

# Evaluasi dan Pemilihan Desain Alternatif Instalasi Pengolahan Limbah Cair Industri Tahu-Tempe

Sona Putri Siswoyo<sup>1</sup>, Ismi Khairunnissa Ariani<sup>1</sup>, Basransyah<sup>1</sup>, Bayu Nur Abdallah<sup>2</sup>,  
Eka Masrifatus Anifah<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Kalimantan, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Industri, Institut Teknologi Kalimantan, Indonesia

\*Koresponden email: ekamasrifatus@itk.ac.id

Diterima: 28 Mei 2024

Disetujui: 7 Juni 2024

## Abstract

The processing of tofu and tempeh produces solid waste and wastewater. Tofu and tempeh wastewater with high organic content must be treated to prevent environmental pollution. Therefore, the tempeh and tofu industry centre in East Kalimantan developed a wastewater treatment plant (WWTP) to treat the wastewater. However, the quality of the effluent still did not meet wastewater quality standards. In addition, the production of tofu and tempeh is increasing every year, so the amount of wastewater is also increasing. This study aims to evaluate and select alternative WWTP designs for tofu and tempeh wastewater. The WWTP design uses an anaerobic digester for wastewater treatment and combines it with three alternative aerobic treatments, including aerobic treatment, wetland and aerated lagoon. The design selection is based on removal efficiency, land area, and operating and construction costs using the Analytical Hierarchy Process method. Based on AHP, the selected design was the WWTP of the second alternative with wetlands. The selected design had a bar screen, an equalisation tank, an anaerobic digester and a wetland. This selected design had a BOD removal efficiency of 96%, COD of 92%, TSS of 88% and a land area of 12,524.20 m<sup>2</sup> with a construction cost of IDR 4,330,301,632 and an operating cost of IDR 179,664,945.

**Keywords:** *aerated lagoon, aerobic biofilter, anaerobic biogas digester, wastewater, wetland*

## Abstrak

Proses pengolahan tahu dan tempe menghasilkan limbah padat dan cair. Limbah cair tahu dan tempe dengan konsentrasi organik yang tinggi harus diolah dengan baik untuk mencegah pencemaran lingkungan. Sentra industri tahu dan tempe di Provinsi Kalimantan Timur memiliki Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) untuk mengolah limbah cair tahu dan tempe, tetapi efluen belum memenuhi baku mutu. Selain itu, pertumbuhan produksi tahu dan tempe semakin meningkat setiap tahun, maka buangan air limbah juga mengalami peningkatan. Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi dan mendesain alternatif IPAL di sentra industri tahu dan tempe tersebut. Perencanaan ini menggunakan *anaerobic digester* untuk mengolah limbah secara anaerobik dan dikombinasikan dengan 3 alternatif pengolahan aerobik yaitu *aerobic biofilter*, *wetland*, dan *aerated lagoon*. Pemilihan alternatif IPAL berdasarkan efisiensi penyisihan, luas lahan, biaya operasional dan konstruksi dengan menggunakan metode AHP (*Analytical Hierarchy Process*). Berdasarkan metode AHP, pada perencanaan ini didapatkan alternatif terpilih yaitu alternatif 2 dengan unit pengolahan *bar screen*, *equalization tank*, *anaerobic digester*, dan *wetland*. Pada alternatif 2 didapatkan efisiensi penyisihan BOD 96%, COD 92%, dan TSS 88%, luas lahan 1,2 Ha dengan biaya konstruksi Rp. 4.330.301.632 dan biaya operasional Rp. 179.664.945/tahun.

**Kata Kunci:** *aerated lagoon, aerobic biofilter, anaerobic digester, limbah cair, wetland*

## 1. Pendahuluan

Salah satu sentra industri tahu dan tempe di Provinsi Kalimantan Timur memiliki Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) untuk mengolah limbah cair yang dihasilkan dari proses pembuatan tahu dan tempe. Unit IPAL tersebut meliputi unit *inlet*, bak kontrol, ekualisasi, *wetland I*, *wetland II*, pengendapan akhir, dan bak indikator. Kualitas efluen IPAL di sentra industri tersebut yaitu BOD 607 mg/L, COD 1012 mg/L, dan TSS 294 mg/L [1]. Berdasarkan Peraturan Daerah Provinsi Kalimantan Timur Nomor 2 Tahun 2011 Tentang Baku Mutu Air Limbah Industri Tahu/Kecap/Tempe, kualitas efluen IPAL masih berada di atas baku mutu, sehingga kinerja IPAL perlu ditingkatkan.

Proses pengolahan tahu dan tempe menghasilkan limbah padat dan cair. Limbah padat dihasilkan dari proses pengayakan dan penggumpalan, kemudian dijadikan olahan seperti biskuit tahu, pakan ternak, dan menjadi tepung. Limbah cair dihasilkan dari proses pencucian, perebusan, pengepresan, dan pencetakan [2].

Kadar organik yang tinggi pada limbah cair tahu dan tempe dikarenakan bahan pembuatan tahu dan tempe yaitu kedelai mengandung 40 – 60% protein, 25 – 50% karbohidrat, dan 10% lemak [3]. Limbah cair tersebut jika dibuang langsung ke badan air akan menurunkan kandungan oksigen terlarut yang dapat menyebabkan penurunan kualitas ekosistem [4].

Limbah cair industri tahu dan tempe dapat diolah dengan pengolahan fisik-kimia maupun biologis. Pengolahan secara fisik-kimia bertujuan untuk memisahkan padatan tersuspensi dengan menggunakan teknologi sedimentasi dan koagulasi-flokulasi [5]. Pengolahan biologis menggunakan mikroorganisme untuk menguraikan senyawa organik yang terbagi menjadi proses anaerob dan aerob [6]. Pada perencanaan ini menggunakan pengolahan biologis *anaerobic biogas digester* yang dikombinasikan dengan pengolahan biologis aerob seperti *aerobic biofilter*, *wetland*, dan *aerated lagoon*. *Anaerobic digester* mampu mereduksi kadar BOD hingga 80%, COD 75%, dan TSS 50% [7]. Unit *wetland* mampu mereduksi 70 – 78% COD, 83 – 87% BOD, dan 61 – 81% TSS [8]. *Aerobic biofilter* mampu menurunkan BOD 90 – 97% [9], COD 78,2 – 88,88%, dan TSS 80,2 – 85,3% [10]. *Aerated lagoon* mampu menurunkan BOD 86,5%, COD 78%, dan TSS 85% [11].

Pengolahan air limbah dikatakan dapat bekerja dengan baik jika efluen yang dihasilkan telah memenuhi baku mutu. Peningkatan kinerja IPAL dilakukan dengan evaluasi dan memberikan desain alternatif pengolahan pada IPAL. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan kriteria desain dengan IPAL eksisting. Pemilihan alternatif dilakukan berdasarkan aspek efisiensi penyisihan, luas lahan biaya operasional dan konstruksi.

## 2. Metode Penelitian

Pengumpulan data meliputi data primer dan data sekunder. Data primer didapatkan dari observasi lapangan yang terdiri dari debit, kualitas air limbah, dan dimensi IPAL. Debit air limbah diukur langsung secara manual menggunakan ember berukuran 3,5 liter. Pengukuran debit air limbah dilakukan selama 7 hari. Setiap hari pengukuran dilakukan selama 8 jam mulai pukul 08.00 – 16.00. Setiap satu jam sekali dilakukan pengukuran debit dan setiap pengukuran dilakukan sebanyak 10 kali, kemudian dihitung rata-rata debit air limbah setiap harinya [12]. Perhitungan debit berdasarkan persamaan berikut [13]:

$$\text{Debit} = \frac{\text{Volume alat tampung (liter)}}{\text{Waktu rata-rata (detik)}} \quad (1)$$

Dimensi unit IPAL diukur langsung menggunakan meteran. Karakteristik air limbah didapatkan dari sampling air di *inlet* dan *outlet* dengan metode *grab sampling*. Sampel air limbah diuji untuk mengetahui konsentrasi BOD, COD, TSS, pH, suhu, amonia, dan fosfat berdasarkan pada *American Public Health Association 2017*

Penentuan alternatif IPAL menggunakan metode AHP (*Analytical Hierarchy Process*). Penentuan alternatif pengolahan menggunakan metode AHP yaitu dengan menerapkan skala dan bobot prioritas. Langkah-langkah metode AHP meliputi [14]:

1. Penentuan tujuan.

Tujuan metode AHP yaitu untuk memilih alternatif IPAL dengan aspek efisiensi penyisihan, luas lahan, biaya operasional, dan konstruksi.

