

TA/TL/2025/2073



JURUSAN  
TEKNIK LINGKUNGAN

## **TUGAS AKHIR**

**Kombinasi Pengolahan Biologis dan Fitoremediasi dalam Mendegradasi Ammonia Pada Pengolahan Air Limbah Lindi**

**Silvanie Amelya**  
**21513178**

**Dosen Pembimbing:**  
**Dr. Joni Aldila Fajri, S.T., M.Eng.**  
**Diah Ayu Prawitasari, S.T., M.T.**

**Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana**  
**Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan**  
**Universitas Islam Indonesia**  
**2025**



DEPARTMENT  
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

## **BACHELOR THESIS**

# **Combination of Biological and Phytoremediation in Degrading Ammonia in Leachate Wastewater Treatment**

**Silvanie Amelya**

**21513178**

**Supervisor:**

**Dr. Joni Aldila Fajri, S.T., M.Eng.**

**Diah Ayu Prawitasari, S.T., M.T.**

**Environmental Engineering Bachelor Program**

**Faculty of Civil Engineering and Planning**

**Universitas Islam Indonesia**

**2025**

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

Kombinasi Pengolahan Biologis dan Fitoremediasi dalam Mendegradasi Ammonia Pada Pengolahan Air Limbah Lindi

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.


Silvanie Amelya

21513178


Tugas akhir ini telah diuji pada tanggal 10 November 2025 dan disetujui oleh:

  
Dr. Joni Ardila Fairi, S.T., M.Eng

(Pembimbing 1)

 11-11-25  
Diah Ayu Prawitasari, S.T., M.T.

(Pembimbing 2)

  
Annisa Nur Lathifah, S.Si., M. Biotech., M.Agr., Ph.D

(Penguji)

Mengesahkan  
Kedua Prodi Teknik Lingkungan Program Sarjana  
 19/11  
Annisa Nur Lathifah, 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, 19 November 2025

Yang membuat pernyataan,

  
Silyani Wulandita  
21513178

## PRAKATA

*Assalamualaikum Warahmatuallah Wabarakatuh.*

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga tugas akhir ini berhasil diselesaikan. Judul Penelitian ini “Seleksi Bakteri Endogenik dan Endofit untuk Bakteri Pengolahan limbah lindi menggunakan floating wetland dalam menurunkan kadar amonia dan warna”. Adapun penyusunan laporan ini merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan program Pendidikan Stara Satu (S1) pada Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

Dalam proses penyusunan laporan tugas akhir ini telah melewati berbagai tahapan sehingga penulis dapat menyelesaikan dengan banyak dukungan dari berbagai pihak. Maka pada kesempatan kali ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

- 1) Allah SWT atas semua nikmat dan kemudahan dalam menjalankan proses penelitian ini.
- 2) Bapak Didi Rudinur, Ibu Tati Yuliati, S.Pd., Mami Susi Susilawati S.FARM., APT., selaku orang tua penulis yang selalu memberikan dukungan, doa, semangat, dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini;
- 3) Feri Aditiansyah, S.Pd., Alfin Nugraha, S.M., dan Raxy Adinata selaku saudara kandung penulis yang senantiasa memberikan dukungan, motivasi dan doa demi kelancaran tugas akhir ini;
- 4) Bapak Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng. selaku Dosen Dosen Pembimbing 1, Ibu Diah Ayu Prawitasari, S.T., selaku Dosen Pembimbing 2 dan Ibu Annisa Nur Lathifah, S. Si., M. Biotech., M.Agr., Ph.D. selaku Dosen Penguji. Yang telah membimbing dan memberikan arahan dan semangat serta kritik, saran, dan penilaian terhadap penulis sejak penulisan proposal tugas akhir hingga tugas akhir ini selesai;
- 5) Al Hayyu Kumala L, Diana Intan Permana, dan Restu Magfirah yang selama ini menjadi teman seperjuangan yang telah memberikan dukungan, semangat, dan kepercayaan selama perkuliahan berlangsung;

7) Para dosen, pengajar, dan laboran yang selama ini telah memberikan ilmu maupun fasilitas yang sangat bermanfaat untuk penulis selama proses menempuh Pendidikan di Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia:

8) Teman-teman Program Studi Teknik Lingkungan Angkatan 2021 yang telah memberikan bantuan selama masa perkuliahan dan Diana Intan, Anisa Utami, Irfan Irsyad, dan Fatur Rachman sebagai teman tim penelitian ini yang telah membantu dari awal penelitian ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan laporan Tugas Akhir ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun serta penulis berharap semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak

Sleman, 10 November 2025



Silvanie Amelya

# Kombinasi Pengolahan Biologis dan Fitoremediasi dalam Mendegradasi Ammonia Pada Pengolahan Air Limbah Lindi

Mahasiswa : Silvanie Amelya  
NIM : 21513178  
Program Studi : Teknik Lingkungan - Program Sarjana  
Pembimbing : Dr. Joni Aldila Fajri, S.T., M.Eng

## Abstrak

Air lindi dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Piyungan memiliki kadar ammonia yang tinggi dan berpotensi mencemari lingkungan jika tidak diolah dengan baik. Pengolahan air lindi secara biologis melalui kombinasi microbial treatment dan fitoremediasi menjadi salah satu solusi alternatif yang ramah lingkungan dan efisien. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji efektivitas kombinasi tanaman *Typha angustifolia* dan konsorsium bakteri endofit (*Bacillus velezensis*, *Bacillus cereus*, dan *Staphylococcus xylosus*) dalam menurunkan kadar ammonia dari air lindi dan mengetahui efektivitas metode kombinasi pengolahan biologis dan fitoremediasi dalam mendegradasi kadar Ammonia. Metode penelitian menggunakan sistem reaktor yang terdiri dari unit anaerobik, aerobik, clarifier, *floating treatment wetland* (FTW), dan *constructed wetland* (CW), baik dengan maupun tanpa penambahan bakteri. Pengujian dilakukan pada tiga variasi konsentrasi air lindi (20%, 50%, dan 100%) selama 63 hari. Parameter yang dianalisis meliputi kadar ammonia, DO, MLSS, SV30, dan suhu, dengan pengukuran ammonia menggunakan spektrofotometer sesuai SNI 06-6989.30-2005. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi fitoremediasi dan microbial treatment mampu menurunkan kadar ammonia secara signifikan. Efisiensi tertinggi dicapai pada reaktor *constructed wetland* non-bakteri dengan konsentrasi air lindi 20%, yaitu sebesar 99,9%. Pada konsentrasi yang lebih tinggi, efisiensi menurun namun tetap menunjukkan performa pengolahan yang baik. Kombinasi metode ini terbukti efektif dan berpotensi menjadi sistem pengolahan air lindi yang ekonomis dan berkelanjutan.

Kata kunci: air lindi, ammonia, fitoremediasi, *microbial treatment*, *Typha angustifolia*

# Combination of Microbial Treatment and Phytoremediation in Degrading Ammonia in Leachate Wastewater Treatment

*Student* : Silvanie Amelya  
*Student Number* : 21513178  
*Study Program* : Environmental Engineering – Bachelor Program  
*Supervisor* : Dr. Joni Aldila Fajri, S.T ., M.Eng

## ***Abstract***

*Leachate from the Piyungan Final Disposal Site (TPA) has high ammonia levels and has the potential to pollute the environment if not treated properly. Biological leachate treatment through a combination of microbial treatment and phytoremediation is an alternative solution that is environmentally friendly and efficient. This study aims to assess the effectiveness of the combination of *Typha angustifolia* plants and a consortium of endophytic bacteria (*Bacillus velezensis*, *Bacillus cereus*, and *Staphylococcus xylosus*) in reducing ammonia levels from leachate. The research method uses a reactor system consisting of anaerobic, aerobic, clarifier, floating treatment wetland (FTW), and constructed wetland (CW) units, both with and without the addition of bacteria. Tests were conducted on three variations of leachate concentrations (20%, 50%, and 100%) for 63 days. The parameters analyzed included ammonia levels, DO, MLSS, SV30, and temperature, with ammonia measurements using a spectrophotometer according to SNI 06-6989.30-2005. The results showed that the combination of phytoremediation and microbial treatment was able to reduce ammonia levels significantly. The highest efficiency was achieved in a non-bacterial constructed wetland reactor with a leachate concentration of 20%, which was 99.9%. At higher concentrations, efficiency decreased but still showed good treatment performance. This combination of methods has proven effective and has the potential to be an economical and sustainable leachate treatment system.*

*Key words: leachate, ammonia, phytoremediation, microbial treatment, *Typha angustifolia**

## DAFTAR ISI

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 .....	5
2.1 Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Piyungan Yogyakarta.....	5
2.3 Ammonia.....	7
2.4 Fitoremediasi .....	9
2.5 Media Tanaman <i>Thypha angustifolia</i> .....	10
2.6 Proses CAS (Anaerobik-Aerobik).....	11
2.7 <i>Endophyte</i> Bakteri .....	11
2.8 Pengolahan Biologis.....	11
2.9 Nitrifikasi dan Denitrifikasi .....	13
2.10 Penelitian Sebelumnya .....	15
BAB III METODE PENELITIAN .....	17
3.1 Waktu dan Lokasi .....	17
3.2 Alat dan Bahan .....	17
3.3 Alur Penelitian.....	18
3.4 Persiapan Pembuatan Reaktor <i>Wetland</i> .....	18
3.4.1 Persiapan Pembuatan Reaktor <i>Wetland</i> .....	19
3.5 Aklimatisasi Sludge.....	25

3.6	Aklimatisasi Tanaman.....	26
3.8	Aklimatisasi Reaktor Biologis.....	30
3.9	Proses <i>Running</i> Reaktor .....	30
3.10	Sampling Air Limbah.....	31
3.11	Pengujian Sampel .....	31
3.12	Analisis.....	31
BAB IV.....		33
4.1	Karakteristik Air Limbah .....	33
4.2	Analisis Kadar Ammonia dalam Pengolahan Air lindi.....	34
4.2.1	Pengolahan Biologis <i>Non Wetland</i> .....	34
4.2.2	Pengolahan Biologis <i>Wetland</i> .....	36
4.3	Parameter Fisik.....	38
4.3.1.	SV 30.....	38
4.3.2.	MLSS.....	40
4.3.3.	<i>Dissolved Oxygen (DO)</i> .....	42
4.4	Korelasi Sludge Dengan <i>Removal</i> Ammonia .....	43
4.4.2.	Korelasi DO Dengan <i>Removal</i> Ammonia .....	45
4.5	Efisiensi <i>Removal</i> .....	46
BAB V PENUTUP.....		49
5.1	Kesimpulan.....	49
5.2	Saran.....	49
DAFTAR PUSTAKA .....		51
LAMPIRAN .....		55
RIWAYAT HIDUP.....		63

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Referensi Penelitian Terdahulu.....	14
Tabel 4. 1 Karakteristik Air Lindi.....	25
Tabel 4. 2 Efisiensi Removal.....	34

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Skema kerangka berpikir penelitian.....	3
Gambar 3. 1 Diagram Alir Tahapan Penelitian.....	17
Gambar 3. 2 Alur Reaktor.....	18
Gambar 3. 3 Desain Anaerob.....	19
Gambar 3. 4 Bak Anaerob.....	19
Gambar 3. 5 Desain Bak Aerob.....	20
Gambar 3. 6 Bak Aerob.....	20
Gambar 3. 7 Desain Clarifier.....	20
Gambar 3. 8 Desain <i>Floating Treatment Wetland</i> . ....	21
Gambar 3. 9 <i>Floating Treatment Wetland</i> . ....	22
Gambar 3. 10 <i>Constructed Treatment Wetland</i> . ....	23
Gambar 3. 11 <i>Constructed Treatment Wetland</i> . ....	23
Gambar 3. 12 Proses Penggantian Larutan NaCl. ....	25
Gambar 3. 13 Proses Penggantian Larutan NaCl. ....	25
Gambar 4. 1 Grafik Konsentrasi Ammonia (Bak Penampung-Clarifier).29	
Gambar 4. 2 Grafik Konsentrasi Ammonia (FW Bakteri-CW Non Bakter . .....	29
Gambar 4. 3 Grafik Konsentrasi Ammonia (FW Bakteri-CW Non Bakteri .....	31
Gambar 4. 4 Grafik Hasil Uji MLSS.....	33
Gambar 4. 5 Grafik Hasil Uji DO di beberapa reaktor . Reaktor Bak penampung, anaerobik, aerobik, dan clarifier.....	34
Gambar 4. 6 Grafik Konsentrasi DO dibeberapa reaktor. Reaktor FW Bakteri, CW Bakteri, FW Non Bakteri, CW Non Bakteri.....	35
Gambar 4. 7 Grafik Efisiensi Removal.....	37

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Average Hasil Pengujian (20%,50%,100%) .....	52
Lampiran 2 Hasil Pengujian 20% Minggu ke 0 .....	52
Lampiran 3 Hasil Pengujian 50% Minggu 1 .....	56
Lampiran 4 Hasil Pengujian 50% Minggu ke 2 .....	56
Lampiran 5 Hasil Pengujian 50% Minggu ke 3 .....	57
Lampiran 6 Hasil Pengujian 50% Minggu Ke 4.....	57
Lampiran 7 Hasil Pengujian Trial 100% .....	58
Lampiran 8 Hasil Pengujian 100% Minggu Ke 1.....	58
Lampiran 9 Hasil Pengujian 100% Minggu Ke 2.....	59
Lampiran 10 Hasil pengujian 100% Minggu Ke 3 .....	59
Lampiran 11 Hasil Pengujian 100% Minggu Ke 4.....	60
Lampiran 12 Rangkaian Reaktor .....	60
Lampiran 12 Rangkaian Reaktor .....	61

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Cairan yang bersumber dari rembesan air sampah dan terurai di TPA disebut air lindi. Air lindi mengandung banyak bahan organik dan anorganik seperti senyawa organik terlarut (COD), logam berat, amonia, fosfor, nitrogen, dan berbagai bahan toksik lainnya yang dapat menurunkan kualitas lingkungan. Variasi karakteristik air lindi dipengaruhi oleh umur sampah, jenis sampah, dan lingkungan sekitar. Karakteristik fisik air lindi dapat dilihat melalui pH yang asam, warna coklat kehitaman, ketajaman bau busuk, dan tingginya kandungan organik. (Abbas et al., 2009)

