

**PERENCANAAN INSTALASI PENGOLAHAN LINDI TEMPAT
PEMBUANGAN AKHIR (TPA) MRICAN KABUPATEN PONOROGO
SEBAGAI KONTROL PEMENUHAN BAKU MUTU**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Melengkapi Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik (S.T.)
pada Program Studi Teknik Lingkungan



**UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A**

Disusun Oleh

NUR AFIFAH

NIM H95219049

Dosen Pembimbing

Dyah Ratri Nurmaningsih, M.T.

Ir. Teguh Taruna Utama, M.T.

**PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGER SUNAN AMPEL
SURABAYA**

2023

HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Nama : Nur Afifah
NIM : H95219049
Program Studi : Teknik Lingkungan
Angkatan : 2019

Menyatakan bahwa saya tidak melakukan plagiat dalam penulisan tugas akhir saya yang berjudul **"PERENCANAAN INSTALASI PENGOLAHAN LINDI TEMPAT PEMBUANGAN AKHIR (TPA) MRICAN KABUPATEN PONOROGO SEBAGAI KONTROL PEMENUHAN BAKU MUTU"**. Apabila suatu saat nanti saya terbukti melakukan tindakan plagiat maka saya bersedia menerima sanksi yang ditetapkan

Demikian pernyataan keaslian ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 13 Juli 2023

Yang Menyatakan,



Nur Afifah

NIM H95219049

LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING

Nama : Nur Afifah
NIM : 1195219049
Judul Tugas Akhir : Perencanaan Instalasi Pengolahan Lindi Tempat
Pembuangan Akhir (TPA) Mrican Kabupaten Ponorogo
sebagai Kontrol Pemertuhan Baku Mutu

Telah disetujui untuk penulisan Sidang Tugas Akhir.

Surabaya, 27 Juni 2023

Dosen Pembimbing 1,



Dyah Rani Numaningsih, M.T.
NIP.198503222014032001

Dosen Pembimbing 2,



Ir. Teguh Taruna Utama, M.T.
NIP.201603319

PENGESAHAN TIM PENGUJI SIDANG AKHIR

Nama : Nur Allah
NIM : 1195219049
Judul Tugas Akhir : Perencanaan Instalasi Pengolahan Limbah Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Mrican Kabupaten Ponorogo sebagai Kontrol Pemenuhan Baku Mutu

Tugas Akhir ini telah dipertahankan
di depan tim penguji Tugas Akhir
di Surabaya, 4 Juli 2023.

Mengesahkan,
Tim Penguji.

Pembimbing I,



Dyah Ratn Numaningsih, M.T.
NIP 198503222014032003

Pembimbing II,



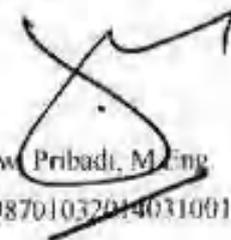
Ir Teguh Taruna Utama, M.T.
NUP 201603319

Penguji I,



Abdul Hakim, M.T.
NIP 198008062014031002

Penguji II,



Arqow Pribadi, M.Eng.
NIP 198701032014031001

Mengetahui,

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Ampel Surabaya.



Abdul Hamdani, M.Pd.
NIP 196507312000031002



UIN SUNAN AMPEL
SURABAYA

KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN AMPEL SURABAYA
PERPUSTAKAAN

Jl. Jend. A. Yani 117 Surabaya 60237 Telp. 031-8431972 Fax.031-8413300
E-Mail: perpustakaan@uin-sby.ac.id

LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademika UIN Sunan Ampel Surabaya, yang bertanda tangan di bawah ini, saya:

Nama : NUR AFIFAH
NIM : H95219049
Fakultas/Jurusan : SAINS DAN TEKNOLOGI / TEKNIK LINGKUNGAN
E-mail address : h95219049@gmail.com

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Perpustakaan UIN Sunan Ampel Surabaya, Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif atas karya ilmiah:

Skripsi Tesis Disertasi Lain lain (.....)
yang berjudul:

PERENCANAAN INSTALASI PENGOLAHAN LINDI TEMPAT PEMBUANGAN

AKHIR (TPA) MRICAN KABUPATEN PONOROGO SEBAGAI KONTROL

PEMENUHAN BAKU MUTU

Beserta petangkar yang diperlukan (bila ada). Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif ini Perpustakaan UIN Sunan Ampel Surabaya berhak menyimpan, mengolah media/format-kan, mengelolanya dalam bentuk pangkalan data (database), mendistribusikannya, dan menampilkan/mempublikasikannya di Internet atau media lain secara *fulltext* untuk kepentingan akademis tanpa perlu meminta ijin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan atau penerbit yang bersangkutan.

Saya bersedia untuk bertanggung secara pribadi, tanpa melibatkan pihak Perpustakaan UIN Sunan Ampel Surabaya, segala bentuk tuntutan hukum yang timbul atas pelanggaran Hak Cipta dalam karya ilmiah saya ini.

Demikian pernyataan ini yang saya buat dengan sebenarnya.

Surabaya, 14 Juli 2023

Penulis,

(Nur Afifah)

ABSTRAK

PERENCANAAN INSTALASI PENGOLAHAN LINDI TEMPAT PEMBUANGAN AKHIR (TPA) MRICAN KABUPATEN PONOROGO SEBAGAI KONTROL PEMENUHAN BAKU MUTU

Lindi yang dihasilkan dari timbunan sampah di TPA dapat memberikan dampak negatif bahkan menyebabkan kerusakan pada lingkungan dan makhluk hidup yang terdampak apabila tidak diolah dengan baik. TPA Mrican yang terletak di Kabupaten Ponorogo merupakan salah satu TPA yang tidak dilengkapi dengan fasilitas pengelolaan lindi. Padahal, sampah yang diterima oleh TPA ini mencapai 70–90 ton setiap harinya sejak tahun 2022. Pada penelitian ini akan direncanakan instalasi pengolahan lindi dan diestimasikan rencana anggaran biaya (RAB) yang diperlukan untuk membuat instalasi tersebut. Untuk merencanakan ukuran atau dimensi dari unit pengolahan lindi, dilakukan perhitungan debit lindi menggunakan metode Thornthwaite and Mather serta dilakukan uji laboratorium untuk mengetahui kualitas lindi TPA Mrican. Setelah dilakukan pengujian dengan parameter pH, COD, BOD, TSS, total nitrogen, kadmium, dan merkuri, diketahui lindi dari TPA Mrican mengandung BOD sebesar 2.473 mg/L, COD sebesar 15.561 mg/L, TSS sebesar 104 mg/L, dan total nitrogen sebesar 4.257 mg/L yang melebihi standar baku mutu menurut PermenLHK Nomor 59 Tahun 2016. Setelah dilakukan perhitungan menggunakan metode Thornthwaite and Mather didapatkan debit lindi TPA Mrican diperkirakan dapat mencapai 77,171 m³/hari. Rangkaian pengolahan yang terdiri dari unit koagulasi flokulasi, prasedimentasi, biofilter anaerobik, biofilter aerobik, dan *constructed wetland* terpilih dari pemilihan unit pengolahan menggunakan metode *analytical hierarchy process* (AHP). Unit-unit tersebut didesain dapat mengolah hingga kapasitas 86,4 m³/hari. Perhitungan RAB dari pembangunan instalasi tersebut menghasilkan nominal sebesar Rp1.293.369.000,00.

Kata Kunci: Lindi, Instalasi Pengolahan Lindi, TPA Mrican

ABSTRACT

PLANNING OF LEACHATE TREATMENT PLANT FOR MRICAN LANDFILL IN PONOROGO REGENCY AS QUALITY STANDARD COMPLIANCE CONTROL

Leachate produced from landfill can have a negative impact and even cause damage to the environment and affected living things if it is not treated properly. Mrican Landfill located in Ponorogo Regency is one of the landfills that is not equipped with leachate treatment system. In fact, the waste received by the Landfill has reached 70-90 tons every day since 2022. This research planned a leachate treatment plant and estimated budget plan that needed to build the plant. To planned the size or dimensions of the leachate treatment unit, a leachate discharge calculation was carried out using the Thornthwaite and Mather methods and a laboratory test was carried out to determine the leachate quality of Mrican Landfill. After parameters pH, COD, BOD, TSS, total nitrogen, cadmium, and mercury was testing, it was found that leachate from Mrican Landfill contained 2,473 mg/L of BOD, 15,561 mg/L of COD, 104 mg/L of TSS, and 4,257 mg/L of total nitrogen which exceeds the quality standards according to PermenLHK Number 59 of 2016. After calculations used the Thornthwaite and Mather methods, it was found that the Mrican Landfill's leachate discharge was estimated at 77.171 m³/day. The treatment plant consisted of flocculation coagulation units, pre-sedimentation units, anaerobic-aerobic biofilters, and constructed wetlands were selected from the selection of treatment units using the analytical hierarchy process (AHP) method. These units were designed to process up to a capacity of 86.4 m³/day. The budget plan calculation for the construction of the installation resulted in a nominal value of IDR 1.293.369.000,00.

Keywords: *Leachate, Leachate Treatment Plant, Mrican Landfill*

UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A

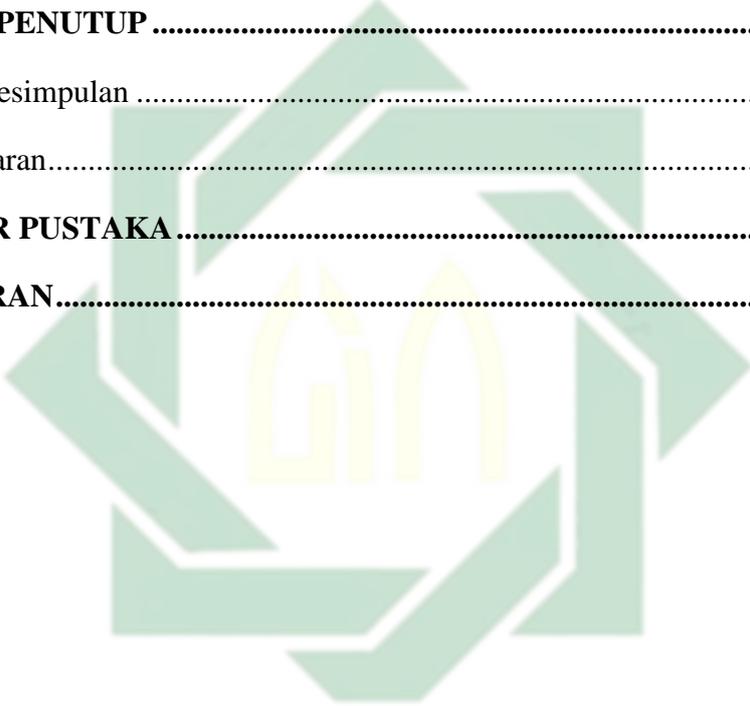
DAFTAR ISI

KOVER	i
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING	iii
PENGESAHAN TIM PENGUJI SIDANG AKHIR	iv
PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
KATA PENGANTAR	vi
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR LAMPIRAN	xx
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Penelitian	5
BAB II KAJIAN PUSTAKA	7
2.1 Sampah.....	7
2.1.1 Karakteristik Sampah.....	7
2.1.2 Komposisi Sampah	12
2.1.3 Sumber Sampah	12
2.1.4 Jenis-Jenis Sampah	14

2.2	Tempat Pembuangan Akhir (TPA)	17
2.3	Lindi	18
2.3.1	Karakteristik Lindi	18
2.3.2	Baku Mutu Lindi	20
2.4	Sistem Pengelolaan Lindi	23
2.4.1	Timbulan Lindi	23
2.4.2	Metode Perhitungan Kuantitas Lindi	24
2.5	Pengolahan Lindi	26
2.5.1	Pengolahan secara Fisika-Kimia (Fisikokimia)	27
2.5.2	Pengolahan secara Biologis	37
2.6	<i>Analytical Hierarchy Process</i>	46
2.7	<i>Bill of Quantity</i> dan Rencana Anggaran Biaya	48
2.8	Standar Operasional Prosedur	49
2.9	Integrasi Keislaman	50
2.9	Penelitian Terdahulu	51
BAB III METODE PENELITIAN		57
3.1	Umum	57
3.2	Tempat dan Waktu Penelitian	57
3.2.1	Lokasi Penelitian	57
3.2.2	Waktu Penelitian	60
3.3	Alat dan Bahan	60
3.4	Kerangka Pikir Penelitian	61
3.5	Tahapan Penelitian	62
3.5.1	Tahap Persiapan	64
3.5.2	Tahap Pelaksanaan	64
3.5.3	Tahap Analisa Data	71

3.5.4	Penyusunan Laporan.....	77
3.6	Integrasi Keislaman.....	77
BAB IV GAMBARAN UMUM WILAYAH PERENCANAAN.....		78
4.1	Profil TPA Mrican	78
4.2	Kondisi Geografis TPA Mrican	78
4.3	Keadaan Iklim TPA Mrican	79
4.4	Sarana dan Prasarana TPA Mrican	80
4.5	Sumber dan Timbulan Sampah	82
4.6	Kelembagaan TPA Mrican.....	82
4.7	Kondisi Eksisting Lokasi Rencana Peletakan Instalasi Pengolahan Lindi	85
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN		86
5.1	Analisis Kualitas Air Lindi	86
5.2	Analisis Perkiraan Debit Lindi.....	89
5.3	Alternatif Instalasi Pengolahan Lindi.....	101
5.3.1	Alternatif Pengolahan Pertama	101
5.3.2	Alternatif Pengolahan Kedua.....	103
5.3.3	Alternatif Pengolahan Ketiga.....	104
5.3.4	Alternatif Pengolahan Keempat.....	106
5.3.5	Pemilihan Alternatif Pengolahan	108
5.4	Detail Instalasi Pengolahan Lindi Terpilih	120
5.4.1	Dimensi Bak Ekualisasi	121
5.4.2	Dimensi Unit Koagulasi Flokulasi.....	123
5.4.3	Dimensi Unit Prasedimentasi.....	131
5.4.4	Dimensi Unit Biofilter Anaerobik	144
5.4.5	Dimensi Unit Biofilter Aerobik	150
5.4.6	Dimensi Unit Constructed Wetland.....	156

5.4.7	Dimensi Bak Kontrol	160
5.4.8	Perhitungan Efisiensi Penyisihan Polutan Organik	161
5.4.9	Perhitungan Profil Hidrolis	177
5.4.10	Perhitungan Produksi Lumpur dan Periode Pengurasan	194
5.5	Penaksiran <i>Bill of Quantity</i> dan Rencana Anggaran Biaya.....	197
5.6	Perencanaan Standar Operasional Prosedur	201
BAB VI PENUTUP		204
6.1	Kesimpulan	204
6.2	Saran.....	204
DAFTAR PUSTAKA		206
LAMPIRAN.....		222



UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Konsentrasi Parameter Pengujian Lindi Pada Iklim Berbeda	19
Tabel 2.2 Perbedaan Konsentrasi Parameter Lindi Pada TPA dengan Perbedaan Umur	20
Tabel 2.3 Baku Mutu Lindi	21
Tabel 2.4 Kriteria Desain Bak Ekualisasi.....	28
Tabel 2.5 Kriteria Desain Koagulator	31
Tabel 2.6 Kriteria Desain Flokulator.....	31
Tabel 2.7 Kriteria Desain Unit Sedimentasi Persegi Panjang	34
Tabel 2.8 Kriteria Desain Unit Sedimentasi Melingkar/Sirkular	36
Tabel 2.9 Kriteria Desain Unit Biofilter Anaerobik dan Aerobik.....	39
Tabel 2.10 Kriteria Desain Unit <i>Trickling Filter</i>	41
Tabel 2.11 Kriteria Desain Unit ABR	42
Tabel 2.12 Karakteristik Tipikal Media untuk <i>Subsurface Flow CW</i>	44
Tabel 2.13 Nilai Indeks Random.....	48
Tabel 2.14 Penelitian Terdahulu Terkait Instalasi Pengolahan Lindi	51
Tabel 3.1 Alat dan Bahan yang Diperlukan Pada Pengambilan Sampel.....	60
Tabel 3.3 Data Primer.....	65
Tabel 3.4 Data Sekunder	70
Tabel 3.5 Faktor Lama Penyinaran	72
Tabel 3.6 Koefisien Run Off	73
Tabel 3.7 Kelangasan Tanah (mm Air per m Tanah).....	74
Tabel 4.1 Temperatur Rata-Rata Bulanan Kabupaten Ponorogo Tahun 2013–2022	79

Tabel 4.2 Curah Hujan Bulanan Kecamatan Jenangan 2013–2022	79
Tabel 4.3 Data Timbulan Sampah TPA Mrican	82
Tabel 5.1 Hasil Analisis Kualitas Lindi	87
Tabel 5.2 Temperatur Rata-Rata Bulanan dan Indeks Panas	90
Tabel 5.3 <i>Soil Moisture Retention at Field Capacity is 100 mm</i>	95
Tabel 5.4 Hasil Perhitungan Debit Lindi dengan <i>Water Balance Methode</i> menurut Thornthwaite & Mather.....	100
Tabel 5.5 Efisiensi Penyisihan Polutan pada Alternatif Pengolahan ke-1	102
Tabel 5.6 Kelebihan dan Kekurangan Kolam Stabilisasi.....	102
Tabel 5.7 Efisiensi Penyisihan Polutan pada Alternatif Pengolahan ke-2	103
Tabel 5.8 Kelebihan dan Kekurangan Sistem Anaerobik	104
Tabel 5.9 Efisiensi Penyisihan Polutan pada Alternatif Pengolahan ke-3	105
Tabel 5.10 Kelebihan dan Kekurangan Kolam Aerasi dan Sedimentasi	105
Tabel 5.11 Efisiensi Penyisihan Polutan pada Alternatif Pengolahan ke-4	107
Tabel 5.12 Kelebihan dan Kekurangan Biofilter Aerob-Anaerob	107
Tabel 5.13 Skala Perbandingan Berpasangan	109
Tabel 5.14 Matrik Perbandingan Berpasangan	110
Tabel 5.15 Jumlah Kolom dari Matrik Perbandingan Berpasangan.....	111
Tabel 5.16 Matrik Faktor Pembobotan untuk Semua Kriteria yang Dinormalkan	112
Tabel 5.17 Matrik Perbandingan Berpasangan untuk Kriteria <i>Removal Efficiency</i>	114
Tabel 5.18 Matrik Faktor Pembobotan untuk Kriteria <i>Efficiency Removal</i> yang Telah Dinormalkan.....	114

Tabel 5.19 Matrik Perbandingan Berpasangan untuk Kriteria Kebutuhan Lahan	115
Tabel 5.20 Matrik Faktor Pembobotan untuk Kriteria Kebutuhan Lahan yang Telah Dinormalkan.....	116
Tabel 5.21 Matrik Perbandingan Berpasangan untuk Kriteria Biaya Konstruksi	117
Tabel 5.22 Matrik Faktor Pembobotan untuk Kriteria Biaya Konstruksi yang Telah Dinormalkan.....	117
Tabel 5.23 Matrik Perbandingan Berpasangan untuk Kriteria Operasional dan Pemeliharaan	118
Tabel 5.24 Matrik Faktor Pembobotan untuk Kriteria Operasional dan Pemeliharaan yang Telah Dinormalkan	119
Tabel 5.25 Hasil Akhir Keputusan Pemilihan Alternatif Pengolahan.....	120
Tabel 5.26 Dimensi Bak Ekualisasi	122
Tabel 5.27 Dimensi Unit Koagulasi Flokulasi	130
Tabel 5.28 Dimensi Unit Prasedimentasi	143
Tabel 5.29 Dimensi Biofilter Anaerobik.....	150
Tabel 5.30 Dimensi Biofilter Aerobik.....	155
Tabel 5.31 Dimensi <i>Constructed Wetland</i>	160
Tabel 5.32 Dimensi Bak Kontrol	161
Tabel 5.33 Kualitas Efluen Unit Koagulasi Flokulasi.....	164
Tabel 5.34 Kualitas Effluent Unit Prasedimentasi	167
Tabel 5.35 Kualitas Effluent Unit Biofilter Anaerobik.....	171
Tabel 5.36 Kualitas Effluent Unit Biofilter Aerobik.....	174

Tabel 5.37 Kualitas Effluent Unit <i>Constructed Wetland</i>	177
Tabel 5.38 <i>Headloss</i> dan Profil Hidrolis pada Setiap Bangunan Instalasi Pengolahan	193
Tabel 5.39 Hasil Produksi Lumpur Setiap Unit Pengolahan.....	196
Tabel 5.40 Frekuensi Pengurasan Lumpur Setiap Unit Pengolahan	197
Tabel 5.41 Rencana Anggaran Biaya Instalasi Pengolahan Lindi TPA Mrican	198
Tabel 5.42 Rekapitulasi Rencana Anggaran Biaya Pembangunan IPL yang direncanakan	201

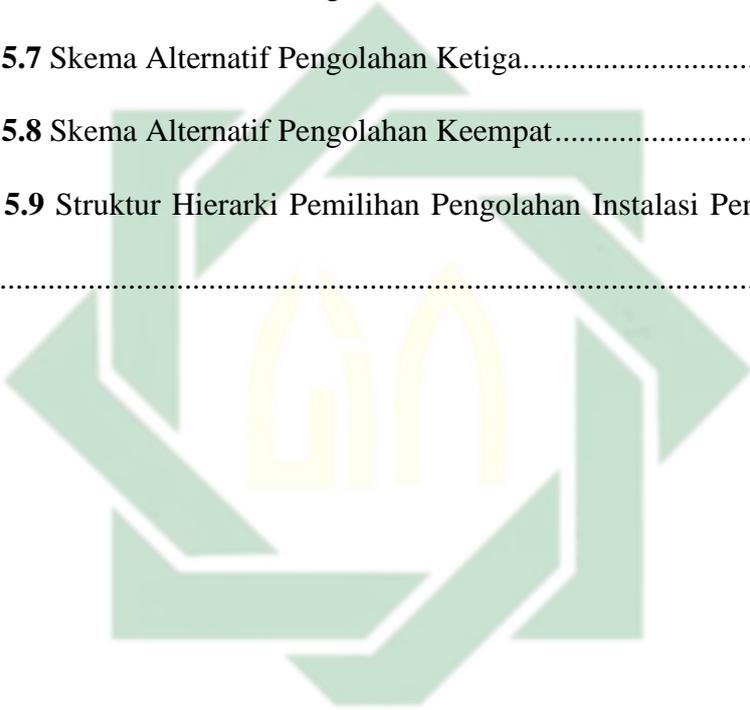


UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema Hubungan Kadar Volatil, Kadar Air, dan <i>Fixed Carbon</i>	9
Gambar 2.2 Skema Komponen Neraca Air Pada TPA.....	25
Gambar 2.3 Potongan Membujur Tangki Sedimentasi Persegi Panjang.....	34
Gambar 2.4 Tampak Atas Tangki Melingkar dengan Pipa <i>Inlet</i> Melewati Dinding	36
Gambar 2.5 Potongan Tangki Melingkar dengan Pipa <i>Inlet</i> Melewati Dinding .	36
Gambar 2.6 Unit Filter Anaerobik.....	39
Gambar 3.1 Lokasi TPA Mrican	59
Gambar 3.2 Bagan Kerangka Pikir Penelitian.....	61
Gambar 3.3 Diagram Alir Tahapan Penelitian	63
Gambar 4.1 Gapura TPA Mrican	80
Gambar 4.2 Bangunan Penunjang	80
Gambar 4.3 Hanggar Kompos TPA Mrican.....	80
Gambar 4.4 Jembatan Timbang TPA Mrican.....	81
Gambar 4.5 Excavator TPA Mrican.....	81
Gambar 4.6 Motor Roda Tiga TPA Mrican	81
Gambar 4.7 Bulldozer TPA Mrican	81
Gambar 4.8 Armroll TPA Mrican	81
Gambar 4.9 Dump Truck TPA Mrican.....	82
Gambar 4.10 Struktur Organisasi UPTD Pengelolaan Sampah Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Ponorogo	84
Gambar 4.11 Lokasi Rencana Peletakan Instalasi Pengolahan Lindi	85

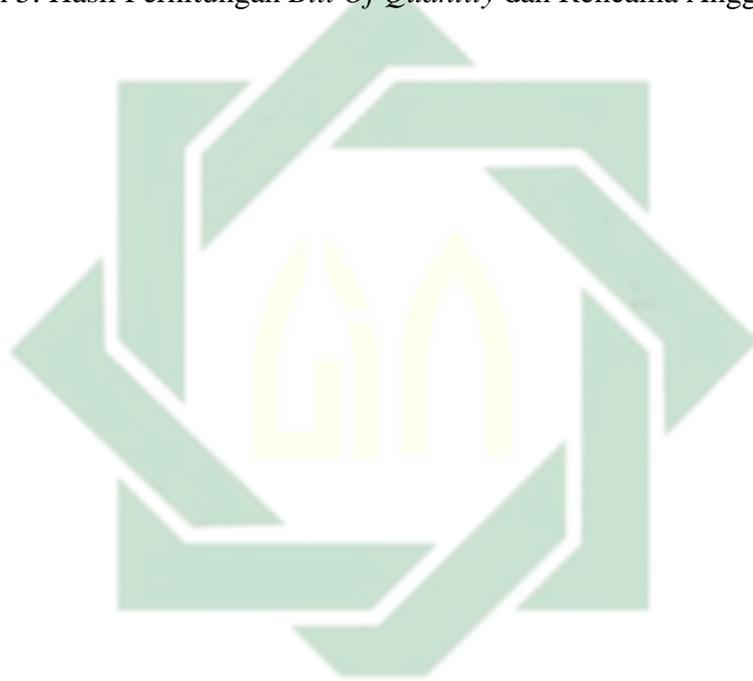
Gambar 5.1 Pengambilan Sampel Lindi.....	86
Gambar 5.2 Pengawetan Sampel Lindi	86
Gambar 5.3 Pengujian pH Lindi.....	87
Gambar 5.4 Pengujian pH Lindi.....	87
Gambar 5.5 Skema Alternatif Pengolahan Pertama	101
Gambar 5.6 Skema Alternatif Pengolahan Kedua.....	103
Gambar 5.7 Skema Alternatif Pengolahan Ketiga.....	104
Gambar 5.8 Skema Alternatif Pengolahan Keempat.....	106
Gambar 5.9 Struktur Hierarki Pemilihan Pengolahan Instalasi Pengolahan Lindi	109



UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A

DAFTAR LAMPIRAN

lampiran 1: Dokumentasi	I-1
Lampiran 2: Hasil Uji Laboratorium.....	II-1
Lampiran 3: Administrasi Persuratan.....	III-1
Lampiran 4: <i>Detail Engineering Design</i>	IV-1
Lampiran 5: Hasil Perhitungan <i>Bill Of Quantity</i> dan Rencana Anggaran BiayaV-1	



UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengelolaan sampah di Indonesia masih sangat terbatas. Dari total volume sampah yang mencapai 68,5 juta ton pada tahun 2021, hanya 7% yang terdaur ulang sedangkan 69% volume sampah tersebut masuk ke TPA (Direktorat Jenderal Pengelolaan Sampah, Limbah, dan B3 (Ditjen PSLB3) Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), 2021). Hal tersebut sangat disayangkan karena penanganan sampah yang baik memainkan peran kunci untuk setidaknya tujuh dari tujuh belas *sustainable development goals* (SDGs) atau tujuan pembangunan berkelanjutan (TPB).

Timbunan sampah sendiri berpotensi menimbulkan dampak negatif bagi berbagai macam aspek kehidupan. Pada aspek kesehatan, tumpukan sampah yang tidak ditangani dengan baik akan menjadi sarang vektor penyakit. Vektor tersebut kemudian dapat menyebarkan penyakit kepada manusia dan menurunkan kualitas kesehatan di masyarakat. Kemudian, penurunan kualitas kesehatan tersebut akan menimbulkan dampak pada aspek sosial dan ekonomi. Selain itu, masalah persampahan juga dapat memberikan dampak negatif pada aspek lingkungan. Sampah dapat menjadi pencemar bagi udara, air, dan tanah. Tumpukan sampah di TPA mengeluarkan gas rumah kaca (GRK) yang dapat mempercepat laju pemanasan global (Rini dkk., 2020). Selain itu, tumpukan sampah dapat menghasilkan lindi yang pada akhirnya akan mencemari perairan dan tanah.

Lindi sendiri menjadi salah satu masalah besar pada pengolahan sampah. Lindi menjadi polutan pada air permukaan, air tanah, dan tanah di sekitar tempat pembuangan sampah dalam banyak kasus. Lindi berasal dari air yang terkandung di dalam sampah (Tchobanoglous & Kreith, 2002). Selain itu, lindi juga dapat berasal dari dekomposisi anaerob dan pembilasan sampah oleh air, seperti air hujan (Damanhuri & Padmi, 2019). Lindi mengandung komponen organik yang konsentrasinya dapat mencapai seratus kali lebih tinggi dari air buangan domestik biasa. Komponen utama dari lindi TPA adalah senyawa organik terlarut, senyawa makro organik, logam berat, dan senyawa xenobiotik

(Salam & Nilza, 2021). Senyawa-senyawa tersebut dapat bersifat berbahaya dan beracun. Padahal, konsentrasi lindi yang signifikan dan melebihi baku mutu diindikasikan dapat bertahan hingga dua puluh tahun (Damanhuri & Padmi, 2019).

Lindi yang tidak diolah dengan baik dapat memberikan dampak negatif bahkan kerusakan pada lingkungan dan makhluk hidup yang terdampak. Padahal, dalam ajaran agama, khususnya Islam, perusakan lingkungan adalah salah satu hal yang dilarang dari aktivitas manusia, seperti halnya disebutkan pada Al-qur'an surat al-A'raf ayat ke-56 berikut,

وَلَا تُفْسِدُوا فِي الْأَرْضِ بَعْدَ إِصْلَاحِهَا وَادْعُوهُ حَوْفًا وَقَطْمًا ۗ إِنَّ رَحْمَتَ اللَّهِ قَرِيبٌ مِّنَ الْمُحْسِنِينَ

Artinya: “Dan janganlah kamu membuat kerusakan di muka bumi, sesudah (Allah) memperbaikinya dan berdoalah kepada-Nya dengan rasa takut (tidak akan diterima) dan harapan (akan dikabulkan). Sesungguhnya rahmat Allah amat dekat kepada orang-orang yang berbuat baik”.

TPA Mrican yang terletak di Kabupaten Ponorogo merupakan salah satu TPA yang tidak dilengkapi dengan fasilitas pengelolaan lindi. Padahal, sampah yang diterima oleh TPA ini mencapai 70–90 ton setiap harinya sejak tahun 2022. Kepala Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Ponorogo pun menilai bahwa pengelolaan sampah pada Kabupaten Ponorogo masih jauh dari kata optimal. Salah satu masalah persampahannya adalah TPA Mrican yang *overload* dalam menerima sampah. Selain itu, TPA ini langsung mengalirkan lindi yang dihasilkannya ke drainase tanpa melewati proses pengolahan terlebih dahulu (Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Ponorogo, 2023). Padahal, kualitas lindi yang dikandung oleh TPA Mrican yang telah didirikan sejak tahun 1995 atau telah berumur 28 tahun ini diperkirakan lebih kompleks jika dibandingkan dengan TPA yang memiliki umur kurang dari sepuluh tahun (*young landfill*). Hal tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Liu dkk. (2022) di mana lindi dari *mature landfill* memiliki kandungan komponen yang lebih kompleks jika dibandingkan dengan *young landfill*.

Hasil uji laboratorium yang dilakukan oleh Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Ponorogo pada tahun 2019 terhadap lindi TPA Mrican menunjukkan bahwa kualitas lindi TPA Mrican tidak memenuhi standar baku

mutu yang telah ditetapkan pada PermenLHK Nomor 59 Tahun 2016 pada beberapa parameter. Parameter yang tidak memenuhi tersebut meliputi *total suspended solid* (TSS) sebesar 218,1 mg/L, *cadmium* (Cd) sebesar 0,23 mg/L, dan N-total sebesar 4.620 mg/L. Selain itu, lindi pada TPA Mrican memiliki kandungan yang melebihi baku mutu pada parameter Hg sebesar 2,526 mg/L, Cd sebesar 2,694 mg/L, dan N Total sebesar 421,934 mg/L pada penelitian yang dilakukan oleh Widyatama (2021). Salah satu hal yang lebih mengkhawatirkan adalah jarak antara TPA Mrican dengan pemukiman terdekat yang kurang dari 100 m. Padahal, SNI 03-3241-1994 menyebutkan syarat bahwa lahan pada jarak 0-100 m dari TPA diharuskan digunakan sebagai zona penyangga berupa sabuk hijau. Dekatnya jarak TPA dengan pemukiman warga tersebut membuat potensi kontaminasi lindi pada air yang digunakan untuk aktivitas warga seperti pengairan untuk kebun dan sawah menjadi lebih besar.

Oleh karena itu, berdasarkan permasalahan-permasalahan yang telah dipaparkan di atas, penulis merasa tertarik untuk membuat perencanaan instalasi pengolahan lindi bagi TPA Mrican. Perencanaan ini diharapkan dapat memberikan pandangan bagi dinas terkait untuk mengatasi permasalahan lindi di TPA Mrican yakni dengan cara merencanakan dan membuat instalasi pengolahan lindi.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah dipaparkan di atas, dapat dirumuskan masalah sebagai berikut,

- a. Bagaimana kualitas air lindi yang dihasilkan dari penimbunan sampah di TPA Mrican Kabupaten Ponorogo?
- b. Bagaimana kuantitas air lindi yang dihasilkan dari penimbunan sampah di TPA Mrican Kabupaten Ponorogo?
- c. Bagaimana alternatif unit instalasi pengolahan lindi yang disarankan untuk mengolah lindi yang dihasilkan di TPA Mrican Kabupaten Ponorogo?
- d. Bagaimana *bill of quantity* (BOQ) dan rencana anggaran biaya (RAB) yang dihasilkan dari perencanaan instalasi pengolahan lindi TPA Mrican?

1.3 Tujuan Penelitian

Dari rumusan masalah yang telah dituliskan di atas, tujuan dari penelitian dan/atau perencanaan ini adalah sebagai berikut,

- a. Mengetahui kualitas lindi yang dihasilkan dari penimbunan sampah di TPA Mrican Kabupaten Ponorogo,
- b. Mengestimasikan kuantitas air lindi yang dihasilkan dari penimbunan sampah di TPA Mrican Kabupaten Ponorogo,
- c. Menganalisis alternatif unit instalasi pengolahan lindi untuk TPA Mrican Kabupaten Ponorogo,
- d. Mengkalkulasi BOQ dan RAB yang dikeluarkan untuk membangun instalasi pengolahan lindi yang telah direncanakan,

1.4 Manfaat Penelitian

Perencanaan instalasi pengolahan lindi TPA Mrican ini dapat memberikan manfaat bagi individu dan kelompok, yakni:

a. Dinas Terkait

Perencanaan instalasi pengolahan lindi ini dapat dijadikan referensi atau gambaran bagi pemerintah, khususnya Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Ponorogo, untuk menentukan instalasi pengolahan lindi yang efisien untuk dibangun di TPA Mrican.

b. Masyarakat

Manfaat dari perencanaan instalasi pengolahan lindi TPA Mrican ini bagi masyarakat, khususnya masyarakat yang tinggal di sekitar TPA Mrican adalah memberikan informasi mengenai kualitas air lindi TPA Mrican dan edukasi terkait pentingnya pengolahan lindi.

c. Akademisi

Manfaat laporan perencanaan instalasi pengolahan lindi ini bagi akademisi adalah untuk dijadikan referensi proses pembuatan perencanaan instalasi pengolahan air limbah, khususnya lindi.

1.5 Batasan Penelitian

Agar tidak terjadi perluasan atau pembiasan masalah sehingga penelitian ini dapat dilakukan dengan lebih fokus dan mendalam, penulis membatasi permasalahan penelitian ini hanya pada:

- a. Analisis kualitas air lindi TPA Mrican untuk parameter COD, BOD, pH, TSS, Total-N, Cd, dan Hg,
- b. Hasil analisis kualitas air lindi TPA Mrican dibandingkan dengan PermenLHK Republik Indonesia Nomor 59 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Lindi bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah,
- c. Perhitungan kuantitas air lindi menggunakan metode thornthwaite dan mather,
- d. Memberikan empat alternatif pilihan instalasi pengolahan lindi yang efisien untuk mengolah air lindi TPA Mrican,
- e. Perencanaan unit instalasi pengolahan lindi untuk TPA Mrican, yang meliputi perhitungan dan penggambaran DED sesuai dengan kriteria desain,
- f. Perhitungan estimasi BOQ dan RAB menggunakan Standar Harga Satuan Tertinggi dan Harga Satuan Bahan Bangunan Konstruksi Kabupaten Ponorogo Tahun 2023 sesuai dengan Keputusan Bupati Kabupaten Ponorogo Nomor 188.45/1286/405.20/2022.

UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A



Halaman ini sengaja dikosongkan

UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Sampah

Sampah merupakan limbah padat yang terdiri dari bahan organik dan anorganik yang dianggap sebagai sesuatu yang tidak berharga lagi. Sampah harus dikelola dengan baik untuk melindungi investasi pembangunan dan agar tidak menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan (Badan Standardisasi Nasional, 2002). Menurut Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2008, sampah merupakan sesuatu yang berbentuk padat dan merupakan sisa dari kegiatan manusia sehari-hari dan/atau proses alam. Sementara itu, menurut Faiza dkk. (2019), sampah dapat didefinisikan sebagai barang yang tidak lagi memiliki nilai bagi orang yang bertanggung jawab untuknya.

2.1.1 Karakteristik Sampah

Karakteristik sampah dibedakan menjadi fisika, kimia, dan kimia unsur penyusun (Damanhuri & Padmi, 2019). Selain itu, menurut Worrell & Vesilind (2012), sampah memiliki karakteristik yang menarik yang meliputi: komposisi berdasarkan barang yang dapat diidentifikasi, seperti kaleng baja dan kertas kantor; kadar air; ukuran partikel; karakteristik kimia; nilai kalor; densitas; sifat mekanis; dan daya urai secara biologis (*biodegradability*).

a. Karakteristik fisika

Menurut Phelps dkk. (1996), karakteristik fisika sampah terdiri dari densitas, kadar air, dan distribusi ukuran partikel. Sementara menurut Damanhuri & Padmi (2019), karakteristik fisika sampah terdiri dari densitas, kadar volatil, kadar air, kadar abu, karbon tetap, dan nilai kalor.

1) Densitas

Densitas sampah adalah rasio dari massa sampah dengan volume. Satuan dari densitas adalah kg/m^3 . Pada negara-negara berpenghasilan tinggi, adanya alat pemadat pada tahap pengumpulan sangatlah menguntungkan karena biasanya

sampah yang dikumpulkan memiliki kepadatan yang rendah. Alat pemadatan tersebut dapat mengurangi volume sampah hingga 75% sehingga densitas sampah dapat meningkat. Pengisian kendaraan pengangkut sampah secara maksimal akan membantu dalam proses perhitungan volume sampah yang masuk ke TPA (Phelps dkk., 1996).

2) Kadar air

Kadar air pada sampah dapat menyatakan persentase dari berat sampah saat kering atau basah. Akan tetapi, biasanya kadar air dinyatakan dalam berat basah. Faktor yang memengaruhi kadar air sampah di antaranya adalah iklim, curah hujan, cuaca, komposisi sampah, dan kelembaban. Setelah berat sampah stabil, kadar air dapat dihitung dengan menimbang kehilangan air pada sampah pada pemanasan 105°C. (Damanhuri & Padmi, 2019).

Kadar air sampah berkisar antara 20–40%. Kadar air merupakan faktor penting pada pengolahan sampah dengan insenerasi karena menentukan energi yang harus disediakan untuk menguapkan air dan menaikkan suhu uap air. Kadar air umumnya lebih tinggi di negara-negara berpenghasilan rendah karena tingginya proporsi limbah makanan dan pekarangan (Phelps dkk., 1996).

3) Kadar volatil

Kadar volatil pada sampah menunjukkan banyaknya materi yang hilang karena menguap pada saat sampah dipanaskan pada temperatur 550–600°C. Kadar volatil dapat dinyatakan dengan persen berat kering (Damanhuri & Padmi, 2019).

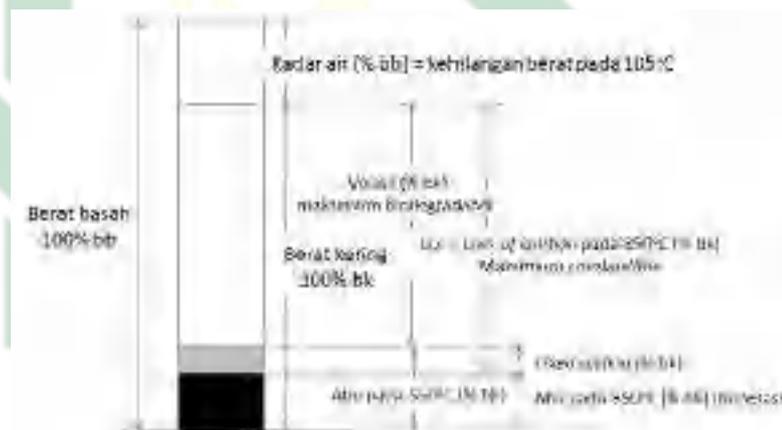
4) Kadar abu

Abu adalah sisa dari pembakaran sampah dan tidak ter volatilisasikan pada saat proses pembakaran. Abu dari proses pembakaran biasanya tercipta dari mineral yang terkandung pada sampah dan bahan bakar yang digunakan untuk membakar

sampah. Kadar abu dinyatakan dengan persen rasio dari berat bagian sampah yang masih tersisa setelah proses pembakaran pada temperatur 550–600°C terhadap berat kadar padatan pada sampah (Damanhuri & Padmi, 2019).

5) *Fixed carbon*

Fixed carbon adalah berat yang hilang pada saat sampah dipanaskan hingga temperatur 950°C (Worrell & Vesilind, 2012). Akan tetapi, *fixed carbon* juga dapat diraih dengan pembakaran pada temperatur di atas 800°C, semisal 850°C (Damanhuri & Padmi, 2019). **Gambar 2.1** di bawah ini menunjukkan skema hubungan kadar volatil, kadar air, dan *fixed carbon* pada sampah.



Gambar 2.1 Skema Hubungan Kadar Volatil, Kadar Air, dan *Fixed Carbon*
Sumber: (Damanhuri & Padmi, 2019)

6) *Heat value* ‘nilai kalor’

Nilai kalor adalah besaran yang menggambarkan kalor yang terdapat pada suatu bahan. Semakin tinggi nilai kalor, semakin mudah pula bahan tersebut terbakar (Damanhuri & Padmi, 2019). Nilai kalor ditentukan secara eksperimental menggunakan uji bom kalorimeter, di mana panas yang dihasilkan pada suhu konstan 25°C dari pembakaran sampel kering diukur. Karena suhu uji di bawah titik didih air, air pembakaran tetap dalam keadaan cair. Akan tetapi, selama

pembakaran suhu gas hasil pembakaran tetap di atas 100°C, sehingga air hasil pembakaran berada dalam keadaan uap (Phelps dkk., 1996).

7) Distribusi ukuran partikel

Pengukuran distribusi ukuran partikel pada sampah penting untuk dilakukan karena signifikansinya dalam desain mesin pemisah dan mesin penghancur (Phelps dkk., 1996).

b. Karakteristik kimia

Karakteristik kimia sampah didapatkan dari hasil dekomposisi dan nilai pemanasan sampah. Karakteristik kimia tersebut meliputi lipid, karbohidrat, protein, serat alami, material organik sintetis, *noncombustible*, dan nilai pemanasan (Phelps dkk., 1996). Karakteristik kimia sampah yang paling sering diuji adalah N-organik, C-organik, dan total fosfor (Damanhuri & Padmi, 2019).

1) C-organik

Karbon organik dianalisis dengan oksidasi menggunakan kalium dikromat berlebih ($K_2Cr_2O_7$) kemudian dititrasi dengan garam mohr dengan digunakan indikator ferroin sebagai indikatornya. Nantinya nilai C organik akan digunakan untuk menghitung rasio C/N sebagai indikator pengomposan.

2) N-organik

N-organik dianalisis dengan mengubahnya menjadi N-total kjeldahl dengan mineralisasi. $N_{organik} = N_{total\ kjeldahl} - N_{NH_4}$ (Damanhuri & Padmi, 2019).

3) Lipid

Sumber utama dari lipid—termasuk minyak, *oil and grease*—adalah *garbage*, minyak goreng, dan lemak. Nilai kalor lipid yang cukup tinggi, sekitar 38000 kJ/kg, membuat limbah yang mengandung lipid dengan kadar yang tinggi cocok untuk proses pemulihan energi. Lipid dalam bentuk cair membantu dalam proses dekomposisi sampah. Sifatnya yang sukar terlarut pada air membuat laju biodegradasi lipid relatif lambat.

4) Karbohidrat

Karbohidrat pada sampah ditemukan terutama dalam sampah makanan dan pekarangan. Karbohidrat mudah terurai menjadi produk seperti karbon dioksida, air, dan metana. Karbohidrat yang membusuk sangat menarik bagi lalat dan tikus.

5) Protein

Protein ditemukan terutama pada sampah makanan dan kebun dan terdiri dari 5-10% padatan kering dari sampah. Protein terurai menjadi asam amino tetapi sebagian dari dekomposisinya dapat menghasilkan amonia yang memiliki bau busuk.

6) Serat alami

Serat alami ditemukan pada kertas, produk kertas, sampah makanan, dan *yard waste*.

7) Material organik sintetis

Material organik sintetis seperti plastik menjadi material sampah yang meningkat jumlahnya pada beberapa tahun terakhir ini. Material ini sangat sulit untuk terurai sehingga untuk mengurangi jumlahnya, dilakukan pendaurulangan. Plastik memiliki nilai kalor yang tinggi, sekitar 32000 kJ/kg, yang membuatnya sangat cocok untuk pembakaran. Namun, plastik berupa polivinil klorida (PVC) bila dibakar akan menghasilkan dioksin dan gas asam yang dapat menyebabkan korosi pada sistem pembakaran dan menjadi komponen pada 'hujan asam'.

8) *Noncombustible*

Noncombustible merupakan bahan yang sulit untuk terbakar. Contohnya adalah logam, kaca, dan keramik (Phelps dkk., 1996).

c. Karakteristik kimia unsur penyusun

Karakteristik kimia unsur penyusun sampah dapat menggambarkan unsur-unsur kimia yang menyusun sampah. Unsur-

unsur yang biasanya dianalisis adalah C, H, N, O, P, S, kandungan halogen, dan logam berat (Damanhuri & Padmi, 2019).

d. *Biodegradability*

Dari keseluruhan ‘*municipal solid waste*’ sampah kota, hanya sekitar 45% yang memiliki potensi untuk terurai secara alami. Oleh karena sebagian besar sampah kota tidak dapat terurai secara alami, selain mengandalkan penguraian atau pengomposan, sampah tersebut harus diolah dengan cara lain (Worrell & Vesilind, 2012).

2.1.2 Komposisi Sampah

Komposisi sampah mencerminkan pola konsumsi dan tingkat pendapatan di suatu wilayah. Negara berpenghasilan tinggi menghasilkan limbah makanan dan organik yang relatif lebih sedikit, yaitu 32% dari total limbah dan menghasilkan lebih banyak limbah kering yang dapat didaur ulang yakni sekitar 51% yang di antaranya adalah plastik, kertas, karton, logam, dan kaca. Negara berpenghasilan menengah dan rendah masing-masing menghasilkan 53% dan 56% limbah makanan dan organik dengan fraksi limbah organik meningkat seiring dengan penurunan tingkat pembangunan ekonomi. Di negara berpenghasilan rendah, bahan yang dapat didaur ulang hanya menyumbang 16% dari aliran limbah. Akan tetapi, persamaan dari seluruh wilayah adalah menghasilkan sekitar 50% atau lebih sampah organik, kecuali Eropa, Asia Tengah, dan Amerika Utara yang menghasilkan porsi sampah kering lebih tinggi (Kaza dkk., 2018).

2.1.3 Sumber Sampah

Menurut sumbernya, sampah diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, yakni permukiman, komersial, kelembagaan, konstruksi dan pembongkaran, layanan kota, perawatan tanaman, industri, dan pertanian (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

a. Permukiman

Sumber berupa permukiman terdiri dari tempat tinggal untuk *single family* dan *multifamily*, apartemen dengan kepadatan rendah,

sedang, dan tinggi. Sampah permukiman biasanya terdiri dari sampah makanan, kertas, karton, plastik, tekstil, kulit, sampah pekarangan, kayu, kaca, kaleng, aluminium, logam lainnya, abu, daun jalanan, limbah spesifik (termasuk barang berukuran besar, elektronik, baterai, oli, dan ban), dan limbah berbahaya/B3 rumah tangga.

b. Komersial

Sumber sampah komersial terdiri dari toko, restoran, pasar, gedung perkantoran, hotel, motel, percetakan, dan bengkel. Sampah dari sumber komersial biasanya berupa kertas, karton, plastik, kayu, sampah makanan, kaca, sampah logam, abu, sampah spesifik (semisal dari bengkel mobil), limbah berbahaya, dan lain sebagainya.

c. Institusi

Institusi yang menjadi sumber sampah di antaranya adalah sekolah, rumah sakit, penjara, dan pusat pemerintahan. Jenis sampah yang dihasilkan biasanya sama dengan sampah yang dihasilkan dari sumber berupa komersial.

d. Konstruksi dan Pembongkaran

Sampah dapat bersumber dari *site* 'tempat' konstruksi baru, perbaikan jalan, *site* renovasi, perataan bangunan, trotoar rusak, dan tempat serta aktivitas konstruksi lainnya.

e. Layanan Kota

Sampah dari pelayanan kota berasal dari pembersihan jalan, pertamanan, drainase, tempat rekreasi, dan tempat umum lainnya. Sampah dari sumber ini biasanya berupa sampah khusus, sampah hasil penyapuan jalan, pemotongan tumbuhan-tumbuhan di jalan, puing-puing kolam tangkapan, limbah dari tempat umum dan rekreasi, dan lain-lain.

f. Fasilitas Pengolahan

Fasilitas pengolahan air, air limbah, dan pengolahan-pengolahan lainnya dapat menjadi salah satu sumber timbulan sampah. Sampah

dari fasilitas pengolahan di antaranya adalah sisa lumpur dan bahan-bahan sisa atau sampingan dari proses pengolahan lainnya.

g. Industri

Industri menjadi salah satu sumber dari sampah. Sampah yang dihasilkan dari industri terdiri dari sampah yang dihasilkan dari proses pembuatan produk (produksi) dan yang bukan.

h. Pertanian

Sumber sampah berupa pertanian di antaranya adalah tanaman ladang, kebun buah-buahan, kebun anggur, perusahaan susu, tempat pemberian pakan, dan peternakan.

2.1.4 Jenis-Jenis Sampah

Menurut Phelps dkk. (1996), berdasarkan karakteristiknya, sampah diklasifikasikan menjadi *garbage*, *rubbish*, abu, sampah berukuran besar, kendaraan bekas, bangkai binatang, sampah industri, sampah berbahaya, sampah konstruksi dan pembongkaran, dan limbah hasil pengolahan air limbah.

a. *Garbage*

Garbage adalah sampah berupa bagian dari hewan dan sayuran yang dihasilkan dari penanganan, penyimpanan, penjualan, penyiapan, pemasakan, dan penyajian makanan. *Garbage* mengandung bahan organik yang dapat membusuk dan menghasilkan bau yang sehingga dapat menarik hewan vektor seperti lalat dan tikus.

b. *Rubbish*

Rubbish adalah sampah pada umumnya yang berasal dari rumah tangga, perusahaan, komersial dan institusi. *Rubbish* dibedakan menjadi *combustable* dan *non-combustable*. *Combustable rubbish* ‘sampah yang mudah terbakar’ meliputi kertas, karet, kayu, daun kering, dan lain-lain. Sementara *non-combustable rubbish* ‘sampah yang tidak mudah terbakar’ meliputi kaca, logam, dan bahan-bahan yang biasanya bersifat anorganik.

c. Abu

Abu adalah hasil atau sisa yang dihasilkan dari pembakaran suatu barang. Abu juga terdiri dari residu tepung halus serta abu dan *clinker* yang sering dicampur dengan potongan logam kecil dan kaca.

d. Sampah Berukuran Besar

Sampah berukuran besar (*bulky waste*) merupakan sampah berukuran besar yang tidak dapat diletakkan dalam wadah penyimpanan rumah tangga biasa. Contoh *bulky waste* adalah kompor, lemari es, kayu, ranting pohon.

e. Kendaraan Bekas

Kendaraan bekas yang tidak digunakan kembali atau bahkan telah dibuang memiliki *scrap value* yang signifikan untuk logamnya dijual ke pedagang atau pengolah barang bekas. Sejak tahun 1994, di negara-negara industri, kendaraan yang dibuang akan didaur ulang.

f. Bangkai Binatang

Sampah berupa bangkai terdiri dari hewan yang mati secara alami dan terbunuh secara tidak sengaja. Bangkai binatang dibagi menjadi dua kelompok, besar dan kecil. Contoh bangkai binatang besar adalah bangkai kuda, sapi, kambing, domba, babi dan sejenisnya. Sementara contoh bangkai binatang kecil meliputi bangkai anjing, kucing, kelinci dan tikus. Bangkai binatang besar memerlukan peralatan khusus untuk mengangkat dan menangani saat dipindahkan. Jika tidak segera ditangani dengan baik, bangkai dapat mengancam kesehatan masyarakat karena menarik lalat dan hama lainnya saat membusuk.

g. Sampah Industri

Sampah industri meliputi bahan padat yang dibuang dari proses manufaktur dan operasi industri.

h. Sampah Berbahaya

Sampah berbahaya dapat didefinisikan sebagai sampah industri, institusi, atau konsumen yang karena sifat fisik, kimia, atau

biologisnya berpotensi menimbulkan bahaya bagi manusia dan lingkungan. Dalam beberapa kasus, meskipun zat aktif dapat berupa cairan dan gas, tetapi tetap diklasifikasikan sebagai limbah padat karena diletakkan atau diwadahi dalam wadah padat.

i. Sampah Konstruksi dan Pembongkaran

Sampah konstruksi dan pembongkaran adalah sampah yang dihasilkan dari proses konstruksi, perbaikan, dan pembongkaran suatu bangunan dan struktur lainnya. Sampah jenis ini terdiri dari tanah, batu, beton, batu bata, kayu, bahan atap, bahan pipa, kabel listrik dan bahan bangunan lainnya.

j. Limbah Hasil Pengolahan Air Limbah (*Sewage Waste*)

Produk sampingan padat dari pengolahan limbah diklasifikasikan sebagai *sewage waste*. Sebagian besar limbah ini bersifat organik. Fraksi anorganik dari limbah seperti pasir dan kulit telur dipisahkan pada tahap awal pengolahan, tetapi karena mengandung bahan organik yang dapat membusuk yang mungkin mengandung patogen, maka limbah ini juga harus segera ditimbun.

Menurut Mundiatur & Daryanto (2015), sampah dapat diklasifikasikan berdasarkan sumber dan bentuknya. Berdasarkan sumbernya, sampah diklasifikasikan menjadi:

a. Sampah alam

Sampah alam merupakan sampah yang berasal dari proses alami seperti daun-daunan kering yang terurai pada tanah.

b. Sampah manusia

Sampah manusia merupakan sampah yang dihasilkan dari proses pencernaan manusia yang meliputi urin dan feses.

c. Sampah konsumsi

Sampah konsumsi berasal dari barang-barang yang telah digunakan oleh manusia dan sengaja dibuang.

d. Sampah industri

e. Sampah pertambangan

f. Sampah nuklir

Mundiaturun & Daryanto (2015) juga mengklasifikasikan limbah/sampah menurut bentuknya yang meliputi:

a. Limbah padat/sampah

Limbah padat/sampah adalah segala bahan buangan yang berbentuk padat. Sampah padat diklasifikasikan kembali berdasarkan kemampuan terurainya oleh alam (*biodegradability*) menjadi:

1) *Biodegradable*

Sampah *biodegradable* memiliki sifat organik dan dapat diuraikan secara sempurna oleh proses alami seperti proses biologi.

2) *Non-biodegradable*

Sampah *non-biodegradable* tidak dapat diuraikan secara alami. Sampah *non-biodegradable* merupakan sampah anorganik yang dibedakan kembali menjadi *recyclable* dan *non-recyclable*.

a) *Recyclable*

Sampah *recyclable* merupakan sampah yang masih memiliki nilai ekonomi apabila diolah dan digunakan kembali. Contoh sampah jenis ini adalah plastik dan logam.

b) *Non-recyclable*

Sampah *non-recyclable* adalah sampah yang tidak dapat diolah dan digunakan kembali.

b. Limbah cair

Limbah cair adalah bahan berbentuk cairan yang tidak diperlukan kembali sehingga dibuang atau dialirkan ke tempat pembuangan.

2.2 Tempat Pembuangan Akhir (TPA)

TPA merupakan tempat yang dibuat untuk membuang dan menimbun sampah dan dianggap sebagai bentuk pengolahan sampah tertua (Hassan & Umer, 2022). Menurut periode pembentukan land, TPA diklasifikasikan dengan umumnya sebagai berikut (Khoo dkk., 2020),

- a. *Young landfill* (0–5 tahun), merupakan terjadinya periode transisi pada pembentukan lindi,
- b. *Young landfill* (5–10 tahun), merupakan terjadinya periode pembentukan asam,
- c. *Intermediate landfill* (10–20 tahun), merupakan terjadinya periode fermentasi metana pada proses pembentukan lindi
- d. *Old landfill* (>20 tahun), merupakan terjadinya periode maturasi atau pematangan lindi.

2.3 Lindi

Lindi adalah masalah utama yang ditimbulkan dari tempat pembuangan akhir limbah padat dan dianggap sebagai polutan terburuk dari sumber air permukaan dan air tanah. Lindi adalah larutan berwarna coklat tua hingga hitam yang berasal dari sampah yang terurai di tempat pemrosesan dan/atau pembuangan sampah. Sumber utama lindi adalah kelebihan air pada dekomposisi sampah organik basah dan juga presipitasi pada musim hujan yang masuk ke tempat pembuangan sampah (Hassan & Umer, 2022). Sementara itu, menurut Kreith & Tchobanoglous (2002), lindi merupakan cairan yang dihasilkan dari perkolasi atau perembesan akibat air hujan, limpasan yang tidak terkendali serta air lainnya yang mengenai sampah. Lindi juga berasal dari air yang terkandung di dalam sampah itu sendiri.

Lindi mengandung bahan terlarut dan tersuspensi. Cairan ini sangat beracun dan mengandung banyak polutan berbahaya seperti logam berat beracun, pelarut industri, amoniak, senyawa organik beracun, patogen, dan bahan pembersih, polutan mikro organik seperti residu farmasi dan pestisida, serta limbah elektronik yang mengandung bahan beracun seperti timbal, merkuri, dan kadmium (Hassan & Umer, 2022).

2.3.1 Karakteristik Lindi

Pada umumnya, lindi mengandung bahan-bahan polutan utama yang dapat dibagi menjadi empat kelompok utama, yakni zat anorganik, logam berat, bahan organik terlarut dan zat xenobiotik (Septiariva dkk., 2019). Karakteristik lindi yang dihasilkan dari TPA dipengaruhi oleh

banyak faktor, antara lain jenis sampah padat yang dibuang di TPA, tingkat pemadatan di TPA, kondisi iklim dan hidrogeologi lokasi TPA, pH, umur TPA, serta proses kimia dan biologi yang terjadi selama degradasi sampah terjadi (Emalya dkk., 2020). Kemudian, penelitian yang dilakukan oleh Ergene dkk. (2022), menunjukkan bahwa secara statistik terbukti curah hujan merupakan faktor terpenting yang memengaruhi karakteristik dan kualitas lindi. Hal tersebut dikarenakan pada curah hujan yang tinggi terjadi pengenceran lindi sehingga menurunkan konsentrasi polutannya. Selain itu, terdapat efek *wash out* yang dapat menyebabkan beban lindi yang tinggi dalam jangka pendek.. Sebaliknya, pada iklim kering, banyak konsentrasi parameter lindi yang bernilai tinggi walaupun dengan umur TPA yang tidak lagi muda (10-15 tahun). Hal tersebut dikarenakan rendahnya kelembaban untuk aktivitas biologis yang berkepanjangan. **Tabel 2.1** di bawah ini menunjukkan perbandingan konsentrasi parameter pengujian lindi pada iklim yang berbeda.

