



UIN Maulana Malik Ibrahim Malang
Fakultas Sains dan Teknologi
TEKNIK LINGKUNGAN

MODUL AJAR

UNIT OPERASI & UNIT PROSES

Pengolahan Air



LUSI ULISFAH
2025

MODUL AJAR

UNIT OPERASI & UNIT PROSES

Pengolahan Air

LUSI ULISFAH

UIN Maulana Malik Ibrahim Malang

Fakultas Sains dan Teknologi

TEKNIK LINGKUNGAN

2025

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga modul ajar Unit Operasi dan Unit Proses ini dapat disusun dengan baik. Modul ini disiapkan sebagai salah satu sumber belajar bagi mahasiswa dalam memahami konsep dasar, prinsip, serta penerapan unit operasi dan unit proses yang berperan penting dalam bidang teknik lingkungan.

Modul ini disusun secara sistematis agar dapat membantu mahasiswa dalam mempelajari materi, baik dari segi teori maupun aplikasinya. Pembahasan meliputi prinsip-prinsip dasar, perhitungan, serta contoh kasus yang relevan dengan perancangan dan pengoperasian sistem pengolahan air. Dengan demikian, diharapkan mahasiswa tidak hanya memahami konsep, tetapi juga memiliki kemampuan analisis serta keterampilan teknis yang dapat diterapkan dalam praktik keprofesian.

Penyusunan modul ini tidak terlepas dari dukungan, masukan, dan referensi dari berbagai pihak, baik dosen maupun sumber literatur yang relevan. Penulis menyadari bahwa modul ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi penyempurnaan modul ini pada edisi berikutnya. Semoga modul ajar ini dapat memberikan manfaat yang optimal bagi mahasiswa, dosen, maupun pihak lain yang berkepentingan dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang teknik lingkungan.

Malang, September 2025

Lusi Ulisfah

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	ii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
BAB 1 PRINSIP DASAR PENGOLAHAN AIR	1
1.1 Sistem Penyediaan Air Bersih	1
1.1.1 Komponen Dasar Penyediaan Air Bersih	1
1.1.2 Kebutuhan Air Bersih	11
1.1.3 Kualitas Air Bersih	15
1.2 Sistem Pengelolaan Air Limbah	17
1.2.1 Komponen Dasar Pengelolaan Air Limbah	17
1.2.2 Kuantitas Air Limbah	19
1.2.3 Baku Mutu Air Limbah	19
BAB 2 PENGOLAHAN AIR SECARA FISIK - KIMIA	22
2.1 <i>Screening</i>	22
2.2 Koagulasi	27
2.3 Flokulasi.....	28
2.4 Sedimentasi.....	34
2.5 Filtrasi	39
2.6 Desinfeksi	47
BAB 3 PENGOLAHAN AIR SECARA BIOLOGI	53
3.1 Proses Aerobik.....	53
3.1.1 <i>Activated Sludge Process (ASP)</i>	54

3.1.2 <i>Trickling Filter (TF)</i>	60
3.1 3 <i>Rotating Biological Contactor (RBC)</i>	66
3.2 Proses Anaerobik.....	70
3.2.1 <i>Septic Tank</i>	71
3.2.2 <i>Anaerobic Pond (Kolam Anaerobik)</i>	73
3.3.3 <i>Anaerobic Baffled Reactor (ABR)</i>	77
DAFTAR PUSTAKA.....	83

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Baku Mutu Air Kelas 1 (Air Baku Air Minum)	3
Tabel 1. 2 Kriteria Kebutuhan Air Domestik.....	11
Tabel 1. 3 Kriteria Kebutuhan Air Non Domestik	14
Tabel 1. 4 Persyaratan Kualitas Air Minum	16
Tabel 1. 5 Baku Mutu Air Limbah Kakus Yang Diolah Pada IPAL dan Dibuang Ke Media Air	20
Tabel 1. 6 Baku Mutu Air Limbah Non Kakus Atau Gabungan Air Limbah Kakus Dengan Air Limbah Non Kakus Dan Dibuang Ke Media Air	20
Tabel 2. 1 Kriteria desain filter pasir lambat	42
Tabel 2. 2 Kriteria desain filter pasir lambat	44
Tabel 3. 1 Kriteria Desain <i>Trickling Filter</i>	62
Tabel 3. 2 Kriteria desain <i>Rotating Biological Contactor (RBC)</i>	68
Tabel 3. 3 Kriteria desain Kolam Anaerobik	74
Tabel 3. 4 Kriteria desain <i>Anaerobic Baffled Reactor (ABR)</i>	78

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 <i>Rotary Screen</i>	23
Gambar 2. 2 <i>Manual Screen</i>	24
Gambar 2. 3 <i>Step Screen</i>	25
Gambar 2. 4 <i>Mechanical Screen</i>	26
Gambar 2. 5 <i>Gambaran Proses Koagulasi - Flokulasi</i>	30
Gambar 2. 6 <i>Bagian-bagian bak sedimentasi</i>	35
Gambar 3. 1 <i>Skema proses lumpur aktif</i>	55
Gambar 3. 2 <i>Skema resirkulasi pada trickling filter</i>	61
Gambar 3. 3 <i>Rotating Biological Contactor</i>	67
Gambar 3. 4 <i>Kolam Anaerobik</i>	73
Gambar 3. 5 <i>Anaerobic Baffled Reactor (ABR)</i>	78

BAB 1 PRINSIP DASAR PENGOLAHAN AIR

1.1 Sistem Penyediaan Air Bersih

Sistem Penyediaan Air Bersih merupakan suatu rangkaian kegiatan yang bertujuan menyediakan air minum yang aman, layak konsumsi, dan berkelanjutan bagi masyarakat. Sistem ini mencakup aspek teknis pengolahan, distribusi air, pemeliharaan, dan pelayanan kepada konsumen. Komponen Sistem Penyediaan Air Bersih terdiri dari 4 (empat) unit utama yang saling berkaitan, yaitu unit air baku, unit produksi, unit distribusi, dan unit pelayanan, yang secara bersama-sama menjamin ketersediaan air bersih dengan kualitas sesuai standar kesehatan dan kebutuhan masyarakat (Permen PUPR No 4 Tahun 2017).

1.1.1 Komponen Dasar Penyediaan Air Bersih

A. Unit Air Baku

Unit air baku merupakan tahap awal dalam sistem penyediaan air bersih yang sangat penting karena kualitas dan kuantitas air baku secara langsung mempengaruhi keberhasilan seluruh sistem. Sumber air baku yang dapat dimanfaatkan untuk penyediaan air minum antara lain:

- Air permukaan, yaitu air yang berada diatas permukaan tanah (*surface water*). Air permukaan meliputi air sungai, air danau, air rawa, ari embung dan air waduk.
- Air tanah, yaitu air yang berada di bawah permukaan tanah (*groundwater*). Air tanah meliputi air tanah dalam, air tanah dangkal dan mata air.

- Air hujan, yaitu air yang diperoleh dari penangkapan air hujan dan dikumpulkan melalui sistem penampungan.
- Air laut, yaitu air yang berada di lautan.

Pemilihan air baku harus mempertimbangkan 3 (tiga) aspek utama, yaitu kuantitas, kualitas, dan kontinuitas sumber air baku.

1. Kuantitas Air Baku

Kuantitas air baku mengacu pada volume air yang tersedia dari sumber air untuk memenuhi kebutuhan air minum masyarakat dalam jangka waktu tertentu. Penentuan kuantitas air baku harus didasarkan pada proyeksi kebutuhan air minum yang realistis, memperhitungkan pertumbuhan penduduk, pola konsumsi, serta cadangan air untuk kondisi darurat seperti kekeringan. Sumber air yang dipilih harus mampu menyediakan debit air yang cukup secara berkelanjutan agar tidak terjadi kekurangan pasokan (Faisal & Sutapa, 2018). Selain itu, perlu dilakukan analisis hidrologi dan hidrogeologi untuk mengetahui ketersediaan air sepanjang tahun dan variasi musiman yang mungkin terjadi.

2. Kualitas Air Baku

Kualitas air baku sangat menentukan proses pengolahan dan mutu air minum yang dihasilkan. Air baku harus memenuhi standar kualitas tertentu agar dapat diolah secara efektif dan efisien menjadi air minum yang aman. Parameter kualitas yang perlu diperhatikan meliputi sifat fisik (warna, kekeruhan, bau, rasa), kimia (pH, kandungan logam berat, zat organik, bahan kimia berbahaya), dan mikrobiologi (keberadaan bakteri patogen, virus, parasit). Sumber air yang memiliki kualitas buruk akan memerlukan proses pengolahan yang lebih kompleks dan biaya yang lebih tinggi. Oleh karena itu,

pemilihan air baku harus mempertimbangkan karakteristik kualitas air. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, disebutkan bahwa klasifikasi air baku ditetapkan menjadi 4 (empat) kelas, diantaranya adalah kelas 1 (satu) yaitu air yang dapat digunakan sebagai air baku air minum dan atau peruntukan lain yang setara. Baku mutu air kelas 1 (satu) dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 1. 1 Baku Mutu Air Kelas 1 (Air Baku Air Minum)

No	Parameter	Satuan	Kelas I	Keterangan
1	Temperatur (deviasi terhadap suhu udara)	°C	Dev 3	Perbedaan dengan suhu udara di atas permukaan air.
2	Padatan terlarut total (TDS)	mg/L	1.000	Tidak berlaku untuk muara.
3	Padatan tersuspensi total (TSS)	mg/L	40	Tidak berlaku untuk air gambut (berdasarkan kondisi alaminya).
4	Warna	Pt-Co Unit	15	
5	Derajat keasaman (pH)	-	6-9	Tidak berlaku untuk air gambut (berdasarkan kondisi alaminya).
6	Kebutuhan oksigen biokimiawi (BOD)	mg/L	2	

No	Parameter	Satuan	Kelas I	Keterangan
7	Kebutuhan oksigen kimiawi (COD)	mg/L	10	
8	Oksigen terlarut (DO)	mg/L	≥ 6	Batas minimal.
9	Sulfat (SO_4^{2-})	mg/L	300	
10	Klorida (Cl^-)	mg/L	300	
11	Nitrat (sebagai N)	mg/L	10	
12	Nitrit (sebagai N)	mg/L	0,06	
13	Amoniak (sebagai N)	mg/L	0,1	
14	Total Nitrogen	mg/L	15	
15	Total Fosfat (sebagai P)	mg/L	0,2	
16	Fluorida (F^-)	mg/L	1	
17	Belerang (sebagai H_2S)	mg/L	0,002	
18	Sianida (CN^-)	mg/L	0,02	
19	Klorin bebas	mg/L	0,03	Untuk air baku air minum; tidak dipersyaratkan pada lainnya.
20	Barium (Ba) terlarut	mg/L	1	
21	Boron (B) terlarut	mg/L	1	
22	Merkuri (Hg) terlarut	mg/L	0,001	
23	Arsen (As) terlarut	mg/L	0,05	
24	Selenium (Se) terlarut	mg/L	0,01	

No	Parameter	Satuan	Kelas I	Keterangan
25	Besi (Fe) terlarut	mg/L	0,3	
26	Kadmium (Cd) terlarut	mg/L	0,01	
27	Kobalt (Co) terlarut	mg/L	0,2	
28	Mangan (Mn) terlarut	mg/L	0,1	(nilai tersedia lebih rinci pada dokumen asli untuk beberapa kasus)
29	Nikel (Ni) terlarut	mg/L	0,05	
30	Seng (Zn) terlarut	mg/L	0,05	
31	Tembaga (Cu) terlarut	mg/L	0,02	
32	Timbal (Pb) terlarut	mg/L	0,03	
33	Kromium heksavalen (Cr-VI)	mg/L	0,05	
34	Minyak dan lemak	mg/L	1	
35	Deterjen total	mg/L	0,2	
36	Fenol	mg/L	0,002	
37	Aldrin / Dieldrin	µg/L	1	(nilai senyawa pestisida organik tercantum)
38	BHC	µg/L	20	
39	Chlordane	µg/L	3	
40	DDT	µg/L	2	
41	Endrin	µg/L	1	
42	Heptachlor	µg/L	18	
43	Lindane	µg/L	56	

No	Parameter	Satuan	Kelas I	Keterangan
44	Methoxychlor	µg/L	35	
45	Toxaphene	µg/L	5	
46	Fecal Coliform	MPN/100 mL	100	
47	Total Coliform	MPN/100 mL	1.000	
48	Sampah	-	nihil	
49	Radioaktivitas Gross-A	Bq/L	0,1	
50	Radioaktivitas Gross-B	Bq/L	1	

Sumber : (PP No 22 Tahun 2021)

3. Kontinuitas Sumber Air

Kontinuitas atau keberlanjutan sumber air mengacu pada kemampuan sumber air untuk menyediakan air secara konsisten sepanjang waktu tanpa gangguan signifikan. Hal ini mencakup kestabilan debit air selama berbagai musim, ketahanan terhadap perubahan iklim, dan dampak aktivitas manusia seperti pencemaran atau eksploitasi berlebihan (Yulistyorini et al., 2019). Sumber air yang dipilih harus memiliki kontinuitas yang baik agar sistem penyediaan air minum dapat beroperasi secara terus menerus tanpa risiko kekurangan pasokan.

4. Aspek Biaya

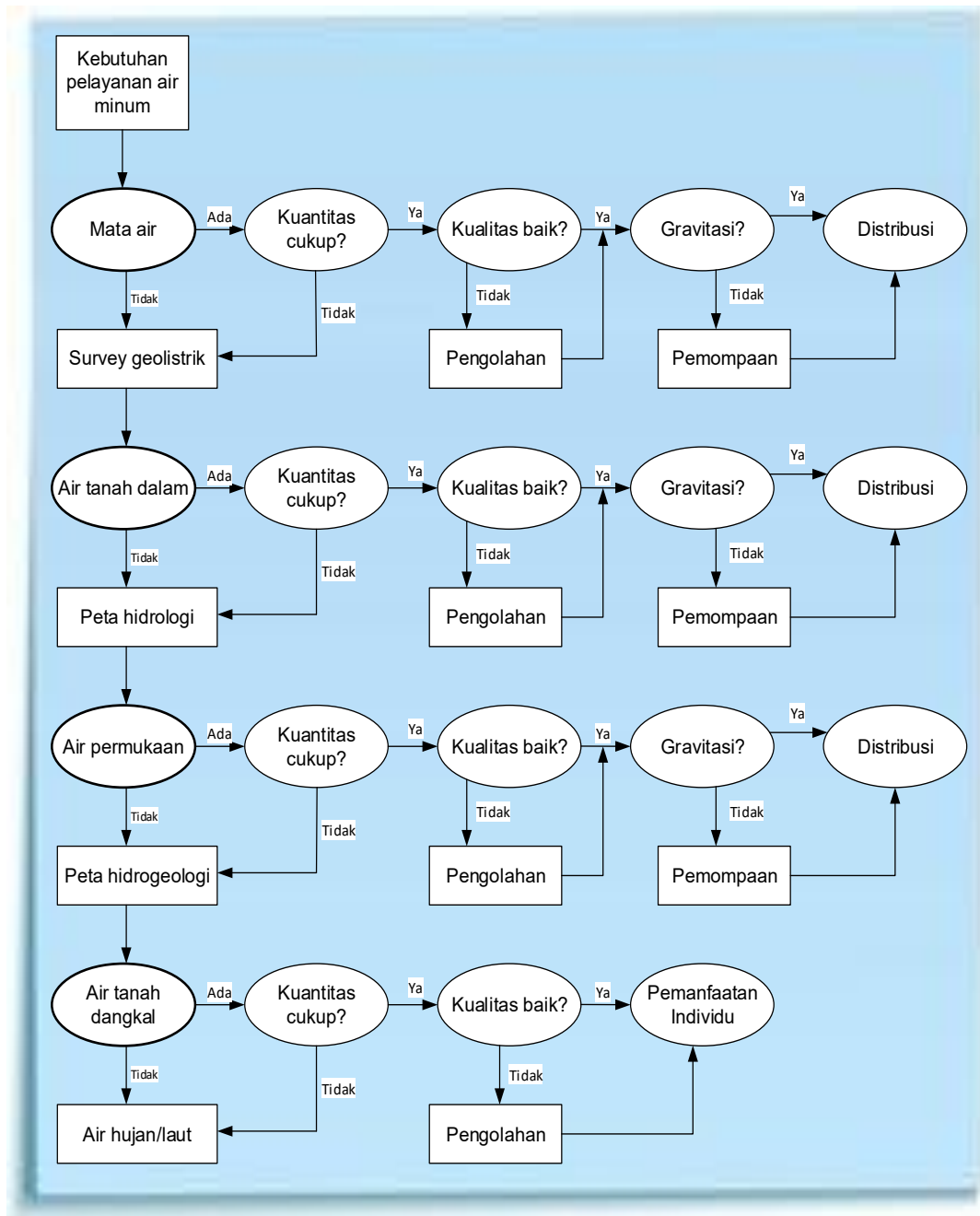
Aspek biaya meliputi tingkat kesulitan pembangunan bangunan pengambil air baku, biaya investasi, biaya operasi, biaya pemeliharaan dan jarak dari sumber air baku ke daerah pelayanan. biaya operasi serta pemeliharaan harus realistis dan sesuai

kemampuan penyelenggara sistem penyediaan air minum (Davis & Cornwell, 2012)

Pemilihan sumber air baku memprioritaskan mata air, air tanah dalam, air permukaan, air tanah dangkal, air hujan dan air laut sebagaimana alur pada gambar 2.1.