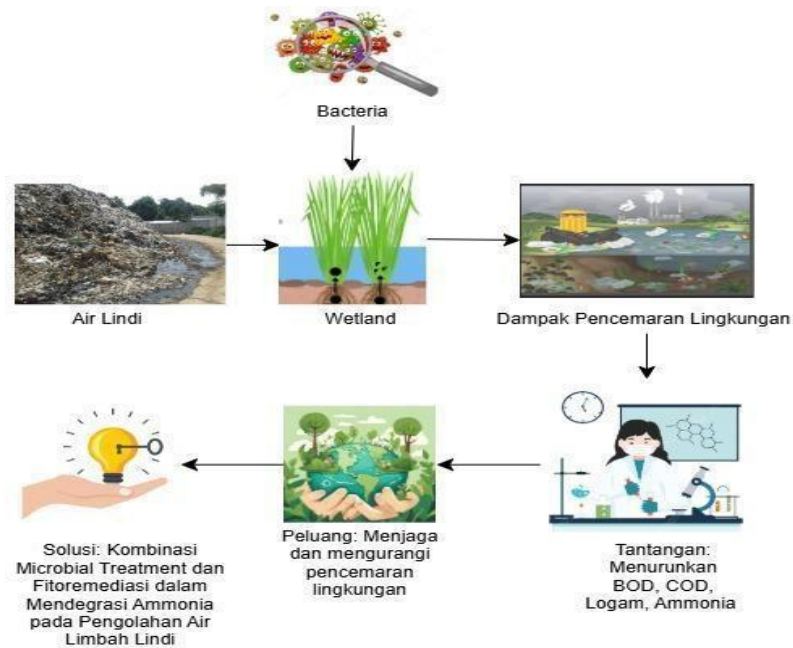
Tingginya konsentrasi dari karakteristik yang dimiliki air lindi menyebabkan menurunnya kualitas lingkungan seperti pencemaran tanah yang menjadi sumber utama air bersih masyarakat, pencemaran air di sekitar lokasi TPA karena polutan dalam air akan bertahan karena terbatasnya oksigen terlarut dengan mengubah komposisi badan air dan akan menyebabkan kematian flora fauna air, dan pencemaran tanah melalui rembesannya akan mendegradasi komponen tanah. Oleh karena itu, sangat penting untuk dilakukan pengolahan yang efektif untuk menangani dampak-dampak buruk yang disebabkan oleh air lindi.

Berbagai macam metode pengolahan air lindi yang efektif dapat diterapkan dalam pengolahan air lindi seperti *Reverse Osmosis* dan Ultrafiltrasi, teknologi koagulasi-flokulasi dan presipitasi kimia, pengolahan dan pembakaran. Semua teknologi tersebut sangat efektif untuk menangani dampak pencemaran dari air lindi namun umumnya memerlukan biaya yang relatif mahal dilihat dari berbagai aspek seperti biaya investasi awal, operasional, maupun perawatan.

Tanaman yang memiliki bakteri endofit pada bagian akar tanaman yang juga mampu mengurai zat berbahaya (Aisyah, 2020). Bakteri akar yang mampu mendegradasi polutan tercemar mampu bertahan dan memanfaatkan senyawa untuk kebutuhan hidup sehingga mampu meningkatkan sistem pertahanan tanaman terhadap gangguan penyakit. Dengan memanfaatkan metode manajemen

lingkungan, sifat bakteri dalam tanah dan akar tanaman bisa dimaksimalkan untuk menurunkan zat pencemar pada lingkungan sampai bisa sesuai dengan nilai baku mutunya. (Pusporini, 2016).

Untuk sebab itu perlu adanya pengolahan alternatif yang murah, mudah, dan efisien. Salah satu alternatif yang paling cocok adalah system lahan basah buatan (*Constructed wetland*). System *constructed wetland* ini memanfaatkan kemampuan tanaman untuk mengolah limbah air lindi menjadi tidak toksik ketika dibuang ke badan air. Lahan basah memiliki dua jenis, yang pertama aliran bawah permukaan (Sub Surface Flow) dan kedua aliran permukaan (Surface flow) (Setiyanto et al., 2016). Kombinasi bakteri dengan fitoremediasi dengan tujuan untuk meningkatkan performa pengolahan air lindi menjadi salah satu solusi paling efektif dan ramah lingkungan untuk mengelola air lindi.



Gambar 1. 1 Skema kerangka berpikir penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian berkelanjutan yang sebelumnya diteliti oleh Asa Bagus Darussalam (2024) dan Rifa Intan Tanjung (2024), dengan satu objek penelitian yaitu air lindi TPA. Dalam kedua penelitian sebelumnya menunjukkan hasil yang positif, seperti pada penelitian Asa Bagus Darussalam (2024) terkait penurunan parameter organik COD dan TSS dengan menggunakan sistem *Floating Treatment Water* melalui tanaman *Typha latifolia* dan mikroorganisme dan pada penelitian Rifa Intan Tanjung (2024) dengan pemanfaatan sistem *Floating Treatment Water* dalam pengurangan ammonia juga menunjukkan hasil yang positif dalam proses degradasi ammonia. Namun pada dua penelitian sebelumnya belum memiliki fokus terhadap studi secara komprehensif terkait efektivitas kombinasi pengolahan biologis dan fitoremediasi, maka untuk memaksimalkan proses degradasi dalam penelitian ini menambahkan pengolahan biologis sebagai alternatif solusi pengolahan air lindi yang lebih efektif.

## 1.2 Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kadar Ammonia pada sampel air lindi TPA Piyungan sebelum dan sesudah diurai dengan efektivitas kombinasi bakteri dan wetland?
2. Bagaimana efektivitas metode kombinasi pengolahan biologis dan fitoremediasi dalam mendegradasi kadar ammonia pada air lindi?

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Maka dapat disusun tujuan penelitian ini berdasar rumusan masalah adalah untuk :

1. Mengkaji kemampuan tanaman *Typha angustifolia* dan bakteri sistem reaktor wetland untuk mengolah limbah air lindi TPA Piyungan dengan mengukur parameter Ammonia
2. Mengetahui efektivitas metode kombinasi pengolahan biologis dan fitoremediasi dalam mendegradasi kadar Ammonia

### **1.4 Manfaat Penelitian**

Manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Sebagai bahan study yang dapat memberikan informasi dan wawasan terkait pemanfaatan tanaman *Typha angustifolia*
2. Sebagai acuan dalam pemilihan alternatif pengolahan limbah air lindi TPA Piyungan yang sederhana dan ekonomis sehingga pencemaran lingkungan dapat dikendalikan

### **1.5 Ruang Lingkup**

Berikut ini merupakan batasan-batasan dalam penelitian ini antara lain:

1. Sampel air lindi yang digunakan dalam penelitian diambil langsung dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA ) Piyungan, Yogyakarta.
2. Terdapat beberapa media untuk reaktor yaitu tanaman, mikroba, dan mengukur pengaruh seberapa besar efisiensi tanaman dan mikroorganisme dalam mendegradasi kadar Ammonia
3. Terdapat beberapa parameter yang akan diteliti pada air lindi TPA Piyungan adalah BOD, COD, Logam dan Ammonia
4. Penambahan bakteri dalam penelitian digunakan untuk memaksimalkan pengurangan kandungan ammonia pada air lindi
5. Penelitian terhadap pengujian sampel dilakukan selama 3 bulan dimulai bulan Maret 2025-Mei 2025

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Piyungan Yogyakarta**

Dalam Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah, Tempat Pembuangan Akhir (TPA) merupakan suatu tempat untuk memproses dan mengembalikan sampah ke media lingkungan secara aman bagi manusia dan lingkungan.

Tempat Pembuangan Akhir (TPA) merupakan satu kawasan yang sudah dipusatkan dan memiliki jarak yang jauh dari pemukiman ataupun pusat kota menggunakan metode sanitary landfill. Keberadaan TPA yang sudah dijauhkan dari pemukiman dan pusat kota nyatanya tidak menghilangkan masalah begitu saja, justru menimbulkan masalah baru yang harus diperhatikan lebih lanjut. Pembusukan tumpukan sampah yang terjadi di TPA dengan sendirinya menimbulkan permasalahan baru dan berbahaya bagi lingkungan sekitar. Bagi permasalahan timbul balik bagi udara. Timbulnya penyakit juga bisa disebabkan karena adanya sampah yang tidak terkelola. (Syakib, 2019)

TPA Piyungan memiliki luas lahan 12 H dengan cakupan pelayanannya merupakan daerah perkotaan Yogyakarta yang meliputi Yogyakarta, Kabupaten Sleman bagian selatan dan Kabupaten Bantul bagian utara yang masuk wilayah perkotaan. TPA Piyungan terletak di Dusun Ngablak dan Watugender, Desa Sitimulyo, Kecamatan Piyungan, Kabupaten Bantul, Kota Yogyakarta. TPA Piyungan dibangun selama 2 tahun sejak tahun 1994-1996 dan beroperasi mulai tahun 1996, pengelolaannya dilakukan oleh Pemda DIY sejak tahun 1996 kemudian pada tahun 2000 dikelola oleh Sekretariat Bersama (Sekber) Kartamantul berdasarkan keputusan Gubernur No.18 Tahun 2000 (Dinas Lingkungan Hidup DIY, 2019).

Metode pengelolaan yang diterapkan di TPA Piyungan adalah sistem “*Sanitary Landfill*” atau bisa dijelaskan tumpukkan sampah dilapisi dengan timbunan tanah, serta terdapat kolam pengelolaan “leachate (lindi)”. Penilaian dampak negatif di lingkungan sekitar TPA dinyatakan dalam nilai resiko

kumulatif maupun parsial. Pada stressor TPA kemungkinan pemberian nilai resiko paling tinggi adalah *leachate* dan timbulan gas *Golder Associate (NZ) Ltd, (2002)*. Yang disebabkan karena adanya bahan kimia berbahaya yang dapat meluas ke semua komponen lingkungan terutama tanah, air tanah, dan air permukaan.

## 2.2 Air Lindi (*leachate*)

Air lindi (*leachate*) merupakan air rembesan yang berasal dari tumpukan limbah dengan unsur-unsur terlarut dan tersuspensi didalamnya yang bisa mencemari lingkungan berasal dari tumpukan sampah. Beberapa zat organik di tumpukan sampah di TPA yang terkena air hujan akan mengakibatkan tingginya kandungan mineral dan zat organik pada air lindi dan berdampak pada kondisi negatif bagi lingkungan sekitar termasuk kesehatan manusia.

Air lindi memiliki beberapa karakteristik beragam yang bergantung pada proses yang terjadi pada landfill dimulai dari karakteristik fisika, kimia, dan biologi. Air lindi juga memiliki beberapa parameter dimulai dari parameter fisika (Suhu, dan Total Suspended Solid, parameter kimia ( pH, *Dissolved Oxygen Demand*, *Biochemical Oxygen Demand*, *Chemical Oxygen Demand*, Ammonia total, Nitrat, Sulfat, Besi), dan juga terdapat parameter mikrobiologi yang dimuat dalam Peraturan Pemerintah No.82 Tahun 2001 mengenai kadar maksimum total koliform yang diperbolehkan pada perairan umum yang diperuntukan untuk mengairi pertanian dan peternakan sebesar 10.000 MPN/100 ml.

Air lindi berupa zat cair memiliki kemampuan untuk menguraikan sampah namun memiliki bau tak sedap yang menusuk hidung. Zat yang terkandung dalam air lindi bersifat toksik terutama jika berasal dari limbah B3 (bahan berbahaya dan beracun). Dengan alami kandungan air lindi akan menurunkan kualitas lingkungan baik secara biotik seperti kematian organisme dan juga secara abiotik seperti tanah, air sungai, dan air laut. Kandungan B3 pada air lindi juga merugikan terutama manusia karena dapat menyebabkan berbagai macam penyakit seperti syaraf, cacat lahir pada bayi, kerusakan sel hati dan ginjal. Maka dari itu sangat perlu digunakan teknologi

yang tepat untuk melakukan perhatian secara khusus bagi air lindi salah satunya dengan fitoremediasi melalui media filter pada pengolahan air lindi untuk mengurangi tingkat pencemaran pathogen (Yatim dan Mukhis, 2017).

Komposisi air lindi sangat bervariasi karena pembentukannya dipengaruhi oleh karakteristik sampah (organik dan anorganik), tingkat kesulitan penguraian (larut dan tidak larut) kondisi sampah (suhu, pH, kelembaban, umur). Karakteristik sumber air, komposisi tanah penutup ketersediaan nutrient, mikroba, dan kehadiran hibitor. (Diana, 2019).

*Leachate* yang berasal dari penurunan kualitas sampah melalui pori-pori tanah akan bercampur dengan air tanah (*groundwater*). Aliran *groundwater* yang tercemar meski dengan aliran lambat (meter per hari bahkan centi meter per tahun) tetap akan menimbulkan pencemaran di alam sekitar TPA (SEPA,2002)

### **2.3 Ammonia**

Konsentrasi ammonia yang terkandung dalam lindi mengalami peningkatan dari waktu ke waktu. TPA yang memiliki umur lebih dari 10 tahun memiliki konsentrasi ammonia diatas 500 mg/L. (Mangimbulude et al.,2012). Secara umum ammonia dianalisis menggunakan metode Fenat dan metode Nessler. Metode Fenat dihasilkan dari pembentukan warna dari reaksi ammonia dengan fenol dan hipoklorit, prinsip metode Fenat didasarkan oleh reaksi ammonia dengan hipoklorit dan fenol yang dikatalis oleh natrium nitropusida yang membentuk warna biru indifenol (Boltz dkk., 1978)

Ammonia merupakan salah satu senyawa yang bersifat toksik dan mencemari lingkungan. Pengolahan ammonia yang terkandung didalam air lindi yang tecakup dalam rangkaian sistem menunjukan hasil yang menjanjikan melalui penyederhanaan sistem pengolahan, insetifitas dalam fluktuasi temperature dan mampu beradaptasi pada rentang konsentrasi polutan yang lebar pengolahan secara fisik dan kimia memerlukan biaya yang relatif ebih mahal. Sehingga dibutuhkan opsi pengolahan lainnya yaitu secara biologis yang relatif

lebih terjangkau. Pengolahan sistem biologis terutama pada pengolahan konvensional melalui proses nitrifikasi-denitrifikasi yang merupakan metode umum untuk mengolah limbah yang mengandung nitrogen seperti limbah rumah tangga, limbah pertanian dan lindi. Dimana sebagian besar merupakan reactor dengan berbagai bentuk modifikasi dan konfigurasi namun proses biologis juga mempunyai kekurangan atau memiliki ketidaksempurnaan dalam prosesnya sehingga dinilai kurang memuaskan. Sehingga untuk mengatasi hal tersebut beberapa peneliti mengembangkan sistem fitoremediasi yaitu suatu sistem pengolahan dengan menggunakan tumbuhan sebagai pengolah yang berjalan secara alami. (Zaman, 2013). Amonia perlu didegradasi dalam air lindi karena merupakan salah satu komponen pencemar utama yang memiliki toksisitas tinggi terhadap lingkungan perairan dan organisme hidup.

