

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Lumpur Tinja

Lumpur tinja (*septage* atau *faecal sludge*) merupakan kumpulan lumpur, busa, dan cairan yang disedot dari sistem pengolahan secara *on-site sanitation* atau Sistem Pengelolaan Air Limbah Domestik Setempat (SPALD-S) (Metcalf & Eddy, 2003). Menurut Tamakloe (2014), lumpur tinja ialah padatan dari hasil penyimpanan *black water* dan tinja dari berbagai konsentrasi padatan yang mengendap atau materi non-feses lainnya. Berdasarkan Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (1999), lumpur tinja adalah isi tangki septik dan endapan lumpur yang berasal dari bangunan pengolahan air limbah rumah tangga (tangki septik) yang pembersihannya menggunakan mobil atau truk tinja.

Lumpur tinja terdiri atas campuran lumpur dari toilet umum yang tidak mempunyai saluran pembuangan dan lumpur tinja dari tangki septik dengan perbandingan 1:2 (Cofie dkk, 2006). Menurut Hermana (2018), lumpur tinja bukan limbah tinja, karena limbah tinja merupakan buangan dari tubuh manusia yang dihasilkan melalui WC kemudian diolah dalam tangki septik dengan waktu <8 jam. Lumpur tinja dari toilet umum memiliki kondisi kurang segar dikarenakan penyimpanan sebelum pengumpulan (dari beberapa hari hingga 2 minggu), menunjukkan konsentrasi organik dan padatannya yang tinggi (Cofie dkk, 2006). Tinja terdiri atas sebagian besar pasir dan minyak yang bersifat bau yang tajam, berbusa jika diaduk, konsentrasi zat padat dan organik tinggi, sukar mengendap dan dipisahkan cairannya (Putri, 2015).

2.1.1 Karakteristik Lumpur Tinja

Karakteristik lumpur tinja sangat bervariasi, ini dapat disebabkan antara lain jumlah pemakai, kebiasaan makan dan minum pemakai, sumber lumpur tinja (tangki septik/cubluk), desain dan ukuran tangki septik, kondisi cuaca dan iklim, dan lain-lain (Putri, 2015). Berdasarkan Kementerian Pekerjaan Umum &

Perumahan Rakyat (2018), hasil pengambilan sampel lumpur tinja beberapa lokasi di Indonesia, lumpur tinja di Indonesia mempunyai karakteristik seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Karakteristik Lumpur Tinja di Indonesia

Parameter	Besaran
pH	7 - 7,5
BOD (mg/l)	2.000 - 5.000
COD (mg/l)	6.000 - 15.000
<i>Total Solid</i> (mg/l)	14.000 - 24.000
<i>Total Suspended Solid</i> (mg/l)	10.000 - 20.000
<i>Sludge Volume Index</i> (mg/l)	31 - 40
Amonia (mg/l)	100 - 250
Minyak dan Lemak (mg/l)	1.000 - 2.000
Total Koliform	1.600.000 - 5.000.000
Fosfat (mg/l)	8 - 20

Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018)

Sedangkan sebagai pembandingan lumpur tinja yang ada di Indonesia, didapatkan data hasil pengujian karakteristik lumpur tinja di Asia Tenggara, Asia Selatan, dan Afrika selama 30 tahun seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Karakteristik Lumpur Tinja di Negara Tropis

	Tipe A (Konsentrasi pencemar tinggi)	Tipe B (Konsentrasi pencemar rendah)	Air Limbah Domestik (Sebagai Perbandingan)
Karakteristik	Kepekatan lumpur tinja tinggi, mengandung lumpur tinja yang belum terolah dan sebagian terolah. Periode pengolahan 2-4 minggu.	Konsentrasi lumpur tinja tidak terlalu tinggi. Padatan lumpur tinja umumnya telah mengendap di tangki septik selama beberapa tahun.	
COD (mg/l)	20.000 - 50.000	<15.000	500 - 2.500
COD/BOD	5:1	10:1	2:1
NH ₄ -N (mg/l)	2.000 - 5.000	<1.000	30 - 70

		Tipe A (Konsentrasi pencemar tinggi)	Tipe B (Konsentrasi pencemar rendah)	Air Limbah Domestik (Sebagai Perbandingan)
<i>Total</i>	<i>Solid</i>	≥3,5%	<3%	<1%
<i>(mg/l)</i>				
<i>Total</i>		≥30.000	≥7.000	200 - 700
<i>Suspended Solid (mg/l)</i>				
Telur	Cacing	20.000 - 60.000	≥4.000	300 - 2.000
<i>(No./L)</i>				

Sumber: Heinss dalam Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018)

2.1.2 Komposisi Lumpur Tinja

Komposisi tinja dan urin manusia disajikan pada Tabel 2.3. Tinja dan urin manusia memiliki bahan organik yang tinggi, antara lain: karbohidrat, protein, dan lemak. Karbohidrat dan protein membentuk pola makan yang baik untuk bakteri, sehingga sering dimanfaatkan untuk pengolahan mikrobiologi air limbah. Sedangkan, urin mengandung jutaan bakteri usus dan sedikit organisme lainnya yang sebagian besar tidak berbahaya (lebih dimanfaatkan) tetapi sebagian kecil dapat menyebabkan penyakit (Gotaas dalam Mara, 2004).

Tabel 2.3 Komposisi Tinja dan Urin Manusia

	Feses	Urin
Kuantitas		
Basah (g/orang/hari)	135 - 270 g	1,0 - 1,3 kg
Padatan Kering (g/orang/hari)	35 - 70 g	50 - 70 g
Komposisi dari berat kering (%)		
Air	66 - 80	93 - 96
Bahan Organik	88 - 97	65 - 85
Nitrogen	5,0 - 7,0	15 - 19
Fosfor (sebagai P ₂ O ₅)	3,0 - 5,4	2,5 - 5,0
Potasium (sebagai K ₂ O)	1,0 - 2,5	3,0 - 4,5
Karbon	44 - 55	11 - 17
Kalsium (sebagai CaO)	4,5	4,5 - 6,0

Sumber: Mara (2004)

2.1.3 Parameter Lumpur Tinja

Menurut Metcalf & Eddy (2003), karakteristik air limbah domestik terdiri atas fisik, kimia, dan biologis. Parameter analisis kualitas lumpur tinja merupakan termasuk dari parameter air limbah domestik. Parameter ini dimaksudkan sebagai acuan untuk melihat kualitas lumpur tinja yang telah diolah melalui IPLT (Sulistia & Septisya, 2020). Adapun beberapa parameter dari lumpur tinja antara lain:

1. Derajat Keasaman (pH)

pH merupakan ukuran untuk menentukan sifat asam dan basa dari suatu larutan (Purwatinigrum, 2018). pH adalah parameter yang penting dalam pemeriksaan lumpur tinja karena dapat mempengaruhi stabilisasi biologi. pH pada lumpur tinja berkisar 6,5 - 8 (Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat, 2018b).

2. *Chemical Oxygen Demand* (COD)

COD adalah jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi zat-zat organik dalam 1 liter sampel air menggunakan oksidator $K_2Cr_2O_7$ sebagai sumber oksigen (Metcalf & Eddy, 2003). Berdasarkan Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018), parameter COD mengindikasikan kandungan organik pada lumpur tinja baik terdegradasi secara biologis maupun non-biologis.

3. *Biochemical Oxygen Demand* (BOD)

BOD merupakan jumlah oksigen yang dibutuhkan mikroorganisme untuk mendegradasi bahan organik dalam air limbah (Putra, 2020). Parameter BOD adalah parameter yang mengindikasi terdegradasinya senyawa organik secara biologis dan paling banyak digunakan dalam uji air limbah dan permukaan. Lumpur tinja umumnya memiliki konsentrasi BOD lebih tinggi dari air limbah domestik (Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat, 2018b).

4. Minyak dan Lemak

Menurut Sugiharto dalam Purwatinigrum (2018), minyak dan lemak adalah zat pencemar padatan yang bersifat mengapung di atas permukaan air.

Lumpur tinja mengandung minyak dan lemak yang berasal dari minyak rumah tangga, daging, dan lain-lain yang dapat menurunkan kemampuan mikroba dalam mendegradasi senyawa organik (Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat, 2018). Menurut Sulistia & Septisya (2020), minyak dan lemak memiliki berat jenis lebih kecil dari air sehingga dapat mengurangi konsentrasi oksigen terlarut dalam air.

5. Padatan Total (*Total Solid*)

Konsentrasi padatan total pada lumpur tinja merupakan parameter fisik berupa kandungan bahan padatan dalam air limbah, mulai dari yang mengapung, mengendap, tersuspensi dan terlarut (Putra, 2020; Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat, 2018). Keberadaan padatan dalam air limbah berasal dari padatan pada sumber limbah yang terbawa dan dinyatakan dalam satuan massa padatan per satuan volume air (Masduqi & Assomadi dalam Putra, 2020).

6. Bakteri Koliform

Berdasarkan Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018), bakteri koliform termasuk organisme patogen yang terkandung dalam lumpur tinja berupa bakteri yang ditemukan dalam saluran pencernaan manusia. Dinyatakan pula nilai total koliform sebagai indikator karena berbanding lurus dengan pencemaran air, artinya semakin sedikit kandungan koliform maka kualitas air semakin baik (Sari & Sutrisno dalam Sulistia & Septisya, 2020).

