

BAB IV

UNIT PENDUKUNG PROSES

4.1 Unit Pengadaan dan Pengolahan Air

Unit utilitas atau alat pendukung proses memiliki peran penting dalam menunjang kelancaran proses produksi di sebuah pabrik. Pada pabrik sikloheksana yang tengah dirancang, utilitas yang digunakan meliputi:

4.1.1 Pengadaan Air

Unit pengadaan air merupakan salah satu unit utilitas yang berfungsi menyediakan kebutuhan air untuk mendukung seluruh kegiatan operasional pabrik. Pada pabrik sikloheksana yang berlokasi di kawasan industri Jenu, Tuban, Jawa Timur kebutuhan air dipenuhi secara mandiri menggunakan sistem *Sea Water Reverse Osmosis* (SWRO). Air baku bersumber dari Laut Jawa dan diolah hingga memenuhi spesifikasi yang dipersyaratkan untuk keperluan industri. Air hasil pengolahan kemudian dimanfaatkan sebagai media pendingin, air konsumsi dan sanitasi, umpan boiler, serta kebutuhan proses produksi. Penerapan sistem SWRO memungkinkan pabrik memperoleh pasokan air yang mandiri, dengan kualitas dan kontinuitas suplai yang tetap terjaga.

1. Air Proses

Air proses adalah air yang berinteraksi secara langsung dengan bahan baku selama berlangsungnya reaksi maupun operasi peralatan untuk menghasilkan produk, misalnya sebagai pelarut. Pada pabrik sikloheksana, air proses tidak digunakan sehingga unit utilitas tidak perlu menyediakan kebutuhan air jenis ini. Apabila suatu proses memerlukan air dengan kemurnian tinggi, umumnya dilakukan proses demineralisasi untuk menghilangkan hampir seluruh ion terlarut di dalam air sehingga diperoleh air demineralisasi (*deionized water*). Proses demineralisasi dilakukan menggunakan sistem penukar ion (*ion exchange*). Air bersih mula-mula dialirkan ke unit *Cation Exchanger* yang berisi resin asam kuat untuk mengikat ion-ion positif, seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Fe^{2+} , Mn^{2+} , dan Al^{3+} , kemudian menggantinya dengan ion H^+ . Selanjutnya, air dialirkan ke unit *Anion Exchanger* yang berfungsi menukar ion-ion negatif, seperti Cl^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , NO_3^- , dan silika, dengan ion OH^- . Ion H^+ dan OH^- yang terbentuk akan bergabung menghasilkan H_2O , sehingga air keluaran memiliki kandungan mineral yang sangat rendah. Air demineralisasi tersebut kemudian ditampung di dalam tangki penyimpanan sebelum digunakan sesuai kebutuhan proses.

2. Air Pendingin

Air pendingin (*chilled water*) digunakan sebagai media pendingin reaktor (R-01) dan heat exchanger E-04, E-06, E-07, dan E-08 dengan suhu masuk 30°C dan keluar 45°C. Kebutuhan *chilled water* sebesar 355.022,3211 kg/jam diperoleh dari hasil perhitungan beban panas total yang harus diserap oleh media pendingin pada seluruh peralatan proses. Untuk menjaga efektivitas perpindahan panas serta mencegah terjadinya korosi, pembentukan kerak (*scaling*), dan fouling pada peralatan, kualitas air pendingin harus memenuhi persyaratan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.1 berikut:

Tabel 4.1 Syarat Mutu Air Pendingin (ASME Water Quality Standard, 2016)

Parameter	Air Pendingin	
	<i>Circulating Water</i>	<i>Make-up Water</i>
pH	6,5 – 8,2	6,0 – 8,0
Konduktivitas (mS/m)	< 80	< 30
Klorin (mg/l)	< 200	< 50
Sulfat (mg/l)	< 200	< 50
Alkali (mg/l)	< 100	< 50
Total hardness (mg/l)	< 200	< 70
Ca ²⁺ (mg/l)	< 150	< 50
Silica (mg/l)	< 40	< 30

Air pendingin harus memiliki sifat tidak korosif, tidak menimbulkan kerak, serta bebas dari mikroorganisme penyebab lumut. Untuk menjaga kualitas tersebut, air pendingin perlu ditambahkan bahan kimia sebagai berikut:

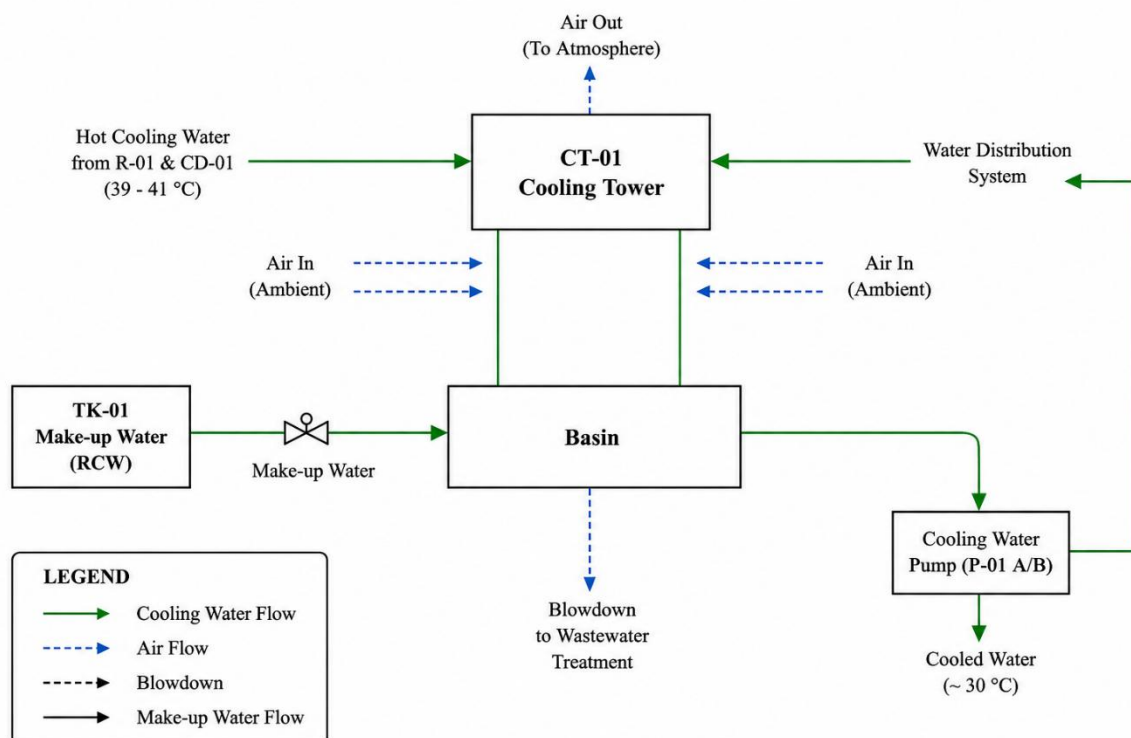
- Trisodium fosfat, mencegah pembentukan kerak,
- Klorin, membunuh mikroorganisme,
- Zat dispersan, mencegah penggumpalan atau pengendapan fosfat.

Kebutuhan air pendingin pada pabrik sikloheksana ini disuplai sebagai air pendingin pada unit pereaksi dan alat penukar panas yang ditunjukkan pada Tabel 4.2 sebagai berikut:

Tabel 4. 2 Kebutuhan Air Pendingin Pabrik Sikloheksana

Nama alat	Kode	Kebutuhan (kg/jam)
Reaktor	R-01	34789,18
Shell and Tube Heat Exchanger 04	E-04	156605,50
Shell and Tube Heat Exchanger 06	E-06	41595,43
Condensor Kolom Distilasi 1	E-07	145,98
Condensor Kolom Distilasi 2	E-08	121886,22
Total		355.022,3211

Alur pengolahan air pendingin pada *cooling tower* disajikan oleh Gambar 4.1 berikut:



Gambar 4.1 Diagram Pengolahan Air Pendingin (*Cooling Water*)

3. Air Umpan Boiler

Air umpan boiler atau *Boiler Feed Water* (BFW) merupakan air hasil pengolahan dengan tingkat kemurnian tinggi yang digunakan sebagai umpan pada sistem boiler. Kualitas BFW harus dijaga agar memenuhi spesifikasi yang dipersyaratkan karena sangat memengaruhi efisiensi operasi dan umur pakai peralatan. Pada pabrik ini, BFW diperoleh dari air laut yang telah diolah pada unit pengadaan air. Selanjutnya, air tersebut dialirkan menuju unit pembangkit steam untuk dipanaskan hingga berubah menjadi uap. Steam yang dihasilkan dimanfaatkan sebagai media pemanas pada reboiler, heat

exchanger, serta peralatan proses lainnya. Agar tidak menimbulkan gangguan selama pengoperasian boiler, kandungan mineral di dalam BFW harus dijaga serendah mungkin sehingga pembentukan kerak dapat dicegah. Selain itu, kapasitas BFW yang disuplai harus disesuaikan dengan kebutuhan steam pada seluruh unit proses. Beberapa aspek penting yang perlu diperhatikan dalam pengelolaan air umpan boiler adalah sebagai berikut:

a. Korosi

Korosi merupakan salah satu permasalahan yang sering dijumpai pada sistem boiler akibat adanya zat-zat yang bersifat korosif di dalam air. Penyebabnya antara lain larutan asam, garam terlarut, padatan tersuspensi, serta gas-gas terlarut seperti O_2 , CO_2 , H_2S , dan NH_3 . Apabila tidak dikendalikan, korosi dapat merusak permukaan logam, menurunkan kekuatan material, serta memperpendek umur pakai boiler dan peralatan pendukungnya.

b. Pembentukan Kerak (*Scale Foaming*)

Kerak terbentuk karena pengendapan senyawa mineral, terutama garam karbonat dan silika, pada permukaan perpindahan panas. Endapan tersebut akan semakin mengeras selama operasi sehingga menghambat perpindahan panas dari sumber panas ke fluida. Akibatnya, efisiensi boiler menurun dan dapat terjadi *local overheating* yang berpotensi menyebabkan kerusakan pada pipa maupun komponen boiler.

c. Pembusaan (*Foaming*)

Pembusaan terjadi akibat adanya senyawa organik atau pengendalian bahan kimia air boiler yang kurang tepat. Terbentuknya busa dapat mempersempit ruang pemisahan uap sehingga butiran air beserta pengotornya ikut terbawa bersama aliran steam (*carryover*). Kondisi ini dapat menurunkan kualitas steam dan mengganggu kinerja peralatan yang menggunakan steam sebagai media pemanas.

Air hasil desalinasi belum dapat langsung digunakan sebagai *boiler feed water* karena kualitasnya masih belum memenuhi spesifikasi yang dipersyaratkan. Oleh sebab itu, air harus melalui proses demineralisasi untuk menghilangkan kandungan mineral terlarut serta deaerasi untuk mengurangi kadar gas-gas terlarut. Pengendalian kualitas BFW menjadi aspek yang sangat penting karena kesalahan dalam proses pengolahan dapat menyebabkan penurunan efisiensi hingga kerusakan pada sistem boiler. Mengacu pada SNI 7268:2009 (S. N. Indonesia & Nasional, 2009) terdapat beberapa parameter

utama yang harus dipenuhi dalam pengawasan kualitas air umpan boiler, yang disajikan pada Tabel 4.3 berikut:

Tabel 4.3 Syarat Air Umpan Boiler (SNI 7268:2009)

Parameter	Satuan	Persyaratan Maksimum
pH (pada 25°C)	(ppm as CaCO_3)	7 s/d 9
Kesadahan	(mg/L)	Maksimum 1
Lemak dan minyak	(mg/L)	0
Oksigen terlarut	(mg/L)	0
Ion klorida (Cl)	(mg/L)	Maksimum 600
Ion fosfat (PO_4^{3-})	(mg/L)	20 s/d 40
Ion sulfit (SO_3)	(mg/L)	10 s/d 50
Hidrasin (N_2H_4)	(mg/L)	0,1 s/d 10
Silica	(ppm as SiO_2)	Maksimal 0,5

Make-up air umpan boiler dipilih 10% dari total air umpan boiler yang tersuplai. Suplai umpan boiler yang digunakan dalam pabrik sikloheksana disajikan pada Tabel 4.4 berikut:

Tabel 4.4 Kebutuhan Umpan Boiler Pabrik Sikloheksana

Nama alat	Kode	Kebutuhan (kg/jam)
Shell and Tube Heat Exchanger 01	E-01	1.948,034383
Shell and Tube Heat Exchanger 03	E-03	2.860,920596
Shell and Tube Heat Exchanger 05	E-05	221,9637927
Reboiler 01	RB-01	0,564251116
Reboiler 02	RB-02	176,5715521
Total		5.208,054575

4. Air Domestik

Air domestik merupakan air yang digunakan untuk memenuhi berbagai kebutuhan sehari-hari di lingkungan pabrik, seperti keperluan air minum, sanitasi, laboratorium, perkantoran, kantin, tempat ibadah, serta fasilitas umum bagi karyawan. Agar aman digunakan dan tidak menimbulkan gangguan kesehatan, air domestik harus memenuhi persyaratan kualitas yang telah ditetapkan. Kualitas air domestik dievaluasi berdasarkan parameter fisik, kimia, dan mikrobiologi sesuai dengan standar baku mutu yang berlaku. Parameter fisik yang menjadi acuan meliputi tingkat kekeruhan, warna, kadar zat padat

terlarut (*total dissolved solids*), suhu, rasa, dan bau. Persyaratan mutu berdasarkan parameter fisik disajikan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Parameter Fisis Standar Baku Mutu Air (Rahmat et al., 2017)

Parameter Wajib	Satuan	Standar Baku Mutu
Kekeruhan	NTU	25
Warna	TCU	50
Zat padat terlarut (<i>total dissolved solid</i>)	mg/L	1.000
Suhu	°C	± 30
Rasa	-	Tidak berasa
Bau	-	Tidak berbau

