

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Air Limbah Industri Energi

Air limbah yang dihasilkan dari kegiatan operasional PLTGU berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan apabila tidak dikelola dengan benar. Dampak pencemaran tersebut dapat terjadi pada perairan laut maupun tanah, yang pada akhirnya dapat merusak ekosistem dan membahayakan kesehatan manusia. Kehadiran bahan kimia berbahaya serta minyak dalam limbah mampu mencemari sumber air dan mengganggu keseimbangan kehidupan organisme akuatik. Oleh karena itu, pengolahan limbah secara menyeluruh sebelum dibuang ke lingkungan menjadi langkah penting dalam upaya menjaga kelestarian lingkungan dan melindungi kesehatan masyarakat (Willy & Mukono, 2023). Limbah industri energi mengacu baku mutu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 8 Tahun 2009 tentang Baku Mutu Air Limbah bagi Usaha atau Kegiatan Pembangkit Listrik Tenaga Termal Sumber Proses Utama, Sehingga dapat diperoleh suatu kualitas air buangan yang sesuai dengan peraturan dan baku mutu.

2.2 Karakteristik Air Limbah Industri Energi

2.2.1 *Total Suspended Solid (TSS)*

Total Suspended Solids (TSS) merupakan istilah untuk menggambarkan partikel-partikel yang tidak larut, sulit mengendap, dan tetap melayang di dalam air. Ketidakmampuan partikel ini untuk mengendap dipengaruhi oleh muatan elektrostatis serta gerak acak yang dikenal sebagai gerak Brown, sehingga partikel tetap stabil dalam fase cair. Keberadaan partikel tersuspensi berkaitan erat dengan tingkat kekeruhan air. Kekeruhan mencerminkan sifat optik air yang dipengaruhi oleh jumlah cahaya yang diserap dan dipantulkan oleh bahan organik maupun anorganik, baik yang terlarut maupun tersuspensi. Semakin tinggi konsentrasi partikel tersuspensi, semakin meningkat pula kekeruhan air tersebut (Effendi, 2003). Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 8 Tahun 2009 mengenai baku mutu air limbah untuk kegiatan Pembangkit Listrik Tenaga Termal

pada proses utama, batas maksimum konsentrasi TSS yang diperbolehkan adalah 100 mg/L.

2.2.2 Besi (Fe)

Besi dalam air umumnya dijumpai dalam dua bentuk, yaitu besi terlarut dan besi yang tidak larut. Air yang mengandung besi ferro biasanya tampak jernih dan tidak berwarna karena bentuk ferro sepenuhnya berada dalam kondisi terlarut. Namun, ketika air tersebut terpapar udara, ion ferro akan teroksidasi menjadi bentuk ferri sehingga air berubah menjadi keruh dan muncul endapan berwarna coklat kemerahan (Fadhilla et al., 2022). Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 8 Tahun 2009 mengenai Baku Mutu Air Limbah untuk kegiatan Pembangkit Listrik Tenaga Termal pada proses utama, batas maksimum konsentrasi besi (Fe) yang diperbolehkan adalah 3 mg/L.

2.2.3 Tembaga (Cu)

Tembaga (Cu) merupakan logam berwarna merah muda yang bersifat lunak, dengan nomor atom 29 dan massa atom 63,546. Logam ini memiliki titik lebur 1083°C, titik didih 2310°C, jari-jari atom 1,173 Å, serta jari-jari ion 0,96 Å. Sebagai logam transisi, tembaga mudah diregangkan dan ditempa, serta memiliki struktur kristal berwarna kemerahan. Di alam, tembaga umumnya dijumpai dalam bentuk logam bebas (Lahuddin, 2007). Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 8 Tahun 2009 mengenai Baku Mutu Air Limbah untuk kegiatan Pembangkit Listrik Tenaga Termal pada proses utama, batas maksimum konsentrasi tembaga (Cu) yang diperbolehkan adalah 1 mg/L.

2.2.4 Seng (Zn)

Seng (Zn) merupakan unsur alam yang secara alami terdapat di kerak bumi. Logam ini bersifat cukup reaktif, berwarna putih kebiruan, mudah memudar saat terpapar uap udara, dan dapat terbakar di udara menghasilkan nyala berwarna hijau terang. Zink mampu bereaksi dengan berbagai zat, termasuk asam, basa, serta senyawa nonlogam. Dalam tabel periodik, unsur ini memiliki nomor atom 30 dan massa atom sebesar 65,39 (Widowati, 2008). Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 8 Tahun 2009 mengenai Baku Mutu Air Limbah untuk

kegiatan Pembangkit Listrik Tenaga Termal pada proses utama, batas maksimum konsentrasi seng (Zn) yang diperbolehkan adalah 1 mg/L.

2.2.5 Kromium total (Cr)

Dalam perkembangan industri modern, berbagai proses produksi tidak terlepas dari terbentuknya limbah yang kemudian dilepaskan ke lingkungan. Salah satu zat yang kerap muncul dalam air limbah industri adalah kromium. Logam ini dapat berada dalam beberapa tingkat oksidasi, yaitu 2+, 3+, dan 6+. Di antara ketiga bentuk tersebut, kromium dengan bilangan oksidasi 6+ atau kromium heksavalen dikenal sebagai bentuk yang paling berbahaya (Rahayu et al., 2021). Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 8 Tahun 2009 mengenai Baku Mutu Air Limbah untuk kegiatan Pembangkit Listrik Tenaga Termal pada proses utama, batas maksimum konsentrasi kromium total yang diperbolehkan adalah 1 mg/L.

2.2.6 Fosfat (PO_4^{3-})

Fosfat adalah senyawa esensial bagi makhluk hidup, namun jika kadarnya berlebih di perairan dapat menjadi sumber pencemaran. Senyawa ini umumnya berasal dari limbah domestik dan berbagai aktivitas industri, termasuk industri asam fosfat yang menghasilkan limbah bersifat asam dengan kandungan fosfat tinggi. Apabila fosfat masuk ke badan air tanpa proses pengolahan, senyawa ini dapat memicu eutrofikasi yang ditandai oleh peningkatan pertumbuhan tumbuhan air, berkurangnya cahaya yang menembus air, penurunan kadar oksigen terlarut, timbulnya bau, hingga meningkatnya kematian biota akuatik. Karena itu, fosfat harus diolah terlebih dahulu sebelum dilepas ke lingkungan (Setiawan et al., 2022). Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 8 Tahun 2009 mengenai Baku Mutu Air Limbah untuk kegiatan Pembangkit Listrik Tenaga Termal pada proses utama, batas maksimum konsentrasi fosfat yang diperbolehkan adalah 10 mg/L.

2.2.7 Minyak lemak

Minyak dan lemak memiliki karakteristik kimia yang hampir sama, yaitu berupa senyawa ester yang terbentuk dari reaksi antara alkohol atau gliserol (gliserin) dengan asam lemak. Senyawa gliserida yang berada dalam keadaan cair

pada suhu ruang disebut minyak, sedangkan yang berbentuk padat dikenal sebagai lemak (grease). Apabila minyak tidak dihilangkan sebelum proses pengolahan air limbah, keberadaannya dapat menimbulkan gangguan terhadap aktivitas biologis di permukaan perairan dan membentuk lapisan tipis yang menghalangi cahaya. Ketebalan minyak yang dibutuhkan untuk menghasilkan lapisan tembus cahaya pada permukaan air sekitar 0,0003048 mm (Metcalf, 2003). Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 8 Tahun 2009 mengenai Baku Mutu Air Limbah untuk kegiatan Pembangkit Listrik Tenaga Termal pada proses utama, batas maksimum konsentrasi minyak dan lemak yang diperbolehkan adalah 10 mg/L.

