

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Industri Susu

Susu merupakan komoditas subsektor peternakan yang terus mengalami kenaikan setiap tahunnya. Seperti pada tahun 2022 dan 2023 produksi susu di Indonesia mengalami peningkatan dari 824.273,20 ton menjadi 837.223,20 ton (BPS, 2023).

Berikut merupakan proses pembuatan susu cair pada industri susu:

a. Tahap Penerimaan Susu Segar *Fresh Milk*

Susu segar yang baru diterima segera diambil sampel untuk diuji di laboratorium. Ini termasuk melakukan uji alkohol dan memeriksa suhunya tidak lebih dari 4°C dengan standar pH sekitar 6,60-6,80. Jika suhunya lebih tinggi, susu tidak dapat diterima. Susu yang telah lolos uji akan dikirim dan ditampung dalam tangki penyimpanan yang dapat menampung 100 ton susu. Uji susu segar akan ditambahkan vitamin B1, B6, dan B12, vitamin A, D, E, dan K, serta *flavour* atau perasa.

b. Tahapan Pencampuran *Mixing*

Ruang formulasi di ruang produksi digunakan untuk menghitung komposisi. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa penghitungan komposisi atau acuan yang digunakan sesuai dengan standar yang telah ditetapkan, seperti jumlah lemak, protein, dan total solid (TS) dalam produk susu Indomilk. Pengadukan berlangsung selama sekitar 10-15 menit.

c. Tahapan Pasteurisasi

Tahap pertama pemasakan adalah proses pasteurisasi. Ini dimulai dengan mengalirkan susu dari tangkiimbangan ke *plate heat exchanger* (PHE) atau ke mesin *homogenizer* 6000. Ini dilakukan dengan tekanan 2900 Psi dan 600 Psi selama 1 (satu) jam untuk 5000, dengan suhu 85–90°C. Tujuan dari proses ini adalah untuk mengurangi jumlah mikroba awal yang ada pada susu.

d. Tahapan Pengisian atau *Filling*

Proses ini dilakukan di ruang penampungan dengan mesin otomatis yang mengisi SCI ke dalam botol plastik dengan takaran 190 mililiter dan kemudian ditutup dengan kertas aluminium. *Aging* dilakukan di tangki penyimpanan sebelum *filling*. Setelah proses *filling*, petugas laboratorium mengambil sampel secara acak untuk pengujian volume dan *leaking*. Pengujian volume dilakukan dengan menimbang untuk mengetahui berat produk dalam kemasan. *Aging* dilakukan selama 45 menit untuk produk SCI *Choco* dan 30 menit untuk produk SCI *Non Choco*.

e. Tahapan Sterilisasi

Sterilisasi adalah langkah penting dalam proses produksi susu cair steril karena keberhasilan proses menentukan keamanan produk dari segi mikroba. Sterilisasi dilakukan pada 121-125°C selama 10 menit. Sterilisasi ini dilakukan untuk membunuh pembusuk dan mikroba patogen SCI, terutama *coliform*. Agar SCI mudah dimasukkan dan dikeluarkan setelah proses sterilisasi, SCI yang dimasukkan ke dalam *autoclave* harus ditata dahulu ke dalam keranjang melalui mesin *loader*.

f. Tahapan Pelabelan atau *labeling*

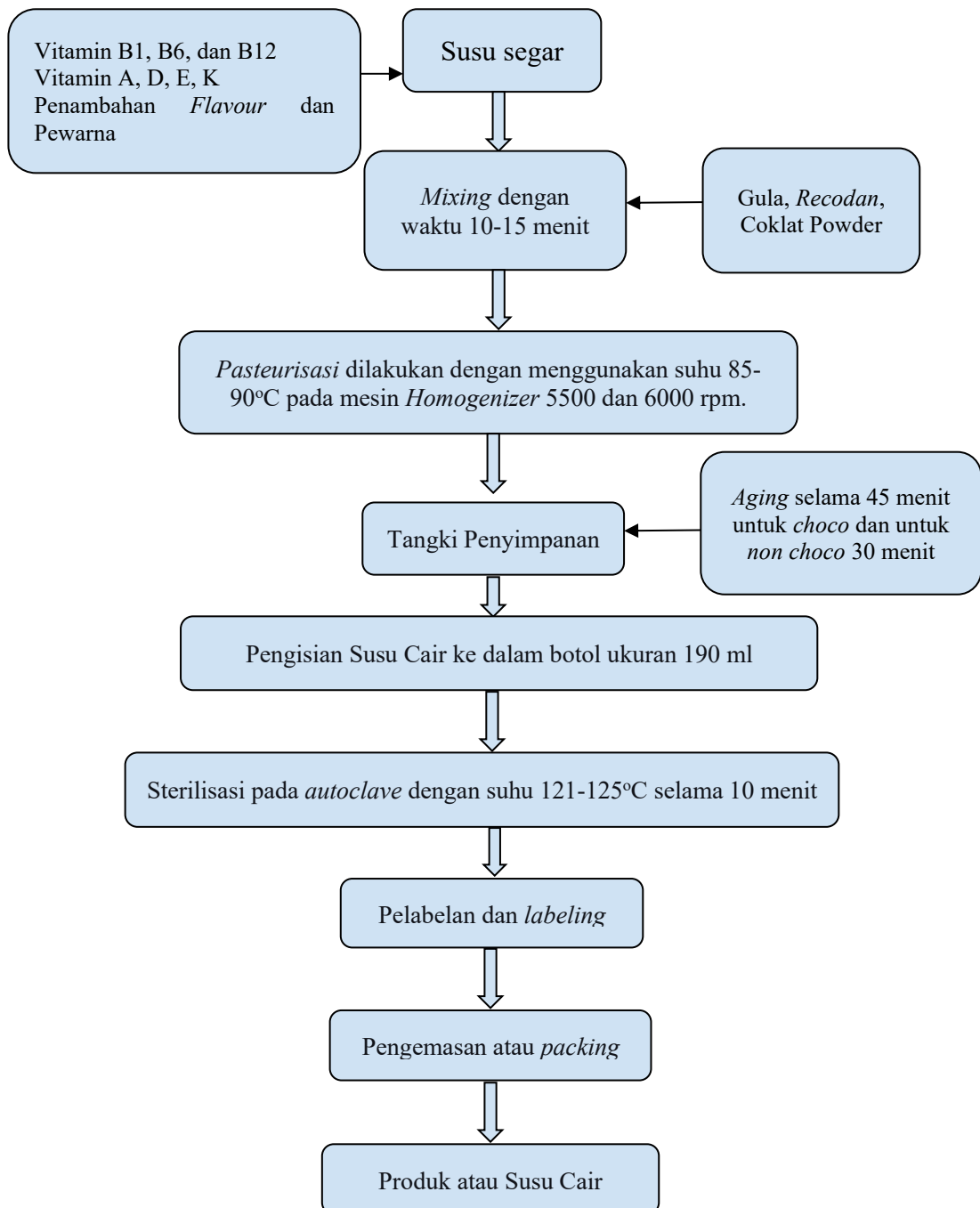
Label diberikan setelah proses sterilisasi. Setelah dibersihkan, produk masuk ke dalam mesin *unloader*, yang kemudian diangkut oleh *conveyor* untuk memulai proses pelabelan. Setelah keluar dari mesin label, botol masuk ke dalam mesin pemanas atau *Hanrong* dengan suhu 260°C, dan kemudian masuk ke dalam mesin coding. Mesin ini akan menunjukkan tanggal kode produksi, tanggal kadaluarsa, dan waktu produksi di pabrik cabang. Proses ini dapat melacak keluhan konsumen atau pasar tentang produk yang bermasalah dan mengidentifikasi kesalahan produk dengan kode yang diterima keluhan tersebut.

g. Tahapan Pengemasan atau *packing*

Proses mengirimkan produk ke pelanggan dikenal sebagai pengemasan. Setelah produk diberi label, mereka dimasukkan ke dalam karton. Setelah produk dimasukkan ke dalam *belt conveyor* dari proses pemberian kode, mereka masuk ke mesin *packer* yang memiliki 24 botol dan kemudian dimasukkan ke dalam karton.

Di mesin *coding* karton, kode yang diberikan pada karton akan identik dengan kode yang diberikan pada botol. Sebelum didistribusikan kepada pelanggan, sortir dilakukan untuk memastikan bahwa produk memenuhi persyaratan.

2.1.1 Proses Produksi Industri Susu



Gambar 2.1 Diagram Alir Pembuatan Susu Cair
(Sumber : Tahiyah, 2017)

2.2 Limbah Cair Industri Susu

Sebagian besar sumber utama limbah cair yang dihasilkan berasal dari produk susu yang terbuang selama proses produksi, biasanya disebabkan oleh kebocoran dan tumpahan selama proses produksi berlangsung, seperti sistem operasional kurang baik yang terjadi pada saat pemindahan pipa saluran produksi, mesin evaporasi, proses pengisian dan sisa bahan baku yang rusak (Tahiyyah, 2017).

2.3 Karakteristik Limbah Cair Industri Industri Susu

Karakteristik limbah cair industri susu tidak jauh berbeda dengan karakteristik limbah industri pangan pada umumnya, hanya saja limbah cair industri susu mempunyai ciri khas yaitu kerentanannya terhadap bakteri pengurai sehingga mudah mengalami pembusukan (Tahiyyah, 2017).

Berdasarkan Peraturan Gubernur Jawa Timur No. 72 Tahun 2013 tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Industri dan/atau Kegiatan Usaha Lainnya memiliki 4 parameter, yaitu BOD, COD, TSS, dan pH. Berdasarkan kondisi tersebut, perlu adanya pengolahan air limbah agar sesuai dengan baku mutu dan air limbah aman untuk dikembalikan ke badan air.

2.3.1 BOD (*Biological Oxygen Demand*)

Biological Oxygen Demand (BOD) merupakan jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk menguraikan komponen organik oleh bakteri aerob melalui proses biologis degradasi aerobik (oksidasi biologis). BOD adalah analisis empiris yang mencoba mendekati secara global proses-proses mikrobiologis yang benar-benar terjadi di dalam air. Angka BOD menguraikan (mengoksidasi) hampir semua senyawa organik yang terlarut dan sebagian tersuspensi di dalam air (Alaerts dan Santika, 1987).

Parameter BOD dapat ditemukan karena limbah cair industri susu mengandung unsur organik dari proses penerimaan susu dan pencampuran *mixing*. Kandungan BOD pada air buangan industri susu PT Indolakto sebesar 592,9 mg/L, sedangkan nilai baku mutu untuk kandungan BOD pada air buangan industri susu yang diperbolehkan untuk dibuang ke lingkungan atau badan air yaitu sebesar 30 mg/L (Peraturan Gubernur Jawa Timur Tahun, 2013).

2.3.2 COD (*Chemical Oxygen Demand*)

COD merupakan sejumlah oksigen yang dibutuhkan agar dapat mengoksidasi zat-zat anorganik dan organik sebagaimana pada BOD. COD adalah ukuran untuk pencemaran air oleh zat anorganik. Pengukuran kekuatan limbah dengan COD adalah bentuk lain pengukuran kebutuhan oksigen dalam limbah. Pengukuran ini menekankan kebutuhan oksigen akan kimia dimana senyawa-senyawa yang diukur adalah bahan-bahan yang tidak dipecah secara biokimia (Sugiharto 1987).

Parameter COD dapat ditemukan karena limbah cair industri susu mengandung bahan kimia berupa vitamin, lemak dan protein pada proses penerimaan susu segar dan pencampuran *mixing*. Kandungan COD pada air buangan industri susu di PT Indolacto sebesar 2379,33 mg/L, sedangkan baku mutu untuk kandungan COD pada air buangan industri susu yang diperbolehkan dibuang ke badan air atau lingkungan yaitu sebesar 90 mg/L (Peraturan Gubernur Jawa Timur, 2013).

2.3.3 TSS (*Total Suspended Solid*)

Padatan tersuspensi yang terdapat pada parameter TSS merupakan senyawa bentuk padat yang berada dalam kondisi tersuspensi dalam air. Padatan tersebut kemungkinan berasal dari mineral-mineral misalnya pasir yang sangat halus, silt, lempung, atau berasal dari zat organik asam sulfat yang merupakan hasil penguraian jasad tumbuh-tumbuhan atau binatang yang telah mati. Di samping itu, padatan tersuspensi ini dapat berasal dari mikroorganisme misalnya plankton, bakteri, alga, virus, dan lain-lainnya. Semua elemen-elemen tersebut umumnya menyebabkan kekeruhan atau warna dalam air (Nusa Idaman Said, 2017).

Parameter TSS dapat ditemukan karena limbah cair industri susu mengandung partikel padatan atau Total Solid (TS) dari proses pencampuran *mixing*. Kandungan TSS pada air buangan industri susu ini adalah 394,8 mg/L, sedangkan baku mutu yang mengatur besar kandungan TSS yang diperbolehkan dibuang ke lingkungan adalah sebesar 25 mg/L (Peraturan Gubernur Jawa Timur Tahun, 2013).

2.3.4 Derajat Keasaman (pH)

pH atau derajat keasaman digunakan sebagai salah satu ukuran tingkat asam atau basa suatu larutan. Mikroorganisme dalam pengolahan limbah dapat hidup optimal pada tingkat keasaman (pH) yang netral yaitu berkisar antara 6 hingga 9. Limbah dengan tingkat keasaman (pH) yang tinggi sulit diolah secara biologis sehingga perlu diolah terlebih dahulu melalui unit pengolahan tertentu (Metcalf & Eddy et al., 2007).