Selain memenuhi persyaratan fisik, air domestik juga harus memenuhi persyaratan kimia untuk mencegah dampak negatif terhadap kesehatan serta menjaga kualitas air selama digunakan. Beberapa parameter yang menjadi acuan antara lain pH, kandungan besi, fluorida, kesadahan, mangan, nitrat, dan berbagai senyawa kimia lainnya sesuai dengan ketentuan yang berlaku. Batas maksimum setiap parameter ditetapkan agar air tetap aman digunakan sebagai air domestik di kawasan pabrik. Standar baku mutu berdasarkan parameter kimia ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Parameter Kimia Standar Baku Mutu Air (Rahmat et al., 2017)

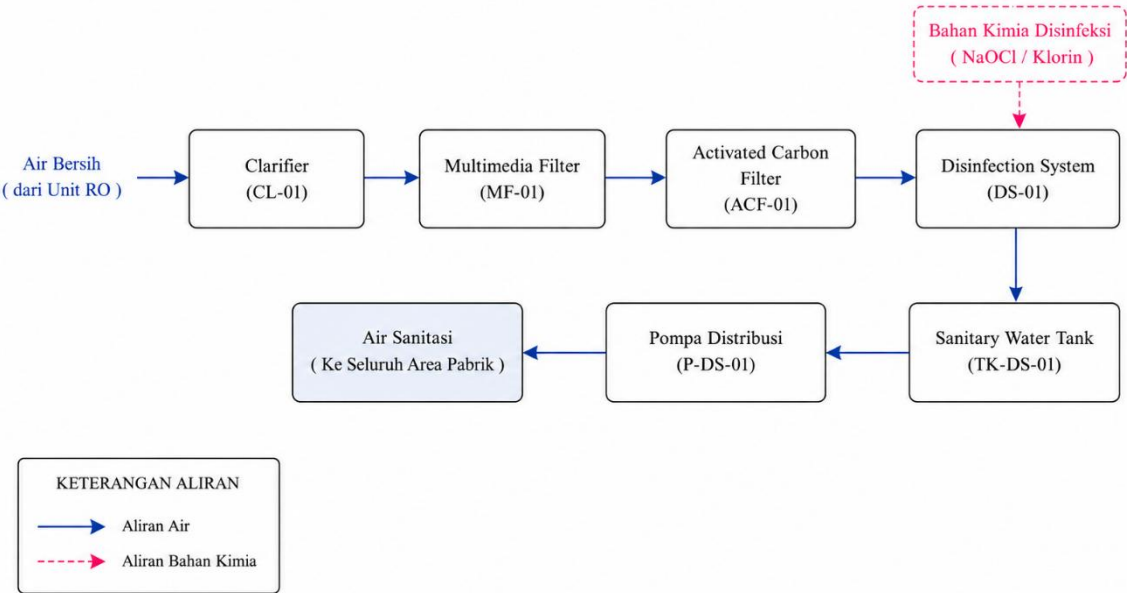
Parameter Wajib	Satuan	Standar Baku Mutu
pH	mg/L	6,5 – 8,5
Besi	mg/L	1
Fluorida	mg/L	1,5
Kesadahan (CaCO ₃)	mg/L	500
Mangan	mg/L	0,5
Nitrat	mg/L	10
Nitrit	mg/L	1
Sianida	mg/L	0,1
Detergen	mg/L	0,05
Pestisida total	mg/L	0,1
Total <i>coliform</i>	CFU/100 mL	50
<i>E. coli</i>	CFU/100 mL	0

Pada pabrik sikloheksana, direncanakan terdapat berbagai fasilitas penunjang untuk memenuhi kebutuhan karyawan. Selain itu kebutuhan air domestik dihitung dengan memperkirakan jumlah karyawan dan tamu kunjungan, sehingga kebutuhan air sanitasi dapat memenuhi 202 orang. Kebutuhan air domestik disajikan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Kebutuhan Air Domestik Pabrik Sikloheksana

Unit	Kebutuhan (kg/jam)
Air konsumsi dan sanitasi	126,25
Laboratorium dan pembersihan	520,833
Hidran dan cadangan	1135,5
Total	1.782,583

Alur pengolahan air domestik disajikan oleh Gambar 4.2 berikut ini.



Gambar 4.2 Alur Pengolahan Air Domestik

5. Air Hidran

Air hidran merupakan cadangan air yang disediakan untuk mendukung sistem proteksi kebakaran di kawasan pabrik. Ketersediaan air hidran bertujuan untuk menjamin pasokan air yang memadai selama proses pemadaman kebakaran sehingga dapat meminimalkan risiko kerusakan fasilitas maupun membahayakan keselamatan pekerja. Kapasitas penyimpanan air hidran ditentukan berdasarkan kebutuhan debit pemadaman dan waktu operasi minimum sesuai standar yang berlaku.

Perhitungan kebutuhan air hidran pada pabrik sikloheksana mengacu pada *Standard for the Installation of Stationary Pumps for Fire Protection (Nfpa ® 20, 2025)*. Berdasarkan standar tersebut, sistem hidran dirancang memiliki debit nominal sebesar 18,925 L/menit dengan waktu operasi minimum selama 30 menit. Dengan demikian, volume minimum tangki penyimpanan air hidran yang diperlukan adalah sebesar 0,56775 m³.

Secara keseluruhan, kebutuhan air pada pabrik sikloheksana kapasitas 150.000 ton/tahun mencakup air pendingin (*cooling water*), air umpan boiler, air domestik, dan air hidran. Jumlah kebutuhan air pabrik sikloheksana sebagai berikut:

Tabel 4.8 Kebutuhan Air Total Pabrik Sikloheksana

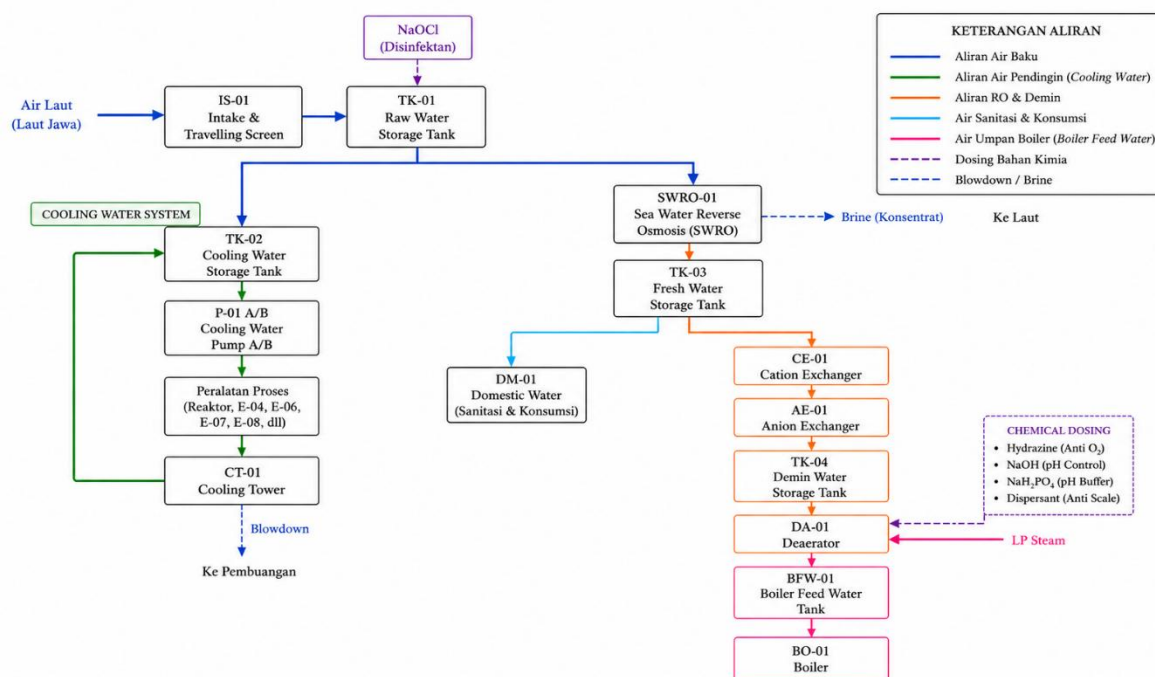
Unit	Kebutuhan Air (m ³ /hari)
Air pendingin	9.410,250188
Air umpan boiler	33,13075681
Air domestik	15,54216867
Air hidran	0,56775
Total (m ³ /hari)	9.459,490863
Total (kg/hari)	9.421.652,9

4.1.2 Pengolahan Air

Pengelolaan air bertujuan menghasilkan air dengan kualitas yang memenuhi spesifikasi untuk setiap kebutuhan di dalam pabrik. Prosesnya meliputi pengolahan fisik, kimia, penambahan disinfektan, maupun penggunaan *ion exchanger*. Air yang digunakan dalam proses industri harus memenuhi beberapa kriteria, antara lain:

- a. Sebagai air pendingin
 - Bebas dari kotoran yang dapat menyebabkan penyumbatan pada pipa maupun peralatan.
 - Tidak mengandung mikroorganisme, zat pencemar, maupun organisme air lainnya.
- b. Sebagai air umpan boiler
 - Bebas dari kotoran yang berpotensi menyumbat aliran pada pipa dan peralatan.
 - Tidak mengandung mikroorganisme, zat pencemar, maupun organisme air lainnya.
 - Tidak mengandung zat yang dapat menimbulkan kerak.
 - Kandungan oksigen berada dalam batas yang diperbolehkan.
 - Kandungan silika sesuai dengan batas yang ditentukan.

Untuk memenuhi seluruh persyaratan tersebut, air baku diolah melalui beberapa tahapan yang meliputi proses fisik, proses kimia, penambahan desinfektan, dan pertukaran ion menggunakan *ion exchanger*. Rangkaian proses pengolahan tersebut menghasilkan air dengan kualitas yang sesuai untuk berbagai kebutuhan utilitas di dalam pabrik. Alur pengolahan air secara umum disajikan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Diagram Alir Pengolahan Utilitas Air Pabrik Siklohekana

1. Unit Desalinasi

Kebutuhan air pendingin, air umpan boiler, serta air untuk keperluan konsumsi dan sanitasi dipenuhi melalui unit desalinasi yang menggunakan teknologi *Reverse Osmosis* (RO). Unit ini dibangun di kawasan yang berdekatan dengan pantai sehingga pengambilan air laut sebagai air baku dapat dilakukan dengan lebih mudah dan efisien.

Air laut yang diperoleh dari saluran pengambilan (*intake*) terlebih dahulu melewati proses *screening* dan *travelling screen* untuk memisahkan sampah, padatan, serta partikel berukuran besar yang berpotensi mengganggu proses selanjutnya. Setelah itu, air dialirkan menuju tangki penampungan. Di dalam tangki tersebut dilakukan injeksi natrium hipoklorit (NaOCl) dengan konsentrasi sekitar 1,7 ppm sebagai upaya menghambat pertumbuhan mikroorganisme dan mencegah terjadinya *biofouling* pada peralatan pengolahan air, khususnya membran RO.

Sebagian air dari tangki penampungan dimanfaatkan sebagai air pendingin pada unit proses. Sistem pendingin yang digunakan adalah *open recirculating cooling system*, di mana air pendingin yang telah menyerap panas dari proses dialirkan menuju

cooling tower untuk didinginkan kembali. Setelah temperatur air turun sesuai kebutuhan, air ditampung dan disirkulasikan kembali ke unit proses sehingga konsumsi air dapat ditekan dan penggunaan air menjadi lebih efisien.

Sisa air dari tangki penampungan selanjutnya diolah pada unit *Reverse Osmosis* (RO). Pada proses ini, air laut dipompa dengan tekanan yang melebihi tekanan osmosis sehingga molekul air dapat melewati membran semipermeabel, sedangkan sebagian besar garam dan zat terlarut tertahan. Hasil pengolahan berupa air bersih (*permeate*) dan larutan berkadar garam tinggi (*brine*) dengan perbandingan sekitar 2:1. Aliran *brine* kemudian dialirkan menuju saluran pembuangan dan dikembalikan ke laut sesuai dengan ketentuan lingkungan yang berlaku. Sementara itu, air bersih ditampung dalam tangki penyimpanan untuk selanjutnya digunakan sebagai air pendingin, air umpan boiler, serta memenuhi kebutuhan konsumsi dan sanitasi di lingkungan pabrik.

2. Unit Demineralisasi

Air tawar yang dihasilkan dari unit desalinasi selanjutnya dialirkan ke unit demineralisasi sebelum dimanfaatkan di dalam pabrik. Sebagian air digunakan untuk kebutuhan konsumsi dan sanitasi, sedangkan sisanya dipersiapkan sebagai air proses dan air umpan boiler. Air yang akan digunakan pada kedua keperluan tersebut harus memenuhi spesifikasi tertentu, seperti tidak mengandung ion penyebab pembentukan kerak, bebas dari senyawa yang bersifat korosif, tidak mengandung mikroorganisme, serta tidak mengandung zat yang dapat menyebabkan pembusaan. Oleh karena itu, diperlukan proses pengolahan lanjutan untuk menghilangkan kandungan ion-ion terlarut sehingga kualitas air memenuhi persyaratan operasi.

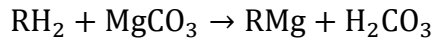
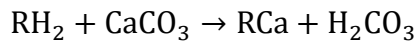
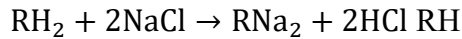
Proses demineralisasi bertujuan menghasilkan air demineral (*deionized water*) melalui mekanisme pertukaran ion (*ion exchange*). Unit ini terdiri atas dua tahap utama, yaitu *cation exchanger* dan *anion exchanger*, yang bekerja secara berurutan untuk menghilangkan ion bermuatan positif maupun negatif dari dalam air. Dengan berkurangnya kandungan ion terlarut, potensi terbentuknya kerak dan terjadinya korosi pada peralatan proses maupun boiler dapat diminimalkan sehingga keandalan operasi pabrik dapat dipertahankan.

a. Cation Exchanger

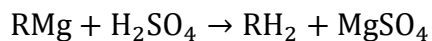
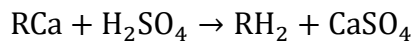
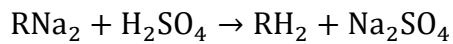
Pada tahap pertama, air dialirkan ke *cation exchanger* yang berisi resin penukar kation. Resin ini berfungsi mengikat ion-ion bermuatan positif, seperti K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , dan Al^{3+} , kemudian menggantikannya dengan ion H^+ yang berasal dari resin. Dengan mekanisme tersebut, kandungan kation di dalam air dapat

dikurangi secara signifikan sebelum memasuki tahap pengolahan berikutnya.