2.2.8 pH (*Potential of Hydrogen*)

Salah satu parameter penting dalam penilaian kualitas air limbah adalah konsentrasi ion hidrogen, yang umumnya dinyatakan dalam satuan pH. Nilai pH mencerminkan tingkat keasaman atau kebasaan dan kisaran yang mendukung proses biologis berada pada rentang 6–9. Air limbah dengan pH sangat rendah maupun sangat tinggi akan sulit diolah melalui proses biologis. Jika pH air limbah tidak disesuaikan dengan baku mutu sebelum dibuang, kondisi tersebut dapat mengganggu atau mencemari keseimbangan pH alami pada badan air penerima. Pengukuran pH biasanya dilakukan menggunakan pH meter (Metcalf, 2003). Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 8 Tahun 2009 mengenai Baku Mutu Air Limbah untuk kegiatan Pembangkit Listrik Tenaga Termal pada proses utama, batas pH yang diperbolehkan antara 6-9.

2.3 Bangunan Pengolahan Air Buangan

2.3.1 Saluran Pembawa

Saluran pembawa adalah komponen penting dari sistem pembuangan limbah yang digunakan untuk memindahkan air limbah dari satu lokasi ke lokasi lain. Selain itu, ada dua jenis saluran pembawa ini: terbuka dan tertutup. Saluran ini dapat mengalirkan air dengan memperhitungkan elevasi atau perbedaan ketinggian antar bangunan. Jika saluran pembawa ini terletak di dataran yang datar, maka kemiringan (slope) (m/m) diperlukan.

Sistem saluran terbuka (open channel flow) adalah sistem yang memungkinkan atmosfer dan udara sekitar mempengaruhi permukaan air. Saluran

terbuka tersedia dalam berbagai bentuk, seperti setengah lingkaran, trapesium, persegi panjang, segitiga, dan bujur sangkar. Sedangkan saluran tertutup (pipe flow) adalah sistem saluran yang permukaan airnya tidak terpengaruh dengan udara luar (atmosfer). Saluran ini biasanya terbuat dari dinding berbahan beton, sehingga dipengaruhi oleh koefisien manning (n) (Wesli, 2008).



(a)

(b)

Gambar 2. 1 (a) saluran terbuka (b) saluran tertutup

(Sumber : [saluran terbuka](#) dan [saluran tertutup](#))

Adapun kriteria perencanaan yang digunakan pada unit saluran pembawa adalah sebagai berikut:

1. Freeboard = 5% - 30%
2. Kecepatan Aliran (v) = 0.3 m/s - 0.6 m/s

(Sumber: Metcalf & Eddy. 2003. *Waste Water Engineering Treatment & Reuse Fourth Edition*. Halaman 316)

3. Koefisien Kekasaran Pipa = 0.002 - 0.012 sesuai dengan tabel

Tabel 2. 1 Koefisien Kekasaran

No	Jenis Saluran	Koefisien Kekasaran <i>Manning (n)</i>
1.	Pipa Besi Tanpa Lapisan	0.012 – 0.015
	Dengan Lapisan Semen	0.012 – 0.013
	Pipa Berlapis Gelas	0.011 – 0.017
2.	Pipa Asbestos Semen	0.010 – 0.015
3.	Saluran Pasangan Batu Bata	0.012 – 0.017
4.	Pipa Beton	0.012 – 0.016
5.	Pipa Baja Spiral dan Pipa Kelingan	0.013 – 0.017
6.	Pipa Plastik Halus (PVC)	0.013 – 0.017
7.	Pipa Tanah Liat (Vitrified Clay)	0.011 – 0.015

(Sumber: Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 04/PRT/M/2017 Tahun 2017 tentang Penyelenggaraan Sistem Pengelolaan Air Limbah Domestik)

2.3.2 Bak Penampung

Bak penampung berfungsi menahan aliran air limbah sekaligus meredam fluktuasi debit dan karakteristiknya, sehingga air limbah yang keluar memiliki kondisi yang lebih stabil dan sesuai dengan kebutuhan unit pengolahan berikutnya. Waktu tinggal di unit ini umumnya dibuat kurang dari dua jam guna mencegah terjadinya pengendapan ataupun proses dekomposisi. Pada kondisi debit puncak, permukaan air harus tetap berada lebih rendah dari elevasi inlet atau saluran pembawanya agar tidak menimbulkan aliran balik. Setelah melalui bak penampung,

variasi debit air limbah per jam akan tereduksi dan berubah menjadi debit mendekati nilai rata-ratanya (Metcalf & Eddy et al., 2003).



Gambar 2. 2 Bak Penampung

(Sumber : [Bak Penampung](#))

Terdapat beberapa komponen utama dan pendukung yang harus diperhatikan dalam melakukan perencanaan bak penampung, antara lain (Dirjen Cipta Karya Kementerian PUPR, 2017):

1. Rumah pompa, digunakan untuk mengatur debit air limbah yang akan masuk pada unit pengolahan selanjutnya, sehingga diperoleh debit harian rata-rata.
2. Mixer/aerator, komponen ini berfungsi untuk menyeragamkan air limbah domestik, khususnya terkait dengan kualitas dan parameter seperti pH, endapan diskrit, dan parameter lain yang tidak sesuai untuk unit pengolahan selanjutnya, penggunaan mixer/aerator dapat menjadi opsi dalam perencanaan unit bak penampung dalam pengolahan air.

Adapun kriteria desain dan perencanaan yang harus dipenuhi untuk perencanaan unit bak penampung antara lain sebagai berikut:

1. Freeboard = 5% - 30%
2. Kecepatan Aliran (v) = 0.3 m/s - 0.6 m/s

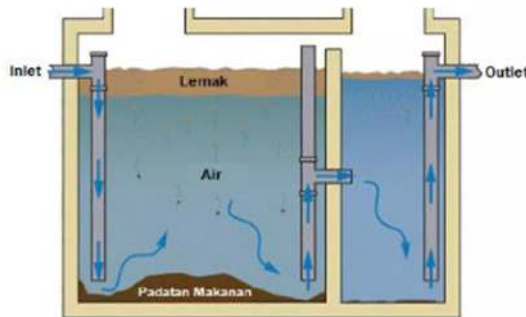
(Sumber: Metcalf & Eddy. 2003. *Waste Water Engineering Treatment & Reuse Fourth Edition*. Halaman 316)

3. Waktu Tinggal (td) = < 2 jam

(Sumber: Metcalf and eddy, *Wastewater Engineering Treatment and Reuse Fourth Edition*, halaman 343-344)

2.3.3 Grease Trap

Penyisihan minyak dan lemak menggunakan *grease trap* dilakukan pada tahap awal pengolahan untuk mencegah gangguan pada proses berikutnya. Secara umum, *grease trap* terdiri atas dua kompartemen, di mana kompartemen pertama berfungsi memisahkan berbagai jenis padatan dalam air limbah; padatan dengan berat jenis lebih besar dari air akan mengendap, sedangkan padatan dengan berat jenis lebih ringan seperti minyak dan lemak akan terapung di permukaan. Kompartemen kedua bertugas memastikan minyak dan lemak tetap tertahan dan tidak terbawa aliran menuju unit pengolahan selanjutnya. Minyak dan lemak yang tertahan perlu dibersihkan secara rutin untuk menjaga kebersihan unit dan mencegah penyumbatan. Beberapa penelitian melaporkan bahwa *grease trap* mampu menghilangkan hingga 80% minyak dan lemak (Kementerian PUPR, 2017).



