

TA/TL/2025/2016



JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

**Penerapan *Advanced Oxidation Process* (AOP) dengan
Kombinasi Ozon (O₃) dan Hidrogen Peroksida (H₂O₂) Untuk
Pengolahan Air Lindi dari TPA Piyungan**

Tri Sanjaya

21513047

Dosen Pembimbing:

Ir. Hudori, S.T., M.T., Ph.D.

Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana

Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan

Universitas Islam Indonesia

2025



DEPARTMENT
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

BACHELOR THESIS

Application of Advanced Oxidation Process (AOP) with a Combination of Ozone (O₃) and Hydrogen Peroxide (H₂O₂) for Leachate Treatment from Piyungan Landfill

Tri Sanjaya

21513047

Supervisor:

Ir. Hudori, S.T., M.T., Ph.D.

Environmental Engineering Bachelor Program

Faculty of Civil Engineering and Planning

Universitas Islam Indonesia

2025

LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR

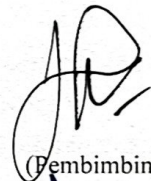
**Penerapan *Advanced Oxidation Process* (AOP) dengan Kombinasi Ozon (O₃)
dan Hidrogen Peroksida (H₂O₂) Untuk Pengolahan Air Lindi dari TPA
Piyungan**

Tugas akhir ini disusun dan diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

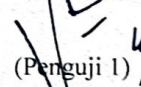
Tri Sanjaya
21513047

Tugas akhir ini telah diuji pada tanggal 08 Agustus 2025 dan disetujui oleh:


Ir. Hudori, S.T., M.T., Ph.D.


(Pembimbing) 16/8/25

Dr. Ir. Andik Yulianto, S.T., M.T., I.P.M.


(Penguji 1) 16/8/25

Ir. Niesa Hanum Mistoro, S.T., M.Eng., I.P.P.


(Penguji 2) 16/09/25

Mengetahui,
Ketua Prodi Teknik Lingkungan Program Sarjana

Any Juliani, S.T., M.Sc.(Res.Eng.), Ph.D.



PERNYATAAN

Saya, penyusun tugas akhir ini, menyatakan bahwa:

1. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik apapun, baik di Universitas Islam Indonesia, maupun di perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini merupakan gagasan, rumusan, dan studi saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan dosen pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama penulis dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Perangkat lunak atau program komputer yang digunakan dalam tugas akhir ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya. Bukan tanggung jawab Universitas Islam Indonesia.
5. Tidak ada penggunaan kecerdasan buatan (*artificial intelligence*, AI) dalam penyusunan karya tugas akhir ini kecuali:
 - a. untuk membantu dalam kadar yang wajar (seperti membantu mengoreksi, mencari ide, dan mencari referensi), dan
 - b. tercantum dan dijelaskan perihal penggunaannya secara eksplisit di dalam karya tugas akhir ini.Implikasi dari penggunaan AI tersebut menjadi tanggung jawab saya sepenuhnya.
6. Pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya. Apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 08 Agustus 2025

Yang membuat pernyataan,



Tri Sanjaya

21513047

PRAKATA

Assalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh

Dengan penuh rasa syukur dan kerendahan hati, penulis panjatkan puji dan syukur ke hadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala, Tuhan Yang Maha Esa, atas limpahan rahmat, karunia, dan petunjuk-Nya. Berkat izin dan pertolongan-Nya, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Penerapan *Advanced Oxidation Process* (AOP) dengan Kombinasi Ozon (O_3) dan Hidrogen Peroksida (H_2O_2) Untuk Pengolahan Air Lindi dari TPA Piyungan” tepat pada waktunya. Tugas akhir ini disusun sebagai bagian dari pemenuhan syarat untuk meraih gelar Sarjana Teknik Lingkungan pada Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Selama proses penyusunan tugas akhir ini, penulis tidak berjalan sendiri. Banyak pihak yang telah memberikan dukungan, arahan, dan semangat. Dengan penuh hormat, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dan berkontribusi dalam penyelesaian karya ini yaitu:

1. Orang tua penulis, Alm. Bapak Jimmi AT dan Ibu Hafsah yang dengan sepuh hati selalu memberi dukungan serta mendoakan penulis dari segala aspek.
2. Bapak Ir. Hudori, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing penulis yang telah memberikan waktu, ilmu, serta masukan yang terbaik selama penulis menyelesaikan tugas akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas bimbingan yang diberikan, semoga ilmu yang diberikan menjadi berkah serta bapak selalu dikelilingi dengan kebaikan.
3. Ibu Any Juliani, S.T., M.Sc. (Res. Eng), Ph.D. selaku Ketua Program Studi Teknik Lingkungan S-1 FTSP UII.

4. Seluruh dosen, staff akademik, dan laboran Program Studi Teknik Lingkungan FTSP UII yang telah memberikan ilmu dan bantuan selama perkuliahan.
5. Pihak DLHK D.I. Yogyakarta yang telah meluangkan waktu dan memberikan izin melakukan penelitian di TPA Piyungan kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir.
6. Nenek, Ko Ben, Ko Pan, Kak Resti, dan Dek Feli yang senantiasa memberikan dukungan dan doa terbaik kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
7. Nafisah Rahma Yumna yang sama-sama berjuang menyelesaikan tugas akhir, selalu memberikan dukungan, doa, bantuan serta memotivasi penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
8. Teman-teman satu bimbingan dan teman-teman “Ketua Bumi” yang berjuang bersama penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
9. Teman-teman Teknik Lingkungan Angkatan 21 yang telah bersama-sama dengan penulis dari awal perkuliahan hingga dititik akhir yaitu menyelesaikan tugas akhir.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan laporan tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna baik dalam penulisan maupun hasil yang disajikan. Penulis sangat terbuka terhadap segala bentuk kritik dan saran yang membangun demi penyempurnaan karya ini di masa mendatang. Harapan besar penulis, semoga tugas akhir ini tidak hanya menjadi syarat akademik semata, tetapi juga dapat memberikan kontribusi positif. Semoga karya sederhana ini dapat memberi manfaat bagi siapapun yang membacanya.

Sleman, 08 Agustus 2025



Tri Sanjaya

Penerapan *Advanced Oxidation Process* (AOP) dengan Kombinasi Ozon (O₃) dan Hidrogen Peroksida (H₂O₂) Untuk Pengolahan Air Lindi di TPA Piyungan

Mahasiswa : Tri Sanjaya
NIM : 21513047
Program Studi : Teknik Lingkungan - Program Sarjana
Pembimbing : Ir. Hudori, S.T., M.T., Ph.D.

Abstrak

Air lindi merupakan limbah cair yang dihasilkan dari proses dekomposisi sampah di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) dan mengandung polutan organik tinggi. Penelitian ini dilakukan di TPA Piyungan dengan tujuan untuk mengetahui efektivitas metode *Advanced Oxidation Process* (AOP) dengan kombinasi ozon (O₃) dan hidrogen peroksida (H₂O₂) dalam menurunkan kadar BOD, COD, dan TSS pada air lindi. Metode yang digunakan yaitu AOP dengan variasi dosis H₂O₂ sebesar 10 ml, 20 ml, 30 ml, dan 40 ml serta waktu ozonisasi selama 20 menit, 40 menit, 60 menit, dan 80 menit. Hasil menunjukkan bahwa penurunan BOD terbaik terjadi pada dosis H₂O₂ 40 ml ozonisasi 40 menit yaitu 57,4 mg/l. Penurunan COD tertinggi pada dosis H₂O₂ 40 ml ozonisasi 60 menit yaitu 627 mg/l. Penurunan TSS terbaik pada dosis H₂O₂ 40 ml ozonisasi 80 menit yaitu 33,50 mg/l. Secara umum, metode AOP cukup efektif dalam mengolah air lindi, meskipun beberapa hasil masih menunjukkan fluktuasi.

Kata kunci: *AOP, Air Lindi, BOD, COD, TSS*

Application of Advanced Oxidation Process (AOP) with a Combination of Ozone (O₃) and Hydrogen Peroxide (H₂O₂) for Leachate Treatment at Piyungan Landfill

Student : Tri Sanjaya
Student Number : 21513047
Study Program : Environmental Engineering – Bachelor Program
Supervisor : Ir. Hudori, S.T., M.T., Ph.D.

Abstract

Leachate is a liquid waste produced from the decomposition process of waste at the Final Processing Site (TPA) and contains high organic pollutants. This study was conducted at the Piyungan TPA with the aim of determining the effectiveness of the Advanced Oxidation Process (AOP) method with a combination of ozone (O₃) and hydrogen peroxide (H₂O₂) in reducing BOD, COD, and TSS levels in leachate. The method used was AOP with variations in H₂O₂ doses of 10 ml, 20 ml, 30 ml, and 40 ml and ozonation times of 20 minutes, 40 minutes, 60 minutes, and 80 minutes. The results showed that the best BOD reduction occurred at a dose of 40 ml H₂O₂ ozonation for 40 minutes, namely 57.4 mg/l. The highest COD reduction was at a dose of 40 ml H₂O₂ ozonation for 60 minutes, namely 627 mg/l. The best TSS reduction was achieved at a dose of 40 ml H₂O₂ and 80 minutes of ozonation, namely 33.50 mg/l. In general, the AOP method is quite effective in treating leachate, although some results still show fluctuations.

Key words: AOP, Leachate, BOD, COD, TSS

DAFTAR ISI

PRAKATA	i
Abstrak.....	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 TPA Piyungan.....	6
2.2 Air Lindi	8
2.3 Metode <i>Advanced Oxidation Process</i> (AOP).....	11
2.3.1 AOP Kombinasi Ozon (O ₃) dan Hidrogen Peroksida (H ₂ O ₂)	11
2.3.2 AOP Kombinasi Ozon (O ₃) dan Sinar Ultraviolet (UV).....	13
2.3.3 AOP Kombinasi Sinar Ultraviolet (UV) dan Hidrogen Peroksida (H ₂ O ₂).....	14
2.4 Penelitian Terdahulu	15
BAB III METODE PENELITIAN	19
3.1 Prosedur Penelitian	19
3.1.1 Analisis Kadar Ozon	20
3.1.2 Sampling Air Lindi.....	20
3.1.3 Penerapan Metode AOP pada Air Lindi.....	22
3.2 Pengumpulan Data.....	24

3.2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	24
3.2.2 Analisis Parameter.....	24
3.3 Prosedur Analisis Data	26
3.3.1 Perhitungan Dosis Ozon.....	26
3.3.2 Perhitungan BOD	27
3.3.3 Perhitungan COD	27
3.3.4 Perhitungan TSS.....	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	29
4.1 Karakteristik Awal Air Lindi	29
4.2 Perhitungan Dosis Ozon.....	30
4.3 Pengaruh AOP terhadap BOD	31
4.4 Pengaruh AOP terhadap COD	34
4.5 Pengaruh AOP terhadap TSS.....	38
4.6 Efektivitas AOP Kombinasi Ozon dan Hidrogen Peroksida pada Air Lindi.....	41
BAB V PENUTUP	45
5.1 Kesimpulan	45
5.2 Saran	46
DAFTAR PUSTAKA.....	47
LAMPIRAN	51
RIWAYAT HIDUP	1

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu	15
Tabel 3.1 Variasi Waktu dan Dosis H ₂ O ₂ pada metode AOP	22
Tabel 4.1 Karakteristik Air Lindi.....	29
Tabel 4.2 Kandungan Ozon Setiap Variasi Waktu	30
Tabel 4.3 Produktivitas Ozon pada Jurnal JK3L	31

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Bagan Alir Proses Pengolahan Air Lindi metode AOP	3
Gambar 2.1 TPA Piyungan	6
Gambar 3.1 Diagram Alir Prosedur Analisis	19
Gambar 3.2 Reaktor Analisis Kadar Ozon	20
Gambar 3.3 IPL TPA Piyungan	21
Gambar 3.4 Sampling Air Lindi	21
Gambar 3.5 Ozon generator Iontech QJ-8005K kapasitas 10 g/jam	22
Gambar 3.6 Reaktor AOP	23
Gambar 3.7 Instalasi Reaktor AOP pada Air Lindi	24
Gambar 4.1 Jumlah Kandungan Ozon Setiap Variasi Waktu.....	30
Gambar 4.2 Pengaruh AOP Kombinasi H ₂ O ₂ Terhadap BOD	33
Gambar 4.3 Persentase Removal Pengaruh AOP terhadap BOD	34
Gambar 4.4 Pengaruh AOP Kombinasi H ₂ O ₂ Terhadap COD	36
Gambar 4.5 Persentase Removal Pengaruh AOP terhadap COD	37
Gambar 4.6 Pengaruh AOP Kombinasi H ₂ O ₂ Terhadap TSS.....	40
Gambar 4.7 Persentase Removal Pengaruh AOP terhadap TSS.....	41

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 - Perhitungan Data Analisis.....	51
Lampiran 2 - Perhitungan Data Analisis.....	54
Lampiran 3 - Data Hasil Uji BOD Laboratorium Kualitas Lingkungan	57
Lampiran 4 - Dokumentasi	58

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) merupakan lokasi akhir pengelolaan sampah, khususnya di wilayah perkotaan yang terbatas lahannya (Rahmayanti et al., 2022). Penelitian ini dilakukan di TPA Piyungan, yang merupakan tempat pembuangan sampah yang berada di Daerah Istimewa Yogyakarta dengan kapasitas 2,7 juta m³ sampah (Lutfiyya Haz, n.d.). TPA ini mulai beroperasi sejak 1995 dengan masa operasional direncanakan 20 tahun hingga 2015, namun masih digunakan hingga awal 2024 dengan memaksimalkan zona 1 yang sebelumnya tidak aktif (Raheem, 2022). Timbunan sampah di TPA Piyungan menghasilkan air lindi yang mengandung senyawa organik, anorganik, mikroorganisme, logam berat, serta zat yang sulit terurai seperti amonia-nitrogen dan garam anorganik, yang berpotensi mencemari tanah, air tanah, dan badan air di sekitarnya (Lutfiyya Haz, n.d.).

Air lindi merupakan cairan yang terbentuk dari rembesan melalui timbunan sampah, membawa zat terlarut maupun tersuspensi yang sebagian besar berasal dari proses penguraian sampah. Di TPA Piyungan, volume lindi yang dihasilkan mencapai sekitar 115 m³ per hari saat musim kemarau, dan dapat meningkat hingga 400 m³ per hari saat musim hujan karena tingginya densitas. Lindi ini tidak dapat langsung dibuang ke lingkungan tanpa pengolahan, karena dapat menimbulkan pencemaran yang membahayakan ekosistem perairan, lingkungan sekitar, serta kesehatan manusia. Oleh karena itu, diperlukan proses pengolahan terlebih dahulu untuk menurunkan tingkat pencemarannya (Astuti et al., 2023).

Adapun pengolahan air lindi yang sudah ada di TPA Piyungan saat ini yaitu berupa Instalasi Pengolahan Lindi (IPL). Pada IPL ini, terdapat beberapa proses pengolahan untuk menurunkan konsentrasi pada air lindi yang dihasilkan pada TPA Piyungan. Unit pertama pada IPL Piyungan yaitu *bar screen*, kemudian masuk ke bak *inlet*. Setelah terkumpul di bak *inlet*, air lindi dialirkan ke bak koagulasi selanjutnya bak ekualisasi. Pada bak ekualisasi, air lindi menuju ke proses

sedimentasi, sedangkan lumpur yang mengendap di proses pada *sludge drying bed*. Kemudian pengolahan selanjutnya yaitu menggunakan teknologi *Aerobic Baffled Reactor* (ABR), bak aerasi dan lanjut dialirkan ke bak maturasi. Unit pengolahan terakhir yaitu bak klorinasi dan dibuang melalui *outlet* IPL. (Dari & Suhartini, 2024).

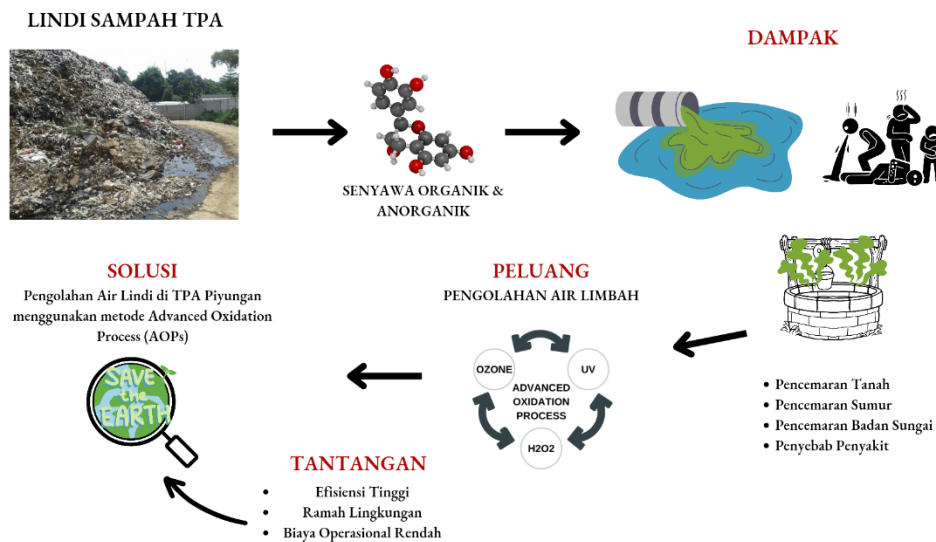
Selain itu, pengolahan air lindi secara konvensional masih banyak digunakan. Metode yang paling umum di Indonesia adalah sistem kolam karena biaya operasionalnya rendah, meskipun memerlukan waktu tinggal yang cukup lama. Kolam anaerobik mampu menurunkan BOD sebesar 50–85%. Kolam fakultatif memiliki efisiensi 70–80%, sedangkan kolam maturasi memiliki efisiensi 60–89% (Nusa et al., 2015). Pada penelitian lain, metode fitoremediasi menggunakan tumbuhan air juga efektif, mampu menurunkan BOD dan COD hingga 64%. Studi lain menunjukkan bahwa tumbuhan air ini mampu menurunkan BOD hingga 78,7% dan COD hingga 98,8% dalam 21 hari (Fajariyah & Mangkoedihardjo, 2017).

