



PRA RANCANGAN PABRIK

“PABRIK N-BUTANOL DARI N-BUTIRALDEHID DAN
HIDROGEN DENGAN PROSES HIDROGENASI KAPASITAS
60.000 TON/TAHUN”

BAB II

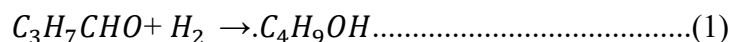
SELEKSI DAN URAIAN PROSES

II.1 Macam-Macam Proses

Terdapat beberapa proses dalam pembentukan n-butanol ($C_4H_{10}O$), diantaranya yakni :

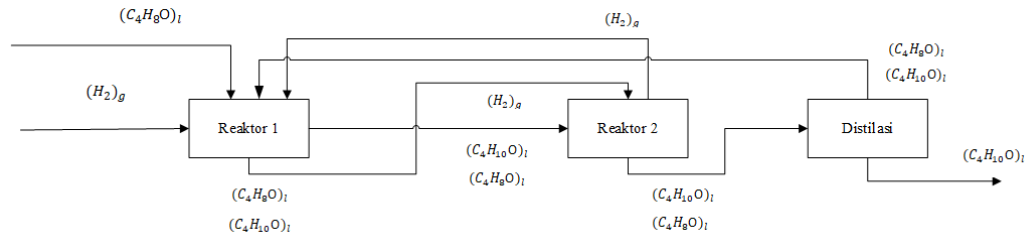
1. Proses hidrogenasi butiraldehid (C_4H_8O)

Proses hidrogenasi n-butiraldehida (C_4H_8O) adalah reaksi penambahan hidrogen (H_2) ke gugus karbonil aldehida untuk mengubahnya menjadi alkohol, sehingga n-butiraldehida dikonversi menjadi n-butanol ($C_4H_{10}O$). Pada proses ini, n-butiraldehida dialirkan bersama gas hidrogen ke dalam reaktor berisi katalis logam seperti Cu, Ni, atau Co yang berfungsi mengaktifkan hidrogen dan juga untuk mempercepat reaksi. Reaksi hidrogenasi n-butiraldehid menjadi n-butanol berlangsung di dalam dua reaktor fixed bed yang disusun secara seri. Pada reaktor pertama terjadi reaksi hidrogenasi awal yang mengonversi sebagian besar n-butiraldehid menjadi n-butanol, namun masih menyisakan n-butiraldehid dan hidrogen yang belum bereaksi. Aliran keluaran dari reaktor pertama kemudian langsung dialirkan ke reaktor kedua untuk melanjutkan dan menyempurnakan reaksi hidrogenasi, sehingga sisa n-butiraldehid dapat dikonversi lebih lanjut dan diperoleh n-butanol dengan konversi yang sangat tinggi. Pada reaktor pertama reaksi berlangsung pada suhu sekitar $50-80^{\circ}C$ dan reaktor kedua pada suhu $80-130^{\circ}C$ dengan keduanya pada tekanan 10-50 atm, dan rasio mol hidrogen terhadap bahan baku sekitar 1:1 hingga 18:1 untuk memastikan konversi yang optimal .



Produk keluaran reaktor selanjutnya dialirkan ke unit flash drum untuk memisahkan fase gas dan fase cair. Fase gas yang mengandung gas hidrogen direcycle kembali ke reaktor awal sebagai umpan, sedangkan

fase cair yang mengandung n-butanol dialirkan ke tahap akhir proses dan disimpan sebagai produk n-butanol.

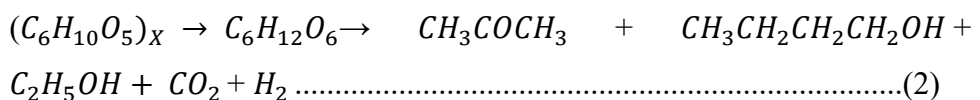


Gambar II.1 Diagram Alir Proses Hidrogenasi Butiraldehid

(Dong, 2015)

2. Proses Fermentasi

Produksi butanol melalui fermentasi dilakukan dengan memanfaatkan bahan baku karbohidrat seperti gula, pati, atau molase yang difermentasi oleh bakteri *Clostridium* dalam kondisi anaerob melalui proses ABE (Acetone–Butanol–Ethanol). Selama tahap awal fermentasi, mikroorganisme menghasilkan asam-asam organik seperti asam asetat dan asam butirat, kemudian seiring perubahan kondisi proses, terutama penurunan pH, reaksi beralih ke fase solventogenesis yang menghasilkan senyawa pelarut berupa butanol sebagai produk utama serta aseton dan etanol sebagai produk samping. Reaksi fermentasi dapat dituliskan sebagai berikut :