Gambar 2. 3 Grease Trap

(Sumber: [Kementrian PUPR, Buku A Panduan Perencanaan Teknik Terinci instalasi bangunan pengolahan lumpur tinja](#))

Adapun kriteria yang digunakan dalam menghitung *grease trap* antara lain:

1. Hydraulic Retention Time (HRT) = 5 - 20 menit
2. Kecepatan aliran di Grease Trap (v) = 2- 6 m/jam
3. Perbandingan P:L = 3 : 1

(Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2017). Buku Pedoman Teknis Pengolahan Air Limbah. Direktorat Jenderal Cipta Karya, Direktorat Pengembangan Penyehatan Lingkungan Permukiman. Halaman 30)

4. Kecepatan Aliran (v) = 0.3 m/s - 0.6 m/s

(Sumber: Metcalf & Eddy. 2003. Waste Water Engineering Treatment & Reuse Fourth Edition. Halaman 316)

2.3.4 Netralisasi

Proses netralisasi bertujuan untuk menetralkan pH atau keasaman air baku sampai menjadi netral. Hal tersebut dimaksudkan agar proses pengolahan dapat berjalan dengan baik. Bahan kimia yang umum dipakai yaitu asam sulfat atau asam klorida untuk menetralkan air baku yang bersifat alkali. Sedangkan untuk air baku yang bersifat asam umumnya digunakan soda ash atau soda abu dan kapur tohor (Said, 2017).

Proses penetralan umumnya dilakukan dengan pengadukan di dalam bak dan biasanya dilengkapi dengan kontrolir pH. Penetralan dengan memakai kapur dapat menimbulkan endapan garam kalsium (Said, 2017). Dalam proses netralisasi, terdapat dua (2) sistem yang digunakan dalam menjalankan prosesnya. Sistem sistem tersebut diantaranya sebagai berikut (Eckenfelder, 2000):

- a. Sistem batch biasa digunakan pada air limbah yang memiliki debit lebih kecil dari 380 m³ /hari.
- b. Sedangkan sistem continue membutuhkan pengaturan tingkat keasaman (pH). Apabila udara diperlukan untuk proses pengadukan, maka aliran udara minimum yang dibutuhkan berkisar antara 1 – 3 ft³ /mm.ft² atau 0,3 – 0,9 m³ /mm.m² dengan kedalaman 9 ft (2,7 m).

Adapun kriteria yang digunakan dalam menghitung bak netralisasi antara lain:

1. Waktu detensi = 20 - 60 detik
2. Gradien Kecepatan Pengaduk (G) = 700 – 900

(Sumber: Reynolds, Tom D. dan Richards c. 2003. Wastewater Engineering Treatment and Reuse 4th edition. Halaman 184)

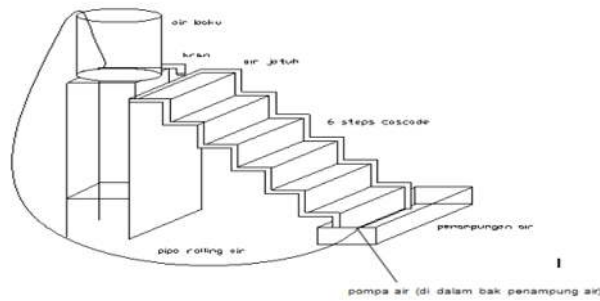
3. Diameter turbine (D_i) = 50% - 80% D/W
4. Lebar turbine (W_i) = $1/6$ - $1/10$ D/W
5. (Sumber: Reynolds, Tom D. dan Richards c. 2003. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse 4th edition. Halaman 185*)

2.3.5 Aerasi

Aerasi adalah suatu proses penambahan udara ataupun oksigen dalam air dengan membawa air dan udara ke dalam kontak yang dekat, dengan cara menyemprotkan air ke udara (air ke dalam udara) atau dengan memberikan gelembung-gelembung halus udara dan membiarkannya naik melalui air (udara ke dalam air). Perpindahan gas dari atmosfer ke air (penambahan oksigen terlarut) akan meningkatkan oksidasi besi, mangan, dan logam lain ke tingkat oksidasi yang lebih tinggi dan lebih tidak larut. Endapan ini akan menjadi dibuang di bak sedimentasi dan unit filtrasi (Droste, 1997). Tujuan utama dari proses aerasi adalah untuk memungkinkan O_2 di udara bereaksi dengan kation dalam air yang diolah. Reaksi kation dan oksigen mengoksidasi logam yang sulit larut dalam air, sehingga dapat mengendap. Keuntungan dari proses ini adalah penghilangan rasa dan bau yang tidak enak, penghilangan gas yang tidak perlu (CO_2 , metana, hidrogen sulfida) dan peningkatan keasaman air (karena kandungan CO_2 dihilangkan) (Yuniarti et al., 2019). Berikut jenis – jenis aerasi:

1. *Cascade Aerator*

Cascade aerator adalah suatu alat untuk proses aerasi dengan menggunakan sistem gravitasi dan prinsip kerja cascade aerator yaitu dengan air yang melewati plat atau lempengan yang disusun secara bertingkat seperti anak tangga kemudian air yang turun melewati cascade tersebut akan berhubungan langsung dengan oksigen di udara lalu untuk pembuatannya cukup sederhana terdiri dari 6 langkah dengan tiap langkahnya mempunyai ketinggian kurang lebih 20 cm, panjang 50 cm dan *cascade aerator* pada gambar dibawah ini yaitu tipe cascade aerator vertical buffel channel (Hastutiningrum, 2015).

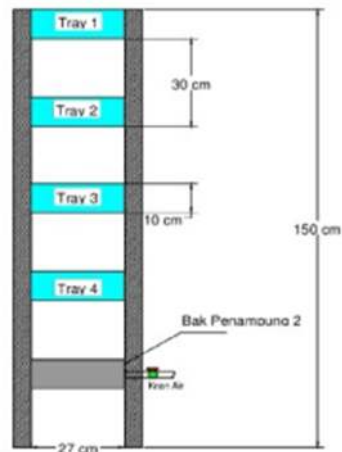


Gambar 2. 4 Cascade Aerator

(Sumber: Hastutiningrum, 2015)

2. Tray Aerator

Tray aerator merupakan sistem aerasi yang menggunakan susunan nampan secara vertikal, di mana air dialirkan melalui setiap tingkat nampan berlubang sebelum ditampung pada bagian bawah. Untuk meningkatkan efektivitas penurunan konsentrasi Fe dan Mn, proses ini dapat dioptimalkan dengan penambahan media seperti kaolin dan karbon aktif (Kurniawan et al., 2021).