2. Penentuan pembobotan nilai AHP.

Pembobotan nilai kriteria dalam metode AHP dapat dilihat pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Pembobotan Nilai AHP dan Definisi setiap skala

Nilai	Definisi
1	Sama pentingnya
3	Sedikit lebih penting
5	Jelas lebih penting
7	Sangat jelas lebih penting
9	Mutlak lebih penting
2,4,6,8	Antara dua nilai yang berdekatan

Sumber : [15]

3. Membuat matriks perbandingan setiap aspek

Perbandingan antar alternatif dilakukan berdasarkan dari pengambilan keputusan dengan menilai tingkat kepentingan suatu aspek dengan aspek lainnya.

4. Menghitung rata-rata geometrik  
 Setelah mendapatkan nilai perbandingan, selanjutnya dihitung rata-rata dari setiap kriteria dengan persamaan berikut [16]:
 
$$a_{ij} = (B_1, B_2, \dots, B_N)^{1/N} \quad (2)$$
5. Menghitung pembobotan  
 Setelah menghitung rata-rata geometri, selanjutnya diakumulasi hasil perhitungan setiap kriteria.
6. Perhitungan normalisasi  
 Hasil akhir perhitungan normalisasi akan dirata-rata, kemudian nilai rata-rata tertinggi akan menjadi alternatif terpilih.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Karakteristik Air Limbah

Karakteristik air limbah tahu dan tempe di sentra industri dapat dilihat pada **Tabel 2**. Karakteristik *outlet* IPAL belum memenuhi baku mutu Peraturan Daerah Provinsi Kalimantan Timur Nomor 2 Tahun 2011 Tentang Baku Mutu Air Limbah Industri Tahu/Kecap/Tempe.

**Tabel 2.** Karakteristik Air Limbah Sentra Industri

Parameter	Inlet	Outlet	Baku Mutu	Satuan
<b>BOD</b>	1450	672	150	mg/L
<b>COD</b>	3156	1642	300	mg/L
<b>TSS</b>	818	291	100	mg/L
<b>Kekeruhan</b>	899	167	-	NTU
<b>Amonia</b>	0,54	0,42	-	mg/L
<b>Fosfat</b>	9,90	8,20	-	mg/L
<b>Suhu</b>	5,7	6,59		
<b>pH</b>	35,54	31,55		

#### 3.2 Evaluasi Pengolahan Air Limbah

Evaluasi unit pengolahan air limbah dilakukan dengan perhitungan dimensi masing-masing unit IPAL eksisting dan dibandingkan dengan kriteria desain.

##### 1. Saluran inlet

Saluran *inlet* berfungsi untuk mengalirkan air limbah dari rumah produksi tahu dan tempe. Perbandingan kondisi eksisting saluran *inlet* dengan kriteria desain dapat dilihat pada **Tabel 3**.

**Tabel 3.** Perbandingan Kondisi Eksisting dengan Kriteria Desain Saluran *Inlet*

Dimensi Saluran Inlet	Kriteria Desain	Sumber	Keterangan
<b>V<sub>full</sub></b>	0,3 m/s	[17]	Sesuai
<b>V</b>	0,23 m/s		Tidak sesuai

Berdasarkan **Tabel 3**, kecepatan saluran *inlet* pada keadaan penuh telah memenuhi kriteria desain, namun saat keadaan normal kecepatan saluran *inlet* tidak memenuhi kriteria desain. Berdasarkan penelitian [18] kecepatan aliran di bawah 0,3 m/detik dapat menyebabkan padatan tersangkut pada saringan.

##### 2. Equalization tank

*Equalization tank* digunakan untuk menampung air limbah dari proses pembuatan tahu dan tempe. Fungsi *equalization tank* yaitu untuk mengendalikan fluktuasi aliran air limbah secara kualitas maupun kuantitas, serta menghomogenkan air limbah [19]. Perbandingan kondisi eksisting *equalization tank* dengan kriteria desain dapat dilihat pada **Tabel 4**.

**Tabel 4.** Perbandingan Kondisi Eksisting dengan Kriteria Desain *Equalization tank*

Dimensi <i>Equalization tank</i>	Kriteria Desain	Sumber	Keterangan
Kedalaman air	2,8 m	[20]	Tidak sesuai
<i>Freeboard</i>	0,2 m		Tidak sesuai
Waktu tinggal	21 jam	[21]	Tidak sesuai

Berdasarkan **Tabel 4**, waktu tinggal, kedalaman air, dan *freeboard equalization tank* tidak memenuhi kriteria desain. Hal ini terjadi karena volume pada *equalization tank* terlalu besar. Waktu tinggal eksisting *equalization tank* yaitu 21 jam, nilai tersebut terlalu tinggi dengan kriteria desain waktu tinggal yaitu 2 – 8 jam. Waktu tinggal yang terlalu lama pada *equalization tank* dapat menyebabkan terjadinya pengendapan. *Equalization tank* yang memiliki waktu tinggal terlalu lama akan terdapat lumpur yang memiliki ketebalan setengah dari kedalaman unit [22]. Ketebalan lumpur terlalu tinggi dapat menyebabkan volume efektif *equalization tank* berkurang, sehingga perlu adanya penambahan bak pengendap 1 [5].

### 3. *Wetland I* dan *Wetland II*

*Wetland* berfungsi sebagai tempat penguraian senyawa organik yang terkandung di dalam air limbah [23]. Penurunan senyawa organik pada *wetland* karena adanya aktivitas mikroorganisme dan tumbuhan [24]. Adanya dua kolam *wetland* bertujuan untuk meningkatkan efisiensi penyisihan IPAL. Perbandingan kondisi eksisting dengan *wetland I* dengan kriteria desain dapat dilihat pada **Tabel 5** dan *wetland II* pada **Tabel 6**.

**Tabel 5.** Perbandingan Kondisi Eksisting dengan Kriteria Desain *Wetland I*

Dimensi <i>Wetland I</i>	Kriteria Desain	Sumber	Keterangan
Rasio P : L	4,5 : 1	4 : 1 – 6 : 1	Sesuai
Laju beban hidraulik	0,53 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .hari	0,01 – 0,05 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .hari	Tidak sesuai
Laju beban BOD maksimum	7676,31 kg <sub>BOD</sub> /ha.hari	80 – 112 kg/ha.hari	Tidak sesuai
Waktu tinggal	4 hari	5 – 14 hari	Tidak sesuai
Kedalaman air	2 m	< 90 cm	Tidak sesuai
<i>Freeboard</i>	0,5 m	30 cm	Tidak sesuai

**Tabel 6.** Perbandingan Kondisi Eksisting dengan Kriteria Desain *Wetland II*

Dimensi <i>Wetland II</i>	Kriteria Desain	Sumber	Keterangan
Rasio P : L	3,8 : 1	4 : 1 – 6 : 1	Tidak sesuai
Laju beban hidraulik	4,20 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .hari	0,01 – 0,05 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .hari	Tidak sesuai
Laju beban BOD maksimum	10357,36 kg <sub>BOD</sub> /ha.hari	80 – 112 kg/ha.hari	Tidak sesuai
Waktu tinggal	0,5 hari	5 – 14 hari	Tidak sesuai
Kedalaman air	2 m	< 90 cm	Tidak sesuai
<i>Freeboard</i>	0,5 m	30 cm	Tidak sesuai