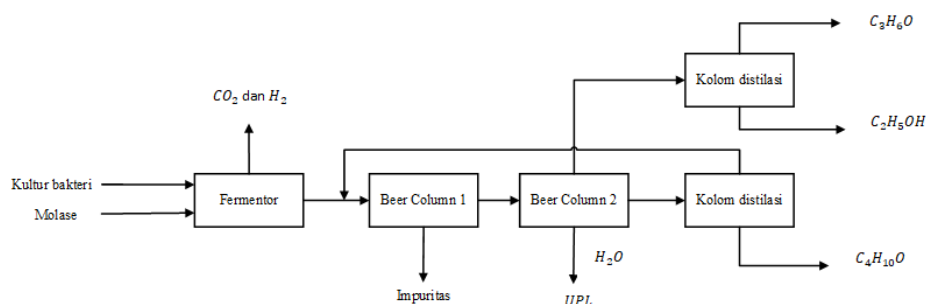


Larutan hasil fermentasi memiliki kadar butanol yang relatif rendah karena sifat butanol ($C_4H_{10}O$) yang bersifat toksik terhadap mikroorganisme, sehingga diperlukan proses pemurnian lanjutan berupa distilasi bertingkat untuk memisahkan butanol ($C_4H_{10}O$) dari air dan komponen lainnya. Fermentasi ABE umumnya hanya mampu menghasilkan 10–15 g/L butanol sebelum proses terhenti akibat inhibisi produk.



PRA RANCANGAN PABRIK

“PABRIK N-BUTANOL DARI N-BUTIRALDEHID DAN HIDROGEN DENGAN PROSES HIDROGENASI KAPASITAS 60.000 TON/TAHUN”

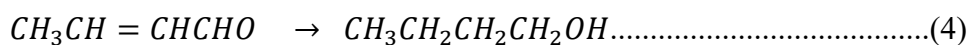
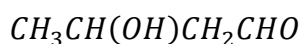
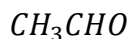


Gambar II.2 Diagram Alir Proses Fermentasi

(Shang-tiang, 2008)

3. Proses Aldol

Proses kondensasi aldol dalam pembuatan n-butanol merupakan salah satu jalur sintesis kimiawi yang memanfaatkan reaksi antara dua molekul asetaldehida untuk membentuk senyawa karbon empat (C₄). Mekanisme proses produksi n-butanol berbasis kondensasi aldol dimulai dari dehidrogenasi etanol menjadi asetaldehida oleh katalis logam (seperti nikel (Ni) atau tembaga (Cu)). Asetaldehida yang terbentuk kemudian mengalami reaksi aldol yaitu kondensasi dua molekul asetaldehida menghasilkan crotonaldehida dan air. Tahap berikutnya adalah hidrogenasi crotonaldehida menjadi n-butanol menggunakan hidrogen yang telah dilepaskan pada tahap pertama, sehingga proses ini disebut juga borrowing hydrogen sehingga terbentuk n-butanol. Reaksi pada proses aldol dapat dituliskan sebagai berikut



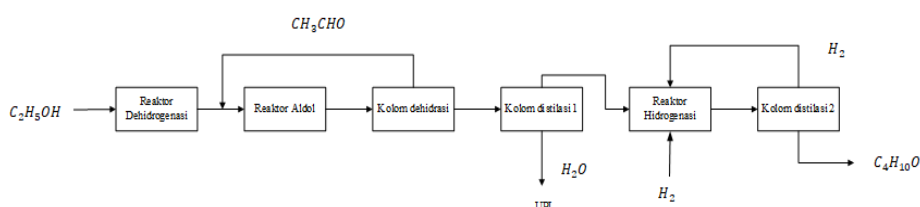
Keluaran reaktor hidrogenasi berupa campuran n-butanol dan sisa gas hidrogen dialirkan ke kolom butanol untuk dilakukan pemisahan secara distilasi. Pada kolom ini, komponen bertitik didih rendah yang didominasi