Meskipun metode konvensional seperti sistem kolam dan tumbuhan air masih efektif dalam mengurangi kandungan organik, penerapannya kini kurang relevan karena membutuhkan waktu lama dan lahan luas, serta perawatan tanaman yang intensif. Sebagai alternatif, metode *Advanced Oxidation Process* (AOP) berbasis ozon (O_3) dan hidrogen peroksida (H_2O_2) menawarkan efisiensi removal yang sebanding, namun dengan waktu pengolahan yang jauh lebih singkat, sehingga lebih direkomendasikan untuk digunakan. Pengolahan air lindi dengan menggunakan AOP sudah dilakukan pada penelitian (Rahmayanti et al., 2022). Penelitian ini menunjukkan bahwa pH tetap stabil pada semua variasi waktu. Efisiensi penyisihan tertinggi dicapai oleh TSS sebesar 67%, BOD sebesar 84,1%, dan COD sebesar 88,41%.

Oleh karena itu, dilakukan penelitian tentang pengolahan air lindi di TPA Piyungan menggunakan metode *Advance Oxidation Process* (AOP) kombinasi Ozon (O_3) dan Hidrogen Peroksida (H_2O_2). AOP yaitu memanfaatkan proses oksidasi lanjut yang menggunakan kombinasi beberapa proses antara lain ozonisasi, sinar ultraviolet (UV), karbon aktif, hidrogen peroksida, katalis, serta beberapa proses lainnya yang menghasilkan radikal hidroksil (Firdaus et al., 2020). Tujuan

dari penelitian ini adalah untuk menganalisis kinerja metode AOP berbasis ozon dan hidrogen peroksida dalam pengolahan air lindi di TPA Piyungan.

Proses ozonisasi merupakan alternatif dalam pengolahan lindi karena memiliki kekuatan oksidasi yang tinggi. Ozon merupakan oksidator kuat dalam air yang memiliki oksidasi potensial sebesar 2,07 V. Selain itu, ozon juga sangat efektif dalam menyisihkan kandungan organik maupun anorganik. Ozon dapat terdekomposisi menjadi $\text{OH}\cdot$ (OH radikal), dimana $\text{OH}\cdot$ terbentuk oleh adanya penambahan H_2O_2 yang bereaksi dengan ozon. $\text{OH}\cdot$ merupakan oksidator terkuat dalam air dengan oksidasi potensial yang lebih tinggi dibandingkan dengan ozon sebesar 2,86 V. Oleh karena itu, $\text{OH}\cdot$ lebih penting sebagai oksidator terkuat yang dapat mengoksidasi kandungan pencemar didalam lindi (Fadiyah et al., 2017).



Gambar 1.1 Bagan Alir Proses Pengolahan Air Lindi metode AOP

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang di atas, permasalahan yang dikaji dalam penelitian ini yaitu air lindi yang dihasilkan dari TPA Piyungan masih mengandung BOD, COD, dan TSS dengan kadar yang cukup tinggi. Meskipun di TPA Piyungan sudah terdapat Instalasi Pengolahan Lindi (IPL), hasil pengolahannya masih belum memenuhi baku mutu, sehingga dilakukan penelitian terkait penerapan metode *Advanced Oxidation Process* (AOP). Namun, sejauh ini belum diketahui sejauh mana AOP mampu menurunkan kadar BOD, COD, dan TSS, serta dosis optimum H_2O_2 dan waktu ozonisasi yang paling efektif, sehingga

diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mendapatkan kondisi pengolahan yang optimal.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yaitu sebagai berikut:

- 1) Mengidentifikasi kandungan awal BOD, COD, dan TSS dalam air lindi di TPA Piyungan.
- 2) Mengidentifikasi tingkat efektivitas pengolahan air lindi di TPA Piyungan dengan metode AOP dalam mengurangi kandungan BOD, COD, dan TSS yang terkandung di dalamnya.
- 3) Mengidentifikasi dosis optimum H_2O_2 dan waktu optimum pada metode AOP dalam menurunkan nilai BOD, COD, dan TSS pada air lindi yang dihasilkan dari TPA Piyungan.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Menambah referensi dalam pengembangan metode ilmiah mengenai efektivitas teknologi AOP dalam pengolahan air lindi, khususnya kombinasi O_3/H_2O_2 .
- 2) Menjadi studi perbandingan bagi metode pengolahan air limbah lainnya dari segi efektivitas dan efisiensi.
- 3) Penelitian ini dapat memperluas wawasan dalam penerapan prinsip kimia lingkungan dan teknologi oksidasi lanjutan yaitu dengan metode AOP.

1.5 Ruang Lingkup

Adapun ruang lingkup pada penelitian ini yaitu:

- 1) Lokasi penelitian berada di TPA Piyungan, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta dan Laboratorium Kualitas Air Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
- 2) Air Lindi yang dijadikan sampel berasal dari tumpukan sampah pada TPA Piyungan.
- 3) Air lindi yang digunakan berasal dari *inlet* IPL TPA Piyungan.

- 4) Pengambilan sampel dilakukan pada bulan Maret dan Mei 2025.
- 5) Pada percobaan ini tidak dilakukan pengolahan pendahuluan terhadap air lindi.
- 6) Kandungan air lindi yang diidentifikasi meliputi BOD, COD, dan TSS.
- 7) Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu *Advanced Oxidation Process* (AOP) berbasis kombinasi Ozon (O_3) dan Hidrogen Peroksida (H_2O_2).
- 8) Penelitian dilaksanakan pada bulan Februari 2025 – Juni 2025.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 TPA Piyungan

Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) adalah lokasi akhir untuk penanganan dan pengelolaan sampah dari suatu wilayah, khususnya di kawasan perkotaan yang umumnya menghadapi keterbatasan lahan (Rahmayanti et al., 2022). TPA Piyungan merupakan TPA yang berada di D.I Yogyakarta tepatnya terletak di Dusun Ngablak, Desa Sitimulyo, Kecamatan Piyungan, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. TPA ini dibangun pada tahun 1992 dan mulai beroperasi pada tahun 1995 dengan lahan seluas 12 hektar dengan kapasitas 2,7 juta m³ sampah yang melayani Kota Yogyakarta, Kabupaten Sleman, dan Kabupaten Bantul dengan rata-rata sampah yang masuk yaitu 200-300 ton per hari (Prayitno Susanto et al., 2004). Namun, sejak 1 Mei 2024, TPA Piyungan resmi ditutup dikarenakan kapasitas yang dapat ditampung sudah tidak mampu menampung volume sampah yang terus meningkat. Walaupun sudah tidak beroperasi, TPA Piyungan masih menimbulkan air lindi dari tumpukan sampah yang tersisa terutama pada musim hujan. Dampak dari air lindi yang sudah terbentuk sebelumnya masih dapat berpengaruh terhadap lingkungan sekitarnya. Oleh karena itu, pemantauan dan pengelolaan lanjutan terhadap sisa air lindi tetap diperlukan untuk memastikan tidak adanya dampak negatif yang berkelanjutan.



Gambar 2.1 TPA Piyungan

Sumber: Website Jawa Pos Radar Jogja

Adapun pengelolaan air lindi yang dihasilkan pada TPA Piyungan yaitu diolah pada IPL TPA Piyungan. IPL TPA Regional Piyungan terletak di bagian selatan zona transisi (*existing zone*), merupakan instalasi pengolahan air lindi dengan aliran debit 0,579 liter/detik atau 50.000 liter/hari. IPL menampung air lindi dari zona A, zona B, dan zona transisi (*existing zone*). Sistem pengelolaan air lindi di Instalasi Pengolahan Lindi (IPL) TPA Regional Piyungan terdiri dari beberapa tahapan utama. Tahap awal adalah bar screen, yang berfungsi menyaring limbah padat seperti kertas, plastik, dan kayu untuk mencegah penyumbatan pada pipa dan pompa. Bar screen terdiri dari batang besi yang dipasang paralel dengan jarak sekitar 10 cm. Setelah itu, air lindi masuk melalui *inlet* yang berfungsi mengumpulkan, mengatur aliran, dan mengarahkan air menuju bak koagulasi serta sebagai titik pengujian awal kualitas air lindi. Bak koagulasi digunakan untuk mengendapkan partikel yang mudah menggumpal dengan penambahan koagulan *Polyaluminium Chloride* (PAC) dan buffer pH berupa NH_4OH . Selanjutnya, bak ekualisasi berfungsi menyeimbangkan debit dan karakteristik air lindi agar proses pengolahan berjalan stabil dan efisien. Proses berlanjut ke bak sedimentasi, yang memanfaatkan gaya gravitasi untuk mengendapkan partikel tersuspensi, dilengkapi dengan baffle dan bendungan untuk meningkatkan efisiensi proses sedimentasi. (Dari & Suhartini, 2024).

Dari proses sedimentasi terdapat endapan berbentuk lumpur yang akan diolah pada unit *sludge drying bed*. *Sludge drying bed* adalah metode pengolahan lumpur dengan cara mengeringkannya, baik secara alami maupun mekanis, untuk mengurangi kadar air. Proses ini efektif dalam menurunkan kandungan bahan organik dan patogen dalam lumpur air lindi. Setelah kering, lumpur dikeluarkan dari unit pengering dan dibuang sesuai prosedur (Marinda & Taruli, 2022). Sedangkan air lindi dari bak sedimentasi, dilanjutkan pemrosesan dengan metode ABR yang merupakan teknologi pengolahan air lindi yang memanfaatkan beberapa ruang atau kompartemen yang dipisahkan oleh penyekat. Desain ini menciptakan pola aliran tertentu yang mendukung pertumbuhan mikroorganisme pengurai bahan organik. Sistem ABR mampu meningkatkan efisiensi penguraian senyawa organik dan menurunkan kadar BOD hingga 90% (Marinda & Taruli, 2022).

Kemudian dilanjutkan menuju bak aerasi. Di IPL TPA Regional Piyungan, terdapat tiga unit bak aerasi. Dalam tahap ini, air lindi dicampur dengan udara yang disuplai melalui aerator, sehingga meningkatkan kontak antara udara dan air. Proses ini bertujuan untuk meningkatkan kadar oksigen terlarut dan membantu proses oksidasi logam terlarut dalam air lindi. Aerasi berperan penting dalam mendukung efisiensi pengolahan biologis dengan menyediakan oksigen yang dibutuhkan oleh bakteri aerob. Bakteri ini juga berkontribusi dalam mengurangi gas-gas berbau yang terbentuk selama proses pengolahan (Fazdli, 2023).

Setelah dilakukan aerasi, air lindi kemudian dialirkan ke bak maturasi yang berfungsi untuk mengendapkan sisa padatan tersuspensi. Pada bak maturasi ini memiliki jangka waktu yang cukup lama bahkan hingga 30 hari. Setelah didiamkan pada bak maturasi, air lindi masuk ke tahap pengolahan terakhir yaitu klorinasi. Pada bak klorinasi terjadi penambahan desinfektan yang bertujuan untuk membasmi patogen serta menghilangkan sisa zat organik yang belum terurai setelah proses sebelumnya. Sebelum dilepas ke lingkungan, air lindi di pastikan kembali kualitasnya pada *outlet* IPL. Jika kualitas air lindi belum memenuhi baku mutu yang ditetapkan, maka air tersebut harus melalui proses pengolahan ulang. Efisiensi pengolahan TSS di TPA Regional Piyungan menunjukkan nilai negatif sebesar -138,59%, yang berarti konsentrasi TSS di *outlet* lebih tinggi daripada di *inlet*. Hal ini menunjukkan bahwa kandungan pencemar dalam air lindi sangat tinggi dan proses pengolahan belum optimal, sehingga perlu evaluasi dan perbaikan sistem. Sementara itu, efisiensi pengolahan BOD sebesar 54,36% dan COD sebesar 41,89%, menunjukkan hasil yang cukup efisien meskipun belum maksimal. Efisiensi ini dipengaruhi oleh teknologi yang digunakan, kualitas awal air lindi, dan kondisi lingkungan saat pengolahan berlangsung. Oleh karena itu, keberadaan *outlet* di IPL penting untuk memastikan bahwa air lindi yang dibuang ke lingkungan telah aman dan tidak menimbulkan pencemaran (Dari & Suhartini, 2024).

2.2 Air Lindi

Air lindi merupakan sumber limbah dari TPA yang merupakan bahan pencemar yang dapat mengganggu kesehatan manusia dan mencemari lingkungan

dan biota perairan (Prayitno Susanto et al., 2004). Air lindi mengandung konsentrasi tinggi zat organik yang mudah terurai, seperti asam lemak volatil (VFA), Biochemical Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), serta ion amonium ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), dengan rasio BOD/COD yang cukup tinggi. Di samping itu, air lindi juga mengandung senyawa-senyawa yang sulit terurai, seperti amonia-nitrogen, logam berat, dan garam-garam anorganik. Keberadaan senyawa-senyawa ini dapat memberikan dampak negatif terhadap kualitas tanah, air tanah, dan keseimbangan ekosistem perairan di sekitarnya. Air lindi sendiri terbentuk akibat proses perkolasi air yang mengalir melalui tumpukan sampah, sehingga sangat penting untuk dilakukan pengolahan terlebih dahulu sebelum dilepaskan ke lingkungan (Rahmayanti et al., 2022). Dalam kondisi normal, air lindi biasanya terkumpul di dasar landfill. Pergerakannya berlangsung melalui lapisan bawah secara lateral, yang dipengaruhi oleh sifat material di sekitarnya. Selain itu, air lindi juga merembes secara vertikal. Arah dan kecepatan pergerakan lindi ini dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu laju rembesan lindi dari dasar landfill menuju air tanah pada lapisan akuifer dangkal, serta kecepatan aliran air tanah dari akuifer dangkal menuju akuifer dalam (Nur Amalia, 2024).

Sama seperti TPA pada umumnya, TPA Piyungan juga menghasilkan air lindi dan gas-gas pada proses dekomposisi sampah organik. Berdasarkan geografisnya, air lindi dari TPA Piyungan ini sangat berpotensi mencemari salah satu sungai yang melintasi wilayah D.I Yogyakarta dan satu-satunya tempat pembuangan air lindi dari TPA Piyungan yaitu sungai Opak. Pencemaran ini dapat berdampak langsung pada masyarakat di sekitar, seperti menyebabkan air sungai menjadi keruh serta menimbulkan iritasi pada kulit (Prayitno Susanto et al., 2004). Selain mencemari aliran sungai, air lindi yang berasal dari TPA Piyungan juga berisiko mencemari air tanah di sekitarnya. Oleh karena itu, diperlukan upaya pengolahan air lindi sebelum dibuang ke badan air untuk mencegah dampak negatif terhadap lingkungan sekitar. Di TPA Piyungan, debit air lindi mencapai sekitar 115 m^3 per hari saat musim kemarau, dan dapat meningkat hingga 400 m^3 per hari pada musim hujan dengan intensitas tinggi (Astuti et al., 2023).

Air lindi pada *inlet* maupun *outlet* pada IPL TPA Piyungan berwarna coklat gelap dan pekat yang menunjukkan bahwa hasil dekomposisi berasal dari senyawa

asam humic dan fluvic. TPA Piyungan termasuk dalam kategori landfill tua, yaitu tempat pembuangan sampah yang telah beroperasi lebih dari 10 tahun. Pada tahap ini, kualitas air lindi cenderung lebih stabil, namun tetap mengandung polutan dalam kadar tinggi. Air lindi dari landfill tua umumnya memiliki ciri khas berwarna coklat gelap, dengan pH bersifat basa di kisaran 8–8,2. Selain itu, air lindi ini juga menunjukkan konsentrasi yang tinggi dari senyawa $\text{NH}_3\text{-N}$ dan COD. Kondisi ini menandakan bahwa meskipun proses dekomposisi organik telah berlangsung cukup lama, masih terdapat senyawa-senyawa yang sulit terurai (Kartikasari et al., 2020).

Proses terbentuknya air lindi merupakan hasil dari berbagai perubahan yang terjadi pada timbunan sampah, baik secara fisik, kimia, maupun biologis. Proses ini mencakup beberapa tahapan, seperti penguraian bahan organik secara biologis melalui mekanisme aerob dan anaerob yang menghasilkan gas serta cairan, reaksi oksidasi kimia, pelepasan gas dari dalam timbunan, interaksi antara senyawa organik dan anorganik dengan air dan lindi dalam lapisan sampah, pergeseran zat terlarut akibat perbedaan konsentrasi dan tekanan osmotik, serta penyusutan volume akibat pemadatan sampah yang mengisi celah-celah kosong di dalam timbunan. Air lindi yang dihasilkan merupakan akumulasi dari proses-proses tersebut dan dapat berasal dari beberapa sumber. Di antaranya adalah air hujan atau aliran permukaan yang meresap ke dalam tumpukan sampah, pergerakan air tanah secara horizontal yang melintasi area pembuangan sampah. Selain itu, air yang terkandung secara alami dalam material sampah juga turut menyumbang volume lindi. Di samping itu, selama proses dekomposisi bahan organik dalam sampah padat, terjadi pelepasan cairan sebagai hasil dari aktivitas mikroorganisme dan reaksi kimia. Proses ini tidak hanya meningkatkan volume lindi, tetapi juga memperkaya kandungan zat pencemar di dalamnya, seperti senyawa organik terlarut, logam berat, serta senyawa yang sulit terurai. Kombinasi dari berbagai sumber tersebut menjadikan air lindi sebagai limbah cair yang kompleks dan memerlukan pengolahan menyeluruh agar tidak mencemari lingkungan sekitarnya (Rachmadhany, 2023).