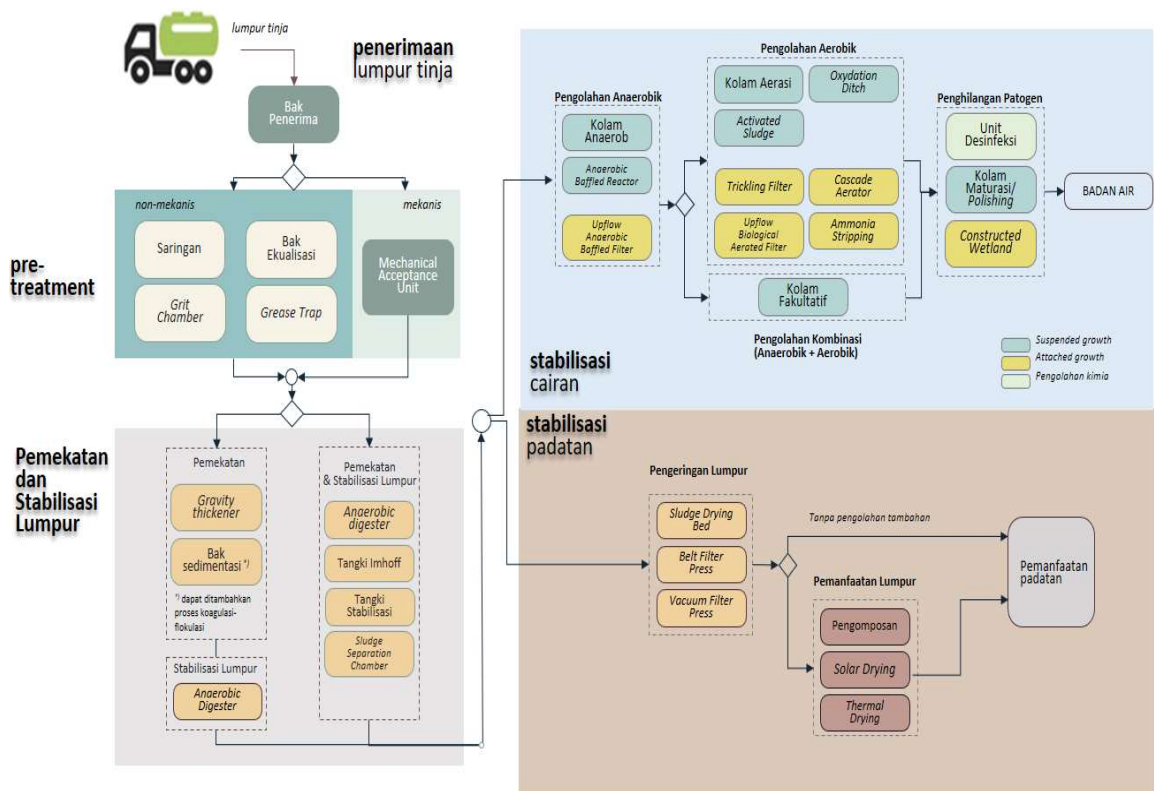
2.2 Bangunan Pengolahan Lumpur Tinja

Tangki septik merupakan unit pengolahan awal lumpur tinja, yang kemudian akan dibawa atau angkut dengan truk tinja dan dilanjutkan pengolahan lumpur tinja ke Instalasi Pengolahan Lumpur Tinja (IPLT). Menurut Fair dkk dalam Putri (2015), Produk akhir dari suatu pengolahan air limbah terdiri dari air efluen (cairan) dan lumpur atau *cake* (padatan). Berdasarkan penjelasan Oktarina & Haki (2013), pengolahan lumpur tinja ini dilakukan dengan tujuan utama, yaitu:

1. Menurunkan kandungan zat organik dari lumpur tinja; dan

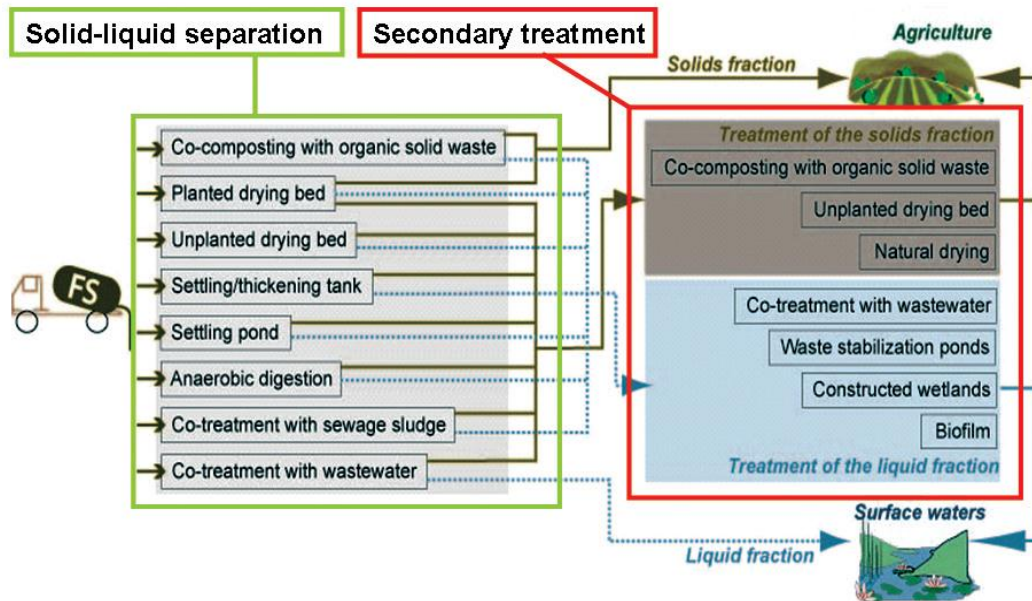
- Menurunkan kandungan mikroorganisme patogen (bakteri, virus, jamur, dan lain-lain).

Pengolahan lumpur tinja bisa menjadi proses yang rumit dikarenakan beberapa desain unit pengolahan yang berbeda bisa digunakan, seperti menggunakan pengolahan fisik, biologis, dan kimiawi, dan kombinasi yang berbeda (Christie dalam Tamakloe, 2014). Lumpur tinja membutuhkan pemisahan padatan dan cairan. Pemisahan padatan dan cairan dilakukan melalui sedimentasi dan penebalan di kolam atau tangki, juga melalui penyaringan dan pengeringan di kolam pengeringan lumpur. Fraksi padat dan cair yang dihasilkan keduanya membutuhkan pengolahan lebih lanjut (Tamakloe, 2014). Gambar 2.1 berikut menunjukkan teknologi-teknologi pengolahan lumpur tinja yang umum digunakan di Indonesia dan Gambar 2.2 menampilkan diagram bagaimana setelah pemisahan padatan dan cairan lumpur tinja dapat diproses atau digunakan lebih lanjut.



Gambar 2.1 Teknologi Pengolahan Lumpur Tinja

Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018)



Gambar 2.2 Opsi Potensial Pengelolaan Lumpur Tinja

Sumber: Strauss dkk dalam Tamakloe (2014)

Dalam Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018), pemilihan unit teknologi untuk mengolah lumpur tinja dilaksanakan berdasarkan tahapan yang meliputi:

1. Unit Penerima dan Pengolahan Pendahuluan;
2. Unit Pemekatan dan Stabilisasi Lumpur;
3. Unit Stabilisasi Cairan;
4. Unit Stabilisasi Padatan;

2.2.1 Unit Penerima dan Pengolahan Pendahuluan

Tahap pertama dalam mengolah lumpur tinja yaitu unit penerima dan pengolahan pendahuluan. Pemilihan unit proses biasanya didasarkan pada karakteristik aliran influen yang diharapkan (Spellman, 2013). Tujuan pengolahan ini untuk mengondisikan lumpur tinja agar dapat diterima oleh unit pengolahan selanjutnya. Teknologi pengolahan pendahuluan pada lumpur tinja yang digunakan alternatif pada perancangan ini terdiri atas: *bar screen*, *grease trap*, dan *equalization tank* atau bak ekualisasi.

1. Unit Penerima dan *Manual Bar Screen*

Unit penyaringan atau *bar screen* memiliki tujuan untuk menahan sampah dan benda padat yang berukuran besar (seperti: plastik, kain, kayu, dan kerikil) yang masuk bersama lumpur tinja. Unit ini terdiri dari rangkaian batang dan/atau pelat berlubang (*perforated plate*), serta bukaannya dapat berbentuk lingkaran, persegi panjang, dan persegi (Qasim & Zhu, 2017). Berdasarkan jarak antar batang (bar/kisi), unit penyaringan dibagi menjadi 3 jenis yaitu saringan kasar (terdiri atas manual *bar screen* dan mekanikal *bar screen*), saringan halus (terdiri atas *static wedgewire*, *step*, *traveling band*, dan *drum*) dan saringan mikro. Saringan halus (*fine screen*) memiliki jarak antar kisi 0,5–6 mm, saringan kasar (*coarse screen*) memiliki jarak antar kisi 6–75 mm, dan saringan mikro (*microscreen*) memiliki jarak antar kisi <0,5 mm (Metcalf & Eddy, 2014; Qasim & Zhu, 2017). Dalam pengolahan lumpur tinja di Indonesia, jenis *screen* yang banyak digunakan yaitu jenis saringan kasar dengan tipe *manual bar screen*. Kelebihan dan kekurangan unit *manual bar screen* dapat dilihat pada tabel 2.4.

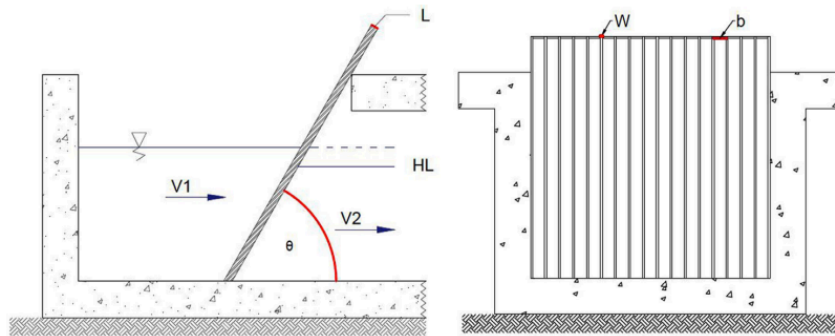
Tabel 2.4 Kelebihan dan Kekurangan Unit *Manual Bar Screen*

Kelebihan	Kekurangan
<ul style="list-style-type: none">• Mudah dioperasikan;• Tidak membutuhkan operator dengan keahlian khusus.	<ul style="list-style-type: none">• Dapat menimbulkan bau dan mengundang alat akibat sampah yang tertahan pada penyaring;• Pembersihan harus dilakukan secara manual dan berkala.

Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018)

Unit *manual bar screen* dapat digunakan pada instalasi pengolahan dengan debit influen relatif kecil maupun besar. Cara kerja unit ini yaitu lumpur tinja yang masuk dari unit inlet akan melewati unit *manual bar screen* yang umumnya terdiri dari kisi atau batang yang disusun berjajar untuk masuk ke unit pengolahan selanjutnya. Sampah-sampah berukuran besar yang ada dalam lumpur tinja akan tertahan pada *bar screen*, kemudian akan dilakukan pembersihan karena jika dibiarkan menumpuk dalam unit tersebut, maka menyebabkan tersumbat dan mengganggu proses. Pembersihan *manual bar*

screen dilaksanakan memakai sikat besi dengan gigi-gigi yang disesuaikan dengan jarak antar bar (Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat, 2018). Pada teknologi ini tidak terdapat persen removal pada parameter tertentu. Untuk kriteria desain unit *manual bar screen* dapat dilihat pada tabel 2.5.



