

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Limbah Industri Pembekuan Ikan

Industri pengolahan ikan, termasuk proses pembekuan ikan (*cold storage*), merupakan salah satu sektor yang menghasilkan berbagai jenis limbah dari kegiatan produksinya. Limbah industri pembekuan ikan (*cold storage*) merupakan hasil buangan yang mengandung protein, nitrat (NO_3), sulfida (H_2S), klorin bebas (Cl_2), lemak, fosfat (PO_4), dan amonia ($\text{NH}_3\text{-N}$) (Banin et al., 2021). Volume air yang dibutuhkan oleh industri pembekuan ikan juga cukup besar karena proses produksi membutuhkan volume air yang banyak. Sumber utama dari limbah pembekuan ikan adalah dari proses pencucian ikan, air rendaman ikan, serta proses pencucian lantai, peralatan, dan mesin yang digunakan dalam produksi sehari-hari.

Kandungan organik yang tinggi menjadi salah satu parameter pencemar air limbah industri pembekuan ikan. Hal ini disebabkan adanya protein yang berasal dari darah ikan, isi perut, sari-sari ikan, dan bagian tubuh lainnya, termasuk insang dan sirip yang terbawa ke dalam air limbah (Afrianisa & A'yunin, 2024). Kandungan zat-zat tersebut yang tidak dikelola dengan baik dapat menyebabkan pencemaran lingkungan yang serius, seperti penurunan kualitas air, kerusakan ekosistem perairan, dan dapat memengaruhi kesehatan masyarakat. Selain itu, keberadaan senyawa organik dalam jumlah besar juga dapat meningkatkan beban pencemaran di perairan sehingga mempercepat proses eutrofikasi yang merugikan kehidupan biota air.

2.2 Karakteristik Air Limbah Pembekuan Ikan

Air Limbah industri pembekuan ikan (*cold storage*) merupakan salah satu limbah cair dengan kandungan bahan organik yang tinggi dan dapat mencemari lingkungan. Mayoritas bahan organik yang menyusun air limbah dari industri pembekuan ikan adalah dari kandungan pada tubuh ikan. Penentuan kualitas dari sebuah air dapat ditinjau berdasarkan kandungan yang ada didalamnya.

2.2.1 pH

Konsentrasi ion hidrogen adalah ukuran kualitas air maupun dari air limbah. Konsentrasi ion hidrogen (pH) dapat diartikan sebagai logaritma negatif dari konsentrasi ion hidrogen, yaitu sebagai berikut:

$$\text{pH} = -\log 10[\text{H}^+]$$

Mayoritas mikroorganisme dapat bertahan hidup di lingkungan dengan nilai pH antara 6 dan 9. Limbah yang sangat asam (pH) merupakan tantangan bagi pengolahan biologis. Limbah akan mengubah tingkat keasaman (pH) air alami jika tidak diolah sebelum dialirkan. Tingkat keasaman (pH) yang dapat dibuang ke badan air untuk proses pengolahan air limbah biasanya antara 6,5 dan 8,5. Pengukur pH, kertas pH, dan indikator warna pH yang berfungsi sebagai standar-semuanya dapat digunakan untuk menguji pH. Indikator warna pH berfungsi sebagai standar dalam menentukan ukuran nilai pH (Metcalf & Eddy, 2004). Kandungan pH yang ditetapkan oleh Peraturan Gubernur Jawa Timur Nomor 72 Tahun 2013 untuk air limbah industri pembekuan ikan adalah sebesar 6 sampai 9.

2.2.2 *Total Suspended Solid (TSS)*

Padatan tersuspensi total, yang dipengaruhi oleh masukan dari daratan, aliran sungai, dan kondisi oseanografi, merupakan elemen sedimen yang mengapung di kolom perairan tanpa menyentuh dasar perairan. Zat yang paling awal membentuk sedimen, padatan tersuspensi total (TSS), juga merupakan residu padatan total dari proses heterogen yang dapat menghambat produksi bahan organik di suatu perairan perairan. Sedimentasi adalah istilah lain untuk keberadaan TSS di dalam air. Konsentrasi TSS yang terlalu tinggi akan menghalangi cahaya untuk menembus air dan mengganggu proses fotosintesis (Baktiar & Basith, 2020).

Total Suspended Solid (TSS) atau muatan padat tersuspensi juga merupakan bahan-bahan tersuspensi dengan diameter $> 1 \mu\text{m}$ yang dapat tertahan pada saringan millipore diameter pori $0,45 \mu\text{m}$. TSS merupakan padatan yang terdapat dalam air limbah seperti pasir, tanah liat, dan puing-puing organik yang terbentuk dari zat organik asam vulvat, yang merupakan hasil dari penguraian tanaman atau hewan yang mati. Selain itu, mikroorganisme termasuk virus, plankton, ganggang, dan lainnya merupakan sumber padatan ini. Menurut Said (2017), semua faktor ini

biasanya dapat mengakibatkan kekeruhan atau warna pada air. Semakin tinggi kandungan bahan tersuspensi tersebut, maka air akan terlihat semakin keruh. Kandungan TSS yang ditetapkan oleh Peraturan Gubernur Jawa Timur Nomor 72 Tahun 2013 untuk air limbah industri pembekuan ikan adalah sebesar 100 mg/L.

2.2.3 Biochemical Oxygen Demand (BOD)

BOD atau (*Biochemical Oxygen Demand*) adalah metrik yang menunjukkan berapa banyak oksigen terlarut yang dibutuhkan oleh mikroorganisme (sering kali bakteri) untuk mencerna bahan organik di lingkungan aerobik. Jumlah oksigen yang digunakan oleh populasi mikroba dalam air sebagai hasil dari penguraian bahan organik yang dapat terurai diukur dengan BOD. Organisme yang bergantung pada oksigen tidak dapat bertahan hidup dalam air limbah dengan tingkat BOD yang tinggi. Kondisi anaerobik dan penipisan oksigen dalam air limbah juga dapat disebabkan oleh peningkatan BOD (Astuti & Rosemalia, 2022)

Nilai BOD tidak menunjukkan seberapa banyak bahan organik yang ada; nilai ini hanya menunjukkan berapa banyak oksigen yang dibutuhkan untuk menguraikan bahan organik. BOD adalah ukuran jumlah oksigen yang digunakan oleh mikroorganisme untuk mengoksidasi bahan organik selama proses metabolisme, tetapi juga dapat digunakan untuk menggambarkan jumlah bahan organik yang dapat terurai di dalam air (*biodegradable organics*). Jumlah oksigen yang dibutuhkan oleh bakteri untuk menguraikan bahan organik dan mengembalikan kejernihan limbah dikenal sebagai BOD₅ dan diukur dalam bagian per juta (ppm) atau miligram per lima liter (mg/L). Pada suhu 28 C, semua ini membutuhkan waktu 100 hari, dan pada skala laboratorium, hanya lima hari yang digunakan, oleh karena itu disebut BOD₅ (Sugiharto, 1987). Kandungan BOD yang ditetapkan oleh Peraturan Gubernur Jawa Timur Nomor 72 Tahun 2013 untuk air limbah industri pembekuan ikan adalah sebesar 100 mg/L.

2.2.4 Chemical Oxygen Demand (COD)

Jumlah total oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi bahan organik secara kimiawi dikenal sebagai *Chemical Oxygen Demand* atau COD. COD adalah jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk proses kimiawi untuk mengoksidasi limbah organik di dalam air. Tingkat kontaminasi bahan organik ditunjukkan oleh nilai

COD. Ketika jumlah bahan organik dalam air limbah menurun, begitu pula tingkat COD dalam limbah tersebut. Prosedur pengolahan konvensional tidak selalu efektif dalam mengurangi bahan organik dalam jumlah rendah (Harahap et al., 2020).

Jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi sepenuhnya produk limbah organik yang sulit diuraikan oleh pengoksidasi kimiawi dikenal sebagai COD. Sering kali sengaja menggunakan kalium bikarbonat dengan katalis perak sulfat yang dipanaskan dalam lingkungan asam untuk mengurai bahan organik yang kompleks. Kalium bikromat atau sumber oksigen (*oxidizing agent*), akan mengoksidasi bahan limbah organik untuk menghasilkan gas CO_2 , H_2O , dan banyak ion krom. Jumlah kontaminan organik dalam air yang dapat dioksidasi secara organik oleh proses biologis dan menyebabkan kandungan oksigen dalam air menurun diukur dengan tingkat COD. Jumlah oksigen terlarut di dalam air akan berkurang ketika COD meningkat (Saputri et al., 2023). Kandungan COD yang ditetapkan oleh Peraturan Gubernur Jawa Timur Nomor 72 Tahun 2013 untuk air limbah industri pembekuan ikan adalah sebesar 200 mg/L.

2.2.5 Amonia Total ($\text{NH}_3\text{-N}$)

Amonia merupakan salah satu senyawa hasil proses penguraian bahan organik oleh aktivitas mikroorganisme, terutama bakteri pengurai. Pada lingkungan perairan, amonia tidak hanya muncul dalam satu bentuk kimia. Amonia yang terkandung dalam perairan hadir dalam bentuk amonia total ($\text{NH}_3\text{-N}$), yang terdiri atas amonia bebas (NH_3) dan ion amonium (NH_4^+). Kedua bentuk ini saling berinteraksi dan hadir dalam jumlah yang bervariasi, tergantung pada faktor-faktor lingkungan seperti pH, suhu, dan konsentrasi oksigen terlarut. Amonia bebas bersifat toksik bagi biota akuatik, termasuk ikan. Toksisitas ini meningkat pada kondisi pH yang tinggi dan suhu air yang hangat, karena kondisi tersebut menyebabkan keseimbangan kimia bergeser ke arah pembentukan NH_3 yang lebih banyak dibandingkan NH_4^+ . Di sisi lain, ion amonium tidak terlalu toksik karena sifatnya yang relatif stabil. Akan tetapi, beberapa proses biogeokimia yang berlangsung dalam air juga dapat mempengaruhinya. Bahan organik yang belum terurai, seperti sisa-sisa tumbuhan, hewan, dan feses, merupakan sumber utama amonia dalam air. Amonia juga terdapat dalam limbah domestik dan industri.

Senyawa ini selanjutnya diubah oleh bakteri perairan melalui proses nitrifikasi dan denitrifikasi, di mana amonia merupakan senyawa antara yang signifikan (Effendi, 2003). Kandungan amonia total ($\text{NH}_3\text{-N}$) yang ditetapkan oleh Peraturan Gubernur Jawa Timur Nomor 72 Tahun 2013 untuk air limbah industri pembekuan ikan adalah sebesar 10 mg/L.

2.2.6 Klor Bebas

Klorin (Cl_2) merupakan unsur yang sangat reaktif, berbentuk gas pada suhu kamar, berperan sebagai oksidator kuat, dan mudah berikatan dengan unsur lain untuk membentuk senyawa, seperti ion klorida (Cl^-) dan garam natrium klorida (NaCl). Dalam aplikasi industri dan domestik, klorin digunakan secara luas sebagai bahan pembersih, pemutih, dan disinfektan, terutama dalam bentuk gas (Cl_2), kalsium hipoklorit ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$), atau senyawa lainnya. Klorin sering ditambahkan ke dalam air sebagai disinfektan untuk membunuh mikroorganisme, namun penggunaannya harus dikontrol dengan hati-hati karena pada konsentrasi rendah klorin efektif untuk pemurnian air, sedangkan pada konsentrasi tinggi dapat menjadi zat berbahaya yang bersifat korosif dan toksik bagi organisme akuatik maupun manusia. Oleh karena itu, kadar klorin dalam limbah cair, khususnya limbah dari fasilitas pengolahan air atau industri yang menggunakan disinfektan berbasis klorin, perlu dipantau sebagai parameter kualitas lingkungan (Moorhouse, 2008). Kandungan klor bebas yang ditetapkan oleh Peraturan Gubernur Jawa Timur Nomor 72 Tahun 2013 untuk air limbah industri pembekuan ikan adalah sebesar 1 mg/L.

