

BAB IV

UNIT PENDUKUNG PROSES

4.1 Unit Pengadaan dan Pengolahan Air

4.1.1 Unit Pengolahan Air

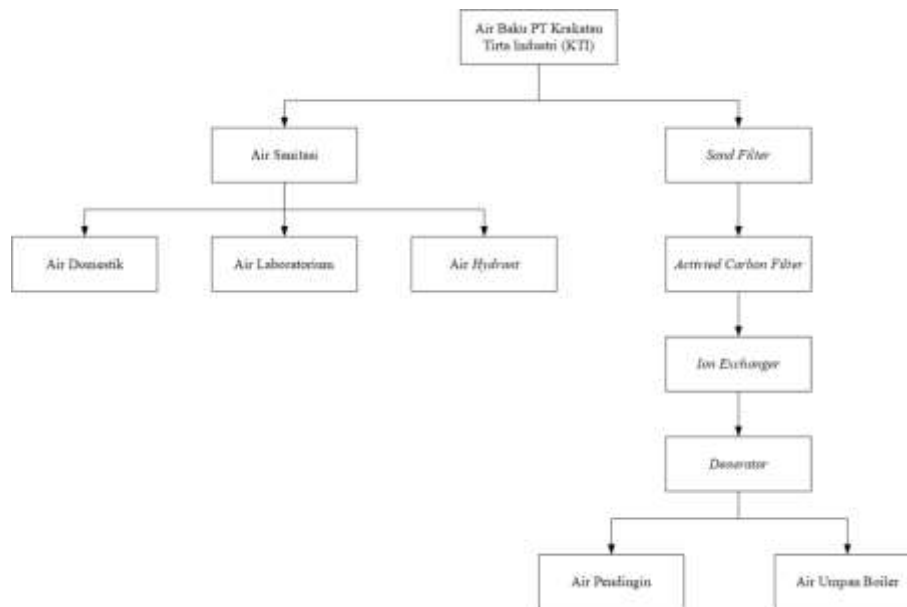
Terdapat dua pendekatan umum dalam pemenuhan kebutuhan air industri, yaitu dengan membangun instalasi pengolahan air (*Water Treatment Plant/WTP*) secara mandiri atau dengan memanfaatkan pasokan air dari penyedia jasa air industri yang telah beroperasi di kawasan tersebut. Pembangunan WTP mandiri, khususnya untuk kapasitas skala industri, memerlukan investasi yang besar baik dari segi lahan maupun modal, mengingat unit ini mencakup rangkaian proses intake, koagulasi-flokulasi, sedimentasi, filtrasi, hingga demineralisasi yang membutuhkan area yang cukup luas serta biaya konstruksi dan peralatan yang tidak sedikit.

Pabrik epiklorohidrin direncanakan didirikan di Kawasan Industri Cilegon, Provinsi Banten, yaitu kawasan yang telah memiliki infrastruktur penyediaan air industri yang mapan melalui PT Krakatau Tirta Industri (KTI). PT KTI merupakan anak perusahaan PT Krakatau Steel (Persero) Tbk. yang telah beroperasi sejak tahun 1996 dan berpengalaman dalam penyediaan air bersih maupun air demin bagi berbagai industri di kawasan Cilegon, termasuk PT Krakatau Steel, PT Chandra Asri Petrochemical, PT Asahimas Chemical, dan PT Krakatau Posco, dengan total kapasitas produksi air bersih mencapai lebih dari 2.000 liter/detik yang bersumber dari Sungai Cidanau, Sungai Cipasauran, serta Waduk Nadra Krenceng sebagai cadangan air baku.

Tabel 4.1 Spesifikasi Air Baku PT Krakatau Tirta Industri

Parameter	Satuan	Nilai
pH	-	7,0 – 8,0
<i>Turbidity</i>	NTU	< 5
<i>Hardness</i>	ppm sebagai CaCO ₃	< 2
TDS	ppm	< 300
TSS	ppm	< 300
Sulfat	ppm	< 200
Silika	ppm	< 49
COD	ppm	< 150
Kalsium	ppm	< 50

Pemilihan skema ini didasarkan pada beberapa pertimbangan. Dari sisi keekonomian, pengadaan air melalui pihak ketiga menghindarkan pabrik dari beban investasi awal (*capital expenditure*) yang besar untuk lahan dan konstruksi unit pengolahan air baku, sehingga modal dapat dialokasikan secara lebih optimal untuk unit proses utama. Sedangkan, dari sisi keandalan operasi, pasokan air dari penyedia yang telah memiliki fasilitas produksi, jaringan distribusi, serta sistem cadangan yang matang cenderung lebih stabil dibandingkan sistem pengolahan air yang dibangun dan dioperasikan secara mandiri, sehingga risiko gangguan pasokan maupun permasalahan teknis pada unit pengolahan internal dapat diminimalkan.



Gambar 4.1 Diagram Alir Pengolahan Air

Meskipun kebutuhan air baku dipenuhi dari pasokan KTI, air yang diterima masih memerlukan tahap pengolahan lanjutan (*polishing treatment*) di dalam pabrik agar memenuhi spesifikasi kualitas yang dipersyaratkan oleh masing-masing unit pemakai, khususnya untuk air umpan boiler yang menuntut kemurnian tinggi. Unit pengolahan tambahan yang diperlukan sebagai berikut.

1. Sand Filter

Penyaringan menggunakan *sand filter* berfungsi menghilangkan *suspended solids*, lumpur, pasir halus, serta partikel-partikel berukuran relatif besar yang masih terbawa dari air baku KTI. Media penyaring umumnya terdiri atas beberapa lapisan silika dengan ukuran berbeda sehingga mampu menurunkan nilai kekeruhan (*turbidity*) dan *total suspended*

solids (TSS). Tahap ini penting karena padatan tersuspensi dapat menyebabkan penyumbatan pada resin penukar ion maupun membentuk deposit pada *heat exchanger* dan *cooling tower* apabila tidak dihilangkan terlebih dahulu.

2. *Activated Carbon Filter*

Unit ini berfungsi mengadsorpsi senyawa organik terlarut, warna, bau, serta sisa klorin bebas yang masih terdapat di dalam air. Penghilangan klorin sangat penting karena klorin dapat menyebabkan degradasi resin penukar ion maupun membran apabila digunakan pada sistem demineralisasi modern. Selain itu, kandungan organik yang tinggi dapat meningkatkan *fouling* pada boiler maupun *cooling water system* sehingga perlu dikurangi sebelum memasuki tahap berikutnya.

3. *Ion Exchanger*

Tahap berikutnya berupa *ion exchanger* yang bertujuan menghasilkan air demineralisasi untuk kebutuhan boiler. Unit ini terdiri atas *cation exchanger* dan *anion exchanger*. Pada *cation exchanger*, ion-ion penyebab kesadahan seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , Fe^{2+} dan kation lainnya ditukar dengan ion H^{+} menggunakan resin kation kuat. Selanjutnya air dialirkan menuju *anion exchanger* untuk menghilangkan ion Cl^{-} , SO_4^{2-} , HCO_3^{-} , NO_3^{-} , dan silika menggunakan resin anion kuat yang menukar ion-ion tersebut dengan OH^{-} . Ion H^{+} dan OH^{-} yang dihasilkan kemudian bergabung membentuk H_2O sehingga diperoleh air dengan kandungan garam terlarut yang sangat rendah.

Air hasil demineralisasi digunakan sebagai *boiler feed water*, sedangkan sebagian air yang hanya memerlukan pengurangan padatan tersuspensi dan zat organik dapat langsung dimanfaatkan sebagai *make-up cooling water* tanpa melalui proses demineralisasi penuh.

4. Deaerator

Air demineralisasi selanjutnya dialirkan menuju deaerator sebelum dipompa ke boiler. Deaerator berfungsi menghilangkan gas-gas terlarut, terutama oksigen (O_2) dan karbon dioksida (CO_2), menggunakan kontak langsung antara air dan *steam*. Oksigen merupakan penyebab utama korosi pitting pada boiler dan jaringan perpipaan, sedangkan CO_2 dapat membentuk asam karbonat yang menyebabkan korosi pada sistem kondensat.

4.1.2 Unit Pengadaan Air

Kebutuhan air akan didistribusikan dan dialokasikan sesuai dengan kebutuhan masing-masing unit pemakai di pabrik. Berdasarkan peruntukannya, kebutuhan air pabrik dijelaskan sebagai berikut.

1. Air Pendingin (*Cooling Water*)

Air pendingin merupakan air yang digunakan sebagai media penyerap panas pada peralatan proses tanpa mengalami kontak langsung dengan bahan baku, produk antara, maupun produk akhir. Secara umum, sistem air pendingin dapat dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu sistem *once-through*, sistem resirkulasi terbuka (*open recirculating system*), dan sistem resirkulasi tertutup (*closed recirculating system*). Pada sistem *once-through*, air hanya digunakan satu kali melewati alat penukar panas sebelum dialirkan menuju unit pengolahan limbah, sehingga tidak memerlukan menara pendingin (*cooling tower*) maupun pompa sirkulasi. Berbeda dengan sistem tersebut, sistem resirkulasi terbuka memanfaatkan *cooling tower* untuk mendinginkan air pendingin sebelum digunakan kembali. Selama proses pendinginan, sebagian air mengalami penguapan sehingga timbul kebutuhan air pengganti (*make-up water*) untuk mengompensasi kehilangan air akibat penguapan, *drift*, maupun *blowdown*. Adapun pada sistem resirkulasi tertutup, air bersirkulasi dalam sistem tertutup tanpa kontak dengan atmosfer sehingga kehilangan air akibat penguapan relatif kecil.

Air pendingin dioperasikan menggunakan sistem sirkulasi terbuka dengan *cooling tower* mengingat kebutuhan air pendingin bersumber dari beberapa titik pemakaian yang tersebar pada unit proses sehingga lebih ekonomis untuk disirkulasikan kembali dibandingkan dibuang setelah satu kali pemakaian. Beberapa parameter penting yang perlu diperhatikan dalam pengolahan air pendingin meliputi.

- a. Konduktivitas (menunjukkan jumlah mineral terlarut dalam air)
- b. pH (menunjukkan tingkat keasaman atau kebasaan air)
- c. Alkalinitas (berupa ion karbonat dan bikarbonat)
- d. *Hardness* atau kesadahan (menunjukkan kandungan ion kalsium dan magnesium dalam air)

Syarat kualitas air pendingin yang digunakan dalam perancangan ini mengacu pada ASME Water Quality Standard (1994), sebagaimana disajikan pada Tabel 4.2 sebagai berikut.

Tabel 4.2 Syarat Kualitas Air Pendingin

No.	Parameter	Satuan	Batas
1.	pH	-	6,5 – 8,2
2.	Konduktivitas Elektrik	mS/m	< 80
3.	Klorin	mg/L	< 200
4.	Alkalinitas	mg/L	< 100
5.	Total <i>Hardness</i>	mg/L	< 200
6.	Silika	mg/L	< 150
7.	Ca ²⁺	mg/L	< 40

Kebutuhan air pendingin pada proses utama di pabrik epiklorohidrin disajikan pada Tabel 4.3 sebagai berikut.