Dari **Tabel 5** dan **Tabel 6** dapat dilihat bahwa laju beban hidraulik dan laju beban BOD maksimum *wetland I* dan *wetland II* di IPAL tidak melebihi kriteria desain. Laju beban hidraulik tidak memenuhi kriteria desain disebabkan debit *inlet* IPAL terlalu tinggi, sehingga *wetland* tidak mampu mengolah debit air tersebut [27]. Jika debit air limbah terlalu tinggi, maka memerlukan unit pengolahan lebih banyak, sehingga memerlukan luas lahan, biaya operasional dan konstruksi lebih tinggi [28]. Nilai laju beban BOD maksimum yang tinggi menunjukkan banyaknya kandungan senyawa organik dalam air limbah yang diuraikan oleh mikroorganisme [29]. Laju beban hidraulik dan laju beban BOD maksimum berbanding terbalik dengan efisiensi penyisihan, semakin tinggi nilai laju beban hidraulik dan laju beban BOD maksimum, maka efisiensi penyisihan akan semakin kecil [30].

Dari **Tabel 5** dan **Tabel 6** nilai waktu tinggal pada *wetland I* dan *wetland II* tidak memenuhi kriteria desain. Waktu tinggal berpengaruh pada efektivitas penurunan kandungan beban pencemar, semakin lama waktu tinggal maka efektivitas penurunan kandungan beban pencemar akan semakin tinggi [31]. Waktu tinggal yang terlalu singkat dikarenakan mikroorganisme tidak memiliki cukup waktu untuk menguraikan senyawa organik yang ada pada air limbah [32].

### 4. *Secondary sedimentation*

*Secondary sedimentation* berfungsi sebagai penampung air limbah yang telah melalui proses pengolahan biologis [33]. Perbandingan kondisi eksisting *secondary sedimentation* dengan kriteria desain dapat dilihat pada **Tabel 7**.

**Tabel 7.** Perbandingan Kondisi Eksisting dengan Kriteria Desain *Secondary Sedimentation*

Dimensi <i>Secondary Sedimentation</i>		Kriteria Desain	Sumber	Keterangan
Panjang	25 m	10 – 100 m	[34]	Sesuai
Lebar	6 m	6 – 24 m		Sesuai
Kedalaman air	2,5 m	2,5 – 5 m		Sesuai
Laju beban permukaan	2,66 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .hari	30 – 50 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .hari	[35]	Tidak sesuai
Waktu tinggal	23 Jam	1 – 5 jam		Tidak sesuai

Dari **Tabel 7** dapat dilihat bahwa laju beban permukaan dan waktu tinggal pada *secondary sedimentation* tidak memenuhi kriteria desain. Nilai laju beban permukaan tidak sesuai kriteria desain menunjukkan partikel tidak terendap secara sempurna, dan akan terbawa ke efluen [36]. Waktu tinggal terlalu lama disebabkan volume pada *secondary sedimentation* terlalu besar [37]. *Secondary sedimentation* dengan nilai waktu tinggal terlalu besar dapat menimbulkan bau yang tidak sedap [38].

### 3.3 Perancangan Ulang IPAL

#### 1. Bar screen

*Bar screen* berfungsi untuk penyaring benda besar seperti kain, kertas, plastik, kaleng, dan cabang pohon yang dapat mengganggu sistem kerja seperti pompa [39]. Berikut perhitungan DED (*Detail Engineering Design*) *bar screen* [35]:

$$\begin{aligned} \text{Kedalaman bar (d)} &= 0,3 \text{ m} \\ \text{Debit} &= 0,0046 \text{ m}^3/\text{detik} \\ \text{Kecepatan} &= 0,3 \text{ m/detik (kriteria desain } 0,3 - 0,6 \text{ m/detik)} \\ \text{Lebar bar (w)} &= 0,8 \text{ cm (kriteria desain } 0,4 - 0,8 \text{ cm)} \\ \text{Jarak antar bar (b)} &= 2,5 \text{ cm (kriteria desain } 2,5 - 7,5 \text{ cm)} \\ \text{Kemiringan} &= 60^\circ \text{ (kriteria desain } 45 - 60^\circ) \\ \text{Faktor bentin } (\beta) &= 1,79 \text{ (lingkaran)} \\ \text{Luas} &= \frac{Q}{V_{rak}} = \frac{0,0046 \text{ m}^3/\text{detik}}{0,3 \text{ m/detik}} = 0,015 \text{ m}^2 \\ \text{Lebar bukaan bersih (l)} &= 0,2 \text{ m} = 20 \text{ cm} \\ \text{Jumlah batang (n)} &\begin{aligned} (n + 1) \times b &= l \\ (n + 1) \times 2,5 \text{ cm} &= 20 \text{ cm} \\ n &= 7 \text{ buah} \end{aligned} \\ \text{Lebar bukaan total saringan (w)} &= (n + 1) \times b = (7 + 1) \times 2,5 = 0,2 \text{ m} \\ \text{Panjang saringan yang terendam air (Ls)} &= \frac{d}{\sin \alpha} = \frac{0,3 \text{ m}}{\sin 60} = 0,35 \text{ m} \\ \text{Lebar bukaan total saat } clogging \text{ (Wc')} &= \frac{1}{2} Wc = \frac{1}{2} 0,2 \text{ m} = 0,1 \text{ m} \\ \text{Kecepatan aliran saat } clogging \text{ 50\% (Vs')} &= \frac{Q}{\frac{1}{2} \times Wc' \times d} = \frac{0,0046 \text{ m}^3/\text{detik}}{\frac{1}{2} \times 0,1 \text{ m} \times 0,3 \text{ m}} = 0,31 \text{ m/detik} \end{aligned}$$

#### 2. Equalization tank

*Equalization tank* berfungsi untuk menyeragamkan aliran agar pada tahap selanjutnya debit air limbah relatif lebih konstan [40]. Berikut perhitungan DED (*Detail Engineering Design*) *equalization tank* [39]:

$$\begin{aligned} \text{Jumlah unit} &= 2 \text{ unit} \\ \text{Kedalaman air} &= 2 \text{ m (kriteria desain } 1,5 - 2 \text{ m)} \\ \text{Debit} &= 0,0046 \text{ m}^3/\text{detik} \\ \text{Debit tiap unit} &= \frac{0,0046 \text{ m}^3/\text{detik}}{2} = 0,0023 \text{ m}^3/\text{detik} \\ \text{Waktu detensi} &= 2 \text{ jam} = 7200 \text{ detik} \\ \text{Volume} &= \text{debit} \times \text{waktu detensi} = 0,00464 \text{ m}^3/\text{detik} \times 7200 \text{ detik} = 16,63 \text{ m}^3 \\ \text{A-surface} &= \frac{\text{Volume}}{\text{Kedalaman}} = \frac{16,63 \text{ m}^3}{2 \text{ m}} = 8,32 \text{ m}^2 \\ \text{Asumsi P : L} &= 2:1 \\ \text{A} &= P \times L \\ \text{L} &= 2,04 \text{ m, P} = 4,08 \text{ m} \\ \text{Freeboard} &= 1 \text{ m} \\ \text{Kedalaman total} &= \text{Kedalaman} + \text{freeboard} = 2 \text{ m} + 1 \text{ m} = 3 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{Cek waktu detensi} = \frac{\text{Volume}}{\text{Debit}} = \frac{16,63 \text{ m}^3}{0,0023 \frac{\text{m}^3}{\text{detik}} \times 3600 \text{ detik}} = 2 \text{ jam (sesuai kriteria desain 2 – 8 jam)}$$