2.2.7 Minyak Lemak

Minyak lemak merupakan senyawa organik yang tergolong dalam kelompok lipid, terdiri dari trigliserida yang terbentuk melalui proses esterifikasi antara satu molekul gliserol dan tiga molekul asam lemak. Perbedaan antara minyak dan lemak terletak pada wujud fisiknya pada suhu kamar: minyak bersifat cair, sedangkan lemak bersifat padat. Minyak dan lemak adalah senyawa non-polar yang tidak larut dalam air tetapi larut dalam pelarut organik non-polar seperti eter, kloroform, dan benzena. Minyak memiliki berat jenis yang lebih rendah daripada air sehingga minyak akan mengapung di permukaan air dalam lapisan tipis. Situasi

ini dapat menurunkan kandungan oksigen terlarut dalam air karena menghalangi fiksasi oksigen bebas. Keseimbangan rantai makanan akan terganggu jika minyak menutupi permukaan air karena minyak juga akan menghalangi sinar matahari untuk menembus air. Selain itu, minyak dan lemak merupakan bahan organik yang tetap yang sulit diurai oleh bakteri (Harmawan, 2022). Ketebalan minyak yang diperlukan untuk membentuk sebuah lapisan tembus cahaya di permukaan badan air sekitar 0,0003048 mm (0,0000120 in) (Metcalf-Eddy, 2003). Kandungan minyak dan lemak yang ditetapkan oleh Peraturan Gubernur Jawa Timur Nomor 72 Tahun 2013 untuk air limbah industri pembekuan ikan adalah sebesar 15 mg/L.

2.3 Bangunan Pengolahan Air Buangan

Air limbah dengan berbagai macam kandungan parameter pencemar yang dihasilkan oleh industri pembekuan ikan harus dilakukan pengolahan terlebih dahulu pada Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) agar aman untuk dibuang ke badan air. Tujuan utama adanya pengolahan air limbah industri pembekuan ikan adalah untuk mengurangi kadar parameter pencemar yang telah melebihi batas baku mutu agar sesuai dengan baku mutu menurut Peraturan Gubernur Jawa Timur Nomor 72 Tahun 2013 tentang baku mutu air limbah industri *cold storage*.

Menurut Sugiharto (1987), proses pengolahan air limbah terbagi dalam empat tahapan serta satu tahapan lain, yaitu:

1. Pengolahan Pendahuluan (*Pre-Treatment*)

Langkah pertama dalam sistem pengolahan air limbah fisik adalah pengolahan awal air limbah atau *pre-treatment*. Tujuan utamanya adalah untuk menghilangkan benda-benda yang tidak diinginkan dan padatan besar untuk melindungi unit pengolahan selanjutnya dari bahaya. Reynolds (1996) menegaskan bahwa *pre-treatment* sangat penting untuk menjaga kelangsungan hidup dan efektivitas sistem pengolahan air limbah.

2. Pengolahan Pertama (*Primary Treatment*)

Primary treatment dalam pengolahan air limbah merupakan tahap awal yang melibatkan proses fisika dan kimia untuk memisahkan zat padat, baik organik maupun anorganik, serta minyak dan lemak dari cairan. Tujuan

utamanya adalah menghasilkan air yang lebih jernih, netral pH-nya, dan bebas logam berat. Dibandingkan sedimentasi alami, pengolahan primer lebih efektif dalam meningkatkan kejernihan air. Efektivitas ini meningkat dengan penambahan lumpur mentah dan lumpur reaktif dari sistem pengolahan air limbah, karena kandungan aluminium dan besi yang berperan sebagai koagulan, membantu penggumpalan partikel dan proses sedimentasi.

3. Pengolahan Kedua (*Secondary Treatment*)

Air limbah umumnya mengandung polutan organik melebihi baku mutu, sehingga memerlukan pengolahan biologis menggunakan mikroorganisme. Tujuan utamanya adalah mengoksidasi senyawa organik *biodegradable*, membentuk flok atau *biofilm* dari partikel tersuspensi, serta mengurangi unsur biologis seperti C, H, O, N, dan P. Proses ini bisa berlangsung secara aerobik atau anaerobik dengan efisiensi pengurangan BOD sebesar 60–90% dan TSS 40–90%. Mikroorganisme, terutama bakteri, berperan penting dalam mengubah materi organik menjadi produk akhir sederhana dan biomassa.

4. Pengolahan Ketiga (*Tertiary Treatment*)

Tertiary treatment dilakukan jika setelah tahap primer dan sekunder masih terdapat zat berbahaya dalam air limbah. Proses ini bersifat khusus dan disesuaikan dengan jenis kandungan limbah yang tersisa. Tujuannya adalah untuk menghilangkan bahan-bahan spesifik yang tidak dapat diatasi pada tahap sebelumnya, dengan menggunakan kombinasi proses fisika, kimia, dan biologi.

5. Pengolahan Lumpur (*Sludge Treatment*)

Hasil dari pengolahan air limbah berupa lumpur (*sludge*) memerlukan penanganan khusus agar tidak mencemari lingkungan dan dapat dimanfaatkan kembali. *Sludge* mengandung bahan organik yang menimbulkan bau dan hanya memiliki kandungan padatan rendah (0,25%–12%). Pengolahan lumpur bertujuan untuk mengurangi volumenya serta memanfaatkannya sebagai pupuk atau material penimbun lahan yang aman.

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 *mannig* (*n*) (Wesli, 2008).



Gambar 2.1 *Open Channel Flow*

Sumber: <https://www.asahidanke.co.jp/product/waterway/>



Gambar 2.2 *Pipe Flow*

Sumber: <https://www.membacivil.com/>

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

1. Kriteria Perencanaan

- a. *Freeboard* = 5 % - 30%
- b. Kecepatan Aliran (v) = 0.3 – 0.6 m/s
(Sumber: Metcalf & Eddy. 2003. *Waste Water Engineering Treatment & Reuse Fourth Edition*. Halaman 316)
- c. Koefisien Kekasaran Pipa = 0.002 – 0.012 sesuai dengan Tabel 2.1

Tabel 2.1 Koefisien Kekasaran Pipa

No	Jenis Saluran	Koefisien Kekasaran <i>Manning</i> (n)
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)	0,002 – 0,012
7	Pipa Tanah Liat (<i>Vitrified Clay</i>)	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. Rumus yang digunakan

- a. Luas Permukaan (A)

$$A = \frac{Q}{v}$$

keterangan:

A : luas permukaan saluran pembawa (m²)

Q : debit limbah (m³/s)

v : kecepatan alir dalam saluran pembawa (m/s)

b. Diameter Pipa (D)

$$A = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

keterangan:

A : luas permukaan (m²)

D : diameter pipa (m)

π : *phi* dengan besar 3,14

c. Jari – Jari Hidrolis (R)

$$R = \frac{\pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2}{\pi \times D}$$

keterangan:

R : jari – jari hidrolis (m)

D : diameter pipa (m)

π : *phi* dengan besar 3,14

d. *Headloss* saluran pembawa tertutup

$$H_f = \frac{10,76 \times Q^{1,85}}{C^{1,85} \times D^{2,6}} \times L$$

keterangan:

H_f : kehilangan tekanan pipa (m)

Q : debit (m³/s)

C : koefisien pipa

D : diameter pipa (m)

L : panjang pipa (m)

e. *Slope* pipa

$$S = \frac{H_f}{L}$$

keterangan:

S : kemiringan pipa (m/m)

H_f : kehilangan tekanan pipa (m)

L : panjang pipa (m)

2.3.2 *Screening*

Pada proses pengolahan air limbah, *screening* adalah unit operasi awal. Tujuan penyaringan ini adalah untuk menyingkirkan partikel kasar, seperti potongan kayu, kerikil, atau partikel yang berukuran besar lainnya. Komponen penyaringan terdiri dari batang yang dipasang paralel, sering dikenal sebagai “kisi-kisi” atau saringan kasar, yang digunakan untuk menyaring partikel kasar (Martini et al., 2020). Secara umum, *screen* dibagi menjadi beberapa tipe, antara lain:

1. *Fine Screen* (Saringan Halus)

Saringan halus, yang biasanya digunakan dalam proses pengolahan pendahuluan atau pengolahan utama, menyaring partikel dengan ukuran bukaan 2,3-6 mm. Saringan halus terdiri dari saringan tetap dan saringan bergerak. Saringan tetap, yang juga dikenal sebagai saringan statis, memerlukan pembersihan menggunakan garu, gigi, atau sikat karena dipasang secara permanen dalam posisi vertikal, miring, atau horizontal. Pembersihan pada saringan bergerak dilakukan secara terus-menerus selama pengoperasian (Qasim, 1985).

2. *Coarse Screen* (Saringan Kasar)

Coarse Screen memiliki ukuran 6–150 mm digunakan untuk pelindung pompa, katup, saluran pipa, dan peralatan lainnya dari penyumbatan dan kerusakan. Saringan kasar digunakan dalam pengolahan tahap pertama. Material yang digunakan untuk saringan kasar meliputi *bar racks* (saringan batang), anyaman kasar, dan kominutor (Qasim, 1985).

Selain itu, terdapat beberapa jenis pembersihan *screening*, yaitu pembersihan manual dan mekanik. Pembersihan manual dilakukan dengan menggunakan bantuan tenaga manusia dan pembersihan mekanik dilakukan dengan menggunakan bantuan mesin.



Gambar 2.3 Unit *Bar screen*

Sumber: <https://www.waterandwastewater.com/coarse-screening-in-wastewater-essential-techniques-for-efficient-management/>

Tabel 2.2 Kriteria Desain *Coarse Sreen*

Parameter	<i>U.S Customary Units</i>			<i>SI Units</i>		
	Metode Pembersihan			Metode Pembersihan		
	Unit	Manual	Mekanis	Unit	Manual	Mekanis
Ukuran batang						
Lebar	Inch	0,2-0,6	0,2-0,6	mm	5,0-15	5,0-15
Kedalaman	Inch	1,0-1,5	1,0-1,5	mm	25-38	25-38
Jarak antar batang	Inch	1,0-2,0	0,3-0,6	mm	25-50	15-75
Kemiringan terhadap vertikal	°	30-45	0-30	°	30-45	0-30
Parameter Lain						
Kecepatan Maksimum	Ft/s	1,0-2,0	2,0-3,25	m/s	0,3-0,6	0,6-1,0
Kecepatan Minimum	Ft/s		1,0-1,6	m/s		0,3-0,5
<i>Headloss</i>	In	6	6-24	m	150	150-600

Sumber: Metcalf and Eddy, 2004, Hal 316

Adapun rumus perhitungan yang digunakan pada unit *screening* adalah sebagai berikut:

a. Menghitung Bak Kontrol

- Volume Bak

$$V = Q \times T$$

keterangan:

V : Volume bak kontrol (m³)

Q : Debit air limbah (m³/s)

T : Waktu detensi (s)

- Dimensi Bak

$$V = L \times W \times H$$

keterangan:

V : Volume bak kontrol (m³)

L : Panjang bak kontrol (m)

W : Lebar bak kontrol (m)

H : Kedalaman bak kontrol (m)

- Kecepatan Air pada Bak Kontrol

$$v = \frac{Q}{W \times H}$$

keterangan:

v : Kecepatan bak kontrol (m/s)

Q : Debit air limbah (m³/s)

W : Lebar bak kontrol (m)

H : Kedalaman bak kontrol (m)

- H air dari Kedalaman Bak Kontrol

$$H \text{ bak kontrol/total} = h \text{ air} + \textit{freeboard}$$

keterangan:

H bak kontrol/total : Kedalaman bak kontrol yang direncanakan (m)

H air : Tinggi air yang melalui *Bar screen*

Freeboard : Ruang kosong untuk antisipasi luapan

b. Menghitung Dimensi *Bar screen*

- Panjang *Bar screen*

$$x = \frac{y}{\sin \theta}$$

keterangan:

x : Panjang kisi (m)

y : Kedalaman total saluran pembawa = tinggi *screen* (m)

$\sin \theta$: Kemiringan *screen*

- Jumlah Kisi dan Batang

$$W_s = (n \times d) + (n + 1) \times r$$

Jumlah batang = jumlah kisi (n) - 1

keterangan:

W_s : Lebar bak kontrol (m)

n : Jumlah kisi

d : Lebar antar kisi (m)

r : Jarak bukaan (m)

- Lebar Bukaan Kisi

$$W_c = W_s - (n \times d)$$

keterangan:

W_c : Lebar bukaan kisi (m)