2.3 Metode *Advanced Oxidation Process* (AOP)

Metode pengolahan lindi yang umum digunakan di Indonesia saat ini adalah kontak stabilisasi, dipilih karena kemudahannya dan kondisi iklim tropis yang cukup panas. Namun, salah satu kelemahan dari pengolahan secara biologi adalah membutuhkan lahan yang luas. Selain itu, karakteristik lindi dapat berubah seiring dengan umur timbulan sampah, sehingga proses pengolahan harus dapat menyesuaikan dengan perubahan ini. Lindi dianggap sulit untuk diolah secara langsung melalui metode biologis. (Sururi et al., 2014)

Advanced Oxidation Process (AOP) merupakan teknik yang dapat diterapkan untuk menyisihkan warna, mengurangi kandungan bahan organik, serta merubah air lindi menjadi lebih mudah di degradasi (Sururi et al., 2014). AOP dapat disebut teknologi yang dikembangkan dari metode oksidasi konvensional dengan tujuan untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas proses oksidasi dalam menguraikan senyawa pencemar, terutama senyawa organik yang sulit terdegradasi. Teknologi ini bekerja dengan menggabungkan beberapa jenis oksidator kuat, seperti ozon (O_3), hidrogen peroksida (H_2O_2), dan/atau sinar ultraviolet (UV), yang dalam reaksinya mampu menghasilkan radikal hidroksil ($OH\cdot$). Radikal hidroksil ini dikenal sangat reaktif untuk proses penguraian air limbah dengan menggunakan oksidator kuat dan memiliki kemampuan oksidasi yang jauh lebih tinggi dibandingkan oksidator tunggal, sehingga mampu merombak ikatan kimia kompleks dalam senyawa polutan menjadi senyawa yang lebih sederhana, bahkan hingga menjadi karbon dioksida dan air (Sari et al., 2017). Oksidator kuat yang dipakai dapat berupa campuran ozon dengan hidrogen peroksida ($O_3 + H_2O_2$), ozon dengan sinar ultra violet ($O_3 + UV$), dan campuran hidrogen peroksida dengan sinar ultra violet ($H_2O_2 + UV$) (Nugroho & Iqbal, 2005).

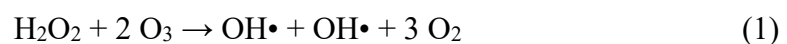
2.3.1 AOP Kombinasi Ozon (O_3) dan Hidrogen Peroksida (H_2O_2)

Metode AOP yang digunakan pada penelitian ini berbasis ozon (O_3) dan Hidrogen Peroksida (H_2O_2). Ozon sendiri merupakan salah satu oksidator yang kuat memiliki nilai E° sebesar 2,07 volt. Ozon dapat terurai menjadi $OH\cdot$ di dalam air, yang merupakan oksidator paling kuat dengan potensial oksidasi sebesar 2,8 volt. Proses ozonisasi dan oksidasi lanjut yang mempercepat

dekomposisi ozon menjadi $\text{OH}\cdot$. Metode ini dianggap sebagai metode yang efektif untuk mengolah lindi (Sururi et al., 2014).

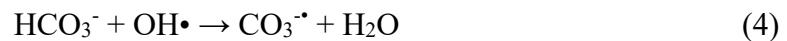
Salah satu kelebihan utama teknologi AOP adalah kemampuannya untuk mengolah air limbah tanpa menghasilkan lumpur atau produk sampingan yang berbahaya, menjadikannya alternatif yang lebih ramah lingkungan. Selain itu, proses AOP dapat dioptimalkan untuk menargetkan jenis kontaminan tertentu, sehingga memberikan fleksibilitas tinggi dalam menghadapi berbagai karakteristik air limbah. Secara umum, AOP merupakan pendekatan yang efisien dan berkelanjutan dalam pengolahan air limbah, dengan kemampuan signifikan dalam menurunkan kadar polutan berbahaya yang berpotensi mencemari sumber air (Teguh et al., 2024).

Sistem ini merupakan salah satu metode yang banyak diterapkan karena bersifat praktis, relatif aman, dan memiliki biaya operasional yang cukup rendah. Efektivitasnya juga lebih tinggi dibandingkan penggunaan ozon atau hidrogen peroksida secara terpisah. Dalam sistem ini, H_2O_2 berfungsi sebagai pemicu untuk mempercepat dekomposisi ozon menjadi radikal hidroksil dan superoksida. Radikal-radikal tersebut kemudian bereaksi secara berantai dengan ozon, mempercepat proses oksidasi. Penambahan H_2O_2 ini mempercepat pembentukan radikal, sehingga proses degradasi kontaminan berlangsung lebih efisien. Adapun reaksi yang digunakan untuk produksi radikal aktif hidroksil menggunakan ozon dan hidrogen peroksida yaitu dapat dilihat pada persamaan (1). Sementara itu, untuk keberadaan promotor, selain berasal dari senyawa organik hasil dekomposisi, percepatan pembentukan radikal hidroksil juga dapat difasilitasi oleh kehadiran H_2O_2 . H_2O_2 berperan penting dalam mempercepat reaksi ozonisasi melalui mekanisme propagasi, di mana molekul H_2O_2 akan bereaksi dengan ozon membentuk radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$) yang memiliki daya oksidasi sangat tinggi dapat dilihat pada persamaan (2) dan (3) (Nabila & Yuniarto, 2024; Sakinah Irawan et al., 2015):



Radikal hidroksil memiliki tingkat selektivitas yang rendah terhadap berbagai spesies yang ada di dalam air, sehingga cenderung bereaksi dengan hampir semua senyawa yang ditemuinya. Proses dekomposisi ozon dapat terhambat oleh adanya spesies tertentu yang menghentikan reaksi berantai dengan cara bereaksi langsung dengan radikal hidroksil. Spesies penghambat ini dikenal sebagai penangkap radikal hidroksil (*radical scavenger*) karena keberadaannya membatasi atau bahkan menghalangi radikal bebas untuk menyerang senyawa target (Trapido, n.d.).

Contoh klasik dari *radical scavenger* ini adalah tert-butil alkohol, meskipun senyawa tersebut biasanya tidak ditemukan di air alami maupun air limbah. Akan tetapi, dalam kondisi nyata, radikal hidroksil justru lebih banyak dikonsumsi oleh reaksi kompetitif dengan komponen alami dalam matriks air, misalnya ion karbonat (CO_3^{2-}), bikarbonat (HCO_3^-), dan spesies lain. Karbonat misalnya, bertindak sebagai scavenger karena menghasilkan radikal karbonat ($\text{CO}_3^{\bullet-}$) yang reaktivitasnya jauh lebih rendah dibanding radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$). Reaksi yang terjadi antara radikal hidroksil dengan ion bikarbonat maupun karbonat adalah sebagai berikut (Trapido, n.d.):



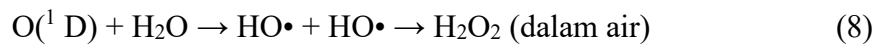
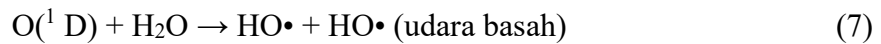
Kehadiran *scavenger* dalam matriks air pada banyak kasus akan mengurangi efektivitas total AOP, karena radikal hidroksil yang seharusnya digunakan untuk mendegradasi polutan organik justru terpakai oleh reaksi samping yang kurang bermanfaat.

2.3.2 AOP Kombinasi Ozon (O_3) dan Sinar Ultraviolet (UV)

Selain metode AOP kombinasi O_3 dan H_2O_2 , terdapat kombinasi lain dari metode AOP yang banyak digunakan adalah kombinasi ozon (O_3) dan sinar ultraviolet (UV). Dibandingkan penggunaan ozon secara tunggal, penambahan UV dapat meningkatkan efisiensi degradasi karena mempercepat pembentukan oksidator kuat. Oleh karena itu, kombinasi ozon dan UV dinilai sebagai salah satu metode yang potensial dalam pengolahan limbah cair, baik untuk menurunkan parameter organik seperti BOD dan COD maupun untuk

meningkatkan kualitas effluent agar memenuhi baku mutu lingkungan (Rohmah & Tri Sugiarto, 2008).

Proses AOP dengan kombinasi O₃ dan UV bekerja dengan memanfaatkan energi foton dari radiasi UV untuk menguraikan molekul ozon. Hasil penguraian tersebut kemudian menghasilkan oksigen singlet yang sangat reaktif, yang selanjutnya bereaksi dengan molekul air membentuk radikal hidroksil (•OH) yang besar. Radikal hidroksil inilah yang berperan utama sebagai oksidator kuat dalam proses menghancurkan berbagai jenis polutan organik, termasuk senyawa kompleks, minyak, maupun mikroorganisme patogen yang terdapat dalam air limbah. Reaksi dari proses kombinasi O₃ dan UV yaitu (Rohmah & Tri Sugiarto, 2008):



2.3.3 AOP Kombinasi Sinar Ultraviolet (UV) dan Hidrogen Peroksida (H₂O₂)

Adapun kombinasi lainnya pada metode AOP yaitu kombinasi UV dan H₂O₂. Prinsip AOP pada kombinasi ini adalah memanfaatkan sinar ultraviolet ($\lambda = 200\text{--}280 \text{ nm}$) bersama dengan suatu oksidator untuk menghasilkan radikal hidroksil (•OH). Radikal hidroksil ini memiliki potensial oksidasi sangat tinggi, yakni sekitar 2,8 V, sehingga mampu merusak dan mendegradasi berbagai jenis kontaminan organik maupun anorganik yang sulit terurai dengan metode konvensional. Keunggulan lain dari proses AOP adalah tidak menghasilkan produk samping berbahaya seperti lumpur kimia, sehingga dianggap lebih ramah lingkungan (Chuango & Sembiring, 2013).

Sinar ultraviolet memiliki efektivitas dalam menginaktivasi bakteri, virus, maupun protozoa tanpa mengubah komposisi kimia dari air. Paparan sinar ultraviolet-C mampu menembus membran sitoplasma serta dinding sel mikroorganisme, kemudian menyebabkan terjadinya perubahan struktur pada molekul DNA sehingga mengganggu fungsi biologisnya. Berikut merupakan reaksi kimia UV-C dengan H₂O₂ (Yasmin, 2023).



(9)

2.4 Penelitian Terdahulu

Terdapat beberapa peneliti sebelumnya yang melakukan penelitian pengolahan air lindi dengan metode AOP di Tempat Pemrosesan Akhir. Hal ini tentunya penting untuk menjadi acuan pembahasan pada penelitian ini. Berikut beberapa hasil penelitian yang telah dilakukan.

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti	Judul	Hasil Penelitian
1	Rachmadhany, 2023	Pemanfaatan Air Lindi TPA Piyungan Yogyakarta Sebagai Pengganti Air Bersih pada Pembuatan <i>Paving Block</i>	Pada TPA Piyungan Yogyakarta menghasilkan air lindi yang memiliki karakteristik yaitu dengan kandungan BOD sebesar 731 mg/l, COD sebesar 1.531 mg/l, dan TSS sebesar 1 mg/l.
2	Wulandari, 2023	Efektivitas Kombinasi Reaktor Aerasi dan Spesifik Bakteri Untuk Mendegradasi Polutan Air Limbah Lindi TPA Piyungan	Kualitas lindi di TPA Piyungan relatif stabil, dengan karakteristik berwarna coklat pekat, memiliki pH basa dalam rentang 8–8,2, serta mengandung konsentrasi $\text{NH}_3\text{-N}$ dan COD yang cukup tinggi.
3	Rahmayanti et al., 2022	Pengolahan Lindi Menggunakan <i>Advanced Oxidation Process</i> (AOP) Berbasis Ozon	Pengolahan air lindi menunjukkan pH yang baik pada setiap variasi. Hasil terbaik waktu ozonasi terhadap nilai TSS yakni

			<p>pada menit ke-15 dengan nilai 56 mg/L, BOD₅ dan COD yaitu pada menit ke-45 dengan masing-masing nilai 511 mg/L dan 1.260 mg/L. Persentase penyisihan nilai terbaik TSS yaitu mencapai 67%, BOD 84,1%, dan COD 88.41%.</p>
4	Fadiyah et al., 2017	<p>Pengolahan Lindi dengan Menggunakan <i>Advanced Oxidation Process</i> (AOP) dengan Variasi Debit Udara</p>	<p>Proses AOP berjalan dengan kenaikan pH yang merupakan parameter berpengaruh terhadap dekomposisi ozon. Proses AOP menggunakan lindi sebanyak 1 liter dengan penambahan H₂O₂ sebanyak 1,197 g/L yang dimana dosis tersebut merupakan konsentrasi terbaik. Penurunan kekeruhan dan DHL tertinggi terdapat pada debit udara 4 L/menit yaitu mencapai 45,14% dan 15,00%. Hal ini disebabkan karena proses oksidasi selama AOP (O₃/H₂O₂) berjalan dengan baik. Hal ini dapat ditandai dengan nilai pH. Nilai pH pada debit udara 4 L/menit menunjukkan kenaikan pH</p>

			tertinggi yang dapat diperkirakan menghasilkan OH radikal tertinggi yang ditunjukkan dengan banyaknya OH•.
5	Sururi et al., 2014	Pengolahan Lindi dengan Proses Oksidasi Lanjut Berbasis Ozon	Titik kritis pada proses ozonisasi konvensional yaitu pada menit ke-60, dimana konsentrasi COD mencapai 275 mg/L, sementara hingga menit ke 180 efisiensi penurunan COD mencapai 18,74%. Hasil terbaik ditunjukkan oleh proses O ₃ /H ₂ O ₂ , dimana titik kritis terjadi pada menit ke 150, COD turun hingga mencapai 231,46 mg/l (28,9%).
6	Sekaringgalih et al., 2023	<i>Treatment of The Gelatin Wastewater With Ozone Peroxide Advanced Oxidation Process</i>	Proses AOP menunjukkan hasil terbaik adalah penambahan 30 ml hidrogen peroksida dalam waktu 160 menit yang dapat menurunkan COD 83,76% dari sebelumnya menjadi 240,39 mg/L. BOD menurun sebesar 69,5189% dari sebelumnya menjadi 96,32 mg/l dengan kondisi yang sama.

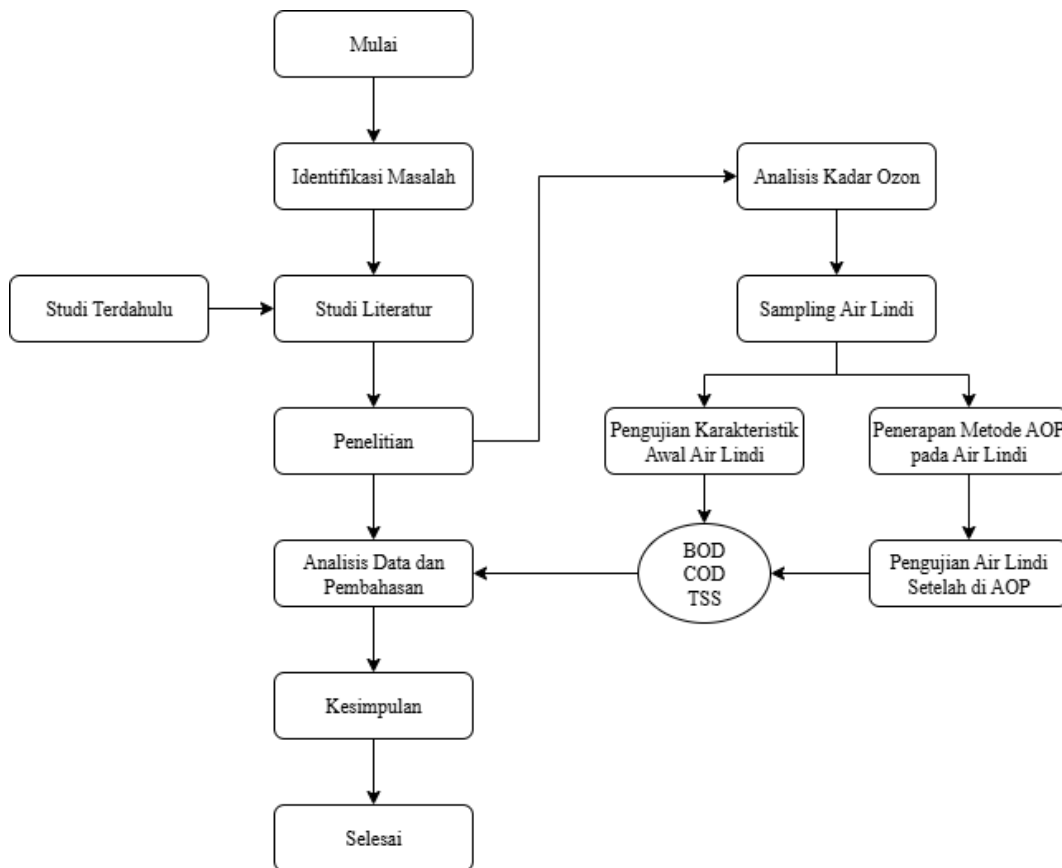
Berdasarkan beberapa studi terdahulu yang telah dijadikan referensi, terdapat beberapa dosis dan waktu ozonisasi optimum dalam mengurangi kadar polutan yang terkandung pada air lindi. Adapun yang menjadi referensi pada penelitian ini yaitu konsentrasi H_2O_2 sebesar 1,197 g/L. Kemudian dilakukan variasi konsentrasi H_2O_2 yang mendekati konsentrasi optimum tersebut. Selain konsentrasi, terdapat variasi waktu ozonisasi yaitu waktu yang belum pernah diteliti sebelumnya. Hal ini berguna untuk mendapatkan efisiensi pengurangan konsentrasi polutan pada air lindi yang lebih optimum dengan beberapa gabungan kondisi maksimum beberapa peneliti.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan metode yang digunakan dalam penelitian, meliputi prosedur penelitian, pengumpulan data, dan analisis parameter. Prosedur penelitian menjelaskan tahapan pelaksanaan penelitian, pengumpulan data menguraikan cara memperoleh informasi yang diperlukan, sedangkan analisis parameter membahas metode pengolahan data agar hasil yang diperoleh dapat mendukung tujuan penelitian.