B. Unit Produksi

Unit produksi adalah instalasi pengolahan air yang berfungsi mengolah air baku menjadi air minum yang memenuhi standar kesehatan dan mutu yang telah ditetapkan. Proses pengolahan air meliputi proses fisik, kimia dan biologi. Unit produksi terdiri dari bangunan pengolahan, perangkat operasional, alat pengukuran dan pemantauan serta bangunan penampungan air. Pemilihan jenis unit produksi tergantung pada kualitas sumber air baku. Umumnya, semakin buruk kualitas air baku, maka bangunan pengolahan dari unit produksi akan semakin kompleks.



Gambar 1. 1 Alur Pemilihan Sumber Air Baku

Unit produksi pengolahan air bertujuan untuk:

- Mendapatkan air yang layak dikonsumsi
Air yang layak dikonsumsi adalah air yang tidak mengandung kontaminan fisik, kimia dan biologi yang mengganggu kesehatan.
- Mendapatkan air yang diterima masyarakat
Air yang diterima masyarakat adalah air yang jernih, tidak berwarna, tidak berasa, tidak berbau dan memiliki suhu normal.
- Mendapatkan air dengan biaya yang terjangkau
Biaya pengolahan air harus seminimal mungkin tapi tetap memperhatikan kualitas air produksi. Sehingga pemilihan teknologi pengolahan air harus sesuai supaya masyarakat mendapatkan air yang aman dan layak serta biaya yang terjangkau.

C. Unit Distribusi

Unit distribusi berperan sebagai jaringan penghubung yang menyalurkan air minum hasil pengolahan dari unit produksi ke konsumen akhir melalui sistem perpipaan dan sistem non perpipaan.

- Sistem perpipaan, yaitu pendistribusian air minum melalui jaringan pipa distribusi hingga ke pelanggan. Sistem distribusi perpipaan dapat dilakukan dengan pemompaan atau pengaliran secara gravitasi. Hal ini tergantung dari perbedaan elevasi antara unit produksi dengan daerah pelayanan.
- Sistem non perpipaan, yaitu pendistribusian air minum yang tidak melalui jaringan perpipaan, tapi menggunakan alat

transportasi pengangkutan air dari unit produksi ke unit pelanggan seperti mobil tangki, gerobak dan lain-lain.

Sistem distribusi harus dirancang sedemikian rupa agar tekanan air tetap stabil dan kualitas air terjaga selama proses distribusi, sehingga air sampai ke pelanggan dalam kondisi yang aman dan layak konsumsi. Selain itu, jaringan distribusi harus mampu menjangkau seluruh wilayah pelayanan secara merata. Efektivitas unit distribusi sangat menentukan ketersediaan dan kontinuitas pasokan air minum bagi masyarakat, serta meminimalkan kehilangan air (non-revenue water) yang dapat terjadi akibat kebocoran atau pencemaran pada jaringan.

D. Unit Pelayanan

Unit pelayanan merupakan bagian akhir dari sistem penyediaan air minum yang berinteraksi langsung dengan konsumen. Unit pelayanan meliputi pemasangan sambungan rumah (SR) yang menghubungkan jaringan distribusi utama ke instalasi air di rumah atau bangunan pelanggan, serta pemasangan hidran umum yang berfungsi sebagai titik akses air bagi masyarakat di area publik atau tempat-tempat yang belum terjangkau sambungan rumah.

Setiap sambungan rumah dan hidran umum dilengkapi dengan meter air yang berfungsi untuk mengukur volume pemakaian air secara akurat. Pengukuran ini sangat penting untuk penentuan tagihan air, pengelolaan konsumsi, serta deteksi kebocoran atau penyalahgunaan air. Meter air yang dipasang harus memenuhi standar teknis agar data penggunaan air yang diperoleh valid dan dapat dipertanggung jawabkan. Selain itu, unit pelayanan juga bertanggung jawab dalam pemeliharaan dan perbaikan meter air serta jaringan sambungan agar pelayanan air minum tetap lancar dan berkualitas.

1.1.2 Kebutuhan Air Bersih

Kebutuhan air minum merupakan jumlah air yang diperlukan oleh suatu wilayah untuk menunjang berbagai aktivitas sehari-hari. Kebutuhan air minum ditentukan berdasarkan jumlah dan jenis pelanggan serta tingkat konsumsi air. Tingkat konsumsi air adalah besarnya volume air yang dikonsumsi oleh pelanggan dalam waktu satu hari. Tingkat konsumsi air dipengaruhi oleh gaya hidup, kondisi iklim dan harga air. Kebutuhan air dapat menjadi kebutuhan air domestik dan non-domestik.

1. Kebutuhan Air Domestik

Kebutuhan air domestik adalah kebutuhan air yang digunakan rumah tangga untuk kegiatan sehari-hari, seperti minum, memasak, mandi, mencuci, menyiram toilet, hingga aktivitas kebersihan. Jumlah kebutuhan air bersih dibedakan untuk wilayah desa, kota kecil, kota sedang, kota besar dan kota metropolitan.

Tabel 1. 2 Kriteria Kebutuhan Air Domestik

No	Uraian	Kategori Kota Berdasarkan Jumlah Penduduk (jiwa)				
		> 1 juta Metro	500ribu - 1 juta Kota Besar	100 ribu - 500ribu Kota Sedang	20ribu - 100ribu Kota Kecil	< 20ribu Desa
1	Konsumsi Unit Sambungan Rumah (L/org/hari)	190	170	150	130	100

No	Uraian	Kategori Kota Berdasarkan Jumlah Penduduk (jiwa)				
		> 1 juta Metro	500ribu - 1 juta Kota Besar	100 ribu - 500ribu Kota Sedang	20ribu - 100ribu Kota Kecil	< 20ribu Desa
2	Konsumsi Unit Hidran Umum (L/org/hari)	30	30	30	30	30
3	Konsumsi Unit Non Domestik (% dari konsumsi domestik)	20 - 30	20 - 30	20 - 30	20 - 30	10 - 20
4	Kehilangan Air (%)	20 - 30	20 - 30	20 - 30	20 - 30	20
5	Faktor Hari Maksimum	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
6	Faktor Jam Puncak	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
7	Jumlah Jiwa per SR	5	5	6	6	10
8	Jumlah Jiwa per HU	100	100	100	100 - 200	200
9	Sisa Tekan di Jaringan Distribusi (mka)	10	10	10	10	10
10	Jam Operasi (jam)	24	24	24	24	24
11	Volume Reservoir (%)	20	20	20	20	20

No	Uraian	Kategori Kota Berdasarkan Jumlah Penduduk (jiwa)				
		> 1 juta Metro	500ribu - 1 juta Kota Besar	100 ribu - 500ribu Kota Sedang	20ribu - 100ribu Kota Kecil	< 20ribu Desa
12	Perbandingan SR : HU	50:50 - 80:20	50:50 - 80:20	50:50 - 80:20	70:30:00	70:30:00
13	Cakupan Pelayanan* (%)	**90	90	90	90	**70

Keterangan:

- *Tergantung survei proyek
- **) 60% perpipaan; 30% non perpipaan
- ***) 25% perpipaan; 45% non perpipaan

Sumber: (Sarwoko, 1985)

2. Kebutuhan Air Non-Domestik

Kebutuhan air non domestik adalah kebutuhan air bersih di luar keperluan rumah tangga. Kebutuhan air non domestik antara lain penggunaan komersil dan industri yaitu penggunaan air oleh badan-badan komersil dan industri. Serta penggunaan umum yaitu penggunaan air untuk bangunan-bangunan pemerintah, rumah sakit, sekolah-sekolah dan tempat-tempat ibadah. Kebutuhan ini bisa mencapai antara 20% - 25% dari total kebutuhan air domestik.

Tabel 1. 3 Kriteria Kebutuhan Air Non Domestik

No	Uraian	Kategori Kota Berdasarkan Jumlah Penduduk (jiwa)				
		> 1 juta Metro	500ribu - 1 juta Kota Besar	100 ribu - 500ribu Kota Sedang	20ribu - 100ribu Kota Kecil	< 20ribu Desa
1	Sekolah (L/murid/hari)	10	10	10	10	5
2	Rumah Sakit (L/tempat tidur/hari)	200	200	200	200	200
3	Puskesmas / BKIA (m ³ /hari)	2	2	2	2	1,2
4	Masjid / Gereja (m ³ /hari)	1 - 2	1 - 2	1 - 2	1 - 2	1 - 2
5	Kantor (L/pegawai/hari)	10	10	10	10	10
6	Pasar (m ³ /ha/hari)	12	12	12	12	12
7	Hotel / Losmen (L/tempat tidur/hari)	150	150	150	150	90
8	Rumah Makan (L/tempat duduk/hari)	100	100	100	100	100

No	Uraian	Kategori Kota Berdasarkan Jumlah Penduduk (jiwa)				
		> 1 juta Metro	500ribu - 1 juta Kota Besar	100 ribu - 500ribu Kota Sedang	20ribu - 100ribu Kota Kecil	< 20ribu Desa
9	Komplek Militer (L/orang/hari)	60	60	60	60	60
10	Kawasan Industri (L/detik/ha)	0,2 - 0,8	0,2 - 0,8	0,2 - 0,8	0,2 - 0,8	10 L/pekerja/hari
11	Kawasan Pariwisata (L/detik/ha)	0,1 - 0,3	0,1 - 0,3	0,1 - 0,3	0,1 - 0,3	0,1 - 0,3

Sumber: (Keputusan Direktorat Jenderal Cipta Karya, 1998)

1.1.3 Kualitas Air Bersih

Berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023 Tentang Kesehatan Lingkungan, air minum dinyatakan aman apabila memenuhi persyaratan kualitas dari aspek fisika mikrobiologis, kimia, dan radioaktif. Standar kualitas air bersih dibedakan menjadi dua yaitu parameter wajib dan parameter tambahan.

1. Parameter wajib, yaitu parameter yang harus selalu dipenuhi karena berdampak langsung pada kesehatan masyarakat, meliputi:
 - Fisik, yaitu tidak berwarna, tidak berbau, tidak berasa, dan bersuhu mendekati lingkungan.

- Mikrobiologis, yaitu bebas dari *Escherichia coli* dan total coliform.
 - Kimiawi, yaitu pH 6,5-8,5, bebas zat beracun (arsen, merkuri, timbal, sianida), serta tidak mengandung bahan kimia berbahaya di atas ambang batas.
 - Radioaktif, yaitu tidak melebihi batas aman.
2. Parameter tambahan, yaitu parameter yang bisa ditambahkan sesuai dengan kondisi lingkungan di daerah masing-masing, seperti kandungan besi (Fe), mangan (Mn), kesadahan, deterjen, serta senyawa organik tertentu. Walaupun tidak wajib, parameter ini penting untuk menjaga kualitas estetika dan kesehatan jangka panjang.

Tabel 1. 4 Persyaratan Kualitas Air Minum

NO	JENIS PARAMETER	KADAR MAKSIMUM	SATUAN
	MIKROBIOLOGI		
1	<i>Escherichia coli</i>	0	CFU/100 ml
2	Total coliform	0	CFU/100 ml
	FISIK		
3	Suhu	3	C
4	Total Dissolve Solid	<300	mg/L
5	Kekeruhan	<3	NTU
6	Warna	10	TCU
7	Bau	Tidak Berbau	-
	KIMIA		
8	pH	6,5 - 8,5	-
9	Nitrat (NO ₃)	20	mg/L
10	Nitrit (NO ₂)	3	mg/L
11	Kromium (Cr ⁶⁺)	0,01	mg/L
12	Besi (Fe)	0,2	mg/L
13	Mangan (Mn)	0,1	mg/L

NO	JENIS PARAMETER	KADAR MAKSIMUM	SATUAN
14	Sisa Klor	0,2 - 0,5 dengan waktu kontak 30 menit	mg/L
15	Arsen (As)	0,01	mg/L
16	Kadmium (Cd)	0,003	mg/L
17	Timbal (Pb)	0,01	mg/L
18	Flouride (F)	1,5	mg/L
19	Aluminium (Al)	0,2	mg/L

Sumber: (Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023)

1.2 Sistem Pengelolaan Air Limbah

Sistem pengelolaan air limbah merupakan rangkaian kegiatan yang berkaitan dengan upaya mengelola air limbah hingga menghasilkan air limbah yang memenuhi persyaratan untuk dibuang ke lingkungan atau dapat dimanfaatkan kembali.

1.2.1 Komponen Dasar Pengelolaan Air Limbah

A. Unit Pelayanan

Unit pelayanan merupakan bagian terdepan dalam pelayanan pengelolaan air limbah kepada masyarakat. Unit ini meliputi sambungan rumah yang menyalurkan air limbah dari sumber air limbah (kamar mandi, dapur, kloset, dan sebagainya) menuju ke saluran air limbah. Sebelum menuju ke saluran air limbah, sebaiknya dilengkapi dengan bak kontrol yang berfungsi sebagai tempat pembersihan agar tidak terjadi penyumbatan saluran.

B. Unit Pengumpulan

Unit pengumpulan dalam sistem pengelolaan air limbah adalah sarana prasarana yang digunakan untuk mengalirkan air limbah dari unit pelayanan menuju ke unit pengolahan. Unit ini terdiri atas sitem

penyaluran air limbah dalam perpipaan dan perlengkapannya seperti pompa, manhole dan sebagainya.

C. Unit Pengolahan

Unit pengolahan merupakan sarana prasarana yang dapat digunakan untuk mengolah air limbah melalui proses fisik, kimia dan biologis. Unit ini terdiri dari bangunan pengolahan dan perlengkapannya, alat operasional, pengukuran dan pemantauan. Tujuan pengolahan air limbah adalah untuk menghilangkan bahan pencemar dalam air limbah sehingga tidak mencemari lingkungan. Tahapan pengolahan air limbah adalah sebagai berikut:

1. Pengolahan pertama (*primary treatment*), berupa pengolahan secara fisik
2. Pengolahan kedua (*secondary treatment*), berupa pengolahan fisik, kimia atau biologis.
3. Pengolahan ketiga (*tertiary & advance treatment*), untuk mereduksi kandungan nutrisi, pestisida, logam berat atau polutan lain yang tidak bisa dihilangkan dengan pengolahan tahap sebelumnya.

D. Unit Pembuangan Akhir

Unit pembuangan akhir merupakan sarana prasarana pembuangan limbah yang telah dikelola pada unit pengolahan. Produk akhir pengolahan air limbah dapat berupa limbah cair dan limbah padat (lumpur). Pembuangan air limbah ke badan air harus memperhatikan kelas badan air.

- Badan air kelas I hanya boleh menerima air limbah golongan I
- Badan air kelas II boleh menerima air limbah golongan I dan golongan II

- Badan air kelas III boleh menerima air limbah golongan I dan golongan II
- Badan air kelas IV boleh menerima air limbah golongan I dan golongan II

1.2.2 Kuantitas Air Limbah

Kuantitas air limbah adalah jumlah air limbah yang dihasilkan dari suatu aktivitas yang dinyatakan dalam satuan liter per hari (L/hari) atau meter kubik per hari (m^3/hari). Kuantitas ini sangat penting untuk diketahui dalam pengelolaan air limbah agar sistem pengolahan yang dirancang dapat menampung dan mengolah air limbah secara efektif. Tidak semua air bersih yang digunakan akan menjadi air limbah. Secara umum, sekitar 60% hingga 90% dari air bersih yang digunakan dalam rumah tangga atau industri akan berubah menjadi air limbah. Persentase ini bervariasi tergantung pada jenis aktivitas dan efisiensi penggunaan air. Air bersih yang digunakan akan menjadi air limbah domestik, sedangkan sisanya akan hilang karena penguapan, peresapan ke tanah atau penggunaan lain yang tidak menghasilkan limbah cair. Perhitungan kuantitas air limbah digunakan untuk menentukan kapasitas Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL).