W_s : Lebar bak control (m)

n : Jumlah kisi

d : lebar antar kisi (m)

c. Menghitung Kecepatan

- Kecepatan yang Melalui *Bar screen*

$$V_i = \frac{Q}{(W_c \times h_{\text{air}})}$$

- Kecepatan Aliran saat Pembersihan

$$V_c = \frac{Q}{(\% \text{ sumbatan} \times W_c \times h_{\text{air}})}$$

keterangan:

V_i : Kecepatan yang lewat *bar screen* (m/s)

V_c : Kecepatan aliran saat pembersihan (m/s)
 Q : Debit air limbah (m³/s)
 H air : Kedalaman air (m)

d. Menghitung *Headloss* Saat *Clogging* Pembersihan

- *Headloss* saat *non clogging*

$$H_f = \frac{1(V_i^2 - V^2)}{C(2g)}$$

- *Headloss* saat *clogging* pembersihan

$$H_f = \frac{1(V_i^2 - V^2)}{C_c(2g)}$$

keterangan:

H_f : Kehilangan tekanan pada *bar screen*

V_i : Kecepatan yang lewat *bar screen* (m/s)

V : Kecepatan awal aliran air (m/s)

C : Koefisien saat *non clogging*, yaitu 0,7

C_c : Koefisien saat *clogging*, yaitu 0,6

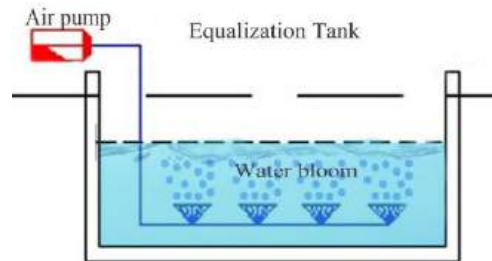
g : Percepatan gravitasi (m/s²)

2.3.3 Bak Ekualisasi

Bak ekualisasi merupakan salah satu unit dalam sistem pengolahan air limbah yang berfungsi untuk mengatur debit air limbah yang masuk ke unit-unit pengolahan berikutnya. Tujuan dari bak ekualisasi adalah menjaga kestabilan aliran air limbah dan menyeragamkan parameter pencemar air limbah, baik dari segi kuantitas dan kualitas, sehingga sistem pengolahan dapat beroperasi secara optimal. Selain sebagai penyeimbang aliran dan beban pencemar, bak ekualisasi juga dapat berperan sebagai bak aerasi awal saat terjadi perubahan yang mendadak dalam beban pencemar (*shock loading*) (Fathoni & Pudjowati, 2023).

Proses pencampuran selalu diterapkan dalam unit ekualisasi untuk menghindari terjadinya pengendapan zat padat di dasar bak. Selama berlangsungnya pencampuran dan aerasi, udara yang terlarut dalam air limbah turut berperan dalam mendukung proses pengolahan. Adapun beberapa metode yang umum digunakan dalam tahap pencampuran meliputi pengaturan aliran masuk dan

pemasangan sekat (*distribution of inlet flow and baffle*), pencampuran dengan turbin (*turbine mixing*), aerasi menggunakan udara tersebar (*diffused air aeration*), dan sistem aerasi mekanis (*mechanical aeration*) (Eckenfelder, 2000).



Gambar 2.4 Bak Ekualisasi

Sumber: https://www.researchgate.net/figure/Equalization-Tank-was-drawn-with-Adobe-photoshop_fig3_372824104

Adapun kriteria perencanaan dan rumus perhitungan yang digunakan pada unit ekualisasi adalah sebagai berikut:

1. Kriteria perencanaan

- a. Waktu detensi (td) = 1-4 jam
(Sumber: Tom D Reynold, *Unit Operation and Processes in Environmental Engineering, Second Edition, 1995, page 161*)
- b. Kecepatan aliran (v) = 0,3 – 0,6 m/s
(Sumber: Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering Treatment & Reuse, 4th Edition, pages 321*)
- c. Freeboard = 5 – 30 %
(Sumber: Chow, Ven Te. 1959. *Open Channel Hydraulics, page 159. New York, USA: Mc. Graw-Hill Book company, Inc*)
- d. Tebal dinding = 20 cm
(Sumber: Metcalf & Eddy.2004. *Wastewater Engineering Treatment & Reuse, Fourth Edition, page 316*)

2. Rumus yang digunakan

- a. Volume bak ekualisasi
 - Volume air limbah = Debit air limbah jam pertama x 1 jam
 - Volume kumulatif = Volume jam pertama +
Volume jam kedua

- Volume rata-rata $= \frac{Q \text{ total}}{24 \text{ jam}}$
- Volume rata-rata Kumulatif $= \text{Volume jam pertama} + \text{Volume jam kedua}$
- Selisih kumulatif & rata-rata kumulatif $= \text{Volume kumulatif jam pertama} - \text{Volume rata-rata kumulatif jam kedua}$

Garis singgung dibuat pada grafik yang sejajar dengan garis debit rata-rata. Volume bak ekualisasi ditentukan dari jarak vertikal antara garis singgung dan garis debit rata-rata.

- Volume bak ekualisasi $= \text{Selisih terbesar} - \text{selisih terkecil}$

b. Dimensi bak ekualisasi

$$\text{Luas} = \frac{\text{Volume}}{H \text{ air}}$$

c. Kedalaman total bak

$$H \text{ total} = H \text{ air} + \text{Freeboard}$$

d. Volume cek

$$\text{Volume cek} = L \times W \times H \text{ total}$$

2.3.4 Koagulasi

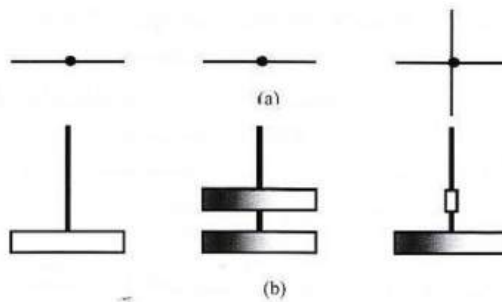
Koagulasi merupakan proses pengadukan secara cepat dengan penambahan bahan kimia yang disebut dengan koagulan. Koagulan berfungsi untuk menggabungkan partikel koloid dengan cara mendestabilisasi muatannya. Melalui proses koagulasi, kekeruhan dan warna yang disebabkan oleh bahan organik zat pengganggu dalam air limbah dapat dihilangkan. Koagulan terdiri dari berbagai macam jenis senyawa berbasis besi maupun alumunium. Tawas ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) dan *Poly Alumunium Chlorida* (PACl) merupakan koagulan populer berbahan dasar alumunium, sedangkan ferro sulfat (FeSO_4) serta campuran tawas dengan kapur atau abu soda merupakan senyawa umum berbahan dasar besi. Zat-zat koagulan ini akan terionisasi di dalam air limbah dan membentuk kation serta anion yang bervalensi tinggi yang berperan dalam proses penggumpalan partikel koloid sehingga akan mempermudah pengendapan partikel (Kusuma, 2021).

Faktor-faktor yang mempengaruhi keberhasilan proses koagulasi antara lain suhu, dosis koagulan, proses pengadukan, dan derajat keasaman (pH). Dosis

koagulan biasanya disesuaikan dengan kandungan koloid atau padatan tersuspensi dalam fluida; jika dosis yang digunakan telah sesuai, maka pembentukan inti flok akan berlangsung cepat dan efisien. Selain itu, pH larutan juga sangat berpengaruh terhadap efektivitas koagulasi, karena setiap jenis koagulan memiliki rentang pH kerja yang spesifik (Ekoputri et al., 2024).

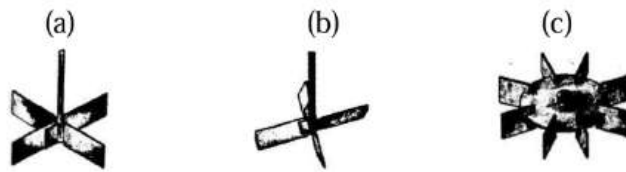
Pengadukan yang cepat adalah salah satu alasan proses destabilisasi. Untuk menyebarkan bahan kimia (koagulan) ke dalam air, pengadukan yang kuat digunakan untuk menciptakan turbulensi. Tergantung pada tujuan pengadukan, pengadukan cepat sering didefinisikan sebagai pengadukan dengan gradien kecepatan yang signifikan (300 hingga 1000/s) selama 5 hingga 60 detik. Pengadukan cepat dapat dilakukan melalui tiga cara, yaitu mekanis, hidraulis, dan pneumatis. Pengadukan mekanis menggunakan peralatan seperti motor listrik, poros, dan alat pengaduk. Pengadukan hidraulis memanfaatkan aliran air dan energi hidraulis seperti jatuhan atau lompatan air. Sementara itu, pengadukan pneumatis menggunakan udara dalam bentuk gelembung sebagai sumber tenaga pengadukan (Masduqi, 2016).

Pengadukan mekanis menggunakan motor listrik, poros (*shaft*), dan *impeller*. Terdapat tiga jenis *impeller* berdasarkan bentuknya: *paddle*, *turbine*, dan *propeller*. Dalam perancangannya, dua parameter penting yang diperhatikan adalah G (kecepatan gradien) dan t_d (waktu detensi). Perhitungan tenaga yang dibutuhkan juga mempertimbangkan jenis *impeller* serta nilai konstanta KL dan KT .



Gambar 2.5 Tipe *paddle* (a) Tampak Atas, (b) Tampak Samping

Sumber: Masquqi & Assomadi, 2012



Gambar 2.6 Tipe *Turbine* (a) *Turbine Blade Lurus*, (b) *Turbine Blade dengan Piringan*, (c) *Turbine dengan Blade Menyerang*

Sumber: Qasim et al., 2000



Gambar 2.7 Tipe *Propeller* (a) *Propeller 2 Blade*, (b) *Propeller 3 Blade*

Sumber: Qasim et al., 2000

Konstanta K_L dan K_T adalah parameter yang digunakan dalam perhitungan kebutuhan tenaga (*power*) pada sistem pengadukan mekanis. K_L (*Liquid Constant/Power Number for Liquid*) merupakan konstanta yang menunjukkan efisiensi transfer energi dari *impeller* ke cairan. K_T (*Torque Constant*) merupakan konstanta yang digunakan untuk menghitung torsi (momen puntir) yang dibutuhkan oleh *impeller* saat beroperasi.

Tabel 2.3 Nilai Konstanta K_L dan K_T

Jenis <i>Impeller</i>	K_L	K_T
<i>Propeller, pitch of 1, 3 blades</i>	41	0,32
<i>Propeller, pitch of 2, 3 blades</i>	43,5	1,00
<i>Turbine, 4 flat blades, vaned disc</i>	60,0	5,31
<i>Turbine, 6 flat blades, vaned disc</i>	65,0	5,75
<i>Turbine, 6 curved blades</i>	70,0	4,80
<i>Fan turbine, 4 blades at 45°</i>	70,0	1,65
<i>Shrouded turbine, 6 curved blades</i>	87,5	1,08
<i>Shrouded turbine, with stator, no baffles</i>	172,5	1,12
<i>Flat paddles, 2 blades (single paddle), $D_i/W_i = 4$</i>	43,0	2,25

Jenis <i>Impeller</i>	K_L	K_T
<i>Flat paddles, 2 blades, $D_i/W_i = 6$</i>	36,5	1,70
<i>Flat paddles, 2 blades, $D_i/W_i = 8$</i>	33,0	1,15
<i>Flat paddles, 4 blades, $D_i/W_i = 6$</i>	49,0	2,75
<i>Flat paddles, 6 blades, $D_i/W_i = 6$</i>	71,0	3,83

Sumber: Reynolds & Richards, 1996, halaman 188

Adapun kriteria perencanaan dan rumus perhitungan yang digunakan pada unit koagulasi adalah sebagai berikut:

1. Kriteria perencanaan

- Gradien kecepatan (G) = 700-1000/s
(Sumber: Reynolds, Tom D. dan Paul A. Richards. 2003. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse 4th edition, pages 182*)
- Lebar *impeller* = 1/6 – 1/10 diameter
- Tinggi bak (H) = 1 – 1,25 lebar bak
- Jarak *impeller* dari dasar = 30 – 50 % diameter *impeller*
(Sumber: Reynolds, Tom D. dan Paul A. Richards. 1996. *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering 2nd edition, pages 184. Boston: PWS Publishing Company*)
- Kecepatan turbin *impeller* = 400 – 1750 rpm
(Sumber: Reynolds, Tom D. dan Paul A. Richards. 1996. *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering 2nd edition, pages 187. Boston: PWS Publishing Company*)
- NRe = >10.000
- Massa jenis air (ρ), T (28°C) = 996,36 kg/m³
- Viskositas absolut (μ), T (28°C) = 0,8363 x 10⁻³ N.s/m²
(Sumber: Reynolds, Tom D. dan Paul A. Richards. 1996. *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering 2nd edition, pages 175-762. Boston: PWS Publishing Company*)