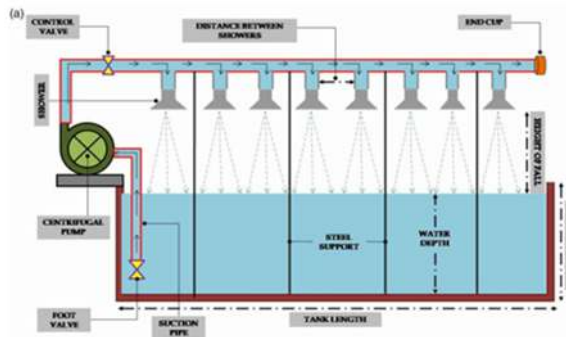
Gambar 2. 5 Tray Aerator

(Sumber: Zilmy, 2022)

3. Spray Aerator

Spray aerator merupakan alat yang dilengkapi satu atau beberapa *orifice* atau *nozzle* yang dipasang pada sebuah pipa manifold. Air

dialirkan melalui pipa dengan tekanan tertentu dan kemudian keluar dari *nozzle* dalam bentuk butiran halus atau semburan air. Butiran atau semburan tersebut jatuh melalui udara di sekitarnya sehingga membentuk luas bidang kontak antara air dan udara yang besar. Kondisi ini memungkinkan proses pertukaran udara berlangsung lebih efektif dan meningkatkan kadar oksigen terlarut (DO) dalam air (Shukla et al., 2018).

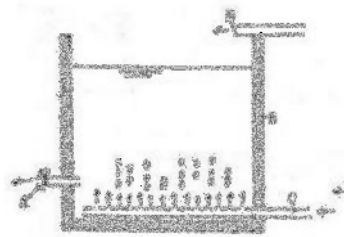


Gambar 2. 6 *Spray Aerator*

(Sumber: Roshan et al., 2021)

4. *Bubble Aerator*

Bubble Aerator bekerja dengan mentransfer oksigen dari udara bertekanan yang diinjeksikan ke dalam air melalui diffuser berpori berbentuk tabung atau disk, menghasilkan gelembung-gelembung halus berukuran seragam yang meningkatkan turbulensi dan efisiensi proses aerasi di dalam reaktor. (Harfadli et al., 2019).



Gambar 2. 7 *Bubble Aerator*

(Sumber: <https://eprints.poltekkesjogja.ac.id/4982/4/chapter%202.pdf>)

Adapun kriteria yang digunakan dalam menghitung bak netralisasi antara lain:

1. Waktu tinggal = 10 – 30 menit
(Sumber: Qasim, dkk. 2000. *Water Work Engineering: Planning, Design, and Operation*. Hal 137)
2. Freeboard = 5% - 30%
3. Kecepatan Aliran (v) = 0.3 m/s - 0.6 m/s
(Sumber: Metcalf & Eddy. 2003. *Waste Water Engineering Treatment & Reuse Fourth Edition*. Halaman 316)
4. Tinggi bak (H) = 1.5 – 3 meter
(Sumber: Metcalf and eddy, *Wastewater Engineering Treatment and Reuse Fourth Edition*, halaman 343-344)

2.3.6 Koagulasi-Flokulasi

Koagulasi-Flokulasi merupakan proses berkelanjutan yang digunakan untuk memperbesar ukuran koloid. Koloid pada umumnya memiliki muatan listrik negatif, muatan negatif mengakibatkan terbentuknya lapisan stern layer dan diffuse layer yang sebagian besar bermuatan positif. Adanya lapisan tersebut mengakibatkan terjadinya gaya tolak menolak antar partikel koloid (Hendrasarie,2024). Proses koagulasi dilakukan dengan melakukan destabilisasi partikel koloid dengan melakukan pengadukan cepat yang diiringi oleh pembubuhan bahan kimia (koagulan). Koagulasi mengakibatkan destabilisasi partikel koloid yang tadinya stabil menjadi ion positif dan negatif, ion yang tidak stabil kemudian mengalami pembentukan ion ikatan antara ion positif dan negatif begitu pula sebaliknya yang mengakibatkan terbentuknya inti flok (presipitasi) (Ali Masduqi, Abdu F. Assomadi. 2012). Pada tabel 2.2 dapat dilihat berbagai macam koagulan yang umum digunakan dalam pengolahan air.

Tabel 2. 2 Jenis-Jenis Koagulan

Koagulan	Formula	Bentuk	Reaksi dengan Air	pH Optimum
<i>Aluminium Sulfat</i>	$Al_2(SO_4)_3 \cdot X H_2O$ X = 14,16,18	Bongkah, bubuk	Asam	6,0-7,8
<i>Sodium Aluminate</i>	$Na_2Al_2O_4$	Bubuk	Basa	6,0-7,8
<i>Polyaluminium Chloride (PAC)</i>	$Aln(OH)mCl_3 n-m$	Cairan, bubuk	Asam	6,0-7,8
<i>Ferric sulfate</i>	$Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$	Kristal halus	Asam	4-9
<i>Ferri klorida</i>	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	Bongkah, cairan	Asam	4-9
<i>Ferro Sulfat</i>	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	Kristal halus	Asam	>8,5

(Sumber : Sugiarto, 2006)

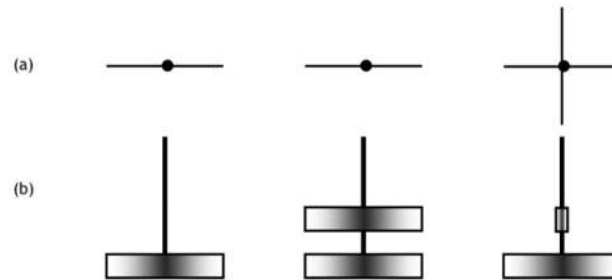
Proses dilanjutkan dengan flokulasi, pada proses ini flok yang terbentuk akan mengalami penggabungan inti flok yang menjadi flok yang lebih besar dan dapat mengendap. Pembentukan flok yang lebih besar terjadi akibat adanya proses pengadukan lambat yang mengakibatkan terjadinya tumbukan antar inti flok (Ali Masduqi, Abdu F. Assomadi. 2012).

Koagulasi - flokulasi memiliki 2 jenis pengadukan berdasarkan kecepatannya, yakni pengadukan lambat dan pengadukan cepat. pengadukan cepat digunakan pada proses koagulasi dengan tujuan untuk untuk menghasilkan turbulensi air sehingga dapat mendispersikan bahan kimia yang akan dilarutkan dalam air (Ali Masduqi et al., 2012). Waktu pengadukan cepat dari 20-60 detik, dengan gradien kecepatan 700- 1000/s. Pengadukan cepat dapat dilakukan dengan pengadukan mekanik, pengadukan pneumatis, dan baffle basins (Reynolds & Richards, 1996).

Adapun jenis-jenis koagulan dan pengadukan cepat unit koagulasi yaitu sebagai berikut.