1.2.3 Baku Mutu Air Limbah

Menurut Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021, baku mutu air limbah adalah batas maksimal kandungan zat pencemar yang diperbolehkan sebelum dibuang ke lingkungan. Parameter mutu air limbah ditentukan berdasarkan jenis kegiatan seperti limbah domestik, industri, rumah sakit, pertambangan, atau perkebunan. Baku mutu air limbah domestik ditetapkan dalam Peraturan Menteri

Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 11 Tahun 2025 Lampiran 1 sebagai berikut:

Tabel 1. 5 Baku Mutu Air Limbah Kakus Yang Diolah Pada IPAL dan Dibuang Ke Media Air

PARAMETER	SATUAN	KADAR PALING TINGGI
Tingkat Keasaman (pH*)	-	6 - 9
Kebutuhan Oksigen Biokimiawi (BOD)	mg/l	150
Kebutuhan Oksigen Kimiawi (COD)	mg/l	300
Padatan Tersuspensi Total (TSS)	mg/l	100
Amoniak (NH ₃ -N)	mg/l	50
<i>Fecal coliform</i>	MPN/100 ml	1.000

Keterangan: *) = diukur langsung pada titik penaaatan

Sumber: (PerMen LHK Nomor 11 Tahun 2025)

Tabel 1. 6 Baku Mutu Air Limbah Non Kakus Atau Gabungan Air Limbah Kakus Dengan Air Limbah Non Kakus Dan Dibuang Ke Media Air

PARAMETER	SATUAN	KADAR PALING TINGGI (berdasarkan volume Air Limbah Domestik yang dihasilkan dalam m ³ /hari)		
		$x \leq 50$	$3 < x \leq 50$	≤ 30
Tingkat Keasaman (pH*)	-	6 - 9	6 - 9	6 - 9
Kebutuhan Oksigen Biokimiawi (BOD)	mg/l	30	50	75
Kebutuhan Oksigen Kimiawi (COD)	mg/l	100	100	

PARAMETER	SATUAN	KADAR PALING TINGGI (berdasarkan volume Air Limbah Domestik yang dihasilkan dalam m ³ /hari)		
		$x \leq 50$	$3 < x \leq 50$	≤ 30
Padatan Tersuspensi Total (TSS)	mg/l	30	50	
Amoniak (NH ₃ -N)	mg/l	10	20	
Deterjen Total***	mg/l	5	10	
Minyak & Lemak	mg/l	5	10	10
Sisa Klorin (Cl ₂)*	mg/l	1	1**	1**
<i>Salmonella</i> **	-	Negatif	Negatif	Negatif
<i>Shigella</i> *	-	Negatif	Negatif	Negatif
<i>Vibrio cholera</i> **	-	Negatif	Negatif	Negatif
<i>Streptococcus</i> *	-	Negatif	Negatif	Negatif
<i>Fecal coliform</i>	MPN/100 ml	1.000	1.000	1.000

Keterangan:

- x = volume Air Limbah Domestik yang dihasilkan.
- *) diukur langsung pada titik penataan.
- **) khusus Pengolahan Air Limbah Domestik pada Fasilitas Pelayanan Kesehatan yang tidak mengolah limbah bahan berbahaya dan beracun dan telah melakukan standar operasional prosedur pengelolaan Air Limbah sesuai peraturan perundang-undangan.
- ***) sebagai *surfactant anionic* (MBAS), khusus untuk kegiatan yang melakukan kegiatan pencucian atau *laundry*.

Sumber: (PerMen LHK Nomor 11 Tahun 2025)

BAB 2 PENGOLAHAN AIR SECARA FISIK - KIMIA

2.1 *Screening*

Screening merupakan tahap awal dalam unit operasi pengolahan air yang berfungsi memisahkan material kasar dari aliran air baku sebelum masuk ke proses selanjutnya. Material yang tersaring dapat berupa ranting, daun, plastik, batu, maupun sampah berukuran besar yang berpotensi menyumbat pipa, merusak pompa, atau menurunkan kinerja unit pengolahan. Menurut (Tchobanoglous & Burton, 2014), *screening* adalah langkah penting yang tidak hanya memperpanjang umur peralatan, tetapi juga mengurangi beban unit proses berikutnya sehingga meningkatkan efisiensi keseluruhan instalasi. Hasil penelitian oleh (Wibowo et al., 2020) menunjukkan bahwa penerapan unit *screening* yang optimal pada instalasi pengolahan air limbah domestik dapat mengurangi *Total Suspended Solid* (TSS) hingga 20% sebelum masuk ke unit sedimentasi. penggunaan drum screen di instalasi pengolahan air minum dengan debit besar mampu meningkatkan efisiensi pengolahan lanjutan karena beban padatan kasar telah tersaring secara signifikan (Rahman & Syafrudin, 2019).

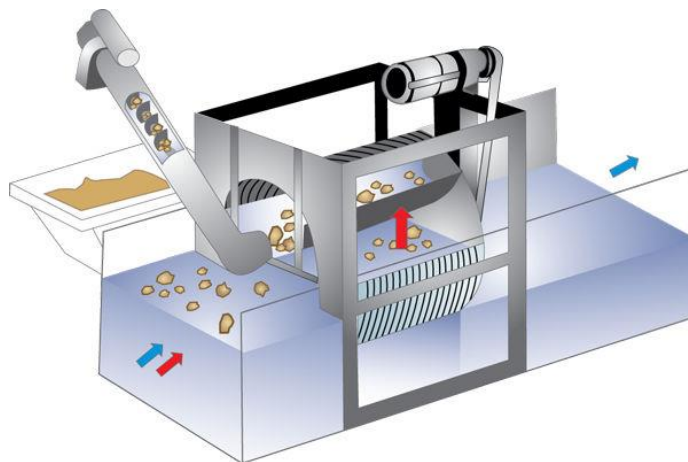
Jenis-Jenis *Screening*

Beberapa jenis *screening* yang umum digunakan dalam instalasi pengolahan air meliputi:

1. *Rotary Screen*

Rotary drum screen merupakan salah satu jenis penyaring mekanis yang berbentuk silinder dan berputar secara horizontal atau miring. Air limbah masuk ke dalam drum, kemudian partikel padat berukuran lebih besar tertahan di permukaan drum yang dilengkapi dengan

perforated plate atau wedge-wire dengan ukuran bukaan 0,25-6 mm. Selama drum berputar, material yang tertahan akan dibersihkan oleh scraper atau semprotan air bertekanan dan kemudian dialirkan ke unit pengolahan padatan seperti *conveyor* atau *compactor*. Keunggulan utama rotary screen adalah kemampuannya menyaring partikel berukuran halus dengan operasi yang relatif otomatis, Namun, kelemahannya terletak pada sensitivitas terhadap material lengket dan benda besar yang dapat merusak permukaan drum, sehingga umumnya rotary screen dipasang setelah *coarse screen* sebagai proteksi awal (En-Nabety & Boudi, 2024).

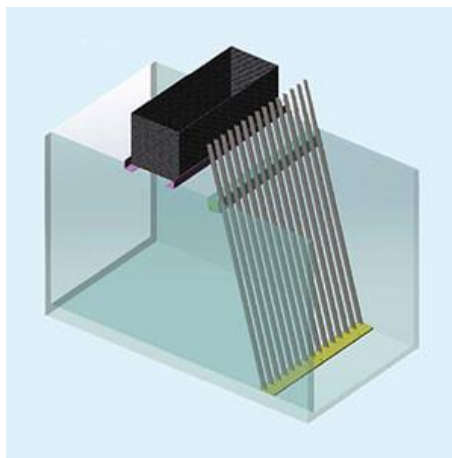


Gambar 2. 1 Rotary Screen

2. Manual Screen

Manual screen merupakan bentuk paling sederhana dari unit penyaringan, berupa batang-batang logam yang dipasang vertikal atau miring pada saluran dengan jarak antar batang relatif lebar (biasanya >25 mm). Aliran air akan melewati celah antar batang, sementara sampah padat seperti plastik, kayu, dan kain tertahan di permukaan screen. Pembersihan dilakukan secara manual oleh

operator menggunakan *rake* atau garpu besi, sehingga efektivitas sangat bergantung pada frekuensi dan konsistensi pembersihan. Unit ini banyak digunakan pada instalasi berkapasitas kecil, stasiun pompa, atau fasilitas dengan sumber daya terbatas karena biaya investasi dan operasinya yang rendah (De la Torre-Bayo et al., 2022). Meski sederhana, *manual screen* memiliki keterbatasan, terutama pada kondisi dengan beban padatan tinggi karena berisiko menyumbat aliran dan meningkatkan headloss secara signifikan. Penggunaannya lebih sesuai pada tahap awal pretreatment skala kecil yang tidak memerlukan pemisahan partikel halus.

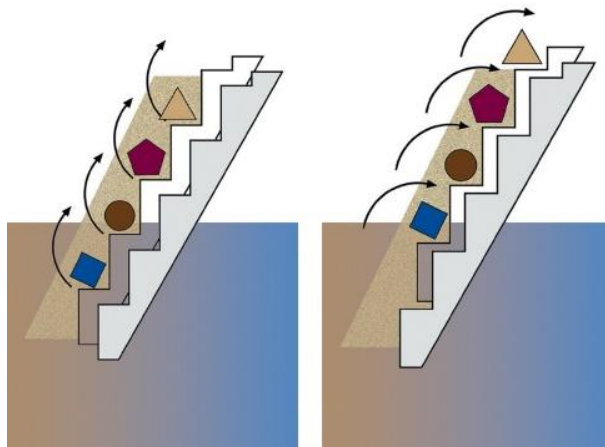


Gambar 2. 2 *Manual Screen*

3. *Step Screen*

Step screen adalah *fine screen* modern yang dirancang dengan prinsip mekanis berupa serangkaian plat berbentuk tangga (*step*) yang bergerak bergantian untuk mengangkat padatan dari dasar saluran ke permukaan. Air limbah melewati celah kecil pada screen (biasanya 3-6 mm), sehingga padatan yang tertahan membentuk lapisan karpet (*screenings mat*) yang kemudian terangkat oleh mekanisme *step*.

Keunggulan utama unit ini adalah efisiensinya yang tinggi dalam menangkap partikel kecil sekaligus meminimalkan penghancuran materi organik yang dapat mengganggu proses lanjutan (Lemonidis et al., 2022). *Step screen* umumnya digunakan pada instalasi modern yang memerlukan pretreatment halus, seperti MBR, dan sering dikombinasikan dengan sistem *washing* dan *compacting* untuk mengurangi volume *screenings* (Akhtar et al., 2024). Kelemahan utamanya adalah biaya investasi yang lebih tinggi dibanding bar screen konvensional, serta kebutuhan ruang tambahan untuk unit penanganan *screenings*. Keuntungan dari segi kualitas pretreatment membuat *step screen* semakin baik dalam instalasi air limbah perkotaan dengan standar efluen ketat (En-Nabety & Boudi, 2024).



Gambar 2. 3 Step Screen

4. Mechanical Screen

Mechanical screen merupakan bar screen yang dilengkapi dengan sistem pembersihan otomatis menggunakan rake atau chain yang digerakkan secara mekanis. Sistem ini dirancang untuk mengatasi keterbatasan manual bar screen, terutama dalam mengurangi intervensi manusia dan meningkatkan kontinuitas operasi. Mekanisme

rake akan mengangkat screenings yang tertahan di permukaan bar, kemudian membuangnya ke *hopper* atau *conveyor*. *Mechanical screen* banyak digunakan pada instalasi pengolahan air limbah perkotaan berskala menengah hingga besar, di mana kontinuitas operasi dan keandalan sangat penting. Studi simulasi numerik berbasis *computational fluid dynamics* (CFD) menunjukkan bahwa desain *mechanical screen*, termasuk jarak antar batang dan bentuk rake, memengaruhi efisiensi penangkapan serta distribusi gaya fluida pada struktur screen. Keunggulannya adalah efektivitas dalam menangani beban padatan tinggi dengan risiko *clogging* rendah, sementara kelemahannya terletak pada kebutuhan perawatan mekanik yang lebih kompleks serta biaya investasi yang lebih besar.



Gambar 2. 4 Mechanical Screen

Screening berperan sebagai pelindung peralatan mekanis sekaligus pencegah gangguan operasional. Keberadaannya dapat menurunkan biaya operasional karena mengurangi frekuensi perawatan pompa maupun unit proses lainnya. (Metcalf & Eddy, 2013) menekankan bahwa keberhasilan tahap awal seperti screening sangat menentukan

kinerja proses berikutnya. semakin sedikit material kasar yang lolos, semakin efektif sedimentasi dan filtrasi berlangsung.

2.2 Koagulasi

Koagulasi berfungsi menghilangkan partikel koloid dan padatan halus yang tidak dapat diendapkan hanya dengan sedimentasi biasa. Partikel koloid umumnya berukuran sangat kecil (1-100 nm), bermuatan listrik, dan stabil di dalam air, sehingga sulit mengendap secara alami. Melalui koagulasi, partikel tersebut dinetralkan dengan bantuan bahan kimia (koagulan), lalu bergabung membentuk partikel lebih besar (flok) yang lebih mudah diendapkan.

Menurut (Metcalf & Eddy, 2013), koagulasi merupakan proses destabilisasi koloid melalui penambahan koagulan kimia, yang mengurangi muatan partikel sehingga memicu penggumpalan. Koagulasi adalah tahap awal penting sebelum flokulasi, filtrasi, dan disinfeksi agar kualitas air memenuhi standar baku mutu. Koagulasi bekerja melalui tiga mekanisme utama:

1. Netralisasi muatan, yaitu ion positif dari koagulan (misalnya Al^{3+} atau Fe^{3+}) bereaksi dengan partikel koloid bermuatan negatif sehingga muatannya hilang dan partikel mudah bergabung.
2. Adsorpsi dan pembentukan flok, yaitu molekul polimer dari koagulan menempel di permukaan partikel lalu menghubungkannya, membentuk flok besar.
3. Presipitasi, yaitu pada kondisi pH tertentu, koagulan seperti alum ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) atau *ferric chloride* (FeCl_3) membentuk endapan hidroksida ($\text{Al}(\text{OH})_3$ atau $\text{Fe}(\text{OH})_3$) yang menyerap partikel koloid dan mengendapkannya.

Dalam praktiknya, larutan koagulan ditambahkan ke air baku yang sedang diaduk cepat (*rapid mixing*) selama 1-2 menit agar tercampur merata. Tahap berikutnya adalah flokulasi, dengan pengadukan lambat untuk memperbesar flok agar stabil dan mudah diendapkan. Koagulan dapat dibedakan menjadi tiga jenis yaitu:

1. Koagulan anorganik:

- Alumunium sulfat ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) → paling umum digunakan untuk menurunkan kekeruhan.
- *Ferric chloride* (FeCl_3) dan *ferric sulfate* ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) → efektif pada rentang pH lebih luas.
- Kapur ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) → digunakan untuk menaikkan pH dan membantu presipitasi.

2. Polimer organik:

- Polielektrolit sintetis sebagai *coagulant aid*, berfungsi memperbesar flok.
- Polimer kationik, anionik, maupun nonionik dipilih sesuai karakteristik air baku.

3. Koagulan alami:

- Ekstrak biji kelor (*Moringa oleifera*), biji kedelai, dan bahan organik lainnya.
- Lebih ramah lingkungan dan murah, tetapi umumnya kurang stabil saat penyimpanan.

2.3 Flokulasi

Flokulasi adalah tahap lanjutan setelah proses koagulasi dalam pengolahan air. Jika koagulasi berfungsi menetralkan muatan partikel, flokulasi berperan memperbesar partikel tersebut melalui pengadukan lambat, sehingga terbentuk flok dengan ukuran dan

massa yang cukup untuk mengendap pada tahap sedimentasi. Menurut (Metcalf & Eddy, 2013), flokulasi adalah proses pengadukan lambat untuk meningkatkan peluang tumbukan antarpartikel yang sudah tidak stabil. Flokulasi tidak hanya menentukan ukuran, tetapi juga kualitas flok, kekompakan dan densitasnya yang berpengaruh langsung terhadap sedimentasi dan filtrasi.

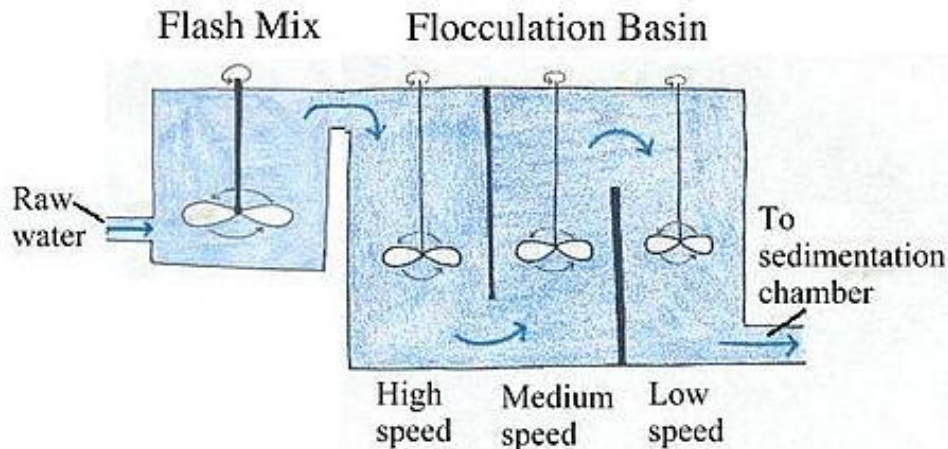
Tahapan proses flokulasi meliputi:

1. Destabilisasi partikel, yaitu partikel hasil koagulasi kehilangan muatan sehingga mudah bertumbukan.
2. Agregasi partikel, yaitu dengan pengadukan lambat, partikel kecil bertemu dan bergabung membentuk agregat lebih besar.
3. Pembentukan flok, yaitu dengan waktu dan energi pengadukan yang tepat, flok tumbuh menjadi padat dan stabil.