2. Rumus yang digunakan

- Volume bak koagulasi
 V bak koagulasi = Q air limbah x t_d

b. Volume koagulan

$$V \text{ koagulan} = Q \text{ koagulan} \times t_d$$

c. Volume total

$$V \text{ total} = V \text{ bak koagulasi} + V \text{ koagulan}$$

d. Kedalaman air

$$H \text{ air} = \frac{V}{\frac{1}{4}\pi D^2}$$

e. Daya pengadukan

$$P = G^2 \times \mu \times V$$

f. Jarak *impeller* dengan dasar

$$H_i = 50\% \times D_i$$

g. Lebar *impeller*

$$W_i = \frac{1}{8} \times D_i$$

h. Cek NRe

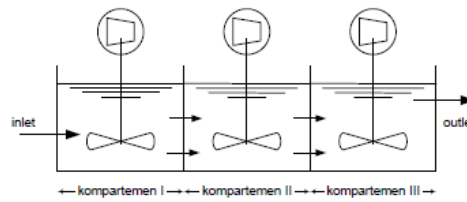
$$NRe = \frac{D_i^2 \times n \times \rho}{\mu}$$

2.3.5 Flokulasi

Flokulasi merupakan tahapan pembentukan mikroflok dari hasil koagulasi. Melalui proses pengendapan, partikel koloid yang tersisa dapat dipisahkan karena mereka akan saling berikatan membentuk flok yang lebih besar dan lebih berat. Flokulan adalah zat kimia yang biasanya ditambahkan untuk meningkatkan efisiensinya. Flokulan yang bersifat netral dapat memperkuat ikatan antar mikroflok dengan membentuk jembatan antar partikel, sehingga menghasilkan flok yang lebih besar dan stabil. Pengadukan yang lambat biasanya menciptakan flok yang kuat dan tidak terpengaruh oleh turbulensi (Kusniawati et al., 2023).

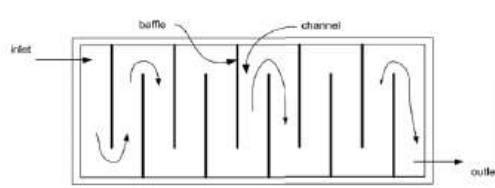
Pengadukan lambat dilakukan dengan gradien kecepatan rendah, yaitu antara 20 hingga 100/s, dan berlangsung selama 10 hingga 60 menit. Nilai GTd atau bilangan Camp pada proses ini berkisar antara 48.000 hingga 210.000. Selama proses berlangsung, gradien kecepatan dikurangi secara bertahap untuk memungkinkan flok yang sudah mulai terbentuk berkembang lebih besar, sehingga proses flokulasi dapat berjalan lebih efektif. Umumnya, pengadukan lambat dapat

berupa pengadukan mekanis dengan memakai *impeller* atau berupa pengadukan hidraulis dengan *baffle channel*.



Gambar 2.8 Pengadukan Lambat dengan *Impeller*

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



Gambar 2.9 Pengadukan Lambat dengan *Baffle Channel*

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

Adapun kriteria perencanaan dan rumus perhitungan yang digunakan pada unit flokulasi adalah sebagai berikut:

1. Kriteria perencanaan

- a. Waktu detensi (td) = 20 – 40 menit
(Sumber: Nusa Idaman Said, *Teknologi Pengolahan Air Limbah*, halaman 33)
- b. Gradien kecepatan (G) = 20 – 75/s
- c. Kedalaman bak (H) = 1 – 1,25 D/W
- d. Diameter *paddle* (Di) = 30 – 50% D/W
- e. Kecepatan putaran *paddle* (n) = 10 – 150 rpm
(Sumber: Reynolds, Tom D. dan Paul A. Richards. 2003. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse 4th edition*, pages 184)
- f. Lebar *paddle* (Wi) = 1/6 – 1/10 D/W
(Sumber: Reynolds, Tom D. dan Paul A. Richards. 2003. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse 4th edition*, pages 185)

2. Rumus yang digunakan

- a. Volume air limbah

$$V = Q \times t_d \text{ per bak}$$

- b. Kedalaman air

$$H_{\text{air}} = \frac{V}{\frac{1}{4}\pi D^2}$$

- c. Cek volume

$$\text{Cek volume} = \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \times H_{\text{air}}$$

- d. Cek waktu detensi

$$\text{Cek } t_d = \frac{\text{Cek volume}}{Q}$$

- e. Daya pengadukan

$$P = G^2 \times \mu \times V$$

- f. Diameter *paddle*

$$D_i = 30\% \times D$$

- g. Lebar *paddle*

$$W_i = \frac{1}{6} \times D_i$$

- h. Jarak *paddle* dari dasar bak

$$H_i = 50\% \times D_i$$

- i. Kecepatan putaran *paddle*

$$n = \left(\frac{P}{K_T \times \rho \times D^5} \right)^{\frac{1}{3}}$$

- j. Cek bilangan Reynold

$$NRe = \frac{D_i^2 \times n \times \rho}{\mu}$$

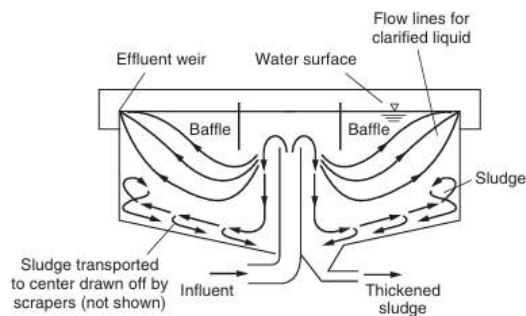
2.3.6 Sedimentasi

Sedimentasi adalah proses pemisahan antara partikel padat dan cairan, yang dilakukan dengan cara membiarkan partikel padat tersebut mengendap secara alami di dasar wadah akibat pengaruh gaya gravitasi. 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.

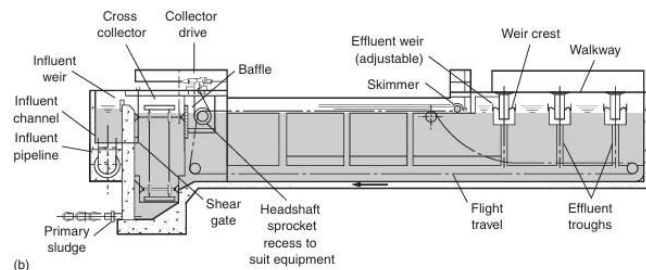
Salah satu contoh aplikasinya adalah dalam *primary settling tank* atau bak pengendap awal, di mana lumpur dan padatan berat lainnya akan mengendap di dasar tangki, sedangkan air bagian atas dialirkan untuk diproses lebih lanjut. Selain itu, sedimentasi juga membantu menurunkan kadar bahan pencemar seperti BOD (*Biochemical Oxygen Demand*) dan TSS (*Total Suspended Solids*), sehingga proses pengolahan lanjutan menjadi lebih efisien dan efektif. Terdapat tiga unit sedimentasi yang biasa digunakan dalam pengolahan air, antara lain:

- Horizontal flow* (aliran horizontal), umumnya dalam bentuk persegi panjang
- Radial flow* (aliran radial), yaitu bak sirkular dimana air mengalir dari tengah menuju pinggir
- Upward flow* (aliran ke atas), yaitu aliran dari bawah ke atas, biasanya dalam bak berbentuk kerucut yang menghadap ke atas.



Gambar 2.10 *Circular Sedimentation*

Sumber: Metcalf & Eddy, 2014



Gambar 2.11 *Rectangular Sedimentation*

Sumber: Metcalf & Eddy, 2014

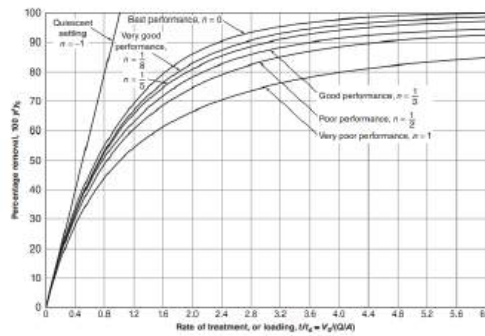
Pengendapan yang terjadi pada bak sedimentasi dibagi menjadi empat kelas. Pembagian ini didasarkan pada konsentrasi pada konsentrasi dari partikel dan kemampuan dari partikel tersebut untuk berinteraksi. Keempat kelas itu adalah:

1. Pengendapan tipe I (*free settling*) yang ditujukan untuk mengendapkan partikel diskrit.
2. Pengendapan tipe II (*flocculent settling*) yang ditujukan untuk mengendapkan partikel flokulen.
3. Pengendapan tipe III (*zone/hindered settling*) yang ditujukan untuk mengendapkan lumpur biologis.
4. Pengendapan tipe IV (*compression settling*) yang ditujukan untuk memampatkan partikel yang telah mengendap akibat dari berat partikel.

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/td 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 2.12 Grafik Good Performance

Sumber: Shamas, N. K., & Wang, L. K., 2015

Adapun kriteria perencanaan dan rumus perhitungan yang digunakan pada unit sedimentasi adalah sebagai berikut:

1. Kriteria Perencanaan

a. Inlet Zone

1. Kecepatan aliran (v) = 0,3 – 0,6 m/s
(Sumber: Metcalf & Eddy. 2003. *Wastewater Engineering Treatment & Reuse*, 4th Edition, page 316)
2. Slope pipa = 2 – 3%
(Sumber: Hakimhomint. 2017. *Standar Kemiringan Pipa Air Kotor*. <https://hakimhomint.wordpress.com/2017/10/23/standar-kemiringan-pipa/>)
3. Koefisien pipa PVC (C)= 130

b. Settling Zone (Zona Pengendap)

1. Kedalaman bak (H) = 3 – 4,9 m
2. Waktu tinggal (td) = 1,5 – 3 jam
3. Slope dasar = 1/16 – 1/6 m/m
4. Flight speed = 0,6 – 1,2 m/menit
5. Overflow rate
 - a. Ave = 30 – 50 m³/m².hari
 - b. Peak = 80 – 120 m³/m².hari

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

6. Massa jenis air (ρ), T (28°C) = 996,36 kg/m³
7. Viskositas kinematik (ν) = 0,8764 x 10⁻⁶ m²/s
8. Viskositas absolut (μ), T (28°C) = 0,8363 x 10⁻³ N.s/m²
(Sumber: Reynolds, Tom D. Dan Paul A. Richards. 1996. *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering*, 2nd edition, page 762 (Appendix C). Boston: PWS Publishing Company)
9. Specific gravity solid (Ss) = 1,4
10. Specific gravity sludge (Sg) = 1,02
(Sumber: Metcalf & Eddy, *Waste Water Engineering Treatment & Reuse*, 4th Edition, page 1456)
11. Bilangan Reynold (NRe) untuk Vs = <1 (aliran laminar)
12. Bilangan Reynold NRe untuk Vh = <2000 (aliran laminar)
13. Bilangan Froude (NFr) = >10⁵ (mencegah aliran pendek)
14. Vh < Vsc = Kec. horizontal < Kec penggerusan, agar partikel yang terendapkan tidak mengalami resuspensi
15. Kontrol penggerusan (*scouring*)
 $\beta = 0,02 - 0,12$
 $\alpha = 0,03$
(Sumber: Huisman, L., 1977. *Sedimentation and Flotation Mechanical Filtration*. Delft University of Technology. Delft. page 57)

c. Sludge Zone (Zona Lumpur)

1. Berat jenis air (ρ_w), T (28°C) = 996,36 kg/m³
(Sumber: Reynolds, Tom D. dan Paul A. Richards. 1996. *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering* 2nd edition, page 762 (Appendix C). Boston: PWS Publishing Company)
2. Berat jenis sludge (ρ_s) = 2650 kg/m³
3. Specific gravity solid (Ss) = 1,4
(Sumber: Metcalf & Eddy, *Waste Water Engineering Treatment & Reuse*, 4th Edition, page 1456)

d. Overflow Zone (Zona Pelimpah)

