

# Optimalisasi Instalasi Pengolahan Lindi Studi Kasus: TPA Galuga Kota Bogor

Zulfa Amala<sup>1\*</sup>, Rangga Sururi<sup>2</sup>, Glenn Lucas Hendrajaya<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Singaperbangsa Karawang, Karawang

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Nasional, Bandung

<sup>3</sup>Program Studi Teknik Lingkungan, Asian Institute of Technology, Thailand

\*Koresponden email: zulfa.amala@ft.unsika.ac.id

Diterima: 21 Agustus 2025

Disetujui: 27 Agustus 2025

## Abstract

The Leachate Treatment Plant (LTP) at Galuga Landfill currently operates using an anaerobic pond-facultative pond-maturation pond. This system was designed based on average leachate loads, making it susceptible to overloads due to fluctuating volumes—particularly during the rainy season. Additionally, the landfill has been operating for over 25 years, contributing to a decrease in the BOD/COD ratio to below 0.1. This low ratio negatively affects the efficiency of biological treatment, partly due to the increased consumption of volatile fatty acids. To address these issues, further development and optimization of the LTP is required. The effort began with a field survey to assess the current condition of the LTP, followed by a literature review to identify appropriate technological improvements. The leachate quality analysis revealed a BOD/COD ratio below 0.1, and the outlet concentrations failed to meet effluent standards. As a result, pre-treatment is essential before biological treatment can be effectively applied.

**Keywords:** *leachate, leachate treatment plant, development, galuga, landfill bogor*

## Abstrak

Instalasi Pengolahan Lindi (IPL) di TPA Galuga saat ini menerapkan sistem pengolahan kolam anaerobik-kolam fakultatif-kolam maturasi. Sistem IPL ini dirancang berdasarkan beban rata-rata, sehingga sering mengalami kelebihan beban akibat fluktuasi volume lindi, khususnya pada musim hujan. Tantangan lain yang dihadapi adalah operasional TPA yang telah berlangsung lebih dari 25 tahun, yang menyebabkan rasio BOD/COD menurun hingga <0,1. Penurunan ini berdampak pada menurunnya efektivitas sistem kolam, seiring dengan meningkatnya konsumsi asam lemak volatil. Maka dari itu, perlu adanya pengembangan dan optimalisasi pada IPL di TPA Galuga. Kegiatan dimulai dengan survei lapangan untuk mengidentifikasi kondisi eksisting IPL, dilanjutkan dengan kajian literatur guna memperoleh rekomendasi teknologi pengolahan yang paling sesuai. Hasil analisis kualitas lindi menunjukkan rasio BOD/COD < 0,1 dan konsentrasi outlet belum memenuhi baku mutu, sehingga diperlukan tahapan pre-treatment sebelum lindi dapat diolah pada unit biologis seperti sistem kolam.

**Kata Kunci:** *air lindi, leachate treatment plant, galuga, pengembangan, tpa bogor*

## 1. Pendahuluan

Kota Bogor merupakan salah satu Kota yang tumbuh dengan pesat di Jawa Barat, kepadatan Kota Bogor pada tahun 2023 mencapai 9.613 jiwa/km<sup>2</sup> dengan laju pertumbuhan penduduk mencapai 1,12 persen [1]. Disamping itu Kota Bogor memiliki posisi yang strategis karena secara geografis, provinsi ini berada pada daerah yang berbatasan langsung dengan Ibu Kota Negara. Sebagai wilayah penyangga Ibu Kota Negara, sudah tentu pembangunan di Kota Bogor juga akan terpicu dengan adanya pembangunan ibukota negara yang cukup pesat. Namun, di sisi lain akibat pembangunan yang pesat juga akan memunculkan berbagai persoalan, salah satu persoalan tersebut adalah masalah sampah.

TPA Galuga dioperasikan sebagai tempat pembuangan akhir sampah untuk melayani Kota Bogor dan Kabupaten Bogor. Luas lahan yang digunakan mencapai 37,7 Ha, dan saat ini mengolah sampah sebanyak kurang lebih 600 ton/hari dengan sistem control landfill. Dari hasil timbulan sampah, turut dihasilkan limbah cair berupa lindi sebagai produk samping proses dekomposisi dan pelindian materi organik. Lindi TPA tergolong sebagai air limbah dengan konsentrasi tinggi, mengandung berbagai polutan organik, anorganik, serta mikroorganisme. Kandungan tersebut meliputi humus, amonia nitrogen, logam berat, garam anorganik, serta ditandai dengan rasio BOD/COD yang rendah, pH berkisar 6-7, dan kadar TDS yang tinggi [2]. Kualitas air lindi dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti timbulan dan komposisi

sampah, lama waktu penimbunan, kadar oksigen yang tersedia, iklim, curah hujan di TPA, serta metode penimbunan yang digunakan [3].

Dalam operasionalnya, TPA Galuga dilengkapi dengan fasilitas pengolahan lindi yang terdiri atas rangkaian kolam anaerobik, kolam fakultatif, dan kolam maturasi. Namun, dengan kapasitas dan sistem pengolahan eksisting, proses pengolahan lindi belum berjalan secara optimal, khususnya pada musim hujan, ketika debit air lindi yang berasal dari zona penimbunan mencapai puncaknya dan melampaui kapasitas kolam pengolah. Selain itu, karakteristik lindi yang telah berumur tua dengan rasio BOD/COD yang rendah menyebabkan efisiensi proses pengolahan biologis menurun. Apabila pencemaran akibat lindi tidak segera ditangani, dikhawatirkan akan menimbulkan keresahan di kalangan masyarakat sekitar TPA dan berpotensi berdampak negatif terhadap kesehatan mereka.