Tabel 4.3 Kebutuhan Air Pendingin

Nama Alat	Kode Alat	Kebutuhan (kg/jam)
Cooler	COL-01	99,521
Cooler	COL-02	213,294
Cooler	COL-03	80,976
Intercooler	INT-01	1759,760
Intercooler	INT-02	1206,226
Kondenser	D-01	590,634
Kondenser	D-02	4512,990
Kondenser	RD-01	232,994
Reaktor	R-01 - R-04	220544,227
TOTAL		229240,624

$$\begin{aligned}
\text{Kebutuhan air pendingin} &= 229240,624 \text{ kg/jam} \\
&= 229,241 \text{ m}^3/\text{jam} \\
&= 5501,775 \text{ m}^3/\text{hari}
\end{aligned}$$

Diperkirakan air hilang sebesar 10%

$$\begin{aligned}
\text{Kebutuhan air make-up} &= 550,177 \text{ m}^3/\text{hari} \\
\text{Total kebutuhan air pendingin} &= 779,418 \text{ m}^3/\text{hari}
\end{aligned}$$

2. Air Umpan Boiler (*Boiler Feed Water/BFW*)

Boiler feed water merupakan air umpan yang digunakan untuk menghasilkan steam sebagai media pemanas pada unit-unit proses. Pada pra-rancangan pabrik epiklorohidrin ini, steam yang dihasilkan boiler dimanfaatkan sebagai media pemanas pada unit *heat exchanger* serta reboiler pada kolom-kolom distilasi. Berdasarkan kondisi operasi pada unit-unit tersebut, steam dialirkan masuk pada suhu 150 – 160 °C, yang setara dengan tekanan jenuh (*saturated*) berkisar 4,7 – 6,2 bar, sehingga steam yang digunakan tergolong sebagai *saturated low pressure (LP) steam*. Steam bertekanan rendah dipilih karena kebutuhan panas pada unit-unit tersebut relatif tidak terlalu tinggi, sehingga penggunaan LP steam sudah cukup memadai dan lebih ekonomis dibandingkan *medium* atau *high pressure steam* yang umumnya digunakan untuk kebutuhan tekanan dan suhu proses yang jauh lebih tinggi, seperti pada unit *reforming* maupun pembangkit tenaga.

Dalam pengoperasiannya, air umpan boiler mengalami siklus tertutup berupa sirkulasi uap-kondensat (*steam-condensate cycle*). Air umpan yang telah memenuhi syarat kualitas dipanaskan di dalam boiler hingga membentuk steam, yang kemudian dialirkan menuju *heat exchanger* dan *reboiler* untuk melepaskan panas laten kepada aliran proses. Setelah melepaskan panasnya, steam terkondensasi menjadi kondensat dan sebagian besar dikembalikan (*direct cycle*) menuju boiler sebagai umpan, sehingga kebutuhan air segar dapat ditekan. Meskipun demikian, selama siklus berlangsung selalu terjadi kehilangan air akibat *steam trap* (kebocoran uap pada perangkat kondensat) dan *blowdown* boiler (pembuangan sebagian air boiler secara berkala untuk mengendalikan konsentrasi padatan terlarut), sehingga air umpan perlu digantikan (*make-up*) secara berkelanjutan agar volume sistem tetap terjaga.

Kebutuhan air umpan boiler didasarkan pada perhitungan steam setiap alat. Berdasarkan hasil perhitungan, kebutuhan air umpan boiler yang dibutuhkan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \text{Kebutuhan air untuk steam} &= 3429,012 \text{ kg/jam} \\
 &= 3,429 \text{ m}^3/\text{jam} \\
 &= 82,296 \text{ m}^3/\text{hari}
 \end{aligned}$$

Asumsi kehilangan air dalam sistem (*blowdown*, kebocoran, dll) sebesar 10%

$$\begin{aligned}
 \text{Make-up water} &= 10\% \times \text{total debit harian} \\
 &= 8,230 \text{ m}^3/\text{hari}
 \end{aligned}$$

$$\text{Total kebutuhan umpan boiler} = 90,526 \text{ m}^3/\text{hari}$$

$$\begin{aligned}
 \text{BFW start-up} &= \text{Debit total} \times 110\% \\
 &= 99,579 \text{ m}^3/\text{hari}
 \end{aligned}$$

Asumsi trap loss sebesar 10% dan trap loss sebesar 2%

$$\begin{aligned}
 \text{BFW operasi normal} &= \text{steam trap} + \text{blowdown} \\
 &= 10,863 \text{ m}^3/\text{hari}
 \end{aligned}$$

Kualitas air umpan boiler harus dijaga secara ketat agar sistem boiler dapat beroperasi secara aman dan efisien. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pengoperasian air umpan boiler antara lain.

- Zat penyebab korosi yang bersumber dari gas-gas terlarut seperti O_2 , CO_2 , dan H_2S , sehingga air umpan perlu melalui proses deaerasi untuk menghilangkan oksigen terlarut sebelum masuk ke boiler.
- Zat pembentuk kerak (*scale forming*), berupa garam-garam karbonat dan silikat akibat kesadahan air dan suhu operasi yang tinggi, yang dapat menurunkan efisiensi perpindahan panas serta menyumbat perpipaan berdiameter kecil.
- Zat penyebab *foaming* yang umumnya disebabkan oleh keberadaan zat organik, zat anorganik, maupun alkalinitas air yang tinggi.

Syarat kualitas air umpan boiler yang digunakan dalam perancangan ini mengacu pada *Boiler Feed Water Characteristics as per IS:10392-1982*, sebagaimana disajikan pada Tabel 4.4 sebagai berikut.

Tabel 4.4 Syarat Kualitas Air Umpan Boiler

No.	Parameter	Satuan	Batas
1.	Total <i>Hardness</i>	Ppm as CaO	< 0,5
2.	pH	-	8,9 – 9,5
3.	<i>Dissolved Oxygen</i> (DO)	Ppm	0,01
4.	Silika	Ppm as SiO ₂	0,5

3. Air Sanitasi

Air sanitasi digunakan untuk memenuhi kebutuhan *higiene* perorangan dan rumah tangga di lingkungan pabrik, seperti keperluan MCK karyawan, kegiatan laboratorium, serta cadangan air pemadam kebakaran. Berbeda dengan air pendingin dan air umpan boiler yang masih memerlukan pengolahan lanjutan (*polishing treatment*) sebelum digunakan, air sanitasi dapat langsung dimanfaatkan dari pasokan PT Krakatau Tirta Industri (KTI) tanpa memerlukan unit pengolahan tambahan, karena air bersih yang didistribusikan KTI telah melalui rangkaian proses koagulasi, flokulasi, sedimentasi, filtrasi, dan disinfeksi sehingga kualitasnya telah memenuhi baku mutu air untuk keperluan *higiene* sanitasi sebagaimana dipersyaratkan dalam Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023 tentang Kesehatan Lingkungan.

Tabel 4.5 Baku Mutu Air untuk Keperluan Sanitasi

No.	Parameter	Satuan	Batas
1.	Bau	-	Tidak berbau
2.	<i>Total Dissolved Solid</i> (TDS)	mg/L	≤ 1000
3.	Kekeruhan	NTU	≤ 25
4.	Warna	TCU	≤ 50
5.	pH	-	6,5 – 8,5
6.	Suhu	°C	Suhu udara ± 3 °C
7.	<i>Escherichia coli</i> (<i>E.coli</i>)	CFU/100 mL	0
8.	Total <i>Coliform</i>	CFU/100 mL	50

Sumber: Permenkes Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan

Kebutuhan air sanitasi pada pabrik ini terbagi menjadi tiga peruntukan, yaitu kebutuhan domestik, laboratorium, dan pemadam kebakaran (*hydrant*), sebagaimana diuraikan berikut.

a. Air Domestik

Air domestik berfungsi untuk memenuhi kebutuhan *higiene* perorangan karyawan, seperti MCK, air minum, dan kebutuhan kebersihan area perkantoran maupun pabrik. Diatur dalam Peraturan Menteri Kesehatan (Permenkes) No. 70 Tahun 2016 tentang Standar dan Persyaratan Kesehatan Lingkungan Kerja Industri. Dengan jumlah karyawan 121 orang, kebutuhan air domestiknya sebagai berikut.

Kebutuhan air karyawan	=	50 L/orang.hari
Jumlah karyawan	=	121 orang
Kebutuhan air karyawan	=	6050 L/hari
	=	6,05 m ³ /hari

b. Air Laboratorium

Kebutuhan air untuk laboratorium dan taman ditetapkan sebesar 20% dari kebutuhan air karyawan, sehingga perhitungannya adalah sebagai berikut.

Air laboratorium	=	1210 L/hari
	=	1,21 m ³ /hari

c. Air Pemadam Kebakaran (*Hydrant*)

Air pemadam kebakaran berfungsi sebagai cadangan air untuk sistem proteksi kebakaran pabrik, yang terdiri atas *hydrant box* (indoor) dan *hydrant pillar* (outdoor). Kebutuhan air *hydrant box* dihitung berdasarkan debit 400 L/menit selama waktu operasi 30 menit, sedangkan *hydrant pillar* dihitung berdasarkan debit 1.200 L/menit selama waktu operasi 45 menit. Maka kebutuhan air *hydrant* sebagai berikut.

Kebutuhan <i>hydrant box</i>	=	2 buah
Kebutuhan <i>hydrant</i> pilar	=	3 buah

$$\begin{aligned} \text{Total kebutuhan air } hydrant &= (Q \times T \times n \text{ } hydrant \text{ box}) + (Q \times T \times n \text{ } hydrant \text{ pilar}) \\ &= 186 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

4.2 Unit Pengadaan Listrik

Tenaga listrik merupakan salah satu kebutuhan utilitas yang sangat vital bagi kelangsungan operasi pabrik, baik untuk menggerakkan peralatan proses, unit utilitas, sistem penerangan, maupun sistem pendinginan udara pada bangunan penunjang. Mengingat pabrik ini direncanakan berlokasi di Kawasan Industri Krakatau, Cilegon, pengadaan tenaga listrik dilakukan melalui dua sumber utama, yaitu jaringan PT Perusahaan Listrik Negara (PLN) dan pembangkit listrik milik kawasan industri, yakni PT Krakatau Daya Listrik (KDL). PT KDL merupakan salah satu anak perusahaan dalam *subholding* PT Krakatau Sarana Infrastruktur yang bergerak khusus di bidang penyediaan energi listrik bagi industri, bisnis, dan permukiman di Kawasan Industri Krakatau. Perusahaan ini mengoperasikan Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (*Combined Cycle Power Plant/CCPP*) berkapasitas 120 MW yang saling terinterkoneksi dengan jaringan PLN berkapasitas 2×400 MVA, sehingga mampu memasok kebutuhan listrik pelanggan industri secara andal dan berkelanjutan.