Flokulasi biasanya dilakukan dengan alat seperti *paddle flocculator*, *hydraulic flocculator*, atau sistem mekanik lain. Kecepatan gradien pengadukan (G value) lebih rendah dibanding koagulasi, yaitu 20-80 s^{-1} , dengan waktu detensi 15-30 menit.

Jenis Flokulasi

1. Perikinetik (*Brownian motion*) yaitu flokulasi akibat gerak acak molekul air (efektif untuk partikel $<1 \mu m$).
2. Ortokeretik (*shear-induced*), terjadi karena gaya geser pengadukan lambat, umum diterapkan di instalasi pengolahan air.
3. Dengan bantuan polimer, yaitu penambahan polimer sintetik atau alami untuk membentuk jembatan (*bridging*), sehingga flok menjadi lebih besar dan padat.



Gambar 2. 5 Gambaran Proses Koagulasi - Flokulasi

Pengadukan Koagulasi - Flokulasi

Pengadukan merupakan salah satu tahapan krusial dalam proses koagulasi-flokulasi pada pengolahan air, karena menentukan efektivitas distribusi koagulan serta keberhasilan pembentukan flok. Pengadukan berfungsi untuk mendispersikan bahan kimia koagulan secara merata ke dalam massa air sehingga partikel koloid yang semula stabil dapat terdestabilisasi dan beragregasi menjadi flok berukuran lebih besar yang mudah diendapkan pada unit sedimentasi (Gregory & Duan, 2001).

Berdasarkan kecepatan pencampurannya, pengadukan dibedakan menjadi:

1. Pengadukan cepat (*rapid mixing*)

Bertujuan mencampurkan koagulan dalam waktu singkat dengan gradien kecepatan tinggi ($G = 700-1000 \text{ s}^{-1}$) selama 30-60 detik, sehingga partikel koloid dapat segera terdestabilisasi dan membentuk mikroflok.

2. pengadukan lambat (*slow mixing*)

Dilakukan dengan gradien kecepatan rendah ($G = 20-80 \text{ s}^{-1}$) selama 20-30 menit, yang memungkinkan partikel-partikel teragregasi lebih lanjut membentuk flok besar, padat, dan stabil (Jarvis et al., 2005).

Berdasarkan metode penerapannya, pengadukan dapat dilakukan secara mekanis maupun hidrolis.

1. Pengadukan mekanis

Menggunakan peralatan seperti impeller, paddle, atau mixer, yang memberikan kontrol lebih baik terhadap kecepatan dan distribusi energi meskipun memerlukan konsumsi energi listrik dan perawatan rutin.

2. Pengadukan hidrolis

Memanfaatkan energi aliran air melalui pipa, saluran, atau baffle, yang relatif hemat energi dan sering diaplikasikan pada instalasi berskala besar, meskipun kecepatan pengadukan sulit dikendalikan karena sangat bergantung pada rancangan hidrolik sistem (Binnie et al., 2002; Letterman, 1999)

Perhitungan pada proses koagulasi flokulasi meliputi:

Dosis Koagulan

Dosis (mg/L) =

$$\text{Dosis} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{\text{Massa Koagulan (mg)}}{\text{Volume Air (L)}}$$

atau untuk perhitungan dengan debit adalah

$$\text{Dosis} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{\text{Massa Koagulan} \left(\frac{\text{kg}}{\text{hari}} \right) \times 10^6}{\text{Debit} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{hari}} \right) \times 1000}$$

Jumlah Bahan Kimia yang Dibutuhkan per Hari

Massa Koagulan (kg/hari) =

$$\text{Massa Koagulan} \left(\frac{\text{kg}}{\text{hari}} \right) = \text{Dosis} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \times \text{Debit} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{hari}} \right) \times 10^{-3}$$

(konversi $1 \text{ mg/L} = 1 \text{ g/m}^3 = 10^{-3} \text{ kg/m}^3$).

Waktu Pengadukan

- Pengadukan cepat (rapid mixing) → 30-60 detik dengan kecepatan gradien $G = 700-1000 \text{ s}^{-1}$.
- Pengadukan lambat (flocculation) → 20-30 menit dengan $G = 20-80 \text{ s}^{-1}$.

Persamaan dasar:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

Keterangan:

P = daya pengadukan (Nm/s)

μ = viskositas dinamik (Ns/m²)

V = volume air (m³)

Contoh Soal dan Pembahasan

Soal 1: Sebuah instalasi pengolahan air memiliki debit 5.000 m³/hari. Pada uji coba jar test, diperoleh dosis optimum tawas sebesar 40 mg/L. Hitunglah jumlah tawas yang diperlukan per hari dalam satuan kg/hari.

Penyelesaian:

$$\text{Massa} \left(\frac{\text{kg}}{\text{hari}} \right) = \text{Dosis} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \times \text{Debit} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{hari}} \right) \times 10^{-3}$$

$$= 40 \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \times 5.000 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{hari}} \right) \times 10^{-3}$$

$$= 200 \frac{\text{kg}}{\text{hari}}$$

Jadi, instalasi pengolahan air memerlukan 200 kg tawas per hari.

Soal 2: Sebuah instalasi pengolahan air menggunakan larutan PAC. Larutan PAC disiapkan dengan konsentrasi 10% (berarti 10 g PAC dalam 100 mL larutan). Jika dosis optimum yang dibutuhkan adalah 25 mg/L untuk debit 2.000 m³/hari, hitunglah:

- Jumlah PAC padatan yang dibutuhkan per hari (kg/hari).
- Volume larutan PAC 10% yang harus disiapkan per hari (liter/hari).

Penyelesaian:

- Hitung massa PAC padatan per hari

$$\text{Massa} \left(\frac{\text{kg}}{\text{hari}} \right) = 25 \times 2.000 \times 10^{-3} = 50 \frac{\text{kg}}{\text{hari}}$$

Massa PAC yang dibutuhkan adalah 50 kg/hari.

- Hitung volume larutan PAC 10%

Larutan 10% = 100 g/L = 0,1 kg/L, maka volume yang dibutuhkan adalah

$$\text{Volume} \left(\frac{\text{L}}{\text{hari}} \right) = \frac{50}{0,1} = 500 \frac{\text{L}}{\text{hari}}$$

Volume larutan PAC yang harus disiapkan adalah 500 L/hari.

2.4 Sedimentasi

Sedimentasi adalah pemisahan solid dari liquid menggunakan pengendapan secara gravitasi untuk menyisahkan *suspended solid*. Sedimentasi pada pengolahan air bertujuan untuk pengendapan air permukaan untuk penyisihan partikel diskret dan pengendapan flok hasil koagulasi - flokulasi sebelum disaring pada proses selanjutnya yaitu filtrasi. Prinsip kerja sedimentasi didasarkan pada perbedaan densitas antara air dan partikel padat. Partikel dengan densitas lebih tinggi akan mengendap ke dasar bak (*sludge zone*), sedangkan air relatif bersih bergerak ke arah atas menuju proses berikutnya.

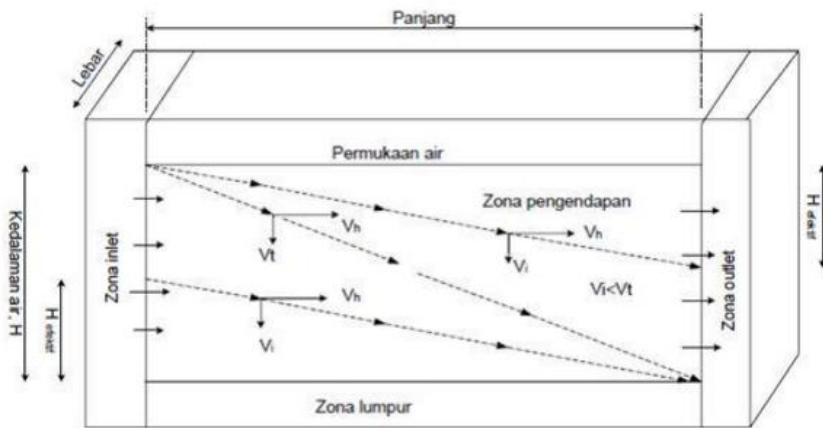
Bentuk bak sedimentasi dibedakan menjadi:

1. Segi empat (*rectangular*), air mengalir horizontal dari inlet menuju outlet, sementara partikel mengendap ke bawah.
2. Lingkaran (*circular*), center feed, air masuk melalui pipa menuju inlet bak di bagian tengah bak, kemudian air mengalir horizontal dari inlet menuju outlet di sekeliling bak, sementara partikel mengendap ke bawah.
3. Lingkaran (*circular*), periferal feed, air masuk melalui sekeliling lingkaran dan secara horizontal mengalir menuju ke outlet di bagian tengah lingkaran, sementara partikel mengendap ke bawah.

bagian-bagian dari bak sedimentasi adalah:

1. *Inlet* yaitu tempat masuk ke dalam bak.
2. Zona pengendapan yaitu tempat flok/partikel mengalami proses pengendapan
3. Ruang lumpur yaitu tempat lumpur berkumpul sebelum diambil ke luar bak.

4. *Outlet* yaitu tempat dimana air akan meninggalkan bak yang biasanya berbentuk pelimpah (*weir*).



Gambar 2. 6 Bagian-bagian bak sedimentasi

Mekanisme sedimentasi dapat dibagi menjadi empat tipe:

1. Settling tipe I (*Discrete Settling*) yaitu partikel mengendap secara individual tanpa interaksi, misalnya pasir atau kerikil.
2. Settling tipe II (*Flocculant Settling*) yaitu partikel kecil bergabung selama proses pengendapan, membentuk flok lebih besar dengan kecepatan jatuh lebih tinggi.
3. Settling tipe III (*Hindered/Zone Settling*) yaitu konsentrasi partikel tinggi sehingga partikel bergerak bersama-sama sebagai satu zona.
4. Settling tipe IV (*Compression Settling*) yaitu terjadi pada konsentrasi padatan sangat tinggi, di mana partikel saling menekan dan membentuk lapisan lumpur padat di dasar bak.

Beberapa faktor utama yang memengaruhi sedimentasi antara lain:

- Ukuran dan densitas flok - semakin besar dan padat, semakin cepat mengendap.
- Waktu detensi hidrolik, terjadi 2-4 jam pada bak konvensional.

- Kecepatan aliran, aliran terlalu cepat dapat membawa partikel keluar sebelum sempat mengendap.
- Desain bak, meliputi kedalaman, luas permukaan, panjang lintasan, dan penggunaan plate settler berperan penting.

Dalam perencanaan unit sedimentasi, perhitungan utama yang perlu dipahami adalah kecepatan jatuh partikel (*settling velocity*) dan waktu detensi hidraulik (*hydraulic detention time*).

Kecepatan Jatuh Partikel (*Settling Velocity*)

Kecepatan jatuh partikel menunjukkan seberapa cepat partikel turun ke dasar.

Untuk partikel kecil yang mengendap di dalam fluida dengan aliran laminar, digunakan Hukum Stokes:

$$v_s = \frac{g \cdot (\rho_p - \rho) \cdot d^2}{18\mu}$$

keterangan:

v_s = kecepatan jatuh partikel (m/s)

g = percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

ρ_p = massa jenis partikel (kg/m³)

ρ = massa jenis air (kg/m³)

d = diameter partikel (m)

μ = viskositas dinamis air (Ns/m²)

Semakin besar ukuran partikel (d) atau semakin besar perbedaan massa jenis partikel dengan air ($\rho_p - \rho$), maka partikel akan lebih cepat mengendap.

Waktu Detensi Hidraulik (*Hydraulic Detention Time*)

Waktu detensi hidraulik menunjukkan lamanya air berada di dalam bak pengendap. Semakin lama air berada di bak, semakin besar peluang partikel mengendap.

$$t_d = \frac{V}{Q}$$

keterangan:

t_d = waktu detensi hidraulik (s)

V = volume bak pengendap (m^3)

Q = debit aliran air (m^3/s)

Kecepatan Luas Permukaan (*Surface Overflow Rate*)

Dalam perhitungan desain sedimentasi, dikenal juga parameter kecepatan permukaan atau *surface overflow rate* (SOR):

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

keterangan:

v_o = kecepatan permukaan (m/s)

Q = debit aliran (m^3/s)

A = luas permukaan bak pengendap (m^2)

Agar partikel bisa mengendap, maka berlaku syarat berikut. Artinya, kecepatan jatuh partikel harus lebih besar atau sama dengan kecepatan permukaan.

$$V_s \geq V_o$$

Contoh Soal dan Pembahasan

Soal 1: Sebuah instalasi pengolahan air minum (IPA) merencanakan bak sedimentasi berbentuk persegi panjang dengan ukuran:

- panjang = 25 m
- lebar = 8 m
- kedalaman = 3 m

Debit air baku yang masuk adalah $0,06 \text{ m}^3/\text{s}$. Jika kecepatan jatuh partikel hasil koagulasi-flokulasi adalah $v_s = 3,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, periksa apakah partikel tersebut dapat terendapkan di dalam bak sedimentasi.

Penyelesaian:

Hitung luas permukaan bak

$$A = \text{panjang} \times \text{lebar} = 25 \times 8 = 200 \text{ m}^2$$

Hitung kecepatan permukaan (*surface overflow rate*)

$$v_o = \frac{Q}{A} = \frac{0,06}{200} = 3,0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

Bandingkan dengan kecepatan jatuh partikel

$$v_s = 3,5 \times 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}} > v_o = 3,0 \times 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Partikel akan terendapkan dengan baik karena kecepatan jatuhnya lebih besar dari kecepatan permukaan.

Soal 2: Air baku dari sungai dengan debit 4.000 m³/hari akan diolah di unit sedimentasi. Partikel tersuspensi yang ada di dalam air memiliki kecepatan jatuh $v_s = 2,2 \times 10^{-4}$ m/s. Jika bak pengendap direncanakan dengan luas permukaan 150 m², apakah luas tersebut sudah cukup untuk mengendapkan partikel?

Penyelesaian:

Ubah debit ke satuan m³/s

$$Q = \frac{4000}{24 \times 3600} = 0,046 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Hitung kecepatan permukaan

$$v_o = \frac{Q}{A} = \frac{0,046}{150} = 3,07 \times 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Bandingkan antara v_s dan v_o

$$v_s = 2,2 \times 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}} < v_o = 3,07 \times 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Partikel tidak akan mengendap sempurna karena kecepatan jatuhnya lebih kecil daripada kecepatan permukaan. Luas bak perlu diperbesar agar v_o lebih kecil dari v_s .

2.5 Filtrasi

Filtrasi berfungsi menyaring partikel tersuspensi, koloid, dan mikroorganisme yang tidak sepenuhnya terendapkan pada tahap sedimentasi. Filtrasi sebagai proses pemisahan fisik, di mana air dilewatkan melalui media berpori seperti pasir, antrasit, atau karbon aktif sehingga partikel padatan tertahan di dalamnya (Metcalf & Eddy, 2013). Filtrasi berperan sebagai tahap akhir yang sangat menentukan kualitas air, khususnya pada pengolahan air minum. Selain mengurangi kekeruhan, filtrasi juga mampu menurunkan konsentrasi

patogen, zat organik, hingga logam berat apabila dipadukan dengan media khusus.

Proses filtrasi melibatkan kombinasi beberapa mekanisme, yaitu:

1. Penyaringan Mekanis (*Straining*) yaitu partikel yang lebih besar dari celah media tertahan di permukaan atau di antara butiran media.
2. Sedimentasi Interstisial yaitu partikel kecil mengendap di pori-pori media akibat kecepatan aliran melambat.
3. Difusi dan Adsorpsi yaitu partikel koloid dan mikroorganisme menempel pada permukaan media karena gaya van der Waals atau muatan elektrostatis.
4. Proses Biologis yaitu pada *slow sand filter*, terbentuk lapisan biologis (*schmutzdecke*) yang berperan mendegradasi senyawa organik dan menurunkan patogen.

Air dapat dialirkan dari atas ke bawah (*downflow*) atau dari bawah ke atas (*upflow*). Ketika media jenuh oleh partikel, dilakukan pencucian balik (*backwashing*) agar media dapat digunakan kembali.

Berdasarkan kapasitas produksi air yang terolah, filter pasir dapat dibedakan menjadi dua, yaitu:

1. **Rapid Sand Filter (RSF) - Filter Pasir Cepat**

Filter yang mempunyai kecepatan filtrasi cepat berkisar antara 6 hingga 11 m/jam. Filter ini selalu didahului dengan proses koagulasi-flokulasi dan pengendapan untuk memisahkan padatan tersuspensi. Jika kekeruhan pada influen filter pasir cepat berkisar 5 - 10 NTU, maka efisiensi penurunan kekeruhannya mencapai 90 - 98% (Masduqi & Assomadi, 2012). Bagian dari filter pasir cepat adalah:

- Bak filter, yaitu tempat proses filtrasi berlangsung. Jumlah dan ukuran bak tergantung debit pengolahan.
- Media filter, yaitu bahan berbutir/granular yang membentuk pori-pori diantara butiran media. Pada pori-pori inilah air mengalir dan terjadi proses penyaringan.
- Sistem *underdrain*, yaitu sistem pengaliran air yang telah melewati proses filtrasi yang terletak di bawah media filter.