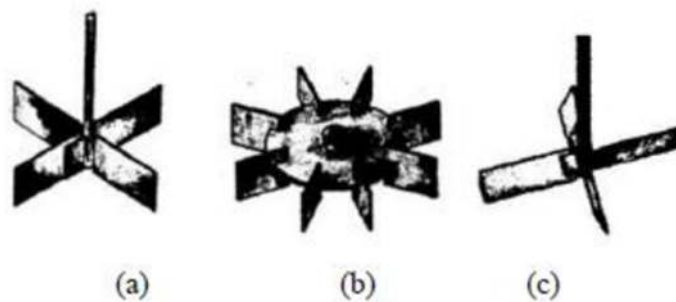
1. Pengadukan Mekanis

Pengadukan mekanis dengan tujuan pengadukan cepat umumnya dilakukan dalam waktu singkat dalam satu bak. Faktor penting dalam perancangan alat pengaduk mekanis adalah dua parameter pengadukan, yaitu G dan td . Pengadukan mekanis biasanya menggunakan peralatan berupa motor bertenaga Listrik, poros pengaduk (shaft), dan alat pengaduk impeller. Berdasarkan bentuknya terdapat tiga macam alat pengaduk, yaitu paddle (pedal), turbin, dan propeller (balong-baling). Bentuk ketiga impeller dapat dilihat pada gambar berikut:



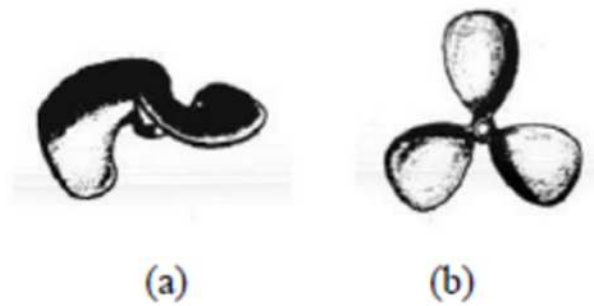
Gambar 2. 8 Tipe paddle (a) Tampak Atas, (b) Tampak Bawah

(Sumber : <https://www.slideshare.net/slideshow/5-unit-koagulasi-flokulasi/15695481>)



Gambar 2. 9 Tipe Turbine (a) Turbine Blade Lurus, (b) Turbine Blade dengan Piringan, (c) Turbine dengan Blade Menyerong

(Sumber : S. R. , Qasim et al., 2000)

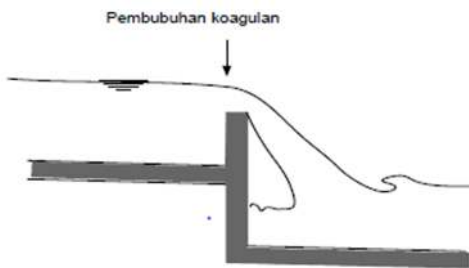


Gambar 2. 10 Tipe Propeller (a) Propeller 2 Blade, (b) Propeller 3 Blade

(Sumber : S. R. , Qasim et al., 2000)

2. Pengadukan Hidrolis

Pengadukan hidrolis adalah pengadukan yang memanfaatkan aliran air sebagai tenaga pengadukan. Tenaga pengadukan ini dihasilkan dari energi hidrolik yang dihasilkan dari suatu aliran hidrolik. Energi hidrolik dapat berupa energi gesek, energi potensial (jatuhan) atau adanya lompatan hidrolik dalam suatu aliran (Ali Masduqi et al., 2012). Jenis pengadukan hidrolis yang digunakan pada pengadukan cepat haruslah aliran air yang menghasilkan energi hidrolik yang besar titik Dalam hal ini dapat dilihat dari besarnya kehilangan energi tutup atau perbedaan muka air. Dengan tujuan menghasilkan turbulensi yang besar tersebut maka jenis aliran yang sering digunakan sebagai pengadukan cepat adalah tersusunan, loncatan hidrolik dan pashall flume (Ali Masduqi et al., 2012).



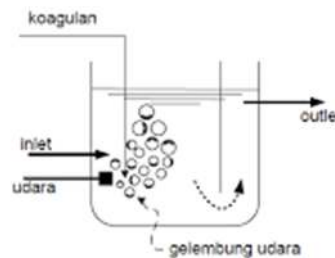
Gambar 5.9 Pengadukan cepat dengan terjunan

Gambar 2. 11 Pengadukan Cepat dengan Terjunan

(Sumber : <https://www.slideshare.net/slideshow/5-unit-koagulasi-flokulasi/15695481>)

3. Pengadukan Pneumatis

Pengadukan pneumatis adalah pengadukan yang menggunakan udara (gas) berbentuk gelembung sebagai tenaga pengadukan. Gelembung tersebut dimasukkan ke dalam air dan akan menimbulkan gerakan pada air. Injeksi udara bertekanan ke dalam air akan menimbulkan turbulensi, akibat lepasnya gelembung udara ke permukaan air. Aliran udara yang digunakan untuk pengadukan cepat harus mempunyai tekanan yang cukup besar sehingga mampu menekan dan menggerakkan air. Makin besar tekanan udara, kecepatan gelembung udara yang dihasilkan makin besar dan diperoleh turbulensi yang makin besar pula.

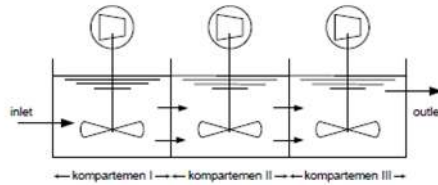


Gambar 2. 12 Pengadukan Cepat Secara Pneumatis

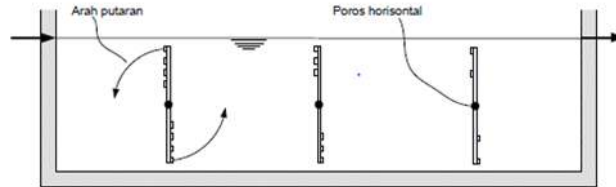
(Sumber : <https://www.slideshare.net/slideshow/5-unit-koagulasi-flokulasi/15695481>)

Pengadukan lambat (agitasi dan stirring) digunakan dalam proses flokulasi, untuk memberi kesempatan kepada partikel flok yang sudah terkoagulasi untuk bergabung membentuk flok yang ukurannya semakin membesar. Selain itu, untuk memudahkan flokulan untuk mengikat flok-flok kecil dan mencegah pecahnya flok yang sudah terbentuk (Hartono, 2016). Pengadukan lambat adalah pengadukan yang dilakukan dengan gradien kecepatan kecil (20 sampai 100 detik) selama 10 hingga 60 menit atau nilai GTd (bilangan Champ) berkisar 48000 hingga 210000. Untuk menghasilkan flok yang baik, gradien kecepatan diturunkan secara bertahap 21 agar flok yang telah terbentuk tidak pecah lagi dan berkesempatan

bergabung dengan yang lain membentuk gumpalan yang lebih besar (Ali Masduqi et al., 2012). Umumnya, pengadukan lambat dapat 25 berupa pengadukan mekanis dengan memakai *impeller* atau berupa pengadukan hidraulis dengan *baffle channel*.