Parameter pH dapat ditemukan pada limbah cair industri susu ini karena pada proses penerimaan susu segar dilakukan pengujian di laboratorium dengan standar pH sekitar 6,60-6,80 apabila melebihi tersebut maka susu tidak dapat diterima pada proses ini. Kandungan pH air buangan industri susu ini sebesar 6,92 dengan baku mutu pH yang diizinkan adalah 6-9 yang berarti pH air buangan industri susu ini bersifat netral dan memenuhi baku mutu yang ada (Peraturan Gubernur Jawa Timur Tahun, 2013)

2.4 Bangunan Pengolahan Air Buangan

Menurut Sugiharto (1987), pengolahan air limbah harus dikelola dengan baik terlepas dari jenis limbahnya. Bangunan pengolahan air buangan dibagi menjadi beberapa kelompok tingkat pengolahan, yang digambarkan sebagai berikut:

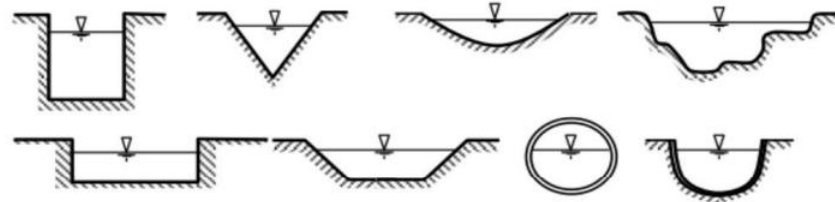
- a. Pengolahan pendahuluan (*Pre-treatment*)
- b. Pengolahan pertama (*Primary-treatment*)
- c. Pengolahan kedua (*Secondary-treatment*)
- d. Pengolahan lumpur (*Sludge-treatment*)

2.4.1 Pengolahan Pendahuluan (*Pre-Treatment*)

Proses pengolahan awal secara fisik yang dikenal sebagai proses *pre-treatment* melibatkan penghapusan sampah terapung berukuran besar dan sedang untuk mempercepat proses pengolahan berikutnya. Pengolahan ini dilakukan untuk memisahkan kerikil dan zat padat. Selain itu, berfungsi sebagai pengangkut air limbah dari fasilitas produksi industri ke bangunan pengolahan limbah. Unit pengolahan *pre-treatment* sebagai berikut:

A. Saluran Pembawa

Saluran pembawa merupakan saluran yang mengalirkan air dari bangunan ke bangunan pengolahan limbah yang lain. Dinding beton biasanya digunakan untuk saluran pendukung ini. Saluran pembawa ini terbagi menjadi dua yaitu saluran terbuka dan saluran tertutup. Saluran ini dapat mengalirkan air dengan memperhatikan perbedaan ketinggian atau elevasi antara bangunan. Saluran terbuka (*open channel flow*) merupakan sistem saluran yang permukaan airnya terpengaruh dengan udara luar (*atmosfer*). Saluran terbuka membutuhkan kemiringan atau *slope* (m/m). Saluran terbuka dapat berbentuk trapesium, segi empat, segitiga, setengah lingkaran atau kombinasi dari bentuk-bentuk tersebut.

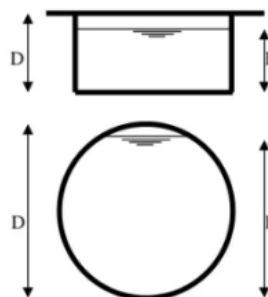


Gambar 2.2 Bentuk-Bentuk Saluran Terbuka

(Sumber : [Bentuk-Bentuk Saluran Terbuka](#))

Selain itu terdapat saluran tertutup (*pipe flow*) yang merupakan sistem saluran yang permukaan airnya tidak terpengaruh oleh udara luar (*atmosfer*). Namun pada saluran tertutup alirannya tetap mengikuti gravitasi.

Gambar 2.3 Bentuk-Bentuk Saluran Tertutup



(Sumber : [Bentuk-Bentuk Saluran Tertutup](#))

Adapun kriteria perencanaan yang disediakan untuk saluran pembawa pada pengolahan air limbah antara lain:

- Kecepatan aliran (v) = 0,3 – 2,4 m/s
 - Kemiringan (*slope*) maksimal = 1,10 – 3m/m
 - *Freeboard* saluran = 5-30%
 - Dimensi saluran direncanakan (W_s) = $B = 2H$
 - Kekasaran saluran (n) = 0,011 – 0,020 (saluran terbuka bahan beton)
- (Sumber: Bambang Triatmodjo, 2008, Hidraulika II, Table 4.2 Harga Koefisien *Manning*)

Adapun rumus perhitungan yang digunakan untuk saluran pembawa adalah sebagai berikut:

- Luas Permukaan (A)

$$A = \frac{Q(m^3/detik)}{v(m/detik)}$$

Keterangan :

A = luas permukaan saluran pembawa (m^2)

Q = debit limbah ($m^3/detik$)

V = kecepatan alir fluida dalam saluran pembawa (m/detik)

(Sumber: Chow, Ven Te, 1959, *Open Channel Hydraulics*, Mc. Graw-Hill Book Company, Inc. Halaman 5)

- Kedalaman Saluran (H)

$$H = \frac{A(m^2)}{B(m)}$$

H = ketinggian air dalam saluran pembawa (m)

A = luas permukaan saluran pembawa (m^2)

B = lebar saluran pembawa (m)

- Ketinggian Total (H_{Total})

$$H_{Total} = H + (10\% - 30\% \times H)$$

Dengan:

H = Kedalaman air dalam saluran pembawa

A = Luas permukaan saluran pembawa (m^2)

Fb = 10% - 30% H

(Sumber: Chow, Ven Te, 1959, *Open Channel Hydraulics*, Mc. Graw-Hill Book Company, Inc. Halaman 5)

- Cek Kecepatan

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

Keterangan:

v = Kecepatan aliran fluida (m/s)

A = Luas Permukaan (m²)

- Jari-jari Hidrolis (R)

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

Dengan:

R = Jari-jari Hidrolis (m)

B = Lebar saluran pembawa (m)

H = Kedalaman saluran pembawa (m)

(Sumber: Chow, Ven Te, 1959, *Open Channel Hydraulics*, Mc. Graw-Hill Book Company, Inc. Halaman 19)

- Slope Saluran (S)

$$S = \left(\frac{V_{cek} \times n}{R^{\frac{2}{3}}} \right)^2$$

Dengan:

v cek = Cek kecepatan (m/s)

n = Koefisien *manning*

S = *Slope* saluran pembawa (m/m)

R = Jari-jari Hidrolis (m)

- Headloss Saluran (Hf)

$$H_f = S \times L$$

Dengan:

S = *Slope* saluran (m/m)

L = Panjang saluran (m)

B. Bar Screen dan Bak Kontrol

Screening atau biasa disebut dengan *bar screen* digunakan dalam pengolahan air baik air bersih maupun air limbah untuk menghilangkan

padatan kasar berupa potongan-potongan kayu, bahan-bahan dari plastik, kain, dan lain sebagainya yang berukuran $>0,5-1,0$ cm sehingga tidak mengganggu proses pengolahan pada bangunan pengolahan air buangan selanjutnya (Metcalf & Eddy et al., 2007). Prinsip dari *screening* adalah untuk menghilangkan material kasar yang terdapat pada aliran air buangan yang dapat menyebabkan:

- Kerusakan pada alat pengolahan.
- Mengurangi efektifitas pengolahan dan biaya pada proses pengolahan
- Kontaminasi pada aliran air. (Metcalf & Eddy, 2003)

Padatan yang disaring kemudian dibuang ke wadah yang terletak di belakang *screen* untuk disimpan, dikeringkan, dan diakumulasi/dipadatkan sebelum akhirnya dibuang. Peran utama *screening* adalah untuk menghilangkan bahan-bahan kasar dari aliran air yang mampu: (1) merusak peralatan unit pengolahan berikutnya; (2) mengurangi kinerja dan efektivitas unit dan proses pengolahan secara keseluruhan; dan (3) mencemari saluran air. Adapun jenis dari bar screen adalah *fine screen* (saringan halus) dan *coarse screen* (saringan kasar). Sedangkan menurut mekanisme operasinya terdapat 2 jenis *bar screen* yaitu dengan pembersihan manual dan mekanik (Reynolds & Richards, 1996).

Adapun kriteria perencanaan untuk mendesain *screen* dengan pembersihan secara manual maupun mekanis baik *coarse screen* maupun *fine screen* adalah sebagai berikut:

Tabel 2.1 Kriteria Perencanaan Saringan Kasar

Parameter	U.S. Customary Units		Satuan Internasional	
	Metode Pembersihan		Metode Pembersihan	
	Manual	Mekanik	Manual	Mekanik
Ukuran Batang				
Lebar	0,2 - 0,6	0,2 - 0,6	5 - 15	5 - 15
Kedalaman	1,0 - 1,5	1,0 - 1,5	23 - 38	25 - 38

Jarak antar batang	1,0 - 2,0	0,6 - 0,3	25 - 50	15 - 75
Parameter Lain				
Kemiringan thd vertikal (Derajat)	30 - 45	0 - 30	30 - 45	0 - 30
Kecepatan	1,0 - 2,0 ft/s	2,0 3,25 ft/s	0,3 - 0,6 m/s	0,6 - 1,0 m/s
<i>Headloss (max)</i>	6 in	5 - 24 in	150 mm	150 - 600mm

(Sumber: *Metcalf and Eddy WWET, and Reuse 4th edition, 2004 Page 315-316*)

Tabel 2.2 Persen *Removal* Saringan Halus

Jenis screen	Luas permukaan		Persen <i>Removal</i>	
	In	Mm	BOD (%)	TSS (%)
<i>Fixed parabolic</i>	625	1,6	5 - 20	5 - 30
<i>Rotary drum</i>	0,01	0,25	25 - 50	25 - 45

Tabel 2.3 Klasifikasi *Fine Screen*

Jenis Screen	Permukaan Screen			Bahan Screen	Penggunaan
	Klasifikasi Ukuran	Range Ukuran			
		In	Mm		
Miring (Diam)	Sedang	0,01 - 0,1	0,25- 2,5	Ayakan kawat yang terbuat dari <i>stainless steel</i>	Pengolahan Primer
Drum (berputar)	Kasar	0,1 - 0,2	2,5 – 5	Ayakan kawat yang terbuat dari <i>stainless steel</i> .	Pengolahan Pendahuluan
	Sedang	0,01 - 0,1	0,25- 2,5	Ayakan kawat yang terbuat dari	Pengolahan Primer

				<i>stainless steel.</i>	
	Halus		6 - 35 μ m	<i>Stainless-steel</i> dan kain <i>polyester</i>	Meremoval residual dari <i>suspended solid</i> sekunder
<i>Horizontal Reciprocating</i>	Sedang	0,06-0,17	1,6-4	Batangan <i>Stainless Steel</i>	Gabungan dengan saluran air hujan
<i>Tangensial</i>	Halus	475	1200 μ m	Jala-jala yang terbuat dari <i>stainless steel</i>	Gabungan dengan saluran pembawa

(Sumber: *Metcalf and Eddy WWET, and Reuse 4th edition, 2004 Page 322-323*)

Adapun rumus perhitungan yang digunakan untuk menghitung screen pada bangunan pengolahan air limbah adalah sebagai berikut:

- Volume bak kontrol (V)

$$V = Q \times T_d$$

Dengan:

$$Q = \text{debit air limbah (m}^3/\text{s)}$$

$$T_d = \text{waktu detensi (s)}$$

- Dimensi Bak Kontrol

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

Dengan:

$$V = \text{Volume bak kontrol (m}^3/\text{s)}$$

$$L = \text{Panjang bak kontrol (m)}$$

$$W = \text{Lebar bak kontrol (m)}$$

H = Kedalaman bak kontrol (m)

- Kecepatan air pada bak kontrol

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

dengan:

v = Kecepatan aliran fluida pada bak kontrol (m/s)

W = Lebar bak kontrol (m)

H = Kedalaman bak kontrol (m)

- H air pada bak kontrol

$$H = H_{Air} + Fb$$

Dengan:

H = Kedalaman bak kontrol (m)

H_{Air} = Ketinggian air dari kedalaman bak kontrol (m)

Fb = 20% x Ketinggian air dari kedalaman bak kontrol (m)

- Jumlah batang / kisi (Ws)

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

Dengan:

Ws = lebar bak kontrol = lebar *screen* (m)

n = jumlah batang/ kisi

d = lebar batang (m)

r = jarak antar batang (m)

- Lebar bukaan kisi (Wc)

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

Dengan:

Wc = lebar bukaan kisi (m)

Ws = lebar *screen* (m)

n = Jumlah batang/ kisi

d = lebar batang (m)

- Panjang bar *screen* / kisi (x)

$$\sin \alpha = \frac{h_{total}}{x}$$

dengan:

x = panjang kisi (m)

h total = kedalaman bak kontrol (m)

- Lebar bar screen (L)

$$\cos \alpha = \frac{L}{x}$$

Dengan:

L = Lebar *bar screen* (m)

x = panjang *bar screen* (m)

- Cek kecepatan melalui kisi (V_i)

$$V_i = \frac{Q}{W_c \times H}$$

Dengan:

Q = Debit air limbah (m^3/s)

W_c = Lebar bukaan kisi (m)

H = Kedalaman bak kontrol (m)

- *Head Loss* saat *clogging*

$$V_{ic} = \frac{Q}{(50\% \times W_c) \times H}$$

$$H_f = \frac{1}{C} x \left(\frac{V_i^2 - v^2}{2 \times g} \right)$$

Dengan:

V_{ic} = Kecepatan melalui kisi saat *clogging* (m/s)

W_c = Lebar bukaan kisi (m)

H_f = *Head Loss* saat *clogging* (m)

C = Koefisien saat *clogging* (0,6)

H = Kedalaman bak kontrol (m)

V_i = kecepatan melalui kisi (m/s)

g = percepatan gravitasi bumi (m/s^2)

- *Head Loss* saat *non-clogging*

$$H_f = \frac{1}{C} x \left(\frac{V_i^2 - v^2}{2 \times g} \right)$$

Dengan:

H_f = *Head Loss* saat *clogging* (m)

C = Koefisien saat *non clogging* (0,7)

V_i = kecepatan melalui kisi (m/s)

g = percepatan gravitasi bumi (m/s^2)

(Sumber: *Metcalf & Eddy, Wastewater Engineering Treatment & Reuse, Fourth Edition, page 316*)

C. Bak Penampung

Bak penampung merupakan bangunan yang berfungsi untuk menampung dan menyeragamkan variasi laju aliran setiap jam dan beberapa parameter terkait untuk mencapai suatu karakteristik dan laju aliran air limbah yang konstan dan dapat diterapkan dalam sejumlah situasi yang berbeda sesuai dengan unit pengolahan yang digunakan berikutnya. Tinggi muka air saat kondisi puncak harus berada di bawah aliran masuk (*inlet*) atau saluran pembawa agar tidak terjadi aliran balik. Setelah keluar dari bak penampung, debit air buangan yang berfluktuasi setiap jamnya akan menjadi debit rata-rata (Metcalf & Eddy et al., 2007).