Pemanfaatan pasokan listrik dari PLN dan PT KDL secara bersamaan memberikan keuntungan berupa keandalan pasokan yang lebih tinggi, karena kedua sumber dapat saling menopang (*back-up*) apabila salah satu mengalami gangguan, sehingga risiko pemadaman listrik yang dapat menghentikan proses produksi dapat diminimalkan. Meskipun demikian, untuk mengantisipasi kondisi darurat berupa pemadaman listrik total dari kedua sumber tersebut, pabrik tetap dilengkapi dengan generator (*genset*) sebagai cadangan daya. Generator ini berfungsi menjaga kelangsungan operasi peralatan-peralatan kritis, seperti sistem instrumentasi dan pengendalian proses, pompa-pompa vital, serta sistem keselamatan pabrik, pada saat terjadi gangguan pasokan listrik dari jaringan utama.

4.2.1 Kebutuhan Listrik Proses

Kebutuhan listrik pada sektor ini digunakan untuk menggerakkan peralatan-peralatan pada unit proses utama pembentukan epiklorohidrin sebagai berikut.

Tabel 4.6 Kebutuhan Listrik Alat Proses

Nama Alat	HP	Jumlah	Total HP
Kompresor	34,299	1	0,500
SBSTR	20,247	4	80,989
Stirred Tank	0,006	1	0,006

Pompa	0,500	6	3,000
TOTAL			84,495

4.2.2 Kebutuhan Listrik Utilitas

Kebutuhan listrik pada sektor ini digunakan untuk menggerakkan peralatan pada unit-unit penunjang proses sebagai berikut.

Tabel 4.7 Kebutuhan Listrik Alat Utilitas

Nama Alat	HP	Jumlah	Total HP
Unit Pengolahan Air			
Ion Exchanger	0,500	3	1,500
Deaerator	0,500	1	0,500
Unit Pengadaan Steam			
Boiler	20,000	1	20,000
Pompa	3,000	1	3,000
Unit Pengadaan Bahan Bakar dan Udara Tekan			
Control Valve	0,500	1	0,500
Compressor	10,000	1	10,000
Unit Pengolahan Limbah			
Pompa	0,500	1	0,500
Filter Press	3,000	1	3,000
Blower	7,500	1	7,500
Washing Tank	1,000	2	2,000
Rotary Dryer	7,500	1	7,500
Crystallizer	5,000	1	5,000
TOTAL			61,000

4.2.3 Kebutuhan Listrik Penerangan

Perkiraan konsumsi daya listrik untuk sistem penerangan dapat dilakukan melalui pendekatan konsep *Luminous Efficacy*, yang mengacu pada jumlah radiasi cahaya tampak (dalam

satuan lumen) yang dipancarkan oleh lampu. Kebutuhan tingkat pencahayaan per satuan luas area dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$Lumen = Luas Area \times Lux$$

Keterangan:

Luas area = luas daerah yang membutuhkan pencahayaan (m²)

Lux = kebutuhan energi cahaya per satuan luas (lumen/m²)

Tingkat Lux yang diterapkan bersifat dinamis dan bergantung pada fungsi ruang. Pada tahap perencanaan awal ini, acuan tingkat Lux merujuk pada standar Zumtobel Lighting GmbH, The Lighting Handbook, edisi ke-6 (2018), yang mengikuti standar Eropa EN 12464-1 (ruang dalam) dan EN 12464-2 (ruang luar).

Tabel 4.8 Kebutuhan Lumen Penerangan Pabrik

Ruangan/Area	Luas (m²)	Intensitas Penerangan (Lux)	Kebutuhan Cahaya (Lumen)
<u>Indoor</u>			
Control Room	84,684	200	16936,740
Laboratorium	84,684	500	42341,849
Kantor & Gedung			
Serbaguna	484,000	500	242000,000
Mushola	50,000	200	10000,000
Kantin	184,000	200	36800,000
Pos Security	22,865	150	3429,690
Gudang & Packing	484,000	400	193600,000
TOTAL	1394,232		545108,279
<u>Outdoor</u>			
Area Produksi	846,837	300	254051,096
Unit Utilitas	169,367	300	50810,219
Unit Pengolahan			
Limbah	169,367	300	50810,219
Power Plant	84,684	1500	127025,548

Ruangan/Area	Luas (m²)	Intensitas Penerangan (Lux)	Kebutuhan Cahaya (Lumen)
Taman industri	141,700	10	1417,000
Parkiran	354,250	10	3542,500
Jalan	84,684	5	423,418
TOTAL	1850,889		488080,002

Lampu yang direncanakan untuk digunakan dari brand Philips dengan jenis lampu LED 14 Watt (untuk ruangan *indoor*) dan 18 Watt (untuk ruangan *outdoor*), dengan keluaran masing-masing sebesar 1.400 lumen dan 2.000 lumen sehingga dapat dihitung jumlah lampu dan total daya penerangan sebagai berikut.

Jumlah lampu indoor = 390 lampu
 Jumlah lampu outdoor = 245 lampu

Kebutuhan listrik penerangan = n lampu x P
 = 9870 Watt
 = 13,236 HP

4.2.4 Kebutuhan Listrik Pendingin udara

Ruangan yang memerlukan sistem pengkondisian udara meliputi ruang-ruang yang digunakan untuk aktivitas kerja secara terus-menerus serta membutuhkan tingkat kenyamanan termal yang tinggi, seperti ruang perkantoran, poliklinik, *control room*, dan laboratorium.

Perancangan sistem tata udara mengacu pada SNI 03-6572-2001 tentang Tata Cara Perancangan Sistem Ventilasi dan Pengkondisian Udara pada Bangunan Gedung. Berdasarkan standar tersebut, perhitungan beban pendinginan secara rinci mempertimbangkan berbagai sumber beban panas, antara lain penghuni, peralatan, sistem pencahayaan, ventilasi, serta radiasi matahari yang masuk ke dalam bangunan. Namun, pada tahap pra-rancangan, kapasitas pendingin diperkirakan menggunakan metode pendekatan praktis yang umum diterapkan dalam perencanaan sistem *air conditioner* (AC) di Indonesia dengan asumsi tinggi plafon bangunan berkisar antara 2,5 – 3,0 m. Kebutuhan kapasitas pendingin dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$BTU/h = \text{Luas ruangan (m}^2\text{)} \times 500$$

Tabel 4.9 Kebutuhan Listrik Pendingin Udara

Bangunan	Luas (m ²)	BTU/h	PK	Daya (Watt)
Control Room	84,684	42341,849	4,705	3763,720
Laboratorium	84,684	42341,849	4,705	3763,720
Kantor & Gedung Serbaguna	484,000	242000,000	26,889	21511,111
Mushola	50,000	25000,000	2,778	2222,222
Kantin	184,000	92000,000	10,222	8177,778
Pos Security	22,865	11432,299	1,270	1016,204
TOTAL	910,232	455115,998	50,568	40454,755

Selanjutnya, hasil perhitungan dikonversi ke kapasitas AC dengan menggunakan asumsi 1 PK $\approx$ 9.000 BTU/h, sedangkan konsumsi daya listrik AC tipe *non-inverter* berada pada kisaran 700 – 800 W per PK. Estimasi kebutuhan kapasitas AC untuk setiap ruangan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\text{Kebutuhan listrik AC} &= 40454,755 \text{ Watt} \\ &= 54,251 \text{ HP}\end{aligned}$$

4.2.5 Kebutuhan Listrik untuk Generator

Generator listrik cadangan (*emergency generator*) disediakan sebagai sistem pengaman apabila terjadi gangguan pasokan listrik dari sumber utama, mengingat pabrik beroperasi secara kontinu dan kegagalan pasokan listrik dapat mengakibatkan kondisi proses yang tidak aman maupun kerugian produksi. Kapasitas generator ditentukan berdasarkan total kebutuhan listrik pabrik sebesar 212.982 HP atau setara 158.885 kW, dengan mempertimbangkan efisiensi generator sebesar 80%. Kebutuhan daya input generator dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$P_{input} = \frac{P_{total}}{\eta_{generator}}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut, diperoleh kebutuhan input generator sebesar 198.606 kW. Generator yang dipilih merupakan generator AC tiga fasa berbahan bakar *natural gas* dengan spesifikasi sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Kebutuhan Listrik untuk Generator

Parameter	Nilai
Tipe	AC Generator, 3 fasa
Kapasitas	250 kW
Tegangan	220/380 Volt
Frekuensi	50 Hz
Efisiensi	80%
Bahan bakar	Natural gas

Kebutuhan bahan bakar generator dihitung berdasarkan kapasitas panas yang harus disuplai untuk menghasilkan daya listrik tersebut, menggunakan pendekatan efisiensi generator dan nilai kalor bahan bakar (*Higher Heating Value*, HHV), sebagaimana dirumuskan pada persamaan berikut.

$$Q_{fuel} = \frac{P}{\eta} ; m_{fuel} = \frac{Q_{fuel}}{HHV}$$

Hasil perhitungan kebutuhan bahan bakar generator ditampilkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Kebutuhan Bahan Bakar Generator

Parameter	Nilai	Satuan
Q fuel	312.500	kW
Q fuel	1.125.000	kJ/jam
m fuel	21.733	kg/jam
Kebutuhan bahan bakar per hari	521.600	Kg/hari

4.3 Unit Pengadaan Steam

Steam (uap air) merupakan salah satu utilitas pendukung yang sangat penting dalam operasi pabrik kimia, khususnya sebagai media pemanas tidak langsung pada peralatan penukar panas. Panas laten yang dilepaskan pada saat steam mengalami kondensasi dimanfaatkan untuk menaikkan suhu umpan proses maupun menyuplai panas penguapan pada tahap pemisahan,

sehingga ketersediaan dan kontinuitas pasokan steam menjadi faktor penting dalam menjaga kestabilan operasi pabrik secara keseluruhan.

4.3.1 Kebutuhan Steam

Total kebutuhan steam pabrik ditentukan berdasarkan hasil neraca panas pada masing-masing alat penukar panas yang menggunakan steam sebagai media pemanas sebagai berikut.

Tabel 4.12 Kebutuhan Steam Alat Proses

Nama Alat	Kode Alat	Kebutuhan (kg/jam)
Heater	HE-01	147,627
Heater	HE-02	0,075
Heater	HE-03	0,075
Distilasi	D-01	702,706
Distilasi	D-02	2345,535
Distilasi	RD-01	232,994
TOTAL		3429,012

Steam yang dihasilkan oleh boiler pada pabrik ini merupakan *saturated steam* (uap jenuh), karena steam dimanfaatkan melalui mekanisme pelepasan panas laten kondensasi pada alat penukar panas dan reboiler, sehingga tidak diperlukan panas sensibel tambahan sebagaimana pada *superheated steam*. Berdasarkan *steam table* (Smith, Van Ness, & Abbott, 2018), pada kondisi operasi berikut diperoleh data entalpi sebagai berikut.