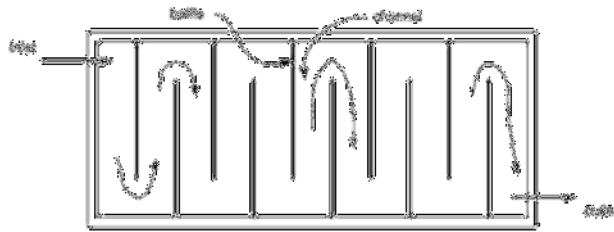
Gambar 5.7 Pengadukan lambat dengan alat pengaduk



Gambar 5.8 Flokulator *paddle wheel* dengan *blade* tegak lurus aliran air (tipe *horizontal shaft*)

Gambar 2. 13 Pengadukan Lambat dengan Impeller

Sumber : <https://chem-envi.blogspot.com/2015/06/pengadukan-dalam-proses-koagulasi.html>



Gambar 2. 14 Pengadukan Lambat dengan Baffle Channel

Sumber : <https://www.slideshare.net/slideshow/5-unit-koagulasi-flokulasi/15695481>

Adapun kriteria desain dan perencanaan yang harus dipenuhi untuk perencanaan unit bak penampung antara lain sebagai berikut:

Koagulasi

1. Waktu Tinggal (td) = 20 – 60 detik
2. Gradien Kecepatan = 700 -100 / s
(Sumber: Reynolds, Tom D. dan Richards c. 2003. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse 4th edition*, hal 182)
3. Diameter paddle (Di) = 50% - 80% D/W
4. Lebar paddle (Wi) = 1/6 - 1/10 D/W
5. (Sumber: Reynolds, Tom D. dan Richards c. 2003. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse 4th edition*. Halaman 185)
6. Kecepatan Aliran (v) = 0.3 m/s - 0.6 m/s
(Sumber: Metcalf & Eddy. 2003. *Waste Water Engineering Treatment & Reuse Fourth Edition*. Halaman 316)
7. NRe = >10000
(Sumber: Reynolds, Tom D. dan Richards c. 2003. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse 4th edition*, hal 187)

Flokulasi

1. Waktu Tinggal (td) = 15 – 45 menit
(Sumber : (Reynold, Tom D. Dan Paul A. Richards.1996. *Unit Operation and Processes in Environment al Engineering 2th* halaman 212)
2. Gradien Kecepatan (G) = 10 – 100 /s
(Sumber: Nusa Idaman Said, *Teknologi Pengolahan Air Limbah*, halaman 34)
3. GT = 10000 – 100000
(Sumber: Reynolds, Tom D. dan Paul A. Richards. 2003. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse 4th edition*, pages 185)
4. NRe = <2000
5. NFr = > 10⁻⁵
(Sumber: Reynolds. 1982. *Unit Operation and Processes in Environmental Engineering*. Hal. 224)

2.3.7 Sedimentasi

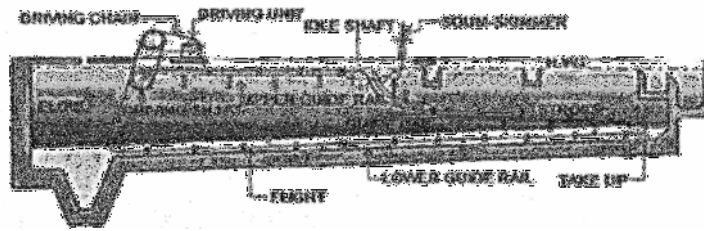
Unit sedimentasi primer bertujuan untuk menghapus partikel padat yang berada dalam suspensi. Partikel tertentu seperti sisa limbah kertas, tekstil, pulp, atau

limbah domestik dapat menggumpal saat bergerak menuju dasar tangki sedimentasi, yang berdampak pada laju pengendapan. Fungsi utama dari sedimentasi primer adalah untuk menghilangkan padatan yang dapat mengendap dan material yang mudah mengapung, sehingga mengurangi jumlah padatan tersuspensi dalam air limbah. Proses sedimentasi primer berfungsi sebagai langkah awal dalam pengolahan lanjut air limbah (Reynolds & Richards, 1996). Sedimentasi biasanya digunakan setelah proses koagulasi dan flokulasi, yaitu ketika partikel-partikel halus telah bergabung menjadi flok yang lebih besar dan mudah mengendap. Selain itu, sedimentasi juga membantu mengurangi beban pencemar pada tahap-tahap pengolahan berikutnya, seperti aerasi atau proses biologis. Berdasarkan konsentrasi dan kecenderungan partikel untuk saling berinteraksi, terdapat empat jenis pengendapan gravitasi yang dapat terjadi, yaitu (Metcalf & Eddy, 2014) :

1. Pengendapan tipe I *Discrete particle settling* (pengendapan partikel diskrit), ditujukan untuk mengendapkan partikel diskrit.
2. Pengendapan tipe II *Flocculant settling* (pengendapan flokulen), ditujukan untuk mengendapkan partikel flokulen.
3. Pengendapan tipe III *Hindered settling* (pengendapan terhambat atau zona), ditujukan untuk mengendapkan lumpur biologis
4. Pengendapan tipe IV *Compression settling* (pengendapan kompresi), ditujukan untuk memampatkan partikel yang telah mengendap akibat dari berat partikel.

Karakteristik tangki, baik secara geometris maupun fungsional, akan menentukan keberhasilan proses berdasarkan pola aliran masuk dan keluar dari material yang diendapkan. Secara umum, terdapat tiga jenis utama tangki sedimentasi, yaitu (Garcia et al., 2014):

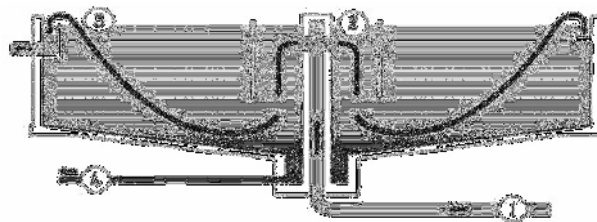
1. Tangki aliran horizontal (*horizontal flow tank*), pengumpulan dan pengeluaran lumpur dilakukan secara manual dengan cara mengosongkan tangki.



Gambar 2. 15 *Rectangular Sedimentation*

(Sumber : Garcia et al., 2014)

2. Tangki aliran radial (*radial flow tank*), pengumpulan lumpur dilakukan di dasar tangki berbentuk kerucut dalam melalui tekanan hidrolik.



Gambar 2. 16 *Circular Sedimentation*

(Sumber : Garcia et al., 2014)

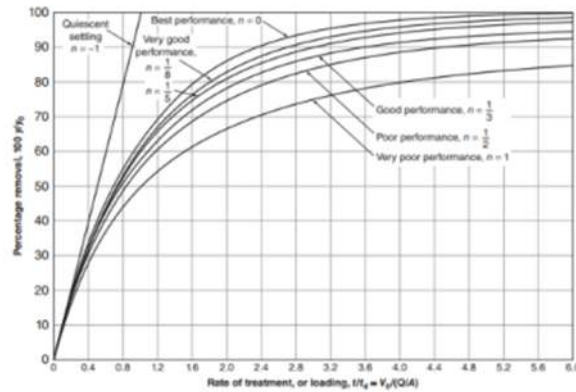
3. Tangki aliran ke atas (*upward flow tank*), pembuangan lumpur dilakukan secara mekanis dengan alat penggaruk (*mechanical scraper*) yang bekerja berdasarkan perbedaan tekanan.