PRA RANCANGAN PABRIK

“PABRIK N-BUTANOL DARI N-BUTIRALDEHID DAN HIDROGEN DENGAN PROSES HIDROGENASI KAPASITAS 60.000 TON/TAHUN”

oleh gas hidrogen akan terpisah dan keluar melalui bagian atas kolom. Aliran gas hidrogen tersebut selanjutnya direcycle kembali ke reaktor hidrogenasi untuk meningkatkan efisiensi pemakaian hidrogen. Sementara itu, komponen bertitik didih tinggi akan terkonsentrasi di bagian bawah kolom, menghasilkan produk cair berupa n-butanol



Gambar I.4 Diagram Alir Proses Kondensasi Aldol

(Jones, 2018)

II.2 Pemilihan Proses

Berdasarkan Proses yang dilakukan terhadap proses pembentukan n-Butanol, dapat dibuat perbandingan sebagai berikut :

Tabel II.1. Perbandingan Proses Pembentukan N-Butanol

Parameter	Jenis Proses		
	Kondensasi Aldol	Hidrogenasi Butiraldehid	Fermentasi
Bahan baku	Asetaldehid	Hidrogen, butiraldehid	Glukosa /Fruktoksa / Galaktosa
Sumber bahan baku	Luar negeri	Dalam negeri dan luar negeri	Dalam negeri dan luar negri
Katalis	<i>Hydroxyapatite</i> (HAP)	Cu, Ni, atau Co	<i>Clostridium Acetobutylicum</i>
Suhu, °C	200-450	50-130	33-37
Tekanan, atm	3-7	10-50	1
Konversi, %	-	80-99,5	6-60
Selektivitas, %	68,8	99-99,7	-
Kemurnian, %	94	99,99	6-15



PRA RANCANGAN PABRIK

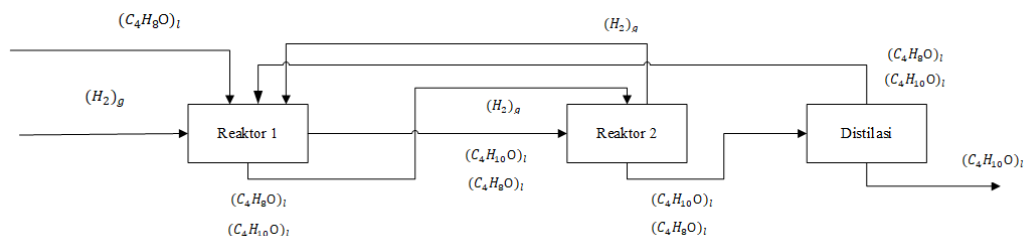
“PABRIK N-BUTANOL DARI N-BUTIRALDEHID DAN HIDROGEN DENGAN PROSES HIDROGENASI KAPASITAS 60.000 TON/TAHUN”

Berdasarkan perbandingan proses pembuatan n-butanol yang ditunjukkan pada Tabel 1.3. Proses hidrogenasi dipilih untuk pra-rancangan pabrik ini karena :

1. Proses pembuatan n-butanol tidak sulit dan lebih mudah dibandingkan dengan proses lain
2. Bahan baku dan bahan pendukung lebih mudah diperoleh, serta
3. Konversi dapat mencapai 99,5%

II.3 Uraian Proses

Berikut ini merupakan Blok Diagram Para Rencana Pabrik Proses produksi n-butanol dari n-butiraldehid (C_4H_8O) dan hidrogen dengan proses Hidrogenasi.



Gambar II.1 Blok Diagram Kualitatif Pra Rancangan Pabrik N-butanol dengan Proses Hidrogenasi

Proses pembuatan N-butanol dengan proses hidrogenasi dibagi menjadi tiga tahapan proses, antara lain :

1. Tahap Persiapan Bahan Baku

Tahap ini bertujuan untuk menyiapkan bahan baku berupa n-butiraldehid serta hidrogen agar memenuhi kondisi operasi reaktor, yaitu suhu $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan tekanan 15 atm. Bahan baku n-butiraldehid (100%) dalam fase cair disimpan pada suhu $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan tekanan 1 atm dalam tangki penyimpanan (F-110). Selanjutnya, n-butiraldehid dialirkan menggunakan pompa (P-111) untuk menaikkan tekanannya menjadi 15 atm. Selanjutnya, campuran Butiraldehid dialirkan ke Heater (E-112) untuk menaikkan suhunya menjadi $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ sesuai dengan kondisi operasi reaktor 1 (R-210). Selanjutnya n-butiraldehid dialirkan menuju reaktor 1 (R-210) bersamaan