Dalam mengakomodasi rencana ini, maka diperlukan studi awal teknis agar IPL dapat menjalankan fungsinya dengan baik. Lebih jauh kapasitasnya mampu menahan beban sampah sepanjang waktu terutama pada waktu-waktu tertentu misal di musim penghujan, karena pada masa tersebut sampah yang ada terakumulasi dengan massa air limpasan. Melalui studi ini, akan diidentifikasi berbagai opsi teknologi dan pendekatan teknis yang paling sesuai untuk diterapkan pada IPL. Pengelolaan sampah tidak akan menimbulkan dampak pencemaran terhadap lingkungan apabila didukung oleh teknologi yang tepat, baik dalam aspek pengelolaan di TPA maupun pengolahan limbah cair berupa lindi. Oleh karena itu, penyusunan studi awal IPL di TPA Galuga, Kota Bogor, menjadi langkah penting dalam mendukung pengelolaan sampah yang berkelanjutan dan ramah lingkungan

## **2. Metode Penelitian**

### **2.1. Lokasi Kegiatan**

Penelitian ini berlokasi di TPA Galuga Kota Bogor tepatnya di wilayah Desa Galuga, Kecamatan Cibungbulang, Kabupaten Bogor, Provinsi Jawa Barat dengan koordinat pusat 06°33'54,06 LS dan 106°38'41,88 BT. Lahan yang dimiliki TPA Galuga berdasarkan Surat Perizinan Tata Ruang TPA Galuga No. 591.3/5205-PR Dinas Tata Ruang dan Pertanahan Pemerintah Kota Bogor adalah seluas 377.000 m<sup>2</sup> atau 37,7 Ha. Dengan luas lahan untuk sarana pendukung sebesar 16.000 m<sup>2</sup> atau sebesar 1,6 Ha (4,2%), untuk lahan penimbunan sampah seluas 120.000 m<sup>2</sup> atau 12 Ha (31,8%) dan sisanya seluas 241.000 m<sup>2</sup> atau seluas 24,1 Ha (64,9%) dimanfaatkan sebagai lahan penghijauan atau ruang terbuka hijau (RTH).

### **2.2. Pengumpulan Data**

#### *Data Primer*

Data primer didapatkan dengan cara: (1) wawancara; yang dilakukan dengan staff Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Bogor untuk memperoleh informasi, antara lain terkait jenis tanah yang digunakan sebagai penutup sampah; (2) survei lapangan, yang dilakukan melalui observasi langsung di lokasi penelitian guna mengidentifikasi kondisi eksisting IPL di TPA Galuga serta melakukan pengukuran kuantitas air lindi pada tiga saluran; dan (3) dokumentasi, yaitu teknik pengumpulan informasi melalui pengolahan dan pencatatan data dalam bentuk foto, video, dan media lainnya sebagai bagian dari rekam jejak kegiatan penelitian [4].

#### *Data Sekunder*

Sementara itu, data sekunder didapatkan dengan cara: (1) pengumpulan data dari instansi terkait, seperti data kualitas air lindi dan data curah hujan; dan (2) studi literatur, yaitu metode pengumpulan informasi dari berbagai sumber tertulis seperti buku, jurnal ilmiah serta referensi lain yang relevan dengan topik pengoptimalan TPA [5]. Studi literatur ini bertujuan untuk memperoleh pemahaman mengenai karakteristik dan kuantitas air lindi, kondisi umum IPL di Indonesia, serta teknologi pengolahan lindi yang sedang diterapkan saat ini.

### **2.3. Analisis Data**

Penelitian ini menggunakan teknik analisis data secara deskriptif, baik secara kualitatif maupun kuantitatif. Langkah analisis yang dilakukan yaitu sebagai berikut:

#### *Identifikasi Kondisi Eksisting IPL*

Identifikasi dilakukan untuk menilai kinerja masing-masing unit operasi dan unit proses [6]. Setelah data terkumpul, hasilnya akan dibandingkan dengan kriteria desain berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 03 Tahun 2013 tentang Penyelenggaraan Prasarana dan Sarana Persampahan

dalam Penanganan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga. Perbandingan ini dilakukan sebagai dasar evaluasi untuk mengetahui tingkat kinerja tiap unit secara menyeluruh.

### Identifikasi Kuantitas Air Lindi

Idealnya dilakukan pengukuran lindi secara periodik pada saat pengoperasian IPL sehingga didapatkan angka timbulan lindi yang nyata di TPA Galuga. Adanya keterbatasan data sehingga pengukuran hanya dilakukan pada bulan Februari dan Mei 2024. Tidak hanya itu, agar dapat tergambar debit air lindi saat ini dengan debit rencana, maka dilakukan perhitungan secara teoritis dengan berbagai metode seperti [7]:

#### a) Metode Thornwaite

Metode Thornthwaite secara luas digunakan untuk memperkirakan potensi evapotranspirasi. Pendekatan ini didasarkan pada asumsi bahwa lindi terbentuk semata-mata dari air hujan yang meresap ke dalam timbunan sampah.

$$\text{PERC} = P - (\text{RO}) - (\text{AE}) - (\Delta\text{ST}) \quad (1)$$

$$I = P - (\text{RO}) \quad (2)$$

$$\text{APWL} = \sum \text{NEG} (I - \text{PE}) \quad (3)$$

Keterangan :

PERC = Perkolasi

P = Presipitasi

RO = Runoff

AE = Evaporasi

ST = Soil Moisture Storage

$\Delta\text{ST}$  = Perubahan simpanan air dalam tanah dari waktu ke waktu

I = Infiltrasi

PE = Evaporasi Potensial

APWL = Accumulated Potential Water Loss

#### b) Metode Swiss

Metode ini bekerja dengan memperkirakan debit lindi berdasarkan curah hujan dan densitas sampah hasil kompaksi. Metode ini digunakan pada negara seperti Brazil dan Australia dengan persamaan sebagai berikut:

$$Q = (P \times A \times K) / t \quad (4)$$

Keterangan

Q = Debit lindi (m<sup>3</sup>/s)

P = Presipitasi atau curah hujan rata-rata tahunan (m/s)

A = Luas TPA aktif (m<sup>2</sup>)

K = Koefisien kompaksi

t = Waktu dalam setahun (s)

#### c) Metode Empiris

Pendekatan empiris dilakukan dengan menghitung debit lindi berdasarkan umur TPA dan curah hujan yang terjadi di daerah tersebut. Acuan ini dilakukan berdasarkan hasil perhitungan debit lindi di Jerman Utara.