3.1 Prosedur Penelitian

Berikut merupakan bagan alir penelitian yang dilaksanakan.

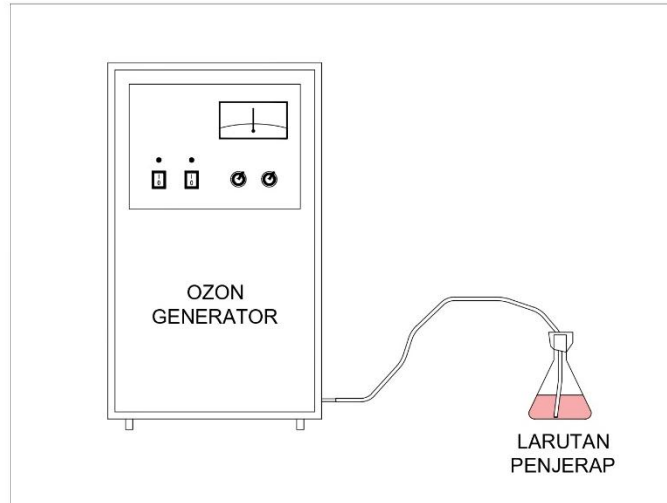


Gambar 3.1 Diagram Alir Prosedur Penelitian

3.1.1 Analisis Kadar Ozon

Pada tahap menganalisis kadar ozon, dilakukan proses ozonisasi dengan larutan KI sebanyak 250 ml pada erlenmeyer dengan variasi waktu yang telah ditetapkan. Selang yang dilengkapi dengan elektroda yang nantinya akan menghasilkan gelembung dari ozon generator langsung dipaparkan ke larutan KI pada erlenmeyer dan ditutup rapat menggunakan *aluminium foil* dan selotip. Nyalakan ozon generator sesuai variasi waktu yang telah ditentukan.

Adapun skema proses analisis kadar ozon dapat dilihat pada gambar 3.2, dimulai dari pengaliran ozon dari ozon generator ke larutan KI pada erlenmeyer hingga terjadi proses ozonisasi. Kemudian ozon yang terperap pada larutan KI akan dihitung kadarnya. Kadar ozon ditentukan dengan metode titrasi. Titrasi dimulai dengan membuat larutan Natrium Tiosulfat 1 N dan Amilum. Larutan KI di titrasi dengan Natrium Tiosulfat hingga menguning, kemudian ditambah beberapa tetes Amilum hingga larutan berwarna biru tua, lanjut titrasi hingga larutan berwarna bening. Catat penggunaan Natrium Tiosulfat.



Gambar 3.2 Reaktor Analisis Kadar Ozon

3.1.2 Sampling Air Lindi

Pengambilan sampel air lindi dilakukan pada Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Piyungan di Yogyakarta. Proses pengambilan sampel mengacu pada pedoman yang telah ditetapkan dalam SNI 6989.59:2008 tentang metode

pengambilan air limbah. Standar ini memberikan panduan teknis untuk memastikan sampel yang diambil dapat mewakili kondisi yang sebenarnya dan dapat digunakan untuk analisis laboratorium dengan hasil yang akurat dan dapat dipercaya. Pada penelitian ini, sampling dilakukan pada *inlet* IPL TPA Piyungan yang dapat dilihat pada gambar 3.4. Tujuan memilih titik sampling di *inlet* ini yaitu atas pertimbangan air lindi belum diolah sama sekali dan belum tercampur oleh zat kimia apapun yang dapat merubah karakteristik air lindi itu sendiri.



Gambar 3.3 IPL TPA Piyungan



Gambar 3.4 Sampling Air Lindi

3.1.3 Penerapan Metode AOP pada Air Lindi

Setelah dilakukan sampling, air lindi kemudian diuji terlebih dahulu guna untuk mengetahui kandungan awal air lindi sesuai dengan parameter yang telah ditentukan yaitu BOD, COD, dan TSS. Bersamaan dengan pengujian ini, air lindi juga dilakukan penerapan metode AOP kombinasi O_3 dengan H_2O_2 . H_2O_2 pada penelitian ini menggunakan H_2O_2 50%. Penerapan AOP ini dilakukan dengan ozon generator yang dapat dilihat pada gambar 3.5 dengan variasi waktu dan dosis H_2O_2 yang telah ditentukan. Ozon generator yang digunakan pada penelitian ini yaitu Iontech QJ-8005K dengan kapasitas 10 g/jam dan tegangan listrik sebesar 220V/50Hz. Adapun sumber yang digunakan pada alat ini yaitu berasal dari udara ambien. Berikut informasi terkait variasi waktu dan dosis H_2O_2 dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Variasi Waktu dan Dosis H_2O_2 pada metode AOP

Waktu (menit)	Dosis H_2O_2 (ml)			
20	10	20	30	40
40	10	20	30	40
60	10	20	30	40
80	10	20	30	40

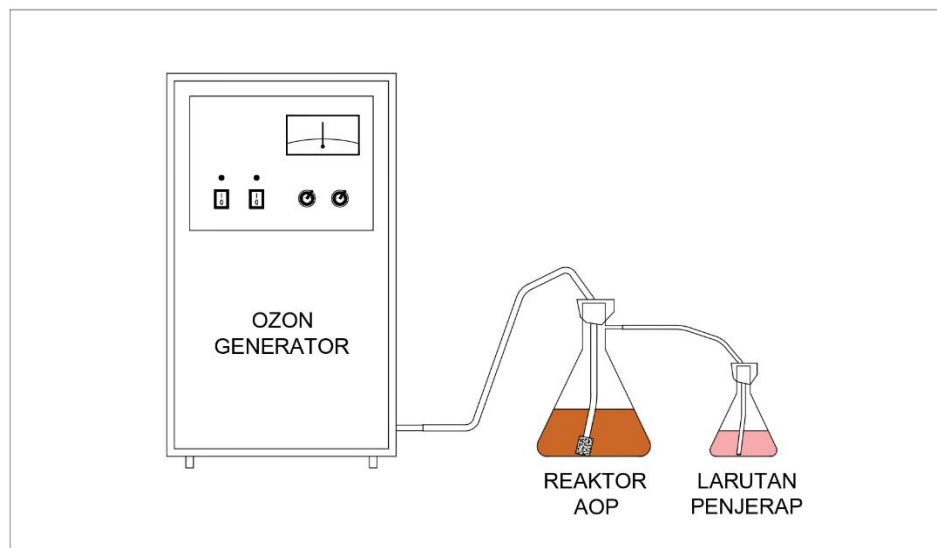


Gambar 3.5 Ozon generator Iontech QJ-8005K kapasitas 10 g/jam

Pada tahap ini, dilakukan proses ozonisasi dengan sampel yaitu air lindi sebanyak 1000 ml pada erlenmeyer 2000 ml dan larutan KI sebanyak 250 ml untuk menjerap sisa ozon yang terlepas pada proses ozonisasi pada sampel air lindi. Untuk H_2O_2 dimasukkan ke dalam sampel sebelum sampel dipaparkan oleh ozon karena nantinya reaktor akan ditutup rapat agar ozon tidak lepas ke

lingkungan bebas. Sama seperti analisis kadar ozon, selang yang dilengkapi dengan elektroda yang nantinya akan menghasilkan gelembung dari ozon generator langsung dipaparkan ke sampel air lindi pada erlenmeyer dan ditutup rapat menggunakan *aluminium foil* dan selotip. Kemudian dari erlenmeyer sampel, dialirkan juga menggunakan selang ke erlenmeyer larutan KI guna menyerap sisa ozon yang terlepas pada proses ozonisasi. Pada erlenmeyer larutan KI juga ditutup rapat menggunakan *aluminium foil* dan selotip agar ozon tidak lepas ke lingkungan. Dinyalakan ozon generator sesuai variasi waktu dan dosis H_2O_2 yang telah ditentukan.

Adapun skema proses penerapan metode AOP pada air lindi dapat dilihat pada gambar 3.6. Proses dimulai dari pengaliran ozon dari ozon generator ke sampel air lindi pada erlenmeyer hingga terjadi proses oksidasi ozon terhadap senyawa organik yang terkandung pada sampel.



Gambar 3.6 Reaktor AOP



Gambar 3.7 Instalasi Reaktor AOP pada Air Lindi

3.2 Pengumpulan Data

3.2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian di mulai dari sampling air lindi yang berlokasi di TPA Piyungan tepatnya di Dusun Ngablak dan Watugender, Desa Sitimulyo, Kecamatan Piyungan Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Kemudian pengujian dilakukan dengan menganalisis beberapa parameter di Laboratorium Kualitas Air, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Penelitian dilaksanakan mulai dari Februari 2025 hingga Juni 2025.

3.2.2 Analisis Parameter

a. Biological Oxygen Demand (BOD)

Tingginya konsumsi oksigen dalam suatu sampel air ditunjukkan oleh semakin rendahnya kadar oksigen terlarut yang tersisa. Hal ini mengindikasikan bahwa di dalam air tersebut terdapat banyak bahan pencemar yang memerlukan oksigen dalam jumlah besar untuk proses penguraiannya. Pada air lindi, tingginya nilai BOD menjadi indikator utama bahwa kandungan zat organik di dalamnya sangat tinggi. Zat organik tersebut memicu aktivitas mikroorganisme aerobik yang memanfaatkan oksigen terlarut untuk mendekomposisi bahan buangan tersebut. Akibatnya, semakin besar jumlah bahan organik dalam air lindi,

semakin banyak pula oksigen yang dibutuhkan dalam proses dekomposisi biologisnya. Hal ini menegaskan pentingnya pengelolaan air lindi yang efektif untuk mencegah penurunan kualitas lingkungan perairan yang menerima limbah tersebut. (Malahayati & Sofiyana, 2018)

Analisis BOD pada penelitian ini dilakukan dengan mengacu pada SNI 6989.72:2009 tentang Cara uji kebutuhan oksigen biokimia (*Biochemical Oxygen Demand/BOD*). Analisis ini yaitu menghitung DO 0 hari dan DO 5 hari. Proses dimulai dari menyiapkan sampel yang akan dianalisis menggunakan botol winkler. Di cek kandungan oksigen terlarut 0 hari sebelum diinkubasi, kemudian didiamkan pada lemari inkubator pada suhu $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ selama 5 hari dan di uji kandungan oksigen terlarut 5 hari menggunakan DO meter.

b. Chemical Oxygen Demand (COD)

Proses ozonisasi menggunakan ozon sebagai oksidator kuat untuk mengurai senyawa organik. Oksidasi oleh ozon mengakibatkan pemecahan senyawa organik kompleks dalam air lindi menjadi senyawa organik yang lebih sederhana. Kandungan nilai COD disebabkan oleh sifat seragam sampah organik yang dihasilkan oleh masyarakat, bersama dengan pola curah hujan dan suhu yang relatif stabil sepanjang tahun. Nilai COD yang tinggi juga disebabkan oleh kesulitan dalam dekomposisi oleh mikroba. (Rahmayanti et al., 2022)

Analisis COD pada penelitian ini dilakukan dengan mengacu pada SNI 6989.2:2019 tentang Cara uji kebutuhan oksigen kimiawi (*Chemical Oxygen Demand/COD*) dengan refluks tertutup secara spektrofotometri. Sebelum melakukan refluks, tabung kultur di sterilkan terlebih dahulu. Kemudian dilakukan proses refluks dengan memasukkan sampel yang telah diencerkan, *digestion solution*, dan larutan pereaksi asam sulfat pada tabung kultur. Dilakukan proses refluks pada *thermoreactor* selama 2 jam dengan suhu $150^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Dinginkan sampel hingga suhu ruang.

Pengujian sampel yang telah di refluks menggunakan spektrofotometer dengan panjang gelombang 600 nm yang dimana panjang gelombang tersebut diperuntukkan pada sampel yang mengandung COD

tinggi. Hasil pembacaan pada spektrofotometer dilakukan perhitungan menggunakan kurva kalibrasi yang telah dibuat.

c. Total Suspended Solid (TSS)

Total suspended solid (TSS) yang tinggi menghalangi masuknya sinar matahari yang ada dalam air, sehingga akan mengganggu proses fotosintesis menyebabkan turunnya oksigen terlarut yang dilepas kedalam air oleh tanaman. Jika sinar matahari terhalangi dari dasar tanaman, maka tanaman akan berhenti memproduksi oksigen dan akan mati. Adapun faktor yang mempengaruhi kandungan TSS dalam air lindi yaitu komposisi limbah di TPA, usia TPA, cuaca, serta sistem pengelolaan TPA. (Hutomo, 2011)

Analisis TSS pada penelitian ini dilakukan secara gravimetri yaitu mengacu pada SNI 6989.3:2019 tentang Cara uji padatan tersuspensi total (*Total Suspended Solid/TSS*) secara gravimetri. Pengujian dilakukan menggunakan kertas saring whatman 42 dengan pori-pori 2,5 μm . Diketahui berat kertas awal (W_0) dan berat kertas akhir (W_1) untuk mengetahui kandungan TSS. Kertas saring dilakukan penyaringan, kemudian di oven pada suhu 103°C - 105°C selama 1 jam. Kemudian dimasukkan ke desikator ± 15 menit dan ditimbang beratnya menggunakan timbangan analitik untuk mendapatkan berat W_0 dan W_1 .

3.3 Prosedur Analisis Data

3.3.1 Perhitungan Dosis Ozon

Pada proses ozonisasi ini menggunakan ozon generator dengan kapasitas 10 g/jam yang tercantum pada spesifikasi alat. Namun, dilakukan pengujian dosis ozon kembali dengan menggunakan metode titrasi. Dosis ozon dihitung berdasarkan variasi waktu yang digunakan dengan kontak langsung dari ozon generator ke larutan KI. Berdasarkan jurnal (Suwarno et al., 2017) ,untuk menghitung dosis ozon pada larutan KI dengan metode titrasi, dapat digunakan rumus berikut:

$$O_3 \text{ (g/menit)} = \frac{1}{2} \frac{A \times N}{2 \times 1000} \frac{B}{t} \quad (8)$$

Keterangan:

A = titran $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (ml)

N = normalitas $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (N)

B = Mr O_3

t = waktu ozonisasi (menit)

Proses titrasi menggunakan Natrium Tiosulfat dan Amilum. Sebelum digunakan, dilakukan standarisasi Natrium Tiosulfat. Larutan KI yang sudah dipaparkan ozon, langsung di titrasi. Catat titran yang digunakan dan masukkan ke rumus perhitungan dosis ozon.

3.3.2 Perhitungan BOD

Dalam perhitungan BOD, sampel dibaca menggunakan DO meter. Penelitian dilakukan guna untuk mengetahui seberapa besar jumlah oksigen terlarut yang dibutuhkan oleh mikroorganisme untuk menguraikan bahan organik dalam air secara biologis. Perhitungan BOD dapat menggunakan rumus berikut:

$$\text{BOD}_5 \text{ (mg/l)} = \text{DO}_{\text{awal}} - \text{DO}_{\text{akhir}} \quad (9)$$

Keterangan:

DO_{awal} = Kadar oksigen terlarut sebelum inkubasi (mg/l)

DO_{akhir} = Kadar oksigen terlarut setelah inkubasi (mg/l)

Pada persamaan tersebut, DO awal diketahui sebelum di inkubasi, sedangkan DO akhir diketahui setelah di inkubasi selama 5 hari. Setelah di dapat nilai DO awal dan DO akhir, DO awal dikurangi dengan DO akhir dan didapatkan kandungan BOD pada sampel tersebut.

3.3.3 Perhitungan COD

Dalam perhitungan COD, sampel dibaca menggunakan Spektrofotometer dan hasil yang didapatkan berupa absorbansi. Penelitian dilakukan guna untuk mengetahui seberapa besar kandungan bahan pencemar organik pada air lindi. Perhitungan COD dilakukan menggunakan kurva

kalibrasi. Pada air lindi, dapat menggunakan kurva kalibrasi COD tinggi. Adapun kurva kalibrasi yang sudah di dapat yaitu:

$$y = 0,0003x + 0,0395 \quad (10)$$

Keterangan :

y = Absorbansi

x = Nilai COD (mg/l)

3.3.4 Perhitungan TSS

Dalam perhitungan TSS, sampel dilakukan penyaringan untuk mengetahui total padatan tersuspensi dengan metode gravimetri. Dilakukan penimbangan berat awal kertas saring sebelum penyaringan dan berat akhir kertas saring setelah penyaringan. Adapun rumus yang digunakan untuk mengetahui kandungan TSS pada sampel yaitu:

$$\text{TSS (mg/l)} = \frac{(W1 - W0) \times 1000}{V} \quad (11)$$

Keterangan:

W0 = Berat Awal Kertas Saring (mg)

W1 = Berat Akhir Kertas Saring (mg)

V = Volume Sampel (ml)

1000 = Konversi mililiter ke liter

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Awal Air Lindi

Adapun karakteristik awal air lindi disusun berdasarkan hasil pengujian laboratorium yang dilakukan secara mandiri dan juga dari data pembanding yang diperoleh dari DLHK Yogyakarta. Data tersebut mencakup parameter-parameter penting seperti pH, BOD, COD, dan TSS, yang merepresentasikan tingkat pencemaran dan kondisi kualitas air lindi pada saat pengambilan sampel. Hasil pengujian sendiri bertujuan untuk memberikan gambaran kondisi aktual di lapangan, sedangkan data dari DLHK digunakan sebagai referensi untuk validasi dan perbandingan. Dengan membandingkan kedua sumber data ini, dapat diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai karakteristik air lindi serta ketepatan metode uji yang digunakan. Berdasarkan tabel 4.1, dapat dilihat perbedaan data yang diuji mandiri dan data dari DLHK DIY, hal ini dikarenakan data yang didapat dari DLHK DIY yaitu pada bulan Februari, sedangkan hasil yang diuji mandiri dilakukan pada bulan April dan Mei. Terdapat faktor alami seperti kondisi musim dan curah hujan yang berbeda menyebabkan perbedaan karakteristik tersebut.