Reaksi pertukaran ion yang terjadi dapat dituliskan sebagai berikut:

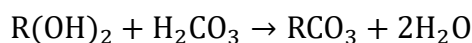
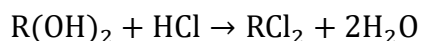
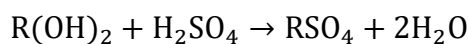


Seiring waktu pemakaian, kapasitas resin akan menurun karena seluruh situs aktifnya telah ditempati oleh ion-ion logam. Kondisi ini menyebabkan resin menjadi jenuh sehingga tidak lagi mampu melakukan proses pertukaran ion secara efektif. Untuk mengembalikan kemampuan resin, dilakukan regenerasi menggunakan larutan asam sulfat (H_2SO_4) sehingga resin kembali ke bentuk semula. Reaksi regenerasi yang berlangsung adalah sebagai berikut:

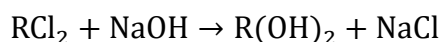
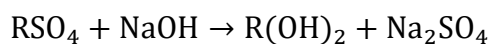


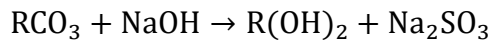
b. Anion Exchanger

Air yang telah melewati *cation exchanger* kemudian diteruskan ke *anion exchanger* untuk menghilangkan ion-ion bermuatan negatif. Ion yang dipisahkan meliputi HCO_3^- , SiO_3^{2-} , Cl^- , NO_3^- , dan CO_3^{2-} . Pada tahap ini, resin anion akan menukar ion-ion tersebut dengan ion OH^- sehingga kandungan anion dalam air berkurang. Ion H^+ yang dihasilkan pada tahap sebelumnya selanjutnya bereaksi dengan ion OH^- membentuk molekul air, sehingga diperoleh air dengan kandungan garam terlarut yang sangat rendah. Reaksi pertukaran ion yang terjadi adalah sebagai berikut:



Seperti halnya resin kation, resin anion juga akan mengalami kejenuhan setelah digunakan dalam jangka waktu tertentu. Oleh sebab itu, regenerasi dilakukan menggunakan larutan natrium hidroksida ($NaOH$) agar resin kembali mengikat ion OH^- dan dapat digunakan kembali. Reaksi regenerasi resin anion ditunjukkan sebagai berikut:





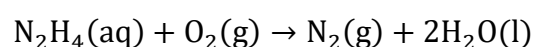
Air yang telah melewati kedua tahap pertukaran ion tersebut memiliki kandungan mineral yang sangat rendah dengan pH berkisar antara 7–8. Selanjutnya, air demineral dialirkan menuju tangki penyimpanan sebelum didistribusikan ke unit proses maupun ke deaerator sebagai tahap persiapan pembentukan *Boiler Feed Water* (BFW). Penggunaan air demineral membantu mengurangi risiko pembentukan kerak, korosi, dan gangguan operasi pada sistem boiler sehingga efisiensi serta umur peralatan dapat dipertahankan.

3. Unit Deaerasi

Air demineral yang dihasilkan dari unit demineralisasi selanjutnya dialirkan menuju deaerator untuk menghilangkan gas-gas terlarut, terutama oksigen (O_2) dan karbon dioksida (CO_2). Keberadaan kedua gas tersebut perlu diminimalkan karena dapat mempercepat laju korosi pada perpipaan, boiler, maupun peralatan proses lainnya. Proses deaerasi dilakukan melalui kombinasi metode mekanis dan kimiawi sehingga kandungan gas terlarut dapat ditekan hingga mencapai batas yang aman. Dengan demikian, kualitas air umpan boiler dapat dipertahankan dan umur operasi peralatan menjadi lebih panjang.

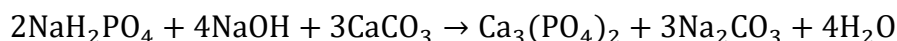
Tahap pertama merupakan proses deaerasi secara mekanis menggunakan *low pressure steam* (LP steam). Steam diinjeksikan ke dalam deaerator sehingga suhu air meningkat dan kelarutan gas di dalam air menurun. Akibatnya, oksigen dan karbon dioksida yang terlarut akan terlepas dari air bersama uap dan dikeluarkan melalui saluran ventilasi deaerator. Melalui proses ini, kadar oksigen terlarut dapat diturunkan hingga sekitar 0,007 ppm, sehingga beban pengolahan pada tahap berikutnya menjadi lebih ringan.

Meskipun sebagian besar oksigen telah dihilangkan secara mekanis, masih terdapat sisa oksigen terlarut yang dapat memicu korosi apabila tidak ditangani lebih lanjut. Oleh karena itu, dilakukan proses deaerasi secara kimia dengan menambahkan hidrazin (N_2H_4) sebagai *oxygen scavenger*. Hidrazin bereaksi dengan oksigen membentuk gas nitrogen dan air sehingga sisa oksigen dapat dihilangkan secara efektif. Reaksi yang terjadi ditunjukkan sebagai berikut:



Selain penambahan hidrazin, larutan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) juga ditambahkan untuk mempertahankan pH air pada kisaran 8,5–9,5. Kondisi pH tersebut penting untuk meminimalkan laju korosi pada sistem boiler sekaligus menjaga

kestabilan operasi. Selanjutnya, natrium dihidrogen fosfat (NaH_2PO_4) diinjeksikan sebagai bahan pengondisi air (*boiler water treatment chemical*) untuk mencegah terbentuknya kerak, terutama yang berasal dari senyawa silika dan kalsium. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:



Sebagai tahap akhir, ditambahkan *dispersant* untuk menjaga partikel padat yang masih terbawa tetap terdispersi sehingga tidak mengalami penggumpalan maupun pengendapan pada permukaan perpipaan dan boiler. Setelah seluruh tahapan pengolahan selesai, air keluaran deaerator telah memenuhi persyaratan sebagai *Boiler Feed Water* (BFW) dan siap didistribusikan ke sistem boiler maupun dimanfaatkan sebagai air proses sesuai kebutuhan pabrik.

4.2 Unit Penyediaan Listrik

Unit penyediaan listrik berfungsi untuk memenuhi kebutuhan energi listrik bagi seluruh kegiatan operasional di pabrik sikloheksana. Energi listrik digunakan untuk mengoperasikan peralatan proses, utilitas, sistem penerangan, serta fasilitas penunjang lainnya. Oleh karena itu, penyediaan listrik harus dirancang agar mampu memasok kebutuhan daya secara kontinu dan andal selama pabrik beroperasi.

4.2.1 Listrik untuk Keperluan Proses dan Utilitas

Listrik untuk keperluan proses dan utilitas digunakan sebagai sumber energi bagi peralatan yang digerakkan oleh motor listrik, seperti pompa, kompresor, agitator, blower, dan peralatan utilitas lainnya. Besarnya kebutuhan listrik ditentukan berdasarkan jumlah peralatan yang beroperasi, daya motor masing-masing peralatan, serta waktu operasinya. Rekapitulasi kebutuhan listrik untuk keperluan proses dan utilitas disajikan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Kebutuhan Listrik Proses dan Utilitas Pabrik Sikloheksana

Alat	Jumlah	Power (HP)	Power (kWh)
C-01	2	512	9163,16
C-02	2	244	4366,81
C-03	2	195	3489,87
P-01	2	5	89,48
P-04	2	5	89,48
P-05	2	1	17,89

P-08	2	5	89,48
P-10	2	5	89,48
P-11	2	1	17,89
P-12	2	5	89,48
P-13	2	5	89,48
P-14	2	10	178,96
P-02	2	15	268,45
P-07	2	10	178,96
Total			17.771,519

4.2.2 Listrik untuk Penerangan

Sistem penerangan di pabrik sikloheksana berfungsi untuk mendukung kelancaran kegiatan operasional serta menciptakan lingkungan kerja yang aman dan nyaman. Penerangan dipasang pada area proses, utilitas, perkantoran, laboratorium, gudang, ruang kontrol, dan fasilitas penunjang lainnya sesuai dengan kebutuhan masing-masing area. Besarnya kebutuhan listrik untuk penerangan dihitung berdasarkan jumlah titik lampu, daya masing-masing lampu, serta lama waktu pengoperasiannya.

1. Listrik untuk Penerangan Dalam Ruangan

Kebutuhan listrik untuk penerangan dalam ruangan (*indoor*) disajikan oleh Tabel 4.10 berikut:

Tabel 4.10 Kebutuhan Listrik untuk Penerangan Dalam Ruangan Pabrik Sikloheksana

Bangunan	Luas (m ²)	Lux (Lumen/sqm)	Lumen
Ruang kendali	100	350	35000
Laboratorium	100	500	50000
Bengkel	300	200	60000
Gudang alat	400	100	40000
Pos penjagaan	50	150	7500
Koperasi karyawan dan kantin	200	200	40000
Kantor induk organisasi	400	350	140000
Kantor bagian produksi	200	350	70000

Bangunan	Luas (m ²)	Lux (Lumen/sqm)	Lumen
Poliklinik	100	300	30000
Kantor LKKK	400	350	140000
Masjid	300	200	60000
Kantor keamanan	20	350	7000
Mess karyawan	300	150	45000
Total	2870		724500

Untuk mengetahui kebutuhan lampu penerangan dan besarnya penggunaan daya alat-alat dalam ruangan, maka dilakukan perhitungan sebagai berikut:

- Lumen output per lampu = 724.500 lumen
- Besaran lumen yang digunakan = 1.650 lumen
- Kebutuhan lampu = $\frac{724.500}{1.650}$
= 464 lampu
- Daya lampu = 14,5 watt
- Kebutuhan daya lampu = 6728 watt
= 161,472 kW (selama 24 jam)

2. Listrik untuk Penerangan Luar Ruangan

Kebutuhan listrik untuk penerangan dalam ruangan (*outdoor*) disajikan oleh Tabel 4.11 berikut:

Tabel 4.11 Kebutuhan Listrik untuk Penerangan Luar Ruangan Pabrik Sikloheksana

Bangunan	Luas (m ²)	Lux (Lumen/sqm)	Lumen
Parkir	400	20	8000
Pembangkit listrik	200	100	20000
Panel-panel instrumen	100	300	30000
Area proses pabrik	10700	100	1070000
Utilitas dan pengolahan limbah	3500	75	262500
Lahan perluasan	11300	10	113000
Jalan dan taman	500	20	10000
Total	26700		1503500

Untuk mengetahui kebutuhan lampu penerangan dan besarnya penggunaan daya alat-alat luar ruangan, maka dilakukan perhitungan sebagai berikut:

- Lumen output per lampu = 1.503.500 lumen

- Besaran lumen yang digunakan = 5.000 lumen
- Kebutuhan lampu = $\frac{1.503.500}{5.000}$
= 301 lampu
- Daya lampu = 50 watt
- Kebutuhan daya lampu = 15.050 watt
= 180,6 kW (selama 12 jam)

4.2.3 Listrik untuk AC

Air conditioner (AC) pada pabrik sikloheksana digunakan sebagai pendingin ruangan untuk menjaga kenyamanan dan produktivitas tenaga kerja serta mempertahankan kondisi lingkungan kerja agar sesuai dengan standar keselamatan dan kesehatan kerja (K3). Kebutuhan listrik untuk AC dihitung berdasarkan jumlah unit AC yang digunakan, sebagai berikut:

- PK AC yang digunakan = 2 PK
- Luas yang dapat didinginkan = 36 m²
- Daya AC 2 PK = 5,275 kW

Kebutuhan listrik untuk *air conditioner* pada pabrik sikloheksana disajikan pada Tabel 4.12 berikut:

Tabel 4.12 Kebutuhan Listrik Air Conditioner (AC) Pabrik Sikloheksana

Ruangan	Luas (m ²)	Kebutuhan Pendingin	Total Daya (kW)
Ruang kendali	100	3	379,8
Laboratorium	100	3	379,8
Pos penjagaan	50	2	253,2
Koperasi karyawan dan kantin	200	6	759,6
Kantor organisasi	400	12	1519,2
Kantor bagian produksi	200	6	759,6
Poliklinik	100	3	379,8
Kantor LKKK	400	12	1519,2
Masjid	300	9	1139,4
Mess karyawan	300	9	1139,4
Total	2150		8229

4.2.4 Listrik untuk Laboratorium, Instrumentasi, *Workshop*, *Waste Water Treatment*, dan *Fire System*

Listrik untuk laboratorium, instrumentasi, *workshop*, *waste water treatment* (WWT), dan *fire system* merupakan kebutuhan listrik untuk fasilitas penunjang operasional pabrik. Kebutuhan listrik masing-masing fasilitas dihitung berdasarkan jenis peralatan yang digunakan, daya peralatan, serta waktu operasinya. Rincian kebutuhan listrik pada setiap fasilitas dijabarkan pada poin berikut:

1. Laboratorium

Kebutuhan listrik pada laboratorium untuk analisis kualitas bahan baku dan produk disajikan pada Tabel 4.13 berikut:

Tabel 4.13 Kebutuhan Listrik Laboratorium Pabrik Sikloheksana

Peralatan	Fungsi	Jumlah	Daya (W)	Total daya (kW)
Gas chromatograph (GC–FID/TCD)	Analisis kemurnian benzena, cyclohexane, dan impuritas	1	1500	36
Density meter	Pengukuran densitas produk	1	50	1,2
Automatic flash point tester	Pengujian titik nyala cyclohexane	1	1000	24
Distillation apparatus (ASTM D86)	Analisis rentang titik didih	1	1200	28,8
Karl fischer moistur titrator	Analisis kadar air	1	150	3,6
pH meter	Analisis air utilitas & limbah	1	20	0,48
Conductivity meter	Analisis cooling water dan boiler water	1	20	0,48
Analytical balance	Penimbangan sampel	2	30	1,44
Drying oven	Pengeringan sampel	1	2000	48
Hot plate magnetic stirrer	Preparasi sampel	2	500	24

Peralatan	Fungsi	Jumlah	Daya (W)	Total daya (kW)
Fume hood	Penanganan benzena dan pelarut	1	750	18
Refrigerator	Penyimpanan bahan kimia	1	250	6
Komputer	Akuisisi data GC dan administrasi	3	150	10,8
Printer	Dokumentasi hasil analisis	2	100	4,8
Total		19	7720	207,6

2. Instrumentasi

Kebutuhan listrik instrumentasi pada pabrik sikloheksana disajikan dalam Tabel 4.14 berikut:

Tabel 4.14 Kebutuhan Listrik Instrumentasi Pabrik Sikloheksana

Peralatan	Jumlah	Daya	Total Daya (kW)
DCS Server	2	1,5	72
HMI workstation	4	1,5	144
PLC panel	10	1,5	360
UPS	2	1,5	72
Network switch	5	1,5	180
Analyzer cabinet	3	1,5	108
Marshalling panel	2	1,5	72
Instrument power supply (24 VDC)	2	1,5	72
Field instrument (FT, PT, LT, TT, Analyzer, dll)	250	1,5	9000
Total			10080

3. Workshop

Kebutuhan listrik pada *workshop* atau bengkel pabrik sikloheksana disajikan pada Tabel 4.15 berikut:

Tabel 4.15 Kebutuhan Listrik Workshop Pabrik Sikloheksana

Peralatan	Daya (W)	Total Daya (kW)
Mesin las	5	120
Gerinda	1	24

Bor bubut	1	24
Kompresor udara ukuran kecil	2	48
Mesin potong	2	48
Total		264

4. *Waste Water Treatment*

Kebutuhan listrik pada area *waste water treatment* pabrik sikloheksana disajikan pada Tabel 4.16 berikut:

Tabel 4.16 Kebutuhan Listrik *Waste Water Treatment* Pabrik Sikloheksana

Peralatan	Daya (W)	Total Daya (kW)
Mixer	2	48
Blower	3	72
Dosing pump	1	24
Panel	1	24
Total		168

5. *Fire System*

Kebutuhan listrik untuk *fire system* pada pabrik sikloheksana disajikan pada Tabel 4.17 berikut:

Tabel 4.17 Kebutuhan Listrik *Fire System* Pabrik Sikloheksana

Peralatan	Daya (W)	Total Daya (kW)
<i>Fire alarm control panel</i>	0,5	12
<i>Emergency lighting</i>	1	24
CCTV	0,8	19,2
<i>Access control</i>	0,2	4,8
Total		60

4.2.5 Listrik untuk Alat-alat Elektronik

Peralatan elektronik merupakan fasilitas pendukung yang digunakan untuk menunjang kegiatan administrasi dan operasional di lingkungan pabrik. Kebutuhan listrik untuk peralatan elektronik dihitung berdasarkan jumlah unit, daya masing-masing peralatan, serta waktu operasinya. Rekapitulasi kebutuhan listrik untuk peralatan elektronik disajikan pada Tabel 4.18 berikut:

Tabel 4.18 Kebutuhan Listrik untuk Alat-alat Elektronik Pabrik Sikloheksana

Peralatan	Jumlah	Daya (W)	Total Daya (kW)
Komputer	40	150	144
Printer	10	400	96
Dispenser	10	350	84
Server/wifi	10	100	24
Total			348

Secara keseluruhan, kebutuhan listrik pabrik sikloheksana mencapai 21.033,034 kW atau 21,03 MW per harinya. Apabila dihitung satu tahun operasi, maka total kebutuhan listrik adalah 6.940,901 MW. Kebutuhan listrik tersebut disuplai oleh PLN Nusantara Power UP PLTU Tanjung Awar-awar Tuban yang hanya berjarak 18 km dari lokasi pendirian pabrik. Untuk cadangan apabila terjadi gangguan suplai listrik, maka digunakan *gas turbine generator* (GTG) dengan efisiensi 40%, sehingga kapasitas *output* yang dihasilkan sebesar 37.500 kJ/s. Generator yang dipilih memiliki kapasitas sebesar 15 MW dan berjumlah 1 buah. Kebutuhan total listrik pada pabrik sikloheksana disajikan pada Tabel 4.19 berikut:

Tabel 4.19 Total Kebutuhan Listrik Pabrik Sikloheksana per Hari

Peruntukkan	Daya (kW)
Peralatan proses	18.218,939
Listrik penerangan <i>indoor</i>	161,472
Listrik penerangan <i>outdoor</i>	180,6
Pendingin (AC)	8229
Laboratorium	207,6
Instrumentasi	10080
<i>Workshop</i>	264
<i>Waste water treatment</i>	168
<i>Fire system</i>	60
Kantor	348
Kebutuhan lainnya	10
Total	37.927,611

4.3 Unit Pengadaan *Steam*

Steam digunakan sebagai media pemanas pada berbagai unit perpindahan panas yang terdapat pada pabrik sikloheksana kapasitas 150.000 ton/tahun. *Steam* yang dipasok berupa *superheated High Pressure Steam* (HPS) keluaran reboiler yang bersuhu 310°C bertekanan 75 barg yang akan diturunkan tekanannya untuk menghasilkan *Medium Pressure Steam* (MPS) dan *Low Pressure Steam* (LPS) yang digunakan untuk unit perpindahan panas yang berbeda-beda. Tabel 4.20 menyajikan alat-alat pada pabrik yang memerlukan pasokan *steam*:

Tabel 4.20 Kebutuhan *Steam* Pabrik Sikloheksana

Alat	Kode	Jenis <i>Steam</i>	Suhu <i>Steam</i> (°C)	Tekanan <i>Steam</i> (barg)	Kebutuhan <i>Steam</i> (kg/jam)
Vaporizer	E-01	<i>Low pressure steam</i>	152	4	1.948,034383
<i>Shell and tube heat exchanger (feed heater to reactor)</i>	E-03	<i>High pressure steam</i>	280	63	2.860,920596
<i>Shell and tube heat exchanger (feed heater to distillation)</i>	E-05	<i>Low pressure steam</i>	12,42	1	221,9637927
Reboiler – 01	RB-01	<i>Low pressure steam</i>	143,732	3	0,564251116
Reboiler – 02	RB-02	<i>High pressure steam</i>	274,507	58	176,5715521
Total					5.208,054575

Untuk memenuhi kebutuhan jenis *steam* dari kondisi *High Pressure Steam* (HPS) digunakan *Pressure Reducing Valve* (PRV), yaitu katup yang berfungsi menurunkan tekanan *steam* melalui proses *throttling* (pencekikan aliran) tanpa disertai kerja mekanis maupun perubahan entalpi yang signifikan (proses isentalpik). Pada proses *throttling*, penurunan tekanan menyebabkan *steam* yang semula berada pada kondisi *superheated* bergerak mendekati kondisi *saturated* (jenuh), sehingga diperlukan sistem *desuperheater* berupa injeksi air (*spray water*) untuk mengondisikan suhu *steam* keluaran agar sesuai dengan spesifikasi

suhu dan tekanan yang dibutuhkan pada masing-masing unit proses. PRV dipilih pada prarancangan pabrik ini karena konstruksinya sederhana, biaya investasi rendah, dan mudah dikendalikan, sehingga lebih sesuai untuk skala pabrik ini dibandingkan *letdown turbine* yang meski mampu memanfaatkan energi tekanan *steam* menjadi kerja poros, memerlukan investasi jauh lebih besar dan lebih cocok diterapkan pada pabrik berskala besar dengan sistem *cogeneration*, di mana pabrik mampu memproduksi *steam* dan listrik sekaligus.

4.4 Unit Pengadaan Bahan Bakar

Unit penyediaan bahan bakar berfungsi memenuhi kebutuhan energi boiler untuk menghasilkan *steam* yang didistribusikan ke unit-unit proses. Ketersediaan bahan bakar yang kontinu dan berkualitas sangat menentukan efisiensi pembakaran serta kestabilan operasi boiler, sehingga pemilihannya perlu mempertimbangkan aspek teknis, ekonomis, dan lingkungan.

Bahan bakar yang digunakan pada prarancangan pabrik ini adalah gas alam, karena memiliki nilai kalor pembakaran (*heating value*) yang tinggi dan menghasilkan pembakaran yang lebih bersih dibandingkan bahan bakar padat atau cair. Gas alam dipasok langsung melalui jaringan perpipaan oleh PT Trans Pacific Petrochemical Indotama (TPPI) yang berlokasi berdekatan dengan pabrik, sehingga distribusi lebih mudah, biaya logistik lebih rendah, dan tidak memerlukan tangki penyimpanan berkapasitas besar seperti pada bahan bakar minyak.

Kandungan metana (CH_4) yang tinggi membuat gas alam terbakar lebih sempurna dengan kebutuhan udara berlebih (*excess air*) yang lebih rendah, sehingga efisiensi termal boiler meningkat. Kandungan sulfur dan pengotornya juga jauh lebih rendah dibandingkan batu bara atau minyak bakar, sehingga emisi SO_x dan partikulat lebih rendah dan lebih mudah memenuhi baku mutu lingkungan. Selain itu, laju alir gas dapat dikontrol secara presisi melalui katup, sehingga rasio udara-bahan bakar mudah disesuaikan dengan perubahan beban boiler tanpa memerlukan sistem penanganan mekanis seperti pada bahan bakar padat atau cair. Pemilihan gas alam sebagai bahan bakar boiler didasarkan pada:

- a. Nilai kalor tinggi dan pembakaran yang lebih sempurna, sehingga efisiensi termal boiler lebih baik.
- b. Kemudahan distribusi dari TPPI yang berlokasi berdekatan dengan pabrik, sehingga menekan biaya logistik dan menjamin kontinuitas pasokan.
- c. Emisi lebih rendah karena kandungan sulfur dan pengotor yang minim, sehingga lebih ramah lingkungan dan sesuai baku mutu emisi,

- d. Gas alam dapat langsung disalurkan menggunakan pipa, sehingga tidak memerlukan tempat penyimpanan tambahan.

Pada boiler, untuk mampu menghasilkan *superheated steam* bertekanan 75 barg dengan suhu air masuk 30°C dan keluar 310°C diperlukan sejumlah energi panas tertentu yang harus dipasok melalui pembakaran bahan bakar gas alam. Besarnya kebutuhan energi ini ditentukan berdasarkan jumlah panas yang diserap air selama proses pemanasan sensibel, penguapan, hingga pemanasan lanjut (*superheating*), sehingga dari nilai tersebut dapat dihitung kebutuhan bahan bakar gas alam yang harus disuplai agar target kapasitas dan kondisi *steam* yang diinginkan dapat tercapai. Perhitungan kebutuhan bahan bakar tersebut diuraikan sebagai berikut:

1. Nilai *Low Heating Value* (LHV) Gas Alam

Tabel 4.21 Perhitungan Nilai *Low Heating Point* Gas Alam Sebagai Bahan Bakar

Komponen	% mol	Massa	Entalphy of Combustion	Low Heating Value (kJ/kg)	Q (kJ)
Nitrogen	2,6	72,826	0	0	
Karbon dioksida	15,18	668,0718	0	0	
Etana	2,59	77,8813	-1,42864	47510,47556	3700177,6
Propana	2,52	111,132	-2,04311	46329,02494	5148637,2
Isobutana	0,52	30,2224	-2,64895	45577,25396	1377454
n-Butana	0,51	29,6412	-2,65732	45721,26635	1355233,2
Isopentana	0,31	22,3665	-3,23954	44900,0693	1004257,4
n-Pentana	0,31	22,3665	-3,24494	44974,91337	1005931,4
n-Heksana	0,45	38,781	-3,8551	44733,11673	1734795
Metana	75,39	1209,40638	-0,80262	50032,41491	60509521,8

Nilai *Entalphy of Combustion* diperoleh dari Perry (2008), sehingga, LHV campuran gas alam adalah:

$$\begin{aligned}
 \text{LHV}_{\text{campuran}} &= \frac{\sum Q}{\sum \text{massa}} \\
 &= \frac{75836007,6}{2282,69508} \\
 &= 33222,13653 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

2. Kebutuhan Gas Alam untuk Reboiler

$$\text{- Massa steam} = 9293041,026 \text{ kJ/jam}$$

- Efisiensi reboiler = 85%

Sehingga, kebutuhan gas alam untuk boiler dapat dihitung:

$$\begin{aligned}
 m_{\text{gas alam}} &= \frac{Q_{\text{steam}}}{\eta \times \text{LHV}} \\
 &= \frac{9293041,026}{85\% \times 33222,13653} \\
 &= 329,08 \text{ kg/jam} \\
 &= 7,898 \text{ ton/hari} \\
 &= 2606,372 \text{ ton/tahun}
 \end{aligned}$$

3. Kebutuhan Gas Alam untuk Generator

Generator digunakan sebagai cadangan daya pabrik apabila PLN mengalami gangguan, sehingga proses produksi tidak terdampak sementara. Untuk memenuhi daya darurat, generator mampu menyuplai sekitar 40% dari total kebutuhan daya listrik harian sebesar 37,9 MW. Berikut merupakan spesifikasi generator dan perhitungannya:

- Jenis generator = gas turbine generator
- Kapasitas generator = 15 MW
- Fase generator = 3 phase AC
- Frekuensi = 50 Hz
- Tegangan keluaran = 6,6 kV
- Efisiensi = 40%