**Tabel 1.** Pendekatan Empiris Debit Lindi

| Umur TPA | Debit Lindi | Catatan   |
|----------|-------------|---|
| Muda     | <10%P       | -   |
| Sedang   | 12-22%P     | Rata-rata = 17%P  |
| Tua      | >25P        | Debit lindi berkurang seiring terjadinya degradasi biologis |

Metode empiris merupakan TPA Galuga telah beroperasi selama >25 Tahun, sehingga tergolong TPA tua. Sehingga, nilai Q lindi teoritisnya >25% [8]. Diperkirakan sebesar 40% dari nilai presipitasi di Kabupaten Bogor.

d) Metode Regresi

Regresi linier merupakan metode prediksi menggunakan garis lurus untuk merepresentasikan hubungan antara dua atau lebih variabel [9]. Dalam penelitian ini, pendekatan regresi linier digunakan dengan memplotkan data luas TPA terhadap debit lindi yang dihasilkan, berdasarkan hasil-hasil studi sebelumnya. Sebanyak lima penelitian yang membahas IPL dan timbulan lindi dikompilasi, kemudian data tersebut divisualisasikan dalam bentuk grafik dan dianalisis melalui regresi linier.

*Identifikasi Kualitas Air Lindi*

Parameter yang dianalisis mencakup pH, BOD, COD, TSS, Nitrogen Total, Amoniak dan Total Coliform. Pengujian kualitas lindi dilakukan oleh DLH Kota Bogor pada dua waktu yang berbeda, yaitu pada titik inlet pada 30 November 2022 dan titik outlet pada 17 Oktober 2023. Hasil pengujian tersebut kemudian dianalisis dengan mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 59 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Lindi bagi usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir.

*Penentuan Derajat Pengolahan*

Penentuan derajat pengolahan dilakukan dengan menganalisis GAP pada kualitas air lindi. Hasil GAP analisis dilakukan untuk mengidentifikasi antara kualitas lindi dengan efluen standar apakah sudah mencapai efluen yang ideal untuk dibuang ke lingkungan [10]. Sehingga apabila hasil kualitas lindi tersebut belum memenuhi baku mutu dapat ditentukan pengolahan alternatif terbaik. Pemilihan metode pengolahan lindi pada umumnya didasarkan pada karakteristik bahan organik pada lindi secara umum dinyatakan sebagai rasio BOD/COD. Rasio BOD/COD yang berada dalam kisaran 0,2-0,5 termasuk dalam kategori biodegradable, sehingga masih memungkinkan untuk diolah menggunakan proses biologis [11]. Pernyataan serupa juga disampaikan oleh (Fresenius dkk., 1989), yang menyatakan bahwa rasio BOD/COD dalam rentang tersebut dapat diproses secara biologis, meskipun laju dekomposisinya cenderung lebih lambat karena mikroorganisme pengurai memerlukan waktu untuk beradaptasi dengan karakteristik limbah [12].

*Pemilihan Alternatif Pengolahan*

Dari alternatif sistem pengolahan yang dianalisis, akan dipilih satu alternatif terbaik yang direncanakan untuk diterapkan sebagai IPL di TPA Galuga, Kota Bogor. Pemilihan ini didasarkan pada sejumlah kriteria pertimbangan, antara lain beban pengolahan, efisiensi proses, kelayakan teknis, aspek ekonomi, serta dampak lingkungan. Berdasarkan analisis tersebut, dapat ditentukan alternatif yang paling optimal untuk diimplementasikan dalam perencanaan IPL di lokasi tersebut.

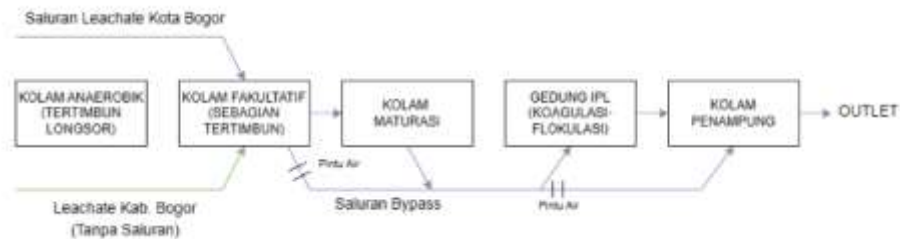
### 3. Hasil dan Pembahasan

*Kondisi Eksisting*

Skema penyaluran lindi menuju Instalasi Pengolahan Lindi (IPL) ditampilkan pada **Gambar 1**. Lokasi IPL berada pada koordinat 6°33'46.03" LS dan 106°38'39.44" BT. Pada awalnya, IPL di TPA Galuga terdiri atas empat unit kolam pengolahan dan satu unit flokulasi-sedimentasi. Namun, saat ini hanya tersisa dua kolam aktif dan satu unit flokulasi-sedimentasi. Dua kolam lainnya telah tertimbun akibat longsoran timbulan sampah dan tidak lagi dapat difungsikan. Lindi dialirkan menuju salah satu kolam yang sebagian wilayahnya juga telah tertutup material longsoran. Di kolam ini, lindi dari wilayah Kota Bogor bercampur dengan lindi dari Kabupaten Bogor. Lindi dari Kabupaten Bogor mengalir secara gravitasi tanpa melalui saluran khusus, mengikuti kontur topografi yang lebih rendah hingga mencapai kolam maturasi.



**Gambar 1.** Skema Melalui Citra Satelit Pengolahan Lindi TPA Galuga



**Gambar 2.** Skema Pengolahan Lindi TPA Galuga

Berikut ini penjelasan unit-unit yang masih difungsikan saat ini:

a. Kolam Maturasi

Berdasarkan skema pada **Gambar 2**, sebagian dari kolam fakultatif sudah tertimbun longsoran timbulan sampah. Kolam maturasi ini difungsikan sebagai kolam aerasi yang masuk ke IPL sebelum diproses ke unit flokulasi-sedimentasi. Pencampuran pada kolam ini dilakukan dengan penambahan aerasi, yaitu sebanyak 2 aerator untuk mencegah terbentuknya padatan tersuspensi pada dasar bak. Proses ini berpotensi meningkatkan kadar DO serta menurunkan BOD. Meskipun secara prinsip kolam aerasi merupakan bagian dari sistem lumpur aktif, sistem ini tidak dilengkapi dengan mekanisme resirkulasi lumpur.



