

BAB IV

UNIT PENDUKUNG PROSES

Suatu pabrik memerlukan unit penunjang (utilitas) supaya dapat berjalan dengan baik. Utilitas dalam pabrik umumnya terdiri dari air dan juga logistik. Utilitas memiliki peran yang penting dalam operasi pabrik. Utilitas berfungsi memasok segala kebutuhan untuk pabrik dapat menjalankan proses dari awal sampai akhir. Utilitas di pabrik isobutil asetat sebagai berikut:

1. Unit Pengolahan dan Penyediaan Air (*Water treatment System*)
2. Unit Penyediaan Steam (*Steam Generation System*)
3. Unit Pembangkit Listrik (*Power Plant System*)
4. Unit Penyediaan Bahan Bakar
5. Unit Penyediaan Udara Instrumen (*Power Air System*)
6. Unit Laboratorium
7. Unit Pengolahan Limbah

4.1 Unit Pengolahan dan Pengadaan Air

4.1.1. Unit Pengolahan Air

Pabrik Isobutil Asetat direncanakan didirikan di Kawasan Industri Maspion, Kecamatan Manyar, Kabupaten Gresik, Jawa Timur. Kawasan ini terletak di pesisir utara Pulau Jawa dan berbatasan langsung dengan Selat Madura sehingga memiliki akses yang baik terhadap sumber air laut. Oleh karena itu, air laut dipilih sebagai sumber air baku untuk memenuhi kebutuhan utilitas pabrik. Air laut yang diambil dari perairan sekitar kawasan industri selanjutnya diolah melalui serangkaian unit pengolahan hingga diperoleh air dengan kualitas yang sesuai untuk berbagai kebutuhan proses. Pengolahan air dilakukan menggunakan teknologi *Seawater Reverse Osmosis* (SWRO), yaitu metode desalinasi yang memanfaatkan membran semipermeabel untuk memisahkan garam dan zat terlarut dari air laut. Pada proses ini, air laut dialirkan ke membran dengan tekanan yang lebih besar daripada tekanan osmotiknya sehingga molekul air dapat melewati membran, sedangkan garam dan ion-ion terlarut tertahan pada sisi konsentrat. Hasil dari proses tersebut berupa air tawar yang selanjutnya dapat dimanfaatkan sebagai air utilitas setelah melalui pengolahan lanjutan sesuai kebutuhan.

Keberhasilan proses SWRO sangat dipengaruhi oleh kualitas air umpan, sehingga tahap *pretreatment* memegang peranan penting. Apabila air laut langsung dialirkan ke membran tanpa pengolahan awal yang memadai, partikel tersuspensi, koloid, maupun senyawa organik dapat menyebabkan *fouling* pada membran. Kondisi ini tidak hanya

menurunkan efisiensi proses desalinasi, tetapi juga memperpendek umur pakai membran (Li et al., 2024). Oleh karena itu, sebelum memasuki unit SWRO, air laut terlebih dahulu diolah melalui beberapa tahapan *pretreatment*, seperti koagulasi-flokulasi, filtrasi multimedia, dan *cartridge filtration*. Rangkaian proses tersebut terbukti mampu menurunkan tingkat kekeruhan air umpan hingga di bawah 1 NTU sehingga kualitas air memenuhi persyaratan untuk memasuki unit membran RO (Wang dkk., 2022). Diagram alir sistem pengolahan air yang digunakan pada pabrik ini ditunjukkan pada Gambar 4.1, sedangkan tahapan pengolahan air secara rinci dijelaskan sebagai berikut.



Gambar 4.1 Diagram Alir Unit Pengolahan Air

1. Pengambilan Air Laut (*Seawater Intake*)

Tahap pertama pengolahan air diawali dengan pengambilan air laut dari perairan sekitar Kawasan Industri Maspion melalui sistem *seawater intake*. Pada saluran masuk dipasang *bar screen* sebagai penyaring kasar untuk menahan sampah, ganggang, kerang, maupun organisme laut berukuran besar agar tidak masuk ke dalam sistem perpipaan. Air laut yang telah melewati penyaringan awal kemudian dipompa menuju tangki penampungan (*buffer tank*) sebelum memasuki proses *pretreatment*.

2. Koagulasi dan Flokulasi

Air laut dari tangki penampungan selanjutnya diolah melalui proses koagulasi dan flokulasi untuk menghilangkan partikel tersuspensi serta koloid yang masih terkandung di dalamnya. Pada tahap koagulasi ditambahkan bahan kimia seperti aluminium sulfat ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) atau besi(III) klorida (FeCl_3) sehingga muatan partikel menjadi tidak stabil dan dapat bergabung membentuk flok yang berukuran lebih besar. Tahap ini merupakan bagian penting dari *pretreatment* karena mampu mengurangi potensi terbentuknya *fouling* pada membran RO akibat deposisi partikel selama proses desalinasi (Li dkk., 2024).

3. Sedimentasi

Flok yang terbentuk pada proses sebelumnya kemudian dipisahkan melalui sedimentasi. Di dalam bak sedimentasi, flok mengendap secara gravitasi membentuk lumpur (*sludge*) di dasar tangki, sedangkan air yang lebih jernih mengalir menuju tahap penyaringan berikutnya.

4. Penyaringan (*Multimedia Filter*)

Air hasil sedimentasi selanjutnya dialirkan ke unit *multimedia filter* yang berisi media penyaring berupa pasir kuarsa, pasir mangan, dan karbon aktif. Kombinasi media tersebut berfungsi untuk menghilangkan sisa padatan tersuspensi, koloid, mikroorganisme, ion logam tertentu, serta senyawa organik yang masih terdapat di dalam air. Menurut Abushaban dkk., 2021, penerapan koagulasi yang diikuti penyaringan menggunakan *sand filter* bertingkat terbukti efektif dalam mengurangi potensi *fouling* partikulat, organik, maupun biologis pada membran RO. Untuk menjaga kinerjanya, media penyaring dibersihkan secara berkala melalui proses *backwash*.

5. *Cartridge Filter*

Setelah melewati *multimedia filter*, air diproses lebih lanjut menggunakan *cartridge filter* berukuran 5 μm sebagai tahap penyaringan terakhir sebelum memasuki unit RO. Penyaringan ini bertujuan menghilangkan partikel-partikel halus yang masih lolos dari tahap sebelumnya sehingga membran RO terlindungi dari penyumbatan maupun kerusakan akibat *fouling* (Abushaban dkk., 2021).

6. *Reverse Osmosis* (RO)

Air yang telah memenuhi persyaratan *pretreatment* kemudian dipompa menggunakan pompa bertekanan tinggi menuju membran *reverse osmosis*. Pada unit ini, tekanan operasi dibuat lebih besar daripada tekanan osmotik air laut

sehingga molekul air dapat melewati membran semipermeabel, sedangkan garam, ion anorganik, logam, senyawa organik, dan kontaminan lainnya tertahan pada sisi konsentrat. Hasil utama proses ini berupa air tawar (*permeate*) dengan kadar garam yang sangat rendah, sedangkan aliran konsentrat (*brine*) dialirkan kembali ke laut atau dikelola sesuai ketentuan lingkungan yang berlaku.

7. Tangki Penampungan Air Tawar (*Buffer Tank*)

Air tawar hasil proses RO selanjutnya ditampung di dalam tangki penampungan sebagai cadangan operasional. Tangki ini berfungsi menjaga kontinuitas pasokan air ke seluruh unit utilitas, mengakomodasi fluktuasi kebutuhan air, serta menjadi titik pemeriksaan kualitas sebelum air didistribusikan ke unit pengolahan lanjutan.

8. Pengolahan Lanjutan Sesuai

Air tawar hasil proses *reverse osmosis* selanjutnya didistribusikan ke beberapa unit pengolahan lanjutan sesuai dengan kebutuhan penggunaannya di pabrik. Tahap pengolahan lanjutan ini bertujuan untuk menyesuaikan karakteristik air dengan spesifikasi yang dipersyaratkan oleh masing-masing sistem utilitas. Berdasarkan peruntukannya, air dialokasikan sebagai air umpan boiler, air pendingin (*cooling water* dan *Chilled water*), air sanitasi, serta air untuk sistem hydrant. Masing-masing aliran akan melalui proses pengolahan yang berbeda sesuai dengan standar kualitas yang dibutuhkan sebelum digunakan pada unit utilitas terkait.

4.1.2. Unit Penyediaan Air

1. Air Pendingin (*Cooling Water*)

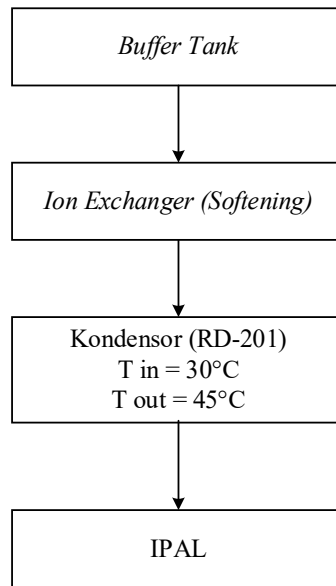
Air pendingin (*cooling water*) pada pabrik isobutil asetat digunakan sebagai media perpindahan panas pada kondensor menara distilasi reaktif (RD-201). Air masuk ke kondensor pada suhu 30 °C dan keluar pada suhu 45 °C setelah menyerap panas dari uap proses. Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 5 Tahun 2021, air pendingin merupakan air yang digunakan sebagai media penghilang panas dan tidak berkontak langsung dengan bahan baku, produk antara, maupun produk akhir.

Secara umum, sistem air pendingin terdiri atas sistem *once-through*, sistem resirkulasi terbuka (*open recirculating system*), dan sistem resirkulasi tertutup (*closed recirculating system*). Pada sistem *once-through*, air pendingin hanya digunakan satu kali melewati alat penukar panas sebelum dialirkan menuju unit

pengolahan limbah. Sistem ini memiliki konfigurasi yang relatif sederhana karena tidak memerlukan *cooling tower*, pompa sirkulasi, maupun proses *blowdown*. Berbeda dengan sistem *once-through*, sistem resirkulasi terbuka menggunakan *cooling tower* untuk mendinginkan air sebelum digunakan kembali. Selama proses pendinginan, sebagian air mengalami penguapan sehingga konsentrasi mineral terlarut meningkat. Kondisi tersebut dapat memicu pembentukan kerak (*scaling*), korosi, dan pertumbuhan mikroorganisme, sehingga diperlukan *blowdown* untuk mengendalikan konsentrasi padatan terlarut serta penambahan *make-up water* secara berkala. Sementara itu, pada sistem resirkulasi tertutup, air pendingin bersirkulasi di dalam sistem tertutup tanpa kontak langsung dengan atmosfer sehingga kehilangan air akibat penguapan relatif kecil dan kebutuhan *make-up water* menjadi lebih rendah (Veolia Water Technologies & Solutions, 2026).

Berdasarkan kebutuhan utilitas pabrik, sistem yang dipilih adalah sistem *once-through*. Pemilihan sistem ini didasarkan pada kebutuhan pendinginan yang relatif kecil karena hanya terdapat satu unit kondensor, yaitu RD-201. Selain itu, lokasi pabrik yang berada di kawasan pesisir dengan ketersediaan air baku yang memadai mendukung penerapan sistem tersebut. Dibandingkan sistem resirkulasi, sistem *once-through* lebih ekonomis karena tidak memerlukan *cooling tower*, pompa sirkulasi, sistem *blowdown*, maupun penambahan bahan kimia pengendali kualitas air secara terus-menerus (Veolia Water Technologies & Solutions, 2026).

Meskipun menggunakan sistem *once-through*, kualitas air pendingin tetap harus memenuhi persyaratan tertentu agar proses perpindahan panas berlangsung secara optimal serta untuk meminimalkan terjadinya pembentukan kerak, korosi, dan *fouling* pada kondensor maupun sistem perpipaan. Air tawar yang dihasilkan dari unit pengolahan air masih mengandung sejumlah kecil ion penyebab kesadahan, terutama ion kalsium (Ca^{2+}) dan magnesium (Mg^{2+}). Oleh karena itu, sebelum digunakan sebagai air pendingin, air terlebih dahulu diproses melalui unit pelunakan (*softening*) menggunakan *ion exchanger* sehingga kandungan ion penyebab kesadahan dapat dikurangi (Gulamussen dkk., 2022). Diagram alir sistem pengolahan air pendingin ditunjukkan pada Gambar 4.2 . Tahapan pengolahan air pendingin dijelaskan sebagai berikut.



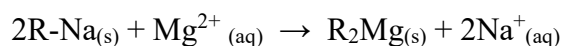
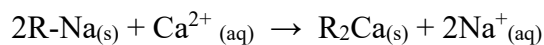
Gambar 4.2 Diagram Alir Unit Cooling Water

1. Tangki Penampungan (*Buffer Tank*)

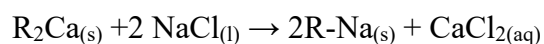
Air tawar hasil unit pengolahan air terlebih dahulu ditampung di dalam *buffer tank*. Tangki ini berfungsi sebagai penyangga untuk menjaga kontinuitas pasokan air menuju unit pengolahan berikutnya serta sebagai tempat pemantauan kualitas air sebelum proses pelunakan.

2. *Ion Exchanger (Softening)*

Air dari *buffer tank* selanjutnya dialirkan ke unit *ion exchanger* siklus natrium (*sodium-cycle cation exchanger*) untuk menurunkan kesadahan air. Pada unit ini, resin kation dalam bentuk R-Na menukar ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} yang terdapat di dalam air dengan ion Na^+ yang terikat pada resin. Proses tersebut menghasilkan air lunak (*soft water*) sehingga risiko pembentukan kerak pada permukaan kondensor dapat diminimalkan (Nasrollahi dkk., 2025). Reaksi penukaran ion yang terjadi adalah sebagai berikut.



Setelah resin mencapai kondisi jenuh, dilakukan regenerasi menggunakan larutan natrium klorida (*brine*) sehingga resin kembali ke bentuk aktifnya.



Regenerasi dilakukan melalui tahapan *backwash*, injeksi larutan *brine*, dan pembilasan (*rinse*) sebelum unit kembali dioperasikan.

3. Distribusi Air Pendingin

Air lunak hasil proses pelunakan selanjutnya dialirkan melalui jaringan distribusi menuju kondensor menara distilasi reaktif (RD-201).

4. Pendinginan pada Kondensor

Di dalam kondensor, air pendingin menyerap panas dari uap proses sehingga uap mengalami kondensasi menjadi cairan. Selama proses perpindahan panas tersebut, suhu air pendingin meningkat dari 30 °C menjadi 45 °C.

5. Pengolahan Limbah

Penggunaan sistem once-through pada sistem air pendingin ini menyebabkan air pendingin yang telah digunakan tidak disirkulasikan kembali, melainkan dialirkan menuju unit pengolahan limbah cair sebelum dibuang ke lingkungan sesuai dengan baku mutu yang berlaku (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, 2021)

Kualitas air pendingin harus memenuhi spesifikasi operasi tertentu supaya sistem pendingin dapat beroperasi secara optimal. Spesifikasi kualitas air pendingin yang digunakan dalam perancangan ini mengacu pada (Kamatkar, 2018), sebagaimana disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Batas Kualitas Air Pendingin

No.	Parameter	Batas
1	pH	6,5–9,0
2	Total Dissolved Solids (TDS), ppm	≤ 5.000
3	Alkalinitas-M (ppm sebagai CaCO_3)	≤ 300
4	Silika sebagai SiO_2 (ppm)	≤ 100
5	Klorida (Cl^-), ppm	≤ 300
6	Sulfat (SO_4^{2-}), ppm	≤ 800
7	Nitrat (NO_3^-), ppm	≤ 300
8	Klorin bebas (Cl_2), ppm	0,5–1,0

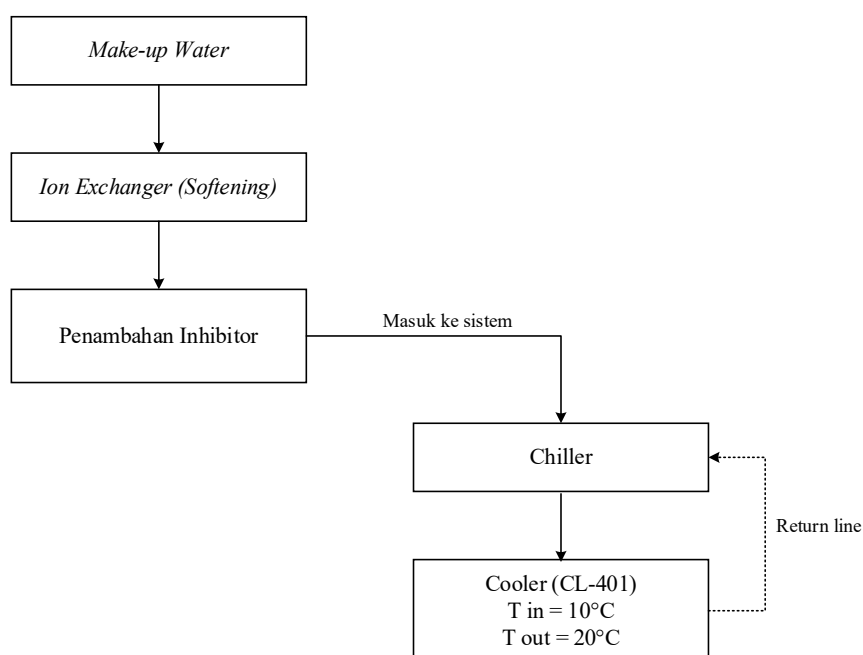
Sumber: (Kamatkar, 2018)

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pengelolaan air pendingin antara lain (Veolia Water Technologies & Solutions, 2026):

- Kesadahan dan kandungan silika yang tinggi dapat memicu terbentuknya kerak kalsium karbonat dan kalsium silikat pada permukaan alat penukar panas.
- Kandungan besi dan oksigen terlarut yang tinggi berisiko menimbulkan korosi pada perpipaan dan peralatan.
- *Total suspended solid* serta pertumbuhan mikroorganisme dan lumut dapat menyebabkan *fouling* biologis pada peralatan.