Tabel 2.1 Konsentrasi Parameter Pengujian Lindi Pada Iklim Berbeda

	< 5 Tahun		5–10 tahun		10–15 tahun		> 15 Tahun	
	Iklim 1	Iklim 2	Iklim 1	Iklim 2	Iklim 1	Iklim 2	Iklim 1	Iklim 2
pH	7,1	7,9	7,7	7,9	8,0	7,8	7,8	8,1
COD	12666	3754	5276	3041	5201	3583	2116	2240
BOD	6540	817	2087	407	1266	369	290	324
BOD/ COD	0,51	0,21	0,37	0,13	0,17	0,11	0,14	0,10
NH ₄ -N	794	541	794	1187	1383	1253	642	904
TSS	863	146	NT	NT	NT	NT	237	244
Cl	2107	2393	2556	2196	NT	NT	NT	NT
EC	16,1	19,3	15,8	18,4	NT	NT	NT	NT
Fe	26,6	15,7	NT	NT	NT	NT	NT	NT

(Sumber: Ergene dkk., 2022)

Keterangan :

EC dalam satuan mS/c dan parameter lainnya dalam mg/L

Iklim 1 memiliki rata-rata presipitasi <1200 mm dan temperatur < 20°C

Iklim 2 memiliki rata-rata presipitasi >1200 mm dan temperatur > 20°C

NT = *Not tested* 'tidak terdeteksi' karena rendahnya data hasil

Umur TPA juga memainkan peranan yang penting pada karakteristik lindi terutama pada kandungan organiknya. Parameter COD dan BOD pada lindi cenderung mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya waktu penimbunan. Nilai COD dan BOD lebih tinggi pada lindi TPA yang lebih muda (<5 tahun). Pembuangan sampah baru secara terus menerus di atas sampah lama tidak meningkatkan kekuatan organik lindi yang terkumpul di dasar tumpukan sampah. Hal tersebut terjadi karena terdapat mikroba pada sampah yang terletak di bagian bawah atau yang telah tertimbun dengan waktu yang lama. Mikroba tersebut bertindak sebagai bioreaktor untuk lindi yang melewati bahan organik tinggi dari sampah baru (Ergene dkk., 2022). **Tabel 2.2** di bawah ini menunjukkan perbedaan konsentrasi parameter lindi TPA dengan umur yang berbeda.

Tabel 2.2 Perbedaan Konsentrasi Parameter Lindi Pada TPA dengan Perbedaan Umur

	< 5 Tahun	5–10 Tahun	10–15 Tahun	> 15 Tahun
pH	7,1	7,7	8,0	7,8
COD	12666	5276	5201	2116
BOD	6540	2087	1266	290
BOD/COD	0,51	0,37	0,17	0,14
NH₄-N	794	794	1383	642
TKN	1088	1310	2133	794
PO₄-P	10,5	15,9	9,0	3,2
TSS	24	18	13	10
Cl	21	22	22	31
Ca	14	16	14	21
Cr	23	17	13	19
Ni	19	17	17	19
Fe	19	18	23	27

(Sumber: Ergene dkk., 2022)

2.3.2 Baku Mutu Lindi

Baku mutu lindi di Indonesia diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor

P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016 tentang Baku Mutu Lindi Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah. **Tabel 2.3** di bawah ini menunjukkan baku mutu lindi tersebut.

Tabel 2.3 Baku Mutu Lindi

Parameter	Kadar Paling Tinggi	
	Nilai	Satuan
pH	6–9	-
BOD	150	mg/L
COD	300	mg/L
TSS	100	mg/L
N-Total	60	mg/L
Merkuri	0,005	mg/L
Kadmium	0,1	mg/L

(Sumber: PermenLHK Nomor P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016)

a. pH

Lindi dari *mature landfill* atau TPA yang telah beroperasi selama lebih dari 10 tahun dapat mencapai nilai lebih tinggi dari 7,5 karena perubahan asam lemak volatil menjadi metana dan karbon dioksida. Sifat basa lindi tersebut merupakan karakteristik dari fase metanogenik lindi dari *mature landfill*. Sifat basa ini mengindikasikan tingginya proporsi sampah lama dan sampah yang stabil dalam total massa yang terakumulasi di TPA (Wdowczyk & Szymańska-Pulikowska, 2020).

b. BOD

Pada *young landfill*, lindi mengandung bahan organik *biodegradable* yang tinggi, termasuk asam lemak dengan berat molekul rendah. Kadar BOD menurun seiring bertambahnya usia TPA. Penurunan tersebut lebih cepat daripada COD karena penguraian sampah yang terjadi dengan cepat. Akibatnya, rasio BOD/COD lindi akan menurun pula seiring bertambahnya usia TPA dan dapat dijadikan indikator usia TPA. Nilai tipikal rasio BOD/COD lindi yang dihasilkan dari *young landfill* (TPA berusia kurang dari lima tahun) adalah antara 0,5 hingga 1,0 (Emalya dkk.,

2020). Sedangkan menurut Youcai (2018) rasio BOD₅/COD dari lindi yang berasal dari *young landfill* adalah 0,5–0,6. Rasio BOD/COD akan menurun hingga <0,1 seiring dengan bertambahnya usia TPA sebagai akibat dari peningkatan konsumsi asam lemak volatil (Khoo dkk., 2020).

c. COD

Young landfill dengan usia 1–2 tahun cenderung memiliki konsentrasi COD yang tinggi, yakni sebesar 3.000–60.000 mg/L. Sedangkan, *mature landfill* yang berusia lebih dari 10 tahun cenderung memiliki konsentrasi COD yang lebih rendah, yakni sekitar 100–500 mg/L (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

d. TSS

Biasanya TSS tersusun atas zat organik dan anorganik yang menyebabkan kekeruhan pada air. Zat-zat tersebut meliputi pasir halus, lumpur, jasad renik yang berasal dari erosi atau kikisan tanah yang terbawa pada air (Laili, 2021).

e. N-Total

Konsentrasi nitrogen dalam bentuk nitrogen amonia dan nitrogen organik pada air limbah umumnya bergantung pada proses pendegradasian bahan organik yang terjadi. Nitrogen total atau N-total adalah akumulasi dari nitrit (NO₂⁻), nitrat (NO₃⁻), amonia (NH₃) atau senyawa-senyawa yang mengandung unsur nitrogen (N) (Angrianto dkk., 2021).

f. Merkuri

Penggunaan merkuri pada produk-produk yang pada akhirnya menjadi sampah yang dibuang ke TPA membuat akumulasi merkuri pada lindi TPA. Hal tersebut menjadikan merkuri sebagai konstituen penting dari lindi yang dihasilkan yang sering dicirikan oleh kandungan bahan organik terlarut yang tinggi, komponen makro anorganik, logam, dan senyawa organik xenobiotik lainnya.

pH merupakan salah satu faktor yang dapat mempengaruhi toksisitas, bioavailabilitas, dan mobilitas merkuri pada lindi TPA.

Pada pH yang lebih besar dari 7, beban zat terlarut termasuk logam pada lindi akan semakin besar (Nevondo dkk., 2019).

g. Kadmium

Menurut Laili (2021), pada pH air lindi yang rendah atau bersifat asam, konsentrasi kadmium akan lebih tinggi. Hal tersebut dikarenakan pada kondisi tersebut kadmium mudah terlarut.

2.4 Sistem Pengelolaan Lindi

Sistem pengolahan lindi adalah semua infrastruktur, pabrik, pengoperasian, pemantauan, dan sistem pengelolaan yang menyediakan fungsi untuk mengubah lindi yang masuk menjadi sesuatu yang aman untuk dibuang ke lingkungan. Sistem pengelolaan lindi terdiri dari sistem pengumpulan lindi dan instalasi pengolahan lindi. Sistem pengelolaan lindi pada TPA sangat penting adanya karena lindi harus diolah hingga mencapai standar yang aman sebelum dibuang ke badan air penerima. Dengan adanya sistem pengelolaan yang berfungsi untuk mengurangi beban pencemar yang dikandung lindi, diharapkan dapat mencegah terjadinya pencemaran terhadap lingkungan (Damanhuri & Padmi, 2010).

2.4.1 Timbulan Lindi

Timbulan lindi, baik kuantitas maupun kualitas, dipengaruhi oleh jenis limbah, iklim (jumlah dan jenis presipitasi, yaitu hujan atau salju), evapotranspirasi, *run-on/runoff*, luas keseluruhan lokasi dan permukaan, tanah penutup harian dan menengah, serta kualitas penutup akhir dan lapisan bawah dari tempat pembuangan sampah (Wilson dkk., 2011). Mekanisme terjadinya timbulan lindi perlu dipelajari untuk memberikan dasar teori bagi perencanaan suatu pengolahan lindi, prediksi hasil lindi, dan pemanfaatan sumberdaya lindi. Mekanisme pembentukan lindi dianalisis dengan dua cara. Cara pertama adalah menganalisis sifat fisik sampah yang disertai dengan produksi air di bawah pemadatan, dan bagian air ini terkait dengan kadar air awal sampah dan karakteristik tanah untuk menyimpan air. Cara kedua adalah

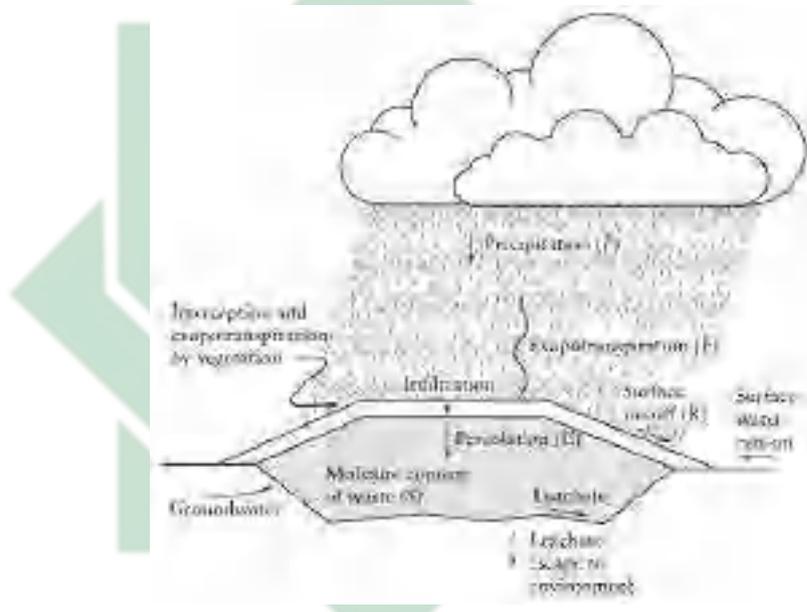
dengan menganalisis proses degradasi sampah dan proses transformasi berbagai senyawa yang ada (Zhang dkk., 2022).

Kuantitas timbulan lindi dapat diperkirakan dengan menggunakan data empiris dan metode neraca air yang mengatur keseimbangan massa antara curah hujan, evapotranspirasi, limpasan permukaan, dan penyimpanan air pada tanah. Metode ini dapat digunakan karena pada proses pembentukan lindi, beberapa fraksi presipitasi (bergantung pada karakteristik limpasan dan jenis serta kondisi tanah) akan meresap melalui tanah penutup dan fraksi air ini dikembalikan ke atmosfer melalui evapotranspirasi. Jika perkolasi melebihi evapotranspirasi untuk waktu yang cukup lama, jumlah air yang dapat ditahan oleh tanah (kapasitas lapangnya) akan terlampaui. Kapasitas lapang (*field capacity*) adalah kelembaban maksimum tanah (atau bahan lain seperti sampah) yang dapat dipertahankan tanpa perkolasi ke bawah terus menerus karena gravitasi. Tanpa tumbuhan, tanah di atas TPA pada akhirnya mencapai kapasitas lapangnya sehingga kelembaban berlebih akan menggantikan kelembaban di dalam tanah. Dengan tutupan tanaman, tanaman dapat mengekstraksi air dari tanah dan melepaskannya melalui evapotranspirasi sehingga mengeringkan tanah hingga di bawah kapasitas lapang. Semua lapisan campuran tanah dan sampah di TPA yang dipadatkan juga memiliki kapasitas lapang (atau kemampuan menahan kelembaban/air). Jika kapasitas lapang campuran ini terlampaui, cairan (lindi) akan jatuh ke lapisan tanah/sampah terendah berikutnya. Campuran tanah/sampah yang tidak mencapai kapasitas lapang pada dasarnya tidak mengalirkan lindi ke lapisan yang lebih dalam. Di TPA, jika kapasitas lapang tanah penutup sampah terlampaui, lindi meresap melalui tanah dan masuk ke dalam sampah yang tertimbun. Sebaliknya, jika kapasitas lapang sampah terlampaui, lindi akan mengalir ke sistem pengumpulan lindi (Worrell & Vesilind, 2012).

2.4.2 Metode Perhitungan Kuantitas Lindi

Salah satu metode yang sering digunakan untuk memprediksi kuantitas lindi adalah metode neraca air. Metode neraca air adalah cara

untuk mengetahui dan menghitung seberapa besar *field capacity* ‘kapasitas lapang’ yang terlampaui sehingga pada akhirnya dapat diketahui produksi lindi pada tempat pembuangan sampah (Worrell & Vesilind, 2012). Dasar dari metode ini adalah asumsi bahwa lindi hanya dihasilkan dari perkolasi atau air eksternal yang masuk atau melalui timbunan sampah tanpa memperhatikan adanya sumber lain seperti aliran air permukaan, infiltrasi pada air tanah, air hasil dekomposisi tanah, dan sumber air yang terdapat di sekitar sampah lainnya (Damanhuri & Padmi, 2019).



Gambar 2.2 Skema Komponen Neraca Air Pada TPA

(Sumber: Worrell & Vesilind, 2012)

Neraca air adalah keseimbangan antara pemasukan air melalui presipitasi dan pengeluaran air melalui evapotranspirasi. Prinsip pada metode ini adalah keseimbangan iklim karena curah hujan dan evapotranspirasi merupakan faktor aktif dari iklim. Dari perbandingan pergerakan curah hujan musiman dengan evapotranspirasi, besarnya parameter terkait lainnya yang meliputi kelebihan air, kehilangan air, penyimpanan air pada tanah dan limpasan air (*runoff*) dapat ditentukan (Thorntwaite & Mather, 1957). Komponen-komponen pada metode neraca air dapat dilihat pada **Gambar 2.2**. Pada metode neraca air yang

dikembangkan oleh Thornthwaite & Mather (1957), data yang diperlukan untuk perhitungan meliputi:

- a. Temperatur udara rata-rata bulanan atau harian
- b. Curah hujan rata-rata bulanan atau harian
- c. Tabel konversi dan komputasi yang penting
- d. Kapasitas atau kemampuan tanah untuk menahan air dari kedalaman tanah yang keseimbangannya akan dihitung.

2.5 Pengolahan Lindi

Pengolahan lindi yang optimal dinilai dapat berubah dari waktu ke waktu seiring dengan perkembangan teknologi, peraturan-peraturan baru, dan/atau kualitas lindi yang bervariasi. Kebutuhan akan pengolahan lindi bergantung pada kondisi akhir lindi. Lindi seringkali sulit diolah karena kekuatan organiknya yang tinggi, tingkat produksi dan komposisinya yang tidak teratur, variasinya dalam biodegradabilitas, dan kandungan fosfornya yang rendah (Worrell & Vesilind, 2012).

Komposisi lindi TPA dapat bervariasi atau mengalami perubahan seiring dengan bertambahnya usia TPA. Lindi pada TPA yang berumur kurang dari 5 tahun mengandung bahan organik yang melimpah, termasuk asam lemak dengan berat molekul yang rendah. Dalam kondisi tersebut, pengolahan lindi secara biologis dinilai efektif. Namun, dengan bertambahnya umur TPA, terjadi penurunan kandungan bahan organik dan rasio BOD/COD. Akan tetapi, zat humat lindi meningkat. Pada kondisi tersebut, biodegradabilitas lindi menurun sehingga metode pengolahan yang hanya mengandalkan proses biologis sulit untuk mencapai hasil yang optimal (Youcai, 2018).

Selain itu, menurut Khoo dkk. (2020), pemilihan teknologi pengolahan lindi berbeda antara satu lokasi dengan lokasi lainnya, tergantung pada karakteristik lindi. Kompleksitas kandungan lindi membuat semakin diperlukannya teknologi pengolahan yang rumit dan multiproses. Oleh karena itu, untuk mendapatkan hasil olahan lindi yang optimal, diperlukan proses pengolahan multistap yang menggabungkan antara pengolahan fisik-kimia dan biologis.

2.5.1 Pengolahan secara Fisika-Kimia (Fisikokimia)

Pengolahan secara fisik-kimia biasanya digunakan ketika pengolahan biologis terhambat karena adanya senyawa refraktori yang berlebihan dalam lindi. Biasanya, proses fisik-kimia ini digunakan sebagai *pretreatment* ‘pengolahan tahap awal’ atau pengolahan tahap akhir (Chelliapan dkk., 2020). Pengoperasian dari pengolahan fisik-kimia cenderung sederhana dan reaksinya berlangsung secara lebih cepat jika dibandingkan dengan pengolahan biologi terutama untuk air dengan kemampuan biodegradabilitas yang rendah (Y. Wang dkk., 2019).

a. Bak Ekualisasi

Menurut Manderso (2018) pemerataan aliran atau ekualisasi menjadi penting untuk mendapatkan kinerja yang tepat dari instalasi pengolahan dengan menghindari beban kejutan (hidrolik dan organik) ke sistem. Karena kemungkinan variasi laju aliran yang diterima di instalasi pengolahan, mungkin ada penurunan kinerja instalasi pengolahan dari nilai optimal. Ekualisasi adalah proses pengendalian kecepatan dan komposisi aliran. Bak ekualisasi dirancang untuk menyediakan aliran influen yang konsisten ke proses hilir dengan mempertahankan fluktuasi aliran yang tinggi. Umumnya, ekualisasi disediakan untuk meredam variasi laju aliran sehingga laju aliran konstan atau hampir konstan tercapai di unit pengolahan. **Tabel 2.4** menunjukkan kriteria desain dari bak ekualisasi.

Proses ekualisasi membantu mengatasi masalah operasional yang disebabkan oleh variasi aliran dan meningkatkan kinerja instalasi pengolahan. Apabila terdapat beragam variasi dalam komposisi aliran dari waktu ke waktu, efisiensi pengolahan kinerja proses secara keseluruhan dapat menurun drastis. Untuk meredam variasi tersebut, disediakan bak ekualisasi di awal rangkaian pengolahan air. Beberapa manfaat dari adanya pemerataan aliran oleh bak ekualisasi adalah:

- 1) Ekualisasi meningkatkan efisiensi sedimentasi dengan meningkatkan waktu detensi hidrolis.
- 2) Efisiensi proses biologis dapat ditingkatkan karena karakteristik aliran yang seragam dan minimalisasi dampak beban kejutan dan racun selama pengoperasian.
- 3) Kontrol manual dan otomatis dari operasi yang bergantung pada laju aliran, seperti pemberian bahan kimia, desinfeksi, dan pemompaan lumpur, disederhanakan.
- 4) Kemudahan pengolahan air limbah ditingkatkan dan beberapa pengurangan BOD dan penghilangan bau disediakan jika aerasi digunakan untuk pencampuran di bak kualifikasi.
- 5) Tersedia titik balik untuk mendaur ulang aliran limbah terkonsentrasi, sehingga mengurangi beban kejutan bagi pemukiman utama atau kolam aerasi.
- 6) Rancangan fasilitas ekualisasi melibatkan tidak hanya ukuran bak ekualisasi, tetapi juga penyediaan strategi operasi untuk memastikan bahwa tujuan yang diinginkan terpenuhi.

Tabel 2.4 Kriteria Desain Bak Ekualisasi

Kriteria	Nilai	Satuan
Kemiringan	2:1–3:1	
Kedalaman air minimal	1,5–2	m
a) Aerasi tidak diperlukan pada bak ekualisasi yang diikuti dengan unit prasedimentasi dan memiliki waktu detensi kurang dari 2 jam. b) Untuk mencegah air limbah menjadi septik dan berbau, dilakukan aerasi dengan rata-rata $0,01–0,015 \text{ m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{menit}$. c) Pengadukan dengan kapasitas $0,004$ sampai $0,008 \text{ kW}/\text{m}^3$ diperlukan untuk mengolah air dengan konsentrasi <i>suspended solids</i> $210 \text{ mg}/\text{L}$.		

(Sumber: Metcalf & Eddy, Inc. dkk., 2003)

b. Kolam Stabilisasi

Kolam stabilisasi adalah badan air buatan untuk mengolah air limbah dengan mengandalkan proses simbiosis secara alami antara cahaya matahari, angin, dan mikroorganisme. Kolam stabilisasi

dapat beroperasi dengan fluktuasi konsentrasi influen yang signifikan serta memiliki kemampuan yang baik untuk menghilangkan senyawa organik, nitrogen, fosfor, dan organisme patogen (Rathnayake dkk., 2021). Selain itu, kelebihan lainnya dari unit pengolahan ini adalah rendahnya biaya modal konstruksi dan operasinya, pemeliharaan dan pengoperasiannya yang mudah, ketahanan benturannya yang tinggi, dan indah dalam segi estetika. Sementara kekurangan dari unit ini adalah membutuhkan lahan yang luas dan proses pengolahannya yang sangat dipengaruhi oleh iklim (Y. Wang dkk., 2019).

Sistem kolam stabilisasi merupakan bentuk paling sederhana dari pengolahan air limbah. Terdapat beberapa varian sistem kolam stabilisasi dengan tingkat kesederhanaan operasional dan kebutuhan lahan yang berbeda. Menurut Von Sperling (2015), terdapat kolam stabilisasi yang memiliki fungsi utama untuk menghilangkan bahan karbon. Kolam stabilisasi tersebut terdiri dari:

- 1) Kolam fakultatif
- 2) Kolam anaerobik diikuti dengan kolam fakultatif
- 3) Laguna aerasi fakultatif
- 4) Laguna aerasi campuran lengkap diikuti dengan kolam sedimentasi

Sementara itu, kolam maturasi yang juga merupakan kolam stabilisasi memiliki fungsi utama untuk menghilangkan organisme patogen. Secara umum, kolam stabilisasi sangat direkomendasikan untuk daerah beriklim hangat dan negara berkembang, karena aspek-aspek berikut:

- 1) Ketersediaan lahan yang cukup di sejumlah besar lokasi;
- 2) Iklim yang mendukung (suhu tinggi dan sinar matahari);
- 3) Pengoperasian unit yang sederhana;
- 4) Sedikit atau tidak ada peralatan khusus yang dibutuhkan.

c. Koagulasi Flokulasi

Proses koagulasi flokulasi merupakan proses yang banyak digunakan pada pengolahan air dan air limbah karena keefektifitasannya dalam menghilangkan bahan organik, padatan tersuspensi, kekeruhan, dan warna. Pada proses koagulasi, partikel berukuran halus yang stabil, tidak stabil, dan sukar mengendap, digumpalkan menjadi partikel berukuran besar dengan penambahan koagulan berupa senyawa kimia bermuatan positif divalen seperti aluminium sulfat (tawas) dan besi klorida. Dengan penambahan senyawa kimia bermuatan positif divalen, partikel koloid menjadi tidak stabil sehingga menciptakan bentuk senyawa gabungan yang netral (Bahrodin dkk., 2021).

Menurut Zakaria dkk. (2022), proses koagulasi-flokulasi dimulai dengan mendestabilisasi koloid melalui muatan netralisasi dan mentransfer partikel kecil tersuspensi menjadi agregat besar dengan membantu pembentukan atau penyerapan sebelum akhirnya mengendapkan flok. Proses netralisasi dan destabilisasi terjadi ketika muatan negatif koloid bertemu dengan ion logam positif dan saling menarik karena gaya elektrostatik. Reaksi ini akan memaksa partikel tersuspensi dan ion logam menggumpal sebagai mikroflok/makroflok dan dikeluarkan dari larutan sebagai lumpur.

Amirtharaja dan O'Melia (1999) dalam L. K. Wang dkk. (2004) membagi proses koagulasi menjadi tiga langkah yang berbeda dan berurutan, yakni: pembentukan koagulan, destabilisasi partikel, dan tabrakan antar partikel. Dua langkah pertama berlangsung di tangki pengadukan cepat (*rapid mixing*) atau koagulator. Tahap ketiga yakni tumbukan antar partikel merupakan proses yang lebih lambat dan dicapai dengan aliran fluida pada pengadukan lambat. Proses pengadukan menyebabkan aglomerasi partikel. Proses ini terjadi pada tangki flokulasi atau flokulator yang biasanya dirancang dengan beberapa kompartemen untuk meminimalkan arus pendek dan untuk memfasilitasi penggabungan zona input energi yang

berkurang dan gradien kecepatan yang meruncing/mengecil. Pengadukan untuk membangkitkan daya pada proses koagulasi flokulasi dapat dilakukan secara hidrolis, mekanis, penggunaan media berlubang, dan pneumatik.

Pengadukan cepat secara hidrolis dapat dilakukan melalui dua cara, yakni dengan terjunan dan pengadukan dalam pipa. Pada pengadukan cepat dengan menggunakan terjunan, pembubuhan koagulan dilakukan sebelum penerjunan air sehingga daya atau energi dari pengadukan pada hal ini didapatkan dari tingginya terjunan (Darmasetiawan, 2004). **Tabel 2.5** di bawah ini menunjukkan kriteria desain dari koagulator.

Tabel 2.5 Kriteria Desain Koagulator

Gradien (detik ⁻¹)	Td (detik)	G x Td
¹⁾ 700–1000	20–60	14.000–60.000
²⁾ 300–1000	5–60	5.000–18.000
³⁾ 700–1000	20–40	20.000–30.000
⁴⁾ 600–1000	10–60	10.000–36.000
⁵⁾ >750	1–5	

(Sumber: ¹⁾Masduqi & Assomadi, 2012; ²⁾Reynolds & Richards, 1996; ³⁾Darmasetiawan, 2004; ⁴⁾Peavy dkk.,1985; ⁵⁾Badan Standardisasi Nasional, 2008)

Sementara itu, untuk tahap flokulasi atau pengadukan lambat secara hidrolis dapat dilakukan melalui dua cara yakni, mengalirkan air pada media kerikil dan pasir atau melalui penghalang. Flokulator yang menerapkan prinsip pengadukan lambat melalui penghalang dibedakan menjadi *buffle channel horizontal*, *buffle channel vertical*, *buffle channel vertical* melingkar (*cyclone* atau *hexagonal*), pengadukan melalui plat berlubang, pengadukan dalam *cone* (flokultor *clarifier*), dan pengadukan dengan pulsator. **Tabel 2.6** di bawah ini menunjukkan kriteria desain dari flokulator.

Tabel 2.6 Kriteria Desain Flokulator

Keterangan	Gradien (detik ⁻¹)	Td (detik)	Tahap Flokulasi
	¹⁾ 20–70	600–1.200	

Keterangan	Gradien (detik ⁻¹)	Td (detik)	Tahap Flokulasi
Flokulator hidrolis	²⁾ 5–60	1.800–2.700	6–10
Flokulator mekanis sumbu horizontal dengan pedal	10–60	1.800–2.400	3–6
Flokulator mekanis sumbu vertikal dengan bilah	10–70	1.200–2.400	2–4
Flokulator <i>clarifier</i>	10–100	1.200–6.000	1

(Sumber: ¹⁾Darmasetiawan, 2004; ²⁾Badan Standardisasi Nasional, 2008)

Penentuan dosis optimum koagulan diperlukan untuk mengoptimalkan pengendapan asam humat dan untuk menghindari pembentukan lumpur yang berlebihan pada akhir proses. Koagulan yang bekerja dengan baik untuk pengolahan lindi yang mengandung zat humat, terutama lindi yang telah stabil adalah ferri klorida. Ketika ferri klorida digunakan, senyawa tersebut dapat membentuk kompleks dengan bahan organik. PH optimal untuk koagulasi oleh ferri klorida adalah sekitar 4,5 untuk konsentrasi 7,0 mmol Fe₃⁺ L⁻¹ (Khoo dkk., 2020).

Kekurangan dari pengolahan dengan proses koagulasi flokulasi adalah timbulnya lumpur kimia yang dihasilkan dari proses tersebut. Lumpur yang mengandung logam dapat terakumulasi dalam jumlah besar karena tingginya volume lindi yang dihasilkan dari TPA, terutama pada iklim tropis yang panas dan lembab sepanjang tahun. Oleh karena itu, penggunaan logam tambahan dari koagulan anorganik lebih baik dihindari jika koagulan alami dan biopolimer dapat bekerja dengan efektif pada proses pengolahan (Khoo dkk., 2020).

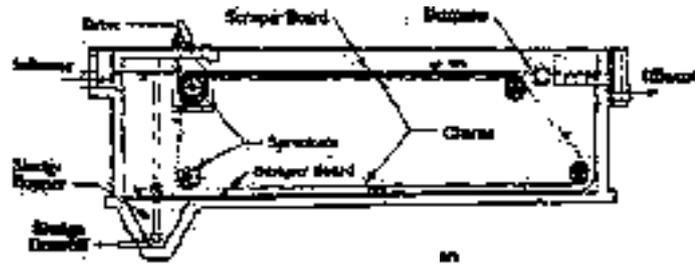
d. Sedimentasi

Sedimentasi adalah proses yang bertujuan untuk mengurangi padatan tersuspensi dengan cara menghilangkan material terapung dan padatan yang mudah mengendap akibat gaya gravitasi. Menurut Reynolds & Richards (1996), berdasarkan konsentrasi partikel dan

kemampuannya untuk berinteraksi, sedimentasi atau pengendapan diklasifikasikan menjadi empat jenis, yakni:

- 1) Pengendapan tipe I atau pengendapan bebas yang merupakan pengendapan dari partikel diskrit dan non flokulan yang tersuspensi,
- 2) Pengendapan tipe II yang merupakan pengendapan dari partikel yang membentuk *floc* selama proses pengendapan sehingga ukurannya bertambah dan kecepatan pengendapannya meningkat,
- 3) Pengendapan tipe III atau zona atau pengendapan terhalang (*hindered settling*) adalah pengendapan partikel dengan konsentrasi menengah di mana partikel-partikelnya sangat berdekatan sehingga partikel-partikel tersebut mengendap secara gravitasi,
- 4) Pengendapan tipe IV atau pengendapan akibat kompresi/tekanan. Pengendapan tipe IV terjadi karena adanya konsentrasi partikel yang tinggi sehingga partikel-partikel tersebut saling bersentuhan dan mengalami kompresi/pemampatan massa dan menyebabkannya mengendap. Pengendapan tipe IV terjadi pada bagian bawah unit pengendapan.

Terdapat tiga jenis bentuk bak sedimentasi, yakni *circular* 'bundar', *rectangular* 'persegi panjang', dan *square* 'kubus'. Satu unit berbentuk persegi panjang akan lebih mahal daripada satu unit berbentuk bundar dengan ukuran yang sama. Akan tetapi, jika diperlukan banyak tangki, unit dengan bentuk persegi panjang akan menjadi lebih ekonomis. (Reynolds & Richards, 1996). **Gambar 2.3** menunjukkan potongan membujur dari tangki sedimentasi berbentuk persegi panjang.



Gambar 2.3 Potongan Membujur Tangki Sedimentasi Persegi Panjang

(Sumber: Reynolds & Richards, 1996)

Biasanya, bak sedimentasi yang didahului bak flokulasi akan memiliki lebar yang sama dengan bak flokulasi tetapi dengan kedalaman yang berbeda. Kedua bak tersebut dipisahkan oleh sekat/pembatas dengan banyak *port*. Jika bak persegi panjang tidak berdampingan dengan flokulator, Influen didistribusikan secara merata ke dalam tangki melalui saluran yang didahului dengan sekat yang akan menyebarkan air ke zona *inlet* ‘saluran masuk’ yang lebih dalam. Untuk mengalirkan efluen menuju *outlet*, digunakan *weir* ‘bendung’. Namun, jika air tersebut adalah air yang telah mengalami proses koagulasi secara kimiawi, sebaiknya tidak digunakan *weir* karena adanya *weir* akan memungkinkan terjadinya turbulensi yang akan memecah sebagian besar flok halus yang telah terbentuk. Sebaiknya, bak prasedimentasi yang digunakan untuk mengolah air yang sebelumnya telah diolah secara kimia dilengkapi dengan lubang saluran pada lebar bak. Lubang saluran memiliki tingkat turbulensi yang tidak tinggi dan tidak akan memecah flok halus. Kriteria desain dari bak prasedimentasi persegi panjang yang biasanya digunakan untuk pengolahan primer dapat dilihat pada **Tabel 2.7** di bawah ini.

Tabel 2.7 Kriteria Desain Unit Sedimentasi Persegi Panjang

Parameter	Rentang Nilai	Satuan
Waktu detensi ¹⁾	1,5–2,5	Jam
<i>Weir loading</i> ¹⁾	125–500	m ³ /m.hari
Panjang ²⁾	10–100	m
Rasio panjang : lebar ²⁾	1–7,5	
Rasio panjang : kedalaman ²⁾	4,2– 25	

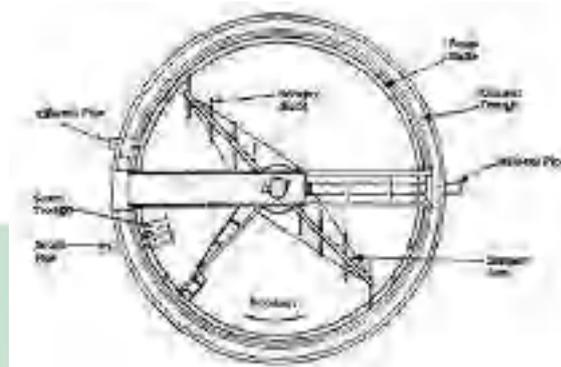
Kedalaman air ²⁾	2,5–5	m
Lebar ²⁾	3–24	m
<i>Slope</i> ²⁾	1–2	%
<i>Slope</i> ruang lumpur ²⁾	≥60	Derajat
<i>Overflow rate, average flow</i> ²⁾	30–50	m ³ /m ² .hari
<i>Overflow rate, peak flow</i> ²⁾	70–130	m ³ /m ² .hari

(Sumber: ¹⁾ Reynolds & Richards, 1996; ²⁾ Qasim, 1999)

Tangki sedimentasi persegi panjang dapat menggunakan sepasang rantai konveyor tak berujung yang berjalan di atas sproket yang terpasang pada poros atau sistem jembatan berjalan untuk mengumpulkan/mengikis lumpur yang ada pada zona pengendapan menuju ruang pengumpulan lumpur (*sludge hopper*) (Metcalf & Eddy, Inc. dkk., 2003). Akan tetapi, pengumpulan atau pembuangan secara mekanis seperti dengan penggunaan rantai pengikis dan sproket serta sistem vakum dinilai kurang praktis di sebagian besar negara berkembang. Dibandingkan dengan tipe mekanis, pembuangan lumpur secara manual lebih disukai karena tidak memerlukan peralatan tertentu serta suku cadangnya. Selain itu, upah tenaga kerja yang dibutuhkan untuk membuang lumpur dinilai tidak terlalu mahal. Meskipun pembuangan lumpur secara manual memerlukan penghentian bak secara berkala saat sedang dibersihkan, hal tersebut tidak menimbulkan masalah ketika tersedia dua bak atau lebih (Okun & Schulz, 1984).

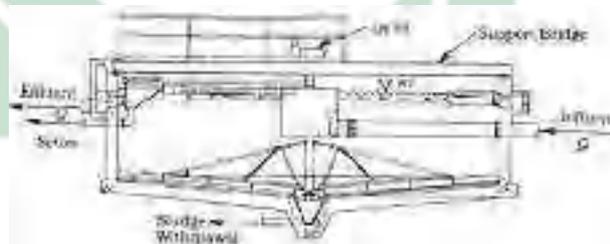
Sementara itu, pada tangki bundar atau melingkar, influen masuk melalui pusat tangki (umpan tengah) atau pinggiran tangki (umpan samping). Sementara efluen keluar dari tangki melalui saluran bendung (*weir*) di sekitar pinggiran tangki yang memberikan pemindahan aliran yang seragam. Tangki melingkar memiliki mekanisme pengumpulan lumpur dengan menggunakan *rakes* ‘penggaruk’. Pada permukaan tangki dilengkapi dengan *skimmer* untuk membuang kotoran yang mengapung pada permukaan. Lumpur biasanya dikumpulkan dalam ruang lumpur yang terdapat di dekat bagian tengah tangki. Tangki sirkular dipengaruhi oleh

ruang mati yang terdapat pada tangki, arus eddy, arus angin, dan arus termal (Reynolds & Richards, 1996). **Gambar 2.4** di bawah ini menunjukkan tampak atas dari tangki melingkar dengan pipa inlet melewati dinding. **Gambar 2.5** menunjukkan potongan dari tangki melingkar dengan pipa inlet melewati dinding.



Gambar 2.4 Tampak Atas Tangki Melingkar dengan Pipa *Inlet* Melewati Dinding

(Sumber: Reynolds & Richards, 1996)



Gambar 2.5 Potongan Tangki Melingkar dengan Pipa *Inlet* Melewati Dinding

(Sumber: Reynolds & Richards, 1996)

Kriteria desain dari tangki sedimentasi melingkar/bundar dapat dilihat pada **Tabel 2.8** di bawah ini.

Tabel 2.8 Kriteria Desain Unit Sedimentasi Melingkar/Sirkular

Parameter	Nilai	Satuan
Diameter	3–60	m
Kedalaman	3–6	m
<i>Slope</i> dasar tangki	40–100	mm/m diameter
<i>Overflow rate, average flow</i> ²⁾	30–50	m ³ /m ² .hari
<i>Overflow rate, peak flow</i> ²⁾	70–130	m ³ /m ² .hari

Parameter	Nilai	Satuan
Waktu detensi	1-2	jam

(Sumber: Qasim, 1999)

2.5.2 Pengolahan secara Biologis

Pengolahan secara biologis merupakan metode pengolahan lindi yang utama. Pengolahan ini biasanya digunakan untuk menghilangkan nutrisi (misalnya amonia) dan senyawa organik. Kekurangan dari pengolahan secara biologis adalah tidak dapat secara efisien menghilangkan logam berat dan partikel yang tidak dapat diuraikan (Miao dkk., 2019). Sedangkan keunggulan dari pengolahan secara biologis adalah efisiensinya yang tinggi, dan polusi sekundernya relatif kecil. Teknologi utama dari pengolahan secara biologis adalah pengolahan aerobik, anaerobik, dan gabungan/kombinasi aerobik dan anaerobik (Y. Wang dkk., 2019). Pengolahan biologis dapat diklasifikasikan menjadi proses dengan sistem kolam atau lagoon, proses dengan biakan melekat (*attached culture*), dan proses dengan biakan tersuspensi (*suspended culture*) (Said, 2000). Selain itu, pengolahan secara biologi juga dapat diklasifikasikan berdasarkan sistem media pertumbuhan mikroorganisme yang dipakai. Sistem tersebut meliputi sistem tersuspensi dan terlekat. Pada pengolahan dengan sistem terlekat, mikroorganisme tumbuh pada permukaan media seperti batu atau *bio ball* pada pengolahan dengan unit *trickling filter*, cakram pada pengolahan *rotating biological contactor*, dan media sarang tawon pada unit filter aerobik/anaerobik. Sementara itu, pada sistem tersuspensi, mikroorganisme yang dimanfaatkan akan tumbuh dan tersuspensi di dalam air limbah. Contoh unit pengolahan yang menggunakan sistem tersuspensi adalah *anaerobic baffled reactor* (ABR), kolam aerasi, dan lumpur aktif (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Cipta Karya Direktorat Pengembangan Penyehatan Lingkungan Permukiman, 2018b).

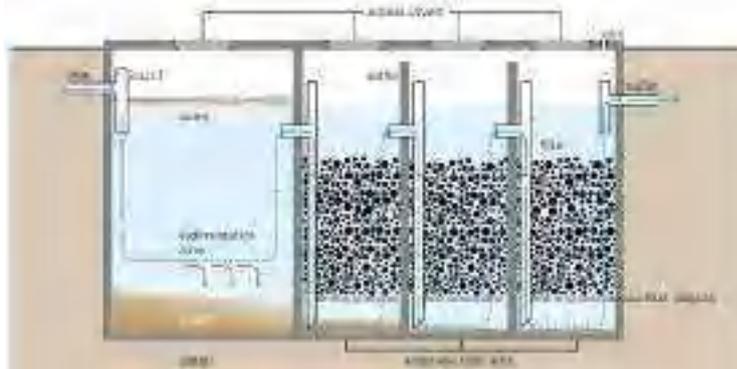
a. Biofilter tercelup

Biofilter tercelup merupakan salah satu pengolahan yang menerapkan proses film mikrobiologis yang mana dapat dilakukan dalam kondisi anaerobik, aerobik, atau gabungan/kombinasi antara anaerobik dan aerobik. Pada proses aerobik, dibutuhkan oksigen terlarut pada reaktor pengolahan selama proses berlangsung. Pada proses pengolahan secara anaerobik, tidak diperlukan adanya oksigen pada reaktor pengolahan. Sementara itu, pada proses kombinasi anaerob-aerob, terdapat gabungan antara proses pengolahan secara anaerobik dan aerobik. Proses kombinasi biasanya digunakan dengan tujuan menghilangkan nitrogen yang terkandung dalam air limbah. Pada kondisi aerobik tersebut nitrogen ammonium pada air limbah akan diubah menjadi nitrat ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_3$) dan proses ini disebut nitrifikasi. Sementara itu, pada kondisi anaerobik, proses denitrifikasi terjadi dengan diubahnya nitrat menjadi gas nitrogen ($\text{NO}_3 \rightarrow \text{N}_2$) (Said, 2000).

Pada reaktor biofilter, media filter tercelup atau berada di bawah permukaan air. Bahan organik yang terdapat pada air limbah akan didegradasi oleh mikroorganisme yang melekat pada media filter tersebut dan membentuk film/lendir. Media biofilter yang digunakan pada proses pengolahan ini dapat berupa bahan material anorganik atau organik. Pada biofilm/biofilter dengan prinsip aerobik, oksigen atau aerasi diperlukan untuk melakukan proses pengolahan air limbah di dalam reaktor. Oksigen tersebut disuplai menggunakan pompa sirkulasi atau blower udara (Said, 2000).

Film yang terbentuk pada media biofilter dihasilkan dari proses fermentasi bahan organik pada air limbah oleh enzim bakteri. Film yang terbentuk tersebut dapat menebal sehingga menutupi celah media filter dan menghambat aliran air limbah. Oleh karena itu, perlu dilakukan *backwash* atau pencucian media secara periodik (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Cipta Karya Direktorat Pengembangan Kesehatan

Lingkungan Permukiman, 2018b). **Gambar 2.6** menunjukkan unit filter anaerobik.



Gambar 2.6 Unit Filter Anaerobik

(Sumber: Tilley dkk., 2014)

Kelebihan dari unit pengolahan ini adalah menghemat waktu pada periode *startup* karena inokulum lebih awet. Sementara itu, kekurangan dari unit pengolahan ini adalah mudah rusaknya filter jika pada filter tersebut terjadi sedimentasi padatan *nonbiodegradable* yang dikandung lindi dalam jumlah besar. Oleh karena itu, air limbah yang mengandung padatan tinggi tidak dapat diolah dengan sempurna menggunakan filter anaerobik (Chelliapan dkk., 2020). **Tabel 2.9** di bawah menunjukkan kriteria desain dari unit biofilter anaerobik dan aerobik.

Tabel 2.9 Kriteria Desain Unit Biofilter Anaerobik dan Aerobik

Parameter	Nilai	Satuan
Biofilter Anaerobik		
Waktu retensi hidraulik ¹⁾	12–96	jam
Luas permukaan media ¹⁾	90–300	m ² /m ³
Kedalaman media ¹⁾	0,9–1,5	m
Tinggi air di atas media ¹⁾	≥0,3	m
Jarak plat penyangga media dan dasar bak ¹⁾	0,5–0,6	m
<i>Organic loading</i> ²⁾	4–5	kg COD/m ³ .hari
Beban organik ²⁾	0,2–15	kg COD/m ³ .hari
Biofilter Aerobik		
Waktu tinggal rata-rata ²⁾	6–8	jam
Tinggi bed media filter ²⁾	0,9–1,5	m
Tinggi air minimum di atas media ²⁾	20	cm

Parameter	Nilai	Satuan
Beban BOD per satuan volume media	0,5–4	kg.BOD/m ³ .hari

(Sumber: ¹Tilley dkk., 2014; ² Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Cipta Karya Direktorat Pengembangan Penyehatan Lingkungan Permukiman, 2018)

b. Trickling Filter

Trickling filter terdiri dari *bed* dangkal yang diisi dengan batu pecah atau media sintesis. Air limbah dialirkan ke permukaan unit melalui sistem distribusi putar otomatis atau mekanis. Bahan organik yang terkandung pada air limbah dihilangkan oleh lapisan mikroorganisme (lapisan lendir) yang tumbuh di atas media. Selain itu, untuk mempertahankan beban hidraulik yang seragam dan untuk mengencerkan influen, sebagian aliran didaur ulang. Pada unit ini, juga terdapat sistem *underdrain* yang mengumpulkan cairan yang terlepas dari media. Berdasarkan beban organik dan hidrolis, *trickling filter* diklasifikasikan menjadi *low-rate* ‘tingkat rendah’, *intermediate-rate* ‘tingkat sedang’, *high-rate* ‘tingkat tinggi’, dan *super-rate* ‘tingkat super tinggi’ (saringan kasar). Dua tahap pengolahan dengan *trickling filter* (dua *trickling filter* disusun secara seri) seringkali digunakan untuk mengolah limbah berkekuatan tinggi (Qasim, 1999a).

Trickling filter bekerja dalam kondisi aerobik sehingga bakteri yang diimobilisasi pada media filter harus memiliki akses yang sama dengan udara dan air limbah. Oleh karena itu, dosis air limbah tertentu dibebankan dalam interval untuk memberikan waktu bagi udara untuk masuk ke dalam reaktor selama jeda yang ada. Selanjutnya, air harus didistribusikan secara merata ke seluruh permukaan untuk memanfaatkan massa filter secara penuh dan efisien (Sasse, 1998). **Tabel 2.10** berikut menunjukkan kriteria desain dari unit *Trickling Filter*.

Tabel 2.10 Kriteria Desain Unit *Trickling Filter*

Parameter	Sistem				
	Tingkat Rendah	Tingkat Sedang	Tingkat Tinggi	Tingkat Sangat Tinggi	Dua Sisi
Rasio sirkulasi	0	0–1	1–2,5	1–4	0,5–3
Kedalaman (m)	1,5–3	1,25–2,5	1–2	4,5–12	2–3
<i>Hydraulic loading</i> (m ³ /m ² .hari)	1–4	4–10	10–40	40–200	10–40
<i>BOD₅ loading</i> (kg/m ³ .hari)	0,08–0,32	0,24–0,48	0,32–1	0,8–6	1–2
Media	Batu, agregat kasar	Batu, agregat kasar	Batu, agregat kasar, sintesis	Sintesis	Batu, agregat kasar, sintesis
Power (kW/10 ³ . m ³)	2–4	2–8	6–10	10–20	6–10
Efisiensi penyisihan BOD ₅ (%)	74–80	80–85	80–85	60–80	85–95

(Sumber: Qasim, 1999)

c. Anaerobic Baffled Reactor (ABR)

Anaerobic baffled reactor (ABR) atau yang disebut juga sebagai *baffled septic tank* merupakan unit pengolahan air limbah yang cocok digunakan mengolah air limbah dengan rasio COD/BOD yang rendah dan persentase padatan tersuspensi yang tinggi serta sulit untuk mengendap. Kinerja ABR dalam menyisihkan polutan berkisar antara 65% - 90% untuk penyisihan COD dan 70% - 95% untuk penyisihan BOD (Sasse, 1998). Konsep teknis dari pengolahan dengan menggunakan ABR didasarkan pada prinsip *anaerobic digestion* ‘pencernaan anaerobik’ oleh *sludge blankets* yang terdiri dari bakteri-bakteri yang tersuspensi oleh tekanan air limbah di baffle *upflow* (UPM Umwelt-Projekt-Management GmbH, 2021a).

ABR terdiri beberapa kompartemen yang bertujuan untuk meningkatkan suspensi lumpur dan mengoptimalkan tahap pengolahan secara anaerobik. Kompartemen-kompartemen tersebut

disekat atau dipisahkan dengan *baffle* yang berfungsi untuk meningkatkan waktu kontak antara limbah dengan biomassa aktif pada *sludge blanket* dengan membuat aliran secara naik dan turun (UPM Umwelt-Projekt-Management GmbH, 2021a). Oleh karena itu, menurut Göçer dkk. (2021), ABR dapat memberikan kondisi lingkungan yang menguntungkan untuk pengembangan populasi bakteri atau mikroba yang berbeda di setiap kompartemen karena terdapat *baffle* dalam strukturnya. **Tabel 2.11** menunjukkan kriteria desain dari unit *anaerobic baffled reactor* (ABR).

Tabel 2.11 Kriteria Desain Unit ABR

Parameter	Nilai	Satuan
Rasio panjang : lebar ¹⁾	2:1–1:3	
Panjang ¹⁾	>50–60	% dari kedalaman air
Upflow velocity ²⁾	< 0,6	m/jam
Jumlah kompartemen ²⁾	3–6	ruang
Waktu retensi hidraulik	12–96	jam

(Sumber: ¹⁾Sasse, 1998; ²⁾Tilley dkk., 2014)

d. Kolam Aerasi

Kolam aerasi (*aerated lagoon*) merupakan teknologi yang paling efektif untuk dijadikan unit *pretreatment* pada pengolahan lindi. Kolam aerasi adalah kolam penampung dan/atau pengolahan yang mempercepat proses penguraian biologis dari polutan organik dengan cara merangsang pertumbuhan dan aktivitas bakteri pengurai polutan organik.

Pada pengolahan ini, oksigen dimasukkan digunakan dalam proses dengan cara memompakannya ke dasar kolam atau dengan mengangkat air limbah/lindi pada bagian lebih dalam ke permukaan kolam. Namun, ada banyak aspek penting lainnya dalam penggunaan teknologi ini, seperti laju pembuangan lumpur yang perlu diperhatikan dalam desain operasional sistem. Selain itu, kekurangan dari teknologi ini adalah lamanya waktu retensi untuk proses pengolahan, yakni sekitar 50–100 hari. Akan tetapi, teknologi

ini memiliki kelebihan berupa rendahnya biaya untuk pemeliharaan dan pengoperasian (Yu, 2007).

e. *Constructed Wetland*

Constructed wetland ‘lahan basah buatan’ adalah sistem pengolahan air limbah buatan yang terdiri dari kolam atau saluran dangkal (biasanya kurang dari 1 m) yang telah ditanami tanaman air, dan yang mengandalkan proses mikroba, biologis, fisik, dan kimia alami untuk mengolah air limbah (United States Environmental Protection Agency, 1999). Umumnya, sistem lahan basah buatan diklasifikasikan menjadi dua tipe: *horizontal flow system* (HFS) ‘sistem aliran horizontal’ dan *vertical flow system* (VFS) ‘sistem aliran vertikal’. Pada HFS, air limbah dialirkan pada inlet dan mengalir secara horizontal melalui *bed* menuju *outlet*. HFS umumnya terdiri dari dua tipe, yakni: sistem *surface flow* (SF) dan *sub-surface flow* (SSF) (Sim, 2003). Sementara, pada VFS, air limbah dimasukkan ke dalam CW dari atas permukaan menggunakan sistem dosis mekanis. Air mengalir secara vertikal ke bawah melalui matriks filter ke dasar CW di mana air tersebut dikumpulkan dalam pipa drainase (Tilley dkk., 2014).

Sistem *surface flow* (SF) atau *free-water surface* (SF) digunakan terutama untuk pengolahan air limbah kota dengan aliran air limbah yang besar sebagai unit pemrosesan/pemaksimalan pengolahan. Lahan basah jenis ini sangat mirip dengan lahan basah alami karena mengandung tanaman air yang berakar pada lapisan tanah di dasar dan air mengalir melalui tanaman yang ada. Pada sistem *sub-surface flow* (SSF) atau *microbial rock plant filter* atau *vegetated submerged bed*, air mengalir dari satu ujung ke ujung lainnya melalui substrat permeabel yang terbuat dari campuran tanah dan kerikil atau batu pecah. Substrat akan mendukung perakaran vegetasi. Kedalaman media pada SSF umumnya sekitar 0,6 m dan bagian bawahnya berupa lapisan tanah liat untuk mencegah rembesan. Ukuran media untuk sebagian besar substrat kerikil berkisar antara 5 hingga 230

mm dengan tipikal 13 hingga 76 mm. Ukuran efektif media untuk *constructed wetland* tipe *sub surface flow* dapat dilihat pada **Tabel 2.12**. Air limbah mengalir secara gravitasi secara horizontal melalui zona akar vegetasi sekitar 100-150 mm di bawah permukaan kerikil (Sim, 2003).

Tabel 2.12 Karakteristik Tipikal Media untuk *Subsurface Flow CW*

Tipe	Ukuran Efektif (mm)	Porositas (%)	Konduktivitas Hidraulik (m ³ /m ² /hari)
<i>Coarse sand</i>	2	32	1.000
<i>Gravelly sand</i>	8	35	5.000
<i>Fine gravel</i>	16	38	7.500
<i>Medium gravel</i>	32	40	10.000
<i>Coarse rock</i>	128	45	100.000

(Sumber: U.S. EPA, 1993)

Constructed wetland (CW) dianggap sebagai teknologi yang ramah lingkungan untuk pengolahan lindi TPA. Faktor yang memengaruhi CW dalam menghilangkan kontaminan dari lindi di antaranya adalah jenis CW, tipe vegetasi, suhu, dan waktu retensi hidrolik, dan variabilitas kontaminan (Bakhshoodeh dkk., 2020). Mekanisme penghilangan polutan pada air limbah yang digunakan pada *constructed wetland* melibatkan kombinasi proses, yakni proses secara fisik seperti sedimentasi dan filtrasi, proses kimiawi seperti adsorpsi dan presipitasi, dan operasi biologis seperti metabolisme bakteri dan tanaman, adsorpsi oleh tanaman, dan kematian secara alami (Khazaleh & Gopalan, 2018).

Lahan basah buatan untuk mengolah lindi TPA menunjukkan efisiensi penyisihan BOD₅ sebesar 60–80%, COD sebesar 20–60%, amonia-N sebesar 60–75%, TSS sebesar 50–65%, TP sebesar 55–80%, dan logam berat sebesar 15-95%. Tanaman *Phragmites* sp. menjadi spesies yang paling berhasil dalam menghilangkan logam (Bakhshoodeh dkk., 2020).

f. Nitrifikasi

Nitrifikasi terdiri dari dua proses oksidasi biologis berurutan. Proses pertama adalah oksidasi NH_4^+ menjadi NO_2^- , yang merupakan langkah pembatas dan dilakukan oleh AOB. Reaksi ini dikatalisis oleh amonia monooksigenase (AMO) dan hidrosilamin oksidoreduktase (HAO), bersama dengan pembentukan hidrosilamin (NH_2OH) sebagai produk *intermediate*. NO_2^- , yang diproduksi pada langkah pertama dengan cepat diubah menjadi NO_3^- pada langkah kedua yang dilakukan oleh *nitrite oxidizing bacteria* (NOB), dengan adanya molekul oksigen. Proses tersebut dikatalisis oleh nitrit oksidoreduktase (NXR) dan sistem pengoksidasi nitrit, yang merupakan enzim oksidasi satu langkah yang ditemukan di *Nitrobacter* dan di genera *Nitrococcus*, *Nitrospina* dan *Nitrospira*.

Nitrifikasi parsial melalui nitrit memberikan beberapa keuntungan signifikan dalam pengolahan air limbah biologis dibandingkan dengan nitrifikasi konvensional, yakni: i) mengurangi 40% kebutuhan oksigen kimia (COD) dan meningkatkan 1,5–2 kali lipat laju reduksi nitrit pada tahap denitrifikasi berikutnya, ii) menghemat konsumsi oksigen 25%, mengurangi 300% biomassa, dan 20% emisi CO_2 selama denitrifikasi. Ketika nitrifikasi parsial digabungkan dengan anammox, amonium sebagian teroksidasi menjadi nitrit secara aerobik, dan amonium yang tersisa kemudian bereaksi dengan nitrit untuk membentuk gas nitrogen secara anaerobik. Hal tersebut memberikan beberapa keuntungan, seperti tidak memerlukan sumber karbon eksternal, mengurangi 80% produksi lumpur, memerlukan lebih sedikit energi, dan mengurangi 60% kebutuhan oksigen dibandingkan dengan nitrifikasi/denitrifikasi konvensional (Rahimi dkk., 2020).

g. Denitrifikasi

Denitrifikasi adalah proses penghilangan total nitrat menjadi gas nitrogen yang tidak berbahaya sebagai produk akhir. Hal-hal yang

harus diperhatikan pada denitrifikasi adalah kondisi anoksik yang ketat, sumber karbon, dan pasca pengolahan. Kekurangan dari pengolahan dengan menggunakan metode denitrifikasi adalah dihasilkannya kekeruhan sebagai akibat dari biomassa yang berlebihan dan sisa sumber karbon. Hal tersebut mengisyaratkan perlunya pengolahan lebih setelah pengolahan ini (Rahimi dkk., 2020).

h. Anammox

Bakteri anammox mengoksidasi amonium menggunakan nitrit sebagai akseptor elektron (Rahimi dkk., 2020). Pengolahan lindi dengan teknologi anammox memiliki beberapa keunggulan, yakni: proses anammox mengurangi konsumsi oksigen sebesar 60% karena hanya sekitar 50% amonia dari influen yang perlu dioksidasi menjadi nitrit, bukan nitrat; proses ini menghemat 100% sumber karbon yang digunakan untuk menghilangkan nitrogen karena anammox merupakan proses autotrofik yang tidak memerlukan bahan organik; dan pertumbuhan bakteri anammox yang lambat secara signifikan mengurangi produksi lumpur yang pada akhirnya juga mengurangi biaya pembuangan lumpur. Sementara itu, kekurangan dari anammox adalah prosesnya yang membutuhkan waktu akumulasi dan SRT yang lama (Miao dkk., 2019).

2.6 *Analytical Hierarchy Process*

Alat bantu pengambil keputusan berupa sistem pendukung keputusan (SPK) diperlukan untuk memperluas kapabilitas dari pengambil keputusan. *Analytical Hierarchy Process* (AHP) merupakan salah satu metode dalam sistem pendukung keputusan yang dikembangkan oleh Thomas L. Saaty. Pada metode ini, masalah multi kriteria atau multi faktor yang kompleks akan diuraikan menjadi kelompok-kelompok yang selanjutnya akan disusun menjadi suatu hirarki sehingga suatu permasalahan dan penyelesaiannya tampak lebih sistematis dan terstruktur (Dwijayadi dkk., 2018).

Menurut Febriyanti dkk. (2019), langkah-langkah pengambilan keputusan dengan metode AHP adalah sebagai berikut:

a. Menjabarkan masalah serta menentukan solusinya

Dalam tahap ini, masalah diuraikan secara detail, jelas, dan mudah dipahami. Kemudian, disajikan solusi yang kemungkinan cocok untuk memecahkan masalah tersebut.

b. Menentukan struktur hierarki

Pembuatan struktur hierarki diawali dengan penyusunan tujuan utama yang kemudian dilanjutkan dengan penyusunan level hierarki yang lebih rendah yakni berupa kriteria-kriteria yang digunakan untuk pertimbangan alternatif solusi. Selain itu, pada struktur hierarki juga ditentukan alternatif yang membantu pemecahan masalah itu sendiri.

c. Menyusun matriks perbandingan berpasangan

Matriks disusun secara sederhana namun memiliki kedudukan yang kuat untuk dijadikan kerangka konstan yang berisi informasi-informasi yang dibutuhkan. Informasi-informasi tersebut hendaknya memuat perbandingan yang dapat digunakan untuk menganalisis kepekaan prioritas secara menyeluruh. Pendekatan melalui matriks memuat aspek mendominasi dan didominasi untuk menentukan prioritas. *Judgement* dari pengambil keputusan berupa penilaian tingkat kepentingan untuk setiap elemen-elemen digunakan untuk mempertimbangkan alternatif dan kriteria yang ada.

d. Melakukan pemeriksaan terhadap konsistensi hierarki

Rasio konsistensi AHP diukur dengan indeks konsistensi. Konsistensi AHP diharapkan mendekati sempurna agar keputusan yang diambil dapat mendekati valid. Rasio konsistensi yang diharapkan adalah $\leq 10\%$. Rasio konsistensi dapat dihitung dengan tahapan-tahapan berikut,

1) Menentukan indeks konsistensi (CI)

Indeks konsistensi dihitung dengan menggunakan persamaan berikut,

$$CI = (\lambda_{maks} - n) / (n - 1) \quad \text{Persamaan 2.1}$$

Keterangan:

λ_{maks} = Jumlah hasil kali dari perkalian kolom dengan eigen faktor utama

n = Jumlah kriteria yang disajikan

2) Menentukan rasio konsistensi (CR)

Rasio konsistensi didapatkan dengan menggunakan persamaan berikut,

$$CR = CI / RI \quad \text{Persamaan 2.2}$$

Keterangan:

RI = Nilai indeks random sesuai dengan ordo matriks. Nilai RI dapat dilihat pada **Tabel 2.13**.