**Gambar 3.** Kolam Maturasi yang Difungsikan Sebagai Kolam Aerasi

Pada musim hujan, sering kali kolam ini tidak dapat memenuhi kapasitasnya. Sehingga ketika terjadi kelebihan debit lindi yang masuk, maka akan dialirkan ke kolam penampung melalui saluran bypass tanpa melewati proses flokulasi-sedimentasi terlebih dahulu. Saluran bypass ini dapat ditutup sehingga aliran lindi dikembalikan ke unit flokulasi-sedimentasi.

b. Gedung IPL

Pada Gedung IPL berfungsi untuk menerima lindi hasil pengolahan kolam maturasi dan kelebihan debit lindi dari kolam fakultatif. Namun, unit ini hanya bekerja apabila pintu air ke-2 ditutup, sehingga saluran bypass akan mengalirkan lindi ke IPL. Gedung ini berfungsi sebagai unit koagulasi-flokulasi bagi air lindi. Koagulan yang digunakan pada unit ini adalah *Poly Aluminium Chloride* (PAC). Pada saat survey lapangan, unit ini sedang tidak menerima aliran lindi dari saluran manapun dikarenakan masih digunakan untuk mengolah air lindi yang datang sebelumnya. Hasil pengolahan ini akan dialirkan ke kolam penampungan, dimana terjadi pencampuran antara lindi tanpa pengolahan dan setelah pengolahan.



**Gambar 4.** Gedung IPL (a) Bak Koagulasi dan (b) Flokulasi

c. Kolam Penampungan

Kolam penampungan dibuat setelah kolam anaerobik dan fakultatif tertimbun longsor. Saat ini, kolam penampungan tidak memiliki fungsi yang pasti. Kolam ini menjadi muara limpasan air berlebih dari kolam fakultatif; dan hasil pengolahan kolam maturasi dan unit koagulasi-flokulasi. Hasil dari kolam ini akan disalurkan ke outlet IPL menuju badan air sejauh  $\pm 5$  km.



**Gambar 5.** Kolam Penampungan

*Identifikasi Longsoran pada Kawasan IPL*

Longsoran pada tumpukan sampah di TPA Galuga telah mengakibatkan tertimbunnya dua buah unit pengolahan lindi seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 7**. Kolam anaerobik telah tertimbun sepenuhnya, sedangkan kolam fakultatif tertimbun sebagian, sehingga keduanya tidak dapat digunakan. Berkurangnya dua unit pengolahan ini telah mengakibatkan kurang optimalnya pengolahan lindi di IPL TPA Galuga.

Secara umum, longsoran timbunan sampah dapat terjadi akibat kurang baiknya pengendalian risiko dan praktik rekayasa geoteknik yang dilakukan. Kasus longsoran TPA Dona Juana di Bogota tahun 1997 secara spesifik disebabkan oleh ketidakstabilan lahan akibat meningkatnya tekanan pori di antara tumpukan sampah [13]. Tekanan pori ini disebabkan oleh beberapa hal: berkurangnya kapasitas pengumpulan lindi, percepatan penumpukan sampah, dan tertutupnya jalur keluarnya gas oleh lindi [14]. Penelitian mengenai kerawanan longsor pada TPA memerlukan analisis dinamis yang menyelidiki terkait stabilitas dan kondisi batas-batas lahan.



**Gambar 6.** Kolam Fakultatif yang Tertimbun Sampah

### Identifikasi Kuantitas Lindi

Pengukuran dilakukan di tiga saluran, saluran 1 merupakan saluran yang membawa air lindi dari timbunan sampah Kota Bogor, saluran 2 membawa air lindi dan air lainnya dari timbunan sampah Kabupaten Bogor, dan saluran 3 merupakan gabungan dari saluran 1 dan 2. **Gambar 1** menunjukkan gambaran dari lokasi sampling air lindi. Hasil pengukuran debit air lindi ditunjukkan pada **Tabel 2**.

**Tabel 2.** Pengukuran Debit Air Lindi Eksisting

| Lokasi    | Debit Air Lindi (L/detik) |    |
|-----------|---------------------------|----|
|           | I                         | II |
| Saluran 1 | 12                        | 21 |
| Saluran 2 | -                         | 70 |
| Saluran 3 | 51                        | 50 |

Selain perhitungan debit langsung, dihitung juga kuantitas lindi dengan beberapa metode: 1) Metode Swiss; 2) Metode Heyer; 3) Metode Thornwaite; dan 4) Pendekatan Regresi Linier. Debit lindi teoritis dari TPA Galuga dihitung berdasarkan data curah hujan rata-rata selama 10 tahun terakhir di Kabupaten Bogor. Ini disebabkan karena TPA Galuga berlokasi di Kabupaten Bogor. Sementara itu, debit lindi teoritis dari TPA Kabupaten Bogor dihitung menggunakan pendekatan faktor pengali (fp) yang dicari berdasarkan perbandingan luas TPA aktif Kota Bogor dan Kabupaten Bogor. Luas TPA aktif ini dicari menggunakan digitasi melalui Google Earth. Debit lindi teoritis Kabupaten Bogor merupakan hasil perkalian antara debit lindi teoritis Kota Bogor dengan fp sebesar 1,23. Hasil digitasi luas TPA Aktif melalui Google Earth disajikan dalam **Gambar 7** dan **Tabel 3**.



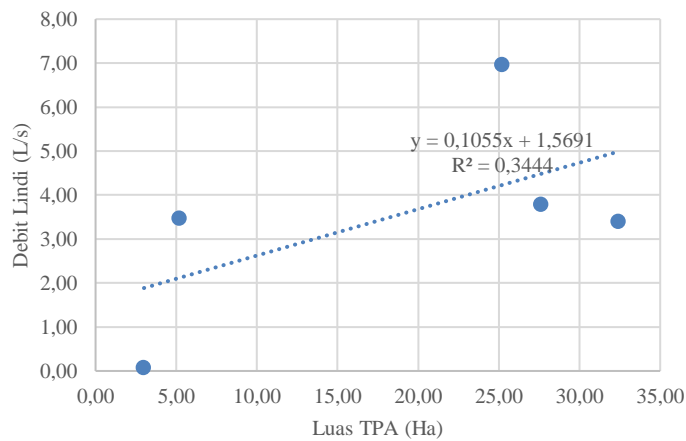
**Gambar 7.** Digitasi Luas TPA Aktif Wilayah Kota Bogor dan Kab. Bogor