### Perhitungan pompa *submersible*

$$\text{Waktu beroperasi} = 24 \text{ jam}$$

$$C = 150$$

$$L \text{ suction} + L \text{ discharge} = 1,5 \text{ m}$$

$$V \text{ rencana} = 0,46 \text{ m/detik}$$

$$\text{Luas pipa} = \frac{\text{debit}}{\text{kecepatan}} = \frac{0,0023 \text{ m}^3/\text{detik}}{0,46 \text{ m/detik}} = 0,005 \text{ m}^2$$

$$\text{Diameter pipa} = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{3,14}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,005 \text{ m}^2}{3,14}} = 0,08 \text{ m} = 80 \text{ mm}$$

$$V_{\text{cek}} = \frac{\text{Debit}}{\frac{1}{4} \times 3,14 \times D^2} = \frac{0,0023 \text{ m}^3/\text{detik}}{\frac{1}{4} \times 3,14 \times 0,08^2} = 0,46 \text{ m/detik}$$

### 3. Anaerobic biogas digester

*Anaerobic biodigester* merupakan unit yang menggunakan tangki kedap udara, sehingga mikroorganisme anaerob mampu menstabilkan senyawa organik menjadi metana dan karbon dioksida [41]. Berikut perhitungan DED (*Detail Engineering Design*) *anaerobic biogas digester* [35]:

$$\text{Jumlah reaktor} = 9 \text{ reaktor}$$

$$\text{Kedalaman} = 7,5 \text{ m (kriteria desain 7,5 – 14 m)}$$

$$\text{Debit} = 0,0046 \text{ m}^3/\text{detik} = 399,16 \text{ m}^3/\text{hari}$$

$$\text{Debit tiap reaktor} = \frac{399,16 \text{ m}^3/\text{hari}}{9} = 44,35 \text{ m}^3/\text{hari}$$

$$\text{Massa BOD input anaerobic biogas digester} = 1.450 \text{ mg/L}$$

$$\text{Beban BOD input anaerobic biogas digester} = 578,79 \text{ kg/hari}$$

$$\text{Beban organik per reaktor} = \frac{\text{Beban BODin}}{\text{Jumlah reaktor}} = \frac{578,79 \text{ kg/hari}}{9} = 64,31 \text{ kg/hari}$$

$$\text{HRT} = 10 \text{ hari (kriteria desain 10 – 20 hari)}$$

$$\text{Volume reaktor} = \text{Debit} \times \text{HRT} = 399,16 \text{ m}^3/\text{hari} \times 10 \text{ hari} = 443,52 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume tiap reaktor} = \frac{443,52 \text{ m}^3}{9} = 49,28 \text{ m}^3$$

$$A\text{-surface} = \frac{\text{Volume}}{\text{Kedalaman}} = \frac{443,52 \text{ m}^3}{7,5 \text{ m}} = 59 \text{ m}^2$$

$$\text{Diameter} = \sqrt{\frac{4 \times A}{3,14}} = \sqrt{\frac{4 \times 59 \text{ m}^2}{3,14}} = 9 \text{ m (sesuai kriteria desain 6 – 38 m)}$$

$$\text{Ruang gas} = 1,5 \text{ m}$$

$$\text{Kedalaman total} = \text{Kedalaman} + \text{ruang gas} = 7,5 \text{ m} + 1,5 \text{ m} = 9 \text{ m}$$

$$\text{Cek waktu detensi} = \frac{\text{Volume}}{\text{Debit}} = \frac{443,52 \text{ m}^3}{0,0005 \frac{\text{m}^3}{\text{detik}} \times 3600 \text{ detik}} = 10 \text{ hari (sesuai kriteria desain 10 – 20 hari)}$$

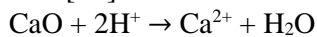
### Pembubuhan Kapur

$$\text{pH} = 5,7$$

$$Q = 44.352 \text{ L/hari} = 44.352 \text{ kg/hari} \times 10.000 \text{ gram} = 443.520.000 \text{ gram/hari}$$

$$[\text{H}^+] = 10^{-5,7} \text{ mol/gram}$$

$$\text{Mol } [\text{H}^+] = Q \times [\text{H}^+] = 443.520.000 \text{ gram/hari} \times 10^{-5,7} \text{ mol/gram} = 884,94 \text{ mol/hari}$$



$$\text{Mol CaO} = \frac{1}{2} \times \text{Mol } [\text{H}^+] = \frac{1}{2} \times 884,94 \text{ mol/hari} = 442,5 \text{ mol/hari}$$

$$\text{Mr CaO} = 56 \text{ gram/mol}$$

$$\text{gram CaO} = \text{Mol} \times \text{Mr} = 442,5 \text{ mol/hari} \times 56 \text{ gram/mol} = 24.778 \text{ gram/hari} = 25 \text{ kg/hari}$$

### Volume Lumpur

$$\text{Waktu pengurasan} = 1 \text{ tahun} = 350 \text{ hari}$$

$$\text{Mlumpur} = 1360,50 \text{ kg/hari} \times 350 \text{ hari} = 476.174,16 \text{ kg/tahun}$$

$$\text{Mkapur} = 25 \text{ kg/hari} \times 350 \text{ hari} = 8.672 \text{ kg/tahun}$$

$$\text{Total produksi lumpur} = \text{Mlumpur} + \text{Mkapur} = 476.174,16 \text{ kg/tahun} + 8.672 \text{ kg/tahun} = 484.846,56 \text{ kg/tahun}$$

$$\% \text{ air} = 88\%; \quad \% \text{ solid} = 12\%$$

$$\text{rho ss} = 2,65 \text{ kg/L}; \quad \text{rho air} = 1 \text{ kg/L}; \quad \text{rho kapur} = 3,34 \text{ kg/L}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ berat SS} &= \frac{M_{\text{lumpur}}}{\text{Total produksi lumpur}} \times 100\% = \frac{476.174,16 \text{ kg/tahun}}{484.846,56 \text{ kg/tahun}} \times 100\% = 98,2\% \\ \% \text{ berat kapur} &= \frac{M_{\text{kapur}}}{\text{Total produksi lumpur}} \times 100\% = \frac{8.672 \text{ kg/tahun}}{484.846,56 \text{ kg/tahun}} \times 100 = 1,8\% \\ \text{Densitas solid} &= \frac{(\rho_{\text{solid}} \times \% \text{berat ss}) + (\rho_{\text{air}} \times \% \text{berat kapur})}{100\%} = \frac{(2,65 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \times 98,2\%) + (1 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \times 1,8\%)}{100\%} = 266,23 \text{ kg/L} \end{aligned}$$

$$\text{Densitas lumpur} = \frac{(\rho_{\text{solid}} \times \% \text{solid}) + (\rho_{\text{air}} \times \% \text{air})}{100\%} = \frac{(2,65 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \times 12\%) + (1 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \times 88\%)}{100\%} = 1,2 \text{ kg/L}$$

$$\text{Volume lumpur} = \frac{\text{Massa lumpur}}{\text{Densitas lumpur}} = \frac{476.174,16 \text{ kg/tahun}}{1.2 \text{ kg/L}} = 394,47 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume lumpur tiap reaktor} = \frac{394,47 \text{ m}^3}{9} = 44,16 \text{ m}^3$$