Tabel 2.4 Kriteria Perencanaan Bak Penampung

No	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan	Sumber
1	Kedalaman air minimal	h_{min}	1,5-2	m	(Metcalf & Eddy et al., 3 2007)
2	Ambang batas (<i>free board</i>)	h_{fb}	5-30	%	
3	Laju pemompaan udara (aerasi)	Q Udara	0,01- 0,015	m ³ /m ³ - menit	
4	Kemiringan dasar tangki	Slope	40-100	mm/m diameter	(Qasim & Zhu, 2017)
5	Waktu Tinggal	Td	1-2	jam	(Metcalf & Eddy et al., 2007)

(Sumber: Dirjen Cipta Karya, 2018, Halaman 32)

Adapun rumus perhitungan yang digunakan dalam menghitung bak penampung antara lain:

- Volume bak penampung (V)

$$V = Q \times T_d$$

Dengan:

$$Q = \text{Debit air limbah (m}^3/\text{s)}$$

$$T_d = \text{Waktu detensi (s)}$$

- Dimensi Bak Penampung

$$V = P \times L \times H$$

Dengan :

$$V = \text{volume bak (m}^3\text{)}$$

$$P = \text{panjang bak (m), dengan } 2 \times L$$

$$L = \text{lebar bak (m)}$$

$$H = \text{ketinggian bak pengumpul (m)}$$

- Kedalaman total (H_{Total})

$$H_{\text{Total}} = H_{\text{Air}} + F_b$$

Dengan :

$$H_{\text{Air}} = \text{Kedalaman bak yang terisi air (m)}$$

$$F_b = \text{Freeboard (10\%-30\% x } H_{\text{Air}}\text{) (m)}$$

Gambar 2.4 Bak Penampung



(Sumber : <https://images.app.goo.gl/irRWoQRxIz6Blusv9>)

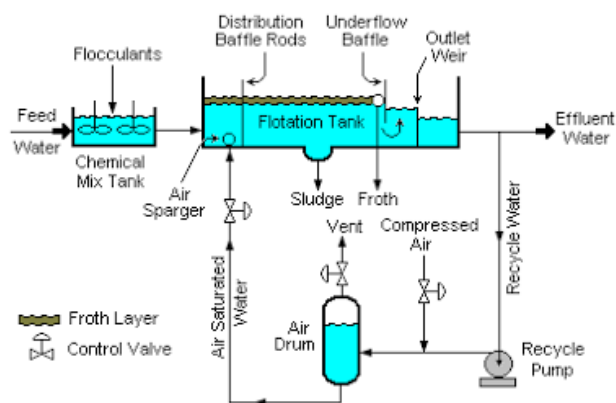
2.4.2 Pengolahan Utama (*Primary Treatment*)

Jika di dalam pengolahan pendahuluan bertujuan untuk menyortir kerikil, lumpur, memisahkan lemak, maka pada pengolahan pertama bertujuan untuk menghilangkan zat padat tercampur melalui pengendapan atau pengapungan. (Sugiharto, 1987)

A. *Dissolved Air Flotation (DAF)*

DAF adalah proses penyisihan minyak dan lemak yang melibatkan proses pemecahan emulsi di dalamnya. Dalam prosesnya, emulsi pada minyak dan lemak pada limbah dapat dipecahkan menggunakan berbagai cara, di antaranya proses pemanasan, destilasi, pelepasan gelembung udara, pembubuhan senyawa kimia, sentrifugasi, hingga filtrasi. Di antara proses tersebut, proses ultrafiltrasi merupakan proses yang paling efektif dalam memisahkan minyak dan asam lemak dari limbah industri yang diolah. Pada sistem (DAF), udara dilarutkan di dalam cairan di bawah tekanan di beberapa atmosfer sampai jenuh, kemudian dilepaskan ke tekanan *atmosfer*. Akibat terjadinya perubahan tekanan maka udara yang terlarut akan lepas kembali dalam bentuk gelembung yang halus (30-120 mikron). Ukuran gelembung udara sangat menentukan dalam proses flotasi, makin besar ukuran gelembung udara, kecepatan naiknya juga semakin besar, sehingga kontak antara gelembung udara dengan partikel tidak berjalan dengan baik. Dengan demikian proses flotasi menjadi tidak efektif.

Gambar 2.5 Skema DAF



(Sumber : <https://oilseparator.co.id/wp-content/uploads/2018/05/DAF.png>)

Unit pengolahan DAF menggunakan konsep flotasi dan koagulasi flokulasi dalam sistem pengolahan sebagai berikut:

1. Flotasi

Flotasi merupakan unit pemisah pada fase cair atau fasa padat dari fasa cair. Pemisahan partikel dari cairan flotasi didasarkan pada perbedaan berat jenis partikel dengan bantuan gelembung udara. Proses flotasi dibagi menjadi 3 jenis, antara lain:

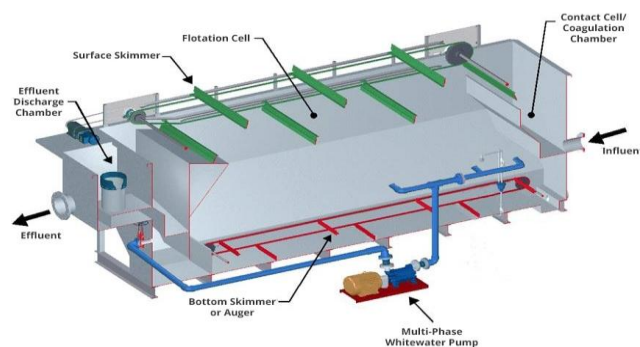
a) *Air Flotation*

Udara akan masuk ke dalam fluida dengan menggunakan mekanisme *rotor-disperser*. Rotor yang terendam dalam fluida akan mendorong udara menuju bukan *disperser* sehingga udara bercampur dengan air sehingga partikel yang mengapung disisihkan. Sistem ini memiliki keuntungan antara lain tidak memerlukan area yang luas dan lebih efektif dalam menyisihkan partikel minyak.

b) *Dissolved Air Flotation*

(DAF Melakukan pengapungan dengan melarutkan udara ke dalam fluida dengan tekanan yang tinggi kemudian dilepaskan dalam tekanan atmosfer. Penggabungan dari gelembung-gelembung gas halus dengan *suspended solid* atau *oil* mengakibatkan penurunan gravitasi sehingga menambah daya pengapungan.

Gambar 2.6 Unit DAF



(Sumber : <https://www.kemcosystems.com/wp-content/uploads/2020/10/DAF-1.jpg>)

c) *Vacuum Flotation*

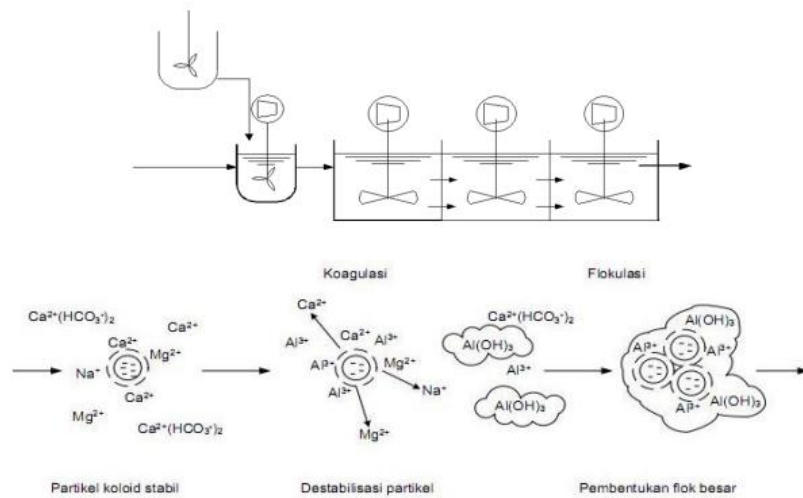
Limbah cair diaerasi hingga jenuh sehingga akan terbentuk gelembung udara yang akan lolos ke *atmosfer* dengan mengangkat partikel-partikel ke atas. Pada tugas perancangan ini kelompok kami menggunakan jenis *Dissolved Air Flotation* (DAF).

2. Koagulasi - Flokulasi

Koagulasi dan flokulasi merupakan dua proses yang terangkai menjadi kesatuan proses tak terpisahkan. Pada proses koagulasi terjadi destabilisasi koloid dan partikel dalam air sebagai akibat dari pengadukan cepat dan pembubuhan bahan kimia (koagulan). Akibat pengadukan cepat, koloid dan partikel yang stabil berubah menjadi tidak stabil karena terurai menjadi partikel yang bermuatan positif dan negatif. Pembentukan ion positif dan negatif juga dihasilkan melalui proses penguraian koagulan. Proses ini dilanjutkan dengan pembentukan ikatan antara ion positif dari koagulan (misal Al^{3+}) dengan ion negatif dari partikel (OH^-) dan antara ion positif dari partikel (misal Ca^{2+}) dengan ion negatif dari koagulan (misal SO_4^{2-}) yang menyebabkan pembentukan inti flok (presipitat). (Ali Masduqi, Abdu F. Assomadi, 2012). Operasi dan Proses Pengolahan Air. Surabaya: ITS Press.)

Setelah flok terbentuk, proses selanjutnya adalah proses flokulasi, yaitu penggabungan inti flok menjadi flok berukuran lebih besar yang memungkinkan partikel dapat mengendap. Penggabungan flok kecil menjadi flok besar terjadi karena adanya tumbukan antar flok. Tumbukan ini terjadi akibat adanya pengadukan lambat. Proses koagulasi-flokulasi dapat digambarkan secara skematik pada (Gambar 2.5).

Gambar 2.7 Gambaran Proses Koagulasi-Flokulasi



(Sumber : Ali Masduqi, Abdu F. Assomadi. (2012). *Operasi dan Proses Pengolahan Air*. Surabaya: ITS Press.)

Proses koagulasi-flokulasi terjadi pada unit pengaduk cepat dan pengaduk lambat. Pada bak pengaduk cepat, dibubuhkan koagulan. Pada bak pengaduk lambat, terjadi pembentukan flok yang berukuran besar hingga mudah diendapkan pada bak sedimentasi. Pemilihan koagulan dan konsentrasinya dapat ditentukan berdasarkan studi laboratorium menggunakan jar test apparatus (Gambar 2.6) untuk mendapatkan kondisi optimum. (Ali Masduqi, Abdu F. Assomadi. (2012). *Operasi dan Proses Pengolahan Air*. Surabaya: ITS Press.)

Gambar 2.8 Peralatan *Jar Test*



Pengadukan merupakan operasi yang mutlak diperlukan pada proses koagulasi-flokulasi. Pengadukan cepat berperan penting dalam pencampuran koagulan dan destabilisasi partikel. Sedangkan pengadukan lambat berperan dalam upaya penggabungan flok. (Ali Masduqi, Abdu F. Assomadi. (2012). Adapun jenis pengadukan dapat dikelompokkan berdasarkan kecepatan pengadukan dan metode pengadukan. Berdasarkan kecepatannya, pengadukan dibedakan menjadi pengadukan cepat dan pengadukan lambat. Sedangkan berdasarkan metodenya, pengadukan dibedakan menjadi pengadukan mekanis, pengadukan hidrolis, dan pengadukan *pneumatis*. Kecepatan pengadukan merupakan parameter penting dalam pengadukan yang dinyatakan dengan gradien kecepatan.

- **Pengadukan Cepat**

Tujuan pengadukan cepat dalam pengolahan air adalah untuk menghasilkan turbulensi air sehingga dapat mendispersikan bahan kimia yang akan dilarutkan dalam air. Secara umum, pengadukan cepat adalah pengadukan yang dilakukan pada gradien kecepatan besar (300 sampai 1000 detik^{-1}) selama 5 hingga 60 detik atau nilai GTd (bilangan Champ) berkisar 300 hingga 1700. Secara spesifik, nilai G dan td bergantung pada maksud atau sasaran pengadukan cepat (Ali Masduqi, Abdu F. Assomadi. (2012)

a. Untuk proses koagulasi-flokulasi :

- Waktu detensi = 20 - 60 detik
- $G = 1000 - 700 \text{ detik}^{-1}$

b. Untuk penurunan kesadahan (pelarutan kapur/soda) :

- Waktu detensi = 20 - 60 detik
- $G = 1000 - 700 \text{ detik}^{-1}$

c. Untuk presipitasi kimia (penurunan fosfat, logam berat, dan lain-lain) :

- Waktu detensi = 0,5 - 6 menit
- $G = 1000 - 700 \text{ detik}^{-1}$

- **Pengadukan Lambat**

Tujuan pengadukan lambat dalam pengolahan air adalah untuk menghasilkan gerakan air secara perlahan sehingga terjadi kontak antar partikel

untuk membentuk gabungan partikel hingga berukuran besar. Pengadukan lambat adalah pengadukan yang dilakukan dengan gradien kecepatan kecil (20 sampai 100 detik^{-1}) selama 10 hingga 60 menit atau nilai GTd (bilangan Champ) berkisar 48000 hingga 210000 . Untuk menghasilkan flok yang baik, gradien kecepatan diturunkan secara bertahap agar flok yang telah terbentuk tidak pecah lagi dan berkesempatan bergabung dengan yang lain membentuk gumpalan yang lebih besar. Secara spesifik, nilai G dan waktu detensi untuk proses flokulasi adalah sebagai berikut (Ali Masduqi, Abdu F. Assomadi. (2012).