**Tabel 3.** Inventarisasi Data Perhitungan Debit Teoritis

| Data                      | Nilai      | Satuan         |
|---------------------------|------------|----------------|
| Presipitasi (P)           | 3.669,9    | mm/tahun       |
| Luas TPA Aktif Kota Bogor | 19.700     | m <sup>2</sup> |
| Luas TPA Aktif Kab. Bogor | 24.252     | m <sup>2</sup> |
| Koefisien kompaksi        | 0,5        | -              |
| t                         | 31.536.000 | detik          |

| Data                             |       | Nilai  | Satuan   |
|----------------------------------|-------|--------|----------|
| PERC Maks.                       |       | 168,35 | mm/bulan |
| TPA Sarimukti-Bandung [5]        | Luas  | 25,2   | Hektar   |
|                                  | Debit | 6,97   | L/detik  |
| TPA Jatibarang-Semarang [15]     | Luas  | 27,61  | Hektar   |
|                                  | Debit | 3,78   | L/detik  |
| Luas TPA Supit Urang-Malang [16] | Luas  | 5,2    | Hektar   |
|                                  | Debit | 3,47   | L/detik  |
| Luas TPA Cilacap-Cilacap [17]    | Luas  | 3      | Hektar   |
|                                  | Debit | 0,07   | L/detik  |
| Luas TPA Suwung-Denpasar [18]    | Luas  | 32,4   | Hektar   |
|                                  | Debit | 3,4    | L/detik  |

Dari data sekunder dan primer yang didapatkan kemudian dilakukan perhitungan dengan menggunakan 4 metode (Swiss, Heyer, Thornwaite, dan regresi linier). Pada metode regresi linier didapatkan dari plotting pada **Gambar 8**. Hasil perbandingan pengukuran debit teoritis dengan 4 metode dan pengukuran langsung ditunjukkan pada **Tabel 4**.



**Gambar 8.** Hasil Plot Luas TPA terhadap Timbulan Lindi

**Tabel 4.** Perbandingan Hasil Pengukuran dan Tiga Metode Perhitungan Debit Lindi

| Metode     | Debit Air Lindi (L/s)<br>di Saluran |       |       |
|------------|-------------------------------------|-------|-------|
|            | 1                                   | 2     | 3     |
| Eksisting  |                                     |       |       |
| Kemarau    | 12                                  | -     | 51    |
| Penghujan  | 21                                  | 70    | 50    |
| Teoritis   |                                     |       |       |
| Swiss      | 1,146                               | 1,411 | 2,557 |
| Heyer      | 0,917                               | 1,129 | 2,046 |
| Thornwaite | 1,46                                | 2,19  | 2,855 |
| Regresi    | 3,61                                | 3,85  | 7,46  |

Secara umum, hasil perhitungan empat metode lebih kecil daripada hasil pengukuran langsung (eksisting). Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa hal:

- Perhitungan empat metode tidak mempertimbangkan pengaruh dari mata air di sekitar TPA Galuga.
- Debit lindi yang masuk ke saluran lindi bukan hanya berasal dari area TPA Aktif saja, melainkan lembah di sekitar TPA yang memiliki topografi menurun ke arah IPL. Kondisi ini tidak diperhitungkan pada perhitungan ketiga metode.
- Adanya kemungkinan masukan air limbah domestik akibat adanya saluran yang membawa air lindi Kabupaten Bogor mengalir ke IPL.
- Perhitungan ketiga metode menggunakan data curah hujan rata-rata.
- Sementara itu, pengukuran langsung di saluran lindi dilakukan pada musim hujan.

- f. Data jenis tanah yang belum spesifik dan masih berupa asumsi dan nilai koefisien kompaksi yang tidak diketahui secara pasti menyebabkan bisa terjadi bias perhitungan pada Metode Swiss dan Heyer.

Berdasarkan analisis tersebut, pendekatan lain untuk memperkirakan debit lindi yang masuk pada IPL TPA Galuga. Hal ini dapat dilakukan dengan melihat secara langsung kelebihan limpasan yang terjadi pada musim hujan di saluran lindi, kemudian memperkirakan faktor kelebihanannya. Faktor ini dikalikan dengan debit eksisting yang telah diukur sebelumnya.

#### *Identifikasi Karakteristik Lindi pada IPL*

Baku mutu untuk efluen dari pengolahan IPL yang digunakan adalah Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 59 tahun 2016 tentang Baku Mutu Lindi bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPAS). Tabel 5 merupakan hasil pengujian kualitas lindi inlet dan outlet di IPL TPA Galuga.

**Tabel 5.** Kualitas Lindi IPL TPA Galuga

| Parameter      | Satuan         | Baku mutu | Inlet | Outlet |
|----------------|----------------|-----------|-------|--------|
| pH             | -              | 6-9       | 8,3   | 8      |
| BOD            | mg/l           | 150       | 82    | 215*   |
| COD            | mg/l           | 300       | 817*  | 721*   |
| TSS            | mg/l           | 100       | 92    | 94     |
| N total        | mg/l           | 60        | 217*  | -      |
| Amoniak        | mg/l           | 10        | 197*  | 26*    |
| Total Coliform | Jumlah/ 100 ml | 3.000     | 2800  | 130    |

Keterangan :

\* Tidak memenuhi baku mutu

- Tidak dilakukan pengujian

Efektivitas IPL dalam menyisihkan zat-zat pencemar dapat dilihat pada kualitas efluen lindi [10]. Berdasarkan pengujian pada influen-efluen nilai BOD meningkat dari 82 mg/L ke 215 mg/L. faktor yang dapat mempengaruhi kualitas tersebut karena adanya perbedaan waktu sampling yang dilakukan. Sampling efluen dilakukan pada Desember 2023 (berbeda >1 tahun). Sampah pada TPA sudah meningkat selama lebih dari 1 tahun, sehingga nilai organik yang terlarut dalam air hujan yang terinfiltrasi pun meningkat. Sementara itu, konsentrasi COD turun sebesar 12%. Penurunan ini dapat disebabkan oleh pengolahan aerasi yang dioperasikan pada kolam maturasi, sehingga konsentrasinya menurun. Meskipun begitu, nilainya masih tidak memenuhi baku mutu yang ditentukan PermenLHK 59/2016.