Gambar 2.3 Unit *Bar Screen*

Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018)

Tabel 2.5 Kriteria Desain Unit *Manual Bar Screen*

Parameter	Satuan	Nilai
Kecepatan aliran lewat bukaan, v	m/detik	0,3 - 0,6
Lebar kisi, d	mm	4 - 8
Jarak antar kisi, r	mm	25 - 75
Kemiringan horizontal, θ	derajat	45 - 60
Headloss non- <i>clogging</i> , h_L	mm	150
Headloss saat <i>clogging</i> , h_L	mm	800

Sumber: Qasim & Zhu (2017:7-8)

Berdasarkan Qasim & Zhu (2017), untuk mengitung desain unit *manual bar screen* dilakukan tahap sebagai berikut:

- Lebar *screen*:

$$L_{screen} = n_{bukaan} \times r + n_{kisi} \times d \dots\dots (1)$$

Dengan: L_{screen} = Lebar *screen* (m)

n_{bukaan} = Jumlah bukaan (buah)

r = Jarak antar kisi (m)

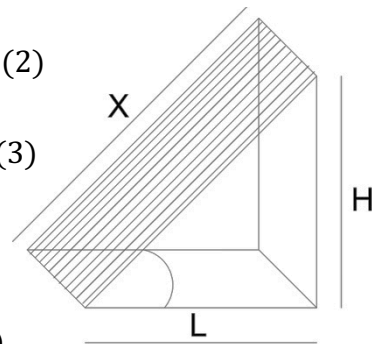
n_{kisi} = Jumlah kisi/bar, $n_{bukaan} - 1$ (buah)

d = Lebar kisi (m)

- Dimensi *bar screen*:

$$X = \frac{H}{\sin \theta} \dots\dots (2)$$

$$L = \frac{H}{\operatorname{tg} \theta} \dots\dots (3)$$



- Dengan: X = Panjang kisi (m)
- L = Panjang *screen* (m)
- H = Tinggi total *screen* (m)
- θ = Kemiringan horizontal (derajat)

- Kecepatan melalui kisi:

$$v_2 = \frac{Q}{n_{bukaan} \times r \times h_{aliran}} \dots\dots (4)$$

- Dengan: v_2 = Kecepatan setelah melalui kisi (m/detik)
- Q = Debit (m³/detik)
- h_{aliran} = Tinggi kedalaman air (m)

- *Headloss* saat non-clogging dan clogging:

$$h_L = \beta \times \left(\frac{W}{b}\right)^{4/3} \times h_v \times \sin \theta \dots\dots (5)$$

$$h_L = \frac{1}{C_d} \times \frac{(v_2)^2 \times (v)^2}{2 \times g} \dots\dots (6)$$

- Dengan: h_L = *Headloss* (m)
- β = Nilai faktor tipe batang
- W = total lebar kisi, $n_{kisi} \times d$ (m)
- b = total lebar bukaan, $n_{bukaan} \times r$ (m)
- h_v = head kecepatan aliran masuk *screen*, $\frac{(v)^2}{2 \times g}$ (m)
- C_d = Koefisien *discharge* (saat non-clogging = 0,7 & saat clogging = 0,6)
- g = Percepatan gravitasi (9,81 m/detik²)

2. Unit *Grease Trap*

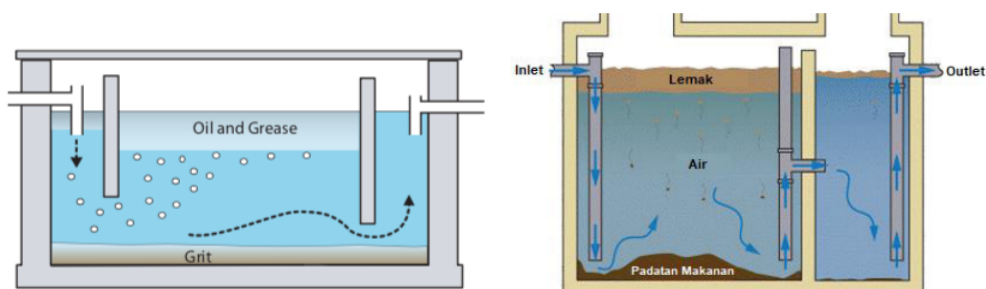
Bak pemisah minyak lemak atau *grease trap* merupakan unit pengolahan pendahuluan yang memiliki tujuan untuk memisahkan lemak atau minyak yang

tersisa, juga mengendapkan kotoran pasir dan sebagainya yang belum terurai secara biologis pada tangki septik (Morel & Diener, 2006). Kandungan minyak atau lemak yang cukup tinggi di dalam air limbah akan menyebabkan terhambatnya proses transfer oksigen di dalam pengolahan biologis yang dapat menyebabkan kinerja dari Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) kurang maksimal (Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, 2011). Umumnya, *grease trap* terdiri dari dua kompartemen. Kompartemen pertama dengan ukuran 2/3 total panjang berfungsi menyisahkan berbagai padatan dalam lumpur tinja ($\rho_{\text{padatan}} > \rho_{\text{air}}$ = padatan akan mengendap, $\rho_{\text{padatan}} < \rho_{\text{air}}$ = padatan akan mengapung, contoh: minyak dan lemak). Sedangkan, kompartemen kedua dengan ukuran 1/3 total panjang berfungsi memastikan minyak lemak tidak terbawa menuju pengolahan selanjutnya (Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat, 2018). Untuk kelebihan dan kekurangan unit *grease trap* dapat dilihat pada tabel 2.6.

Tabel 2.6 Kelebihan dan Kekurangan Unit *Grease Trap*

Kelebihan	Kekurangan
<ul style="list-style-type: none"> Mencegah penyumbatan dan gangguan unit selanjutnya yang diakibatkan oleh minyak dan lemak. 	<ul style="list-style-type: none"> Diperlukan pembersihan scum secara berkala; Menambah kebutuhan lahan.

Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018)



Gambar 2.4 Unit *Grease Trap*

Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018); Morel & Diener (2006)

Menurut Maharani & Tangahu (2017), dalam memisahkan minyak dan lemak, unit *grease trap* bekerja dengan kecepatan lambat. Kecepatan lambat tersebut bermaksud memberikan waktu minyak dan lemak agar terpisah dengan air secara gaya gravitasi. Mekanismenya yaitu, air limbah masuk ke kompartemen pertama, berlangsung proses secara gaya gravitasi kemudian membentuk lapisan minyak dan lemak pada lapisan atas, sedangkan air limbah pada lapisan bawah. Minyak dan lemak yang terbentuk dalam unit tersebut dapat dipisahkan menggunakan pengambilan manual maupun mekanikal. Air limbah lanjut masuk dalam tangki kedua, dengan catatan masih mengandung minyak dan lemak, namun dalam jumlah yang relatif sedikit. Berdasarkan Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018), menyebutkan bahwa unit *grease trap* dapat meremoval 80% minyak dan lemak, juga menurut Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya (2015), dapat unit ini dapat menyisihkan $\pm 95\%$ minyak dan lemak. Untuk kriteria desain unit *grease trap* dapat dilihat pada tabel 2.7.

Tabel 2.7 Kriteria Desain Unit *Grease Trap*

Parameter	Satuan	Nilai
<i>Hydraulic retention time</i> , HRT	menit	15 - 30
Volume min. air limbah yang masuk, V_{min}	liter	200 - 300
Perbandingan panjang & lebar, p:l	-	1,3 - 2,0
Kecepatan aliran, v	m/jam	2 - 6
Interval pengurasan, I_p	hari	<7

Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018:31);

Morel & Diener (2006:22)

Berdasarkan Dinas Lingkungan Hidup Pemerintah Kota Surabaya (2019), untuk mengitung desain unit *grease trap* dilakukan tahap sebagai berikut:

- Massa minyak:

$$M_{minyak} = [minyak lemak]in \times Q \times I_p \dots\dots (7)$$

Dengan: M_{minyak} = Massa minyak (g)

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

I_p = Interval pengurasan (hari)

- Volume minyak:

$$V_{minyak} = M_{minyak} / \rho_{minyak} \dots\dots (8)$$

Dengan: V_{minyak} = Volume minyak (cm^3)

ρ_{minyak} = Massa jenis minyak ($0,8 \text{ g/cm}^3$)

- Ketinggian minyak:

$$H_{minyak} = V_{minyak} / (p \times l) \dots\dots (9)$$

Dengan: H_{minyak} = Ketinggian minyak (cm)

p = Panjang bak (cm)

l = Lebar bak (cm)

- Volume air:

$$V_{air} = Q \times HRT \dots\dots (10)$$

Dengan: V_{air} = Volume air (cm^3)

HRT = *Hydraulic retention time* (hari)

- Ketinggian air dan bak:

$$H_{air} = V_{air} / (p \times l) \dots\dots (11)$$

$$H_{bak} = H_{minyak} + H_{air} \dots\dots (12)$$

Dengan: H_{bak} = Ketinggian bak (cm)

H_{minyak} = Ketinggian minyak (cm)

H_{air} = Ketinggian air (cm)

3. Unit *Equalization Tank* atau Bak Ekualisasi

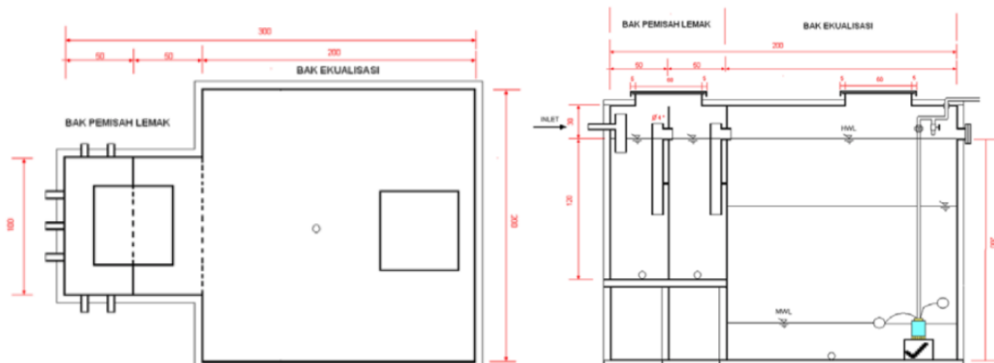
Bak ekualisasi merupakan unit pengolahan yang bertujuan untuk meminimalkan atau mengendalikan fluktuasi karakteristik air limbah agar dapat memberikan kondisi yang optimal untuk proses pengolahan selanjutnya (Eckenfelder, 2001). Dalam pengolahan lumpur tinja, bak ekualisasi berfungsi sebagai pemerata konsentrasi lumpur tinja sebelum diolah ke unit stabilisasi lumpur (Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat, 2018). Selain itu, bak ekualisasi dapat digunakan untuk mengatasi masalah operasional yang disebabkan oleh variasi debit, yang nanti akan tercapai debit yang konstan dalam sejumlah situasi yang berbeda (Metcalf & Eddy, 2014). Dalam prosesnya, bak ekualisasi dibantu dengan *mixing* atau aerasi, biasanya dilakukan untuk

memastikan pemerataan yang memadai dan untuk mencegah padatan yang mengendap pada dasar bak. Beberapa metode yang telah digunakan untuk *mixing* atau aerasi meliputi: distribusi aliran masuk dan penyekat/*baffle*, *mixing* turbin, *diffused air aeration*, *mechanical aeration*, mixer terendam (Eckenfelder, 2001). Dalam bangunan pengolahan lumpur tinja, lumpur tinja yang masuk mempunyai konsentrasi polutan yang berbeda-beda beserta dengan debit influen yang masuk berfluktuasi. Oleh karena itu, bak ekualisasi digunakan demi menyamakan debit serta karakteristik influen lumpur tinja yang masuk, juga mengoptimalkan waktu yang dibutuhkan untuk proses selanjutnya. Untuk kelebihan dan kekurangan unit bak ekualisasi dapat dilihat pada tabel 2.8.