1. Untuk air sungai
 - $G = 10 - 50 \text{ detik}^{-1}$
2. Untuk air waduk - Waktu = 30 menit
 - $G = 10 - 75 \text{ detik}^{-1}$
3. Untuk air keruh
 - Waktu dan G lebih rendah
4. Bila menggunakan gram besi sebagai koagulan
 - G tidak lebih dari 50 detik^{-1}
5. Untuk flokulator 3 kompartemen
 - G kompartemen 1 : nilai terbesar
 - G kompartemen 2 : 40% dari G kompartemen 1
 - G kompartemen 3 : nilai terkecil
6. Untuk penurunan kesadahan (pelarutan kapur dan soda)
 - Waktu detensi = minimum 30 menit
 - $G = 10 - 50 \text{ detik}^{-1}$
7. Untuk presipitasi kimia (penurunan fosfat, logam berat, dan lain-lain)
 - Waktu detensi = $15 - 30$ menit
 - $G = 20 - 75 \text{ detik}^{-1}$
 - GTd = $10.000 - 100.000$

Sedangkan berdasarkan metode pengadukannya, pengadukan dibedakan menjadi:

- **Pengadukan Mekanis**

Pengadukan mekanis adalah metode pengadukan menggunakan peralatan mekanis yang terdiri atas motor, poros pengaduk (*shaft*), dan alat pengaduk (*impeller*). Peralatan tersebut digerakkan dengan motor bertenaga listrik. Berdasarkan bentuknya, ada tiga macam *impeller*, yaitu *paddle* (pedal), turbin, dan *propeller* (baling-baling). *Paddle impeller* biasanya memiliki dua atau empat *blades*. *Blades* dapat berbentuk *pitch* atau vertikal. Tipe yang umum digunakan yaitu vertikal. Diameter *paddle impeller* biasanya 50-80% dari diameter atau lebar tangki. Dan lebar *paddle* biasanya 1/6 atau 1/10 dari diameter. Jarak *paddle* yaitu 50% dari diameter diatas dasar tangki. Kecepatan *paddle* berkisar antara 20-150 rpm. *Paddle impeller* tidak seefisien turbin, karena tidak menghasilkan banyak turbulensi dan gaya geser (Reynold, 1996).

Propeller impeller memiliki dua atau tiga *blades*. *Pitch* didefinisikan sebagai jarak cairan bergerak secara aksial selama satu revolusi. Biasanya *pitch* adalah 1,0 atau 2,0 dan diameter *propeller* maksimum 18 inch. Kecepatan *propeller* biasanya 400-1750 rpm. Agitator *propeller* sangat efektif dalam tangki besar, karena kecepatan tinggi (Reynold, 1996).

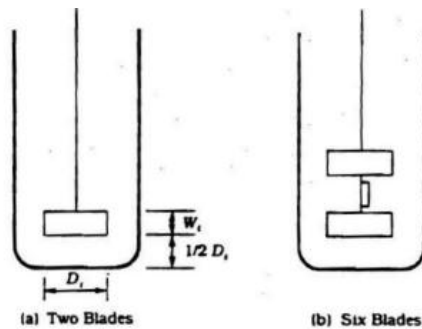
Power yang dihasilkan dari berbagai *impeller* dapat ditentukan dengan menggunakan hubungan yang di kembangkan oleh Rushton. Daya tangki tidak sama, sesuai dengan nilai konstanta *impeller*, K_T dan K_L .

Tabel 2.5 Konstanta K_T dan K_L

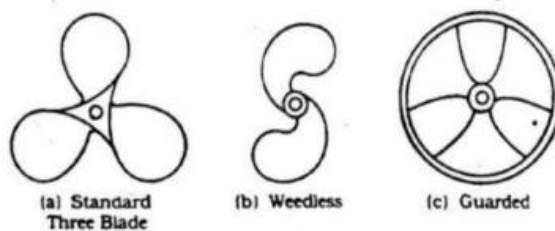
Jenis Impeller	K_L	K_T
Propeller, pitch of 1, 3 blades	41,0	0,32
Propeller, pitch of 2, 3 blades	43,5	1,00
Turbine, 4 flat blades, vaned disc	60,0	5,31
Turbine, 6 flat blades, vaned disc	65,0	5,75
Turbine, 6 curved blades	70,0	4,80
Fan turbine, 6 blades at 45°	70,0	1,65
Shroude turbine, 6 curved blades	97,5	1,08
Shrouded turbine, with stator, no baffles	172,5	1,12
Flat paddles, 2 blades (single paddle), $D_i/W_i = 4$	43,0	2,25
Flat paddles, 2 blades , $D_i/W_i = 6$	36,5	1,70
Flat paddles, 2 blades , $D_i/W_i = 8$	33,0	1,15
Flat paddles, 4 blades , $D_i/W_i = 6$	49,0	2,75
Flat paddles, 6 blades , $D_i/W_i = 8$	71,0	3,82

(Sumber : Reynolds, Tom D. dan Paul A. Richards. 1996. *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering 2nd edition*)

Gambar 2.9 Tipe *Paddle Impeller*

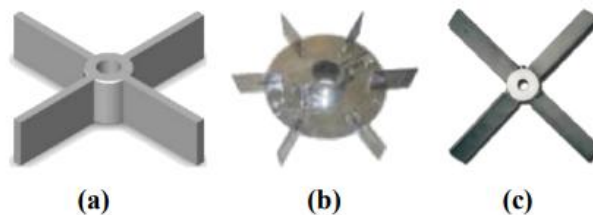


Gambar 2.10 Tipe *Propeller Impeller*



(Sumber : Reynolds, Tom D. dan Paul A. Richards. 1996. *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering 2nd edition*)

Gambar 2.11 Tipe *Turbine*



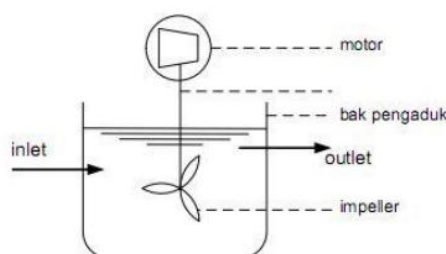
(a) *turbine blade* lurus, (b) *turbine blade* dengan piringan, (c) turbin dengan blade menyerong

(Sumber: Qasim, S. R. (1985). *Wastewater Treatment Plant : Planning, Design and Operation*. New York: Holt, Rinehart and Winston.)

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 . Sedangkan pengadukan mekanis dengan tujuan pengadukan lambat umumnya memerlukan tiga kompartemen dengan ketentuan G di kompartemen I lebih besar daripada G di kompartemen II dan G di kompartemen III adalah yang

paling kecil. Pengadukan mekanis yang umum digunakan untuk pengadukan lambat adalah tipe *paddle* yang dimodifikasi hingga membentuk roda (*paddle wheel*), baik dengan posisi horizontal maupun vertikal.

Gambar 2.12 Pengadukan Cepat dengan Alat Pengaduk



Sumber: (Ali Masduqi, Abdu F. Assomadi. (2012). *Operasi dan Proses Pengolahan Air*. Surabaya: ITS Press.)

Tabel 2.6 Nilai Gradien Kecepatan dan Waktu Pengadukan

Waktu Pengadukan, td (detik)	Gradien Kecepatan (1/detik)
20	1000
30	900
40	790
50 ≥	700

(Sumber : Tom D. Reynolds, Paul A. Richards. (1996). *Unit Operation and Processes in Environmental Engineering (Second Edition)*. Boston: PWS Publishing Company.)

- **Pengadukan Hidrolis**

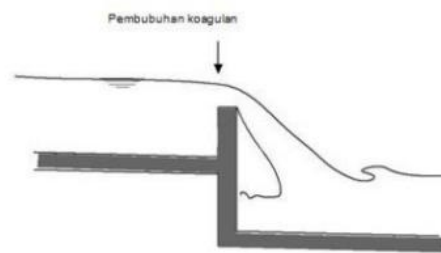
Pengadukan hidrolis adalah pengadukan yang memanfaatkan aliran air sebagai tenaga pengadukan. Tenaga pengadukan ini dihasilkan dari energi hidrolik yang dihasilkan dari suatu aliran hidrolik. Energi hidrolik dapat berupa energi gesek, energi potensial (jatuhan) atau adanya lompatan hidrolik dalam suatu aliran.

Jenis pengadukan hidrolis yang digunakan pada pengadukan cepat haruslah aliran air yang menghasilkan energi hidrolik yang besar. Dalam hal ini dapat dilihat dari besarnya kehilangan energi (*head loss*) atau perbedaan muka air. Dengan tujuan menghasilkan turbulensi yang besar tersebut, maka jenis aliran

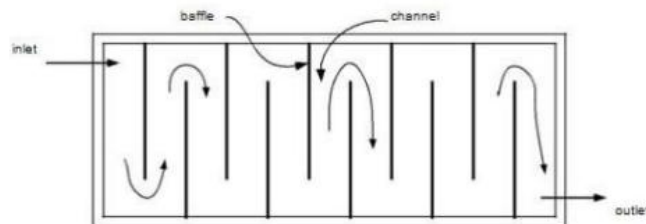
yang sering digunakan sebagai pengadukan cepat adalah terjunan loncatan hidrolis, dan *parshall flume*.

Jenis pengadukan hidrolis yang digunakan pada pengadukan lambat adalah aliran air yang menghasilkan energi hidrolis yang lebih kecil. Aliran air dibuat relatif lebih tenang dan dihindari terjadinya turbulensi agar flok yang terbentuk tidak pecah lagi. Beberapa contoh pengadukan hidrolis untuk pengadukan lambat adalah kanal bersekat (*baffled channel*, Gambar 2.8), *perforated wall*, *gravel bed* dan sebagainya. (Ali Masduqi, Abdu F. Assomadi. (2012)

Gambar 2.13 Pengadukan Cepat dengan Terjunan



Gambar 2.14 *Baffle Channel*



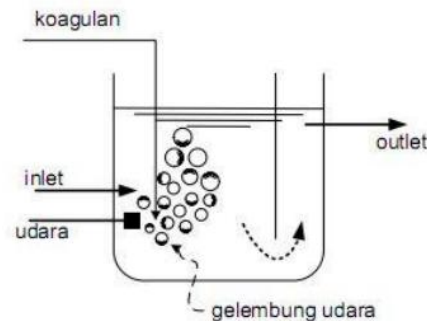
(Sumber : Ali Masduqi, Abdu F. Assomadi. (2012). *Operasi dan Proses Pengolahan Air*. Surabaya: ITS Press.)

- **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 (Gambar 2.13). 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 2.15 Pengadukan Cepat Secara *Pneumatis*



(Sumber : Ali Masduqi, Abdu F. Assomadi. (2012). *Operasi dan Proses Pengolahan Air*. Surabaya: ITS Press.)

Koagulan yang banyak digunakan dalam pengolahan air minum adalah aluminium sulfat atau garam-garam besi. Terkadang koagulan-pembantu, seperti polielektrolit dibutuhkan untuk memproduksi flok yang lebih besar agar padatan tersuspensi lebih cepat mengendap. Faktor utama yang mempengaruhi proses koagulasi-flokulasi air adalah kekeruhan, padatan tersuspensi, temperatur, pH, komposisi dan konsentrasi kation dan anion, durasi dan tingkat agitasi selama koagulasi dan flokulasi, dosis koagulan, dan jika diperlukan, koagulan pembantu.

Rumus :

- Power (P)

$$P = Kt \times n^3 \times Di^5 \times \rho$$

- Nre

$$Nre = \frac{Di^5 \times n \times \rho \text{ air}}{\mu}$$

(Sumber: Reynolds, Tom D. dan Paul A. Richards. 1996. *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering 2nd edition*, hal 188. Boston: PWS Publishing Company)

Bak Koagulan

- Kebutuhan alum
(Dosis alum x Q air limbah) x td

Keterangan :

Q = Debit air limbah

td = Waktu detensi

- Volume alum cair

$$\frac{\text{Kebutuhan alum}}{\rho \text{ alum}}$$

Keterangan :

ρ = Massa Jenis alum

- Supply tenaga (P)

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

Keterangan :

P = Supply Tenaga

Gradien kecepatan (G) = 20-75 / s

Viskositas absolute (μ) di suhu 30°C = 0,8004 x 10⁻³N.s/m²

V = Volume Bak Flokulasi

- Power drive (P')

$$P' = \frac{P}{\text{efisiensi gearbox}}$$

Keterangan :

P = Supply tenaga

P' = Power drive

- Diameter Turbin (Di)

Di = 50% x diameter bak

- Jarak turbin dengan dasar bak

Jarak turbin = 50% x diameter turbin

- Kecepatan putaran (n)

$$n = \left(\frac{P'}{\rho \text{ air} \times Kt \times Di^5} \right)^{1/3}$$

Keterangan :

P' = Power drive

- ρ = Massa jenis air
- D_i = Diameter turbin
- n = Kecepatan putaran

- Cek Nre

$$Nre = \frac{D_i^2 \times n \times \rho \text{ air}}{\mu}$$

Bak Koagulasi

- Volume bak koagulasi
 $V = Q \text{ limbah} \times t_d$
- Volume total
 $V \text{ total} = V \text{ limbah} + V \text{ koagulan}$
- Supply tenaga (P)

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

- Power drive (P')

$$P' = \frac{P}{\text{efisiensi gearbox}}$$

Keterangan :

- P = Supply tenaga
- P' = *Power drive*

- Diameter Turbin (D_i)
 $D_i = 50\% \times \text{diameter bak}$
- Jarak turbin dengan dasar bak
 $\text{Jarak turbin} = 50\% \times \text{diameter turbin}$
- Kecepatan putaran (n)

$$n = \left(\frac{P'}{\rho \text{ air} \times K_t \times D_i^5} \right)^{1/3}$$

Keterangan :

- P' = *Power drive*
- ρ = Massa jenis air
- D_i = Diameter turbin
- n = Kecepatan putaran

- Cek Nre

$$Nre = \frac{Di^2 \times n \times \rho \text{ air}}{\mu}$$

Bak Flokulasi

- Volume bak flokulasi

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

- Dimensi bak

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

- H Bangunan = H air + Hfb

Keterangan :

H air = Tinggi air

H fb = Tinggi bangunan

- Supply tenaga (P)

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

- Power drive (P')

$$P' = \frac{P}{\text{efisiensi gearbox}}$$

Keterangan :

P = Supply tenaga

P' = Power drive

- Diameter Turbin (Di)

Di = 50% x diameter bak

- Jarak turbin dengan dasar bak

Jarak turbin = 50% x diameter turbin

- Kecepatan putaran (n)

$$n = \left(\frac{P'}{\rho \text{ air} \times Kt \times Di^5} \right)^{1/3}$$

Keterangan :

P' = Power drive

ρ = Massa jenis air

Di = Diameter turbin

n = Kecepatan putaran

- Cek Nre

$$Nre = \frac{Di^2 \times n \times \rho \text{ air}}{\mu}$$

B. Bak Ekualisasi

Fungsi bak ekualisasi adalah untuk mengendapkan butiran kasar dan merupakan unit penyeimbang. Dalam prosesnya, bak ekualisasi sering digunakan sebagai salah satu alternatif yang dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan pengolahan air buangan yang terjadi akibat adanya fluktuasi konsentrasi beban pencemar. Bak ekualisasi harus berukuran cukup untuk mengurangi fluktuasi limbah yang disebabkan oleh perubahan program rencana produksi untuk mengurangi konsentrasi secara periodik pada bak penampung atau saluran (Metcalf & Eddy, 2003).