Underdrain terdiri atas:

- *Orifice* adalah lubang kecil yang berfungsi untuk mengatur serta mendistribusikan aliran air secara merata ke seluruh bagian media filter. Dalam sistem *underdrain*, *orifice* berperan penting dalam memastikan bahwa air yang masuk maupun keluar dari media filter tersebar secara merata, sehingga proses filtrasi dapat berlangsung secara optimal dan media filter terhindar dari kerusakan akibat aliran yang tidak merata.
- *Lateral* adalah pipa-pipa cabang yang berasal dari pipa utama (*manifold*) dan dilengkapi dengan sejumlah *orifice* sepanjang pipa tersebut. Fungsi utama *lateral* adalah menyalurkan air secara merata ke seluruh area media filter. Dengan adanya *lateral*, distribusi air menjadi lebih merata sehingga seluruh bagian media filter dapat berfungsi secara efektif dalam proses penyaringan.
- *Manifold* merupakan pipa utama yang berperan sebagai saluran pusat dalam sistem *underdrain*. *Manifold* bertugas mengumpulkan air hasil filtrasi dari *lateral* dan mengalirkannya keluar dari sistem filter. Sebaliknya, pada saat proses pencucian balik (*backwash*), *manifold*

mendistribusikan air masuk ke lateral untuk membersihkan media filter. Dengan demikian, manifold berfungsi sebagai penghubung utama yang mengatur aliran air masuk dan keluar dalam sistem filtrasi.

Tabel 2. 1 Kriteria desain filter pasir lambat

Unit	Saringan Biasa (Gravitasi)	Saringan dg Pencucian Antar Saringan	Saringan Bertekanan
Jumlah bak saringan	$N = 12 Q^{0,5 *}$	Minimum 5 bak	-
Kecepatan penyaringan (m/jam)	6 - 11	6 - 11	12 - 33
Pencucian:			
• Sistem pencucian	Tanpa/dengan blower &/atau <i>surface wash</i>	Tanpa/dengan blower &/atau <i>surface wash</i>	Tanpa/dengan blower &/atau <i>surface wash</i>
• Kecepatan (m/jam)	36 - 50	36 - 50	72 - 198
• Lama pencucian (menit)	10 - 15	10 - 15	-
• Periode antar pencucian (jam)	18 - 24	18 - 24	-
• Ekspansi (%)	30 - 50	30 - 50	30 - 50
Media pasir:			
• Tebal (mm)	300 - 700	300 - 700	300 - 700
• Singel media	600 - 700	600 - 700	600 - 700
• Media ganda	300 - 600	300 - 600	300 - 600

Unit	Saringan Biasa (Gravitasi)	Saringan dg Pencucian Antar Saringan	Saringan Bertekanan
• Ukuran efektif, ES (mm)	0,3 - 0,7	0,3 - 0,7	-
• Koefisien keseragaman, UC	1,2 - 1,4	1,2 - 1,4	1,2 - 1,4
• Berat jenis (kg/dm ³)	2,5 - 2,65	2,5 - 2,65	2,5 - 2,65
• Porositas	0,4	0,4	0,4
• Kadar SiO ₂	> 95 %	> 95 %	> 95 %

Sumber: (SNI 6774, 2008)

2. *Slow Sand Filter (SSF)* - Filter Pasir Lambat

Filter pasir lambat (*slow sand filter*) digunakan untuk menghilangkan partikel tersuspensi, mikroorganisme patogen, dan bahan organik dari air baku. Sistem ini terdiri dari lapisan pasir halus yang berfungsi sebagai media filtrasi, dengan ketebalan media biasanya berkisar antara 0,6 hingga 1,2 meter. Komponen Utama filter pasir lambat adalah media pasir yang berperan sebagai tempat terbentuknya lapisan biologis yang disebut *schmutzdecke*, yaitu lapisan mikroorganisme yang berkembang di permukaan pasir. Lapisan ini berfungsi sebagai zona aktif biologis yang menguraikan bahan organik dan menekan pertumbuhan mikroorganisme patogen. Menurut (Hijnen et al., 2018), *slow sand filter* mampu menurunkan *Escherichia coli* hingga >99% berkat lapisan biologis (*schmutzdecke*).

Proses filtrasi pada filter pasir lambat terdiri dari tiga proses, yaitu:

- Filtrasi Mekanis, yaitu partikel tersuspensi dalam air tertahan secara fisik oleh butiran pasir saat air mengalir melalui media.
- Adsorpsi, yaitu partikel dan mikroorganisme menempel pada permukaan butiran pasir dan lapisan biologis, sehingga terjadi pengurangan kontaminan.
- Aktivitas Biologis, yaitu mikroorganisme dalam lapisan *schmutzdecke* menguraikan bahan organik dan menekan pertumbuhan patogen.

Air baku dialirkan secara gravitasi dengan kecepatan rendah, biasanya antara 0,1 hingga 0,4 meter per jam, sehingga memungkinkan kontak yang cukup antara air dan media filter. Air yang telah melewati media pasir lambat memiliki kualitas yang meningkat secara signifikan, dengan pengurangan kekeruhan, bakteri patogen, dan bahan organik.

Tabel 2. 2 Kriteria desain filter pasir lambat

Komponen	Kriteria Desain
Laju filtrasi	0,1 - 0,4 m ³ /m ² /jam
Kedalaman media pasir	0,7 - 1,2 m
Ukuran efektif pasir (<i>Effective Size</i> , d ₁₀)	0,15 - 0,35 mm
<i>Uniformity Coefficient</i> (<i>UC</i>)	≤ 3 (ideal 2 - 2,5)
Kedalaman lapisan kerikil penyangga	0,3 - 0,45 m (bertahap dari 2 mm - 50 mm)

Komponen	Kriteria Desain
Tebal lapisan air di atas pasir	1 - 1,5 m
Waktu kontak (<i>detention time</i>)	$\pm 4 - 12$ jam
Pembersihan media	Dengan pengikisan lapisan atas pasir $\pm 1-2$ cm setiap kali laju alir menurun
Umur operasi sebelum pengikisan	4 - 8 minggu (tergantung kualitas air baku)
Efisiensi penyisihan	TSS: 90-99%, Bakteri: 90-99%, Warna: 50-90%

Sumber: (Schulc et al., 1984)

Dalam desain dan analisis filtrasi, perhitungan berfokus pada:

Laju Filtrasi (*Filtration Rate*)

Laju filtrasi adalah kecepatan air yang melewati media filter per satuan luas permukaan.

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

keterangan:

vf = laju filtrasi ($m^3/m^2 \cdot jam$ atau m/jam)

Q = debit air yang difiltrasi (m^3/jam)

A = luas permukaan filter (m^2)

Waktu Operasi sampai Pencucian (Filter Run Time)

Waktu operasi filter (*filter run time*) tergantung pada kapasitas filter dan jumlah air yang difiltrasi sebelum dilakukan backwash.

$$t = \frac{V}{Q}$$

keterangan:

t = waktu operasi (jam)

V = volume total air yang dapat difiltrasi sebelum backwash (m^3)

Q = debit filtrasi (m^3 /jam)

Kehilangan Tekanan (*Head Loss*)

Head loss menunjukkan resistansi atau hambatan aliran air saat melewati media filter. Perhitungannya dapat menggunakan Hukum Darcy:

$$h_f = \frac{v \cdot L}{K}$$

keterangan:

h_f = kehilangan tekanan (m)

v = kecepatan filtrasi (m/s)

L = tebal media filter (m)

K = koefisien permeabilitas media (m/s)

Contoh soal dan pembahasan

Soal 1 : Sebuah unit filter pasir cepat memiliki ukuran panjang 6 m dan lebar 4 m. Air baku yang masuk ke filter adalah $240 m^3$ /jam. Hitung laju filtrasi dalam m/jam. Apakah laju filtrasi tersebut masih dalam rentang kriteria desain?

Penyelesaian:

Luas permukaan filter

$$A = 6 \times 4 = 24 m^2$$

Laju filtrasi

$$v_f = \frac{Q}{A} = \frac{240}{24} = 10 \frac{\text{m}}{\text{jam}}$$

Laju filtrasi sebesar 10 m/jam, masih dalam kriteria desain filter pasir cepat (5-15 m/jam).

Soal 2: Sebuah filter pasir cepat mampu memproses air hingga total 1.800 m³ sebelum harus dicuci ulang (*backwash*). Debit operasi adalah 75 m³/jam. Hitung berapa lama filter dapat beroperasi sebelum perlu dicuci ulang.

Penyelesaian:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{1800}{75} = 24 \text{ jam}$$

Filter dapat beroperasi selama 24 jam sebelum pencucian ulang dilakukan.

Soal 3: Sebuah filter pasir memiliki tebal media 0,7 m dan koefisien permeabilitas $K = 2 \times 10^{-3}$ m/s. Jika kecepatan filtrasi adalah 0,005 m/s, hitung kehilangan tekanan awal filter.

Penyelesaian:

$$h_f = \frac{v \cdot L}{K} = \frac{0,005 \times 0,7}{2 \times 10^{-3}} = 1,75 \text{ m}$$

Head loss awal = 1,75 m, masih di bawah batas desain (kriteria 2-3 m).

2.6 Desinfeksi

Desinfeksi bertujuan untuk menonaktifkan mikroorganisme patogen, termasuk bakteri, virus, dan protozoa, sehingga air yang dihasilkan aman untuk dikonsumsi atau dibuang ke lingkungan tanpa

menimbulkan risiko kesehatan (Vijaya Kumar, 2023). Proses disinfeksi umumnya dilakukan setelah tahapan pengolahan awal seperti koagulasi, sedimentasi, dan filtrasi, yang berfungsi untuk menghilangkan partikel padat dan zat pereduksi. Hal ini penting agar disinfektan dapat bekerja secara optimal dan efisien dalam menonaktifkan patogen (National Research Council (NRC), 1980) (Centers for Disease Control and Prevention (CDC), 2024).

Metode disinfeksi terdiri dari:

1. Klorinasi

Klorinasi merupakan metode disinfeksi yang paling banyak diterapkan karena efektivitasnya dalam menonaktifkan berbagai jenis patogen serta kemampuannya meninggalkan residu aktif yang mempertahankan kualitas mikrobiologis air sepanjang sistem distribusi (Oliveira, 2024). Namun, reaksi antara klorin dengan bahan organik alami dalam air dapat menghasilkan produk sampingan disinfeksi (*disinfection by-products/DBPs*) seperti *trihalometana* (THMs) dan asam haloasetat (HAAs), yang telah diidentifikasi memiliki potensi karsinogenik (Richardson et al., 2007).

2. Disinfeksi dengan Sinar Ultraviolet (UV)

Metode disinfeksi menggunakan sinar ultraviolet merupakan proses fisik yang tidak melibatkan bahan kimia. UV efektif dalam menonaktifkan patogen seperti *Giardia* dan *Cryptosporidium*. Namun, metode ini tidak meninggalkan residu dalam sistem distribusi dan tidak menghilangkan kontaminan terlarut lainnya.

3. Ozonasi dan Proses Oksidasi Lanjutan (*Advanced Oxidation Processes*)

Ozon merupakan oksidator kuat yang efektif dalam menonaktifkan berbagai patogen serta menguraikan senyawa organik kompleks. Namun, ozonasi dapat menghasilkan produk sampingan disinfeksi seperti bromat apabila air baku mengandung ion bromida (Collivignarelli & et al., 2017). Proses oksidasi lanjutan yang menggabungkan ozon, sinar UV, dan hidrogen peroksida mampu mengeliminasi kontaminan organik secara komprehensif sekaligus melakukan disinfeksi tanpa menghasilkan residu toksik.

Dalam desain dan analisis, parameter penting adalah:

1. Dosis Klorin (*Chlorine Dose*), yaitu jumlah klorin yang ditambahkan ke air (mg/L).
2. Kebutuhan Klorin (*Chlorine Demand*), yaitu jumlah klorin yang habis bereaksi dengan bahan organik, anorganik, dan mikroorganisme.
3. Sisa Klorin Bebas (*Free Residual Chlorine*), yaitu jumlah klorin yang masih tersisa setelah kontak, harus ada untuk menjaga perlindungan distribusi.

Hubungan sederhana:

$$\text{Dosis} = \text{kebutuhan} + \text{Sisa}$$

Konsep CT (*Concentration × Time*)

Efektivitas desinfeksi sering dihitung menggunakan konsep CT (mg·menit/L):

$$CT = C \times T$$

keterangan:

C = konsentrasi sisa desinfektan (mg/L)

T = waktu kontak efektif (menit)

Kriteria CT bergantung pada jenis desinfektan, pH, suhu, dan mikroorganisme target (misalnya, menurut standar US EPA, CT tertentu diperlukan untuk membunuh 99,99% virus).

Waktu Detensi pada Bak Kontak

Jika digunakan bak kontak (*contact basin*), waktu detensi efektif dapat dihitung:

$$T = \frac{V}{Q}$$

keterangan:

T = waktu kontak (menit)

V = volume efektif bak (L atau m^3)

Q = debit aliran (L/menit atau m^3 /menit)

Dalam praktiknya, sering digunakan faktor efisiensi (*baffling factor*) untuk memperhitungkan aliran tidak ideal yaitu 0,1 - 1,0.

$$T_{\text{efektif}} = T \times BF$$

Contoh soal dan pembahasan

Soal 1: Sebuah instalasi pengolahan air minum menggunakan klorinasi untuk desinfeksi. Data yang tersedia adalah sebagai berikut:

- debit air = 100 L/detik
- Volume bak kontak = 180 m^3
- Faktor baffling (BF) = 0,6

- Konsentrasi sisa klorin yang terukur pada outlet bak kontak = 0,5 mg/L
- Standar CT yang disyaratkan untuk inaktivasi 99,99% virus = 15 mg menit/L.

Hitung waktu detensi efektif bak kontak, nilai CT yang dicapai sistem, dan apakah sistem sudah memenuhi standar CT? Jika belum, berikan alternatif solusi teknis yang bisa dilakukan operator IPA.

Penyelesaian:

Hitung waktu detensi teoritis

$$T = \frac{V}{Q}$$

$$V = 180 \text{ m}^3 = 180.000 \text{ L}$$

$$Q = 100 \frac{\text{L}}{\text{s}} = 6.000 \frac{\text{L}}{\text{menit}}$$

$$T = \frac{180.000}{6.000} = 30 \text{ menit}$$

Hitung waktu detensi efektif

$$T_{\text{efektif}} = T \times BF = 30 \times 0,6 = 18 \text{ menit}$$

Hitung nilai CT

$$CT = C \times T_{\text{efektif}} = 0,5 \times 18 = 9 \text{ mg} \frac{\text{menit}}{\text{L}}$$

Analisis kelayakan, Nilai CT tercapai = 9 mg·menit/L. Standar CT yang dipersyaratkan = 15 mg·menit/L. Artinya, sistem belum memenuhi standar desinfeksi.

Alternatif solusi teknis:

- Meningkatkan konsentrasi sisa klorin di *outlet* (misalnya dengan menambah dosis awal klorin).
- Meningkatkan waktu kontak efektif, bisa dengan memperbesar volume bak atau memperbaiki desain aliran (menaikkan *baffling factor*).

Soal 2: Sebuah IPA menambahkan klorin sebesar 2,5 mg/L ke air baku. Setelah 20 menit kontak dalam bak, sisa klorin bebas yang terukur adalah 0,7 mg/L. Standar operasional mensyaratkan bahwa sisa klorin bebas minimal harus 1,0 mg/L setelah 20 menit kontak.

1. Hitung kebutuhan klorin pada air baku.
2. Analisislah apakah dosis klorin yang diberikan sudah cukup? Jika belum, berapa dosis minimal yang seharusnya diberikan agar standar tercapai?

Penyelesaian

1. Hitung kebutuhan klorin

$$\text{Kebutuhan} = \text{Dosis} - \text{Sisa}$$

$$\text{Kebutuhan} = 2,5 - 0,7 = 1,8 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

2. Analisis kecukupan dosis:

- Standar mengharuskan sisa klorin $\geq 1,0 \text{ mg/L}$
- Dengan dosis 2,5 mg/L \rightarrow sisa = 0,7 mg/L ($< 1,0 \text{ mg/L}$) \rightarrow belum memenuhi standar

Untuk memenuhi syarat maka:

$$\text{Dosis minimal} = \text{Kebutuhan} + \text{Sisa standar}$$

$$\text{Dosis minimal} = 1,8 + 1,0 = 2,8 \text{ mg/L}$$

BAB 3 PENGOLAHAN AIR SECARA BIOLOGI

3.1 Proses Aerobik

Pengolahan biologis merupakan metode penting dalam pengolahan air limbah yang memanfaatkan aktivitas mikroorganisme untuk mendegradasi senyawa organik. Salah satu teknik yang paling banyak digunakan adalah pengolahan biologis aerobik, yaitu proses penguraian bahan organik dengan bantuan mikroorganisme heterotrof dalam kondisi tersedianya oksigen terlarut (dissolved oxygen, DO).