### Produksi Methan

$$\text{Yield coefficient (y)} = 0,04 \text{ (kriteria desain } 0,04 - 0,06)$$

$$\text{Endogenous coefficient (b)} = 0,01 \text{ (kriteria desain } 0,01 - 0,04)$$

$$\text{BOD}_{\text{influen}} = 578,79 \text{ kg/hari}; \quad \text{BOD}_{\text{effluen}} = 115,76 \text{ kg/hari}$$

$$\text{Konsentrasi sel bakteri (Px)} = \frac{YQ(\text{BOD}_{\text{in}} - \text{BOD}_{\text{eff}})}{1 + b(\text{HRT})} = \frac{0,04 \times 44.352 \text{ m}^3/\text{hari} (578,79 - 115,76) \text{ kg/hari}}{1 + 0,01 \times 10 \text{ hari}} = 746,78 \text{ kg/hari}$$

kg/hari

$$\begin{aligned} \text{Volume gas methan} &= 0,4 \times (\text{BOD}_{\text{in}} - \text{BOD}_{\text{eff}}) \times Q - 1,42 \text{ Px} \\ &= 0,4 \times (578,79 - 115,76) \text{ kg/hari} \times 44,352 \text{ m}^3/\text{hari} - (1,42 \times 746,78 \text{ kg/hari}) \\ &= 7.154,18 \text{ m}^3/\text{hari} \end{aligned}$$

$$\text{Massa jenis gas methan} = 0,657 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Volume gas methan} = 7.154,18 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,657 \text{ kg/m}^3 = 4700,29 \text{ kg/hari}$$

### 4. Aerobic biofilter

*Aerobic biofilter* dioperasikan dengan tambahan pasokan oksigen melalui injeksi udara menggunakan kompresor atau blower. oksigen atau udara digunakan mikroorgansime untuk menguraikan senyawa organik menjadi CO<sub>2</sub>, air, dan amonia [42]. Berikut perhitungan DED (*Detail Engineering Design*) *aerobic biofilter* [43]:

$$\text{Jumlah unit} = 2 \text{ unit}$$

$$Q = 0,0046 \text{ m}^3/\text{detik}$$

$$\text{Debit tiap unit} = \frac{0,0046 \text{ m}^3/\text{detik}}{2} = 0,0023 \text{ m}^3/\text{detik} = 199,58 \text{ m}^3/\text{hari}$$

$$\text{BOD}_{\text{in}} = \frac{290 \text{ mg/L}}{1000} = 0,29 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Beban BOD} = Q \times \text{BOD}_{\text{in}} = 199,58 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,29 \text{ kg/m}^3 = 57,87 \text{ kg/hari}$$

$$\text{Beban BOD per volume media} = 2 \text{ kg BOD/m}^3 \cdot \text{hari} \text{ (kriteria desain } 0,5 - 4 \text{ kg BOD/m}^3 \cdot \text{hari)}$$

$$\text{BOD disisihkan} = 46,30 \text{ kg/hari}$$

$$\text{Volume media} = \frac{\text{BOD disisihkan}}{\text{Beban BOD per volume media}} = \frac{46,30 \text{ kg/hari}}{2 \text{ kg BOD/m}^3 \cdot \text{hari}} = 24,37 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume reaktor} = \frac{100}{50} \times \text{volume media} = \frac{100}{50} \times 24,37 \text{ m}^3 = 48,74 \text{ m}^3$$

$$\text{Cek beban BOD per volume media} = \frac{\text{Beban BOD}}{\text{Volume media}} = \frac{57,87 \text{ kg/hari}}{24,37 \text{ m}^3} = 2 \text{ kg BOD/m}^3 \cdot \text{hari}$$

$$\text{Kedalaman} = 3 \text{ m}$$

$$A\text{-surface} = \frac{\text{Volume reaktor}}{\text{Kedalaman}} = \frac{48,74 \text{ m}^3}{3 \text{ m}} = 16.25 \text{ m}^2$$

$$\text{Asumsi P : L} = 2:1$$

$$A = P \times L$$

$$L = 2,85 \text{ m}; \quad P = 5,70 \text{ m}$$

$$\text{Cek waktu detensi} = \frac{\text{Volume}}{\text{Debit}} = \frac{48,74 \text{ m}^3}{0,0023 \frac{\text{m}^3}{\text{detik}} \times 3600 \text{ detik}} = 6 \text{ jam (sesuai kriteria desain } 6 - 8 \text{ jam)}$$

### Ruang bed media

$$\text{Panjang} = 5,70 \text{ m}; \quad \text{Lebar} = 285 \text{ m}$$

$$\text{Kedalaman air diatas media filter} = 0,2 \text{ m (kriteria desain } 20 \text{ cm)}; \quad \text{Freeboard} = 0,2 \text{ m}$$

$$\text{Tinggi ruang lumpur} = 0,5 \text{ m (kriteria desain } 0,5 \text{ m)}$$

$$\text{Tinggi bed media} = 1,8 \text{ m (kriteria desain } 0,9 - 150 \text{ m)}$$

$$\text{Diameter media} = 2 \text{ cm (di pasaran)}$$

### Kebutuhan udara

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan } O_2 &= 104,18 \text{ kg/hari (kebutuhan oksigen = kebutuhan BOD dihilangkan)} \\ \text{Faktor keamanan} &= 1,5 \\ \text{Kebutuhan } O_2 \text{ teoritis} &= \text{faktor keamanan} \times \text{kebutuhan oksigen} = 1,5 \times 104,18 \text{ kg/hari} = 156,27 \text{ kg/hari} \\ \text{Berat jenis udara} &= 1,1725 \text{ kg/m}^3; \%O_2 \text{ di udara} = 23,20\% \\ \text{Jumlah kebutuhan } O_2 \text{ teoritis} &= \frac{\text{Kebutuhan } O_2 \text{ teoritis}}{\text{Berat jenis udara} \times \%O_2 \text{ di udara}} = \frac{156,27 \text{ kg/hari}}{1,1725 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 23,20\%} = 574,5 \text{ m}^3/\text{hari} \\ \text{Efisiensi difuser} &= 5\% \\ \text{Kebutuhan udara aktua} &= \frac{\text{Jumlah kebutuhan } O_2 \text{ teoritis}}{\text{Efisiensi difuser}} = \frac{574,5 \text{ m}^3/\text{hari}}{5\%} = 11.489,91 \text{ m}^3/\text{hari} \end{aligned}$$

Didapatkan kebutuhan oksigen teoritis = 156,27 kg/hari atau 6,51 kg/jam, sehingga dibutuhkan aerator jenis *fine bubble disc diffuser* dengan kapasitas 0,55 kg/jam sebanyak 12 buah.

### 5. Wetland

Tumbuhan air dalam *wetland* memiliki peranan dalam proses pemulihan kualitas air limbah secara alami [44]. Berikut perhitungan DED (*Detail Engineering Design*) *wetland* [45]:

$$\begin{aligned} \text{Jumlah unit} &= 5 \text{ unit} \\ \text{Debit} &= 0,0046 \text{ m}^3/\text{detik} \\ \text{Debit tiap unit} &= \frac{0,0046 \text{ m}^3/\text{detik}}{5} = 0,0009 \text{ m}^3/\text{detik} = 79,83 \text{ m}^3/\text{hari} \\ \text{Kedalaman kolam (y)} &= 0,5 \text{ m}; \quad \text{Porositas media kerikil} = 0,4 \\ \text{HRT} &= 5 \text{ hari (kriteri desain 5 – 14 hari)} \\ \text{A-surface} &= \frac{\text{HRT} \times \text{Debit}}{y \times \text{porositas media}} = \frac{5 \text{ hari} \times 79,83 \text{ m}^3/\text{hari}}{0,5 \text{ m} \times 0,4} = \frac{2076 \text{ m}^2}{10000} = 0,21 \text{ ha} \\ \text{Asumsi P : L} &= 4 : 1 \text{ (kriteria desain 4 : 1 – 6 : 1)} \\ \text{A} &= P \times L \\ \text{L} &= 22,78 \text{ m}; P = 91,12 \text{ m} \\ \text{Cek HRT} &= \frac{A \times y \times \text{porositas}}{Q} = \frac{2076 \text{ m}^2 \times 0,5 \text{ m} \times 0,4}{79,83 \text{ m}^3/\text{hari}} = 5 \text{ hari (sesuai kriteria desain 5 – 14 hari)} \\ \text{HLR} &= \frac{\text{Debit}}{\text{Luas}} = \frac{79,83 \text{ m}^3/\text{hari}}{2076 \text{ m}^2} = 0,04 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hari} \\ \text{Laju beban BOD} &= \frac{\text{Debit} \times \text{BOD}_{in}}{\text{Luas}} = \frac{79,83 \frac{\text{m}^3}{\text{hari}} \times \frac{0,29 \text{ kg}}{\text{m}^3}}{0,21 \text{ ha}} = 111,5 \text{ kg/ha.hari} \end{aligned}$$