2. Air Pendingin Khusus (*Chilled water*)

Pada proses ini juga membutuhkan *Chilled water* untuk mendinginkan produk akhir isobutil asetat pada *cooler* (CL-401) untuk menurunkan suhu produk isobutil asetat sebelum dialirkan ke tangki penyimpanan. Berbeda dengan *cooling water* yang menggunakan sistem *once-through*, *Chilled water* dioperasikan menggunakan sistem resirkulasi tertutup (*closed recirculating system*). Pada sistem ini, air didinginkan terlebih dahulu menggunakan unit *chiller*, kemudian dialirkan menuju *cooler* untuk menyerap panas dari produk, selanjutnya dikembalikan ke *chiller* agar didinginkan kembali sebelum disirkulasikan ke sistem. Sistem ini tidak memerlukan *blowdown* maupun pembuangan rutin karena tidak terjadi penguapan seperti pada *cooling tower* sehingga kehilangan air hanya terjadi akibat kebocoran kecil pada sistem perpipaan yang perlu diganti dengan *make-up water* secara berkala (Guyer, 2022). Diagram alir sistem *Chilled water* ditunjukkan pada Gambar 4.3. Tahapan pengolahan *Chilled water* dijelaskan sebagai berikut.



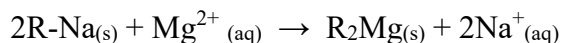
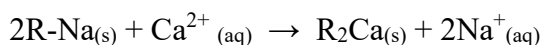
Gambar 4.3 Diagram Alir Unit *Chilled water*

1. *Make-up Water*

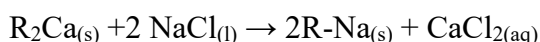
Air tawar hasil unit pengolahan air digunakan sebagai *make-up water* untuk pengisian awal sistem serta mengganti kehilangan air akibat kebocoran kecil pada sambungan atau *seal* perpipaan selama operasi. Air ini ditampung sementara sebelum dialirkan ke tahap pengolahan berikutnya. Karena sistem *Chilled water* beroperasi secara tertutup, kebutuhan *make-up water* relatif kecil dibandingkan sistem pendingin terbuka.

2. *Ion Exchanger (Softening)*

Apabila kesadahan total *make-up water* melebihi 250 ppm sebagai CaCO_3 , air terlebih dahulu dilunakkan menggunakan *ion exchanger* siklus natrium (*sodium-cycle cation exchanger*). Pada proses ini, resin kation dalam bentuk R-Na menukar ion kalsium (Ca^{2+}) dan magnesium (Mg^{2+}) penyebab kesadahan dengan ion natrium (Na^+) sehingga diperoleh air lunak (*soft water*) yang dapat meminimalkan pembentukan kerak pada perpipaan, *chiller*, dan *cooler* (Nasrollahi dkk., 2025). Reaksi penukaran ion yang terjadi adalah sebagai berikut.



Setelah resin jenuh, dilakukan regenerasi menggunakan larutan natrium klorida (*brine*) untuk mengembalikan resin ke bentuk aktifnya.



Regenerasi dilakukan melalui tiga tahap, yaitu *backwash*, injeksi larutan *brine* (NaCl), dan pembilasan (*rinse*) hingga resin kembali ke bentuk R-Na .

3. Penambahan Inhibitor Kimia

Sistem *Chilled water* merupakan sistem resirkulasi tertutup tanpa *blowdown* sehingga pengendalian korosi dan pertumbuhan mikroorganisme dilakukan melalui penambahan inhibitor kimia ke dalam air sirkulasi. Program inhibitor yang umum digunakan meliputi:

- a. Nitrit-azol: menggunakan natrium nitrit dengan konsentrasi 600–1.000 ppm (sebagai NO_2) dan pH dijaga pada kisaran 8,5–9,5. Program ini tidak direkomendasikan apabila jumlah konsentrasi ion Cl^- dan SO_4^{2-} melebihi 800 ppm.

- b. Molibdat-azol: menggunakan natrium molibdat dengan konsentrasi 100–125 ppm (sebagai Mo) pada pH 8,5–9,5. Program ini kompatibel dengan sistem yang menggunakan etilen glikol maupun propilen glikol.
- c. Biosida: glutaraldehida atau isothiazolone ditambahkan secara berkala untuk mengendalikan pertumbuhan mikroorganisme dan pembentukan *biofilm*. Pada program inhibitor berbasis nitrit, penggunaan *oxidizing biocide* tidak direkomendasikan karena tidak kompatibel dengan inhibitor tersebut.

4. Pendinginan pada *Chiller*

Air yang telah memenuhi persyaratan kualitas kemudian dialirkan ke unit *chiller* untuk didinginkan menggunakan siklus refrigerasi hingga mencapai suhu operasi *chilled water*, yaitu sekitar 4–13 °C. Pada perancangan pabrik ini, *chilled water* keluar dari *chiller* pada suhu 10 °C sebelum dialirkan menuju *cooler* (CL-401).

5. Pendinginan Produk pada *Cooler* (CL-401)

Chilled water pada suhu 10 °C dialirkan menuju *cooler* (CL-401) untuk menyerap panas dari produk akhir isobutil asetat. Setelah menyerap panas, suhu *chilled water* meningkat menjadi 20 °C dan air dikembalikan ke *chiller* untuk didinginkan kembali dan disirkulasikan ulang dalam sistem tertutup tanpa pernah dibuang ke lingkungan.

Sebagai acuan kualitas air pada sistem *Chilled water*, digunakan standar internasional IS 8188:1999-*Treatment of Water for Cooling Towers: Code of Practice* (Bureau of Indian Standards). Standar tersebut mengategorikan *Chilled water* sebagai bagian dari *closed recirculatory system* dan memberikan parameter umum kualitas air untuk sistem resirkulasi sebagaimana tercantum pada klausul 7.1.3. Parameter yang digunakan dalam penelitian/perancangan ini ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.2 Syarat Kualitas *Chilled water*

Parameter	Nilai
pH	mendekati Indeks Langelier +0,2
Turbiditas (NTU)	≤ 50
Klorin residual (ppm)	0,2–0,5
Total Hardness (ppm CaCO ₃)	≤ 250
Kesadahan sementara (ppm CaCO ₃)	≤ 200

Rasio Klorida : Kesadahan	$\pm 1 : 3$
Besi + Mangan (ppm)	$\leq 0,5$
Angka KMnO_4 (oksigen terabsorpsi) (ppm)	≤ 2
COD (ppm)	≤ 4
<i>Total Dissolved Solid</i> (ppm)	≤ 500
Karbon dioksida	Sesuai kondisi lingkungan
Sulfat (ppm SO_4)	≤ 600
Silika (ppm SiO_2)	≤ 75

Sumber: IS 8188:1999, Bureau of Indian Standards, klausul 7.1.3

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pengoperasian sistem *Chilled water*:

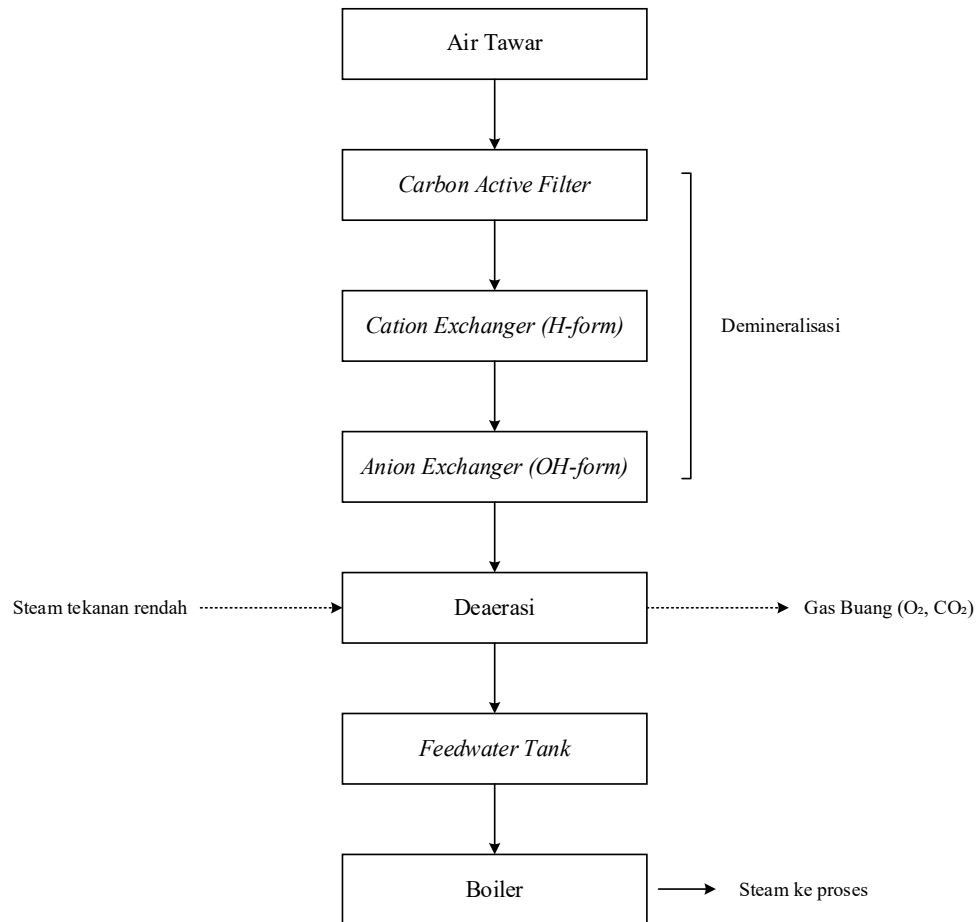
- pH yang terlalu rendah memicu korosi pada pipa dan komponen logam, sedangkan pH yang terlalu tinggi mendorong terbentuknya kerak.
- Kesadahan air *make-up* tetap perlu dijaga rendah karena tidak ada mekanisme pembuangan otomatis seperti *blowdown* pada sistem terbuka.
- Bagian pipa dengan aliran lambat atau mati (*dead leg*) tetap rawan pertumbuhan mikroorganisme/biofilm sehingga umumnya diperlukan dosis biosida secara berkala meski volume air dalam sistem relatif kecil.
- Diperlukan penambahan *corrosion inhibitor* (umumnya berbasis nitrit, molibdat, atau fosfat) untuk melindungi permukaan logam dalam sistem tertutup.

3. Air Umpan Boiler

Boiler feed water merupakan air umpan yang digunakan untuk menghasilkan *steam* sebagai media pemanas dalam proses. Pada pra-rancangan pabrik isobutil asetat ini, *steam* yang dihasilkan oleh boiler digunakan untuk memenuhi kebutuhan panas pada *pre-heater* dan reboiler menara distilasi reaktif. Dalam proses pembentukan *steam*, air dipanaskan hingga mengalami penguapan, sedangkan ion-ion mineral yang terlarut tidak ikut menguap dan akan tertinggal di dalam boiler. Akibatnya, konsentrasi mineral dalam air boiler akan terus meningkat selama operasi apabila tidak dikendalikan. Kondisi ini dapat menyebabkan berbagai permasalahan yang menurunkan efisiensi operasi dan mempercepat kerusakan peralatan.

Air boiler harus memiliki kualitas yang baik untuk menghasilkan *steam* yang sesuai dengan kebutuhan proses. Maka dari itu, air umpan terlebih dahulu melalui

proses demineralisasi untuk menghilangkan mineral terlarut dan dilanjutkan dengan proses deaerasi untuk mengurangi kandungan gas-gas terlarut, terutama oksigen (O_2) dan karbon dioksida (CO_2) yang dapat memicu korosi pada peralatan (Shokri & Sanavi, 2023). Tahapan pengolahan air umpan boiler secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Diagram Alir Unit Air Umpan Boiler

Menurut Veolia Water Technologies & Solutions, 2026, tahapan pengolahan air umpan boiler adalah sebagai berikut:

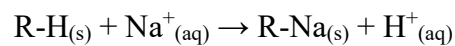
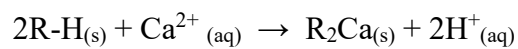
1. *Carbon Active Filter*

Air tawar dilewatkan melalui media karbon aktif untuk menghilangkan klorin, senyawa organik, bau, dan warna melalui mekanisme adsorpsi fisik sebelum masuk ke unit demineralisasi. Proses penghilangan klorin pada tahap ini penting karena klorin dapat merusak dan menurunkan kapasitas resin penukar ion pada tahap berikutnya sehingga efektivitas demineralisasi berkurang. Air yang keluar dari tahap ini memiliki pH sekitar 6,8–7,7 dan siap diumpankan ke unit *cation exchanger*.

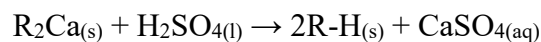
2. *Cation Exchanger*

Pada tahap pertama demineralisasi, resin kation asam kuat dalam bentuk hidrogen (*H-form*) mengubah garam-garam terlarut menjadi asam-asam. Ion-ion kation seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , dan Na^+ yang terkandung dalam air digantikan oleh ion H^+ dari resin. Untuk air umpan boiler bertekanan tinggi, hampir seluruh ion terlarut termasuk silika dan karbon dioksida harus dihilangkan sehingga proses ini menjadi tahap kritis dalam menghasilkan air berkemurnian tinggi. Air keluaran *cation exchanger* bersifat asam dengan pH sekitar 3,2–3,3 karena ion H^+ yang dilepaskan ke dalam air.

Reaksi operasi (penukaran ion):



Reaksi regenerasi (dengan H_2SO_4 ketika resin telah jenuh):

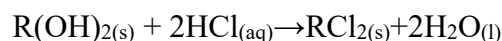


Regenerasi dilakukan melalui tiga tahap, yaitu *backwash* untuk melonggarkan *bed* resin, injeksi larutan H_2SO_4 , dan pembilasan hingga resin kembali ke bentuk R-H dan siap digunakan kembali.

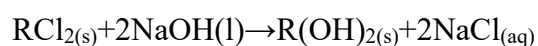
3. *Anion Exchanger*

Air keluaran *cation exchanger* selanjutnya diumpankan ke unit *anion exchanger* yang menggunakan resin anion basa kuat dalam bentuk hidroksil (*OH-form*). Resin ini menghilangkan seluruh anion mineral terlarut termasuk Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , dan SiO_3^{2-} . Ion OH^- dari resin menetralkan asam-asam yang terbentuk dari tahap *cation exchanger* sehingga menghasilkan air dengan kemurnian tinggi yang setara kualitas air destilasi dan sesuai untuk air umpan boiler bertekanan tinggi. Air keluaran memiliki pH sekitar 8,6–8,9.

Reaksi operasi (penukaran ion):



Reaksi regenerasi (dengan NaOH ketika resin telah jenuh):



Regenerasi dilakukan melalui tiga tahap, yaitu *backwash*, injeksi larutan NaOH , dan pembilasan hingga resin kembali ke bentuk R-OH.

4. Dearasi

Oksigen terlarut (DO) merupakan penyebab utama korosi pada berbagai bagian boiler karena pada air panas, oksigen bersifat sangat korosif bahkan

dalam konsentrasi kecil. Oksigen mengoksidasi permukaan logam melalui reaksi elektrokimia. Pada tahap ini besi teroksidasi pada reaksi anodik dan elektron yang dilepaskan diserap oleh oksigen terlarut pada reaksi katodik sehingga material akan menipis secara bertahap (Shokri & Sanavi, 2023). Deaerasi dilakukan secara mekanis dengan memanaskan air menggunakan *steam* bertekanan rendah di dalam *deaerating heater* sehingga gas-gas terlarut (O_2 dan CO_2) terlepas dan dibuang bersama sebagian *steam* yang diventilasi keluar sistem. Selain secara mekanis, deaerasi juga dapat dilakukan secara kimiawi dengan penambahan hidrazin (N_2H_4) sebagai pengikat oksigen sisa yang masih terkandung dalam air setelah proses mekanis (Shokri & Sanavi, 2023).

5. Tangki Penyimpanan Air Umpan (*Feedwater Tank*)

Air hasil deaerasi ditampung di tangki penyimpanan sebagai cadangan operasional sebelum dipompa masuk ke boiler. Tangki ini juga berfungsi sebagai titik penambahan bahan kimia pendukung seperti fosfat untuk pengendalian kerak selama operasi boiler berlangsung (Midwest Machinery, 2026).