Dalam kondisi aerobik, mikroorganisme mengoksidasi senyawa organik menjadi karbon dioksida (CO_2), air (H_2O), serta biomassa baru berupa lumpur aktif. Menurut Metcalf & Eddy (2013), sistem aerobik mampu menurunkan *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) hingga lebih dari 90% jika dioperasikan dengan baik. Oleh karena itu, metode ini menjadi pilihan utama dalam pengolahan air limbah domestik maupun industri dengan kandungan organik tinggi.

Secara umum, mekanisme pengolahan biologis secara aerobik terdiri dari tahapan berikut:

1. Penyediaan oksigen terlarut (DO) yaitu dilakukan melalui aerasi mekanis (blower, aerator) atau difusi udara agar mikroorganisme tetap aktif.
2. Biodegradasi senyawa organik yaitu mikroorganisme memanfaatkan senyawa organik sebagai sumber karbon dan energi.
3. Pertumbuhan dan flokulasi biomassa yaitu mikroorganisme berkembang biak dan membentuk flok yang mudah diendapkan.

4. Produksi lumpur yaitu sebagian biomassa diendapkan di unit sedimentasi sekunder dan dibuang sebagai *waste activated sludge* (WAS) untuk menjaga keseimbangan sistem.

3.1.1 *Activated Sludge Process (ASP)*

Activated Sludge Process (proses lumpur aktif) merupakan sistem paling umum digunakan di seluruh dunia. Prinsipnya adalah memanfaatkan biomassa mikroorganisme dalam reaktor aerasi yang dilengkapi penyedia oksigen. Setelah proses aerasi, campuran air limbah dan biomassa dialirkan ke sedimentasi sekunder. Flok mikroba mengendap sebagai lumpur aktif, sebagian dikembalikan ke reaktor (*Return Activated Sludge/RAS*), sementara sisanya dibuang.

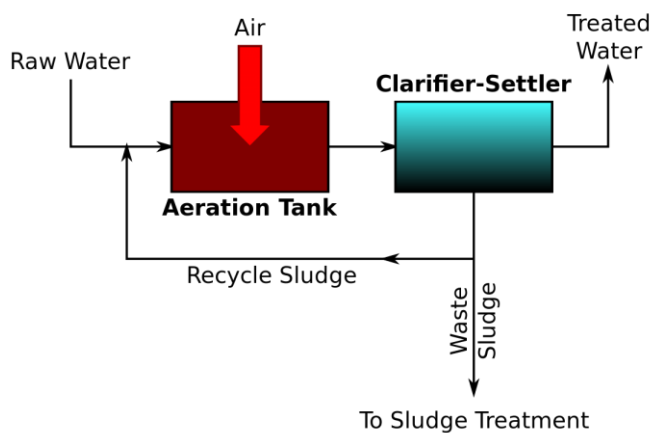
Variasi *Activated Sludge Process* adalah sebagai berikut:

- *Plug Flow*: aliran menyerupai pipa dengan gradien beban organik dari inlet ke outlet.
- *Complete Mix*: seluruh isi reaktor homogen.
- *Extended Aeration*: waktu tinggal lebih lama, produksi lumpur lebih sedikit.
- *Sequencing Batch Reactor (SBR)*: sistem siklik (isi, aerasi, sedimentasi, buang), fleksibel untuk debit fluktuatif.

Kelebihan *Activated Sludge Process* adalah memiliki efisiensi tinggi (>90% BOD/COD), fleksibel, dapat dimodifikasi untuk nitrifikasi-denitrifikasi. Sedangkan kekurangannya adalah konsumsi energi aerasi tinggi, menghasilkan lumpur banyak, memerlukan operator yang terlatih.

Proses lumpur aktif terdiri atas tangki aerasi dan bak pengendap. Tangki aerasi merupakan reaktor biologis karena fungsinya sebagai

tempat pertumbuhan mikroba dan berlangsungnya penguraian bahan organik. Bahan organik dalam air limbah merupakan makanan bagi mikroba yang disebut substrat. Substrat digunakan oleh mikroba untuk pertumbuhan, menghasilkan energi dan sel baru.



Gambar 3. 1 Skema proses lumpur aktif

Dalam proses penguraian bahan organik, mikroba membutuhkan oksigen dalam jumlah yang besar. Sehingga dilakukan aerasi secara terus menerus. Penguraian bahan organik menghasilkan lumpur biomassa baik yang hidup atau mati.

Berdasarkan sistem resirkulasi, lumpur aktif dibedakan menjadi dua yaitu:

1. Lumpur aktif tanpa resirkulasi

Proses lumpur aktif tanpa resirkulasi merupakan sistem pengolahan biologis yang relatif sederhana, di mana air limbah dialirkan ke dalam reaktor aerasi dan bercampur dengan biomassa tersuspensi (mikroorganisme) untuk mendegradasi bahan organik. Pada sistem ini, lumpur yang mengendap di unit pengendap sekunder tidak dialirkan kembali ke reaktor, sehingga konsentrasi biomassa di dalam

reaktor cenderung menurun seiring waktu. Akibatnya, proses degradasi organik berjalan kurang stabil dan efisiensi pengolahan berfluktuasi, terutama jika terjadi variasi beban organik. Kondisi ini sering menyebabkan penurunan kinerja dalam jangka panjang, serta peningkatan kebutuhan luas lahan karena diperlukan volume reaktor yang lebih besar untuk mempertahankan waktu tinggal sel yang memadai (Tchobanoglous & Burton, 2014).

2. Lumpur aktif dengan resirkulasi

Berbeda dengan sistem tanpa resirkulasi, proses lumpur aktif dengan resirkulasi mengembalikan sebagian lumpur hasil endapan di pengendap sekunder ke dalam reaktor aerasi. Tujuannya adalah menjaga konsentrasi biomassa (*Mixed Liquor Suspended Solids/MLSS*) tetap tinggi dan stabil, sehingga proses degradasi bahan organik berlangsung lebih efektif. Resirkulasi lumpur memungkinkan tercapainya waktu tinggal sel (*Sludge Retention Time/SRT*) yang lebih panjang tanpa perlu memperbesar volume reaktor, sehingga efisiensi penghilangan BOD, COD, maupun nutrisi lebih tinggi. Selain itu, sistem ini meningkatkan ketahanan terhadap fluktuasi beban organik dan hidrolis, serta mendukung pertumbuhan komunitas mikroba khusus, misalnya bakteri nitrifikasi untuk penghilangan nitrogen (Henze et al., 2008 ; Madigan et al., 2018). Oleh karena itu, resirkulasi lumpur menjadi prinsip dasar pada hampir semua sistem lumpur aktif modern, baik untuk instalasi pengolahan air limbah domestik maupun industri.

Parameter dalam perhitungan lumpur aktif proses adalah

Food to Microorganism Ratio (F/M)

Rasio ini menunjukkan keseimbangan antara makanan (organik) dan jumlah mikroorganisme. Nilai tipikal 0,2 - 0,6 kg BOD/kg MLSS·hari.

$$\frac{F}{M} = \frac{Q \times S_0}{V \times X}$$

Keterangan:

Q = debit limbah (m³/hari)

S₀ = konsentrasi BOD masuk (mg/L)

V = volume tangki aerasi (m³)

X = konsentrasi MLSS (Mixed Liquor Suspended Solids) (mg/L)

Mean Cell Residence Time (MCRT) / Sludge Age (θ_c)

$$\theta_c = \frac{\text{Massa MLSS dalam tangki}}{\text{Massa lumpur keluar (buangan+effluent)}}$$

Parameter ini menunjukkan berapa lama mikroorganisme bertahan dalam sistem. Nilai tipikal 5 - 15 hari tergantung proses.

Hydraulic Retention Time (HRT, θ)

$$\theta = \frac{V}{Q}$$

Waktu tinggal limbah dalam tangki aerasi berkisar antar 4 - 8 jam.

Oxygen Requirement (digunakan untuk menentukan kapasitas aerasi)

$$O_2 = Q \times (S_0 - S)$$

Keterangan:

S_0 = BOD influen (mg/L)

S = BOD efluen (mg/L)

Contoh soal dan pembahasan

Soal 1: Sebuah IPAL menerima air limbah dengan data sebagai berikut:

- Debit $Q = 5.000 \text{ m}^3/\text{hari}$
- BOD influen $S_0 = 250 \text{ mg/L}$
- Konsentrasi MLSS di tangki $X = 3.000 \text{ mg/L}$
- Target rasio $F/M = 0,4 \text{ kg BOD/kg MLSS} \cdot \text{hari}$

Hitung kebutuhan volume tangki aerasi agar target F/M tercapai dan apakah volume tersebut realistis jika waktu tinggal hidraulik (HRT) < 6 jam?

Penyelesaian:

Hitung beban organik masuk

$$Q \times S_0 = 5.000 \times 250 = 1.250.000 \frac{\text{mg}}{\text{hari}} = 1.250 \text{ kg/hari}$$

Gunakan rumus F/M

$$\frac{F}{M} = \frac{Q \times S_0}{V \times X}$$

$$0,4 = \frac{1.250}{V \times 3}$$

$$V = \frac{1.250}{0,4 \times 3}$$

$$V = 1041,7 \text{ m}^3$$

Hitung HRT

$$\theta = \frac{V}{Q} = \frac{1.041,7}{5.000/24} = \frac{1.041,7}{208,3} \approx 5 \text{ jam}$$

Soal 2: Sebuah sistem ASP memiliki Debit limbah 10.000 m³/hari, Konsentrasi MLSS dalam aerasi 3.500 mg/L, Volume aerasi 3.000 m³, Lumpur buangan (waste sludge) 150 m³/hari dengan konsentrasi padatan sebesar 8.000 mg/L dan Konsentrasi padatan di *effluent* 20 mg/L. Hitung *Sludge Age* dan apakah sistem beroperasi dalam rentang optimum (5-15 hari). Jika tidak, berikan solusi secara teknis.

Penyelesaian:

Hitung massa MLSS dalam tangki

$$\text{Massa MLSS} = V \times X = 3.000 \times 3.500 = 10.500.000 \text{ mg} = 10.500 \text{ kg}$$

Hitung massa lumpur keluar dari effluent

$$Q \times X_e = 10.000 \times 20 = 200.000 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ per hari} = 200 \text{ kg/hari}$$

Hitung massa lumpur keluar dari *waste sludge*

$$Q_w \times X_w = 150 \times 8.000 = 1.200.000 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 1.200 \frac{\text{kg}}{\text{hari}}$$

Hitung *Sludge Age*

$$\theta_c = \frac{10.500}{1.400} = 7,5 \text{ hari}$$

Hasil analisis

Hasil $\theta_c = 7,5$ hari. Nilai optimum 5 - 15 hari, maka sistem masih dalam kondisi baik.

Jika hasil < 5 hari, maka perlu mengurangi pemborosan lumpur (kurangi Q_w). Jika > 15 hari maka perlu menambah pembuangan lumpur.

3.1.2 *Trickling Filter (TF)*

Trickling filter merupakan salah satu unit pengolahan biologis yang digunakan secara luas dalam sistem pengolahan air limbah domestik maupun industri. Unit ini bekerja berdasarkan prinsip pertumbuhan biofilm pada media padat, seperti batu pecah, plastik berongga, keramik, atau material lain yang memiliki luas permukaan besar. Mikroorganisme yang menempel pada media tersebut membentuk lapisan biofilm yang berfungsi sebagai agen pengurai bahan organik terlarut maupun partikulat dalam air limbah.

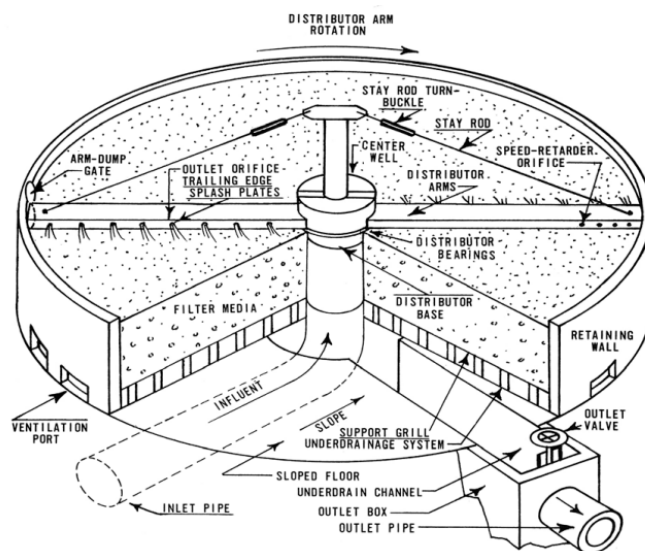
Air limbah yang telah melalui proses pengendapan awal dialirkan ke permukaan media *trickling filter* melalui sistem distribusi, biasanya berupa pipa berperforasi yang berputar secara mekanis atau hidraulik. Ketika air mengalir ke bawah, terjadi kontak antara limbah cair, biofilm, dan udara yang masuk melalui ruang kosong di antara media. Kondisi aerob ini memungkinkan mikroorganisme melakukan metabolisme bahan organik dan nutrisi, sehingga kadar pencemar berkurang signifikan. Biofilm yang menebal secara berkala akan terlepas akibat aliran air, suatu proses yang dikenal sebagai *sloughing*, dan kemudian terbawa menuju unit sedimentasi sekunder.

Trickling filter diklasifikasikan berdasarkan beban organik dan hidraulik yang diterima, yaitu *low-rate*, *intermediate*, *high-rate*, dan *roughing filter*. Pada *low-rate filter*, aliran relatif rendah dan proses berlangsung tanpa resirkulasi. Sebaliknya, *high-rate filter* dirancang

dengan beban organik lebih tinggi dan hampir selalu dioperasikan dengan sistem resirkulasi (Climate Policy Watcher, n.d.).

Trickling filter terdiri atas:

- Media dari benda padat yang sangat permeabel (mudah dilewati air limbah) sebagai tempat mikroba menempel. Media yang biasa digunakan antara lain betu/kerikil, plastik atau bahan lainnya.
- Pipa distributor yang menyebabkan air limbah secara merata (pipa berputar atau sistem *sprinkler*) untuk menjaga lingkungan aerobik.
- *Underdrain* untuk mengalirkan air limbah terolah dan biofilm yang terlepas.
- Bak pengendap untuk mengendapkan biomassa yang terlepas dari media dan juga untuk menyediakan air resirkulasi.



Gambar 3. 2 Skema resirkulasi pada *trickling filter*

Sumber: Pennsylvania Department of Environmental Protection,
2016

Resirkulasi dalam *Trickling Filter*

Resirkulasi adalah proses mengembalikan sebagian efluen dari sedimentasi sekunder ke inlet trickling filter untuk dialirkan kembali melalui media. Rasio resirkulasi didefinisikan sebagai perbandingan antara debit resirkulasi dengan debit influen baru, misalnya 1:1 atau 2:1. Pemilihan rasio ini sangat bergantung pada karakteristik air limbah, jenis trickling filter, serta tujuan pengolahan.

Fungsi utama resirkulasi adalah untuk meningkatkan efisiensi penguraian biologis dengan memperpanjang waktu kontak antara substrat dan biofilm. Selain itu, resirkulasi membantu menjaga kelembapan media, memperbaiki distribusi beban hidraulik, dan menekan timbulnya masalah operasional seperti bau, genangan (*ponding*), dan populasi lalat filter. Resirkulasi juga dapat mendorong proses terlepasnya biofilm (*sloughing*) sehingga biofilm tidak menebal secara berlebihan, yang pada akhirnya meningkatkan stabilitas sistem.

Tabel 3. 1 Kriteria Desain *Trickling Filter*

Parameter Desain	Satuan	Trickling Filter Rendah (Low Rate)	Trickling Filter Tinggi (High Rate)
Beban Hidrolis (<i>Hydraulic Loading</i>)	$\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hari}$	1 - 4	4 - 10
Beban Organik (<i>Organic Loading</i>)	$\frac{\text{kg BOD}_5}{\text{m}^3 \cdot \text{hari}}$	0,08 - 0,32	0,32 - 1,12
Kedalaman Media	m	1,8 - 2,4	0,9 - 2,4
Diameter Media	mm	25 - 100	25 - 100

Parameter Desain	Satuan	Trickling Filter Rendah (Low Rate)	Trickling Filter Tinggi (High Rate)
Void Ratio Media	%	40 - 50	90 - 95 (media plastik)
Efisiensi Penghilangan BOD ₅	%	65 - 85	65 - 90
Rasio Resirkulasi	—	0 - 1	1 - 2
Kecepatan Udara Alami	m/s	0,02 - 0,05	0,02 - 0,05

Sumber: (Reynolds & Richards, 1996)

Faktor penting dalam desain dan operasi *trickling filter* adalah

- Resirkulasi (*return flow*), untuk meningkatkan kecepatan alir, menjaga kelembaban biofilm, dan meningkatkan efisiensi.
- Ventilasi, merupakan pasokan oksigen penting agar degradasi biologis optimal.
- Pembersihan media, untuk mencegah penyumbatan akibat *sloughing*.