Masih banyaknya parameter yang tidak memenuhi baku mutu menandakan kurang efektifnya pengolahan lindi di TPA Galuga saat ini. Penyisihan komponen nonbiodegradable yang tidak signifikan ini dapat disebabkan oleh sistem pengolahan yang masih menggunakan sistem kolam yang kurang cocok bagi pengolahan lindi pada TPA tua [7]. TPA yang lebih tua cenderung memiliki komponen nonbiodegradable yang lebih tinggi (BOD/COD lebih rendah), sehingga memerlukan sistem pengolahan yang lebih advanced untuk menyisihkannya. Selain itu, tertimbunnya kolam anaerobik dan fakultatif di IPL TPA Galuga juga menjadi kontribusi kurang efektifnya pengolahan lindi di IPL tersebut.

#### *Penentuan Derajat Pengolahan*

Hasil kualitas effluent dari pengolahan IPL menunjukkan bahwa pengolahan yang ada masih belum optimal. Dari hasil survey lapangan, kolam anaerob dan fakultatif sudah tidak bisa difungsikan dengan normal akibat longsor timbunan sampah. Hal ini menyebabkan karakteristik air lindi yang masuk ke pengolahan berfluktuatif yang ditunjukkan pada Tabel 4. Perbandingan BOD/COD pada karakteristik lindi di TPA Galuga berada pada range 0,1-0,3 yang menunjukkan bahwa limbah di TPA Galuga diklasifikasi pada limbah menengah yang mana untuk TPA yang berumur 5-10 tahun [7]. Dari hasil karakteristik lindi kandungan komponen organik dan konsentrasi asam sulfat yang dihasilkan rendah. Rasio BOD/COD dalam kisaran 0,2-0,5 masih memungkinkan untuk diolah secara biologis, meskipun laju dekomposisinya

cenderung lebih lambat karena mikroorganisme pengurai memerlukan waktu adaptasi terhadap karakteristik limbah tersebut. Di sisi lain, untuk mengatasi nilai BOD/COD yang terus menurun seiring bertambahnya usia TPA, sangat disarankan untuk menggunakan gabungan proses kimiawi dan biologis [19].

#### *Identifikasi Alternatif Pengolahan*

Sebagian besar IPL di Indonesia belum beroperasi sesuai dengan standar teknis yang ditetapkan. Rendahnya kinerja IPL di TPA disebabkan oleh berbagai faktor, antara lain: keterbatasan anggaran untuk operasional dan pemeliharaan, kurangnya tenaga kerja yang kompeten dalam pengelolaan IPL, lemahnya sistem pengendalian dan pemantauan operasional, serta minimnya perhatian dari para pengambil kebijakan terhadap keberlanjutan pengelolaan TPA [20], [21].

Dalam menentukan sistem pengolahan yang paling ekonomis dan efisien berdasarkan karakteristik air lindi, baik kualitas maupun kuantitasnya serta kondisi lokasi perencanaan, dilakukan pemilihan beberapa alternatif yang diperkirakan akan dapat memenuhi tujuan pengolahan yaitu meminimalisasi terjadinya penurunan kualitas lingkungan (badan air penerima) akibat adanya kontaminasi fisik, kimia maupun biologi secara efektif dan efisien. Aspek-aspek yang menjadi dasar pertimbangan yaitu; beban pengolahan, efisiensi pengolahan, aspek teknis, aspek ekonomi, dan aspek lingkungan.

Berdasarkan hasil pertimbangan 5 aspek sebelumnya, maka ditetapkan unit proses yang akan direncanakan adalah sebagai berikut :

##### 1. Bar Screen

Bar screen akan menyisihkan padatan kasar yang mungkin masuk ke dalam sistem pengolahan air lindi karena dapat mengganggu proses pengolahan serta merusak peralatan yang digunakan. Bar Screen berupa kisi – kisi yang terbuat dari batangan besi atau baja yang dipasang sejajar dan membentuk suatu kerangka yang kuat.

##### 2. Sumur Pengumpul

Sumur pengumpul merupakan bangunan yang menerima air lindi dari saluran/pipa Kota Bogor dan Kabupaten Bogor yang kemudian menyalurkannya ke unit Tangki Aliran Rata-rata (TAR). Pengaliran diutamakan menggunakan sistem gravitasi agar tidak sulit dalam pengoperasiannya, yaitu dengan gate valve atau dengan pintu air. Jika tidak memungkinkan maka diperlukan pompa submersible dalam pengoperasiannya, untuk mengangkat air lindi ke unit TAR. Selain itu dengan adanya bak inlet yang sebelumnya dipasang bar screen dapat berfungsi untuk menampung dan menyaring kotoran-kotoran besar yang dibawa oleh air lindi sebelum di proses.

##### 3. Bak Ekualisasi/Tangki Aliran Rata-Rata

TAR digunakan sebagai pengatur konsentrasi, debit, sekaligus penampung sementara lindi yang masuk sebelum dialirkan ke unit-unit selanjutnya. Kapasitas desain TAR yang digunakan perlu diperbesar dari debit eksisting yang telah diukur karena digunakan juga sebagai penampung terlebih dahulu sebelum masuk ke unit selanjutnya. Selain itu, kolam maturasi yang telah ada sebelumnya, digunakan sebagai TAR tambahan (kapasitas  $\pm 47$  L/s).

##### 4. Bak Koagulasi-Flokulasi

Proses kimiawi ditempatkan pada pre-treatment sebelum masuk ke proses biologi untuk meningkatkan rasio BOD/COD agar proses biologi dapat lebih efektif dilakukan [22], [23]. Koagulasi-flokulasi di desain dengan kapasitas 30 L/detik. Sistem yang digunakan merupakan sistem hidrolis, dimana pencampuran koagulan dan proses pembentukan flok memanfaatkan terjunan air. Bak koagulasi berbentuk persegi, sementara flokulasi berbentuk persegi panjang. Kompartemen untuk flokulasi didesain sebanyak 5 kompartemen.

##### 5. Sedimentasi I

Unit sedimentasi 1 digunakan sebagai pengendap flok yang telah terbuat di unit sebelumnya (flokulasi). Kapasitas yang digunakan yaitu sebesar 30 L/s dan menggunakan sistem plate settler.

##### 6. Anaerobic Baffled Reactor (ABR)

ABR didesain dengan kapasitas 30 L/s, menggunakan 3 kompartemen. Aliran dalam kompartemen didesain sebagai aliran downflow dan upflow. Dengan menggunakan ABR sistem pengolahan tidak memakan lahan yang begitu luas.