Keuntungan proses ekualisasi untuk mengolah limbah adalah:

- Dapat mengurangi fluktuasi bahan organik yang diolah untuk mencegah *shock loading* pada proses biologis.
- Mengontrol pH atau meminimumkan kebutuhan bahan kimia.
- Meminimumkan aliran pada proses pengolahan fisik – kimia dan mengetahui rata-rata kebutuhan bahan kimia.
- Memberikan kapasitas untuk mengontrol aliran limbah.
- Mencegah tingginya konsentrasi bahan berbahaya yang masuk pada proses pengolahan biologis.
- Pencampuran selalu diberikan pada proses ekualisasi dan untuk mencegah pengendapan zat padat pada dasar bak. Pada proses pencampuran, oksidasi dapat mengurangi bahan organik atau BOD (10- 20% tersisihkan) oleh udara dalam air limbah dari proses pencampuran dan aerasi. Untuk metode yang digunakan pada proses pencampuran ialah *distribution of inlet flow and baffle, turbine mixing, diffused air aeration, dan mechanical aeration* (Reynold, 1996).

Bak ekualisasi di desain untuk menyamakan aliran. Debit atau aliran serta konsentrasi limbah yang fluktuatif akan disamakan dalam bak 27 ekualisasi,

sehingga dapat memberikan kondisi yang optimum pada pengolahan selanjutnya (Metcalf & Eddy, 2003).

Gambar 2.16 Bak Ekualisasi



Gambar 7.27. Bak equalisasi

Cara kerja dari unit ini adalah saat air limbah sudah dialirkan melalui bak sedimentasi, maka selanjutnya air limbah dialirkan menuju bak ekualisasi agar debitnya konstan. Adapun rumus yang digunakan pada unit di atas adalah sebagai berikut:

- Volume bak ekualisasi

$$V = Q \times t_d$$

Keterangan:

V = volume bak ekualisasi (m^3)

Q = debit air limbah ($m^3/detik$)

t_d = waktu detensi (detik)

- Kebutuhan oksigen

$$\text{Keb. DO} = \text{DO air buangan} - \text{DO minimum}$$

Keterangan:

Keb.DO = kebutuhan oksigen terlarut dalam air (mg/L)

DO air buangan = kadar minimal oksigen terlarut air (mg/L)

DO minim = kadar oksigen terlarut air limbah (mg/L)

- Dimensi bak ekualisasi

$$V = L \times B \times H$$

Keterangan:

V = Volume bak penampung (m^3)

L = Panjang (m)

B = Lebar (m)

H = kedalaman (m)

- Kedalaman total

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

Keterangan:

H = Ketinggian Air dalam bak penampung (m)

Freeboard = 5% - 30%

2.4.3. Pengolahan Sekunder (*Secondary Treatment*)

Pengolahan kedua umumnya mencakup proses biologis untuk mengurangi bahan-bahan organik melalui mikroorganisme yang ada di dalamnya. Pada proses ini dipengaruhi oleh banyak faktor antara lain jumlah air limbah, tingkat kekotoran, jenis kekotoran, dan lain sebagainya (Sugiharto, 1987).

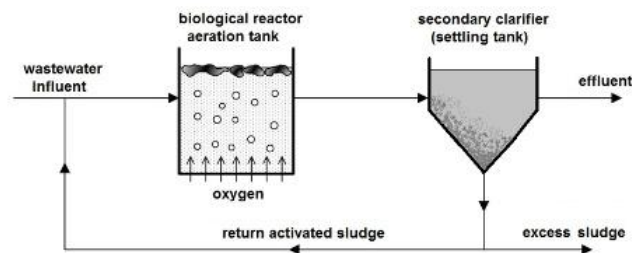
A. Lumpur Aktif (*Activated Sludge*)

Secara umum proses biologis yang terdapat dalam sistem aerasi biologis atau lebih dikenal dengan *activated sludge*. Air limbah yang mengalir kedalam bak aerasi (*aeration basin*) mengandung material organik (BOD) sebagai suplai makanan. Bakteri memetabolisme sampah organik tersebut, menghasilkan pertumbuhan dengan mengambil oksigen terlarut dan melepaskan karbon dioksida. Lumpur aktif merupakan massa biologis kompleks yang dihasilkan apabila limbah organik diberi penanganan secara aerobik. Lumpur akan mengandung berbagai ragam mikroorganisme heterotrof termasuk bakteri, protozoa dan bentuk kehidupan yang lebih tinggi. Dengan kata lain, lumpur aktif merupakan campuran antara lumpur dan mikroorganisme yang memiliki kemampuan untuk mengolah limbah (Singh et al., 2008). Tahapan dalam proses lumpur aktif meliputi:

1. Konvensional

Sistem konvensional terdiri dari tangki aerasi, clarifier sekunder, dan proses pengembalian lumpur (*recycle sludge*). Selama proses berlangsung, terjadi penyerapan, flokulasi, serta oksidasi bahan organik.

Gambar 2.17 *Activated Sludge Konvensional*



(Sumber :

<https://www.researchgate.net/publication/309217252/figure/fig1/AS:669024199389188@1536519207445/The-basic-principle-ofActivated-Sludge-Process.ppm>)

- Tangki Aerasi

Selama proses oksidasi aerobik material organik dalam tangki, efluen awal dicampur dengan Lumpur Aktif Balik (*Return Activated Sludge/RAS*) atau disingkat LAB, membentuk lumpur campuran (*mixed liquor*) yang mengandung padatan tersuspensi sekitar 1.500– 2.500 mg/l. Aerasi dilakukan secara mekanis. Salah satu ciri khas dari proses lumpur aktif adalah adanya daur ulang biomassa, yang memungkinkan waktu tinggal sel (biomassa) menjadi lebih lama dibandingkan waktu tinggal hidroliknya (Sterritt dan Lester, 1988). Kondisi ini memungkinkan mikroorganisme dalam jumlah besar untuk mengoksidasi senyawa organik dalam waktu yang relatif singkat. Waktu tinggal di tangki aerasi biasanya berkisar antara 4 hingga 8 jam.

- Tangki Sedimentasi

Tangki ini berfungsi untuk mengendapkan flok mikroba (lumpur) yang terbentuk selama fase oksidasi di tangki aerasi. Sebagian lumpur yang terkumpul dalam tangki penjernih didaur ulang sebagai Lumpur Aktif Balik (LAB) ke tangki aerasi, sementara sisanya dibuang untuk menjaga keseimbangan rasio makanan terhadap mikroorganisme (F/M Ratio).

Parameter yang umum digunakan dalam lumpur aktif (Davis dan Cornwell, 1985; Verstraete dan van Vaerenbergh, 1986) adalah sebagai berikut:

a. *Mixed-Liquid Suspended Solids (MLSS)*

Isi tangki aerasi dalam sistem lumpur aktif disebut sebagai *mixed liquor* yang diterjemahkan sebagai lumpur campuran. MLSS merupakan jumlah total

dari padatan tersuspensi yang berupa material organik dan mineral, termasuk di dalamnya adalah mikroorganisme. MLSS ditentukan 25 dengan cara menyaring lumpur campuran dengan kertas saring (filter), kemudian filter dikeringkan pada temperatur 105°C , dan berat padatan dalam contoh ditimbang.

b. Mixed-Liquid Volatile Suspended Solids (MLSS)

Porsi material organik pada MLSS diwakili oleh MLVSS, yang berisi material organik bukan mikroba, mikroba hidup dan mati, dan hancuran sel (Nelson dan Lawrence, 1980). MLVSS diukur dengan memanaskan terus sampel filter yang telah kering pada $600 - 650^{\circ}\text{C}$.

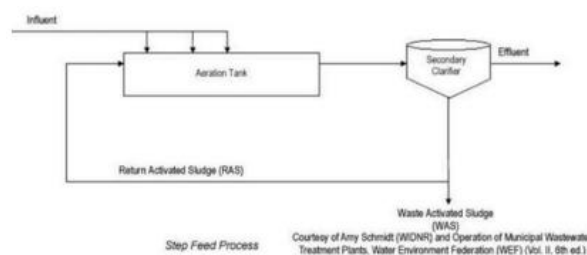
- *Food to microorganism ratio (F/M Ratio)*
- Parameter ini merupakan indikasi beban organik yang masuk ke dalam sistem lumpur aktif dan diwakili nilainya dalam kilogram BOD per kilogram MLSS per hari (Curds dan Hawkes, 1983; Nathanson, 1986)

2. Non Konvensional

● *Stop Aeration*

- Termasuk tipe *plug flow* dengan perbandingan F/M atau substrat dan mikroorganisme yang menurun menuju *outlet*.
- Pada *inlet* air buangan akan masuk melalui 3 – 4 titik tangki aerasi yang bertujuan menetralkan rasio substrat dan mikroorganisme dalam mengurangi tingginya kebutuhan oksigen dititik yang paling awal.
- Keuntungan dari *step aeration* adalah memiliki waktu detensi yang lebih pendek.

Gambar 2.18 *Activated Sludge Step Aeration*



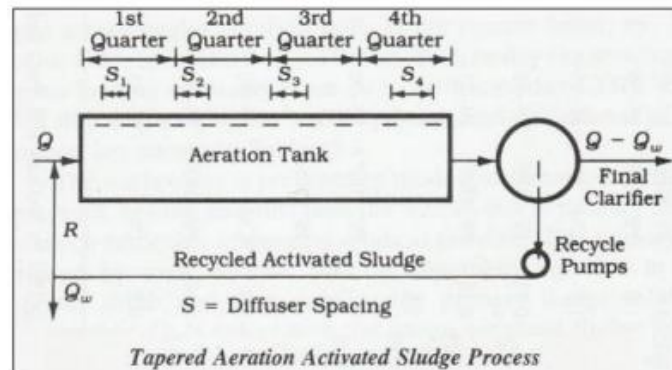
(Sumber:

<https://dnr.wi.gov/regulations/opcert/documents/wwsgactsludgeintro.pdf>)

- *Tapered Aeration*

- Termasuk sama dengan step aerasi, namun pada *tapered* aerasi ini memiliki injeksi udara di titik awal yang lebih tinggi.

Gambar 2.18 *Activated Sludge Tapered Aeration*



(Sumber:

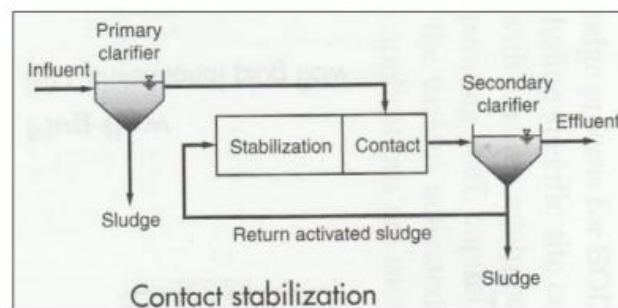
https://uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/5/5_2018_12_15!08_58_32_PM.pdf)

- *Contact Stabilization*

Pada sistem ini terdapat 2 tangki, yaitu:

- *Contact tank*, berfungsi untuk mengabsorpsi bahan organik agar dapat memproses lumpur aktif.
- *Reaeration tank*, berfungsi untuk mengoksidasi bahan organik yang telah di *adsorbs* (proses stabilisasi).

Gambar 2.19 *Activated Sludge Contact Stabilization*



(Sumber:

https://uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/5/5_2018_12_15!08_58_32_PM.pdf)

Adapun rumus yang digunakan pada pengolahan ini adalah sebagai berikut:

- Partikulat BOD *Effluent*

$$BOD_{ss} = BOD_{eff} \times \left(\frac{MLVSS}{MLSS} \right) \times FB$$

$$BOD \text{ terlarut} = BOD_{eff} - BOD_{ss}$$

Keterangan:

VSS/SS = ratio perbandingan

VSS dan SS FB = Fraksi biodegradable VSS

(Sumber: *Marcos Von, Activ. Sludge and ABR, Page 29*)

- Efisiensi *system* dalam penyisihan BOD

$$E\% = \frac{BOD \text{ influent} - BOD \text{ terlarut}}{BOD \text{ influent}}$$

(Sumber: *Marcos Von Sperling, Activated Sludge and ABR, page 30*)

- Debit resirkulasi

$$Q_r = R \times Q_0$$

Keterangan :

Q_r = Debit resirkulasi (m^3 /detik)

Q_0 = Debit air limbah awal (m^3 /detik)

R = rasio resirkulasi

(Sumber: *Marcos Von Sperling, Activated Sludge and ABR, page 36*)

- Debit total *bioreactor*

$$Q_{tot} = Q_0 \times Q_r$$

Keterangan:

Q_{tot} = Debit total (m^3 /detik)

Q_r = Debit Resirkulasi (m^3 /detik)

Q_0 = Debit air limbah awal (m^3 /detik)

- Konsentrasi BOD dalam *bioreactor*

$$S_a = \frac{(S_0 \times Q_0) + (S_r \times Q_r)}{(Q_0 + Q_r)}$$

Keterangan :

S_a = konsentrasi BOD dalam reaktor (mg/L)

S_r = konsentrasi BOD resirkulasi (mg/L)

S_0 = konsentrasi BOD awal (mg/L)

Q_r = Debit Resirkulasi (m^3 /detik)

Q_0 = Debit air limbah awal (m^3 /detik)

- Volume *bioreactor*

$$V = \frac{Y \times \theta_c \times Q_a \times (S_0 - S_a)}{X_a \times (1 + K_d \times F_b \times \theta_c)}$$

Keterangan:

V = volume *bioreactor*

Y = *Yield Coefficient* (g VSS / g BOD5 removed)

θ_c = umur lumpur (hari)

S_a = konsentrasi BOD dalam reaktor (mg/L)