Tabel 2.8 Kelebihan dan Kekurangan Unit Bak Ekualisasi

Kelebihan	Kekurangan
<ul style="list-style-type: none"> • Efisiensi pengolahan akan meningkat juga konsentrasi dan debit influen yang merata; • Menyamakan nilai pH sehingga mengurangi kebutuhan bahan kimia (bila menggunakan bahan kimia pada proses selanjutnya). 	<ul style="list-style-type: none"> • Menambah kebutuhan lahan; • Menambah kebutuhan biaya pengadaan, operasi, dan pemeliharaan; • Berpotensi menimbulkan bau

Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018)



Gambar 2.5 Unit Bak Ekualisasi

Sumber: Kementerian Kesehatan Republik Indonesia (2011)

Agar mencegah terbentuknya padatan tersuspensi dalam dasar bak serta untuk meningkatkan konsentrasi *dissolved oxygen* (DO) dan mengurangi beban organik, dalam proses pemerataan konsentrasi lumpur tinja, bak ekualisasi dibantu menggunakan *baffle* pada titik influen, turbin, aerasi dengan diffuser atau aerator dengan waktu tinggal di dalam bak atau *hydraulic retention time* (HRT) yaitu 4-8 jam (Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat, 2018; Said, 2008). Dalam unit bak ekualisasi, tidak terdapat persen removal untuk parameter tertentu. Untuk kriteria desain unit bak ekualisasi dapat dilihat pada tabel 2.9.

Tabel 2.9 Kriteria Desain Unit Bak Ekualisasi

Parameter	Satuan	Nilai
Kedalaman air minimum, H_{min}	meter	1,5 - 2
Kemiringan, Slope	-	3:1 - 2:1
<i>Hydraulic retention time</i> , HRT	jam	4 - 8

- Untuk air limbah dengan konsentrasi padatan tersuspensi ≥ 210 mg/l, diperlukan pengaduk 0,004-0,008 kW/m³.
- Untuk menjaga kondisi aerobik, dibutuhkan suplai udara 0,01-0,015 m³/m³. menit

Sumber: Metcalf & Eddy (2014:251-252); Said (2008:240)

Berdasarkan Metcalf & Eddy (2014), untuk mengitung desain unit bak ekualisasi dilakukan tahap sebagai berikut:

- Menentukan volume bak ekualisasi berdasarkan volume kumulatif influen lumpur tinja pada setiap jam operasional, dengan cara membuat grafik volume akumulasi lumpur tinja serta menggambarkan garis tangen titik terendah dan tertinggi pada diagram akumulasi volume influen juga sejajar dengan garis tangen rerata.
- Volume lumpur tinja dalam bak ekualisasi:

$$V_{sc} = V_{sp} + V_{ic} - V_{oc} \dots \dots (13)$$

- Dengan: V_{sc} = volume pada suatu periode waktu, m³
 V_{sp} = volume pada akhir periode waktu sebelumnya, m³
 V_{ic} = volume influen selama suatu periode waktu, m³
 V_{oc} = volume efluen selama suatu periode waktu, m³

- Konsentrasi rerata BOD dalam lumpur tinja keluar bak ekualisasi:

$$X_{OC} = \frac{(V_{ic}) (X_{ic}) + (V_{sp}) (X_{sp})}{V_{ic} + V_{sp}} \dots\dots (14)$$

Dengan: X_{oc} = rerata konsentrasi BOD efluen setelah suatu periode waktu, mg/l

X_{ic} = rerata konsentrasi BOD influen, mg/l

X_{sp} = konsentrasi BOD air limbah pada akhir periode waktu sebelumnya, mg/l

2.2.2 Unit Pemekatan dan Stabilisasi Lumpur

Tahap kedua dalam mengolah lumpur tinja yaitu unit pemekatan lumpur dan stabilisasi lumpur. Tahap ini memiliki tujuan untuk memisahkan fase padatan dan cairan, serta mereduksi bakteri patogen juga mengontrol proses pembusukan materi organik. Terdapat beberapa teknologi yang dapat digunakan pada proses pemekatan dan stabilisasi lumpur, antara lain tangki *imhoff*, *anaerobic sludge digester*, *gravity thickener*, dan *solid separation chamber* (Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat, 2018). Namun dalam alternatif perancangan lumpur tinja ini, unit pemekatan dan stabilisasi lumpur yang digunakan yaitu unit *solid separation chamber* (SSC).

1. Unit *Solid Separation Chamber* (SSC) dan *Drying Area* (DA)

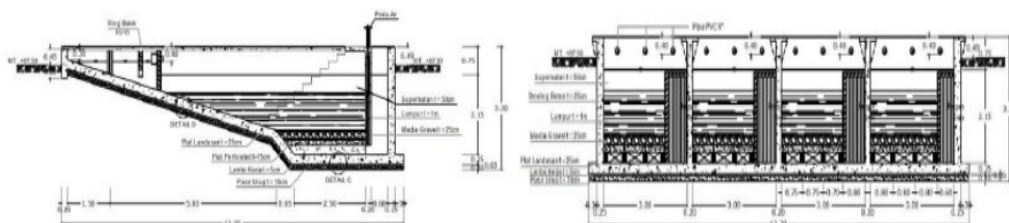
Unit SSC merupakan unit pemekatan dan stabilisasi lumpur tinja dengan pengolahan secara fisik yang bertujuan untuk memisahkan antara cairan dan padatan. Menurut Hermana dalam Putra (2020), SSC secara fisik berfungsi untuk memisahkan fraksi padatan/TSS (*solid*) pada lumpur tinja dari fraksi cairan/air (supernatan). Proses yang terjadi dalam unit SSC yaitu gabungan antara proses sedimentasi, filtrasi, dekantasi, dan evaporasi (Wulandari & Herumurti, 2017). Lebih tepatnya, unit SSC yaitu modifikasi dan kombinasi dari *drying bed* (*sand drying bed* dengan *solar drying bed*) yang merupakan salah satu unit *dewatering* (Darwin & Moersidik, 2016). Dalam praktiknya, unit SSC dan *drying area* (DA) merupakan satu rangkaian unit sebagai alternatif pengganti unit tangki *imhoff* (Hermana, 2008). *Drying area* sendiri adalah kolam

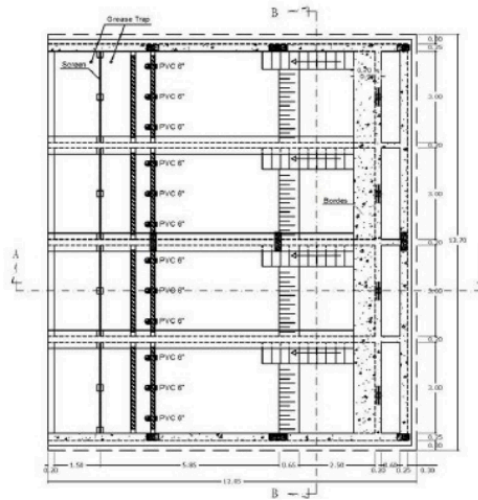
yang berfungsi sebagai pengering padatan lumpur dari unit SSC, di dalam unit ini terjadi proses desinfeksi mikroorganisme dengan bantuan radiasi sinar UV dari matahari. Unit SSC sendiri memiliki efisiensi penyisihan pada beberapa parameter. Menurut Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018), unit SSC dapat meremoval diantaranya: 20% BOD, 17% COD, dan 40% TSS. Sedangkan menurut Dian & Herumurti (2016), unit SSC dapat meremoval diantaranya: 40% BOD, 40% COD, dan 90% TSS. Berdasarkan Wulandari & Herumurti (2017), unit SSC memiliki kemampuan dalam menyisihkan beban organik dan TSS dikarenakan proses filtrasi yang terjadi oleh media filter (pasir dan kerikil). Ditambahkan juga oleh Putra (2020), bahwa TSS yang tersisih dalam unit ini merupakan TSS dengan ukuran padatan besar, untuk padatan dengan ukuran semi terlarut maupun terlarut akan diolah dalam pengolahan biologis. Kelebihan dan kekurangan unit SSC dapat dilihat pada tabel 2.10.

Tabel 2.10 Kelebihan dan Kekurangan Unit *Solid Separation Chamber*

Kelebihan	Kekurangan
<ul style="list-style-type: none"> • Pengoperasian sistem sederhana; dan • Tidak membutuhkan operator berkeahlian khusus. 	<ul style="list-style-type: none"> • Diperlukan penggantian media filter secara berkala untuk menjaga efisiensi proses filtrasi dan mencegah terjadinya penyumbatan; • Pemindahan lumpur dari kolam SSC ke area pengeringan dilakukan secara manual atau menggunakan mekanik (contoh: <i>crane</i>); dan • Membutuhkan area yang luas.