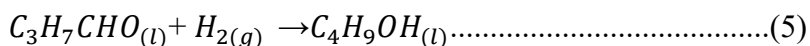
PRA RANCANGAN PABRIK

“PABRIK N-BUTANOL DARI N-BUTIRALDEHID DAN HIDROGEN DENGAN PROSES HIDROGENASI KAPASITAS 60.000 TON/TAHUN”

dengan aliran recycle dari menara disilasi (D-310). Sementara itu, hidrogen murni (100%) dalam fase gas disuplai langsung oleh PT Air liquida melalui sistem perpipaan pada suhu 30 °C dan tekanan 3 atm. Gas ini kemudian dikompresi menggunakan kompresor (G-121) hingga mencapai tekanan 15 atm. Setelah itu, gas hidrogen dinaikkan suhunya menggunakan Heater (E-122) hingga suhu 60 °C. Sebelum dialirkan ke reaktor 1 (R-210) aliran hidrogen dicampur dengan aliran recycle yang berasal dari hasil keluaran reaktor 2 (R-220) yang sudah dinaikkan tekanan dan diturunkan suhunya hingga sesuai dengan kondisi operator reaktor yakni tekanan 15 atm dan suhu 60 °C.

2. Tahap Pembentukan Produk

Pada tahap ini, pembentukan n-butanol berlangsung dalam 2 reaktor, kedua reaktor tersebut terhubung secara seri, yang dimana pada reaktor 1(R-210) memiliki saluran keluar yang langsung terhubung dengan saluran masuk pada reaktor 2 (R-220). Pada reaktor 1 (R-210) merupakan tahap reaksi hidrogenasi awal, dan pada reaktor 2 (R-220) merupakan lanjutan reaksi dari reaktor 1(R-210) untuk menyempurnakan reaksi agar produk butanol yang didapat memiliki konversi tinggi. Reaktor yang digunakan merupakan reaktor packed bed. Pada reaktor 1 (R-210) dioperasikan pada suhu 60 °C dan tekanan 15 atm, menggunakan katalis nikel. Rasio molar antara hidrogen dan n-butiraldehid yang digunakan adalah 3:1. Reaksi yang terjadi dapat dituliskan sebagai berikut :



Produk yang keluar dari reaktor 1 (R-210) berupa n-butanol, n-Butiraldehid sisa yang belum bereaksi dan sisa hidrogen dalam fase gas yang tidak bereaksi, Proses ini menghasilkan konversi reaktan sebesar 90%, selanjutnya keluaran dari bagian bawah reaktor 1 (R-210) yang berupa n-butanol, n-Butiraldehid sisa yang belum bereaksi dalam fase cair dialirkan menuju heater (E-212) untuk dinaikkan suhunya menjadi 90 °C sesuai dengan kondisi operasi pada reaktor 2(R-220) yakni pada suhu



PRA RANCANGAN PABRIK

“PABRIK N-BUTANOL DARI N-BUTIRALDEHID DAN HIDROGEN DENGAN PROSES HIDROGENASI KAPASITAS 60.000 TON/TAHUN”

90 °C dan tekanan 14 atm, serta pada keluaran bagian samping reaktor 1 (R-210) berupa gas hidrogen juga dialirkan menuju heater (E-212) untuk dinaikkan suhunya menjadi 90 °C sesuai dengan kondisi operasi pada reaktor 2(R-220). selanjutnya kedua keluaran tersebut dibawa menuju reaktor 2 (R-220) untuk menyempurnakan reaksinya, dengan mereaksikan kembali n-butiraldehid sisa yang belum bereaksi dengan gas hidrogen untuk membentuk n-butanol. Pada reaktor 2 (R-220) dioperasikan pada suhu 90 °C dengan tekanan 14 atm, sehingga diperoleh konversi reaktan total sebesar 98%.Selanjutnya, keluaran gas hydrogen pada reaktor 2 akan direcycle menuju reaktor 1 dengan menaikkan tekanannya dengan kompressor 2 (G-222) dan diturunkan suhunya dengan menggunakan cooler 2 (E-222) sehingga sesuai kondisi operasi reaktor 1 (R-210) yakni suhu 60 °C dengan tekanan 15 atm.