1. Koefisien drag (Cd) = 0,548

2. Sudut *V-Notch* $= 45^\circ$
(Sumber: Qasim, dkk., 2000, *Water Works Engineering Planning, Design, and Operation*)
3. *Weir loading rate* $= 125 - 500 \text{ m}^3/\text{m.hari}$
(Sumber: Metcalf & Eddy, *Waste Water Engineering Treatment & Reuse, 4th Edition, page 398*)

e. Outlet Zone

1. Kecepatan aliran (v) $= 0,3 - 0,6 \text{ m/s}$
(Sumber: Metcalf & Eddy. 2003. *Wastewater Engineering Treatment & Reuse, 4th Edition, page 316*)
2. Koefisien drag (Cd) $= 0,548$
3. Sudut *V-Notch* $= 45^\circ$
(Sumber: Qasim, dkk., 2000, *Water Works Engineering Planning, Design, and Operation*)

2. Rumus yang digunakan

a. Inlet Zone

1. *Slope* pipa
$$S = \frac{H_f}{L}$$
2. Jari-jari hidrolis
$$R = \frac{A}{\text{Keliling basah}}$$
3. Cek kecepatan
$$V_{cek} = \frac{Q}{A}$$

b. Settling Zone (Zona Pengendap)

1. Volume bak pengendap
$$V = Q \times t_d$$
2. Luas permukaan
$$A = \frac{V}{H}$$
3. Kedalaman total
$$H_{total} = H + \text{Freeboard}$$

4. Cek volume

$$\text{Cek volume} = L \times W \times H$$

5. Cek waktu detensi

$$\text{Cek td} = \frac{\text{Cek Volume}}{Q}$$

6. Cek *surface loading rate*

$$\text{SLR} = \frac{Q}{A}$$

7. Diameter partikel

$$D_p = \sqrt{\frac{V_s \times 18 \times v}{g (S_s - 1)}}$$

8. Jari-jari hidrolis

$$R = \frac{W \times H}{W + (2 \times H)}$$

9. Massa jenis *solid*

$$S_g = \frac{\rho_{\text{solid}}}{\rho_{\text{water}}}$$

10. Kecepatan *horizontal*

$$V_h = \frac{Q}{W \times H}$$

11. Cek bilangan Reynold

$$\text{NRe} = \frac{V_h \times R}{\nu}$$

12. Cek bilangan Froude

$$\text{NFr} = \frac{V_h}{\sqrt{g \times H}}$$

13. Kecepatan penggerusan

$$V_{sc} = \sqrt{\frac{8 \times \beta \times g \times (\rho_s - \rho_w) \times \text{NFr}}{\lambda \times \rho_w}}$$

14. Kemiringan dasar bak

$$S = 1\% \times L$$

15. Panjang miring *plate settler*

$$L_p = \frac{\text{Tinggi plate settler}}{\sin 60^\circ}$$

16. Panjang area *plate settler*

$$L_{ps} = \frac{1}{3} \times L$$

17. Jumlah *plate settler*

$$N_p = \frac{L_{ps} - S_{ps}}{S_{ps} - W_{ps}}$$

18. Kecepatan vertikal

$$V_v = \frac{Q}{S_{ps} \times H_{ps}}$$

c. Sludge Zone (Zona Lumpur)

1. Parameter yang tersisihkan

TSS yang tersisihkan = %*removal* x kadar TSS dalam air

2. Berat lumpur yang mengendap

$$W_s = Q \times \text{TSS yang disihkan}$$

3. Berat air

$$W_w = \frac{\text{Kadar air dalam lumpur}}{\text{Kadar padatan dalam lumpur}} \times W_s$$

4. Berat jenis *sludge*

$$\rho_s = (\text{berat jenis } S_s \times \text{Kadar SS kering dalam lumpur}) + (\rho_w \times \text{Kadar air dalam lumpur})$$

5. Volume lumpur

$$V_{\text{lumpur}} = \frac{\text{Berat lumpur } (W_s) + \text{berat air } (W_w)}{\text{Berat jenis lumpur } (\rho)} \times \text{waktu pengurasan}$$

6. Debit lumpur

$$Q_{\text{lumpur}} = \frac{V}{t_d}$$

7. Dimensi zona lumpur

Luas permukaan atas zona lumpur

$$A = L_1 \times W_1$$

Luas permukaan bawah zona lumpur

$$A' = L_2 \times W_2$$

Volume limas terpancung

$$V = \frac{1}{3} \times H \times (A + \sqrt{AA'} + A')$$

d. Overflow Zone (Zona Pelimpah)

1. Panjang total *weir*

$$L_w = \frac{Q}{WLR}$$

2. Panjang pelimpah

$$L = \frac{L_w}{\text{Jumlah pelimpah}}$$

3. Debit tiap pelimpah *weir*

$$Q_{weir} = \frac{Q}{\text{Jumlah pelimpah}}$$

4. Luas saluran *gutter*

$$A = \frac{Q_{weir}}{v}$$

5. Ketinggian air pada *gutter*

$$H_{air} = \left(\frac{Q_{weir}}{1,38 \times \text{lebar gutter}} \right)^{2/3}$$

6. Tinggi *gutter*

$$H_{gutter} = H_{air} + \text{Freeboard}$$

7. Jari-jari hidrolis *gutter*

$$R_{gutter} = \frac{H_{gutter} \times \text{lebar gutter}}{(2 \times H_{gutter}) + \text{lebar gutter}}$$

8. Luas basah *gutter*

$$A_{gutter} = \text{Lebar gutter} \times H_{gutter}$$

9. *Slope gutter*

$$S_{gutter} = \left(\frac{Q_{gutter} \times n}{A_{gutter} \times R_{gutter}^{2/3}} \right)^2$$

10. *Headloss* pada *gutter*

$$H_f_{gutter} = L_{gutter} \times S_{gutter}$$

11. Jumlah *V-Notch*

$$n = \frac{\text{Panjang total pelimpah}}{\text{Jarak antar } V \text{ Notch} + \text{lebar } V \text{ Notch}}$$

12. Debit yang mengalir di tiap *V-Notch*

$$Q_{V-Notch} = \frac{Q_{weir}}{\text{Jumlah } V \text{ Notch}}$$

13. Tinggi peluapan melalui *V-Notch*

$$Q = \frac{8}{15} (Cd) \sqrt{2 \times g} \times \tan \frac{\Theta}{2} \times H^{5/2}$$

e. Outlet Zone

1. Volume *outlet*

$$V = Q \times t_d$$

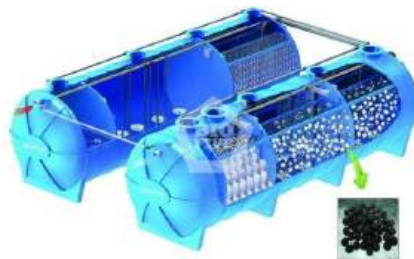
2. Jari-jari hidrolis

$$R = \frac{L \times H}{L + (2 \times H)}$$

2.3.7 Biofilter Anaerob

Biofilter anaerob adalah sistem pengolahan air limbah yang memanfaatkan mikroorganisme anaerob (tanpa oksigen) untuk menguraikan bahan organik dalam air limbah. Mikroorganisme memecah bahan organik melalui tahapan katabolisme, di mana senyawa organik itu sendiri berperan sebagai penerima elektron akhir, menggantikan fungsi oksigen dalam proses respirasi. Proses ini menghasilkan produk, antara lain metana (CH_4), karbon dioksida (CO_2), dan senyawa organik lainnya yang lebih sederhana. Penguraian secara anaerobik umumnya berlangsung lebih lambat dibandingkan proses aerobik, namun memiliki keunggulan dalam memproduksi energi dalam bentuk biogas yang dapat dimanfaatkan kembali sebagai sumber energi alternatif (Rittman dan McCarty, 2011).

Mikroorganisme tumbuh dan berkembang pada media tertentu, membentuk lapisan *biofilm* yang berperan dalam proses degradasi polutan. Media yang digunakan memiliki rongga yang dapat menyediakan permukaan bagi mikroorganisme untuk menempel dan berkembang. Pada beberapa kasus, biofilter anaerob dikombinasikan dengan proses aerobik untuk meningkatkan efisiensi pengolahan limbah.



Gambar 2.13 Biofilter Anaerob – Aerob

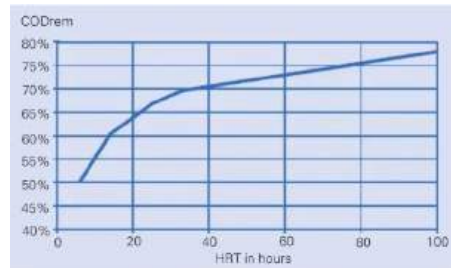
Sumber: <https://ipalbiofive.com/category/ipal-dengan-proses-biofilter-anaerob-aerob/>

Adapun kriteria perencanaan dan rumus perhitungan yang digunakan pada unit biofilter anaerob adalah sebagai berikut:

1. Kriteria perencanaan

- a. Waktu detensi (td) $= > 6$ jam

- b. *Organic loading rate* = $0,5 - 4 \text{ kgBOD/m}^3 \cdot \text{hari}$
- c. Beban BOD/satuan permukaan media (LA) = $5 - 30 \text{ gBOD/m}^2 \cdot \text{hari}$
- d. Tinggi ruang (bed) media pembiakkan mikroba = $0,9 - 1,5 \text{ m}$
(Sumber: Said, N.I., *Teknologi Pengolahan Air Limbah Teori dan Aplikasi*. Halaman 302. Jakarta: Erlangga)
- e. Hubungan HRT dan penyisihan COD



Gambar 2.14 Hubungan HRT dan Penyisihan COD

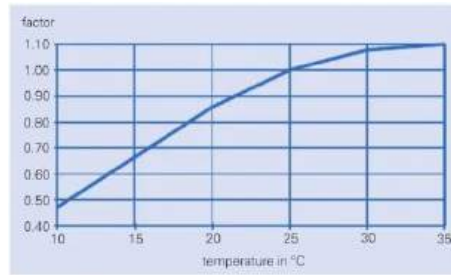
Sumber: Sasse, L. 2009

Kurva pada Gambar 2.14 dapat dimodelkan dengan beberapa persamaan:

- $\text{HRT} < 12 \text{ jam}$
 $\text{CODrem} = \text{HRT} \times 0,16 / 12 + 0,44$
- $\text{HRT} < 24 \text{ jam}$
 $\text{CODrem} = (\text{HRT} - 12) \times 0,07 / 12 + 0,6$
- $\text{HRT} < 33 \text{ jam}$
 $\text{CODrem} = (\text{HRT} - 24) \times 0,03 / 9 + 0,67$
- $\text{HRT} < 100 \text{ jam}$
 $\text{CODrem} = (\text{HRT} - 33) \times 0,09 / 67 + 0,7$
- $\text{HRT} \geq 100 \text{ jam}$
 $\text{CODrem} = 0,78$

(Sumber: Sasse, L. 2009. *Decentralised Wastewater Treatment System (DEWATS) and Sanitation in Developing Countries*. London: Water, Engineering and Development Centre (WEDC), page 255)

f. Hubungan suhu dan penyisihan COD



Gambar 2.15 Hubungan Suhu dan Penyisihan COD

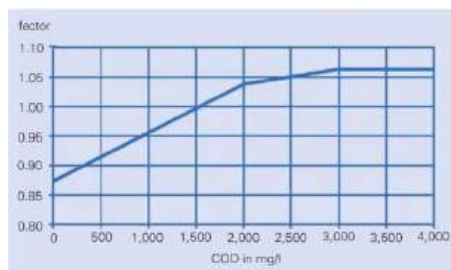
Sumber: Sasse, L. 2009

Kurva pada Gambar 2.15 dapat dimodelkan dengan beberapa persamaan:

- $Temp < 20^{\circ}C$
 $Factor = (temp - 10) \times 0,39 / 20 + 0,47$
- $Temp < 25^{\circ}C$
 $Factor = (temp - 20) \times 0,14 / 5 + 0,86$
- $Temp < 30^{\circ}C$
 $Factor = (temp - 25) \times 0,08 / 5 + 1$
- $Temp \geq 30^{\circ}C$
 $Factor = 1,10$