- Tekanan saturasi (P) = 618,17 kPa
- Suhu saturasi (T) = 160 °C
- Entalpi cairan jenuh (Hf) = 675,53 kJ/kg
- Entalpi uap jenuh (Hg) = 2.758,1 kJ/kg

4.3.2 Perhitungan Kapasitas Boiler

Unit bahan bakar menyediakan natural gas untuk kebutuhan boiler, furnace, dan generator. Pemilihan natural gas didasarkan pada pertimbangan nilai kalor yang tinggi, mudah untuk didapat, serta tidak memerlukan unit penyimpanan karena menggunakan sistem *pipeline*. Kapasitas boiler dihitung untuk menentukan beban panas (*duty*) yang harus disediakan agar air umpan dapat diubah menjadi steam pada kondisi operasi yang telah ditetapkan. Persamaan yang digunakan sebagai berikut (Kern, 1965).

$$Q = m \times (H_g - H_f)$$

$$Q = 3.429,012 \times (2.758,1 - 675,53)$$

$$Q = 7.141.158,295 \text{ kJ/jam}$$

$$Q = 7.533.922,001 \text{ BTU/jam}$$

Kapasitas boiler selanjutnya dinyatakan dalam satuan *Boiler Horse Power* (BHP), yaitu satuan yang menyatakan kemampuan boiler untuk menguapkan 34,5 lb air pada suhu 212 °F (100 °C) menjadi steam pada suhu yang sama dalam waktu satu jam, dengan panas laten penguapan sebesar 970,3 Btu/lb.

$$Hp = \frac{Q}{970,3 \times 34,5}$$

$$Hp = \frac{7.533.922,001}{970,3 \times 34,5}$$

$$Hp = 225,059 \text{ BHP}$$

Berdasarkan standar industri, luas bidang pemanasan (*heating surface*) untuk boiler jenis *water tube* adalah sebesar 5 ft²/BHP (Engineering ToolBox, 2008), sehingga luas bidang pemanasan yang dibutuhkan.

$$A = 5 \times Hp$$

$$A = 5 \times 225,059$$

$$A = 1.125,294 \text{ ft}^2$$

Jenis boiler yang dipilih pada pra-rancangan pabrik ini adalah *water tube boiler*, yaitu boiler dengan air yang mengalir di dalam tube sedangkan api dan gas panas berada di luar tube. Pemilihan jenis boiler ini didasarkan pada pertimbangan bahwa *water tube boiler* mampu beroperasi pada tekanan dan kapasitas steam yang lebih tinggi dengan efisiensi termal yang baik, bahkan dapat mencapai lebih dari 90%, serta memiliki waktu pemanasan awal (*start-up*) yang relatif singkat dibandingkan *fire tube boiler*, sehingga sesuai untuk memenuhi kebutuhan steam pada skala industri yang beroperasi secara kontinu (Engineering ToolBox, 2003).

4.4 Unit Pengadaan Bahan Bakar

Unit penyediaan bahan bakar berfungsi memenuhi kebutuhan bahan bakar bagi peralatan yang menggunakan proses pembakaran sebagai sumber energi, yaitu boiler dan generator cadangan. Bahan bakar yang digunakan pada kedua peralatan tersebut adalah natural gas (gas alam). Natural gas memiliki nilai kalor (HHV) yang tinggi, sehingga jumlah bahan bakar yang

diperlukan untuk memenuhi beban panas relatif lebih sedikit dibandingkan bahan bakar padat maupun cair dengan nilai kalor lebih rendah. Selain itu, pasokan natural gas di kawasan industri umumnya tersedia melalui jaringan pipa milik PT Pertamina maupun PT Perusahaan Gas Negara (PGN), sehingga tidak diperlukan unit penyimpanan (*storage tank*) khusus sebagaimana pada bahan bakar cair, yang berdampak pada penghematan luas lahan dan biaya investasi.

Pembakaran natural gas menghasilkan emisi partikulat, SO_x, dan jelaga yang jauh lebih rendah dibandingkan bahan bakar minyak residu maupun batu bara, sehingga sejalan dengan prinsip pabrik yang ramah lingkungan dan memudahkan pemenuhan baku mutu emisi udara. Sebagai komoditas yang telah terintegrasi dengan jaringan distribusi gas nasional, pasokan natural gas relatif stabil dengan harga yang kompetitif untuk kebutuhan energi skala industri di Indonesia.

4.4.1 Kebutuhan Bahan Bakar Boiler

Komposisi natural gas yang digunakan dalam perhitungan nilai kalor disajikan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Kandungan Gas Alam

Komponen	BM (g/mol)	%massa	HHV (kJ/kg)	xi . HHV (kJ/kg)
CH ₄	16,04	84,86%	55576,000	47161,794
C ₂ H ₆	30,07	5,11%	51982,000	2657,320
C ₃ H ₈	44,1	3,07%	50370,000	1544,848
i-C ₅ H ₁₂	72,15	0,41%	48950,000	200,206
n-C ₅ H ₁₂	72,15	0,20%	49046,000	100,054
n-C ₆ H ₁₂	86,18	0,20%	48717,000	99,383
N ₂	28,01	1,02%	0,000	0,000
CO ₂	44,01	5,11%	0,000	0,000
H ₂ S	34,08	0,00%	16501,000	0,165
TOTAL				51763,768

Kebutuhan bahan bakar boiler dihitung menggunakan persamaan berikut

$$m_{fuel} = \frac{Q}{\eta \times HHV}$$

Dengan asumsi efisiensi boiler sebesar 80% ($\eta = 0,8$), maka

$$m_{fuel} = \frac{7.533.922,001}{0,8 \times 51.763,768}$$

$$m_{fuel} = 181,930 \text{ kg/jam}$$

4.4.2 Spesifikasi Generator

Sumber energi listrik utama pabrik dipasok oleh PT PLN. Mengingat proses produksi berlangsung secara kontinu, diperlukan sumber listrik cadangan berupa generator yang akan beroperasi apabila terjadi gangguan pasokan dari jaringan PLN, guna menjaga kontinuitas peralatan-peralatan penting seperti sistem kendali, instrumentasi, pompa utilitas, dan fasilitas keselamatan pabrik. Total kebutuhan listrik yang menjadi dasar penentuan kapasitas generator sebagai berikut.

Tabel 4.14 Kebutuhan Listrik Keseluruhan

No.	Komponen	Kebutuhan (HP)	Kebutuhan (kW)
1.	Proses Utama	84,495	63,034
2.	Utilitas	61,000	45,506
3.	Penerangan	13,23	69,874
4.	Pendingin Udara (AC)	54,251	40,471
Total		212,982	158,885

Generator yang digunakan adalah generator arus bolak-balik (AC) tiga fasa. Pemilihan jenis ini didasarkan pada pertimbangan bahwa sistem tiga fasa mampu menyalurkan daya listrik dalam jumlah besar secara stabil, memiliki efisiensi penyaluran daya yang tinggi, serta memungkinkan pengoperasian motor-motor listrik berdaya besar, seperti pompa dan kompresor, yang banyak digunakan pada peralatan proses maupun utilitas pabrik (Engineering ToolBox, 2003).

Generator diasumsikan bekerja pada efisiensi 80%, sehingga kapasitas input generator yang diperlukan untuk memenuhi total beban listrik dihitung sebagai berikut:

$$\text{Input Generator} = \frac{\text{Total kebutuhan listrik}}{\text{Efisiensi Generator}}$$

Didapatkan hasil input generator sebesar 198,607 kW. Kapasitas output generator ditetapkan sebesar 250 kW, mengacu pada kapasitas standar komersial yang umum tersedia di pasaran, dengan margin pengaman sekitar 26% di atas kebutuhan input yang telah dihitung. Margin

tersebut diperlukan untuk mengakomodasi arus start (*inrush current*) pada motor-motor listrik berdaya besar, fluktuasi beban operasi, serta kemungkinan penambahan beban di masa mendatang, sekaligus mencegah generator bekerja pada beban penuh secara terus-menerus yang dapat memperpendek usia pakai mesin. Spesifikasi generator yang digunakan adalah sebagai berikut.

- Tipe : AC Generator, 3 fasa
- Kapasitas : 250 kW
- Tegangan : 220/380 Volt
- Frekuensi : 50 Hz
- Efisiensi : 80%
- Bahan bakar : Natural gas
- Jumlah : 1 unit

Penggunaan natural gas sebagai bahan bakar generator dipilih agar konsisten dengan sistem penyediaan bahan bakar boiler yang telah tersedia melalui jaringan pipa gas di kawasan industri, sehingga tidak diperlukan sistem penyimpanan bahan bakar cair terpisah untuk generator dan sistem perpipaan bahan bakar pabrik menjadi lebih sederhana.

4.4.3 Kebutuhan Bahan Bakar Generator

Kebutuhan bahan bakar generator dihitung berdasarkan kapasitas *output* generator yang telah ditetapkan, yaitu 250 kW, dengan asumsi generator dioperasikan pada beban penuh sebagai kondisi terberat yang mungkin terjadi apabila gangguan pasokan listrik dari PLN berlangsung lama. Energi yang harus disuplai oleh bahan bakar sebagai berikut.

$$Q_{fuel} = \frac{F}{\eta}$$

$$Q_{fuel} = \frac{250}{0,80}$$

$$Q_{fuel} = 312,5 \text{ kW}$$

$$Q_{fuel} = 1.125.000 \text{ kJ/jam}$$

Kebutuhan massa bahan bakar dihitung sebagai berikut.

$$m_{fuel} = \frac{Q_{fuel}}{HHV}$$

$$m_{fuel} = \frac{1.125.000}{51.763,768}$$

$$m_{fuel} = 21,733 \text{ kg/jam}$$

Apabila generator diasumsikan beroperasi penuh selama 24 jam/hari, maka kebutuhan bahan bakar generator sebesar 521,592 kg/hari.

4.5 Unit Pengadaan Udara Tekan

Unit pengadaan udara tekan berfungsi menyediakan udara bertekanan yang digunakan sebagai *instrument air* dan *plant air* untuk menunjang kelancaran operasi pabrik. Udara instrumen dimanfaatkan sebagai media penggerak (*actuating medium*) berbagai peralatan kontrol, seperti *control valve*, *pneumatic valve*, *positioner*, *pneumatic transmitter*, serta sistem *interlock* dan *emergency shutdown* (ESD). Sementara itu, plant air digunakan untuk keperluan umum, seperti pembersihan peralatan (*blow cleaning*), pengeringan, pemeliharaan (*maintenance*), dan pekerjaan utilitas lainnya. Oleh karena itu, udara tekan yang digunakan sebagai *instrument air* harus memiliki kualitas yang tinggi, bebas dari partikel padat, minyak, dan uap air agar tidak menyebabkan korosi, penyumbatan, maupun kerusakan pada sistem instrumentasi pneumatik.