Parameter penting dalam perhitungan *trickling filter* adalah

Loading Organik (Organic Loading Rate, OLR)

$$OLR = \frac{Q \times S_0}{V}$$

Keterangan:

Q = debit air limbah (m³/hari)

S₀ = BOD influen (mg/L), dikonversi ke kg/m³

V = volume media filter (m³)

Satuan OLR = kg BOD/m³·hari dengan batas tipikal pada *Trickling Filter* konvensional adalah 0,08 - 0,32 dan *Trickling Filter* tegangan tinggi (*high rate*) adalah 0,32 - 1,2.

Hydraulic Loading Rate (HLR)

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

Keterangan:

Q = debit air limbah (m³/hari)

A = luas permukaan media (m²)

Satuan HLR = m³/m²·hari

Efisiensi Removal BOD

Efisiensi *Trickling Filter* bisa diperkirakan dengan persamaan empiris

$$\frac{S}{S_0} = \frac{1}{1 + k \frac{V}{Q}}$$

Keterangan:

S₀ = BOD influen (mg/L)

S = BOD efluen (mg/L)

k = konstanta reaksi (dipengaruhi jenis filter, suhu, resirkulasi)

$\frac{V}{Q}$ = waktu tinggal hidraulik efektif

Contoh soal dan pembahasan

Soal 1 : Sebuah *trickling filter* konvensional dirancang untuk menerima debit air limbah 2.500 m³/hari, BOD influen 200 mg/L, Media filter diameter 20 m, kedalaman 2 m. Hitung volume media filter dan *organic loading rate* (OLR).

Penyelesaian

Volume media

$$V = \pi r^2 h = 3,14 \times 10^2 \times 2 = 628 \text{ m}^3$$

Hitung beban organik

$$Q \times S_0 = 2.500 \times 200 = 500.000 \frac{\text{g}}{\text{hari}} = 500 \frac{\text{kg}}{\text{hari}}$$

$$\text{OLR} = \frac{500}{628} = 0,80 \frac{\text{kgBOD}}{\text{m}^3} \cdot \text{hari}$$

Soal 2: Sebuah *trickling filter high rate* memiliki Debit 4.000 m³/hari, BOD influen 180 mg/L, Volume filter 1.200 m³, Konstanta $k = 1,2$ (untuk kondisi operasi). Hitung konsentrasi BOD efluen, efisiensi removal BOD dan apakah efluen ini memenuhi standar baku mutu BOD = 50 mg/L?

Penyelesaian

Hitung rasio $\frac{V}{Q}$

$$\frac{V}{Q} = \frac{1.200}{\frac{4.000}{24}} = \frac{1.200}{166,7} = 7,2 \text{ jam}$$

Konversi ke hari

$$\frac{7,2 \text{ jam}}{24 \text{ jam/hari}} = 0,3 \text{ hari}$$

Substitusi ke persamaan

$$\frac{S}{100} = \frac{1}{1 + 1,2 \times 0,3} = \frac{1}{1 + 0,36} = \frac{1}{1,36} = 0,735$$

$$S = 180 \times 0,735 = 132 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Efisiensi penghilangan:

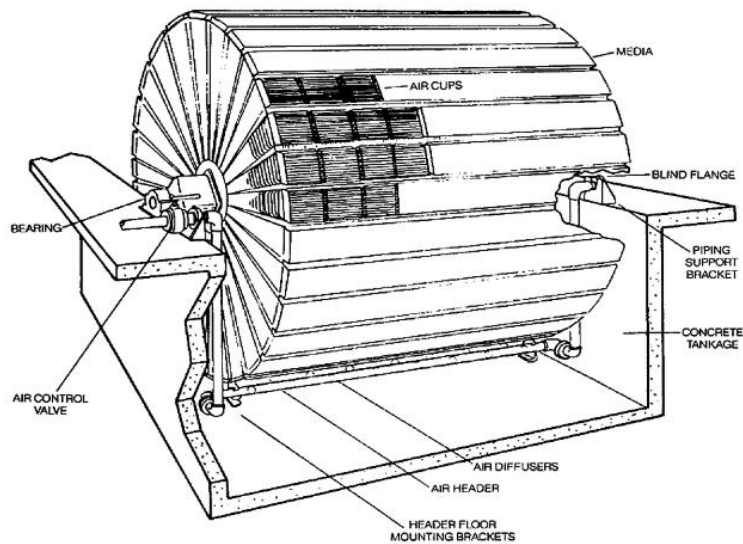
$$\% \text{ Removal BOD} = \frac{180 - 132}{180} \times 100\% = 26,7\%$$

Analisis Efluen = 132 mg/L dan Baku mutu = 50 mg/L. Maka belum memenuhi standar, sehingga perlu resirkulasi atau peningkatan volume media.

3.1 3 *Rotating Biological Contactor (RBC)*

Rotating Biological Contactor (RBC) adalah unit pengolahan air limbah berbasis proses biologis aerobik yang memanfaatkan media cakram berputar untuk mendukung pertumbuhan biofilm mikroorganisme. Cakram-cakram ini tersusun secara paralel pada sebuah poros horizontal yang sebagian terendam dalam aliran air limbah. Putaran mekanis poros memungkinkan cakram bergantian terendam dalam air limbah dan terpapar udara bebas, sehingga mikroorganisme mendapatkan akses terhadap substrat organik sekaligus oksigen untuk metabolisme (Metcalf & Eddy, 2013).

Selama operasi, lapisan biofilm pada permukaan cakram menyerap dan menguraikan bahan organik serta nutrisi seperti nitrogen dan fosfor. Ketika ketebalan biofilm mencapai batas tertentu, sebagian akan terlepas akibat gaya gesek dari putaran, lalu terbawa ke unit sedimentasi sekunder. Dengan cara ini, RBC dapat menurunkan *Biochemical Oxygen Demand (BOD)*, *Chemical Oxygen Demand (COD)*, serta *Total Suspended Solids (TSS)* pada air limbah (Tchobanoglous & Burton, 2014).



Gambar 3. 3 *Rotating Biological Contactor*

Kelebihan *Rotating Biological Contactor (RBC)* adalah:

1. Efisiensi penghilangan BOD tinggi, dapat mencapai 85-95% pada beban organik.
2. Kebutuhan energi rendah dibandingkan proses lumpur aktif, karena oksigen diperoleh dari rotasi cakram
3. Stabilitas operasi baik, tetap berfungsi pada fluktuasi beban hidraulik dan organik
4. Desain kompak sehingga tidak memerlukan lahan luas
5. Kemudahan operasi dan perawatan sederhana, dibandingkan beberapa unit biologis lainnya

Kekurangan *Rotating Biological Contactor (RBC)*

1. Kerusakan mekanis pada poros atau cakram sering terjadi akibat beban berlebih atau korosi
2. Efisiensi menurun pada suhu rendah, karena aktivitas mikroorganisme terhambat

3. Kurang optimal untuk beban organik sangat tinggi, sehingga perlu dikombinasikan dengan proses lain
4. Memerlukan pemeliharaan rutin pada komponen mekanis berputar, yang meningkatkan biaya operasional

Tabel 3. 2 Kriteria desain *Rotating Biological Contactor (RBC)*

Parameter Desain	Satuan	Tujuan pengolahan		
		Penurunan BOD	Penurunan BOD dan nitrifikasi	Nitrifikasi
Beban hidrolik (HLR)	m ³ /m ² ·hari	0,08 - 0,16	0,03 - 0,08	0,04 - 0,10
Beban organik permukaan (OLR)	gBOD ₅ /m ² ·hari	9,8 - 17,2	7,3 - 14,6	1,0 - 2,9
Waktu tinggal hidrolik	jam	0,7 - 1,5	1,5 - 4,0	1,2 - 2,9
BOD <i>effluent</i>	mg/L	15 - 30	7 - 15	7 - 15

Sumber: Von Sperling dan Chernicharo, 2005

Analisa perhitungan pada unit *Rotating Biological Contactor (RBC)* adalah sebagai berikut:

Surface Area Loading (SAL)

$$SAL = \frac{Q \times S_0}{A}$$

Keterangan:

Q = debit air limbah (m³/hari)

S₀ = BOD influen (mg/L), konversi ke kg/hari

A = luas permukaan total cakram (m²)

Satuan SAL = g BOD/m²·hari atau kg BOD/1000 m²·hari

Nilai tipikal SAL pada tahap awal *Rotating Biological Contactor* adalah 10-20 g BOD/m²·hari dan tahap akhir *Rotating Biological Contactor* adalah lebih rendah (karena sisa BOD kecil).

Efisiensi BOD Removal

Secara empiris, efisiensi *Rotating Biological Contactor* dapat diperkirakan sebagai berikut:

$$S = S_0 \times e^{-k \cdot N}$$

Keterangan:

S_0 = BOD influen (mg/L)

S = BOD efluen (mg/L)

k = konstanta reaksi (0,3-0,5 per stage)

N = jumlah tahap RBC

Hydraulic Loading (HLR)

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

Keterangan:

Satuan HLR adalah m³/m²·hari, dengan kriteria desain < 0,01 m³/m²·hari.

Contoh soal dan pembahasan

Soal 1 : Sebuah RBC dirancang untuk mengolah limbah domestik dengan data Debit 2.000 m³/hari, BOD influen 180 mg/L dan Luas permukaan total cakram 8.000 m². Hitung beban organik harian (kg BOD/hari) dan hitung *Surface Area Loading* (SAL). Apakah nilai SAL ini sesuai dengan kisaran tipikal RBC tahap awal (10-20 g/m²·hari)?

Penyelesaian

Beban organik

$$Q \times S_0 = 2.000 \times 180 = 360.000 \frac{\text{g}}{\text{hari}} = 360 \text{ kg/hari}$$

Surface Area Loading (SAL)

$$\text{SAL} = \frac{360.000}{8.000} = 45 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \cdot \text{hari}$$

Nilai SAL adalah $45 \text{ g/m}^2 \cdot \text{hari}$. Kisaran RBC tahap awal adalah 10-20. Maka hasil jauh lebih tinggi, sehingga desain kelebihan beban organik, risiko biofilm overload. perlu memperbesar luas permukaan cakram atau menurunkan debit.

3.2 Proses Anaerobik

Pengolahan biologis anaerobik merupakan metode pengolahan air limbah yang memanfaatkan aktivitas mikroorganisme dalam kondisi tanpa oksigen terlarut (*anoxic/anaerobic*). Pada kondisi ini, senyawa organik diuraikan menjadi biogas terutama metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2) serta sejumlah kecil biomassa baru. Berbeda dengan proses aerobik yang memerlukan suplai oksigen secara terus-menerus, sistem anaerobik bekerja dalam kondisi reduktif sehingga penggunaan energi lebih hemat. Selain itu, biogas yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan. Menurut (Metcalf & Eddy, 2013), proses ini sangat sesuai diterapkan pada limbah berkonsentrasi organik tinggi ($\text{BOD} > 1.500 \text{ mg/L}$ atau $\text{COD} > 3.000 \text{ mg/L}$), seperti pada limbah industri makanan, peternakan, maupun bioetanol.

Degradasi organik secara anaerobik berlangsung melalui tahapan berikut:

1. Hidrolisis

Senyawa kompleks seperti protein, polisakarida, dan lipid diuraikan menjadi molekul sederhana, misalnya selulosa menjadi glukosa.

2. Asidogenesis

Molekul sederhana difermentasi oleh bakteri asidogen menjadi asam organik (asetat, propionat, butirat), alkohol, serta gas H_2 dan CO_2 .

3. Asetogenesis

Senyawa organik rantai panjang diubah menjadi asam asetat, H_2 , dan CO_2 .

4. Metanogenesis

Dilakukan oleh mikroorganisme archaea metanogenik, menghasilkan CH_4 dan CO_2 sebagai produk utama, misalnya melalui reaksi:

3.2.1 Septic Tank

Tangki septik merupakan unit primer dalam sistem pengolahan air limbah domestik yang bekerja melalui proses pengendapan gravitasi dan degradasi anaerobik. Limbah rumah tangga masuk ke dalam tangki ke dalam air, di mana padatan mengendap membentuk lumpur (*sludge*), sementara zat organik yang lebih ringan naik membentuk lapisan buih (*scum*). Mikroorganisme anaerobik di dalam tangki mengurai sebagian material organik, sehingga efluen yang keluar sudah lebih homogen dan siap untuk pengolahan lanjutan seperti resapan atau filtrasi (SNI 2398:2017).

Aspek teknis yang harus diperhatikan dalam perencanaan dan pembangunan tangki septik:

1. Ketahanan dan kedap air

Tangki harus dibangun dengan material yang kedap air dan tahan terhadap korosi, sering menggunakan beton atau bata berlapis semen

2. Pipa saluran

- Inlet dan outlet menggunakan pipa PVC diameter minimum Ø 110 mm, dengan sambungan yang kedap air.
- Outlet biasanya dibuat lebih rendah dari inlet, dan dilengkapi sambungan berbentuk T atau sekat agar efisien

3. Ventilasi

- Wajib dilengkapi pipa ventilasi udara dengan diameter sekitar Ø 50-63 mm, dan tinggi minimal 25 cm-250 mm dari permukaan tanah

4. Lubang pemeriksa (*manhole*)

- Bentuk persegi minimal 0,4 m × 0,4 m, atau bulat dengan diameter minimal 0,4 m, ditempatkan sedikit di atas permukaan tanah untuk akses penyedotan dan pemeriksaan

5. Periode pengurasan

- Direkomendasikan antara 2-5 tahun sekali, tergantung pada volume lumpur yang terbentuk

6. Jarak aman terhadap fasilitas lain

- Jarak minimal dari bangunan: 1,5 m.
- Sumur air bersih: minimal 10 m.
- Sumur resapan atau sistem lanjutan: minimal 5 m

3.2.2 Anaerobic Pond (Kolam Anaerobik)

Kolam anaerobik merupakan salah satu bentuk pengolahan air limbah yang beroperasi tanpa suplai oksigen terlarut. Pada sistem ini, proses degradasi bahan organik dilakukan oleh komunitas mikroorganisme anaerob yang memanfaatkan substrat organik sebagai sumber energi. Kolam anaerobik biasanya dirancang dengan kedalaman relatif besar, yaitu sekitar 2-5 meter, untuk meminimalkan difusi oksigen dari atmosfer ke dalam badan air. Kondisi anaerob ini memungkinkan terjadinya fermentasi dan metanogenesis, yang menghasilkan gas-gas seperti metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2) (Mara, 2024) & (von Sperling, 2007).

Dalam sistem kolam berurutan (waste stabilization ponds), kolam anaerobik sering ditempatkan sebagai unit pertama yang berfungsi menurunkan beban organik yang tinggi, terutama dari limbah domestik maupun industri pangan. Unit ini berperan sebagai pengurai awal, sehingga beban pencemar pada unit berikutnya seperti kolam fakultatif atau kolam maturasi dapat berkurang secara signifikan (Tchobanoglous et al., 2013).



Gambar 3. 4 Kolam Anaerobik

Tabel 3. 3 Kriteria desain Kolam Anaerobik

Parameter Desain	Satuan	Kriteria desain
Kedalaman Kolam	m	3 - 5
Waktu Tinggal Hidrolik (HRT)	hari	1 - 5 (tropis) 5 - 20 (iklim sedang)
Beban Volumetrik Organik	kg BOD/ m ³ ·hari	0,1 - 0,4 (tropis) 0,05 - 0,2 (iklim sedang)
Efisiensi Penghilangan BOD ₅	%	50 - 70
Rasio Panjang : Lebar	—	2 : 1 hingga 5 : 1
Rasio Luas Permukaan per Kapita	m ² /kapita	0,05 - 0,1 (tropis)
Produksi Lumpur	m ³ /kapita·tahun	0,02 - 0,04

Sumber: Mara, D. D. (2004)

Kelebihan Kolam Anaerobik adalah:

1. Efisiensi penghilangan beban organik tinggi, khususnya untuk air limbah dengan *Biochemical Oxygen Demand (BOD)* yang tinggi, misalnya di atas 300 mg/L.
2. Biaya konstruksi dan operasi rendah, karena tidak memerlukan aerasi mekanis atau peralatan tambahan.
3. Kemudahan dalam operasi, sebab tidak memerlukan tenaga ahli untuk pengendalian sehari-hari.
4. Produksi lumpur relatif sedikit, dibandingkan dengan proses aerobik, karena sebagian besar bahan organik terdegradasi menjadi gas.