Tabel 4.1 Karakteristik Air Lindi

No.	Parameter	Satuan	Hasil Uji DLHK ⁽¹⁾	Hasil Uji Peneliti ⁽²⁾	Baku Mutu
1	pH	-	8,13	8,51	6 - 9
2	BOD	mg/L	566	1959	150
3	COD	mg/L	5239	1994	300
4	TSS	mg/L	20	59	100

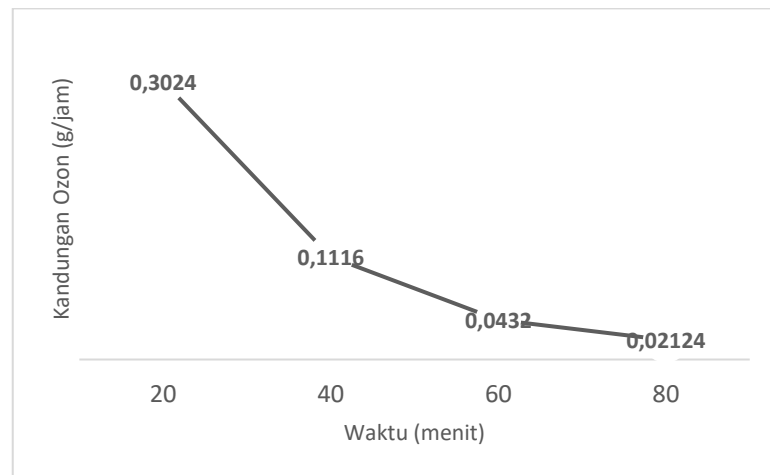
Sumber: (1) Laporan Hasil Uji DLHK DIY bulan Februari & (2) Hasil Uji Peneliti di Laboratorium

4.2 Perhitungan Dosis Ozon

Dosis ozon diketahui dari kontak langsung ozon generator dengan larutan KI dengan variasi waktu yang telah ditentukan yaitu 20, 40, 60, dan 80 menit. Larutan KI ini berfungsi sebagai larutan penjerap, Untuk mengetahui dosis ozon yang terkandung pada larutan KI dilakukan metode titrasi dengan Natrium Tiosulfat dan Amilum. Berikut merupakan hasil perhitungan dosis ozon dengan beberapa variasi waktu.

Tabel 4.2 Kandungan Ozon Setiap Variasi Waktu

Waktu (menit)	Volume $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	Kandungan Ozon (g/menit)	Kandungan Ozon (g/jam)
20	42	0,00504	0,3024
40	31	0,00186	0,1116
60	18	0,00072	0,0432
80	11,8	0,00035	0,0212



Gambar 4.1 Jumlah Kandungan Ozon Setiap Variasi Waktu

Berdasarkan tabel 4.2, adapun kandungan ozon dengan waktu paparan selama 20 menit yaitu 0,3024 g/jam, 40 menit yaitu 0,1116 g/jam, 60 menit yaitu 0,0432 g/jam, dan 80 menit yaitu 0,0212 g/jam. Jika dilihat pada grafik 4.1, semakin lama waktu ozonisasi maka semakin sedikit pula ozon yang terkandung pada larutan KI. Hal ini disebabkan karena semakin lama paparan oleh ozon generator maka produktivitas ozon akan semakin mengecil. Berbanding lurus dengan penggunaan Natrium Tiosulfat dalam titrasi larutan KI yang telah diozon, dari waktu ozonisasi 20 menit menggunakan Natrium Tiosulfat paling banyak hingga paling sedikit pada waktu ozonisasi terlama yaitu 80 menit.

Tabel 4.3 Produktivitas Ozon pada Jurnal JK3L

Titration Ke-	Waktu	Produktivitas Ozon
1	15 Menit	0,012 g/jam
2	15 Menit	0,012 g/jam
3	15 Menit	0,012 g/jam
4	10 Menit	0,012 g/jam
5	10 Menit	0,012 g/jam
6	10 Menit	0,013 g/jam

Sumber : Jurnal Keselamatan, Kesehatan Kerja dan Lingkungan (JK3L)

Berdasarkan pada jurnal (Kamaludin et al., 2021) seperti yang dilampirkan pada tabel 4.3, produktivitas ozon generator yang menggunakan metode lucutan plasma atau *corona discharge* menunjukkan tingkat yang cukup stabil namun terjadi sedikit perubahan dalam waktu operasi tertentu. Berdasarkan hasil pengujian sebanyak tiga kali, dalam durasi pengoperasian selama 15 menit, alat ini mampu menghasilkan dosis ozon sekitar 0,012 g/jam. Sementara itu, pada waktu pengoperasian selama 10 menit, dosis ozon yang dihasilkan berada dalam kisaran 0,012 hingga 0,013 g/jam.

4.3 Pengaruh AOP terhadap BOD

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kandungan BOD yang terkandung pada air lindi sebelum dan sesudah diterapkan metode AOP. Proses ini secara efektif mengurangi kandungan bahan organik yang dapat terbiodegradasi, sehingga nilai BOD menurun. Penurunan nilai BOD mencerminkan bahwa senyawa organik dalam limbah telah mengalami proses dekomposisi, di mana senyawa organik kompleks berhasil diuraikan menjadi bentuk yang lebih sederhana dan mudah terurai. Proses ini menunjukkan keberhasilan sistem pengolahan dalam mengurangi beban pencemar organik. Namun, hasil pengukuran BOD yang masih menunjukkan angka di atas baku mutu yang ditetapkan untuk air lindi mengindikasikan bahwa kandungan senyawa organik dalam limbah masih cukup tinggi. Nilai BOD yang tinggi berarti bahwa limbah tersebut masih mengandung banyak bahan organik yang memerlukan oksigen dalam jumlah besar untuk terdegradasi secara biologis oleh mikroorganisme. Kondisi ini menandakan bahwa sistem pengolahan yang digunakan belum optimal atau bahwa air lindi tersebut berasal dari sumber dengan

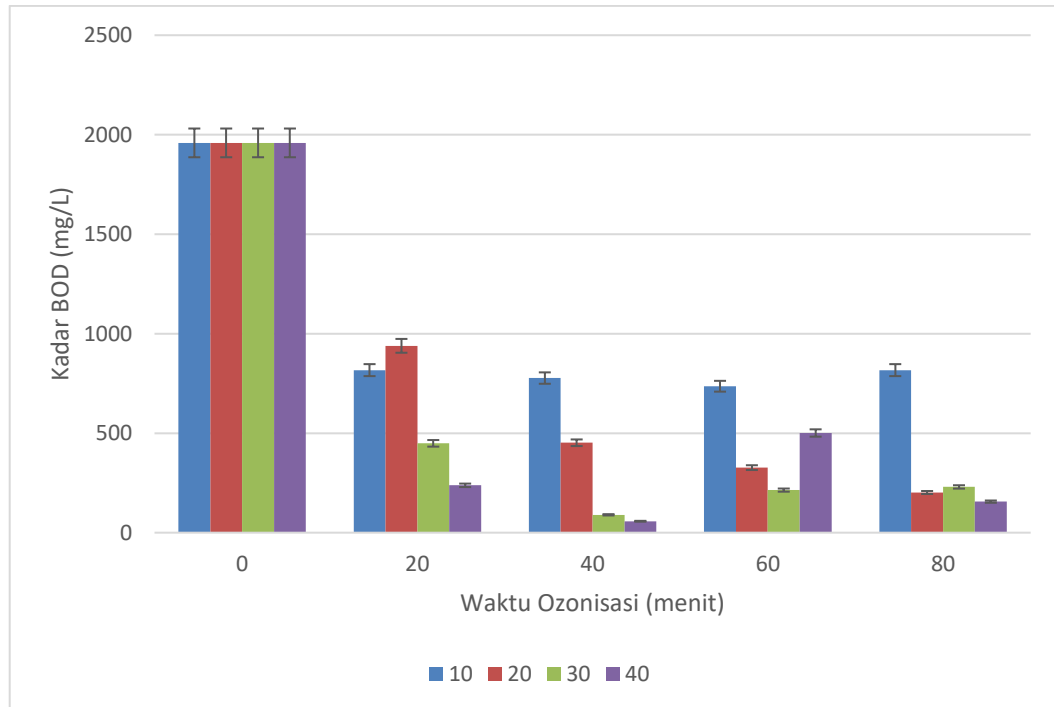
beban organik yang sangat tinggi. (Malahayati & Sofiyana, 2018)

Jika dilihat tabel data perhitungan BOD pada lampiran 1, penurunan BOD pada variasi H_2O_2 10 ml mengalami fluktuasi. Dimulai dari waktu ozonisasi 20 menit hingga 60 menit, kandungan BOD menunjukkan tren penurunan, sedangkan pada waktu ozonisasi 80 menit, kandungan BOD sedikit meningkat. Namun secara keseluruhan pada variasi H_2O_2 10 ml ini menunjukkan tren penurunan kandungan BOD yang baik walaupun belum memenuhi baku mutu.

Pada variasi H_2O_2 20 ml terjadi penurunan BOD yang menunjukkan tren penurunan yang konsisten. Dimulai dari waktu ozonisasi 20 menit hingga 80 menit, kandungan BOD terus menerus turun walaupun belum memenuhi baku mutu. Namun secara keseluruhan pada variasi H_2O_2 20 ml ini menunjukkan tren penurunan kandungan BOD yang baik.

Sama dengan variasi H_2O_2 10 ml, pada variasi H_2O_2 30 ml terjadi penurunan BOD yang mengalami fluktuasi. Dimulai dari waktu ozonisasi 20 menit hingga 80 menit tidak menunjukkan tren penurunan yang konsisten, kandungan BOD naik turun di tiap variasi waktunya. Namun pada waktu ozonisasi 40 menit, kandungan BOD telah memenuhi baku mutu. Secara keseluruhan pada variasi H_2O_2 30 ml ini memiliki tren yang tidak konsisten.

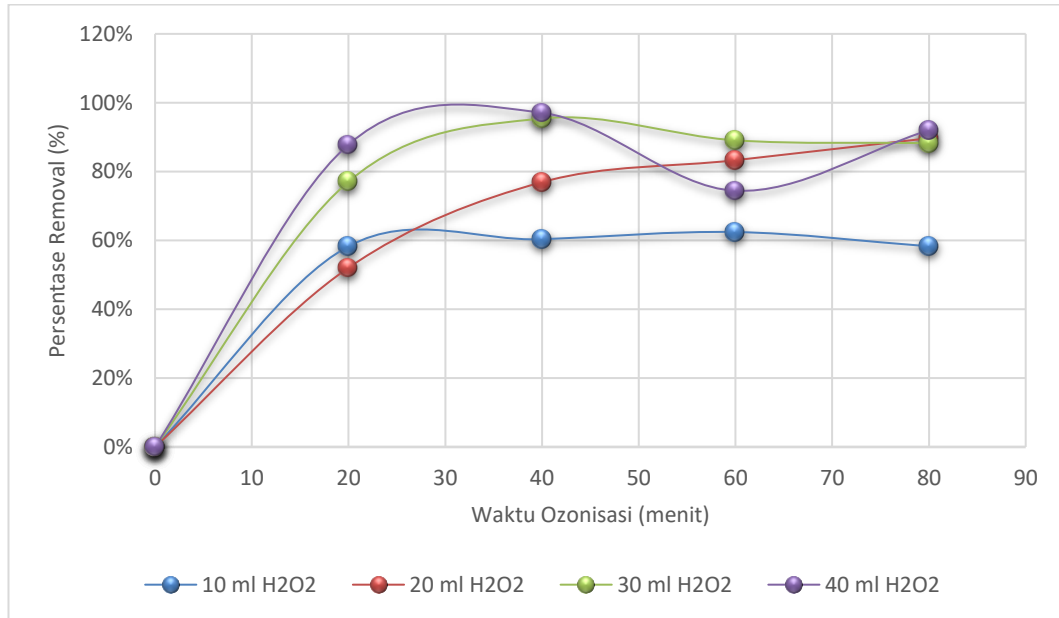
Begitu juga dengan variasi H_2O_2 40 ml, penurunan BOD mengalami fluktuasi. Sama dengan variasi H_2O_2 30 ml, pada variasi H_2O_2 40 ml ini juga dimulai dari waktu ozonisasi 20 menit hingga 80 menit tidak menunjukkan tren penurunan yang konsisten, kandungan BOD naik turun di tiap variasi waktunya. Namun pada waktu ozonisasi 40 menit, kandungan BOD turun drastis hingga memenuhi baku mutu. Secara keseluruhan pada variasi H_2O_2 40 ml ini memiliki tren yang tidak konsisten.



Gambar 4.2 Pengaruh AOP Kombinasi H₂O₂ Terhadap BOD

Dapat dilihat pada grafik 4.2, penurunan BOD terdapat yang konsisten tren penurunannya dan terdapat pula yang mengalami fluktuasi. Jika dilihat dari data penurunan kandungan BOD, terdapat penurunan paling drastis dan memenuhi baku mutu yaitu pada variasi H₂O₂ 30 ml dengan waktu ozonisasi 40 menit dan pada variasi H₂O₂ 40 ml dengan waktu ozonisasi 40 menit. Penyisihan BOD ini menandakan bahwa efisiensi proses pengolahan tidak berlangsung secara konsisten. Salah satu penyebab utama adalah sifat ozon yang tidak stabil. Ozon mudah terdekomposisi dalam kondisi lingkungan tertentu, terutama ketika terpapar suhu tinggi, cahaya, atau senyawa pengganggu lainnya. Ketidakstabilan ini menyebabkan produksi radikal hidroksil sebagai agen oksidator utama dalam proses AOP menjadi tidak merata sehingga efektivitas degradasi senyawa organik dapat berubah-ubah (Fajri R et al., 2017). Senyawa H₂O₂ diduga memiliki potensi sebagai senyawa pengganggu dalam proses pengukuran BOD, terutama jika tidak terdegradasi sepenuhnya. Keberadaan residu H₂O₂ dalam sampel dapat menyebabkan hasil pengukuran BOD menjadi tidak akurat, karena H₂O₂ sendiri dapat bereaksi dengan senyawa organik atau mikroorganisme, yang seharusnya menjadi indikator dalam pengukuran BOD. Oleh karena itu, penambahan H₂O₂ dalam proses oksidasi lanjutan seperti AOP perlu dikontrol dengan tepat. Dosis

H₂O₂ yang digunakan harus dioptimalkan agar cukup untuk menghasilkan radikal hidroksil (OH•) secara efektif, namun tidak berlebih hingga meninggalkan residu yang mengganggu proses biologis (Sururi et al., 2014).



Gambar 4.3 Persentase Removal Pengaruh AOP terhadap BOD

Jika dilihat pada grafik 4.3, persentase removal pada penurunan kandungan BOD dengan AOP cukup signifikan jika dibandingkan tanpa pengolahan. Namun, pada pengolahannya, terdapat data yang menunjukkan tren penurunan yang konsisten dan ada pula yang mengalami fluktuasi.

4.4 Pengaruh AOP terhadap COD

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kandungan COD yang terkandung pada air lindi sebelum dan sesudah diterapkan metode AOP. COD merepresentasikan jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi senyawa organik dalam air limbah secara kimiawi. Nilai COD memberikan gambaran seberapa besar beban pencemar organik yang terdapat dalam air, di mana semakin tinggi konsentrasi senyawa organik, maka semakin besar pula kebutuhan oksigen untuk proses degradasi melalui reaksi oksidasi. (Rahmayanti et al., 2022)

Mekanisme penyisihan COD dalam proses ozonasi pada dasarnya memiliki prinsip kerja yang serupa dengan mekanisme penyisihan BOD, dengan melibatkan dua jenis reaksi utama yaitu reaksi langsung dan reaksi tidak langsung. Pada reaksi

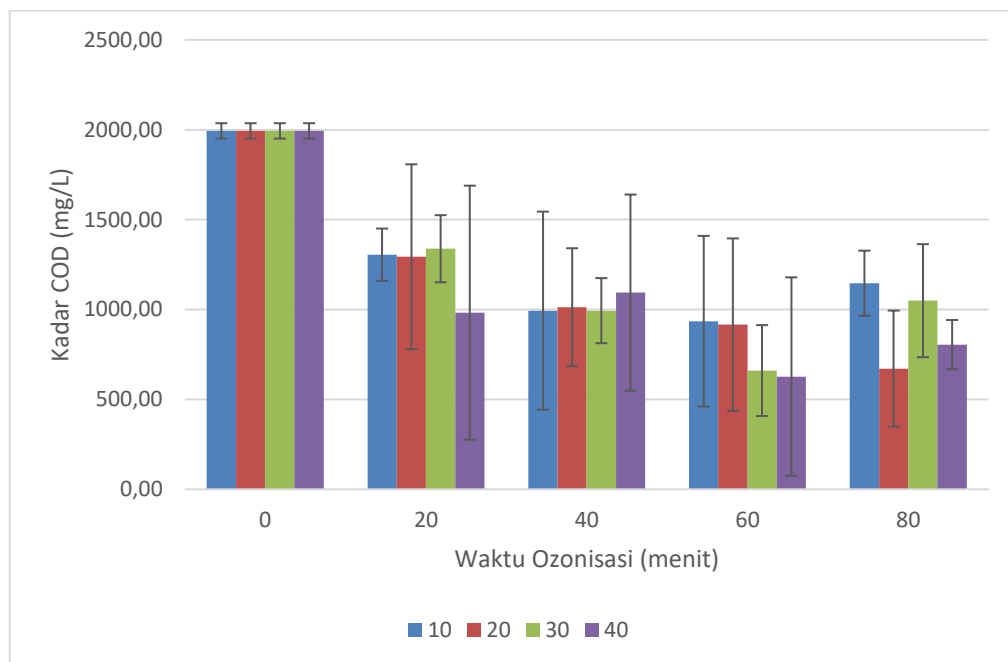
langsung, molekul ozon (O_3) bereaksi secara langsung dengan senyawa pencemar yang terdapat dalam lindi. Reaksi ini bersifat selektif, artinya ozon hanya bereaksi dengan jenis senyawa tertentu, dan berlangsung dengan laju reaksi yang relatif lambat. Meskipun demikian, reaksi langsung ini tetap berperan penting dalam mengurangi sebagian kandungan COD, terutama dari senyawa organik tak jenuh dan aromatik. Di sisi lain, reaksi tidak langsung melibatkan pembentukan radikal hidroksil ($OH\bullet$) yang dihasilkan dari dekomposisi ozon. Radikal hidroksil memiliki daya oksidasi yang jauh lebih tinggi dibanding ozon itu sendiri dan bersifat non-selektif, sehingga mampu mengoksidasi berbagai jenis senyawa organik kompleks dalam air lindi secara lebih cepat dan efisien. Kombinasi kedua mekanisme ini membuat proses ozonasi menjadi metode yang efektif dalam menurunkan kadar COD, terutama dalam air limbah yang mengandung senyawa-senyawa resisten terhadap biodegradasi (Fajri R et al., 2017). Dari pengujian, nilai COD rata-rata masih belum memenuhi baku mutu, meskipun AOP mampu menurunkan kadar COD secara signifikan, diperlukan proses lanjutan untuk memastikan hasil akhir memenuhi baku mutu yang ditetapkan.