(Sumber: Sasse, L. 2009. *Decentralised Wastewater Treatment System (DEWATS) and Sanitation in Developing Countries*. London: Water, Engineering and Development Centre (WEDC), page 255)

g. Hubungan konsentrasi COD masuk dengan penyisihan COD



Gambar 2.16 Hubungan Konsentrasi COD Masuk dengan Penyisihan COD

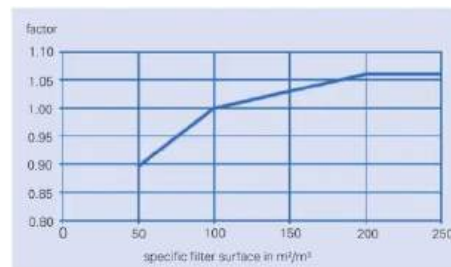
Sumber: Sasse, L. 2009

Kurva pada Gambar 2.16 dapat dimodelkan dengan beberapa persamaan:

- $COD_{in} < 2.000 \text{ mg/L}$
 $Factor = COD_{in} \times 0,17 / 2.000 + 0,87$
- $COD_{in} < 3.000 \text{ mg/L}$
 $Factor = (COD_{in} - 2.000) \times 0,02 / 1.000 + 1,04$
- $COD_{in} \geq 3.000 \text{ mg/L}$
 $Factor = 1,06$

(Sumber: Sasse, L. 2009. *Decentralised Wastewater Treatment System (DEWATS) and Sanitation in Developing Countries*. London: Water, Engineering and Development Centre (WEDC), page 236)

h. Hubungan luas permukaan spesifik media dengan penyisihan COD



Gambar 2.17 Hubungan Luas Permukaan Spesifik Media dengan Penyisihan COD

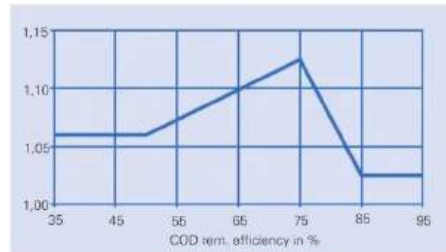
Sumber: Sasse, L. 2009

Kurva pada Gambar 2.17 dapat dimodelkan dengan beberapa persamaan:

- $Surface < 100 \text{ m}^2/\text{m}^3$
 $Factor = (Surface - 50) \times 0,1 / 50 + 0,9$
- $Surface < 200 \text{ m}^2/\text{m}^3$
 $Factor = (Surface - 100) \times 0,06 / 100 + 1$
- $Surface \geq 200 \text{ m}^2/\text{m}^3$
 $Factor = 1,06$

(Sumber: Sasse, L. 2009. *Decentralised Wastewater Treatment System (DEWATS) and Sanitation in Developing Countries*. London: Water, Engineering and Development Centre (WEDC), page 256)

- i. Rasio efisiensi penyisihan BOD terhadap penyisihan COD



Gambar 2.18 Rasio Efisiensi Penyisihan BOD Terhadap Penyisihan COD

Sumber: Sasse, L. 2009

Kurva pada Gambar 2.18 dapat dimodelkan dengan beberapa persamaan:

- $COD_{rem} < 0,5$
 $Factor = 1,06$
- $COD_{rem} < 0,75$
 $Factor = (COD_{rem} - 0,5) \times 0,065 / 0,25 + 1,06$
- $COD_{rem} < 0,85$
 $Factor = 1,125 - (COD_{rem} - 0,75) \times 0,1 / 0,1$
- $COD_{rem} \geq 0,85$
 $Factor = 1,025$

(Sumber: Sasse, L. 2009. *Decentralised Wastewater Treatment System (DEWATS) and Sanitation in Developing Countries*. London: Water, Engineering and Development Centre (WEDC), page 256)

- j. $S_g = 1,03$

(Sumber: Metcalf & Eddy, *Waste Water Engineering Treatment & Reuse*, 4th Edition, page 1456)

- k. Massa jenis air (ρ), T (28°C) = 996,36 kg/m³

(Sumber: Reynolds, Tom D. Dan Paul A. Richards. 1996. *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering*, 2nd edition, page 762 (Appendix C). Boston: PWS Publishing Company)

- l. *Synthesis yield in anaerob* (Y) = 0,06 gVSS/gCOD

- m. %solid = 5%

- n. COD/mol metana = 64 gO₂/mol

- o. Konstanta gas (R) = 0,082057 atm/L/mol.K
- p. Mol gas (n) = 1 mol
- q. Tekanan gas (P) = 1 atm

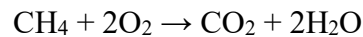
2. Rumus yang digunakan

a. Produksi lumpur

1. Massa COD_{VSS} = 1,42 x Y x Massa COD tersisihkan
2. Massa COD_{TSS} = $\frac{\text{Massa COD}_{VSS}}{0,85}$
3. Q lumpur = $\frac{\text{Massa COD}_{TSS}}{S_g \times \rho_w \times \%solid}$

b. Produksi biogas

COD metana adalah jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi metana (CH₄) menjadi karbon dioksida (CO₂) dan air (H₂O).



1. Massa COD_{metana} = Massa COD tersisihkan – Massa COD_{VSS}
2. Volume gas (V_{gas}) = $\frac{n \times R \times T}{P}$
3. Produksi gas metana (CH₄) = $\frac{V_{gas} \times 64 \text{ gCOD/molCH}_4}{\text{COD metana}}$

c. Dimensi bak anaerob

1. Volume bak
V = Debit x waktu detensi
2. Panjang bak
 $L = \frac{V}{\frac{W \times H}{n}}$
3. Tinggi bak
H total = H + *Freeboard*
4. Cek volume
Cek volume = L x W x H
5. Cek waktu detensi
Cek td = $\frac{\text{Cek volume}}{Q}$

d. Dimensi media

1. Tinggi media

$$H \text{ media} = \frac{L \times W \times H}{\left(\frac{100\%}{\text{proporsi media}}\right) \times L \text{ media} \times W \text{ media}}$$

2. Jarak di bawah media

$$H \text{ bawah media} = H - H \text{ atas media} - H \text{ media} - \text{Tebal plat Penyangga}$$

3. Cek proporsi media

$$\text{Cek proporsi media} = \frac{\text{Volume media}}{\text{Volume bak}}$$

e. Kecepatan upflow

$$V_{up} = \frac{Q_{peak}}{L \times W \times P_m}$$

f. Cek *organic loading rate*

$$OLR = \frac{\text{Massa BOD in}}{H \text{ media} \times L \times W \times n \times P_m}$$

g. Cek BOD *loading*

$$\text{BOD loading} = \frac{OLR}{\text{Luas spesifik media}}$$

2.3.8 Biofilter Aerob

Biofilter aerob adalah sistem pengolahan air limbah yang memanfaatkan mikroorganisme aerob (membutuhkan oksigen) untuk menguraikan bahan organik dalam air limbah. Mikroorganisme ini tumbuh dan berkembang pada media filter (batu, plastik, arang, atau bahan berpori lainnya) dan membentuk lapisan *biofilm* yang berperan dalam proses degradasi polutan. Biofilter aerob perlu suplai oksigen yang dapat berasal dari blower atau aerator, agar mikroorganisme dapat menjalankan proses biodegradasi secara efisien. Menurut Said 2017, terdapat beberapa aspek penting dalam pengolahan aerobik, yaitu:

1. Jenis media

Media harus memiliki sifat yang kuat, tahan terhadap tekanan, tidak mudah mengalami perubahan, dan memiliki luas permukaan yang tinggi.

2. Ukuran media

Diameter media berkisar antara 2,5 hingga 3,0 cm. Semakin luas permukaan media, semakin banyak mikroorganisme yang dapat tumbuh dan berkembang.

3. Ketebalan media

Ketebalan lapisan media minimal 1 meter dan maksimal 3 – 4 meter. Ketebalan dapat berpengaruh pada pertumbuhan mikroorganisme.

4. pH

Kondisi ideal berada dalam kisaran pH 4 hingga 9,5, dengan nilai optimum antara 6,5 sampai 7,5 agar proses biologis berlangsung secara optimal.

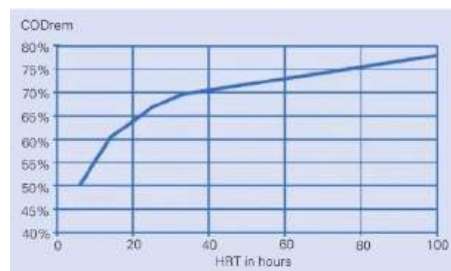
5. Suhu

Suhu optimal untuk pertumbuhan mikroorganisme berada dalam rentang 25 hingga 37°C. Selain itu, suhu juga dapat memengaruhi kecepatan reaksi.

Adapun kriteria perencanaan dan rumus perhitungan yang digunakan pada unit biofilter aerob adalah sebagai berikut:

1. Kriteria perencanaan

- a. Waktu detensi (td) $= > 6$ jam
- b. *Organic loading rate* $= 0,5 - 4$ kgBOD/m³.hari
- c. Beban BOD/satuan permukaan media (LA) $= 5 - 30$ gBOD/m².hari
- d. Tinggi ruang (bed) media pembiakan mikroba $= 0,9 - 1,5$ m
(Sumber: Said, N.I., *Teknologi Pengolahan Air Limbah Teori dan Aplikasi*. Halaman 302. Jakarta: Erlangga)
- e. Hubungan HRT dan penyisihan COD



Gambar 2.19 Hubungan HRT dan Penyisihan COD

Sumber: Sasse, L. 2009

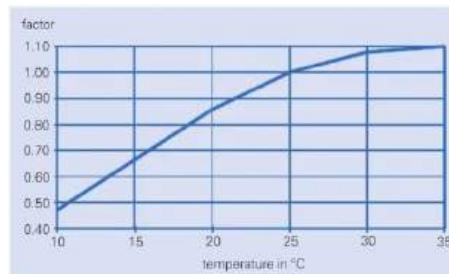
Kurva pada Gambar 2.19 dapat dimodelkan dengan beberapa persamaan:

- $HRT < 12$ jam
$$CODrem = HRT \times 0,16 / 12 + 0,44$$
- $HRT < 24$ jam
$$CODrem = (HRT - 12) \times 0,07 / 12 + 0,6$$

- $HRT < 33 \text{ jam}$
 $COD_{rem} = (HRT - 24) \times 0,03 / 9 + 0,67$
- $HRT < 100 \text{ jam}$
 $COD_{rem} = (HRT - 33) \times 0,09 / 67 + 0,7$
- $HRT \geq 100 \text{ jam}$
 $COD_{rem} = 0,78$

(Sumber: Sasse, L. 2009. *Decentralised Wastewater Treatment System (DEWATS) and Sanitation in Developing Countries*. London: Water, Engineering and Development Centre (WEDC), page 255)

f. Hubungan suhu dan penyisihan COD



Gambar 2.20 Hubungan Suhu dan Penyisihan COD

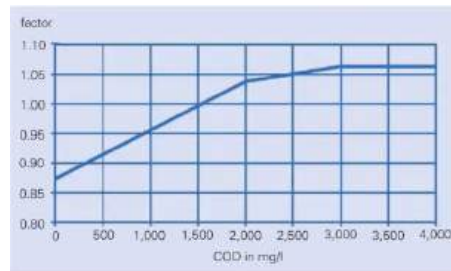
Sumber: Sasse, L. 2009

Kurva pada Gambar 2.20 dapat dimodelkan dengan beberapa persamaan:

- $Temp < 20^{\circ}C$
 $Factor = (temp - 10) \times 0,39 / 20 + 0,47$
- $Temp < 25^{\circ}C$
 $Factor = (temp - 20) \times 0,14 / 5 + 0,86$
- $Temp < 30^{\circ}C$
 $Factor = (temp - 25) \times 0,08 / 5 + 1$
- $Temp \geq 30^{\circ}C$
 $Factor = 1,10$