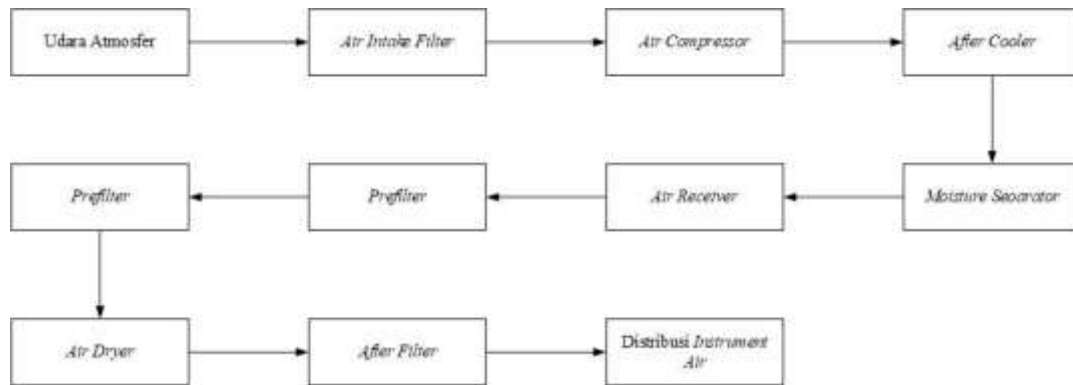
Berdasarkan Broughton (1994); ISO 8573-1 (kelas kualitas udara tekan) untuk menjadin keandalan dan umur operasi peralatan pneumati, udara instrumen harus memenuhi parameter kualitas utama sebagai berikut.

Tabel 4.15 Spesifikasi Kualitas Udara Instrumen

No.	Parameter	Spesifikasi
1.	Tekanan distribusi	6 – 8 barg
2.	Ukuran partikel maksimum	$\leq 3 \mu\text{m}$
3.	Kandungan minyak	$\leq 1 \text{ ppm}$
4.	<i>Pressure dew point</i>	$\leq -40^\circ\text{C}$ atau minimal 10°C di bawah suhu lingkungan
5.	Kondessat	Tidak boleh terbentuk pada kondisi operasi. Jangan full

Udara atmosfer yang digunakan sebagai sumber udara tekan mengandung berbagai pengotor, seperti debu, uap air, minyak, serta partikel-partikel lain yang dapat mengganggu kinerja peralatan pneumatik. Oleh karena itu, sebelum digunakan sebagai *instrument air*, udara harus melalui serangkaian proses pengolahan untuk memperoleh kualitas yang memenuhi

spesifikasi operasi. Pengolahan tersebut bertujuan menghasilkan udara tekan yang bersih, kering, bebas minyak, serta memiliki tekanan yang stabil sehingga dapat meningkatkan keandalan sistem kontrol, mengurangi risiko korosi dan penyumbatan pada pipa maupun instrumentasi, serta memperpanjang umur pakai peralatan.



Gambar 4.2 Diagram Alir Pengolahan Udara Tekan

1. *Air Intake Filter*

Tahap pertama diawali dengan pengambilan udara atmosfer menggunakan *air intake filter*. Peralatan ini berfungsi menyaring debu, pasir, serbuk, serangga, dan partikel kasar lainnya agar tidak masuk ke dalam kompresor. Penyaringan awal ini penting untuk mencegah keausan komponen kompresor dan menjaga efisiensi proses kompresi.

2. *Air Compressor*

Udara yang telah disaring kemudian dikompresi menggunakan *air compressor* hingga mencapai tekanan operasi yang dibutuhkan, umumnya sekitar 7 barg. Selama proses kompresi, volume udara berkurang sehingga tekanan meningkat, namun suhu udara juga naik akibat proses kompresi yang bersifat mendekati adiabatik.

3. *After Cooler*

Udara bertekanan dengan temperatur tinggi selanjutnya dialirkan menuju *after cooler*. Peralatan ini berfungsi menurunkan temperatur udara mendekati suhu lingkungan menggunakan media pendingin, sehingga sebagian besar uap air di dalam udara mengalami kondensasi menjadi air cair.

4. *Moisture Separator*

Campuran udara dan kondensat dari *after cooler* kemudian masuk ke *moisture separator*. Alat ini memisahkan tetesan air hasil kondensasi dari aliran udara menggunakan

prinsip gaya sentrifugal atau perubahan arah aliran. Air yang terpisah selanjutnya dibuang melalui *automatic drain* sehingga tidak terbawa ke proses berikutnya.

5. *Air Receiver*

Udara bertekanan selanjutnya ditampung di dalam *air receiver*. Tangki ini berfungsi sebagai penyangga (*buffer*) untuk menstabilkan tekanan udara, mengurangi fluktuasi akibat perubahan beban pemakaian, serta memberikan waktu tinggal yang lebih lama sehingga sisa kondensat dapat mengendap sebelum udara diproses lebih lanjut.

6. *Prefilter*

Sebelum memasuki unit pengering, udara dialirkan melalui *prefilter*. Prefilter berfungsi menghilangkan partikel halus, aerosol minyak, dan sisa kondensat yang masih terbawa sehingga dapat melindungi media pengering pada *air dryer* dari kontaminasi dan memperpanjang umur operasinya.

7. *Air Dryer*

Udara kemudian dikeringkan menggunakan *desiccant air dryer*. Pada unit ini, uap air diserap oleh media desikan seperti activated alumina atau molecular sieve sehingga diperoleh udara dengan *pressure dew point* sekitar -40°C , sesuai dengan persyaratan kualitas udara instrumen. Tahap ini merupakan proses paling penting karena mencegah terbentuknya kondensat pada sistem distribusi udara tekan.

8. *After Filter*

Setelah keluar dari *air dryer*, udara dilewatkan melalui *after filter* untuk menangkap partikel halus maupun serbuk desikan yang mungkin terbawa dari unit pengering. Dengan demikian, udara yang dihasilkan memiliki tingkat kebersihan yang tinggi dan aman digunakan untuk sistem instrumentasi pneumatik.

9. *Distribusi Instrument Air*

Udara tekan yang telah memenuhi spesifikasi selanjutnya dialirkan menuju *instrument air header* untuk didistribusikan ke seluruh pengguna di pabrik, seperti *control valve*, *pneumatic actuator*, *pneumatic transmitter*, serta peralatan instrumentasi lainnya. Tekanan distribusi dipertahankan tetap konstan menggunakan pressure regulator sehingga seluruh sistem kontrol dapat beroperasi secara stabil, aman, dan andal.

4.6 Laboratorium

Laboratorium merupakan salah satu fasilitas penunjang yang berperan dalam menjamin kualitas bahan baku, produk antara, dan produk akhir yang dihasilkan. Kegiatan laboratorium meliputi analisis mutu bahan baku sebelum digunakan dalam proses produksi, pengendalian kualitas selama proses berlangsung (*in-process quality control*), serta pengujian produk akhir sebelum disimpan maupun dipasarkan. Hasil analisis laboratorium digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan terhadap kelayakan bahan baku, pengendalian kondisi operasi, serta pemenuhan spesifikasi produk sesuai standar yang ditetapkan perusahaan.

4.6.1 Analisis Bahan Baku

Analisis bahan baku dilakukan untuk memastikan bahwa bahan yang digunakan memenuhi spesifikasi proses sehingga tidak mempengaruhi konversi reaksi maupun kualitas produk akhir.

1. Analisis Kemurnian Gliserol

Kemurnian gliserol perlu dianalisis karena gliserol merupakan bahan baku utama dalam sintesis epiklorohidrin. Adanya pengotor seperti metanol, senyawa organik lain, maupun air dapat menurunkan selektivitas reaksi hidroklorinasi, meningkatkan pembentukan produk samping, serta menurunkan rendemen epiklorohidrin. Pengujian dilakukan menggunakan *Gas Chromatography–Flame Ionization Detector* (GC-FID). Metode ini dipilih karena memiliki sensitivitas tinggi terhadap senyawa organik, mampu memisahkan komponen campuran dengan baik, serta merupakan metode yang umum digunakan dalam analisis kemurnian gliserol pada industri kimia. Kemurnian gliserol dihitung menggunakan metode normalisasi luas puncak.

$$\%kemurnian = \frac{A_{gliserol}}{\sum A_i} \times 100\%$$

Keterangan:

$A_{gliserol}$ = luas puncak gliserol

$\sum A_i$ = total luas puncak komponen

2. Analisis Kemurnian Asam Heksanoat

Larutan NaOH digunakan sebagai reaktan pada tahap dehidroklorinasi sehingga konsentrasinya harus sesuai dengan rancangan proses. Konsentrasi yang terlalu rendah menyebabkan konversi DCH menjadi epiklorohidrin tidak optimal, sedangkan konsentrasi yang terlalu tinggi meningkatkan konsumsi bahan kimia dan biaya produksi. Konsentrasi

NaOH dianalisis menggunakan titrasi asam-basa dengan larutan HCl standar dan indikator fenolftalein. Metode ini dipilih karena sederhana, cepat, memiliki ketelitian tinggi, serta telah menjadi metode standar untuk analisis larutan basa kuat.

3. Analisis Konsentrasi Natrium Hidroksida (NaOH)

Asam heksanoat digunakan sebagai katalis pada reaksi hidroklorinasi gliserol. Kemurnian katalis perlu dipastikan karena adanya pengotor dapat mengurangi aktivitas katalitik sehingga laju reaksi menurun dan pembentukan produk samping meningkat. Pengujian dilakukan menggunakan GC-FID karena metode ini mampu mengidentifikasi dan mengukur kadar senyawa organik volatil secara akurat dengan waktu analisis yang relatif singkat. Kemurnian gliserol dihitung menggunakan metode normalisasi luas puncak.

$$\%kemurnian = \frac{A_{as. \text{ heksanoat}}}{\sum A_i} \times 100\%$$

Keterangan:

$A_{as. \text{ heksanoat}}$ = luas puncak asam heksanoat

$\sum A_i$ = total luas puncak komponen

4.6.2 Analisis Bahan Setengah Jadi

Pengujian produk antara bertujuan memantau keberhasilan reaksi serta memastikan setiap tahapan proses berlangsung sesuai kondisi operasi yang dirancang.

1. Analisis Kadar Diklorohidrin (DCH)

Analisis DCH dilakukan pada keluaran reaktor hidroklorinasi untuk mengetahui tingkat pembentukan produk antara sebelum memasuki tahap pemurnian. Data kadar DCH digunakan untuk mengevaluasi konversi gliserol dan menentukan apakah kondisi operasi reaktor telah sesuai dengan desain. Analisis dilakukan menggunakan GC-FID karena DCH merupakan senyawa organik yang dapat dipisahkan dan dideteksi dengan baik menggunakan kromatografi gas. Kadar DCH dihitung berdasarkan normalisasi luas puncak. Analisis kadar diklorohidrin dihitung menggunakan metode normalisasi luas puncak.

$$\%kemurnian = \frac{A_{DCH}}{\sum A_i} \times 100\%$$

Keterangan:

A_{DCH} = luas puncak DCH

$\sum A_i$ = total luas puncak komponen

2. Analisis Kandungan HCl setelah Kolom D-01

Pengujian kadar HCl dilakukan untuk memastikan sebagian besar HCl telah dipisahkan sebelum campuran dialirkan menuju reaktor dehidroklorinasi. Kandungan HCl yang terlalu tinggi dapat menyebabkan konsumsi NaOH meningkat dan mempercepat korosi pada peralatan proses. Analisis dilakukan menggunakan **titrasi** argentometri metode Mohr. Metode ini dipilih karena memiliki ketelitian tinggi dalam menentukan ion klorida, prosedurnya sederhana, serta banyak digunakan pada analisis garam anorganik.