Persyaratan kualitas air umpan boiler dan air boiler yang digunakan dalam pra-rancangan ini disesuaikan dengan tekanan operasi boiler dan disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Syarat Kualitas Air Umpan Boiler dan Air Boiler Berdasarkan Tekanan Operasi

Parameter	0–300 psig (0– 2.07 MPa)	301–450 psig (2.08– 3.10 MPa)	451–600 psig (3.11– 4.14 MPa)	601–750 psig (4.15– 5.17 MPa)	751–900 psig (5.18– 6.21 MPa)	901–1000 psig (6.22– 6.89 MPa)	1001–1500 psig (6.90– 10.34 MPa)	1501–2000 psig (10.35– 13.79 MPa)
Feedwater								
Dissolved oxygen, ppm (mg/L) O ₂	< 0.007	< 0.007	< 0.007	< 0.007	< 0.007	< 0.007	< 0.007	< 0.007
Total iron, ppm (mg/L) Fe	≤ 0.1	≤ 0.05	≤ 0.03	≤ 0.025	≤ 0.025	≤ 0.02	≤ 0.01	≤ 0.01
Total copper, ppm (mg/L) Cu	≤ 0.05	≤ 0.025	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.015	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01
Total hardness, ppm (mg/L)	< 0.3	< 0.3	< 0.2	< 0.2	< 0.1	< 0.05	ND	ND
pH @ 25°C	8.3–10.0	8.3–10.0	8.3–10.0	8.3–10.0	8.3–10.0	8.8–9.6	8.8–9.6	8.8–9.6
Chemical for preboiler system protection	NS	NS	NS	NS	NS	VAM	VAM	VAM
Nonvolatile TOC, ppm (mg/L) C	< 1	< 1	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.2	< 0.2	< 0.2
Oily matter, ppm	< 1	< 1	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.2	< 0.2	< 0.2
Boiler Water								

Silica, ppm (mg/L)	< 150	< 90	< 40	< 30	< 20	< 8	< 2	< 1
Total alkalinity, ppm (mg/L)	< 700	< 500	< 500	< 200	< 150	< 100	< NS	< NS
Free OH alkalinity, ppm (mg/L)	350–500	450–900	300–800	150–300	100–200	NS–200	ND–150	ND–40
Specific conductance @ 25°C, µmhos/cm (without neutralization)	450–1100	450–900	300–800	150–300	120–200	NS–200	ND–150	ND–40
Total Dissolved Solids in Steam								
TDS (maximum), ppm (mg/L)	1.0–0.2	1.0–0.2	1.0	0.2	0.5–0.1	0.5–0.1	0.1	0.1

Keterangan:

NS = Not Specified

ND = Not Detectable

VAM = Volatile Alkalizing Materials

Sumber: ASME, CRTD Vol. 34, *Consensus on Operating Practices for the Control of Feedwater and Boiler Water Chemistry in Modern Industrial Boilers*, Tabel 1, dalam Midwest Machinery, 2026

Kualitas air boiler perlu dikendalikan untuk mencegah berbagai permasalahan yang dapat mengganggu operasi boiler. Terdapat tiga permasalahan utama yang perlu diperhatikan dalam pengoperasian boiler, yaitu:

a. Korosi

Korosi pada boiler umumnya disebabkan oleh pH air yang rendah serta adanya gas-gas terlarut, seperti oksigen (O_2), karbon dioksida (CO_2), dan hidrogen sulfida (H_2S). Gas-gas tersebut dapat bereaksi dengan permukaan logam sehingga menyebabkan penipisan material dan menurunkan umur pakai peralatan (Shokri & Sanavi, 2023).

b. Pembentukan Kerak (*Scaling*)

Kerak terbentuk akibat pengendapan mineral terlarut pada suhu operasi yang tinggi, terutama kalsium karbonat dan silika. Endapan tersebut dapat menempel pada permukaan perpindahan panas sehingga menghambat transfer panas dan menurunkan efisiensi boiler. Untuk mengurangi pembentukan kerak, dapat ditambahkan senyawa fosfat yang mengikat ion kalsium menjadi endapan lunak yang lebih mudah dikeluarkan melalui proses *blowdown* (Midwest Machinery, 2026).

c. Pembentukan Busa (*Foaming*)

Foaming terjadi akibat adanya kontaminan, seperti zat organik atau bahan kimia tertentu, di dalam air boiler. Kondisi ini dapat menyebabkan terbawanya butiran air bersama aliran steam (*carryover*), sehingga berpotensi menimbulkan endapan dan korosi pada sistem perpipaan maupun peralatan proses yang menggunakan *steam* (Shokri & Sanavi, 2023).

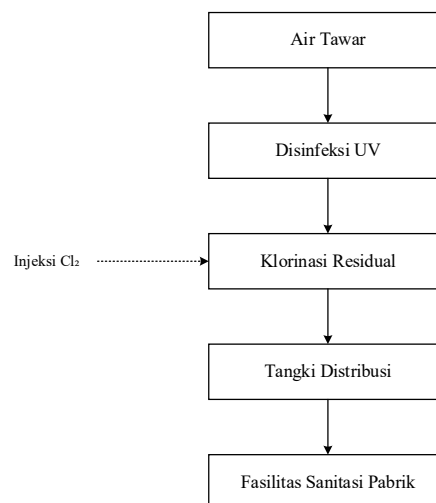
Pengendalian terhadap ketiga permasalahan tersebut dilakukan melalui proses *blowdown*, yaitu pembuangan sebagian air boiler secara berkala untuk menjaga konsentrasi zat terlarut tetap berada dalam batas yang diizinkan. Dengan pengolahan air umpan yang baik dan pengendalian kualitas air boiler yang memadai, steam yang dihasilkan dapat memenuhi kebutuhan pemanasan proses secara efisien sekaligus menjaga keandalan operasi boiler dan peralatan pendukungnya.

4. Air Konsumsi Umum dan Sanitasi

Penggunaan air tidak hanya dibutuhkan untuk kegiatan proses, melainkan juga digunakan untuk keperluan umum karyawan, seperti mandi, cuci, dan kakus

(MCK). Air untuk keperluan tersebut tidak bisa sembarangan, melainkan harus memenuhi standar baku mutu yang berlaku, baik dari segi fisik maupun kimia. Dari segi fisik, air semestinya bersuhu setara dengan suhu lingkungan sekitar, terlihat jernih, serta tidak berasa dan berbau. Sementara dari segi kimia, air tersebut harus bebas dari zat-zat yang berpotensi membahayakan kesehatan, baik yang bersifat organik maupun anorganik.

Meskipun air tawar hasil unit pengolahan air telah melalui proses *reverse osmosis* sehingga kandungan garam dan kontaminan kimianya sangat rendah, proses RO menghilangkan seluruh perlindungan disinfeksi residual dari sumber air sehingga mikroorganisme tetap berpotensi berkembang di dalam sistem perpipaan distribusi apabila tidak dilakukan disinfeksi lanjutan (Saha et al., 2026). Oleh karena itu, diperlukan tahapan pengolahan tambahan sebelum air dapat digunakan untuk keperluan sanitasi. Tahapan pengolahan air sanitasi ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Diagram Alir Unit Air Konsumsi Umum dan Sanitasi

Menurut Saha et al., 2026, tahapan pengolahan air sanitasi setelah proses RO adalah sebagai berikut:

1. Disinfeksi UV (*Ultraviolet Disinfection*)

Air tawar hasil RO dilewatkan melalui unit disinfeksi UV sebagai tahap akhir dalam rangkaian pengolahan air (*treatment train*). Sistem UV menggunakan lampu merkuri bertekanan rendah yang memancarkan cahaya UV pada panjang gelombang 254 nm untuk membunuh atau menonaktifkan patogen dengan cara merusak DNA mikroorganisme. Metode ini efektif terhadap bakteri,

virus, dan sebagian besar protozoa tanpa menambahkan bahan kimia apapun ke dalam air sehingga tidak mengubah rasa, bau, maupun komposisi kimia air. Dosis UV minimum yang disyaratkan berdasarkan standar NSF/ANSI 55 adalah 40 mJ/cm² untuk memastikan inaktivasi patogen secara efektif.

2. Klorinasi Residual

Setelah disinfeksi UV, ditambahkan klorin dalam konsentrasi rendah (0,3–0,5 mg/L klorin bebas residual) ke dalam air untuk mempertahankan perlindungan disinfeksi sepanjang sistem perpipaan distribusi hingga titik penggunaan. Klorin residual diperlukan karena disinfeksi UV hanya efektif di dalam unit perlakuan dan tidak memberikan perlindungan berkelanjutan di luar unit tersebut. Penambahan klorin dalam konsentrasi yang tepat juga membantu menghilangkan bau dan mengendalikan pertumbuhan bakteri selama penyimpanan dan distribusi.

3. Tangki Distribusi

Air yang telah melalui disinfeksi UV dan klorinasi residual ditampung di tangki distribusi sebelum dialirkan ke seluruh fasilitas sanitasi pabrik, termasuk toilet, wastafel, dan fasilitas MCK karyawan.

Berdasarkan pada Gambar 4.5, kualitas air yang dipakai untuk keperluan umum dan sanitasi pada pabrik ini harus dijaga agar tidak melampaui batas parameter yang ditetapkan. Parameter lengkap yang menjadi acuan ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Parameter Air untuk Keperluan Higiene dan Sanitasi

No.	Parameter	Kadar Maksimum	Satuan	Metode Pengujian
Mikrobiologi				
1	<i>Escherichia coli</i>	0	CFU/100 mL	SNI/APHA
2	Total Coliform	0	CFU/100 mL	SNI/APHA
Fisik				
3	Suhu	Suhu udara ± 3°C	-	SNI/APHA
4	Total Dissolved Solid (TDS)	< 300	mg/L	SNI/APHA
5	Kekeruhan	< 3	NTU	SNI atau yang setara

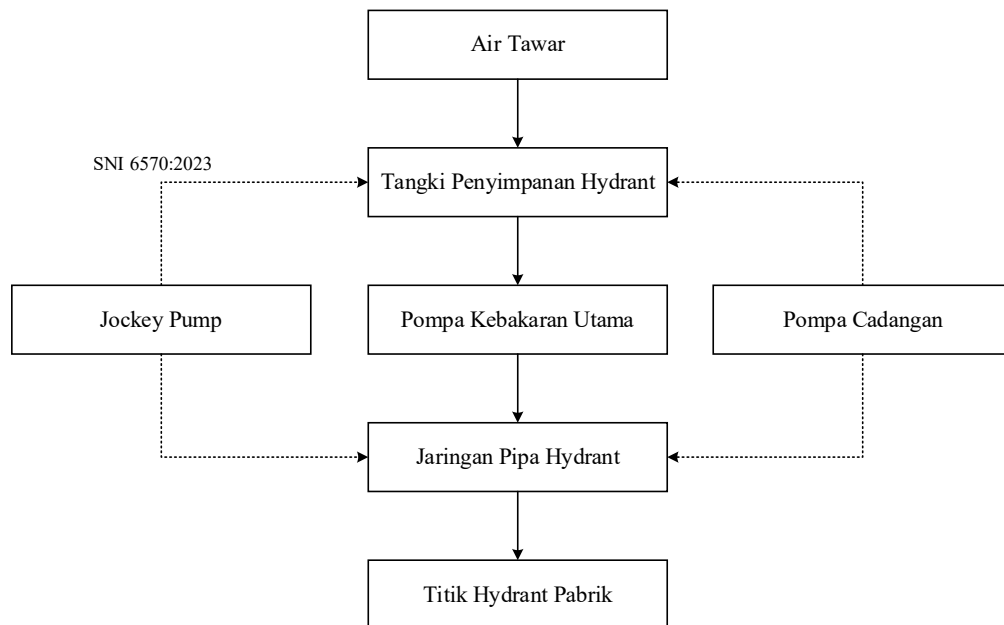
6	Warna	10	TCU	SNI/APHA
7	Bau	Tidak berbau	-	APHA
Kimia				
8	pH	6,5 – 8,5	-	SNI/APHA
9	Nitrat (sebagai NO ₃ , terlarut)	20	mg/L	SNI/APHA
10	Nitrit (sebagai NO ₂ , terlarut)	3	mg/L	SNI/APHA
11	Kromium valensi 6 (terlarut)	0,01	mg/L	SNI/APHA
12	Besi (Fe, terlarut)	0,2	mg/L	SNI/APHA
13	Mangan (Mn, terlarut)	0,1	mg/L	SNI/APHA

Sumber: Permenkes No. 2 Tahun 2023

Berdasarkan pada Tabel 4.4., kualitas air yang dipakai untuk keperluan umum dan sanitasi pada pabrik ini harus dijaga supaya tidak melampaui batas-batas parameter mikrobiologi, fisik, dan kimia yang sudah ditetapkan sehingga aman digunakan oleh seluruh karyawan.

5. Air Pemadam Kebakaran

Air pemadam kebakaran merupakan salah satu utilitas yang wajib tersedia di pabrik untuk mengantisipasi terjadinya kebakaran dan mendukung upaya penanggulangan secara cepat. Pada pra-rancangan pabrik isobutil asetat ini, air pemadam kebakaran berasal dari air tawar hasil unit pengolahan air yang ditampung secara terpisah di tangki penyimpanan khusus *hydrant*. Pemisahan tangki ini penting untuk memastikan ketersediaan air pemadaman tidak terganggu oleh kebutuhan utilitas lain selama keadaan darurat berlangsung (Nair, 2014). Air tersebut kemudian disalurkan melalui jaringan pipa *hydrant* yang terhubung ke seluruh area pabrik. Titik-titik *hydrant* ditempatkan pada lokasi yang strategis dengan mempertimbangkan kemudahan akses dan jangkauan terhadap seluruh fasilitas pabrik apabila terjadi keadaan darurat. Tahapan penyediaan air pemadam kebakaran ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Diagram Alir Unit Air Pemadam Kebakaran

Menurut Nair, 2014, tahapan penyediaan air pemadam kebakaran pada industri proses adalah sebagai berikut:

1. Air Tawar Masuk

Air tawar dari unit pengolahan air dialirkan ke tangki penyimpanan *hydrant* secara kontinu untuk menjaga level tangki tetap pada kapasitas penuh. Air yang digunakan untuk keperluan pemadam kebakaran tidak memerlukan perlakuan khusus tambahan selain yang telah diperoleh dari unit pengolahan air, karena fungsinya semata-mata sebagai media penyerap panas dan bukan untuk dikonsumsi.

2. Tangki Penyimpanan *Hydrant*

Air tawar ditampung di tangki penyimpanan khusus *hydrant* yang terpisah dari tangki utilitas lainnya. Kapasitas tangki penyimpanan air *hydrant* ditentukan berdasarkan ketentuan dalam SNI 6570:2023 tentang Instalasi Pompa yang Dipasang Tetap untuk Proteksi Kebakaran, yaitu berdasarkan kebutuhan air untuk durasi operasi minimum 45 menit pada kapasitas nominal pompa kebakaran, atau berdasarkan kebutuhan hidraulik hasil perhitungan dengan menggunakan nilai yang lebih besar sebagai dasar perancangan. Untuk industri yang memproses cairan mudah terbakar dalam jumlah besar, kapasitas penyimpanan minimum yang direkomendasikan adalah empat jam pasokan pada laju *firewater* maksimum yang diperkirakan.

3. Pompa Kebakaran (*Fire Pump*)

Air dari tangki dialirkan ke sistem distribusi menggunakan pompa kebakaran sentrifugal. Sistem pemompaan terdiri dari pompa utama bertenaga listrik (*electric drive*) dan pompa cadangan bertenaga mesin diesel (*diesel engine driven pump*) yang beroperasi secara otomatis apabila pompa utama gagal atau terjadi pemadaman listrik. Selain itu, dipasang *jockey pump* berkapasitas kecil untuk mempertahankan tekanan pada jaringan *hydrant* saat sistem tidak sedang digunakan aktif, sehingga kebocoran kecil tidak menyebabkan penurunan tekanan yang memicu pompa utama beroperasi tanpa keperluan.

4. Jaringan Pipa *Hydrant*

Air bertekanan dari pompa kebakaran didistribusikan melalui jaringan pipa *loop* yang mengelilingi seluruh area pabrik. Sistem *loop* dipilih karena memungkinkan aliran air dari dua arah menuju titik kebakaran secara bersamaan sehingga tekanan di titik *hydrant* tetap terjaga. Ukuran pipa utama minimum adalah 20 cm (8 inci) dengan cabang 15 cm (6 inci) menuju masing-masing titik *hydrant*. Tekanan minimum residual yang harus tersedia di titik *hydrant* terjauh adalah 5,6 kg/cm².

5. Titik *Hydrant* Pabrik

Titik-titik *hydrant* ditempatkan di seluruh area pabrik dengan jarak antar titik tidak melebihi 30–60 meter sehingga semua bagian pabrik dapat dijangkau oleh minimal dua aliran selang *hydrant* secara bersamaan. Penempatan titik *hydrant* mempertimbangkan lokasi unit proses, tangki penyimpanan, *loading rack*, dan gedung-gedung pendukung pabrik.