(Sumber: Sasse, L. 2009. *Decentralised Wastewater Treatment System (DEWATS) and Sanitation in Developing Countries*. London: Water, Engineering and Development Centre (WEDC), page 255)

g. Hubungan konsentrasi COD masuk dengan penyisihan COD



Gambar 2.21 Hubungan Konsentrasi COD Masuk dengan Penyisihan COD

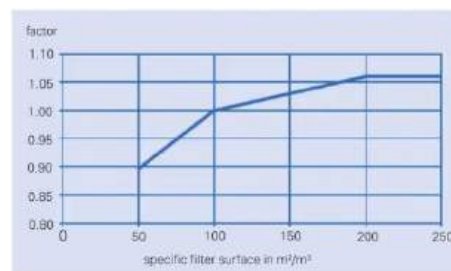
Sumber: Sasse, L. 2009

Kurva pada Gambar 2.21 dapat dimodelkan dengan beberapa persamaan:

- $COD_{in} < 2.000 \text{ mg/L}$
 $Factor = COD_{in} \times 0,17 / 2.000 + 0,87$
- $COD_{in} < 3.000 \text{ mg/L}$
 $Factor = (COD_{in} - 2.000) \times 0,02 / 1.000 + 1,04$
- $COD_{in} \geq 3.000 \text{ mg/L}$
 $Factor = 1,06$

(Sumber: Sasse, L. 2009. *Decentralised Wastewater Treatment System (DEWATS) and Sanitation in Developing Countries*. London: Water, Engineering and Development Centre (WEDC), page 236)

h. Hubungan luas permukaan spesifik media dengan penyisihan COD



Gambar 2.22 Hubungan Luas Permukaan Spesifik Media dengan Penyisihan COD

Sumber: Sasse, L. 2009

Kurva pada Gambar 2.22 dapat dimodelkan dengan beberapa persamaan:

- $Surface < 100 \text{ m}^2/\text{m}^3$

$$Factor = (Surface - 50) \times 0,1 / 50 + 0,9$$

- $Surface < 200 \text{ m}^2/\text{m}^3$

$$Factor = (Surface - 100) \times 0,06 / 100 + 1$$

- $Surface \geq 200 \text{ m}^2/\text{m}^3$

$$Factor = 1,06$$

(Sumber: Sasse, L. 2009. *Decentralised Wastewater Treatment System (DEWATS) and Sanitation in Developing Countries*. London: Water, Engineering and Development Centre (WEDC), page 256)

- Rasio efisiensi penyisihan BOD terhadap penyisihan COD



Gambar 2.23 Rasio Efisiensi Penyisihan BOD Terhadap Penyisihan COD

Sumber: Sasse, L. 2009

Kurva pada Gambar 2.23 dapat dimodelkan dengan beberapa persamaan:

- $CODrem < 0,5$

$$Factor = 1,06$$

- $CODrem < 0,75$

$$Factor = (CODrem - 0,5) \times 0,065 / 0,25 + 1,06$$

- $CODrem < 0,85$

$$Factor = 1,125 - (CODrem - 0,75) \times 0,1 / 0,1$$

- $CODrem \geq 0,85$

$$Factor = 1,025$$

(Sumber: Sasse, L. 2009. *Decentralised Wastewater Treatment System (DEWATS) and Sanitation in Developing Countries*. London: Water, Engineering and Development Centre (WEDC), page 256)

- j. Penyisihan $\text{NH}_3\text{-N}$ = 90 – 95%
(Sumber: Said, N.I., Teknologi Pengolahan Air Limbah Teori dan Aplikasi. Halaman 302. Jakarta: Erlangga)
- k. S_g = 1,03
(Sumber: Metcalf & Eddy, Waste Water Engineering Treatment & Reuse, 4th Edition, page 1456)
- l. Massa jenis air (ρ), T (28°C) = 996,36 kg/m³
(Sumber: Reynolds, Tom D. Dan Paul A. Richards. 1996. Unit Operations and Processes in Environmental Engineering, 2nd edition, page 762 (Appendix C). Boston:PWS Publishing Company)
- m. Synthesis yield in anaerob (Y) = 0,06 gVSS/gCOD
- n. %solid = 5%
- o. Endogenous decay coefficient (b) = 0,15 gVSS/gVSS.hari
- p. Fraction of biomass as cell debris (fd) = 0,15 gVSS/gVSS.hari
- q. VSS/TSS = 0,85
- r. Sludge Retention Time (SRT) = 7 hari
- s. Massa jenis O_2 = 1,1725 kg/m³
- t. Jumlah O_2 dalam udara = 20,95%

2. Rumus yang digunakan

a. Produksi lumpur

1. Observed yield coefficient

$$Y_{\text{obs}} = \frac{Y}{1 + b(\text{SRT})} + \frac{(fd)(b)(Y)(\text{SRT})}{1 + b(\text{SRT})}$$

2. $P_{x \text{ VSS}}$ = $Y_{\text{obs}} \times Q_{\text{inlet}} \times (\text{COD}_{\text{inlet}} - \text{COD}_{\text{outlet}})$

3. $P_{x \text{ TSS}} = \frac{P_{x \text{ VSS}}}{\text{VSS/TSS}}$

4. $\text{MLVSS } (X_{\text{VSS}}) = \frac{P_{x \text{ VSS}} \times \text{SRT}}{\text{Volume bak}}$

5. $\text{MLSS } (X) = \frac{\text{MLVSS}}{\text{VSS/TSS}}$

6. Rasio F/M = $\frac{Q_{\text{in}} \times (\text{COD}_{\text{in}} - \text{COD}_{\text{out}})}{\text{Volume bak} \times \text{MLSS}}$

7. $Q_{\text{lumpur}} = \frac{P_{x \text{ TSS}}}{S_g \times \rho_w \times \% \text{solid}}$

b. Dimensi bak aerob

1. Debit rata-rata

$$Q_{peak} = \frac{Q}{\text{Waktu pengaliran}}$$

2. Volume bak

$$V = \text{Debit} \times \text{waktu detensi}$$

3. Panjang bak

$$L = \frac{V}{\frac{W \times H}{n}}$$

4. Tinggi bak

$$H_{total} = H + \text{Freeboard}$$

5. Cek volume

$$\text{Cek volume} = L \times W \times H$$

6. Cek waktu detensi

$$\text{Cek td} = \frac{\text{Cek volume}}{Q}$$

c. Dimensi media

1. Tinggi media

$$H_{media} = \frac{L \times W \times H}{\left(\frac{100\%}{\text{proporsi media}}\right) \times L_{media} \times W_{media}}$$

2. Jarak di bawah media

$$H_{bawah media} = H - H_{atas media} - H_{media} - \text{Tebal plat Penyangga}$$

3. Cek proporsi media

$$\text{Cek proporsi media} = \frac{\text{Volume media}}{\text{Volume bak}}$$

d. Kecepatan *upflow*

$$V_{up} = \frac{Q_{peak}}{L \times W \times P_m}$$

e. Cek *organic loading rate*

$$OLR = \frac{\text{Massa BOD in}}{H_{media} \times L \times W \times n \times P_m}$$

f. Cek BOD *loading*

$$\text{BOD loading} = \frac{OLR}{\text{Luas spesifik media}}$$

g. Kebutuhan udara

1. Kebutuhan udara teoritis

$$\text{Kebutuhan udara teoritis} = \text{Beban total} \times \text{safety factor}$$

2. Kebutuhan udara

$$\text{Kebutuhan udara} = \frac{\text{Kebutuhan udara teoritis}}{\text{Massa jenis O}_2 \times \text{Jumlah O}_2 \text{ dalam udara}}$$

3. Kebutuhan udara sebenarnya

$$\text{Kebutuhan udara sebenarnya} = \frac{\text{Kebutuhan udara}}{\text{Efisiensi diffuser}}$$

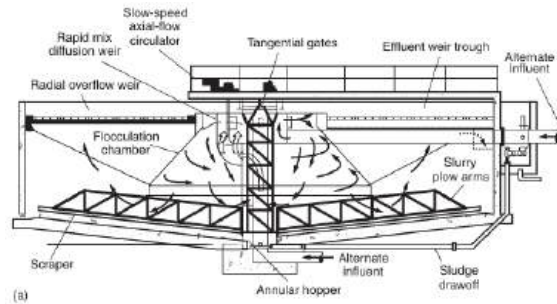
h. Daya blower

$$P = \frac{w \times R \times T1}{550 \times n \times e} \times \left[\left(\frac{P2}{P1} \right)^n - 1 \right]$$

2.3.9 Clarifier

Clarifier adalah sebuah sistem pengolahan air yang berfungsi memisahkan partikel padat yang tersuspensi dalam cairan melalui mekanisme pengendapan secara gravitasi. *Secondary clarifier* (bak pengendap 2) berfungsi untuk memisahkan lumpur aktif dari *Mixed-Liquor Suspended Solids* (MLSS). Dalam clarifier, partikel-partikel padat secara perlahan mengendap ke dasar bak akibat gaya gravitasi, sementara air yang sudah terpisah dari padatan tersebut keluar dari unit dengan kualitas yang lebih baik. Pengoperasian yang optimal juga dapat memaksimalkan proses sedimentasi, mempercepat pemisahan partikel, dan mengurangi beban pencemar pada tahap pengolahan air selanjutnya.

Pada tahap terakhir, air hasil pengolahan sebelumnya akan memasuki proses pengendapan lanjutan yang bertujuan untuk mengurangi kadar padatan tersuspensi. Air yang telah melalui tahap ini dan tertampung di dalam *secondary clarifier* dapat dimanfaatkan lebih lanjut, misalnya untuk penyiraman tanaman dan keperluan lain yang sesuai. Berbeda dengan *preliminary clarifier* yang kinerjanya bergantung pada kecepatan pengendapan, *secondary clarifier* lebih dipengaruhi oleh kedalaman tangki. Salah satu tantangan dalam proses ini adalah pengaturan waktu detensi (lama waktu air berada dalam tangki). Jika waktu detensi terlalu lama, ada risiko flok yang telah terbentuk akan pecah kembali, sehingga menurunkan efisiensi pengendapan (Metcalf & Eddy, 2004).



Gambar 2.24 Clarifier

Sumber: Metcalf & Eddy, 2014

Adapun kriteria perencanaan dan rumus perhitungan yang digunakan pada unit clarifier adalah sebagai berikut:

1. Kriteria perencanaan

a. *Settling Zone* (Zona Pengendap)

1. Bentuk bak sedimentasi akhir = *circular*
2. Diameter bak (D) = 3 – 60 m
3. Kedalaman bak (H) = 3 – 6 m
4. Waktu tinggal (td) = 1,5 – 2,5 jam
5. *Slope* dasar = 1/16 – 1/6 m/m
6. *Flight speed* = 0,02 – 0,05 m/menit
7. *Overflow rate*
 - a. *Ave* = 30 – 50 m³/m².hari
 - b. *Peak* = 80 – 120 m³/m².hari

(Sumber: Metcalf & Eddy, *Waste Water Engineering Treatment & Reuse, 4th Edition, page 401*)

8. Diameter *inlet well* = 15 – 20% diameter bak
9. Ketinggian *inlet well* = 0,5 – 0,7 m
10. Kecepatan *inlet well* = 0,3 – 0,75 m/s

(Sumber: Metcalf & Eddy, *Waste Water Engineering Treatment & Reuse, 4th Edition, page 401*)

11. Massa jenis air (ρ), T (28°C) = 996,36 kg/m³
12. Viskositas kinematik (ν) = 0,8764 x 10⁻⁶ m²/s
13. Viskositas absolut (μ), T (28°C) = 0,8363 x 10⁻³ N.s/m²

(Sumber: Reynolds, Tom D. Dan Paul A. Richards. 1996. *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering*, 2nd edition, page 762 (Appendix C). Boston: PWS Publishing Company)

14. *Specific gravity solid (Ss)* = 1,25

15. *Specific gravity sludge (Sg)* = 1,005

(Sumber: Metcalf & Eddy, *Waste Water Engineering Treatment & Reuse*, 4th Edition, page 1456)