Selain berdampak pada ekosistem perairan, kadar amonia yang tinggi juga dapat menurunkan efisiensi proses pengolahan lanjutan karena menghambat pertumbuhan mikroorganisme pada sistem biologis. Dalam konteks pengelolaan air lindi di TPA Piyungan, degradasi amonia menjadi prioritas utama karena tingginya kadar nitrogen anorganik merupakan indikator kematangan lindi (*mature leachate*), yang sulit diolah hanya dengan proses fisik atau kimia. Penelitian-penelitian sebelumnya seperti yang dilakukan oleh Rahmad et al. (2022) dan Putra et al. (2020) menunjukkan bahwa air lindi Piyungan memiliki karakteristik C/N ratio yang rendah, sehingga proses nitrifikasi–denitrifikasi secara biologis menjadi metode yang paling sesuai untuk menguraikan kandungan amonia menjadi bentuk nitrogen yang lebih stabil seperti nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) atau gas nitrogen ( $\text{N}_2$ ). Selain itu, keberadaan amonia dalam konsentrasi tinggi dapat menyebabkan pH air meningkat ( $>8$ ) dan menghasilkan bau menyengat akibat pelepasan gas  $\text{NH}_3$ , yang berdampak langsung terhadap kualitas udara dan kenyamanan masyarakat di sekitar TPA. Oleh karena itu, proses degradasi amonia melalui kombinasi pengolahan biologis dan fitoremediasi yang dilakukan dalam penelitian ini menjadi solusi yang efektif dan ramah lingkungan untuk menurunkan kandungan amonia secara signifikan serta memperbaiki kualitas air lindi sebelum dibuang ke lingkungan sekitar.

Mekanisme degradasi amonia pada air lindi melalui kombinasi pengolahan biologis dan fitoremediasi berlangsung melalui serangkaian proses mikrobiologis, kimia, dan biofisik yang saling melengkapi untuk menurunkan konsentrasi amonia hingga mencapai kadar aman bagi lingkungan.

Sementara itu, dalam tahap fitoremediasi, tanaman seperti *Typha angustifolia* berperan aktif dalam menyerap, mentransformasi, dan menstabilkan senyawa nitrogen. Akar tanaman menyerap amonia ( $\text{NH}_4^+$ ) dan nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) sebagai sumber nutrisi untuk pertumbuhan jaringan tanaman. Selain itu, zona perakaran (rhizosfer) menciptakan kondisi mikro-lingkungan yang mendukung keberlangsungan proses biologis: bagian permukaan akar yang kaya oksigen memperkuat proses nitrifikasi, sedangkan zona akar yang lebih dalam (minim oksigen) memfasilitasi denitrifikasi. Akar tanaman juga menjadi tempat kolonisasi mikroorganisme seperti *Bacillus cereus*, *Bacillus velezensis*, dan *Staphylococcus xylosum*, yang berperan dalam mempercepat oksidasi amonia dan meningkatkan kemampuan adaptasi tanaman terhadap lingkungan toksik air lindi.

Selain mekanisme biologis dan tanaman, pada sistem ini juga terjadi proses volatilisasi amonia, terutama pada kondisi pH tinggi ( $>8$ ) dan suhu meningkat, di mana sebagian amonia dalam bentuk  $\text{NH}_3$  bebas akan menguap ke udara. Kombinasi proses-proses tersebut nitrifikasi, denitrifikasi, serapan tanaman, aktivitas mikroba endofit, dan volatilisasi menciptakan sistem pengolahan terpadu yang efisien dan ramah lingkungan.

Penelitian-penelitian sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh Rahmad et al. (2022) dan Ng et al. (2017), menunjukkan bahwa kombinasi sistem biologis dan fitoremediasi mampu menurunkan kadar amonia pada air lindi hingga lebih dari 80–90%, bahkan mendekati 99% pada sistem yang melibatkan tanaman *Typha angustifolia* dan bakteri endofit. Mekanisme ini terbukti efektif untuk air lindi matang seperti di TPA Piyungan, yang umumnya memiliki kadar amonia tinggi (mencapai ratusan mg/L) dan rasio C/N rendah, sehingga pengolahan biologis dan fitoremediasi menjadi solusi yang efisien, berkelanjutan, dan sesuai dengan kondisi tropis Indonesia.

## 2.4 Fitoremediasi

Fitoremediasi adalah istilah yang berasal dari kata *Phytoremediation* yang terdiri dari kata phyto atau phyton yang berarti tanaman dan remedium yang berarti penyembuhan. Fitoremediasi merujuk pada kegiatan tanaman dalam membersihkan, menghancurkan, atau menstabilkan zat-zat pencemar baik organik maupun anorganik. Fitoremediasi yang memanfaatkan tanaman dan bagian-bagian tanaman untuk mengurangi dan menyerap limbah yang memiliki zat pencemar (Budhi Joko, 2018)

Fitoremediasi memanfaatkan fungsi tumbuhan air untuk meminimalisir zat pencemar dalam lingkungan yang sudah terkontaminasi. Terdapat pembaruan metode teknik melalui perkembangan pesat karena terbukti lebih ekonomis dibandingkan dengan teknik lainnya, seperti ditambahkannya lapisan permukaan tanah. Rata-rata tumbuhan memiliki kemampuan menyerap logam tertentu dalam konsentrasi yang cukup tinggi (Juhaiti dkk, 2017)

## **2.5 Media Tanaman *Typha angustifolia***

*Typha angustifolia* memiliki tinggi rata-rata 1,5 m memiliki batang bulat dengan akar berbentuk rimpang. *Typha angustifolia* dimanfaatkan untuk *constructed wetland* mampu menurunkan TSS dan Total-Nitrogen sebesar 70,714% dan 66,838% (Ramdhani et al., 2019). *Typha angustifolia* memiliki kemampuan untuk fitoremediasi logam berat Hg, As, Pb, Cu, dan Zn (Anning dan Akoto, 2018). Dalam penerapan tanaman *Typha angustifolia* pada limbah organik industri kerupuk melalui sistem *Subsurface Flow Constructed Wetland*, diperoleh kesimpulan bahwa efisiensi pengurangan konsentrasi terbaik terjadi pada 15 hari pengamatan dengan *total suspended solid* (TSS) sebesar 84,71%; BOD5 94,17%; COD 94,87%; Ammoniak 87,52%; Sulfida 99,81% (Abdulgani et al., 2014)

Dalam pengolahan air lindi TPA yang memiliki salinitas tinggi, tanaman *Typha angustifolia* menunjukkan efektivitas yang lebih baik dibandingkan dengan *Echornia crassipe* (Niam dkk.2013). Tanaman *Typha angustifolia* dapat mengurangi 92% sebagai tanaman pembersih tanah yang terkontaminasi logam berat karena pertumbuhan yang kokoh, tingkat biomassa yang tinggi, dan sifatnya yang perenial.

## **2.6 Proses CAS (Anaerobik-Aerobik)**

Proses *Conventional Activated Sludge* (CAS) menggunakan sistem aerob anaerob adalah metode biologis yang digunakan untuk mengurangi zat organik dan malnutrien seperti fosfat dan nitrogen. Selama tahap anaerob, mikroorganisme mengarahkan bahan organik dalam kondisi bebas oksigen, menciptakan koneksi seperti metana dan karbon dioksida (Metcalf & Eddy, 2014). Bahan organik dan nutrisi yang tersisa mengoksidasi bahan organik dan nutrisi yang tersisa selama tahap aerobik, mengakibatkan memproduksi air bersih. Kombinasi proses anaerob dalam sistem CAS dapat mengurangi tingkat fosfat air permeabel dari hingga 70 ° C. Rahmad et al. (2022)

## **2.7 Endophyte Bakteri**

Endofit berasal dari bahasa Yunani “endo” yang memiliki arti di dalam dan “phyton” yang berarti tanaman. Bakteri endofit merupakan mikroorganisme seperti jamur dan bakteri yang terdapat di endosfer tanaman dan tidak merusak bagian inang (Kandel, 2017). Bakteri ini berada pada jaringan tanaman yang merupakan bagian penting dari tanaman inangnya (Priya & Mini, 2011). Bakteri endofit adalah bakteri yang tinggal di jaringan dalam tanaman tanpa menunjukkan tanda-tanda infeksi atau dampak pada inangnya (Ryan dkk, 2007). Bakteri endofit pada tanaman akan mengurangi tingkat toksisitas melalui degradasi polutan dalam tanaman, sehingga bakteri ini mendapatkan nutrisinya. Oleh karena itu, diharapkan bakteri ini dapat memperkuat sistem pertahanan tanaman terhadap ancaman penyakit karena kemampuannya dalam menghasilkan senyawa antimikrob dan enzim. 12 asam salisilat, etilena, dan zat sekunder lain berfungsi menginduksi ketahanan tanaman (Backman & Sikora, 2008).

## **2.8 Pengolahan Biologis**

Pengolahan biologis dalam penelitian ini berperan sebagai tahap utama dalam menurunkan kadar amonia sebelum masuk ke sistem fitoremediasi. Sistem yang digunakan terdiri atas reaktor anaerobik, aerobik, dan clarifier, yang

diintegrasikan dengan dua tahap fitoremediasi yaitu *Floating Treatment Wetland* (FTW) dan *Constructed Wetland* (CW) baik dengan maupun tanpa penambahan bakteri endofit (*Bacillus velezensis*, *Bacillus cereus*, dan *Staphylococcus xylosus*). Pada tahap anaerobik, bahan organik kompleks dalam air lindi diuraikan menjadi senyawa sederhana seperti amonia, metana, dan asam-asam volatil melalui aktivitas mikroorganisme anaerob. Proses ini bertujuan mengurangi beban organik dan mempersiapkan senyawa nitrogen terlarut agar dapat dioksidasi pada tahap berikutnya. Tahap aerobik selanjutnya menjadi inti proses biologis karena di sini terjadi proses nitrifikasi, yaitu oksidasi amonia ( $\text{NH}_4^+$ ) menjadi nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) dan nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) oleh bakteri nitrifikasi seperti *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter*. *Clarifier* kemudian berfungsi memisahkan lumpur aktif yang mengandung mikroorganisme dari air olahan serta menjaga kestabilan biomassa melalui proses pengendapan lumpur (MLSS dan SV30).

Keunggulan pengolahan biologis dalam menurunkan kadar amonia pada air lindi telah dibuktikan oleh berbagai penelitian terdahulu. Menurut Aziz et al. (2010), sistem biologis anaerob-aerobik terbukti efektif mengoksidasi senyawa amonia pada air lindi secara bertahap melalui nitrifikasi-denitrifikasi. Badrah et al. (2021) juga menunjukkan bahwa penggunaan *constructed wetland* berbasis proses biologis mampu menurunkan konsentrasi amonium secara signifikan hingga lebih dari 70%. Selain itu, penelitian oleh Ng et al. (2017) menjelaskan bahwa sistem hibrida biologis seperti yang Anda gunakan yang memadukan proses mikroba dan tanaman memberikan efisiensi lebih tinggi dibandingkan sistem tunggal karena adanya gradien oksigen alami yang memungkinkan proses nitrifikasi dan denitrifikasi berlangsung bersamaan. Dari sisi ekonomi dan keberlanjutan, pengolahan biologis dinilai lebih hemat energi dan ramah lingkungan dibandingkan metode kimia atau fisik, karena menggunakan aktivitas mikroorganisme alami tanpa bahan kimia tambahan (Zaman, 2013).

Dengan demikian, pengolahan biologis dalam penelitian ini tidak hanya berfungsi sebagai tahap pendukung, tetapi sebagai komponen utama yang memulai proses konversi amonia menjadi bentuk nitrogen yang lebih stabil dan kurang toksik. Kombinasi sistem biologis dengan fitoremediasi menjadikan metode ini

sangat efektif, ekonomis, dan berkelanjutan dalam mengolah air lindi dengan kadar amonia tinggi seperti di TPA Piyungan.

## 2.9 Nitrifikasi dan Denitrifikasi

Nitrifikasi merupakan proses biologis aerobik yang penting dalam siklus nitrogen, di mana amonia ( $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ ) dioksidasi secara bertahap menjadi nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) dan selanjutnya menjadi nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ). Proses ini berlangsung melalui dua tahapan utama, yaitu oksidasi amonia oleh bakteri nitrifikasi kelompok *ammonia-oxidizing bacteria* (AOB), seperti *Nitrosomonas* dan *Nitrosococcus*, dan oksidasi nitrit oleh *nitrite-oxidizing bacteria* (NOB), seperti *Nitrobacter* (Kholif & Sugito, 2020). Tahap pertama, yaitu oksidasi amonia menjadi nitrit, merupakan langkah pembatas kecepatan karena memerlukan oksigen terlarut yang cukup, pH optimal sekitar 7–8, serta suhu 25–35°C untuk mendukung aktivitas enzim *ammonia monooxygenase* dan *hydroxylamine oxidoreductase* (Mutiara et al., 2019). Pada tahap kedua, bakteri NOB mengubah nitrit menjadi nitrat sebagai bentuk nitrogen yang lebih stabil dan kurang toksik terhadap organisme akuatik (Suharto & Mirwan, 2018). Nitrifikasi sangat dipengaruhi oleh kualitas substrat, konsentrasi amonia, dan keberadaan senyawa toksik, karena bakteri nitrifikasi tergolong sensitif terhadap perubahan lingkungan (Putri et al., 2021). Dalam pengolahan air limbah dan air lindi, proses nitrifikasi merupakan langkah penting untuk mengurangi toksisitas amonia serta menjadi tahap awal sebelum proses denitrifikasi untuk menghilangkan nitrogen secara keseluruhan (Hidayat & Lestari, 2020). Dengan demikian, pemahaman yang baik mengenai mekanisme dan faktor yang memengaruhi nitrifikasi sangat penting dalam merancang sistem pengolahan biologis yang efektif.