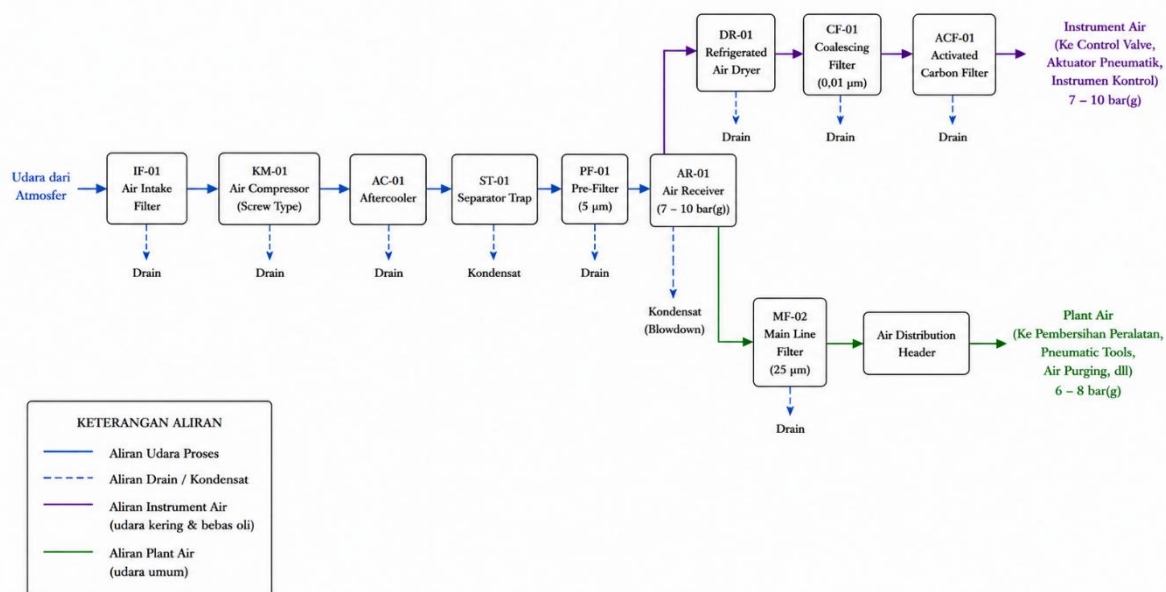
Sehingga, kebutuhan gas alam untuk generator dapat dihitung:

$$\begin{aligned}
 \text{Kebutuhan energi bahan bakar} &= \frac{\text{Power}}{\text{Efisiensi}} \\
 &= \frac{15}{40\%} \\
 &= 37,5 \text{ MW} \\
 &= 37.500 \text{ kJ/s}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m_{\text{gas alam}} &= \frac{Q_{\text{fuel}}}{\text{LHV}} \\
 &= \frac{37500}{33222,13653} \\
 &= 1,1287 \text{ kg/s} \\
 &= 4063,5556 \text{ kg/jam} \\
 &= 4,0635 \text{ ton/jam} \\
 &= 97,52533 \text{ ton/hari} \\
 &= 32.183,36061 \text{ ton/tahun}
 \end{aligned}$$

4.5 Unit Pengadaan Udara Tekan

Udara tekan merupakan salah satu utilitas krusial pada sebuah pabrik yang digunakan untuk menggerakkan instrumen kontrol pneumatik maupun untuk keperluan umum seperti pembersihan peralatan. Berbeda dari utilitas lain yang sifatnya dikonsumsi habis oleh proses, udara tekan bersifat sebagai media kerja yang harus tersedia secara kontinu dan tanpa gangguan, karena kegagalan pasokannya dapat langsung menyebabkan *valve* kontrol gagal beroperasi dan berpotensi memicu *shutdown* darurat pada unit-unit kritis seperti reaktor hidrogenasi maupun kolom distilasi ekstraktif. Alur penyediaan udara tekan disajikan oleh Gambar 4.4 berikut:



Gambar 4.4 Alur Penyediaan Udara Tekan

1. Instrument Air

Instrument air digunakan untuk menggerakkan *control valve*, aktuator pneumatik, dan instrumen kontrol lainnya yang tersebar di seluruh area proses. Prinsip kerjanya memanfaatkan tekanan udara sebagai media penggerak: sinyal kontrol dari sistem DCS (*Distributed Control System*) diterjemahkan menjadi sinyal tekanan udara yang dikirim ke aktuator valve, sehingga *valve* dapat membuka atau menutup sesuai perintah tanpa memerlukan tenaga listrik langsung di titik *valve* tersebut. Pendekatan pneumatik ini dipilih terutama karena pertimbangan keselamatan, mengingat penggunaan motor listrik konvensional di area yang mengandung bahan mudah terbakar seperti hidrogen dan benzena berisiko menimbulkan percikan api yang dapat memicu ledakan.

Instrument air berperan langsung dalam menjaga kestabilan dan keselamatan operasi, kualitas udara yang dipasok harus memenuhi standar ketat agar tidak menyebabkan korosi, pembekuan, maupun kontaminasi pada komponen pneumatik. Standar acuan yang umum digunakan adalah ANSI/ISA-7.0.01-1996, yang mensyaratkan pressure dew point minimal 10°C di bawah suhu ambien terendah lokasi pabrik, ukuran partikel maksimum 40 mikron, serta kadar oli maksimum 1 ppm agar tidak merusak komponen internal aktuator dan control valve yang presisi. Perhitungan kebutuhan udara tekan sebagai berikut:

- *Control valve* = 17 buah
- Suplai udara = 1,7 m³/jam
- Faktor keamanan = 15%

Maka, kebutuhan udara tekan dapat dihitung:

$$Q_{total} = (17 \times 1,7) \times 115\%$$

$$= 33,235 \text{ m}^3/\text{jam}$$

Dari perhitungan tersebut diperoleh kebutuhan udara tekan pabrik sikloheksana per tahun sebesar 263.261,2 m³/tahun dengan kebutuhan spesifik sebesar 1,755 m³ udara/ton sikloheksana.

2. *Utility Air*

Berbeda dengan *instrument air* yang kualitasnya harus sangat kering dan bebas oli, *plant air* digunakan untuk keperluan umum seperti pembersihan peralatan (*air purging*), *pneumatic tools* di bengkel *maintenance*, serta udara pembersih pada area kerja tertentu, sehingga persyaratan kualitasnya jauh lebih longgar dan tidak memerlukan pengeringan hingga *dew point* serendah *instrument air*. Meskipun persyaratannya lebih longgar, pasokan *plant air* tetap perlu direncanakan dengan kapasitas kompresor yang memadai agar tidak mengganggu ketersediaan *instrument air*, mengingat kedua jenis udara tekan ini umumnya berasal dari sistem kompresor yang sama sebelum dipisahkan jalurnya, dengan *instrument air* melalui proses pengeringan tambahan sementara *plant air* langsung didistribusikan dari *air receiver* tanpa perlakuan khusus.

4.6 Unit Pengolahan Limbah

Unit ini bertugas mengolah seluruh limbah pabrik sikloheksana, baik cair, padat, dan B3 dari hulu ke hilir agar aman dilepaskan ke lingkungan atau ditangani sesuai ketentuan yang berlaku sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan.

1. Pengolahan Limbah Cair

Limbah cair yang dihasilkan oleh pabrik sikloheksana ini merupakan campuran sisa proses kimia bertekanan tinggi, seperti *blowdown boiler*, *purge* dari sistem regenerasi sulfolane, air pendingin bekas, hingga limbah domestik karyawan. Pengelolaan limbah cair harus memenuhi baku mutu air limbah, sebagaimana diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (Laut et al., 2018) tentang Baku Mutu Air Limbah, yang menetapkan parameter wajib ukur, seperti pH, COD, BOD, TSS, dan minyak – lemak untuk sektor industri kimia. Berikut merupakan tahapan dan fungsi pengolahan limbah cair yang terdapat pada pabrik sikloheksana yang disajikan pada Tabel 4.22:

Tabel 4.22 Tahap Pengolahan Limbah Cair Pabrik Sikloheksana

Tahapan	Fungsi	Unit/Metode
Pra-pengolahan	Menyaring padatan kasar dan meredam fluktuasi beban.	Bar <i>screen</i> dan bak ekualisasi.
Primer	Memisahkan padatan tersuspensi dan minyak secara fisik.	Tangki sedimentasi dan API <i>oil – water separator</i> .
Sekunder	Menguraikan bahan organik terlarut secara biologis.	<i>Activated sludge</i> (bakteri aerob dan aerasi).
Tersier	Menghilangkan polutan sisa yang belum terurai.	Filtrasi lanjutan dan adsorpsi karbon aktif.
Disinfeksi	Membunuh mikroorganisme patogen.	Klorinasi atau penyinaran UV.
Pengolahan lumpur	Mengurangi volume dan kadar air pada lumpur.	<i>Thickening</i> dan <i>dewatering</i> (<i>belt press</i> atau <i>centrifuge</i>).

Dikarenakan efluen akhir akan dibuang ke badan air laut, perusahaan juga perlu memenuhi ketentuan dumping limbah ke laut sebagaimana diatur dalam (Laut et al., 2018) tentang Persyaratan dan Tata Cara Dumping (Pembuangan) Limbah ke Laut, sebagaimana telah diubah dengan Permen LHK No. P.20/2020, yang mensyaratkan izin dumping tersendiri di luar izin pembuangan air limbah biasa.

2. Pengolahan Limbah Padat dan B3

Limbah padat dan B3 pabrik ini terutama berasal dari katalis Ni/Al₂O₃ bekas, lumpur IPAL, dan kemasan bekas bahan kimia. Payung hukum utamanya adalah (Hidup, 2021) tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup

(menggantikan PP No. 101 Tahun 2014), dengan aturan teknis pelaksanaannya diatur lebih rinci dalam (Lingkungan et al., 2021) tentang Tata Cara dan Persyaratan Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun. Berikut merupakan jenis limbah dan penanganannya yang disajikan pada Tabel 4.23:

Tabel 4.23 Jenis Limbah Pabrik Sikloheksana dan Penanganannya

Jenis Limbah	Karakteristik	Penanganan
Katalis Ni/Al ₂ O ₃ bekas	B3 (kandungan logam Ni)	TPS B3 berizin atau disalurkan ke pihak ketiga untuk dilakukan regenerasi atau pemusnahan.
Lumpur IPAL	Ditentukan oleh uji TCLP untuk mengetahui kandungan logam berat dan senyawa organik beracun.	Dilakukan melalui <i>dewatering</i> pada TPS B3 (apabila limbah tidak memenuhi persyaratan) atau non B3.
Kemasan bekas bahan kimia	B3 (residu bahan kimia)	Ditampung pada TPS B3 atau diserahkan kepada pihak ketiga.
Sampah domestik	Non B3	Sistem pengolahan sampah umum.

Berdasarkan (Lingkungan et al., 2021), fasilitas TPS B3 wajib berupa bangunan tertutup dengan lantai kedap air dan tidak bergelombang, dilengkapi sistem drainase serta bak penampung tumpahan, dan setiap kemasan limbah B3 wajib diberi simbol dan label sesuai ketentuan. Masa simpan limbah B3 di TPS juga dibatasi antara 90 hingga 365 hari tergantung kategori limbahnya, sehingga penyerahan ke pihak ketiga berizin harus dilakukan sebelum batas waktu tersebut terlampaui, disertai dokumen manifest sebagai bukti rantai pertanggungjawaban.

4.7 Unit Pengendalian Pencemaran Air dan Udara

Unit ini bertugas mengendalikan emisi dan buangan dari proses produksi agar tetap berada dalam ambang batas yang dipersyaratkan, sebelum dilepaskan ke lingkungan. Berbeda dari unit pengolahan limbah pada subbab sebelumnya yang berfokus pada pengolahan limbah secara

umum, unit ini lebih menitikberatkan pada peralatan pengendalian spesifik untuk mencegah pencemaran udara dan air pada sumber-sumber emisi utama pabrik.

1. Pengendalian Pencemaran Air

Air limbah proses, terutama yang berpotensi mengandung sisa hidrokarbon dan sulfolane dari sistem distilasi ekstraktif, perlu melalui tahapan pengendalian sebelum masuk ke unit pengolahan biologis maupun dibuang ke badan air. Berikut unit pengendalian air yang terdapat pada pabrik sikloheksana yang disajikan pada Tabel 4.24:

Tabel 4.24 Pengendalian Air Pabrik Sikloheksana

Unit Pengendalian	Fungsi	Prinsip Kerja
API <i>oil – water</i> separator	Memisahkan minyak atau hidrokarbon bebas dari air limbah.	Gravitasi, memanfaatkan perbedaan berat jenis minyak dan air (Hukum Stokes).
Bak ekualisasi (<i>equalization tank</i>)	Meredam fluktuasi debit dan konsentrasi limbah harian.	Pencampuran limbah dari berbagai sumber sebelum dioleh lebih lanjut.
Unit netralisasi pH	Menjaga pH efluen sesuai baku mutu (6 – 9).	Penambahan asam atau basa terkontrol berdasarkan pembacaan pH meter.
Titik pemantauan sebelum <i>outfall</i>	Memastikan efluen akhir memenuhi baku mutu sebelum dibuang ke laut.	Sampling dan analisis parameter kunci (pH, COD, BOD, TSS, dan minyak secara berkala).

API *oil-water separator* biasanya ditempatkan sebagai unit pengendalian *awal (pre-treatment)* sebelum air limbah masuk ke unit pengolahan biologis yang lebih lanjut, karena kandungan minyak bebas dapat mengganggu kinerja mikroorganisme pengurai pada tahap berikutnya.