Jika dilihat tabel data perhitungan COD pada lampiran 1, penurunan konsentrasi COD pada variasi H_2O_2 10 ml menunjukkan pola yang berfluktuasi. Pada waktu ozonisasi 20 menit hingga 60 menit, terjadi tren penurunan COD secara bertahap, yang mencerminkan efektivitas proses oksidasi dalam menguraikan senyawa organik. Namun, pada durasi 80 menit, kadar COD justru mengalami sedikit peningkatan. Meskipun demikian, secara keseluruhan, penggunaan variasi H_2O_2 10 mL tetap menunjukkan tren penurunan COD yang cukup baik, namun hasil akhir masih belum memenuhi baku mutu yang ditetapkan.

Sedangkan pada variasi H_2O_2 20 ml penurunan konsentrasi COD menunjukkan tren penurunan yang konsisten. Dimulai dari waktu ozonisasi 20 menit hingga 80 menit, terjadi tren penurunan COD secara bertahap, yang mencerminkan efektivitas proses oksidasi dalam menguraikan senyawa organik. Secara keseluruhan, walaupun belum memenuhi baku mutu yang ditetapkan, penggunaan variasi H_2O_2 20 mL tetap menunjukkan tren penurunan COD yang cukup baik.

Sama dengan variasi H₂O₂ 10 ml, penurunan konsentrasi COD pada variasi H₂O₂ 30 ml menunjukkan pola yang berfluktuasi. Pada waktu ozonisasi 20 menit hingga 60 menit, terjadi tren penurunan COD secara bertahap, yang mencerminkan efektivitas proses oksidasi dalam menguraikan senyawa organik. Namun, pada durasi 80 menit, kadar COD justru mengalami peningkatan yang signifikan. Secara keseluruhan, penggunaan variasi H₂O₂ 30 ml tetap menunjukkan tren penurunan COD yang cukup baik, namun hasil akhir masih belum memenuhi baku mutu yang ditetapkan.

Begitu juga pada variasi H₂O₂ 40 ml, penurunan konsentrasi COD menunjukkan pola yang berfluktuasi. Disetiap waktu ozonisasi mengalami penurunan dan peningkatan nilai COD. Pada variasi ini, efektivitas proses oksidasi dalam menguraikan senyawa organik tidak stabil. Secara keseluruhan, penggunaan variasi H₂O₂ 40 mL belum memenuhi baku mutu yang telah ditetapkan.

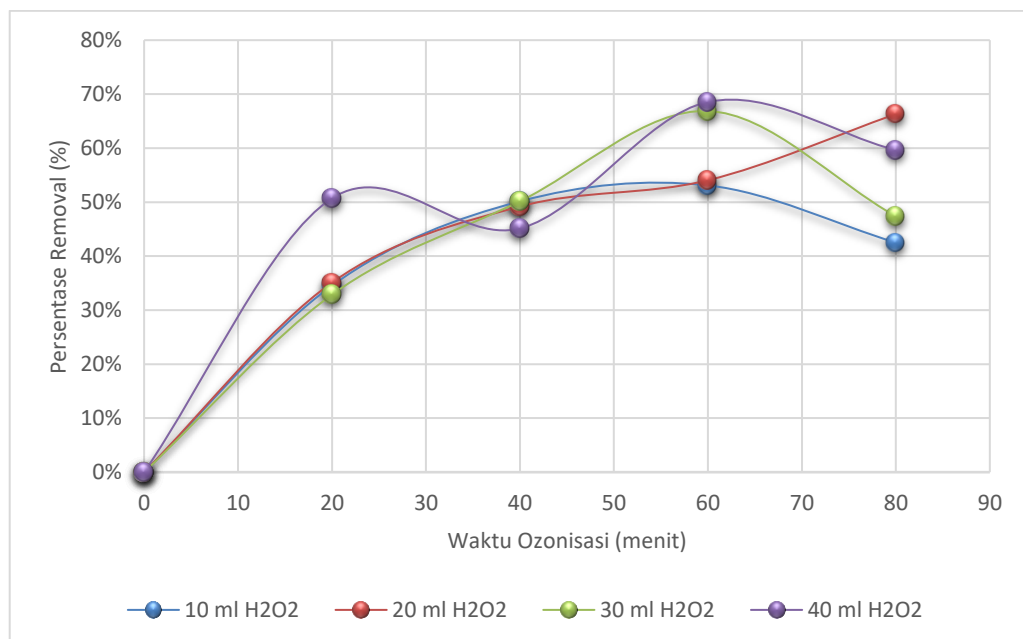


Gambar 4.4 Pengaruh AOP Kombinasi H₂O₂ Terhadap COD

Berdasarkan grafik 4.4, pola penurunan COD menunjukkan dua kecenderungan, yaitu tren penurunan yang konsisten dan mengalami fluktuasi. Dari data yang tersedia, penurunan COD paling signifikan yaitu pada variasi H₂O₂ sebesar 20 ml dengan waktu ozonisasi 80 menit, variasi H₂O₂ 30 ml dan 40 ml, masing-masing pada waktu ozonisasi selama 60 menit. Walaupun hasil akhir belum

memenuhi baku mutu, namun penurunan pada ketiga variasi tersebut cukup signifikan. Ketidakkonsistenan hasil penyisihan menunjukkan bahwa efisiensi proses AOP tidak berlangsung secara stabil.

Secara keseluruhan, proses penyisihan COD masih belum mencapai hasil yang maksimal dan menunjukkan pola fluktuatif. Kondisi ini erat kaitannya dengan sifat ozon yang sangat reaktif namun tidak stabil di dalam air. Ozon mudah terdekomposisi, terutama dalam kondisi tertentu, dan menghasilkan radikal bebas seperti radikal hidroksil ($\text{OH}\cdot$) yang memulai reaksi oksidasi lanjutan terhadap senyawa organik. Secara umum, tren penurunan COD dalam limbah mengikuti dua tahapan reaksi. Tahap pertama adalah fase penurunan cepat, di mana laju reaksi berlangsung sangat tinggi akibat tingginya konsentrasi senyawa organik yang mudah teroksidasi. Pada tahap ini, COD dapat berkurang secara signifikan dalam waktu singkat. Namun, setelah itu proses memasuki tahap kedua, yaitu fase perlambatan reaksi, yang ditandai dengan menurunnya efisiensi oksidasi. Hal ini disebabkan oleh terbentuknya senyawa antara seperti karbon organik yang bersifat lebih stabil, sehingga lebih sulit diurai oleh radikal oksidatif. Hal ini menunjukkan meskipun AOP efektif di awal proses, optimalisasi parameter diperlukan agar proses lanjutan tetap berjalan efisien dan hasil akhir dapat memenuhi baku mutu (Estikarini et al., 2016).



Gambar 4.5 Persentase Removal Pengaruh AOP terhadap COD

Jika dilihat pada grafik 4.5, persentase removal pada penurunan kandungan COD dengan AOP cukup signifikan jika dibandingkan tanpa pengolahan. Namun, pada pengolahannya, terdapat data yang menunjukkan tren penurunan yang konsisten dan ada pula yang mengalami fluktuasi.

4.5 Pengaruh AOP terhadap TSS

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kandungan TSS yang terkandung pada air lindi sebelum dan sesudah diterapkan metode AOP. Konsentrasi TSS yang tinggi dalam air dapat menurunkan kejernihan perairan secara signifikan, sehingga menghambat penetrasi cahaya matahari ke lapisan bawah. Kondisi ini berdampak langsung pada proses fotosintesis organisme autotrof seperti fitoplankton yang sangat bergantung pada ketersediaan cahaya. Terhambatnya aktivitas fotosintesis akan menurunkan produksi oksigen terlarut (DO) di dalam air, yang pada akhirnya dapat mengganggu keseimbangan ekosistem perairan serta menurunkan kualitas lingkungan bagi organisme akuatik lainnya (Malahayati & Sofiyana, 2018).

Pada penelitian (Estikarini et al., 2016), terdapat kutipan penelitian Isyuniarto dkk, yaitu disebutkan bahwa peningkatan efisiensi penyisihan TSS disebabkan oleh adanya interaksi langsung antara radikal hidroksil ($\text{OH}\cdot$) dan senyawa organik dalam air limbah. Radikal hidroksil yang sangat reaktif ini memiliki kemampuan tinggi untuk menabrak dan mengoksidasi partikel organik, sehingga mampu menurunkan konsentrasi zat pencemar secara signifikan, termasuk partikel tersuspensi. Namun, ketika persentase penyisihan TSS menurun, kondisi ini mengindikasikan bahwa proses oksidasi tidak berlangsung secara optimal. Penurunan efisiensi ini dapat terjadi karena O_3 , sebagai salah satu sumber pembentukan $\text{OH}\cdot$, memiliki sifat kimia yang tidak stabil. Ketidakstabilan ini menyebabkan ozon cenderung mencari elektron untuk mencapai kestabilannya, sehingga jika tidak terdapat cukup senyawa target yang reaktif di dalam limbah, proses oksidasi tidak berjalan maksimal.

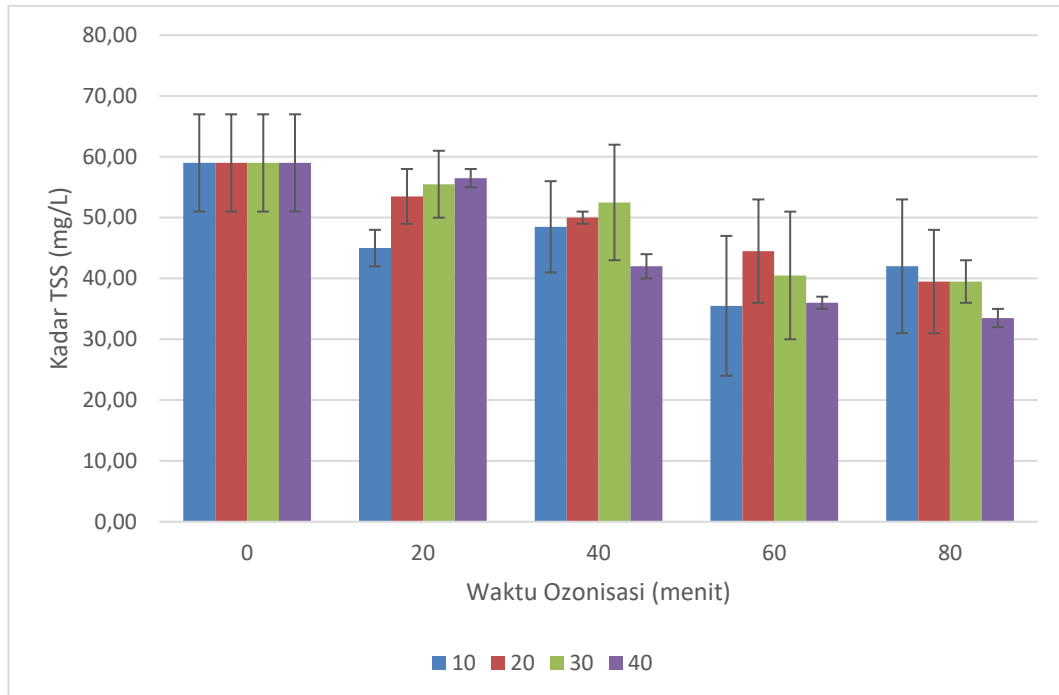
Jika dilihat tabel data perhitungan TSS pada lampiran 1, penurunan konsentrasi TSS pada variasi H_2O_2 10 ml menunjukkan pola yang berfluktuasi. Disetiap waktu ozonisasi mengalami penurunan dan peningkatan nilai TSS. Pada variasi ini, efektivitas proses oksidasi dalam menguraikan partikel tersuspensi tidak stabil. Walaupun sebelum diolah, kandungan TSS pada air lindi sudah memenuhi

baku mutu yang ditetapkan, namun akan lebih baik jika setelah melalui proses pengolahan, konsentrasi TSS dapat ditekan menjadi lebih rendah. Secara keseluruhan, penggunaan variasi H₂O₂ 10 ml menunjukkan ketidakstabilan penurunan kandungan TSS nya.

Sedangkan pada variasi H₂O₂ 20 ml penurunan konsentrasi TSS menunjukkan pola konsisten. Dimulai dari waktu ozonisasi 20 menit hingga 80 menit, terjadi tren penurunan TSS secara bertahap, yang mencerminkan efektivitas proses oksidasi dalam menguraikan partikel tersuspensi. Walaupun sebelum diolah, kandungan TSS pada air lindi sudah memenuhi baku mutu yang ditetapkan, namun akan lebih baik jika setelah melalui proses pengolahan, konsentrasi TSS dapat ditekan menjadi lebih rendah. Secara keseluruhan, penggunaan variasi H₂O₂ 20 ml menunjukkan tren penurunan TSS yang cukup baik.

Sama halnya dengan variasi H₂O₂ 30 ml, penurunan konsentrasi TSS menunjukkan pola konsisten. Dimulai dari waktu ozonisasi 20 menit hingga 80 menit, terjadi tren penurunan TSS secara bertahap, yang mencerminkan efektivitas proses oksidasi dalam menguraikan partikel tersuspensi. Secara keseluruhan, penggunaan variasi H₂O₂ 30 ml menunjukkan tren penurunan TSS yang cukup baik.

Begitu juga dengan variasi H₂O₂ 40 ml, terjadi penurunan konsentrasi TSS yang menunjukkan pola konsisten. Sama dengan variasi H₂O₂ 20 ml dan H₂O₂ 30 ml, dimulai dari waktu ozonisasi 20 menit hingga 80 menit, terjadi tren penurunan TSS secara bertahap, yang mencerminkan efektivitas proses oksidasi dalam menguraikan partikel tersuspensi. Secara keseluruhan, penggunaan variasi H₂O₂ 40 ml menunjukkan tren penurunan TSS yang cukup baik.

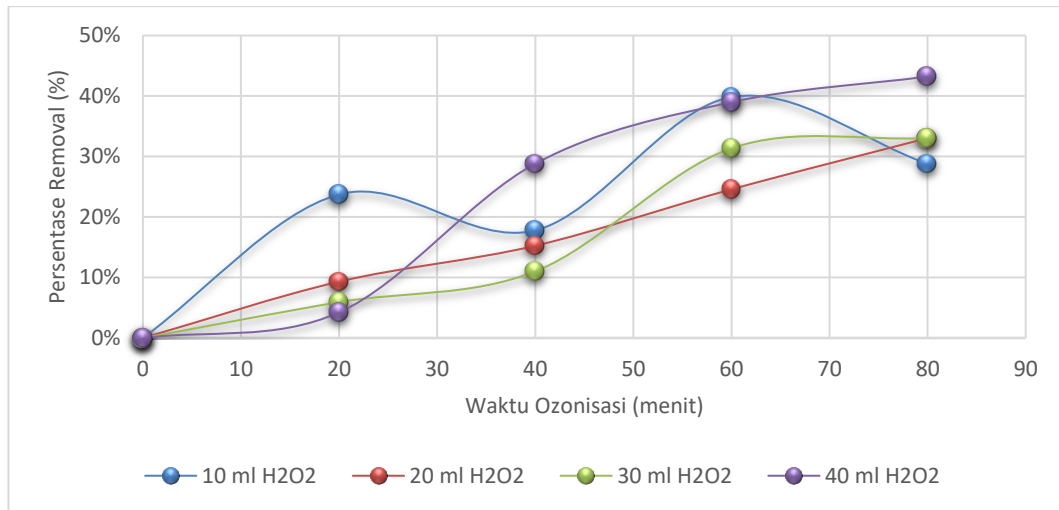


Gambar 4.6 Pengaruh AOP Kombinasi H₂O₂ Terhadap TSS

Berdasarkan grafik 4.6, pola penurunan TSS menunjukkan dua kecenderungan, yaitu tren penurunan yang konsisten dan mengalami fluktuasi. Namun pada penyisihan kandungan TSS ini dominan lebih konsisten pemurunannya dibandingkan dengan BOD dan COD. Dari data yang tersedia, penurunan TSS paling signifikan yaitu pada variasi H₂O₂ sebesar 10 ml dengan waktu ozonisasi 60 menit, variasi H₂O₂ 40 ml dengan waktu ozonisasi 60 menit dan 80 menit. Kandungan TSS pada air lindi sebelum diolah sudah memenuhi baku mutu yang ditetapkan, namun akan lebih baik jika setelah melalui proses pengolahan, konsentrasi TSS dapat ditekan menjadi lebih rendah.