### Kebutuhan Tanaman

$$\begin{aligned} \text{Jenis tanaman} &= \text{eceng gondok} \\ \text{Dasar } \textit{wetland} &= \text{lapisan } \textit{geomembrane} \\ \text{Material filter} &= \text{gravel kasar} \\ \text{Kerapatan tanaman} &= 2 \text{ tanaman/m}^2 \\ \text{Kebutuhan tanaman} &= \text{A-surface} \times \text{kerapatan tanaman} = 2076 \text{ m}^2 \times 2 \text{ tanaman/m}^2 = 4.151 \text{ tanaman} \\ \text{Kebutuhan total tanaman} &= 4.151 \text{ tanaman} \times 5 \text{ unit} = 20.756 \text{ tanaman} \end{aligned}$$

### 5. Aerated lagoon

Prinsip kerja unit ini yaitu air limbah yang ditampung dalam kolam besar diatur agar kondisi aerobik berjalan melalui pengaduk mekanis ataupun menginjeksi udara [46]. Berikut perhitungan DED (*Detail Engineering Design*) *aerated lagoon* [47]:

$$\begin{aligned} \text{Jumlah unit} &= 2 \text{ unit} \\ \text{Kedalaman} &= 1,5 \text{ m (kriteria desain 1 – 6 m)} \\ \text{Debit} &= 0,0046 \text{ m}^3/\text{detik} \\ \text{Debit tiap unit} &= \frac{0,0046 \text{ m}^3/\text{detik}}{2} = 0,0023 \text{ m}^3/\text{detik} = 199,58 \text{ m}^3/\text{hari} \\ \text{td} &= 3 \text{ hari (kriteria desain 3 – 6 hari)} \\ \text{Yield coefficient (y)} &= 0,7 \text{ (kriteria desain 0,6 – 0,7); Laju autolisis (b)} = 0,07/\text{hari} \\ \text{MLSS} &= \frac{3500 \text{ mg/L}}{1000} = 3,5 \text{ kg/m}^3 \\ \text{BOD}_{in} &= \frac{290 \text{ mg/L}}{1000} = 0,29 \text{ kg/m}^3; \text{BOD}_{out} = \frac{39,15 \text{ mg/L}}{1000} = 0,039 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \text{Volume} &= Q \times td = 199,58 \text{ m}^3/\text{hari} \times 3 \text{ hari} = 598,75 \text{ m}^3 \\ \text{A-surface} &= \frac{\text{Volume}}{\text{kedalaman}} = \frac{598,75 \text{ m}^3}{1,5 \text{ m}} = 399,17 \text{ m}^2 \\ \text{Asumsi P : L} &= 2:1 \\ \text{A} &= P \times L \\ \text{L} &= 14,13 \text{ m}; P = 28,25 \text{ m} \\ \text{Cek waktu detensi} &= \frac{\text{Volume}}{\text{Debit}} = \frac{598,75 \text{ m}^3}{199,6 \frac{\text{m}^3}{\text{hari}}} = 3 \text{ hari (sesuai kriteria desain 3 – 6 hari)} \\ \text{MLVSS} &= \frac{Y(S_0 - S_e)}{1 + b \cdot td} = \frac{0,7 (0,29 - 0,039) \text{ kg/m}^3}{1 + \frac{0,07}{\text{hari}} \cdot 3 \text{ hari}} = 0,145 \text{ kg/m}^3 \\ \text{F/M} &= \frac{Q(S_0 - S_e)}{\text{MLSS} \times V} = \frac{199,58 \text{ m}^3/\text{hari} (0,29 - 0,039) \text{ kg/m}^3}{3,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 598,75 \text{ m}^3} = 0,024 \text{ (sesuai kriteria 0,015 – 0,04)} \\ \text{Cek beban volume organik} &= \frac{\text{Debit} \times \text{BOD}_{in}}{\text{volume}} = \frac{199,58 \frac{\text{m}^3}{\text{hari}} \times \frac{0,29 \text{ kg}}{\text{m}^3}}{598,75 \text{ m}^3} = 0,1 \text{ kgBOD/m}^3 \cdot \text{hari} \end{aligned}$$

### Kebutuhan Oksigen

$$\begin{aligned} R_{\text{oks}} &= [1,5(S_0 - S_e)Q - 1,42 X Q] \\ &= \frac{[1,5 (0,29 - 0,039) \text{ kg/m}^3 \times 199,58 \text{ m}^3/\text{hari} - 1,42 \times 0,145 \text{ kg/m}^3 \times 199,58 \text{ m}^3/\text{hari}] \times 0,001}{24} \\ &= 0,13 \text{ kg/jam} \end{aligned}$$

Kebutuhan oksigen saat proses nitrifikasi

$$R_{O_2} = [3,1 (S_0 - S_e)Q]/24 = \frac{[3,1 (0,29 - 0,039) \text{ kg/m}^3 \times 199,58 \text{ m}^3/\text{hari}]}{24} = 6,47 \text{ kg/jam}$$

$$\text{Total kebutuhan oksigen} = R_{\text{oks}} + R_{O_2} = 0,13 \text{ kg/jam} + 6,47 \text{ kg/jam} = 6,59 \text{ kg/jam} = 158,23 \text{ kg/hari}$$

$$\text{Faktor keamanan} = 1,5$$

$$\text{Kebutuhan } O_2 \text{ teoritis} = \text{faktor keamanan} \times \text{kebutuhan oksigen} = 1,5 \times 158,23 \text{ kg/hari} = 237,35 \text{ kg/hari}$$

$$\text{Berat jenis udara} = 1,1725 \text{ kg/m}^3$$

$$\%O_2 \text{ di udara} = 23,20\%$$

$$\text{Jumlah kebutuhan } O_2 \text{ teoritis} = \frac{\text{Kebutuhan } O_2 \text{ teoritis}}{\text{Berat jenis udara} \times \%O_2 \text{ di udara}} = \frac{237,35 \text{ kg/hari}}{1,1725 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 23,20\%} = 872,55 \text{ m}^3/\text{hari}$$

$$\text{Efisiensi difuser} = 5\%$$

$$\text{Kebutuhan udara aktual} = \frac{\text{Jumlah kebutuhan } O_2 \text{ teoritis}}{\text{Efisiensi difuser}} = \frac{872,55 \text{ m}^3/\text{hari}}{5\%} = 17.450,97 \text{ m}^3/\text{hari}$$

Didapatkan kebutuhan oksigen teoritis = 237,35 kg/hari atau 9,88 kg/jam, sehingga dibutuhkan turbo jet aerator dengan kapasitas 7 kg/jam sebanyak 2 buah

### 3.4 Pemilihan Alternatif Pengolahan

Penentuan alternatif pengolahan menggunakan metode AHP (*Analytical Hierarchy Process*) yaitu dengan menerapkan skala dan bobot prioritas [14]. Hasil perhitungan normalisasi setiap kriteria dan alternatif dapat dilihat pada **Tabel 8**.