4.6.3 Analisis Produk

Produk akhir dianalisis sebelum disimpan pada tangki produk untuk memastikan telah memenuhi spesifikasi mutu komersial epiklorohidrin.

1. Analisis Kemurnian Epiklorohidrin (ECH)

Kemurnian epiklorohidrin merupakan parameter mutu utama yang menentukan nilai jual produk. Produk dengan kemurnian tinggi memiliki kualitas yang lebih baik untuk digunakan sebagai bahan baku resin epoksi maupun industri kimia lainnya. Analisis dilakukan menggunakan GC-FID karena mampu memisahkan epiklorohidrin dari senyawa organik lain seperti DCH maupun gliserol dengan sensitivitas tinggi. Kemurnian dihitung menggunakan metode normalisasi luas puncak.

$$\%kemurnian = \frac{A_{ECH}}{\sum A_i} \times 100\%$$

Keterangan:

A_{ECH} = luas puncak ECH

$\sum A_i$ = total luas puncak komponen

2. Analisis Kadar Air

Kadar air merupakan salah satu parameter penting karena air dapat mempercepat hidrolisis epiklorohidrin menjadi glisidol maupun senyawa lain sehingga menurunkan stabilitas produk selama penyimpanan. Analisis dilakukan menggunakan *Karl Fischer Titration*. Metode ini dipilih karena merupakan metode paling akurat dan spesifik dalam menentukan kadar air pada pelarut organik hingga tingkat ppm.

$$\%H_2O = \frac{V_{KF} \times F}{m} \times 100\%$$

Keterangan:

V_{KF} = volume pereaksi *Karl Fischer* (mL)

F = faktor pereaksi (mg H₂O/mL)

m = massa sampel (mg)

3. Analisis Kadar Gliserol sisa

Analisis gliserol sisa dilakukan untuk mengetahui efektivitas proses pemisahan setelah tahap dehidroklorinasi dan distilasi. Kandungan gliserol yang tinggi menunjukkan pemisahan belum berlangsung secara optimal sehingga dapat menurunkan kemurnian produk. Analisis dilakukan menggunakan *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC) dengan *Refractive Index Detector* (RID). Metode ini dipilih karena gliserol memiliki volatilitas rendah sehingga lebih sesuai dianalisis menggunakan HPLC dibandingkan GC tanpa derivatisasi. Konsentrasi gliserol ditentukan berdasarkan kurva kalibrasi larutan standar.

$$C_{\text{sampel}} = \frac{A_{\text{sampel}} - b}{m}$$

Keterangan:

A_{sampel} = luas puncak sampel

b = gradien kurva kalibrasi

m = *intercept* kurva kalibrasi

4.7 Unit Pengolahan Limbah

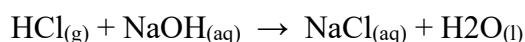
Kegiatan produksi epiklorohidrin menghasilkan limbah yang terdiri atas limbah gas, limbah cair, dan limbah padat. Pengolahan limbah dilakukan untuk mengurangi dampak pencemaran terhadap lingkungan sekaligus memenuhi baku mutu yang ditetapkan dalam peraturan perundang-undangan. Selain bertujuan melindungi lingkungan, pengolahan limbah juga mendukung penerapan produksi bersih (*cleaner production*) melalui pemanfaatan kembali produk samping yang masih memiliki nilai ekonomis.

4.7.1 Pengolahan Limbah Gas

Limbah gas utama yang dihasilkan pada pabrik epiklorohidrin berupa gas hidrogen klorida (HCl) yang tidak bereaksi sempurna pada reaktor hidroklorinasi. HCl merupakan gas yang bersifat korosif, beracun, mudah larut dalam air, dan dapat menyebabkan iritasi pada saluran pernapasan apabila dilepaskan langsung ke atmosfer. Oleh karena itu, sebelum dibuang melalui

cerobong (*stack*), gas buang harus diolah terlebih dahulu agar memenuhi baku mutu emisi yang dipersyaratkan dalam peraturan lingkungan hidup.

Pengolahan limbah gas HCl dilakukan menggunakan *wet scrubber* tipe *packed column* dengan larutan natrium hidroksida (NaOH) sebagai absorben. Metode ini dipilih karena HCl mempunyai kelarutan yang sangat tinggi di dalam air dan bereaksi secara cepat dengan basa kuat. Selain memiliki efisiensi penyerapan yang tinggi, *packed scrubber* juga memberikan luas permukaan kontak gas-cair yang besar sehingga perpindahan massa berlangsung secara efektif dengan kehilangan tekanan (*pressure drop*) yang relatif rendah dibandingkan jenis scrubber lainnya. Reaksi netralisasi yang terjadi di dalam scrubber adalah sebagai berikut.



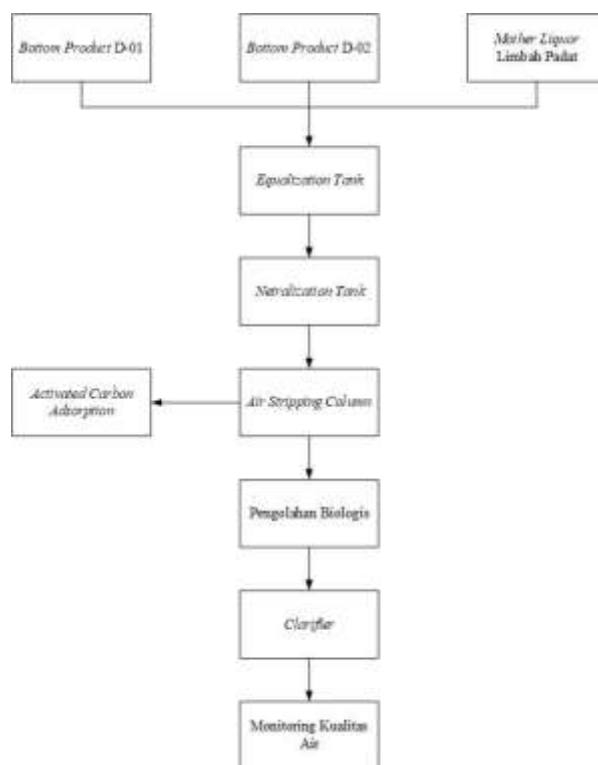
Reaksi tersebut merupakan reaksi asam-basa yang berlangsung hampir sempurna dan bersifat sangat eksotermis. Karena NaOH merupakan basa kuat dengan derajat ionisasi mendekati 100%, efisiensi penyisihan HCl menggunakan packed wet scrubber umumnya dapat mencapai lebih dari 99%. Produk hasil reaksi berupa larutan natrium klorida (NaCl) selanjutnya dialirkan menuju unit pengolahan limbah cair untuk dimanfaatkan sebagai produk samping.

Sesuai dengan ketentuan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2021 tentang Tata Cara Penerbitan Persetujuan Teknis dan Surat Kelayakan Operasional Bidang Pengendalian Pencemaran Lingkungan, emisi gas buang yang dilepaskan ke atmosfer harus memenuhi baku mutu emisi yang berlaku sesuai jenis industrinya. Untuk emisi hidrogen klorida, konsentrasi gas buang umumnya dibatasi pada kisaran 10 mg/Nm³ untuk beberapa kategori industri kimia dan pembakaran limbah B3, atau mengikuti baku mutu spesifik sesuai sektor industri yang bersangkutan. Oleh karena itu, pemasangan wet scrubber dengan efisiensi penyisihan lebih dari 99% menjadi salah satu metode yang paling banyak digunakan untuk memastikan konsentrasi HCl pada gas buang berada di bawah ambang batas yang diizinkan.

Selain memenuhi persyaratan emisi, pemasangan *wet scrubber* juga memberikan keuntungan dari aspek keselamatan proses karena mampu mengurangi paparan gas HCl terhadap pekerja, mencegah korosi pada peralatan hilir, serta mengurangi potensi terbentuknya hujan asam akibat pelepasan gas asam ke atmosfer.

4.7.2 Pengolahan Limbah Cair

Limbah cair yang dihasilkan pada pabrik epiklorohidrin berasal dari beberapa unit proses, yaitu aliran bawah kolom distilasi D-01 dan kolom distilasi D-02. Aliran bawah D-01 mengandung campuran gliserol, asam heksanoat, diklorohidrin (DCH), natrium hidroksida (NaOH), dan sejumlah kecil senyawa organik lainnya, sedangkan aliran bawah D-02 didominasi oleh air dengan kandungan epiklorohidrin (ECH) dalam jumlah kecil. Limbah tersebut masih mengandung senyawa organik yang menyebabkan tingginya nilai *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan *Biological Oxygen Demand* (BOD), serta senyawa organoklorin seperti DCH yang bersifat toksik terhadap mikroorganisme. Oleh karena itu, limbah cair tidak dapat langsung dibuang ke lingkungan dan harus melalui beberapa tahapan pengolahan agar memenuhi baku mutu air limbah sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2021.