Kekurangan Kolam Anaerobik adalah:

1. Potensi menimbulkan bau tidak sedap, akibat terbentuknya senyawa volatil seperti hidrogen sulfida (H_2S) dan asam organik volatil.
2. Memerlukan area yang cukup luas, meskipun lebih kecil dibandingkan kolam fakultatif, terutama pada skala besar.
3. Efisiensi penghilangan patogen rendah, sehingga perlu dikombinasikan dengan unit pengolahan lanjutan seperti kolam fakultatif dan maturasi.
4. Kurang efektif pada iklim dingin, karena aktivitas mikroorganisme anaerob sangat dipengaruhi oleh suhu; efisiensi optimum biasanya tercapai pada kisaran 20-35 °C.

Parameter Penting dalam desain kolam anaerobik adalah

Debit limbah (Q), yaitu jumlah air limbah yang masuk ke kolam ($m^3/hari$).

Konsentrasi BOD influen (S_0) dan efluen (S), yaitu beban organik awal dan target akhir (mg/L).

Beban Volumetrik (L_v), yaitu rasio beban organik terhadap volume kolam.

$$L_v = \frac{Q \times S_0}{V}$$

Keterangan:

L_v = beban volumetrik ($kg\ BOD/m^3 \cdot hari$)

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

S_0 = BOD influen (kg/m^3)

V = volume kolam (m^3)

Nilai L_v yang disarankan adalah 0,1 - 0,3 kg BOD/m³·hari untuk iklim tropis.

Volume Kolam (V)

$$V = \frac{Q \times S_0}{L_v}$$

Waktu Detensi Hidraulik (HRT) yaitu 1-5 hari untuk kolam anaerobik.

$$t = \frac{V}{Q}$$

Contoh soal dan pembahasan:

Sebuah pabrik pengolahan makanan menghasilkan limbah dengan debit 1.200 m³/hari. Konsentrasi BOD influen 600 mg/L. Target efisiensi penghilangan BOD pada kolam anaerobik adalah 60%. Diasumsikan beban volumetrik yang diizinkan adalah 0,2 kg BOD/m³·hari dan kadar BOD efluen dapat diperkirakan:

$$S = S_0 \times (1 - \eta)$$

Hitung volume kolam anaerobik yang dibutuhkan, waktu detensi hidraulik, konsentrasi BOD efluen yang dihasilkan dan apakah hasil ini sesuai target?

Penyelesaian:

Hitung beban organik

$$S_0 = 600 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 0,6 \text{ kg/m}^3$$

$$Q \times S_0 = 1.200 \times 0,6 = 720 \frac{\text{kgBOD}}{\text{hari}}$$

Volume kolam

$$V = \frac{Q \times S_0}{V_v} = \frac{720}{0,2} = 3.600 \text{ m}^3$$

Waktu detensi

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{3.600}{1.200} = 3 \text{ hari}$$

BOD efluen

$$S = 600 \times (1 - 0,6) = 240 \text{ mg/L}$$

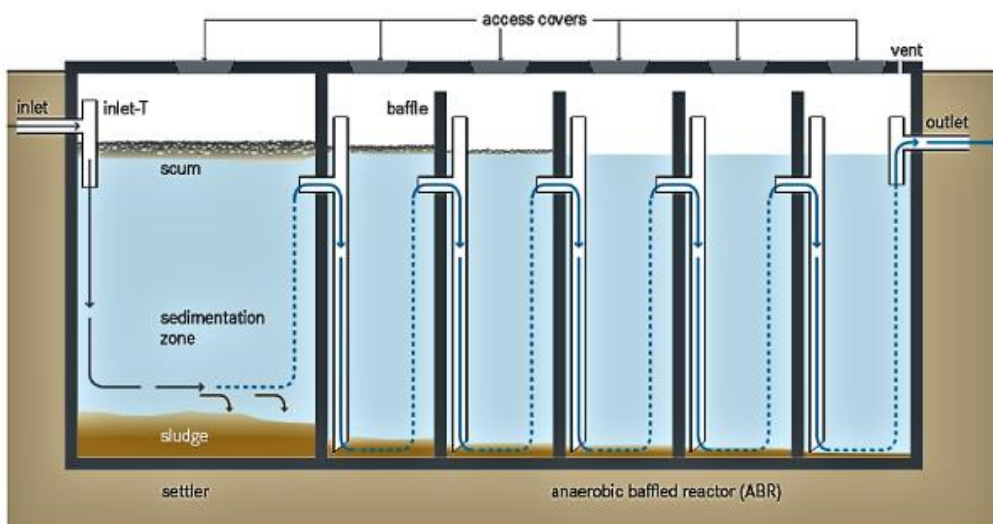
Target efisiensi adalah 60%, dan efluen sebesar 240 mg/L. Hasil perhitungan menunjukkan desain kolam cukup untuk mencapai target. Jika standar baku mutu lebih rendah dari 240 mg/L, maka kolam ini harus dikombinasikan dengan unit lanjutan (misalnya kolam fakultatif atau aerasi).

3.3.3 Anaerobic Baffled Reactor (ABR)

Anaerobic Baffled Reactor (ABR) merupakan salah satu teknologi pengolahan air limbah berbasis proses biologis anaerobik yang dikembangkan dari konsep tangki septik. ABR dirancang dengan serangkaian sekat (*baffle*) vertikal yang membagi tangki menjadi beberapa kompartemen. Sekat ini memaksa aliran air limbah untuk bergerak ke atas dan ke bawah secara bergantian ketika melewati setiap kompartemen. Pola aliran ini menciptakan kondisi kontak yang lebih intensif antara air limbah dan biomassa aktif yang terendapkan di dasar reaktor (McCarty, 2001) & (Barber & Stuckey, 1999).

Mekanisme kerja ABR adalah air limbah yang masuk ke ABR pertama kali akan melewati kompartemen awal, di mana sebagian besar

padatan tersuspensi mengendap dan mengalami degradasi oleh mikroorganisme anaerob. Selanjutnya, limbah cair mengalir ke kompartemen berikutnya melalui sistem baffle dengan pola naik-turun. Pada setiap kompartemen terjadi degradasi bertahap melalui tahapan hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, dan metanogenesis. Dengan demikian, proses penguraian senyawa organik berlangsung secara berlapis, yang meningkatkan efisiensi dibandingkan sistem tangki septik konvensional.



Gambar 3. 5 *Anaerobic Baffled Reactor (ABR)*

Tabel 3. 4 Kriteria desain *Anaerobic Baffled Reactor (ABR)*

Parameter Desain	Satuan	Kriteria Desain
Kedalaman Reaktor	m	2 - 6
Jumlah Kompartemen	unit	4 - 10

Parameter Desain	Satuan	Kriteria Desain
Waktu Tinggal Hidrolik (HRT)	jam - hari	6 - 20 jam (limbah domestik); 1 - 3 hari (industri)
Beban Volumetrik Organik	kg COD/m ³ ·hari	1 - 6
Efisiensi Penghilangan BOD/COD	%	65 - 85 (BOD); 60 - 80 (COD)
Kecepatan Aliran Upflow	m/h	0,5 - 1,5
Produksi Lumpur	kg TSS/kg BOD terurai	±0,1 - 0,2

Sumber: Sasse, L. (1998)

Kelebihan *Anaerobic Baffled Reactor* adalah:

1. Efisiensi penghilangan bahan organik tinggi, dengan efisiensi BOD dan COD yang lebih baik dibandingkan tangki septik tradisional, terutama untuk air limbah domestik dan agroindustri.
2. Kapasitas tahan terhadap fluktuasi beban, baik hidraulik maupun organik, karena proses penguraian berlangsung di beberapa kompartemen secara bertahap (McCarty, 2001).
3. Produksi lumpur relatif rendah, dengan laju akumulasi lebih lambat dibandingkan sistem aerobik, sehingga frekuensi pengurasan lebih jarang (Chernicharo, 2007).
4. Desain sederhana dan biaya operasional rendah, karena tidak memerlukan suplai energi eksternal untuk aerasi.

5. Kemampuan memfasilitasi pertumbuhan komunitas mikroba beragam, termasuk bakteri asidogenik dan metanogenik, yang meningkatkan stabilitas ekosistem mikrobiologis dalam reaktor.

Kekurangan *Anaerobic Baffled Reactor* adalah:

1. Efisiensi rendah dalam penghilangan nutrisi, seperti nitrogen dan fosfor, sehingga biasanya memerlukan unit pengolahan lanjutan (Chernicharo, 2007).
2. Potensi menghasilkan bau tidak sedap, akibat pembentukan senyawa volatil seperti hidrogen sulfida (H_2S).
3. Membutuhkan waktu start-up relatif lama, karena perkembangan komunitas mikroorganisme anaerob berlangsung secara bertahap.
4. Kurang efektif pada iklim dingin, karena kinerja mikroorganisme anaerob sangat dipengaruhi suhu; efisiensi menurun pada temperatur di bawah $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.
5. Risiko penyumbatan, terutama jika kualitas influen mengandung padatan tersuspensi yang tinggi dan tidak melalui penyaringan awal.

Parameter Penting dalam Desain dan Perhitungan ABR

Debit limbah (Q), yaitu jumlah air limbah yang masuk ke reaktor (m^3/hari).

Konsentrasi BOD influen (S_0) dan efluen (S), yaitu BOD awal dan akhir yang menggambarkan beban pencemar (mg/L).

Efisiensi removal BOD

$$\eta = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100\%$$

Waktu Detensi Hidraulik (HRT), yaitu waktu rata-rata limbah berada di dalam reaktor.

$$t = \frac{V}{Q}$$

Contoh soal dan pembahasan:

Soal 1: Sebuah ABR menerima debit 200 m³/hari dengan konsentrasi BOD influen 400 mg/L. Target efluen adalah BOD 100 mg/L. Diasumsikan efisiensi ABR dapat diperkirakan dengan persamaan berikut dengan $k=0,2 \text{ jam}^{-1}$ (konstanta reaksi anaerobik)

$$S = \frac{S_0}{1 + k \cdot t}$$

Pertanyaan:

1. Berapa waktu detensi minimum yang dibutuhkan agar efluen mencapai target (100 mg/L)?
2. Berapa volume total reaktor yang harus dibangun?
3. Jika reaktor dibagi menjadi 4 kompartemen sama besar, berapa volume tiap kompartemen?

Penyelesaian:

1. Hitung waktu detensi

$$S = \frac{S_0}{1 + k \cdot t}$$

$$100 = \frac{400}{1+0,2 t}$$

$$1+0,2 t = \frac{400}{100} = 4$$

$$0,2 t = 3$$

$$t = 15 \text{ jam}$$

2. Hitung volume reaktor

$$Q = 200 \frac{\text{m}^3}{\text{hari}} = \frac{200}{24} \approx 8,33 \frac{\text{m}^3}{\text{jam}}$$

$$V = Q \times t = 8,33 \times 15 \approx 125 \text{ m}^3$$

3. Jika terbagi menjadi 4 kompartemen, maka volume tiap kompartemen adalah

$$V_{\text{kompartemen}} = \frac{125}{4} = 31,25 \text{ m}^3$$

DAFTAR PUSTAKA

- Akhtar, S., Memon, S. A., Chae, H.-B., Choi, D.-W., & Park, C. W. (2024). Hydrostructural phenomena in a wastewater screening channel with an ascendable sub-screen using the arbitrary Lagrangian-Eulerian approach. *Applied Sciences*, 14(1), 76.
- Barber, W. P., & Stuckey, D. C. (1999). The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: A review. *Water Research*, 33(7), 1559-1578. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00371-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00371-6)
- Binnie, C., Kimber, M., & Smethurst, G. (2002). *Basic Water Treatment (3rd ed.)*. Thomas Telford Publishing.
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC). (2024, February 6). *How Water Treatment Works*.
- Chernicharo, C. A. L. (2007). *Anaerobic Reactors*. IWA Publishing.
- Climate Policy Watcher. (n.d.). *Trickling Filters - Wastewater Treatment*. Retrieved September 10, 2025, from <https://www.climate-policy-watcher.org/wastewater-treatment-3/trickling-filters.html>
- Collivignarelli, M. C., & et al. (2017). Overview of the Main Disinfection Processes for Sustainability. *Sustainability*.
- Davis, M. L., & Cornwell, D. A. (2012). *Introduction to Environmental Engineering*. McGraw-Hill.

- De la Torre-Bayo, J. J., Martín-Pascual, J., Torres-Rojo, J. C., & Zamorano Toro, M. (2022). Characterization of screenings from urban wastewater treatment plants: Alternative approaches to landfill disposal. *Journal of Cleaner Production*, 380.
- En-Nabety, L., & Boudi, E. M. (2024). Separation efficiency of a wastewater bar screen based on a 3D computational fluid dynamics modeling. *Desalination and Water Treatment*, 320.
- Faisal, F., & Sutapa, I. N. (2018). Evaluation of raw water quality and treatment process for drinking water supply. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 12-19.
- Gregory, J., & Duan, J. (2001). Hydrolyzing metal salts as coagulants. *Pure and Applied Chemistry*, 73(12), 2017-2026.
- Henze, M., van Loosdrecht, M. C. M., Ekama, G. A., & Brdjanovic, D. (2008). *Biological wastewater treatment: Principles, modelling and design*. IWA Publishing.
- Hijnen, W. A. M., Schijven, J. F., & Medema, G. J. (2018). Slow sand filtration for microbial removal: A review. *Water Research*, 135, 74-86.
- Jarvis, P., Jefferson, B., Gregory, J., & Parsons, S. A. (2005). A review of floc strength and breakage. *Water Research*, 39(14).
- Lemonidis, I., Banti, D. C., Tzenos, C. A., Kalamaras, S. D., Kotsopoulos, T. A., & Samaras, P. (2022). Energy valorization of fine screenings from a municipal wastewater treatment plant. *Energies*, 15(21).

- Letterman, R. D. (1999). *Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies (5th ed.)*. McGraw-Hill.
- Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. (2018). *Brock biology of microorganisms (15th ed.)*. Pearson.
- Mara, D. D. (2024). *Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries (Vol. 2004)*. Earthscan.
- Masduqi, A., & Assomadi, A. F. (2012). *Operasi & Proses Pengolahan Air*. ITS Press.
- McCarty, P. L. (2001). development of anaerobic treatment and its future. *Water Science and Technology*, 44(8), 149-156.
<https://doi.org/https://doi.org/10.2166/wst.2001.0473>
- Metcalf & Eddy. (2013). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery (5th ed.)*. McGraw-Hill Education.
- National Research Council (NRC). (1980). *The Disinfection of Drinking Water*.
- Oliveira, I. M. (2024). A review of research advances on disinfection strategies. *Water Research*.
- Pennsylvania Department of Environmental Protection. (2016). *Trickling Filters*. Pennsylvania Department of Environmental Protection.
- Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023 Tentang Kesehatan Lingkungan.

Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Nomor 11 Tahun 2025 Tentang Baku Mutu Air Limbah Dan Standar Teknologi Pengolahan Air Limbah Untuk Air Limbah Domestik.

Permen PUPR No 4 Tahun 2017 Tentang Penyelenggaraan Sistem Pengelolaan Air Limbah Domestik.

Petunjuk Teknis Perencanaan, Pelaksanaan, Dan Pengawasan Pembangunan Pengelolaan Sistem Penyediaan Air Minum. Keputusan Direktorat Jenderal Cipta Karya Nomor 61/Kpts/CK/1998, Direktorat Jenderal Cipta Karya, Departemen Pekerjaan Umum (1998).

PP No 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan Dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.

Rahman, A., & Syafrudin. (2019). Efektivitas drum screen dalam pengolahan air baku skala besar. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 25(2), 101-110.

Reynolds, T. D. , & Richards, P. A. (1996). *Unit operations and processes in environmental engineering (2nd ed.)*. PWS Publishing.

Richardson, S. D., Plewa, M. J., Wagner, E. D., Schoeny, R., & DeMarini, D. M. (2007). Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: A review and roadmap for research. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 636(1-3), 178-242. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2007.09.001>

- Sarwoko, M. (1985). *Penyediaan Air Bersih*. Jurusan Teknik Lingkungan ITS.
- Schulc, C. R., Okun, & Daniel A. (1984). *Surface Water Treatment for Communities in Developing Countries*. John Wiley & Sons, Inc.
- SNI 6774. (2008). *Tata Cara Perencanaan Unit Paket Instalasi Pengolahan Air*.
- Tchobanoglous, G., & Burton, F. L. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse*. McGraw-Hill International Editions.
- Vijaya Kumar, M. (2023). Drinking Water Treatment With Disinfection Method: A Review. *International Journal of Science Technology & Engineering*.
- von Sperling, M. (2007). *Waste Stabilisation Ponds*. IWA Publishing.
- Wibowo, H., Santoso, A., & Lestari, D. (2020). Analisis kinerja unit screening terhadap penurunan padatan tersuspensi pada IPAL domestik. *Jurnal Pengelolaan Lingkungan*, 12(1), 45-53.
- Yulistyorini, A. , Kusuma, D. , & Pramono, A. (2019). Sustainability of raw water sources for drinking water supply in tropical regions. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 8(5), 233-241. *Sustainability of Raw Water Sources for Drinking Water Supply in Tropical Regions*, 8(5), 233-241.