Tabel 2.13 Nilai Indeks Random

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,51

(Sumber: Febriyanti dkk., 2019)

3) Mengecek konsistensi hierarki

Hasil perhitungan dapat dinyatakan benar apabila rasio konsistensi bernilai $\leq 10\%$. Perhitungan harus diulang apabila rasio konsistensi bernilai kurang dari 10%.

2.7 *Bill of Quantity* dan Rencana Anggaran Biaya

Menurut International Federation of Consulting Engineers, *bills of quantities* (BOQ) terdiri dari daftar item pekerjaan yang dijelaskan secara singkat. BOQ menyajikan pemberian harga pada pekerjaan yang dilakukan. Item pekerjaan didefinisikan secara rinci oleh aturan dalam metode pengukuran atau perhitungan (Randeniya dkk., 2018).

Menurut Seeley & Winfield (1999) *bills of quantity* (BOQ) adalah dokumen yang terdiri dari jadwal item pekerjaan yang harus dilakukan berdasarkan kontrak dengan jumlah yang dimasukkan untuk setiap item yang disiapkan berdasarkan Metode Standar Pengukuran Bangunan Bekerja. Pada pengerjaan suatu proyek konstruksi, BOQ dikerjakan oleh *quantity surveyor* atas nama *klien* dengan menggunakan gambar dan spesifikasi terperinci yang dibuat oleh arsitek. BOQ, gambar dan spesifikasi kemudian dikirim ke kontraktor untuk menentukan harga proyek. Setelah itu, kontraktor mengalokasikan harga satuan untuk setiap item di BOQ. Pada tahap terakhir,

ketika semua item dijumlahkan akan menghasilkan total rencana anggaran biaya untuk proyek tersebut.

2.8 Standar Operasional Prosedur

Standard Operating Procedure ‘Standar Operasional Prosedur’ (SOP) adalah seperangkat instruksi tertulis yang mendokumentasikan kegiatan rutin atau berulang yang diikuti oleh suatu organisasi (U.S. EPA, 2007). Sementara itu, menurut Singh dan John (2019), SOP adalah seperangkat instruksi tertulis yang terinci dan mendokumentasikan aktivitas rutin atau berulang untuk mencapai keseragaman kinerja fungsi tertentu. SOP membahas mengenai siapa, apa, di mana dan kapan suatu kegiatan harus dilakukan.

Menurut U.S. EPA (2007), SOP dimaksudkan untuk menjadi spesifik untuk organisasi atau fasilitas yang aktivitasnya dijelaskan dan membantu organisasi tersebut untuk memelihara proses kendali mutu dan penjaminan mutu dan memastikan kepatuhan terhadap peraturan pemerintah. Manfaat dari dibuatnya SOP sendiri di antaranya:

- a. Meminimalkan variasi dan meningkatkan kualitas melalui penerapan proses atau prosedur yang konsisten di dalam organisasi.
- b. SOP dapat menunjukkan kepatuhan terhadap persyaratan organisasi dan pemerintah dan dapat digunakan sebagai bagian dari program pelatihan personel, karena harus memberikan instruksi kerja yang terperinci.
- c. Meminimalkan peluang untuk miskomunikasi dan dapat mengatasi masalah keamanan.
- d. Ketika data historis sedang dievaluasi untuk penggunaan saat ini, SOP juga dapat bermanfaat untuk merekonstruksi kegiatan proyek ketika tidak ada referensi lain yang tersedia.
- e. Dapat digunakan sebagai daftar periksa oleh inspektur saat mengaudit prosedur.

Dari hal-hal yang telah disebutkan di atas, dapat disimpulkan bahwa manfaat dari SOP adalah mengurangi upaya kerja, seiring dengan peningkatan komparabilitas, kredibilitas, dan pertahanan hukum.

2.9 Integrasi Keislaman

وَلَا تُفْسِدُوا فِي الْأَرْضِ بَعْدَ إِصْلَاحِهَا وَادْعُوهُ خَوْفًا وَطَمَعًا إِنَّ رَحْمَتَ اللَّهِ قَرِيبٌ مِّنَ الْمُحْسِنِينَ ٥٦

وَهُوَ الَّذِي يُرْسِلُ الرِّيحَ بُشْرًا بَيْنَ يَدَيْ رَحْمَتِهِ حَتَّىٰ إِذَا أَقَلَّتْ سَحَابًا ثِقَالًا سُفِّهُهُ لِبَدٍ مَّيِّتٍ فَانزَلْنَا بِهِ الْمَاءَ فَأَخْرَجْنَا بِهِ مِنْ كُلِّ الثَّمَرَاتِ كَذَٰلِكَ نُخْرِجُ الْمَوْتَىٰ لَعَلَّكُمْ تَشْكُرُونَ ٥٧

وَالْبَدُ الطَّيِّبُ يَخْرُجُ نَبَاتُهُ بِإِذْنِ رَبِّهِ وَالَّذِي خَبُثَ لَا يَخْرُجُ إِلَّا نَكِدًا كَذَٰلِكَ نُصَرِّفُ الْآيَاتِ لِقَوْمٍ يَشْكُرُونَ ٥٨

Artinya: “(56) Dan janganlah kamu berbuat kerusakan di bumi setelah (diciptakan) dengan baik. Berdoalah kepada-Nya dengan rasa takut dan penuh harap. Sesungguhnya rahmat Allah sangat dekat kepada orang yang berbuat kebaikan. (57) Dialah yang meniupkan angin sebagai pembawa kabar gembira mendahului kedatangan rahmat-Nya (hujan) sehingga apabila angin itu membawa awan mendung, Kami halau ke suatu daerah yang tandus, lalu Kami turunkan hujan di daerah itu. Kemudian kami tumbuhkan dengan hujan itu berbagai macam buah-buahan. Seperti itulah Kami membangkitkan orang yang telah mati, mudah-mudahan kamu mengambil pelajaran. (58) Dan tanah yang baik, tanaman-tanamannya tumbuh subur dengan izin Tuhan; dan tanah yang buruk, tanaman-tanamannya tumbuh merana. Demikianlah Kami menjelaskan berulang-ulang tanda-tanda (kebesaran Kami) bagi orang-orang yang bersyukur.” (Q.S. al-A’raf ayat 56–58).

Dari surat al-A’raf ayat 56, Allah melarang manusia untuk berbuat kerusakan atau merusak bumi. Hal tersebut berkaitan dengan usaha mengolah lindi TPA agar tidak merusak lingkungan. Pengolahan lindi tersebut dapat dilakukan dengan salah satu caranya adalah membuat instalasi pengolahan lindi. Kemudian, pada ayat ke-57 disebutkan tentang turunnya hujan sebagai rahmat. Akan tetapi, sayangnya lindi sebagai salah satu akibat dari bersentuhannya sampah dengan air hujan dapat menyebabkan pencemaran lingkungan padahal pada surat al-A’raf ayat ke-57 tersebut dijelaskan bahwasanya hujan memiliki beberapa fungsi yang salah satunya adalah

menumbuhkan tanaman. Selain itu, lindi yang meresap ke dalam tanah dapat menyebabkan pencemaran tanah. Padahal pada ayat ke-58 surat al-A'raf dijelaskan bahwasanya tanah yang baik (tidak tercemar) menjadi salah satu faktor tumbuhan dapat tumbuh dengan baik. Maka dari itu, pencemaran oleh lindi harus diupayakan untuk diatasi.

2.9 Penelitian Terdahulu

Penelitian serupa atau yang berkenaan dengan perencanaan instalasi lindi telah dilakukan pula sebelumnya, di antaranya adalah penelitian-penelitian yang terdapat pada **Tabel 2.14** di bawah ini.

Tabel 2.14 Penelitian Terdahulu Terkait Instalasi Pengolahan Lindi

No.	Nama (Tahun)	Judul	Hasil Penelitian
1.	Elvira Apriana, Intan Supraba, dan Won Kim (2023)	Constructed Wetland at Galuga Landfill for Leachate Treatment: a Sustainable Approach	Lahan basah buatan (<i>constructed wetland</i>) efektif menghilangkan polutan, terutama untuk parameter BOD, COD, nitrat, dan fosfat. Penurunan konsentrasi BOD, COD, nitrat, dan fosfat pada <i>constructed wetland</i> konvensional dapat mencapai 87,3%, 87,7%, 50%, dan 97,4%. Penurunan konsentrasi BOD, COD, nitrat, dan fosfat pada lahan basah buatan yang memanfaatkan limbah padat dapat mencapai 77,1%, 76,9%, 98%, dan 98,9%. Namun <i>constructed wetland</i> tidak efektif untuk menghilangkan TSS. Partikel media yang terbawa air menyebabkan peningkatan TSS dan kekeruhan. Oleh karena itu, tangki sedimentasi diperlukan pasca-pengolahan dengan <i>constructed wetland</i> .
2.	Ye Li, Fan Tang, dan Bing Xie (2021)	Advances in Biological Nitrogen Removal of Landfill Leachate	Pengolahan dengan proses anammox memiliki efisiensi yang tinggi untuk mengolah lindi yang dihasilkan dari TPA yang berusia lebih dari 5 tahun—biasanya memiliki rasio biodegradabilitas sangat rendah (BOD_5/COD) yakni kurang dari 0,3—karena dapat mengatasi masalah kekurangan sumber karbon dengan lebih baik dalam proses denitrifikasi. Sementara itu, untuk TPA dengan umur kurang dari 5 tahun yang biasanya menghasilkan lindi muda dengan rasio biodegradabilitas tinggi (BOD_5/COD) lebih dari 0,3 dan konsentrasi COD lebih dari 10.000 mg/L, pengolahan dengan sel bahan bakar mikroba atau konstruksi lahan basah lebih direkomendasikan untuk menghilangkan nitrogen dalam lindi melalui transformasi mikroba dan transformasi ekologi. Teknologi yang dikombinasikan dengan ekologi merupakan metode penyisihan nitrogen yang efisien di mana sistem gabungan alga-bakteri

No.	Nama (Tahun)	Judul	Hasil Penelitian
			memiliki efisiensi penyisihan nitrogen amonia sebesar 95%.
3.	Naef A. A. Qasem, Ramy H. Mohammed, dan Dahiru U. Lawal (2021)	Removal of Heavy Metal Ions from Wastewater: a Comprehensive and Critical Review	Pemilihan teknik yang paling tepat untuk menghilangkan ion berat dari air limbah bergantung pada banyak faktor kunci, termasuk biaya operasi, konsentrasi awal ion logam, dampak lingkungan, nilai pH, bahan kimia yang ditambahkan, efisiensi penyisihan, dan kelayakan ekonomi. Metode pengolahan air limbah di sini diklasifikasikan menjadi adsorpsi, pengolahan membran, pengolahan kimia, pengolahan elektrik, dan fotokatalisis. Adsorpsi adalah metode yang paling menjanjikan dalam menghilangkan ion logam berat dari air limbah karena operasinya sederhana, pengaplikasiannya kuat, tingkat penyisihannya tinggi, dan biaya penggunaan kembalinya rendah. Dibandingkan dengan adsorpsi, metode membran secara teknis lebih matang karena praktis tetapi masih memiliki tantangan dalam biaya pemisahan dan pengotoran membran. Metode berbasis kimia, terutama pengendapan kimia, secara teknis merupakan metode yang matang, praktis, dan hemat biaya. Namun, metode ini menghasilkan lumpur dengan volume besar dan membutuhkan pemisahan sedimentasi.
4.	L. Salami, K. B. Salami, T. A. Salami, T. A. Salami, dan A. A. Susu (2021)	Recent Advances in Landfill Leachates Treatment Technology	Penelitian ini menerangkan bahwa teknologi pengolahan fisik dan kimia yang menawarkan pengolahan yang lebih baik untuk mengolah lindi TPA Lagos seperti koagulasi-flokulasi, resirkulasi, adsorpsi karbon aktif dan filtrasi membran dengan ditambahkan <i>air stripping</i> dan presipitasi kimia berkemungkinan tidak memberikan hasil yang sesuai dengan yang diharapkan. Teknologi biologis yang cocok untuk pengolahan lindi TPA Lagos adalah <i>aerated lagoons</i> , <i>sequential batch reactor</i> (SBR) amonium anaerobik, <i>rotating biological contactors</i> (RBC), oksidasi amonium anaerobik (anammox), dan <i>upflow anaerobic sludge blanket</i> (UASB). Penggunaan kombinasi teknologi akan menghasilkan hasil pengolahan yang lebih baik untuk remediasi lindi.
5.	Laili Zahratul Rizqia & Agus Slamet (2021)	Perencanaan Revitalisasi Instalasi Pengolahan Air Lindi (IPL) TPA Gunung Panggung, Kabupaten Tuban	Tidak semua lindi yang dihasilkan TPA Gunung Panggung terolah dalam instalasi pengolahan lindi. Dari hasil uji laboratorium, diketahui parameter TSS, COD, dan BOD ₅ lindi melebihi baku mutu sehingga dilakukan revitalisasi. Unit yang direncanakan adalah koagulasi, flokulasi, sedimentasi, anaerobik filter, dan <i>constructed wetland</i> . Efisiensi penyisihan BOD diestimasikan sebesar 98,8%, COD sebesar 98,9%, TSS sebesar 97,9%, dan total N sebesar 89,5%. Biaya

No.	Nama (Tahun)	Judul	Hasil Penelitian
			konstruksi untuk instalasi pengolahan lindi tersebut ditaksir mencapai Rp232.516.044.
6.	Syahrul Al-Qadar Haumahu, Herawaty Riogilang, dan Isri R. Mangangka (2021)	Perancangan Instalasi Pengolahan Lindi dengan Proses Kombinasi Kolam Anaerobik, Fakultatif, dan Maturasi di TPA Sumompo	TPA Sumompo, Kota Manado yang menerapkan sistem <i>open dumping</i> memiliki instalasi pengolahan lindi yang sudah tidak bekerja dengan baik sehingga hasil pengujian laboratorium dari lindi menunjukkan nilai COD dan BOD yang melebihi standar baku mutu. Hal tersebut melatarbelakangi dilakukannya perencanaan instalasi pengolahan lindi kembali. Unit instalasi pengolahan lindi yang direncanakan terdiri dari empat kolam anaerobik berukuran 5m × 4m × 2m, dua kolam fakultatif berukuran 8m × 8m × 2m, dan dua kolam maturasi berukuran 9m × 9m × 2m. <i>Efficiency removal</i> COD dan BOD dari kolam anaerobik sebesar 70%, kolam fakultatif sebesar 69,48%, dan maturasi sebesar 50%.
7.	Feqinansyah Gerizepta Mahendra dan Erina Rahmadyanti (2021)	Studi Perencanaan Instalasi Pengolahan Limbah Lindi pada TPA Griyo Mulyo Kabupaten Sidoarjo	Digunakan data curah hujan pada 10 tahun terakhir untuk mengestimasi debit lindi. Untuk mengolah lindi TPA Griyo Mulyo, unit yang disarankan pada perencanaan meliputi kolam stabilisasi dan kolam anaerobik. Selain itu, untuk pengolahan lindi juga dilakukan dengan cara mengendalikan air permukaan dan mengisolasi timbunan sampah dengan lapisan tanah penutup agar lindi tidak masuk ke dalam permukaan tanah dan timbunan sampah. Selain itu, pengolahan lindi juga dilakukan dengan cara merembeskan lindi ke lahan yang telah ditanami tanaman tertentu. Metode dengan menggunakan tanaman ini dinilai lebih efektif dan ekonomis.
8.	Ronei de Almeida, Fábio de Almeida Oroski, dan Juacyara Carbonelli Campos (2020)	Techno-Economic Evaluation of Landfill Leachate Treatment by Hybrid Lime Application and Nanofiltration Process	Proses pengolahan kombinasi untuk lindi memungkinkan produksi permeat yang jernih dan terbukti sangat efektif dalam menghilangkan semua polutan. Dalam penelitian ini, dievaluasi faktor teknis dan ekonomi mengenai aplikasi kapur dan nanofiltrasi untuk pengolahan lindi dari TPA Seropédica (Negara Bagian Rio de Janeiro, Brasil). Hasilnya menunjukkan bahwa penerapan 30 g kapur L ⁻¹ pada kondisi optimal diikuti dengan <i>air stripping</i> mampu menurunkan kadar polutan limbah hingga standar pembuangan nitrogen amoniak yang ditetapkan oleh undang-undang setempat. Penggunaan nanofiltrasi menghasilkan permeat yang jernih dan tidak berwarna serta terbukti sangat efektif dalam menghilangkan semua polutan. Mengenai perkiraan biaya, dengan mempertimbangkan aliran produksi lindi rata-rata 1000 m ³ , pemulihan 60% dan fluks permeat rata-rata 12 L m ⁻² h ⁻¹
9.	Shadi Rahimi, Oskar	Technologies for Biological Removal and	Dua teknik biologis yang berpotensi dapat digunakan untuk pemulihan nitrogen meliputi sistem bioelektrokimia dan mikroorganisme fotosintetik.

No.	Nama (Tahun)	Judul	Hasil Penelitian
	Modin, dan Ivan Mijakovic (2020)	Recovery of Nitrogen from Wastewater	<p>Tujuan dari artikel ini adalah untuk membandingkan efisiensi dari berbagai metode penghilangan nitrogen secara biologis yang meliputi nitrifikasi, denitrifikasi, dan oksidasi amonium anaerobik (anammox). Dibandingkan dengan proses fisikokimia untuk pengolahan air limbah, penghilangan nitrogen secara biologis melalui nitrifikasi dan denitrifikasi lebih hemat biaya. Namun, masih ada beberapa kelemahan, seperti reaksi nitrifikasi yang lambat, penurunan aktivitas nitrifikasi oleh kelebihan amonium dan bahan organik, kebutuhan kontrol oksigen, dan kebutuhan akan dua reaktor. Selain itu, diperlukan waktu retensi hidrolik (HRT) yang lama untuk menyelesaikan penghilangan NH_4^+ karena tingkat nitrifikasi yang rendah, yang mengakibatkan biaya operasional yang tinggi. Sementara itu, pengolahan dengan denitrifikasi dapat mengurangi biaya pembuangan limbah karena kontaminan diolah secara bersamaan. Kekurangan dari proses denitrifikasi adalah dihasilkannya kekeruhan sebagai akibat dari biomassa yang berlebihan dan sisa sumber karbon, sehingga memerlukan perawatan lebih lanjut. Selain itu, terdapat risiko dari dihasilkannya gas nitro oksida yang dapat menyebabkan efek gas rumah kaca.</p> <p>Penyisihan nitrogen pada air limbah juga dapat dilakukan dengan metode anammox. Kombinasi anammox dan nitrifikasi memiliki beberapa kelebihan, yakni tidak menggunakan sumber karbon yang ada di air limbah, meningkatkan pemulihan energi dari air limbah, produksi lumpur yang minim, dan menurunkan emisi gas rumah kaca akibat konsumsi karbon CO_2 anorganik serta emisi N_2O yang lebih rendah. Tantangan utama dari penerapan proses anammox dalam mengolah air limbah arus utama adalah asio C/N yang tinggi, suhu yang rendah, dan kualitas air limbah yang perlu ditingkatkan untuk memenuhi standar pembuangan limbah melalui pengolahan lebih lanjut dapat meningkatkan biaya dan konsumsi energi. Sementara itu, sistem bioelektrokimia adalah proses pengolahan air limbah secara elektrokimia (bioanoda/biokatoda) dengan kapasitas transfer elektron ekstraseluler yang memanfaatkan mikroorganisme aktif.</p>
10.	Elizabeth Carvajal-Flórez dan Cardona Gallo Santiago-	Technologies Applicable to the Removal of Heavy Metals from Landfill Leachate	<p>Penerapan proses non-biologis untuk mengolah logam berat pada lindi memiliki beberapa kekurangan, yakni tingginya biaya operasional dan pemeliharaan dan tingginya timbulan produk sampingan. Pada pengolahan yang menerapkan proses presipitasi, terbentuk lumpur dalam jumlah besar yang</p>

No.	Nama (Tahun)	Judul	Hasil Penelitian
	Alonso Cardona-Gallo (2019)		mempersulit pengelolaannya. Elektrokoagulasi membutuhkan energi listrik untuk diterapkan, masa manfaat elektroda terbatas, dan penggantianinya menghasilkan biaya tinggi. Metode flotasi memerlukan pencucian balik membran yang akhirnya menurunkan kinerja penyisihan logam berat. Sementara itu, penerapan pengolahan secara biologis dianggap memiliki kelebihan karena hasil penelitian menunjukkan tingkat penyisihan di atas 90% untuk sebagian besar kasus yang diteliti, dan perubahan fungsi dari biomassa terpilih. Pengolahan dengan mikroorganisme dan/atau tanaman memiliki beberapa keunggulan di antaranya biayanya yang rendah, penerapannya yang cukup mudah, dan kemampuan penyisihan logamnya yang cukup tinggi.
11.	Endi Adriansyah, Tuty Emilia Agustina, dan Susila Arita (2019)	Leachate Treatment of TPA Talang Gulo, Jambi City by Fenton Methode and Adsorption	Salah satu tujuan dari penelitian ini adalah mengolah lindi menggunakan metode AOPs yang disebut dengan metode fenton. Dari penelitian tersebut diketahui bahwa kondisi optimum dicapai pada rasio molar antara Fe^{2+} dengan garam H_2O_2 1:200 dengan lama waktu pengadukan 120 menit. Setelah dilakukan metode fenton, lindi diolah dengan metode adsorpsi menggunakan karbon aktif selama 120 menit. Rangkaian pengolahan ini mampu menurunkan 95% kadar COD, 95% kadar BOD, dan 92% kadar TSS.
12.	Perry L. McCarty (2018)	What is the Best Biological Process for Nitrogen Removal: When and Why?	<p>Disajikan empat alternatif untuk penyisihan nitrogen: alternatif A terdiri dari <i>primary clarifier</i>, oksidasi organik aerobik + nitrifikasi, <i>clarifier</i>, denitrifikasi, <i>final clarifier</i>, dan <i>anaerobic digestion</i>; alternatif B terdiri dari <i>primary clarifier</i>, penyisihan organik, <i>clarifier</i>, nitrifikasi, anammox, <i>final clarifier</i>, dan <i>anaerobic digestion</i>; alternatif C terdiri dari <i>primary clarifier</i>, denitrifikasi, oksidasi organik aerobik + nitrifikasi, <i>final clarifier</i>, dan <i>anaerobic digestion</i>; alternatif D terdiri dari <i>primary clarifier</i>, denitrifikasi, oksidasi organik aerobik + nitrifikasi, <i>final clarifier</i>, <i>anaerobic digestion</i>, nitrifikasi, dan anammox.</p> <p>Alternatif A dengan nitrifikasi/denitrifikasi jalur langsung adalah alternatif yang paling tidak ramah lingkungan, membutuhkan COD tambahan dalam jumlah besar, memiliki kebutuhan oksigen terbesar, dan menghasilkan biosolid yang paling mudah dicerna untuk penanganan dan pembuangan. Satu-satunya kelebihan dari alternatif A adalah memiliki persentase tertinggi dari total penyisihan nitrogen di antara alternatif lainnya. Akan tetapi, alternatif A membutuhkan biaya yang tinggi untuk modal, pengoperasian, dan pengolahan lingkungan.</p>

No.	Nama (Tahun)	Judul	Hasil Penelitian
			<p>Alternatif B dengan didahului pembuangan organik anaerob dan diikuti dengan anammox memiliki kelebihan berupa rendahnya kebutuhan oksigen yang hanya 38–46%, produksi biosolid yang dicerna hanya 65–74%, dan nitrogen total yang disisihkan lebih tinggi (93 berbanding 85–90%). Produksi oksigen dan biosolid yang lebih rendah dengan peningkatan produksi metana akan menurunkan biaya operasional. Biaya konstruksi kemungkinan akan berkurang juga karena pengurangan ukuran yang dibutuhkan untuk pencernaan biosolid anaerobik, dan tidak adanya kebutuhan dengan bioreaktor membran untuk <i>final clarifier</i> dan filtrasi. Tetapi alternatif ini memiliki banyak kekurangan seperti laju pertumbuhan organisme yang lambat, kepekaan terhadap nitrit yang tinggi dan kondisi lingkungan lainnya, dan kesulitan dalam mempertahankan jumlah oksigen yang tepat. Dengan oksigen yang terlalu sedikit, penghilangan amonia menjadi terbatas, dengan oksigen yang terlalu banyak, produksi nitrat juga menghasilkan penghilangan yang rendah.</p> <p>Pengolahan C dan D menerapkan sistem nitrifikasi/denitrifikasi tradisional yang digunakan secara luas saat ini. Efisiensi penyisihan nitrogen dalam sistem ini merupakan fungsi dari laju daur ulang, semakin tinggi daur ulang, semakin tinggi efisiensi penyisihan. Kelebihan dari alternatif C dan D adalah dengan melalui modifikasi, alternatif ini berhasil digunakan untuk menghilangkan fosfat, sesuatu yang belum ditunjukkan dengan pengolahan <i>mainstream anammox</i>.</p>

UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Umum

Secara umum, metode yang digunakan pada penelitian ini adalah kuantitatif karena data-data yang digunakan pada penelitian ini sebagian besar berupa angka-angka. Menurut metode kuantitatif dapat disebut juga sebagai metode *discovery*. Alasannya adalah karena dengan metode ini, iptek baru dapat ditemukan dan dikembangkan dengan data penelitian berupa angka-angka dan analisis statistik data berupa angka-angka untuk menemukan jawaban dari rumusan masalah (Balaka, 2022).

Penelitian yang memiliki tujuan utama untuk membuat perencanaan instalasi pengolahan lindi yang efisien bagi TPA Mrican ini dilakukan dengan beberapa tahapan yang saling berhubungan satu sama lain. Oleh karena itu, penelitian ini harus dilakukan dengan runut sesuai dengan tahapan-tahapan yang meliputi tahap persiapan, pelaksanaan, dan penyusunan laporan. Pada tahap persiapan, dilakukan pencarian atau identifikasi masalah dengan melakukan penggalan informasi melalui studi literatur, survei lapangan, dan diskusi atau wawancara dengan beberapa pihak. Setelah tahap persiapan, dilakukan tahap pelaksanaan yang meliputi pengumpulan serta penganalisan data primer dan sekunder. Tahap terakhir dari perencanaan ini adalah penyusunan laporan sehingga didapatkan perencanaan instalasi pengolahan lindi TPA Mrican yang berisi alternatif pilihan unit instalasi pengolahan, DED unit instalasi pengolahan lindi terpilih, *bill of quantity* (BOQ), rencana anggaran biaya (RAB), dan standar operasional prosedur dari instalasi pengolahan lindi terpilih.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

3.2.1 Lokasi Penelitian

Perencanaan instalasi pengolahan lindi ini dilakukan untuk TPA Mrican yang terletak di Desa Mrican, Kecamatan Jenangan, Kabupaten Ponorogo, tepatnya pada koordinat geografi $7^{\circ}51'41,6''S$ dan $111^{\circ}31'34,5''E$. Peta lokasi TPA Mrican dapat dilihat pada **Gambar 3.1** berikut,



Halaman ini sengaja dikosongkan

UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A



PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI
SUNAN AMPEL SURABAYA

TUGAS AKHIR (TA)

Perencanaan Instalasi Pengolahan Lindi Temp
Pembuangan Akhir (TPA) Mrican Kabupaten
Ponorogo sebagai Kontrol Pemenuhan Baku Mutu

JUDUL GAMBAR

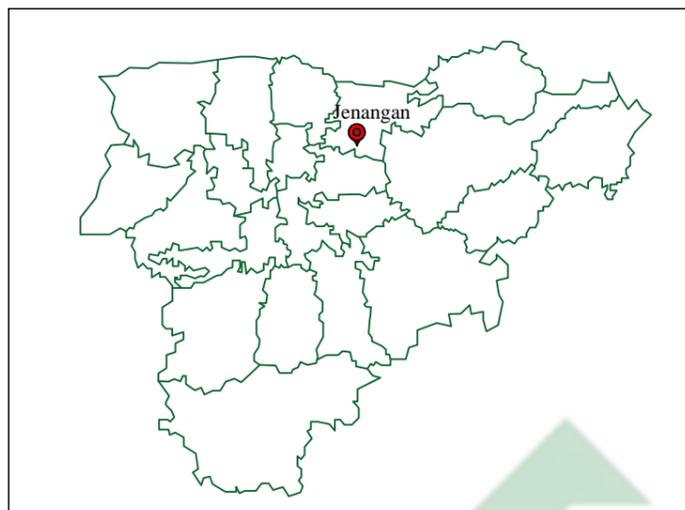
LOKASI TPA MRICAN

KETERANGAN

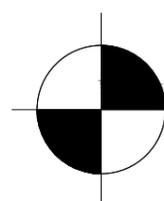
 Sel Penimbunan Sampah

 Lokasi Rencana Peletakan IPL

Nama Mahasiswa	Nomor Induk
Nur Afifah	H95219049
Dosen Pembimbing	Dosen Penguji
Dyah Ratri N., M.T. Teguh Taruna U., M.T.	Abdul Hakim, M.T. Arqowi Pribadi, M.T.
Tanggal Digambar	Tanggal Diperiksa
24 Juni 2023	06 Juli 2023
Skala Gambar	Halaman
1:25	59



UIN
S U



LOKASI TPA MRICAN

SKALA 1 : 2000

3.2.2 Waktu Penelitian

Perencanaan instalasi pengolahan lindi TPA Mrican ini dilaksanakan selama enam bulan. Tahap persiapan, survey awal lokasi, penyusunan proposal dilakukan pada bulan Februari 2023. Seminar dan revisi proposal dilaksanakan pada bulan Maret 2023. Pengumpulan dan analisis data dilakukan selama dua bulan, yakni pada bulan Maret hingga April 2023. Review hasil dilaksanakan pada bulan Juni 2023. Sementara itu, penyusunan laporan dilakukan dari mulai data dikumpulkan, yakni bulan April hingga Juli 2023.

3.3 Alat dan Bahan

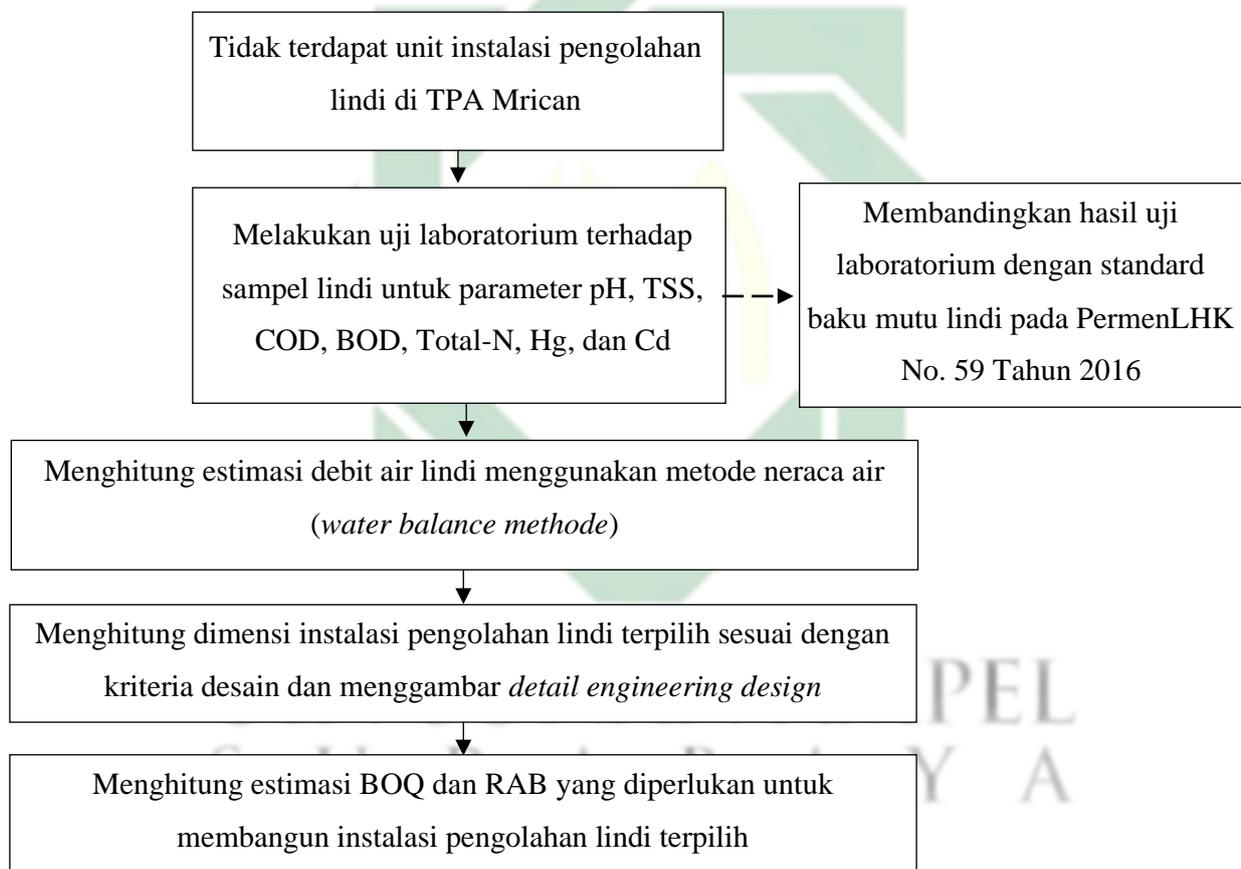
Pada tahap pelaksanaan atau pengambilan data, khususnya pada proses pengambilan sampel air lindi, diperlukan beberapa alat dan bahan. Alat-alat dan bahan yang diperlukan tersebut dapat dilihat pada **Tabel 3.1** di bawah ini

Tabel 3.1 Alat dan Bahan yang Diperlukan Pada Pengambilan Sampel

No	Alat dan Bahan	Fungsi/Kegunaan	Sumber
1.	Botol kaca gelap 250 ml	Sebagai wadah sampel	SNI 6989.59:2008
2.	pH meter	Untuk mengukur tingkat keasaman sampel di lapangan	SNI 6989.11: 2019
3.	DO meter	Untuk mengukur DO ₀ sampel di lapangan	
3.	Cool box	Sebagai tempat disimpannya botol kaca agar sampel tetap awet dengan kondisi temperatur 4°C ± 2°C	SNI 6989.59:2008
4.	Aquades	Untuk mengkalibrasikan pH meter dan DO meter	SNI 6989.11: 2019
5.	HNO ₃	Untuk mencuci atau membilas botol kaca yang berfungsi sebagai wadah sampel yang akan dianalisis kandungan Cd dan Hg-nya	SNI 6989.59:2008

3.4 Kerangka Pikir Penelitian

Menurut Saputra (2021), kerangka pikir penelitian merupakan suatu panduan untuk melaksanakan berbagai kegiatan dalam penelitian agar dapat dicapai tujuan utama dari penelitian tersebut. Kegiatan-kegiatan dalam penelitian dapat menjadi acak-sporadis, menghabiskan banyak sumber daya, tetapi gagal untuk menjawab tujuan utama dari penelitian tersebut apabila tidak terdapat kerangka pikir penelitian. Bagan kerangka pikir dari penelitian ini terdapat pada **Gambar 3.2** di bawah ini.



Gambar 3.2 Bagan Kerangka Pikir Penelitian

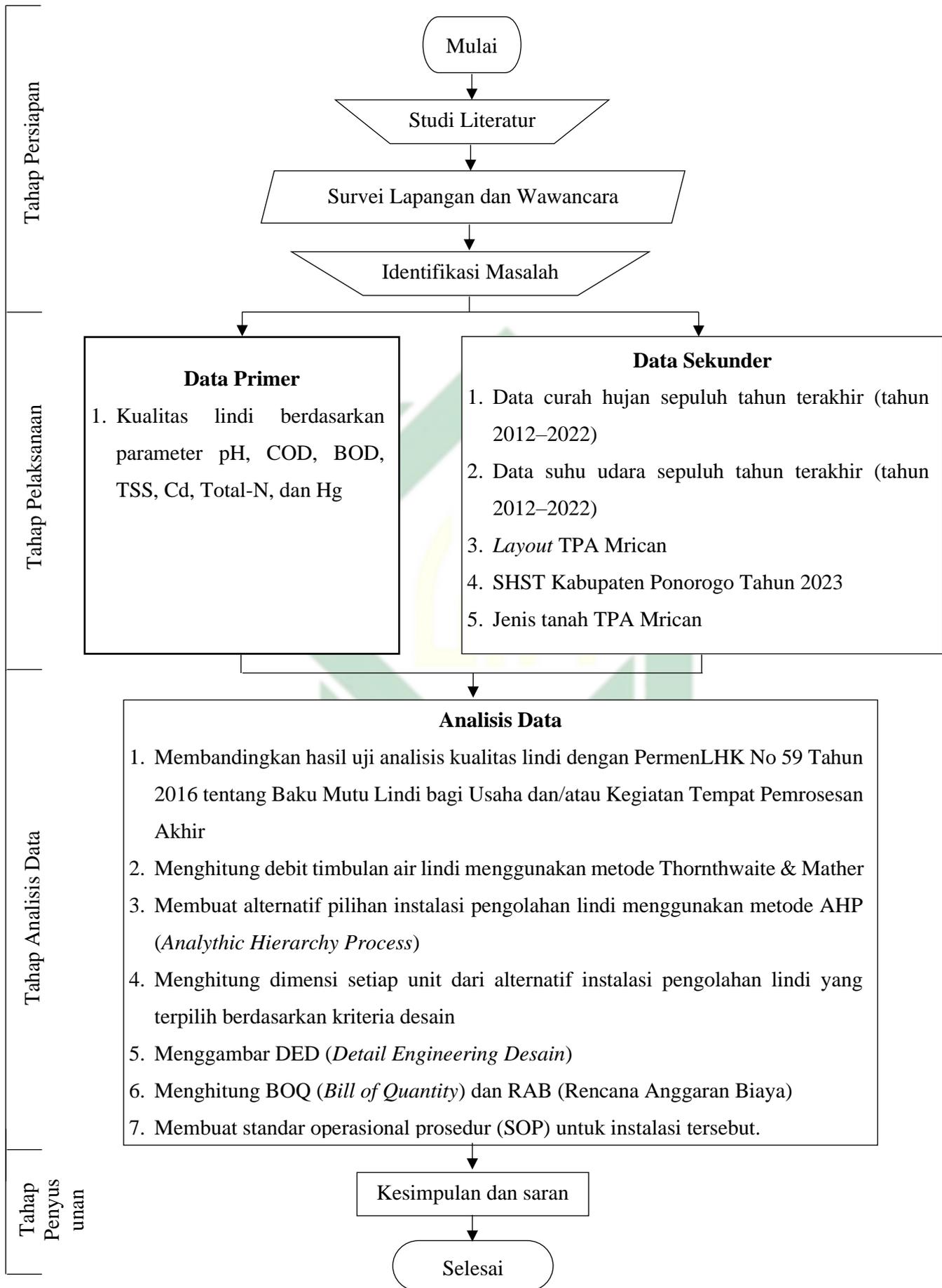
Penelitian ini diawali dengan ditemukannya masalah berupa ketidakadaannya instalasi pengolahan lindi pada TPA Mrican Kabupaten Ponorogo. Setelah itu, untuk mengetahui kualitas air lindi TPA Mrican, dilakukan uji laboratorium dengan parameter yang diujikan meliputi pH, COD, BOD, TSS, total-N, Hg, dan Cd. Untuk mengetahui parameter-parameter yang

melebihi baku mutu, hasil uji laboratorium kualitas lindi TPA Mrican dibandingkan dengan PermenLHK No 59 Tahun 2016. Setelah diketahui kandungan TPA Mrican yang melebihi standard baku mutu, dilakukan perencanaan instalasi pengolahan lindi dengan diawali perhitungan estimasi timbulan debit lindi. Debit timbulan air lindi dapat diestimasi menggunakan metode neraca air. Pada penggunaan metode tersebut, digunakan data yang meliputi curah hujan dan temperatur bulanan selama sepuluh tahun serta jenis tanah tutupan pada TPA.

Selain menghitung estimasi debit timbulan air lindi, setelah diketahui kualitas air lindi, diberikan empat pilihan alternatif unit instalasi pengolahan lindi yang selanjutnya akan dipilih salah satunya menggunakan metode AHP. Langkah selanjutnya adalah menghitung dimensi setiap unit terpilih sesuai dengan kriteria desain yang didapatkan dari studi literatur dan menggambarkan *detail engineering design* dari dimensi unit tersebut. Dengan adanya dimensi setiap unit tersebut, dapat diestimasi BOQ dan RAB untuk konstruksi. Selain itu, untuk melengkapi penelitian ini, dibuat standar operasi dan prosedur untuk pengoperasian dan pemeliharaan instalasi pengolahan lindi tersebut.

3.5 Tahapan Penelitian

Agar lebih mudah dipahami, ringkasan panduan atau acuan rangkaian pokok kegiatan yang akan dilakukan pada penelitian ini tergambar dalam diagram alir tahapan penelitian pada **Gambar 3.3**. Dengan adanya acuan ini, diharapkan penulis dapat menjalankan tahapan-tahapan dalam pembuatan perencanaan instalasi pengolahan lindi TPA Mrican secara terarah sehingga dapat dicapai hasil yang maksimal.



Gambar 3.3 Diagram Alir Tahapan Penelitian

Dari **Gambar 3.3** di atas, terdapat beberapa tahapan pada perencanaan instalasi pengolahan lindi TPA Mrican yakni tahap persiapan, pelaksanaan, analisa data, dan penyusunan laporan.

3.5.1 Tahap Persiapan

Pada tahap persiapan, dilakukan pencarian atau pengidentifikasian masalah, studi literatur, dan survei awal lapangan. Ketiga hal tersebut saling berkaitan adanya. Dari studi literatur, didapatkan informasi bahwa salah satu hal yang memerlukan perhatian khusus dari beroperasionalnya sebuah TPA adalah lindi yang dihasilkan. Kemudian, dengan disertai survei lapangan dan diskusi dengan beberapa pihak pada beberapa TPA, didapati bahwa masih terdapat TPA yang tidak dilengkapi dengan instalasi pengolahan lindi. Salah satu TPA tersebut adalah TPA Mrican. Berasal dari hal tersebut dapat diidentifikasi masalah terkait lindi TPA Mrican. Kemudian, penelitian berfokus pada kualitas dan kuantitas lindi tersebut dengan membandingkannya terhadap beberapa literatur. Setelah mengetahui kualitas lindi TPA Mrican serta cara atau metode untuk memproyeksikan kuantitas timbulan lindi dilakukan studi literatur kembali untuk mencari alternatif unit pengolahan lindi yang efisien bagi TPA Mrican beserta dengan kriteria desain setiap unit yang telah dipilih.

3.5.2 Tahap Pelaksanaan

Tahap pelaksanaan perencanaan instalasi pengolahan lindi TPA Mrican terdiri dari pengumpulan data yang terdiri dari data primer dan sekunder. Data primer digunakan untuk mengetahui kualitas lindi, sedangkan data sekunder digunakan untuk mengetahui proyeksi kuantitas timbulan air lindi, pemilihan alternatif serta perencanaan desain unit instalasi pengolahan lindi, penghitungan BOQ dan RAB, serta pembuatan SOP.

a. Data Primer

Untuk mengumpulkan data primer, penulis melakukan survei secara langsung untuk mengetahui kondisi eksisting TPA Mrican.

Untuk mendapatkan data primer berupa kualitas lindi, penulis mengambil sampel lindi TPA Mrican secara langsung pada titik koordinat 7°51'39,3" LS (-7,8609167 S) dan 111°31'35,1" BT (111,5264167 E).

Tabel 3.2 Data Primer

No	Data yang Dikumpulkan	Metode Pengujian Sampel
1	pH Lindi	SNI 6989.11:2019
2	TSS Lindi	SNI 6989.3:2019
3	BOD Lindi	SNI 6989.72:2009
4	COD Lindi	SNI 6989.2:2019
5	Total-N Lindi	Titrimetri
6	Cd Lindi	SNI 6989.82:2018
7	Hg Lindi	APHA 3125 B-2017

1) Pengambilan Sampel Lindi

Pengambilan sampel berupa air lindi dilakukan dengan cara-cara yang mengacu pada SNI 6989.59:2008 mengenai Metode Pengambilan Contoh Air Limbah. Pengambilan sampel menurut SNI tersebut bertujuan untuk keperluan pengujian sifat kimia dan fisika air limbah. Karena TPA Mrican tidak memiliki bak ekualisasi untuk menampung lindi sebelum memasuki perairan penerima, pengambilan lindi dilakukan dengan cara sesaat (*grab sampling*). Pengambilan lindi itu sendiri yakni dengan cara sebagai berikut:

- a) Mempersiapkan peralatan yang akan digunakan;
- b) Mencuci botol yang akan digunakan sebagai wadah dengan deterjen bebas fosfat dan membilasnya dengan air hingga bersih kemudian mengeringkannya;
- c) Membilas botol dan peralatan yang akan digunakan untuk mengambil lindi dengan air lindi sebanyak tiga kali
- d) Mengambil sampel sesuai dengan peruntukan analisis dan menghomogenkannya;

- e) Memasukkan sampel dalam wadah yang sesuai dengan peruntukan analisis;
- f) Mengukur parameter pH menggunakan pH meter;
- g) Mengulangi langkah c) hingga e) di lapangan untuk mengambil sampel yang akan diujikan di laboratorium. Sampel diambil sebanyak 2,5 liter.
- h) Mengawetkan sampel untuk pengujian parameter yang harus dilakukan di laboratorium.

2) pH Lindi

Pengujian pH pada lindi dilakukan di lapangan secara langsung setelah lindi diambil. Pengujian ini dilakukan sesuai dengan SNI 6989.11: 2019 tentang Cara Uji Derajat Keasaman (pH) dengan Menggunakan pH Meter. Cara pengujian pH sesuai SNI tersebut adalah sebagai berikut,

- a) Membilas elektroda pada pH meter menggunakan akuades untuk mengalibrasikannya kemudian mengeringkannya dengan tisu,
- b) Mencilupkan elektroda pH meter ke dalam sampel uji hingga skala atau angka pada pH meter stabil,
- c) Mencatat angka pH dan suhu yang terbaca di pH meter,
- d) Membilas elektroda pH meter dengan akuades untuk membersihkannya.

3) TSS Lindi

TSS (*total suspended solids*) ‘padatan tersuspensi total’ dari lindi di uji di Laboratorium Pengujian dan Kalibrasi Badan Standardisasi dan Kebijakan Jasa Industri Balai Standardisasi dan Pelayanan Jasa Industri Surabaya. TSS lindi diuji sesuai dengan SNI 6989.3-2019 menggunakan metode gravimetri. Prinsip dari pengujian TSS menurut SNI tersebut adalah menghitung selisih berat antara media penyaring sebelum dan sesudah digunakan untuk menyaring air atau berisi residu dari air dengan disertai pengeringan pada kisaran suhu 103–105°C hingga mencapai

berat yang tetap. Perhitungan TSS tersebut menggunakan rumus berikut:

$$\text{TSS} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{(W_B - W_A) \times 1000}{\text{Volume Sampel (ml)}}$$

Keterangan:

W_B = Berat media penyaring berisi residu kering (mg)

W_A = Berat media penyaring awal (mg)

4) BOD

Pengujian BOD (*biological oxygen demand*) ‘kebutuhan oksigen biokimia’ dilakukan menurut SNI 6989.72: 2009 di Laboratorium Pengujian dan Kalibrasi Badan Standardisasi dan Kebijakan Jasa Industri Balai Standardisasi dan Pelayanan Jasa Industri Surabaya. Prosedur pengujian BOD tersebut adalah sebagai berikut,

- a) Memasukkan sampel ke dalam dua labu ukur masing-masing sebanyak 75 ml dan mengencerkannya dengan menambahkan masing-masing 300 ml akuades,
- b) Memasukkan sampel yang telah diencerkan ke dalam botol winkler hingga meluap dan memberinya notasi A dan B,
- c) Menyimpan botol B pada inkubator $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ selama 5 hari ± 6 jam,
- d) Mengukur oksigen terlarut pada larutan di botol A menggunakan DO meter selambat-lambatnya 30 menit setelah dilakukan pengenceran sehingga didapatkan nilai DO_0 ,
- e) Mengukur oksigen terlarut pada botol B yang telah diinkubasi sehingga didapatkan nilai DO_5 ,
- f) Menghitung nilai BOD dengan menggunakan rumus

$$\text{BOD}_5 \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{(A - B) - \frac{(C - D)}{V_{\text{blanko}}} (V_{\text{sampel}})}{P}$$

Keterangan:

A = Nilai DO_0 dari sampel (mg/L)

B = Nilai DO₅ dari sampel (mg/L)

C = Nilai DO₀ blanko atau akuades sebelum diinkubasi (mg/L)

D = Nilai DO₅ blanko atau akuades sebelum diinkubasi (mg/L)

V_{blanko} = Volume blanko (ml)

V_{sampel} = Volume sampel (ml)

P = Perbandingan volume sampel (V₁) per volume total (V₂)

5) COD

Pengujian COD dilakukan di Laboratorium Pengujian dan Kalibrasi Badan Standardisasi dan Kebijakan Jasa Industri Balai Standardisasi dan Pelayanan Jasa Industri Surabaya dengan mengacu pada SNI 6989.2: 2019 mengenai Cara Uji Kebutuhan Oksigen Kimiawi (*Chemical Oxygen Demand*/COD) dengan Refluks Tertutup secara Kimiawi. Proses pengujian COD tersebut adalah sebagai berikut:

- a) Sepuluh mililiter sampel ditambahkan dengan 6 ml *digestion solution* (campuran antara K₂Cr₂O₇ 1,216 g, 500 ml akuades, H₂SO₄ 127 ml, dan HgSO₄ 33,3 g yang diencerkan dengan akuades hingga 1000 ml), dan 14 ml larutan pereaksi (dari campuran antara 10,12 g Ag₂SO₄ dan 1000 ml H₂SO₄) dalam tabung kultur,
- b) Tutup dan kocok tabung kultur secara perlahan hingga larutan homogen,
- c) Panaskan tabung kultur berisi larutan tersebut pada suhu 15°C ± 2°C dengan menggunakan refluks tertutup selama 2 jam,
- d) Setelah pemanasan selama dua jam, diinginkan sampel hingga suhu ruang serta suspensinya mengendap dan bagian yang akan diukur menjadi jernih,
- e) Buat kurva kalibrasi dari lima variasi konsentrasi larutan kerja kalium hidrogen phtalat (KHP) dan satu blanko

kemudian buat persamaan garis lurusnya hingga diperoleh koefisien nilai $r \geq 0,995$.

- f) Uji serapan sampel menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 600 nm atau 420 nm,
- g) Lakukan perhitungan nilai COD menggunakan persamaan linier yang didapatkan dari kurva kalibrasi.

6) Total-N

Total nitrogen dianalisis secara makro kjeldahl dengan menetapkan amonia yang terbentuk menggunakan metode titrimetri. Secara garis besar, penganalisan nitrogen menggunakan metode kjeldahl terdiri dari tiga tahap, yakni destruksi, destilasi, dan titrasi. Menurut SNI 06-6989.52-2005, prinsip dari analisis kadar nitrogen menggunakan metode titrimetri adalah perubahan senyawa nitrogen organik pada air limbah dengan campuran H_2SO_4 dan katalis menjadi garam amonium. Kemudian, dengan penambahan basa kuat, garam amonium tersebut akan diubah menjadi amonia yang dibebaskan dan selanjutnya akan bereaksi dengan asam sulfat atau asam borat membentuk senyawa amonia. Senyawa amonia tersebut kemudian dapat ditetapkan melalui titrimetri.

Untuk membawa sampel yang akan diuji kandungan total nitrogennya, sampel harus diawetkan dengan meletakkannya pada *cool box* dan menambahkannya dengan H_2SO_4 hingga pH sampel kurang dari 2. Total nitrogen diuji di Laboratorium Pengujian dan Kalibrasi Balai Standarisasi dan Pelayanan Jasa Industri Surabaya.

7) Cd

Analisis kadmium (Cd) dari lindi TPA Mrican dilakukan di Genau Lab atau PT Genau Loka Gantari. Analisis Cd dilakukan sesuai SNI 6989.82: 2018 (Air dan Air Limbah – Bagian 82: Cara Uji Logam Menggunakan Spektrometer Emisi Atom *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometric*

(ICP-OES). Prinsip dari uji ini adalah tereksitasinya logam pada tingkat energi yang lebih tinggi akibat adanya suplai energi dari plasma. Eksitasi logam tersebut terjadi secara tidak stabil sehingga atom akan kembali ke keadaan dasar dan mengemisikan energi dalam bentuk spektrum sesuai panjang gelombang spesifik dari kadmium atau logam yang terkandung pada sampel. Untuk pengujian kadar kadmium, sampel diawetkan menggunakan HNO₃ hingga mencapai pH < 2.

8) Hg

Hg (merkuri) dianalisis dengan menggunakan acuan APHA 3125 B-2017 di Genau Lab atau PT Genau Loka Gantari. Pada metode ini, Hg akan dianalisis dengan plasma gandeng induktif atau *inductively coupled plasma mass spectrometry* (ICP-MS).

b. Data Sekunder

Data sekunder yang dikumpulkan untuk perencanaan instalasi pengolahan lindi TPA Mrican ini meliputi, data curah hujan dan suhu bulanan selama sepuluh tahun serta data jenis tanah TPA Mrican untuk menentukan proyeksi timbulan lindi menggunakan metode thornthwaite. Selain itu, dikumpulkan pula data berupa peta serta sarana dan prasarana TPA Mrican. Untuk membuat BOQ dan RAB, dikumpulkan data Standar Harga Satuan Tertinggi (SHST) dan Harga Satuan Bahan Bangunan Konstruksi Tahun 2023 menurut Keputusan Bupati Kabupaten Ponorogo Nomor: 188.45/1286/405.20/2022.

Tabel 3.3 Data Sekunder

No	Data yang Dikumpulkan	Sumber
1	Data intensitas curah hujan dan suhu bulanan	BPS Kabupaten Ponorogo Tahun 2012-2022
2	Peta, sarana, dan prasarana TPA Mrican	TPA Mrican
3	SHST dan HSBGN Kabupaten Ponorogo Tahun 2023	Keputusan Bupati Kabupaten Ponorogo Nomor: 188.45/1286/405.20/2022

No	Data yang Dikumpulkan	Sumber
4.	Jenis tanah TPA Mrican	Dinas Lingkungan Hidup dan Dinas Pertanian, Ketahanan Pangan, dan Perikanan Kabupaten Ponorogo

3.5.3 Tahap Analisa Data

a. Analisis Kualitas Lindi

Parameter yang diuji pada analisis kualitas lindi meliputi parameter-parameter yang disebutkan dalam PermenLHK No 59 Tahun 2016, yakni pH, COD, BOD, TSS, total N, Hg, dan Cd. Pengujian pH dilakukan secara langsung di lapangan sedangkan pengujian parameter COD, BOD, TSS, total N, Hg, dan Cd dilakukan di laboratorium Kesehatan Daerah Kabupaten Ponorogo. Hasil pengujian atau kualitas air lindi kemudian dibandingkan dengan baku mutu kualitas lindi pada PermenLHK No 59 Tahun 2016.

b. Mengestimasi Debit Lindi

Digunakan metode neraca air (*water balance methode*) atau metode Thornthwaite-Mather menurut Thornthwaite & Mather (1957) untuk menghitung estimasi debit timbulan lindi. Cara menghitung estimasi debit lindi menggunakan metode ini adalah sebagai berikut.

- 1) Menentukan jenis tanah tutupan akhir dari *landfill* dan kemampuannya untuk menyimpan air,
- 2) Menghitung nilai tahunan indeks panas (I) dengan menjumlahkan indeks bulanan selama 12 bulan. Indeks bulanan dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut,

$$IP = \sum_{T=0}^{12} \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514} \quad \text{Persamaan 3.1}$$

Keterangan:

T = Temperatur rata-rata bulanan (°C)

IP = Indeks panas

- 3) Menghitung evapotranspirasi potensial belum terkoreksi (PET_0) berdasarkan jumlah bulan standar, yakni 30 hari dengan penyinaran selama 12 jam.

$$PET_0 = c \times \left(\frac{10T}{\sum IP} \right)^a \quad \text{Persamaan 3.2}$$

Keterangan

c = Koefisien permeabilitas

= 1,62 (untuk PET dengan satuan mm) (Rohwer, 1931)

T = Temperatur rata-rata bulanan ($^{\circ}C$)

$a = (6,7 \times 10^{-8} \times IP^3) - (77,1 \times 10^{-6} \times IP^2) + (0,01792 \times IP) + 0,49239$

IP = Indeks panas

- 4) Mengkalibrasikan evapotranspirasi bulanan belum terkoreksi
Evapotranspirasi bulanan yang belum terkoreksi (PET_0) dikalibrasikan tergantung pada jumlah hari N dalam sebulan ($1 \leq N \leq 31$) dan durasi siang hari harian atau faktor lama penyinaran matahari (jam). Faktor lama penyinaran matahari dijadikan faktor koreksi (r) dan disesuaikan dengan posisi lintang geografis dari TPA. **Tabel 3.4** di bawah ini menunjukkan faktor lama penyinaran matahari.

Tabel 3.4 Faktor Lama Penyinaran

LS	Bulan											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	1,04	0,94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04
1	1,04	0,94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04
2	1,05	0,94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,02	1,05
3	1,05	0,95	1,04	1,01	1,03	1,00	1,03	1,04	1,01	1,05	1,02	1,05
4	1,06	0,95	1,04	1,00	1,03	1,00	1,03	1,03	1,00	1,05	1,03	1,06
5	1,06	0,95	1,04	1,00	1,02	0,99	1,02	1,03	1,00	1,05	1,03	1,06
6	1,06	0,95	1,04	1,00	1,02	0,99	1,02	1,03	1,00	1,05	1,03	1,06
7	1,07	0,96	1,04	1,00	1,02	0,98	1,02	1,03	1,00	1,05	1,04	1,07
8	1,07	0,96	1,05	1,00	1,02	0,98	1,01	1,02	1,00	1,06	1,04	1,08
9	1,08	0,97	1,05	0,99	1,01	0,97	1,01	1,02	1,00	1,06	1,05	1,09
10	1,08	0,97	1,05	0,99	1,01	0,96	1,00	1,01	1,00	1,06	1,05	1,1

(Sumber: Mahbub, 2006)

5) Menghitung nilai evapotranspirasi potensial terkoreksi

Evapotranspirasi potensial terkoreksi didapatkan dengan mengalikan nilai evapotranspirasi potensial belum terkoreksi dengan faktor koreksi. Persamannya adalah sebagai berikut

$$PET = PET_o \times r \quad \text{Persamaan 3.3}$$

Keterangan:

r = Faktor lama penyinaran matahari

PET = Evapotranspirasi potensial terkoreksi (mm)

6) Menentukan nilai *run off* (limpasan)

Nilai *run off* dapat dihitung dengan memperhatikan koefisien *run off*. Koefisien *run off* dari beberapa jenis permukaan tanah dapat dilihat pada **Tabel 3.5** berikut.

Tabel 3.5 Koefisien Run Off

Tipe Daerah Aliran	Jenis Tanah	Kemiringan	Nilai C
Lahan terbuka	Tanah pasir	Datar, 2%	0,05–0,10
		Landai, 2–7%	0,10–0,15
		Curam, 7%	0,15–0,20
	Tanah liat	Datar, 2%	0,13–0,17
		Landai, 2–7%	0,18–0,22
		Curam, 7%	0,25–0,35

(Sumber: Subarkah, 1980)

Nilai *run off* dapat dihitung dengan persamaan berikut,

$$Ro = P \times Cro \quad \text{Persamaan 3.4}$$

Keterangan:

Ro = *Run off* (mm)

P = Presipitasi atau curah hujan bulanan (mm)

Cro = Koefisien *run off*

7) Menghitung nilai infiltrasi

Nilai infiltrasi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut,

$$I = P - Ro \quad \text{Persamaan 3.5}$$

Keterangan:

I = Infiltrasi (mm)

- 8) Menghitung kapasitas tanah dalam menyimpan air/*water holding capacity* (WHC)

$$WHC = I - PET \quad \text{Persamaan 3.6}$$

- 9) Menghitung *accumulation potential water loss* 'akumulasi potensi kehilangan air tanah' (APWL)

Nilai APWL dapat ditentukan dengan hal berikut,

- Untuk bulan-bulan basah atau $I > PET$, nilai APWL sama dengan nol,
- Untuk bulan-bulan kering atau ketika nilai $I < PET$, nilai APWL didapat dengan mengakumulasikan nilai selisih ($I - PET$) setiap bulan dengan nilai ($I - PET$) pada bulan sebelumnya.