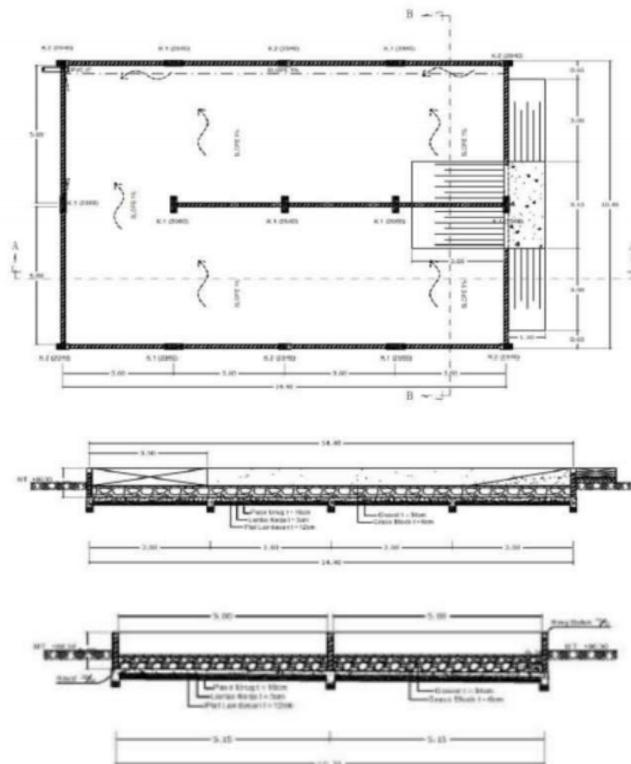
Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018)





Gambar 2.6 Unit *Solid Separation Chamber*

Sumber: Hermana (2008)



Gambar 2.7 Unit *Drying Area*

Sumber: Hermana (2008)

Prinsip kerja di dalam unit SSC, lumpur tinja akan melalui proses penyaringan dengan dua media filtrasi, yaitu media pasir dan kerikil dengan

ketebalan masing-masing antara 20-30 cm. Dialirkan lumpur tinja diatas media filtrasi secara gravitasi, nantinya padatan lumpur tinja akan tertahan pada media tersebut. Untuk filtratnya, akan mengalir melalui pipa *underdrain* untuk menuju unit pengolahan selanjutnya. Kemudian, terjadi proses pengeringan dengan penyinaran memanfaatkan matahari sebagai desinfeksi dan angin untuk mengurangi kelembapan. Waktu pengeringan padatan lumpur pada unit SSC yaitu sekitar 12-15 hari, setelah itu padatan lumpur yang cukup kering akan dipindahkan menggunakan sistem manual ataupun mekanik (*crane, excavator, dll*) ke unit *drying area* untuk proses pengeringan dan proses desinfeksi menggunakan bantuan sinar matahari (Dian & Herumurti, 2016; Hermana, 2008; Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat, 2018). Kriteria desain unit SSC ditunjukkan pada Tabel 2.11 dan kriteria desain unit DA ditunjukkan pada Tabel 2.12.

Tabel 2.11 Kriteria Desain Unit SSC

Kriteria	Nilai	Satuan
Tebal media pasir, $H_{\text{media pasir}}$	20-30	cm
Tebal media kerikil, $H_{\text{media kerikil}}$	20-30	cm
Tinggi lumpur, H_{lumpur}	30-50	cm
Waktu pengeringan, $t_{\text{pengeringan}}$	5-12	hari
Waktu pengisian, $t_{\text{pengisian}}$	± 5	hari
Kadar solid	80	%
Kadar air	20	%

Sumber: Hermana (2008)

Tabel 2.12 Kriteria Desain Unit DA

Kriteria	Nilai	Satuan
Ketebalan lumpur, H_{lumpur}	10-30	cm
Waktu pengeringan, $t_{\text{pengeringan}}$	7-15	hari
Waktu pengambilan, $t_{\text{pengambilan}}$	1	hari
Tebal lapisan pasir, H_{pasir}	15-30	cm
Kadar solid	80	%
Kadar air	20	%

Sumber: Hermana (2008)

Berdasarkan Hermana (2008), untuk mengitung desain unit SSC dan DA dilakukan tahap sebagai berikut:

- Merencanakan skema pengisian lumpur tinja pada unit SSC selama waktu pengisian lumpur tinja tertentu dan skenario operasional harian unit SSC. Diasumsikan laju pengendapan lumpur 20% per hari;
- Perencanaan bak SSC:

$$V_{solid} = 80\% \times Q_{lumpur} \dots\dots (15)$$

$$V_{air} = Q_{lumpur} - V_{solid} \dots\dots (16)$$

Dengan: V_{solid} = Volume solid (m³)

Q_{lumpur} = Debit lumpur dari skema pengisian (m³)

V_{air} = Volume air (m³)

Menentukan kedalaman unit SSC (ketinggian lumpur, ketinggian supernatan, ketinggian media pasir, ketinggian media kerikil, dan *freeboard*), dimensi permukaan unit SSC (panjang dan lebar), dan unit pelengkap dalam SSC (zona *settling*, pompa, penutup, dan *baffle*).

- Merencanakan unit DA dari V_{solid} yang dihasilkan dalam unit SSC.

2.2.3 Unit Stabilisasi Cairan

Tahap selanjutnya pengolahan lumpur tinja yaitu unit stabilisasi cairan. Unit stabilisasi cairan ini memiliki fungsi untuk menyisahkan partikel organik terlarut serta koloid, juga melanjutkan penyisihan padatan tersuspensi. Umumnya, pada tahap ini menggunakan proses dengan pengolahan secara biologis (anaerobik dan/ atau aerobik), namun pengolahan fisik, kimia, maupun kombinasinya dimungkinkan untuk penggunaannya. Terdapat beberapa teknologi yang dapat digunakan pada unit stabilisasi cairan, untuk pengolahan biologis secara anaerobik terdapat diantaranya: kolam anaerobik, *anaerobic baffled reactor* (ABR), dan lainnya. Sedangkan untuk pengolahan biologis secara aerobik, diantaranya: kolam *activated sludge* (AS), *oxidation ditch* (OD), *trickling filter* (TF), dan yang lainnya (Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat, 2018). Namun dalam

alternatif perancangan lumpur tinja ini, unit stabilisasi cairan yang digunakan yaitu unit *oxidation ditch* (OD), *final clarifier* (FC), dan *constructed wetland* (CW).

1. Unit *Oxidation Ditch* (OD) / Parit Oksidasi

Menurut Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2017), unit OD merupakan unit modifikasi *activated sludge* atau lebih tepatnya pengembangan metode *extended aeration* dengan proses biologis secara aerobik dan anoksik yang diterapkan pada saluran sirkular dengan kedalaman 1 - 1,5 m, yang dibangun dengan pasangan batu dan/ atau beton bertulang. Unit OD berfungsi untuk menyisihkan konsentrasi bahan organik (BOD, COD, dan nutrien) pada supernatan dengan memanfaatkan mikroorganisme. Lumpur tinja yang masuk dialirkan berputar mengikuti saluran sirkular yang cukup panjang dengan tujuan terjadinya proses aerasi. Alat aerasi yang digunakan berupa alat mekanik rotor berbentuk tabung dengan sikat baja. Rotor diputar melalui poros (*axis*) horizontal dipermukaan air yang disebut *cage rotor*. Kelebihan dan kekurangan unit OD dapat dilihat pada tabel 2.13.

Tabel 2.13 Kelebihan dan Kekurangan Unit *Oxidation Ditch*

Kelebihan	Kekurangan
<ul style="list-style-type: none"> • Waktu retensi hidraulik yang panjang dan pengadukan yang sempurna mengurangi kemungkinan terjadinya <i>shock loading</i> organik dan hidraulik; dan • Lumpur yang dihasilkan relatif sedikit. 	<ul style="list-style-type: none"> • Konsentrasi solid tersuspensi masih relatif tinggi jika dibandingkan unit lumpur aktif lain; dan • Kebutuhan luas lahan besar

Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018)

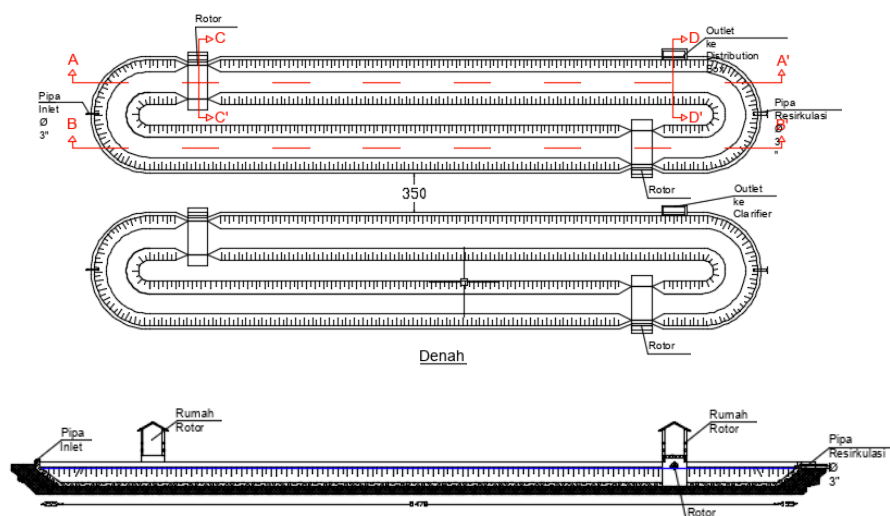
Prinsip kerja unit OD yaitu memanfaatkan mikroorganisme yang tumbuh dalam kondisi aerobik secara tersuspensi yang menjadikan senyawa polutan sebagai sumber makanan. Terjadi proses nitrifikasi dengan waktu retensi solid berkisar 12 - 24 hari. Lumpur tinja yang masuk ke unit OD akan bercampur dengan lumpur aktif yang mengandung jutaan kultur mikroorganisme tadi. Untuk memenuhi kebutuhan oksigen dalam proses bio-oksidasi dilakukan proses

aerasi. Mikroorganisme mengadsorpsi padatan organik terlarut di dalam air limbah dan membentuk flok dan lumpur campuran atau *mixed liquor suspended solids* (MLSS) yang akan mengendap di tangki pengendapan. Selanjutnya, sebagian endapan biomassa berkisar 50 - 75% akan diresirkulasi untuk dicampur kembali dengan influen air limbah untuk mendegradasi beban organik seperti pada proses awal (Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat, 2018). Unit OD memiliki efisiensi penyisihan pada beberapa parameter. Berdasarkan Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018), unit OD dapat meremoval parameter diantaranya: $\leq 96\%$ BOD, $\leq 97\%$ COD, dan $\geq 85\%$ amoniak. Sedangkan menurut Qasim dalam Anwar dkk (2008), unit OD dapat meremoval parameter diantaranya: 80 - 90% BOD dan COD, serta 70% ammonia. Kriteria desain unit OD ditunjukkan pada Tabel 2.14.