Denitrifikasi merupakan proses biologis anaerob fakultatif yang berfungsi mengubah nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) menjadi gas nitrogen ( $\text{N}_2$ ) melalui serangkaian reaksi reduksi dengan perantara nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ), nitric oxide (NO), dan nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Proses ini dilakukan oleh kelompok bakteri denitrifikasi seperti *Pseudomonas*, *Paracoccus*, *Achromobacter*, dan beberapa spesies *Bacillus* yang mampu memanfaatkan nitrat sebagai akseptor elektron ketika oksigen terlarut rendah atau tidak tersedia (Kholif & Sugito, 2020). Dalam reaksi denitrifikasi, sumber karbon organik seperti asam organik, metanol, atau senyawa organik alami dalam air lindi

berperan penting sebagai donor elektron untuk mendukung aktivitas enzimatik reduksi nitrat (Mutiarra et al., 2019). Faktor lingkungan seperti kondisi anoksik, pH netral, ketersediaan karbon organik, dan konsentrasi nitrat sangat memengaruhi efisiensi proses denitrifikasi (Putri et al., 2021). Pada sistem pengolahan air limbah maupun air lindi, denitrifikasi menjadi tahap kritis untuk mengurangi nitrogen total, mengingat nitrat berpotensi menyebabkan eutrofikasi pada badan air penerima jika tidak dikendalikan (Hidayat & Lestari, 2020). Proses ini biasanya dikombinasikan dengan nitrifikasi untuk mencapai penghilangan nitrogen yang lebih optimal, di mana nitrat hasil nitrifikasi selanjutnya direduksi menjadi nitrogen gas melalui denitrifikasi (Suharto & Mirwan, 2018). Dengan demikian, denitrifikasi memainkan peranan besar dalam pengelolaan nitrogen pada sistem pengolahan biologis.

## 2.10 Penelitian Sebelumnya

Ada beberapa rujukan dari penelitian sebelumnya sebagai kajian literatur untuk memperluas pemahaman teori sebagai landasan dalam penyusunan dan pelaksanaan penelitian :

Tabel 2. 1 Referensi Penelitian Terdahulu

Referensi	Teknologi	Wetland	Bakteri	Hasil
Utami dkk (2002)	Sistem Concusted Wetland	Kombi nasi beberapa jensis tanaman air	-	Dalam kombinasi tanaman air tergolong efektif dalam penurunan pencemaran organik dan non organik pada air lindi
(Suharyadi et al.,2022)	<i>Constru cted Wetland</i>	Tanaman <i>Thypa angustifolia</i>	-	Dalam metode remediasi air asam tambang melalui reduksi Fe dan Mn dengan presentasi masing-masing 82,5% dan 70,7% dalam jangka waktu 30 hari
Joshua Christian dkk (2020)	Sistem <i>Constructed wetland</i>	Tanam an melti air	-	Metode efektif untuk pengolahan limbah rumah sakit sebagai <i>alternatif tertiary treatment.</i>

Tabel 2. 2 Referensi Penelitian Terdahulu

Eko Siswoyo dkk (2006)	<i>Constructed Wetland</i> dengan tanaman eceng gondok ( <i>Eichornia crassiper</i> ) sebagai alternatif pengolahan air limbah industri tapioka	Tanaman Eceng Gondok	Mikroorganisme	Tumbuhan eceng gondok mendegradasi dengan sangat efektif dalam menurunkan BOD, COD, dan TSS. Didukung dengan keberadaan mikroorganisme yang tumbuh dalam reaktor dalam proses penurunan pencemaran dalam limbah
------------------------	---	----------------------	----------------	---

Pada referensi penelitian-penelitian mengenai sistem *constructed wetland* (CW) diatas dapat disimpulkan terdapat potensi signifikan dalam pengolahan air limbah industri dan domestik. Secara keseluruhan, penelitian-penelitian ini menegaskan bahwa sistem *constructed wetland* (CW) memiliki kemampuan yang efektif dalam mengolah air limbah industri ataupun domestik, namun penelitian-penelitian diatas belum memiliki fokus terhadap studi secara komprehensif terkait efektivitas kombinasi mikrobiologi *treatment* menggunakan *microbial treatment* dengan konsorsium bakteri endofit (*Bacillus velezensis*, *Bacillus cereus*, dan *Staphylococcus xylosus*) dan fitoremediasi dengan tanaman *Typha angustifolia* dalam mendegradasi kadar Ammonia pada air lindi TPA Piyungan, yang berfokus pada variasi konsentrasi air lindi dan waktu tinggal hidrolis. Maka untuk mempertimbangkan aspek berkelanjutan sebagai alternatif solusi pengolahan air lindi yang lebih efektif, maka penelitian lebih lanjut dan spesifik terhadap penerapan kombinasi pengolahan biologis dan fitoremediasi dalam mendegradasi Ammonia yang terkandung pada air lindi perlu dilakukan.

## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

#### **3.1 Waktu dan Lokasi**

Penelitian pengujian kadar ammonia ini mulai akan dilaksanakan pada bulan Februari 2025 - Juli 2025. Penelitian berlokasi di Laboratorium Workshop untuk semua proses rangkaian reaktor sampai pada sampling Wetland, dan Laboratorium Bioteknologi Lingkungan Program Studi Teknik Lingkungan untuk menguji kadar Ammonia, Fakultas Teknis Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Analisis dilakukan pada tanaman *Typha angustifolia*. Sampel yang digunakan pada penelitian ini adalah air lindi yang diambil dari IPL TPA Piyungan, Yogyakarta, dengan pengambilan sampel air lindi pada proses anaerobik.

#### **3.2 Alat dan Bahan**

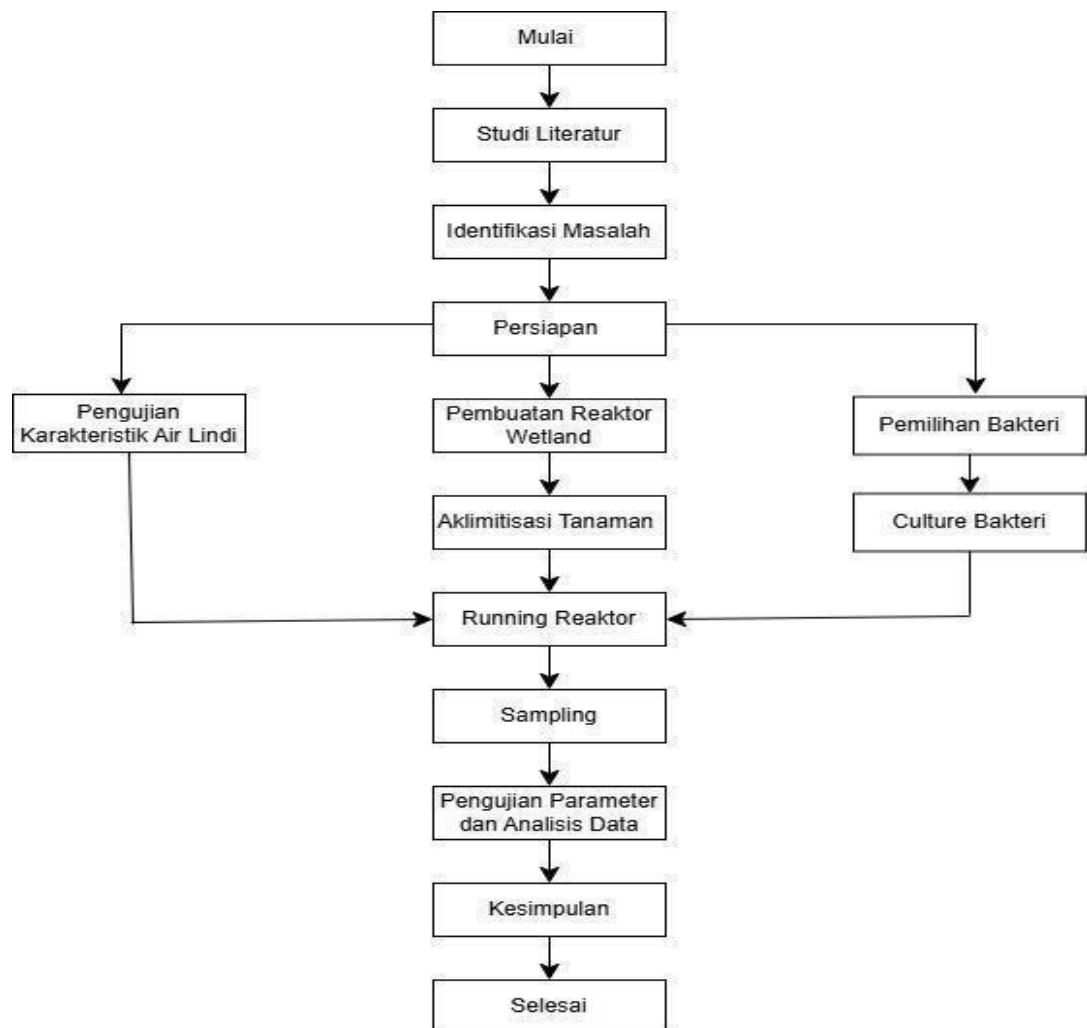
Beberapa alat yang digunakan dalam pembuatan reaktor penelitian ini adalah kotak plastik dengan 2 ukuran yang berbeda, yaitu ukuran 35 cm x 52 cm x 28 cm dengan volume 40 L, dan ukuran 56,5 cm x 40,2 cm x 28 cm dengan volume 55 L, serta jerigen dan botol sampel. Bahan yang digunakan adalah contoh air lindi dari TPA Piyungan. Sampah yang telah dikumpulkan selama periode tertentu untuk mendukung proses penelitian. Dengan metode fitoremediasi melalui tanaman *Typha angustifolia* sistem *wetland* untuk mendegradasi kandungan Ammonia yang ada pada air lindi secara bertahap.

Adapun beberapa alat yang digunakan dalam proses pengujian sampel yaitu spektrofotometer, timbangan analitik, erlenmeyer 50 mL, labu ukur 100 mL, 500 mL, dan 1000 mL, gelas ukur 25 mL, pipet volumetrik (1 mL, 2 mL, dan 3mL), pipet ukur (10 mL dan 100 100 mL), gelas piala 1000 mL. Dan beberapa bahan yang digunakan dalam pengujian sampel limbah lindi yaitu larutan amonium klorida ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), larutan fenol ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ ), natrium nitroprusida ( $\text{C}_5\text{FeN}_6\text{Na}_2\text{O}$ )

0,5%, alkalin sitrat ( $C_6H_5Na_3O_7$ ), natrium hipoklorit ( $NaClO$ ) 5% dan larutan pengoksidasi.

### 3.3 Alur Penelitian

Dengan penggunaan Kombinasi Microbial Treatment dengan tanaman *Typha angustifolia* penelitian ini menggunakan pengolahan FTW. Berikut ini merupakan diagram alir tahapan pada penelitian :

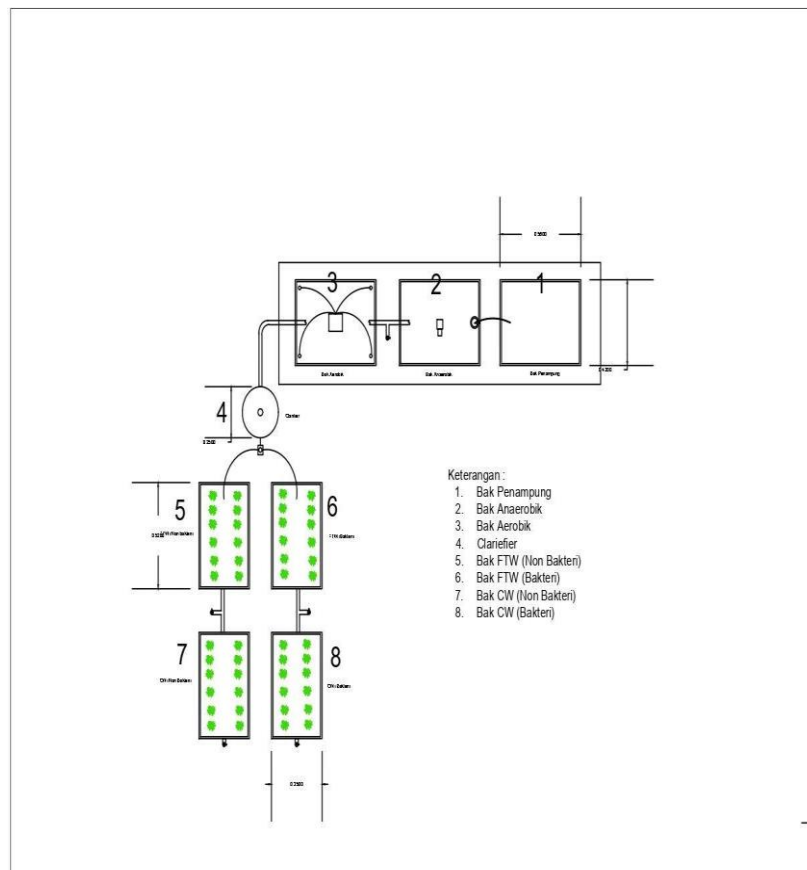


Gambar 3. 1 Diagram Alir Tahapan Penelitian

### 3.4 Persiapan Pembuatan Reaktor Wetland

Pembuatan reaktor menggunakan desain yang disesuaikan dengan karakteristik tanaman *Typha angustifolia* yang digunakan dalam proses

fitoremediasi dengan mempertimbangkan volume air lindi yang akan diolah. Reaktor merupakan serangkaian box container plastik berukuran 500 mL yang terdiri dari beberapa . Rangkaian reaktor terdiri dari bak penampung, anaerobik, aeronik, clarifier, floating treatment wetland bakteri, floating treatment wetland non bakteri, constructed treatment wetland bakteri, constructed treatment wetland non bakteri.



Gambar 3. 2 Alur Reaktor

### 3.4.1 Persiapan Pembuatan Reaktor Wetland

Reaktor terdiri dari beberapa komponen yaitu:

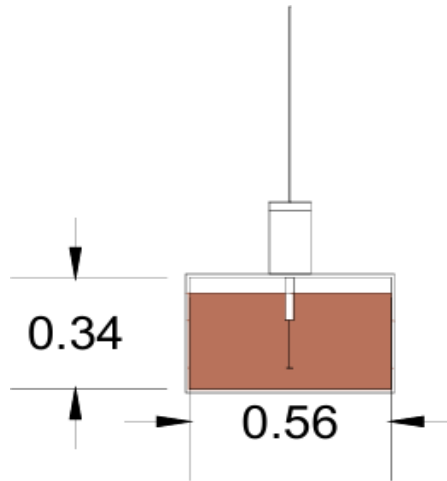
- **Bak penampung**

Berfungsi sebagai penampungan air lindi yang nantinya akan diolah.