Walaupun pada penurunan kandungan TSS ini dominan lebih konsisten namun ada beberapa variasi yang masih mengalami fluktuasi. Saat terjadi penurunan, ini disebabkan oleh keberadaan radikal hidroksil (OH•) yang bereaksi langsung dengan partikel organik tersuspensi dalam air limbah, sehingga proses oksidasi berlangsung secara efektif. Namun, saat kandungan TSS mengalami peningkatan, kondisi ini mengindikasikan bahwa ozon (O₃) belum sepenuhnya bereaksi dengan senyawa organik lainnya akibat sifat ozon yang tidak stabil dan cenderung mudah terurai sebelum membentuk radikal hidroksil secara optimal. Saat terjadi penurunan kembali setelah peningkatan, hal ini menunjukkan bahwa

pada titik tersebut telah terbentuk jumlah radikal hidroksil yang lebih banyak, sehingga proses degradasi terhadap senyawa pencemar, termasuk partikel tersuspensi, dapat berlangsung lebih efektif. Fluktuasi ini menunjukkan bahwa efektivitas AOP sangat bergantung pada kestabilan reaksi dan waktu paparan yang tepat (Indah Dianawati et al., 2017).



Gambar 4.7 Persentase Removal Pengaruh AOP terhadap TSS

Jika dilihat pada grafik 4.7, persentase removal pada penurunan kandungan TSS dengan AOP cukup signifikan jika dibandingkan tanpa pengolahan. Namun, pada pengolahannya, terdapat data yang menunjukkan tren penurunan yang konsisten dan ada pula yang mengalami fluktuasi.

4.6 Efektivitas AOP Kombinasi Ozon (O_3) dan Hidrogen Peroksida (H_2O_2) pada Air Lindi

Penerapan metode AOP terbukti cukup efektif dalam menurunkan kandungan pencemar pada air lindi, meskipun hasil penurunan antar parameter bervariasi. Efektivitas tertinggi dicapai pada parameter BOD, dengan penurunan mencapai 97%. Hal ini menunjukkan bahwa senyawa organik yang mudah terurai secara biologis dalam air lindi dapat dioksidasi secara efisien oleh radikal hidroksil yang dihasilkan dari kombinasi ozon dan hidrogen peroksida. Namun, meskipun terdapat penurunan yang konsisten pada sebagian besar variasi, beberapa hasil tetap

mengalami fluktuasi, yang kemungkinan besar dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara dosis oksidator, waktu paparan, dan karakteristik awal air lindi.

Pada parameter BOD, hasil pengolahan menunjukkan bahwa dua kombinasi perlakuan yaitu pada dosis H_2O_2 30 ml dan 40 ml dengan waktu ozonisasi 40 menit mampu menurunkan konsentrasi BOD hingga berada di bawah ambang batas baku mutu. Hal ini mengindikasikan bahwa kombinasi AOP dengan waktu reaksi yang cukup dan dosis oksidator yang tepat dapat secara signifikan menurunkan beban organik dalam air lindi. Penurunan BOD ini penting karena menggambarkan keberhasilan dalam menurunkan senyawa-senyawa organik yang dapat menyebabkan pencemaran lingkungan apabila dibuang langsung ke badan air.

Sementara itu, pada parameter COD, hasil menunjukkan adanya penurunan yang cukup signifikan meskipun belum memenuhi standar baku mutu. Kombinasi perlakuan dengan dosis H_2O_2 20 - 40 ml dengan waktu ozonisasi 60 - 80 menit menunjukkan penurunan COD hingga mencapai kisaran 627 - 671 mg/l. Hal ini mengindikasikan bahwa AOP cukup efektif dalam menguraikan senyawa organik kompleks dan non-biodegradable, meskipun diperlukan optimasi lanjutan untuk meningkatkan efisiensi degradasi hingga memenuhi standar yang ditetapkan.

Pada parameter TSS, meskipun air lindi telah memenuhi baku mutu sebelum diolah, penelitian ini menyoroti kemampuan AOP dalam mengurangi partikel tersuspensi. Beberapa kombinasi perlakuan menunjukkan penurunan TSS hingga mencapai 33,5 mg/l. Penurunan ini penting dalam konteks efisiensi keseluruhan sistem pengolahan, karena partikel tersuspensi dapat mengganggu proses lanjutan seperti filtrasi atau desinfeksi. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa metode AOP memiliki potensi besar untuk diterapkan sebagai teknologi pengolahan lanjutan dalam menangani kompleksitas karakteristik air lindi di TPA Piyungan.

Efektivitas AOP yang menggabungkan ozon dan hidrogen peroksida sangat dipengaruhi oleh interaksi antara dosis reaktan dan durasi waktu reaksi. Ozon sebagai oksidator kuat, mampu bereaksi langsung dengan kontaminan atau menghasilkan radikal hidroksil ($OH\bullet$) ketika dikombinasikan dengan H_2O_2 . Radikal hidroksil inilah yang memiliki potensi tinggi untuk mendegradasi senyawa organik kompleks yang sulit terurai secara biologis. Radikal hidroksil dikenal memiliki

tingkat selektivitas yang rendah terhadap berbagai spesies yang terdapat di dalam air. Artinya, radikal ini cenderung bereaksi dengan hampir semua senyawa yang dijumpainya tanpa membedakan jenisnya. Namun, proses dekomposisi ozon dalam menghasilkan radikal hidroksil dapat terhambat apabila terdapat spesies tertentu yang mampu menghentikan reaksi berantai radikal dengan cara bereaksi langsung dengan radikal hidroksil. Spesies tersebut disebut sebagai penghambat radikal (*radical scavenger*), karena keberadaannya dapat membatasi bahkan menonaktifkan peran radikal bebas terhadap senyawa target yang seharusnya diuraikan (Trapido, n.d.).

Sebagai contoh, ion bikarbonat (HCO_3^-) dan karbonat (CO_3^{2-}) sering ditemukan dalam air alami maupun limbah, dan keduanya berfungsi sebagai scavenger radikal hidroksil. Reaksi antara $\text{OH}\cdot$ dengan ion tersebut menghasilkan radikal karbonat ($\text{CO}_3\cdot^-$) yang memiliki reaktivitas jauh lebih rendah dibandingkan $\text{OH}\cdot$. Akibatnya, efisiensi AOP menurun karena sebagian besar radikal hidroksil “terbuang” dalam reaksi samping (Trapido, n.d.).

Dalam konteks air lindi TPA Piyungan, yang mengandung campuran senyawa mudah dan sukar terdegradasi, sinergi antara ozon dan H_2O_2 menjadi kunci keberhasilan dalam meningkatkan efisiensi pengolahan. Fluktuasi hasil pada beberapa parameter, seperti COD dan TSS, menunjukkan bahwa proses AOP masih sangat bergantung pada kondisi operasional yang tepat. Oleh karena itu, efektivitas AOP sangat dipengaruhi oleh kondisi matriks air, terutama kandungan ion-ion penghambat tersebut. Untuk mengatasi hal ini, diperlukan pengaturan pH, dosis ozon atau H_2O_2 yang tepat, serta pemilihan kombinasi AOP yang sesuai agar produksi radikal hidroksil tetap optimal dan tidak didominasi oleh reaksi samping yang kurang efektif.

Di sisi lain, efektivitas metode AOP juga memiliki keuntungan dalam aspek lingkungan. Berbeda dengan beberapa metode fisik atau kimia lainnya, AOP tidak menghasilkan lumpur aktif atau produk samping berbahaya dalam jumlah besar. Oleh sebab itu, penerapan teknologi ini cenderung lebih ramah lingkungan dan berpotensi mengurangi beban pengolahan lanjutan. Terlebih lagi, fleksibilitas sistem AOP memungkinkan penyesuaian dengan kondisi air lindi yang berbeda. Dengan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa metode AOP kombinasi ozon dan

hidrogen peroksida merupakan alternatif yang menjanjikan untuk pengolahan air lindi, walaupun masih diperlukan pengembangan dan optimasi untuk memenuhi semua baku mutu secara konsisten.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah pembahasan hasil penelitian, adapun kesimpulan pada penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Karakteristik awal air lindi TPA Piyungan memiliki kandungan BOD sebesar 1959 mg/l, kandungan COD sebesar 1993,67 mg/l, dan kandungan TSS sebesar 59 mg/l.
2. Penerapan metode AOP pada air lindi cukup efektif. Pada parameter BOD, efektivitas penurunannya mencapai 97% dengan nilai BOD turun hingga 57,4 mg/l, pada parameter COD efektivitas penurunannya mencapai 69% dengan nilai COD turun hingga 627 mg/l, dan pada parameter TSS efektivitas penurunannya mencapai 43% dengan nilai TSS turun hingga 33,5 mg/l. Dengan hasil ini, didapat bahwa pada parameter BOD dan TSS sudah memenuhi baku mutu, sedangkan parameter COD belum memenuhi baku mutu.
3. Pada penerapan metode AOP kombinasi O_3 dan H_2O_2 , didapat dosis optimum pada tiap parameter. Pada parameter BOD, dosis optimum yaitu pada variasi H_2O_2 40 ml dengan waktu ozonisasi 40 menit, pada parameter COD, dosis optimum yaitu pada variasi H_2O_2 40 ml dengan waktu ozonisasi 60 menit, dan pada parameter TSS, dosis optimum yaitu pada variasi H_2O_2 40 ml dengan waktu ozonisasi 80 menit.

5.2 Saran

Merujuk pada temuan dan hasil analisis yang diperoleh dalam penelitian ini, maka saran-saran berikut disampaikan sebagai bahan pertimbangan ke depan :

1. Menentukan kembali variasi waktu dan dosis H_2O_2 yang lebih optimal dalam pengolahan air limbah.
2. Menerapkan metode AOP pada *outlet* IPL TPA Piyungan guna memperoleh gambaran perbedaan efektivitas pengolahan IPL dibandingkan dengan hasil pada *inlet*.
3. Disarankan untuk membuat tutup reaktor AOP yang lebih kedap agar ozon yang dikeluarkan oleh *ozon generator* tidak lepas ke lingkungan bebas.

DAFTAR PUSTAKA

- Astuti, F. A., Syafrudin, S., & Susilowati, I. (2023). Kajian Status Mutu Air Sungai Akibat Buangan Air Lindi TPA Piyungan di Kabupaten Bantul. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(4), 881–887. <https://doi.org/10.14710/jil.21.4.881-887>
- Chuango, L., & Sembiring, T. (2013). Penggunaan Sinar UV dan Hidrogen Peroksida Untuk Menurunkan COD, TSS dan TDS Air Buangan Pabrik Oleokimia. *Jurnal Saintia Kimia*, 1(2).
- Dari, H. W., & Suhartini. (2024). Dampak Pengolahan Air Lindi terhadap Kualitas Air Sungai dan Sumur di Sekitar TPA Regional Piyungan Yogyakarta. *Bioscientist: Jurnal Ilmiah Biologi*, 12(1), 71. <https://doi.org/10.33394/bioscientist.v12i1.9601>
- Estikarini, H. D., Hadiwidodo, M., & Luvita, V. (2016). Penurunan Kadar COD dan TSS pada Limbah Tekstil Dengan Metode Ozonisasi. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 5.
- Fadiyah, M. A., Sururi, M. R., & Ainun, S. (2017). *Advanced Oxidation Process (AOP) dengan Variasi Debit Udara*.
- Fajri R, 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). In *Jurnal Teknik Lingkungan* (Vol. 6, Issue 1).
- Fazdli, D. (2023). *Pengolahan Air Lindi TPA Gampong Jawa Banda Aceh Dengan Menggunakan Proses Trickling Filter dan Rotating Biological Contactor (RBC)*. Universitas Islam Negeri Ar-Raniry.
- Firdaus, M. A., Suherman, S. D. M., Ryansyah, M. H. D., & Sari, D. A. (2020). *Teknologi dan Metode Pengolahan Limbah Cair Sebagai Pencegahan Pencemaran Lingkungan*. 5, 232–238.
- Hutomo, N. T. (2011). *Analisa Karakter Timbulan Lindi (pH, COD, BOD dan TSS) dari Berbagai Umur Sampah Perkotaan Menggunakan Kolom Landfill Secara Seri*.
- Indah Dianawati, R., Endah Wahyuningsih, N., & Nur, M. (2017). Efektivitas Ozon Dalam Menurunkan Kadar TSS dan Nilai pH Limbah Cair Rumah Sakit dr.

- Adhyatma, MPH Semarang. *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 5, 2356–3346.
<http://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jkm>
- Kamaludin, A., Yetty Hanurawaty, N., & Ardiani Septiati, Y. (2021). Waktu Kontak Ozon Dalam Penurunan Angka Lempeng TOTAL Bakteri (ALT) Pada Alat Makan di Kantin PT. X Textile Cimahi. *Jurnal Keselamatan, Kesehatan Kerja Dan Lingkungan (JK3L)*, 02(2). <http://jk3l.fkm.unand.ac.id/>
- Kartikasari, I. B., Widyastuti, M., & Hadisusanto, S. (2020). Pengujian Toksisitas Lindi Instalasi Pengolahan Lindi TPA Piyungan pada *Daphnia sp.* dengan Whole Effluent Toxicity. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(2), 297–304.
<https://doi.org/10.14710/jil.18.2.297-304>
- Lutfiyya Haz, F. (n.d.). *Studi Toksisitas Air Sampah (Lindi) Di IPL TPST Piyungan Menggunakan Metode Whole Effluent Toxicity (WET) Dengan Ikan Nila (Oreochromis niloticus) Study Toxicity of Leachate in Wastewater Treatment Plant of TPST Piyungan Using Whole Effluent Toxicity (WET) Method With Nile Tilapia (Oreochromis niloticus)*.
- Malahayati, E. N., & Sofiyana, M. S. (2018). *Prosiding Seminar Nasional VI Hayati 2018 Analisis Kualitas Air Lindi pada Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Sampah Ngegong Kota Blitar Tahun 2018*.
- Marinda, E., & Taruli, C. O. (2022). *Instalasi Pengolahan Lumpur Tinja (Studi Kasus Kota Pariaman, Sumatra Barat)*.
- Nabila, M. L., & Yuniarto, A. (2024). *Kajian Penerapan Metode Advanced Oxidation Process (AOPS) pada Pengolahan Limbah Cair di Indonesia*.
- Nugroho, R., & Ikbal. (2005). *Pengolahan Air Limbah Berwarna Industri Tekstil Dengan Proses AOPs (Vol. 1, Issue 2)*.
- Nur Amalia, A. (2024). *Analisis Kandungan Logam Seng (Zn) dan Kromium (Cr) Pada Mikroplastik di Air Lindi TPA Piyungan Yogyakarta*. Universitas Islam Indonesia.
- Nusa, O. :, Said, I., Dinda, D., Krishumartani, R., Pusat, H., & Lingkungan, T. (2015). *Pengolahan Air Lindi Dengan Proses Biofilter Anaerob-Aerob dan Denitrifikasi*. 8(1).

- Prayitno Susanto, J., Puji Ganefati, S., Muryani, S., & Hani Istiqomah, S. (2004). *Pengolahan Lindi (Leachate) Dari TPA Dengan Sistem Koagulasi-Biofilter Anaerobic*.
- Rachmadhany, H. (2023). *Pemanfaatan Air Lindi TPA Piyungan Yogyakarta Sebagai Pengganti Air Bersih Pada Pembuatan Paving Block*. Universitas Islam Indonesia.
- Raheem, F. A. (2022). *Uji Kandungan Logam Berat Cu, Fe, dan Pb Menggunakan Metode Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) Pada Air Lindi TPA Piyungan, Bantul*.
- Rahmayanti, A., Faradila, R. S., Masrufah, A., Puput, D., Permata, A., Lindi, S. 2022 P., Anggraini, P., & Sari, P. (2022). Pengolahan Lindi Menggunakan Advanced Oxidation Process (AOPs) Berbasis Ozon. *Journal of Research and Technology*, 8(1), 141–148.
- Rohmah, N., & Tri Sugiarto, A. (2008). *Penurunan TS (Total Solid) pada Limbah Cair Industri Perminyakan Dengan Teknologi AOP*. Pusat Penelitian Kalibrasi, Instrumentasi dan Metrologi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.
- Sakinah Irawan, K., Sururi, M. R., & Ainun, S. (2015). Konsentrasi Sisa Ozon pada Pengolahan Lindi TPA Paripurna menggunakan Advanced Oxidation Process (AOP). *Jurnal Rekayasa Lingkungan, Teknik Lingkungan Itenas* |, 3(2).
- Sari, D. F., Sururi, M. R., & Ainun, S. (2017). Penyisihan Kekeruhan dan DHL Lindi dengan Menggunakan Advanced Oxidation Process (AOP) pada Reaktor Kontinu. In *Reka Lingkungan ©Teknik Lingkungan Itenas | No.1 |* (Vol. 5, Issue 1).
- Sekaringgalih, R., Nur, A., & Rachmah, L. (2023). Treatment of The Gelatin Wastewater With Ozone Peroxide Advanced Oxidation Process. In *Jurnal Teknik Sipil* (Vol. 18, Issue 2).
- Sururi, M. R., Ainun, S., & Krisna, A. (2014). Pengolahan Lindi Dengan Ozon dan Proses Oksidasi Lanjut Berbasis Ozon. *Reaktor*, 15(1), 20. <https://doi.org/10.14710/reaktor.15.1.20-26>
- Suwarno, W., Andrio, D., & Asmura, J. (2017). Pengukuran Produktivitas Ozon Sebagai Oksidator Senyawa Organik Pencemar. In *Jom FTEKNIK* (Vol. 4, Issue 2).