Tabel 2.14 Kriteria Desain Unit OD

Kriteria	Nilai	Satuan
Waktu retensi solid, SRT	15-30	hari
Waktu retensi hidraulik, HRT	15-30	jam
Rasio F/M	0,03-0,15	-
Konsentrasi lumpur, MLSS	3.000-5.000	mg/l
<i>Organic loading rate</i> , OLR	0,1-0,3	kgBOD/m ³ .hari
<i>Return Activated Sludge</i> , RAS	75-150	%

Sumber: Metcalf & Eddy (2003)



Gambar 2.8 Unit Oxidation Ditch

Sumber: Putra (2020)

Berdasarkan Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018), untuk mengitung desain unit OD dilakukan tahap-tahap sebagai berikut:

- Menentukan karakteristik air limbah yang diperlukan desain:

COD influen yang dapat didegradasi secara biologis

$$\text{bCOD} = \sim 1,6 \text{ BOD} \dots\dots (17)$$

$$\text{bCOD} = \text{COD} + \text{nbCOD} \dots\dots (18)$$

Dimana: bCOD = Konsentrasi COD yang dapat didegradasi secara biologis (mg/l)

BOD = Jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi zat-zat organik secara biologis (mg/l)

COD = Jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi zat-zat organik secara kimia (mg/l)

nbCOD = Jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi zat-zat organik secara kimia (mg/l)

- Menghitung kapasitas unit OD:

Volume oxidation ditch

$$V = \frac{Y \times Q \times (S_0 - S_e) \times SRT}{X_d \times (1 + k_d \times SRT)} \dots\dots (19)$$

Dengan: Y = Koefisien pembentukan biomassa (rasio perbandingan massa sel yang terbentuk dengan massa substrat yang dikonsumsi) (0,40-0,80 gVSS/gbCOD)

Q = Debit influen rerata (m³/hari)

S₀ = Konsentrasi senyawa terlarut dalam influen (mg/l)

S_e = Konsentrasi senyawa terlarut dalam efluen (mg/l)

SRT = Waktu retensi lumpur (hari)

X_d = Konsentrasi MLVSS (konsentrasi mikroorganisme di dalam sistem, dapat diasumsikan 65-75% dari MLSS) (mg/l)

k_d = Koefisien endogen organik (0,04-0,2 gVSS/gVSS.hari)

Organic loading rate (OLR)

$$OLR = \frac{Q \times S_0}{V} \dots\dots (20)$$

Dengan: OLR = Massa BOD dalam setiap m³ air limbah yang akan diolah oleh mikroorganismenya (kg BOD/m³.hari)
V = Volume unit *oxidation ditch* (m³)
Q = Debit influen rerata (m³/hari)
S₀ = Konsentrasi senyawa terlarut dalam influen (mg/l)

Rasio F/M

$$F/M = \frac{Q \times S_0}{MLVSS \times V} \dots\dots (21)$$

Dengan: F/M = Jumlah makanan dibandingkan dengan jumlah mikroorganismenya
V = Volume unit *oxidation ditch* (m³)
Q = Debit influen rerata (m³/hari)
S₀ = Konsentrasi senyawa terlarut dalam influen (mg/l)
MLVSS = Jumlah biomassa aktif yang terbentuk di dalam proses pengolahan menggunakan prinsip *activated sludge* (mg/l)

Waktu retensi hidraulik (HRT)

$$HRT = \frac{V}{Q} \dots\dots (22)$$

Dengan: V = Volume unit *oxidation ditch* (m³)
Q = Debit influen rerata (m³/hari)

- Menentukan dimensi unit OD: merancang panjang parit (panjang sisi lurus dan panjang sisi melengkung), lebar parit, dan kedalaman parit (kedalaman pada zona aerator dan tinggi *freeboard*).

- Menghitung lumpur dan kebutuhan oksigen:

Jumlah lumpur aktif yang dihasilkan per hari

$$P_{x,BIO} = \frac{Q \times Y \times (S_0 - S)}{1 + (k_d) \times SRT} + \frac{(f_d) \times (k_d) \times Y \times Q \times (S_0 - S) \times SRT}{1 + (k_d) \times SRT} \dots\dots (23)$$

Dengan: P_{x, vss} = Jumlah massa lumpur aktif yang dihasilkan setiap hari (kg VSS/hari)

- Q = Debit influen rerata (m³/hari)
 Y = Koefisien pembentukan biomassa (rasio perbandingan massa sel yang terbentuk dengan massa substrat yang dikonsumsi)
 S₀ = Konsentrasi senyawa terlarut dalam influen (mg/l)
 S = Konsentrasi senyawa terlarut dalam efluen (mg/l)
 f_a = Fraksi massa sel yang tersisa sebagai debris (0,15 g/g)
 k_a = Koefisien endogen organik (/hari)
 SRT = Waktu retensi lumpur (hari)

Debit lumpur

$$Debit\ lumpur = \frac{Massa\ lumpur}{Sg \times \rho\ air \times 1.000\ kg/m^3} \dots\dots (24)$$

Dengan: Massa Lumpur = Massa lumpur yang dihasilkan per hari, $\frac{P_{x,bio}}{\% solid}$
 (kg/hari)

- Sg = Spesifik gravitasi (1,1)
 ρ air = Massa jenis air (gr/cm³)

Kebutuhan oksigen (R₀)

$$R_0 = Q \times (S_0 - S) - 1,42 P_{x,bio} \dots\dots (25)$$

Dengan: R₀ = Kebutuhan oksigen (kg/hari)

- Q = Debit influen rerata (m³/hari)
 S₀ = Konsentrasi senyawa terlarut dalam influen (mg/l)
 S = Konsentrasi senyawa terlarut dalam efluen (mg/l)
 P_{x,bio} = Biomassa sebagai VSS yang terbuang per hari (kg /hari)

Standar oxygen requirement (SOR)

$$SOR = R_0 \times \left[\frac{(\beta \times C_{walt} \times Fa) - Ct}{C_s} \right] \times 1,024^{T-20} \times \alpha \dots\dots (26)$$

Dengan: SOR = Standar kebutuhan oksigen pada suhu operasi (kg/hari)

- R₀ = Kebutuhan oksigen (kg/hari)
 β = Koefisien kelarutan oksigen (0,95 - 0,98)
 α = Koefisien transfer oksigen (sesuai jenis tipe limbah)

- C_{walt} = Koefisien walt (sesuai suhu operasi)
- F_a = Faktor kesalahan/error (0,9)
- C_s = Nilai oksigen terlarut pada permukaan laut (9,17)
- C_t = Nilai oksigen terlarut sesuai suhu operasi
- T = Suhu atau temperatur proses (°C)

Kebutuhan udara

$$Keb. udara = \frac{SOR}{Berat\ udara \times \% \text{ Oksigen di udara}} \dots\dots (27)$$

Dengan: Keb. udara = Laju udara yang dibutuhkan per hari (m³/jam)

SOR = Standar kebutuhan oksigen pada suhu operasi (kg/hari)

Berat udara = Berat oksigen di udara sesuai suhu operasi (kg/m³)

% O₂ = Prosentase oksigen di udara (23,2 %)

2. Unit *Final Clarifier* (FC)

Final Clarifier (FC) merupakan unit pengendapan dari hasil proses pengolahan secara biologis. Unit FC berfungsi pula sebagai unit pemisah antara partikel padat dengan air, agar air yang keluar dari *clarifier* terpisah dari padatnya. Umumnya, unit FC dilengkapi dengan *scraper* yang berfungsi untuk mempermudah proses pengendapan yang terjadi. Di dalam clarifier terdiri dari 3 zona yaitu zona lumpur, zona pengendapan, dan zona air bersih yang keluar melalui pelimpah. Prinsip operasi yang berlangsung di dalam unit FC ini adalah pemisahan dari suatu suspensi ke dalam fase-fase padat (*sludge*) dan cair dari komponen-komponennya. Operasi ini dipakai dimana cairan yang mengandung zat padat ditempatkan dalam suatu bak tenang dengan desain tertentu sehingga akan terjadi pengendapan secara gravitasi (Metcalf & Eddy, 2003). Kelebihan dan kekurangan unit FC dapat dilihat pada tabel 2.15.

Prinsip kerja unit FC yaitu umpan (lumpur tinja dari pengolahan sebelumnya) akan masuk ke bagian tengah unit FC atau biasa disebut dengan *inlet wall*. Padatan dari lumpur tinja akan secara otomatis mengalami gaya gravitasi, dan akan keluar melewati bagian bawah unit FC (masuk ke zona *sludge*). Sementara untuk cairannya, akan keluar melewati bagian atas unit FC yang sudah

dilengkapi dengan *v-notch* dan pelimpah atau *weir*. Diperoleh air jernih pada permukaan dan disalurkan ke outlet unit FC, kemudian disalurkan ke unit pengolahan selanjutnya. Hasil samping dari proses unit FC ini dihasilkan lumpur pada bagian dasarnya. Sebagian lumpur akan diresirkulasi ke unit pengolahan biologis (lumpur aktif) untuk digunakan kembali, sementara sisanya akan diolah dalam unit stabilisasi padatan seperti *sludge drying bed* (SDB). Unit FC memiliki efisiensi penyisihan pada parameter *suspended solid*. Berdasarkan Metcalf & Eddy (2014), unit FC dapat meremoval parameter TSS sebesar 50-70%. Kriteria desain unit FC ditunjukkan pada Tabel 2.16.

Tabel 2.15 Kelebihan dan Kekurangan Unit *Final Clarifier*

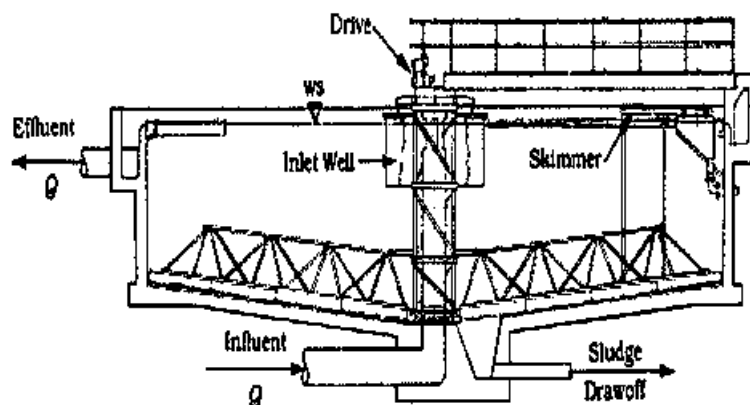
Kelebihan	Kekurangan
<ul style="list-style-type: none"> • Teknologi yang sederhana; • Biaya konstruksi dan operasi relatif tidak mahal; dan • Tidak membutuhkan operator berkeahlian khusus. 	<ul style="list-style-type: none"> • Laju beban hidraulik rendah; dan • Kurang efektif untuk menyisihkan padatan tersuspensi dalam kondisi beban padatan yang tinggi.