- **Bak anaerob**

Berfungsi sebagai tempat penguraian bahan organik terlarut dan bahan organik terdispersi yang ada dalam air limbah dengan kondisi tanpa

oksigen. Reaktor anaerob berbahan kotak kontainer bervolume 55L (56,5 cm x 40,2 cm x 34 cm). Lumpur atau lumpur aktif dimasukkan ke dalam reaktor, dan reaktor juga memiliki sistem mixer yang berfungsi untuk menjaga kondisi limbah tetap sama.



Gambar 3. 3 Desain Anaerob

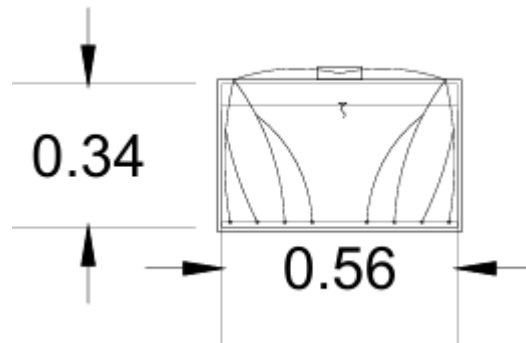


Gambar 3. 4 Bak Anaerob

- **Bak aerob**

Berfungsi sebagai tempat penguraian senyawa organik dan nutrisi dengan bantuan oksigen. Reaktor aerob dibangun dengan wadah

berbentuk kotak dengan volume 55 L dan dimensi 56,5 cm × 40,2 cm × 34 cm. Ada sistem aerator untuk menyuplai oksigen dan selama proses aerasi, limbah dicampur dengan sludge atau lumpur aktif.



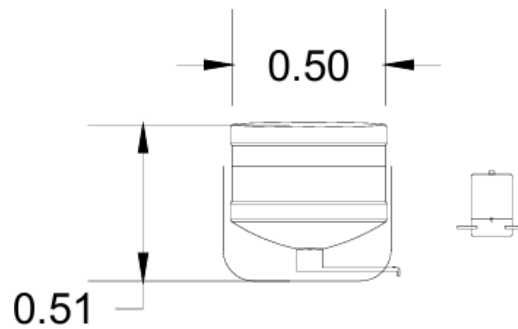
Gambar 3. 5 Desain Bak Aerob



Gambar 3. 6 Bak Aerob

- **Clarifier**

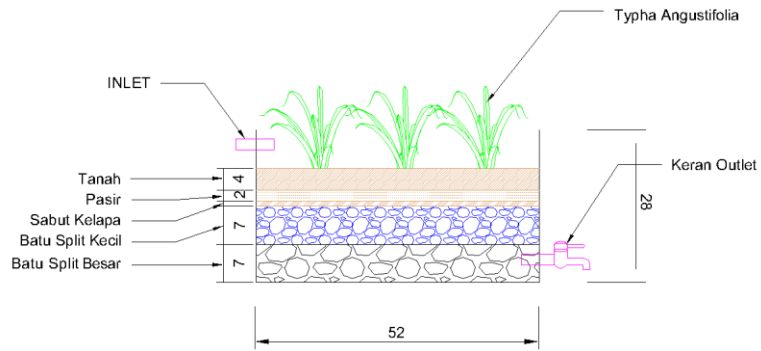
Berfungsi untuk memisahkan padatan tersuspensi (*Suspended solids*) dari air limbah dengan proses pengendapan secara gravitasi



Gambar 3. 7 Desain Clarifier

- **Bak *Floating Treatment Wetland***

Merupakan sistem pengolahan melalui akar dari makrofit yang tumbuh pada media terapung dipermukaan melalui penggabungan antara mikroorganisme, tanaman, air untuk mengurangi kandungan yang ada pada air lindi (Mantasa, 2021). Reaktor Wetland Floating dibangun dengan wadah kontainer berbentuk box 40 L (52 cm × 35 cm × 28 cm). Sistem reaktor memiliki keranjang yang membantu mempertahankan posisinya tanaman agar tetap mengapung di atas air. Sistem terdiri dari dua unit reaktor, masing-masing berisi enam batang tanaman *Typha angustifolia*. Dalam keranjang reaktor, susunan media pendukung terdiri dari berbagai lapisan material. Ini termasuk batu sprite berukuran besar, batu sprite berukuran kecil, sabut kelapa, lapisan pasir (1 cm), dan lapisan tanah (4 cm).



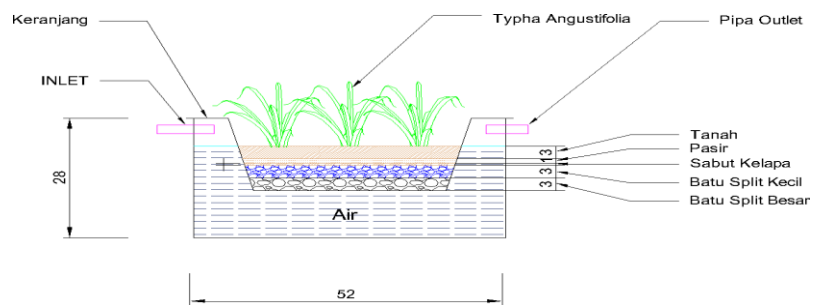
Gambar 3. 8 Desain *Floating Treatment Wetland*



Gambar 3. 9 *Floating Treatment Wetland*

- **Bak *Constructed Treatment Wetland***

Berfungsi sebagai tempat pemrosesan limbah lindi dengan memanfaatkan pertumbuhan mikroorganismenya pada akar dan tanah tanaman. Sistem *Constructed Wetland* (CW) memiliki jenis tanaman dan dimensi kontainer yang sama dengan sistem *Floating Wetland*. Setiap reaktor CW memiliki volume 40 L berdimensi 52 cm x 35 cm x 28 cm. Dengan enam batang tanaman *Typha angustifolia* ditanam. Komposisi media reaktor CW berbeda dengan *Wetland Floating* karena terdiri dari susunan lapisan yang lebih tebal. Ini termasuk batu split berukuran besar (7 cm), batu split berukuran kecil (7 cm), sabut kelapa, lapisan pasir (2 cm), dan lapisan tanah (4 cm).



Gambar 3. 10 *Constructed Treatment Wetland*



Gambar 3. 11 *Constructed Treatment Wetland*

### 3.5 Aklimatisasi Sludge

Proses aklimatisasi sludge dilakukan dengan mengambil sludge di Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) KIT Batang, Semarang. Proses aklimatisasi *sludge* bertujuan agar mikroorganisme dapat beradaptasi dengan karakteristik air lindi sehingga diharapkan mampu berkerja dengan efektif selama proses degradasi berlangsung. Aklimatisasi diawali dengan pembagian lumpur ke masing-masing reaktor aerob dan aerob dengan volume awal 10 liter dari kapasitas reaktor 48 liter.

Proses aklimatisasi dilakukan secara bertahap dimulai dari konsentrasi air lindi terendah yaitu 20% untuk memaksimalkan proses adaptasi mikroorganisme. Proses aklimatisasi berlangsung selama 37 hari mulai pada tanggal 14 Maret 2025 – 20 April 2025. Dalam proses aklimatisasi, mikroorganisme diberikan nutrisi berupa gula dan urea sebagai sumber karbon dan nitrogen dengan perbandingan 10:1. Larutan nutrisi ini dicampurkan kedalam bak penampung air lindi sebanyak 48 liter. Untuk menjaga kestabilan maka dilakukan pengecekan beberapa parameter seperti pH, suhu, dan SV30 secara berkala. Proses aklimatisasi berhasil jika kondisi lumpur yang stabil dan nilai SV30 yang mencapai 80 mL.

Penambahan nutrisi (gula dan urea) dihentikan apabila terjadi kenaikan sludge atau disebut juga sludge bulking, dimana kondisi sludge aktif kesulitan dalam mengendap karena adanya kenaikan pertumbuhan. Secara teori, gula berfungsi sebagai sumber karbon dan urea sebagai sumber nitrogen dapat menjadi pendukung proses pertumbuhan mikroorganisme. Namun, jika kadar nutrisi

berlebihan, bisa menyebabkan ketidakseimbangan rasio C/N yang menjadi pemicu pertumbuhan mikroba yang tidak diinginkan. Ketidakseimbangan ini dapat menyebabkan pembentukan flok yang kurang padat dan tidak stabil sehingga proses pengendapan terganggu. Ketika ketidakseimbangan rasio C/N terjadi, maka dilakukan penghentian pemberian nutrisi (gula dan urea) untuk memaksimalkan keseimbangan nutrisi dan mengembangkan bakteri filamentous, serta memperbaiki kualitas pengendapan lumpur. Dalam sebuah penelitian Hossain (2004) tentang *Activated Sludge Bulking: A review of Causes and Control Strategies*, dijelaskan mengenai kenaikan beban organik dan ketidakseimbangan nutrisi merupakan penyebab utama fenomena *sludge bulking*, maka perlu adanya pengendalian pada pemberian nutrisi yang sesuai.

### **3.6 Aklimatisasi Tanaman**

Aklimatisasi merupakan proses bakteri menyesuaikan atau proses dimana bakteri beradaptasi dengan lingkungan yang baru. (Trimanto, 2012). Aklimatisasi juga merupakan proses bakteri beradaptasi secara fisiologis terhadap lingkungan yang baru. Proses aklimatisasi memungkinkan bakteri untuk mempertahankan kinerja atau kelangsungan hidupnya di lingkungan yang baru yang berbeda dari habitat aslinya. Aklimatisasi tanaman juga dilakukan terhadap Tanaman *Typha angustifolia* dengan tujuan agar tanaman tidak merasa asing di lingkungan yang baru dan masih bisa mempertahankan sifat mendegradasi kandungan-kandungan yang ada di lingkungan yang baru.

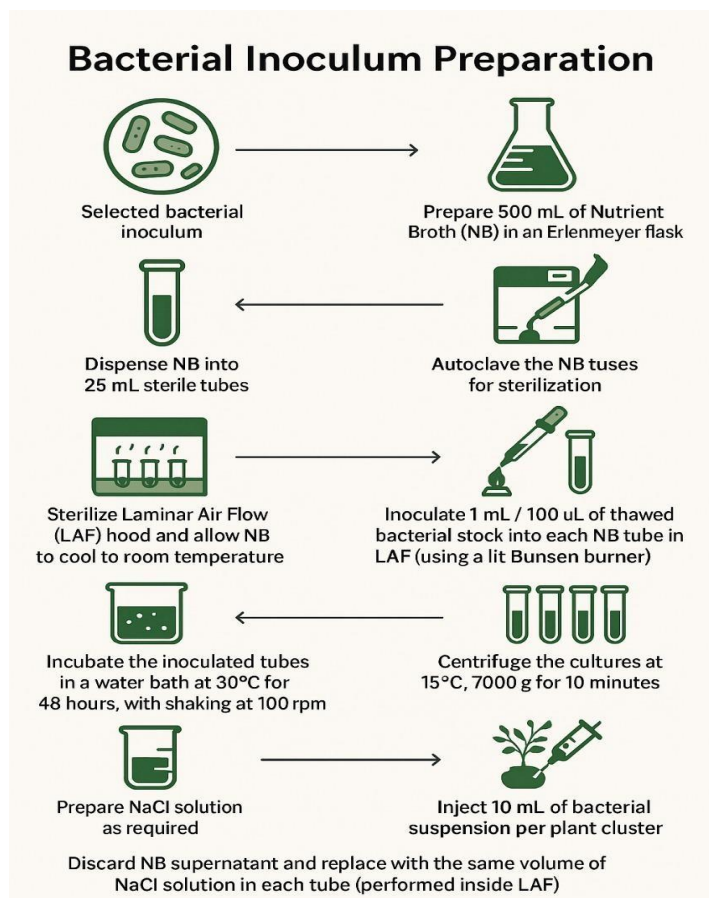


Aklimatisasi tanaman merupakan proses lanjutan untuk tanaman *Typha angustifolia*, aklimatisasi tanaman berfungsi agar tanaman *Typha angustifolia* bisa beradaptasi dengan media dan lingkungan. Upaya aklimatisasi tanaman juga bertujuan untuk memaksimalkan fungsi akar tanaman dengan air lindi. Proses aklimatisasi dilakukan selama 3,5 bulan dengan cara memotong daun tanaman hingga tersisa sepanjang 15 cm, kemudian diberi pupuk hidroponik teratur yaitu 1 kali dalam seminggu selama 2 bulan pertama. Aklimatisasi tanaman dimulai pada tanggal 29 September 2024 dan berakhir pada tanggal 3 Januari 2025.

### **3.7 Culture Bacteri**

Bakteri yang telah diidentifikasi dalam penelitian sebelumnya digunakan dalam penelitian ini. konsorsium bakteri yang mendorong pertumbuhan tumbuhan termasuk *Bacillus cereus*, *Bacillus velezensis*,

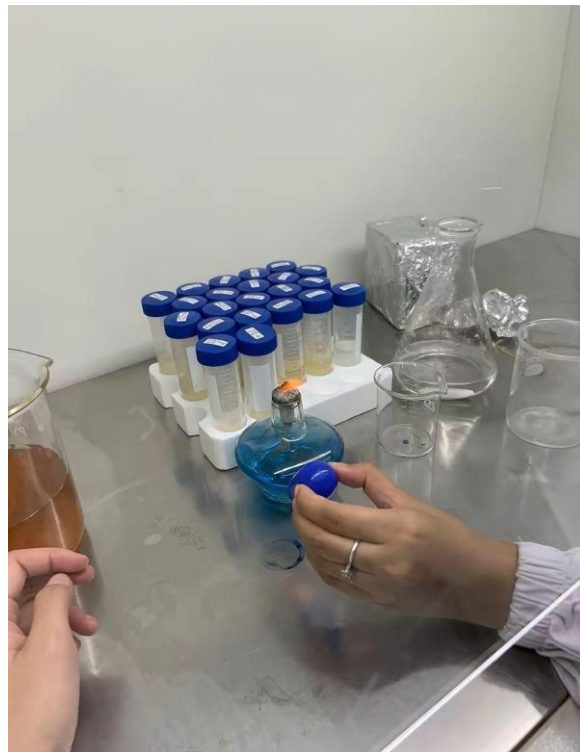
*Staphylococcus xylosus* dan bakteri penghasil pertumbuhan tanaman (PGPR), yang berhasil berkembang dan membentuk koloni tunggal dalam penelitian sebelumnya, ditempatkan dalam 500 mililiter *Nutrient Broth* (NB) dalam erlenmeyer. Setelah penambahan media bakteri dan kultur, erlenmeyer ditempatkan di dalam panci berisi air selama 48 jam pada suhu 30 °C dan diaduk dengan kecepatan 100 rpm. Selanjutnya, 20 mL kultur diambil untuk mengukur *Densitas Optik* (OD) menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 600 nm. Setelah itu, bakteri dicentrifugasi sambil menyiapkan larutan natrium klorida; bakteri yang telah dicentrifugasi akan mengendap di bagian bawah tabung. Selanjutnya, endapan dibuang dan cairan natrium klorida digantikan dengan endapan (endapan tidak boleh dibuang). Pengujian ini dilakukan di *Laminar Air Flow* (LAF) pada meja kerja yang telah dibersihkan.