### 7. *Aerated Lagoon*

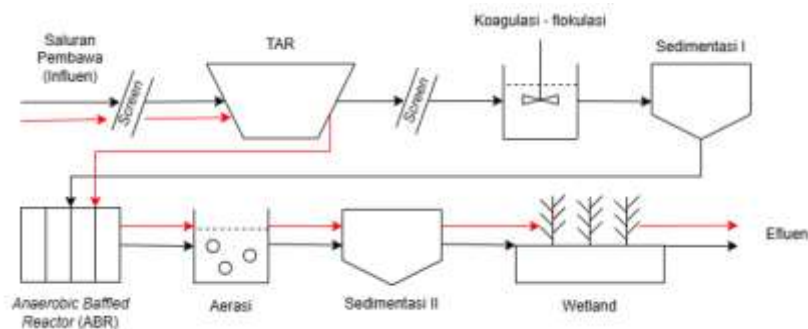
Unit aerasi digunakan sebagai terusan dari unit ABR. Aerasi berupa kolam yang diberikan aerator sebagai penyuplai oksigen ke dalam lindi. Kapasitas unit aerasi yang digunakan merupakan 30 L/s dengan waktu retensi 2 hari. Kolam penampung sementara yang ada di eksisting akan digunakan sebagai kolam aerasi, namun kapasitasnya yang belum memenuhi perencanaan yaitu baru 11,6 L/s sehingga memerlukan unit tambahan.

### 8. Sedimentasi II

Kombinasi ABR dan aerasi menghasilkan lumpur yang perlu diendapkan. Unit pengendap (sedimentasi) didesain menggunakan sistem plate settler.

### 9. *Constructed Wetland*

Unit wetland berfungsi sebagai sistem pengolahan yang memanfaatkan kemampuan tanaman air dalam menyerap bahan organik dan logam berat melalui mekanisme absorpsi. Kandungan logam dalam air lindi perlu dikurangi agar kualitas efluen memenuhi baku mutu yang ditetapkan. Salah satu alternatif yang dapat digunakan untuk proses penyisihan logam tersebut adalah kolam wetland. Proses ini berlangsung melalui penyerapan logam oleh akar tanaman air. Jenis tanaman yang digunakan dalam perencanaan ini meliputi Common red, *Typha angustifolia*, dan *Cyperus papyrus* [24]. Wetland didesain sebagai unit terakhir sekaligus penambah estetika dari unit pengolahan.



**Gambar 9.** Skematik Alternatif Pengolahan

Skematik alternatif pengolahan lindi ditunjukkan pada **Gambar 9**. Dapat dilihat juga sebelum dan setelah masuk pada pengolahan bak ekualisasi, perlu adanya bar screen untuk mencegah masuknya sampah kedalam IPL. Unit-unit eksisting yang sudah ada sebelumnya dan masih dapat digunakan seperti kolam maturasi, koagulasi-flokulasi, dan kolam penampung akan dimaksimalkan dengan digunakannya kembali atau perlu adanya rekonstruksi dan/atau penambahan unit.

#### **Skenario 1**

Pada skenario pertama merupakan pengolahan ideal dan optimal dalam proses penyisihan beban pencemar pada air lindi. Pada praktiknya, masih sering dijumpai kegagalan dalam penerapan IPL di Indonesia, khususnya pada TPA yang telah beroperasi dalam jangka waktu lama dan menggunakan sistem kolam. Oleh karena itu, dalam skenario pertama ini diterapkan tahap pretreatment melalui penambahan unit koagulasi-flokulasi sebelum lindi dialirkan ke unit pengolahan anaerob dan aerob. Susunan pengolahan yang optimal yaitu sebagai berikut; TAR - Koagulasi-Flokulasi - Sedimentasi 1 - ABR - Kolam Aerasi - Sedimentasi 2 - Constructed Wetland. Lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 9 dengan panah hitam.

#### **Skenario 2**

Pada skenario 2, digunakan ketika terjadi lonjakan beban lindi yang masuk hingga TAR tidak mampu menampung lagi. Maka susunan pengolahan yang dapat digunakan sebagai berikut; TAR - ABR - Kolam Aerasi - Sedimentasi - Constructed Wetland. Lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 10 dengan panah merah. Pada proses ini unit pretreatment (koagulasi-flokulasi) tidak dilakukan sehingga proses dari TAR langsung menuju ke proses anaerob dengan unit ABR. Proses ini masih memungkinkan dengan pengkondisian mikroorganisme pada proses anaerob dan aerob. Gambar 10 merupakan layout IPL TPA Galuga setelah dilakukan Optimalisasi.



Gambar 10. Layout IPL TPA Galuga di overlay dengan Google Earth

#### 4. Kesimpulan

Instalasi pengolahan lindi di TPA Galuga secara umum memiliki masalah pada kapasitas dan efisiensi pengolahan unit yang kurang optimal. Saluran lindi dengan sistem terbuka membuat kontribusi hujan begitu besar pada besarnya kuantitas lindi. Di sisi lain, kapasitas unit pengolahan eksisting yang kurang memadai menyebabkan tidak terolahnya sebagian besar lindi yang masuk ke IPL. Dilihat dari karakteristiknya, lindi yang dihasilkan dari TPA Galuga memiliki nilai BOD/COD <0,1, sehingga memerlukan pretreatment sebelum dapat diolah di unit pengolahan biologis seperti kolam. Alternatif pengolahan yang disarankan untuk mengoptimasi IPL TPA Galuga adalah dengan urutan berikut: 1. TAR; 2. Koagulasi; 3. Flokulasi; 4. Sedimentasi 1; 5. ABR; 6. Aerasi; 7. Sedimentasi 2; 8. Constructed Wetland. Perbaikan utama yang perlu dilakukan adalah mengubah sistem saluran lindi menjadi saluran tertutup guna mengurangi limpasan debit nonlindi. Selain itu, unit pengolahan yang perlu dibangun pertama kali untuk menyamaratakan debit dan kualitas lindi adalah unit TAR. Dalam jangka panjang, debit yang besar dapat diatasi dengan melewati pengolahan koagulasi-flokulasi.

#### 5. Ucapan Terima Kasih

Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada Dinas Lingkungan Hidup Kota Bogor yang telah melakukan kegiatan optimalisasi IPL TPA Galuga Tahun 2024.