Sumber: Qasim (1999)

Tabel 2.16 Kriteria Desain Unit FC

Kriteria	Nilai	Satuan
<i>Overflow Rate, OFR</i>	8-16	$\text{mg}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hari}$
<i>Solids loading, SLR</i>	1-5	$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{jam}$
Kedalaman, H	4-5,5	m

Sumber: Metcalf & Eddy (2014)





Gambar 2.9 Unit *Final Clarifier*

Sumber: Rosidi (2017); Putra (2020)

Berdasarkan Asmadi & Suharno dalam Rosidi (2017), untuk mengitung desain unit FC dilakukan tahap-tahap sebagai berikut:

- Menghitung zona *settling* unit FC:

Mendapatkan debit desain

$$Q_{\text{desain}} = Q_{\text{ave}} + Q_r \dots\dots (28)$$

Dimana: Q_{desain} = Debit desain unit FC (m^3/hari)

Q_{ave} = Debit rata-rata limbah masuk (m^3/hari)

Q_r = Debit resirkulasi limbah (m^3/hari)

Diameter *inlet wall*

$$D_{\text{inwall}} = (15 - 20\%) \times D \dots\dots (29)$$

Dimana: D_{inwall} = Diameter *inlet wall* (m)

D = Diameter zona *settling* (m)

Overflow Rate

$$\text{OFR} = Q_{\text{desain}} / A \dots\dots (30)$$

Dimana: OFR = *Overflow rate* ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{hari}$)

A = Luas permukaan zona *settling* (m^2)

Solids Loading

$$\text{SLR} = (Q_{\text{desain}} \times \text{MLSS}) / A \dots\dots (31)$$

Dimana: SLR = *Solids loading rate* ($\text{kg}/\text{m}^2.\text{jam}$)

MLSS = Konsentrasi lumpur (kg/m^3)

- Menentukan zona *thickening* unit FC: merancang kedalaman air zona *settling* dengan *freeboard*, konsentrasi *sludge* pada zona *thickening*, total massa *sludge*, dan kedalaman zona *thickening*.
- Merencanakan zona *sludge* unit FC:

Total *solid* dalam unit FC

$$\text{Total solid dalam unit FC} = \text{Total massa sludge pada unit FC} + \text{Total solid yang disimpan} \dots\dots (32)$$

Dimana: Tot. *solid* FC = Jumlah padatan di dalam unit FC (kg)
 Tot. massa = Jumlah berat lumpur dalam unit FC (kg)
 Tot. *solid* simpan = Jumlah padatan yang tersimpan,

$$\frac{(\text{Waktu penyimpanan lumpur} \times \text{MLVSS})}{\text{MLVSS/MLSS}} \text{ (kg)}$$

Kedalaman zona *sludge*

$$H_{\text{sludge}} = \frac{\text{total solid dalam unit FC}}{(\text{kons. sludge pd thickening} \times A)} \dots\dots (33)$$

Dimana: H_{sludge} = Kedalaman zona lumpur (m)
 Kons. *sludge* = Konsentrasi lumpur di zona *thickening* (kg/m³)

- Merencanakan saluran inlet dan outlet unit FC: panjang saluran, diameter saluran, kecepatan aliran, dan headloss.
- Merencanakan pelimpah unit FC:

Jumlah *v-notch*

$$n_{\text{v-notch}} = \text{Keliling weir} + \text{Jarak antar v-notch} \dots\dots (34)$$

Dimana: $n_{\text{v-notch}}$ = Banyaknya *v-notch* yang dibutuhkan (buah)
 Keliling *weir* = Keliling *weir plate* (m)
 Jarak antar *v-notch* = Jarak antar *v-notch*, pusat ke pusat (m)

Weir loading

$$\text{Weir loading} = Q_{\text{desain}} + L \dots\dots (35)$$

Dimana: *Weir loading* = *Weir loading* (m³/m.hari)
 L = Panjang total *v-notch* (m)

- Menghitung lumpur yang dikuras dan pipa penguras:

Volume lumpur di unit FC

$$V_{\text{lumpur}} = \text{Massa lumpur} / (\rho \text{ air} \times \% \text{ SS} \times S_s) \dots\dots (36)$$

Dimana: V_{lumpur} = Volume lumpur tiap *clarifier* (m^3)
 Massa lumpur = Massa/berat lumpur (kg/hari)
 ρ air = Massa jenis air ($998,2 \text{ kg/m}^3$)
 % SS = Prosentase *suspended solid* dalam lumpur
 S_s = Spesifik gravitasi (2,65)

Waktu pengurasan

$$\text{Waktu pengurasan} = V_{\text{lumpur}} + Q_{\text{pengurasan}} \dots \dots (37)$$

Dimana: Waktu pengurasan = Waktu pengurasan bak (hari)

$Q_{\text{pengurasan}}$ = Debit pengurasan yang dibutuhkan (m^3/hari)

3. Unit *Constructed Wetland* (CW)

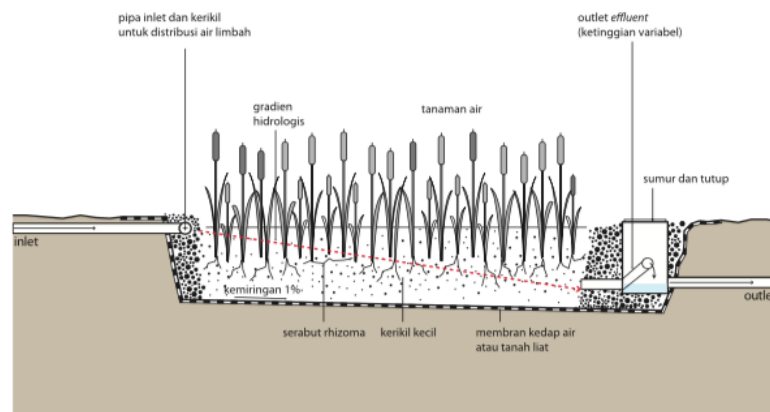
Constructed Wetland (CW) atau lahan basah buatan merupakan unit pengolahan limbah untuk meniru proses alami yang terjadi di daerah rawa dan payau. Sistem ini memiliki dasar dengan lapisan atau saluran yang diisi pasir atau media (batu, kerikil, pasir, tanah). Saluran atau mangkuk dilapisi penghalang tidak tembus air (tanah liat atau geotekstil) untuk mencegah rembesan air limbah. Vegetasi asli (seperti *cattail*, alang-alang dan/atau sulur-sulur) dibiarkan tumbuh di bagian dasar (Tim Teknis Pembangunan Sanitasi, 2010). Sistem ini umumnya digunakan sebagai pengolahan lanjutan setelah proses pengolahan tahap kedua atau ketiga. Sistem pengolahan CW pada dasarnya terbagi menjadi dua jenis, yaitu sistem aliran permukaan (*free water surface system*) yaitu terdiri dari sebuah kolam yang dangkal dan berisi tanah atau media lainnya sebagai tempat tumbuh vegetasi, dan sistem aliran bawah permukaan (*subsurface flow system*) yang terbagi menjadi 2 jenis aliran, yaitu horisontal dan vertikal. Pada jenis *subsurface* horisontal, didesain untuk membuat air mengalir horisontal di bawah permukaan media melalui media yang dapat dilalui air (*permeable*), sehingga menjaga proses pengolahan berlangsung di bawah permukaan dan mencegah terbentuknya bau. Sedangkan jenis *subsurface* vertikal, yang membedakan adalah pengaliran air tidak dilakukan secara kontinyu, melainkan *inermiten*. Air dialirkan dari atas ke bawah melewati zona akar dan media (terjadi proses filtrasi) hingga akhirnya

keluar melalui sistem perpipaan pada dasar kolam. Nutrien dan material organik diabsorpsi oleh mikroorganisme (Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat, 2018). Kelebihan dan kekurangan unit CW dapat dilihat pada tabel 2.17.

Tabel 2.17 Kelebihan dan Kekurangan Unit *Constructed Wetland*

Kelebihan	Kekurangan
<ul style="list-style-type: none"> • Mampu menerima beban yang tinggi; • Biaya konstruksi dan operasional murah; • Konstruksi sederhana; dan • Menambah nilai estetika. 	<ul style="list-style-type: none"> • Luas lahan yang dibutuhkan besar; dan • Pengolahan dinilai lebih ekonomis hanya ketika lahan tersedia dan tidak mahal.

Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018)



Gambar 2.10 Unit *Constructed Wetland*

Sumber: Tim Teknis Pembangunan Sanitasi (2010)

Proses pengolahan yang terjadi pada unit CW meliputi proses filtrasi, sedimentasi dan pengolahan biologis. Aliran pada sistem ini dirancang memiliki kecepatan aliran yang rendah, agar memungkinkan terjadinya proses pengendapan partikel-partikel yang terkandung dalam air limbah. Selain itu, kecepatan aliran yang rendah dapat memperpanjang waktu kontak antara air limbah dan permukaan lahan basah dimana organisme-organisme dan vegetasi menggunakan senyawa organik sebagai sumber nutrien mereka, dan berlangsung proses destruksi patogen (Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat, 2018). Unit CW memiliki efisiensi penyisihan pada beberapa parameter. Berdasarkan Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan

Rakyat (2018), unit CW dapat meremoval parameter diantaranya: BOD $\pm 99\%$, COD 95%, TSS $\leq 89\%$, ammonia $\leq 80\%$, dan total koliform $\pm 80\%$. Kriteria desain unit CW ditunjukkan pada Tabel 2.18.