- 10) Menghitung *soil moisture storage* 'kelangasan tanah' (ST)

Soil moisture storage adalah banyaknya air pada tanah yang tersimpan pada saat kesetimbangan. Ketebalan tanah penutup terakhir dan jenis tanah menentukan nilai dari ST. **Tabel 3.6** di bawah ini menunjukkan kelangasan berbagai jenis tanah.

Tabel 3.6 Kelangasan Tanah (mm Air per m Tanah)

Tipe Tanah	Kapasitas Lapang	Wilting Point	Ketersediaan Air (mm/m)
<i>Fine sand</i>	120	20	100
<i>Sandy loam</i>	200	50	150
<i>Silty loam</i>	300	100	200
<i>Clay loam</i>	375	125	250
<i>Clay</i>	450	150	300

(Sumber: Thornthwaite dan Mather, 1957)

Nilai dari *soil moisture storage* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan,

$$ST = \text{available water} \times \text{ketebalan tanah} \quad \text{Persamaan 3.7}$$

Setelah didapatkan nilai ST awal, dilakukan penentuan nilai $\Sigma \text{NEG} (I - \text{PET})$ dengan menggunakan tabel penyimpanan air dalam kapasitas lapang tanah (Fenn dkk., 1975a).

11) Menentukan *actual evapotranspiration* (AET)

Actual evapotranspiration menyatakan banyaknya air yang hilang dari bulan ke bulan. Nilai AET didapatkan dengan,

a) Apabila nilai $I > \text{PET}$, nilai $\text{AET} = \text{PET}$

b) Apabila nilai $I < \text{PET}$, nilai $\text{AET} = I - \Delta \text{ST}$ Persamaan 3.8

12) Menentukan *percolation* (PERC)

a) Apabila $I > \text{PET}$, nilai perkolasi dapat ditentukan dengan persamaan $\text{Perc} = I - \text{PET} - \Delta \text{ST}$ Persamaan 3.9

b) Apabila $I < \text{PET}$, nilai $\text{Perc} = 0$

13) Melakukan pengecekan

Untuk melakukan uji terhadap hasil yang telah didapatkan, digunakan persamaan

$$P = \text{Perc} + \text{AET} + \Delta \text{ST} + \text{Ro} \quad \text{Persamaan 3.10}$$

c. Pemilihan Alternatif Unit Instalasi Pengolahan Lindi

Setelah diketahui kualitas dari lindi TPA Mrican, diberikan empat alternatif instalasi pengolahan lindi untuk dijadikan bahan pertimbangan. Setiap alternatif terdiri dari kombinasi unit pengolahan secara fisik-kimia dan biologis. Satu dari empat alternatif instalasi pengolahan lindi tersebut kemudian akan dipilih atau ditetapkan untuk direncanakan. Pemilihan satu dari keempat alternatif tersebut didasarkan pada metode AHP (*Analytical Hierarchy Process*) dengan menggunakan pertimbangan *removal efficiency* 'efisiensi penyisihan' polutan yang telah ditetapkan (TSS, COD, BOD, total nitrogen, kadmium, dan merkuri), kebutuhan lahan, biaya pembangunan, dan operasional pemeliharaan.

d. Penetapan Kriteria Desain dan Perhitungan Dimensi setiap Unit Instalasi Pengolahan Lindi

Penetapan dimensi setiap unit instalasi pengolahan lindi didasarkan pada kriteria desain yang diperoleh dari beberapa sumber referensi. Dimensi dari setiap unit yang akan dihitung terdiri dari beberapa komponen yang di antaranya adalah kedalaman, panjang dan lebar dari setiap unit.

e. Penggambaran *Detail Engineering Design* (DED)

Setelah dimensi dari setiap unit instalasi pengolahan dan pipa pengumpul lindi ditetapkan, dilakukan penggambaran *detail engineering design* menggunakan aplikasi AutoCAD. DED yang akan digambar terdiri dari gambar:

- 1) *Layout* instalasi pengolahan lindi;
- 2) Denah rangkaian instalasi pengolahan lindi;
- 3) Potongan melintang dan memanjang dari setiap unit; dan
- 4) Profil hidrolis.

f. Perhitungan BOQ dan RAB

Digunakan acuan Standar Harga Satuan Tertinggi (SHST) dan Harga Satuan Bahan Bangunan Konstruksi Pemerintah Kabupaten Ponorogo Tahun Anggaran 2023 untuk menghitung BOQ dan RAB dari perencanaan instalasi pengolahan lindi TPA Mrican ini. Perhitungan BOQ dan RAB dilakukan dengan menggunakan bantuan Microsoft Excel dengan langkah-langkah sebagai berikut,

- 1) Mencatat daftar harga satuan dasar material dan alat yang digunakan beserta upah para pekerjanya pada *sheet 1*,
- 2) Membuat analisis harga satuan pekerjaan (AHSP) berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 1 Tahun 2022 tentang Pedoman Penyusunan Perkiraan Biaya Pekerjaan Konstruksi Bidang Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat pada *sheet 2*,
- 3) Membuat rekapitulasi AHSP pada *sheet 3*,
- 4) Menghitung kuantitas atau volume dari setiap pekerjaan pada *sheet 4*,

5) Mengkalkulasikan AHSP dengan kuantitas pekerjaan menjadi rencana anggaran biaya pada *sheet 5*.

g. Pembuatan Standar Operasional Prosedur

Tahap terakhir dari perencanaan ini adalah pembuatan standar operasional prosedur untuk pengoperasionalan dan pemeliharaan dari setiap unit instalasi pengolahan lindi yang telah direncanakan. Buku 3 Pedoman Standar Operasional Prosedur (SOP) UPTD Pengelola Air Limbah Domestik (SOP Aset Operasi) digunakan sebagai acuan untuk membuat standar operasional prosedur dari unit-unit instalasi pengolahan lindi yang direncanakan.

3.5.4 Penyusunan Laporan

Setelah dilakukan pengumpulan dan penganalisisan data, disusunlah hasil dari pengolahan data-data tersebut menjadi suatu laporan yang utuh sehingga tujuan dari penelitian ini dapat terlihat ketercapaiannya.

3.6 Integrasi Keislaman

Penelitian ini dilaksanakan secara bertahap mulai dari tahap persiapan hingga penyusunan proposal. Kegiatan-kegiatan yang dilakukan pada penelitian ini pun memerlukan waktu untuk menggali dasar-dasar atau ilmu yang diperlukan untuk pelaksanaan kegiatan pada beberapa tahapan penelitian. Tahapan-tahapan penelitian ini diharapkan dapat dilaksanakan secara runut, konsisten, dan tidak terburu-buru sehingga didapatkan hasil yang maksimal. Sebagaimana perkataan seorang ulama di masa tabi'in, yakni Ibnu Syihab Az-Zuhri,

من رام العلم جملة ذهب عنه جملة وإنما العلم يطلب على مرّ الأيام والليالي

Artinya: "Siapa yang terburu-buru meraih ilmu dalam jumlah banyak sekaligus, maka akan hilang dalam jumlah banyak pula. Yang namanya ilmu dicari siang demi siang dan malam demi malam." (Riwayat Ibnu 'Abdil Barr dalam kitab Al Jaami")

BAB IV

GAMBARAN UMUM WILAYAH PERENCANAAN

4.1 Profil TPA Mrican

Tempat pembuangan akhir (TPA) sampah Mrican merupakan tempat terakhir dilakukannya kegiatan pengisolasian sampah di Kabupaten Ponorogo. TPA ini didirikan pada tahun 1995 dengan lahan seluas 17.772 m² di Desa Mrican, Kecamatan Jenangan, Kabupaten Ponorogo, Provinsi Jawa Timur. Metode pembuangan sampah yang awalnya diterapkan pada TPA ini adalah *open dumping*. Kemudian, dilakukan revitalisasi terhadap TPA Mrican pada tahun 2008 setelah diterbitkannya Undang-Undang Persampahan Nomor 18 Tahun 2008 yang melarang penanganan sampah dengan pembuangan terbuka di TPA sehingga metode pembuangan sampah di TPA ini berubah menjadi *controlled landfill*.

Pada saat penjalanannya, meskipun telah diubah menjadi *controlled landfill*, pemrosesan sampah pada TPA ini masih dilakukan layaknya pada metode *open dumping*. Selain itu, TPA Mrican pun tidak dilengkapi dengan geomembran, pipa pengumpul dan penyalur lindi, pipa penangkap gas, dan instalasi pengolahan lindi. Untuk menanggulangi semakin tingginya tumpukan sampah dan mencegah terjadinya longsor, dibangun talud yang mengelilingi *site* atau zona penimbunan sampah.

4.2 Kondisi Geografis TPA Mrican

Secara geografis, TPA Mrican terletak pada 111°31'33,9" - 111°40' bujur timur (BT) dan 7°21' - 7°51' lintang selatan (LS). Batas-batas wilayah TPA Mrican adalah sebagai berikut:

Batas utara : Sungai Kedungwaduk

Batas timur : Jalan lingkungan sekunder

Batas selatan : Ladang jagung

Batas barat : Sawah

Jarak lokasi TPA dengan pemukiman terdekat sekitar ± 55,23 m. Sementara itu, jarak antara zona penimbunan dengan permukiman terdekat sekitar ± 95,57 m.

4.3 Keadaan Iklim TPA Mrican

Tabel 4.1 di bawah ini merupakan data temperatur rata-rata bulanan Kabupaten Ponorogo tahun 2013–2022.

Tabel 4.1 Temperatur Rata-Rata Bulanan Kabupaten Ponorogo Tahun 2013–2022

Tahun	Temperatur Rata-Rata Bulanan (°C)											
	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agust	Sept	Okt	Nov	Des
2013	23,8	23,2	23,9	24,3	24,7	24,4	23,2	23,6	24,3	25,4	24,1	23,4
2014	22,4	22,9	23,5	23,7	24,4	24,1	23,3	23,4	24,2	25,7	25,7	23,5
2015	23,4	23,0	23,4	23,7	23,7	23,9	23,0	23,4	24,4	25,7	26,1	24,3
2016	24,3	23,4	24,3	24,6	24,6	23,9	23,8	23,6	24,2	24,2	24,1	24,0
2017	23,4	23,2	23,6	23,8	24,2	23,9	23,6	23,7	24,7	25,2	24,0	23,8
2018	23,5	23,3	23,5	24,7	24,7	24,2	23,7	23,4	25,2	26,3	25,9	24,4
2019	24,0	23,7	23,5	24,3	24,7	23,9	23,4	23,7	24,7	26,8	26,9	25,5
2020	24,5	23,7	24,3	24,4	24,6	24,1	23,7	24,4	25,6	25,6	25,3	23,5
2021	23,1	23,0	23,6	24,1	24,4	23,9	23,8	24,6	25,1	26,0	24,0	24,1
2022	23,7	23,4	23,8	23,9	24,4	23,7	23,7	23,9	25,1	24,1	24,1	24,0
Rata-Rata	23,6	23,3	23,7	24,1	24,4	24,0	23,5	23,8	24,7	25,5	25,0	24,0

(Sumber: Badan Pusat Statistik Kabupaten Ponorogo, 2013-2022)

TPA Mrican terletak pada Kecamatan Jenangan. Kecamatan Jenangan memiliki Stasiun Penakar Hujan Bollu untuk mengukur curah hujan di daerah tersebut. **Tabel 4.2** di bawah ini menunjukkan curah hujan yang diukur di Stasiun Penakar Hujan Bollu pada tahun 2013–2022.

Tabel 4.2 Curah Hujan Bulanan Kecamatan Jenangan 2013–2022

Tahun	Curah Hujan Bulanan (mm)											
	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agust	Sept	Okt	Nov	Des
2013	435	239	226	197	210	214	150	0	0	63	177	299
2014	197	56	260	172	0	15	0	0	0	12	289	299
2015	269	427	188	402	75	8	0	0	0	0	177	209
2016	200	357	206	371	119	80	190	152	267	119	302	153
2017	209	396	348	306	102	75	18	0	75	23	432	224
2018	328	283	202	210	1	26	0	0	0	33	467	218
2019	305	369	445	130	18	0	0	0	0	0	37	343
2020	220	297	334	59	61	31	25	37	2	107	289	418
2021	268	544	126	177	47	232	10	0	31	50	415	243
2022	294	158	437	191	236	158	14	15	54	421	430	170
Rata-Rata	272,5	312,6	277,2	221,5	86,9	83,9	40,7	20,4	42,9	82,8	301,5	257,6

(Sumber: Stasiun Penakar Hujan Bollu)

4.4 Sarana dan Prasarana TPA Mrican

TPA Mrican memiliki beberapa fasilitas sarana dan prasarana yang meliputi fasilitas umum, penunjang, dan pengoperasian.

a. Fasilitas Umum

Fasilitas umum TPA Mrican meliputi jalan masuk, papan nama berupa gapura seperti pada **Gambar 4.1**, bangunan penunjang (kantor pengelola, kamar mandi, gudang, dan garasi) seperti pada **Gambar 4.2**, dan drainase.



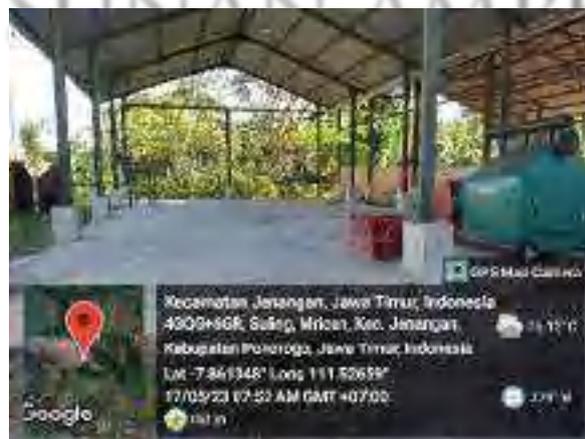
Gambar 4.1 Gapura TPA Mrican



Gambar 4.2 Bangunan Penunjang

b. Fasilitas Penunjang

Fasilitas penunjang TPA Mrican meliputi air bersih, hanggar kompos seperti pada **Gambar 4.3**, dan jembatan timbang seperti pada **Gambar 4.4**.



Gambar 4.3 Hanggar Kompos TPA Mrican



Gambar 4.4 Jembatan Timbang TPA Mrican

(Sumber: Dokumen TPA Mrican, 2022)

c. Fasilitas Pengoperasian

Untuk mengolah gundukan sampah yang ada, TPA Mrican memiliki satu unit excavator, satu unit bulldozer, enam unit truk armroll, tiga unit dump truck, dan satu unit pick up roda tiga.



Gambar 4.5 Excavator TPA Mrican



Gambar 4.6 Motor Roda Tiga TPA Mrican



Gambar 4.7 Bulldozer TPA Mrican



Gambar 4.8 Armroll TPA Mrican



Gambar 4.9 Dump Truck TPA Mrican

4.5 Sumber dan Timbulan Sampah

TPA Mrican menerima sampah yang dihasilkan dari aktivitas penduduk Kabupaten Ponorogo. Kabupaten Ponorogo sendiri terdiri dari 21 Kecamatan. **Tabel 4.3** di bawah ini menunjukkan, rata-rata sampah yang masuk ke TPA Mrican sejak tahun 2013 hingga 2022.

Tabel 4.3 Data Timbulan Sampah TPA Mrican

Tahun	Sampah Masuk TPA Mrican	
	Jumlah per Hari	Jumlah per Bulan
2013	119,554 kg/hari	1.434,658 kg/bulan
2014	127,321 kg/hari	1.527,857 kg/bulan
2015	129,513 kg/hari	1.554,160 kg/bulan
2016	134,474 kg/hari	1.613,690 kg/bulan
2017	140,223 kg/hari	1.682,680 kg/bulan
2018	145,594 kg/hari	1.747,133 kg/bulan
2019	151,171 kg/hari	1.814,055 kg/bulan
2020	149,573 kg/hari	1.794,881 kg/bulan
2021	157,976 kg/hari	1.895,715 kg/bulan
2022	164,027 kg/hari	1.968,328 kg/bulan

(Sumber: UPTD Pengelolaan Sampah Kabupaten Ponorogo)

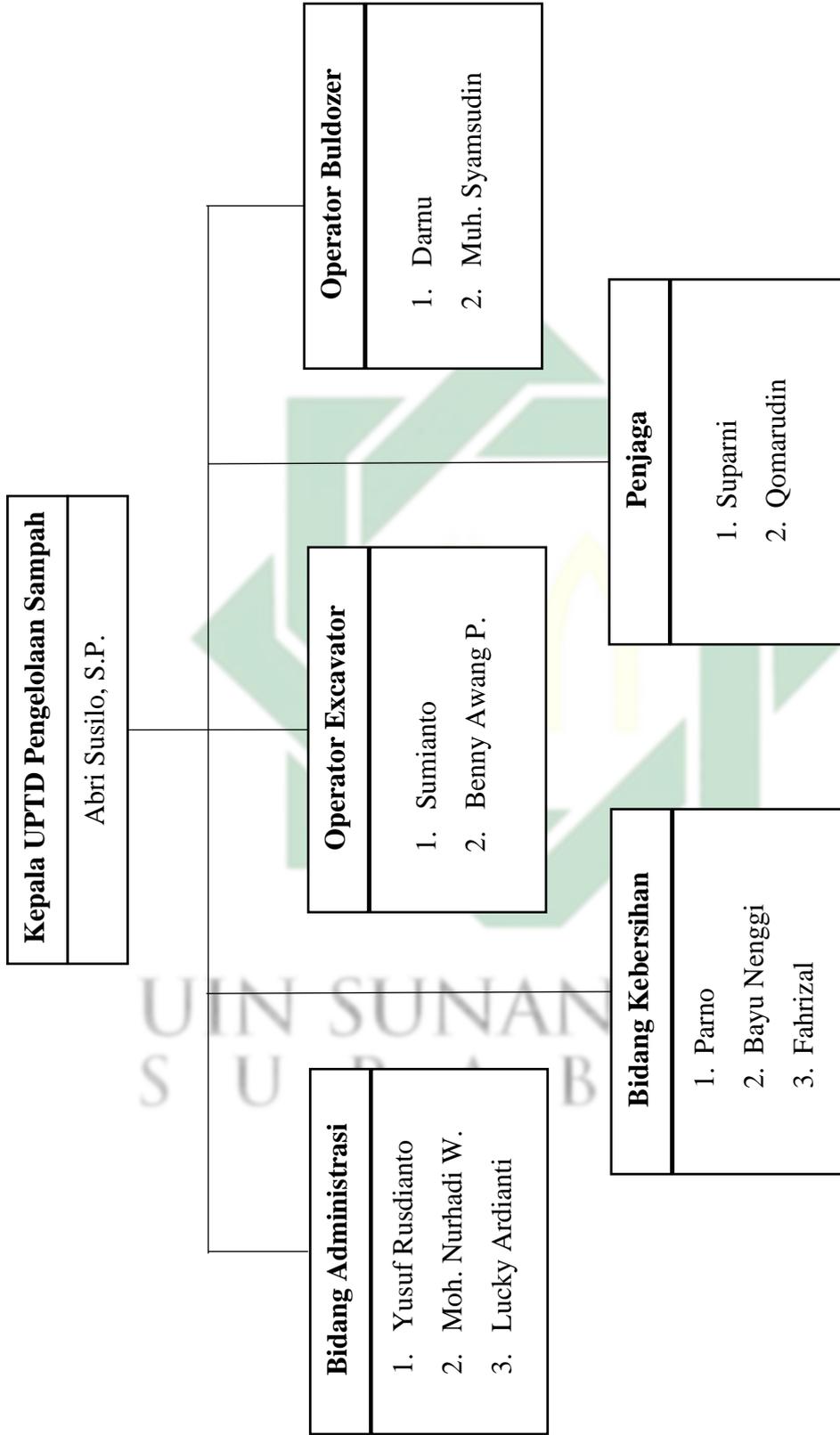
4.6 Kelembagaan TPA Mrican

TPA Mrican dikelola oleh Unit Pelaksana Teknis Daerah (UPTD) bidang pengelolaan sampah yang dinaungi oleh Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kabupaten Ponorogo. TPA Mrican dipimpin oleh kepala UPTD pengelolaan sampah yang bertanggung jawab langsung kepada kepala Dinas Lingkungan Hidup. Selain itu, pada UPTD TPA Mrican juga terdapat beberapa kelompok jabatan fungsional yang meliputi bidang administrasi, kebersihan, operator

kendaraan berat, dan penjaga. Susunan organisasi dari TPA Mrican dapat dilihat pada **Gambar 4.10**.

UPTD pengelolaan sampah memiliki tugas pokok dan fungsi sebagai berikut:

- a. Menyusun rencana program dan rencana kerja anggaran di bidang TPA Sampah;
- b. Pelaksanaan kebijakan teknis TPA Sampah;
- c. Pelaksanaan operasional pelayanan kepada masyarakat di TPA Sampah;
- d. Pelaksanaan operasional dan pemeliharaan prasarana dan sarana TPA Sampah;
- e. Melaksanakan pengolahan sampah dan air lindi/*leachate* (instalasi pengolahan air limbah) di TPA Sampah;
- f. Melaksanakan kegiatan penghijauan dan pemeliharaan di lingkungan TPA Sampah;
- g. Menyiapkan bahan dalam rangka penyusunan program tetap (protap) pembuangan sampah, yang meliputi jam buang, pengaturan zona buangan dan pengaturan kendaraan masuk;
- h. Mengkoordinir pengamanan TPA Sampah;
- i. Mencatat, mengadministrasikan dan menimbang jumlah volume sampah yang masuk ke dalam TPA Sampah;
- j. Pelaksanaan pelayanan teknis administrasi ketatausahaan UPTD;
- k. Pelaksanaan pengadaan prasarana dan sarana penunjang pelaksanaan dan pemeliharaan TPA Sampah;
- l. Pelaksanaan monitoring, evaluasi dan pelaporan pelaksanaan kegiatan TPA Sampah; dan
- m. Pelaksanaan tugas-tugas lain yang diberikan oleh Kepala Dinas.

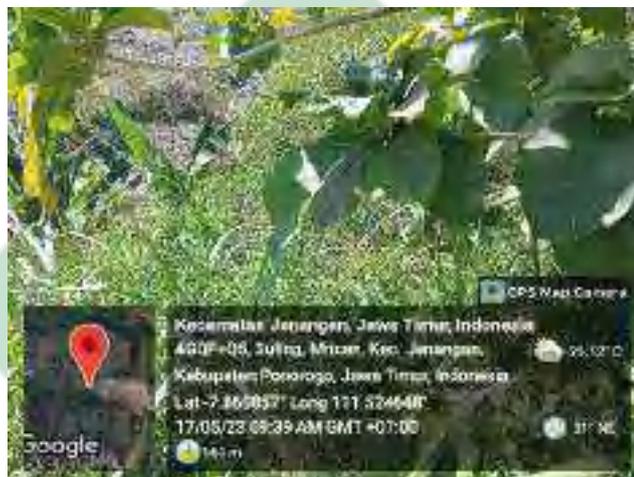


Gambar 4.10 Struktur Organisasi UPTD Pengelolaan Sampah Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Ponorogo

(Sumber: UPTD Pengelolaan Sampah Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Ponorogo, 2023)

4.7 Kondisi Eksisting Lokasi Rencana Peletakan Instalasi Pengolahan Lindi

Lokasi rencana peletakan instalasi pengolahan lindi untuk TPA Mrican memiliki elevasi yang lebih rendah dari lahan urug yakni 158-160 MDPL. Lokasi ini terletak di sisi bagian barat dari lahan urug. Luas dari lahan lokasi rencana peletakan tersebut sekitar $\pm 950 \text{ m}^2$. **Gambar 4.11** di bawah ini menunjukkan lokasi rencana untuk pembangunan instalasi pengolahan lindi TPA Mrican.



Gambar 4.11 Lokasi Rencana Peletakan Instalasi Pengolahan Lindi

UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A

BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Analisis Kualitas Air Lindi

Sebelum melakukan perencanaan instalasi pengolahan lindi untuk TPA Mrican, perlu dilakukan analisis kualitas dari air lindi TPA tersebut. Lindi didapatkan dari pipa pengaliran lindi TPA Mrican, tepatnya pada titik koordinat $7^{\circ}51'39,3''$ LS ($-7,8609167$ S) dan $111^{\circ}31'35,1''$ BT ($111,5264167$ E). **Gambar 5.1** dan **Gambar 5.2** menunjukkan proses pengambilan sampel lindi.



Gambar 5.1 Pengambilan Sampel Lindi



Gambar 5.2 Pengawetan Sampel Lindi

Analisis BOD, COD, TSS, total N dilakukan di Laboratorium Pengujian dan Kalibrasi Badan Standardisasi dan Kebijakan Jasa Industri Balai Standardisasi dan Pelayanan Jasa Industri Surabaya. Analisis cadmium (Cd) dan merkuri (Hg) dilakukan di Laboratorium Genau Lab. Kedua laboratorium tersebut telah terakreditasi oleh Komite Akreditasi Nasional (KAN). Sementara itu, analisis pH dari air lindi dilakukan secara langsung atau insitu di lapangan. Pengalisan pH dilakukan menggunakan pH meter dan kertas pengukur pH seperti terlihat pada **Gambar 5.3** dan **Gambar 5.4**. Metode analisis yang digunakan untuk pengujian kadar BOD pada air lindi TPA Mrican adalah SNI 6989.72 : 2009. Kemudian untuk kadar COD dianalisis dengan SNI 6989.2 :

2019. TSS dianalisis menggunakan metode SNI 6989.3:2019. Total N dianalisis menggunakan metode titrimetri. Kadmium dianalisis menggunakan SNI 6989-82:2018. Sementara itu, merkuri atau raksa (Hg) dianalisis menggunakan metode APHA 3125 B-2017.



Gambar 5.3 Pengujian pH Lindi



Gambar 5.4 Pengujian pH Lindi

Dari hasil analisis yang ditunjukkan pada **Tabel 5.1**, diketahui bahwa air lindi TPA Mrican masih memenuhi serta baku mutu untuk paramater pH dan kandungan logam yang meliputi kadmium (Cd) dan raksa (Hg). Sementara itu, untuk kandungan *biological oxygen demand* (BOD), *chemical oxygen demand* (COD), *total suspended solid* (TSS), serta total nitrogen pada air lindi yang dihasilkan dari TPA Mrican masih melebihi standar baku mutu yang ditetapkan pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016.

Tabel 5.1 Hasil Analisis Kualitas Lindi

Parameter	Satuan	Hasil Pemeriksaan	Baku Mutu	Metode Pemeriksaan	Keterangan
pH	-	8,0	6,0 – 9,0	QI/LKA/08 (Elektrometri)	Memenuhi
BOD	mg/L	2.473	150	SNI 6989.72 : 2009	Tidak Memenuhi
COD	mg/L	15.561	300	SNI 6989.2 : 2019	Tidak Memenuhi
TSS	mg/L	104	100	SNI 6989.3:2019	Tidak Memenuhi
Total N	mg/L	4.257	60	Titrimetri	Tidak Memenuhi
Kadmium (Cd)	mg/L	<0,0072	0,1	SNI 6989-82:2018	Memenuhi
Merkuri (Hg)	mg/L	<0,0008	0,005	APHA 3125 B-2017	Memenuhi

Keterangan:

Memenuhi : Tidak melebihi baku mutu

Tidak Memenuhi : Melebihi baku mutu

Hasil analisis di atas menunjukkan bahwa pH dari lindi TPA Mrican, baik saat diukur secara *in situ*, maupun di laboratorium menunjukkan nilai 8 yang berarti air lindi tersebut bersifat basa. Nilai pH pada air limbah dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya adalah bahan kimia yang terkandung (Listyaningrum, 2022). Menurut Supriatna dkk. (2020), konsentrasi CO₂ pada air memengaruhi pH. Pada siang hari, saat terjadi fotosintesis, konsentrasi CO₂ akan turun dan mengakibatkan peningkatan pH pada air tersebut. Sementara itu, pH akan mengalami penurunan pada malam hari di saat organisme-organisme dalam air melepaskan CO₂. Selain itu, lindi yang dihasilkan pada periode awal pengendapan sampah (hingga TPA berumur 5 tahun) memiliki pH 3,7-6,5 yang menandakan adanya asam karboksilat dan ion bikarbonat. Seiring waktu, lindi menjadi netral atau basa lemah (pH 7,0-7,6). Kemudian, pada *mature landfill* lindi biasanya bersifat basa (pH 8,0-8,5) (Słomczyńska & Słomczyński, 2004). Lindi TPA Mrican yang menunjukkan angka 8 menandakan bahwa pH air lindi masih memenuhi baku mutu.

Sementara itu, COD dan BOD lindi TPA Mrican melebihi baku mutu karena nilainya yang mencapai 15.561 mg/L untuk COD dan 2.473 mg/L untuk BOD. Rasio antara BOD dan COD (BOD/COD) pada TPA Mrican menunjukkan nilai 0,16. Hal tersebut sesuai dengan teori yang dikemukakan oleh Tchobanoglous & Kreith (2002) bahwa TPA yang berusia lebih dari 10 tahun memiliki rasio BOD/COD kurang dari 0,3. Kemudian, TSS air lindi TPA Mrican yang bernilai 104 mg/L sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Wdowczyk & Szymańska-Pulikowska (2021) yang menjelaskan bahwa TSS pada TPA tua bernilai < 400 mg/L.

Kadar Total-N yang tinggi pada lindi TPA Mrican, yakni 4.257 mg/L sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Zakaria & Aziz (2018) yang menunjukkan bahwa lindi pada TPA tua (telah beroperasi lebih dari 10 tahun) memiliki karakteristik yang stabil. Lindi berada dalam kondisi metanogenik karena memiliki nilai pH, amoniak yang tinggi dan kisaran COD, TDS dan BOD₅/COD yang lebih rendah dari TPA muda. Fase metanogenik merupakan fase ketiga dalam degradasi anaerobik yang dipercepat oleh bakteri metanogenik dan menghasilkan konsentrasi gas metana yang tinggi. Pada tahap

ini, konsentrasi asam lemak volatil rendah, sehingga menyebabkan kenaikan pH dan nilai COD, BOD₅/COD yang lebih rendah. Keberadaan amoniak dalam lindi dapat memberikan dampak negatif terhadap lingkungan. Amonia sendiri dihasilkan dari hidrolisis dan fermentasi nitrogen yang terjadi pada lindi TPA yang distabilkan (fase metanogenik).

Konsentrasi kadmium TPA Mrican menunjukkan nilai <0,0072 dan merkuri <0,0008. Kedua nilai tersebut masih dibawah standar baku mutu yang ditetapkan pada PermenLHK No. 59 Tahun 2016. Salah satu faktor yang diperkirakan memengaruhi konsentrasi logam pada lindi TPA adalah usia suatu TPA. Dengan semakin bertambahnya usia TPA, logam yang terkandung pada lindi yang dihasilkannya akan semakin berkurang (Wdowczyk & Szymańska-Pulikowska, 2021).

5.2 Analisis Perkiraan Debit Lindi

Debit lindi dapat diperkirakan menggunakan metode thornthwaite. Adapun langkah-langkah perhitungan debit lindi menggunakan metode thornthwaite adalah sebagai berikut:

a. Menghitung Indeks Panas Bulanan (IP)

Indeks panas bulanan dihitung menggunakan Persamaan 3.1 dan data temperatur Kabupaten Ponorogo yang telah dihitung rata-rata untuk setiap bulannya. Contoh perhitungan indeks panas untuk bulan Februari adalah sebagai berikut,

Diketahui:

Temperatur rata-rata bulan Februari = 23,3°C

Dihitung nilai indeks panas untuk bulan Februari:

$$\begin{aligned} IP &= \sum_{T=0}^{12} \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514} \\ &= \sum_{T=0}^{12} \left(\frac{23,3^{\circ}\text{C}}{5} \right)^{1,514} \\ &= 10,27 \end{aligned}$$

Tabel 5.2 Temperatur Rata-Rata Bulanan dan Indeks Panas

Bulan	Temperatur Rata-Rata Bulanan (°C)	Indeks Panas
Januari	23,6	10,49
Februari	23,3	10,27
Maret	23,7	10,57
April	24,1	10,85
Mei	24,4	11,05
Juni	24,0	10,74
Juli	23,5	10,43
Agustus	23,8	10,59
September	24,7	11,26
Oktober	25,5	11,79
November	25,0	11,44
Desember	24,0	10,78
Total	289,8	130,244427338988

b. Menghitung Potensial Evapotranspirasi (PET_0)

Potensial evapotranspirasi dihitung menggunakan Persamaan 3.2. Pada perhitungan ini digunakan jumlah total dari indeks panas bulanan, yakni 130,244427338988. Di bawah ini merupakan contoh perhitungan PET_0 untuk bulan Februari.

Diketahui:

$$IP = 130,244427338988$$

$$\text{Temperatur rata-rata bulan Februari} = 23,3^\circ\text{C}$$

$$\text{Nilai koefisien } c = 16,2 \text{ (Rohwer, 1931)}$$

Menghitung nilai a:

$$\begin{aligned} a &= (6,75 \times 10^{-8} \times IP^3) - (77,1 \times 10^{-6} \times IP^2) + (0,01792 \times IP) + 0,49239 \\ &= \{0,000000675 \times ((130,244427338988)^3)\} - \{0,0000771 \times ((130,244427338988)^2)\} + \{0,01792 \times 130,244427338988\} + 0,49239 \\ &= \{0,000000675 \times 2209415,78113233\} - \{0,0000771 \times 16963,610852861\} + \{0,01792 \times 130,244427338988\} + 0,49239 \\ &= 1,49135565226432 - 1,30789439675558 + 2,333980138 + 0,49239 \\ &= 3,00983139342340 \\ &\approx 3,0098 \end{aligned}$$

Menghitung nilai potensial evapotranspirasi belum terkoreksi bulan Februari:

Setelah didapatkan nilai a, dicari nilai potensial evapotranspirasi. Di bawah ini merupakan contoh perhitungan potensial evapotranspirasi untuk bulan Februari.

$$PET_0 = c \times \left(\frac{10 T}{\sum IP} \right)^a$$

dengan c merupakan koefisien permeabilitas dengan nilai 1,62

$$\begin{aligned} PET_0 &= 1,62 \times \left(\frac{10 (23,3^\circ C)}{130,244427338988} \right)^{3,0098} \\ &= 9,304 \text{ cm} = 93,04 \text{ mm} \end{aligned}$$

Didapatkan nilai potensial evapotranspirasi belum terkoreksi (PET_0) untuk bulan Februari sebesar 93,04 mm. Untuk nilai PET_0 selengkapnya dapat dilihat pada **Tabel 5.4**.

c. Menentukan Faktor Koreksi

Faktor koreksi ditentukan menggunakan lama penyinaran matahari. TPA Mrican terletak pada titik koordinat $7^\circ 51' 39,3''$ LS ($-7,8609167$ S) dan $111^\circ 31' 35,1''$ BT ($111,5264167$ E). Digunakan interpolasi dengan menggunakan lama penyinaran matahari pada Tabel 3.6 untuk mengetahui faktor koreksi untuk lokasi TPA Mrican. Pada garis lintang, TPA Mrican terletak pada $-7,8609167$ S sehingga faktor koreksi untuk bulan Februari adalah sebagai berikut

$$\begin{array}{ll} x &= 7,8609167 & y &= f_{\text{Februari}} \\ x_1 &= 7 & y_1 &= 0,96 \\ x_2 &= 8 & y_2 &= 0,96 \end{array}$$

sehingga

$$\begin{aligned} y &= y_1 + \frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} (y_2 - y_1) \\ &= 0,96 + \frac{(7,8609167 - 7)}{(8 - 7)} (0,96 - 0,96) \\ &= 0,96 \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas didapatkan faktor koreksi untuk bulan Februari adalah 0,96. Untuk faktor koreksi bulan Januari dan lainnya dapat dilihat pada **Tabel 5.4**.

d. Menghitung Potensial Evapotranspirasi Terkoreksi (PET)

Untuk melakukan kalibrasi terhadap nilai potensial evapotranspirasi atau untuk mendapatkan nilai potensial evapotranspirasi terkoreksi, digunakan Persamaan 3.3. Di bawah ini merupakan contoh perhitungan potensial evapotranspirasi terkoreksi untuk bulan Februari.

Diketahui

$$PET_0 \text{ bulan Februari} = 93,04$$

$$r \text{ bulan Februari} = 0,96$$

Menghitung nilai potensial evapotranspirasi terkoreksi bulan Februari

$$\begin{aligned} PET &= PET_0 \times r_{\text{Februari}} \\ &= 93,04 \text{ mm} \times 0,96 \\ &= 89,32 \text{ mm} \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas didapatkan nilai potensial evapotranspirasi terkoreksi untuk bulan Februari adalah 89,32 mm. Nilai evapotranspirasi terkoreksi untuk bulan lainnya dapat dilihat pada **Tabel 5.4**.

e. Koefisien Run-Off

Menurut Damanhuri dkk. (2006), ketebalan lapisan tanah penutup reguler (antara atau harian) minimal 30 cm untuk *sanitary landfill* dan 20 cm untuk *controlled landfill*. Pada TPA Mrican, digunakan lapisan tanah jenis *sandy loam* (tanah lempung berpasir) sebagai penutup regular dengan ketebalan 40 cm (DLH Kabupaten Ponorogo, 2023). Lokasi TPA Mrican memiliki tanah yang cukup landai. Berdasarkan hal tersebut, menurut **Tabel 3.5** dapat diambil koefisien run off sebesar 0,15.

f. Air Larian Bulanan (*Run Off*)

Nilai *run off* dapat dihitung dengan mengalikan presipitasi atau rata-rata hujan bulanan seperti yang tertera pada Tabel 4.2 dengan koefisien *run*

off. Di bawah ini merupakan contoh perhitungan untuk *run off* pada bulan Februari.

Diketahui

Rata-rata hujan bulan Februari= 312,6 mm

Koefisien run off = 0,15

Menghitung nilai run off bulan Februari

$$\begin{aligned} R_o &= P \times C_{ro} \\ &= 312,6 \text{ mm} \times 0,15 \\ &= 46,89 \text{ mm} \end{aligned}$$

Nilai *run off* selengkapnya dapat dilihat pada **Tabel 5.4**.

g. Infiltrasi (I)

Nilai infiltrasi merupakan perkiraan banyaknya air hujan yang masuk ke dalam tanah. Digunakan Persamaan 3.5 untuk menghitung nilai infiltrasi. Di bawah ini merupakan contoh perhitungan infiltrasi untuk bulan Februari.

Diketahui

Rata-rata hujan bulan Februari= 312,6 mm

Run off bulan Februari = 46,89 mm

Menentukan nilai infiltrasi bulan Februari

$$\begin{aligned} I &= P \times R_o \\ &= 312,6 \times 46,89 \\ &= 265,71 \text{ mm} \end{aligned}$$

Didapatkan nilai infiltrasi untuk bulan Februari sebesar 265,71 mm. Nilai infiltrasi untuk bulan lainnya dapat dilihat pada **Tabel 5.4**.

h. Menentukan Kapasitas Tanah dalam Menyimpan Air (I – PET)

Kapasitas tanah dalam menyimpan air dapat diketahui dengan mengurangi infiltrasi dengan potensial evapotranspirasi seperti pada Persamaan 3.6. Di bawah ini merupakan contoh perhitungan kapasitas tanah dalam menyimpan air pada bulan Februari dan Mei.

Diketahui:

$$I_{\text{Februari}} = 265,71 \text{ mm} \qquad I_{\text{Mei}} = 73,87 \text{ mm}$$

$$PET_{\text{Februari}} = 89,32 \text{ mm}$$

$$PET_{\text{Mei}} = 109,82 \text{ mm}$$

Menghitung kapasitas tanah dalam menyimpan air bulan Februari dan Mei

$$\begin{aligned} WHC_{\text{Februari}} &= I_{\text{Februari}} - PET_{\text{Februari}} \\ &= 265,71 \text{ mm} - 89,32 \text{ mm} \\ &= 176,39 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} WHC_{\text{Mei}} &= I_{\text{Mei}} - PET_{\text{Mei}} \\ &= 73,87 \text{ mm} - 109,82 \text{ mm} \\ &= -35,95 \end{aligned}$$

Nilai negatif menyatakan banyaknya infiltrasi air yang gagal untuk dipasok pada tanah. Sedangkan nilai positif adalah kelebihan air selama periode tertentu untuk mengisi tanah.

i. Menentukan Nilai *Accumulation Potential Water Loss* (APWL)

APWL atau nilai negatif dari $(I - PET)$ merupakan kehilangan air secara kumulatif.

- 1) Untuk bulan-bulan basah atau $I > PET$ seperti pada bulan Januari – April, nilai APWL sama dengan nol,
- 2) Untuk bulan-bulan kering atau ketika nilai $I < PET$, nilai APWL didapat dengan mengakumulasikan nilai selisih $(I - PET)$ setiap bulan dengan nilai $(I - PET)$ pada bulan sebelumnya. Contoh perhitungan di bawah ini merupakan nilai APWL untuk bulan Juni.

$$\begin{aligned} APWL_{\text{Juni}} &= (I - PET)_{\text{Mei}} + (I - PET)_{\text{Juni}} \\ &= (-35,95) + (-28,44) \\ &= -64,39 \text{ mm} \end{aligned}$$

Nilai APWL selengkapnya dapat dilihat pada **Tabel 5.4**.

j. Menghitung *Soil Moisture Storage* (ST)

Soil moisture storage menunjukkan banyaknya air yang tersimpan pada tanah saat keseimbangan. Nilai yang dipakai disesuaikan dengan lapisan tanah penutup. Lapisan tanah penutup yang digunakan pada TPA Mrican berjenis *sandy loam* (lempung berpasir) dengan ketebalan 40 cm (DLH Kabupaten Ponorogo, 2023). Sehingga, berdasarkan **Tabel 3.6**, dapat dihitung nilai ST.

Diketahui

Available water untuk tanah jenis *sandy loam* = 150 mm/m

Ketebalan tanah = 40 cm = 0,4 m

Dihitung nilai soil moisture storage

ST = *available water* × ketebalan tanah

= 150 mm/m × 0,4 m

= 60 mm ≈ 100 mm

Pada perhitungan di atas didapatkan nilai ST adalah 60 mm, tetapi menurut buku *Use of the Water Balance Methode for Predicting Leachate Generation from Solid Waste Disposal Sites* oleh Fenn dkk. (1975), tabel Simpanan Air (*Soil Moisture Storage Tabel*) yang tersedia hanya 100mm, 125 mm, dan 150 mm. Oleh karena itu, 60 mm dijadikan 100 mm.

Selanjutnya, untuk bulan yang memiliki nilai APWL = 0, nilai ST pada bulan tersebut = 100 mm. Sementara itu, untuk bulan yang memiliki nilai APWL ≠ 0, nilai ST pada bulan tersebut ditentukan melalui **Tabel 5.3 Soil Moisture Storage/Retention** untuk *field capacity* 'kelangasan tanah' dengan nilai 100 berikut.

Tabel 5.3 Soil Moisture Retention at Field Capacity is 100 mm

ΣNeg (I-PET)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100	99	98	97	96	95	94	93	92	91
10	90	89	88	88	87	86	85	84	83	82
20	81	81	80	79	78	77	77	76	75	74
30	74	73	72	71	70	70	69	68	68	67
40	66	66	65	64	64	63	62	62	61	60
50	60	59	59	58	58	57	56	56	55	54
60	54	53	53	52	52	51	51	50	50	49
70	49	48	48	47	47	46	46	45	45	44
80	44	44	43	43	42	42	41	41	40	40
90	40	39	39	38	38	38	37	37	36	36
100	36	35	35	35	34	34	34	33	33	33
110	32	32	32	31	31	31	30	30	30	30
120	29	29	29	28	28	28	27	27	27	27
130	26	26	26	26	25	25	25	24	24	24

Σ Neg (I-PET)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
140	24	24	23	23	23	23	22	22	22	22
150	22	21	21	21	21	20	20	20	20	20
160	19	19	19	19	19	18	18	18	18	18
170	18	17	17	17	17	17	16	16	16	16
180	16	16	15	15	15	15	15	15	14	14
190	14	14	14	14	14	14	13	13	13	13
200	13	13	12	12	12	12	12	12	12	12
210	12	11	11	11	11	11	11	11	11	11
220	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
230	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
240	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
250	8	8	8	7	7	7	7	7	7	7
260	7	7	7	7	7	7	6	6	6	6
270	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
280	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5
290	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
300	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4
310	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
320	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
330	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
340	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
350	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2
360	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
370	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
380	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
390	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
400	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
410	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1
420	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
430	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
440	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
450	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
460	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
470	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
480	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
490	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Σ Neg (I-PET)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
500	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

(Sumber: Fenn dkk., 1975)

Sebagai contoh, untuk menentukan nilai ST pada bulan April dengan nilai APWL $-35,95 \approx -36$. Diketahui nilai APWL = -36 sehingga dapat dilihat pada **Tabel 5.3** baris 30 dan kolom 6 nilai ST = 69.

k. Menghitung Perubahan ST dari Bulan Terakhir (Δ ST)

Perubahan ST didapatkan dengan mengurangi nilai ST pada bulan bersangkutan dengan bulan sebelumnya. Di bawah ini merupakan contoh perhitungan nilai Δ ST bulan Mei.

$$\begin{aligned}\Delta ST_{\text{Mei}} &= ST_{\text{Mei}} - ST_{\text{April}} \\ &= 69 - 100 \\ &= -31\end{aligned}$$

Nilai perubahan ST untuk bulan lainnya dapat dilihat pada **Tabel 5.4.**

l. Menentukan Nilai *Actual Evapotranspiration* (AET)

1) Apabila nilai $I \geq PET$, nilai AET = PET

Contoh dalam hal ini adalah pada bulan Februari nilai infiltrasi ($I = 265,71$ mm) lebih besar dari nilai evapotranspirasi potensial terkoreksi ($PET = 89,32$ mm) sehingga,

$$\begin{aligned}AET_{\text{Februari}} &= PET_{\text{Februari}} \\ &= 89,32 \text{ mm}\end{aligned}$$

2) Apabila nilai $I < PET$, nilai AET = $I - \Delta$ ST

Contoh dalam hal ini adalah pada bulan Mei nilai infiltrasi ($I = 73,87$ mm) lebih kecil dari nilai evapotranspirasi potensial terkoreksi ($PET = 109,82$ mm) sehingga,

$$\begin{aligned}AET_{\text{Mei}} &= I_{\text{Mei}} - \Delta ST_{\text{Mei}} \\ &= 73,87 \text{ mm} - (-31 \text{ mm}) \\ &= 104,87 \text{ mm}\end{aligned}$$

Nilai AET selengkapnya dapat dilihat pada **Tabel 5.4.**

m. Menentukan Nilai Perkolasi (PERC)

Dalam menentukan nilai perkolasi, terdapat beberapa aturan berikut

- 1) Apabila $I > PET$, nilai perkolasi dapat ditentukan dengan persamaan

$$Perc = I - PET - \Delta ST$$

Contoh dalam hal ini adalah pada bulan Februari di mana nilai infiltrasi ($I = 265,71$ mm) yang lebih besar dari nilai potensial evapotranspirasi terkoreksi bulan Februari ($PET = 89,32$ mm), sehingga nilai perkolasi pada bulan Februari adalah sebagai berikut

$$\begin{aligned} Perc_{\text{Februari}} &= I_{\text{Februari}} - PET_{\text{Februari}} - \Delta ST_{\text{Februari}} \\ &= 265,71 \text{ mm} - 89,32 \text{ mm} - 0 \\ &= 176,39 \text{ mm} \end{aligned}$$

- 2) Apabila $I < PET$, nilai $Perc = 0$

Contoh dalam hal ini adalah pada bulan Mei di mana nilai infiltrasi ($I = 73,87$ mm) lebih kecil dari nilai evapotranspirasi potensial terkoreksi ($PET = 109,82$ mm), sehingga nilai Perkolasi pada bulan Mei adalah 0.

n. Pengecekan

Untuk memastikan ketepatan nilai-nilai yang telah dihitung, dilakukan pengecekan dengan menggunakan Persamaan 3.10. Contoh pengecekan untuk bulan Februari adalah sebagai berikut,

Diketahui

$$Perc = 176,39 \text{ mm}$$

$$AET = 89,32 \text{ mm}$$

$$\Delta ST = 0$$

$$Ro = 46,89 \text{ mm}$$

Sehingga,

$$\text{Kontrol} = Perc + AET + \Delta ST + Ro$$

$$= 176,39 \text{ mm} + 89,32 \text{ mm} + 0 + 46,89 \text{ mm}$$

$$= 312,6 \text{ mm}$$

Nilai 312,60 mm yang didapatkan dari perhitungan tersebut telah sama dengan nilai presipitasi atau curah hujan rata-rata pada bulan Februari sehingga perhitungan dinyatakan benar.

o. Penentuan Debit Lindi

Dari perhitungan nilai perkolasi, diketahui bahwa nilai perkolasi tertinggi terjadi pada bulan Februari, yakni sebesar 176,39 mm. Kemudian, diketahui bahwa luas lahan urug pada TPA Mrican adalah 12.250 m² (DLH Kabupaten Ponorogo, 2023). Untuk memperkirakan debit lindi yang masuk ke dalam instalasi pengolahan lindi, dilakukan perhitungan sebagai berikut:

Diketahui

Perkolasi terbesar = 176,39 mm/bulan
Luas lahan urug = 12.250 m²
Jumlah hari pada bulan Februari = 28 hari

Menghitung nilai perkolasi per hari

$$\text{Nilai perkolasi } \left(\frac{\text{mm}}{\text{hari}}\right) = \frac{\text{Nilai perkolasi } \left(\frac{\text{mm}}{\text{bulan}}\right)}{\text{Jumlah hari dalam satu bulan}}$$

$$\begin{aligned}\text{Nilai perkolasi } \left(\frac{\text{mm}}{\text{hari}}\right) &= \frac{176,39 \text{ mm/bulan}}{28 \text{ hari/bulan}} \\ &= 6,29964 \text{ mm/hari}\end{aligned}$$

Menghitung debit air lindi

$$\begin{aligned}\text{Debit air lindi} &= \text{Nilai perkolasi} \times \text{luas lahan urug} \\ &= 6,29964 \text{ mm/hari} \times 12.250 \text{ m}^2 \\ &= (6,29964 \times 10^{-3}) \text{ m/hari} \times 12.250 \text{ m}^2 \\ &= 77,171 \text{ m}^3/\text{hari}\end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas, dapat diperkirakan bahwa debit air lindi yang dapat mengalir menuju instalasi pengolahan air lindi dalam sehari adalah sebesar 77,171 m³/hari. Untuk mengantisipasi terjadinya *overload*, setiap instalasi pengolahan lindi yang direncanakan didesain mampu mengolah air lindi dengan kapasitas 86,4 m³/hari atau sebesar 3.600 L/jam.

Tabel 5.4 Hasil Perhitungan Debit Lindi dengan *Water Balance Methode* menurut Thornthwaite & Mather

Parameter	Satuan	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agust	Sept	Okt	Nov	Des
T (Temperatur Rata-Rata)	°C	29,8	29,4	30,4	30,5	31,1	30,9	30,8	31,4	32,8	32,8	32,3	30,3
IP (Indeks Panas)		14,90	14,61	15,38	15,48	15,94	15,74	15,68	16,12	17,23	17,23	16,82	15,33
a		5,772	5,772	5,772	5,772	5,772	5,772	5,772	5,772	5,772	5,772	5,772	5,772
PET ₀ (Evapotranspirasi Potensial Belum Terkoreksi)	cm	21,380	19,813	24,126	24,681	27,615	26,360	25,919	28,867	37,207	37,142	33,927	23,807
PET ₀ (Evapotranspirasi Potensial Belum Terkoreksi)	mm	213,80	198,13	241,26	246,81	276,15	263,60	259,19	288,67	372,07	371,42	339,27	238,07
r (Faktor Koreksi)		1,07	0,96	1,05	1	1,02	0,98	1,01	1,02	1	1,06	1,04	1,08
PET (Evapotranspirasi Potensial Terkoreksi)	mm	228,77	190,21	252,99	246,81	281,68	258,32	262,14	294,85	372,07	393,19	352,84	256,79
P (Presipitasi atau Curah Hujan Bulanan Rata-Rata)	mm	272,5	312,6	277,2	221,5	86,9	83,9	40,7	20,4	42,9	82,8	301,5	257,6
CRO (Koefisien Run Off)		0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
RO (Run Off)	mm	40,875	46,89	41,58	33,225	13,035	12,585	6,105	3,06	6,435	12,42	45,225	38,64
I (Infiltrasi)	mm	231,625	265,71	235,62	188,275	73,865	71,315	34,595	17,34	36,465	70,38	256,275	218,96
I-PET	mm	2,86	75,50	-17,37	-58,53	-207,81	-187,01	-227,55	-277,51	-335,61	-322,81	-96,56	-37,83
ΣNeg(I-PET) atau APWL	mm	0	0	-17,37	-75,90	-283,72	-470,73	-698,28	-975,78	-1311,39	-1634,20	-1730,76	-1768,59
ST (Soil Moisture Storage)	mm	100	100	84	46	6	1	1	1	1	1	1	1
ΔST (Perubahan ST)	mm	99	0	-16	-38	-40	-5	0	0	0	0	0	0
AET (Actual Evapotranspiration)		228,77	190,21	251,62	226,28	113,87	76,32	34,60	17,34	36,47	70,38	256,28	218,96
Perc (Perkolasi)		-96,14	75,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kontrol = P	mm	272,50	312,60	277,20	221,50	86,90	83,90	40,70	20,40	42,90	82,80	301,50	257,60

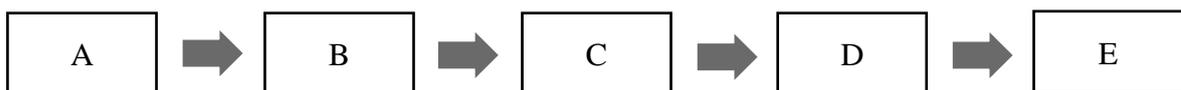
5.3 Alternatif Instalasi Pengolahan Lindi

Proses fisik dan kimia merupakan langkah utama pada pengolahan lindi untuk mengurangi beban polutan atau konsentrasi senyawa organik dan anorganik utama yang dapat mengganggu proses biologis pada pengolahan lindi. Pengolahan secara biologis pada lindi yang dihasilkan dari TPA yang berusia lebih dari sepuluh tahun cenderung tidak efisien karena tingkat biodegradasi lindinya yang menurun (Luu, 2020). Akan tetapi, untuk mendapatkan hasil olahan yang maksimal, pengolahan secara kombinasi (fisik, kimia, dan biologi) sangat dianjurkan untuk diterapkan.

Guna memperoleh instalasi pengolahan lindi yang sesuai, diberikan empat alternatif pilihan rangkaian instalasi pengolahan lindi. Alternatif-alternatif rangkaian instalasi pengolahan lindi ini selain dipilih berdasarkan Lampiran III Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia Nomor 03/PRT/M/2013 tentang Penyelenggaraan Prasarana dan Sarana Persampahan dalam Penanganan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Rumah Tangga, digunakan pula pertimbangan-pertimbangan yang mengacu pada beberapa literatur. Di bawah ini merupakan alternatif-alternatif rangkaian instalasi pengolahan lindi yang disajikan untuk perencanaan instalasi pengolahan lindi TPA Mrican.

5.3.1 Alternatif Pengolahan Pertama

Alternatif rangkaian instalasi pengolahan lindi yang pertama merupakan rangkaian dari kolam stabilisasi. Alternatif ini terdiri dari prasedimentasi, kolam anaerobik, kolam fakultatif, kolam maturasi, dan biofilter. **Gambar 5.5** menunjukkan skema rangkaian instalasi pengolahan lindi untuk alternatif pertama.



Gambar 5.5 Skema Alternatif Pengolahan Pertama

Keterangan:

A. Prasedimentasi

- B. Kolam anaerobik
- C. Kolam fakultatif
- D. Kolam maturasi
- E. Unit biofilter

Efisiensi penyisihan polutan yang meliputi BOD, COD, TSS dan Total N yang dapat dilakukan oleh rangkaian alternatif pengolahan pertama ini dapat dilihat pada **Tabel 5.5** berikut.

Tabel 5.5 Efisiensi Penyisihan Polutan pada Alternatif Pengolahan ke-1

ALTERNATIF 1											
Parameter	Influent (mg/L)	Prasedimentasi		Kolam Anaerobik		Kolam Fakultatif		Kolam Maturasi		Biofilter Anaerob	
		Efisiensi	Hasil	Efisiensi	Hasil	Efisiensi	Hasil	Efisiensi	Hasil	Efisiensi	Hasil
TSS	104	50%	52	20%	41,6	80%	8,32	80%	1,664	95%	0,08
BOD	2473	30%	1731,1	60%	692,44	85%	103,87	80%	20,77	70%	6,23
COD	15561	30%	10892,7	85%	1633,91	80%	326,78	70%	98,03	70%	29,41
Total N	4257	19%	3448,17	70%	1034,45	92%	82,76	47%	43,86	90%	4,39

Alternatif pengolahan pertama yang menerapkan rangkaian kolam stabilisasi ini memiliki kelebihan dan kekurangan yang dapat dilihat pada **Tabel 5.6**.

Tabel 5.6 Kelebihan dan Kekurangan Kolam Stabilisasi

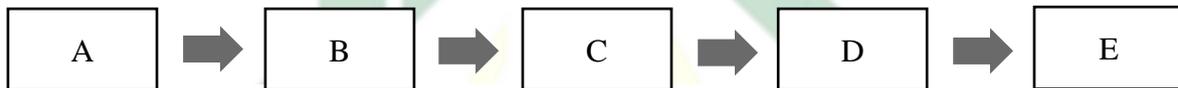
No	Kelebihan	Kekurangan
1.*	Desain dan konstruksinya sederhana	Kebutuhan lahannya besar
2.*	Lumpur biologis yang diproduksinya rendah	Jika tidak dilakukan pengontrolan terhadap vegetasi, nyamuk dan mikroba lainnya dapat berkembang biak
3.*	Modal, biaya operasi, dan pemeliharaannya rendah	Dapat menimbulkan bau jika tidak dirancang dengan baik
4.*	Kuat dan relatif dapat diandalkan	Sulit untuk mengontrol atau memprediksi tingkat ammonia dalam air limbah yang sedang diolah
5.**	Pengoperasian dan pemeliharaannya sederhana, tidak memerlukan tenaga kerja dengan keterampilan khusus	Menghasilkan efluen dengan konsentrasi padatan tersuspensi yang tinggi

No	Kelebihan	Kekurangan
6.*	Kurang sensitif terhadap <i>shock loading</i>	

(Sumber: *Phuntsho dkk., 2009; **Mara, 2003)

5.3.2 Alternatif Pengolahan Kedua

Alternatif pengolahan lindi kedua yang juga terdapat pada Lampiran III Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia Nomor 03/PRT/M/2013 adalah koagulasi flokulasi, sedimentasi, kolam anaerobik, *anaerobic baffled reactor* (ABR), dan maturasi. **Gambar 5.6** menunjukkan skema rangkaian instalasi pengolahan lindi untuk alternatif kedua.



Gambar 5.6 Skema Alternatif Pengolahan Kedua

Keterangan:

- A. Unit koagulasi flokulasi
- B. Unit sedimentasi
- C. Kolam anaerobik
- D. *Anaerobic baffled reactor* (ABR)
- E. Kolam maturasi

Efisiensi penyisihan polutan yang meliputi BOD, COD, TSS dan Total N yang dapat dilakukan oleh rangkaian alternatif pengolahan kedua ini dapat dilihat pada **Tabel 5.7** berikut.

Tabel 5.7 Efisiensi Penyisihan Polutan pada Alternatif Pengolahan ke-2

ALTERNATIF 2											
Parameter	Influent (mg/L)	Koagulasi Flokulasi		Sedimentasi		Kolam Anaerobik		ABR		Kolam Maturasi	
		Efisiensi	Hasil	Efisiensi	Hasil	Efisiensi	Hasil	Efisiensi	Hasil	Efisiensi	Hasil
TSS	104	75%	26	65%	9,1	20%	7,28	90%	0,73	80%	0,15
BOD	2473	38%	1533,26	40%	919,956	60%	367,98	70%	110,39	80%	22,08
COD	15561	65%	5446,35	40%	3267,81	85%	490,17	65%	171,56	70%	51,47
Total N	4257	68,3%	1351,60	19%	1094,79	70%	328,44	72%	91,96	47%	48,74

Pada alternatif pengolahan kedua ini digunakan rangkaian unit anaerobik. Kelebihan dan kekurangan dari alternatif pengolahan kedua, khususnya sistem pengolahan secara anaerobik dapat dilihat pada **Tabel 5.8** di bawah ini.