S_0 = konsentrasi BOD awal (mg/L)

Q_a = Debit air limbah total (m^3 /detik)

X_a = MLVSS (mg/L)

K_d = *Endogenous Respiration Coefficient* (g VSS/g VSS.d)

F_b = *Biodegradable fraction of VSS*

(Sumber: Marcos Von Sperling, *Activated Sludge and ABR*, page 21)

- Kedalaman bioreaktor

$H_{total} = H + f_b$

H_{total} = kedalaman total bioreaktor (m)

H = kedalaman bioreaktor (m)

f_b = freeboard (5%-30% $\times h$)

- F/M Rasio

$$F/M = \frac{S_a}{t_d \times X_a}$$

Keterangan:

S_a = konsentrasi BOD dalam reaktor (mg/L)

X_a = MLVSS (mg/L)

t_d = waktu tinggal hidrolis (jam)

- Konsentrasi resirkulasi lumpur

$$X_r = \frac{X_a(Q_0 + Q_r)}{Q_r}$$

Keterangan:

X_r = konsentrasi resirkulasi lumpur (mg/L)

Q_r = Debit Resirkulasi (m^3 /detik)

Q_0 = Debit air limbah awal (m^3 /detik)

X_a = MLVSS (mg/L)

(Sumber: *Marcos Von Sperling, Activated Sludge and ABR, page 35*)

- Produksi lumpur tiap hari

$$Y_{obs} = \frac{Y}{1 + Fb + Kd + \theta c}$$

$$S_r = Q_a \times (S_0 - S_a)$$

$$P_x = \frac{P_{xv}}{VSS/SS}$$

Keterangan :

P_x = produksi lumpur (kg/hari)

Y_{obs} = Koefisien *observed yield*

Y = *Yield Coefficient* (g VSS / g BOD5 removed)

θc = umur lumpur (hari)

K_d = *Endogenous Respiration Coefficient* (gVSS/g VSS.d)

FB = *Biodegradable fraction of VSS*

S_r = penyisihan beban BOD (kg/hari)

S_a = konsentrasi BOD dalam reaktor (mg/L)

S_0 = konsentrasi BOD awal (mg/L)

Q_a = Debit air limbah total (m^3 /detik)

(Sumber: *Marcos Von Sperling, Activated Sludge and ABR, page 39*)

- Debit lumpur yang dibuang

$$Q_{exc} = \frac{V}{\theta c}$$

$$Q_{exc} = \frac{V}{\theta c} \times \frac{X}{X_r}$$

Keterangan :

V = volume *bioreactor*

θc = umur lumpur (hari)

X = MLSS (mg/L)

Xr = konsentrasi resirkulasi lumpur (mg/L)

(Sumber: *Marcos Von Sperling, Activated Sludge and ABR, page 43 - 44*)

- Volume Lumpur

$$V \text{ lumpur} = \frac{Px}{\rho \text{ lumpur} \times C} \times \theta c$$

Keterangan :

V lumpur = volume lumpur (m³)

Px = produksi lumpur (kg/hari)

ρ lumpur = massa jenis lumpur (kg/m³)

C = konsentrasi lumpur

θc = umur lumpur (hari)

- Kebutuhan oksigen

$$\text{Kebutuhan teoritis} = \frac{O_2}{Sr} \times Sr$$

Kebutuhan O₂ teoritis = Kebutuhan teoritis x factor desain

$$\text{Keb. udara aktual} = \frac{\text{Kebutuhan teoritis}}{\text{efisiensi blower}}$$

- Desain perpipaan *diffuser*

$$\text{Panjang pipa lateral (LL)} = \frac{W \text{ bioreaktor} - DM}{2}$$

$$LM = (n \times DL) + ((n + 1) \times rL)$$

$$LL = (n \times DO) + ((n + 1) \times rO)$$

Keterangan :

LM = panjang pipa *manifold* (m)

LL = panjang pipa *lateral* (m)

DM = Diameter pipa *manifold* (m)

DL = Diameter pipa *lateral* (m)

DO = diameter lubang *orifice* (m)

rL = jarak antar pipa *lateral* (m)

rO = jarak antar lubang *orifice* (m)

2.4.4 Pengolahan Tersier (*Tertiary Treatment*)

Menurut Sugiharto (1987), proses pengolahan ini merupakan lanjutan dari tahapan sebelumnya dan diterapkan jika pengolahan pertama dan kedua masih menyisakan zat-zat tertentu yang berpotensi membahayakan masyarakat. Pengolahan tahap ketiga ini dirancang secara khusus untuk menangani kandungan zat tertentu, seperti nitrogen, fosfat, bakteri patogen, dan lainnya. Unit pengolahan tersier biasanya digunakan dalam pengolahan air limbah khusus, seperti limbah yang mengandung fenol, yang sering dihasilkan oleh pabrik-pabrik tertentu.

A. *Clarifier*

Sedimentasi adalah proses fisik untuk memisahkan partikel suspensi di dalam air akibat beratnya sendiri atau oleh pengaruh gaya gravitasi, proses ini biasa disebut sebagai proses pengendapan. Air bersih yang terpisahkan dari *sludge* dalam zona separator dialirkan melalui drain untuk diolah ke unit selanjutnya. Sedangkan lumpur padat dialirkan dan dikumpulkan di *sludge collector* untuk diolah lebih lanjut.

Pertimbangan utama dalam merencanakan proses sedimentasi adalah (Kawamura, 1991):

- a. Proses pengolahan keseluruhan
- b. Kandungan alami materi terlarut dalam air baku
- c. Kecepatan pengendapan partikel yang akan dipindahkan
- d. Kondisi iklim setempat
- e. Karakteristik air baku
- f. Karakteristik geologi setempat
- g. Variasi aliran
- h. Tipe dan konfigurasi tangki pengendapan
- i. Rancangan *inlet* dan *outlet* tangki
- j. Tipe dan pemilihan kecepatan pengendapan
- k. Metode pembuangan lumpur
- l. Harga dan bentuk tangki

Karakteristik aliran bak sedimentasi dapat diperkirakan dengan bilangan *Reynolds* (Re) dan bilangan *Froude* (Fr) (Kawamura, 1991):

$$\mathbf{Re} = \frac{vR}{\nu} < 2000$$

$$\mathbf{Fr} = \frac{v^2}{gR} > 10^{-5}$$

Dimana:

v = kecepatan aliran (m/s)

R = radius hidrolis (m)

$$\mathbf{R} = \frac{A}{P}$$

Dimana:

A = luas area yang dilewati (m²)

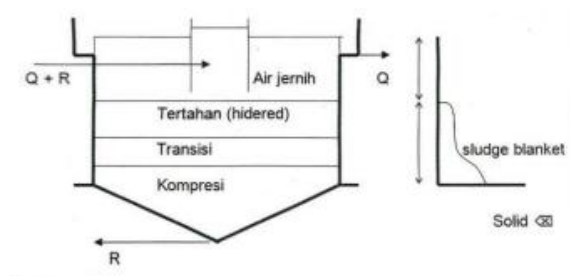
P = keliling basah (m)

ν = viskositas kinematis (m²/s) = 1,306.10⁻⁶ m²/s pada 10°C

g = konstanta gravitasi (9,81 m/s²)

Berdasarkan tingkat konsentrasi partikel di dalam air baku dan kecenderungan partikel untuk saling berinteraksi, *clarifier* setelah unit *activated sludge* termasuk dalam sedimentasi tipe 3. Pada sedimentasi tipe ini terjadi pengendapan partikel dengan konsentrasi yang lebih pekat, dimana antar partikel secara bersama-sama saling menahan pengendapan partikel lain di sekitarnya (pengendapan terjadi secara bersama-sama sebagai sebuah zona dengan kecepatan yang konstan). Pengendapan lumpur biomassa pada *final clarifier* terjadi setelah proses biologis, misalnya pada proses lumpur aktif atau pada *trickling filter*.

Gambar 2.20 Lapisan Lumpur yang Mengendap pada Sedimentasi tipe III

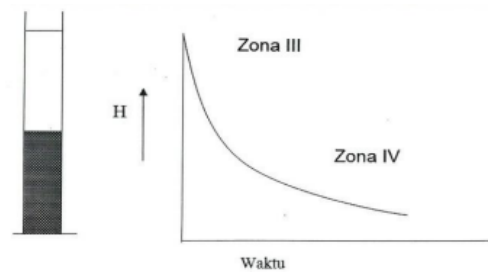


(Sumber: Masduqi & Assomadi, 2016)

Laju pengendapan lumpur biologis dapat ditentukan dengan percobaan laboratorium. Percobaan dilakukan dengan mengendapkan lumpur (misalnya 50 lumpur aktif) pada sebuah kolom berskala agar diketahui ketebalan lumpur pada

waktu-waktu tertentu. Dengan berjalannya waktu, ketebalan lumpur semakin berkurang karena terjadi pemampatan seperti yang terjadi pada grafik di bawah ini. Grafik yang dihasilkan dapat digunakan untuk menentukan dimensi bak sedimentasi atau bak *thickener*.

Gambar 2.21 Pemampatan Lumpur Terjadi Seiring Berjalannya Waktu



(Sumber: Masduqi & Assomadi, 2016)

Waktu tinggal lumpur di *clarifier* biasanya berkisar antara 1–2 jam, berdasarkan rata-rata aliran harian. Kedalaman *clarifier* umumnya mencapai 10–15 kaki (3–4,6 meter), sementara ketebalan lapisan lumpur (*sludge blanket*) biasanya kurang dari 2 kaki (0,6 meter). *Secondary clarifier* merupakan bagian integral dari sistem lumpur aktif, dengan peran utama memisahkan lumpur dari air limbah yang telah diproses dalam reaktor biologis.

Zona Settling

- Debit bak clarifier (Q)

$$MLSS \text{ dibuang} = \frac{P \times MLSS}{\text{berat jenis lumpur}}$$

$$Q_{in \text{ clarifier}} = (Q + Q_r) - MLSS \text{ dibuang}$$

Keterangan :

$Q_{in \text{ Clarifier}}$ = debit masuk pada bak (m^3 /hari)

Q_r = Debit resirkulasi (m^3 /hari)

Q = Debit limbah (m^3 /hari)

- Luas Area *Surface* (AS)

$$AS = \frac{Q}{\text{over flow rate}}$$

Keterangan :

AS = Luas area *surface* (m^2)

Q = Debit limbah (m³ /hari)

Over *flow rate* = Volume aliran per luas area (m³ /m² .hari)

- Diameter Bak (D)

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

Keterangan :

D = diameter bak (m)

π = 3,14

- Diameter *Inlet Wall* (D')

$$D' = (15\% - 20\%) \times D$$

Keterangan:

D = Dimensi bak (m)

D' = Diameter *inlet wall* (m)

- Volume Bak *Clarifier*

$$V = Q \times td$$

Keterangan:

V = Volume bak *clarifier* (m³)

Q = Debit air limbah (m³ /hari)

td = Waktu detensi (detik)

- Kedalaman Zona *Settling* (H *settling*)

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

Keterangan :

H *settling* = Kedalaman zona *settling* (m)

V = Volume bak *clarifier* (m³)

A = Luas area *surface* (m²)

$$H \text{ total} = H \text{ settling} + fb$$

Keterangan :

H total = Kedalaman total bak *clarifier* (m)

H *settling* = Kedalaman zona *settling* (m)

fb = *Freeboard* (5-30% × H)

- Kecepatan pengendapan (V_s)

$$V_s = \frac{H_{tot}}{td}$$

Keterangan :

V_s = Kecepatan pengendapan partikel (m/s)

H_{tot} = Kedalaman zona *settling* (m)

td = Waktu detensi (detik)

(Sumber: *Metcalf & Eddy, Waste Water Engineering Treatment & Reuse, 4th Edition, page 368*)

- Diameter partikel (D_p)

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

Keterangan:

D_p = Diameter partikel (m)

v_s = Kecepatan pengendapan (m/s)

v = Viskositas kinematis ($0,8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

g = Percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

sg = Spesifik *gravity*

- Cek bilangan Reynold

$$NRe = \frac{\rho_s \times D_p \times v_s}{\mu}$$

Keterangan :

Nre = Bilangan *Reynold*

D_p = Diameter partikel (m)

V_s = Kecepatan pengendapan (m/s)

μ = Viskositas absolut (N.s/m^2)

ρ_s = Massa jenis partikel (kg/m^3)

(Sumber: *Reynolds, Tom D. and Paul A. Richards. 1996. Unit Operations and Processes in Environmental Engineering 2nd edition, page 224. Boston: PWS Publishing Company*)

- Kecepatan horizontal (V_h)

$$V_h = \frac{Q_{in}}{\pi \times D \times H}$$

Keterangan:

V_h = Kecepatan horizontal (m/s)

Q_{in} = Debit air limbah (m^3/s)

D = Diameter bak *clarifier* (m)

H = Kedalaman bak (m)

- Jari-jari hidrolis (R)

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

Keterangan :

R = Jari-jari hidrolis (m)

r = Jari-jari bak *clarifier* (m)

H = Kedalaman bak *clarifier* (m)

- Cek bilangan *Froude*

$$N_{fr} = \frac{V_h}{\sqrt{g \times H}}$$

Keterangan:

N_{fr} = Bilangan *froude*

v_h = Kecepatan horizontal (m/s)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

H = Kedalaman bak (m)

- Cek penggerusan / kecepatan *scouring* (V_{sc})

$$V_{sc} = \sqrt{\frac{\sqrt{8k}(Sg - 1) \times g \times D_p}{\lambda}}$$

Keterangan :

λ = Faktor gesekan hidrolis

k = Konstanta kohesi partikel yang saling mengikat (0,06)

D_p = Diameter partikel (m)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

Sg = Spesifik gravity

Zona Thickening

- MLVSS dalam clarifier

$$MLVSS\ AS = 30\% \times MLVSS\ total$$

$$MLVSS\ clarifier = MLVSS\ total - MLVSS\ AS$$

Keterangan :

MLVSS AS = MLVSS dari bioreaktor AS (mg/L)

MLVSS total = MLVSS total dari bioreaktor AS (mg/L)

MLVSS *clarifier* = MLVSS di dalam *clarifier* (mg/L)

- Massa solid total *clarifier*

$$M\ solid\ total = MLVSS\ clarifier \times V\ clarifier$$

Keterangan :