Menurut Masqudi, 2016, bak sedimentasi memiliki 4 bagian utama, yaitu bagian inlet, zona pengendapan, zona lumpur dan zona outlet.

1. Zona *inlet* merupakan tempat air masuk kedalam bak.
2. Zona pengendapan merupakan tempat flok atau partikel mengalami proses pengendapan.
3. Zona lumpur merupakan tempat lumpur mengumpul sebelum keluar bak.
4. Zona outlet merupakan tempat dimana air akan meninggalkan bak yang biasanya berbentuk pelimpah (*weir*).

Pada unit sedimentasi terdapat grafik good performance yang menunjukkan hubungan antara efisiensi penghilangan partikel (% removal) dengan laju pengolahan atau beban (t/td), untuk berbagai kondisi kinerja sedimentasi yang diwakili oleh nilai parameter n. Kurva dengan label "*Good performance, n = 1/3*"

menunjukkan performa sedimentasi yang baik, di mana efisiensi penghilangan mencapai sekitar 80% pada rasio t/t_d sekitar 2, dan meningkat secara bertahap seiring bertambahnya rasio tersebut. Dalam kondisi tersebut, sistem sedimentasi bekerja cukup efektif dalam menghilangkan partikel dari air limbah pada laju pengolahan yang moderat. Kurva ini berguna untuk mendesain atau mengevaluasi sistem sedimentasi berdasarkan target efisiensi dan kapasitas pengolahan..



Gambar 2. 17 Grafik Good Performance

(Sumber: Shammas, N. K., & Wang, L. K., 2015)

Adapun kriteria desain dan perencanaan yang harus dipenuhi untuk perencanaan unit bak penampung antara lain sebagai berikut:

- a. Waktu detensi = 1.5 – 2.5 jam

(Sumber: Metcalf & Eddy. *Wastewater Engineering Treatment & Reuse*, 4th Edition . Halaman 398)

- b. Kecepatan aliran (v) = 0.4 – 0.6 m/s

(Sumber: (Sumber: Metcalf & Eddy. 2003. *Waste Water Engineering Treatment & Reuse Fourth Edition*. Halaman 316)

- c. $N_{re} = < 2000$

(Sumber: SNI 6774-2008 Tentang Tata Cara Perencanaan Unit Paket Instalasi Pengolahan Air)

- d. Sudut V-Notch = 45°

(Sumber: Qasim, dkk., 2000, *Water Works Engineering Planning, Design, and Operation*)

- e. Weir loading rate = $125 - 500 \text{ m}^3 / \text{m.hari}$

(Sumber: Metcalf & Eddy, *Waste Water Engineering Treatment & Reuse*, 4th Edition, page 398)

- f. Kontrol penggerusan (scouring)

$$\alpha = 0.03$$

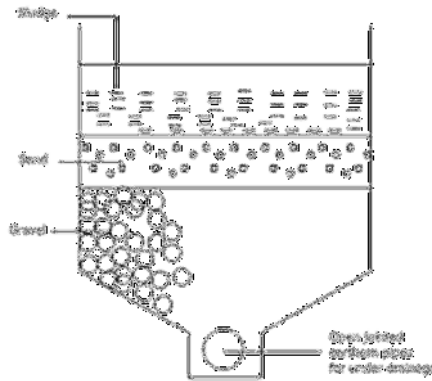
$$\beta = 0.02 - 0.12$$

(Sumber: Huisman, L., 1977. *Sedimentation and Flotation Mechanical Filtration*. Delft University of Technology. Delft. page 57))

2.3.8 *Sludge Drying Bed*

Sludge Drying Bed pada umumnya digunakan untuk pengumpulan padatan lumpur atau sludge dengan ukuran padatan yang relatif kecil hingga sedang. Dalam prosesnya, lumpur atau sludge diletakkan pada kolam memiliki kedalaman lapisan lumpur yang berkisar antara 200-300 mm. Selanjutnya lumpur tersebut dibiarkan mengering. Pengurangan kadar air dalam sludge drying bed terjadi karena adanya saluran drainase yang terletak di dasar kolam dan akibat proses penguapan. Kebanyakan hilangnya kadar air dari *sludge drying bed* diakibatkan oleh pengurangan pada saluran drainase. Oleh karena itu, kecermatan dalam penentuan dimensi pipa drainase sangat dibutuhkan. *Sludge drying bed* pada umumnya dilengkapi dengan saluran drainase lateral (pipa PVC berpori atau pipa yang diletakkan didasar dengan open join) (Metcalf & Eddy, 2003).

Ketebalan yang diatur sedemikian rupa memiliki fungsi guna menghambat laju air dan meminimasi masuknya lumpur atau sludge ke dalam saluran drainase. Pasir yang digunakan pada media penyangga juga memiliki batasan koefisien keseragaman yang tidak lebih dari 4 dan memiliki effective size antara 0,3-0,75. Area pengeringan memiliki dimensi lebar yang dibatasi pada 6 m dengan panjang yang berkisar antara 6-30 m dan kedalaman yang berkisar antara 380-460 mm. Bahan beton disarankan digunakan sebagai bahan penyusun bangunan *sludge drying bed* (Metcalf & Eddy, 2003).



Gambar 2. 18 *Sludge Drying Bed*

(Sumber : Metcalf & Eddy, 2003)

Pipa inlet pada bangunan *sludge drying bed* harus dirancang dengan kecepatan minimal 0,75 m/s dan memungkinkan untuk terjadinya proses pengurasan pada saluran drainase. Pipa besi dan PVC merupakan jenis pipa yang paling sering digunakan. Sistem penyaluran *sludge* dilakukan dengan mengalirkan air tegak lurus dengan posisi *sludge drying bed* guna mengurangi kecepatan alir saat *sludge* memasuki bangunan pengering. (Metcalf & Eddy, 2003) Padatan pada *sludge drying bed* hanya dapat dikuras dari bangunan *sludge drying bed* setelah *sludge* mengering. Lumpur yang telah mengering memiliki ciri yaitu memiliki permukaan yang terlihat retak dan mudah hancur serta berwarna hitam atau coklat gelap. Kadar air yang terkandung dalam lumpur yang telah mengering berkisar pada 60% pada rentang antara 10-15 hari. Proses pengurasan dapat dikatakan selesai apabila lumpur telah dikeruk menggunakan scrapper atau secara manual dan diangkut menggunakan truk keluar dari lokasi pengolahan (Metcalf & Eddy, 2003).

Sludge drying bed yang sedang digunakan untuk proses pengeringan lumpur hendaknya ditutup guna mengisolasi dan mengantisipasi tersebarnya bau yang mungkin ditimbulkan. Akan tetapi, apabila reaktor dirancang untuk dibiarkan terbuka, hendaknya reaktor *sludge drying bed* dibangun pada jarak minimal 100 m dari lokasi hunian penduduk guna mengantisipasi pencemaran udara yang diakibatkan oleh bau (Metcalf & Eddy, 2003).