Gambar 3. 12 Proses Kultur Bakteri



Gambar 3. 12 Proses Penggantian Larutan NaCl



Gambar 3. 13 Proses Penggantian Larutan NaCl

### **3.8 Aklimatisasi Reaktor Biologis**

Proses aklimatisasi sludge merupakan proses persiapan lumpur aktif agar dapat mengolah air limbah secara efektif. Dimulai dengan memasukkan lumpur aktif dari Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) di KIT Batang, Semarang, Selanjutnya air limbah dimasukkan secara bertahap mulai dari konsentrasi rendah yaitu 20%, 50%, dan 100% , bertujuan agar mikroba dapat beradaptasi. Proses aklimatisasi dilakukan selama 37 hari, dimulai tanggal 14 Maret 2025 hingga 20 April 2025. Selama Aklimatisai sludge, sludge diberikan nutrisi berupa gula dan urea dengan perbandingan 10 : 1 dalam 40 liter limbah.

### **3.9 Proses *Running* Reaktor**

Dalam proses running reaktor, sludge yang digunakan diambil dari Waste Water Treatment Plant Kawasan Industri Batang (IPAL Batang). Proses running reaktor dilakukan pada konsentrasi 20% ketika adanya kenaikan pada sludge.

Proses running reaktor dilakukan setelah proses aklimatisasi selesai dan setelah proses trial reaktor. Running reaktor dengan mengalirkan air lindi secara kontinyu pada rangkaian sistem reaktor. Pada penelitian ini digunakan air lindi dengan konsentrasi 20%, 50%, dan 100% dengan pengaplikasian variasi waktu sampai 63 hari. Pada proses running dilakukan pengecekan terhadap beberapa parameter seperti Oksigen Terlarut (DO), suhu, MLSS, dan SV 30 yang dilakukan secara rutin dengan tujuan untuk menjaga kestabilan kondisi mikroorganisme dan tanaman *Typha angustifolia*.

Penerapan variasi waktu sangat penting dalam penentuan efektivitas pengolahan air lindi. Perbedaan variasi waktu bertujuan untuk memberikan periode interaksi antara air lindi dengan pengolahan biologis untuk memaksimalkan penurunan kandungan ammonia dan parameter pencemar lainnya.

### 3.10 Sampling Air Limbah

Pengambilan sampel dilakukan setelah proses running dilakukan pada masing-masing konsentrasi air lindi yaitu 20%, 50%, dan 100% dilakukan pada 1 kali dalam 1 minggu dalam jangka waktu 2 bulan lebih dimulai h-0 sampai h-64. Proses pengambilan sampel dilakukan pada semua rangkaian reaktor dari mulai bak penampung, aerob-anaerob, clarifier, *Floating Treatment Wetland* (bakteri dan non bakteri), *Constructed Treatment Wetland* (Bakteri dan non bakteri) sebanyak 25 ml pada masing masing rangkaian reaktor yang mengacu pada SNI 06-6989.30-2005 untuk parameter kimia, dan untuk parameter fisika yaitu DO, MLSS, dan SV 30 selama 63 hari.

### 3.11 Pengujian Sampel

Pengujian sampel dilakukan untuk mengetahui kadar ammonia pada air lindi pada proses degradasi melalui pengambilan sampel pada reaktor. Pengujian sampel dilakukan pada konsentrasi air lindi 20 %, 50 % dan 100% pada masing-masing reaktor Pengujian kadar ammonia pada limbah lindi dilakukan sesuai dengan SNI 06-6989.30-2005 menggunakan spektrofotometer dengan panjang gelombang 640 nm.

### 3.12 Analisis

Proses analisis penelitian dilakukan pada konsentrasi limbah lindi yaitu 20 %, 50 % dan 100%. Proses analisis ini dilakukan dengan cara menghitung konsentrasi awal amonia pada limbah dan dibandingkan dengan konsentrasi akhir ammonia yang telah diuji sesuai SNI 06-6989.30-2005 menggunakan spektrofotometer dengan panjang gelombang 640 nm pada reaktor.

$$Y = \left( \frac{(A - B)}{A} \right) \times 100\%$$

Dimana :

Y : Efisiensi removal

A : Konsentrasi Ammonia sebelum diolah

B : Konsentrasi Ammonia setelah diolah

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Karakteristik Air Limbah

Air lindi memiliki karakteristik yang bermacam-macam tergantung pada proses pengolahan yang terjadi di masing-masing TPA. Terdapat 3 pengolahan pada air lindi dimulai dari aerasi, sedimentasi dan desinfeksi. (Kartikasari et al., 2020). Kualitas Air lindi yang berada di TPA Piyungan masuk ke dalam kategori stabil. Karakteristik dari air lindi selain memiliki warna coklat gelap, lindi juga memiliki nilai pH diatas 7 yaitu (8-8,2) dan juga memiliki kandungan COD dan NH<sub>3</sub>- N yang cukup tinggi (Kartikasari et al., 2020).

Tabel 4. 1 Karakteristik Air Lindi

Parameter	Satuan	Hasil Uji	Baku Mutu
Ammonia	mg/L	299,085	10
DO	mg/L	0,8	
MLSS	mg/L	44.206	
SV30	mL	80	
pH		8	6-9
Suhu	0C	28,1	40
BOD	mg/L	266	150
COD	mg/L	1631	300

Sampel air lindi diambil pada proses anaerob, dengan karakteristik berwarna coklat keruh dan berbau busuk yang muncul karena proses dekomposisi kandungan bahan organik yang cukup tinggi (Aziz et al., 2010). Penelitian ini dilakukan menggunakan limbah air lindi dengan konsentrasi 20%, 50 %, dan 100% yang bertujuan untuk mengetahui efektivitas proses fitoremediasi..

## 4.2 Analisis Kadar Ammonia dalam Pengolahan Air lindi

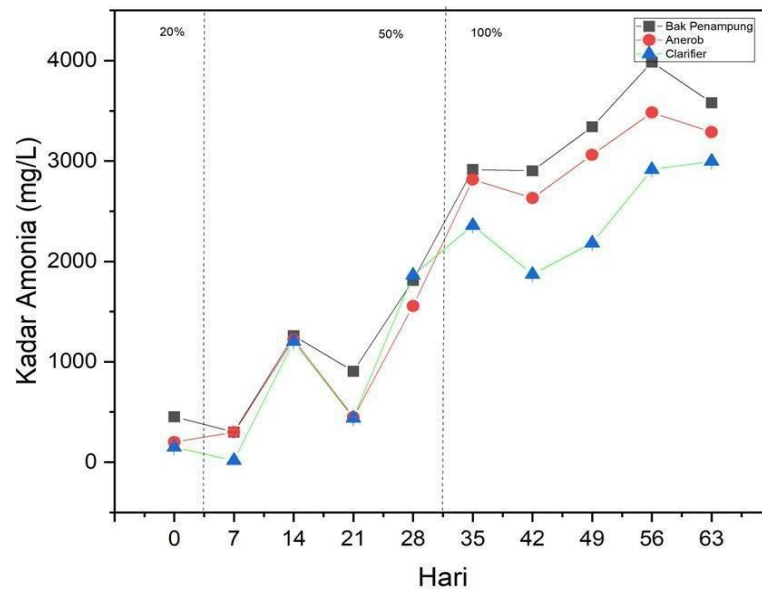
Hasil pengujian kadar ammonia pada masing-masing konsentrasi dari 20%, 50%, dan 100% dapat dilihat pada gambar 4.1 dan 4.2 yang menunjukkan perubahan kadar ammonia melalui serangkaian reaktor dimulai dari bak penampung, (aerob-anaerob), clarifier, FW Bakteri, CW Bakteri, FW Non Bakteri, CW Non Bakteri. Pada ketiga konsentrasi limbah air lindi terdapat perbedaan pada masing-masing konsentrasi, dimana setiap peningkatan nilai konsentrasi limbah air lindi berbanding lurus dengan peningkatan kadar ammonia. Proses dekomposisi nitrogen organik terlarut menyebabkan peningkatan kadar ammonia dalam jumlah besar dan terjadi lebih cepat saat minggu pertama sehingga terjadi penumpukan senyawa ammonia (Ng et al, 2017; Aziz et al, 2020). Oksidasi aerob berperan dalam mengubah senyawa akhir yang lebih stabil (Badrah et al, 2021). Ammonia ( $\text{NH}_3$ ) di air dapat menguap ke udara terutama saat angin kencang dan suhu panas, proses tersebut disebut volatilisasi yang disebabkan akibat tekanan gas ammonia ( $\text{NH}_3$ ) di air lebih tinggi daripada di udara, sehingga ammonia ( $\text{NH}_3$ ) menguap dan terlepas ke udara (Boyd, 1998)

### 4.2.1 Pengolahan Biologis Non *Wetland*

Proses pengolahan biologis non wetland dilakukan pada rangkaian awal reaktor dimulai dari bak penampung, anaerob-aerob, dan clarifier. Pada rangkaian reaktor bak penampung yang merupakan proses *preliminary treatment* yang bertujuan untuk menyiapkan air lindi yang akan diolah pada rangkaian berikutnya sesuai dengan konsentrasi yang telah ditentukan yaitu 20%, 50%, dan 100%. Kemudian dilanjutkan dengan proses biologis yang terjadi pada bak aerob-clarifier, proses utama yang terjadi adalah nitrifikasi–denitrifikasi. Dalam kondisi aerob, terjadi proses nitrifikasi dimana oksigen akan mengoksidasi ammonia menjadi nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) dan kemudian menjadi nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ). Reaksi ini berlangsung dengan bantuan oksigen terlarut (DO) sebagai akseptor elektron, di mana *Nitrosomonas* memanfaatkan ammonia sebagai sumber energi dan *Nitrobacter* melanjutkan oksidasi nitrit menjadi nitrat. Proses ini tidak hanya mengubah bentuk nitrogen menjadi lebih stabil, tetapi juga mengurangi toksisitas ammonia yang tinggi terhadap

mikroorganisme dan lingkungan perairan. Selanjutnya, pada zona anoksik yang terjadi di *clarifier* terjadi proses denitrifikasi, bakteri denitrifikasi seperti *Pseudomonas* dan *Bacillus* menggunakan nitrat hasil nitrifikasi sebagai akseptor elektron dan mereduksinya menjadi gas nitrogen ( $N_2$ ) yang dilepaskan ke atmosfer. Proses ini dikenal sebagai denitrifikasi, yang melengkapi siklus nitrogen dan menurunkan total nitrogen dalam air lindi (Ren, H., & Zhao, L., 2019)

Berikut ini merupakan grafik yang menunjukkan hasil pengujian kadar ammonia dari proses pengolahan bak penampung-CW non bakteri:



Gambar 4. 1 Grafik Konsentrasi Ammonia (Bak Penampung-Clarifier)

Berdasarkan hasil pengujian air lindi di TPA Piyungan, kandungan amonia tercatat sangat tinggi, berkisar antara 283,75 mg/L hingga 1.050 mg/L, dengan nilai COD dan BOD yang juga cukup besar, menunjukkan tingkat pencemaran yang berat dan tingkat biodegradabilitas yang rendah. Konsentrasi amonia setinggi ini disebabkan oleh proses dekomposisi bahan organik nitrogen (protein, urea, dan asam amino) dalam timbunan sampah yang berlangsung secara anaerob. Kondisi TPA Piyungan yang telah beroperasi sejak tahun 1995 dengan volume timbunan mencapai jutaan ton dan sistem drainase lindi yang terbuka menyebabkan air lindi mengandung amonia bebas ( $NH_3$ ) dalam jumlah signifikan. Amonia bebas bersifat toksik terhadap organisme akuatik karena dapat menghambat respirasi dan

mengganggu keseimbangan osmotik biota air, serta menyebabkan penurunan kadar oksigen terlarut di badan air penerima.

#### **4.2.2 Pengolahan Biologis *Wetland***

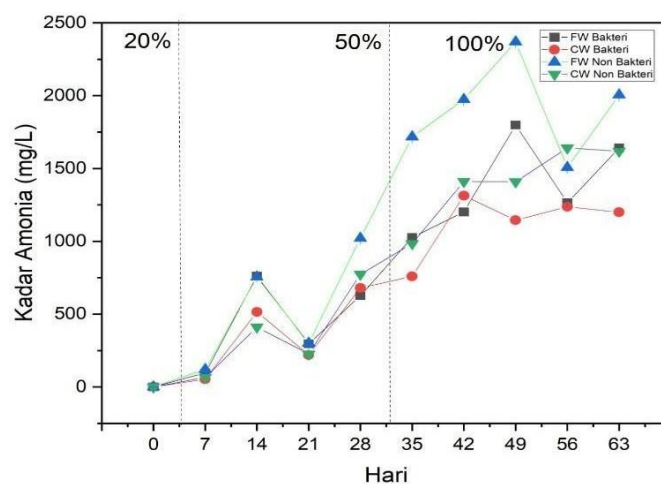
Terdapat dua variasi dalam pengolahan biologis *wetland* dengan tanaman *Typha angustifolia* yaitu dengan penambahan bakteri dan non bakteri pada masing-masing sistem reaktor, baik pada Constructed Treatment dan Floating Treatment *Wetland*.