M solid total = Massa solid total dalam *clarifier* (kg)

MLVSS *clarifier* = MLVSS di dalam *clarifier* (mg/L)

V *clarifier* = Volume *clarifier* (m³)

- Kedalaman zona *thickening*

$$H = \frac{M\ solid\ total}{X \times A}$$

Keterangan:

M solid total = massa solid total dalam *clarifier* (kg)

X = MLSS dari bioreaktor AS (mg/L)

A = Luas penampang *clarifier* (m²)

Zona Sludge

- Total lumpur yang terkumpul

$$T_L = Px \times t$$

Keterangan:

T_L = Total lumpur yang terkumpul (kg)

Px = Lumpur yang dihasilkan dari bioreaktor AS
(kg/hari)

T = Waktu pengurasan (hari)

- Total massa lumpur pada *clarifier*

$$T_{ML} = T_L + m \text{ solid total}$$

Keterangan:

T^{ML} = Total massa lumpur pada *clarifier* (kg)

T^L = Total lumpur yang terkumpul (kg)

M solid total = Massa solid total dalam *clarifier* (kg)

- Volume lumpur pada *clarifier*

$$V_L = \frac{T_{ML}}{P_S}$$

Keterangan:

V_L = Volume lumpur pada *clarifier* (m³)

T_{ML} = Total massa lumpur pada *clarifier* (kg)

P_S = Massa jenis solid (kg/m³)

- Debit lumpur

$$Q_L = \frac{V_L}{\text{waktu pengurasan}}$$

Keterangan :

V_L = Volume lumpur pada bak per hari (m³ /hari)

t_d = Lama waktu pengurasan (jam)

- Kedalaman ruang sludge

$$V \text{ ruang lumpur} = \frac{1}{3}H(A + B) + \sqrt{A \times B}$$

Keterangan :

V = Volume ruang lumpur (m³)

H = Kedalaman ruang *sludge* (m)

A = Luas permukaan atas (m²)

B = Luas permukaan bawah (m²)

- Kedalaman total clarifier

$$H \text{ tot} = H \text{ settling} + H \text{ thickening} + H \text{ sludge}$$

Keterangan :

$H \text{ tot}$ = Kedalaman total (m)

$H \text{ settling}$ = Kedalaman zona *settling* (m)

$H \text{ thickening}$ = Kedalaman zona *thickening* (m)

H_{sludge} = Kedalaman zona *sludge* (m)

Zona Outlet

- Panjang pelimpah

$$L = \pi \times D \text{ bak}$$

Keterangan :

L = Panjang pelimpah (m)

D = Diameter bak *clarifier* (m)

- Jumlah V_{notch} setiap pelimpah (*weir*)

$$n = \frac{\text{panjang pelimpah}}{\text{jarak antar } V \text{ notch}}$$

Keterangan :

L_{weir} = Panjang pelimpah (m)

R_{weir} = Jarak antar *weir* (m)

(Sumber: Syed R. Qasim, *Wastewater Treatment and Reuse, Vol 1, Guang Zhu, page: 9-21 9-26, 459-460*)

- Debit air melalui V_{notch}

$$Q_{V \text{ notch}} = \frac{Q_{in}}{n}$$

Keterangan :

$Q_{v \text{ notch}}$ = Debit air melalui V_{notch} (m^3/s)

Q_{in} = Debit air limbah (m^3/s)

N = Jumlah V_{notch}

- Tinggi limpahan V_{notch}

$$Nre = \frac{\rho \times D \times vs}{\mu}$$

Keterangan :

Nre = Bilangan *Reynold*

D = Diameter bak (m)

vs = Kecepatan pengendapan (m/s)

μ = Viskositas absolut ($N.s/m^2$)

ρ = Massa jenis air (kg/m^3)

- Luas permukaan saluran limpahan

$$A = \frac{Q_{in}}{n}$$

Keterangan:

A = Luas permukaan saluran pelimpah (m^2)

Q_{in} = Debit yang masuk (m^3/s)

v = Kecepatan saluran pelimpah (m/s)

- Dimensi saluran pelimpah

$$A = B \times H$$

$$H = H + (H \times \text{freeboard})$$

Keterangan:

A = Luas permukaan saluran pelimpah (m^2)

B = Lebar saluran pelimpah (m)

H = Tinggi pelimpah melalui V notch (m)

Freeboard = (15-20%) kedalaman

2.4.5 Pengolahan Lumpur (*Sludge Treatment*)

Pengolahan lumpur merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari suatu instalasi pengolahan air limbah domestik. Pengolahan lumpur memiliki beberapa tujuan, yakni mengurangi kadar air, menstabilkan, serta menghilangkan mikroorganisme patogen yang berpotensi terkandung di dalam lumpur. Hal ini dilakukan agar lumpur yang telah diproses dapat lebih aman ketika dibuang atau dimanfaatkan untuk keperluan terbatas. Dari pengolahan air limbah maka hasilnya adalah berupa lumpur yang perlu diadakan pengolahan secara khusus agar lumpur tersebut tidak mencemari lingkungan dan dapat dimanfaatkan kembali untuk 30 keperluan kehidupan. *Sludge* dalam disposal *sludge* memiliki masalah yang lebih kompleks. Hal ini disebabkan karena (Metcalf & Eddy et al., 2007):

1. *Sludge* sebagian besar di komposisi dari bahan-bahan yang *responsible* untuk menimbulkan bau.
2. Bagian *sludge* yang dihasilkan dari pengolahan biologis di komposisi dari bahan organik.

Hanya sebagian kecil dari *sludge* yang mengandung solid (0.25% - 12% *solid*). Tujuan utama dari pengolahan lumpur adalah untuk mereduksi kadar lumpur, dan memanfaatkan lumpur sebagai bahan yang berguna seperti pupuk dan sebagai penguruk lahan yang sudah aman. Adapun unit pengolahan lumpur di antaranya adalah *sludge drying bed*. *Sludge drying bed* merupakan suatu bak yang dipakai untuk mengeringkan lumpur hasil pengolahan. Bak ini berbentuk persegi panjang yang terdiri dari lapisan pasir dan kerikil serta pipa *drain* untuk mengalirkan air dari lumpur yang dikeringkan. Waktu pengeringan paling cepat 10 hari dengan bantuan sinar matahari.

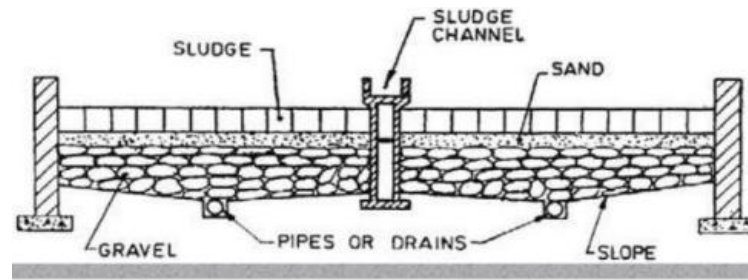
Adapun beberapa teknologi dalam pengolahan lumpur antara lain sebagai berikut:

A. Bak Pengering Lumpur (*Sludge Drying Bed*)

Prinsip bak pengering lumpur yaitu mengeluarkan air lumpur melalui media pengering secara gravitasi dan penguapan sinar matahari. Lumpur yang berasal dari pengolahan air limbah secara langsung tanpa dilakukan proses pemekatan terlebih dahulu dapat dikeringkan dengan bak pengering lumpur. Bak pengering berupa bak dangkal yang berisi media penyaring pasir, batu kerikil sebagai penyangga pasir serta saluran air tersaring (filtrat) di bagian bawah bak. Pada bagian dasar dibuat saluran pembuangan air dan di atasnya diberi lapisan kerikil dan lapisan pasir kasar. 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 et al., 2007).

Gambar 2.22 *Sludge Drying Bed*





(Sumber: <https://wastewater101.net/2018/10/study-time-treatment-plantdiscussion-solids-handling-10/sludge-drying-beds-5-638>)

Tabel 2.7 Kriteria Desain Unit *Sludge Drying Bed*

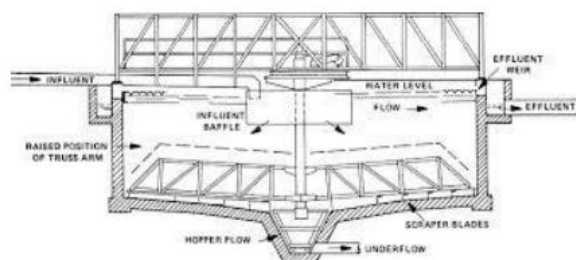
No	Parameter	Nilai	Satuan	Sumber
1	Tebal pasir	23-30	cm	Qasim, 1985
2	Tebal kerikil	20-30	cm	
3	<i>Sludge loading rate</i>	100-300	kg/m ² .tahun	
4	Tebal <i>bed</i>	20-30	cm	
5	Lebar <i>bed</i>	5-8	m	
6	Panjang <i>bed</i>	6-30	m	
7	Waktu pengeringan	10-15	hari	
8	<i>Uniformity coefficient</i>	<4		
9	<i>Effective size</i>	0,3-0,75	mm	
10	V air dalam <i>inlet</i>	0,75	m/detik	
11	V air dalam <i>drain</i>	0,75	m/detik	
12	Tebal lumpur	200-300	mm	
13	Kecepatan pipa <i>underdrain</i>	0,75	m/detik	Metcalf & Eddy

14	Diameter pipa <i>underdrain</i>	>100	Mm	4 th Edition., 2003
15	Koef. keseragaman	<4	-	
16	Ukuran efektif	0,3-0,785	%	
17	<i>Slope</i>	>1	%	
18	Rasio lebar : panjang	6:6-30	-	

B. *Sludge Thickener*

Sludge thickener adalah suatu bak yang berfungsi untuk menaikkan kandungan solid dari lumpur dengan cara mengurangi porsi fraksi cair (air), sehingga lumpur dapat dipisahkan dari air dan ketebalannya menjadi berkurang atau dapat dikatakan sebagai pemekatan lumpur. Tipe *thickener* yang digunakan adalah *gravity thickener* dan lumpur berasal dari bak pengendap I dan pengendap II. Pada sistem *gravity thickener* ini, lumpur diendapkan di dasar bak *sludge thickener*.

Gambar 2.23 *Sludge Thickener*

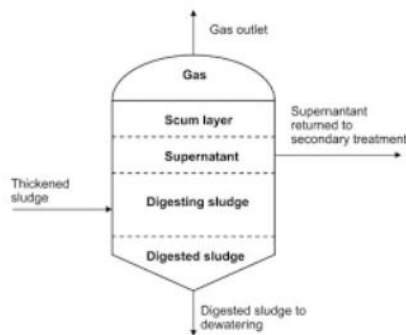


(Sumber: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/sludgethickening>)

C. *Sludge Digester*

Sludge digester berfungsi untuk menstabilkan *sludge* yang dihasilkan dari proses lumpur aktif dengan mengkomposisi organik material yang bersifat lebih stabil berupa anorganik material sehingga lebih aman untuk dibuang.

Gambar 2.24 *Sludge Digester*



(Sumber:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360128508000312>)

D. Belt Filter Press

Sebagian besar jenis *Belt-Filter Press* bekerja dengan mengkondisikan lumpur di saluran gravitasi untuk meningkatkan ketebalan lumpur. Pada tahap ini, banyak air dipisahkan dari lumpur melalui gaya gravitasi. Beberapa unit dilengkapi dengan sistem vakum untuk membantu pemisahan air dan mengurangi bau. Setelah 47 melalui saluran gravitasi, lumpur diproses di bagian tekanan rendah, di mana lumpur diperas di antara kain sabuk berpori. Beberapa unit juga memiliki bagian tekanan tinggi, di mana lumpur ditekan lebih lanjut melalui penggulung untuk mengeluarkan lebih banyak air. Tahap akhir melibatkan pengeringan lumpur hingga membentuk *cake* lumpur, yang kemudian dipisahkan dari sabuk menggunakan *scraper blade*.

Sistem operasi *belt-filter press* meliputi beberapa komponen utama, seperti pompa penyedot lumpur, peralatan polimer, tangki flokulasi lumpur (flokulator), *belt-filter press*, *conveyor* untuk *cake* lumpur, serta sistem pendukung seperti kompresor dan pompa pencuci. Namun, beberapa unit tidak menggunakan tangki flokulasi lumpur. Kinerja *belt-filter press* dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk karakteristik lumpur, metode dan kondisi penggunaan bahan kimia, tekanan, konfigurasi mesin (saluran gravitasi), porositas sabuk, kecepatan sabuk, dan lebar sabuk. Alat ini sangat sensitif terhadap variasi karakteristik lumpur, yang dapat mempengaruhi efisiensi pengeringannya. Oleh karena itu, fasilitas yang dapat mencampur lumpur dengan karakteristik beragam harus dipertimbangkan dalam

desain sistem. Namun, biaya operasional yang tinggi sering menjadi tantangan, sehingga upaya meningkatkan konsentrasi padatan lumpur dilakukan untuk meningkatkan efisiensi pengeringan *cake* lumpur.

Gambar 2.25 Belt Filter Press



(Sumber : <https://www.sludgeprocessing.com/process-and-operation/thickening-dewatering-drying/dewatering/belt-filter-presses/>)

2.4.6 Aksesoris Perancangan Bangunan

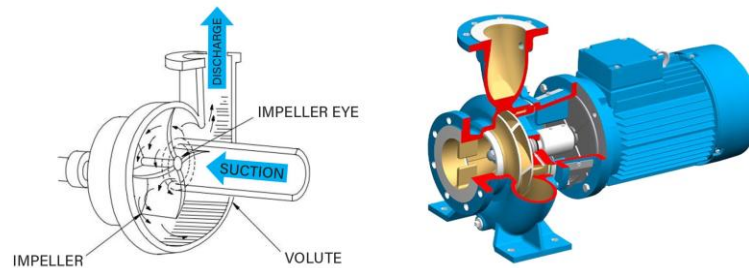
A. Pompa

Pompa merupakan suatu alat yang digunakan untuk memindahkan suatu cairan dari satu tempat ke tempat yang lain dengan cara menaikkan tekanan cairan tersebut. Kenaikan tekanan cairan digunakan untuk mengatasi hambatan pengaliran yang berupa perbedaan tekanan, ketinggian, atau hambatan gesek. Pada prinsipnya pompa dapat mengubah energi mekanik menjadi energi aliran fluida, energi yang diterima oleh fluida akan digunakan untuk menaikkan tekanan dan mengatasi tahanan yang terdapat pada saluran yang dilalui. Pompa memiliki dua kegunaan, yaitu untuk memindahkan cairan dari suatu tempat ke tempat lainnya dan untuk mensirkulasikan cairan sekitar *system*. Pompa sendiri memiliki bermacam-macam jenis, yaitu:

1. Centrifugal Pump

Pompa sentrifugal merupakan pompa *non positive* displacement yang menggunakan gaya sentrifugal untuk menghasilkan *head* untuk memindahkan zat cair. Pompa ini memiliki konstruksi yang membuat aliran fluida yang keluar dari *impeller* akan melalui sebuah bidang tegak lurus poros pompa.