4.1.3. Kebutuhan Air

Secara umum penyediaan kebutuhan air pada prarancangan pabrik isobutil asetat ini meliputi kebutuhan air pendingin (*cooling water*), *Chilled water*, air domestik, dan air *hydrant*, yang diperkirakan sebagai berikut:

1. Kebutuhan Air Pendingin (*Cooling Water*)

Air pendingin digunakan untuk menjaga suhu kondenser agar tetap stabil sesuai kondisi operasi yang dirancang. Kebutuhan air pendingin dihitung berdasarkan beban panas kondensor (QC-201) hasil dari neraca panas pada kondensor di menara distilasi reaktif (RD-201) dengan persamaan sebagai berikut:

$$mCW = \frac{Q_c}{C_{\text{pair}} - \Delta T}$$

Keterangan:

- QC = beban panas kondensor : 143.850,54 kJ/jam
- Cp air = kapasitas panas air : 4,2 kJ/kg.°C
- ΔT = selisih suhu air pendingin keluar dan masuk = 45 – 30 = 15 °C

$$mCW = \frac{143.850,54}{4,2 \times 15} = \frac{143.850,54}{63} = 2.283,34 \text{ kg/jam}$$

Adapun kebutuhan air pendingin pada pra-rancangan pabrik isobutil asetat dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Kebutuhan Air Pendingin		
No.	Nama Alat	Kebutuhan (kg/jam)
1	Condenser RD-201 (CD-201)	2.283,34
	Total	2.283,34

2. Kebutuhan *Chilled water*

Chilled water digunakan sebagai media pendingin pada *cooler* (CL-401) untuk mendinginkan produk akhir isobutil asetat hingga suhu penyimpanan. Kebutuhan *Chilled water* dihitung berdasarkan beban panas *cooler* CL-401 hasil neraca panas dengan persamaan berikut:

$$mChW = \frac{Q_c}{C_{\text{pair}} - \Delta T}$$

Keterangan:

- QCL = beban panas *cooler* : 115.806,85 kJ/jam
- Cp air = kapasitas panas air : 4,2 kJ/kg.°C
- ΔT = selisih suhu air pendingin keluar dan masuk = 20 – 10 = 10 °C

$$mChW = \frac{115.806,85}{4,2 \times 10} = \frac{115.806,85}{42} = 2.757,31 \text{ kg/jam}$$

Adapun kebutuhan *Chilled water* pada prarancangan pabrik isobutil asetat dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Kebutuhan <i>Chilled water</i>		
No.	Nama Alat	Kebutuhan (kg/jam)
1	<i>Cooler</i> (CL-401)	2.757,31
	Total	2.757,31

3. Kebutuhan Air Domestik

Air domestik digunakan untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari karyawan dan operasional fasilitas pabrik, meliputi kebutuhan MCK karyawan, laboratorium, dan pembersihan area pabrik. Perhitungan kebutuhan air domestik mengacu pada Keputusan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No. 70 Tahun 2016 tentang Standar dan Persyaratan Kesehatan Lingkungan Kerja Industri yang menetapkan kebutuhan air sanitasi minimum sebesar 60 liter/orang/hari, yang mencakup penggunaan toilet, cuci tangan, air minum, dan kebersihan umum selama jam kerja.

a. Air untuk karyawan kantor.

Jumlah karyawan pabrik isobutil asetat sebanyak 92 orang sehingga kebutuhan air yang diperlukan adalah:

$$\begin{aligned} &= 92 \text{ orang} \times 60 \text{ L/orang/hari} \\ &= 5.5200 \text{ L/hari} \\ &= 5,52 \text{ m}^3/\text{hari} \end{aligned}$$

b. Air untuk tamu, kontraktor, pekerja lepas.

Diasumsikan jumlah tamu, kontraktor, dan pekerja lepas sebanyak 20 orang per hari sehingga kebutuhan air yang diperlukan berdasarkan SNI 03-7065-2005 dimana sebesar 50L/hari adalah:

$$\begin{aligned} &= 20 \text{ orang} \times 50 \text{ L/orang/hari} \\ &= 1000 \text{ L/hari} \\ &= 1 \text{ m}^3/\text{hari}. \end{aligned}$$

c. Air untuk laboratorium.

Kebutuhan air laboratorium dihitung berdasarkan SNI 03-7065-2005 yang menetapkan kebutuhan air laboratorium sebesar 100 liter/orang/hari. Pekerja yang menggunakan fasilitas laboratorium meliputi karyawan proses *shift* sebanyak 25 orang sehingga kebutuhan airnya adalah:

$$\begin{aligned} &= 25 \text{ orang} \times 100 \text{ L/orang/hari} \\ &= 2500 \text{ L/hari} \\ &= 2,5 \text{ m}^3/\text{hari} \end{aligned}$$

d. Air untuk pembersihan area pabrik.

Kebutuhan air untuk pembersihan area pabrik dihitung berdasarkan luas total area pabrik sebesar 4.069 m² dengan asumsi penggunaan sistem

pembersihan bertekanan tinggi (*high pressure jet cleaner*) yang memerlukan air sebesar 2,5 liter/m²/hari (Colorado Waterwise Council, 2007):

$$= 4.069 \text{ m}^2 \times 2,5 \text{ L/m}^2/\text{hari}$$

$$= 10.172,5 \text{ L/hari}$$

$$\approx 11 \text{ m}^3/\text{hari}$$

$$\text{Kebutuhan air untuk sanitasi sebanyak} = 5,52 + 1,0 + 2,5 + 11$$

$$= 19,1 \text{ m}^3/\text{hari}.$$

4. Kebutuhan Air *Hydrant*

Berdasarkan SNI 6570:2023 : Instalasi Pompa yang Dipasang Tetap untuk Proteksi Kebakaran, kapasitas tangki penyimpanan air *hydrant* dihitung dari durasi 45 menit kapasitas nominal pompa kebakaran. Pada pra-rancangan ini, kapasitas pompa kebakaran diasumsikan sebesar 500 GPM (1.892,5 liter/menit), sebagai nilai yang umum digunakan untuk fasilitas industri skala kecil menengah. Maka volume tangki penyimpanan minimum adalah:

$$V = Q \times t$$

$$= 1.892,5 \text{ liter/menit} \times 45 \text{ menit}$$

$$= 85.162,5 \text{ liter}$$

$$= 85,16 \text{ m}^3.$$

4.2 Unit Pengadaan *Steam*

Untuk menghasilkan uap air yang digunakan untuk proses pabrik adalah dengan boiler. Pemilihan boiler biasanya ditentukan oleh kapasitas dan tekanan uap yang dihasilkan, bahan bakar yang digunakan, keawetan instalasi, biaya perawatan dan operasi serta faktor-faktor ekonomi lain. Pabrik isobutil asetat ini menggunakan *steam* untuk memenuhi kebutuhan panas pada alat *pre-heater* (HE-101 dan HE-102) dan *reboiler* (RB-201) yang dihasilkan oleh boiler. Kebutuhan steam dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Kebutuhan *Steam*

No.	Nama Alat	Kebutuhan (kg/jam)
1	<i>Pre-heater</i> (HE-101)	23,870
2	<i>Pre-heater</i> (HE-102)	30,856
3	Reboiler (RB-201)	56,378
	Total	111,105

Umpan boiler disuplai dari unit pengolahan air. Total kebutuhan *steam* adalah sebesar 111,105 kg/jam. Untuk menjaga ketersediaan *steam*, ditambahkan 20% sebagai faktor kehilangan, sehingga jumlah *steam* total yang dibutuhkan adalah sebesar 133,326 kg/jam. Jenis boiler yang digunakan adalah *water tube boiler* (air di dalam *tube* dan api di luar *tube*). Digunakan *water tube boiler* karena memiliki efisiensi termal yang tinggi. *Water tube boiler* modern dapat mencapai efisiensi lebih dari 90% dan mampu menghasilkan *steam* bertekanan tinggi dengan kapasitas besar sesuai kebutuhan industri proses (Engineering ToolBox, 2003).

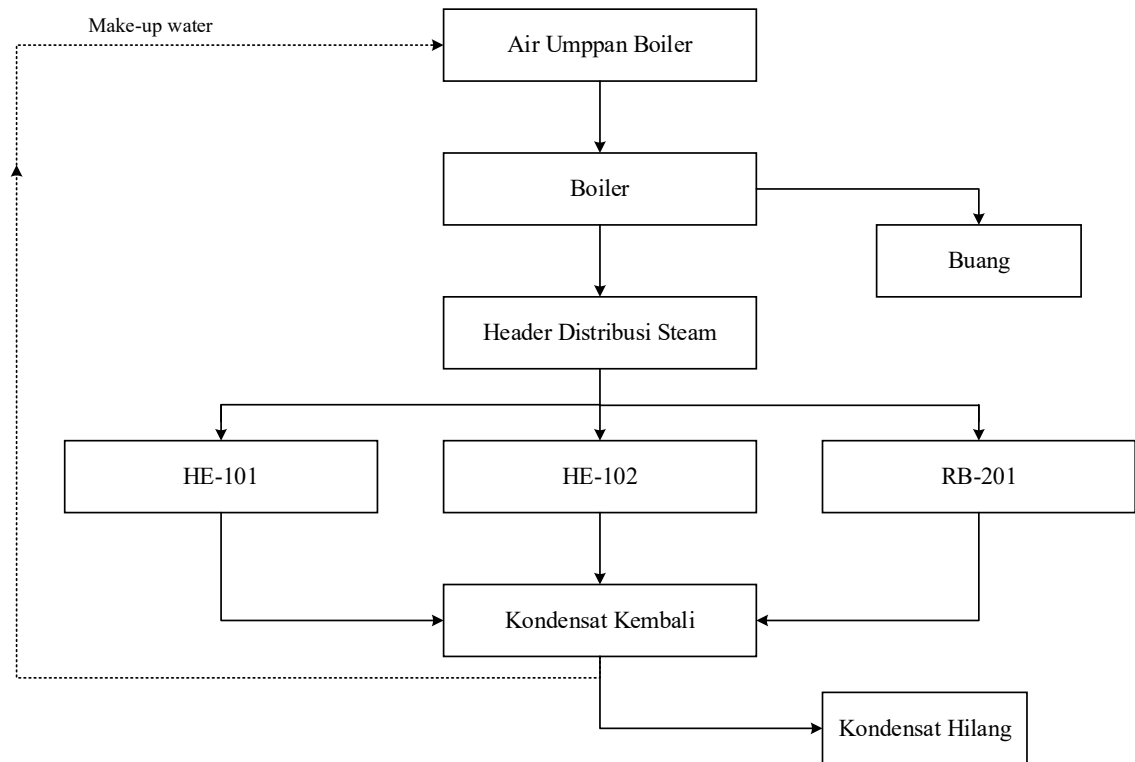
Steam yang digunakan merupakan *saturated steam* berdasarkan *steam table* (Smith dkk., 2018) pada kondisi:

- Tekanan = 361,38 kPa
- Suhu = 140°C
- H_v (*enthalpy* uap jenuh) = 2.733,1 kJ/kg
- H_i (*enthalpy* cair jenuh) = 589,1 kJ/kg

Kebutuhan steam dihitung menggunakan persamaan (Kern, 1965, hal. 257, Pers. 12.1) (Kern, 1950):

$$m = \frac{Q}{H_v - H_i}$$

Blowdown pada air umpan boiler ditetapkan sebesar 5% dari *steam* yang dihasilkan (Midwest Machinery, 2026). Tahapan pengadaan *steam* secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Diagram Alir Unit Pengadaan Steam

$$\begin{aligned}
 \text{Blowdown} &= 5\% \text{ dari steam yang dihasilkan} \\
 &= 5\% \times 133,326 \text{ kg/jam} \\
 &= 6,666 \text{ kg/jam}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Umpan air masuk boiler} &= \text{blowdown} + \text{steam yang dihasilkan} \\
 &= 6,666 + 133,326 \\
 &= 139,992 \text{ kg/jam}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Kondensat yang kembali} &= 80\% \text{ dari steam yang dihasilkan} \\
 &= 80\% \times 133,326 \\
 &= 106,660 \text{ kg/jam}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Kondensat yang hilang} &= \text{Umpan air masuk boiler} - \text{kondensat yang kembali} \\
 &= 139,992 - 106,660 \\
 &= 33,331 \text{ kg/jam}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Make up boiler} &= \text{kondensat yang hilang} + \text{blowdown} \\
 &= 33,331 + 6,666 \\
 &= 39,998 \text{ kg/jam}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \% \text{ Make up boiler} &= \frac{\text{make up boiler}}{\text{air masuk boiler}} \times 100\% \\
 &= \frac{39,998}{139,992} \times 100\%
 \end{aligned}$$

$$= 28,57\%$$

$$\begin{aligned}\% \text{ Kondensat yang kembali} &= \frac{\text{kondensat yang kembali}}{\text{air masuk boiler}} \times 100\% \\ &= \frac{106,660}{139,992} \times 100\% \\ &= 76,19\%\end{aligned}$$

Kebutuhan air boiler dapat dilihat di Tabel 4.8

Tabel 4.8 Kebutuhan Air Boiler

Keterangan	Kebutuhan (kg/jam)
Kebutuhan <i>Steam</i>	133,326
<i>Blowdown</i>	6,666
Umpan air masuk boiler	139,992
Kondensat yang kembali	106,660
Kondensat yang hilang	33,331
<i>Make up</i> boiler	39,998
Total	459,973

1. Perhitungan Kapasitas Boiler

Kapasitas boiler dihitung dengan persamaan:

$$Q = m (H - H_f)$$

Keterangan:

Q = Kapasitas boiler (BTU/jam)

m = Massa steam (lb/jam)

H_v = Entalpi uap steam pada kondisi 361,38 kPa suhu 140°C (BTU/lb)

H_f = Entalpi *feed* (BTU/lb)

Berdasarkan *steam table* (Smith dkk., 2018), *make up* air pada T = 30°C dari *steam table* didapat H_{liq} = 125,79 kJ/kg. *Steam* yang digunakan merupakan *saturated steam* dengan kondisi *steam* pada:

P = 361,38 kPa

T = 140°C

Dari *steam table* didapat:

H_f (H sat liq) = 589,1 kJ/kg

H (H sat vap) = 2.733,1 kJ/kg

Karena *steam* yang masuk terdiri dari 28,57% *fresh feed* (*make up water*) dan 76,19% kondensat, Maka:

$$H_f = (0,2857 \times H_{\text{liq } 30^\circ\text{C}}) + (0,7619 \times H_{\text{sat liq } 140^\circ\text{C}})$$

$$H_f = (0,2857 \times 125,79) + (0,7619 \times 589,1)$$

$$H_f = 484,778 \text{ kJ/kg}$$

$$Q = \text{Steam} \times (H - H_f)$$

$$= 133,326 \text{ kg/jam} \times (2.733,1 - 484,778) \text{ kJ/kg}$$

$$= 299.758,665 \text{ kJ/jam}$$

$$= 284.115,278 \text{ BTU/jam}$$

Menentukan Luas Perpindahan Panas

Boiler *Saturated Steam*

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

$$H_p = \frac{284.115,278}{970,3 \times 34,5}$$

$$H_p = 8,487 \text{ Hp}$$

Berdasarkan standar industri Amerika Serikat, luas bidang pemanasan untuk *water tube boiler* adalah 5 ft²/Hp (Engineering ToolBox, 2008), sehingga total *heating surface*:

$$A = 5 \text{ ft}^2/\text{Hp} \times 8,487 \text{ Hp}$$

$$= 42,44 \text{ ft}^2$$

2. Perhitungan Bahan Bakar untuk Boiler

Bahan bakar yang digunakan untuk boiler adalah minyak residu (*fuel oil* No. 4), yaitu bahan bakar *intermediate* yang digunakan untuk pembakar industri yang membutuhkan atomisasi minyak dengan viskositas lebih tinggi dari pembakar domestik (Engineering ToolBox, 2003). Data properti bahan bakar yang digunakan berdasarkan Hougen & Watson (1943) adalah sebagai berikut:

$$\text{Heating Value (NHV)} = 19.676 \text{ BTU/lb}$$

$$\text{Densitas} = 59,32 \text{ lb/ft}^3$$

$$\text{Specific gravity} = 0,8691$$

$$\text{Efisiensi Boiler} = 80\%$$

Kebutuhan Bahan Bakar untuk Boiler:

$$mf = \frac{Q}{n \times \text{NHV}}$$

Keterangan:

$$Q = \text{Beban Panas}$$

$$= 284.115,278 \text{ BTU/jam}$$

N = Efisiensi Bahan Bakar

$$= 80\%$$

Maka:

$$mf = \frac{284.115,278}{0,80 \times 19.676}$$

$$mf = 18,050 \text{ lb/jam}$$

Volume Bahan Bakar:

$$V = \frac{\text{massa bahan bakar}}{\text{densitas bahan bakar}}$$

$$V = \frac{18,050}{59,32}$$

$$V = 0,30428 \text{ ft}^3/\text{jam}$$

$$= 0,0086 \text{ m}^3/\text{jam}$$

Kebutuhan Setiap Bulan:

$$0,0086 \frac{\text{m}^3}{\text{jam}} \times \frac{24 \text{ jam}}{\text{hari}} \times \frac{30 \text{ hari}}{\text{bulan}} = 6,19 \text{ m}^3/\text{bulan}$$

4.3 Unit Pengadaan Listrik (*Power Plant System*)

Unit penyediaan tenaga listrik berfungsi untuk memasok kebutuhan energi listrik bagi seluruh peralatan dan fasilitas di pabrik. Pada pra-rancangan pabrik isobutil asetat ini, sumber listrik utama berasal dari PLN. Proses produksi yang berlangsung secara kontinyu, diperlukan sumber listrik cadangan untuk menjaga kelangsungan operasi apabila terjadi gangguan atau pemadaman listrik dari jaringan utama. Maka dari itu, disediakan generator sebagai sumber tenaga listrik darurat yang akan beroperasi ketika pasokan listrik dari PLN terputus. Generator yang digunakan adalah generator arus bolak-balik (AC) tiga fasa karena mampu menyediakan daya yang besar dan sesuai untuk kebutuhan peralatan industri. Sistem tiga fasa memiliki kestabilan tegangan yang baik, efisiensi penyaluran daya yang tinggi, serta memungkinkan penggunaan beberapa tingkat tegangan melalui transformator sesuai kebutuhan peralatan (Engineering ToolBox, 2003). Penggunaan sistem ini juga mendukung pengoperasian motor-motor listrik berdaya besar yang banyak digunakan pada pompa, kompresor, dan peralatan proses lainnya sehingga operasi pabrik dapat berlangsung dengan lebih andal dan efisien.