Ketika *Typha angustifolia* dikombinasikan dengan bakteri PGPR (*Plant Growth-Promoting Rhizobacteria*) seperti *Bacillus velezensis*, *Bacillus cereus*, dan *Staphylococcus xylosum*, proses degradasi amonia menjadi lebih cepat dan efisien. Bakteri PGPR bekerja melalui mekanisme bioaugmentasi, yaitu meningkatkan kemampuan tanaman dan mikroba alami dalam mendegradasi polutan. Bakteri PGPR mempercepat oksidasi amonia melalui produksi enzim amonia monooxygenase dan *nitrite oxidoreductase* yang meningkatkan laju nitrifikasi di sekitar akar (Ng et al., 2017). Selain itu, PGPR menghasilkan hormon pertumbuhan tanaman seperti IAA, sitokinin, dan giberelin yang merangsang perkembangan akar, sehingga memperluas area penyerapan  $\text{NH}_4^+$  dan meningkatkan permeabilitas oksigen ke rhizosfer (Backman & Sikora, 2008). Bakteri *Bacillus* juga berperan dalam denitrifikasi karena mampu mereduksi nitrat menjadi nitrogen gas pada kondisi anoksik, sehingga mempercepat penghilangan nitrogen total (Mutiara et al., 2019). Kehadiran PGPR meningkatkan ketahanan *Typha* terhadap toksisitas air lindi, memperbaiki sistem perakaran, dan memperkuat kolonisasi mikroba fungsional, sehingga efisiensi penurunan amonia menjadi lebih tinggi dibandingkan sistem tanpa PGPR. Hal ini didukung oleh penelitian Rahmad et al. (2022) dan Ng et al. (2017) yang menunjukkan bahwa integrasi bakteri dan tanaman mampu meningkatkan efisiensi removal ammonia hingga >90%.

Pada sistem fitoremediasi tanpa penambahan bakteri PGPR, tanaman *Typha angustifolia* melakukan penurunan amonia melalui tiga mekanisme utama: penyerapan langsung, transformasi biologis di zona perakaran (rhizosfer), dan peningkatan kondisi mikro-lingkungan yang mendukung proses nitrifikasi–denitrifikasi. Amonium ( $\text{NH}_4^+$ ) dalam air lindi diserap oleh akar sebagai sumber nitrogen untuk pertumbuhan, kemudian ditranslokasikan ke jaringan tanaman sebagai penyusun protein dan klorofil (Anning & Akoto, 2018). Selain

penyerapan, akar *Typha* mengeluarkan oksigen melalui proses *radial oxygen loss* (ROL), yang menciptakan zona oksik di sekitar akar. Zona ini mendukung aktivitas bakteri nitrifikasi seperti *Nitrosomonas* (mengoksidasi  $\text{NH}_4^+$  menjadi  $\text{NO}_2^-$ ) dan *Nitrobacter* (mengoksidasi  $\text{NO}_2^-$  menjadi  $\text{NO}_3^-$ ). Di bagian akar yang lebih dalam dengan sedikit oksigen, terjadi proses denitrifikasi oleh bakteri anaerob fakultatif yang mereduksi nitrat menjadi gas nitrogen ( $\text{N}_2$ ), sehingga nitrogen hilang dari sistem sebagai emisi yang tidak berbahaya (Ren & Zhao, 2019). Kombinasi mekanisme serapan tanaman, nitrifikasi–denitrifikasi alami di rhizosfer, serta volatilisasi  $\text{NH}_3$  pada kondisi pH dan suhu tertentu, menjadikan *Typha angustifolia* tetap efektif menurunkan amonia meskipun tanpa mikroba tambahan (Niam et al., 2013).

Berikut ini merupakan grafik konsentrasi ammonia FW Bakteri-CW Non Bakteri:



Gambar 4. 2 Grafik Konsentrasi Ammonia (FW Bakteri-CW Non Bakteri)

Pada konsentrasi air lindi 20% hari ke 0 kadar ammonia sebesar 452,532 mg/L yang merupakan karakter awal air lindi. Setelah dilakukan proses pengolahan, terdapat penurunan kadar ammonia secara signifikan melalui serangkaian reaktor yaitu pada bak anaerob sebesar 199,306 mg/L, clarifier sebesar 149,904 mg/L, FW bakteri 0,98 mg/L, CW bakteri 0,65 mg/L, dan sampai pada proses terakhir yaitu FW non bakteri 0,83 mg/L dan CW non bakteri 0,773 mg/L.

Pada air lindi 50% kadar ammonia pada minggu pertama atau hari ke 7 sempat mengalami penurunan dari konsentrasi 20 % sebelumnya pada nilai 299,085 mg/L di bak penampung. Namun setelah mengalami proses pengolahan melalui serangkaian reaktor, kadar ammonia tetap menunjukkan adanya penurunan sampai di CW non bakteri kadar ammonia sebesar 65,6262 mg/L. Penurunan kadar amonia disebabkan oleh proses volatilisasi, yaitu penguapan amonia ke udara dalam bentuk gas. Proses ini menjadi salah satu faktor utama yang menurunkan konsentrasi amonia, terutama di lingkungan terbuka yang terkena sinar matahari (Mutiara et al., 2019)

Pada konsentrasi 100% kadar ammonia mencapai 2902,505 mg/L minggu pertama atau hari ke 42. Penurunan kadar ammonia terjadi di seluruh reaktor sampai pada hari ke 63. Penurunan tertinggi terletak pada *Constructed Treatment Wetland* dengan nilai 1199,229 mg/L. Konsentrasi amonia cenderung tidak stabil karena dipengaruhi oleh penyerapan tanaman dan proses nitrifikasi, di mana amonia diubah menjadi nitrit dan nitrat (Kholif & Sugito, 2020)

### **4.3 Parameter Fisik**

Pengujian parameter fisik dilakukan sebanyak 58 kali pengujian dimulai pada tanggal 7 Mei 2025- 3 Juli 2025 menggunakan *Multifunction Pen Type Water Quality Testing*. Terdapat beberapa parameter yang diuji yaitu pH, EC/Cons, suhu, TDS, MLSS, SV 30 dan DO. Pengujian parameter fisik dilakukan dengan cara memasukan alat *Multifunction Pen Type Water Quality Testing* ke dalam sampel air lindi pada masing-masing rangkaian reaktor, dimulai dari bak penampung, aerob, anaerob, clarifier, Floating Treatment Wetland (Bakteri dan non Bakteri), dan Constructed Treatment Wetland (Bakteri dan non Bakteri) dilakukan pada masing-masing konsentrasi setiap harinya. Berikut ini merupakan analisis masing-masing parameter fisik yang telah diuji pada air lindi:

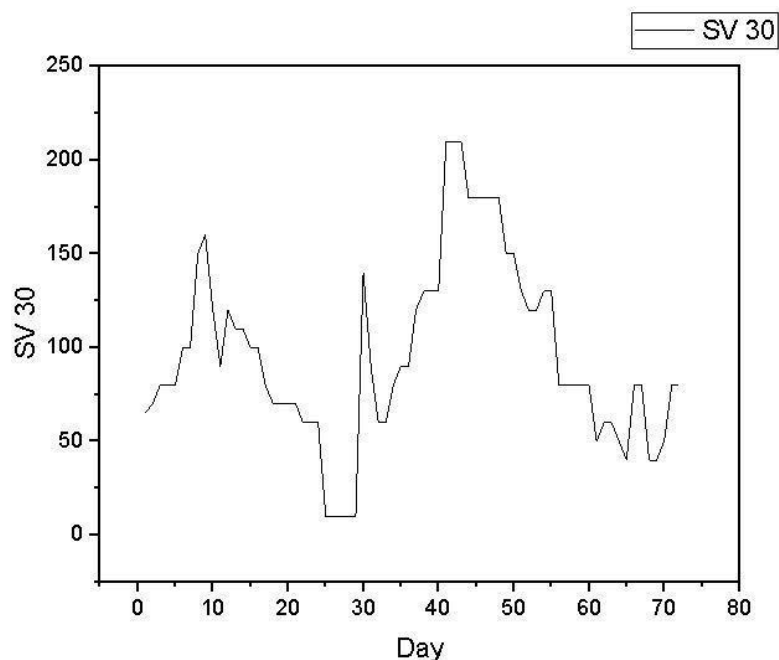
#### **4.3.1. SV 30**

Berdasarkan grafik yang menunjukkan nilai Sludge Volume after 30 minutes (SV30) selama 63 hari, dapat dilihat bahwa terdapat variasi yang cukup signifikan dalam karakteristik lumpur dari air lindi. Nilai SV30 mengalami fluktuasi dari titik minimum mendekati 0 mL/L hingga maksimum mendekati 220 mL/L. Pada awal

periode (hari ke-1 hingga ke-20), SV30 menunjukkan peningkatan yang cukup tajam, mengindikasikan akumulasi biomassa atau kemungkinan masalah dalam sedimentasi lumpur. Nilai kemudian turun drastis di sekitar hari ke-30,

yang dapat diinterpretasikan sebagai gangguan dalam sistem biologi, seperti shock loading, toksisitas, atau masalah dalam pengendalian proses. Setelah itu, terdapat lonjakan kembali hingga mencapai nilai tertinggi hari ke-42 sebelum kembali menurun bertahap. Pola fluktuasi ini dapat mengindikasikan ketidakkonsistenan dalam kualitas air lindi, keberadaan zat pengganggu (inhibitor), atau pengaruh beban organik yang berubah-ubah.

Berikut ini merupakan hasil uji SV 30 selama 63 hari:



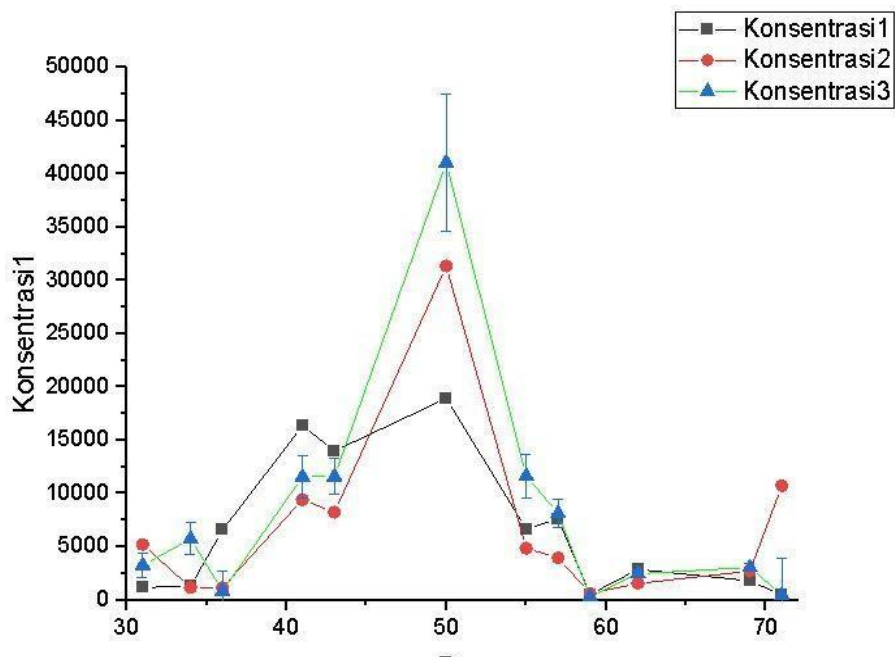
Gambar 4. 3 Grafik SV30

#### 4.3.2. MLSS

Berdasarkan grafik hasil pengujian MLSS selama 63 hari, terlihat bahwa ketiga jenis konsentrasi (Konsentrasi 1, Konsentrasi 2, dan Konsentrasi 3) mengalami fluktuasi signifikan dengan puncak tertinggi terjadi sekitar hari ke-50, di mana MLSS mencapai lebih dari 40.000 mg/L pada Konsentrasi 3. Lonjakan nilai MLSS ini mengindikasikan adanya peningkatan biomassa mikroorganisme

dalam sistem pengolahan biologis air lindi, yang dapat disebabkan oleh masuknya beban organik yang tinggi. Namun, lonjakan ini diikuti oleh penurunan drastis MLSS pada hari-hari setelahnya (hari ke-55 hingga ke-60), yang dapat menandakan terjadinya inhibisi aktivitas mikroba, kematian sel, atau washout lumpur aktif akibat beban toksik yang tidak terkendali terutama amonia.

Berikut ini merupakan hasil uji MLSS selama 63 hari:



Gambar 4. 4 Grafik Hasil Uji MLSS

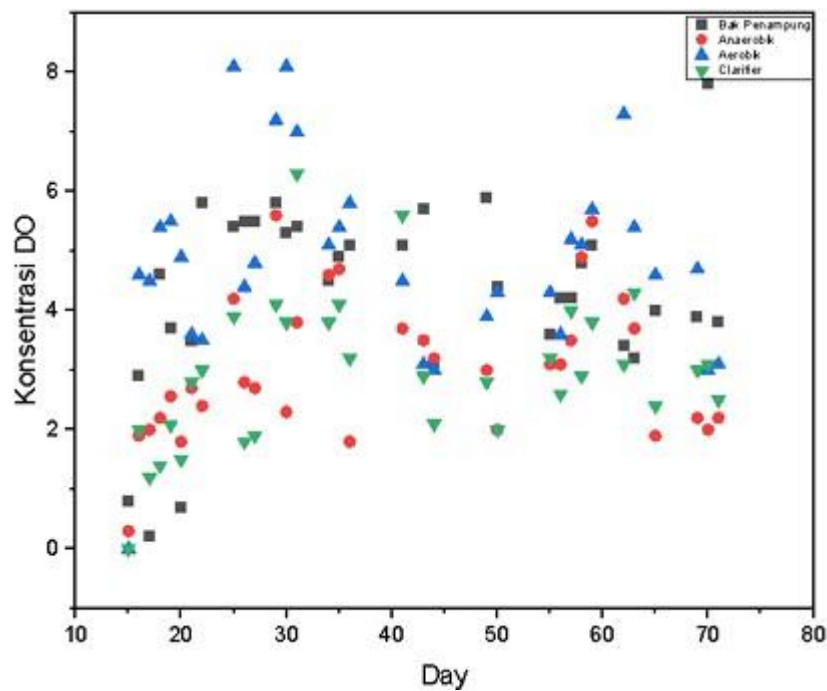
Amonia dalam air lindi, terutama pada konsentrasi tinggi dan dalam bentuk  $\text{NH}_3$  bebas (non-ionik), dikenal bersifat toksik terhadap mikroorganisme dalam sistem lumpur aktif. Keberadaan amonia yang tinggi dapat menghambat aktivitas bakteri nitrifikasi (*Nitrosomonas* dan *Nitrobacter*), yang pada akhirnya menurunkan efisiensi proses pengolahan dan menyebabkan penurunan drastis konsentrasi MLSS. Penurunan MLSS pada grafik di atas dapat dikaitkan dengan kemungkinan akumulasi amonia dalam reaktor akibat beban nitrogen yang tidak terurai secara efektif, atau kurangnya adaptasi mikroorganisme terhadap kondisi lingkungan. Kenaikan kembali nilai MLSS pada hari ke-70 untuk Konsentrasi 2 juga mengindikasikan bahwa sistem perlahan-lahan mulai pulih, mungkin karena

konsentrasi amonia menurun atau karena mikroorganismenya mulai beradaptasi terhadap lingkungan yang ekstrem.