3. Tahap Pemurnian

Produk keluaran dari reaktor 2 (R-220) berupa N-Butanol, n-Butiraldehid sisa serta hidrogen sisa dalam fase gas. Gas hidrogen keluar dari bagian samping reaktor kemudian direcycle kembali ke reaktor 1 (R-210) untuk digunakan kembali pada reaksi selanjutnya. Sedangkan untuk Produk n-butanol dan n-butiraldehid sisa yang keluar melalui bagian bawah reaktor dialirkan menuju distilasi untuk memisahkan n-butanol dari n-butiraldehid. namun, sebelum masuk tahap distilasi perlu diturunkan terlebih dahulu tekanannya dengan menggunakan Pressure Reducing Valve (G-222) sehingga menjadi tekanan 1 atm, setelah itu diturunkan suhunya dengan menggunakan cooler (E-223) dari suhu 90 °C menjadi suhu 78,9 °C sesuai kondisi operasi menara distilasi (D-310) yakni pada tekanan 1 atm dan suhu 78,9 °C. Pada tahap distilasi (D-310) n-butiraldehid yang lebih volatil dapat dipisahkan sebagai produk atas kolom distilasi dengan suhu 78 °C dan dikondensasikan dengan menggunakan kondensor (E-311) sehingga suhunya menjadi 75,12 °C, hasil kondensasi sebagian untuk direcycle pada reaktor 1 (R-210) dan sebagian lagi direfluks menuju ke distilasi kembali. Produk bawah distilasi berupa n-butanol dengan



PRA RANCANGAN PABRIK

“PABRIK N-BUTANOL DARI N-BUTIRALDEHID DAN HIDROGEN DENGAN PROSES HIDROGENASI KAPASITAS 60.000 TON/TAHUN”

kemurnian 99,9% pada kondisi suhu 117,9 °C yang selanjutnya dialirkan ke reboiler dan suhunya naik menjadi 119,4 °C dan dialirkan ke unit penyimpanan produk (F-320) pada kondisi suhu 30 °C dan tekanan 1 atm.

Perhitungan Ekonomi Potensial :

Komposisi Bahan Baku

Komposisi N-Butiraldehyde (C_4H_8O) dari Hebei Yanxi Chemical Co., Ltd di Cina

Komponen	%Berat
C_4H_8O	99.9
H_2O	0.1

Komposisi Gas Hidrogen (H_2) dari PT Air Liquide

Komponen	% Berat
H_2	100

Data Berat Molekul

Komponen	BM (g/mol)
C_4H_8O	72,1100
H_2	2,0160
$C_4H_{10}O$	74,1260
H_2O	18

Basis = 1000 kg/jam C_4H_8O

Rasio Mol = $C_4H_8O : H_2$

= 1 : 3

Feed dari Butiraldehida

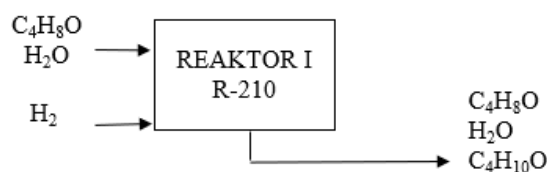
Komponen	%Berat	Berat(kg/jam)	Berat (kmol/jam)
C_4H_8O	99.9	999	13,8538
H_2O	0.1	1	0.0556



PRA RANCANGAN PABRIK

“PABRIK N-BUTANOL DARI N-BUTIRALDEHID DAN
HIDROGEN DENGAN PROSES HIDROGENASI KAPASITAS
60.000 TON/TAHUN”

Reaktor-1



Stoikiometri	$C_4H_8O_{(l)}$ (Butiraldehida)	+	$H_{2(g)}$ (Hidrogen)	$\xrightarrow{\text{Catalyst Ni}}$	$C_4H_{10}O_{(l)}$ (Butanol)
M	13.8538		41.56		-
R	12.47		12.4685		12.5
S	1.39		29.0931		12.5

Konversi Reaksi = 90 %

C_4H_8O Bereaksi = 13.8538 kmol/jam x 90
 = 12.46845098 kmol/jam
 = 899.1 kg/jam

C_4H_8O Sisa = 13.8538 - 12.4684
 = 1.385 kmol/jam
 = 99.9 kg/jam

H_2 Bereaksi = 12.468 kmol/jam
 = 25.13 kg/jam

H_2 Masuk Reaktor = 12.47 : 90 x 3 x 100
 = 41.56150326 kmol/jam
 = 83.78799057 kg/jam