2. Pengendalian Pencemaran Udara

Sumber emisi udara utama pada pabrik ini berasal dari gas buang boiler (hasil pembakaran bahan bakar gas alam), gas berlebih dari reaktor dan sistem *relief valve*, serta uap hidrokarbon yang berpotensi lepas dari *venting* maupun kebocoran peralatan. Pengendaliannya dilakukan lewat beberapa unit berikut yang disajikan pada Tabel 4.25:

Tabel 4.25 Pengendalian Pencemaran Udara Pabrik Sikloheksana

Unit Pengendalian	Fungsi	Prinsip Kerja
-------------------	--------	---------------

Sistem flare (<i>flare stack</i>)	Membakar gas buang lebih dari <i>relief valve</i> atau kondisi darurat secara aman.	Gas dialirkan lewat <i>flare header</i> ke <i>knock-out drum</i> (memisahkan cairan dari gas), lalu ke <i>liquid seal drum</i> (mencegah <i>flashback</i>), dan dibakar di <i>flare tip</i> yang dilengkapi <i>flame arrester</i> dan <i>pilot burner</i> .
<i>Leak Detection and Repair</i> (LDAR)	Mendeteksi dan memperbaiki kebocoran <i>fugitif</i> dari <i>flange, valve, seal</i> pompa.	Pemindaian rutin memakai gas detektor portabel pada titik-titik rawan bocor.
<i>Scrubber</i> gas buang boiler	Menurunkan kadar SOx atau partikulat dari gas buang boiler.	Gas buang dikontakkan dengan larutan penyerap (umumnya basa) dalam menara scrubber.
<i>Dust collector</i> atau <i>bag filter</i>	Menangkap debu katalis saat <i>loading</i> atau <i>unloading</i> reaktor.	Udara mengandung debu dilewatkan melalui filter kain berpori halus.

Sistem flare menjadi unit pengendalian udara terpenting pada pabrik ini mengingat sifat gas hidrogen dan hidrokarbon ringan yang mudah terbakar; standar acuan yang umum digunakan untuk desain sistem ini adalah API 521 tentang *Pressure-Relieving and Depressuring Systems*.

4.8 Laboratorium

Laboratorium pada pabrik sikloheksana berfungsi sebagai unit pendukung yang bertanggung jawab memastikan mutu bahan baku, produk, serta hasil pengelolaan limbah tetap sesuai spesifikasi dan baku mutu yang dipersyaratkan sepanjang siklus produksi. Keberadaan laboratorium menjadi krusial mengingat proses hidrogenasi benzena menjadi sikloheksana sangat sensitif terhadap kemurnian bahan baku, di mana pengotor sekecil apa pun pada benzena maupun hidrogen dapat menurunkan aktivitas katalis Ni/Al₂O₃ atau menyebabkan produk akhir tidak memenuhi spesifikasi pasar.

Secara kelembagaan, laboratorium pabrik dirancang mengacu pada prinsip kompetensi laboratorium pengujian sebagaimana diatur dalam SNI ISO/IEC 17025:2017, standar yang menetapkan persyaratan umum kompetensi laboratorium pengujian dan kalibrasi di Indonesia melalui Komite Akreditasi Nasional (KAN). Meskipun tidak seluruh laboratorium internal

pabrik wajib terakreditasi secara resmi, penerapan prinsip-prinsip ISO/IEC 17025 seperti penggunaan metode uji baku, kalibrasi alat secara berkala, dan validasi metode tetap penting diterapkan agar hasil analisis dapat dipercaya dan konsisten dari waktu ke waktu.

Laboratorium pada pabrik ini terbagi menjadi beberapa area kerja sesuai jenis analisisnya, yaitu laboratorium analisis bahan baku dan produk (menggunakan instrumen seperti kromatografi gas untuk analisis kemurnian), laboratorium lingkungan (untuk analisis limbah cair dan emisi), serta laboratorium mikrobiologi sederhana bila diperlukan untuk memantau kinerja unit pengolahan limbah biologis. Pembahasan lebih rinci mengenai program kerja dan cakupan analisis laboratorium ini akan dijabarkan pada subbab berikut:

4.8.1 Program Laboratorium

Program kerja laboratorium pabrik sikloheksana ini secara garis besar terbagi menjadi tiga kategori utama, yaitu program pengendalian mutu rutin (*routine quality control*), program pemantauan lingkungan, dan program penelitian dan pengembangan (*research and development*) skala kecil. Program pengendalian mutu rutin dijalankan setiap hari untuk memastikan bahan baku yang masuk maupun produk yang keluar dari pabrik senantiasa memenuhi spesifikasi, sementara program pemantauan lingkungan dijalankan dengan frekuensi berkala (harian hingga bulanan tergantung parameter) untuk memastikan limbah yang dibuang tetap berada dalam ambang batas baku mutu yang berlaku.

Setiap sampel yang masuk ke laboratorium melalui prosedur baku mulai dari pengambilan sampel (*sampling*) di titik yang telah ditentukan, pelabelan, penyimpanan sesuai kondisi yang dipersyaratkan (misalnya pendinginan untuk sampel yang mudah menguap), hingga analisis oleh analis menggunakan metode dan instrumen yang telah dikalibrasi. Hasil analisis kemudian dicatat, diverifikasi oleh penanggung jawab laboratorium, dan didokumentasikan dalam sistem pelaporan yang dapat ditelusuri (*traceable*) sewaktu-waktu diperlukan, baik untuk keperluan internal perusahaan maupun audit dari pihak berwenang seperti Dinas Lingkungan Hidup setempat.

Program laboratorium juga mencakup kegiatan kalibrasi berkala terhadap seluruh instrumen analisis yang digunakan, seperti kromatografi gas, spektrofotometer, pH meter, dan neraca analitik, untuk menjamin akurasi dan presisi hasil pengukuran tetap terjaga. Selain itu, laboratorium turut berperan dalam program investigasi apabila terjadi penyimpangan mutu produk atau ketidaksesuaian hasil limbah terhadap baku mutu,

dengan melakukan analisis akar penyebab (*root cause analysis*) untuk menentukan sumber masalah, baik dari sisi bahan baku, kondisi operasi, maupun kesalahan pada unit peralatan tertentu. Berikut ringkasan program laboratorium beserta frekuensinya yang disajikan pada Tabel 4.26:

Tabel 4.26 Program Laboratorium Pabrik Sikloheksana

Program	Objek Pemantauan	Frekuensi
Pengendalian mutu bahan baku	Benzena dan hidrogen	Kontinyu atau berkala dari sampling point jalur pipa karena lokasi pendirian pabrik berada tepat di samping supplier.
Pengendalian mutu produk	Sikloheksana dan sulfolane hasil recovery	Per shift (dilakukan sampling berkala)
Pemantauan performa katalis	Profil suhu reaktor, <i>pressure drop</i> , konversi, dan selektivitas produk	Kontinyu via instrumen proses dan sampling fisik saat dilakukan <i>shutdown/turn around</i>
Pemantauan limbah cair	Efluent unit pengolahan limbah	Harian (parameter kritis) dan bulanan (parameter lengkap)
Pemantauan emisi udara	Cerobong boiler dan area proses	Berkala sesuai ketentuan izin lingkungan
Kalibrasi instrumen	GC, pH meter, spektrofotometer, dan alat laboratorium lainnya	Sesuai jadwal kalibrasi (umumnya 6 – 12 bulan)

4.8.2 Analisis Bahan Baku, Produk, dan Limbah

Analisis terhadap bahan baku, produk, dan limbah pada pabrik sikloheksana ini disesuaikan dengan karakteristik masing-masing material. Rincian parameter, metode uji, dan prinsip kerjanya dirangkum pada sub-poin berikut:

1. Bahan Baku

Kedua bahan baku utama, benzena dan hidrogen, dianalisis kemurniannya sebelum masuk ke reaktor hidrogenasi, mengingat pengotor pada keduanya berpotensi meracuni katalis Ni/Al₂O₃. Berikut merupakan parameter uji bahan baku yang digunakan disajikan pada Tabel 4.27:

Tabel 4.27 Parameter Uji Bahan Baku Pabrik Sikloheksana

Material	Parameter	Metode Uji	Prinsip Singkat
Benzena	Kemurnian dan pengotor hidrokarbon	ASTM D5713 (GC Kapiler – FID)	Pemisahan komponen pada kolom kapiler berdasarkan titik didih lalu dideteksi menggunakan FID, kemurnian dihitung dengan $\rightarrow 100\% - \sum\%$ area pengotor.
Hidrogen	Kemurnian dan pengotor (N_2 , CO , CH_4)	GC – TCD	Deteksi lewat perbedaan konduktivitas panas gas pembawa (Ar) terhadap komponen sampel.

2. Produk dan *Solvent*

Produk sikloheksana dianalisis kemurnian dan kadar airnya sebelum dikirim ke tangki penyimpanan, sementara sulfolane sebagai solvent yang disirkulasikan kembali perlu dipantau kondisinya agar performa unit distilasi ekstraktif tetap terjaga. Berikut merupakan parameter uji produk dan *solvent* yang digunakan disajikan pada Tabel 4.28:

Tabel 4.28 Parameter Uji Produk dan *Solvent* Pabrik Sikloheksana

Material	Parameter	Metode Uji	Prinsip Singkat
Sikloheksana	Kemurnian dan sisa benzena	ASTM D7266/D7871 (GC – FID)	D7266 menggunakan kalibrasi standar eksternal (sama seperti analisis bahan baku benzena) dan D7871 menggunakan <i>effective carbon number</i> .
Sulfolane	Warna dan degradasi termal	Spektrofotometri	Absorbansi larutan dibandingkan dengan standar warna larutan acuan. Biasanya menggunakan <i>fresh</i> dan <i>recovered</i> sulfolane.
Sikloheksana dan sulfolane	Kadar air	Titrasi Karl Fischer	Reaksi stoikiometri antara air dengan iodine yang ditambahkan

SO₂, di mana volume reagen terpakai dikonversi ke kadar air.

3. Performa Katalis

Karena katalis Ni/Al₂O₃ bersifat fixed bed di dalam reaktor dan tidak bisa diambil sampelnya sewaktu-waktu, pemantauannya dilakukan secara tidak langsung lewat parameter proses, dengan sampling fisik hanya dimungkinkan saat shutdown/turnaround. Berikut merupakan parameter uji katalis yang digunakan disajikan pada Tabel 4.29:

Tabel 4.29 Parameter Uji Katalis Pabrik Sikloheksana

Parameter	Metode/ Instrumen	Prinsip Singkat
Profil suhu reaktor	Termokopel sepanjang <i>bed</i>	Deteksi hot spot atau pergeseran suhu puncak sebagai indikasi deaktivasi lokal.
<i>Pressure drop across bed</i>	<i>Differential pressure transmitter</i>	Kenaikan drastis mengindikasikan <i>fouling</i> atau penyumbatan.
Konversi dan selektivitas	GC pada <i>outlet</i> reaktor	Penurunan konversi mengindikasikan katalis mulai deaktivasi.
Aktivitas fisik katalis (BET dan dispersi Ni)	Sampling fisik saat <i>shutdown</i> atau <i>turnaround</i>	Uji laboratorium terhadap sampel <i>bed</i> yang diambil.

4. Limbah

Limbah cair dianalisis untuk memastikan efluen memenuhi baku mutu sebelum dibuang ke lingkungan, sementara katalis bekas yang telah jenuh dianalisis untuk menentukan status dan penanganannya sebagai limbah B3. Berikut merupakan parameter uji limbah yang digunakan disajikan pada Tabel 4.30:

Tabel 4.30 Parameter Uji Limbah Pabrik Sikloheksana

Jenis Limbah	Parameter	Metode Uji	Prinsip Singkat
Limbah cair	COD	APHA 5220	Oksidasi bahan organik menggunakan K ₂ Cr ₂ O ₇ dan

			H ₂ SO ₄ , di mana sisa dikromat dititrasi oleh FAS.
	BOD	APHA 5210 (Winkler)	Perhitungan selisih DO awal dan DO akhir (sampel diinkubasi 5 hari pada kondisi gelap dalam 20°C).
	TSS	APHA 2540 (Gravimetri)	Perhitungan selisih berat kertas saring sebelum – sesudah penyaringan yang dibagi dengan volume sampel.
	pH, minyak, dan residu benzena	Seusai Permen LHK No.5/2014	-
Katalis bekas (Ni/Al ₂ O ₃)	Kadar logam nikel (Ni)	AAS/ICP-OES	Dilakukan melalui destruksi asam (aqua regia), kemudian dilakukan deteksi absorbansi atau emisi atom Ni.
	Karakteristik toksisitas	TCLP	Pelindian menggunakan asam asetat 18 jam, kemudian hasil ekstrak dianalisis kadar nikelnya.

Setelah seluruh parameter limbah cair dipastikan memenuhi baku mutu, efluen dapat dibuang ke badan air penerima (laut) melalui *outfall* yang telah memenuhi ketentuan izin lingkungan. Sementara itu, katalis bekas sebagai limbah B3 diserahkan kepada pihak ketiga berizin (baik untuk regenerasi maupun pemusnahan akhir), disertai dokumen *manifest* limbah B3 sebagai bukti pertanggungjawaban rantai penanganannya sesuai ketentuan PP No. 22 Tahun 2021.

4.9 Kesehatan Keselamatan Kerja dan Lingkungan Hidup

K3LH pada pabrik sikloheksana ini mencakup tiga aspek utama yang saling terkait, yaitu kesehatan kerja, keselamatan kerja, dan pengelolaan lingkungan hidup. Ketiganya perlu dikelola bersama mengingat proses produksi melibatkan bahan berbahaya seperti hidrogen, benzena, dan sulfolane, serta kondisi operasi bertekanan dan bertemperatur tinggi. Payung hukum parameter ini adalah UU No. 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja, yang berlaku

pada setiap tempat kerja dengan potensi bahaya seperti kebakaran, ledakan, atau paparan zat beracun yang mana sesuai karakteristik industri kimia. Undang-undang ini mengatur syarat keselamatan kerja mulai dari jalur evakuasi, pengendalian suhu dan gas berbahaya, hingga pencegahan penyakit akibat kerja. Berikut merupakan tabel aspek K3LH dan penerapannya yang disajikan pada Tabel 4.31:

Tabel 4. 31 Aspek Kesehatan Keselamatan Kerja dan Lingkungan Hidup Pabrik Sikloheksana

Aspek K3LH	Fokus Utama	Contoh Penerapan pada Pabrik
Kesehatan kerja	Menjaga kondisi fisik dan mental pekerja	<i>Medical check-up</i> berkala, tersedianya klinik perusahaan, dan pengaturan <i>shift</i> sesuai batas maksimal kerja.
Keselamatan kerja	Mencegah kecelakaan fisik	Menggunakan APD, melengkapi industri dengan sistem <i>interlock</i> , dan melakukan pelatihan tanggap darurat terhadap karyawan dan warga sekitar lokasi pabrik.
Lingkungan hidup	Mengelola dampak terhadap elemen udara, air, dan tanah	Melakukan pengelolaan limbah, pengendalian emisi, dan penanganan limbah B3 di area pabrik dan penduduk sekitar.