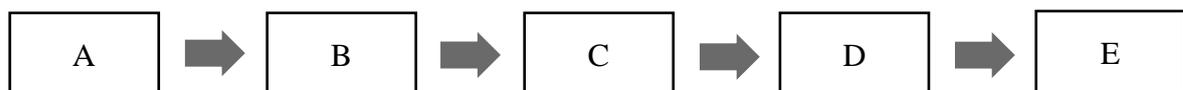
Tabel 5.8 Kelebihan dan Kekurangan Sistem Anaerobik

No	Kelebihan	Kekurangan
1.	Membutuhkan lebih sedikit energi untuk pengoperasiannya dibandingkan dengan proses pengolahan aerobik	Perlu adanya penambahan alkalinitas untuk mempertahankan pH
2.	Biaya pengolahan dan pembuangan lumpur lebih sedikit daripada pengolahan aerobik	Proses ini peka terhadap senyawa beracun seperti logam berat, senyawa terklorinasi, dan detergen
3.	Membutuhkan lebih sedikit nutrisi karena lebih sedikit biomassa yang dihasilkan	Perawatan anaerobik lebih rentan terhadap efek merugikan dari suhu operasi yang lebih rendah.
4.	Memerlukan volume reaktor yang lebih kecil karena dapat menangani laju pemuatan volumetrik yang lebih tinggi	Pengolahan anaerobik mungkin memerlukan pengolahan aerobik lebih lanjut untuk pemolesan limbah agar memenuhi standar pembuangan
5.	Menghasilkan metana yang merupakan sumber energi potensial	Proses ini berpotensi menghasilkan bau dan gas korosif
6.	Proses anaerobik dapat merespons penambahan substrat dengan cepat	Membutuhkan waktu start-up yang lama untuk mengembangkan biomassa yang tepat

(Sumber: Ghangrekar & Behera, 2014)

5.3.3 Alternatif Pengolahan Ketiga

Alternatif pengolahan lindi ketiga terdiri dari beberapa unit, yakni koagulasi flokulasi, sedimentasi I, kolam aerasi, *trickling* filter, dan sedimentasi II. **Gambar 5.7** di bawah menunjukkan skema rangkaian instalasi pengolahan lindi untuk alternatif ketiga.



Gambar 5.7 Skema Alternatif Pengolahan Ketiga

Keterangan:

- A. Unit koagulasi flokulasi
- B. Unit sedimentasi I
- C. Kolam aerasi
- D. Trickling filter
- E. Unit sedimentasi II

Efisiensi penyisihan polutan yang meliputi BOD, COD, TSS dan Total N yang dapat dilakukan oleh rangkaian alternatif pengolahan ketiga dapat dilihat pada **Tabel 5.9** di bawah ini.

Tabel 5.9 Efisiensi Penyisihan Polutan pada Alternatif Pengolahan ke-3

ALTERNATIF 3											
Parameter	Influent (mg/L)	Koagulasi Flokulasi		Sedimentasi I		Kolam Aerasi		Trickling Filter		Sedimentasi II	
		Efisiensi	Hasil	Efisiensi	Hasil	Efisiensi	Hasil	Efisiensi	Hasil	Efisiensi	Hasil
TSS	104	75%	26	65%	9,1	48%	4,732	60%	1,8928	65%	0,66
BOD	2473	38%	1533,26	40%	919,96	80%	183,99	85%	27,60	40%	17
COD	15561	65%	5446,35	40%	3267,81	80%	653,56	80%	130,71	40%	78,43
Total N	4257	68,3%	1351,60	19%	1094,79	35%	711,62	60%	284,65	19%	230,56

Pada alternatif pengolahan ketiga ini digunakan sedimentasi bertingkat dan aerasi. Kelebihan dan kekurangan dari alternatif pengolahan ketiga dapat ditunjukkan pada **Tabel 5.10** di bawah ini.

Tabel 5.10 Kelebihan dan Kekurangan Kolam Aerasi dan Sedimentasi

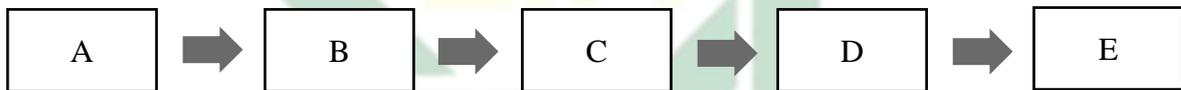
No	Kelebihan	Kekurangan
1.	Sedimentasi merupakan teknologi yang sederhana	Laju beban hidraulik dari unit sedimentasi relatif rendah
2.	Biaya untuk konstruksi dan pengoperasian unit cenderung tidak mahal	Pada kondisi beban padatan yang tinggi, unit sedimentasi kurang efektif dalam menyisihkan padatan tersuspensi
3.	Tidak memerlukan pekerja dengan keterampilan khusus	Dibutuhkan operator dengan keterampilan khusus untuk megoperasikan kolam aerasi
4.	Kolam aerasi memiliki ketahanan yang cukup baik terhadap <i>shock loading</i>	Pengoperasionalan kolam aerasi membutuhkan biaya operasioanal yang tinggi untuk kebutuhan listrik

No	Kelebihan	Kekurangan
5.	Kemampuan mereduksi bakteri patogen dari kolam aerasi cukup baik	
6.	Kolam aerasi tidak menimbulkan masalah bau dan serangga	

(Sumber: Direktorat Jenderal Cipta Karya, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017)

5.3.4 Alternatif Pengolahan Keempat

Pada alternatif pengolahan keempat ini digunakan teknologi kombinasi pengolahan biofilter aerob-anaerob. Unit-unit yang menyusun rangkaian alternatif pengolahan keempat meliputi koagulasi flokulasi, prasedimentasi, biofilter anaerobik, biofilter aerobik, dan lahan basah buatan (*constructed wetland*). Rangkaian instalasi pengolahan lindi untuk alternatif pengolahan keempat dapat dilihat pada **Gambar 5.8** di bawah ini.



Gambar 5.8 Skema Alternatif Pengolahan Keempat

Keterangan:

A. Koagulasi Flokulasi

B. Prasedimentasi

C. Biofilter anaerobik

D. Biofilter aerobik

E. *Constructed wetland*

Efisiensi penyisihan polutan yang meliputi BOD, COD, TSS dan Total N yang dapat dilakukan oleh rangkaian alternatif pengolahan keempat dapat dilihat pada **Tabel 5.11** di bawah ini.

Tabel 5.11 Efisiensi Penyisihan Polutan pada Alternatif Pengolahan ke-4

ALTERNATIF 4											
Parameter	Influent (mg/L)	Koagulasi Flokulasi		Prasedimentasi		Biofilter Anaerobik		Biofilter Aerobik		Wetland	
		Efisiensi	Hasil	Efisiensi	Hasil	Efisiensi	Hasil	Efisiensi	Hasil	Efisiensi	Hasil
TSS	104	75%	26	50%	13	95%	0,65	65%	0,23	89%	0,03
BOD	2473	38%	1533,26	30%	1073,28	70%	321,98	95%	16,10	60%	6,44
COD	15561	65%	5446,35	30%	3812,45	70%	1143,73	85%	171,56	96%	6,86
Total N	4257	68,25%	1351,60	19%	1094,79	90%	109,48	88%	13,14	90%	1,31

Alternatif pengolahan keempat yang menggunakan prinsip utama atau pengolahan dengan biofilter aerob anaerob memiliki kelebihan dan kekurangan. Kelebihan dan kekurangan tersebut dapat dilihat pada **Tabel 5.12**.

Tabel 5.12 Kelebihan dan Kekurangan Biofilter Aerob-Anaerob

No	Kelebihan	Kekurangan
1.*	Biaya investasi dan operasionalnya rendah	Sulit untuk mengontrol pH karena adanya pembentukan SO_4^{2-}
2.*	Pengoperasian dan perawatannya mudah karena tidak terjadi asalah <i>bulking</i>	Perlu dilakukan penggantian bed filter
3.*	Memiliki daya penyisihan polutan yang efektif pada konsentrasi H_2S yang rendah	
4.**	Lumpur yang dihasilkan sedikit	
5.**	Mampu mengolah air limbah dengan konsentrasi rendah dan tinggi	
6.**	Tahan terhadap fluktuasi, baik fluktuasi air limbah yang diolah, maupun konsentrasinya	
7.**	Penurunan suhu tidak berdampak besar terhadap efisiensi pengolahan	
8.***	Mampu mengurangi konsentrasi fosfor, nitrogen, BOD, COD, SS, deterjen (MBAS), ammonium, dan bakteri <i>e. coli</i> dengan baik	

(Sumber: *Le Borgne & Baquerizo, 2019; **Said & Ruliasih, 2005; ***Prayitno, 2011)

5.3.5 Pemilihan Alternatif Pengolahan

Dari empat pilihan alternatif pengolahan yang disajikan, dipilih salah satu instalasi pengolahan lindi. Pemilihan tersebut dilakukan menggunakan metode *analytical hierarchy process* (AHP). Pada metode AHP, masalah multi kriteria atau multi faktor yang kompleks diuraikan menjadi kelompok-kelompok yang selanjutnya akan disusun menjadi suatu hirarki sehingga suatu permasalahan dan penyelesaiannya tampak lebih sistematis dan terstruktur (Dwijayadi dkk., 2018). Untuk mendapatkan pengolahan lindi yang sesuai dengan tujuan, dilakukan tahapan-tahapan dalam metode AHP sebagai berikut:

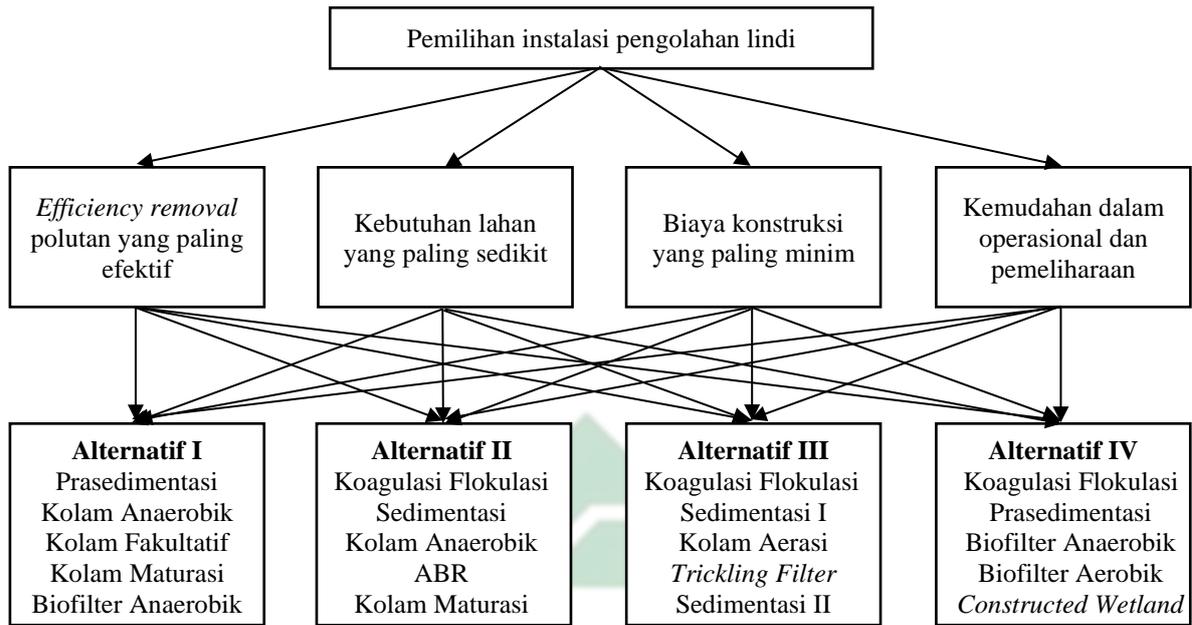
A. Mendefinisikan masalah dan menentukan solusi

Masalah atau tujuan dari digunakannya AHP ini adalah untuk menentukan instalasi pengolahan lindi yang akan direncanakan untuk TPA Mrican. Pemilihan instalasi pengolahan lindi tersebut didasarkan pada empat kriteria, yakni:

- 1) *Efficiency removal* ‘efisiensi penyisihan’ polutan yang paling efektif,
- 2) Kebutuhan lahan yang paling sedikit,
- 3) Biaya konstruksi yang paling minim, dan
- 4) Kemudahan dalam operasional serta pemeliharaan

B. Membuat struktur hierarki

Struktur hierarki terdiri dari tujuan umum pada hierarki I, dilanjutkan dengan kriteria-kriteria untuk pemilihan pada hierarki II, dan alternatif-alternatif pilihan pada hierarki III. **Gambar 5.9** di bawah ini menunjukkan struktur hierarki dari pemilihan pengolahan instalasi pengolahan lindi TPA Mrican dari keempat alternatif yang disajikan.



Gambar 5.9 Struktur Hierarki Pemilihan Pengolahan Instalasi Pengolahan Lindi

D. Membuat matrik perbandingan berpasangan kriteria untuk pemilihan instalasi pengolahan lindi

Setelah disusun hierarki, dibuatlah matrik perbandingan berpasangan untuk membandingkan pengaruh setiap elemen atau alternatif terhadap tujuan atau kriteria yang setingkat di atasnya. Sebelum dibuat matrik perbandingan, ditentukan nilai atau skala seperti pada **Tabel 5.13** yang nantinya akan digunakan untuk menentukan tingkat kepentingan dari setiap elemen yang ada.

Tabel 5.13 Skala Perbandingan Berpasangan

Identitas Kepentingan	Keterangan	Penjelasan
1	Kedua elemen sama pentingnya	Dua elemen memiliki pengaruh yang sama besar
3	Elemen yang satu sedikit lebih penting dari elemen yang lain	Pengalaman dan penilaian sedikit menyokong satu elemen dibandingkan elemen yang lainnya
5	Elemen yang satu lebih penting dari elemen yang lain	Pengalaman dan penilaian sangat kuat menyokong satu elemen dibandingkan elemen yang lainnya

Identitas Keperentingan	Keterangan	Penjelasan
7	Satu elemen jelas lebih mutlak penting dari elemen lainnya	Satu elemen yang kuat disokong dan dominan terlihat dalam praktik
9	Satu elemen mutlak penting dari elemen lainnya	Bukti yang mendukung elemen yang satu terhadap elemen lain memiliki tingkat penegasan tertinggi yang mungkin menguatkan
2, 4, 6, 8	Nilai-nilai antara dua nilai pertimbangan yang berdekatan	Nilai ini diberikan bila ada dua kompromi di antara dua pilihan
Kebalikan	Jika kriteria i mendapat nilai 1 dibandingkan dengan kriteria j, maka j memiliki nilai kebalikannya dibandingkan dengan nilai i (1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9)	

(Sumber: Parhusip, 2019)

Nilai-nilai pada Tabel 5.13 di atas kemudian digunakan untuk melakukan penilaian atau pembobotan untuk membandingkan prioritas antara kriteria yang satu dengan yang lain. Hasil pembobotan atau penilaian untuk kriteria-kriteria yang digunakan pada pemilihan alternatif instalasi pengolahan lindi yang akan direncanakan untuk TPA Mrican dapat dilihat pada **Tabel 5.14** di bawah ini.

Tabel 5.14 Matrik Perbandingan Berpasangan

Kriteria	<i>Efficiency Removal</i>	Kebutuhan Lahan	Biaya Konstruksi	Operasional dan Pemeliharaan
<i>Efficiency Removal</i>	1	1	5/1	3/1
Kebutuhan Lahan	1	1	5/1	3/1
Biaya Konstruksi	1/5	1/5	1	1/5
Operasional dan Pemeliharaan	1/3	1/3	5/1	1

Dari **Tabel 5.14** di atas, dapat diketahui bahwa angka 1 pada kolom *efficiency removal* baris *efficiency removal* menggambarkan tingkat kepentingan yang sama antar kriteria, yakni *efficiency removal*. Kemudian, angka 1/5 pada kolom *efficiency removal* baris biaya konstruksi menunjukkan bahwa *efficiency removal* lebih penting dari biaya konstruksi. Nilai 2/1 pada kolom operasional dan pemeliharaan baris *efficiency removal* menggambarkan nilai yang berdekatan antara *efficiency removal* dengan operasional dan pemeliharaan. Angka-angka atau nilai-nilai yang lain diperoleh dengan cara yang sama.

E. Menormalkan data

Setelah dilakukan pembobotan atau penilaian dari kriteria-kriteria yang ada, nilai-nilai pada tabel perbandingan tersebut kemudian dijadikan bentuk desimal dan dijumlahkan untuk setiap kolomnya. Jumlah nilai dari setiap kolom matrik perbandingan tersebut dapat dilihat pada **Tabel 5.15**.

Tabel 5.15 Jumlah Kolom dari Matrik Perbandingan Berpasangan

Kriteria	<i>Efficiency Removal</i>	Kebutuhan Lahan	Biaya Konstruksi	Operasional dan Pemeliharaan
<i>Efficiency Removal</i>	1,000	1,000	5,000	3,000
Kebutuhan Lahan	1,000	1,000	5,000	3,000
Biaya Konstruksi	0,200	0,200	1,000	0,200
Operasional dan Pemeliharaan	0,333	0,333	5,000	1,000
Σ Kolom	2,533	2,533	16,000	7,200

Kemudian, dilakukan penormalan terhadap bobot relatif pada **Tabel 5.15** dengan cara membagi unsur-unsur pada setiap kolom dengan jumlah total nilai dari setiap kolom yang bersangkutan. Hasil penormalan terhadap bobot atau kriteria pada tabel perbandingan berpasangan dapat dilihat pada **Tabel 5.16**.

Tabel 5.16 Matrik Faktor Pembobotan untuk Semua Kriteria yang Dinormalkan

Kriteria	<i>Efficiency removal</i>	Kebutuhan lahan	Biaya konstruksi	Operasional dan Pemeliharaan	Σ Baris	<i>Eigen Vector</i>
<i>Efficiency removal</i>	0,39	0,39	0,31	0,42	1,52	0,380
Kebutuhan lahan	0,39	0,39	0,31	0,42	1,52	0,380
Biaya konstruksi	0,08	0,08	0,06	0,03	0,25	0,062
Operasional dan Pemeliharaan	0,13	0,13	0,31	0,14	0,71	0,179

Nilai-nilai pada baris pertama didapatkan dari perhitungan-perhitungan berikut:

$$1 : 2,533 = 0,39$$

$$1 : 2,533 = 0,39$$

$$5 : 16 = 0,31$$

$$3 : 7,2 = 0,42$$

Nilai-nilai pada kolom lainnya didapatkan dengan perhitungan yang sama, yakni dengan membagi nilai pada kolom yang bersangkutan dengan total jumlah kolom tempat kolom itu berada.

F. Menghitung nilai *eigen vector* dan menguji kekonsistensiannya

Nilai *eigen vector* menunjukkan prioritas dari masing-masing kriteria yang ada. Nilai *eigen vector* didapatkan dengan cara membagi jumlah dari nilai baris yang ada dengan banyaknya kolom atau kriteria.

$$\begin{aligned} \text{Eigen vector efficiency removal} &= \Sigma \text{ Baris} / \text{banyaknya kolom} \\ &= 1,52 / 4 \\ &= 0,38 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Eigen vector kebutuhan lahan} &= \Sigma \text{ Baris} / \text{banyaknya kolom} \\ &= 1,52 / 4 \\ &= 0,38 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Eigen vector biaya konstruksi} &= \Sigma \text{ Baris} / \text{banyaknya kolom} \\ &= 0,25 / 4 \\ &= 0,062 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Eigen vector operasional dan pemeliharaan} &= \Sigma \text{ Baris} / \text{kolom} \\ &= 0,71 / 4 \end{aligned}$$

$$= 0,179$$

Kemudian, dicari nilai *eigen* maksimum ($\lambda_{\text{maksimum}}$) dengan cara menjumlahkan antar hasil perkalian jumlah kolom dengan *eigen vector*.

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{maksimum}} &= (2,533 \times 0,38) + (2,533 \times 0,38) + (16 \times 0,062) + (7,2 \times \\ & \quad 0,179) \\ &= 0,96254 + 0,96254 + 0,992 + 1,2888 \\ &= 4,20588\end{aligned}$$

Selanjutnya, karena matrik berordo 4 (terdiri dari 4 kolom dan 4 baris), maka nilai indeks konsistensi (CI) adalah:

$$CI = \frac{\lambda_{\text{maksimum}} - n}{n - 1} = \frac{4,20588 - 4}{4 - 1} = \frac{0,20588}{3} = 0,0686267$$

Setelah didapatkan nilai indeks konsistensi, dicari rasio konsistensi dengan menggunakan Persamaan 2.2 berikut.

$$CR = CI / RI$$

Dari Tabel 2.5 diketahui nilai RI (indeks random) dari matrik berordo 4 adalah 0,9 sehingga,

$$\begin{aligned}CR &= CI / RI \\ &= 0,0686267 / 0,9 \\ &= 0,07625\end{aligned}$$

Nilai CR di atas, yakni 0,07625 kurang dari 0,1 atau $\leq 10\%$ maka hierarki dinyatakan konsisten. Kemudian, dari **Tabel 5.16** dapat diketahui kriteria *removal efficiency* dan kebutuhan lahan sama pentingnya, yakni dibuktikan dengan bobot yang sama 0,38. Kemudian, kriteria kemudahan dalam operasional dan pemeliharaan menempati posisi ketiga dengan bobot 0,179. Kriteria biaya konstruksi menempati urutan yang terakhir dengan bobot 0,062.

Kemudian, karena hierarki telah dinyatakan konsisten, kriteria-kriteria tersebut dapat dinyatakan layak untuk dipakai pada perhitungan selanjutnya, yakni menentukan prioritas setiap kriteria pemilihan alternatif pengolahan lindi berdasarkan perbandingan berpasangan setiap alternatif pengolahan yang telah ditentukan.

- 1) Perhitungan faktor evaluasi untuk kriteria *removal efficiency*

Dilakukan pembobotan terhadap kriteria *removal efficiency* dari alternatif-alternatif pengolahan yang ada. Selanjutnya, pembobotan tersebut dijadikan ke dalam bentuk desimal dan diletakkan pada tabel matrik perbandingan berpasangan **Tabel 5.17** di bawah ini.

Tabel 5.17 Matrik Perbandingan Berpasangan untuk Kriteria *Removal Efficiency*

Alternatif	Pengolahan I	Pengolahan II	Pengolahan III	Pengolahan IV
Pengolahan I	1,000	5,000	7,000	0,333
Pengolahan II	0,200	1,000	3,000	0,143
Pengolahan III	0,143	0,333	1,000	0,111
Pengolahan IV	3,000	7,000	9,000	1,000
ΣKolom	4,343	13,333	20,000	1,587

Selanjutnya, semua unsur atau nilai pada alternatif pengolahan dibagi dengan jumlah kolom terkait untuk mendapatkan bobot relatif yang dinormalkan. Setelah mendapat bobot relatif yang telah dinormalkan, didapatkan nilai *eigen vector* yang merupakan rata-rata relatif dari setiap baris. Pembobotan alternatif-alternatif pengolahan untuk kriteria *removal efficiency* serta *eigen vector*-nya dapat dilihat pada **Tabel 5.18**.

Tabel 5.18 Matrik Faktor Pembobotan untuk Kriteria *Efficiency Removal* yang Telah Dinormalkan

Alternatif	Pengolahan I	Pengolahan II	Pengolahan III	Pengolahan IV	ΣBaris	<i>Eigen Vector</i>
Pengolahan I	0,230	0,375	0,350	0,210	1,165	0,2913
Pengolahan II	0,046	0,075	0,150	0,090	0,361	0,0903
Pengolahan III	0,033	0,025	0,050	0,070	0,178	0,0445
Pengolahan IV	0,691	0,525	0,450	0,630	2,296	0,5739

Selanjutnya dicari nilai *eigen vector* maksimum untuk kriteria *removal efficiency*

$$\begin{aligned}
 \lambda_{\text{Maksimum}} &= (4,343 \times 0,2913) + (13,333 \times 0,0903) + (20 \times \\
 &\quad 0,0445) + (1,587 \times 0,5739) \\
 &= 1,265 + 1,204 + 0,89 + 0,911 \\
 &= 4,27
 \end{aligned}$$

Sehingga, nilai indeks konsistensi dari pembobotan kriteria *removal efficiency* tersebut adalah

$$CI = \frac{\lambda \text{ maksimum} - n}{n - 1} = \frac{4,27 - 4}{4 - 1} = \frac{0,27}{3} = 0,09$$

Maka nilai rasio konsistensi yang diperoleh adalah sebagai berikut,

$$\begin{aligned} CR &= CI / RI \\ &= 0,09 / 0,9 \\ &= 0,1 \end{aligned}$$

Hasil rasio konsistensi menunjukkan 0,1 atau $\leq 10\%$ sehingga hasil dinyatakan konsisten. Selain itu, dari hasil *eigen vector* dapat diketahui nilai tertinggi dari kriteria *removal efficiency* terletak pada pengolahan IV dengan hasil 0,5739 dan diikuti dengan pengolahan I dengan hasil 0,2913. Sementara itu, nilai untuk pengolahan II sebesar 0,0903 dan nilai untuk pengolahan III sebesar 0,0445.

2) Perhitungan faktor evaluasi untuk kriteria kebutuhan lahan

Untuk mengetahui nilai prioritas dari alternatif pengolahan yang ada selanjutnya dilakukan penilaian untuk kriteria kebutuhan lahan. Semakin sedikit luas lahan yang dibutuhkan, semakin tinggi nilai atau bobot yang diberikan. Pembobotan dilakukan pada matriks perbandingan berpasangan yang kemudian dijadikan ke dalam bentuk desimal dan diletakkan pada **Tabel 5.19** di bawah ini.

Tabel 5.19 Matrik Perbandingan Berpasangan untuk Kriteria Kebutuhan Lahan

Alternatif	Pengolahan I	Pengolahan II	Pengolahan III	Pengolahan IV
Pengolahan I	1,000	0,200	0,333	0,143
Pengolahan II	5,000	1,000	3,000	0,333
Pengolahan III	3,000	0,333	1,000	0,200
Pengolahan IV	7,000	3,000	5,000	1,000
Σ Kolom	16,000	4,533	9,333	1,676

Selanjutnya, semua unsur atau nilai pada alternatif pengolahan dibagi dengan jumlah kolom terkait untuk mendapatkan bobot relatif yang dinormalkan. Setelah mendapat bobot relatif yang telah dinormalkan, didapatkan nilai *eigen vector* untuk pembobotan dengan kriteria kebutuhan lahan yang merupakan

rata-rata relatif dari setiap baris. Pembobotan alternatif-alternatif pengolahan untuk kriteria kebutuhan lahan serta *eigen vector*-nya dapat dilihat pada **Tabel 5.20**.

Tabel 5.20 Matrik Faktor Pembobotan untuk Kriteria Kebutuhan Lahan yang Telah Dinormalkan

Alternatif	Pengolahan I	Pengolahan II	Pengolahan III	Pengolahan IV	Σ Baris	<i>Eigen Vector</i>
Pengolahan I	0,063	0,044	0,036	0,085	0,228	0,0569
Pengolahan II	0,313	0,221	0,321	0,199	1,053	0,2633
Pengolahan III	0,188	0,074	0,107	0,119	0,487	0,1219
Pengolahan IV	0,438	0,662	0,536	0,597	2,232	0,5579

Selanjutnya dicari nilai *eigen vector* maksimum untuk kriteria kebutuhan lahan seperti berikut,

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{Maksimum}} &= (16 \times 0,0569) + (4,533 \times 0,2633) + (9,333 \times 0,1219) \\ &\quad + (1,676 \times 0,5579) \\ &= 0,9104 + 1,1935 + 1,1377 + 0,935 \\ &= 4,1766\end{aligned}$$

Sehingga, nilai indeks konsistensi dari pembobotan kriteria *removal efficiency* tersebut adalah

$$CI = \frac{\lambda_{\text{maksimum}} - n}{n - 1} = \frac{4,1766 - 4}{4 - 1} = \frac{0,1766}{3} = 0,05887$$

Maka nilai rasio konsistensi yang diperoleh adalah sebagai berikut,

$$\begin{aligned}CR &= CI / RI \\ &= 0,05887 / 0,9 \\ &= 0,06541\end{aligned}$$

Hasil rasio konsistensi menunjukkan 0,06541 atau $\leq 10\%$ sehingga hasil dinyatakan konsisten. Dari nilai rata-rata atau *eigen vector* diketahui bahwa pengolahan IV memiliki nilai tertinggi, yakni 0,5579. Selanjutnya, pengolahan II menempati kedudukan kedua dengan nilai 0,2633. Kemudian, pengolahan III menduduki peringkat ketiga dengan nilai 0,1219 dan pengolahan IV menduduki peringkat terakhir dengan nilai sebesar 0,0569.

- 3) Perhitungan faktor evaluasi untuk kriteria biaya konstruksi

Dilakukan pembobotan terhadap kriteria biaya konstruksi untuk alternatif-alternatif pengolahan yang ada dengan menjadikan nilai perbandingan berpasangan tersebut ke dalam bentuk desimal dan diletakkan pada **Tabel 5.21** di bawah ini.

Tabel 5.21 Matrik Perbandingan Berpasangan untuk Kriteria Biaya Konstruksi

Alternatif	Pengolahan I	Pengolahan II	Pengolahan III	Pengolahan IV
Pengolahan I	1,000	3,000	3,000	5,000
Pengolahan II	0,333	1,000	3,000	3,000
Pengolahan III	0,333	0,333	1,000	3,000
Pengolahan IV	0,200	0,333	0,333	1,000
ΣKolom	1,867	4,667	7,333	12,000

Selanjutnya, semua unsur atau nilai pada alternatif pengolahan dibagi dengan jumlah kolom terkait untuk mendapatkan bobot relatif yang dinormalkan serta nilai *eigen vector* yang merupakan rata-rata relatif dari setiap baris. Pembobotan alternatif-alternatif pengolahan untuk kriteria biaya konstruksi serta *eigen vector*-nya dapat dilihat pada **Tabel 5.22**.

Tabel 5.22 Matrik Faktor Pembobotan untuk Kriteria Biaya Konstruksi yang Telah Dinormalkan

Alternatif	Pengolahan I	Pengolahan II	Pengolahan III	Pengolahan IV	ΣBaris	<i>Eigen Vector</i>
Pengolahan I	0,536	0,643	0,409	0,417	2,004	0,5011
Pengolahan II	0,179	0,214	0,409	0,250	1,052	0,2630
Pengolahan III	0,179	0,071	0,136	0,250	0,636	0,1591
Pengolahan IV	0,107	0,071	0,045	0,083	0,307	0,0768

Nilai *eigen vector* maksimum untuk kriteria biaya konstruksi tersebut kemudian dicari dengan perhitungan sebagai berikut,

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{Maksimum}} &= (1,867 \times 0,5011) + (4,667 \times 0,2630) + (7,333 \times \\ &\quad 0,1591) + (12 \times 0,0768) \\ &= 0,93555 + 1,22742 + 1,16668 + 0,9216 \\ &= 4,25125\end{aligned}$$

Sehingga, nilai indeks konsistensi dari pembobotan kriteria *removal efficiency* tersebut adalah

$$CI = \frac{\lambda_{\text{maksimum}} - n}{n - 1} = \frac{4,25125 - 4}{4 - 1} = \frac{0,25125}{3} = 0,08375$$

Maka nilai rasio konsistensi yang diperoleh adalah sebagai berikut,

$$\begin{aligned} CR &= CI/RI \\ &= 0,08375 / 0,9 \\ &= 0,09306 \end{aligned}$$

Hasil rasio konsistensi menunjukkan 0,09306 atau $\leq 10\%$ sehingga hasil dinyatakan konsisten. Kemudian, dari **Tabel 5.22** dapat diketahui bahwa nilai *eigen vector* untuk pengolahan I dengan kriteria biaya konstruksi memiliki nilai tertinggi, yakni sebesar 0,5011. Nilai *eigen vector* tertinggi kedua adalah pada pengolahan II sebesar 0,2630. Selanjutnya, nilai *eigen vector* untuk pengolahan III sebesar 0,1591. Pengolahan IV mendapatkan nilai *eigen vector* terkecil yakni 0,0768.

4) Perhitungan faktor evaluasi untuk kriteria operasional dan pemeliharaan

Operasional dan pemeliharaan termasuk dalam kriteria pemilihan alternatif pengolahan lindi sehingga perlu dilakukan perhitungan pembobotan untuk mengetahui pengolahan dengan bobot tertinggi. Semakin mudah operasional dan pemeliharaan alternatif pengolahan yang disajikan, semakin tinggi nilai atau bobot yang diberikan. Pembobotan untuk kriteria operasional dan pemeliharaan yang telah dikonversi menjadi bentuk desimal dapat dilihat pada **Tabel 5.23** di bawah ini.

Tabel 5.23 Matrik Perbandingan Berpasangan untuk Kriteria Operasional dan Pemeliharaan

Alternatif	Pengolahan I	Pengolahan II	Pengolahan III	Pengolahan IV
Pengolahan I	1,000	5,000	5,000	3,000
Pengolahan II	0,200	1,000	3,000	0,500
Pengolahan III	0,200	0,333	1,000	0,500
Pengolahan IV	0,333	2,000	2,000	1,000
Σ Kolom	1,733	8,333	11,000	5,000

Kemudian, untuk mendapatkan bobot relatif yang dinormalkan, semua unsur atau nilai pada alternatif pengolahan dibagi dengan jumlah kolom terkait. Setelah mendapat bobot relatif yang telah dinormalkan, didapatkan nilai *eigen vector* untuk pembobotan dengan kriteria operasional dan pemeliharaan. Penormalan bobot alternatif-alternatif pengolahan untuk kriteria kebutuhan lahan serta *eigen vector*-nya dapat dilihat pada **Tabel 5.24**.

Tabel 5.24 Matrik Faktor Pembobotan untuk Kriteria Operasional dan Pemeliharaan yang Telah Dinormalkan

Alternatif	Pengolahan I	Pengolahan II	Pengolahan III	Pengolahan IV	Σ Baris	<i>Eigen Vector</i>
Pengolahan I	0,577	0,600	0,455	0,600	2,231	0,5579
Pengolahan II	0,115	0,120	0,273	0,100	0,608	0,1520
Pengolahan III	0,115	0,040	0,091	0,100	0,346	0,0866
Pengolahan IV	0,192	0,240	0,182	0,200	0,814	0,2035

Dari nilai *eigen vector* yang telah didapatkan, dicari *eigen vector* maksimum untuk kriteria operasional dan pemeliharaan.

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{Maksimum}} &= (1,733 \times 0,5579) + (8,333 \times 0,1520) + (11 \times \\ &\quad 0,0866) + (5 \times 0,2035) \\ &= 0,9668407 + 1,266616 + 0,9526 + 1,0175 \\ &= 4,20356 \end{aligned}$$

Sehingga, nilai indeks konsistensi dari pembobotan kriteria *removal efficiency* tersebut adalah

$$CI = \frac{\lambda_{\text{maksimum}} - n}{n - 1} = \frac{4,20356 - 4}{4 - 1} = \frac{0,20356}{3} = 0,067853$$

Maka nilai rasio konsistensi yang diperoleh adalah sebagai berikut,

$$\begin{aligned} CR &= CI / RI \\ &= 0,067853 / 0,9 \\ &= 0,07539 \end{aligned}$$

Hasil rasio konsistensi menunjukkan 0,07539 atau $\leq 10\%$ sehingga hasil dinyatakan konsisten. Dari hasil yang disajikan pada **Tabel 5.24** dapat diketahui bahwa pengolahan I mendapatkan nilai *eigen vector* terbesar untuk

kriteria operasional dan pemeliharaan, yakni 0,5579. Kemudian, pengolahan IV mendapatkan nilai *eigen vector* terbesar kedua yakni 0,2035. Pengolahan II dengan *eigen vector* sebesar 0,1520 dan pengolahan III sebesar 0,0866.

G. Menentukan hasil akhir dari *analytical hierarchy process*

Setelah didapatkan nilai *eigen vector* dari masing-masing kriteria pemilihan alternatif, dibuatlah pemeringkatan atau *ranking* untuk menentukan urutan dari pengolahan yang terpilih. Perhitungan total *eigen vector* didapat dengan mengalikan matriks *eigen vector* setiap pengolahan dengan *eigen vector* pada perbandingan setiap kriteria. Hasil akhir dari pemilihan alternatif pengolahan lindi untuk TPA Mrican menggunakan metode *analytical hierarchy process* dapat dilihat pada **Tabel 5.25** di bawah ini.

Tabel 5.25 Hasil Akhir Keputusan Pemilihan Alternatif Pengolahan

	<i>Removal Efficiency</i>	Kebutuhan Lahan	Biaya Konstruksi	Operasional dan Pemeliharaan	Total	Rank
	0,38	0,38	0,062	0,179		
Pengolahan I	0,2913	0,0569	0,5011	0,5579	0,263	2
Pengolahan II	0,0903	0,2633	0,2630	0,1520	0,178	3
Pengolahan III	0,0445	0,1219	0,1591	0,0866	0,089	4
Pengolahan IV	0,5739	0,5579	0,0768	0,2035	0,471	1

Dari **Tabel 5.25** di atas dapat diketahui bahwa pengolahan IV yang terdiri dari unit koagulasi flokulasi, prasedimentasi, biofilter anaerobik, biofilter aerobik, dan *constructed wetland* menempati *rank* pertama dari empat alternatif pengolahan lindi dengan menggunakan metode *analytical hierarchy process* (AHP). Nilai total dari pengolahan IV pada pembobotan tersebut adalah 0,471.

5.4 Detail Instalasi Pengolahan Lindi Terpilih

Agar gambar dari instalasi pengolahan lindi yang direncanakan dapat lebih dipahami, diproses, dan diaplikasikan, diperlukan ukuran atau dimensi untuk setiap unit instalasi. Ukuran atau dimensi sendiri juga merupakan suatu hal yang penting dalam gambar teknik. Oleh karena itu, hal utama yang diperlukan dari perencanaan instalasi pengolahan lindi ini adalah ukuran atau dimensi dari

masing-masing unit. Di bawah ini dipaparkan mengenai dimensi-dimensi atau ukuran-ukuran dari setiap unit yang direncanakan untuk mengolah lindi TPA Mrican. Data terpenting yang dibutuhkan untuk perencanaan instalasi pengolahan lindi ini adalah kualitas dan kuantitas air lindi. Pada perencanaan ini, direncanakan instalasi pengolahan lindi mampu mengolah lindi dengan kapasitas debit 86,4 m³/hari. Sementara itu, air lindi yang akan diolah pada instalasi pengolahan ini direncanakan memiliki kualitas sebagai berikut:

- a. COD = 15.561 mg/L
- b. BOD = 12.473 mg/L
- c. TSS = 104 mg/L
- d. Total N = 4.257 mg/L

5.4.1 Dimensi Bak Ekualisasi

Sebelum lindi diolah pada unit-unit pengolahan, lindi masuk atau ditampung terlebih dahulu pada bak ekualisasi. Selain untuk penampungan sementara, bak ekualisasi juga berfungsi untuk menyamakan debit dan karakteristik dari lindi yang akan diolah pada unit pengolahan sehingga nantinya akan menambah efektivitas dari pengolahan lindi itu sendiri (Direktorat Jenderal Cipta Karya, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017). Untuk menentukan dimensi bak ekualisasi yang direncanakan untuk TPA Mrican, dilakukan perhitungan seperti di bawah ini.

Kriteria desain yang digunakan untuk perencanaan bak ekualisasi ini mengacu pada buku *Wastewater Engineering Treatment and Reuse (Fourth Edition)* karya Metcalf & Eddy, Inc. dkk. (2003) yang terdiri dari

- a. Kedalaman minimum = 1,5 – 2 m
- b. Kemiringan sisi dalam = 3:1 – 2:1

Dari kriteria desain yang ada, kemudian direncanakan komponen-komponen sebagai berikut:

- a. Waktu detensi = 1 jam
- b. Debit lindi (Q) = 86,4 m³/hari
- c. *Freeboard* = 0,2 m
- d. Tinggi bak = 2 m

e. Rasio P : L = 1 : 1

Sehingga,

a. Volume bak = $Q \times T_d$
 $= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times \frac{1 \text{ jam}}{24 \text{ jam/hari}}$
 $= 3,6 \text{ m}^3$

b. Luas permukaan = $\frac{\text{Volume bak}}{\text{Kedalaman bak}}$
 $= \frac{3,6 \text{ m}^3}{2 \text{ m}}$
 $= 1,8 \text{ m}^2$

c. Luas permukaan = Panjang \times Lebar
 $1,8 \text{ m}^2 = \text{Panjang}^2$
 Panjang = $\sqrt{1,8 \text{ m}^2}$
 $= 1,34 \text{ m} \approx 1,4 \text{ m}$

d. Lebar = Panjang (karena rasio P : L = 1 : 1)
 $= 1,4 \text{ m}$

Kemudian, lakukan pengecekan terhadap waktu detensi

$$T_d = \frac{(\text{Kedalaman} \times \text{Panjang} \times \text{Lebar})}{Q_{\text{rata-rata}}}$$

$$= \frac{(2 \text{ m} \times 1,4 \text{ m} \times 1,4 \text{ m})}{\frac{86,4 \text{ m}^3/\text{hari}}{24 \text{ jam/hari}}}$$

$$= \frac{3,92 \text{ m}^3}{3,6 \text{ m}^3/\text{jam}}$$

$$= 1 \text{ jam (Memenuhi)}$$

Dari perhitungan di atas, didapatkan dimensi bak ekualisasi seperti pada

Tabel 5.26 di bawah ini

Tabel 5.26 Dimensi Bak Ekualisasi

No	Kriteria	Hasil Perhitungan	Satuan
1.	Debit influen	3,6	m ³ /jam
2.	Panjang bak	1,4	m
3.	Lebar bak	1,4	m
4.	Kedalaman air	2	m
5.	<i>Freeboard</i>	0,2	m
6.	Volume efektif bak	3,92	m ³

5.4.2 Dimensi Unit Koagulasi Flokulasi

Proses koagulasi flokulasi merupakan proses yang banyak digunakan pada pengolahan air dan air limbah karena keefektifitasannya dalam menghilangkan bahan organik, padatan tersuspensi, kekeruhan, dan warna. (Bahrodin dkk., 2021). Koagulasi biasanya dicapai melalui penambahan koagulan anorganik seperti garam berbasis aluminium atau besi, dan/atau polimer organik sintetik yang umumnya dikenal sebagai polielektrolit (Wang dkk., 2004). Untuk mencampurkan atau melarutkan koagulan ke dalam air yang sedang diolah, terdapat beberapa tipe pengadukan, yakni hidrolis, mekanik, media berlubang, dan pneumatik (Darmasetiawan, 2004). Prinsip dari pengadukan secara hidrolis sendiri adalah pemanfaatan gaya gravitasi. Menurut Darmasetiawan (2004), nilai G (gradien kecepatan) yang merupakan parameter penting dalam pembentukan flok, dipengaruhi oleh besaran:

- a. Besaran tinggi terjunan pada proses *rapid mixing* ‘pengadukan cepat’, dan
- b. Beda tinggi permukaan atau *headloss* (kehilangan tekanan) pada proses pembentukan flok di flokulator.

Pada perencanaan ini, bak koagulasi dan flokulasi akan dibuat dengan tipe pengadukan hidrolis. Pengadukan hidrolis pada bak koagulasi direncanakan dengan mengadakan terjunan. Sementara itu, pengadukan hidrolis pada flokulator atau bak flokulasi direncanakan dengan aliran vertikal dengan bantuan baffle (*hydraulic baffled wall flocculator*).

Perencanaan unit koagulasi flokulasi ini menggunakan kriteria-kriteria desain sebagai berikut:

- a. Waktu pengadukan minimal untuk air berwarna = 60 detik (Darmasetiawan, 2004)
- b. Nilai gradien/detik = 700–1000/detik (Masduqi & Assomadi, 2012)

Dari kriteria-kriteria di atas, direncanakan:

- a. Debit masuk = $86,4 \text{ m}^3/\text{hari}$
= $0,001 \text{ m}^3/\text{detik}$

- b. Jumlah unit = 1
- c. Waktu detensi = 60 detik
- d. Gradien kecepatan = 700/detik
- e. Diameter pipa = 114 mm
- f. Temperatur air = 28°C
- g. Viskositas dinamis (μ) = 0,0008318 N.s/m²
- h. Viskositas kinematik (ν) = 8,35 x 10⁻⁷ m²/s
- i. Massa jenis air (ρ) = 0,9962 gram/cm³
= 9962 kg/m³
- j. Percepatan gravitasi (g) = 9,81 m/s²

Dari hal-hal yang telah direncanakan di atas, dapat dihitung satuan-satuan untuk bak koagulasi yang terdiri dari bak pembubuh koagulan dan bak penampungan setelah terjunan seperti di bawah ini.

a. Perencanaan bak pembubuh koagulan

Koagulan yang direncanakan untuk digunakan adalah aluminium sulfat atau tawas sehingga bak pembubuh koagulan direncanakan dapat mengolah dengan:

- 1) Dosis aluminium sulfat = 300 mg/L
- 2) Kadar aluminium sulfat pada larutan = 11%
- 3) Densitas aluminium sulfat = 2.670 kg/m³
- 4) Kedalaman air pada bak = 0,2 m
- 5) *Freeboard* = 0,2

Dari perencanaan tersebut, dapat dilakukan perhitungan yang meliputi:

1) Perhitungan kebutuhan aluminium sulfat

$$\begin{aligned}
 \text{Kebutuhan aluminium sulfat} &= \text{Dosis} \times \text{Debit lindi} \\
 &= 300 \text{ mg/L} \times 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \\
 &= \frac{300 \text{ mg/L}}{1000 \text{ kg/m}^3} \times 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \\
 &= 0,3 \text{ kg/m}^3 \times 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \\
 &= 26 \text{ kg/hari}
 \end{aligned}$$

2) Perhitungan volume aluminium sulfat

$$\begin{aligned} \text{Volume aluminium sulfat} &= \frac{\text{Berat}}{\text{Densitas}} \\ &= \frac{26 \text{ kg/hari}}{2.670 \text{ kg/m}^3} \\ &= 0,01 \text{ m}^3/\text{hari} \end{aligned}$$

3) Perhitungan volume larutan

$$\begin{aligned} \text{Volume larutan} &= \frac{\text{Volume aluminium sulfat}}{\text{Kadar aluminium sulfat pada larutan}} \\ &= \frac{0,01 \text{ m}^3/\text{hari}}{11\%} \\ &= 0,0088 \text{ m}^3/\text{hari} \end{aligned}$$

4) Perhitungan luas permukaan bak pembunuh koagulan

$$\begin{aligned} \text{Luas permukaan} &= \frac{\text{Volume larutan}}{\text{Kedalaman bak direncanakan}} \\ &= \frac{0,0088 \text{ m}^3/\text{hari}}{2 \text{ m}} \\ &= 0,44 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

5) Perhitungan panjang dan lebar

Direncanakan rasio panjang dan lebar adalah 1:1 sehingga panjang sama dengan lebar,

$$\begin{aligned} \text{Luas permukaan} &= P \times L \\ 0,44 \text{ m}^2 &= P \times P \\ &= P^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{0,44 \text{ m}^2} \\ &= 0,66 \approx 0,7 \text{ m} \end{aligned}$$

Sehingga, didapatkan panjang dan lebar dari bak pembunuh koagulan sebesar 0,7 m.

b. Perencanaan bak pengaduk cepat

Bak pengaduk cepat direncanakan memiliki:

- 1) Tinggi terjunan (H) = 1,5 m
- 2) Lebar = Lebar bak pembunuh koagulan
= 0,7 m
- 3) Tinggi bak = 0,2 m
- 4) *Freeboard* = 0,3 m
- 5) Ketinggian air pada bak terjunan = 0,2 m
- 6) Ketinggian air di atas terjunan (Hb) = 0,1 m

7) Beda tinggi/ketinggian terjunan (Z) = 1,5 m

Dari hal-hal yang telah direncanakan di atas, dapat dilakukan perhitungan-perhitungan di bawah ini:

1) Perhitungan volume bak

$$\begin{aligned}\text{Volume bak} &= \text{Debit lindi} \times \text{waktu detensi} \\ &= 0,001 \text{ m}^3/\text{detik} \times 60 \text{ detik} \\ &= 0,06 \text{ m}^3\end{aligned}$$

2) Perhitungan debit per lebar unit (q)

$$\begin{aligned}\text{Debit per lebar unit} &= \frac{\text{Debit}}{\text{Lebar unit}} \\ &= \frac{0,001 \text{ m}^3/\text{detik}}{0,7 \text{ m}} \\ &= 0,00143 \text{ m}^2/\text{detik}\end{aligned}$$

3) Perhitungan bilangan terjunan/*drop number* (D)

$$\begin{aligned}\text{Bilangan terjunan/drop number} &= \frac{\text{Debit per lebar unit}^2}{g \times \text{Tinggi terjunan}^3} \\ &= \frac{(0,00143 \text{ m}^2/\text{detik})^2}{9,81 \text{ m/s}^2 \times (1,5 \text{ m})^3} \\ &= 1,33 \times 10^{-8}\end{aligned}$$

4) Perhitungan nilai bilangan terjunan (L_d)

$$\begin{aligned}\text{Bilangan terjunan} &= 4,3 \times \text{tinggi terjunan} \times \text{bilangan terjunan}^{0,27} \\ &= 4,3 \times 1,5 \text{ m} \times (1,33 \times 10^{-8})^{0,27} \\ &= 0,08035 \text{ m}\end{aligned}$$

5) Perhitungan kedalaman air pada hulu loncatan (Y_1)

$$\begin{aligned}\text{Kedalaman air pada hulu loncatan} &= 0,54 \times H \times D^{0,425} \\ &= 0,54 \times 1,5 \text{ m} \times (1,33 \times 10^{-8})^{0,425} \\ &= 0,00061 \text{ m}\end{aligned}$$

6) Perhitungan kedalaman air pada hilir loncatan (Y_2)

$$\begin{aligned}\text{Kedalaman air pada hilir loncatan} &= 1,66 \times H \times D^{0,27} \\ &= 1,66 \times 1,5 \text{ m} \times (1,33 \times 10^{-8})^{0,27} \\ &= 0,03102 \text{ m}\end{aligned}$$

7) Perhitungan panjang loncatan (L)

$$\begin{aligned}\text{Panjang loncatan} &= 6 \times (Y_2 - Y_1) \\ &= 6 \times (0,03102 \text{ m} - 0,00061 \text{ m})\end{aligned}$$

$$= 0,18247 \text{ m}$$

- 8) Perhitungan kecepatan aliran dalam bak awal (v)

$$\begin{aligned} \text{Kecepatan aliran dalam bak awal} &= \frac{\text{Debit}}{\text{Luas permukaan bak pembubuh}} \\ &= \frac{0,001 \text{ m}^3/\text{detik}}{0,44 \text{ m}^2} \\ &= 0,0023 \text{ m/detik} \end{aligned}$$

- 9) Perhitungan kecepatan setelah terunan (v_1)

$$\begin{aligned} \text{Kecepatan setelah terjunan} &= v \times (2g \times (Z - 0,5 H_b)) \\ &= 0,0023 \text{ m/detik} \times ((2 \times 9,81 \text{ m/s}^2) \times (1,5 \text{ m} - (0,5 \times 0,1 \text{ m})) \\ &= 0,06243 \text{ m/detik} \end{aligned}$$

- 10) Perhitungan nilai bilangan froude (F_1)

$$\begin{aligned} \text{Nilai bilangan froude} &= \frac{v_1}{\sqrt{g \times Y_1}} \\ &= \frac{0,06243 \text{ m/detik}}{\sqrt{9,81 \text{ m/s}^2 \times 0,00061 \text{ m}}} \\ &= 0,81 \end{aligned}$$

- 11) Penentuan L_b/Y_2

Dari grafik hubungan antara panjang loncatan dengan nilai nilai bilangan froude, dengan nilangan froude sebesar 0,8 didapatkan L_b/Y_2 sebesar 3,8.

- 12) Perhitungan L_b

$$\begin{aligned} L_b/Y_2 &= 3,8 \\ L_b/0,03102 \text{ m} &= 3,8 \\ L_b &= 3,8 \times 0,03102 \text{ m} \\ &= 0,126 \text{ m} \end{aligned}$$

- 13) Perhitungan panjang minimum bak pengaduk cepat

$$\begin{aligned} \text{Panjang minimum bak pengaduk cepat} &= L_d + L + L_b \\ &= 0,08035 \text{ m} + 0,18247 \text{ m} + 0,126 \text{ m} \\ &= 0,4 \text{ m} \end{aligned}$$

Kemudian, ditetapkan panjang bak pengaduk cepat lebih dari 0,4 m. Direncanakan, panjang bak pengaduk cepat sebesar 0,8 m.

- 14) Perhitungan luas permukaan bak

$$\begin{aligned} \text{Luas permukaan bak} &= \text{Panjang} \times \text{lebar} \\ &= 0,8 \text{ m} \times 0,7 \text{ m} \\ &= 0,56 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

15) Perhitungan ketinggian air (H) pada bak

$$\begin{aligned} \text{Ketinggian air pada bak} &= \frac{\text{Volume}}{\text{Luas permukaan}} \\ &= \frac{0,06 \text{ m}^3}{0,56 \text{ m}^2} \\ &= 0,1 \text{ m} \end{aligned}$$

c. Perencanaan bak pengaduk lambat (flokulasi)

Bak flokulasi direncanakan bertipe *vertical baffle channel* dengan 6 kompartemen. Selain itu, unit ini direncanakan memiliki:

- 1) Gradien kompartemen 1 = 60/detik
- 2) Gradien kompartemen 2 = 50/detik
- 3) Gradien kompartemen 3 = 40/detik
- 4) Gradien kompartemen 4 = 30/detik
- 5) Gradien kompartemen 5 = 20/detik
- 6) Gradien kompartemen 6 = 10/detik
- 7) Waktu detensi pada setiap kompartemen = 450 detik
- 8) Panjang dan lebar unit = 0,4 m
- 9) *Freeboard* = 0,2 m
- 10) Viskositas kinematik (ν) = $8,35 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

Dari hal-hal yang telah direncanakan di atas, dapat dilakukan perhitungan-perhitungan sebagai berikut:

1) Perhitungan debit setiap kompartemen

$$\begin{aligned} \text{Debit setiap kompartemen} &= \frac{\text{Debit lindi}}{\text{Jumlah kompartemen}} \\ &= \frac{0,001 \text{ m}^3/\text{detik}}{6} \\ &= 0,000167 \text{ m}^3/\text{detik} \end{aligned}$$

2) Perhitungan volume setiap kompartemen

$$\begin{aligned} \text{Volume setiap kompartemen} &= \text{Debit} \times \text{waktu detensi} \\ &= 0,000167 \text{ m}^3/\text{detik} \times 450 \text{ detik} \\ &= 0,075 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

3) Perhitungan luas permukaan

Luas permukaan bak = Panjang x lebar

$$\begin{aligned}\text{Luas permukaan setiap kompartemen (As)} &= 0,4 \text{ m} \times 0,4 \text{ m} \\ &= 1,6 \text{ m}^2\end{aligned}$$

4) Perhitungan tinggi air dan beda tinggi

$$\begin{aligned}\text{Tinggi air kompartemen 1} &= \frac{\text{Volume}}{\text{Luas permukaan}} \\ &= \frac{0,075 \text{ m}^3}{1,6 \text{ m}^2} \\ &= 0,47 \text{ m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Beda tinggi pada kompartemen 1} &= \frac{G \times v \times \text{Tinggi air} \times \text{As}}{\text{Debit}} \\ &= \frac{60/\text{detik} \times 8,35 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \times 0,47 \text{ m} \times 1,6 \text{ m}^2}{0,000167 \text{ m}^3/\text{detik}} \\ &= 0,023 \text{ m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tinggi air kompartemen 2} &= \text{Tinggi air kompartemen 1} - \text{beda} \\ &\quad \text{tinggi kompartemen 1} \\ &= 0,47 \text{ m} - 0,023 \text{ m} \\ &= 0,45 \text{ m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Beda tinggi pada kompartemen 2} &= \frac{G \times v \times \text{Tinggi air} \times \text{As}}{\text{Debit}} \\ &= \frac{50/\text{detik} \times 8,35 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \times 0,45 \text{ m} \times 1,6 \text{ m}^2}{0,000167 \text{ m}^3/\text{detik}} \\ &= 0,018 \text{ m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tinggi air kompartemen 3} &= \text{Tinggi air kompartemen 2} - \text{beda} \\ &\quad \text{tinggi kompartemen 2} \\ &= 0,45 \text{ m} - 0,018 \text{ m} \\ &= 0,43 \text{ m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Beda tinggi pada kompartemen 3} &= \frac{G \times v \times \text{Tinggi air} \times \text{As}}{\text{Debit}} \\ &= \frac{40/\text{detik} \times 8,35 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \times 0,43 \text{ m} \times 1,6 \text{ m}^2}{0,000167 \text{ m}^3/\text{detik}} \\ &= 0,014 \text{ m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tinggi air kompartemen 4} &= \text{Tinggi air kompartemen 3} - \text{beda} \\ &\quad \text{tinggi kompartemen 3} \\ &= 0,43 \text{ m} - 0,014 \text{ m} \\ &= 0,41 \text{ m}\end{aligned}$$

$$\text{Beda tinggi pada kompartemen 4} = \frac{G \times v \times \text{Tinggi air} \times \text{As}}{\text{Debit}}$$

$$= \frac{30/\text{detik} \times 8,35 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \times 0,41 \text{ m} \times 1,6 \text{ m}^2}{0,000167 \text{ m}^3/\text{detik}}$$

$$= 0,01 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Tinggi air kompartemen 5} &= \text{Tinggi air kompartemen 4} - \text{beda} \\ &\quad \text{tinggi kompartemen 4} \\ &= 0,41 \text{ m} - 0,01 \text{ m} \\ &= 0,4 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Beda tinggi pada kompartemen 5} &= \frac{G \times v \times \text{Tinggi air} \times \text{As}}{\text{Debit}} \\ &= \frac{20/\text{detik} \times 8,35 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \times 0,4 \text{ m} \times 1,6 \text{ m}^2}{0,000167 \text{ m}^3/\text{detik}} \\ &= 0,006 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tinggi air kompartemen 6} &= \text{Tinggi air kompartemen 5} - \text{beda} \\ &\quad \text{tinggi kompartemen 5} \\ &= 0,4 \text{ m} - 0,006 \text{ m} \\ &= 0,39 \text{ m} \end{aligned}$$

Karena ketinggian air maksimum yang terjadi pada kompartemen 1 sebesar 0,47 m, direncanakan bak koagulasi memiliki ketinggian 0,5 m.

Dari perhitungan di atas, didapatkan dimensi bak ekualisasi seperti pada **Tabel 5.27** di bawah ini

Tabel 5.27 Dimensi Unit Koagulasi Flokulasi

No	Kriteria	Hasil Perhitungan	Satuan
Dimensi Bak Pembubuh			
1.	Panjang bak	0,7	m
2.	Lebar bak	0,7	m
3.	Kedalaman air	0,2	m
4.	<i>Freeboard</i>	0,2	m
Dimensi Bak Koagulasi			
1.	Panjang bak	0,8	m
2.	Lebar bak	0,7	m
3.	Kedalaman air	0,2	m
4.	<i>Freeboard</i>	0,3	m
5.	Tinggi terjunan	1,5	m
Dimensi Bak Flokulasi			

No	Kriteria	Hasil Perhitungan	Satuan
Dimensi Bak Pembubuh			
1.	Panjang setiap kompartemen	0,4	m
2.	Lebar setiap kompartemen	0,4	m
3.	Kedalaman air	0,5	m
4.	<i>Freeboard</i>	0,2	m

5.4.3 Dimensi Unit Prasedimentasi

Prasedimentasi merupakan unit *preliminary* pada pengolahan air yang berfungsi untuk mengendapkan partikel diskrit atau zat-zat padat yang terbawa oleh air sehingga dapat meringankan beban kerja unit selanjutnya. Unit prasedimentasi terdiri dari empat ruang atau zona, yakni zona *inlet*, zona pengendapan, zona lumpur, dan zona *outlet*. Menurut sistem kerjanya, prasedimentasi dapat dibedakan menjadi tiga, yakni prasedimentasi dengan pengendapan secara alami, *sand-traps*, dan prasedimentasi mekanik. Sementara menurut bentuknya, unit prasedimentasi dibedakan menjadi *rectangular* dan *circular* (Pratama dkk., 2021). Pada perencanaan ini, akan direncanakan unit prasedimentasi dengan tipe *rectangular*. Di bawah ini ditentukan dan dihitung dimensi-dimensi yang akan digunakan untuk perencanaan unit prasedimentasi bagi TPA Mrican.