H_2 Keluar Reaktor = 83.788 - 25.13639 kg/jam
 = 58.6515934 kg/jam
 = 29.09305228 kmol/jam

$C_4H_{10}O$ Terbentuk = 12.46845098 kmol/jam
 = 924.2363972 kg/jam

Kebutuhan katalis Ni Reaktor 1 :

Massa katalis = 3750 Kg



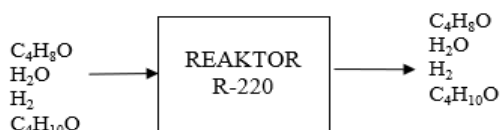
PRA RANCANGAN PABRIK

“PABRIK N-BUTANOL DARI N-BUTIRALDEHID DAN HIDROGEN DENGAN PROSES HIDROGENASI KAPASITAS 60.000 TON/TAHUN”

Neraca Massa Reaktor

REAKTOR (R-210)			
Komponen Masuk (kg/jam)		Komponen Keluar (kg/jam)	
Bahan Baku dari F-110		Produk ke H-310	
C ₄ H ₈ O	999.000	C ₄ H ₈ O	99.900
H ₂ O	1.000	H ₂ O	1.000
Total	1000.00	H ₂	58.652
		C ₄ H ₁₀ O	924.236
Bahan Baku dari F-120			
H ₂	83.788		
Total	83.788		
TOTAL	1083.7880	TOTAL	1083.7880

Reaktor-2



Stoikiometri	C ₄ H ₈ O _(l)	+	H _{2(g)}	$\xrightarrow{\text{Catalyst Ni}}$	C ₄ H ₁₀ O _(l)
	(Butiraldehida)		(Hidrogen)		(Butanol)
M	1.3854		29.09		-
R	1.108		1.1083		1.1083
S	0.3		27.9847		1.1083

Konversi Reaksi		80	%	
C ₄ H ₈ O Bereaksi	=	1.385	kmol/jam	x 80
	=	1.1083	kmol/jam	
	=	80	kg/jam	
C ₄ H ₈ O Sisa	=	1.385	- 1.108	
	=	0.277	kmol/jam	
	=	19.98	kg/jam	
H ₂ Bereaksi	=	1.108	kmol/jam	
	=	2.234	kg/jam	
H ₂ Masuk Reaktor	=	29.09	kmol/jam	
	=	58.65	kg/jam	
H ₂ Keluar Reaktor	=	58.65	- 2.2343	
	=	56.42	kg/jam	
	=	27.98	kmol/jam	
C ₄ H ₁₀ O Terbentuk	=	1.108	kmol/jam	
	=	82.15	kg/jam	



PRA RANCANGAN PABRIK

“PABRIK N-BUTANOL DARI N-BUTIRALDEHID DAN HIDROGEN DENGAN PROSES HIDROGENASI KAPASITAS 60.000 TON/TAHUN”

Neraca Massa Reaktor

REAKTOR (R-220)			
Komponen Masuk (kg/jam)		Komponen Keluar (kg/jam)	
Bahan Baku dari F-110		Produk ke H-310	
C ₄ H ₈ O	99.9000	C ₄ H ₈ O	19.9800
H ₂ O	1.0000	H ₂ O	1.0000
H ₂	58.6516	H ₂	56.417
C ₄ H ₁₀ O	924.2364	C ₄ H ₁₀ O	1006.391
TOTAL	1083.7880	TOTAL	1083.7880

Kebutuhan katalis Ni Reaktor-2 :

Massa katalis = 2081 kg

Total Kebutuhan katalis = 3750 + 2081 (kg)
= 5830.40 kg

Komponen	Massa (kg)	Harga/kg		Harga Total
C ₄ H ₁₀ O	1,006.39	Rp	86,400.00	84436183.39
C ₄ H ₈ O	999.00	Rp	26,000.00	25974000
H ₂	83.79	Rp	35,000.00	2932579.67
Katalis Ni	5,830.40	Rp	65,500.00	1,157,246.28

Harga Bahan	Rp	30,063,825.9
Harga Produk	Rp	86,952,160.2
Keuntungan	Rp	56,888,334.3

Rasio bahan baku dengan produk yakni :

Bahan baku : 1

Produk : 3