Tabel 2.18 Kriteria Desain Unit CW

Kriteria	Nilai	Satuan
Waktu detensi, HRT_{terlarut}	5-14	hari
Waktu detensi, $HRT_{\text{tersuspensi}}$	0,5-3	hari
Laju beban BOD maks.	80-112	kg/ha.hari
Laju beban hidraulik, HLR	0,01-0,05	m/hari
Luas permukaan dibutuhkan	0,002-0,014	ha/m ³ .hari
Rasio panjang:lebar, P:L	4:1-6:1	-
Kedalaman air, H	0,1-0,5	m
Slope, S	3:1-10:1	-

Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018)

Berdasarkan Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018), untuk mengitung desain unit CW dilakukan tahap-tahap sebagai berikut:

- Menentukan dimensi unit CW

Laju konstanta orde pertama

$$K_T = K_R \times \theta_R^{(T_A - T_R)} \dots\dots (38)$$

Dimana: K_T = Laju konstanta penyisihan amoniak (/hari)

K_R = Laju konstanta suhu referensi (/hari)

θ_R = Koefisien Laju konstanta suhu referensi

T_A = Suhu air ($^{\circ}\text{C}$)

T_R = Suhu referensi (20°C)

Efluen amoniak yang dihasilkan

$$[\text{Amoniak}]_{\text{out}} = [\text{Amoniak}]_{\text{in}} \exp [-0,126 \times (1,008)^{T_A - 20} \times HRT] \dots\dots (39)$$

Dimana: $[\text{Amoniak}]_{\text{out}}$ = Efluen amoniak yang dihasilkan (mg/l)

$[\text{Amoniak}]_{\text{in}}$ = Influen amoniak yang masuk (mg/l)

HRT = Waktu detensi (hari)

Luas permukaan kolam

$$A_{\text{CW}} = \frac{Q_{\text{ave}} \times HRT}{\varepsilon \times H} \dots\dots (40)$$

Dimana: A_{CW}	= Luas permukaan kolam (m^2)
Q_{ave}	= Debit rerata influen (m^3)
H	= Kedalaman kolam yang dirancang (m)
ε	= Porositas media (%)

Laju beban hidraulik (HLR)

$$HLR = \frac{Q_{ave}}{A_{CW}} \dots\dots (41)$$

Dimana: HLR	= Laju beban hidraulik (m/hari)
Q_{ave}	= Debit rerata influen (m^3)
A_{CW}	= Luas permukaan kolam (m^2)

2.2.4 Unit Stabilisasi Padatan

Tahap terakhir pengolahan lumpur tinja yaitu unit stabilisasi padatan. Unit stabilisasi padatan (lumpur) memiliki tujuan dalam mereduksi bakteri patogen, menghilangkan bau, mengontrol proses pembusukan materi organik dalam lumpur. Terdapat berbagai metode pengolahan stabilisasi padatan, tetapi umumnya dilakukan secara biologis dengan sistem anaerobik. Pengolahan secara anaerobik dinilai efisien karena tidak membutuhkan energi listrik dan tidak menggunakan bahan kimia. Beberapa teknologi yang dapat digunakan pada unit stabilisasi padatan diantaranya: *sludge drying bed* (SDB), *belt filter press*, *filter press*, dan lainnya (Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat, 2018). Namun dalam alternatif perancangan bangunan pengolahan lumpur tinja ini, unit stabilisasi padatan yang digunakan yaitu unit *sludge drying bed* (SDB).

1. Unit *Sludge Drying Bed* (SDB)

Unit *sludge drying bed* (SDB) memiliki fungsi untuk membantu proses pengeringan lumpur dengan penguapan alamiah oleh sinar matahari (Dian & Herumurti, 2016). Menurut Putri (2015), lumpur dari pengendapan biologis akan diangkat dan diletakkan pada unit SDB yang dilengkapi dengan media pasir dan kerikil sehingga cairan dan padatan akan terpisah. Cairan akan menuju ke saluran bawah dan padatan akan dikeringkan dengan menggunakan cahaya matahari. Menurut Cofie dkk. (2006), ketebalan media pasir kasar dan halus yang digunakan sebagai media masing-masing adalah 15 cm. Sedangkan untuk

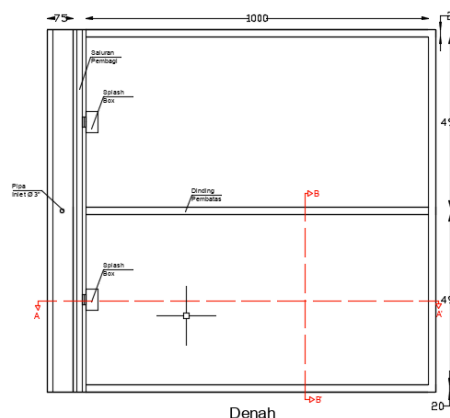
media kerikil yang digunakan memiliki ketinggian optimum 25 cm. Dengan desain sedemikian rupa, didapatkan waktu pengeringan lumpur selama 2 minggu dengan ketebalan lumpur 30 cm. Kelebihan dan kekurangan unit SDB dapat dilihat pada tabel 2.19.

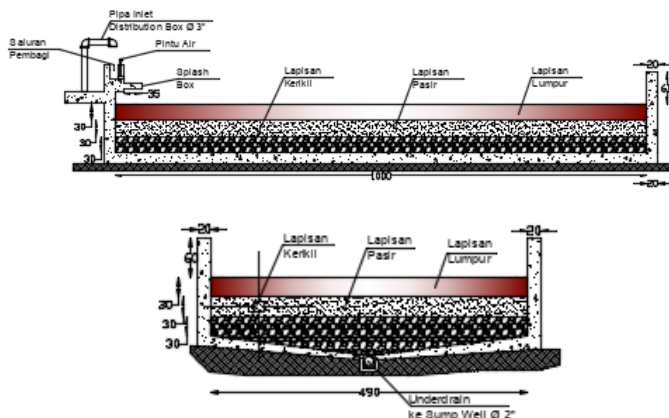
Prinsip kerja unit SDB yaitu memanfaatkan penguapan alamiah oleh sinar matahari. SDB dilengkapi dengan media pasir dan kerikil di bagian bawah agar didapatkan supernatan yang kualitasnya lebih baik. Supernatan akan mengalir menuju bada air melalui sistem perpipaan bawah tanah (*underdrain*) (Putra, 2020). Dalam unit SDB tidak menyisahkan parameter apapun. Kriteria desain unit SDB ditunjukkan pada Tabel 2.20.

Tabel 2.19 Kelebihan dan Kekurangan Unit *Sludge Drying Bed*

Kelebihan	Kekurangan
<ul style="list-style-type: none"> • Mudah untuk dioperasikan sehingga tidak membutuhkan operator berkemampuan khusus; • Padatan hasil pengeringan dapat dijadikan campuran bahan pengomposan; • Reduksi volume yang dihasilkan tinggi; dan • Dapat menyisahkan bakteri patogen. 	<ul style="list-style-type: none"> • Luas lahan yang dibutuhkan besar; • Hasil pengeringan tergantung pada kondisi cuaca; • Hanya dapat diaplikasikan pada musim kemarau atau dilengkapi dengan atap pada musim penghujan; • Pembersihan padatan kering dilakukan secara manual atau menggunakan alat khusus; dan • Berpotensi menimbulkan bau.

Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018)





Gambar 2.11 Unit *Sludge Drying Bed*

Sumber: Putra (2020)

Tabel 2.20 Kriteria Desain Unit SDB

Kriteria	Nilai	Satuan
Waktu pengeringan, HRT	10-15	hari
Tebal lapisan lumpur, H_{lumpur}	30-50	cm
Tebal media pasir, H_{pasir}	20-30	cm
Tebal media kerikil, H_{kerikil}	20-30	cm
Kadar air, P	60	%
Kadar solid, P_i	40-50	%
Kecepatan <i>underdrain</i> , v	0,75	m/detik
Kemiringan, S	1	%

Sumber: Metcalf & Eddy (2003)

Berdasarkan Metcalf & Eddy (2003), untuk mengitung desain unit SDB dilakukan tahap-tahap sebagai berikut:

- Menentukan dimensi SDB:

Volume lumpur influen

$$V = Q_{\text{lumpur}} \times \text{HRT}_{\text{pengeringan}} \dots \dots (42)$$

Dimana: V = Volume lumpur yang masuk (m^3)

Q_{lumpur} = Debit lumpur yang dihasilkan pengolahan biologis (m^3/hari)

HRT = Waktu yang dibutuhkan untuk mengeringkan lumpur (hari)

Volume *cake sludge (solid)*

$$V_i = \frac{V \times (1 - P)}{1 - P_i} \dots\dots (43)$$

Dimana: V_i = Volume *solid* (m^3)
 P = Kadar air (60%)
 P_i = Kadar *solid* (40%)

Jari-jari hidrolis

$$R = \frac{L \times H_{SDB}}{L + (2 \times H_{SDB})} \dots\dots (44)$$

Dimana: R = Jari-jari hidrolis (m)
 L = Lebar bak (m)
 H = Kedalaman total bak (m)

2.3 Persen Removal

Berikut merupakan persen removal dari setiap unit bangunan pengolahan lumpur tinja yang digunakan sebagai alternatif dapat dilihat pada Tabel 2.21.

Tabel 2.21 Persen Removal Tiap Unit Bangunan Pengolahan Lumpur Tinja

Bangunan	Parameter Tersisih	Kemampuan Penyisihan	Sumber
Unit Penerima dan Manual Bar Screen (BS)	-	-	-
Solid Separation Chamber (SSC) dan Drying Area (DA)	BOD	20%	Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018), hal. 60
	COD	17%	
	TSS	40%	
Grease Trap (GT)	Minyak Lemak	80%	Putra (2020), hal. 48
	Minyak lemak	$\geq 80\%$	Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018), hal. 25
Equalization Tank (ET)	Minyak lemak	95%	Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya (2015), hal. 30
	-	-	-
Oxidation Ditch (OD)	BOD	$\leq 96\%$	Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018), hal. 86
	COD	$\leq 97\%$	
	Ammonia	$\geq 85\%$	

Bangunan	Parameter Tersisih	Kemampuan Penyisihan	Sumber
	BOD	80% - 90%	Qasim dalam Anwar dkk. (2008), hal 207
	COD	80% - 90%	
	Ammonia	70%	
<i>Final Clarifier (FC)</i>	TSS	50% - 70%	Metcalf & Eddy (2014), hal 382
<i>Constructed Wetland (CW)</i>	BOD	±99%	Kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat (2018), hal. 171
	COD	95%	
	TSS	≤89%	
	Amoniak	≤80%	
	Total koliform	±80%	
<i>Sludge Drying Bed (SDB)</i>	-	-	-

Sumber: Penyusun (2021)

2.4 Profil Hidrolis

Untuk membuat profil hidrolis diperlukan perhitungan kehilangan tekanan pada bangunan. Kehilangan tekanan akan mempengaruhi ketinggian muka air di dalam bangunan pengolahan. Kesalahan dalam perhitungan tinggi muka air dapat menjadi kesalahan dalam menentukan elevasi (ketinggian) bangunan pengolahan dalam pelaksanaan pembangunan. Sehingga dapat mempengaruhi dalam proses pengolahan. Kehilangan tekanan bangunan (saluran terbuka dan tertutup), tinggi terjunan yang direncanakan (jika ada) akan berpengaruh pada perhitungan tinggi muka air.

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 air; dan

- Kehilangan tekanan pada *weir*, sekat dan lain-lain harus dihitung secara khusus.

b) Kehilangan Tekanan pada Perpipaan dan Aksesoris

Kehilangan tekanan pada saluran terbuka berbeda dengan cara menghitung saluran tertutup. Kehilangan tekanan pada perpipaan dan aksesoris ada beberapa macam, yaitu:

- Kehilangan tekanan pada perpipaan dan aksesoris;
- Kehilangan tekanan pada perpipaan;
- Kehilangan tekanan pada aksesoris; dan
- Kehilangan tekanan pada pompa.