#### 6. Referensi

- [1] BPS, *Kota Bogor Dalam Angka 2024*. Badan Pusat Statistik Kota Bogor, 2024.
- [2] L. Z. Rizqia and A. Slamet, 'Perencanaan Revitalisasi Instalasi Pengolahan Air Lindi (IPL) TPA Gunung Panggung, Kabupaten Tuban', *JTITS*, vol. 10, no. 2, pp. C86–C91, Dec. 2021, doi: 10.12962/j23373539.v10i2.65273.
- [3] F. Moradian, B. Ramavandi, N. Jaafarzadeh, and E. Kouhgardi, 'Effective treatment of high-salinity landfill leachate using ultraviolet/ultrasonication/peroxy monosulfate system', *Waste management*, vol. 118, pp. 591–599, 2020.
- [4] D. Suardi, M. Fuad Aziz, and M. Idris Taking, 'Studi Pengoptimalan Tempat Pembuangan Akhir Balang, Kabupaten Takalar', *JUPS*, vol. 4, no. 2, pp. 094–109, Mar. 2024, doi: 10.35965/jups.v4i2.465.
- [5] P. Safria and A. Perdana, 'Evaluasi dan Optimalisasi Instalasi Pengolahan Lindi di TPK Sarimukti', *Reka Lingkungan*, vol. 10, no. 1, pp. 11–22, Jun. 2021, doi: 10.26760/rekalingkungan.v10i1.11-22.
- [6] S. Al, Q. Haumahu, H. Riogilang, and I. R. Mangangka, 'Perancangan Instalasi Pengolahan Lindi Dengan Proses Kombinasi Kolam Anaerobik, Fakultatif, dan Maturasi di TPA Sumompo', vol. 19, 2021, doi: 10.35793/jts.v19i79.38393.
- [7] E. Damanhuri, *Diktat Landfilling Limbah, Bagian Tujuh Pengelolaan Leachate (Lindi)*. FTSL ITB, 2012.
- [8] R. Stegmann, '\* Institute of Waste Management, Hamburg University of Technology, Harburger Schloßstr. 36, 21079 Hamburg, Germany \*\* Consultants for Waste Management, Prof. R. Stegmann und Partner, Nartenstraße 4a, D-21079 Hamburg, Germany ° IMAGE, Department of Hydraulic, Maritime, Environmental and Geotechnical Engineering, University of Padua, Via Loredan 20, 35131 Padova, Italy', 2005.
- [9] W. A. L. Sinaga, S. Sumarno, and I. P. Sari, 'The Application of Multiple Linear Regression Method for Population Estimation Gunung Malela District', *JOMLAI: Journal of Machine Learning and Artificial Intelligence*, vol. 1, no. 1, pp. 55–64, Mar. 2022, doi: 10.55123/jomlai.v1i1.143.

- [10] A. P. Pradwi Sukma and W. M. Widiadnyana, 'Aspects influence leachate characteristics on leachate treatment plants in Temesi Landfill Gianyar Regency, Bali Province, Indonesia', *E3S Web Conf.*, vol. 148, p. 05001, 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202014805001.
- [11] G. Samudro and S. Mangkoedihardjo, 'Review On BOD, COD and BOD/COD Ratio: A Triangle Zone For Toxic, Biodegradable And Stable Levels.', *International Journal of Academic Research*, vol. 2, no. 4, 2010.
- [12] A. R. Putri, 'Penentuan Rasio BOD/COD optimal pada reaktor Aerob, Fakultatif dan Anaerob', *Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 2, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2013.
- [13] S. Wahyono, 'Mitigasi Bencana Longsor Sampah, Analisis Penyebab Dan Upaya Pencegahannya', *Jurnal Sains Dan Teknologi Mitigasi Bencana*, vol. 9, no. 2, pp. 6–18, 2014.
- [14] L. Afriani, *Kerawanan Longsor Pada Lereng Tanah Lunak dan Penangannya*. Klaten: Lakeisha, 2020.
- [15] B. Zaman and S. Mangkoedihardjo, 'Potential Treatment System for Ammonia in Leachate, A Case Study for Jatibarang Landfill, Central Java', 2012.
- [16] A. Fadillah and A. Slamet, 'Evaluasi Kinerja Sistem Bioreaktor Membran pada Instalasi Pengolahan Lindi (Studi Kasus: TPA Supit Urang, Kota Malang)', *JTITS*, vol. 12, no. 3, pp. F179–F184, Dec. 2023, doi: 10.12962/j23373539.v12i3.119911.
- [17] R. R. Khairani and H. S. Titah, 'Perencanaan Instalasi Pengolahan Lindi di Tempat Pengolahan Sampah Terpadu Refused Derived Fuel (TPST RDF) Cilacap', *JTITS*, vol. 12, no. 3, pp. D156–D163, Dec. 2023, doi: 10.12962/j23373539.v12i3.121356.
- [18] I. K. H. Setiawan, 'Redesain Tempat Pengolahan Sampah 3R Mertasari, Sidakarya, Denpasar Selatan', *Wastuloka*, vol. 1, no. 1, pp. 23–30, Jun. 2023.
- [19] N. T. Hutomo, 'Analysis of Character Leachate Generation (pH, COD, BOD and TSS) on Various Age From MSW Use Series Landfill Columns', 2012, [Online]. Available: <https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/35358>
- [20] R. S. Manik, 'Evaluasi Unit Instalasi Pengolahan Air Lindi Di TPA Sarimukti', *Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan Institut Teknologi Nasional Bandung 2023*, 2023.
- [21] N. I. Said and D. R. K. Hartaja, 'Pengolahan Air Lindi Dengan Proses Biofilter Anaerob-Aerob dan Denitrifikasi', *JAI*, vol. 8, no. 1, Feb. 2018, doi: 10.29122/jai.v8i1.2380.
- [22] M. Y. Kılıç, K. Kestioglu, and T. Yonar, 'Landfill leachate treatment by the combination of physicochemical methods with adsorption process', 2007.
- [23] L. S. Pedro-Cedillo and J. M. Marrufo-Gomez, 'Landfill Leachate Treatment Evaluacio' N De Los Procesos De Adsorcio' N Y Fenton-Adsorcio' N', vol. 14, no. 3, 2015.
- [24] D. Papiurus, 'Menurunkan Kadar Polutan COD dan TSS Pada Outlet Instalasi Pengolahan Lindi TPA Klotok Kota Kediri Menggunakan Metode Constructed Wetland', *Jurnal Enviro*, 2022.