2.4 Persen Removal

Berdasarkan studi literatur, diperoleh beberapa persen efisiensi penyisihan untuk unit pengolahan beserta keseluruhan parameter dalam air limbah pembekuan ikan (cold storage) sehingga dapat diolah dalam bangunan pengolahan air limbah yang telah direncanakan. Berikut rangkuman persen penyisihan air limbah pembekuan ikan beserta sumber yang tertera pada tabel 2.3

Tabel 2. 3 Persen Removal

Unit	Parameter	% Removal	Sumber
<i>Grease Trap</i>	Minyak dan Lemak	80%	<i>Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2017). Buku A: Panduan perencanaan teknik terinci instalasi bangunan pengolahan lumpur tinja. Kementerian PUPR. Halaman 30.</i>
Netralisasi	pH	7	<i>Reynolds & Richards, 1996. Unit Operations & Processes in Environment Engineering, 2nd, hal 161</i>
Aerasi	Besi (Fe)	20% - 90 %	<i>Droste, Ronald L. 1997. Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment, hal 224</i>
	Zinc (Zn)	0% - 20%	

Unit	Parameter	% Removal	Sumber
Sedimentasi	Besi (Fe)	20% - 90 %	<i>Droste, Ronald L. 1997. Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment, hal 224.</i>
	TSS	80% - 90%	<i>Metcalf and Eddy, Wastewater Engineering Treatment and Reuse 4th, Hal 497.</i>
	Zinc (Zn)	20% - 90%	<i>Droste, Ronald L. 1997. Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment, hal 224.</i>
	Fosfat	75% - 95%	<i>Metcalf and Eddy, Wastewater Engineering Treatment and Reuse 4th, Hal 506.</i>

(Sumber: Studi Literatur, 2025)

2.5 Profil Hidrolis

Profil hidrolis merupakan representasi grafis yang menggambarkan variasi elevasi muka air di sepanjang jalur aliran pada sistem distribusi atau pengolahan air limbah. Umumnya, grafik ini menyajikan hubungan antara permukaan aliran, dasar saluran (invert), dan struktur-struktur utama seperti saluran masuk (inlet), saluran keluar (outlet), serta unit-unit pengolahan di sepanjang sistem. Tujuan utama dari penyusunan profil hidrolis adalah untuk memastikan bahwa aliran air limbah atau air proses dapat mengalir secara kontinu dan efisien, baik dengan sistem gravitasi maupun pompa bantu, tanpa menimbulkan permasalahan seperti genangan, aliran balik, maupun luapan.

Sebelum melakukan perancangan profil hidrolis suatu sistem pengolahan air, terdapat beberapa aspek teknis yang perlu diperhatikan agar aliran air dapat

dikendalikan secara optimal dan tidak menimbulkan gangguan dalam proses pengolahan. Aspek-aspek tersebut meliputi:

6. Kehilangan tekanan pada bangunan pengolahan Perhitungan kehilangan tekanan yang terjadi di berbagai komponen bangunan pengolahan sangat penting karena akan memengaruhi tinggi muka air di masing-masing unit. Beberapa sumber kehilangan tekanan tersebut antara lain:
 - Pada saluran terbuka
 - Di dalam unit bak pengolahan
 - Pada pintu air
 - Pada elemen tambahan seperti weir, sekat, dan lainnya, yang perlu dihitung secara spesifik
7. Kehilangan tekanan pada sistem perpipaan dan aksesoris Selain bangunan pengolahan, sistem perpipaan dan peralatan pendukung lainnya juga menyebabkan kehilangan tekanan, yang meliputi:
 - Kehilangan tekanan di dalam pipa
 - Kehilangan tekanan akibat penggunaan aksesoris perpipaan (misalnya valve, elbow, reducer)
 - Kehilangan tekanan pada sistem pompa
8. Perhitungan tinggi muka air Ketelitian dalam menentukan tinggi muka air sangat krusial, karena kesalahan dalam perhitungan dapat berakibat pada kesalahan dalam penentuan elevasi bangunan pengolahan. Hal ini dapat berdampak langsung pada efisiensi proses pengolahan air. Kehilangan tekanan baik di saluran terbuka maupun tertutup, serta tinggi terjunan yang direncanakan (jika ada), harus diperhitungkan secara akurat.

Langkah-langkah umum dalam perhitungan tinggi muka air antara lain:

- i. Menentukan terlebih dahulu tinggi muka air dari bangunan pengolahan paling akhir dalam sistem.
- ii. Menambahkan kehilangan tekanan antara unit tersebut dengan unit sebelumnya, dimulai dari clear well.

- iii. Dengan demikian, diperoleh tinggi muka air dari bangunan yang berada sebelum clear well, dan proses ini dilanjutkan secara berurutan hingga bangunan pertama setelah intake.
- iv. Apabila tinggi muka air pada bangunan pertama setelah intake ternyata lebih tinggi dari muka air sumber, maka diperlukan pemasangan pompa di unit intake untuk menaikkan aliran air ke sistem.

2.5 BoQ dan RAB

2.5.1 *Bill of Quantity* (BoQ)

Daftar kuantitas dan harga atau yang dikenal dengan Bill of Quantity (BoQ) merupakan dokumen penting dalam perencanaan dan pelaksanaan proyek konstruksi. BoQ memuat rincian kebutuhan bahan, alat, dan pekerjaan yang disusun secara sistematis berdasarkan kelompok atau bagian pekerjaan dalam proyek (Radinal et al., 2022).

Setiap item dalam BoQ disertai informasi mengenai jenis pekerjaan, volume atau jumlah kebutuhan, satuan pengukuran, serta harga satuan dari masing-masing komponen. Penyusunan BoQ bertujuan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai kebutuhan proyek sehingga dapat mempermudah proses pengadaan barang dan jasa, pengendalian biaya, serta pelaksanaan pekerjaan di lapangan. Selain itu, BoQ juga berfungsi sebagai dasar perhitungan anggaran dan menjadi acuan dalam evaluasi penawaran dari penyedia jasa konstruksi pada saat proses pelelangan.

2.5.2 Rancangan Anggaran Biaya (RAB)

Rencana Anggaran Biaya (RAB) merupakan sebuah rencana, sehingga angka-angka yang tercantum di dalamnya tidak bersifat mutlak atau sepenuhnya akurat. Meskipun demikian, RAB memiliki peranan yang sangat penting dalam pelaksanaan suatu proyek. Penyusunan RAB dilakukan dengan cara memperkirakan biaya dari berbagai komponen pekerjaan, sambil mempertimbangkan durasi pelaksanaan proyek. Secara umum, komponen dalam

RAB terdiri atas biaya langsung dan biaya tidak langsung. Biaya langsung atau direct cost adalah biaya yang dapat dikaitkan secara langsung dengan objek atau produk tertentu, sehingga bisa dibebankan secara spesifik. Contohnya antara lain bahan baku, upah tenaga kerja yang secara langsung terlibat, ongkos pengangkutan, serta biaya iklan. Sementara itu, biaya tidak langsung atau indirect cost merupakan biaya yang tidak bisa dikaitkan secara langsung dengan satu unit produk atau kegiatan tertentu. Contoh dari biaya ini meliputi biaya penyusutan aset, asuransi, listrik, serta biaya overhead, yang dapat terdiri dari biaya overhead pabrik, biaya penjualan, dan biaya umum serta administrasi (Mokolensang et al., 2021).