Perencanaan unit prasedimentasi ini menggunakan kriteria-kriteria desain sebagai berikut:

Kriteria desain menurut Metcalf & Eddy, Inc. dkk. (2003)

a. Waktu detensi = 1,5–2,5 jam

Kriteria desain menurut Qasim (1999)

b. Rasio panjang terhadap lebar = 1–7,5

c. Kedalaman air = 2,5–5 m

Dari kriteria-kriteria desain di atas, direncanakan:

a. Temperatur lindi saat masuk = 28,4°C

b. Jumlah bak = 1 bak

c. Debit influen = 86,4 m³/hari
= 0,001 m³/detik

Dari hal-hal yang telah direncanakan di atas, dapat ditentukan dimensi-dimensi dari setiap zona pada unit prasedimentasi dengan perhitungan-perhitungan berikut:

a. Perencanaan zona *inlet*

Direncanakan zona *inlet* memiliki:

- 1) Lebar zona *inlet* = 1 m
- 2) Kecepatan aliran = 0,15 m/detik
- 3) Rencana waktu detensi = 5 menit
- 4) *Freeboard* = 0,2 m
- 5) Kedalaman zona inlet = 0,5 m

Dari rencana yang telah ditetapkan tersebut, dapat dihitung dimensi-dimensi untuk zona inlet sebagai berikut:

1) Perhitungan volume zona inlet

$$\begin{aligned} \text{Volume zona inlet} &= \text{Debit influen} \times \text{waktu detensi} \\ &= 0,001 \text{ m}^3/\text{detik} \times \frac{60 \text{ detik}}{1 \text{ menit}} \times 5 \text{ menit} \\ &= 0,3 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

2) Perhitungan luas permukaan zona inlet

$$\begin{aligned} A_{\text{Surface}} \text{ zona inlet} &= \frac{\text{Volume zona inlet}}{\text{Kedalaman zona inlet}} \\ &= \frac{0,3 \text{ m}^3}{0,5 \text{ m}} \\ &= 0,6 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

3) Perhitungan panjang zona inlet

$$\begin{aligned} \text{Panjang zona inlet} &= \frac{A_{\text{Surface}}}{\text{Lebar zona inlet}} \\ &= \frac{0,6 \text{ m}^2}{1 \text{ m}} \\ &= 0,6 \text{ m} \end{aligned}$$

4) Perhitungan kecepatan horizontal (V_h)

$$\begin{aligned} V_h &= \frac{\text{Debit influen}}{\text{Lebar} \times \text{kedalaman zona inlet}} \\ &= \frac{0,001 \text{ m}^3/\text{detik}}{1 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}} \\ &= 0,002 \text{ m/detik} \end{aligned}$$

5) Perhitungan keliling basah

$$\begin{aligned} \text{Keliling basah (R)} &= \frac{\text{Panjang} \times \text{kedalaman zona inlet}}{\text{Panjang} + (2 \times \text{kedalaman zona inlet})} \\ &= \frac{0,6 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}}{0,6 \text{ m} + (2 \times 0,5 \text{ m})} \\ &= 0,188 \text{ m} \end{aligned}$$

6) Pengecekan bilangan reynold

$$\begin{aligned} \text{Nre} &= \frac{V_h \times R}{\nu} \\ &= \frac{0,002 \text{ m/detik} \times 0,188 \text{ m}}{8,581 \times 10^{-7} \text{ m/detik}} \\ &= 437 \text{ (Ok laminar, Nre} < 2000) \end{aligned}$$

Nilai bilangan reynold yang kurang dari 2000 menunjukkan aliran pada zona inlet terjadi secara laminar.

7) Pengecekan bilangan fraud

$$\begin{aligned} \text{Nfr} &= \frac{V_h}{\sqrt{g \cdot R}} \\ &= \frac{0,002 \text{ m/detik}}{\sqrt{9,81 \text{ m/detik}^2 \times 0,188 \text{ m}}} \\ &= 1,47 \times 10^{-3} \text{ (Ok, Nfr} > 10^{-5}) \end{aligned}$$

Nilai bilangan fraud yang lebih dari 10^{-5} menunjukkan tidak adanya aliran singkat dalam zona inlet.

b. Perencanaan pintu air

Pintu air direncanakan memiliki kriteria:

- 1) Lebar pintu air rencana (b) = 0,3 m
- 2) Koefisien debit (C_d) = 0,6

Sehingga, diperoleh tinggi bukaan pintu air sebesar,

$$\begin{aligned} \text{Tinggi bukaan pintu air} &= \frac{3/2 \sqrt{\frac{Q \times 3}{2 \times C_d \times \sqrt{2 \times g \times b}}}}{} \\ &= \frac{3/2 \sqrt{\frac{0,001 \text{ m}^3/\text{detik} \times 3}{2 \times 0,6 \times \sqrt{2 \times 9,81 \text{ m/detik}^2 \times 0,3 \text{ m}}}}{} \\ &= 0,02 \text{ m} \end{aligned}$$

c. Perencanaan zona pengendapan

Untuk zona pengendapan, direncanakan:

- 1) Waktu detensi = 1,5 jam
- 2) *Free board* = 0,2 m
- 3) *Specific gravity* = 2,65

- 4) $v = 8,581 \times 10^{-7} \text{ m/detik}$
 $= 8,581 \times 10^{-5} \text{ cm/detik}$
- 5) Kecepatan partikel mengendap (V_s) $= 45 \text{ m/hari}$
 $= 0,00052083 \text{ m/detik}$
 $= 0,052083 \text{ cm/detik}$
- 6) *Overflow rate* $= 30 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hari}$

Sehingga dapat dihitung dimensi-dimensi berikut:

- 1) Perhitungan luas permukaan zona pengendapan

$$A_{Surface} = \frac{\text{Debit influen}}{\text{Over flow rate}}$$

$$= \frac{86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 24 \text{ jam} \times 3.600 \text{ detik}}{30 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hari}}$$

$$= 2,9 \text{ m}^2$$

- 2) Perhitungan panjang dan lebar zona pengendapan

Direncanakan rasio panjang : lebar (P:L) = 3 : 1, sehingga

$$\text{Panjang} \times \text{lebar} = A_{Surface}$$

$$3L \times L = 2,9 \text{ m}^2$$

$$L = \sqrt{\frac{2,9 \text{ m}^2}{3}}$$

$$= 0,98 \text{ m} \approx 1 \text{ m}$$

Lebar dari zona pengendap sebesar 1 m, sehingga panjang dari zona pengendap adalah

$$P = 3L$$

$$= 3 \times 1 \text{ m}$$

$$= 3 \text{ m}$$

- 3) Pengecekan luas permukaan zona pengendapan

$$A_{Surface} = \text{Panjang} \times \text{lebar}$$

$$= 3 \text{ m} \times 1 \text{ m}$$

$$= 3 \text{ m}^2$$

- 4) Perhitungan volume zona pengendapan

Direncanakan waktu detensi pada zona pengendapan selama 1,5 jam, sehingga didapatkan volume:

$$\text{Volume zona pengendap} = \text{Debit influen} \times \text{waktu detensi}$$

$$= 0,001 \text{ m}^3/\text{detik} \times \left(\frac{1,5 \text{ jam} \times 3.600 \text{ detik}}{1 \text{ jam}} \right)$$

$$= 5,4 \text{ m}^3$$

5) Perhitungan kedalaman bak

$$\text{Kedalaman bak} = \frac{\text{Volume zona pengendap}}{\text{Luas permukaan zona pengendap}}$$

$$= \frac{5,4 \text{ m}^3}{3 \text{ m}^2}$$

$$= 1,8 \text{ m}$$

Karena *freeboard* sebesar 0,2 m, untuk memudahkan pengukuran, kedalaman bak dijadikan 1,8 m.

6) Perhitungan diameter terkecil yang dapat terendapkan

Untuk menghitung diameter terkecil yang dapat terendapkan, digunakan hukum Stoke berikut:

$$\text{Diameter} = \sqrt{\frac{18 \times V_s \times v}{(\text{Specific gravity} - 1) \times g}}$$

$$d = \sqrt{\frac{18 \times 0,052083 \text{ cm/detik} \times 0,052083 \text{ cm/detik} \times 8,581 \times 10^{-5} \text{ cm/detik}}{(2,65 - 1) \times (9,81 \text{ m/s} \times 100)}}$$

$$= 0,00022 \text{ cm}$$

7) Perhitungan kecepatan penggerusan (V_{sc})

Dengan diketahui:

$$\beta = 0,04 \text{ Unigranulair sand}$$

$$= 0,06 \text{ Non uniform}$$

$$\text{Diambil rata-rata} = 0,03$$

$$\text{Faktor gesekan hidrolis } (\lambda) = 0,03$$

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

Diameter partikel (d)

$$\text{Berat jenis partikel } (\rho_s) = 2,65 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Berat jenis air } (\rho_w) = 1 \text{ g/cm}^3$$

Sehingga, didapatkan kecepatan penggerusan sebesar

$$V_{sc} = \sqrt{\frac{8\beta}{\lambda} \cdot \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \cdot g \cdot d}$$

$$= \sqrt{\frac{8 \times 0,03}{0,03} \cdot \frac{2,65 \text{ g/cm}^3 - 1 \text{ g/cm}^3}{1 \text{ g/cm}^3} \cdot 981 \text{ cm/s}^2 \cdot 0,00022}$$

$$= 2,081 \text{ cm/detik}$$

8) Perhitungan kecepatan horizontal (V_h)

$$\begin{aligned} V_h &= \frac{\text{Debit influen}}{\text{Lebar} \times \text{kedalaman zona pengendapan}} \\ &= \frac{0,001 \text{ m}^3/\text{detik}}{1 \text{ m} \times 1,8 \text{ m}} \\ &= 0,000556 \text{ m/detik} \\ &= 0,0556 \text{ cm/detik} \end{aligned}$$

9) Perhitungan keliling basah

$$\begin{aligned} \text{Keliling basah (R)} &= \frac{\text{Lebar} \times \text{kedalaman zona pengendap}}{\text{lebar} + (2 \times \text{kedalaman zona pengendap})} \\ &= \frac{1 \text{ m} \times 1,8 \text{ m}}{1 \text{ m} + (2 \times 1,8 \text{ m})} \\ &= 0,391 \text{ m} \end{aligned}$$

10) Pengecekan bilangan reynold

$$\begin{aligned} N_{re} &= \frac{V_h \times R}{\nu} \\ &= \frac{0,00056 \text{ m/detik} \times 0,391 \text{ m}}{8,581 \times 10^{-7} \text{ m/detik}} \\ &= 253,3 \quad (\text{Ok laminar, } N_{re} < 2000) \end{aligned}$$

Nilai bilangan reynold yang kurang dari 2000 menunjukkan aliran terjadi secara laminar.

11) Pengecekan bilangan froude

$$\begin{aligned} N_{fr} &= \frac{V_h}{\sqrt{g \cdot R}} \\ &= \frac{0,0556 \text{ cm/detik}}{\sqrt{9,81 \text{ m/detik}^2 \times 0,391 \text{ m}}} \\ &= 2,84 \times 10^{-4} \quad (\text{Ok, } N_{fr} > 10^{-5}) \end{aligned}$$

Nilai bilangan fraud yang lebih dari 10^{-5} menunjukkan tidak adanya aliran singkat dalam zona pengendap.

d. Perencanaan zona lumpur

Direncanakan zona lumpur memiliki dimensi-dimensi berikut:

- 1) *Specific gravity* = 2,65 gr/cm³
- 2) TSS influen atau konsentrasi SS = 26 mg/L
- 3) Konsentrasi diskrit dan grit = 90% × konsentrasi SS
- 4) Lumpur mengandung = 95% air dan 5% SS kering
- 5) Berat jenis SS = 2.650 kg/m³

$$6) \text{ Berat jenis air} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

Dari rencana zona lumpur di atas, dapat ditentukan dimensi-dimensi lainnya dari zona lumpur dengan perhitungan sebagai berikut,

1) Perhitungan konsentrasi diskrit dan grit

$$\begin{aligned} \text{Konsentrasi diskrit dan grit} &= 90\% \times \text{konsentrasi SS} \\ &= 90\% \times 26 \text{ mg/L} \\ &= 23,4 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

2) Perhitungan berat lumpur tersisihkan

$$\begin{aligned} \text{Lumpur tersisihkan} &= 50\% \times \text{konsentrasi diskrit \& grit} \\ &= 50\% \times 23,4 \text{ mg/L} \\ &= 11,7 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

3) Perhitungan lumpur yang lolos

$$\begin{aligned} \text{Lumpur lolos} &= \text{Konsentrasi diskrit dan grit} - \\ &\quad \text{lumpur tersisihkan} \\ &= 23,4 \text{ mg/L} - 11,7 \text{ mg/L} \\ &= 11,7 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

4) Perhitungan berat lumpur yang terendapkan

$$\begin{aligned} \text{Berat lumpur terendapkan} &= \text{Lumpur tersisihkan} \times \text{debit} \\ &= \frac{11,7 \text{ mg/L}}{\frac{1000 \text{ mg/L}}{\text{kg/m}^3}} \times 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \\ &= 0,94 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

5) Perhitungan berat air

$$\begin{aligned} \text{Berat air} &= (95\% / 5\%) \times \text{berat lumpur terendapkan} \\ &= (95\% / 5\%) \times 0,94 \text{ kg.hari} \\ &= 17,784 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

6) Perhitungan berat jenis lumpur

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis lumpur} &= (\text{Berat jenis SS} \times 5\%) + \\ &\quad (\text{berat jenis air} \times 95\%) \\ &= (2650 \text{ kg/hari} \times 5\%) + (342 \text{ kg/hari} \times \\ &\quad 95\%) \\ &= 1.082,5 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

7) Perhitungan volume lumpur

$$\begin{aligned}\text{Volume lumpur} &= \frac{(\text{Berat lumpur} + \text{berat air})}{\text{Berat jenis lumpur}} \\ &= \frac{(0,94 \text{ kg/hari} + 17,784 \text{ kg/hari})}{1.082,5 \text{ kg/m}^3} \\ &= 0,035 \text{ m}^3/\text{hari}\end{aligned}$$

Jika direncanakan pengurasan akan dilakukan setiap sepuluh hari sekali, maka volume lumpur:

$$\begin{aligned}\text{Volume lumpur 1 kali pengurasan} &= \text{Volume lumpur} \times 10 \text{ hari} \\ &= 0,035 \text{ m}^3/\text{hari} \times 10 \text{ hari} \\ &= 0,35 \text{ m}^3/10 \text{ hari}\end{aligned}$$

8) Penentuan lebar, panjang, dan kedalaman zona lumpur

$$\begin{aligned}\text{Lebar permukaan zona lumpur} &= \text{lebar zona pengendap} \\ &= 1 \text{ m}\end{aligned}$$

$$\text{Lebar dasar zona lumpur} = 0,5 \text{ m}$$

$$\text{Panjang permukaan zona lumpur} = 1 \text{ m}$$

$$\text{Panjang dasar zona lumpur} = 0,5 \text{ m}$$

$$\text{Kedalaman (h)} = 0,5 \text{ m}$$

9) Perhitungan luas permukaan zona lumpur

$$\begin{aligned}\text{Luas permukaan zona lumpur (A}_1\text{)} &= 1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \\ &= 1 \text{ m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Luas dasar zona lumpur (A}_2\text{)} &= 0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m} \\ &= 0,25 \text{ m}^2\end{aligned}$$

10) Pengecekan volume zona lumpur

Ruang lumpur berbentuk limas terbalik atau terpancung, sehingga volumenya dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{Volume zona lumpur} &= \frac{1}{3} \times h \times (A_1 + A_2 + \sqrt{(A_1 + A_2)}) \\ &= \frac{1}{3} \times 0,5 \text{ m} \times (1 \text{ m}^2 + 0,25 \text{ m}^2 + \sqrt{(1 \text{ m}^2 + 0,25 \text{ m}^2)}) \\ &= 0,39 \text{ m}^3\end{aligned}$$

e. Perencanaan *plate settler*

Untuk memperluas bidang pengendapan, sehingga pengendapan bisa berjalan dengan maksimal, unit prasedimentasi

dilengkapi dengan *plate settler*. *Plate settler* direncanakan memiliki kriteria sebagai berikut:

- 1) Viskositas kinematis pada suhu 28°C = $8,3497 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{detik}$
- 2) Sudut kemiringan *plate settler* = 60°
- 3) Jarak antar *plate settler* (w) = 10 cm = 0,1 m
- 4) Tebal *plate* (t) = 1 cm = 0,01 m
- 5) Kecepatan pengendapan (v_s) = 0,00052083 m/detik
- 6) Tinggi tegak *plate* = 0,8 m
- 7) Panjang miring *plate* sudut 60° = 0,8 m : sin 60° = 0,92 m

Dari rencana kriteria di atas, dapat dihitung dan ditentukan komponen-komponen berikut:

- 1) Perhitungan luas permukaan bak terjangkau *settler* (A)

$$\begin{aligned} \text{Luas permukaan} &= \frac{Q}{v_s} \times \frac{w}{h \cos \alpha + h \cos^2 \alpha} \\ &= \frac{0,001 \text{ m}^3/\text{deik}}{0,00052083 \text{ m/detik}} \times \frac{0,1 \text{ m}}{0,92 \text{ m} \cos 60^\circ + 0,92 \text{ m} \cos^2 60^\circ} \\ &= 0,39 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

- 2) Perhitungan kecepatan horizontal (v_h)

$$\begin{aligned} \text{Kecepatan horizontal } (v_h) &= \frac{Q}{A \sin \alpha} \\ &= \frac{0,001 \text{ m}^3/\text{deik}}{0,39 \text{ m}^2 \sin 60^\circ} \\ &= 0,00293 \text{ m/detik} \end{aligned}$$

- 3) Perhitungan debit celah *settler* (Q_{celah})

$$\begin{aligned} \text{Debit celah } \textit{settler} &= v_h \times \text{jarak antar } \textit{plate} \times \text{lebar bak} \\ &= 0,00293 \text{ m/detik} \times 0,1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \\ &= 0,000293 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

- 4) Perhitungan jumlah celah *settler* (N)

$$\begin{aligned} \text{Jumlah celah } \textit{settler} &= \frac{Q}{Q_{\text{celah}}} \\ &= \frac{0,001 \text{ m}^3/\text{detik}}{0,000293 \text{ m}^3} \\ &= 3,5 \approx 4 \end{aligned}$$

- 5) Perhitungan *plate settler* (N + 1)

$$\begin{aligned} \text{Jumlah } \textit{plate settler} &= N + 1 \\ &= 4 + 1 \end{aligned}$$

$$= 5$$

6) Perhitungan panjang zona *plate settler*

$$\begin{aligned} \text{Panjang zona } plate \text{ settler} &= (N \times w : \sin \alpha) + ((N+1) \times t : \sin \alpha) \\ &= (4 \times 0,1 \text{ m} : \sin 60^\circ) + ((4+1) \times 0,01 \text{ m} : \sin 60^\circ) \\ &= 0,5196 \text{ m} \approx 0,52 \text{ m} \end{aligned}$$

7) Perhitungan jari-jari hidrolis (R)

$$\begin{aligned} \text{Jari-jari hidrolis} &= \frac{w^2}{4+w} \\ &= \frac{(0,1 \text{ m})^2}{4+0,1 \text{ m}} = 0,025 \text{ m} \end{aligned}$$

8) Pengecekan bilangan reynold (N_{Re})

$$\begin{aligned} N_{re} &= \frac{v_h \times R}{v} \\ &= \frac{0,00293 \text{ m/detik} \times 0,025 \text{ m}}{8,3497 \times 10^{-7} \text{ m/detik}} \\ &= 87,67 \quad (\text{Ok laminar, } N_{re} < 2000) \end{aligned}$$

9) Pengecekan bilangan froude (N_{Fr})

$$\begin{aligned} N_{fr} &= \frac{v_h^2}{g \times R} \\ &= \frac{(0,00293 \text{ m/detik})^2}{9,81 \text{ m/detik}^2 \times 0,025 \text{ m}} \\ &= 3,5 \times 10^{-5} \quad (\text{Ok, } N_{fr} > 10^{-5}) \end{aligned}$$

Nilai bilangan fraud yang lebih dari 10^{-5} menunjukkan tidak adanya aliran singkat dalam zona pengendap.

f. Perencanaan zona *outlet*

Zona *outlet* direncanakan memiliki hal-hal sebagai berikut:

- 1) Beban pelimpah (*weir loading rate*) = $50 \text{ m}^3/\text{m.hari}$
= $0,000579 \text{ m}^3/\text{m.detik}$
- 2) Jumlah *weir* tiap *launder* = 2 (kiri dan kanan)
- 3) Jenis *weir* = *weir* segitiga (v-notch)
- 4) Koefisien debit (C_d) = 0,6
- 5) Tinggi air di atas *weir* (h) = 0,02 m
- 6) Tinggi *weir* bebas = 0,02 m
- 7) Lebar *launder* (b) = 0,15 m

Sehingga, dapat dihitung dan ditentukan komponen-komponen di bawah ini:

1) Penentuan panjang *launder*

$$\begin{aligned} \text{Panjang } \textit{launder} &= \text{Panjang zona } \textit{plate settler} \\ &= 0,52 \text{ m} \end{aligned}$$

2) Perhitungan panjang *weir* total

$$\begin{aligned} \text{Panjang } \textit{weir} \text{ total} &= \frac{\text{Debit influen}}{\text{Weir loading rate}} \\ &= \frac{0,001 \text{ m}^3/\text{detik}}{0,000579 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{detik}} \\ &= 1,73 \text{ m} \end{aligned}$$

3) Perhitungan jumlah *launder*

$$\begin{aligned} \text{Jumlah } \textit{launder} &= \frac{\text{Panjang } \textit{weir} \text{ total}}{\text{Jumlah } \textit{weir} \text{ tiap } \textit{launder} \times \text{panjang } \textit{launder}} \\ &= \frac{1,73 \text{ m}}{2 \times 0,52 \text{ m}} \\ &= 2 \end{aligned}$$

4) Perhitungan debit tiap *weir* (Q_{weir})

$$\begin{aligned} \text{Debit tiap } \textit{weir} \text{ (} Q_{\text{weir}} \text{)} &= \frac{8}{16} \times C_d \times \sqrt{2 \times g} \times h^{5/2} \\ &= \frac{8}{16} \times 0,6 \times \sqrt{2 \times 9,81 \text{ m/detik}^2} \times \\ &\quad 0,02 \text{ m}^{5/2} \\ &= 8,02 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{detik} \end{aligned}$$

5) Perhitungan jumlah *weir*

$$\begin{aligned} \text{Jumlah } \textit{weir} &= \frac{\text{Debit influen}}{\text{Debit tiap } \textit{weir}} \\ &= \frac{0,001 \text{ m}^3/\text{detik}}{8,02 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{detik}} \\ &= 12 \end{aligned}$$

6) Perhitungan jumlah *weir* tiap sisi *launder*

$$\begin{aligned} \text{Jumlah } \textit{weir} \text{ tiap sisi } \textit{launder} &= \text{Jumlah } \textit{weir} : \text{jumlah } \textit{launder} : \\ &\quad \text{jumlah } \textit{weir} \text{ tiap } \textit{launder} \\ &= 12 : 2 : 2 \\ &= 3 \end{aligned}$$

7) Perhitungan lebar air pada *weir*

$$\begin{aligned} \text{Lebar air pada } \textit{weir} &= 2 \times \text{tinggi air di atas } \textit{weir} \\ &= 2 \times 0,02 \text{ m} \end{aligned}$$

$$= 0,04 \text{ m}$$

8) Perhitungan tinggi *weir* total

$$\begin{aligned} \text{Tinggi } weir \text{ total} &= \text{Tinggi air di atas } weir + \text{tinggi } weir \text{ bebas} \\ &= 0,02 \text{ m} + 0,02 \text{ m} \\ &= 0,04 \text{ m} \end{aligned}$$

9) Perhitungan lebar *weir* total

$$\begin{aligned} \text{Lebar } weir \text{ total} &= 2 \times 0,04 \text{ m} \\ &= 0,08 \text{ m} \end{aligned}$$

10) Perhitungan panjang *weir* dalam satu sisi *launder*

$$\begin{aligned} \text{Panjang } weir \text{ tiap sisi } launder &= \text{Lebar } weir \text{ total} \times \text{jumlah } weir \\ &\hspace{15em} \text{tiap sisi } launder \\ \text{Panjang } weir \text{ tiap sisi } launder &= 0,08 \text{ m} \times 3 \\ &= 0,24 \text{ m} \end{aligned}$$

11) Perhitungan debit tiap *launder* (Q_L)

$$\begin{aligned} \text{Debit tiap } launder (Q_L) &= \frac{\text{Debit influen}}{\text{Jumlah } launder} \\ &= \frac{0,001 \text{ m}^3/\text{detik}}{2} \\ &= 0,0005 \text{ m}^3/\text{detik} \end{aligned}$$

12) Perhitungan debit per satuan lebar *launder* (q)

$$\begin{aligned} \text{Debit per satuan lebar } launder (q) &= \frac{\text{Debit tiap } launder}{\text{Lebar } launder} \\ &= \frac{0,0005 \text{ m}^3/\text{detik}}{0,15 \text{ m}} \\ &= 0,003 \text{ m}^3/\text{detik} \end{aligned}$$

13) Perhitungan kedalaman kritis pada hilir *launder* (y_c)

$$\begin{aligned} \text{Kedalaman kritis pada hilir } launder (y_c) &= \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \\ &= \sqrt[3]{\frac{(0,003 \text{ m}^3/\text{detik})^2}{9,81 \text{ m}/\text{detik}^2}} \\ &= 0,01 \text{ m} \end{aligned}$$

14) Perhitungan kedalaman maksimum pada hulu *launder* (H_o)

$$\text{Kedalaman maksimum pada hulu } launder = \sqrt{y_c^2 + \frac{2 \times Q_L^2}{g \times b^2 \times y_c}}$$

$$= \sqrt{(0,01\text{m})^2 + \frac{2 \times (0,0005 \text{ m}^3/\text{detik})^2}{9,81 \text{ m/detik}^2 \times (0,15\text{m})^2 \times 0,01 \text{ m}}}$$

$$= 0,018 \text{ m}$$

g. Perencanaan saluran pengumpul

Saluran pengumpul direncanakan memiliki dimensi-dimensi sebagai berikut:

- 1) Panjang = 0,6 m
- 2) Lebar = Lebar zona pengendapan
= 1 m
- 3) Kedalaman = 0,8 m

Dari perhitungan yang telah dilakukan untuk dimensi-dimensi unit prasedimentasi di atas yang terdiri dari zona *inlet*, pengendapan, lumpur, dan *outlet*, didapatkan hasil dimensi prasedimentasi seperti pada **Tabel 5.28** di bawah ini.

Tabel 5.28 Dimensi Unit Prasedimentasi

No	Kriteria	Hasil Perhitungan	Satuan
Zona Inlet			
1.	Lebar zona inlet	1	m
2.	Panjang zona inlet	0,6	m
3.	Kedalaman zona inlet	0,5	m
4.	<i>Freeboard</i> zona inlet	0,2	m ³
5.	Lebar pintu air	0,3	m
6.	Tinggi bukaan pintu air	0,02	m
Zona Pengendapan			
7.	Lebar zona pengendapan	1	m
8.	Panjang zona pengendapan	3	m
9.	Kedalaman zona pengendapan	1,8	m
10.	<i>Freeboard</i> zona pengendapan	0,2	m
11.	Panjang zona <i>plate settler</i>	0,52	m
12.	Jumlah celah <i>plate settler</i>	4	
13.	Jumlah <i>plate settler</i>	5	unit
14.	Sudut kemiringan <i>plate</i>	60	derajat
15.	Jarak antar <i>plate settler</i>	0,1	m

No	Kriteria	Hasil Perhitungan	Satuan
16.	Tinggi tegak <i>settler</i>	0,8	m
Zona Lumpur			
17.	<i>Slope</i> ruang lumpur	63	derajat
18.	Lebar permukaan limas	1	m
19.	Lebar dasar limas	0,5	m
20.	Panjang permukaan limas	1,0	m
21.	Panjang dasar limas	0,5	m
22.	Kedalaman zona lumpur	1	m
Zona Outlet			
23	Jumlah <i>launder</i>	2	
24	Jumlah sisi <i>launder</i>	2	sisi
25	Jumlah <i>weir</i> tiap sisi <i>launder</i>	3	
26	Lebar <i>launder</i>	0,15	m
27	Panjang <i>launder</i>	0,52	m
28	Tinggi <i>weir</i> total	0,04	m
29	Lebar air pada <i>weir</i>	0,04	m
30	Panjang saluran pengumpul	0,6	m
31	Lebar saluran pengumpul	1	m
32	Kedalaman saluran pengumpul	0,8	m

5.4.4 Dimensi Unit Biofilter Anaerobik

Anaerobic filter ‘filter anaerobik’ (AF) atau yang juga dikenal sebagai *fixed bed* ‘unggun tetap’ atau *fixed film reactor* ‘reaktor film tetap’ merupakan unit yang mengolah air limbah dengan cara mengontakkannya dengan bakteri aktif. Biofilter anaerobik dapat dioperasikan dengan sistem aliran bawah (*downflow*) atau aliran atas (*upflow*). Sistem aliran atas biasanya lebih disukai karena risiko penghilangan bakteri aktifnya yang lebih sedikit. Di sisi lain, pembilasan filter untuk tujuan pembersihan lebih mudah dilakukan pada AF dengan sistem aliran bawah. Kombinasi sistem aliran atas dan aliran bawah juga dapat digunakan untuk pengolahan air limbah. Hal terpenting pada pengolahan dengan unit ini adalah distribusi air limbah yang harus merata pada area filter (Sasse, 1998).

Menurut Said & Ruliasih (2005), pada pengaplikasiannya, keefektivan proses pengolahan pada biofilter sangat dipengaruhi oleh bentuk serta jenis media yang digunakan karena media tersebut berfungsi sebagai penyedia area permukaan untuk tempat berkoloni bakteri atau mikroorganisme yang memiliki peranan penting dalam pengolahan air limbah. Selain itu, agar bakteri dapat bekerja secara efektif, biofilter dan media penyangga juga harus didesain agar mampu menyediakan distribusi oksigen dan nutrisi serta menghilangkan produksi buangan yang terlarut dan tersuspensi. Pada penelitian yang dilakukan oleh Said & Ruliasih (2005) memaparkan bahwa tipe media biofilter terstruktur seperti tipe sarang tawon (*cross flow*) secara teknis dinilai paling baik untuk digunakan daripada kerikil ukuran kecil, kerikil ukuran besar, *mash pad*, *brilio pad*, *bio ball*, dan *random dumped* sebagai media biofilter untuk mengolah air limbah.

Dari hal-hal yang telah dijelaskan di atas, dipilih media sarang tawon (*cross flow*) sebagai media biofilter anaerobik yang direncanakan untuk TPA Mrican. Selain itu, dipilih pula sistem aliran atas dan aliran bawah. Di bawah ini merupakan kriteria-kriteria desain dari biofilter anaerobik. Kriteria desain menurut Tilley dkk. (2014):

- a. Waktu retensi hidraulik = 12–96 jam
- b. Luas permukaan media = 90 – 300 m²/m³
- c. Kedalaman media = 0,9–1,5 m
- d. Tinggi air di atas media = ≥ 0,3 m
- e. Jarak plat penyangga media dan dasar bak = 0,5–0,6 m

Kriteria menurut Kunio dan Nuriatsu (1992):

- f. Beban BOD per satuan luas media = 5–30 g.BOD/m².hari

Kriteria menurut Said (2017):

- g. Beban BOD per volume media = 0,4–4,7 kg.BOD/m³.hari

Kriteria menurut Sasse (1998):

- h. *Velocity upflow* = < 2 m/jam

Dari kriteria-kriteria desain di atas, direncanakan:

- a. Beban BOD per volume media = 4 kg.BOD/m³.hari
- b. Kedalaman ruang biofilter = 2,3 m
- c. Jarak plat penyangga media dan dasar bak = 0,5 m
- d. Volume media filter = 50% dari ruang biofilter
- e. Jumlah kompartemen = 4
- f. Tinggi air di atas media = 0,3 m
- g. Rasio panjang : lebar (P : L) = 1 : 3
- h. Debit influen = 86,4 m³/hari
- i. BOD influen = 1073,28 mg/L
= 1,07328 kg/m³

Dari kriteria-kriteria desain yang telah dipilih, dilakukan perhitungan berikut untuk menentukan dimensi-dimensi atau ukuran-ukuran dari biofilter anaerobik yang akan direncanakan:

a. Perhitungan beban BOD

$$\begin{aligned} \text{Beban BOD} &= \text{Debit influen} \times \text{konsentrasi BOD influen} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 1,0738 \text{ kg/m}^3 \\ &= 92,73 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

b. Perhitungan volume media filter yang dibutuhkan

$$\begin{aligned} \text{Volume media filter} &= \frac{\text{Beban BOD}}{\text{Kapasitas beban organik media direncanakan}} \\ &= \frac{92,73 \text{ kg/hari}}{4 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{hari}} \\ &= 23 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Volume total media filter didapatkan sebesar 23 m³, sehingga volume media filter pada satu kompartemen adalah

$$\begin{aligned} \text{Volume media filter pada satu kompartemen} &= \frac{\text{Volume total media filter}}{\text{Jumlah kompartemen}} \\ &= \frac{23 \text{ m}^3}{4} \\ &= 5,8 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

c. Perhitungan volume ruang biofilter

Karena direncanakan volume media filter sebesar 50% dari ruang biofilter, didapatkan ruang biofilter sebesar,

$$\text{Volume ruang biofilter} = \frac{\text{Volume media filter}}{50\%}$$

$$= \frac{23 \text{ m}^3}{0,5}$$

$$= 46,37 \text{ m}^3$$

Volume total ruang biofilter didapatkan sebesar $46,37 \text{ m}^3$, sehingga volume satu ruang biofilter atau satu kompartemen adalah

$$\text{Volume satu kompartemen} = \frac{\text{Volume ruang biofilter}}{\text{Jumlah kompartemen}}$$

$$= \frac{46,37 \text{ m}^3}{4}$$

$$= 11,59 \text{ m}^3$$

d. Perhitungan luas penampang biofilter

Karena telah direncanakan tinggi media sebesar 1,5 m, luas penampang biofilter dapat dihitung sebagai berikut,

$$\text{Luas penampang biofilter} = \frac{\text{Volume satu ruang biofilter}}{\text{Kedalaman ruang biofilter}}$$

$$= \frac{11,59 \text{ m}^3}{2,3 \text{ m}}$$

$$= 5,04 \text{ m}^2$$

e. Perhitungan panjang dan lebar biofilter

Setelah didapatkan luas penampang sebesar $5,04 \text{ m}^2$ dan ditetapkan rasio panjang : lebar sebesar 1 : 3, panjang dan lebar biofilter ditentukan dengan perhitungan berikut,

$$\text{Luas penampang biofilter} = \text{Panjang} \times \text{lebar}$$

$$5,04 \text{ m}^2 = P \times 3P$$

$$= 3P^2$$

$$P = \sqrt{\frac{5,04 \text{ m}^2}{3}}$$

$$= 1,296 \text{ m} \approx 1,3 \text{ m}$$

Didapatkan panjang kompartemen atau satu ruang biofilter sebesar 1,3 m, sehingga lebar kompartemen dapat dihitung sebagai berikut,

$$\text{Lebar} = 3 \times \text{Panjang}$$

$$= 3 \times 1,3 \text{ m}$$

$$= 3,9 \text{ m}$$

f. Pengecekan luas penampang satu ruang biofilter atau kompartemen

$$\text{Luas penampang kompartemen} = \text{Panjang} \times \text{lebar}$$

$$= 1,3 \text{ m} \times 3,9 \text{ m}$$

$$= 5,07 \text{ m}^2$$

- g. Pengecekan kesesuaian kecepatan aliran dalam biofilter dengan kriteria desain

$$\text{Kecepatan aliran dalam biofilter} = \frac{\text{Debit influen}}{\text{Luas penampang kompartemen}}$$

$$= \frac{86,4 \text{ m}^3/\text{hari}}{5,07 \text{ m}^2}$$

$$= 17,04 \text{ m/hari}$$

$$= 0,71 \text{ m/jam}$$

Didapatkan kecepatan aliran dalam biofilter sebesar 0,71 m/jam. Kecepatan aliran tersebut memenuhi kriteria desain, yakni < 1,2 m/jam.

- h. Perhitungan kedalaman media biofilter

$$\text{Kedalaman media} = \frac{\text{Volume media}}{\text{Luas permukaan}}$$

$$= \frac{5,8}{5,07 \text{ m}^2}$$

$$= 1,1 \text{ m dijadikan } 1,4 \text{ m}$$

Didapatkan bahwa dengan kedalaman 2,3 m tersebut, dirancang media dengan tinggi 1,4 m, jarak antara plat penyangga media dengan dasar tangki sebesar 0,5 m, ketebalan plat penyangga 0,1 m, dan ketinggian air di atas media sebesar 0,3 m.

- i. Perhitungan total volume aktif biofilter

$$\text{Total volume aktif biofilter} = \text{Panjang} \times \text{lebar} \times \text{kedalaman} \times \text{jumlah kompartemen}$$

$$= 1,3 \text{ m} \times 3,9 \text{ m} \times 2,3 \text{ m} \times 4$$

$$= 46,64 \text{ m}^3$$

- j. Perhitungan HRT dalam ruang biofilter

$$\text{HRT dalam ruang biofilter} = \frac{\text{Total volume aktif biofilter}}{\text{Debit influen}}$$

$$= \frac{46,64 \text{ m}^3}{86,4 \text{ m}^3/\text{hari}}$$

$$= 0,54 \text{ hari}$$

$$= 13 \text{ jam}$$

HRT dalam ruang biofilter sebesar 13 jam dinyatakan memenuhi kriteria menurut Tilley dkk. (2014), yakni 12–96 jam.

Sebelum ruang biofilter, hendaknya biofilter anaerobik didahului dengan tangki pengendap untuk menghindari akumulasi padatan yang berat pada media filter. Tangki pengendap dapat dimasukkan dalam struktur yang sama dan ditempatkan sebagai kompartemen pertama dari biofilter anaerobik atau menjadi konstruksi terpisah, seperti *septic tank* atau biogas digester (UPM Umwelt-Projekt-Management GmbH, 2021b).

Direncanakan:

HRT pada zona sedimentasi = 3 jam

Sehingga didapatkan perhitungan:

a. Perhitungan lebar zona sedimentasi

$$\begin{aligned}\text{Lebar zona sedimentasi} &= \text{lebar ruang biofilter} \\ &= 3,9 \text{ m}\end{aligned}$$

b. Perhitungan kedalaman aktif

$$\begin{aligned}\text{Kedalaman aktif} &= \text{Kedalaman ruang biofilter} \\ &= 2,3 \text{ m}\end{aligned}$$

c. Perhitungan panjang zona sedimentasi

$$\begin{aligned}\text{Panjang zona sedimentasi} &= \frac{\text{HRT} \times \text{Debit influen}}{\text{Lebar} \times \text{Kedalaman}} \\ &= \frac{3 \text{ jam} \times \frac{86,4 \text{ m}^3/\text{hari}}{24 \text{ jam/hari}}}{3,9 \text{ m} \times 2,3 \text{ m}} \\ &= 1,2 \text{ m}\end{aligned}$$

d. Volume zona sedimentasi

$$\begin{aligned}\text{Volume zona sedimentasi} &= \text{Panjang} \times \text{lebar} \times \text{kedalaman} \\ &= 1,2 \text{ m} \times 3,9 \text{ m} \times 2,3 \text{ m} \\ &= 10,8 \text{ m}^3\end{aligned}$$

Dari kriteria-kriteria dan perhitungan-perhitungan di atas, didapatkan rencana dimensi-dimensi untuk biofilter anaerobik seperti pada **Tabel 5.29** di bawah ini.

Tabel 5.29 Dimensi Biofilter Anaerobik

No	Kriteria	Hasil Perhitungan	Satuan
Ruang Biofilter			
1.	Jumlah kompartemen	4	Ruang
2.	Panjang kompartemen	1,3	m
3.	Lebar kompartemen	3,9	m
4.	Kedalaman kompartemen	2,3	m
5.	Panjang media filter	1,3	m
6.	Lebar media filter	3,9	m
7.	Ketinggian media filter	1,4	m
8.	Volume setiap kompartemen	11,59	m ³
9.	Volume media setiap kompartemen	5,8	m ³
10	Ketinggian air di atas media	0,3	m
11	Jarak plat penyangga media dengan dasar tangki	0,5	m
Ruang Sedimentasi			
12	Panjang ruang	1,2	m
13	Lebar ruang	3,9	m
14	Kedalaman ruang	2,3	m

5.4.5 Dimensi Unit Biofilter Aerobik

Biofilter aerobik merupakan unit pengolahan air limbah secara biologis yang terdiri dari media tempat tumbuh dan berkembangnya mikroorganisme dan dilengkapi dengan sistem aerasi. Pada proses pengolahan menggunakan biofilter aerobik, polutan organik yang masih tersisa akan terurai menjadi gas karbon dioksida (CO₂) dan air (H₂O). Gas H₂S akan berubah menjadi sulfat. Sementara itu, amoniak akan teroksidasi menjadi nitrit yang kemudian akan menjadi nitrat (Dewi & Slamet, 2021). Menurut biofilter aerobik dengan media sarang tawon mampu untuk menurunkan zat organik, kekeruhan, padatan terlarut total (TSS), amonia, nitrat, dan deterjen (Said & Herlambang, 2014). Biofilter aerobik menghasilkan lebih banyak lumpur daripada biofilter anaerobik. Namun, biofilter aerobik memiliki efek pembersihan sendiri ketika diberikan waktu detensi yang cukup, karena lumpur aerobik terdiri dari

bakteri hidup yang melakukan semacam kanibalisme atau autolisis ketika suplai nutrisi berhenti (Sasse, 1998).

Di bawah ini merupakan kriteria-kriteria desain untuk biofilter aerobik:

Kriteria desain menurut (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Cipta Karya Direktorat Pengembangan Penyehatan Lingkungan Permukiman, 2018b):

- a. Tinggi bed media filter = 0,9–1,5 m
- b. Tinggi air minimum di atas permukaan media = 20 cm
- c. Beban BOD per volume media = 0,5–4 kg.BOD/m³.hari

Kriteria menurut Kunio dan Nuriatsu (1992):

- d. Beban BOD per satuan luas media = 5–30 g.BOD/m².hari

Kriteria menurut Sasse (1998):

- e. *Velocity upflow* = < 2 m/jam

Kriteria menurut Metcalf & Eddy, Inc. dkk. (2003)

- f. Waktu tinggal = 2–10 jam

Dari kriteria-kriteria desain di atas, direncanakan:

- a. *Freeboard* = 0,3 m
- b. Standard beban BOD = 1,2 kg.BOD/m³.hari
- c. Volume media filter = minimal 50% dari ruang media filter
- d. Kedalaman reaktor = 2,5 m
- e. Panjang sekat = 0,2 m
- f. Rasio panjang : lebar (P : L) = 1 : 1
- g. Debit influen = 86,4 m³/hari
- h. BOD influen = 321,98 mg/L
- i. COD influen = 1.143,73mg/L
- j. TSS influen = 0,65 mg/L

Dari kriteria perencanaan di atas, dapat dihitung dimensi-dimensi atau ukuran-ukuran pada unit biofilter aerobik yang direncanakan. Perhitungan dimensi-dimensi tersebut adalah sebagai berikut,

- a. Perhitungan beban BOD

$$\begin{aligned}
\text{Beban BOD} &= Q \times \text{BOD influen} \\
&= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 321,98 \text{ mg/L} \\
&= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,32198 \text{ kg/m}^3 \\
&= 27,82 \text{ kg/hari}
\end{aligned}$$

b. Perhitungan volume filter yang dibutuhkan media

$$\begin{aligned}
\text{Volume media filter} &= \frac{\text{Beban BOD}}{\text{Kapasitas beban organik media direncanakan}} \\
&= \frac{27,82 \text{ kg/hari}}{1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{hari}} \\
&= 23,18 \text{ m}^3
\end{aligned}$$

c. Perhitungan volume ruang biofilter

Karena direncanakan volume media filter sebesar 50% dari ruang biofilter, didapatkan ruang biofilter atau reaktor sebesar,

$$\begin{aligned}
\text{Volume reaktor} &= \frac{\text{Volume media filter}}{50\%} \\
&= \frac{23,18 \text{ m}^3}{0,5} \\
&= 46,37 \text{ m}^3
\end{aligned}$$

d. Perhitungan waktu tinggal

$$\begin{aligned}
\text{Waktu tinggal} &= \frac{\text{Volume ruang biofilter}}{\text{Debit air lindi}} \\
&= \frac{46,37 \text{ m}^3}{\frac{86,4 \text{ m}^3/\text{hari}}{24 \text{ jam/hari}}} \\
&= 12,88 \text{ jam}
\end{aligned}$$

e. Perhitungan luas permukaan reaktor

$$\begin{aligned}
\text{Luas permukaan reaktor} &= \frac{\text{Volume reaktor}}{\text{Kedalaman reaktor}} \\
&= \frac{46,37 \text{ m}^3}{2,5 \text{ m}} \\
&= 18,5 \text{ m}^2
\end{aligned}$$

f. Perhitungan panjang dan lebar reaktor

Setelah didapatkan luas permukaan reaktor sebesar 18,5 m² dan direncanakan rasio panjang : lebar (P : L) reaktor adalah 1 : 1, maka panjang dan lebar reaktor dapat dihitung sebagai berikut,

$$\begin{aligned}
\text{Luas permukaan reaktor} &= P \times L \\
18,5 \text{ m}^2 &= P \times P
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 18,5 \text{ m}^2 &= P^2 \\
 P &= \sqrt{18,5 \text{ m}^2} \\
 &= 4,31 \text{ m} \approx 4,4 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Karena rasio panjang terhadap lebar adalah 1 : 1 maka,

$$\begin{aligned}
 L &= P \\
 &= 4,4 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas, didapatkan panjang reaktor sebesar 4,4 m.

Reaktor dibagi menjadi dua ruang yakni ruang media dan ruang aerasi.

Direncanakan ruang aerasi memiliki panjang 0,5 m, sehingga panjang ruang media dapat dihitung sebagai berikut,

$$\begin{aligned}
 \text{Panjang ruang media} &= \text{Panjang total reaktor} - \text{panjang ruang aerasi} \\
 &= 4,4 \text{ m} - 0,5 \text{ m} \\
 &= 3,9 \text{ m}
 \end{aligned}$$

g. Pengecekan volume reaktor

$$\begin{aligned}
 \text{Volume reaktor} &= \text{Panjang total} \times \text{lebar} \times \text{kedalaman} \\
 &= 4,4 \text{ m} \times 4,4 \text{ m} \times 2,5 \text{ m} \\
 &= 48,4 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Setelah dilakukan pengecekan, didapatkan volume reaktor sebesar 48,4 m³, maka panjang dan lebar reaktor dinyatakan memenuhi karena volume setelah dilakukan pengecekan tidak kurang dari volume perhitungan awal.

h. Pengecekan waktu tinggal dalam reaktor

$$\begin{aligned}
 \text{Waktu tinggal dalam reaktor} &= \frac{\text{Volume reaktor}}{\text{Debit air lindi}} \\
 &= \frac{48,4 \text{ m}^3}{\frac{86,4 \text{ m}^3/\text{hari}}{24 \text{ jam/hari}}} \\
 &= 13,4 \text{ jam}
 \end{aligned}$$

i. Perhitungan panjang dan lebar media

$$\begin{aligned}
 \text{Panjang media} &= \text{Panjang ruang media} \\
 &= 3,9 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Lebar media} &= \text{Lebar reaktor} \\
 &= 4,4 \text{ m}
 \end{aligned}$$

j. Perhitungan tinggi media

$$\begin{aligned} \text{Tinggi media} &= \frac{\text{Volume media}}{\text{Panjang} \times \text{lebar}} \\ &= \frac{23,18 \text{ m}^3}{3,9 \text{ m} \times 4,4 \text{ m}} \\ &= 1,4 \text{ m} \end{aligned}$$

k. Pengecekan volume media

$$\begin{aligned} \text{Volume media} &= \text{Panjang} \times \text{lebar} \times \text{tinggi} \\ &= 3,9 \text{ m} \times 4,4 \text{ m} \times 1,4 \text{ m} \\ &= 24 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

l. Perhitungan kebutuhan udara teoritis

Untuk memperhitungkan udara teoritis, direncanakan:

$$\begin{aligned} \text{Temperatur udara rata-rata} &= 28^\circ\text{C} \\ \text{Massa jenis udara pada temperatur } 28^\circ\text{C} (\rho) &= 1,1725 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Jumlah oksigen di udara} &= 23,2\% \\ \text{Faktor keamanan untuk media plastik sarang tawon} &= 1,6 \text{ (Metcalf} \\ &\text{ \& Eddy, Inc. dkk., 2003)} \end{aligned}$$

Dari kriteria-kriteria di atas, kemudian dilakukan perhitungan-perhitungan sebagai berikut:

m. Pengecekan beban BOD per volume media

$$\begin{aligned} \text{Beban BOD per volume media} &= \frac{\text{Beban BOD}}{\text{Volume media}} \\ &= \frac{27,82 \text{ kg/hari}}{24 \text{ m}^3} \\ &= 1,16 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{hari} \end{aligned}$$

n. Penyisihan BOD

$$\begin{aligned} &= 95\% \times 27,82 \text{ kg/hari} \\ &= 26,43 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

o. Perhitungan kebutuhan oksigen

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan oksigen} &= \text{Faktor keamanan} \times \text{BOD yang dihilangkan} \\ &= 1,6 \times 26,43 \text{ kg/hari} \\ &= 42,29 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

p. Kebutuhan udara teoritis = $\frac{\text{Kebutuhan oksigen}}{\text{Massa jenis udara} \times \text{jumlah oksigen di udara}}$

$$\begin{aligned} &= \frac{42,29 \text{ kg/hari}}{1,1725 \text{ kg/m}^3 \times 23,2\%} \\ &= 155,45 \text{ m}^3/\text{hari} \end{aligned}$$

q. Perhitungan kebutuhan udara aktual

Diketahui efisiensi dari blower udara tipe *rigid porous tubes, single spiral roll* sebesar 9 – 12% (Metcalf & Eddy, Inc. dkk., 2003). Dipilih blower dengan efisiensi 10%, sehingga perhitungan dari kebutuhan udara aktual adalah sebagai berikut

$$\begin{aligned}
 \text{Kebutuhan udara aktual} &= \frac{\text{Kebutuhan udara teoritis}}{\text{Efisiensi blower}} \\
 &= \frac{155,45 \text{ m}^3/\text{hari}}{10\%} \\
 &= 1554,5 \text{ m}^3/\text{hari} \\
 &= 1,080 \text{ m}^3/\text{menit} \\
 &= 1.080 \text{ L/menit}
 \end{aligned}$$

r. Pemilihan blower udara

Setelah didapat kebutuhan udara aktual sebesar 1.080 L/menit, ditentukan untuk memakai blower udara dengan kapasitas minimal 1.080 L/menit.

Dari kriteria-kriteria dan perhitungan-perhitungan di atas, didapatkan rencana dimensi-dimensi untuk biofilter anaerobik seperti pada **Tabel 5.30** di bawah ini.

Tabel 5.30 Dimensi Biofilter Aerobik

No	Kriteria	Hasil Perhitungan	Satuan
1.	Panjang reaktor	4,4	m
2.	Lebar reaktor	4,4	m
3.	Kedalaman reaktor	2,5	m
4.	Panjang ruang aerasi	0,5	m
5.	Panjang ruang media	3,9	m
6.	Panjang media filter	3,9	m
7.	Lebar media filter	4,4	m
8.	Kedalaman media filter	1,4	m
9.	Volume reaktor	48,4	m ³
10	Volume media	24	m ³
11	Ketinggian air di atas media	0,5	m
12	Jarak plat penyangga media dengan dasar tangki	0,6	m

5.4.6 Dimensi Unit Constructed Wetland

Constructed wetland ‘lahan basah buatan’ adalah sistem pengolahan air limbah buatan yang terdiri dari kolam atau saluran dangkal (biasanya kurang dari 1 m) yang telah ditanami tanaman air, dan yang mengandalkan proses mikroba, biologi, fisik, dan kimia alami untuk mengolah air limbah (U.S. EPA, 1999). Lahan basah buatan yang umum digunakan terdiri dari dua jenis, yakni lahan basah dengan permukaan air bebas atau *free water surface* (FWS) dan lahan basah aliran bawah atau *subsurface flow* (SF). Lahan basah dengan permukaan air bebas memaparkan permukaan air dalam sistem ke atmosfer. Sementara itu, lahan basah dengan aliran bawah permukaan mempertahankan ketinggian air di bawah permukaan kerikil atau media lain yang ditempatkan di dasar lahan basah (U.S. EPA, 1993).

Untuk perencanaan unit *constructed wetland* TPA Mrican, dipilih *constructed wetland* dengan tipe *subsurface flow*. Dimensi-dimensi untuk *constructed wetland* tersebut direncanakan menggunakan kriteria-kriteria desain berikut:

Kriteria desain menurut Crites dan Tchobanoglous (2003)

- a. Kedalaman air = 0,1–1 m
- b. *Hydraulic loading rate* (HLR) = 2–30 cm/hari
- c. Kedalaman media = 0,45–0,75 m

Kriteria desain menurut U.S. EPA (2004):

- d. Porositas media (α) medium gravel = 0,4
- e. Konduktivitas hidraulik (k_s) media medium gravel = 10.000 m³/m².hari
- f. Koefisien standar pada suhu 20°C (K_{20}) = 0,86/hari
- g. *Slope* = 0,5–1%

Dari kriteria-kriteria desain di atas, direncanakan:

- a. Debit influen = 80 m³/hari
Debit influen = 0,00093 m³/detik
- b. Jumlah unit = 3 unit
- c. Temperatur (T) = 28,4°C
- d. Tipe vegetasi = *Canna indica*

- e. Media = Medium gravel
- f. Slope 1% = 1%
- g. BOD influen (Co) = 16,10 mg/L
- h. BOD effluen (Ce) = 6,44 mg/L
- i. Efisiensi penyisihan BOD = 60%
- j. TSS influen = 0,23 mg/L
- k. TSS effluen = 0,03 mg/L
- l. Efisiensi penyisihan TSS = 89%

Dari rencana yang telah ditetapkan di atas, untuk mendapatkan ukuran-ukuran lainnya dilakukan perhitungan seperti di bawah ini.

a. Perhitungan BOD yang disisihkan

$$\begin{aligned} \text{BOD yang disisihkan} &= \text{BOD influen} - \text{BOD effluen} \\ &= 16,10 \text{ mg/L} - 6,44 \text{ mg/L} \\ &= 9,66 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

b. Perhitungan laju konstanta pada suhu T_A (K_T)

Untuk perencanaan *constructed wetland* dengan sistem *subsurface flow* dengan suhu referensi 20°C, menurut (Direktorat Jenderal Cipta Karya, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017) diketahui:

Laju konstanta pada suhu referensi (K_R) = 1,104/hari

Koefisien suhu untuk konstanta laju pada suhu referensi (θ_R) = 1,06

$$\begin{aligned} K_T &= K_R \times \theta_R^{(\text{Suhu air} - \text{suhu referensi})} \\ &= 1,104/\text{hari} \times 1,06^{(28,4^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})} \\ &= 1,8/\text{hari} \end{aligned}$$

c. Perhitungan debit tiap unit

$$\begin{aligned} \text{Debit tiap unit} &= \frac{\text{Debit influen}}{\text{Jumlah unit}} \\ &= \frac{86,4 \text{ m}^3/\text{hari}}{3 \text{ unit}} = 28,8 \text{ m}^3/\text{hari} \end{aligned}$$

d. Perhitungan waktu detensi *pore space*

$$\text{Waktu detensi} = - \left(\frac{\text{LN} \left(\frac{\text{BOD Effluen}}{\text{BOD influen}} \right)}{K_T} \right)$$

$$= - \left(\frac{\text{LN} \left(\frac{6,44 \text{ mg/L}}{16,10 \text{ mg/L}} \right)}{1,8/\text{hari}} \right)$$

$$= 0,5 \text{ hari}$$

e. Kedalaman media

Direncanakan *constructed wetland* dengan tanaman *Canna indica* atau *Common reed* atau *Phragmites sp.*. *Canna indica* dipilih karena memiliki kemampuan untuk menyisihkan polutan organik dengan kadar yang tinggi, meliputi COD sebesar 87%, BOD sebesar 91%., total nitrogen (TN) sebesar 97% dan total fosfor (TP) sebesar 98% pada pengolahan limbah menggunakan *constructed wetland* (Pinninti dkk., 2021). Menurut U.S. EPA (1993), panjang akar *Canna indica* dapat mencapai 0,6 m sehingga kedalaman dari media *constructed wetland* direncanakan setinggi 0,6 m.

f. Perhitungan luas penampang ($A_{Surface}$)

$$A_{Surface} = \frac{\text{Debit tiap unit} \times (\text{LN (konsentrasi BOD influen)} - \text{LN (konsentrasi BOD efluen)})}{K_T \times \alpha \times \text{kedalaman media}}$$

$$A_{Surface} = \left(\frac{28,8 \text{ m}^3/\text{hari} \times (\text{LN (16,10 mg/L)} - \text{LN (6,44 mg/L)})}{1,8/\text{hari} \times 0,4 \times 0,6 \text{ m}} \right)$$

$$= 61,05 \text{ m}^2$$

g. Perhitungan A_{Cross}

$$A_{Cross} = \frac{\text{Debit tiap unit}}{\text{Slope} \times k_s}$$

$$= \frac{28,8 \text{ m}^3}{1\% \times 10.000 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hari}}$$

$$= 0,288 \text{ m}^2$$

h. Perhitungan panjang dan lebar

Direncanakan rasio panjang : lebar (P : L) = 3 : 2, sehingga dapat dihitung sebagai berikut,

$$P \times L = A_{Surface}$$

$$P \times \frac{2}{3}P = 61,05 \text{ m}^2$$

$$\frac{2}{3}P^2 = 61,05 \text{ m}^2$$

$$P = \sqrt{\frac{61,05 \text{ m}^2}{2/3}}$$

$$= 9,6 \text{ m}$$

Sehingga, lebar dari satu unit adalah

$$\begin{aligned} L &= \frac{2}{3} P \\ &= \frac{2}{3} (9,6 \text{ m}) \\ &= 6,4 \text{ m} \end{aligned}$$

i. Pengecekan luas permukaan ($A_{Surface}$)

$$\begin{aligned} A_{Surface} &= \text{Panjang} \times \text{lebar} \\ &= 9,6 \text{ m} \times 6,4 \text{ m} \\ &= 61,44 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

j. Perhitungan *hydraulic loading rate* (HLR)

$$\begin{aligned} \text{HLR} &= \frac{\text{Debit satu unit}}{A_{Surface}} \\ &= \frac{28,8 \text{ m}^3/\text{hari}}{61,44 \text{ m}^2} \\ &= 0,5 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hari} \text{ (memenuhi kriteria } < 1 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hari)} \\ &= 46,875 \text{ cm/hari} \end{aligned}$$

k. Perhitungan *hydraulic loading rate* (HLR) saat pengurasan

$$\begin{aligned} \text{HLR pengurasan} &= \frac{\text{Debit influent}}{A_{Surface}} \\ &= \frac{86,4 \text{ m}^3/\text{hari}}{61,44 \text{ m}^2} \\ &= 1,41 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hari} \\ &= 141 \text{ cm/hari} \end{aligned}$$

l. Perhitungan kebutuhan tanaman

Direncanakan setiap terdapat 2 tanaman *Canna indica* per m^2 , sehingga,

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan tanaman} &= A_{Surface} \times \text{banyaknya tanaman} \\ &= 61,44 \text{ m}^2 \times 2 \text{ tanaman/m}^2 \\ &= 123 \text{ tanaman} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan tanaman untuk 3 unit CW} &= 123 \text{ tanaman} \times 3 \text{ unit} \\ &= 369 \text{ tanaman} \end{aligned}$$

Dari kriteria-kriteria dan perhitungan-perhitungan di atas, didapatkan rencana dimensi-dimensi untuk biofilter anaerobik seperti pada **Tabel 5.31** di bawah ini.