Penerapan K3LH yang baik pada dasarnya bukan hanya soal memenuhi kewajiban regulasi, melainkan juga investasi jangka panjang bagi keberlangsungan operasional pabrik. Kecelakaan kerja atau insiden lingkungan yang terjadi akibat lemahnya sistem K3LH dapat menimbulkan kerugian yang jauh lebih besar dibandingkan biaya pencegahannya, baik dari sisi finansial, waktu henti produksi, maupun reputasi perusahaan di mata publik dan calon investor. Selain itu, budaya K3LH yang kuat juga berdampak langsung pada moral dan produktivitas karyawan, karena pekerja yang merasa aman dan sehat cenderung lebih fokus dan berkomitmen terhadap pekerjaannya. Pengawasan dan evaluasi K3LH pun perlu dilakukan secara berkala, tidak hanya saat terjadi insiden, agar potensi bahaya baru dapat terdeteksi sedini mungkin seiring perubahan kondisi operasional pabrik. Keterlibatan aktif seluruh lini, mulai dari manajemen puncak hingga operator lapangan, menjadi kunci keberhasilan penerapan K3LH secara menyeluruh dan berkelanjutan. Dengan demikian, K3LH bukan sekadar kepatuhan administratif, melainkan bagian integral dari strategi keberlanjutan bisnis pabrik sikloheksana ini.

4.10 SMK3 Standar ISO 45001:2018

Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) yang diterapkan pada pabrik sikloheksana kapasitas 150.000 ton/tahun ini mengacu pada standar internasional ISO 45001:2018 tentang *Occupational Health and Safety Management Systems*. Standar ini menjadi standar internasional pertama yang secara khusus menetapkan persyaratan sistem manajemen K3 bagi organisasi di seluruh dunia, tanpa memandang ukuran, jenis, maupun sifat organisasinya. ISO 45001:2018 menggantikan standar sebelumnya yaitu OHSAS 18001:2007 yang telah lebih dulu digunakan secara luas di berbagai industri, dengan masa transisi migrasi selama tiga tahun bagi organisasi yang sebelumnya telah bersertifikat OHSAS 18001.

Apabila dibandingkan OHSAS 18001 yang hanya memiliki empat klausul utama, ISO 45001:2018 dirancang dengan struktur yang jauh lebih rinci, yaitu sepuluh klausul yang mengikuti *High Level Structure* (HLS) atau Annex SL. Struktur ini sengaja diselaraskan dengan sistem manajemen ISO lainnya seperti ISO 9001:2015 dan ISO 14001:2015, sehingga memudahkan perusahaan mengintegrasikan ketiga sistem manajemen tersebut ke dalam satu kerangka kerja terpadu, alih-alih mengelolanya secara terpisah. Kesepuluh klausul tersebut mencakup ruang lingkup, acuan normatif, istilah dan definisi, konteks organisasi, kepemimpinan dan partisipasi pekerja, perencanaan, dukungan, operasi, evaluasi kinerja, hingga peningkatan berkelanjutan, yang secara keseluruhan disusun mengikuti alur logis mulai dari pemahaman kondisi organisasi hingga perbaikan sistem secara berkesinambungan.

Penerapan ISO 45001:2018 pada dasarnya mengikuti siklus *Plan – Do – Check – Act* (PDCA), terhitung mulai dari klausul 4 hingga klausul 10. Tahap perencanaan (*Plan*) mencakup pemahaman konteks organisasi, kepemimpinan dan partisipasi pekerja, hingga identifikasi bahaya, penilaian risiko, dan penetapan sasaran K3. Tahap pelaksanaan (*Do*) diwujudkan melalui penyediaan sumber daya dan kompetensi, serta penerapan program dan prosedur kerja yang telah direncanakan. Selanjutnya, tahap pemeriksaan (*Check*) dilakukan lewat pemantauan, pengukuran, audit internal, dan evaluasi kesesuaian terhadap sasaran K3, lalu diakhiri dengan tahap tindak lanjut (*Act*) berupa perbaikan berkelanjutan berdasarkan temuan yang diperoleh. Siklus ini bersifat kontinu, bukan sekali jalan, sehingga sistem manajemen K3 pabrik dapat terus disempurnakan seiring waktu dan perkembangan kondisi operasional.

Di Indonesia, penerapan SMK3 tidak hanya dapat merujuk pada ISO 45001:2018, tetapi juga diatur secara wajib melalui Peraturan Pemerintah No. 50 Tahun 2012 tentang Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja, sebagai amanat dari Undang-Undang

No. 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja dan Undang-Undang No. 13 Tahun 2003 tentang Ketenagakerjaan. PP No. 50 Tahun 2012 ini wajib diterapkan oleh perusahaan yang mempekerjakan lebih dari 100 orang atau memiliki tingkat potensi bahaya tinggi, kriteria yang jelas terpenuhi oleh pabrik sikloheksana ini mengingat penggunaan bahan mudah terbakar seperti hidrogen dan benzena dalam skala besar. Bedanya dengan ISO 45001:2018 yang sifatnya sukarela namun diakui secara internasional, SMK3 PP No. 50/2012 bersifat wajib dan diawasi langsung oleh Kementerian Ketenagakerjaan RI, lengkap dengan sanksi administratif hingga pidana bagi perusahaan wajib yang tidak menerapkannya.

Kedua sistem tersebut saling melengkapi dan tidak saling menggantikan. Penerapan SMK3 PP No. 50/2012 memenuhi kewajiban hukum di ranah nasional, sementara sertifikasi ISO 45001:2018 memberikan pengakuan dan daya saing di ranah internasional. Karena itu, banyak perusahaan di Indonesia, termasuk yang direkomendasikan untuk pabrik ini, memilih menerapkan keduanya secara bersamaan. Dari sisi pengawasan, ISO 45001:2018 diaudit oleh lembaga sertifikasi independen yang ditunjuk perusahaan sendiri, dengan sertifikat berlaku tiga tahun dan audit pengawasan setiap tahun, sedangkan SMK3 PP No. 50/2012 diaudit oleh badan yang ditunjuk pemerintah, dengan masa berlaku sertifikat yang sama namun audit ulang dilakukan minimal sekali dalam periode tersebut. Penerapan kedua sistem manajemen ini secara terintegrasi diharapkan mampu memberikan kerangka kerja yang sistematis sekaligus memenuhi kewajiban hukum dalam mengelola risiko K3 pada pabrik sikloheksana ini, khususnya mengingat karakteristik bahan baku dan produk yang tergolong berbahaya seperti hidrogen bertekanan dan benzena yang bersifat karsinogenik.

4.11 Fasilitas Pelayanan Kesehatan

Sebagai bagian dari komitmen perusahaan terhadap kesejahteraan karyawan, pabrik sikloheksana ini menyediakan fasilitas pelayanan kesehatan yang memadai untuk menunjang kesehatan pekerja selama menjalankan aktivitas kerja sehari-hari. Penyediaan fasilitas kesehatan ini juga merupakan bagian dari pemenuhan kewajiban perusahaan sebagaimana diamanatkan dalam Peraturan Menteri Tenaga Kerja No. PER.03/MEN/1982 tentang Pelayanan Kesehatan Tenaga Kerja, yang mewajibkan setiap perusahaan menyelenggarakan pelayanan kesehatan kerja bagi karyawannya.

Fasilitas utama yang disediakan berupa klinik pabrik (poliklinik perusahaan) yang berlokasi strategis dan mudah dijangkau dari seluruh area kerja, dilengkapi dengan tenaga medis seperti dokter perusahaan dan paramedis yang bertugas secara bergantian mengikuti pola

shift operasional pabrik. Klinik ini berfungsi untuk menangani keluhan kesehatan ringan, pemeriksaan kesehatan rutin, serta penanganan pertama (*first aid*) apabila terjadi kecelakaan kerja di area pabrik, sebelum pasien dirujuk ke fasilitas kesehatan yang lebih lengkap bila diperlukan. Ruang klinik dilengkapi dengan peralatan medis dasar seperti tempat tidur pasien, obat-obatan P3K, tabung oksigen, serta perlengkapan untuk penanganan luka bakar dan paparan bahan kimia, mengingat karakteristik bahan yang digunakan di pabrik seperti benzena dan hidrogen.

Selain klinik di dalam area pabrik, perusahaan juga menjalin kerja sama dengan rumah sakit rujukan terdekat untuk penanganan kasus kecelakaan kerja yang lebih serius atau kondisi darurat medis yang membutuhkan penanganan spesialis. Kerja sama ini penting untuk memastikan adanya jalur rujukan yang jelas dan cepat, mengingat kondisi darurat pada industri kimia dapat berkembang dengan sangat cepat dan membutuhkan penanganan medis lanjutan dalam waktu singkat. Ambulans siaga juga disediakan di lokasi pabrik untuk mempercepat proses evakuasi dan rujukan pasien ke rumah sakit apabila dibutuhkan. Berikut merupakan fasilitas pelayanan kesehatan yang tersedia di pabrik sikloheksana disajikan pada Tabel 4.32:

Tabel 4.32 Fasilitas Pelayanan Kesehatan Pabrik Sikloheksana

Fasilitas	Fungsi	Keterangan
Klinik perusahaan	Pemeriksaan rutin, P3K, penanganan awal kecelakaan kerja	Buka mengikuti jadwal shift operasional
Ambulans siaga	Evakuasi dan rujukan pasien darurat	<i>Standby</i> 24 jam di area pabrik
Kerja sama rumah sakit rujukan	Penanganan lanjutan kasus berat/spesialis	Rumah sakit terdekat dari lokasi pabrik
Program <i>medical check-up</i> berkala	Pemantauan kesehatan pekerja, khususnya area berisiko paparan kimia	Dilakukan 6 bulan sekali

Program kesehatan kerja juga mencakup pemeriksaan kesehatan berkala (*medical check-up*) bagi seluruh karyawan, dengan perhatian khusus pada karyawan yang bekerja di area berisiko paparan bahan kimia seperti benzena, mengingat efek kesehatan kronis yang dapat ditimbulkan dari paparan jangka panjang. Selain pemeriksaan fisik umum, pemeriksaan juga dapat mencakup uji laboratorium spesifik seperti hitung darah lengkap untuk mendeteksi dini

gangguan pada sistem pembentukan darah akibat paparan benzena. Dengan tersedianya rangkaian fasilitas pelayanan kesehatan tersebut, perusahaan berupaya memastikan kesejahteraan fisik pekerja tetap terjaga sepanjang masa kerja mereka di lingkungan pabrik.

4.12 Potensi Bahaya di Sekitar Pabrik

Pabrik sikloheksana yang beroperasi dengan bahan baku dan produk berupa senyawa hidrokarbon serta gas hidrogen bertekanan pada dasarnya menyimpan berbagai potensi bahaya yang perlu diidentifikasi sejak tahap perancangan. Potensi bahaya ini penting untuk dipetakan terlebih dahulu sebelum menentukan langkah pengendalian dan mitigasi yang tepat, mengingat karakteristik masing-masing bahaya berbeda-beda baik dari segi sumber, mekanisme kemunculan, maupun tingkat keparahan dampaknya terhadap pekerja, aset perusahaan, dan lingkungan sekitar.

Bahaya kebakaran dan ledakan (*fire and explosion hazard*) merupakan potensi bahaya utama pada pabrik ini, bersumber dari gas hidrogen yang digunakan pada reaktor hidrogenasi serta benzena dan sikloheksana yang bersifat mudah menguap dan mudah terbakar. Hidrogen memiliki rentang mudah terbakar (*flammability range*) yang sangat lebar, yaitu sekitar 4–75% volume di udara, sehingga kebocoran sekecil apa pun berpotensi membentuk campuran yang mudah tersulut apabila bertemu sumber api atau percikan listrik statis. Selain itu, tekanan operasi tinggi pada sistem kompresi dan penyimpanan hidrogen turut meningkatkan risiko terjadinya ledakan fisik (*physical explosion*) apabila terjadi kegagalan mekanis pada peralatan bertekanan.

Selain risiko kebakaran dan ledakan, pabrik ini juga menghadapi potensi bahaya toksisitas, terutama akibat paparan benzena yang tergolong sebagai senyawa karsinogenik golongan 1 menurut IARC (*International Agency for Research on Cancer*). Paparan benzena dalam jangka pendek dapat menimbulkan iritasi pada mata dan saluran pernapasan, sedangkan paparan jangka panjang berisiko menimbulkan kerusakan sumsum tulang dan gangguan pembentukan sel darah. Sulfolane yang digunakan sebagai *entrainer* pada sistem distilasi ekstraktif, meskipun tergolong relatif stabil dan tidak semudah benzena menguap, tetap berpotensi menimbulkan iritasi kulit dan mata apabila terjadi kontak langsung akibat kebocoran maupun tumpahan. Berikut merupakan potensi bahaya utama pada pabrik beserta sumber dan area yang berisiko disajikan pada Tabel 4.33:

Tabel 4.33 Potensi Bahaya Utama Pabrik Sikloheksana

Jenis Bahaya	Sumber/Bahan	Area Berisiko
Kebakaran dan ledakan	Hidrogen, benzena, dan sikloheksana	Reaktor hidrogenasi, kompresor H ₂ , dan tangki penyimpanan
Toksisitas (karsinogenik)	Benzena	Area penyimpanan <i>feed</i> , unit distilasi, dan laboratorium
Iritasi kimia	Sulfolane	Sistem distilasi ekstraktif dan unit regenerasi sulfolane
Bahaya tekanan tinggi	Gas hidrogen bertekanan	Kompresor, jalur perpipaian, tangki penyimpanan H ₂
Bahaya termal (panas/dingin)	<i>Steam</i> bertekanan dan sistem vakum	Reboiler, boiler, kolom vakum DC-02

Di samping bahaya-bahaya yang bersumber langsung dari bahan proses, pabrik juga menghadapi potensi bahaya dari peralatan penunjang, seperti bahaya termal akibat kontak langsung dengan pipa atau peralatan bertemperatur tinggi pada sistem *steam*, maupun bahaya mekanis dari peralatan berputar seperti pompa dan kompresor. Dengan teridentifikasinya seluruh potensi bahaya tersebut secara sistematis, perusahaan dapat menyusun program pengendalian risiko yang lebih terarah.