4.3.1. Kebutuhan Listrik untuk Alat Proses

Kebutuhan listrik untuk kegunaan alat proses di pabrik isobutil asetat dapat dilihat pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Kebutuhan Listrik untuk Alat Proses			
Alat	HP	Jumlah	Total HP
dipilih			
Pompa Asam Asetat	1	1	1
Pompa Isobutanol	1	1	1
Pompa Isobutil Asetat	1	1	1
Jumlah		3	3

4.3.2. Kebutuhan Listrik untuk Utilitas

Kebutuhan listrik untuk proses utilitas dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Kebutuhan Listrik untuk Utilitas			
Alat	HP	Jumlah	Total HP
Pompa <i>cooling water</i>	1	1	1
Pompa <i>Chilled water</i>	1	1	1
Pompa air sanitasi	1	1	1
Pompa <i>feedwater</i> boiler	1	1	1
Pompa bahan bakar boiler	1	1	1
Pompa pengolahan limbah (IPAL)	1	1	1
Pompa menuju IPAL	1	1	1
Jumlah		7	7

$$\begin{aligned}\text{Kebutuhan listrik pengolahan} &= \text{Kebutuhan proses} + \text{Kebutuhan Utilitas} \\ &= 3 \text{ HP} + 7 \text{ HP} \\ &= 10 \times 0,7457 \\ &= 7,457 \text{ kW}\end{aligned}$$

4.3.3. Kebutuhan Listrik untuk Penerangan

Perkiraan besarnya tenaga listrik yang dibutuhkan untuk keperluan penerangan dapat ditentukan dengan pendekatan konsep *Luminous Efficacy*, yaitu tenaga radiasi cahaya yang dikeluarkan oleh lampu dalam bentuk lumen. Kebutuhan pencahayaan per luas area dapat ditentukan dengan:

$$\text{Lumen} = \text{Area} \times \text{Lux}$$

Keterangan:

Area = luas daerah yang membutuhkn pencahayaan (m²)

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

Besarnya nilai lux berbeda-beda tergantung jenis area yang akan diberi penerangan. Pada pra-rancangan ini, nilai lux standar yang digunakan mengacu pada Zumtobel, 2018, yang disusun berdasarkan standar Eropa EN 12464-1 (pencahayaan ruang dalam) dan EN 12464-2 (pencahayaan ruang luar). Standar ini konsisten dengan Keputusan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No. 70 Tahun 2016 tentang Standar dan Persyaratan Kesehatan Lingkungan Kerja Industri yang juga mengatur kebutuhan pencahayaan minimum di lingkungan kerja. Kebutuhan lumen untuk tiap area ditunjukkan pada Tabel 4.11 dan 4.12.

Tabel 4.11 Kebutuhan Lumen Penerangan Pabrik (*Indoor*)

No.	Ruangan/Area	Luas (m ²)	Intensitas Penerangan (Lux)	Kebutuhan Cahaya (Lumen)
1	Mushola	60	200	12.000
2	Kantin	80	200	16.000
3	Poliklinik	36	500	18.000
4	Perkantoran	200	500	100.000
5	Bengkel Maintenance	80	300	24.000
6	Penyimpanan Katalis	36	100	3.600
7	Area Proses	160	300	48.000
8	Control Room & Laboratorium	80	500	40.000
9	Ruang P3K/APAR	12	500	6.000
10	Area Utilitas	150	200	30.000
11	WWTP	100	150	15.000
Jumlah		994		312.600

*Tidak ada kategori "tempat ibadah" pada EN 12464; nilai didekati dengan kategori "lounges/general assembly area"

Sumber: Zumtobel Lighting GmbH, *The Lighting Handbook*, 6th ed. (2018), berdasarkan EN 12464-1 dan EN 12464-2.

Tabel 4.12 Kebutuhan Lumen Penerangan Pabrik (*Outdoor*)

No.	Area	Luas (m ²)	Intensitas Penerangan (Lux)	Kebutuhan Cahaya (Lumen)
1	Pos Keamanan (2 unit)	24	150	3.600
2	Area Parkir Truk	270	20	5.400

No.	Area	Luas (m ²)	Intensitas Penerangan (Lux)	Kebutuhan Cahaya (Lumen)
3	Tangki Asam Asetat (AC)	110	100	11.000
4	Tangki Isobutanol (IbOH)	170	100	17.000
5	Tangki Isobutil Asetat (IbAC)	170	100	17.000
6	Area Pengembangan Proses	400	5	2.000
7	Area Parkir Karyawan	150	10	1.500
Jumlah		1.294		57.500

Sumber: Zumtobel Lighting GmbH, The Lighting Handbook, 6th ed. (2018), berdasarkan EN 12464-1 dan EN 12464-2.

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 lumen di ruangan indoor = 288.600 lumen
- Jumlah lampu yang digunakan (*indoor*) = $312.600 / 1.400$
 $= 223,28 \approx 224$ lampu
- Jumlah lumen di ruangan outdoor = 57.500 lumen
- Jumlah lampu yang digunakan (*outdoor*) = $57.500 / 2.000$
 $= 28,75 \approx 29$ lampu
- Total daya penerangan
 $= (224 \times 14) + (29 \times 18)$
 $= 3.136 + 522$
 $= 3.658 \text{ Watt}$
 $= 3,658 \text{ kW}$

4.3.4. Kebutuhan Listrik untuk Pendingin Udara

Ruangan yang membutuhkan pendingin udara meliputi ruangan-ruangan dengan aktivitas kerja menetap dan kebutuhan kenyamanan termal khusus, yaitu perkantoran, poliklinik, *control room* & laboratorium, dan ruang P3K/APAR. Kebutuhan listrik untuk pendingin udara dapat dilihat pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Kebutuhan Listrik untuk Pendingin Udara

No.	Bangunan	Luas (m ²)
1	Perkantoran	200
2	Poliklinik	36
3	<i>Control Room</i> dan Laboratorium	80
4	Ruang P3K/APAR	12
Jumlah		328

Perancangan sistem tata udara mengacu pada SNI 03-6572-1:2024 tentang Tata Cara Perancangan Sistem Ventilasi dan Pengkondisian Udara pada Bangunan Gedung. Perhitungan beban pendinginan secara rinci menurut standar tersebut memerlukan data mengenai beban panas dari penghuni, peralatan, pencahayaan, ventilasi, dan radiasi matahari. Pada tahap pra-rancangan, kebutuhan kapasitas pendingin diperkirakan menggunakan pendekatan praktis yang umum digunakan dalam perencanaan sistem AC di Indonesia dengan asumsi tinggi plafon bangunan 2,5–3 m.

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

dengan konversi standar 1 PK $\approx$ 9.000 BTU/h, dan konsumsi daya AC standar (non-inverter) berkisar 700–800 Watt per PK. Estimasi kebutuhan AC per ruangan dapat dilihat pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Estimasi Kebutuhan AC per Ruangan

No.	Bangunan	Luas (m ²)	BTU/h	PK	Daya (Watt)*
1	Perkantoran	200	100.000	11,11	8.333
2	Poliklinik	36	18.000	2,00	1.500
3	<i>Control Room</i> dan Laboratorium	80	40.000	4,44	3.333
4	Ruang P3K/APAR	12	6.000	0,67	500
Jumlah		328	164.000	18,22	13.875

Sumber: SNI 03-6572-1:2024 (BSN) untuk kerangka acuan perancangan sistem AC gedung; nilai konversi BTU–PK–Watt mengikuti praktik umum industri HVAC Indonesia.

$$\text{Total PK} = \frac{164.000}{9.000} = 18,22 \approx 18,5 \text{ PK}$$

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan total daya AC} &= 18,5 \times 750 \\ &= 13.875 \text{ Watt} \\ &= 13,875 \text{ kW} \end{aligned}$$

4.3.5. Kebutuhan Listrik untuk Generator

Generator berfungsi sebagai sumber listrik cadangan apabila pasokan dari PT. PLN mengalami gangguan, mengingat proses produksi isobutil asetat berlangsung secara kontinyu. Total kebutuhan listrik pabrik dihitung dengan menjumlahkan seluruh komponen dan dapat dilihat pada Tabel 4.15.

Tabel 4.15 Rekapitulasi Kebutuhan Listrik

No.	Komponen	Kebutuhan (kW)
1	Proses + Utilitas	7,457
2	Penerangan	3,658
3	Pendingin udara/AC	13,875
	Jumlah	24,990
Total kebutuhan listrik		$= 7,457 + 3,658 + 13,875$ $= 24,990 \text{ kW}$

Generator bekerja pada efisiensi 80% sehingga kapasitas input generator yang diperlukan:

$$\text{Input generator} = \frac{\text{Total kebutuhan listrik}}{\text{Efisiensi generator}} = \frac{24,990}{0,80} = 31,238 \text{ kW}$$

Kapasitas *output* generator ditetapkan sebesar 50 kW berdasarkan kapasitas standar komersial yang tersedia di pasaran, dengan margin pengaman sebesar 60% di atas kebutuhan *input* aktual. Margin ini memberikan ruang yang cukup untuk menampung fluktuasi beban operasi, penambahan beban di masa depan, serta menjaga generator tidak bekerja pada beban penuh terus-menerus yang dapat memperpendek usia pakai mesin.

Spesifikasi generator:

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

4.4 Unit Pengadaan Bahan Bakar

Unit penyediaan bahan bakar berfungsi untuk memenuhi kebutuhan bahan bakar pada peralatan utilitas yang menggunakan proses pembakaran sebagai sumber energi. Pada pra-rancangan pabrik isobutil asetat ini, bahan bakar digunakan untuk mengoperasikan generator darurat (*emergency generator*) yang berfungsi sebagai sumber listrik cadangan apabila terjadi gangguan pasokan listrik dari PLN dan mesin diesel pompa *hydrant*. Keberadaan generator diperlukan untuk menjamin kontinuitas operasi peralatan penting, seperti sistem kontrol, instrumentasi, pompa utilitas, serta fasilitas keselamatan pabrik selama terjadi pemadaman listrik.

Bahan bakar yang digunakan adalah solar (*diesel fuel*) karena memiliki nilai kalor yang tinggi, mudah diperoleh, serta umum digunakan pada generator industri. Generator berbahan bakar solar memiliki waktu respons yang cepat sehingga dapat segera beroperasi saat sumber listrik utama mengalami gangguan. Kebutuhan bahan bakar ditentukan berdasarkan kapasitas generator yang digunakan dan efisiensi sistem pembangkitan listrik. Data properti solar yang digunakan mengacu pada Engineering ToolBox (2003):

- Lower Heating Value (LHV) solar = 42,6 MJ/kg
- Densitas solar = 846 kg/m³ = 0,846 kg/L

4.4.1 Kebutuhan Bahan Bakar Generator

Data Perancangan:

- Kapasitas generator = 50 kW
- Efisiensi generator = 80%

Perhitungan Kebutuhan Bahan Bakar

- Energi yang harus disuplai bahan bakar:

$$\dot{Q}_{fuel} = \frac{P}{\eta}$$

$$\dot{Q}_{fuel} = \frac{50}{0,80}$$

$$\dot{Q}_{fuel} = 62,5 \text{ kW}$$

- Konversi ke satuan energi per jam:

$$62,5 \times 3600 = 225.000 \text{ kJ/jam}$$

- Kebutuhan massa solar:

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{\dot{Q}_{fuel}}{\text{LHV}}$$

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{225.000}{42.600}$$

$$\dot{m}_{fuel} = 5,28 \text{ kg/jam}$$

- Volume solar yang dibutuhkan:

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

$$V = \frac{5,27}{846}$$

$$V = 0,00624 \text{ m}^3/\text{jam}$$

$$V = 6,24 \text{ L/jam}$$

- Apabila generator diasumsikan beroperasi penuh 24 jam/hari (skenario terburuk saat gangguan PLN berkepanjangan):

$$\text{Kebutuhan solar per hari} = 6,24 \times 24 = 149,7 \text{ L/hari} \approx 150 \text{ L/hari}$$

$$\text{Kebutuhan solar per bulan} = 150 \times 30 = 4.500 \text{ L/bulan}$$

4.4.2 Kebutuhan Bahan Bakar Mesin Diesel Pompa *Hydrant*

Data Perancangan:

- Kapasitas pompa *hydrant* = 75 HP = 55,93 kW
- Efisiensi mesin diesel = 80%

Perhitungan Kebutuhan Bahan Bakar

- Energi yang harus disuplai bahan bakar:

$$\dot{Q}_{fuel} = \frac{P}{\eta}$$

$$\dot{Q}_{fuel} = \frac{55,93}{0,80}$$

$$\dot{Q}_{fuel} = 69,91 \text{ kW}$$

- Konversi ke satuan energi per jam:

$$69,91 \times 3600 = 251.676 \text{ kJ/jam}$$

- Kebutuhan massa solar:

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{\dot{Q}_{fuel}}{\text{LHV}}$$

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{251.676}{42.600}$$

$$\dot{m}_{fuel} = 5,91 \text{ kg/jam}$$

- Volume solar yang dibutuhkan:

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

$$V = \frac{5,89}{832}$$

$$V = 0,00699 \text{ m}^3/\text{jam}$$

$$V = 6,99 \text{ L/jam} \approx 7,0 \text{ L/jam}$$

Berbeda dengan generator yang beroperasi kontinyu saat gangguan listrik, mesin diesel pompa *hydrant* hanya beroperasi saat kebakaran terjadi atau saat uji rutin. Oleh karena itu, yang relevan untuk perancangan adalah kapasitas tangki solar lokal yang harus tersedia. Berdasarkan NFPA 20, mesin diesel pompa kebakaran harus memiliki cadangan bahan bakar untuk minimal 8 jam operasi penuh (NFPA, 2022):

Kebutuhan *storage* solar = $7,0 \times 8 = 56$ liter. Ringkasan kebutuhan bahan bakar dapat dilihat pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16 Ringkasan Kebutuhan Bahan Bakar

Parameter	Generator	Diesel Pompa Hydrant
Kapasitas	50 kW	75 HP
Jenis Bahan Bakar	Solar (Diesel)	Solar (Diesel)
Konsumsi Solar	6,24 L/jam	7,0 L/jam
Basis Perancangan	Konsumsi kontinyu saat gangguan pasokan listrik PLN	Cadangan tangki lokal untuk operasi 8 jam sesuai NFPA 20
Kebutuhan Tangki/Penyimpanan	4.500 L/bulan (estimasi operasional)	56 L (<i>onboard tank</i>)

Sumber data properti solar: Engineering ToolBox (2003); basis penyimpanan diesel pompa *hydrant*: NFPA 20 (2022)

4.5 Unit Pengadaan Udara Tekan

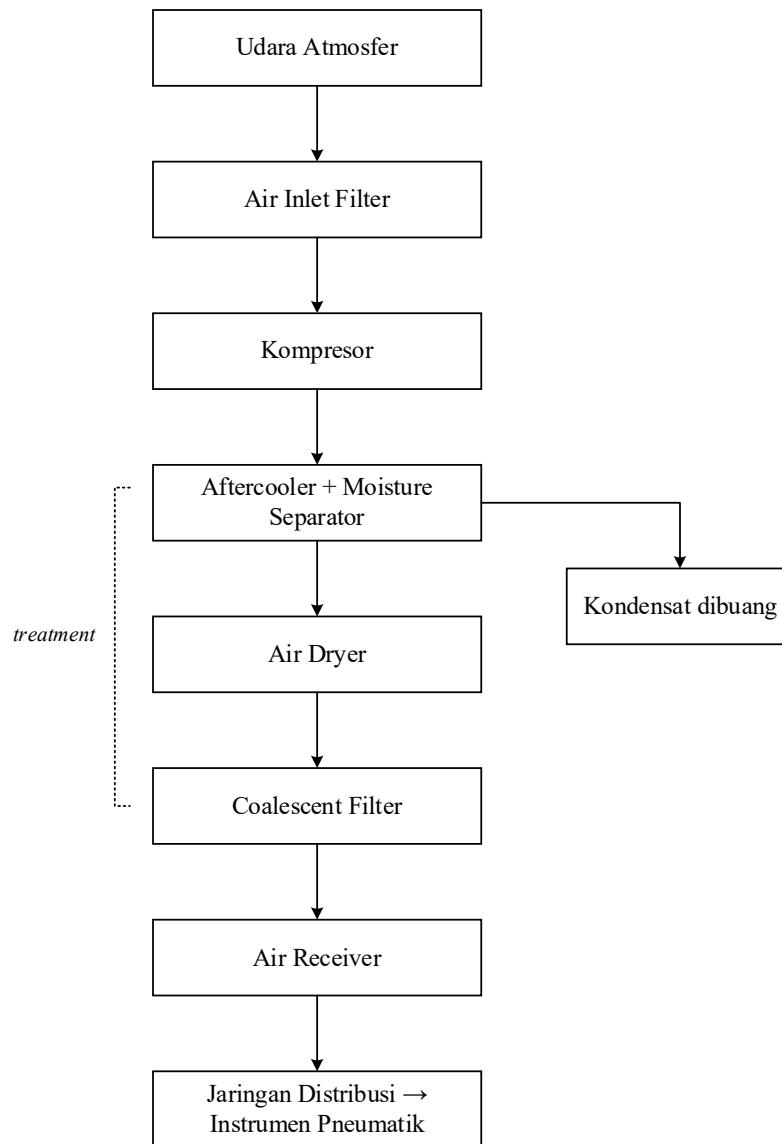
Unit penyediaan udara instrumen (*instrument air*) berfungsi menyediakan udara bertekanan untuk mengoperasikan berbagai peralatan pneumatik yang digunakan dalam sistem pengendalian proses, seperti *control valve*, aktuator pneumatik, dan instrumen kontrol lainnya. Penggunaan udara tekan pada sistem instrumentasi banyak diterapkan di industri kimia karena memiliki tingkat keamanan yang baik, terutama pada area yang menangani bahan mudah terbakar, serta mampu memberikan respons pengendalian yang stabil dan andal (U.S. Department of Energy, 2003). Sistem udara tekan industri terdiri dari dua sisi, yaitu sisi suplai yang mencakup kompresor dan peralatan pengolahan udara, serta sisi permintaan yang mencakup sistem distribusi dan

peralatan akhir. Sisi suplai yang dikelola dengan baik akan menghasilkan udara yang bersih, kering, dan bertekanan stabil yang dikirimkan secara andal ke seluruh sistem instrumentasi (U.S. Department of Energy, 2003). Udara instrumen diperoleh dari udara atmosfer yang dikompresi menggunakan kompresor hingga mencapai tekanan operasi yang dibutuhkan, kemudian melalui serangkaian tahapan pengolahan sebelum didistribusikan ke instrumen pneumatik.