16. Bilangan Reynold (NRe) untuk Vs = <1 (aliran laminar)

17. Bilangan Reynold NRe) untuk Vh = <2000 (aliran laminar)

18. Bilangan Froude (NFr) = >10⁵ (mencegah aliran pendek)

19. Vh < Vsc = Kec. horizontal < Kec penggerusan, agar partikel yang terendapkan tidak mengalami resuspensi

20. MLVSS (xv) = 1500 – 3500 mg/L

21. MLSS (x) = 2000 – 4000 mg/L

(Sumber: Metcalf & Eddy, *Waste Water Engineering Treatment & Reuse*, 4th Edition, page 874)

b. Inlet Zone

1. Diameter *inlet well* = 15 – 20% diameter bak

2. Ketinggian *inlet well* = 0,5 – 0,7 m

3. Kecepatan *inlet well* = 0,3 – 0,75 m/s

(Sumber: Metcalf & Eddy, *Waste Water Engineering Treatment & Reuse*, 4th Edition, page 401)

c. Thickening Zone

1. MLVSS (xv) = 1500 – 3500 mg/L

2. MLSS (x) = 2000 – 4000 mg/L

(Sumber: Metcalf & Eddy, *Waste Water Engineering Treatment & Reuse*, 4th Edition, page 874)

d. Sludge Zone

1. Massa jenis *sludge* (ps) = 2650 kg/m³

2. Massa jenis air (p), T (28°C) = 996,36 kg/m³

(Sumber: Reynolds, Tom D. Dan Paul A. Richards. 1996. Unit Operations and Processes in Environmental Engineering, 2nd edition, page 762 (Appendix C). Boston:PWS Publishing Company)

3. Specific gravity solid (Ss) = 1,25
4. Specific gravity sludge (Sg) = 1,005

(Sumber: Metcalf & Eddy, Waste Water Engineering Treatment & Reuse, 4th Edition, page 1456)

e. Outlet Zone

1. Koefisien drag (Cd) = 0,548
2. Sudut V-Notch = 45°

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

3. Weir loading rate = 125 – 500 m³/m.hari

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

2. Rumus yang digunakan

a. Settling Zone

1. Volume bak pengendap

$$V = Q \times t_d$$

2. Luas surface area

$$A = \frac{V}{\text{Overflow rate}}$$

3. Diameter bak

$$D = \sqrt{\frac{4 \times A}{\pi}}$$

4. Diameter inlet well

$$D' = 20\% \times D$$

5. Kedalaman zona pengendap

$$H = \frac{V}{A}$$

6. Cek surface area

$$\text{Cek } A = \frac{1}{4} \times \pi \times D^2$$

7. Cek volume

$$\text{Cek Volume} = \pi \times r^2 \times H$$

8. Cek *overflow rate*

$$\text{Cek OFR} = \frac{Q}{\text{Cek A}}$$

9. Cek waktu detensi

$$\text{Cek td} = \frac{\text{Cek A} \times H}{Q}$$

10. *Slope* dasar bak

$$S = \text{Persen } slope \times r$$

11. Kecepatan pengendapan partikel

$$V_s = \frac{H}{\text{Cek td}}$$

12. Diameter partikel

$$D_p = \sqrt{\frac{V_s \times 18 \times v}{g (S_s - 1)}}$$

13. Cek NRe

$$\text{NRe} = \frac{\rho_s \times D_p \times V_s}{\mu}$$

14. Kecepatan horizontal

$$V_h = \frac{Q}{\pi \times D \times h}$$

15. Jari-jari hidrolis

$$R = \frac{\text{Cek A}}{\pi \times D \times H}$$

16. Cek bilangan NRe

$$\text{NRe} = \frac{V_h \times R}{\nu}$$

17. Cek bilangan Froude

$$\text{NFr} = \frac{V_h}{\sqrt{g \times H}}$$

18. Cek kecepatan penggerusan

$$V_{sc} = \sqrt{\frac{8 \times K \times g \times (S_s - 1) \times D_p}{f}}$$

b. Inlet Zone

1. Diameter *inlet well*

$$D' = 20\% \times D$$

c. Thickening Zone

1. MLVSS dalam clarifier

$$\text{MLVSS clarifier} = \text{MLVSS total} - \text{MLVSS unit sebelumnya}$$

2. Massa *solid* total

$$M_{\text{solid total}} = \text{MLVSS clarifier} \times \text{Volume clarifier}$$

3. Kedalaman zona *thickening*

$$H_{\text{thickening}} = \frac{M_{\text{solid total}}}{\text{Konsentrasi MLSS} \times A}$$

d. Sludge Zone

1. Produksi lumpur per hari

- a. *Removal TSS*

$$\text{TSS tersisihkan} = \text{TSSin} - (\text{TSSin} \times (100\% - \% \text{removal TSS}))$$

- b. Berat *solid*

$$\text{Berat solid} = (\text{TSS tersisihkan} \times Q) + \text{MLVSS}_{(X_{\text{vss}})}$$

- c. Berat air

$$\text{Berat air} = \frac{\text{Kadar air dalam lumpur}}{\text{Kadar padatan dalam lumpur}} \times \text{berat solid}$$

- d. Berat jenis *solid*

$$\text{Berat jenis solid} = S_s \times p_w$$

- e. Volume *solid*

$$\text{Volume solid} = \frac{\text{Berat solid}}{\text{Berat jenis solid}}$$

- f. Volume air

$$\text{Volume air} = \frac{\text{Berat air}}{\text{Berat jenis air}}$$

- g. Volume *sludge*

$$\text{Volume sludge} = \text{Volume solid} + \text{volume air}$$

- h. Berat *sludge*

$$\text{Berat sludge} = \text{Volume sludge} \times \text{berat jenis sludge}$$

i. Debit *sludge*

$$Q_{sludge} = \frac{\text{Berat } sludge}{\text{Berat jenis } sludge}$$

2. Total produksi lumpur per periode pengurasan

a. Total lumpur dari TSS yang tersisihkan

$$\text{Total lumpur TSS} = \text{Volume } sludge \times \text{periode pengurasan}$$

b. Total lumpur yang terkumpul

$$T_L = P_x \text{ vss} \times \text{periode pengurasan}$$

c. Total berat lumpur dalam bak

$$T_{MS} = T_L + M_{solid} \text{ total}$$

d. Volume lumpur di bak

$$\text{Volume lumpur} = \frac{T_{MS}}{\rho_s}$$

e. Volume air

$$\text{Volume air} = 95\% \times \text{Vol lumpur}$$

f. Berat air

$$\text{Berat air} = \text{Vol air} \times \rho_w$$

g. Volume *solid*

$$\text{Volume } solid = 5\% \times \text{Vol lumpur}$$

h. Berat *solid*

$$\text{Berat } solid = \text{Vol } solid \times \rho_s$$

i. Volume *sludge*

$$\text{Volume } sludge = \text{Vol air} + \text{vol } solid$$

j. Volume total lumpur di bak

$$\text{Volume total } sludge = \text{Volume total TSS} + \text{Volume } sludge$$

3. Dimensi ruang lumpur

$$V = \frac{1}{3} \times \pi \times H \times (R^2 + r^2 + Rr)$$

e. **Outlet Zone**

1. Panjang keliling *weir*

$$L = \pi \times D$$

2. Jumlah *V-Notch*

$$N = \frac{L}{\text{Jarak antar } V \text{ Notch}}$$

3. Debit *V-Notch*

$$Q_{\text{weir}} = \frac{Q}{n}$$

4. Tinggi pelimpah melalui *V-Notch*

$$Q = \frac{8}{15} (Cd) \sqrt{2 \times g} \times \tan \frac{\theta}{2} \times H^{5/2}$$

5. Luas permukaan saluran pelimpah

$$A = \frac{Q}{v}$$

2.3.10 Sludge Drying Bed

Sludge Drying Bed (SDB) adalah tangki pasir dangkal yang berada di bawah saluran pembuangan. Tergantung pada luas permukaan dan porositasnya, lapisan ini dapat menyaring lumpur dan air agar terpisah. Volume pori-pori dalam media filter meningkat dengan persentase porositas. Desain bak SDB harus memungkinkan pelepasan dan pengeringan air secara terus menerus untuk mencegah keadaan meluap dengan sinar matahari (Mulyanto et al., 2023). Pengurangan kandungan air dalam lumpur menggunakan sistem pengering alami dengan matahari, maka air akan berkurang melalui saringan dan proses penguapan. Kelebihan bak pengering lumpur adalah sistem operasi yang mudah dan sederhana serta biaya operasional rendah. Kelemahan bak pengering lumpur adalah membutuhkan lahan yang cukup luas dan sangat bergantung dengan cuaca. Waktu pengeringan paling cepat 5 hari dengan bantuan sinar matahari (PUPR, 2018).



Gambar 2.25 Sludge Drying Bed

Sumber: <https://www.pjlenviro.com/id>

Adapun kriteria perencanaan dan rumus perhitungan yang digunakan pada unit Sludge Drying Bed adalah sebagai berikut:

1. Kriteria Perencanaan

- a. Waktu pengeringan = 5 – 6 hari (20 cm)
= 7 – 9 hari (30 cm)
= 9 – 10 hari (40 cm)

(Sumber: Ummah & Herumurti. 2018. *Pengeringan Lumpur Ipal Biologis Pada Unit Sludge Drying Bed*)

- b. Tebal *sludge cake* = 20 – 30 cm
- c. Tebal pasir = 23 – 30 cm
- d. Lebar = 3 – 9 m
- e. Panjang = 6 – 30 m
- f. *Slope* = 1%
- g. Berat air dalam *cake* (Pi) = 60 – 70%
- h. Kadar air = 60 – 80%
- i. Kadar *solid* = 20 – 40%
- j. *Sludge loading rate* = 120 – 150 kg/*solid* kering/m².tahun

(Sumber: Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering Treatment & Reuse, Fourth Edition, pages 1570-1572*)

2. Rumus yang digunakan

- a. Total volume lumpur setiap pengurasan
V bak = Volume lumpur semua unit
- b. Tebal media
Tebal media = Tebal pasir + tebal kerikil + tebal *sludge cake*
- c. Volume lumpur tiap *bed*
$$V_{bed} = \frac{V_{bak}}{\text{Jumlah bak}}$$
- d. Volume *sludge cake*
$$V_i = \frac{V_{bed} \times (1 - P)}{1 - P_i}$$
- e. Volume Sludge Drying Bed tiap *bed*
V = V_i x waktu pengeringan

f. Dimensi Sludge Drying Bed

$$A = \frac{V}{\text{Tebal cake}}$$

g. Volume air

$$V_a = \frac{V_{\text{sludge total}} - V_i}{\text{Jumlah bak}}$$

h. Kedalaman *underdrain*

$$H_{\text{underdrain}} = \frac{V_a}{A_{\text{bed}}}$$

i. Kedalaman air

$$H_{\text{air}} = H_{\text{underdrain}} + \text{tebal media}$$

j. Kedalaman total

$$H_{\text{total}} = H_{\text{air}} + \text{Freeboard}$$

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 2.4**.

Tabel 2.4 Persen Removal Tiap Unit

Unit	Parameter Pencemar	% Removal	Sumber
Sedimentasi	TSS	50 – 70%	<i>Metcalf & Eddy. 2003. Wastewater Engineering Treatment & Reuse, 5th Edition, page 382</i>
Biofilter Anaerob	BOD	85,66%	<i>Sasse, L. 2009. Decentralised Wastewater Treatment System</i>

Unit	Parameter Pencemar	% Removal	Sumber
	COD	78,81%	<i>(DEWATS) and Sanitation in Developing Countries. London: Water, Engineering and Development Centre (WEDC), pages 236- 256</i>
	TSS	40%	
Biofilter Aerob	BOD	63,62%	<i>Sasse, L. 2009. Decentralised Wastewater Treatment System (DEWATS) and Sanitation in Developing Countries. London: Water, Engineering and Development Centre (WEDC), pages 236- 256</i>
	COD	58,76%	
	TSS	40%	
	NH ₃ -N	90 – 95%	<i>Said, N.I., 2017. Teknologi Pengolahan Air Limbah Teori dan Aplikasi. Halaman 302. Jakarta: Erlangga</i>
Clarifier	TSS	60 – 80%	<i>Huisman, L. 1977. Sedimentation and Flotation Mechanical Filtration. Page 12</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:

1. 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

2. 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

3. 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:

- a. Menentukan terlebih dahulu tinggi muka air dari bangunan pengolahan paling akhir dalam sistem.
- b. Menambahkan kehilangan tekanan antara unit tersebut dengan unit sebelumnya, dimulai dari *clear well*.
- c. Dengan demikian, diperoleh tinggi muka air dari bangunan yang berada sebelum *clear well*, dan proses ini dilanjutkan secara berurutan hingga bangunan pertama setelah *intake*.
- d. 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.

2.6 BoQ dan RAB

2.6.1 *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.

2.6.2 Rencana 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).