Gambar 4.3 Diagram Alir Pengolahan Limbah Cair

a. *Equalization Tank*

Seluruh limbah cair dari D-01 dan D-02 terlebih dahulu dialirkan menuju *equalization tank*. Unit ini berfungsi menghomogenkan karakteristik limbah, baik dari segi debit, temperatur, pH, maupun konsentrasi bahan organik sehingga beban pencemar yang

masuk ke unit pengolahan berikutnya menjadi lebih stabil. *Equalization tank* juga berfungsi sebagai penyangga (*buffer tank*) untuk mengurangi fluktuasi aliran akibat perubahan kondisi operasi pabrik. Proses *equalization* merupakan salah satu unit pendahuluan yang umum diterapkan pada instalasi pengolahan limbah industri karena mampu meningkatkan kestabilan proses biologis.

b. Netralisasi

Limbah dari *equalization tank* selanjutnya dialirkan menuju tangki netralisasi untuk mengatur pH pada kisaran 6 – 9. Kisaran tersebut dipilih karena sesuai dengan rentang optimum pertumbuhan mikroorganisme pada proses lumpur aktif (*activated sludge*) dan juga memenuhi persyaratan baku mutu air limbah. Penyesuaian pH dilakukan menggunakan larutan natrium hidroksida (NaOH) apabila limbah bersifat asam akibat adanya sisa HCl. Sebaliknya, apabila pH terlalu tinggi karena adanya sisa NaOH dari proses dehidroklorinasi, dapat ditambahkan larutan asam hingga mencapai pH yang diinginkan.

c. *Air Stripping Column*

Setelah pH disesuaikan, limbah dialirkan menuju *air stripping column* untuk mengurangi kandungan senyawa organik volatil, terutama diklorohidrin (DCH) dan sisa epiklorohidrin yang masih terlarut. DCH merupakan senyawa organoklorin yang bersifat toksik, sulit terdegradasi secara biologis, serta dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme pada unit pengolahan biologis. Pada proses *stripping*, udara dialirkan secara berlawanan arah (*counter-current*) terhadap aliran limbah sehingga senyawa volatil berpindah dari fase cair ke fase gas berdasarkan perbedaan tekanan parsial sesuai Hukum Henry. Gas hasil *stripping* selanjutnya dialirkan menuju unit pengolahan gas, misalnya *activated carbon adsorption*, untuk mencegah pelepasan senyawa organik volatil ke atmosfer. Dengan berkurangnya kandungan DCH dan ECH, beban toksisitas limbah terhadap proses biologis dapat diminimalkan sehingga efisiensi pengolahan selanjutnya meningkat.

d. Pengolahan Biologis

Limbah yang telah mengalami proses *stripping* selanjutnya dialirkan menuju *aeration tank* untuk menjalani proses pengolahan biologis secara aerobik. Pada unit ini digunakan komunitas mikroorganisme (*mixed culture*) yang didominasi oleh bakteri heterotrof, seperti *Pseudomonas spp.*, *Bacillus spp.*, *Acinetobacter spp.*, dan bakteri pembentuk flok *Zoogloea*

spp. Mikroorganisme tersebut memanfaatkan senyawa organik seperti gliserol, asam heksanoat, dan senyawa organik *biodegradable* lainnya sebagai sumber karbon dan energi. Dengan bantuan suplai udara dari *blower*, mikroorganisme mengoksidasi bahan organik menjadi karbon dioksida, air, serta biomassa baru (*activated sludge*). eaksi biologis tersebut menyebabkan nilai BOD, COD, dan kandungan senyawa organik di dalam limbah menurun secara signifikan.

e. *Secondary Clarifier*

Campuran air limbah dan lumpur aktif kemudian dialirkan menuju *secondary clarifier* untuk memisahkan biomassa dari air olahan. Lumpur yang mengendap di dasar *clarifier* sebagian dikembalikan ke aeration tank sebagai *return activated sludge* (RAS) untuk mempertahankan konsentrasi mikroorganisme, sedangkan kelebihan lumpur (*waste activated sludge*) dialirkan menuju unit pengolahan lumpur. Air jernih (*overflow*) dari *clarifier* selanjutnya dialirkan menuju bak kontrol kualitas sebelum dibuang ke badan air penerima.

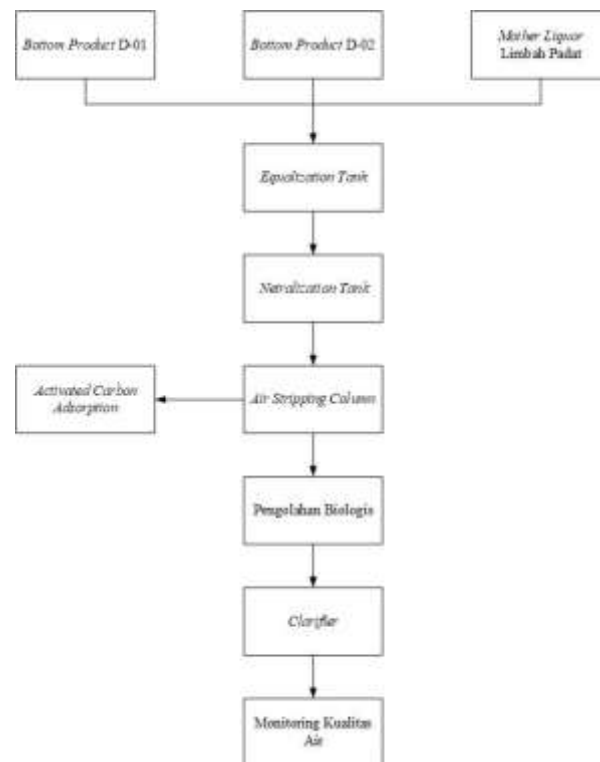
f. Monitoring Kualitas Air Limbah

Sebelum dilepaskan ke lingkungan, air hasil pengolahan harus memenuhi baku mutu air limbah sesuai Permen LHK Nomor 5 Tahun 2021 atau ketentuan teknis yang berlaku bagi industri kimia organik. Parameter yang dipantau meliputi pH, BOD, COD, *Total Suspended Solids* (TSS), minyak dan lemak, *Total Dissolved Solids* (TDS), temperatur, serta kandungan senyawa organik spesifik apabila dipersyaratkan. Pengukuran dilakukan secara berkala menggunakan instrumen laboratorium untuk memastikan kualitas air limbah selalu berada di bawah baku mutu sebelum dialirkan ke lingkungan.

4.7.3 Pengolahan Limbah Padat

Limbah padat utama yang dihasilkan pada pabrik epiklorohidrin berupa NaCl hasil reaksi dehidroklorinasi pada RD-01. Berbeda dengan limbah padat pada umumnya, NaCl memiliki nilai ekonomi sehingga dapat dimanfaatkan sebagai produk samping setelah melalui proses pemurnian. Karena masih memiliki nilai ekonomi, NaCl tidak diperlakukan sebagai limbah yang dibuang, tetapi dimanfaatkan sebagai produk samping (*by-product*) setelah melalui proses pemisahan dan pemurnian sederhana. Produk NaCl yang dihasilkan ditujukan untuk penggunaan skala industri (*industrial grade sodium chloride*) sehingga tidak memerlukan proses pemurnian lanjutan hingga mencapai kemurnian tinggi. Selain NaCl, limbah padat lainnya berupa lumpur dari instalasi

pengolahan air limbah (*waste activated sludge*), media filter bekas, karbon aktif jenuh, serta resin penukar ion yang telah habis masa pakainya. Limbah-limbah tersebut dikelola sesuai ketentuan pengelolaan limbah industri dan limbah B3 apabila memenuhi karakteristik yang dipersyaratkan.



Gambar 4.4 Diagram Alir Pengolahan Limbah Padat

a. Filtrasi

Tahap pertama pengolahan dilakukan dengan memisahkan kristal NaCl dari larutan induk menggunakan *pressure filter*. Filtrasi merupakan metode yang umum digunakan untuk memisahkan padatan kristal dari fase cair berdasarkan perbedaan ukuran partikel melalui media berpori. Pada tahap ini diperoleh filter cake berupa kristal NaCl yang masih mengandung sedikit cairan antarpartikel (*entrained liquor*), sedangkan filtrat yang terdiri atas air, gliserol, DCH, ECH, asam heksanoat, dan sebagian kecil NaCl terlarut dialirkan menuju unit pengolahan limbah cair untuk diproses lebih lanjut.

b. Pencucian Kristal

Kristal NaCl hasil filtrasi selanjutnya dicuci menggunakan larutan jenuh natrium klorida (*brine*) atau air bersih. Penggunaan larutan jenuh NaCl lebih disarankan karena mampu menghilangkan sisa cairan induk yang masih melekat pada permukaan kristal tanpa menyebabkan pelarutan NaCl secara signifikan. Tahap pencucian bertujuan mengurangi

kandungan senyawa organik seperti gliserol, DCH, ECH, dan asam heksanoat sehingga kemurnian produk meningkat serta mengurangi potensi kontaminasi selama penyimpanan.

c. Pengeringan

Kristal NaCl yang telah dicuci kemudian dikeringkan menggunakan *rotary dryer* dengan media udara panas hingga diperoleh kadar air yang memenuhi spesifikasi penyimpanan maupun pemasaran. *Rotary dryer* dipilih karena mampu menangani padatan kristalin secara kontinu dengan kapasitas besar serta menghasilkan distribusi pengeringan yang relatif seragam. Setelah proses pengeringan, kristal didinginkan sebelum disimpan di silo penyimpanan untuk mencegah penyerapan kembali uap air dari lingkungan.

d. Penyimpanan dan Pemanfaatan Produk Samping

NaCl yang telah dikeringkan kemudian disimpan di dalam *storage silo* sebelum dipasarkan sebagai produk samping. Produk ini dipasarkan sebagai *industrial grade sodium chloride*, sehingga spesifikasi kemurniannya tidak ditujukan untuk kebutuhan pangan maupun industri farmasi. NaCl tersebut dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pada industri yang tidak mensyaratkan kemurnian tinggi, seperti regenerasi resin penukar ion, pembuatan larutan *brine*, maupun berbagai proses kimia lainnya. Dengan memanfaatkan NaCl sebagai produk samping, jumlah limbah padat yang harus dibuang dapat dikurangi sehingga meningkatkan nilai tambah proses sekaligus mendukung penerapan konsep *waste minimization* dan *cleaner production*.

e. Pengelolaan *Mother Liquor*

Larutan induk hasil proses filtrasi dan pencucian masih mengandung sejumlah kecil NaCl terlarut serta senyawa organik seperti gliserol, DCH, ECH, dan asam heksanoat. Oleh karena itu, aliran tersebut tidak dibuang secara langsung ke lingkungan, tetapi dialirkan menuju unit pengolahan limbah cair untuk diproses bersama aliran limbah proses lainnya. Pengembalian *mother liquor* ke instalasi pengolahan limbah bertujuan mencegah pelepasan senyawa organik ke lingkungan serta mendukung efisiensi pengelolaan limbah melalui pengolahan yang terintegrasi.

4.8 Kesehatan, Keselamatan Kerja, dan Lingkungan Hidup

Pabrik epiklorohidrin merupakan industri kimia yang mengolah bahan-bahan berbahaya dan beracun sehingga penerapan aspek Keselamatan, Kesehatan Kerja, dan Lingkungan Hidup (K3LH) menjadi salah satu faktor penting dalam menjamin keselamatan pekerja, keandalan

operasi, serta perlindungan terhadap lingkungan. Potensi bahaya pada pabrik ini berasal dari penggunaan bahan kimia korosif seperti HCl dan NaOH, senyawa organik yang mudah terbakar dan bersifat toksik seperti ECH, serta kondisi operasi yang melibatkan temperatur, tekanan, dan sistem vakum. Oleh karena itu, seluruh aktivitas operasional harus mengacu pada prinsip *hierarchy of controls*, penerapan sistem manajemen K3, serta peraturan perundang-undangan yang berlaku, seperti Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja, PP Nomor 50 Tahun 2012 tentang Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3), dan PP Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.