4.13 Faktor Bahaya di Sekitar Pabrik

Selain bahaya yang bersumber dari dalam proses produksi itu sendiri, keberadaan suatu pabrik kimia juga tidak lepas dari berbagai faktor bahaya yang berasal dari lingkungan sekitarnya, baik yang bersifat alami maupun akibat aktivitas manusia. Faktor-faktor ini perlu diidentifikasi sejak tahap perancangan pabrik agar pemilihan lokasi, tata letak (*plant layout*), maupun sistem mitigasi yang dirancang benar-benar sesuai dengan kondisi nyata di lapangan, bukan hanya berdasarkan asumsi umum semata.

Dari sisi kondisi alam, lokasi pabrik perlu dikaji terhadap potensi bahaya geologis seperti gempa bumi, mengingat sebagian besar wilayah Indonesia berada pada zona rawan gempa akibat posisinya di jalur Cincin Api Pasifik. Guncangan gempa berpotensi merusak struktur peralatan proses, terutama kolom distilasi bertekanan dan tangki penyimpanan hidrogen bertekanan tinggi, sehingga desain struktur dan pondasi peralatan perlu memperhitungkan

beban seismik sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI 1726: 2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung) tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan. Selain gempa, potensi banjir juga perlu dipertimbangkan, khususnya bila lokasi pabrik berdekatan dengan daerah aliran sungai atau memiliki elevasi tanah yang rendah, karena genangan air dapat mengganggu operasional peralatan listrik dan instrumentasi di lapangan.

Faktor cuaca ekstrem seperti angin kencang, petir, maupun curah hujan tinggi juga menjadi perhatian tersendiri. Sambaran petir misalnya, apabila mengenai tangki penyimpanan bahan mudah terbakar seperti benzena atau area penyimpanan hidrogen, berpotensi memicu kebakaran maupun ledakan. Oleh karena itu, sistem penangkal petir (*lightning protection system*) perlu dipasang pada titik-titik tertinggi bangunan dan tangki, dilengkapi dengan sistem pentanahan (*grounding*) yang memadai di seluruh unit peralatan untuk mencegah akumulasi muatan listrik statis, yang juga menjadi sumber penyulut potensial pada area dengan uap hidrokarbon mudah terbakar.

Di sisi lain, faktor bahaya juga dapat bersumber dari aktivitas di sekitar lokasi pabrik, seperti kepadatan lalu lintas kendaraan bermuatan bahan berbahaya, keberadaan industri lain di kawasan sekitar yang berpotensi menimbulkan efek domino (misalnya kebocoran gas dari pabrik tetangga yang terbawa angin ke area pabrik), maupun faktor sosial seperti kepadatan permukiman penduduk di sekitar kawasan industri. Kedekatan dengan permukiman penduduk menjadi pertimbangan penting terkait radius aman (*safety distance*) apabila terjadi skenario kecelakaan terburuk (*worst case scenario*) seperti kebocoran gas hidrogen atau kebakaran tangki, sehingga jarak aman antara pabrik dan permukiman perlu mengacu pada perhitungan konsekuensi (*consequence analysis*) yang mempertimbangkan radius dampak ledakan maupun sebaran gas toksik. Tabel 4.34 merangkum beberapa faktor bahaya eksternal beserta potensi dampak dan upaya mitigasinya:

Tabel 4. 34 Faktor Bahaya Eksternal, Dampak, dan Upaya Mitigasi Pabrik Sikloheksana

Faktor Bahaya	Potensi Dampak	Upaya Mitigasi
Gempa bumi	Kerusakan struktur peralatan dan pondasi.	Desain bangunan tahan gempa sesuai SNI 1726:2019 dan melakukan inspeksi struktur berkala.
Petir	Kebakaran atau ledakan pada tangki penyimpanan.	<i>Lightning protection system</i> dan <i>grounding</i> menyeluruh.

Banjir	Gangguan sistem kelistrikan dan instrumentasi.	Elevasi bangunan kritis dan sistem drainasi yang memadai.
Kepadatan permukiman sekitar	Risiko korban jiwa saat skenario kecelakaan terburuk.	Penetapan <i>safety distance</i> berdasarkan <i>consequence analysis</i> .
Efek domino dari industri sekitar	Eskalasi kecelakaan dari luar area pabrik.	Koordinasi tanggap darurat antarindustri dan menerapkan <i>early warning system</i> .

Dengan mengidentifikasi dan mengantisipasi faktor-faktor bahaya eksternal tersebut sejak tahap perancangan, diharapkan pabrik sikloheksana ini dapat beroperasi dengan tingkat risiko yang telah diminimalkan, baik terhadap pekerja di dalam pabrik maupun masyarakat serta lingkungan di sekitarnya.

4.14 Sistem Keamanan Kerja

Industri kimia, termasuk pabrik sikloheksana yang beroperasi dengan bahan-bahan mudah terbakar seperti benzena dan hidrogen, memiliki tingkat risiko kecelakaan kerja yang relatif tinggi dibandingkan industri lain pada umumnya. Hidrogen sebagai gas yang mudah terbakar dan memiliki rentang ledak (*flammability range*) yang lebar, serta benzena yang bersifat toksik dan karsinogenik, menuntut penerapan sistem keselamatan kerja yang komprehensif agar risiko kecelakaan, kebakaran, maupun paparan zat berbahaya terhadap pekerja dapat ditekan seminimal mungkin. Penerapan sistem keselamatan kerja ini juga menjadi kewajiban perusahaan sebagaimana diatur dalam Undang-Undang No. 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja.

Secara umum, upaya keselamatan kerja pada pabrik ini dilakukan melalui pendekatan hierarki pengendalian bahaya, mulai dari eliminasi dan substitusi bahan berbahaya bila memungkinkan, pengendalian teknis (*engineering control*) seperti pemasangan sistem *interlock* dan *pressure relief valve*, pengendalian administratif berupa prosedur kerja standar (SOP) dan pelatihan, hingga penyediaan alat pelindung diri (APD) sebagai lapisan pertahanan terakhir. Sistem deteksi kebocoran gas (*gas detector*) juga dipasang pada titik-titik rawan seperti area kompresor hidrogen dan reaktor hidrogenasi, dilengkapi dengan alarm otomatis yang akan aktif apabila konsentrasi gas mudah terbakar mendekati batas *Lower Explosive Limit* (LEL). Berikut merupakan beberapa alat pelindung diri (APD) yang wajib digunakan oleh karyawan sesuai area kerjanya masing-masing yang disajikan pada Tabel 4.35:

Tabel 4.35 APD yang Wajib Digunakan Karyawan

Area Kerja	APD yang Digunakan
Area proses (reaktor, kolom distilasi)	Helm, safety shoes, sarung tangan tahan panas, kacamata pelindung, coverall tahan api.
Area laboratorium	Jas laboratorium, sarung tangan kimia, kacamata pelindung, masker respirator
Area penyimpanan bahan mudah terbakar	Sepatu antistatik, pakaian tahan api, respirator uap organik
Area umum/perkantoran	Helm (saat memasuki area proses) dan safety shoes

Selain penyediaan APD, perusahaan juga perlu menyediakan fasilitas penunjang keselamatan seperti *safety shower* dan *eyewash station* di area yang berpotensi terpapar bahan kimia, unit pemadam kebakaran baik portabel (APAR) maupun *fixed system (hydrant dan sprinkler)*, serta jalur evakuasi dan titik kumpul (*assembly point*) yang jelas dan mudah diakses dari seluruh area pabrik. Pelatihan tanggap darurat, termasuk simulasi kebakaran dan tumpahan bahan kimia (*spill response*), perlu dilakukan secara berkala agar seluruh karyawan memahami prosedur evakuasi dan penanganan awal apabila terjadi kondisi darurat sesungguhnya.

Di samping itu, aspek keselamatan kerja juga mencakup pemantauan kesehatan pekerja secara berkala, khususnya bagi karyawan yang bekerja di area dengan risiko paparan benzena, mengingat paparan jangka panjang terhadap senyawa ini dapat menimbulkan efek kesehatan kronis seperti gangguan pada sistem pembentukan darah. Oleh karena itu, pemeriksaan kesehatan berkala (*medical check-up*) serta pemantauan kadar paparan di lingkungan kerja perlu menjadi bagian rutin dari program keselamatan dan kesehatan kerja (K3) perusahaan, sejalan dengan prinsip bahwa keselamatan pekerja merupakan prioritas utama yang tidak dapat dikompromikan demi kelancaran operasional semata.

4.15 Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL)

Pendirian pabrik sikloheksana dengan kapasitas 150.000 ton/tahun ini berpotensi menimbulkan dampak terhadap lingkungan sekitar, baik selama tahap konstruksi, operasi, maupun pasca operasi. Oleh karena itu, analisis mengenai dampak lingkungan perlu dilakukan sebagai bagian dari studi kelayakan pabrik, mengacu pada Undang-Undang No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup serta Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.

AMDAL bertujuan untuk mengidentifikasi sumber dampak, memprediksi besaran dan sifat dampak yang timbul, serta merumuskan langkah pengelolaan dan pemantauan agar dampak negatif terhadap lingkungan dapat ditekan seminimal mungkin sementara dampak positif tetap dioptimalkan.

Dari sisi kualitas udara, proses hidrogenasi benzena menjadi sikloheksana melibatkan gas hidrogen dan senyawa hidrokarbon volatil seperti benzena, sikloheksana, dan metilsikloheksana yang berpotensi terlepas ke atmosfer melalui kebocoran peralatan, *venting*, maupun *flare* pada kondisi tidak normal. Benzena sendiri tergolong senyawa karsinogenik sehingga emisi perlu dikendalikan secara ketat, misalnya melalui program *Leak Detection and Repair* (LDAR) pada *flange*, *valve*, dan *seal* pompa. Selain itu, debu katalis Ni/Al₂O₃ yang timbul saat proses *loading* maupun *unloading* katalis di reaktor hidrogenasi juga berpotensi menjadi sumber pencemar udara partikulat di area sekitar reaktor. Tabel 4.36 menyajikan parameter kualitas udara ambien yang relevan untuk dipantau beserta baku mutunya sesuai PP No. 22 Tahun 2021 Lampiran VII:

Tabel 4. 36 Baku Mutu Udara

Parameter	Waktu Pengukuran	Baku Mutu
Sulfur dioksida (SO ₂)	1 jam	150 µg/m ³
	24 jam	75 µg/m ³
	1 tahun	45 µg/m ³
Karbon monoksida (CO)	1 jam	10000 µg/m ³
	24 jam	4000 µg/m ³
Nitrogen dioksida (NO ₂)	1 jam	200 µg/m ³
	24 jam	65 µg/m ³
	1 tahun	50 µg/m ³
Oksidan fotokimia (Ox) sebagai ozon (O ₃)	1 jam	150 µg/m ³
	8 jam	100 µg/m ³
	1 tahun	35 µg/m ³
Hidrokarbon non metana (NMHC)	3 jam	160 µg/m ³
Partikulat debu < 100 µm (TSP)	24 jam	230 µg/m ³
Partikulat debu < 10 µm (PM ₁₀)	24 jam	75 µg/m ³
	1 tahun	40 µg/m ³
Partikulat debu < 2,5 µm (PM _{2,5})	24 jam	55 µg/m ³

	1 tahun	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Timbal (Pb)	24 jam	2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Selain itu, aspek lain yang perlu diperhatikan adalah limbah cair yang dihasilkan dari sistem distilasi ekstraktif menggunakan sulfolane sebagai entrainer. Meskipun sulfolane dirancang untuk disirkulasikan kembali dalam sistem regenerasi DC-02, tetap ada kemungkinan terbawanya sejumlah kecil sulfolane maupun sisa hidrokarbon pada aliran *blowdown* atau *purge*, yang apabila dibuang langsung ke badan air dapat meningkatkan kadar COD dan BOD di lingkungan perairan. Oleh karena itu, unit pengolahan limbah cair (*wastewater treatment*) berupa proses pemisahan minyak-air dan pengolahan biologis diperlukan sebelum air buangan dilepas ke lingkungan, agar parameter limbah cair yang dihasilkan memenuhi baku mutu yang dipersyaratkan.

Katalis $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ yang telah jenuh atau kehilangan aktivitasnya setelah masa pakai tertentu turut menjadi perhatian tersendiri karena tergolong sebagai limbah bahan berbahaya dan beracun (B3), mengingat kandungan logam nikel di dalamnya. Penanganannya harus mengikuti ketentuan PP No. 22 Tahun 2021 mengenai pengelolaan limbah B3, mulai dari penyimpanan sementara di tempat penyimpanan limbah B3 (TPS B3) berizin, hingga penyerahan ke pihak ketiga berizin untuk diproses lebih lanjut, baik melalui regenerasi maupun pemusnahan akhir. Dengan penerapan seluruh langkah pengelolaan dan pemantauan lingkungan tersebut, operasional pabrik sikloheksana ini diharapkan dapat berjalan selaras dengan prinsip pembangunan berkelanjutan.