Berdasarkan ANSI/ISA-7.0.01 *Quality Standard for Instrument Air*, udara instrumen harus memenuhi tiga parameter kualitas utama seperti ditunjukkan pada Tabel 4.17 untuk menjamin keandalan dan umur operasi peralatan pneumatik (ISA, 1996).

Tabel 4.17 Spesifikasi Kualitas Udara Instrumen	
Parameter	Batasan
<i>Pressure Dew Point</i>	$\leq 4^{\circ}\text{C}$ (39°F) pada tekanan operasi dan minimal 10°C di bawah suhu terendah yang dialami sistem
Ukuran Partikel	Maksimum $40\ \mu\text{m}$
Kandungan Pelumas (Minyak)	Mendekati nol dan tidak boleh melebihi 1 ppm (w/w atau v/v)
Sumber: ANSI/ISA-7.0.01-1996, <i>Quality Standard for Instrument Air</i> , Instrument Society of America (ISA), 1996.	

Tahapan pengolahan udara atmosfer hingga menjadi udara instrumen yang siap digunakan ditunjukkan pada Gambar 4.8. Menurut U.S. Department of Energy, 2003, tahapan pengolahan udara tekan adalah sebagai berikut:



Gambar 4.8 Diagram Alir Unit Pengadaan Udara Tekan

1. Filter Udara Masuk

Air inlet filter dipasang pada saluran masuk kompresor untuk melindungi kompresor dari partikel debu dan kotoran yang terbawa udara atmosfer. Partikel-partikel tersebut apabila masuk ke dalam kompresor dapat menyebabkan keausan pada komponen internal, penurunan efisiensi, dan kerusakan permanen pada peralatan. Udara atmosfer yang telah disaring memasuki kompresor dalam kondisi lebih bersih sehingga umur pakai kompresor dapat terjaga.

2. Kompresor

Kompresor merupakan komponen utama dalam sistem udara tekan yang berfungsi meningkatkan tekanan udara dari tekanan atmosfer hingga mencapai

tekanan operasi yang dibutuhkan oleh instrumen dan aktuator pneumatik. Kompresor bekerja dengan cara menghisap sejumlah udara ke dalam ruang kompresi dan memampatkannya secara mekanis sehingga volume udara berkurang dan tekanannya meningkat sebelum dilepaskan ke sisi keluaran. Proses kompresi ini menghasilkan panas yang signifikan sehingga diperlukan pendinginan setelah kompresi.

3. *After Cooler dan Moisture Separator*

Udara keluar kompresor memiliki temperatur yang sangat tinggi akibat proses kompresi. *Aftercooler* digunakan untuk menurunkan temperatur udara tekan tersebut sehingga sebagian besar uap air yang terkandung dapat terkondensasi. *Moisture separator* yang dipasang setelah *aftercooler* kemudian memisahkan kondensat dari aliran udara melalui perubahan arah dan kecepatan aliran serta dapat dilengkapi dengan *impingement baffles*. Tahap ini mampu menghilangkan sebagian besar kandungan air dalam udara tekan sebelum memasuki tahap pengeringan lebih lanjut.

4. *Air Dryer*

Setelah melewati *aftercooler* dan *moisture separator*, udara tekan masih dalam kondisi jenuh sehingga masih berpotensi mengalami kondensasi lebih lanjut saat mengalir melalui jaringan perpipaan distribusi yang terpapar suhu lebih rendah. Kondensasi ini dapat menyebabkan korosi dan kontaminasi pada sistem instrumentasi. Oleh karena itu, *air dryer* digunakan untuk menurunkan *pressure dew point* udara tekan hingga memenuhi standar ANSI/ISA-7.0.01 yaitu $\leq 4^{\circ}\text{C}$ pada tekanan operasi (ISA, 1996). Jenis *air dryer* yang digunakan adalah *refrigerant dryer* karena memiliki biaya investasi dan operasi yang relatif rendah. *Refrigerant dryer* mendinginkan udara tekan menggunakan sistem refrigerasi sehingga uap air terkondensasi dan dapat dipisahkan, menghasilkan udara dengan *pressure dew point* sekitar 35°F ($\pm 2^{\circ}\text{C}$).

5. *Coalescent Filter*

Setelah melalui *air dryer*, udara tekan melewati *coalescent filter* untuk menghilangkan sisa partikel padat dan tetes minyak (*oil mist*) yang masih terkandung dalam aliran udara. Filter ini bekerja dengan cara menggabungkan (*coalescing*) butiran aerosol minyak menjadi tetesan yang lebih besar sehingga dapat dipisahkan dari aliran udara, menghasilkan kandungan minyak yang

mendekati nol sesuai persyaratan ANSI/ISA-7.0.01 tidak melebihi 1 ppm (ISA, 1996).

6. *Air Receiver*

Air receiver berfungsi sebagai tangki penampung sementara udara tekan yang telah memenuhi spesifikasi kualitas. Tangki ini berperan menjaga kestabilan tekanan dalam sistem distribusi, menyediakan cadangan udara untuk mengatasi lonjakan kebutuhan sesaat, serta mengurangi frekuensi siklus *start-stop* kompresor sehingga umur pakai kompresor dapat lebih terjaga.

7. Jaringan Distribusi

Udara tekan yang telah memenuhi seluruh spesifikasi kualitas sesuai ANSI/ISA-7.0.01 selanjutnya dialirkan melalui jaringan perpipaan distribusi menuju instrumen dan aktuator pneumatik yang tersebar pada area proses maupun utilitas. Jaringan distribusi berfungsi mengantarkan udara bertekanan ke seluruh titik penggunaan, sebagaimana fungsi sistem kabel pada sistem kelistrikan.

4.6 Laboratorium

Laboratorium merupakan fasilitas pendukung yang berperan dalam pengendalian mutu bahan baku, produk, utilitas, dan lingkungan pabrik. Secara umum, laboratorium pada pabrik kimia berfungsi untuk mendukung kegiatan quality control, quality assurance, pemantauan proses, serta pengawasan lingkungan sehingga operasi pabrik dapat berlangsung sesuai spesifikasi yang telah ditetapkan (Towler & Sinnott, 2022).

Pada pra-rancangan pabrik isobutil asetat ini, laboratorium dibagi menjadi beberapa fungsi utama sebagai berikut:

1. Pengendalian Mutu Produk (*Quality Control*)

Pengendalian mutu merupakan kegiatan yang dilaksanakan mulai dari pengendalian standar kualitas mutu bahan, standar proses produksi, barang setengah jadi, barang jadi, hingga ke standar pengiriman produk akhir ke konsumen agar barang (jasa) yang dihasilkan sesuai dengan spesifikasi mutu yang direncanakan.

2. Pengendalian Baku Mutu Lingkungan

Program kegiatan ini mencakup analisa limbah hasil proses produksi seperti limbah cair dan limbah gas. Selain itu menganalisa limbah yang telah diolah melalui unit pengolahan limbah sebelum melakukan pembuangan ke

lingkungan, dan menganalisa buangan *cooling water* yang telah digunakan pada unit alat proses.

3. Penelitian dan Pengembangan (Research and Development)

Penelitian dan pengembangan bermanfaat dalam mengatasi permasalahan yang berhubungan dengan kualitas material terkait dalam proses untuk meningkatkan hasil produk dan mengimbangi kebutuhan pasar.

Peralatan utama yang digunakan untuk menunjang kegiatan di laboratorium adalah sebagai berikut:

I. Analisis Bahan Baku

Bahan baku yang digunakan dalam pabrik isobutil asetat adalah asam asetat (CH_3COOH) dan isobutanol ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$). Analisa bahan baku dilakukan untuk memastikan spesifikasi bahan baku sesuai dengan kebutuhan proses. Parameter pengujian bahan baku mengacu pada ASTM D3620 untuk asam asetat glasial dan ASTM D1298 untuk isobutanol.

a. *Water Content Tester*

Tujuan: menganalisis kadar air dalam bahan baku asam asetat dan isobutanol.

Pengujian dilakukan menggunakan ASTM D1364 (*Standard Test Method for Water in Volatile Solvents, Karl Fischer Reagent Titration Method*), yaitu metode titrasi Karl Fischer yang merupakan metode standar industri untuk penentuan kadar air dalam pelarut organik dan bahan kimia. Metode ini mampu mendeteksi kadar air sangat rendah secara kuantitatif..

Peralatan:

1. Alat titrasi Karl Fischer
2. Buret mikro
3. Sel titrasi tertutup
4. Pengaduk magnetik

Cara Uji:

1. Siapkan reagen Karl Fischer dan kalibrasi alat titrasi.
2. Masukkan sejumlah tertentu sampel ke dalam sel titrasi yang telah dikondisikan.
3. Lakukan titrasi dengan reagen Karl Fischer hingga titik akhir tercapai (ditandai perubahan potensial listrik pada elektroda).

4. Catat volume reagen yang digunakan dan hitung kadar air dengan rumus:

$$\% \text{ kadar air} = \frac{V \times F}{m \times 10} \times 100\%$$

Keterangan:

- V = volume reagen Karl Fischer yang digunakan (mL)
- F = faktor air reagen Karl Fischer (mg air/mL reagen)
- m = massa sampel (g)

b. Acidimetri

Tujuan: mengetahui kadar keasaman bahan baku asam asetat dan memastikan tidak terdapat kontaminan asam berlebih pada isobutanol.

Pengujian dilakukan menggunakan ASTM D1613 (*Standard Test Method for Acidity in Volatile Solvents and Chemical Intermediates Used in Paint, Varnish, Lacquer, and Related Products*), yaitu standar yang spesifik untuk pengujian keasaman dalam pelarut organik volatil termasuk ester dan alkohol.

Peralatan:

1. pH meter
2. Buret atau alat titrasi lain (25 ml)
3. Labu ukur 100 dan 1000 ml
4. Gelas ukur 100 ml
5. Pipet 10 ml
6. Labu erlenmeyer 250 ml

Cara Uji:

1. Ukur sejumlah sampel dan masukkan ke dalam labu erlenmeyer.
2. Tambahkan indikator fenolftalin.
3. Titrasi dengan larutan NaOH 0,1 N hingga warna merah muda pertama yang stabil.
4. Hitung kadar keasaman (sebagai asam asetat) dengan rumus:

$$\text{Keasaman total } \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right) = \frac{V \times N \times 60,5 \times 1000}{m}$$

Keterangan:

- V = volume NaOH yang digunakan (mL)
- N = normalitas NaOH
- 60,05 = berat molekul asam asetat (g/mol)
- m = massa sampel (g)

c. *Density & Specific Gravity*

Tujuan: menganalisis densitas dan *specific gravity* bahan baku isobutanol sebagai salah satu parameter identifikasi dan kemurnian.

Pengujian dilakukan menggunakan ASTM D4052 (*Standard Test Method for Density, Relative Density, and API Gravity of Liquids by Digital Density Meter*), yaitu metode pengukuran densitas menggunakan *digital density meter* (densitometer osilasi tabung-U) yang lebih akurat dan modern untuk cairan kimia organik.

Peralatan:

1. *Digital density meter* (densitometer osilasi tabung-U)
2. Syringe injeksi sampel
3. Termostat pengontrol suhu

Cara Uji:

1. Kalibrasi densitometer dengan air dan udara kering.
2. Injeksikan sampel ke dalam tabung-U densitometer hingga tidak ada gelembung.
3. Biarkan suhu sampel stabil pada suhu pengukuran yang ditentukan (umumnya 20 °C).
4. Baca dan catat nilai densitas yang ditampilkan.
5. Hitung *specific gravity* dengan membandingkan densitas sampel terhadap densitas air pada suhu yang sama.

d. Uji Warna (*Color Test*)

Tujuan: menganalisis warna bahan baku untuk memastikan tidak terdapat kontaminan yang menyebabkan perubahan warna.

Pengujian dilakukan menggunakan ASTM D1209 (*Standard Test Method for Color of Clear Liquids using the Platinum-Cobalt Scale*). Metode ini mengukur warna cairan jernih dalam skala Pt-Co (APHA), di mana nilai yang lebih rendah menunjukkan cairan yang lebih jernih dan murni.

Peralatan:

1. *Nessler tube* atau *sel warna standar*
2. *Larutan standar warna Pt-Co*
3. *Sumber cahaya standar*

Cara Uji:

1. Bandingkan warna sampel secara visual dengan larutan standar Pt-Co dalam tabung Nessler.
2. Pilih standar yang paling mendekati warna sampel.
3. Catat nilai warna Pt-Co dari standar yang dipilih sebagai nilai warna sampel.

II. Analisis Produk

Produk utama pabrik ini adalah isobutil asetat ($C_6H_{12}O_2$). Analisis produk dilakukan untuk memastikan kemurnian dan spesifikasi produk sesuai standar ASTM D1718 (*Standard Specification for Isobutyl Acetate 95% Grade*) yang menetapkan parameter pengujian meliputi *specific gravity*, warna, kisaran titik didih, *nonvolatile matter*, kadar air, keasaman, dan kemurnian.

b. *Water Content Tester*

Tujuan: menganalisis kadar air dalam bahan baku asam asetat dan isobutanol.

Pengujian dilakukan menggunakan ASTM D1364 (*Standard Test Method for Water in Volatile Solvents, Karl Fischer Reagent Titration Method*), yaitu metode titrasi Karl Fischer yang merupakan metode standar industri untuk penentuan kadar air dalam pelarut organik dan bahan kimia. Metode ini mampu mendeteksi kadar air sangat rendah secara kuantitatif..

Peralatan:

1. Alat titrasi Karl Fischer
2. Buret mikro
3. Sel titrasi tertutup
4. Pengaduk magnetik

Cara Uji:

1. Siapkan reagen Karl Fischer dan kalibrasi alat titrasi.
2. Masukkan sejumlah tertentu sampel ke dalam sel titrasi yang telah dikondisikan.
3. Lakukan titrasi dengan reagen Karl Fischer hingga titik akhir tercapai (ditandai perubahan potensial listrik pada elektroda).
4. Catat volume reagen yang digunakan dan hitung kadar air dengan rumus:

$$\% \text{ kadar air} = \frac{V \times F}{m \times 10} \times 100\%$$

Keterangan:

- V = volume reagen Karl Fischer yang digunakan (mL)

- F = faktor air reagen Karl Fischer (mg air/mL reagen)
- m = massa sampel (g)

c. Keasaman (*Acidity*)

Tujuan: mengetahui kadar keasaman bahan baku asam asetat dan memastikan tidak terdapat kontaminan asam berlebih pada isobutanol.

Pengujian dilakukan menggunakan ASTM D1613 (*Standard Test Method for Acidity in Volatile Solvents and Chemical Intermediates Used in Paint, Varnish, Lacquer, and Related Products*), yaitu standar yang spesifik untuk pengujian keasaman dalam pelarut organik volatil termasuk ester dan alkohol.