Gambar 4.5 *Hierarchy of Controls*

4.8.1 Identifikasi Bahaya

Identifikasi bahaya dilakukan untuk mengenali potensi kecelakaan maupun gangguan kesehatan yang mungkin terjadi selama proses produksi sehingga tindakan pengendalian dapat dirancang sejak tahap perancangan pabrik. Pada pabrik epiklorohidrin, potensi bahaya utama meliputi kebocoran gas HCl yang bersifat korosif dan dapat menyebabkan iritasi pada saluran pernapasan, paparan uap epiklorohidrin yang bersifat toksik dan mudah terbakar, kontak langsung dengan larutan natrium hidroksida yang dapat mengakibatkan luka bakar kimia, serta bahaya akibat operasi pada temperatur dan tekanan tinggi pada reaktor, kolom distilasi, dan peralatan perpindahan panas. Selain itu, penggunaan pompa, kompresor, agitator, dan peralatan berputar lainnya juga menimbulkan potensi bahaya mekanis bagi pekerja. Identifikasi bahaya dilakukan secara sistematis menggunakan metode *Hazard Identification and Risk Assessment*

(HIRA) serta *Hazard and Operability Study* (HAZOP) untuk mengevaluasi penyimpangan kondisi operasi, penyebab, konsekuensi, dan tindakan pengendaliannya.

4.8.2 Alat Pelindung Diri (APD)

Penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) merupakan lapisan perlindungan terakhir dalam hierarki pengendalian risiko setelah penerapan pengendalian teknis (*engineering control*) dan administratif. Seluruh pekerja yang memasuki area proses wajib menggunakan APD sesuai tingkat risiko pekerjaan. Pemilihan APD mengacu pada karakteristik bahan kimia yang ditangani dan potensi bahaya di setiap area kerja (OSHA, 2024). APD yang digunakan meliputi safety helmet untuk melindungi kepala dari benturan, *safety goggles* atau *chemical splash goggles* untuk melindungi mata dari percikan bahan kimia, sarung tangan tahan bahan kimia berbahan nitril atau *neoprene* saat menangani HCl, NaOH, maupun ECH, *safety shoes* dengan pelindung ujung kaki, pakaian kerja tahan bahan kimia (*chemical protective clothing*), serta respirator dengan cartridge gas asam atau respirator mandiri (*Self Contained Breathing Apparatus/SCBA*) pada pekerjaan yang berpotensi terpapar gas HCl atau uap ECH dalam konsentrasi tinggi. Penggunaan APD wajib disertai dengan inspeksi berkala dan pelatihan penggunaan yang benar sesuai standar keselamatan kerja.

4.8.2 Prosedur Keselamatan Operasional

Selain penggunaan APD, keselamatan kerja didukung melalui penerapan prosedur operasi yang terstandarisasi untuk setiap tahapan produksi, mulai dari *start-up*, operasi normal, *shutdown*, hingga kondisi darurat. Setiap pekerjaan dengan tingkat risiko tinggi wajib menggunakan sistem *Permit to Work* (PTW), seperti pekerjaan panas (*hot work*), pekerjaan di ruang terbatas (*confined space entry*), pekerjaan listrik, dan pekerjaan pada ketinggian (CCPS, 2008). Untuk mencegah terjadinya kecelakaan akibat penyimpangan kondisi operasi, setiap peralatan utama dilengkapi dengan instrumen pengaman. Sistem proteksi yang diterapkan pada pabrik sebagai berikut.

- a. *Pressure Safety Valve* (PSV) untuk mencegah tekanan berlebih
- b. *Emergency Shutdown System* (ESD) untuk menghentikan proses saat kondisi darurat
- c. *High Pressure Alarm* untuk memberikan peringatan tekanan tinggi
- d. *High Temperature Alarm* untuk memberikan peringatan temperatur tinggi
- e. *Gas detector* HCl untuk mendeteksi kebocoran HCl
- f. *Gas detector* ECH untuk mendeteksi kebocoran uap ECH
- g. *Fire alarm* untuk deteksi dini kebakaran

4.8.3 Perlindungan Lingkungan

Pengelolaan lingkungan dilakukan dengan menerapkan sistem pengolahan limbah secara terpadu sehingga seluruh limbah yang dihasilkan memenuhi baku mutu sebelum dilepas ke lingkungan. Limbah gas berupa HCl diolah menggunakan *wet scrubber* dengan larutan NaOH sehingga konsentrasi HCl memenuhi baku mutu emisi. Limbah cair diolah melalui unit *equalization*, netralisasi, *air stripping*, *activated sludge*, dan *secondary clarifier* sebelum dibuang ke badan air penerima. Sementara itu, limbah padat berupa NaCl dimanfaatkan sebagai produk samping untuk keperluan industri, sedangkan lumpur IPAL serta media filter bekas dikelola sesuai ketentuan pengelolaan limbah industri dan limbah B3 apabila memenuhi karakteristik limbah berbahaya. Kualitas limbah dipantau secara berkala sebelum dibuang ke lingkungan. Parameter yang dianalisis meliputi pH, BOD, COD, TSS, minyak dan lemak, temperatur, serta parameter lain sesuai ketentuan Permen LHK Nomor 5 Tahun 2021.

4.9 Instrumentasi

Instrumentasi merupakan penerapan alat ukur dan sistem pengendalian pada suatu objek yang bertujuan untuk mengetahui besaran variabel suatu proses serta mengendalikannya agar tetap berada pada rentang yang dikehendaki (*set point*) (Considine, 1985). Keberadaan sistem instrumentasi pada pabrik epiklorohidrin sangat penting mengingat proses berlangsung melalui tahapan reaksi klorinasi gliserol yang bersifat eksotermis serta tahapan pemisahan multi-komponen (distilasi dan dekantasi) yang sensitif terhadap perubahan suhu dan tekanan. Tanpa sistem pengendalian yang andal, penyimpangan kondisi operasi dapat menurunkan konversi reaksi, menyebabkan kegagalan pemisahan produk, bahkan menimbulkan potensi bahaya seperti dekomposisi termal maupun kebocoran gas HCl.

Besaran proses yang umum diukur dan dikendalikan pada pabrik epiklorohidrin meliputi laju alir (*flow*) pada perpipaan umpan dan produk, tekanan (*pressure*) di dalam reaktor maupun kolom distilasi, suhu (*temperature*) pada unit penukar panas dan reboiler, serta ketinggian (*level*) cairan pada tangki penyimpanan, dekanter, dan dasar kolom. Sistem instrumentasi yang digunakan mengikuti prinsip pengendalian umpan balik (*feedback control*). Elemen sensor (*sensing element*) yang terpasang pada peralatan proses mendeteksi nilai besaran fisik aktual (*process variable/PV*), kemudian mengubahnya menjadi sinyal melalui transmitter dan mengirimkannya ke *controller*. *Controller* selanjutnya membandingkan nilai PV dengan nilai *set point* (SP) yang telah ditentukan; apabila terjadi selisih (*error*), *controller* akan menghasilkan

sinyal koreksi yang dikirimkan ke elemen kendali akhir (*final control element*), umumnya berupa *control valve*, untuk mengatur bukaan aliran fluida (bahan baku, steam, atau media pendingin) hingga nilai PV kembali mendekati SP. Siklus pengukuran, perbandingan, dan koreksi ini berlangsung secara terus-menerus selama pabrik beroperasi.

1. *Flow Indicator Controller (FIC)*

FIC berfungsi mengukur sekaligus mengendalikan laju alir fluida di dalam pipa agar sesuai dengan kondisi rancangan. Pada pabrik ini, FIC dipasang pada aliran umpan gliserol menuju *Static Inline Mixer* (SIM-01) dan Reaktor (R-01), serta pada aliran larutan HCl menuju reaktor, guna menjaga perbandingan mol gliserol terhadap HCl tetap sesuai stoikiometri rancangan (1:2). FIC juga dipasang pada aliran refluks Menara Distilasi (COL-01 dan COL-03) untuk menjaga rasio refluks konstan selama proses pemurnian berlangsung.

2. *Temperature Indicator Controller (TIC)*

TIC berfungsi mengukur dan mengendalikan suhu pada unit-unit yang sensitif terhadap perubahan panas. TIC dipasang pada *Heat Exchanger* (HE-01) untuk mengendalikan suhu gliserol yang dipanaskan menggunakan steam dari 30°C menjadi 150°C sebelum diumpankan ke reaktor, pada HE-02 dan HE-03 untuk mengendalikan suhu campuran sebelum memasuki *Reactive Distillation* (RD-01), serta pada reboiler COL-01, COL-02, dan COL-03 untuk menjaga suhu pemanasan pada masing-masing kolom distilasi. TIC juga dipasang pada mantel pendingin Reaktor (R-01) untuk mengendalikan suhu reaksi klorinasi gliserol yang berlangsung secara eksotermis agar tidak melampaui batas suhu rancangan.

3. *Pressure Indicating Controller (PIC)*

PIC berfungsi mengukur dan mengendalikan tekanan pada peralatan bertekanan agar operasi berlangsung sesuai rancangan dan terhindar dari kondisi *overpressure*. PIC dipasang pada Reaktor (R-01) yang beroperasi mendekati tekanan atmosferik, serta pada Menara Distilasi (COL-01, RD-01, dan COL-03) untuk menjaga tekanan operasi agar titik didih campuran sesuai dengan rancangan pemisahan diklorohidrin dan epiklorohidrin yang rentan terdekomposisi pada suhu tinggi.

4. *Level Indicating Controller (LIC)*

LIC berfungsi memantau dan mengendalikan ketinggian cairan di dalam tangki maupun *vessel* proses guna mencegah kondisi meluap (*overflow*) maupun kekosongan (*dry running*). LIC dipasang pada tangki penyimpanan gliserol, *Stirred Tank* larutan NaOH (ST-01), Distilasi (D-01 dan D-02), dasar kolom distilasi (COL-01, COL-02, dan COL-03), serta pada tangki penyimpanan produk epiklorohidrin (TK-ECH).

Sistem pengendalian yang digunakan pada pabrik epiklorohidrin ini adalah *Distributed Control System* (DCS). DCS merupakan sistem pengendalian berbasis komputer yang mendistribusikan fungsi pengukuran dan pengendalian ke sejumlah kontroler otonom yang tersebar di seluruh area proses, berbeda dengan sistem terpusat yang memusatkan seluruh fungsi kendali pada satu lokasi. DCS umumnya diterapkan pada pabrik proses kontinu berskala besar seperti pabrik kimia dan petrokimia karena kemampuannya mengelola ratusan *control loop* secara bersamaan dengan keandalan dan keamanan tinggi (Seborg et al., 2016). Dengan penerapan DCS, seluruh parameter proses dapat dipantau dan dikendalikan secara terpusat dari ruang kontrol (*control room*), sehingga operator dapat mendeteksi dan menangani penyimpangan proses secara cepat dan tepat. Sistem ini juga mendukung penerapan alarm otomatis, pencatatan data (*data logging*), serta integrasi dengan sistem keselamatan pabrik, sehingga operasi pabrik epiklorohidrin dapat berlangsung secara efisien, aman, dan andal.