**Tabel 8.** Hasil Normalisasi Setiap Kriteria dan Alternatif

Alternatif	Efisiensi penyisihan	Biaya pembangunan	Biaya operasional	Luas lahan
	0,27	0,19	0,40	0,14
<b>Alternatif 1</b>	0,34	0,51	0,13	0,57
<b>Alternatif 2</b>	0,34	0,15	0,73	0,08
<b>Alternatif 3</b>	0,32	0,33	0,13	0,34

Tahap terakhir dari metode AHP yaitu melakukan perkalian *matriks* hasil rata-rata normalisasi kriteria dengan rata-rata setiap alternatif. Berikut merupakan perhitungan perkalian *matriks*:

$$\begin{aligned} \text{Alternatif 1} &= (K_1 + A_1) + (K_2 + A_1) + (K_3 + A_1) + (K_4 + A_1) \\ &= (0,27 + 0,34) \times (0,19 + 0,51) \times (0,4 + 0,13) \times (0,14 + 0,57) \\ &= 0,33 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Alternatif 2} &= (K_1 + A_2) + (K_2 + A_2) + (K_3 + A_2) + (K_4 + A_2) \\ &= (0,27 + 0,34) \times (0,19 + 0,15) \times (0,4 + 0,73) \times (0,14 + 0,08) \\ &= 0,42 \end{aligned}$$

$$\text{Alternatif 3} = (K_1 + A_3) + (K_2 + A_3) + (K_3 + A_3) + (K_4 + A_3)$$

$$= (0,27 + 0,32) \times (0,19 + 0,33) \times (0,4 + 0,13) \times (0,14 + 0,34)$$

$$= 0,25$$

Dari **Tabel 8** didapatkan bahwa nilai perkalian *matriks* tertinggi terdapat pada alternatif 2 dengan rata – rata 0,42. Hasil ini dapat disimpulkan bahwa alternatif IPAL terpilih yaitu alternatif pengolahan 2. Pada alternatif 2 memiliki nilai normalisasi efisiensi penyisihan sebesar 0,34 dengan efisiensi penyisihan BOD sebesar 96%, COD 92%, dan TSS 88. Nilai normalisasi luas lahan pada alternatif 2 yaitu sebesar 0,08 dengan luas lahan 12.524,20 m<sup>2</sup>. Nilai normalisasi biaya pembangunan pada alternatif 2 yaitu sebesar 0,15 dengan biaya pembangunan Rp. 4,330,301,632. Nilai normalisasi biaya operasional pada alternatif 2 sebesar 0,73 dengan biaya operasional Rp. 179,664,945.

## 5. Kesimpulan

1. Beberapa parameter unit IPAL tidak memenuhi kriteria desain. Pada saluran *inlet* kriteria yang tidak memenuhi yaitu kecepatan. Pada *equalization tank* kriteria yang tidak memenuhi yaitu kedalaman air, *freeboard*, dan waktu tinggal. Pada *wetland I* dan *wetland II* kriteria yang tidak memenuhi yaitu laju beban hidraulik, laju beban BOD maksimum, waktu tinggal, kedalaman air, dan *freeboard*. Pada *secondary sedimentation* kriteria yang tidak memenuhi yaitu laju beban permukaan dan waktu tinggal.
2. Alternatif 2 adalah alternatif desain IPAL terpilih dengan unit pengolahan *bar screen*, *equalization tank*, *anaerobic biogas digester*, dan *wetland*. Pada alternatif 2 didapatkan efisiensi penyisihan BOD 96%, COD 92%, dan TSS 88, luas lahan 12.524,20 m<sup>2</sup> dengan biaya konstruksi Rp. 4,330,301,632 dan biaya operasional Rp. 179,664,945

## 6. Referensi

- [1] H. W. Raharti, “Studi Pemanfaatan Ekstrak Biji Cempedak Sebagai Koagulan Dalam Menurunkan Kadar TSS, COD, dan Kekeruhan di Industri Tahu dan Tempe di Balikpapan,” Institut Teknologi Kalimantan, 2022.
- [2] F. Lubis, L. Fadila, Y. P. Hasibuan, F. Doli, and A. Razaq, “<https://journals.stimsukmamedan.ac.id/index.php/senashtek> Publish online, Juli 2022, page 786-791,” pp. 786–791, 2022.
- [3] M. M. Huda, M. R. Kirom, S. Si, M. Si, and A. Qurthobi, “Analisis Produksi Hidrogen Dalam Pengolahan Limbah Kacang Analysis Hydrogen Production in the Processing of Soybean Waste Using Anaerobic Digester,” vol. 4, no. 3, pp. 3953–3960, 2017.
- [4] F. Sayow, B. V. J. Polii, W. Tilaar, and K. D. Augustine, “Analisis Kandungan Limbah Industri Tahu Dan Tempe Rahayu Di Kelurahan Uner Kecamatan Kawangkoan Kabupaten Minahasa,” *Agri-Sosioekonomi*, vol. 16, no. 2, p. 245, 2020, doi: 10.35791/agrsosek.16.2.2020.28758.
- [5] L. Indrayani and N. Rahmah, “Nilai Parameter Kadar Pencemar Sebagai Penentu Tingkat Efektivitas Tahapan Pengolahan Limbah Cair Industri Batik,” *Jurnal Rekayasa Proses*, vol. 12, no. 1, p. 41, 2018, doi: 10.22146/jrekpros.35754.
- [6] N. L. G. Sudaryati, *Monograf Sedimen Perairan Tercemar Untuk Bahan Lumpur Aktif Dalam Pengolahan Limbah Cair Industri Tahu*. Bandung: Media Sains Indonesia, 2021.
- [7] R. Y. Kusumadewi, “Perencanaan Instalasi Pengolahan Air Limbah Kegiatan Peternakan Sapi Perah dan Industri Tahu,” 2016.
- [8] S. G. Abdelhakeem, S. A. Abouloos, and M. M. Kamel, “Performance of a vertical subsurface flow constructed wetland under different operational conditions,” *J Adv Res*, vol. 7, no. 5, pp. 803–814, 2016, doi: 10.1016/j.jare.2015.12.002.
- [9] E. Loupasaki and E. Diamadopoulos, “Attached growth systems for wastewater treatment in small and rural communities: A review,” *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 88, no. 2, pp. 190–204, 2013, doi: 10.1002/jctb.3967.
- [10] RR. V. E. K. dan T. A. Rachmanto, “Efektivitas Porositas Biofilter Aerob untuk Mendegradasi Parameter Limbah Cair Rumah Makan dengan Menggunakan Micro Bubble Generator,” vol. 3, no. 1, pp. 156–161, 2022.
- [11] Z. Ammar, B. A. Abdelhafid, and D. Ali, “The effects of hydraulic retention time on organic loading rate in efficiency of aerated lagoons in treating rural domestic wastewater at El-Oued (south-east Algeria),” *Oriental Journal of Chemistry*, vol. 33, no. 4, pp. 1890–1898, 2017, doi: 10.13005/ojc/330434.
- [12] M. Thohuroh, “Studi Perencanaan Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Pabrik Tahu ‘3 Saudara’ Malang Dengan Kombinasi Biofilter Anaerobik-aerobik,” 2020.