Tabel 5.31 Dimensi *Constructed Wetland*

No	Kriteria	Hasil Perhitungan	Satuan
1.	Jumlah unit	3	buah
2.	Lebar setiap unit	6,4	m
3.	Panjang setiap unit	9,6	m
4.	Kedalaman media	0,6	m
5.	Waktu detensi <i>pore space</i>	0,5	hari
6.	<i>Freeboard</i>	0,4	m

5.4.7 Dimensi Bak Kontrol

Untuk memantau kualitas effluen hasil pengolahan sebelum dibuang ke lingkungan, dibuatlah bak kontrol. Pada bak kontrol ini akan ditambahkan desinfektan berupa kaporit untuk membunuh organisme patogen sehingga lindi yang akan dibuang ke lingkungan akan memiliki kualitas yang lebih baik. Dimensi-dimensi unit bak kontrol pada perencanaan ini didesain dengan kriteria dan perhitungan sebagai berikut,

- f. Waktu detensi = 1 jam
- g. Debit lindi (Q) = 86,4 m³/hari
- h. *Freeboard* = 0,5 m
- i. Tinggi bak = 2 m
- j. Rasio P : L = 1 : 1

Sehingga,

$$\begin{aligned}
 \text{b. Volume bak} &= Q \times T_d \\
 &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times \frac{1 \text{ jam}}{24 \text{ jam/hari}} \\
 &= 3,6 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{e. Luas permukaan} &= \frac{\text{Volume bak}}{\text{Kedalaman bak}} \\
 &= \frac{3,6 \text{ m}^3}{2 \text{ m}} \\
 &= 1,8 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

- f. Luas permukaan = Panjang × Lebar
 $1,8 \text{ m}^2 = \text{Panjang}^2$
 Panjang = $\sqrt{1,8 \text{ m}^2}$
 $= 1,34 \text{ m} \approx 1,4 \text{ m}$
- g. Lebar = Panjang (karena rasio P : L = 1 : 1)
 $= 1,4 \text{ m}$

Kemudian, lakukan pengecekan terhadap waktu detensi

$$T_d = \frac{(\text{Kedalaman} \times \text{Panjang} \times \text{Lebar})}{Q_{\text{rata-rata}}}$$

$$= \frac{(2 \text{ m} \times 1,4 \text{ m} \times 1,4 \text{ m})}{\frac{86,4 \text{ m}^3/\text{hari}}{24 \text{ jam/hari}}}$$

$$= \frac{3,92 \text{ m}^3}{3,6 \text{ m}^3/\text{jam}}$$

$$= 1 \text{ jam (Memenuhi)}$$

Dari perhitungan di atas, didapatkan dimensi bak kontrol seperti pada **Tabel 5.31** di bawah ini

Tabel 5.32 Dimensi Bak Kontrol

No	Kriteria	Hasil Perhitungan	Satuan
1.	Debit influen	3,6	m ³ /jam
2.	Panjang bak	1,4	m
3.	Lebar bak	1,4	m
4.	Kedalaman air	2	m
5.	<i>Freeboard</i>	0,5	m
6.	Volume efektif bak	3,92	m ³

5.4.8 Perhitungan Efisiensi Penyisihan Polutan Organik

- a. Efisiensi penyisihan polutan pada unit koagulasi flokulasi

Menurut Guida dkk. (2007), proses koagulasi flokulasi menggunakan koagulan aluminium sulfat atau tawas dapat menyisihkan TSS lebih dari 75% dan COD lebih dari 65%. Selain itu, penggunaan tawas pada proses koagulasi flokulasi juga dapat menurunkan kadar BOD sebesar 14-38% (Fajri dkk., 2017). Proses ini juga dapat menyisihkan total nitrogen dengan persentase penyisihan 3,88–68,25%.

Berdasarkan kriteria tersebut dan kualitas *influent* lindi pada unit koagulasi flokulasi, direncanakan:

BOD <i>influent</i>	= 2.473 mg/L
COD <i>influent</i>	= 15.561 mg/L
TSS <i>influent</i>	= 104 mg/L
Total-N <i>influent</i>	= 4.257 mg/L
Efisiensi penyisihan BOD	= 38%
Efisiensi penyisihan COD	= 65%
Efisiensi penyisihan TSS	= 75%
Efisiensi penyisihan Total-N	= 68,25%

1) BOD tersisihkan pada proses kogulasi flokulasi

$$\begin{aligned}\text{BOD tersisihkan} &= \text{BOD } \textit{influent} \times \text{efisiensi penyisihan BOD} \\ &= 2.473 \text{ mg/L} \times 38\% \\ &= 939,74 \text{ mg/L} \\ &= 0,93974 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

Beban BOD tersisihkan pada proses kogulasi flokulasi

$$\begin{aligned}\text{Beban BOD} &= \text{Debit lindi} \times \text{BOD tersisihkan} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,93974 \text{ kg/m}^3 \\ &= 81,19 \text{ kg/hari}\end{aligned}$$

2) BOD *effluent* dari proses kogulasi flokulasi

$$\begin{aligned}\text{BOD } \textit{effluent} &= \text{BOD } \textit{influent} - \text{BOD tersisihkan} \\ &= 2.473 \text{ mg/L} - 939,74 \text{ mg/L} \\ &= 1.533,26 \text{ mg/L} \\ &= 1,5332 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

Beban BOD pada *effluent* hasil proses kogulasi flokulasi

$$\begin{aligned}\text{Beban BOD} &= \text{Debit lindi} \times \text{BOD } \textit{effluent} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 1,53326 \text{ kg/m}^3 \\ &= 132,47 \text{ kg/hari}\end{aligned}$$

3) COD tersisihkan pada proses kogulasi flokulasi

$$\begin{aligned}\text{COD tersisihkan} &= \text{COD } \textit{influent} \times \text{efisiensi penyisihan COD} \\ &= 15.561 \text{ mg/L} \times 65\% \\ &= 10.114,65 \text{ mg/L}\end{aligned}$$

$$= 10,11465 \text{ kg/m}^3$$

Beban COD tersisihkan pada proses kogulasi flokulasi

$$\begin{aligned}\text{Beban COD} &= \text{Debit lindi} \times \text{COD tersisihkan} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 10,114,65 \text{ kg/m}^3 \\ &= 873,91 \text{ kg/hari}\end{aligned}$$

4) COD *effluent* dari proses kogulasi flokulasi

$$\begin{aligned}\text{COD } \textit{effluent} &= \text{COD } \textit{influent} - \text{COD tersisihkan} \\ &= 15.561 \text{ mg/L} - 10.114,65 \text{ mg/L} \\ &= 5.446,35 \text{ mg/L} \\ &= 5,44635 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

Beban COD pada *effluent* hasil proses kogulasi flokulasi

$$\begin{aligned}\text{Beban COD} &= \text{Debit lindi} \times \text{COD } \textit{effluent} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 5,44635 \text{ kg/m}^3 \\ &= 470,56 \text{ kg/hari}\end{aligned}$$

5) TSS tersisihkan pada proses kogulasi flokulasi

$$\begin{aligned}\text{TSS tersisihkan} &= \text{TSS } \textit{influent} \times \text{efisiensi penyisihan TSS} \\ &= 104 \text{ mg/L} \times 75\% \\ &= 78 \text{ mg/L} \\ &= 0,078 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

Beban TSS tersisihkan pada proses kogulasi flokulasi

$$\begin{aligned}\text{Beban TSS} &= \text{Debit lindi} \times \text{TSS tersisihkan} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,078 \text{ kg/m}^3 \\ &= 6,74 \text{ kg/hari}\end{aligned}$$

6) TSS *effluent* dari proses kogulasi flokulasi

$$\begin{aligned}\text{TSS } \textit{effluent} &= \text{TSS } \textit{influent} - \text{TSS tersisihkan} \\ &= 104 \text{ mg/L} - 78 \text{ mg/L} \\ &= 26 \text{ mg/L} \\ &= 0,026 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

Beban TSS pada *effluent* hasil proses kogulasi flokulasi

$$\begin{aligned}\text{Beban TSS} &= \text{Debit lindi} \times \text{TSS } \textit{effluent} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,026 \text{ kg/m}^3 \\ &= 2,25 \text{ kg/hari}\end{aligned}$$

7) Total-N tersisihkan pada proses kogulasi flokulasi

$$\begin{aligned} \text{Total-N tersisihkan} &= \text{Total-N } \textit{influent} \times \text{efisiensi penyisihan} \\ &= \text{Total-N} \\ &= 4.257 \text{ mg/L} \times 68\% \\ &= 2.905,4 \text{ mg/L} \\ &= 2,9054 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Beban Total-N tersisihkan pada proses kogulasi flokulasi

$$\begin{aligned} \text{Beban Total-N} &= \text{Debit lindi} \times \text{Total-N tersisihkan} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 2,9054 \text{ kg/m}^3 \\ &= 251,03 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

8) Total-N *effluent* dari proses kogulasi flokulasi

$$\begin{aligned} \text{Total-N } \textit{effluent} &= \text{Total-N } \textit{influent} - \text{Total-N tersisihkan} \\ &= 4.257 \text{ mg/L} - 2.905,4 \text{ mg/L} \\ &= 1.351,6 \text{ mg/L} \\ &= 1,3516 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Beban Total-N pada *effluent* hasil proses kogulasi flokulasi

$$\begin{aligned} \text{Beban Total-N} &= \text{Debit lindi} \times \text{Total-N } \textit{effluent} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 1,3516 \text{ kg/m}^3 \\ &= 116,78 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas, didapatkan kualitas *effluent* lindi dari hasil proses kogulasi flokulasi yang ditunjukkan pada **Tabel 5.33** di bawah ini.

Tabel 5.33 Kualitas Efluen Unit Koagulasi Flokulasi

Parameter	<i>Influent</i> (mg/L)	Koagulasi Flokulasi	
		Efisiensi	<i>Effluent</i> (mg/L)
pH	8	0%	8
BOD	2.473	38%	1.533,26
COD	15.561	65%	5.446,35
TSS	104	75%	26
Total-N	4.257	68,25%	1.351,60
Kadmium (Cd)	<0,0072	0%	<0,0072
Merkuri (Hg)	<0,0008	0%	<0,0008

b. Efisiensi penyisihan polutan pada unit prasedimentasi

Menurut Qasim (1986), prasedimentasi memiliki efisiensi penyisihan BOD sebesar 30–40%, COD sebesar 30–40%, dan TSS sebesar 50–65%. Berdasarkan kriteria tersebut dan kualitas *influent* lindi pada unit prasedimentasi, direncanakan:

$$\text{BOD } \textit{influent} = 1.533,26 \text{ mg/L}$$

$$\text{COD } \textit{influent} = 5.446,35 \text{ mg/L}$$

$$\text{TSS } \textit{influent} = 26 \text{ mg/L}$$

$$\text{Total-N } \textit{influent} = 1.351,60 \text{ mg/L}$$

$$\text{Efisiensi penyisihan BOD} = 30\%$$

$$\text{Efisiensi penyisihan COD} = 30\%$$

$$\text{Efisiensi penyisihan TSS} = 50\%$$

$$\text{Efisiensi penyisihan Total-N} = 19\%$$

1) BOD tersisihkan pada prasedimentasi

$$\text{BOD tersisihkan} = \text{BOD } \textit{influent} \times \text{efisiensi penyisihan BOD}$$

$$= 1.533,26 \text{ mg/L} \times 30\%$$

$$= 459,98 \text{ mg/L}$$

$$= 0,45998 \text{ kg/m}^3$$

Beban BOD tersisihkan pada prasedimentasi

$$\text{Beban BOD} = \text{Debit lindi} \times \text{BOD tersisihkan}$$

$$= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,45998 \text{ kg/m}^3$$

$$= 39,74 \text{ kg/hari}$$

2) BOD *effluent* dari prasedimentasi

$$\text{BOD } \textit{effluent} = \text{BOD } \textit{influent} - \text{BOD tersisihkan}$$

$$= 1.533,26 \text{ mg/L} - 459,98 \text{ mg/L}$$

$$= 1.073,28 \text{ mg/L}$$

$$= 1,07328 \text{ kg/m}^3$$

Beban BOD pada *effluent* hasil prasedimentasi

$$\text{Beban BOD} = \text{Debit lindi} \times \text{BOD } \textit{effluent}$$

$$= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 1,07328 \text{ kg/m}^3$$

$$= 92,73 \text{ kg/hari}$$

3) COD tersisihkan pada prasedimentasi

$$\begin{aligned}
\text{COD tersisihkan} &= \text{COD } \textit{influent} \times \text{efisiensi penyisihan COD} \\
&= 5.446,35 \text{ mg/L} \times 30\% \\
&= 1.633,91 \text{ mg/L} \\
&= 1,63391 \text{ kg/m}^3
\end{aligned}$$

Beban COD tersisihkan pada prasedimentasi

$$\begin{aligned}
\text{Beban COD} &= \text{Debit lindi} \times \text{COD tersisihkan} \\
&= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 1,63391 \text{ kg/m}^3 \\
&= 141,17 \text{ kg/hari}
\end{aligned}$$

4) COD *effluent* dari prasedimentasi

$$\begin{aligned}
\text{COD } \textit{effluent} &= \text{COD } \textit{influent} - \text{COD tersisihkan} \\
&= 5.446,35 \text{ mg/L} - 1.633,91 \text{ mg/L} \\
&= 3.812,45 \text{ mg/L} \\
&= 3,81245 \text{ kg/m}^3
\end{aligned}$$

Beban COD pada *effluent* hasil prasedimentasi

$$\begin{aligned}
\text{Beban COD} &= \text{Debit lindi} \times \text{COD } \textit{effluent} \\
&= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 3,81245 \text{ kg/m}^3 \\
&= 329,4 \text{ kg/hari}
\end{aligned}$$

5) TSS tersisihkan pada prasedimentasi

$$\begin{aligned}
\text{TSS tersisihkan} &= \text{TSS } \textit{influent} \times \text{efisiensi penyisihan TSS} \\
&= 26 \text{ mg/L} \times 50\% \\
&= 13 \text{ mg/L} \\
&= 0,013 \text{ kg/m}^3
\end{aligned}$$

Beban TSS tersisihkan pada prasedimentasi

$$\begin{aligned}
\text{Beban TSS} &= \text{Debit lindi} \times \text{TSS tersisihkan} \\
&= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,013 \text{ kg/m}^3 \\
&= 1,12 \text{ kg/hari}
\end{aligned}$$

6) TSS *effluent* dari prasedimentasi

$$\begin{aligned}
\text{TSS } \textit{effluent} &= \text{TSS } \textit{influent} - \text{TSS tersisihkan} \\
&= 26 \text{ mg/L} - 13 \text{ mg/L} \\
&= 13 \text{ mg/L} \\
&= 0,013 \text{ kg/m}^3
\end{aligned}$$

Beban TSS pada *effluent* hasil prasedimentasi

$$\begin{aligned} \text{Beban TSS} &= \text{Debit lindi} \times \text{TSS } \textit{effluent} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,013 \text{ kg/m}^3 \\ &= 1,12 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

7) Total-N tersisihkan pada prasedimentasi

$$\begin{aligned} \text{Total-N tersisihkan} &= \text{Total-N } \textit{influent} \times \text{efisiensi penyisihan} \\ &\quad \text{Total-N} \\ &= 1.351,60 \text{ mg/L} \times 19\% \\ &= 256,80 \text{ mg/L} \\ &= 0,2568 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Beban Total-N tersisihkan pada prasedimentasi

$$\begin{aligned} \text{Beban Total-N} &= \text{Debit lindi} \times \text{Total-N tersisihkan} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,2568 \text{ kg/m}^3 \\ &= 22,19 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

8) Total-N *effluent* dari prasedimentasi

$$\begin{aligned} \text{Total-N } \textit{effluent} &= \text{Total-N } \textit{influent} - \text{Total-N tersisihkan} \\ &= 1.351,6 \text{ mg/L} - 256,80 \text{ mg/L} \\ &= 1.094,79 \text{ mg/L} \\ &= 1,09479 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Beban Total-N pada *effluent* hasil prasedimentasi

$$\begin{aligned} \text{Beban Total-N} &= \text{Debit lindi} \times \text{Total-N } \textit{effluent} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 1,09479 \text{ kg/m}^3 \\ &= 94,59 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas, didapatkan kualitas *effluent* lindi dari hasil pengolahan unit prasedimentasi yang ditunjukkan pada **Tabel 5.34** di bawah ini.

Tabel 5.34 Kualitas Effluent Unit Prasedimentasi

Parameter	<i>Influent</i> (mg/L)	Koagulasi Flokulasi		Prasedimentasi	
		Efisiensi	<i>Effluent</i> (mg/L)	Efisiensi	<i>Effluent</i> (mg/L)
pH	8	0%	8	0%	8
BOD	2.473	38%	1.533,26	30%	1.073,28
COD	15.561	65%	5.446,35	30%	3.812,45
TSS	104	75%	26	50%	13

Parameter	Influent (mg/L)	Koagulasi Flokulasi		Prasedimentasi	
		Efisiensi	Effluent (mg/L)	Efisiensi	Effluent (mg/L)
Total-N	4.257	68,25%	1.351,60	19%	1.094,79
Kadmium (Cd)	<0,0072	0%	<0,0072	0%	<0,0072
Merkuri (Hg)	<0,0008	0%	<0,0008	0%	<0,0008

c. Efisiensi penyisihan polutan pada biofilter anaerobik

Menurut Dewiyanti (2016), biofilter anaerobik memiliki efisiensi penyisihan BOD sebesar 60–70%, COD sebesar 60–70%, dan TSS sebesar 80–95%. Selain itu, menurut Ma dkk., (2017), biofilter anaerobik mampu menyisihkan total-N dengan persentase penyisihan sebesar 85,65–90,14%. Berdasarkan kriteria tersebut dan kualitas *influent* lindi pada unit biofilter anaerobik seperti pada **Tabel 5.34** di atas, direncanakan:

Efisiensi penyisihan BOD	= 70%
Efisiensi penyisihan COD	= 70%
Efisiensi penyisihan TSS	= 95%
Efisiensi penyisihan Total-N	= 90%

Dengan perkiraan besarnya efisiensi di atas, dapat dihitung besarnya BOD yang tersisihkan dan kualitas *effluent* dari biofilter anaerobik.

1) BOD tersisihkan pada biofilter anaerobik

$$\begin{aligned}
 \text{BOD tersisihkan} &= \text{BOD } \textit{influent} \times \text{efisiensi penyisihan BOD} \\
 &= 1.073,28 \text{ mg/L} \times 70\% \\
 &= 751,30 \text{ mg/L} \\
 &= 0,7513 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

Beban BOD tersisihkan pada biofilter anaerobik

$$\begin{aligned}
 \text{Beban BOD} &= \text{Debit lindi} \times \text{BOD tersisihkan} \\
 &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,7513 \text{ kg/m}^3 \\
 &= 64,91 \text{ kg/hari}
 \end{aligned}$$

2) BOD *effluent* dari biofilter anaerobik

$$\begin{aligned}
 \text{BOD } \textit{effluent} &= \text{BOD } \textit{influent} - \text{BOD tersisihkan} \\
 &= 1.073,28 \text{ mg/L} - 751,30 \text{ mg/L} \\
 &= 321,98 \text{ mg/L}
 \end{aligned}$$

$$= 0,32198 \text{ kg/m}^3$$

Beban BOD pada *effluent* hasil biofilter anaerobik

$$\begin{aligned} \text{Beban BOD} &= \text{Debit lindi} \times \text{BOD } \textit{effluent} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,32198 \text{ kg/m}^3 \\ &= 27,82 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

3) COD tersisihkan pada biofilter anaerobik

$$\begin{aligned} \text{COD tersisihkan} &= \text{COD } \textit{influent} \times \text{efisiensi penyisihan COD} \\ &= 3.812,45 \text{ mg/L} \times 70\% \\ &= 2.668,71 \text{ mg/L} \\ &= 2,66871 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Beban COD tersisihkan pada biofilter anaerobik

$$\begin{aligned} \text{Beban COD} &= \text{Debit lindi} \times \text{COD tersisihkan} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 2,66871 \text{ kg/m}^3 \\ &= 230,58 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

4) COD *effluent* dari biofilter anaerobik

$$\begin{aligned} \text{COD } \textit{effluent} &= \text{COD } \textit{influent} - \text{COD tersisihkan} \\ &= 3.812,45 \text{ mg/L} - 2.668,71 \text{ mg/L} \\ &= 1.143,73 \text{ mg/L} \\ &= 1,14373 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Beban COD pada *effluent* hasil biofilter anaerobik

$$\begin{aligned} \text{Beban COD} &= \text{Debit lindi} \times \text{COD } \textit{effluent} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 1,14373 \text{ kg/m}^3 \\ &= 98,82 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

5) TSS tersisihkan pada biofilter anaerobik

$$\begin{aligned} \text{TSS tersisihkan} &= \text{TSS } \textit{influent} \times \text{efisiensi penyisihan TSS} \\ &= 13 \text{ mg/L} \times 95\% \\ &= 12,35 \text{ mg/L} \\ &= 0,01235 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Beban TSS tersisihkan pada biofilter anaerobik

$$\begin{aligned} \text{Beban TSS} &= \text{Debit lindi} \times \text{TSS tersisihkan} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,01235 \text{ kg/m}^3 \\ &= 1,07 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

6) TSS *effluent* dari biofilter anaerobik

$$\begin{aligned} \text{TSS } effluent &= \text{TSS } influent - \text{TSS tersisihkan} \\ &= 13 \text{ mg/L} - 12,35 \text{ mg/L} \\ &= 0,65 \text{ mg/L} \\ &= 0,00065 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Beban TSS pada *effluent* hasil biofilter anaerobik

$$\begin{aligned} \text{Beban TSS} &= \text{Debit lindi} \times \text{TSS } effluent \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,00065 \text{ kg/m}^3 \\ &= 0,06 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

7) Total-N tersisihkan pada biofilter anaerobik

$$\begin{aligned} \text{Total-N tersisihkan} &= \text{Total-N } influent \times \text{efisiensi penyisihan} \\ &= \text{Total-N} \\ &= 1.094,79 \text{ mg/L} \times 90\% \\ &= 985,31 \text{ mg/L} \\ &= 0,98531 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Beban Total-N tersisihkan pada biofilter anaerobik

$$\begin{aligned} \text{Beban Total-N} &= \text{Debit lindi} \times \text{Total-N tersisihkan} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,98531 \text{ kg/m}^3 \\ &= 85,13 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

8) Total-N *effluent* dari biofilter anaerobik

$$\begin{aligned} \text{Total-N } effluent &= \text{Total-N } influent - \text{Total-N tersisihkan} \\ &= 1.094,79 \text{ mg/L} - 985,31 \text{ mg/L} \\ &= 109,48 \text{ mg/L} \\ &= 0,10948 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Beban Total-N pada *effluent* hasil biofilter anaerobik

$$\begin{aligned} \text{Beban Total-N} &= \text{Debit lindi} \times \text{Total-N } effluent \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,10948 \text{ kg/m}^3 \\ &= 9,46 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas, didapatkan kualitas *effluent* lindi dari hasil pengolahan unit biofilter anaerobik yang ditunjukkan pada **Tabel 5.35** di bawah ini.

Tabel 5.35 Kualitas Effluent Unit Biofilter Anaerobik

Parameter	<i>Influent</i> (mg/L)	Koagulasi Flokulasi		Prasedimentasi		Biofilter Anaerobik	
		Efisiensi	<i>Effluent</i> (mg/L)	Efisiensi	<i>Effluent</i> (mg/L)	Efisiensi	<i>Effluent</i> (mg/L)
pH	8	0%	8	0%	8	0%	8
BOD	2.473	38%	1.533,26	30%	1.073,28	70%	321,98
COD	15.561	65%	5.446,35	30%	3.812,45	70%	1.143,73
TSS	104	75%	26	50%	13	95%	0,65
Total-N	4.257	68,25%	1.351,60	19%	1.094,79	90%	109,48
Kadmium (Cd)	<0,0072	0%	<0,0072	0%	<0,0072	0%	<0,0072
Merkuri (Hg)	<0,0008	0%	<0,0008	0%	<0,0008	0%	<0,0008

d. Efisiensi penyisihan polutan pada biofilter aerobik

Menurut Dewiyanti (2016), biofilter aeobik memiliki efisiensi penyisihan BOD sebesar 75–95%, COD sebesar 80–85%, dan TSS sebesar 50–65%. Selain itu, menurut Buttler dkk., (2022), biofilter aerobik mampu menyisihkan total-N dengan persentase penyisihan sebesar 21–88%. Berdasarkan kriteria tersebut dan kualitas *influent* lindi pada unit biofilter aerobik seperti pada **Tabel 5.35** di atas, direncanakan:

$$\text{Efisiensi penyisihan BOD} = 95\%$$

$$\text{Efisiensi penyisihan COD} = 85\%$$

$$\text{Efisiensi penyisihan TSS} = 65\%$$

$$\text{Efisiensi penyisihan Total-N} = 88\%$$

1) BOD tersisihkan pada biofilter aerobik

$$\begin{aligned} \text{BOD tersisihkan} &= \text{BOD } \textit{influent} \times \text{efisiensi penyisihan BOD} \\ &= 321,98 \text{ mg/L} \times 95\% \\ &= 305,89 \text{ mg/L} \\ &= 0,30589 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Beban BOD tersisihkan pada biofilter aerobik

$$\begin{aligned} \text{Beban BOD} &= \text{Debit lindi} \times \text{BOD tersisihkan} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,30589 \text{ kg/m}^3 \\ &= 26,43 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

2) BOD *effluent* dari biofilter aerobik

$$\begin{aligned}
 \text{BOD effluent} &= \text{BOD influent} - \text{BOD tersisihkan} \\
 &= 321,98 \text{ mg/L} - 305,89 \text{ mg/L} \\
 &= 16,10 \text{ mg/L} \\
 &= 0,0161 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

Beban BOD pada *effluent* hasil biofilter aerobik

$$\begin{aligned}
 \text{Beban BOD} &= \text{Debit lindi} \times \text{BOD effluent} \\
 &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,0161 \text{ kg/m}^3 \\
 &= 1,39 \text{ kg/hari}
 \end{aligned}$$

3) COD tersisihkan pada biofilter aerobik

$$\begin{aligned}
 \text{COD tersisihkan} &= \text{COD influent} \times \text{efisiensi penyisihan COD} \\
 &= 1.143 \text{ mg/L} \times 85\% \\
 &= 972,17 \text{ mg/L} \\
 &= 0,97217 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

Beban COD tersisihkan pada biofilter aerobik

$$\begin{aligned}
 \text{Beban COD} &= \text{Debit lindi} \times \text{COD tersisihkan} \\
 &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,97217 \text{ kg/m}^3 \\
 &= 26,43 \text{ kg/hari}
 \end{aligned}$$

4) COD *effluent* dari biofilter aerobik

$$\begin{aligned}
 \text{COD effluent} &= \text{COD influent} - \text{COD tersisihkan} \\
 &= 1.143,73 \text{ mg/L} - 972,17 \text{ mg/L} \\
 &= 171,56 \text{ mg/L} \\
 &= 0,17156 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

Beban COD pada *effluent* hasil biofilter aerobik

$$\begin{aligned}
 \text{Beban COD} &= \text{Debit lindi} \times \text{COD effluent} \\
 &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,17156 \text{ kg/m}^3 \\
 &= 14,82 \text{ kg/hari}
 \end{aligned}$$

5) TSS tersisihkan pada biofilter aerobik

$$\begin{aligned}
 \text{TSS tersisihkan} &= \text{TSS influent} \times \text{efisiensi penyisihan TSS} \\
 &= 0,65 \text{ mg/L} \times 65\% \\
 &= 0,42 \text{ mg/L} \\
 &= 0,00042 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

Beban TSS tersisihkan pada biofilter aerobik

$$\begin{aligned} \text{Beban TSS} &= \text{Debit lindi} \times \text{TSS tersisihkan} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,00042 \text{ kg/m}^3 \\ &= 0,04 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

6) TSS *effluent* dari biofilter aerobik

$$\begin{aligned} \text{TSS } \textit{effluent} &= \text{TSS } \textit{influent} - \text{TSS tersisihkan} \\ &= 0,65 \text{ mg/L} - 0,42 \text{ mg/L} \\ &= 0,23 \text{ mg/L} \\ &= 0,00023 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Beban TSS pada *effluent* hasil biofilter aerobik

$$\begin{aligned} \text{Beban TSS} &= \text{Debit lindi} \times \text{TSS } \textit{effluent} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,00023 \text{ kg/m}^3 \\ &= 0,02 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

7) Total-N tersisihkan pada biofilter aerobik

$$\begin{aligned} \text{Total-N tersisihkan} &= \text{Total-N } \textit{influent} \times \text{efisiensi penyisihan} \\ &\quad \text{Total-N} \\ &= 109,48 \text{ mg/L} \times 88\% \\ &= 96,34 \text{ mg/L} \\ &= 0,09634 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Beban Total-N tersisihkan pada biofilter aerobik

$$\begin{aligned} \text{Beban Total-N} &= \text{Debit lindi} \times \text{Total-N tersisihkan} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,09634 \text{ kg/m}^3 \\ &= 8,32 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

8) Total-N *effluent* dari biofilter aerobik

$$\begin{aligned} \text{Total-N } \textit{effluent} &= \text{Total-N } \textit{influent} - \text{Total-N tersisihkan} \\ &= 109,48 \text{ mg/L} - 96,34 \text{ mg/L} \\ &= 13,14 \text{ mg/L} \\ &= 0,001314 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Beban Total-N pada *effluent* hasil biofilter aerobik

$$\begin{aligned} \text{Beban Total-N} &= \text{Debit lindi} \times \text{Total-N } \textit{effluent} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,001314 \text{ kg/m}^3 \\ &= 1,14 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas, didapatkan kualitas *effluent* lindi dari hasil pengolahan unit biofilter aerobik yang ditunjukkan pada **Tabel 5.36** di bawah ini.

Tabel 5.36 Kualitas Effluent Unit Biofilter Aerobik

Parameter	Influent (mg/L)	Koagulasi Flokulasi		Prasedimentasi		Biofilter Anaerobik		Biofilter Aerobik	
		Efisiensi	Effluent (mg/L)	Efisiensi	Effluent (mg/L)	Efisiensi	Effluent (mg/L)	Efisiensi	Effluent (mg/L)
pH	8	0%	8	0%	8	0%	8	0%	8
BOD	2.473	38%	1.533,26	30%	1.073,28	70%	321,98	95%	6,44
COD	15.561	65%	5.446,35	30%	3.812,45	70%	1.143,73	85%	6,86
TSS	104	75%	26	50%	13	95%	0,65	65%	0,03
Total-N	4.257	68,25%	1.351,60	19%	1.094,79	90%	109,48	88%	1,31
Kadmium (Cd)	<0,0072	0%	<0,0072	0%	<0,0072	0%	<0,0072	0%	<0,0072
Merkuri (Hg)	<0,0008	0%	<0,0008	0%	<0,0008	0%	<0,0008	0%	<0,0008

e. Efisiensi penyisihan polutan pada *constructed wetland*

Menurut Micek (2020), *constructed wetland* (CW) memiliki efisiensi penyisihan COD sebesar 94–96%. Menurut Jozwiakowski (2012), CW mampu menurunkan BOD sebesar 91–94%. Kemudian menurut Marzec dkk. (2019) CW mampu menurunkan TSS sebesar 92–94%. CW juga mampu menyisihkan total-N dengan persentase penyisihan sebesar 90% hanya dengan media gravel yang digunakan (Azkew & Hines, 1994). Berdasarkan kriteria tersebut dan kualitas *influent* lindi pada unit *constructed wetland* seperti pada **Tabel 5.36** di atas, direncanakan memiliki:

Efisiensi penyisihan BOD = 60%

Efisiensi penyisihan COD = 96%

Efisiensi penyisihan TSS = 89%

Efisiensi penyisihan Total-N = 90%

1) BOD tersisihkan pada *constructed wetland*

$$\begin{aligned}
 \text{BOD tersisihkan} &= \text{BOD } \textit{influent} \times \text{efisiensi penyisihan BOD} \\
 &= 16,10 \text{ mg/L} \times 60\% \\
 &= 9,66 \text{ mg/L} \\
 &= 0,00966 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

Beban BOD tersisihkan pada *constructed wetland*

$$\begin{aligned}\text{Beban BOD} &= \text{Debit lindi} \times \text{BOD tersisihkan} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,00966 \text{ kg/m}^3 \\ &= 0,83 \text{ kg/hari}\end{aligned}$$

2) BOD *effluent* dari *constructed wetland*

$$\begin{aligned}\text{BOD effluent} &= \text{BOD influent} - \text{BOD tersisihkan} \\ &= 16,10 \text{ mg/L} - 9,66 \text{ mg/L} \\ &= 6,44 \text{ mg/L} \\ &= 0,00644 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

Beban BOD pada *effluent* hasil *constructed wetland*

$$\begin{aligned}\text{Beban BOD} &= \text{Debit lindi} \times \text{BOD effluent} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,00644 \text{ kg/m}^3 \\ &= 0,56 \text{ kg/hari}\end{aligned}$$

3) COD tersisihkan pada *constructed wetland*

$$\begin{aligned}\text{COD tersisihkan} &= \text{COD influent} \times \text{efisiensi penyisihan COD} \\ &= 171,56 \text{ mg/L} \times 96\% \\ &= 164,70 \text{ mg/L} \\ &= 0,1647 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

Beban COD tersisihkan pada *constructed wetland*

$$\begin{aligned}\text{Beban COD} &= \text{Debit lindi} \times \text{COD tersisihkan} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,1647 \text{ kg/m}^3 \\ &= 14,23 \text{ kg/hari}\end{aligned}$$

4) COD *effluent* dari *constructed wetland*

$$\begin{aligned}\text{COD effluent} &= \text{COD influent} - \text{COD tersisihkan} \\ &= 171,56 \text{ mg/L} - 164,70 \text{ mg/L} \\ &= 6,86 \text{ mg/L} \\ &= 0,00686 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

Beban COD pada *effluent* hasil *constructed wetland*

$$\begin{aligned}\text{Beban COD} &= \text{Debit lindi} \times \text{COD effluent} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,00686 \text{ kg/m}^3 \\ &= 0,59 \text{ kg/hari}\end{aligned}$$

5) TSS tersisihkan pada *constructed wetland*

$$\begin{aligned}
 \text{TSS tersisihkan} &= \text{TSS } \textit{influent} \times \text{efisiensi penyisihan TSS} \\
 &= 0,23 \text{ mg/L} \times 89\% \\
 &= 0,2 \text{ mg/L} \\
 &= 0,0002 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

Beban TSS tersisihkan pada *constructed wetland*

$$\begin{aligned}
 \text{Beban TSS} &= \text{Debit lindi} \times \text{TSS tersisihkan} \\
 &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,0002 \text{ kg/m}^3 \\
 &= 0,02 \text{ kg/hari}
 \end{aligned}$$

6) TSS *effluent* dari *constructed wetland*

$$\begin{aligned}
 \text{TSS } \textit{effluent} &= \text{TSS } \textit{influent} - \text{TSS tersisihkan} \\
 &= 0,23 \text{ mg/L} - 0,2 \text{ mg/L} \\
 &= 0,03 \text{ mg/L} \\
 &= 0,00003 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

Beban TSS pada *effluent* hasil *constructed wetland*

$$\begin{aligned}
 \text{Beban TSS} &= \text{Debit lindi} \times \text{TSS } \textit{effluent} \\
 &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,00003 \text{ kg/m}^3 \\
 &= 0,002 \text{ kg/hari}
 \end{aligned}$$

7) Total-N tersisihkan pada *constructed wetland*

$$\begin{aligned}
 \text{Total-N tersisihkan} &= \text{Total-N } \textit{influent} \times \text{efisiensi penyisihan} \\
 &\quad \text{Total-N} \\
 &= 13,14 \text{ mg/L} \times 90\% \\
 &= 11,82 \text{ mg/L} \\
 &= 0,01182 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

Beban Total-N tersisihkan pada *constructed wetland*

$$\begin{aligned}
 \text{Beban Total-N} &= \text{Debit lindi} \times \text{Total-N tersisihkan} \\
 &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,01182 \text{ kg/m}^3 \\
 &= 1,02 \text{ kg/hari}
 \end{aligned}$$

8) Total-N *effluent* dari *constructed wetland*

$$\begin{aligned}
 \text{Total-N } \textit{effluent} &= \text{Total-N } \textit{influent} - \text{Total-N tersisihkan} \\
 &= 13,14 \text{ mg/L} - 11,82 \text{ mg/L} \\
 &= 1,31 \text{ mg/L} \\
 &= 0,00131 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

Beban Total-N pada *effluent* hasil *constructed wetland*

$$\begin{aligned} \text{Beban Total-N} &= \text{Debit lindi} \times \text{Total-N } \textit{effluent} \\ &= 86,4 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,00131 \text{ kg/m}^3 \\ &= 0,114 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas, didapatkan kualitas *effluent* dari pengolahan lindi menggunakan instalasi pengolahan lindi yang direncanakan untuk TPA Mrican adalah seperti pada **Tabel 5.37** di bawah ini.

Tabel 5.37 Kualitas Effluent Unit *Constructed Wetland*

Parameter	<i>Influent</i> (mg/L)	Prasedimentasi		ABR		Biofilter Anaerobik		Biofilter Aerobik		<i>Constructed Wetland</i>	
		Efisiensi	<i>Effluent</i> (mg/L)	Efisiensi	<i>Effluent</i> (mg/L)	Efisiensi	<i>Effluent</i> (mg/L)	Efisiensi	<i>Effluent</i> (mg/L)	Efisiensi	<i>Effluent</i> (mg/L)
pH	8	0%	8	0%	8	0%	8	0%	8	0%	8
BOD	2.473	38%	1.533,26	30%	1.073,28	70%	321,98	95%	6,44	60%	6,44
COD	15.561	65%	5.446,35	30%	3.812,45	70%	1.143,73	85%	6,86	96%	6,86
TSS	104	75%	26	50%	13	95%	0,65	65%	0,03	89%	0,03
Total-N	4.257	68,25%	1.351,60	19%	1.094,79	90%	109,48	88%	1,31	90%	1,31
Kadmium	<0,0072	0%	<0,0072	0%	<0,0072	0%	<0,0072	0%	<0,0072	0%	<0,0072
Merkuri	<0,0008	0%	<0,0008	0%	<0,0008	0%	<0,0008	0%	<0,0008	0%	<0,0008

5.4.9 Perhitungan Profil Hidrolis

Perbedaan muka air dalam unit pengolahan limbah yang terjadi karena adanya belokan, jatuhan, kecepatan aliran, dan media filter disebut dengan profil hidrolis. Aliran air akan mengalami jatuhan dan belokan pada saat berpindah ke unit selanjutnya.

Kehilangan tekanan yang disebabkan karena adanya jatuhan dan belokan dapat dihitung dengan persamaan *Manning* berikut:

$$H_f = \left(\frac{v \times n}{R^{2/3}} \right)^2 \times L$$

Keterangan:

- v : Kecepatan aliran (m/s)
- n : Koefisien kekasaran
- R : Jari-jari hidrolis (m)
- L : Panjang jatuhan atau belokan (m)

Kemudian kehilangan tekanan yang diakibatkan karena adanya aliran pada unit-unit pengolahan dapat dihitung dengan persamaan *Darcy-Weisbach* berikut:

$$H_f = f \times \frac{L}{4R} \times \frac{v^2}{2g}$$

dengan $f = 1,5 \times (0,01989 + 0,0005078 / 4R)$

Keterangan:

L : Panjang bangunan (m)

R : Jari-jari hidrolis (m)

v : Kecepatan aliran (m/s)

g : Percepatan gravitasi (m/s²)

Sementara itu, kehilangan tekanan pada media biofilter yang berupa media sarang tawon dapat dihitung dengan menggunakan persamaan *Rose* berikut:

$$H_f = 1,067 \times \frac{C_D \times L \times v^2}{\Psi \times d \times e^4 \times g}$$

Dengan pengujian bilangan Reynold berikut,

$$N_{Re} = \frac{\Psi \times \rho \times d \times v}{\mu}$$

didapatkan C_d dengan ketentuan berikut:

$$\text{Untuk } N_{Re} < 1 : C_d = \frac{24}{N_{Re}}$$

$$\text{Untuk } 1 < N_{Re} < 10^4 : C_d = \frac{24}{N_{Re}} + \frac{3}{\sqrt{N_{Re}}} + 0,34$$

$$\text{Untuk } N_{Re} > 10^4 : C_d = 0,4$$

Keterangan

L : Kedalaman filter (m)

e : Porositas media

v : Kecepatan filtrasi (m/s)

g : Percepatan gravitasi (m/s²)

d : Ukuran rongga media (m)

Ψ : Faktor bentuk

μ : Viskositas dinamis (kg/m.s)

ρ : Massa jenis (kg/m^3)

a. Headloss bak ekualisasi

Bak ekualisasi direncanakan memiliki kriteria:

Panjang (b)	= 1,4 m
Tinggi	= 2,2 m
Kedalaman (y)	= 2 m
Koefisien kekasaran beton (n)	= 0,015
Percepatan gravitasi (g)	= 9,81 m/s
Slope saluran (s)	= 1% = 0,01

Dengan kriteria-kriteria di atas, dapat dihitung:

1) Perhitungan jari-jari hidrolis

$$\begin{aligned} R &= \frac{b \times y}{b + 2y} \\ &= \frac{1,4 \text{ m} \times 2 \text{ m}}{1,4 \text{ m} + (2 \times 2 \text{ m})} \\ &= 0,5 \text{ m} \end{aligned}$$

2) Perhitungan *headloss* kecepatan air pada bangunan

$$\begin{aligned} f &= 1,5 \times \frac{(0,01989 + 0,0005078)}{4 \times R} \\ &= 1,5 \times \frac{(0,01989 + 0,0005078)}{4 \times 0,5 \text{ m}} \\ &= 0,03 \end{aligned}$$

Sehingga didapatkan nilai *headloss*

$$\begin{aligned} H_f &= f \times \frac{L}{4R} \times \frac{v^2}{2g} \\ &= 0,03 \times \frac{1,4 \text{ m}}{4 \times R} \times \frac{\left(\frac{\text{Panjang unit}}{\text{Waktu detensi}} \right)^2}{2 \times g} \\ &= 0,03 \times \frac{1,4 \text{ m}}{4 \times 0,5 \text{ m}} \times \frac{\left(\frac{1 \text{ jam} \times \frac{60 \text{ menit}}{1 \text{ jam}} \times \frac{60 \text{ detik}}{1 \text{ menit}} \right)^2}{2 \times 9,81 \text{ m/s}^2} \\ &= 1,57 \times 10^{-10} \text{ m} \end{aligned}$$

b. Headloss bak koagulasi flokulasi

Bak pembubuh koagulan direncanakan memiliki kriteria:

Panjang (b)	= 0,7 m
Tinggi	= 0,4 m
Kedalaman (y)	= 0,2 m
Koefisien kekasaran beton (n)	= 0,015
Percepatan gravitasi (g)	= 9,81 m/s
Slope saluran (s)	= 1% = 0,01

Dengan kriteria-kriteria di atas, dapat dihitung:

1) Perhitungan jari-jari hidrolis

$$\begin{aligned} R &= \frac{b \times y}{b + 2y} \\ &= \frac{0,7 \text{ m} \times 0,2 \text{ m}}{0,7 \text{ m} + (2 \times 0,2 \text{ m})} \\ &= 0,1 \text{ m} \end{aligned}$$

2) Perhitungan *headloss* kecepatan air pada bangunan

$$\begin{aligned} f &= 1,5 \times \frac{(0,01989 + 0,0005078)}{4 \times R} \\ &= 1,5 \times \frac{(0,01989 + 0,0005078)}{4 \times 0,1 \text{ m}} \\ &= 0,03133 \end{aligned}$$

Sehingga didapatkan nilai *headloss*

$$\begin{aligned} H_f &= f \times \frac{L}{4R} \times \frac{v^2}{2g} \\ &= 0,03133 \times \frac{L}{4 \times R} \times \frac{\left(\frac{\text{Panjang unit}}{\text{Waktu detensi}}\right)^2}{2 \times g} \\ &= 0,03133 \times \frac{0,7 \text{ m}}{4 \times 0,1 \text{ m}} \times \frac{\left(\frac{0,7 \text{ m}}{60 \text{ detik}}\right)^2}{2 \times 9,81 \text{ m/s}^2} \\ &= 2,99 \times 10^{-7} \text{ m} \end{aligned}$$

Kemudian, dihitung *headloss* untuk bak setelah terjunan atau bak koagulasi yang direncanakan memiliki kriteria:

Panjang (b)	= 0,8 m
Tinggi	= 0,5 m
Kedalaman (y)	= 0,1 m
Koefisien kekasaran beton (n)	= 0,015

$$\begin{aligned} \text{Percepatan gravitasi (g)} &= 9,81 \text{ m/s} \\ \text{Slope saluran (s)} &= 1\% = 0,01 \end{aligned}$$

Dengan kriteria-kriteria di atas, dapat dihitung:

1) Perhitungan jari-jari hidrolis

$$\begin{aligned} R &= \frac{b \times y}{b + 2y} \\ &= \frac{0,8 \text{ m} \times 0,1 \text{ m}}{0,8 \text{ m} + (2 \times 0,1 \text{ m})} \\ &= 0,08 \text{ m} \end{aligned}$$

2) Perhitungan *headloss* kecepatan air pada bangunan

$$\begin{aligned} f &= 1,5 \times \frac{(0,01989 + 0,0005078)}{4 \times R} \\ &= 1,5 \times \frac{(0,01989 + 0,0005078)}{4 \times 0,08 \text{ m}} \\ &= 0,0322 \end{aligned}$$

Sehingga didapatkan nilai *headloss*

$$\begin{aligned} H_f &= f \times \frac{L}{4R} \times \frac{v^2}{2g} \\ &= f \times \frac{L}{4 \times R} \times \frac{\left(\frac{\text{Panjang unit}}{\text{Waktu detensi}} \right)^2}{2 \times g} \\ &= 0,0322 \times \frac{0,8 \text{ m}}{4 \times 0,08 \text{ m}} \times \frac{\left(\frac{0,8 \text{ m}}{60 \text{ detik}} \right)^2}{2 \times 9,81 \text{ m/s}^2} \\ &= 7,298 \times 10^{-7} \text{ m} \end{aligned}$$

Selanjutnya, dihitung *headloss* untuk bak flokulasi sebagai berikut,

$$\begin{aligned} \text{Headloss kompartemen 1} &= \frac{G \times v \times \text{Tinggi air} \times \text{As}}{\text{Debit}} \\ &= \frac{60/\text{detik} \times 8,35 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \times 0,47 \text{ m} \times 1,6 \text{ m}^2}{0,000167 \text{ m}^3/\text{detik}} \\ &= 0,023 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Headloss kompartemen 2} &= \frac{50/\text{detik} \times 8,35 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \times 0,45 \text{ m} \times 1,6 \text{ m}^2}{0,000167 \text{ m}^3/\text{detik}} \\ &= 0,018 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Headloss kompartemen 3} &= \frac{40/\text{detik} \times 8,35 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \times 0,43 \text{ m} \times 1,6 \text{ m}^2}{0,000167 \text{ m}^3/\text{detik}} \\ &= 0,014 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Headloss kompartemen 4} &= \frac{30/\text{detik} \times 8,35 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \times 0,41 \text{ m} \times 1,6 \text{ m}^2}{0,000167 \text{ m}^3/\text{detik}} \\ &= 0,01 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Headloss kompartemen 5} &= \frac{20/\text{detik} \times 8,35 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \times 0,4 \text{ m} \times 1,6 \text{ m}^2}{0,000167 \text{ m}^3/\text{detik}} \\ &= 0,006 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Headloss kompartemen 6} &= \frac{10/\text{detik} \times 8,35 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \times 0,39 \text{ m} \times 1,6 \text{ m}^2}{0,000167 \text{ m}^3/\text{detik}} \\ &= 0,003 \text{ m} \end{aligned}$$

c. Headloss prasedimentasi

Bak prasedimentasi direncanakan memiliki kriteria:

Panjang zona pengendap (b)	= 3 m
Tinggi zona pengendap	= 2 m
Panjang zona inlet	= 0,6 m
Kedalaman zona inlet	= 0,5 m
Kedalaman (y)	= 1,8 m
Koefisien kekasaran beton (n)	= 0,015
Percepatan gravitasi (g)	= 9,81 m/s
Slope saluran (s)	= 1% = 0,01

Dengan kriteria-kriteria di atas, dapat dihitung:

1) *Headloss* pintu air

a) Perhitungan jari-jari hidrolis

$$\begin{aligned} R &= \frac{b \times y}{b + 2y} \\ &= \frac{0,6 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}}{0,6 \text{ m} + (2 \times 0,5 \text{ m})} \\ &= 0,1875 \text{ m} \end{aligned}$$

b) Perhitungan *headloss* mayor

$$\begin{aligned} H_f &= \left(\frac{v \times n}{R^{2/3}} \right)^2 \times L \\ &= \left(\frac{\left(\frac{L}{\text{Waktu detensi}} \right) \times n}{R^{2/3}} \right)^2 \times L \end{aligned}$$

$$\left(\frac{\left(\frac{3 \text{ m}}{1,5 \text{ jam} \times \frac{60 \text{ menit}}{1 \text{ jam}} \times \frac{60 \text{ detik}}{1 \text{ menit}} \right) \times 0,015}{0,1875^{2/3}} \right)^2 \times 0,6 \text{ m}$$

$$= 3,88 \times 10^{-10} \text{ m}$$

c) Perhitungan head kecepatan

$$H_v = \frac{v^2}{2g}$$

$$= \frac{\left(\frac{3 \text{ m}}{1,5 \text{ jam} \times \frac{60 \text{ menit}}{1 \text{ jam}} \times \frac{60 \text{ detik}}{1 \text{ menit}} \right)^2}{2 \times (9,81 \text{ m/s}^2)}$$

$$= 1,57 \times 10^{-8} \text{ m}$$

d) Perhitungan *headloss* pintu air

$$\text{Headloss pintu air} = \frac{\left(\frac{H_f + H_v}{3} \right)}{(1 - (0,99^2))}$$

$$= \frac{\left(\frac{3,88 \times 10^{-10} \text{ m} + 1,57 \times 10^{-8} \text{ m}}{3} \right)}{(1 - (0,99^2))}$$

$$= 2,7 \times 10^{-7} \text{ m}$$

2) *Headloss* inlet

$$\text{Headloss inlet} = \text{Slope} \times \text{panjang pipa inlet}$$

$$= 1\% \times 0,5 \text{ m}$$

$$= 0,005 \text{ m}$$

3) *Headloss* kecepatan air pada bangunan

a) Perhitungan jari-jari hidrolis

$$R = \frac{b \times y}{b + 2y}$$

$$= \frac{3 \text{ m} \times 1,8 \text{ m}}{3 \text{ m} + (2 \times 1,8 \text{ m})}$$

$$= 0,818 \text{ m}$$

b) Perhitungan *headloss*

$$f = 1,5 \times \frac{(0,01989 + 0,0005078)}{4 \times 818}$$

$$= 1,5 \times \frac{(0,01989 + 0,0005078)}{4 \times 0,818 \text{ m}}$$

$$= 0,0093$$

Sehingga didapatkan nilai *headloss*

$$\begin{aligned}
H_f &= f \times \frac{L}{4R} \times \frac{v^2}{2g} \\
&= f \times \frac{L}{4 \times R} \times \frac{\left(\frac{\text{Panjang unit}}{\text{Waktu detensi}}\right)^2}{2 \times g} \\
&= 0,0093 \times \frac{3 \text{ m}}{4 \times 0,818 \text{ m}} \times \frac{\left(\frac{3 \text{ m}}{1,5 \text{ jam} \times \frac{60 \text{ menit}}{1 \text{ jam}} \times \frac{60 \text{ detik}}{1 \text{ menit}}}\right)^2}{2 \times 9,81 \text{ m/s}^2} \\
&= 1,35 \times 10^{-10} \text{ m}
\end{aligned}$$

4) *Headloss gutter*

a) Perhitungan jari-jari hidrolis

$$\begin{aligned}
R &= \frac{b \times y}{b + 2y} \\
&= \frac{0,52 \text{ m} \times 0,02 \text{ m}}{0,52 \text{ m} + (2 \times 0,02 \text{ m})} \\
&= 0,037 \text{ m}
\end{aligned}$$

b) Perhitungan *headloss mayor*

$$\begin{aligned}
H_f &= \left(\frac{v \times n}{R^{2/3}}\right)^2 \times L \\
&= \left(\frac{\left(\frac{L}{\text{Waktu detensi}}\right) \times n}{R^{2/3}}\right)^2 \times L \\
&= \left(\frac{\left(\frac{3 \text{ m}}{1,5 \text{ jam} \times \frac{60 \text{ menit}}{1 \text{ jam}} \times \frac{60 \text{ detik}}{1 \text{ menit}}\right) \times 0,015}{0,037^{2/3}}\right)^2 \times 0,52 \text{ m} \\
&= 3,73 \times 10^{-9} \text{ m}
\end{aligned}$$

c) Perhitungan head kecepatan

$$\begin{aligned}
H_v &= \frac{v^2}{2g} \\
&= \frac{\left(\frac{3 \text{ m}}{1,5 \text{ jam} \times \frac{60 \text{ menit}}{1 \text{ jam}} \times \frac{60 \text{ detik}}{1 \text{ menit}}}\right)^2}{2 \times (9,81 \text{ m/s}^2)} \\
&= 1,57 \times 10^{-8} \text{ m}
\end{aligned}$$

d) Perhitungan total *headloss* pada gutter

$$\begin{aligned}
\text{Total headloss} &= H_f + H_v \\
&= 3,73 \times 10^{-9} \text{ m} + 1,57 \times 10^{-8} \text{ m}
\end{aligned}$$

$$\text{Total headloss} = 1,95 \times 10^{-8} \text{ m}$$

d. Headloss biofilter anaerobik

Bak biofilter anaerobik direncanakan memiliki kriteria:

Panjang zona media (b)	= 1,3 m
Panjang zona sedimentasi	= 1,2
Tinggi	= 2,6 m
Kedalaman (y)	= 2,3 m
Tinggi sekat	= 2,3 m
Koefisien kekasaran beton (n)	= 0,015
Percepatan gravitasi (g)	= 9,81 m/s
Slope saluran (s)	= 1% = 0,01
Tinggi media	= 1,4 m
Diameter rongga	= 0,1 m
Faktor bentuk media saran tawon	= 1
Porositas media sarang tawon	= 0,98
Viskositas dinamis	= $8,318 \times 10^{-4}$
Massa jenis	= $0,9963 \text{ kg/m}^3$

Dengan kriteria-kriteria di atas, dapat dihitung:

1) *Headloss* zona sedimentasi

a) Perhitungan jari-jari hidrolis

$$R = \frac{b \times y}{b + 2y}$$

$$= \frac{1,2 \text{ m} \times 2,3 \text{ m}}{1,2 \text{ m} + (2 \times 2,3 \text{ m})}$$

$$= 0,48 \text{ m}$$

b) Perhitungan *headloss* kecepatan pada bangunan

$$f = 1,5 \times \frac{(0,01989 + 0,0005078)}{4 \times 0,48 \text{ m}}$$

$$= 1,5 \times \frac{(0,01989 + 0,0005078)}{4 \times 0,48 \text{ m}}$$

$$= 0,0302$$

Sehingga didapatkan nilai *headloss*

$$H_f = f \times \frac{L}{4R} \times \frac{v^2}{2g}$$

$$\begin{aligned}
&= f \times \frac{L}{4 \times R} \times \frac{\left(\frac{\text{Panjang unit}}{\text{Waktu detensi}} \right)^2}{2 \times g} \\
&= 0,0302 \times \frac{1,2 \text{ m}}{4 \times 0,48 \text{ m}} \times \frac{\left(\frac{1,2 \text{ m}}{3 \text{ jam} \times \frac{60 \text{ menit}}{1 \text{ jam}} \times \frac{60 \text{ detik}}{1 \text{ menit}} \right)^2}{2 \times 9,81 \text{ m/s}^2} \\
&= 1,2 \times 10^{-11} \text{ m}
\end{aligned}$$

c) Perhitungan *headloss* inlet

$$\begin{aligned}
\text{Headloss inlet} &= \text{Slope} \times \text{panjang pipa inlet} \\
&= 1\% \times 0,5 \text{ m} \\
&= 0,005 \text{ m}
\end{aligned}$$

d) Perhitungan total *headloss* ruang pengendapan

$$\begin{aligned}
\text{Total headloss} &= H_f + \text{headloss inlet} \\
&= 1,2 \times 10^{-11} \text{ m} + 0,005 \text{ m} \\
&= 0,005 \text{ m}
\end{aligned}$$

2) *Headloss* zona media

a) Perhitungan jari-jari hidrolis

$$\begin{aligned}
R &= \frac{b \times y}{b + 2y} \\
&= \frac{1,3 \text{ m} \times 2,3 \text{ m}}{1,3 \text{ m} + (2 \times 2,3 \text{ m})} \\
&= 0,51 \text{ m}
\end{aligned}$$

1) Perhitungan *headloss* kecepatan pada bangunan

$$\begin{aligned}
f &= 1,5 \times \frac{(0,01989 + 0,0005078)}{4 \times 0,51 \text{ m}} \\
&= 1,5 \times \frac{(0,01989 + 0,0005078)}{4 \times 0,51 \text{ m}} \\
&= 0,015
\end{aligned}$$

Sehingga didapatkan nilai *headloss*

$$\begin{aligned}
H_f &= f \times \frac{L}{4R} \times \frac{v^2}{2g} \\
&= f \times \frac{L}{4 \times R} \times \frac{\left(\frac{\text{Panjang unit}}{\text{Waktu detensi}} \right)^2}{2 \times g}
\end{aligned}$$

$$= 0,015 \times \frac{1,3 \text{ m}}{4 \times 0,5 \text{ m}} \times \frac{\left(\frac{1,3 \text{ m}}{13 \text{ jam} \times \frac{60 \text{ menit}}{1 \text{ jam}} \times \frac{60 \text{ detik}}{1 \text{ menit}}} \right)^2}{2 \times 9,81 \text{ m/s}^2}$$

$$= 6,1 \times 10^{-12} \text{ m}$$

1) Perhitungan *headloss* inlet

Headloss inlet = Slope x panjang pipa inlet

$$= 1\% \times 0,2 \text{ m}$$

$$= 0,002 \text{ m}$$

2) Perhitungan *headloss* belokan

$$H_f = \left(\frac{v \times n}{R^{2/3}} \right)^2 \times L$$

$$= \left(\frac{\left(\frac{\text{Panjang unit}}{\text{Waktu detensi}} \right) \times n}{R^{2/3}} \right)^2 \times L$$

$$= \left(\frac{\left(\frac{1,3 \text{ m}}{13 \text{ jam} \times \frac{60 \text{ menit}}{1 \text{ jam}} \times \frac{60 \text{ detik}}{1 \text{ menit}}} \right) \times 0,015}{0,51 \text{ m}^{2/3}} \right)^2 \times 2,3 \text{ m}$$

$$= 1,59 \times 10^{-11} \text{ m}$$

3) Perhitungan *headloss* media filter

$$\text{Kecepatan filtrasi (v)} = \frac{\text{Debit}}{\frac{\text{Diameter rongga}^2}{\text{Porositas media}}}$$

$$= \frac{0,001 \text{ m}^3/\text{detik}}{0,1^2}$$

$$= 0,102 \text{ m/s}$$

$$\text{Bilangan Reynold} = \frac{\Psi \times \rho \times d \times v}{\mu}$$

$$= \frac{1 \times 0,9963 \text{ kg/m}^3 \times 0,1 \text{ m} \times 0,102 \text{ m/s}}{8,318 \times 10^{-4} \text{ Kg/m.s}}$$

$$= 12,22$$

Karena nilai bilangan reynold lebih dari satu ($N_{Re} > 1$), nilai C_d adalah 0,4 sehingga dapat dihitung nilai *headloss* media filter sebagai berikut,

$$\begin{aligned}
H_f &= 1,067 \times \frac{C_D \times L \times v^2}{\Psi \times d \times e^4 \times g} \\
&= 1,067 \times \frac{0,4 \times 1,4 \text{ m} \times (0,102 \text{ m/s})^2}{1 \times 0,1 \text{ m} \times 0,98^4 \times 9,81 \text{ m/s}^2} \\
&= 0,00688 \text{ m}
\end{aligned}$$

4) Perhitungan total *headloss* media filter

Total *headloss* ruang media = *headloss* kecepatan air pada bangunan + *headloss* inlet + *headloss* belokan + *headloss* media filter

$$\begin{aligned}
\text{Total } headloss &= 6,1 \times 10^{-12} \text{ m} + 0,002 \text{ m} + 1,59 \times 10^{-11} \text{ m} + \\
&\quad 0,00688 \text{ m} \\
&= 0,00888 \text{ m}
\end{aligned}$$

e. **Headloss biofilter aerobik**

Bak biofilter aerobik direncanakan memiliki kriteria:

Panjang (b)	= 4,4 m
Tinggi	= 2,7 m
Kedalaman (y)	= 2,5 m
Tinggi sekat	= 2,15 m
Koefisien kekasaran beton (n)	= 0,015
Percepatan gravitasi (g)	= 9,81 m/s
<i>Slope</i> saluran (s)	= 1% = 0,01
Tinggi media	= 1,4 m
Diameter rongga	= 0,1 m
Faktor bentuk media saran tawon	= 1
Porositas media sarang tawon	= 0,98
Viskositas dinamis	= 8,318 x 10 ⁻⁴
Massa jenis	= 0,9963 kg/m ³

Dari kriteria-kriteria di atas, dapat dihitung:

1) Perhitungan jari-jari hidrolis

$$R = \frac{b \times y}{b + 2y}$$

$$= \frac{4,4 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}}{4,4 \text{ m} + (2 \times 2,5 \text{ m})}$$

$$= 1,2 \text{ m}$$

2) Perhitungan *headloss* kecepatan pada bangunan

$$f = 1,5 \times \frac{(0,01989 + 0,0005078)}{4 \times 1,2 \text{ m}}$$

$$= 1,5 \times \frac{(0,01989 + 0,0005078)}{4 \times 1,2 \text{ m}}$$

$$= 0,0065$$

Sehingga didapatkan nilai *headloss*

$$H_f = f \times \frac{L}{4R} \times \frac{v^2}{2g}$$

$$= f \times \frac{L}{4 \times R} \times \frac{\left(\frac{\text{Panjang unit}}{\text{Waktu detensi}}\right)^2}{2 \times g}$$

$$= 0,0065 \times \frac{4,4 \text{ m}}{4 \times 1,2 \text{ m}} \times \frac{\left(\frac{4,4 \text{ m}}{13,4 \text{ jam} \times \frac{60 \text{ menit}}{1 \text{ jam}} \times \frac{60 \text{ detik}}{1 \text{ menit}}}\right)^2}{2 \times 9,81 \text{ m/s}^2}$$

$$= 2,59 \times 10^{-12} \text{ m}$$

3) Perhitungan *headloss* inlet

$$\text{Headloss inlet} = \text{Slope} \times \text{panjang pipa inlet}$$

$$= 1\% \times 4,5 \text{ m}$$

$$= 0,045 \text{ m}$$

4) Perhitungan *headloss* belokan

$$H_f = \left(\frac{v \times n}{R^{2/3}}\right)^2 \times L$$

$$= \left(\frac{\left(\frac{\text{Panjang unit}}{\text{Waktu detensi}}\right) \times n}{R^{2/3}}\right)^2 \times 2,15$$

$$= \left(\frac{\left(\frac{4,4 \text{ m}}{13,4 \text{ jam} \times \frac{60 \text{ menit}}{1 \text{ jam}} \times \frac{60 \text{ detik}}{1 \text{ menit}}\right) \times 0,015}{1,2 \text{ m}^{2/3}}\right)^2 \times 2,15 \text{ m}$$

$$= 3,24 \times 10^{-12} \text{ m}$$

5) Perhitungan *headloss* media filter

$$\text{Kecepatan filtrasi (v)} = \frac{\text{Debit}}{\frac{\text{Diameter rongga}^2}{\text{Porositas media}}}$$

$$= \frac{\frac{0,001 \text{ m}^3/\text{detik}}{0,1^2}}{0,98}$$

$$= 0,102 \text{ m/s}$$

$$\text{Bilangan Reynold} = \frac{\Psi \times \rho \times d \times v}{\mu}$$

$$= \frac{1 \times 0,9963 \text{ kg/m}^3 \times 0,1 \text{ m} \times 0,102 \text{ m/s}}{8,318 \times 10^{-4} \text{ Kg/m.s}}$$

$$= 12,22$$

Karena nilai bilangan reynold lebih dari satu ($N_{Re} > 1$), nilai C_d adalah 0,4 sehingga dapat dihitung nilai *headloss* media filter sebagai berikut,

$$\begin{aligned} H_f &= 1,067 \times \frac{C_D \times L \times v^2}{\Psi \times d \times e^4 \times g} \\ &= 1,067 \times \frac{0,4 \times 1,4 \text{ m} \times (0,102 \text{ m/s})^2}{1 \times 0,1 \text{ m} \times 0,98^4 \times 9,81 \text{ m/s}^2} \\ &= 0,00688 \text{ m} \end{aligned}$$

6) Perhitungan total *headloss* media filter

Total *headloss* ruang media = *headloss* kecepatan air pada bangunan + *headloss* inlet + *headloss* belokan + *headloss* media filter

$$\begin{aligned} \text{Total } headloss &= 2,59 \times 10^{-12} \text{ m} + 0,045 \text{ m} + 3,24 \times 10^{-12} \text{ m} + \\ &\quad 0,00688 \text{ m} \\ &= 0,05188 \text{ m} \end{aligned}$$

f. **Headloss constructed wetland**

Constructed wetland direncanakan memiliki kriteria:

Panjang (b) = 9,6 m

Kedalaman (y) = 0,6 m

Luas permukaan (A_s) = 61,44

Konduktivitas media medium *gravel* = 10000 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hari}$

Koefisien kekasaran beton (n) = 0,015

Percepatan gravitasi (g) = 9,81 m/s

$$\text{Slope saluran (s)} = 1\% = 0,01$$

Dari kriteria-kriteria di atas, dapat dihitung:

1) Perhitungan jari-jari hidrolis

$$\begin{aligned} R &= \frac{b \times y}{b + 2y} \\ &= \frac{9,6 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}}{9,6 \text{ m} + (2 \times 0,6 \text{ m})} \\ &= 0,5 \text{ m} \end{aligned}$$

2) Perhitungan *headloss* kecepatan pada bangunan

$$\begin{aligned} f &= 1,5 \times \frac{(0,01989 + 0,0005078)}{4 \times 0,5 \text{ m}} \\ &= 1,5 \times \frac{(0,01989 + 0,0005078)}{4 \times 0,5 \text{ m}} \\ &= 0,0143 \end{aligned}$$

Sehingga didapatkan nilai *headloss*

$$\begin{aligned} H_f &= f \times \frac{L}{4R} \times \frac{v^2}{2g} \\ &= 0,0143 \times \frac{9,6 \text{ m}}{4 \times 0,5 \text{ m}} \times \frac{(0,3 \text{ m/s})^2}{2 \times 9,81 \text{ m/s}^2} \\ &= 0,000296 \text{ m} \end{aligned}$$

3) Perhitungan *headloss* inlet

$$\begin{aligned} \text{Headloss kompartemen 1} &= \text{Slope} \times \text{panjang pipa inlet} \\ &= 1\% \times 0,5 \text{ m} \\ &= 0,005 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Headloss kompartemen 2 dan 3} &= \text{Slope} \times \text{panjang pipa inlet} \\ &= 1\% \times 0,25 \\ &= 0,0025 \text{ m} \end{aligned}$$

4) Perhitungan *headloss* media

Headloss pada media *constructed wetland* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \text{Headloss} &= \frac{\text{Luas permukaan} \times \text{debit}}{\text{Konduktivitas media} \times \text{kedalaman} \times \text{panjang}^2} \\ &= \frac{61,44 \text{ m}^2 \times 86,4 \text{ m}^3/\text{hari}}{10000 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hari} \times 0,6 \text{ m} \times 9,6^2} \\ &= 0,0096 \text{ m} \end{aligned}$$

5) Perhitungan total *headloss*

Total *headloss* kompartemen 1 = *headloss* kecepatan air pada bangunan + *headloss* inlet + *headloss* media

$$\text{Total } headloss \text{ kompartemen 1} = 0,000296 \text{ m} + 0,005 \text{ m} + 0,0096 \text{ m}$$

$$\text{Total } headloss \text{ kompartemen 1} = 0,0149$$

$$\text{Total } headloss \text{ kompartemen 2} = 0,000296 \text{ m} + 0,025 \text{ m} + 0,0096 \text{ m}$$

$$\text{Total } headloss \text{ kompartemen 2} = 0,0124$$

$$\text{Total } headloss \text{ kompartemen 3} = 0,000296 \text{ m} + 0,025 \text{ m} + 0,0096 \text{ m}$$

$$\text{Total } headloss \text{ kompartemen 3} = 0,0124$$

g. *Headloss* bak kontrol

Bak kontrol direncanakan memiliki kriteria:

$$\text{Panjang (b)} = 1,4 \text{ m}$$

$$\text{Tinggi} = 2,5 \text{ m}$$

$$\text{Kedalaman (y)} = 2 \text{ m}$$

$$\text{Koefisien kekasaran beton (n)} = 0,015$$

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

$$\text{Slope saluran (s)} = 1\% = 0,01$$

Dengan kriteria-kriteria di atas, dapat dihitung:

1) Perhitungan jari-jari hidrolis

$$\begin{aligned} R &= \frac{b \times y}{b + 2y} \\ &= \frac{1,4 \text{ m} \times 2 \text{ m}}{1,4 \text{ m} + (2 \times 2 \text{ m})} \\ &= 0,5 \text{ m} \end{aligned}$$

2) Perhitungan *headloss* kecepatan air pada bangunan

$$\begin{aligned} f &= 1,5 \times \frac{(0,01989 + 0,0005078)}{4 \times R} \\ &= 1,5 \times \frac{(0,01989 + 0,0005078)}{4 \times 0,5 \text{ m}} \\ &= 0,03 \end{aligned}$$

Sehingga didapatkan nilai *headloss*

$$\begin{aligned}
H_f &= f \times \frac{L}{4R} \times \frac{v^2}{2g} \\
&= 0,03 \times \frac{1,4 \text{ m}}{4 \times R} \times \frac{\left(\frac{\text{Panjang unit}}{\text{Waktu detensi}}\right)^2}{2 \times g} \\
&= 0,03 \times \frac{1,4 \text{ m}}{4 \times 0,5 \text{ m}} \times \frac{\left(\frac{1,4 \text{ m}}{1 \text{ jam} \times \frac{60 \text{ menit}}{1 \text{ jam}} \times \frac{60 \text{ detik}}{1 \text{ menit}}}\right)^2}{2 \times 9,81 \text{ m/s}^2} \\
&= 1,57 \times 10^{-10} \text{ m}
\end{aligned}$$

3) Perhitungan *headloss* inlet

$$\begin{aligned}
\text{Headloss inlet} &= \text{Slope} \times \text{panjang pipa inlet} \\
&= 1\% \times 0,5 \text{ m} \\
&= 0,005 \text{ m}
\end{aligned}$$

Headloss seluruh unit yang direncanakan beserta ketinggian air terhadap permukaan tanah dapat dilihat pada **Tabel 5.38** di bawah ini.

Tabel 5.38 *Headloss* dan Profil Hidrolis pada Setiap Bangunan Instalasi Pengolahan

Unit dan Keterangan	Jenis <i>Headloss</i>	<i>Headloss</i>	Tinggi Muka Air Terhadap Permukaan Tanah
Bak ekualisasi			-0,2
	<i>Headloss</i> kecepatan air pada bangunan	1,57E-10	-0,2000000002
Koagulasi			2,7
	<i>Headloss</i> kecepatan air di bak pembubuh	2,99E-07	2,6999997
Elevasi setelah terjunan			-0,1
	<i>Headloss</i> kecepatan di bak setelah terjunan	7,298E-07	-0,10000073
Flokulasi			-0,10000073
	Headloss kompartemen 1	0,023	-0,12
	Headloss kompartemen 2	0,018	-0,14
	Headloss kompartemen 3	0,014	-0,15
	Headloss kompartemen 4	0,010	-0,16
	Headloss kompartemen 5	0,006	-0,17
	Headloss kompartemen 6	0,003	-0,17
Prasedimentasi			-0,17
	Headloss pipa inlet	0,005	-0,18
	Headloss kecepatan air pada bangunan	1,35E-10	-0,18
	Headloss pintu air	2,7E-07	-0,18
	Headloss gutter	1,95E-08	-0,18

Unit dan Keterangan	Jenis Headloss	Headloss	Tinggi Muka Air Terhadap Permukaan Tanah
Biofilter Anaerobik			-0,18
	Headloss ruang pengendapan	0,005	-0,18
	Headloss kompartemen 1	0,00888	-0,19
	Headloss kompartemen 2	0,00888	-0,20
	Headloss kompartemen 3	0,00888	-0,21
	Headloss kompartemen 4	0,00888	-0,22
Biofilter Aerobik			-0,22
	Headloss belokan	3,24E-12	-0,22
	Headloss pipa inlet	0,045	-0,26
	Headloss kecepatan air pada bangunan	2,59E-12	-0,26
	Headloss media filter	0,0069	-0,27
Constructed Wetland			-0,27
	Headloss kompartemen 1	0,0149	-0,29
Elevasi air pada kompartemen 2			-0,39
	Headloss kompartemen 2	0,0124	-0,40
Elevasi air pada kompartemen 2			-0,484
	Headloss kompartemen 3	0,0124	-0,496
Bak Kontrol			-0,496
	Headloss pipa inlet	0,005	-0,50
	Headloss kecepatan	1,57E-10	-0,50

5.4.10 Perhitungan Produksi Lumpur dan Periode Pengurasan

Pengolahan air, termasuk air limbah akan menghasilkan residu atau hasil samping berupa lumpur. Lumpur tersebut harus dikuras secara berkala agar tidak mengganggu proses pengolahan secara alamiah pada setiap unit serta tidak mengakibatkan tersumbatnya pipa-pipa yang ada pada unit pengolahan. Produksi lumpur dari setiap unit pengolahan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{VSS hasil penyisihan BOD} = \text{konsentrasi BOD influen} \times \% \text{ penyisihan BOD} \times Y$$

$$\text{VSS hasil penyisihan COD} = \frac{Q \times Y \times (S_0 - S)}{1 + k_d \times SRT}$$

$$\text{Hasil penyisihan TSS} = Q \times (\text{TSS masuk} - \text{TSS keluar})$$

$$\text{Total produksi lumpur} = \text{VSS hasil penyisihan BOD} + \text{VSS hasil penyisihan COD} + \text{hasil penyisihan TSS}$$

Di bawah ini merupakan contoh perhitungan untuk produksi lumpur pada unit prasedimentasi.

Diketahui:

Debit masuk (Q)	= 86.400 L/hari
Konsentrasi BOD <i>influent</i> prasedimentasi	= 1533,26 mg/L
% penyisihan BOD prasedimentasi	= 30%
<i>Growth yield coefficient</i> (Y)	= 0,5
COD masuk	= 5446,35 mg/L
COD keluar	= 3812,45 mg/L
TSS masuk	= 26 mg/L
TSS keluar	= 13 mg/L
Koefisien kinematis (kd)	= 0,06/hari
Kadar air pada lumpur	= 95%
Kadar <i>solid</i> pada lumpur	= 5%
Massa jenis <i>solid</i>	= 9650 kg/m ³
Massa jenis air	= 1000 kg/m ³
SRT direncanakan	= 2 hari

Dari kriteria-kriteria di atas, dapat dilakukan perhitungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{VSS hasil penyisihan BOD} &= \text{Debit masuk} \times \text{konsentrasi BOD influen} \\ &\quad \times \% \text{ penyisihan BOD} \times Y \\ &= 86.400 \text{ L/hari} \times \frac{1.633,26 \text{ mg/L}}{1000 \text{ mg/kg}} \times 30\% \times 0,5 \\ &= 19,87 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{VSS hasil penyisihan COD} &= \frac{Q \times Y \times (S_0 - S)}{1 + kd \times SRT} \\ &= \frac{86.400 \text{ L/hari} \times 0,5 \times \left(\frac{5446,35 \text{ mg/L} - 3812,45 \text{ mg/L}}{1000 \text{ mg/kg}} \right)}{1 + 0,06 \times 2 \text{ hari}} \\ &= 63,02 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Hasil penyisihan TSS} &= Q \times (\text{TSS masuk} - \text{TSS keluar}) \\ &= 86.400 \text{ L/hari} \times \frac{(26 \text{ mg/L} - 13 \text{ mg/L})}{1000 \text{ mg/kg}} \\ &= 1,12 \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

$$\text{Total produksi lumpur} = \text{VSS hasil penyisihan BOD} + \text{VSS hasil}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{penyisihan COD} + \text{hasil penyisihan TSS} \\
 & = 19,87 \text{ kg/hari} + 63,02 \text{ kg/hari} + 1,12 \text{ kg/hari} \\
 & = 84,02 \text{ kg/hari}
 \end{aligned}$$

Didapatkan massa lumpur yang dihasilkan dalam satu hari adalah 84,02 kg/hari, sehingga volume lumpur dapat dihitung dengan tahapan sebagai berikut:

$$\text{Massa jenis lumpur} = \frac{(5\% \times 2650 \text{ kg/m}^3) + (95\% \times 1000 \text{ kg/m}^3)}{1000}$$

$$= 1,0825 \text{ kg/L}$$

$$\text{Volume lumpur} = \frac{\text{Total massa lumpur diproduksi}}{\text{Massa jenis lumpur}}$$

$$= \frac{84,02 \text{ kg/hari}}{1,0825 \text{ kg/L}}$$

$$\text{Volume lumpur} = 77,61 \text{ L/hari}$$

$$= 0,07761 \text{ m}^3/\text{hari}$$

Untuk hasil perhitungan produksi lumpur pada setiap unit pengolahan dapat dilihat pada **Tabel 5.39** di bawah ini.

Tabel 5.39 Hasil Produksi Lumpur Setiap Unit Pengolahan

	Ekualisasi	Koagulasi Flokulasi	Prasedimentasi	Biofilter Anaerobik	Biofilter Aerobik	Constructed Wetland	Bak Kontrol
Debit masuk (L/hari)	86400	86400	86400	86400	86400	86400	86400
SRT (hari)	2	2	2	2	2	2	2
COD masuk (mg/L)	15561	15561	5446,35	3812,45	1143,73	171,56	6,86
COD keluar (mg/L)	15561	5446,35	3812,45	1143,73	171,56	6,86	6,86
TSS masuk (mg/L)	104	104	26	13	0,65	0,23	0,03
TSS keluar (mg/L)	104	26	13	0,65	0,23	0,03	0,03
BOD masuk (mg/L)	2473	2473	1533,26	1073,28	321,98	16,10	6,44
% penyisihan BOD	0%	38%	30%	70%	95%	60%	0%
kd (/hari)	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Y	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Massa lumpur TSS (kg/hari)	0	6,74	1,12	1,07	0,04	0,02	0
Massa lumpur COD (kg/hari)	0	390,14	63,02	102,94	37,50	6,35	0
Massa lumpur BOD (kg/hari)	0	40,60	19,87	32,46	13,21	0,42	0
Massa lumpur total (kg/hari)	0	437,47	84,02	136,46	50,75	6,79	0
Kadar air lumpur	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Kadar solid lumpur	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Massa jenis lumpur (kg/L)	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08
Volume lumpur (L/hari)	0,00	404,13	77,61	126,06	46,88	6,27	0,00

Lumpur yang dihasilkan harus dikuras secara berkala. Pengurasan dilakukan dengan cara melakukan penyedotan menggunakan truk penampung limbah atau truk tangki. Untuk frekuensi atau periode pengurasan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Frekuensi pengurasan dalam satu tahun} = \frac{\frac{\text{Volume lumpur}}{\text{Tinggi lumpur}} \times \frac{360 \text{ hari}}{1 \text{ tahun}}}{\text{Luas unit}}$$

Ketinggian lumpur disesuaikan dengan aturan masing-masing unit pengolahan.

Di bawah ini merupakan contoh perhitungan frekuensi pengurasan lumpur pada unit Prasedimentasi.

$$\begin{aligned} \text{Frekuensi pengurasan dalam satu tahun} &= \frac{\frac{\text{Volume lumpur}}{\text{Tinggi lumpur}} \times \frac{360 \text{ hari}}{1 \text{ tahun}}}{\text{Luas unit}} \\ &= \frac{\frac{0,07761 \text{ m}^3/\text{hari}}{1 \text{ m}} \times \frac{360 \text{ hari}}{1 \text{ tahun}}}{1 \text{ m}^2} \\ &= 56 \text{ kali/tahun} \end{aligned}$$

Frekuensi pengurasan pada unit lainnya dapat dilihat pada **Tabel 5.40** di bawah ini.

Tabel 5.40 Frekuensi Pengurasan Lumpur Setiap Unit Pengolahan

	Ekualisasi	Koagulasi Flokulasi	Prasedimentasi	Biofilter Anaerobik	Biofilter Aerobik	Constructed Wetland	Bak Kontrol
Volume lumpur (m ³ /hari)	0,00	0,404	0,078	0,126	0,047	0,006	0,00
Tinggi lumpur	0,5	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Luas unit	1,96	2,0	1,00	24,98	19,36	183,73	1,96
Frekuensi pengurasan	0	371	56	4	2	0	0

Dari **Tabel 5.40** di atas, dapat diketahui bahwa bak koagulasi flokulasi memerlukan pengurasan dengan frekuensi terbanyak dalam satu tahun, yakni 371 hari.

5.5 Penaksiran *Bill of Quantity* dan Rencana Anggaran Biaya

Untuk mengetahui perkiraan biaya yang harus dikeluarkan untuk membangun instalasi pengolahan lindi TPA Mrican, dibuatlah suatu BOQ dan RAB. Rencana anggaran biaya dibuat dengan mengacu pada dimensi atau

ukuran-ukuran dari bangunan pengolahan lindi yang digunakan menentukan besarnya volume suatu pekerjaan dalam pembangunan. Rencana anggaran biaya dari perencanaan instalasi pengolahan lindi TPA Mrican disusun dengan menggunakan harga upah pekerja dan bahan-bahan bangunan yang tercantum pada Keputusan Bupati Ponorogo Nomor: 188.45/1286/405.20/2022 tentang Penetapan Standar Harga Satuan Tertinggi (SHST) dan Harga Satuan Bahan Bangunan Konstruksi Pemerintah Kabupaten Ponorogo Tahun Anggaran 2023. Sementara itu, untuk melakukan analisis harga satuan pekerjaan (HSP) digunakan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 1 Tahun 2022 tentang Pedoman Penyusunan Perkiraan Biaya Pekerjaan Konstruksi Bidang Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. **Tabel 5.41** di bawah ini menunjukkan hasil perhitungan rencana anggaran biaya untuk unit pengolahan lindi yang direncanakan.

Tabel 5.41 Rencana Anggaran Biaya Instalasi Pengolahan Lindi TPA Mrican

No.	Uraian Pekerjaan	Volume/	Sat	Analisa	Harga Satuan	Jumlah Harga
1	2	3		4	5	6
A	Pekerjaan Persiapan					
1	1 m ² Pembersihan dan Pengupasan Permukaan Tanah (Striping) s.d. Tanaman Ø 2cm	275,72	m ²	T.01	Rp110.975,00	Rp30.597.472,13
2	Pengukuran dan Pemasangan 1 m Bowplank	153,40	m	T.01	Rp508.760,00	Rp78.043.784,00
					Sub Jumlah	Rp108.641.256,13
B	Pekerjaan Tanah					
1	Penggalian 1 m ³ Tanah Biasa sedalam s.d. 1 m untuk Volume 200 m ³ s.d. 2000 m ³	3,04	m ³	1.7.7.1.1.a (a)	Rp66.687,35	Rp202.846,25
2	Penggalian 1 m ³ Tanah Biasa sedalam > 1 m s.d. 2 m untuk volume 200 s.d 2000 m ³	307,96	m ³	1.7.7.1.1.d (a)	Rp79.953,75	Rp24.622.428,92
3	Penggalian 1 m ³ Tanah Biasa sedalam > 2 m s.d. 3 m untuk volume s.d 200 m ³	196,21	m ³	1.7.7.1.1.e (a)	Rp118.691,50	Rp23.288.221,83
4	Pengurugan Kembali 1 m ³ Galian Tanah	70,40	m ³	T.14a	Rp59.225,00	Rp4.169.476,42
5	Pengurugan 1 m ³ dengan Pasir Urug	17,41	m ³	T.14c	Rp184.345,00	Rp3.209.169,93
					Sub Jumlah	Rp55.492.143,36
C	Pekerjaan Lantai Kerja					
1	Pembuatan 1 m ³ Beton Mutu f'c = 9.8 Mpa (K125)	23,80	m ³	A.4.1.1.2	Rp1.188.333,82	Rp28.282.642,00
					Sub Jumlah	Rp28.282.642,00
D	Pekerjaan Beton Bertulang					

No.	Uraian Pekerjaan	Volume/	Sat	Analisa	Harga Satuan	Jumlah Harga
1	<i>Dinding Unit</i>					
	Pembuatan 1 m ³ Beton Mutu f'c = 24.0 Mpa (K275)	65,28	m ³	A.4.1.1.9	Rp1.363.832,64	Rp89.024.175,76
	Penulangan 100 kg dengan Besi Polos atau Besi Sirip	3.496,69	/100 kg	B.17.a	Rp1.901.410,00	Rp66.486.375,30
	Pemasangan 1 m ² Bekisting untuk Dinding Beton	446,97	m ²	A.4.1.1.23.	Rp885.063,00	Rp395.595.370,02
	Perawatan Beton/Lain Lain	0,00	m ³	Taksir	Rp50.000,00	Rp0,00
					Jumlah	Rp551.105.921,09
2	<i>Lantai Unit</i>					
	Pembuatan 1 m ³ Beton Mutu f'c = 24.0 Mpa (K275)	47,79	m ³	A.4.1.1.9	Rp1.363.832,64	Rp65.174.834,34
	Penulangan 100 kg dengan Besi Polos atau Besi Sirip	1.353,85	/100 kg	B.17.a	Rp1.901.410,00	Rp25.742.262,10
	Perawatan Beton/Lain Lain	0,00	m ³	Taksir	Rp50.000,00	Rp0,00
					Jumlah	Rp90.917.096,44
3	<i>Kolom 20x20</i>					
	Pembuatan 1 m ³ Beton Mutu f'c = 24.0 Mpa (K275)	4,35	m ³	A.4.1.1.9	Rp1.363.832,64	Rp5.936.763,49
	Penulangan 100 kg dengan Besi Polos atau Besi Sirip	603,41	/100 kg	B.17.a	Rp1.901.410,00	Rp11.473.391,68
	Pemasangan 1 m ² Bekisting untuk Kolom Beton	56,83	0	A.4.1.1.20.	Rp776.963,00	Rp44.154.496,50
	Perawatan Beton/Lain Lain	0,00	m ³	Taksir	Rp50.000,00	Rp0,00
					Jumlah	Rp61.564.651,68
4	<i>Sloof</i>					
	Pembuatan 1 m ³ Beton Mutu f'c = 24.0 Mpa (K275)	7,25	m ³	A.4.1.1.9	Rp1.363.832,64	Rp9.883.967,93
	Penulangan 100 kg dengan Besi Polos atau Besi Sirip	975,76	/100 kg	B.17.a	Rp1.901.410,00	Rp18.553.166,84
	Pemasangan 1 m ² Bekisting untuk Sloof Beton	61,86	0	A.4.1.1.19.	Rp519.156,00	Rp32.117.482,11
	Perawatan Beton/Lain Lain	0,00	m ³	Taksir	Rp50.000,00	Rp0,00
					Jumlah	Rp60.554.616,88
5	<i>Hanging Wall</i>					
	Pembuatan 1 m ³ Beton Mutu f'c = 24.0 Mpa (K275)	1,42	0	A.4.1.1.9	Rp1.363.832,64	Rp1.935.278,52
	Penulangan 100 kg dengan Besi Polos atau Besi Sirip	210,39	/100 kg	B.17.a	Rp1.901.410,00	Rp4.000.414,53
	Pemasangan 1 m ² Bekisting untuk Dinding Beton	17,36	m ²	A.4.1.1.23.	Rp885.063,00	Rp15.360.268,37
	Perawatan Beton/Lain Lain	0,00	0	Taksir	Rp50.000,00	Rp0,00
					Jumlah	Rp21.295.961,41
5	<i>Plat</i>					
	Pembuatan 1 m ³ Beton Mutu f'c = 24.0 Mpa (K275)	8,82	0	A.4.1.1.9	Rp1.363.832,64	Rp12.031.731,58
	Penulangan 100 kg dengan Besi Polos atau Besi Sirip	1.281,28	/100 kg	B.17.a	Rp1.901.410,00	Rp24.362.386,05

No.	Uraian Pekerjaan	Volume/	Sat	Analisa	Harga Satuan	Jumlah Harga
	Pemasangan 1 m ² Bekisting untuk Plat Beton	21,36	m ²	A.4.1.1.19.	Rp914.963,00	Rp19.543.243,69
	Perawatan Beton/Lain Lain	0,00	0	Taksir	Rp50.000,00	Rp0,00
					Jumlah	Rp55.937.361,32
6	Balok					
	Pembuatan 1 m ³ Beton Mutu f'c = 24.0 Mpa (K275)	2,39	0	A.4.1.1.9	Rp1.363.832,64	Rp3.258.196,18
	Penulangan 100 kg dengan Besi Polos atau Besi Sirip	363,58	/100 kg	B.17.a	Rp1.901.410,00	Rp6.913.160,74
	Pemasangan 1 m ² Bekisting untuk Balok Beton	7,96	m ²	A.4.1.1.21.	Rp808.013,00	Rp6.428.809,99
	Perawatan Beton/Lain Lain	0,00	m ³	Taksir	Rp50.000,00	Rp0,00
					Jumlah	Rp16.600.166,91
					Sub Jumlah	Rp857.975.775,73
E	Pekerjaan Pipa					
1	Pemasangan 1 m Pipa PVC Tipe AW Diameter 4"	25,65	m	A.23	Rp113.310,36	Rp2.906.410,80
2	Pemasangan 1 m Pipa PVC Tipe AW Diameter 2"	3,53	m	Taksir	Rp284.901,00	Rp1.005.700,53
3	Pengadaan Tee PVC Ø 4"	15,00	bh	Taksir	Rp15.500,00	Rp232.500,00
4	Pengadaan Tee PVC Ø 2"	2,00	bh	Taksir	Rp5.500,00	Rp11.000,00
5	Pengadaan Pipa Vent	4,00	bh	Taksir	Rp150.000,00	Rp600.000,00
					Sub Jumlah	Rp4.755.611,33
F	Pekerjaan Lain Lain					
1	Pembersihan Akhir	7,00	Ls	Taksir	Rp200.000,00	Rp1.400.000,00
2	Water Bar	0,00	m	Taksir	Rp2.500,00	Rp0,00
3	Pengadaan <i>Manhole</i>	5	bh	Taksir	Rp370.000,00	Rp1.850.000,00
4	Pengadaan Media Biofilter Sarang Tawon	31,12	m ³	Taksir	Rp1.500.000,00	Rp46.683.000,00
5	Pengadaan Blower	1,00	bh	Taksir	Rp3.700.000,00	Rp3.700.000,00
6	Pengadaan Diffuser	10,00	bh	Taksir	Rp266.000,00	Rp2.660.000,00
7	Pengadaan V-Notch Weir	12,00	bh	Taksir	Rp64.000,00	Rp768.000,00
8	Pengadaan Pintu Air	1,00	bh	Taksir	Rp10.000.000,00	Rp10.000.000,00
9	Tanaman <i>Canna Indica</i>	123,00	bh	Taksir	Rp20.000,00	Rp2.460.000,00
					Sub Jumlah	Rp69.521.000,00
TOTAL BIAYA UNTUK PEMBANGUNAN INSTALASI PENGOLAHAN LINDI RENCANA						Rp1.124.668.429

Dari **Tabel 5.41** di atas diketahui terdapat bidang pokok pekerjaan pada konstruksi instalasi pengolahan lindi, yakni pekerjaan persiapan, tanah, lantai kerja, beton bertulang, dan perpipaan. Rekapitulasi harga dari setiap pokok pekerjaan tersebut dapat dilihat pada **Tabel 5.42** di bawah ini.

Tabel 5.42 Rekapitulasi Rencana Anggaran Biaya Pembangunan IPL yang direncanakan

No.	Uraian Pekerjaan	Jumlah Harga
1	2	3
A	Pekerjaan Persiapan	Rp108.641.256,13
B	Pekerjaan Tanah	Rp55.492.143,36
C	Pekerjaan Lantai Kerja	Rp28.282.642,00
D	Pekerjaan Beton Bertulang	Rp857.975.775,73
D	Pekerjaan Perpipaan	Rp4.755.611,33
E	Pekerjaan Lain=Lain	Rp69.521.000,00
	JUMLAH	Rp1.124.668.428,54
	PPN 15%	Rp168.700.264,28
	TOTAL	Rp1.293.368.692,82
	DIBULATKAN	Rp1.293.369.000,00
<i>Terbilang: Satu Milyar Dua Ratus Sembilan Puluh Tiga Juta Tiga Ratus Enam Puluh Sembilan Ribu Rupiah</i>		

Dari **Tabel 5.42** di atas dapat diketahui bahwa biaya yang mungkin dikeluarkan untuk pembangunan instalasi pengolahan lindi yang telah direncanakan di atas adalah sebesar Rp1.293.369.000,00.

5.6 Perencanaan Standar Operasional Prosedur

Agar bangunan pengolah lindi tidak cepat rusak dan hasil olahan lindi sesuai dengan yang direncanakan, pengoperasian dan pemeliharaan instalasi pengolahan lindi harus diperhatikan. Terdapat beberapa acuan mengenai pengoperasian dan perawatan instalasi-instalasi pengolahan air limbah yang telah dikeluarkan oleh pemerintah, di antaranya adalah buku *Seri Sanitasi Lingkungan Pedoman Teknis Instalasi Pengolahan Air Limbah dengan Sistem Biofilter Anaerob Aerob pada Fasilitas Pelayanan Kesehatan* yang dikeluarkan oleh Kementerian Kesehatan RI Direktorat Jenderal Bina Upaya Kesehatan (2011) dan *Buku 3 Pedoman Standar Operasional Prosedur (SOP) UPTD Pengelola Air Limbah* yang dikeluarkan oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Cipta Karya Direktorat Pengembangan Penyehatan Lingkungan Permukiman (2018).

Berikut ini merupakan rancangan dari standar operasional prosedur dari instalasi pengolahan lindi yang telah direncanakan di atas:

- a. Operasional

Secara garis besar, hal-hal yang harus diperhatikan dan dilakukan pada pengoperasian unit-unit pengolahan lindi yang telah direncanakan di atas adalah;

- 1) Memastikan aliran air limbah pada inlet dan outlet lancar atau tidak tersumbat agar aliran dapat berjalan secara kontinu,
- 2) Melakukan pengurasan lumpur pada setiap unit secara berkala dengan menyisahkan sebagian lumpur pada unit biofilter aerobik, dan biofilter anaerobik agar proses biologis pada unit tersebut tetap berlangsung,
- 3) Melakukan pengujian terhadap kualitas lindi secara berkala untuk mengontrol agar lindi hasil olahan tetap berada pada standar baku mutu,
- 4) Memastikan blower dan diffuser tidak tersumbat dan dapat menghantarkan udara pada unit biofilter aerobik secara merata sehingga air lindi dapat homogen,
- 5) Melakukan pemeriksaan ketinggian lumpur pada setiap unit khususnya bak ekualisasi dan prasedimentasi. Pengukuran dilakukan menggunakan tongkat ukur minimal satu minggu sekali,
- 6) Memasukkan tablet desinfektan pada bak desinfeksi dan memastikannya berkontak dengan air lindi yang mengalir di dalamnya,

b. Pemeliharaan

Selain harus dioperasionalkan dengan tepat, instalasi pengolahan lindi juga harus dirawat atau dipelihara dengan baik. Pemeliharaan instalasi pengolahan lindi yang telah direncanakan di atas harus meliputi hal-hal berikut:

- 1) Membersihkan sampah atau benda-benda, termasuk *scum* yang mengapung di atas permukaan unit,
- 2) Merawat blower dan diffuser secara rutin sesuai dengan panduan di *manual book* yang diberikan.
- 3) Membersihkan *baffle* atau sekat antar kompartemen pada biofilter anaerobik secara berkala,
- 4) Perlu dilakukan pembersihan minimal satu minggu sekali pada unit setiap unit untuk menghindari adanya penyumbatan aliran,

- 5) Mencegah masuknya sampah atau benda padat ke dalam instalasi pengolahan lindi,
- 6) Memastikan adanya stok tablet desinfektan dan menjaganya agar tetap kering sebelum dimasukkan ke dalam unit bak kontrol,
- 7) Membersihkan *constructed wetland* dari tanaman yang telah mati, tanaman yang tidak diinginkan, daun yang berguguran, dan sampah atau kotoran lainnya.



UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A

BAB VI PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Dari hal-hal yang telah dipaparkan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- a. Setelah dilakukan pengujian, diketahui lindi dari TPA Mrican memiliki pH sebesar 8, kadar BOD sebesar 2.473 mg/L, kadar COD sebesar 15.561 mg/L, kadar TSS sebesar 104 mg/L, total nitrogen sebesar 4.257 mg/L, kadmium sebesar <0,0072 mg/L, dan merkuri sebesar <0,0008 mg/L. dari pengujian tersebut, diketahui bahwa kadar BOD, COD, TSS dan total nitrogen dari lindi TPA Mrican tidak memenuhi standar baku mutu menurut PermenLHK no. 59 Tahun 2016.
- b. Dari hasil perhitungan untuk kuantitas air lindi, diperkirakan debit lindi yang dihasilkan oleh TPA Mrican dapat mencapai 77,171 m³/hari.
- c. Dengan menggunakan metode *analytical hierarchy process* (AHP) dan mengutamakan kriteria *removal efficiency*, alternatif instalasi pengolahan lindi yang terdiri dari unit koagulasi flokulasi, prasedimentasi, biofilter anaerobik, biofilter aerobik, dan *constructed wetland* terpilih dari keempat pilihan alternatif yang ada.
- d. Rencana anggaran biaya untuk pembangunan rangkaian instalasi pengolahan lindi terpilih yang didesain dapat mengolah hingga kapasitas 86,4 m³/hari adalah sebesar Rp1.293.369.000,00.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil dan kesimpulan yang diperoleh, diberikan saran sebagai berikut:

- a. TPA Mrican harus segera membangun instalasi pengolahan lindi karena kualitas lindi yang dihasilkannya masih melebihi baku mutu dan berkemungkinan besar menyebabkan pencemaran lingkungan dan masalah sosial.



Halaman ini sengaja dikosongkan

UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A

DAFTAR PUSTAKA

- Adriansyah, E., Agustina, T. E., & Arita, S. (2019). Leachate Treatment of TPA Talang Gulo, Jambi City by Fenton Method and Adsorption. *Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry*, 4(1), 20–24.
<https://doi.org/10.24845/ijfac.v4.i1.20>
- Almeida, R. de, Campos, J., & Oroski, F. de A. (2020). Techno-Economic Evaluation of Landfill Leachate Treatment by Hybrid Lime Application and Nanofiltration Process. *Detritus*, 10, 170–181.
<https://doi.org/10.31025/2611-4135/2020.13897>
- Angrianto, N. L., Manusawai, J., & Sinery, A. S. (2021). Analisis Kualitas Air Lindi dan Permukaan pada Areal TPA Sowi Gunung dan Sekitarnya di Kabupaten Manokwari Papua Barat. *Cassowary*, 4(2), 221–233.
<https://doi.org/10.30862/cassowary.cs.v4.i2.79>
- Apriana, E., Supraba, I., & Kim, W. (2023). *Constructed Wetland at Galuga Landfill for Leachate Treatment: A Sustainable Approach*. 6(1).
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). *SNI_19-2454-2002 Tata Cara Teknik Operasional Pengelolaan Sampah Perkotaan*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2005). *SNI 06-6989.52-2005 Air dan Air Limbah—Bagian 52: Cara Uji Kadar Nitrogen Organik secara Makro Kjeldahl dan Titrasi*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). *SNI 6774:2008: Tata Cara Perencanaan Unit Paket Instalasi Pengolahan Air*.

- Badan Standardisasi Nasional. (2009). *SNI 6989.72:2009 Air dan Air Limbah—Bagian 72: Cara Uji Kebutuhan Oksigen Biokimia (Biochemical Oxygen Demand/BOD)*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2018). *SNI 6989-82: 2018 Air dan Air Limbah—Bagian 82: Cara Uji Logam Menggunakan Spektrometer Emisi Atom Industrially Coupled Plasma Optical Emission Spectrometric (ICP-OES)*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019a). *SNI 6989.3-2019 Air dan Air Limbah—Bagian 3: Cara Uji Padatan Tersuspensi Total (Total Suspended Solids/TSS) secara Gravimetri*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019b). *SNI 6989.11: 2019 Air dan Air Limbah—Bagian 11: Cara Uji Derajat Keasaman (pH) dengan Menggunakan pH Meter*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). *SNI 6989.59:2008 Air dan Air Limbah—Bagian 59: Metode Pengambilan Contoh Air Limbah*.
- Bahrodin, M. B., Zaidi, N. S., Hussein, N., Sillanpää, M., Prasetyo, D. D., & Syafiuddin, A. (2021). Recent Advances on Coagulation-Based Treatment of Wastewater: Transition from Chemical to Natural Coagulant. *Current Pollution Reports*, 7(3), 379–391. <https://doi.org/10.1007/s40726-021-00191-7>
- Bakhshoodeh, R., Alavi, N., Oldham, C., Santos, R. M., Babaei, A. A., Vymazal, J., & Paydary, P. (2020). Constructed Wetlands for Landfill Leachate Treatment: A Review. *Ecological Engineering*, 146, 105725. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105725>

- Balaka, Muh. Y. (2022). *Metodologi Penelitian Kuantitatif*. Widina Bhakti Persada Bandung.
- Carvajal-Flórez, E. & Santiago-Alonso Cardona-Gallo. (2019). Technologies Applicable to the Removal of Heavy Metals from Landfill Leachate. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(16), 15725–15753. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04888-7>
- Chelliapan, S., Arumugam, N., Md. Din, Mohd. F., Kamyab, H., & Ebrahimi, S. S. (2020). Anaerobic Treatment of Municipal Solid Waste Landfill Leachate. Dalam *Bioreactors* (1st ed., hlm. 175–193). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821264-6.00011-5>
- Damanhuri, E., Ismaria, R., & Padmi, T. (2006). *Pedoman Pengoperasian dan Pemeliharaan Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Sistem Controlled Landfill dan Sanitary Landfill*.
- Damanhuri, E., & Padmi, T. (2010). *Diktat Kuliah TL-3104 Pengelolaan Sampah*.
- Damanhuri, E., & Padmi, T. (2019). *Pengelolaan Sampah Terpadu* (Edisi kedua). ITB Press.
- Darmasetiawan, M. (2004). *Teori dan Perencanaan Instalasi Pengolahan Air*. Ekamitra Engineering.
- Dewi, A. P., & Slamet, A. (2021). Perencanaan Sistem Penyaluran dan Instalasi Pengolahan Air Limbah Domestik di Kelurahan Rangkah, Kecamatan Tambaksari, Kota Surabaya. *Jurnal Teknik ITS*, 9(2), D85–D90. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v9i2.54772>

- Direktorat Jenderal Cipta Karya, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2017). *Buku A Panduan Perencanaan Teknik Terinci Bangunan Pengolahan Lumpur Tinja*.
- Dwijayadi, I. N. A. A., Warawan, I. M. A., & Divayana, D. G. H. (2018). *Pengembangan Sistem Pendukung Keputusan Penentuan Hotel di Kecamatan Buleleng dengan Metode Analytical Hierarchy Process (AHP) dan Technique for Others Reference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)*. 7(2).
- Emalya, N., Munawar, E., Rinaldi, W., & Yunardi, Y. (2020). Landfill Leachate Management in Indonesia: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 845(1), 012032. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/845/1/012032>
- Ergene, D., Aksoy, A., & Sanin, F. D. (2022). *Investigation of the Impact of Landfill Age and Climate Factors on Landfill Leachate Characteristics*.
- Faiza, N., Hassan, N. A., Farhan R, M., M.A, E., & Rus, R. M. (2019). Solid Waste: Its Implication for Health and Risk of Vector Borne Diseases. *Journal of Wastes and Biomass Management*, 1(2), 14–17. <https://doi.org/10.26480/jwbm.02.2019.14.17>
- Fajri, N., Hadiwidodo, M., & Rezagama, A. (2017). *Pengolahan Lindi dengan Metode Koagulasi-Flokulasi Menggunakan Koagulan Aluminium Sulfat dan Metode Ozonisasi untuk Menurunkan Parameter BOD, COD, dan TSS (Studi Kasus Lindi TPA Jatibarang)*. 6(1).

- Febriyanti, S., Rumanti, A. A., & Supratman, N. A. (2019). *Sistem Pendukung Keputusan untuk Penentuan Lokasi Instalasi Pengolahan Air Limbah Komunal Industri Tekstil di Sungai Citarum Berbasis Web*. 6(2).
- Fenn, D. G., Hanley, K. J., & De Geare, T. V. (1975a). *Use of The Water Balance Method for Predicting Leachate Generation from Solid Waste Disposal Sites*. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA).
- Fenn, D. G., Hanley, K. J., & De Geare, T. V. (1975b). *Use of the Water Balance Methode for Predicting Leachate Generation from Solid Waste Disposal Sites*. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA).
- Ghangrekar, M. M., & Behera, M. (2014). Suspended Growth Treatment Process. Dalam *Comperhensive Water Quality and Purification*. Elsevier.
- Göçer, S., Duyar, A., Kozak, M., & Cirik, K. (2021). Treatment of Landfill Leachate by Anaerobic Baffled Reactor (ABR). *Environmental Research and Technology*, 4(2), 134–139. <https://doi.org/10.35208/ert.834186>
- Guida, M., Mattei, M., Della Rocca, C., Melluso, G., & Meriç, S. (2007). Optimization of Alum-Coagulation/Flocculation for COD and TSS Removal from Five Municipal Wastewater. *Desalination*, 211(1–3), 113–127. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.02.086>
- Hassan, N. E., & Umer, M. I. (2022). Primary Treatment of Landfill Leachate Effects on Heavy Metal and Soil Chemical Properties in Kwashe Industrial Area in Duhok Province, Kurdistan Region of Iraq. *Journal of Medicinal and Chemical Sciences*, 5(1), 1–9. <https://doi.org/10.26655/JMCHEMSCI.2022.1.1>

- Haumahu, S. al-Qadar, Riogilang, H., & Mangangka, I. R. (2021). *Perancangan Instalasi Pengolahan Lindi dengan Proses Kombinasi Kolam Anaerobik, Fakultatif, dan Maturasi di TPA Sumompo. 19.*
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & van Woerden, F. (2018). *What A Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050.* The World Bank.
- Kelompok Kerja Pembangunan, Perumahan, Permukiman, Air dan Sanitasi (Pokja PPAS) Nasional. (1994). *Tata Cara Pemilihan Lokasi Tempat Pembuangan Akhir Sampah. SNI TPA 03-3241-1994.*
- Kementerian Kesehatan RI Direktorat Jenderal Bina Upaya Kesehatan. (2011). *Seri Sanitasi Lingkungan Pedoman Teknis Instalasi Pengolahan Air Limbah dengan Sistem Biofilter Anaerob Aerob pada Fasilitas Pelayanan Kesehatan.*
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Cipta Karya Direktorat Pengembangan Penyehatan Lingkungan Permukiman. (2018a). *Buku 3 Pedoman Standar Operasional Prosedur (SOP) UPTD Pengelola Air Limbah Domestik (SOP Aset Operasi).*
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Cipta Karya Direktorat Pengembangan Penyehatan Lingkungan Permukiman. (2018b). *Pedoman Perencanaan Teknik Terinci Sistem Pengelolaan Air Limbah Domestik Terpusat (SPALD-T) Buku B: Panduan Perencanaan Teknik Terinci Sub-Sistem Pengolahan Terpusat.* Direktorat Pengembangan Penyehatan Lingkungan Permukiman Direktorat Jenderal Cipta Karya Kementerian Pekerjaan Umum.

- Khazaleh, M., & Gopalan, B. (2018). *Constructed Wetland for Wastewater Treatment*. 6(1), 78–86.
- Khoo, K. S., Tan, X., Ho, S.-H., Ling, T. C., Juan, J. C., Pal, P., Show, P. L., & Nguyen, T. H. P. (2020). Treatment for Landfill Leachate via Physicochemical Approaches: An Overview. *Chemical & Biochemical Engineering Quarterly*, 34(1), 1–24.
<https://doi.org/10.15255/CABEQ.2019.1703>
- Laili, F. (2021). *Analisis Kualitas Air Lindi dan Potensi Penyebaran ke Lingkungan Sekitar TPA Gunung Tugel Kabupaten Banyumas*. Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
- Le Borgne & Baquerizo. (2019). Microbial Ecology of Biofiltration Units Used for the Desulfurization of Biogas. *ChemEngineering*, 3(3), 72.
<https://doi.org/10.3390/chemengineering3030072>
- Li, Y., Tang, F., Xu, D., & Xie, B. (2021). Advances in Biological Nitrogen Removal of Landfill Leachate. *Sustainability*, 13(11), 6236.
<https://doi.org/10.3390/su13116236>
- Listyaningrum, R. (2022). *Analisis Kandungan DO, BOD, COD, TS, TDS, TSS dan Analisis Karakteristik Fisikokimia Limbah Cair Industri Tahu di UMKM Daerah Imogiri Barat Yogyakarta*.
- Liu, J., Gu, Z., Wang, X., & Li, Q. (2022). The Molecular Differences of Young and Mature Landfill Leachates: Molecular Composition, Chemical Property, and Structural Characteristic. *Chemosphere*, 287, 132215.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132215>

- Luu, T. L. (2020). Post Treatment of ICEAS-Biologically Landfill Leachate Using Electrochemical Oxidation with Ti/BDD and Ti/RuO₂ Anodes. *Environmental Technology & Innovation*, 20, 101099. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101099>
- Mahbub, M. (2006). *Penuntun Praktikum Agrohidrologi*.
- Mahendra, F. G., & Rahmadyanti, E. (2021). Studi Perencanaan Instalasi Pengolahan Limbah Lindi Pada Tpa Griyo Mulyo Kabupaten Sidoarjo. *Jurnal Teknik Sipil*, 2(2), 9–17. <https://doi.org/10.31284/j.jts.2021.v2i2.2161>
- Manderso, T. M. (2018). Determination of the Volume of Flow Equalization Basin in Wastewater Treatment System. *Civil and Environmental Research*, 10(4).
- Mara, D. (2003). *Waste Stabilization Ponds: Time for Aggressive Marketing*.
- Masduqi, A., & Assomadi, A. F. (2012). *Operasi & Proses Pengolahan Air* (Edisi Kedua). ITS Press.
- McCarty, P. L. (2018). What is the Best Biological Process for Nitrogen Removal: When and Why? *Environmental Science & Technology*, 52(7), 3835–3841. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05832>
- Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2016). *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016 tentang Baku Mutu Lindi Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah*.

- Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse (Fourth Edition)* (4th edition). McGraw-Hill.
- Miao, L., Yang, G., Tao, T., & Peng, Y. (2019). Recent Advances in Nitrogen Removal from Landfill Leachate Using Biological Treatments – A Review. *Journal of Environmental Management*, 235, 178–185. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.057>
- Mundiaturun, & Daryanto. (2015). *Pengelolaan Kesehatan Lingkungan*. Gava Media.
- Nevondo, V., Malehase, T., Daso, A., & Okonkwo, O. (2019). Leachate Seepage from Landfill: A Source of Groundwater Mercury Contamination in South Africa. *Water SA*, 45(2 April). <https://doi.org/10.4314/wsa.v45i2.09>
- Okun, D. A., & Schulz, C. A. (1984). *Surface Water Treatment for Communities in Developing Countries*. John Wiley and Sons.
- Peavy, H. S., Rowe, D. R., & Tchobanoglous, G. (1985). *Environmental Engineering*. McGraw-Hill.
- Phelps, H. O., Heinke, G. W., Jonker, J. F., Ouano, E. A. R., & Vandcasteele, C. (1996). *Management of Solid Wastes*. UNESCO.
- Phuntsho, S., Shon, H. K., Vigneswaran, S., & Kandasamy, J. (2009). *Wastewater Stabilization Ponds (WSP) for Wastewater Treatment: Vol. II*. UNESCO - EOLSS.
- Pinninti, R., Kasi, V., Sallangi, L. K. S. V. P., Landa, S. R., Rathinasamy, M., Sangamreddi, C., & Dandu Radha, P. R. (2021). Performance of *Canna Indica* Based Microscale Vertical Flow Constructed Wetland Under Tropical Conditions for Domestic Wastewater Treatment. *International*

Journal of Phytoremediation, 24(7), 684–694.
<https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1962800>

Pratama, G. A. P., Dewi, E., & Meidinariasty, A. (2021). Proses Pengolahan Air Pada Prasedimentasi Ditinjau dari Laju Alir dan Waktu Pengendapan Di PLTG Borang. *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia*, 1(8), 339–343.
<https://doi.org/10.52436/1.jpti.79>

Prayitno. (2011). *Teknologi Pengolahan Air Limbah Rumah Sakit*. 1(2), 133–139.

Qasem, N. A. A., Mohammed, R. H., & Lawal, D. U. (2021). Removal of Heavy Metal Ions from Wastewater: A Comprehensive and Critical Review. *Npj Clean Water*, 4(1), 36. <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>

Qasim, S. R. (1999a). *Wastewater Treatment Plants: Planning, Design, and Operation* (Second Edition). CRC Press LLC.

Qasim, S. R. (1999b). *Wastewater Treatment Plants: Planning, Design, and Operation, Second Edition* (Second Edition). CRC Press.

Rahimi, S., Modin, O., & Mijakovic, I. (2020). Technologies for Biological Removal and Recovery of Nitrogen from Wastewater. *Biotechnology Advances*, 43, 107570. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107570>

Randeniya, R., Rasangika, J., Wathuge, G., Wijethunge, S., Jayasooriya, S., & Karunanayake, S. (2018). *Impact of Decision Making on the Credibility of Bill of Quantities (BOQ)*.

Rathnayake, P., Herath, G., & Yatigammana, S. (2021). *Leachate Treatment Using Stabilization Ponds in Tropical Environments*.

Republik Indonesia. (2008). *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah*.

- Reynolds, T. D., & Richards, P. A. (1996). *Unit Operations and Process in Environmental Engineering* (Second Edition). PWS Publishing Company.
- Rini, T. S., Kusuma, M. N., Pratiknyo, Y. B., & Purwaningrum, S. W. (2020). *Kajian Potensi Gas Rumah Kaca dari Sektor Sampah di Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPA) Randegan, Kota Mojokerto*. 6(1).
- Rizqia, L. Z., & Slamet, A. (2021). Perencanaan Revitalisasi Instalasi Pengolahan Air Lindi (IPL) TPA Gunung Panggung, Kabupaten Tuban. *Jurnal Teknik ITS*, 10(2), C86–C91. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v10i2.65273>
- Said, N. I. (2000). *Teknologi Pegolahan Air Limbah dengan Proses Biofilm Tercelup*. 2.
- Said, N. I., & Herlambang, A. (2014). Peningkatan Kualitas Air Baku dengan Proses Biofilter Tercelup Menggunakan Media Struktur Sarang Tawon. *Jurnal Air Indonesia*, 7(1). <https://doi.org/10.29122/jai.v7i1.2391>
- Said, N. I., & Ruliasih. (2005). Tinjauan Aspek Teknis Pemilihan Media Biofilter untuk Pengolahan Air Limbah. *Jurnal Air Indonesia*, 1(3). <https://doi.org/10.29122/jai.v1i3.2355>
- Salam, M., & Nilza, N. (2021). Hazardous Components of Landfill Leachates and Its Bioremediation. Dalam M. L. Larramendy & S. Soloneski (Ed.), *Soil Contamination—Threats and Sustainable Solutions*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94890>
- Salami, L., Salami, K. B., Salami, T. A., Salami, T. A., & Susu, A. A. (2021). *Recent Advances in Landfill Leachates Treatment Technology*. 4(2), 1–13.

- Saputra, N. (2021). Kerangka Pikir dan Konseptualisasi Penelitian. Dalam *Fundamentals of Social Research Methods, Processes, and Applications*. Diandra Kreatif.
- Sasse, L. (1998). *Decentralised Wastewater Treatment in Developing Countries*. BORDA (Bremen Overseas Research and Development Association).
- Seeley, I. H., & Winfield, R. (1999). *Building Quantities Explained*. Macmillan Education UK. <https://doi.org/10.1007/978-1-349-14653-6>
- Septiariva, I. Y., Padmi, T., Damanhuri, E., & Helmy, Q. (2019). A Study on Municipal Leachate Treatment Through a Combination of Biological Processes and Ozonation. *MATEC Web of Conferences*, 276, 06030. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201927606030>
- Sim, C. H. (2003). *The Use of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Wetlands International.
- Singh, M. M., & John, R. F. H. H. A. (2019). *What are the SOPs (Standard Operating Procedures) and Its Benefits?*
- Słomczyńska, B., & Słomczyński, T. (2004). *Physico-Chemical and Toxicological Characteristics of Leachates from MSW Landfills*. 13(6), 627–637.
- Supriatna, Mahmudi, M., Musa, M., & Kusriani. (2020). *Hubungan pH dengan Parameter Kualitas Air pada Tambak Intensif Udang Vannamei (Litopenaeus vannamei)*. 4(3), 368–374.
- Tchobanoglous, G., & Kreith, F. (Ed.). (2002). *Handbook of Solid Waste Management* (2nd ed). McGraw-Hill.
- Thornthwaite, C. W., & Mather, J. R. (1957). *Instruction and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and The Water Balance*. Climatology.

- Tilley, E., Ulrich, L., Luthi, C., Reymond, P., & Zurbrugg, C. (2014). *Compendium of Sanitation Systems and Technologies* (2nd revised edition). EAWAG.
- United States Environmental Protection Agency. (1999). *Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA).
- UPM Umwelt-Projekt-Management GmbH. (2021a). *Anaerobic Baffled Reactor (ABR) Design Considerations for Faecal Sludge*. UPM Umwelt-Projekt-Management GmbH.
- UPM Umwelt-Projekt-Management GmbH. (2021b). *Anaerobic Filter (AF) Design Considerations for Faecal Sludge*. UPM Umwelt-Projekt-Management GmbH.
- U.S. EPA. (1993). *Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. A Technology Assessment* (Vol. 2). U.S. Environmental Protection Agency (USEPA).
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0925857493900095>
- U.S. EPA. (1999). *Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA).
- U.S. EPA. (2007). *Guidance for Preparing Standard Operating Procedures (SOPs)*.
- Von Sperling, M. (2007). *Waste Stabilisation Ponds* (Vol. 3). IWA Publishing.
<https://iwaponline.com/ebooks/book/83/>
- Wang, L. K., Pereira, N. C., & Hung, Y.-T. (Ed.). (2004). *Handbook of Environmental Engineering Volume 3 (Physicochemical Treatment Process)* (Vol. 3). Humana Press.

- Wang, Y., Fang, Q., & Jin, J. (2019). Review of Landfill Leachate Treatment. *Journal of Urban Science*, 8(2), 41–45. <https://doi.org/10.22645/UDI.2019.12.30.041>
- Wdowczyk, A., & Szymańska-Pulikowska, A. (2020). Differences in the Composition of Leachate from Active and Non-Operational Municipal Waste Landfills in Poland. *Water*, 12(11), 3129. <https://doi.org/10.3390/w12113129>
- Wdowczyk, A., & Szymańska-Pulikowska, A. (2021). Analysis of the possibility of conducting a comprehensive assessment of landfill leachate contamination using physicochemical indicators and toxicity test. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 221, 112434. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112434>
- Wilson, N., Peissig, L., Burford, P., Radians, A., Burnyeat, R., & Sielaff, B. (2011). *Land Treatment of Landfill Leachate*. Minnesota Pollution Control Agency.
- Worrell, W. A., & Vesilind, P. A. (2012). *Solid Waste Engineering* (Second Edition). Cengage Learning.
- Youcai, Z. (2018). *Pollution Control Technology for Leachate from Municipal Solid Waste*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03224-X>
- Yu, D. (2007). *Landfill Leachate Treatment Case Study, SRV Atervinning, Sweden.pdf*.
- Zakaria, S. N. F., Abdul Aziz, H., & Mohamad, M. (2022). Comparison Performance of Coagulation Flocculation Process and Combination with Ozonation Process of Stabilized Landfill Leachate Treatment. *Water Environment Research*, 94(8). <https://doi.org/10.1002/wer.10770>

Zakaria, S. N. F., & Aziz, H. A. (2018). Characteristic of Leachate at Alor Pongsu Landfill Site, Perak, Malaysia: A Comparative Study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 140, 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/140/1/012013>

Zhang, P., Chai, J., Cao, J., Qin, Y., Dang, M., Geng, K., & Wei, Y. (2022). *Landfill Leachate Generation Mechanism Study: A Review*. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04723-6>



UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A