- Teguh, D., Cendekia, D., Wulandari, Y. R., Putri, C. E., & Ramandani, A. A. (2024). Advanced oxidation processes technology using the Fenton method in Bakung landfill leachate treatment. *Journal of Natural Sciences and Mathematics Research J. Nat. Scien. & Math. Res*, *10*(2), 148–157. <http://journal.walisongo.ac.id/index.php/jnsmr>
- Trapido, M. (n.d.). *Ozone-Based Advanced Oxidation Processes*. Tallinn University of Technology.
- Wulandari, D. I. (2023). *Efektivitas Kombinasi Reaktor Aerasi dan Spesifik Bakteri Untuk Mendegradasi Polutan Air Limbah Lindi TPA Piyungan*. Universitas Islam Indonesia.
- Yasmin, H. Z. (2023). Efektivitas Kombinasi Konsentrasi Hidrogen Peroksida (H₂O₂) dan Waktu Kontak Sinar Ultraviolet-C Terhadap Penurunan Bakteri Coliform Pada Limbah Cair RS PKU Muhammadiyah Surakarta. *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, *11*(1), 72–82. <https://doi.org/10.14710/jkm.v11i1.34578>

LAMPIRAN

Lampiran 1 - Perhitungan Data Analisis

a. Data Perhitungan Kadar Ozon

Waktu (menit)	Volume Na₂S₂O₃	Kandungan Ozon (g/menit)	Kandungan Ozon (g/jam)
20	42	0,00504	0,3024
40	31	0,00186	0,1116
60	18	0,00072	0,0432
80	11,8	0,00035	0,02124

b. Data Perhitungan BOD

Waktu (menit)	Variasi H2O2							
	10 ml		20 ml		30 ml		40 ml	
	Hasil Uji (mg/l)	Efisiensi (%)	Hasil Uji (mg/l)	Efisiensi (%)	Hasil Uji (mg/l)	Efisiensi (%)	Hasil Uji (mg/l)	Efisiensi (%)
0	59,00 ± 8,00	0%	59,00 ± 8,00	0%	59,00 ± 8,00	0%	59,00 ± 8,00	0%
20	45,00 ± 3,00	24%	53,50 ± 4,50	9%	55,50 ± 5,50	6%	56,50 ± 1,50	4%
40	48,50 ± 7,50	18%	50,00 ± 1,00	15%	52,50 ± 9,50	11%	42,00 ± 2,00	29%
60	35,50 ± 11,50	40%	44,50 ± 8,50	25%	40,50 ± 10,50	31%	36,00 ± 1,00	39%
80	42,00 ± 11,00	29%	39,50 ± 8,50	33%	39,50 ± 3,50	33%	33,50 ± 1,50	43%

c. Data Perhitungan COD

Waktu (menit)	Variasi H2O2							
	10 ml		20 ml		30 ml		40 ml	
	Hasil Uji (mg/l)	Efisiensi (%)	Hasil Uji (mg/l)	Efisiensi (%)	Hasil Uji (mg/l)	Efisiensi (%)	Hasil Uji (mg/l)	Efisiensi (%)
0	1993,67 ± 42,62	0%	1993,67 ± 42,62	0%	1993,67 ± 42,62	0%	1993,67 ± 42,62	0%
20	1304,78 ± 145,52	35%	1293,67 ± 514,14	35%	1338,11 ± 186,72	33%	982,56 ± 706,43	51%
40	993,67 ± 550,86	50%	1012,78 ± 328,11	49%	993,67 ± 180,97	50%	1093,67 ± 545,89	45%
60	935,00 ± 474,54	53%	915,89 ± 479,71	54%	660,33 ± 252,94	67%	627,00 ± 552,04	69%
80	1146,11 ± 181,22	43%	671,44 ± 322,80	66%	1049,22 ± 314,43	47%	804,78 ± 137,02	60%

d. Data perhitungan TSS

Waktu (menit)	Variasi H2O2							
	10 ml		20 ml		30 ml		40 ml	
	Hasil Uji (mg/l)	Efisiensi (%)	Hasil Uji (mg/l)	Efisiensi (%)	Hasil Uji (mg/l)	Efisiensi (%)	Hasil Uji (mg/l)	Efisiensi (%)
0	1959,00 ± 72,20	0%	1959,00 ± 72,20	0%	1959,00 ± 72,20	0%	1959,00 ± 72,20	0%
20	817,00 ± 30,10	58%	939,00 ± 34,70	52%	449,00 ± 16,00	77%	238,00 ± 8,74	88%
40	777,00 ± 28,60	60%	452,00 ± 16,60	77%	89,80 ± 3,33	95%	57,40 ± 2,11	97%
60	736,00 ± 27,20	62%	327,00 ± 12,00	83%	214,00 ± 7,93	89%	501,00 ± 18,40	74%
80	817,00 ± 30,10	58%	202,00 ± 7,40	90%	230,00 ± 8,45	88%	156,00 ± 5,72	92%

Lampiran 2 - Perhitungan Data Analisis

a. Data Mentah BOD

Kode	V Sampel	V titrasi	F	N Na ₂ S ₂ O ₃	C sampel (mg/L)	Fp	C BOD (mg/L)
Blanko (0)	50	1.77	1.0204	0.0249	7.2069	1	0.4343
Blanko (5)	50	1.67	1.0204	0.0248	6.7726		
Blanko Kontrol (0)	50	2.16	1.0204	0.0249	8.7948	1	0.3189
Blanko Kontrol (5)	50	2.09	1.0204	0.0248	8.4759		
AL.095 (0)	50	1.90	1.0204	0.0249	7.7362	200	1958.9
AL.095 (5)	50	0.70	1.0204	0.0248	2.8388		
AL.096 (0)	50	1.88	1.0204	0.0249	7.6547	100	817.2
AL.096 (5)	50	0.88	1.0204	0.0248	3.5688		
AL.097 (0)	50	1.88	1.0204	0.0249	7.6547	100	776.6
AL.097 (5)	50	0.93	1.0204	0.0248	3.7716		
AL.098 (0)	50	1.87	1.0204	0.0249	7.6140	100	736.0
AL.098 (5)	50	0.97	1.0204	0.0248	3.9338		
AL.099 (0)	50	1.81	1.0204	0.0249	7.3697	100	817.0
AL.099 (5)	50	0.81	1.0204	0.0248	3.2849		
AL.100 (0)	50	1.89	1.0204	0.0249	7.6955	100	938.9
AL.100 (5)	50	0.74	1.0204	0.0248	3.0010		
AL.101 (0)	50	1.80	1.0204	0.0249	7.3290	100	451.9
AL.101 (5)	50	1.25	1.0204	0.0248	5.0693		
AL.102 (0)	50	1.79	1.0204	0.0249	7.2883	50	327.3
AL.102 (5)	50	0.99	1.0204	0.0248	4.0149		
AL.103 (0)	50	1.88	1.0204	0.0249	7.6547	50	201.8
AL.103 (5)	50	1.39	1.0204	0.0248	5.6371		
AL.104 (0)	50	1.80	1.0204	0.0249	7.3290	50	449.0
AL.104 (5)	50	0.70	1.0204	0.0248	2.8388		
AL.105 (0)	50	1.75	1.0204	0.0249	7.1254	10	89.8
AL.105 (5)	50	0.65	1.0204	0.0248	2.6360		
AL.106 (0)	50	1.76	1.0204	0.0249	7.1661	25	214.3
AL.106 (5)	50	0.71	1.0204	0.0248	2.8794		
AL.107 (0)	50	1.92	1.0204	0.0249	7.8176	50	230.2
AL.107 (5)	50	1.36	1.0204	0.0248	5.5154		
AL.108 (0)	50	1.90	1.0204	0.0249	7.7362	50	238.3
AL.108 (5)	50	1.32	1.0204	0.0248	5.3532		
AL.109 (0)	50	1.87	1.0204	0.0249	7.6140	10	57.4
AL.109 (5)	50	1.17	1.0204	0.0248	4.7449		
AL.110 (0)	50	1.78	1.0204	0.0249	7.2476	100	500.5
AL.110 (5)	50	1.17	1.0204	0.0248	4.7449		
AL.111 (0)	50	1.80	1.0204	0.0249	7.3290	25	155.6
AL.111 (5)	50	1.04	1.0204	0.0248	4.2177		

a. Data Mentah COD

Variasi H2O2 10 ml						
Waktu (menit)	x(1)	x(2)	x(3)	Rata-Rata	St.Dev	% Removal
0	2011	1935	2035	1993,67	42,62	0%
20	1377,67	1101,67	1435	1304,78	145,52	35%
40	677,67	535	1768,33	993,67	550,86	50%
60	268,33	1335	1201,67	935	474,54	53%
80	1001,67	1401,67	1035	1146,11	181,22	43%
Variasi H2O2 20 ml						
Waktu (menit)	x(1)	x(2)	x(3)	Rata-Rata	St.Dev	% Removal
0	2011	1935	2035	1993,67	42,62	0%
20	644,33	1335	1901,67	1293,67	514,14	35%
40	635	1435	968,33	1012,78	328,11	49%
60	244,33	1168,33	1335	915,89	479,71	54%
80	277,67	1068,33	668,33	671,44	322,80	66%
Variasi H2O2 30 ml						
Waktu (menit)	x(1)	x(2)	x(3)	Rata-Rata	St.Dev	% Removal
0	2011	1935	2035	1993,67	42,62	0%
20	1111	1335	1568,33	1338,11	186,72	33%
40	744,33	1068,33	1168,33	993,67	180,97	50%
60	311	768,33	901,67	660,33	252,94	67%
80	711	968,33	1468,33	1049,22	314,43	47%
Variasi H2O2 40 ml						
Waktu (menit)	x(1)	x(2)	x(3)	Rata-Rata	St.Dev	% Removal
0	2011	1935	2035	1993,67	42,62	0%
20	77,67	1068,33	1801,67	982,56	706,43	51%
40	377,67	1201,67	1701,67	1093,67	545,89	45%
60	44,33	468,33	1368,33	627	552,04	69%
80	611	901,67	901,67	804,78	137,02	60%

b. Data Mentah TSS

Variasi H2O2 10 ml					
Waktu (menit)	x(1)	x(2)	Rata-Rata	St.Dev	% Removal
0	67,00	51,00	59,00	8,00	0%
20	48,00	42,00	45,00	3,00	24%
40	56,00	41,00	48,50	7,50	18%
60	47,00	24,00	36	11,50	40%
80	53,00	31,00	42,00	11,00	29%
Variasi H2O2 20 ml					
Waktu (menit)	x(1)	x(2)	Rata-Rata	St.Dev	% Removal
0	67,00	51,00	59,00	8,00	0%
20	58,00	49,00	53,50	4,50	9%
40	49,00	51,00	50,00	1,00	15%
60	53,00	36,00	44,50	8,50	25%
80	48,00	31,00	39,50	8,50	33%
Variasi H2O2 30 ml					
Waktu (menit)	x(1)	x(2)	Rata-Rata	St.Dev	% Removal
0	67,00	51,00	59,00	8,00	0%
20	61,00	50,00	55,50	5,50	6%
40	62,00	43,00	52,50	9,50	11%
60	51,00	30,00	40,50	10,50	31%
80	43,00	36,00	39,50	3,50	33%
Variasi H2O2 40 ml					
Waktu (menit)	x(1)	x(2)	Rata-Rata	St.Dev	% Removal
0	67,00	51,00	59,00	8,00	0%
20	58,00	55,00	56,50	1,50	4%
40	44,00	40,00	42,00	2,00	29%
60	37,00	35,00	36	1,00	39%
80	35,00	32,00	33,50	1,50	43%

Lampiran 3 - Data Hasil Uji BOD Laboratorium Kualitas Lingkungan



LABORATORIUM KUALITAS LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA



AL.092.476.05.25

HASIL PENGUJIAN

No.	Parameter	Kode Sampel	Keterangan Lokasi	Satuan	Hasil Uji	Metode Uji
1	BOD	AL.095	Sampel A-0	mg/L	1959 ± 72,2	SNI 6989.72-2009
2	BOD	AL.096	Sampel A-1	mg/L	817 ± 30,1	SNI 6989.72-2009
3	BOD	AL.097	Sampel A-2	mg/L	777 ± 28,6	SNI 6989.72-2009
4	BOD	AL.098	Sampel A-3	mg/L	736 ± 27,2	SNI 6989.72-2009
5	BOD	AL.099	Sampel A-4	mg/L	817 ± 30,1	SNI 6989.72-2009
6	BOD	AL.100	Sampel B-1	mg/L	939 ± 34,7	SNI 6989.72-2009
7	BOD	AL.101	Sampel B-2	mg/L	452 ± 16,6	SNI 6989.72-2009
8	BOD	AL.102	Sampel B-3	mg/L	327 ± 12,0	SNI 6989.72-2009
9	BOD	AL.103	Sampel B-4	mg/L	202 ± 7,40	SNI 6989.72-2009
10	BOD	AL.104	Sampel C-1	mg/L	449 ± 16,6	SNI 6989.72-2009
11	BOD	AL.105	Sampel C-2	mg/L	89,8 ± 3,33	SNI 6989.72-2009
12	BOD	AL.106	Sampel C-3	mg/L	214 ± 7,93	SNI 6989.72-2009
13	BOD	AL.107	Sampel C-4	mg/L	230 ± 8,45	SNI 6989.72-2009
14	BOD	AL.108	Sampel D-1	mg/L	238 ± 8,74	SNI 6989.72-2009
15	BOD	AL.109	Sampel D-2	mg/L	57,4 ± 2,11	SNI 6989.72-2009
16	BOD	AL.110	Sampel D-3	mg/L	501 ± 18,4	SNI 6989.72-2009
17	BOD	AL.111	Sampel D-4	mg/L	156 ± 5,72	SNI 6989.72-2009



Yogyakarta, 26 Mei 2025
Kepala Laboratorium
(Signature)
(Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D.)

Hal. 2 dari 2

VALUES | INNOVATION | PERFECTION

www.environment.uii.ac.id
 Email: envirolab@uii.ac.id
 Telp. (0274) 896440 ext: 3223; HP. 0812 2274 2234

Lampiran 4 - Dokumentasi



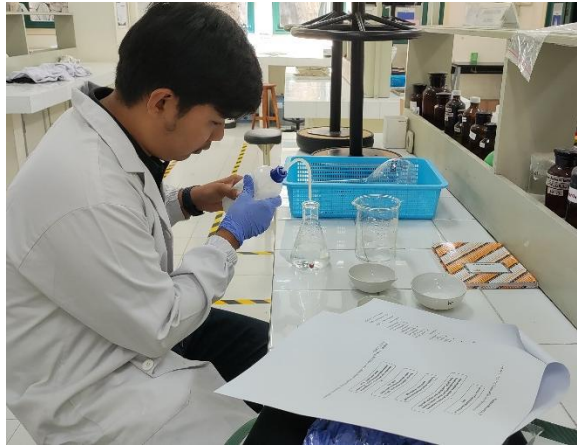
Gambar 1 Inlet IPL TPA Piyungan



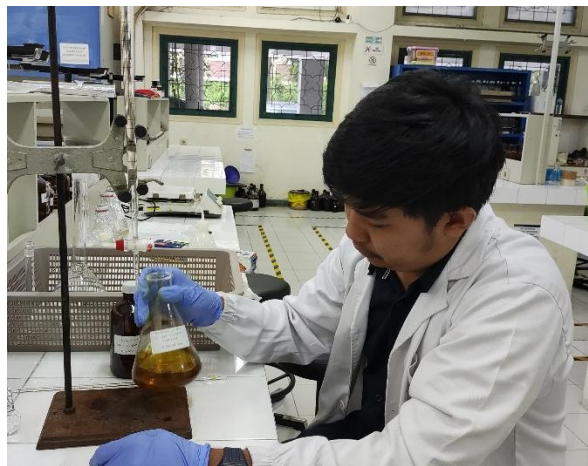
Gambar 2 Pengambilan Sampel Air Lindi TPA Piyungan



Gambar 3 Pengecekan pH Air Lindi



Gambar 4 Pembuatan Larutan Penjerap KI



Gambar 5 Perhitungan Kadar Ozon dengan Titrasi Iodometri



Gambar 6 Instalasi Reaktor AOP



Gambar 7 Proses metode AOP



Gambar 8 Proses Uji COD



Gambar 9 Proses Uji TSS

RIWAYAT HIDUP



Tri Sanjaya merupakan nama lengkap penulis. Penulis lahir pada tanggal 22 Maret 2003 di Dabo Singkep. Penulis merupakan anak ke-3 dari 4 bersaudara dengan ayah Alm. Jimmi AT dan Ibu Hafsah. Penulis memulai pendidikan di SDN 002 Singkep, SMP N 2 Singkep, dan SMA N 2 Singkep.

Setelah lulus, penulis melanjutkan pendidikan Strata-1 (S1) di Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Selama perkuliahan, selain melaksanakan kewajiban perkuliahan akademik, penulis juga aktif pada bidang non-akademik. Penulis aktif dalam kegiatan kepanitiaan dimulai dari *Enviro Champions* 2021 (*Organizing Committee* Ketua Komisi B), *Lintas Lingkungan* 2022 (*Organizing Committee* Divisi Kesehatan), *Lintas Lingkungan* 2023 (*Steering Committee* Divisi Kesehatan). Penulis juga mengikuti beberapa *volunteer* sosial dan lingkungan. Organisasi kemahasiswaan yang pernah diikuti penulis yaitu Lembaga Eksekutif Mahasiswa FTSP UII pada periode 2022-2023 dengan jabatan sebagai Wakil Kepala Bidang Sosial Lingkungan. Penulis telah menyelesaikan kerja praktik di PLN Enjiniring Proyek PLTGU Muaratawar dengan topik Instalasi Pengolahan Air Limbah pada tahun 2024 di Muaratawar, Bekasi.