- [13] I. Hasyim and D. A. Rakhman, "Kajian Penggunaan Kebutuhan Kapur Dalam Pengolahan Air Asam Tambang Pada Settling Pond 02 Di PT. Bara Kumala Sakti Kabupaten Kutai Kartanegara Provinsi Kalimantan Timur," *Jurnal Geologi Pertambangan*, vol. 1, no. 14, pp. 14–22, 2014.
- [14] H. A. Pratama, "Perencanaan Instalasi Pengolahan Air Limbah (Ipal) Domestik Yayasan Pondok Pesantren Al-Jaly Kabupaten Bangkalan," pp. 1–115, 2022.
- [15] S. Febriyanti, A. A. Rumanti, and ..., "Sistem Pendukung Keputusan Untuk Penentuan Lokasi Instalasi Pengolahan Air Limbah Komunal Industri Tekstil Di Sungai Citarum Berbasis Web," *eProceedings ...*, vol. 6, no. 2, pp. 7392–7405, 2019.
- [16] U. E. Wirdianto E, *Aplikasi Metode Analytical Hierarchy Process dalam Menentukan Kriteria Penilaian Supplier*. 2008.
- [17] S. R. Qasim, *Wastewater Treatment Plants, Palnning, Design, and Operation*. Holt, Rinerhart, and Winton: CBS College Publishing, 1985.
- [18] V. P. DR Hapsari., EFT Haqq., "Bangunan Pengolahan Lumpur Tinja Kecamatan Rungkut Kota Surabaya," UPN Jawa Timur, 2022.
- [19] R. I. Yuriski, R. Haribowo, and M. Sholichin, "Studi Evaluasi Kelayakan Sistem Instalasi Pengolahan Air Limbah ( IPAL ) Rumah Potong Hewan ( RPH ) Gadang Kabupaten Malang," *Jurnal Teknik Pengairan Universitas Brawijaya*, pp. 1–12, 2018.
- [20] Tchobanoglous, *Wastewater Engineering : Treatment and Reuse*, 4th editio. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [21] N. I. Said, *Instalasi Pengolahan Air Limbah Rumah Sakit*. Jakarta: Pusat Pengkajian dan Penerapan Lingkungan, 2006.
- [22] H. D. Prabowo and I. F. Purwanti, "Evaluasi Instalasi Pengolahan Air Limbah Hotel X di Surabaya," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 6, no. 1, pp. 1–5, 2017, doi: 10.12962/j23373539.v6i1.21852.
- [23] P. Asmoro and M. Al Kholif, "Pemanfaatan Parit Drainase Sebagai Wetland Untuk Mendegradasi Cemaran Air Limbah Domestik," *WAKTU: Jurnal Teknik UNIPA*, vol. 14, no. 1, pp. 8–14, 2016, doi: 10.36456/waktu.v14i1.99.
- [24] H. Abdulgani, M. Izzati, and Sudarno, "Pengolahan Limbah Cair Industri Kerupuk Dengan Sistem Subsurface Flow Constructed Wetland Menggunakan Tanaman Typha Angustifolia," pp. 482–488, 2013.
- [25] J. Bendoricchio, G., Cin, L. D., & Persson, "Guidelines for Free Water Surface Wetland Design," in *Ecosystems*, 2000, pp. 51–91.
- [26] UN Habitat, *State Of The World's Cities 2008/2009*. London: Harmonious cities, 2008.
- [27] Y. A. Salim, "Efektivitas Sistem Constructed Wetland Sebagai Pengolahan Limbah Batik Ecoprint Menggunakan Tanaman Kangkung Air," *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents*, vol. 3, no. 2, p. 6, 2021.
- [28] Y. Pratiwi, "Analisis Kebutuhan Instalasi Pengolahan Lumpur Tinja (IPLT) di Kabupaten Blitar," 2019.
- [29] A. Munfaridah, S. P. Saraswati, and J. S. Mahathir, "Pengaruh Sistem Aerasi Intermittent terhadap Removal Organik dan Nitrogen pada Pengolahan Air Limbah Domestik Kamar Mandi Umum," *Jurnal Ilmu Lingkungan*, vol. 20, no. 1, pp. 102–114, 2022, doi: 10.14710/jil.20.1.102-114.
- [30] S. Novitasari, In., Syafrudin., "Pengaruh Variasi Konsentrasi Influen dan Hydraulic Loading Rate (HLR) Terhadap Penyisihan Parameter BOD dan COD Pada Pengolahan Air Limbah Domestik Artificial (Grey Water) Menggunakan Reaktor UASB," 2014.
- [31] A. Riyadi and F. Amrulloh, "Efektivitas Penggunaan Reaktor Downflow Lahan Basah Buatan (Constructed Wetlands) terhadap Penurunan COD, BOD, dan TSS dalam Pengolahan Air Limbah Domestik," *Jurnal Teknologi dan Pengelolaan Lingkungan*, vol. 8, no. 2, pp. 15–24, 2021.
- [32] R. Ratnawati and M. Al Kholif, "Aplikasi Media Batu Apung Pada Biofilter Anaerobik Untuk Pengolahan Limbah Cair Rumah Potong Ayam," *Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan*, vol. 10, no. 1, pp. 1–14, 2018, doi: 10.20885/jstl.vol10.iss1.art1.
- [33] R. A. Sari, A. Pribadi, D. R. Nurmaningsih, S. Nengse, and Y. Yustrianti, "Design of Communal Wastewater Treatment Plant (Case Study in Depok Village, Trenggalek, East Java)," *Konversi*, vol. 11, no. 2, pp. 69–78, 2022, doi: 10.20527/k.v11i2.13903.
- [34] G. Qasim, S.R., Motley, E.M., and Zhu, *Water Work Engineering: Planning, Design & Operation*. Texas: Prentice Hall PTR, 2000.
- [35] Tchobanoglous, George, Franklin Burton, and H. David Stensel. "Wastewater engineering: treatment and reuse." *American Water Works Association. Journal* 95.5 (2003): 201

- [36] Saputra, Mahardika, Etih Hartati, and Nico Halomoan. "Evaluasi Kinerja Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) di Waduk Melati, Kota Jakarta Pusat." *Jurnal Teknik Lingkungan* 22.2 (2016): 52-62.
- [37] E. Kurnianingtyas, A. Prasetya, and A. T. Yuliansyah, "Kajian Kinerja Sistem Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Komunal (Studi Kasus: IPAL Komunal Kalisong, Kelurahan Sembung, Kecamatan Tulungagung, Kabupaten Tulungagung, Jawa Timur)," vol. 5, pp. 62–70, 2020.
- [38] R. N. Azizah, A. Slamet, and A. Yuniarto, "Evaluasi Instalasi Pengolahan Air Limbah Industri Tapioka Di Kabupaten Lampung Timur," pp. 147–153, 2016.
- [39] S. R. Qasim and G. Zhu, *Wastewater treatment and reuse: Theory and design examples: Volume 1: Principles and basic treatment*. 2017. doi: 10.1201/b22368.
- [40] A. P. Sari and A. Yuniarto, "Perencanaan Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Industri Agar-agar," *IPTEK Journal of Proceedings Series*, vol. 3, no. 5, pp. 174–182, 2017, doi: 10.12962/j23546026.y2017i5.3130.
- [41] S. Rezeki, W. D. Ivontianti, and A. Khairullah, "Optimasi Temperatur Pada Produksi Biogas dari Limbah Rumah Makan di Kota Pontianak," *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, dan Material*, vol. 5, no. 1, p. 32, 2021, doi: 10.30588/jeemm.v5i1.850.
- [42] A. A. Astuti, A. D., Rinanti, A., & Vieira, "Canteen Wastewater and Gray Water Treatment Using Subsurface Constructed Wetland-Multilayer Filtration Vertical Flow Type with Melati Air (*Echindorus paleafolius*) at Senior High School," *Journal of Science and Technology*, pp. 117–120, 2017.
- [43] R. Ratnawati and M. Alkholif, "Desain Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Biofilter untuk Mengolahan Air Limbah Poliklinik UNIPA Surabaya," vol. 12, pp. 73–82, 2014.
- [44] C. Fajariyah and Lingkungan, "Kajian Literatur Pengolahan Lindi Tempat Basah menggunakan Tumbuhan Air," vol. 6, no. 2, 2017.
- [45] Dirjen Cipta Karya, *Panduan Perencanaan Teknik Terinci Bangunan Pengolahan Lumpur Tinja*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2018.
- [46] L. Oktavia and N. Karnaningroem, "Menggunakan Kolam Aerasi Dengan Penambahan Inola-121 Sugar Mills Waste Water Treatment By Using Aerated Lagoon With Inola-121 Addition," *Jurnal Purifikasi*, vol. 13, pp. 9–16, 2012.
- [47] Dirjen Cipta Karya, *Pedoman Perencanaan Teknik Terinci Sistem Pengelolaan Air Limbah Domestik Terpusat SPALD-T*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2018.