Peralatan:

1. pH meter
2. Buret atau alat titrasi lain (25 ml)
3. Labu ukur 100 dan 1000 ml
4. Gelas ukur 100 ml
5. Pipet 10 ml
6. Labu erlenmeyer 250 ml

Cara Uji:

1. Ukur sejumlah sampel dan masukkan ke dalam labu erlenmeyer.
2. Tambahkan indikator fenolftalin.
3. Titrasi dengan larutan NaOH 0,1 N hingga warna merah muda pertama yang stabil.
4. Hitung kadar keasaman (sebagai asam asetat) dengan rumus:

$$\text{Keasaman total } \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right) = \frac{V \times N \times 60,5 \times 1000}{m}$$

Keterangan:

- V = volume NaOH yang digunakan (mL)
- N = normalitas NaOH
- 60,05 = berat molekul asam asetat (g/mol)
- m = massa sampel (g)

d. *Density & Specific Gravity*

Tujuan: menganalisis densitas dan *specific gravity* bahan baku isobutanol sebagai salah satu parameter identifikasi dan kemurnian.

Pengujian dilakukan menggunakan ASTM D4052 (*Standard Test Method for Density, Relative Density, and API Gravity of Liquids by Digital Density Meter*), yaitu metode pengukuran densitas menggunakan *digital density meter* (densitometer osilasi tabung-U) yang lebih akurat dan modern untuk cairan kimia organik.

Peralatan:

1. *Digital density meter* (densitometer osilasi tabung-U)
2. Syringe injeksi sampel
3. Termostat pengontrol suhu

Cara Uji:

1. Kalibrasi densitometer dengan air dan udara kering.
2. Injeksikan sampel ke dalam tabung-U densitometer hingga tidak ada gelembung.
3. Biarkan suhu sampel stabil pada suhu pengukuran yang ditentukan (umumnya 20 °C).
4. Baca dan catat nilai densitas yang ditampilkan.
5. Hitung *specific gravity* dengan membandingkan densitas sampel terhadap densitas air pada suhu yang sama.

e. Uji Warna (*Color Test*)

Tujuan: menganalisis warna bahan baku untuk memastikan tidak terdapat kontaminan yang menyebabkan perubahan warna.

Pengujian dilakukan menggunakan ASTM D1209 (*Standard Test Method for Color of Clear Liquids using the Platinum-Cobalt Scale*). Metode ini mengukur warna cairan jernih dalam skala Pt-Co (APHA), di mana nilai yang lebih rendah menunjukkan cairan yang lebih jernih dan murni.

Peralatan:

1. *Nessler tube* atau sel warna standar
2. *Larutan standar warna Pt-Co*
3. *Sumber cahaya standar*

Cara Uji:

1. Bandingkan warna sampel secara visual dengan larutan standar Pt-Co dalam tabung Nessler.
2. Pilih standar yang paling mendekati warna sampel.

3. Catat nilai warna Pt-Co dari standar yang dipilih sebagai nilai warna sampel.

f. Uji Kemurnian dan Kandungan Alkohol (*Purity and Alcohol Content*)

Tujuan: menganalisis kemurnian produk isobutil asetat dan kandungan sisa reaktan isobutanol yang tidak bereaksi.

Pengujian dilakukan menggunakan ASTM D3545 (*Standard Test Method for Alcohol Content and Purity of Acetate Esters by Gas Chromatography*). Metode ini menggunakan kromatografi gas (GC) untuk menentukan kandungan ester dan alkohol yang tersisa dalam produk ester asetat dan secara eksplisit mencakup isobutil asetat.

Peralatan:

1. Serangkaian alat *Gas Chromatography* (GC)
2. Kolom GC yang sesuai
3. Integrator/komputer pengolah data

Cara Uji:

1. Siapkan larutan standar isobutil asetat dan isobutanol dengan konsentrasi yang diketahui sebagai pembanding.
2. Injeksikan sampel ke dalam kolom GC.
3. Rekam dan analisis kromatogram yang dihasilkan.
4. Hitung kemurnian isobutil asetat dan kadar isobutanol sisa berdasarkan luas area puncak kromatogram.

g. Uji Kisaran Titik Didih (*Distillation Range*)

Tujuan: memverifikasi bahwa produk isobutil asetat memiliki kisaran titik didih sesuai spesifikasi (115–117 °C pada 1 atm).

Pengujian dilakukan menggunakan ASTM D1078 (*Standard Test Method for Distillation Range of Volatile Organic Liquids*).

Peralatan:

1. Labu distilasi
2. Kondensor
3. Termometer yang dikalibrasi
4. Gelas ukur

Cara Uji:

1. Masukkan 100 mL sampel ke dalam labu distilasi.

2. Panaskan secara perlahan dan catat suhu pada saat tetes pertama jatuh ke kondensor (titik didih awal).
 3. Catat suhu pada saat 95% volume sampel telah terdistilasi (titik didih akhir).
 4. Bandingkan hasil dengan spesifikasi ASTM D1718 untuk isobutil asetat.
- h. Uji *Nonvolatile Matter*

Tujuan: menentukan kadar residu tidak mudah menguap dalam produk isobutil asetat yang dapat mengindikasikan adanya kontaminan.

Pengujian dilakukan menggunakan ASTM D1353 (*Standard Test Method for Nonvolatile Matter in Volatile Solvents for Use in Paint, Varnish, Lacquer, and Related Products*).

Peralatan:

1. Cawan porselen
2. Oven
3. Neraca analitik

Cara Uji:

1. Timbang sejumlah sampel ke dalam cawan porselen yang telah ditimbang.
2. Uapkan sampel dalam oven hingga kering sempurna.
3. Timbang kembali cawan dan hitung persentase residu yang tidak menguap.

i. pH

Tujuan: mengetahui pH produk isobutil asetat guna memastikan tidak terdapat kelebihan asam asetat yang signifikan dalam produk.

Pengujian dilakukan menggunakan ASTM E70 (*Standard Test Method for pH of Aqueous Solutions with the Glass Electrode*).

Peralatan:

1. pH meter dengan perlengkapannya
2. Pengaduk gelas/*magnetic stirrer*
3. Labu ukur 1000 ml
4. Neraca analitik

Cara Uji:

1. Kalibrasi internal pH meter dengan larutan *buffer* standar.
2. Bilas elektroda dengan air bebas mineral, lalu keringkan.
3. Celupkan elektroda ke dalam sampel uji sampai pH meter menunjukkan pembacaan yang stabil.

4. Catat hasil pembacaan skala atau angka pada tampilan pH meter.
5. Catat suhu pada saat pengukuran pH dan laporkan hasilnya.
6. Bilas kembali elektroda dengan air bebas mineral setelah pengukuran.

j. Viskositas

Tujuan: mengukur viskositas produk isobutil asetat.

Pengujian dilakukan menggunakan ASTM D445 (*Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids*).

Peralatan:

1. Viskosimeter kapiler gelas (Ubbelohde atau Cannon-Fenske)
2. Termometer
3. *Viscosity bath* dengan kontrol suhu

Cara Uji:

1. Bersihkan dan keringkan tabung viskosimeter.
2. Isi tabung viskosimeter dengan sampel hingga batas yang ditentukan.
3. Tempatkan dalam *bath* pada suhu yang dikontrol (20 °C).
4. Ukur waktu alir sampel antara dua tanda batas dan hitung viskositas kinematik:

$$V = C \times t$$

Keterangan:

- v = viskositas kinematik (mm²/s atau cSt)
- C = konstanta kalibrasi tabung viskosimeter (mm²/s²)
- t = waktu alir (s)

k. *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS)

Tujuan: menganalisis kandungan logam berat dan kontaminan dalam produk isobutil asetat.

Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) adalah metode analisis di mana sampel berbentuk *liquid* diubah menjadi bentuk aerosol, kemudian bersama campuran gas bahan bakar masuk ke dalam nyala. Unsur yang dianalisis menjadi atom-atom dalam keadaan dasar (*ground state*). Sinar dari lampu katoda dengan panjang gelombang yang sesuai dilewatkan pada atom dalam nyala api sehingga elektron pada kulit terluar atom tereksitasi. Penyerapan yang terjadi berbanding lurus dengan banyaknya atom *ground state* dalam nyala. Pengujian mengacu pada SNI 6989.8:2009 (*Cara Uji*

Timbal (Pb) Secara Spektrofotometri Serapan Atom Nyala) atau standar AAS yang sesuai dengan logam yang dianalisis.

Peralatan:

1. Serangkaian alat AAS

Cara Uji:

1. Pembuatan standar: unsur yang akan dianalisis dilarutkan dalam pelarut yang sesuai, kemudian dibuat dalam deret konsentrasi tertentu untuk pembuatan kurva standar
2. Preparasi sampel: digunakan pelarut yang sesuai dengan unsur yang akan dianalisa; jika sampel berbentuk padatan maka harus dilarutkan terlebih dahulu, apabila sampel berbentuk cair bisa langsung diencerkan
3. Standar dan sampel disaring dengan *syringe filter* dan dimasukkan ke dalam tabung reaksi untuk kemudian dianalisis

4.7 Unit Pengolahan Limbah

Setiap pabrik kimia wajib memiliki unit pengolahan limbah untuk memastikan bahwa buangan yang dihasilkan dari proses produksi tidak mencemari lingkungan sekitar. Pengolahan limbah pada pabrik isobutil asetat ini mengacu pada Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Berdasarkan jenis dan sumbernya, limbah yang dihasilkan pabrik isobutil asetat dibagi menjadi tiga kategori, yaitu limbah cair, limbah padat, dan limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3).

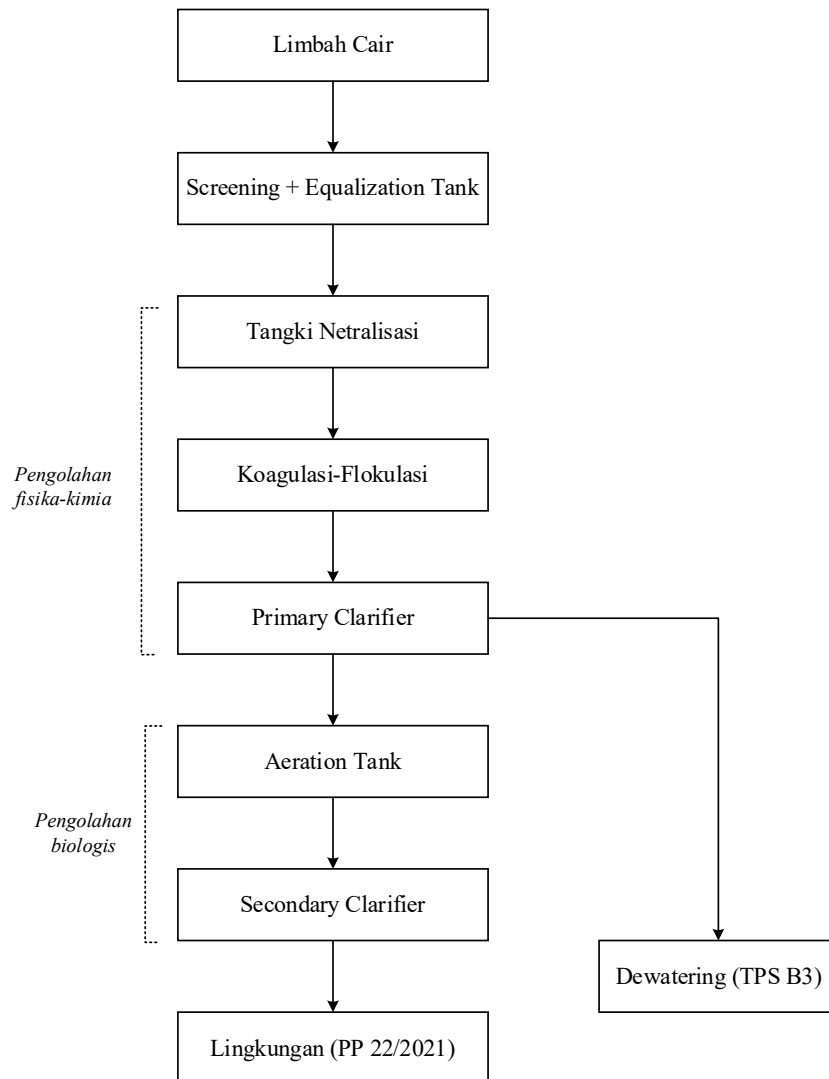
4.7.1. Limbah Cair

Limbah cair pada pabrik isobutil asetat berasal dari beberapa sumber, yaitu:

- Bocoran-bocoran proses yang mengandung sisa reaktan berupa asam asetat dan isobutanol
- Buangan dari unit utilitas seperti *blowdown* boiler dan *cooling water*
- Air sisa proses pemisahan pada kolom distilasi
- Limbah buangan sanitasi dari kamar mandi dan dapur

Limbah cair yang mengandung senyawa organik seperti sisa asam asetat, isobutanol, dan isobutil asetat tergolong sebagai limbah cair dengan kandungan BOD dan COD yang perlu diturunkan sebelum dibuang ke lingkungan. Baku mutu air limbah yang harus dipenuhi mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia No. 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah, yang

menetapkan parameter kritis meliputi BOD maksimum 50 mg/L (Golongan I) atau 150 mg/L (Golongan II), COD maksimum 100 mg/L (Golongan I) atau 300 mg/L (Golongan II), TSS, pH 6–9, serta parameter logam berat. Pengolahan air limbah industri kimia umumnya melibatkan kombinasi metode fisika, kimia, dan biologis yang diterapkan secara berurutan untuk menghasilkan efluen yang memenuhi baku mutu lingkungan (Crini dkk., 2019). Tahapan pengolahan limbah cair ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Diagram Alir Unit Pengolahan Limbah Cair (IPAL)

Menurut Crini & Lichtfouse, 2019, Tahapan pengolahan limbah cair pada pabrik isobutil asetat adalah sebagai berikut:

1. Pra-pengolahan (*Screening* dan *Equalization Tank*)

Limbah cair dari seluruh sumber dialirkan melalui *bar screen* untuk menyaring padatan kasar dan mencegah penyumbatan pada sistem pemompaan.

Air limbah kemudian ditampung di *equalization tank* (bak ekualisasi) untuk menyeimbangkan debit, konsentrasi, suhu, dan pH agar beban masuk ke unit pengolahan berikutnya lebih stabil dan merata.

2. Netralisasi (*pH Neutralization*)

Limbah cair yang bersifat asam akibat kandungan sisa asam asetat dinetralkan menggunakan larutan alkali (NaOH) atau asam (HCl) hingga pH berada pada rentang 6,5–8,5. Penetapan pH yang tepat penting untuk memastikan efektivitas proses koagulasi-flokulasi dan pengolahan biologis berikutnya, karena aktivitas mikroorganisme pada proses aerobik sangat dipengaruhi oleh kondisi pH.

3. Koagulasi dan Flokulasi

Partikel koloid dan padatan tersuspensi dalam air limbah dihilangkan melalui proses koagulasi menggunakan koagulan *Poly Aluminium Chloride* (PAC), dilanjutkan flokulasi menggunakan polimer flokulan melalui pengadukan lambat untuk membentuk flok berukuran lebih besar. Koagulasi-flokulasi merupakan salah satu proses paling penting dan banyak digunakan dalam pengolahan limbah industri karena kesederhanaan dan efektivitasnya dalam menghilangkan polutan tersuspensi (Kato & Kansha, 2024).

4. *Primary Clarifier* (Pengendap Awal)

Flok yang terbentuk pada tahap koagulasi-flokulasi diendapkan secara gravitasi di *primary clarifier* sehingga menghasilkan air yang lebih jernih di bagian atas dan lumpur primer di bagian bawah. Lumpur primer dipompa menuju tangki lumpur untuk proses *dewatering* lebih lanjut.

5. *Aeration Tank* (Pengolahan Biologis Aerobik)

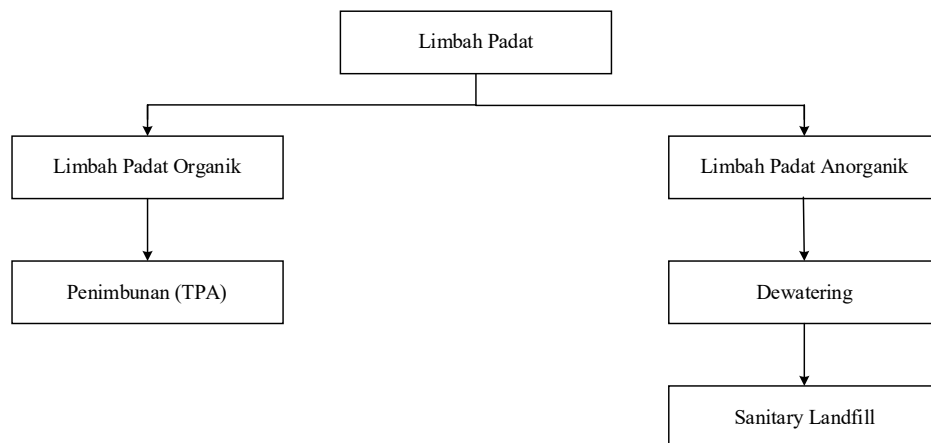
Air limbah yang keluar dari *primary clarifier* diolah menggunakan mikroorganisme aerobik di dalam *aeration tank*. Aerasi diperlukan untuk menyuplai oksigen bagi aktivitas mikroorganisme sekaligus sebagai pengadukan. Dalam reaktor ini, senyawa organik dalam air limbah termasuk sisa asam asetat dan isobutanol diuraikan oleh mikroorganisme menjadi sel mikroba baru, CO₂, dan H₂O sehingga secara efektif menurunkan kadar BOD dan COD air limbah. Pengolahan biologis aerobik dengan sistem *activated sludge* merupakan metode yang paling banyak diterapkan dalam pengolahan limbah industri kimia karena kemampuannya mendegradasi senyawa organik secara efisien.