Gambar 2.26 Centrifugal Pump



(Sumber : <https://www.gibbonsgroup.co.uk/media/blog/5-golden-rules-of-centrifugal-pump-maintenance/>)

2. Rotary Pump

Rotary Pump, adalah pompa yang menggerakkan fluida dengan menggunakan prinsip rotasi. Vakum terbentuk oleh rotasi dari pompa dan selanjutnya menghisap fluida masuk. Keuntungan dari pompa ini adalah efisiensi yang tinggi karena secara natural dapat mengeluarkan udara dari pipa alirannya, serta dapat mengurangi kebutuhan pengguna untuk mengeluarkan udara tersebut secara manual. Dan untuk kelemahan dari pompa ini adalah apabila pompa bekerja pada kecepatan yang terlalu tinggi, maka fluida kerjanya justru dapat menyebabkan erosi pada sudut-sudut pompa.

Gambar 2.27 Rotary Pump



(Sumber : <https://www.iwakupumps.jp/en/products/rotary/>)

3. Gear Pump

Gear Pump, merupakan jenis pompa roda gigi positif yang dapat memindahkan cairan dengan berulang kali menutup volume tetap menggunakan roda gigi yang saling mengunci, dan mentransfernya secara mekanis

menggunakan pemompaan siklik yang memberikan aliran pulsa-halus mulus sebanding dengan kecepatan rotasi gir-nya.

Gambar 2.28 Gear Pump

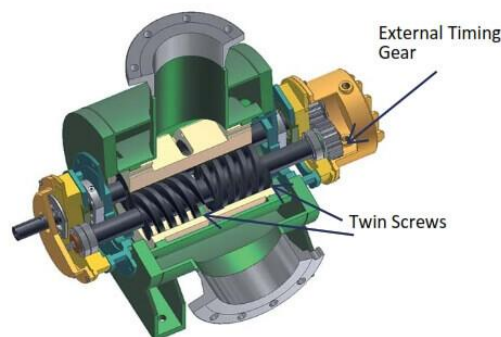


(Sumber : <https://www.saikenpumps.com/Stainless-steel-Gear-Pump/Stainless-Steel-Gear-Pump-with-PEEK-gear.html>)

4. *Screw Pump*

Screw Pump merupakan pompa yang digunakan untuk menangani cairan yang mempunyai viskositas tinggi, heterogen, sensitif terhadap geseran dan cairan yang mudah berbusa. Prinsip kerja *Screw* ditemukan oleh seorang engineer prancis bernama *Rene Moineau*, sehingga sering disebut juga dengan *Moineau pump*.

Gambar 2.29 Screw Pump



(Sumber : https://www.northridgepumps.com/article-233_screw-pump-guide)

B. *Blower*

Blower merupakan sebuah mesin atau alat yang digunakan untuk menaikkan atau memperbesar tekanan udara atau gas yang akan dialirkan dalam suatu ruangan

dan juga berfungsi sebagai pengisapan atau pemvakuman udara atau gas tertentu. Umumnya blower merupakan mesin yang memampatkan udara atau gas oleh gaya sentrifugal ke tekanan akhir yang melebihi dari 40 psig. Menurut klasifikasinya blower dibagi menjadi 2 jenis, yaitu:

1. *Blower Sentrifugal*

Pada dasarnya *blower* sentrifugal terdiri dari satu *impeller* atau lebih yang dilengkapi dengan sudu – sudu yang dipasangkan pada poros yang berputar dan diselubungi rumah (*casing*). *Blower* sentrifugal ini memanfaatkan udara *inlet blower* lalu diputar ke arah sumbu yang berlawanan oleh gaya sentrifugal ke arah *outlet blower*. *Blower* ini memiliki *impeller* yang dapat berputar hingga 15.000 rpm. *Blower* sentrifugal dapat beroperasi melawan tekanan 0,35 sampai 0,70 kg/cm².

Gambar 2.30 *Blower Sentrifugal*



(Sumber : [https://indonesian.hvac-fanmotor.com/china-light weight 650w centrifugal blower fan 6 inch 8 inch centrifugal fan blower-8082998.html](https://indonesian.hvac-fanmotor.com/china-light-weight-650w-centrifugal-blower-fan-6-inch-8-inch-centrifugal-fan-blower-8082998.html))

2. *Blower Positive Displacement*

Blower Positive Displacement merupakan *blower* yang memiliki rotor yang menjebak udara dan mendorongnya melalui rumah *blower*. *Blower* ini menyediakan volume udara yang konstan bahkan jika tekanan system nya bervariasi. *Blower* ini berputar lebih pelan daripada blower sentrifugal hanya 3.600 rpm. Dan sering digerakkan oleh *belt* untuk memfasilitasi perubahan kecepatan.

Gambar 2.31 *Blower Positive Displacement*



(Sumber : <https://esp-richmond.com/5-ways-to-maintain-your-positive-displacement-blower/>)

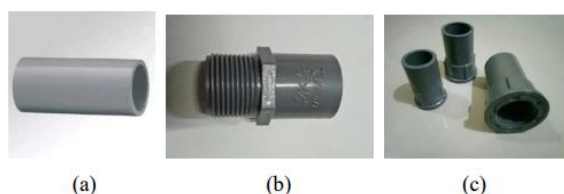
C. Aksesoris Pipa

Dalam membangun sebuah sistem jaringan saluran air yang ideal maka dibutuhkan dukungan aksesoris pipa yang tepat. Fungsi dari aksesoris pipa adalah untuk membangun jalur belokan, membangun jalur percabangan, mendukung metode penyambungan, dan menyambung antar pipa. Adapun aksesoris yang dimiliki pipa terdiri dari

1. *Shock* pipa/socket

Merupakan aksesoris untuk menyambung pipa yang bertujuan untuk memperpanjang pipa dengan menyambung lurus satu pipa dengan pipa lainnya. Aksesoris ini biasa digunakan untuk menyambung pipa dengan diameter yang sama, dengan ulir yang berada di dalam. *Shock* pipa terbagi menjadi beberapa jenis seperti:

Gambar 2.32 Jenis *Shock* Pipa



(a) *shock* pipa polos (b) *shock* pipa drat luar (c) *shock* pipa drat dalam

(Sumber: <https://mengalirjauh.blogspot.com/2019/04/mengenal-jenis-jenis-aksesoris-pipa-pvc.html>)

- *Shock* pipa PVC polos

Aksesoris ini digunakan untuk menyambung dua pipa PVC dengan ujungnya tidak ada ulir atau drat.

- *Shock* pipa drat luar

Pada kedua ujung *shock*nya memiliki ulir/drat. *Shock* pipa jenis ini biasanya dikombinasikan dengan *shock* pipa drat dalam.

- *Shock* pipa drat dalam

Pada kedua ujung *shock*nya memiliki ulir/drat. *Shock* pipa jenis ini biasanya dikombinasikan dengan *shock* pipa drat luar maupun konektor penyambung selang.

2. *Elbow*

Elbow merupakan aksesoris perpipaan yang memiliki bentuk mirip dengan huruf “L” atau berbentuk siku (*Elbow*). Aksesoris ini berfungsi untuk membelokkan aliran. Aksesoris ini memiliki kombinasi sudut bervariasi yang paling sering dipakai adalah 90° dan 45°.

Gambar 2.33 *Elbow*



(Sumber : <https://id.aliexpress.com/item/4000021857235.html>)

3. *Tee*

Tee merupakan aksesoris pipa yang berfungsi untuk membagi aliran 53 lurus menjadi dua arah, ke kanan dan kiri. Seperti namanya aksesoris *tee* berbentuk seperti huruf “T” , namun ada beberapa kasus *Tee* berbentuk seperti huruf “Y”, banyak orang menyebutnya *Y-Branch*.

Gambar 2.34 *Tee*



(a) Tee bentuk T (b) Y branch

(Sumber : <https://www.bhinneka.com/rucika-y-branch-d-y-3-inch-sku3326825976>)

4. Reducer

Reducer merupakan aksesoris pipa yang berfungsi untuk menyambung dua pipa dengan diameter berbeda. *Reducer* ini terbagi menjadi dua tipe, yakni *reducer elbow* untuk membelokkan aliran dan *reducer socket* untuk memperpanjang pipa dengan sambungan lurus.

Gambar 2.35 Reducer



(Sumber : <https://uk.misumi-ec.com/vona2/detail/110302212910/>)

5. Dop/plug/cap/clean out

Dop/plug/cap/clean out, merupakan aksesoris pipa yang berfungsi untuk menutup saluran pipa pada ujung pipa yang tidak dihubungkan lagi. *Cap* adalah penutup yang lebih simpel dari yang lain, *Plug* adalah penutup yang sangat rapat dengan sistem ulir/drat, *clean out* adalah penutup yang dapat ditutup dan dibuka sesuka hati. Namun kebanyakan kontraktor memilih untuk menutup ujung pipa dengan kran, agar sewaktu waktu ujung pipa dapat digunakan dan bermanfaat.

Gambar 2.36 Plug Pipa



(Sumber : <https://www.indiamart.com/proddetail/pvc-pipe-plug-16895420588.html>)

2.5 Persen *Removal*

Pada unit bangunan pengolah air limbah terdapat parameter yang akan diproses di dalamnya. Setiap bangunan mengolah parameter yang berbeda sehingga memiliki *Removal* yang berbeda. Persen *Removal* berarti besar persentase penghilangan dan / atau pembersihan dan / atau penghapusan nilai atau jumlah parameter dalam satuan persen (%). Besar persen *Removal* unit pengolahan air limbah industri tekstil dapat dilihat pada tabel 2.10 berikut.

Tabel 2.8 Persen *Removal* Unit Pengolahan Limbah

Unit Pengolahan	% <i>Removal</i>	Sumber
<i>Pre Treatment</i>		
Saluran Pembawa & Bar <i>Screen</i>	-	-
Bak Penampung	-	-
<i>Primary Treatment</i>		
Koagulasi - Flokulasi	-	-
Flotasi	-	
<i>Skimmer</i>	TSS : 50-85%	Cavaseno, Industrial Wastewater and Solid Waste Engineering, page 14)
Bak ekualisasi	-	-
<i>Secondary Treatment</i>		
<i>Activated Sludge</i>	COD : 50-95% BOD : 80-99%	Cavaseno, Industrial Waste water and solid Waste engineering, page 15
<i>Clarifier</i>	TSS : 60-80%	Huisman, L. (1977). Sedimentation and Flotation Mechanical Filtration.

		Hal 12
	MLSS : 97%	Reynold 2rd edition, page 246

2.6 Profil Hidrolis

Profil hidrolis disajikan secara grafis “*hidrolik grade line*” dalam instalasi pengolahan untuk menyatakan elevasi unit pengolahan (*influen - effluen*) dan perpipaan. Hal ini dilakukan untuk memastikan aliran air dapat mengalir secara gravitasi, mengetahui kebutuhan pompa, dan untuk menghindari terjadinya banjir atau luapan air akibat aliran balik.

Hal-hal yang harus diperhatikan dalam membuat profil hidrolis adalah sebagai berikut:

a. Kehilangan Tekanan Pada Bangunan Pengolahan

Untuk membuat profil hidrolis perlu perhitungan kehilangan tekanan pada bangunan. Kehilangan tekanan akan mempengaruhi ketinggian muka air di dalam bangunan pengolahan. Kehilangan tekanan pada bangunan pengolahan ada beberapa macam, yaitu:

- Kehilangan tekanan pada saluran terbuka
- Kehilangan tekanan pada bak
- Kehilangan tekanan pada pintu
- Kehilangan tekanan pada *weir*, sekat, ambang dan sebagainya harus dihitung secara khusus.

b. Kehilangan Tekanan Pada Perpipaan dan Aksesoris

Kehilangan tekanan pada perpipaan dan aksesoris yang berhubungan dengan bangunan pengolahan adalah sebagai berikut :

- Kehilangan tekanan pada perpipaan
Cara yang mudah dengan monogram “*Hazen William*” Q atau V diketahui maka S didapat dari monogram.
- Kehilangan tekanan pada aksesoris
Cara yang mudah adalah dengan mengekuivalen aksesoris tersebut dengan panjang pipa, di sini juga digunakan monogram untuk mencari panjang ekuivalen sekaligus S .

- Kehilangan tekanan pada pompa

Bisa dihitung dengan rumus, grafik karakteristik pompa serta dipengaruhi oleh banyak faktor seperti jenis pompa, cara pemasangan dan sebagainya.

- Kehilangan tekanan pada alat pengukur flock

Cara perhitungannya juga dengan bantuan monogram.

c. **Tinggi Muka Air**

Kesalahan dalam perhitungan tinggi muka air dapat terjadi kesalahan dalam menentukan elevasi (ketinggian) bangunan pengolahan, dalam pelaksanaan pembangunan, sehingga dapat mempengaruhi pada proses pengolahan. Kehilangan tekanan bangunan (saluran terbuka dan tertutup) tinggi terjunan yang direncanakan (jika ada) akan berpengaruh pada perhitungan tinggi muka air. Perhitungan dapat dilakukan dengan cara:

- Menentukan tinggi muka air bangunan pengolahan yang paling akhir.
- Menambahkan kehilangan tekanan antara bangunan kedua dengan bangunan sebelumnya pada ketinggian muka air pada bangunan kedua.
- Didapat tinggi muka air bangunan sebelum bangunan kedua demikian seterusnya hingga bangunan terakhir.