6. *Secondary Clarifier* (Pengendap Akhir)

Efluen dari *aeration tank* dialirkan ke *secondary clarifier* untuk memisahkan biomassa mikroorganisme dari air olahan. Sebagian lumpur yang terendapkan (*return activated sludge*) didaur ulang kembali ke *aeration tank* untuk menjaga populasi mikroorganisme, sedangkan kelebihan lumpur (*excess sludge*) dipompa ke tangki lumpur untuk dikurangi kadar airnya melalui proses *dewatering* (Kato & Kansha, 2024). Lumpur hasil *dewatering* yang bersifat B3 diserahkan kepada pihak ketiga berizin untuk pengelolaan lebih lanjut sesuai PP No. 22 Tahun 2021. Air olahan yang telah memenuhi baku mutu dibuang ke badan air penerima sesuai ketentuan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah.

4.7.2. Limbah Padat

Limbah padat pada pabrik isobutil asetat berupa *sludge* yang dihasilkan dari unit pengolahan air dan kegiatan domestik karyawan. Tahapan pengelolaan limbah padat ditunjukkan pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Diagram Alir Pengelolaan Limbah Padat

Pengelolaan limbah padat dibagi berdasarkan jenisnya:

1. Limbah Padat Organik

Limbah padat organik berasal dari kegiatan domestik karyawan. Limbah ini dikelola melalui penimbunan pada Tempat Pembuangan Akhir (TPA) di mana proses penguraian oleh mikroorganisme akan mengubahnya menjadi bahan organik yang bermanfaat bagi kesuburan tanah.

2. Limbah Padat Anorganik

Limbah padat anorganik meliputi *sludge* dari unit IPAL dan endapan dari unit pengolahan air. Limbah ini dikelola dengan metode *sanitary landfill* menggunakan lubang yang dilapisi tanah liat dan geomembran plastik untuk mencegah pencemaran tanah dan air tanah. Gas metana yang terbentuk dari proses penguraian dalam *landfill* dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik sehingga memberikan nilai tambah sekaligus mengurangi emisi gas rumah kaca.

4.7.3. Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3)

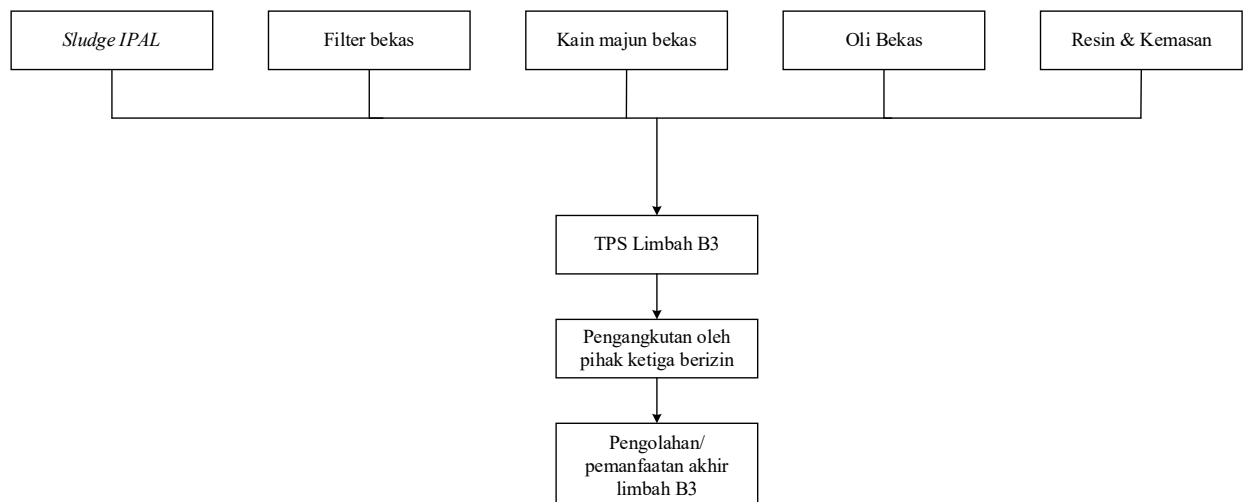
Berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021, limbah B3 didefinisikan sebagai sisa usaha atau kegiatan yang mengandung zat atau komponen yang secara langsung maupun tidak langsung dapat mencemarkan, merusak, atau membahayakan lingkungan hidup, kesehatan, serta kelangsungan hidup manusia dan makhluk hidup lain. Pabrik isobutil asetat menghasilkan beberapa jenis limbah B3 dari kegiatan proses dan pemeliharaan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Jenis Limbah B3 yang Dihasilkan Pabrik Isobutil Asetat

No.	Jenis Limbah B3	Kode Limbah	Kategori Bahaya	Sumber
1	<i>Sludge</i> IPAL	B108d	2	Unit pengolahan limbah cair
2	Filter bekas	B109d	2	Unit pengolahan air
3	Kain majun bekas	B110d	2	Pemeliharaan peralatan
4	Oli/pelumas bekas	B105d	2	Pemeliharaan pompa dan mesin
5	Resin penukar ion bekas	B323-3	2	Unit demineralisasi
6	Kemasan bekas bahan kimia	B104d	2	Penyimpanan bahan baku

Sumber: Lampiran IX PP No. 22 Tahun 2021

Pengelolaan limbah B3 dilaksanakan sesuai dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 6 Tahun 2021 tentang Tata Cara dan Persyaratan Pengelolaan Limbah B3. Tahapan pengolahannya dapat dilihat pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Diagram Alir Pengelolaan Limbah B3

Tahapan pengelolaan limbah B3 adalah sebagai berikut:

1. Penyimpanan Sementara (TPS Limbah B3)

Limbah B3 yang dihasilkan disimpan sementara di Tempat Penyimpanan Sementara (TPS) Limbah B3 yang memenuhi persyaratan teknis, yaitu lantai kedap air, memiliki ventilasi yang memadai, dilengkapi atap pelindung dari hujan, dan dilengkapi sistem drainase yang mencegah limpasan keluar area TPS. TPS juga wajib dilengkapi dengan fasilitas penanganan tumpahan, alat pemadam kebakaran, alat pelindung diri (APD), dan *labeling* sesuai karakteristik limbah B3 yang disimpan (Permen LHK No. 6 Tahun 2021). Masa simpan di TPS disesuaikan dengan kategori limbah B3 sebagaimana diatur dalam PP No. 22 Tahun 2021, yaitu 90 hari untuk limbah yang dihasilkan ≥ 50 kg/hari dan 365 hari untuk limbah kategori 2 dari sumber spesifik.

2. Penyerahan kepada Pihak Ketiga Berizin

Limbah B3 yang telah melewati masa simpan maksimum diserahkan kepada pihak ketiga yang memiliki izin resmi dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) sebagai pengumpul, pengangkut, dan pengolah limbah B3. Setiap kegiatan penyerahan limbah B3 wajib disertai dokumen manifes limbah B3 sesuai ketentuan Permen LHK No. 6 Tahun 2021.

4.8 Kesehatan Keselamatan Kerja dan Lingkungan Hidup

Kesehatan dan keselamatan kerja merupakan aspek yang wajib diperhatikan dalam setiap kegiatan operasional pabrik. Penerapan K3LH bertujuan untuk melindungi tenaga kerja dari risiko kecelakaan dan penyakit akibat kerja, serta

menjaga kelestarian lingkungan hidup di sekitar pabrik. Dasar hukum pelaksanaan K3LH di pabrik isobutil asetat ini mengacu pada Undang-Undang No. 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja dan Peraturan Pemerintah No. 74 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Bahan Berbahaya dan Beracun (B3).

4.8.1. Identifikasi Bahaya Bahan Kimia

Pengenalan bahaya bahan kimia di tempat kerja mengacu pada Material Safety Data Sheet (MSDS) atau Safety Data Sheet (SDS) yang merupakan dokumen wajib sesuai Permenaker No. 5 Tahun 2018 tentang K3 Bahan Kimia Berbahaya. MSDS memuat informasi mengenai sifat fisik dan kimia, potensi bahaya terhadap kesehatan, prosedur penanganan darurat, serta rekomendasi alat pelindung diri (APD) untuk setiap bahan kimia yang digunakan. Berikut adalah identifikasi bahaya bahan-bahan kimia yang terlibat dalam proses produksi isobutil asetat:

l. Asam Asetat (CH_3COOH)

Asam asetat glasial bersifat korosif dan mudah terbakar dengan titik nyala 40°C . Paparan terhadap asam asetat dapat menyebabkan luka bakar serius pada kulit dan mata serta iritasi pada saluran pernapasan. Uap asam asetat dapat membentuk campuran yang mudah meledak dengan udara. Penanganan darurat yang harus dilakukan apabila terjadi kontak dengan asam asetat adalah sebagai berikut (Thermo Fisher Scientific, 2024a):

- Kontak kulit: segera bilas dengan air mengalir selama minimal 15 menit dan lepaskan pakaian yang terkontaminasi
- Kontak mata: bilas dengan air bersih selama minimal 15 menit dan segera cari pertolongan medis
- Terhirup: pindahkan korban ke udara segar, berikan pernapasan buatan jika diperlukan, dan segera hubungi dokter

m. Isobutanol ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$)

Isobutanol merupakan cairan yang sangat mudah terbakar (*flammable liquid and vapor*) dengan titik nyala 28°C . Uap isobutanol lebih berat dari udara dan dapat menyebar di sepanjang lantai menuju sumber penyalan yang jauh. Paparan dapat menyebabkan iritasi kulit, iritasi mata serius, iritasi saluran pernapasan, serta efek narkotik berupa mengantuk dan pusing (Thermo Fisher Scientific, 2025a). Penanganan darurat:

- Kontak kulit: lepaskan pakaian yang terkontaminasi dan bilas dengan air mengalir

- Kontak mata: bilas dengan air bersih selama minimal 15 menit; segera hubungi dokter
- Terhirup: pindahkan ke udara segar; jika tidak bernapas, berikan pernapasan buatan

n. Isobutil Asetat ($C_6H_{12}O_2$)

Isobutil asetat merupakan produk utama yang bersifat sangat mudah terbakar (*flammable liquid and vapor*) dengan titik nyala $18^{\circ}C$. Uapnya dapat membentuk campuran eksplosif dengan udara. Paparan dapat menyebabkan pusing, sakit kepala, dan efek narkotik pada susunan saraf pusat. Organ target yang terpengaruh adalah sistem saraf pusat (CNS). Tindakan pemadaman kebakaran yang sesuai meliputi penggunaan semprotan air, karbon dioksida (CO_2), serbuk kering, atau busa kimia (Thermo Fisher Scientific, 2025b).

Penanganan darurat:

- Kontak kulit: lepaskan pakaian yang terkontaminasi dan bilas dengan air mengalir
- Kontak mata: bilas dengan air bersih selama minimal 15 menit
- Terhirup: pindahkan ke udara segar; jika tidak bernapas, berikan pernapasan buatan dan segera cari pertolongan medis

4.8.2. Alat Pelindung Diri (APD)

Seluruh karyawan yang bekerja di area proses produksi diwajibkan menggunakan APD sesuai dengan potensi bahaya yang ada. APD yang digunakan di pabrik isobutil asetat meliputi:

1. Helm keselamatan : melindungi kepala dari benturan dan kejatuhan benda
2. Kacamata pelindung (*safety goggles*) : melindungi mata dari percikan bahan kimia korosif (asam asetat) dan uap isobutil asetat
3. Pelindung wajah (*face shield*) : digunakan saat menangani asam asetat dalam jumlah besar
4. Sarung tangan tahan kimia : melindungi tangan dari kontak langsung dengan bahan kimia, terutama asam asetat yang bersifat korosif
5. Sepatu keselamatan (*safety shoes*) : melindungi kaki dari tumpahan bahan kimia dan benda berat
6. Pakaian kerja tahan kimia : melindungi tubuh dari percikan bahan kimia
7. Respirator / masker uap organik : melindungi saluran pernapasan dari paparan uap isobutanol dan isobutil asetat yang bersifat narkotik

4.8.3. Prosedur Keselamatan Operasional

Karakteristik dari seluruh bahan utama yang digunakan, yaitu asam asetat, isobutanol, dan isobutil asetat mempunyai sifat yang mudah terbakar. Maka dari itu, terdapat beberapa prosedur keselamatan yang harus diterapkan di seluruh area proses:

1. Seluruh peralatan listrik di area proses menggunakan jenis *explosion-proof* untuk mencegah percikan api
2. Dilarang merokok atau membawa sumber api terbuka di seluruh area pabrik
3. Tangki dan peralatan proses harus dihubungkan ke sistem *grounding* untuk mencegah listrik statis
4. Ventilasi yang memadai harus tersedia di seluruh area proses untuk mencegah akumulasi uap mudah terbakar
5. Sistem detektor gas mudah terbakar (*combustible gas detector*) dipasang di titik-titik kritis area proses
6. *Emergency shower* dan *eye wash station* disediakan di setiap area yang berpotensi terjadi kontak dengan asam asetat

4.8.4. Pengelolaan Lingkungan Hidup

Pengelolaan lingkungan hidup dilaksanakan sesuai dengan Undang-Undang No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup dan PP No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Seluruh limbah yang dihasilkan dari proses produksi, baik cair, padat, maupun limbah B3, wajib diolah terlebih dahulu sebelum dibuang ke lingkungan.

4.9 Instrumentasi

Instrumentasi adalah seni dan ilmu pengetahuan dalam penerapan alat ukur dan sistem pengendalian pada suatu objek yang bertujuan untuk mengetahui besaran variabel suatu proses dan mengendalikannya agar berada dalam batas yang diinginkan (*set point*) (Considine, 1985). Fungsi instrumentasi adalah sebagai pengontrol, penunjuk (*indicator*), pencatat (*recorder*), dan pemberi tanda bahaya (*alarm*). Beberapa besaran proses yang harus diukur dan dikendalikan pada suatu industri proses meliputi aliran (*flow*) di dalam pipa, tekanan (*pressure*) di dalam sebuah vessel, suhu (*temperature*) di unit *heat exchanger*, dan permukaan (*level*) zat cair pada sebuah tangki.

4.9.1 Jenis-Jenis Instrumentasi

Sistem instrumentasi dan pengendalian proses pada pabrik kimia umumnya melibatkan perangkat *transmitter* untuk mengukur parameter fisik, *controller* untuk mengatur jalannya proses, dan *final control element* seperti *control valve* sebagai elemen pengendali akhir. Berikut adalah jenis-jenis instrumentasi yang digunakan pada pabrik isobutil asetat:

8. *Flow Controller* (FC)

Flow Controller berfungsi untuk mengukur dan mengendalikan laju alir fluida di dalam pipa. Pada pabrik isobutil asetat, FC dipasang pada pipa umpan asam asetat dan isobutanol menuju distilasi reaktif untuk memastikan rasio umpan bahan baku sesuai dengan kondisi perancangan. FC juga dipasang pada aliran *reflux* kolom distilasi.

9. *Temperature Controller* (TC)

Temperature Controller berfungsi untuk mengukur dan mengendalikan suhu pada unit-unit proses yang sensitif terhadap perubahan suhu. TC dipasang pada:

- *Pre-heater* (HE-101 dan HE-102): untuk mengendalikan suhu umpan sebelum masuk ke distilasi reaktif
- *Reboiler* (RB-201): untuk mengendalikan suhu pemanasan pada kolom distilasi
- *Cooler* (CL-401): untuk mengendalikan suhu pendinginan produk isobutil asetat

10. *Pressure Controller* (PC)

Pressure Controller berfungsi untuk mengukur dan mengendalikan tekanan pada peralatan bertekanan. PC dipasang pada kolom distilasi reaktif untuk memastikan operasi berlangsung pada tekanan yang telah dirancang dan mencegah terjadinya tekanan berlebih (*overpressure*) yang dapat membahayakan.

11. *Level Controller* (LC)

Level Controller berfungsi untuk memantau dan mengendalikan ketinggian cairan di dalam tangki dan *vessel* proses. LC dipasang pada tangki penyimpanan bahan baku (asam asetat dan isobutanol), tangki produk, *reflux drum*, dan *reboiler* untuk mencegah kondisi *overflow* maupun *dry running*.

4.9.2 Sistem Pengendalian Proses

Sistem pengendalian yang digunakan pada pabrik isobutil asetat adalah *Distributed Control System* (DCS). DCS merupakan sistem pengendalian berbasis

komputer yang mendistribusikan fungsi pengukuran dan pengendalian ke beberapa 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 yang tinggi (Seborg dkk., 2016). Dengan sistem 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, *data logging*, dan integrasi dengan sistem keselamatan pabrik sehingga operasi pabrik isobutil asetat dapat berlangsung secara efisien, aman, dan andal.