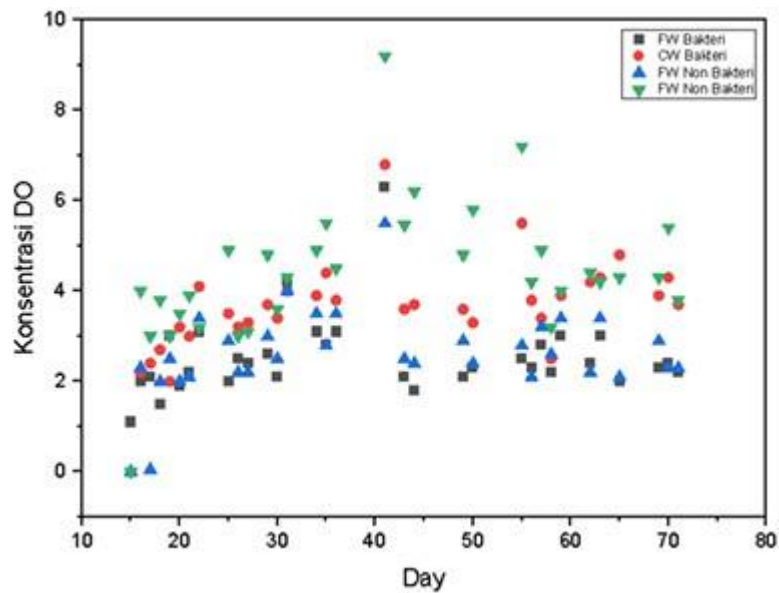
### 4.3.3. Dissolved Oxygen (DO)

Berdasarkan grafik hasil pengujian konsentrasi *Dissolved Oxygen* (DO) pada berbagai tahapan unit pengolahan air limbah dan berbagai perlakuan, terlihat bahwa nilai DO mengalami fluktuasi dengan kecenderungan menurun pada titik-titik tertentu. Pada grafik pertama, tahapan anaerob cenderung memiliki nilai DO yang rendah (<2 mg/L), sesuai dengan kondisi lingkungan yang memang dirancang tanpa keberadaan oksigen. Sementara itu, pada tahapan aerobik dan clarifier, nilai DO menunjukkan kisaran yang lebih tinggi, yaitu antara 3–7 mg/L, yang menunjukkan keberadaan oksigen terlarut yang cukup untuk mendukung aktivitas mikroorganismenya aerob. Hal ini mengindikasikan bahwa kondisi lingkungan dalam unit-unit tersebut telah sesuai untuk proses biologis yang bergantung pada oksigen, seperti nitrifikasi.

Berikut ini merupakan hasil uji MLSS selama 63 hari:



Gambar 4. 5 Grafik Hasil Uji DO di beberapa reaktor . Reaktor Bak penampung, anaerobik, aerobik, dan clarifier



Gambar 4. 6 Grafik Konsentrasi DO di beberapa reaktor. Reaktor FW Bakteri, CW Bakteri, FW Non Bakteri, CW Non Bakteri

Pada grafik kedua, pengaruh perlakuan bakteri (FW/CW Bakteri) dan non-bakteri juga terlihat signifikan terhadap fluktuasi DO. Perlakuan dengan bakteri cenderung mempertahankan kadar DO yang lebih stabil, berkisar antara 2–6 mg/L, sementara pada perlakuan non-bakteri terdapat lebih banyak penyimpangan atau nilai ekstrem. Stabilitas kadar DO ini penting karena oksigen terlarut adalah komponen kunci dalam proses nitrifikasi, yaitu konversi amonia ( $\text{NH}_3$ ) menjadi nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) dan kemudian nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) oleh bakteri nitrifikasi seperti *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter*. Proses ini hanya dapat berlangsung dalam kondisi aerobik yang optimal. Oleh karena itu, fluktuasi DO yang besar atau DO yang rendah (<2 mg/L) dapat menyebabkan proses nitrifikasi terganggu, yang pada akhirnya menyebabkan penumpukan amonia dalam air lindi.

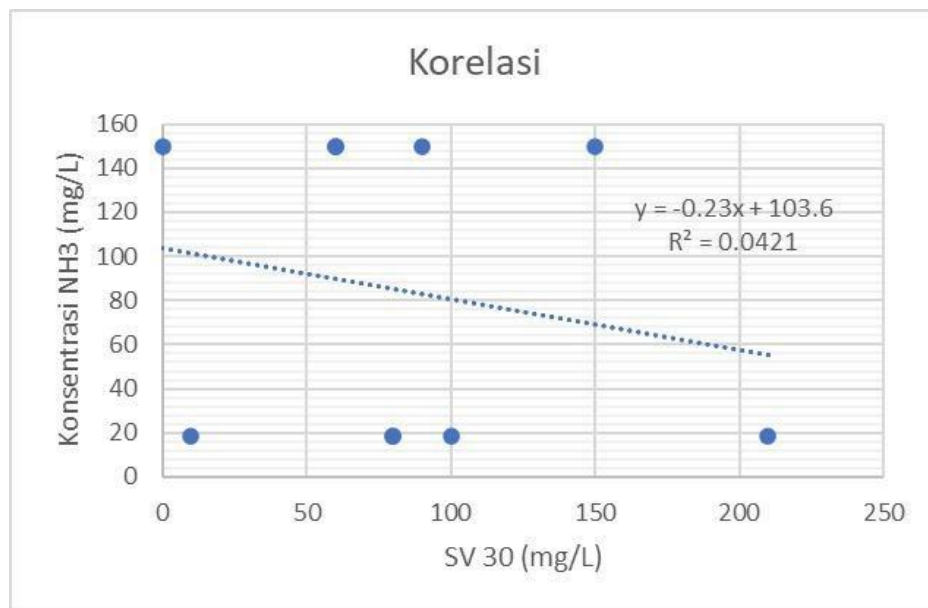
#### 4.4 Korelasi Sludge Dengan Removal Ammonia

##### 4.4.1. Korelasi SV30 Dengan Removal Ammonia

Dengan nilai koefisien determinasi  $R^2=0.0421$  garis regresi menunjukkan kemiringan negatif, yang secara teori menyiratkan bahwa semakin tinggi SV30, semakin rendah konsentrasi amonia. Ini masuk akal karena lumpur aktif yang

mengendap dengan baik (nilai SV30 tinggi) biasanya menandakan sistem biologis yang sehat dan aktif dalam mendegradasi senyawa seperti amonia (Metcalf & Eddy, 2014).

Berikut ini merupakan grafik korelasi antara SV 30 dengan konsentrasi ammonia:



Gambar 4. 7 Grafik korelasi konsentrasi NH<sub>3</sub> dengan SV30

Namun, nilai  $R^2$  yang sangat kecil (0.0421) menunjukkan bahwa keterkaitan antara SV30 dan konsentrasi NH<sub>3</sub> sangat lemah. Dengan kata lain, variabilitas SV30 hanya menjelaskan sekitar 4,21% dari variasi konsentrasi amonia, sedangkan faktor lain memengaruhi.

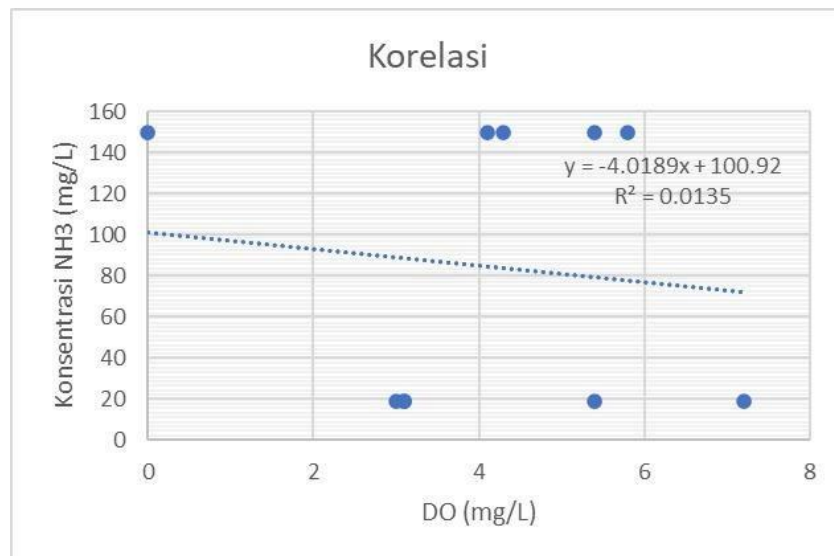
Hasil pengujian SV 30 tidak menunjukkan korelasi yang kuat terhadap penurunan ammonia salah satu penyebab utama fluktuasi ini juga dipengaruhi oleh tingginya kadar ammonia dalam air lindi pada hari ke 42 sebesar 2902,505 mg/L. Amonia merupakan senyawa toksik bagi mikroorganismenya, terutama pada pH tinggi di mana bentuk bebas  $\text{NH}_3$  lebih dominan dan lebih beracun. Konsentrasi amonia yang tinggi dapat menghambat aktivitas bakteri nitrifikasi, menyebabkan ketidakseimbangan komunitas mikroba, serta menurunkan efisiensi sedimentasi lumpur aktif. Oleh karena itu, penurunan nilai SV30 secara drastis bisa dikaitkan dengan peningkatan kadar amonia yang mengganggu sistem

biologis. Selain itu, peningkatan SV30 secara mendadak bisa mencerminkan akumulasi mikroorganisme yang belum mengalami degradasi sempurna akibat ketidakmampuan sistem mengolah beban organik tinggi dari air lindi.

#### 4.4.2. Korelasi DO Dengan Removal Ammonia

Stabilitas kadar DO ini penting karena oksigen terlarut adalah komponen kunci dalam proses nitrifikasi, yaitu konversi amonia ( $\text{NH}_3$ ) menjadi nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) dan kemudian nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) oleh bakteri nitrifikasi seperti *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter*. Proses ini hanya dapat berlangsung dalam kondisi aerobik yang optimal. Oleh karena itu, fluktuasi DO yang besar atau DO yang rendah ( $<2$  mg/L) dapat menyebabkan proses nitrifikasi terganggu, yang pada akhirnya menyebabkan penumpukan amonia dalam air lindi.

Berikut ini merupakan grafik korelasi antara SV 30 dengan konsentrasi ammonia:



Gambar 4. 8 Grafik korelasi konsentrasi NH<sub>3</sub>dengan DO

Garis regresi memiliki kemiringan negatif, yang berarti secara teoritis bahwa semakin tinggi DO, maka konsentrasi amonia cenderung menurun. Hal ini sejalan dengan prinsip dasar bioremediasi, karena bakteri nitrifikasi seperti *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter* memerlukan DO yang cukup ( $>2$  mg/L) untuk mengoksidasi amonia menjadi senyawa yang kurang beracun (Metcalf & Eddy, 2014). Nilai  $R^2$  yang sangat rendah (0.0135) menunjukkan bahwa hubungan antara DO dan NH<sub>3</sub> sangat lemah dalam sistem ini. Artinya, hanya sekitar 1,35%

variasi dalam konsentrasi amonia yang bisa dijelaskan oleh perubahan nilai DO. Sebagian besar variasi amonia dipengaruhi oleh faktor lain.

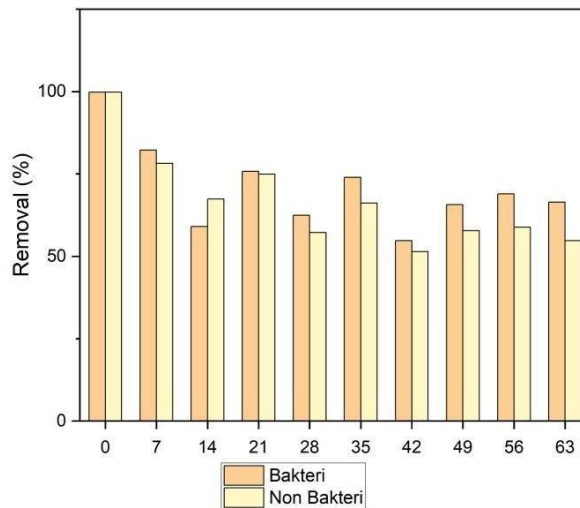
Penurunan kadar DO juga bisa disebabkan oleh beban amonia yang tinggi, karena proses oksidasi amonia secara biologis membutuhkan jumlah oksigen yang besar. Reaksi nitrifikasi secara keseluruhan sangat menguras oksigen, dengan perkiraan kebutuhan oksigen sebesar 4,57 mg O<sub>2</sub> untuk setiap mg amonia yang teroksidasi. Maka, pada fase-fase di mana kadar amonia meningkat tajam (seperti yang ditunjukkan dalam grafik amonia sebelumnya), kadar DO cenderung menurun akibat konsumsi oksigen yang tinggi oleh mikroorganisme. Hal ini menjelaskan korelasi negatif antara kadar amonia dan DO dalam sistem pengolahan air lindi. Jika suplai oksigen tidak sebanding dengan beban amonia, maka proses nitrifikasi tidak dapat berlangsung optimal, menyebabkan akumulasi amonia yang bersifat toksik terhadap mikroorganisme lain.

#### 4.5 Efisiensi Removal

Berikut ini merupakan tabel efisiensi removal:

Tabel 4. 2 Efisiensi Removal

Reaktor	Konsentrasi 20%	Konsentrasi 50%				Konsentrasi 100%				
	0	7	14	21	28	35	42	49	56	63
Aerob-Anaerob	56,0	66,9	2,9	50,5	14,1	3,5	9,4	8,4	12,6	8,1
Clarifier	66,9	99,9	4,5	94,4	-2,9	99,9	35,5	99,7	26,8	99,8
Bakteri	99,9	82,3	59,1	75,8	62,5	74,0	54,8	65,7	69,0	54,7
Non Bakteri	99,8	78,2	67,4	75,0	57,2	66,2	51,4	57,8	58,8	66,5



Gambar 4. 7 Grafik Efisiensi Removal

Berdasarkan hasil pengujian efisiensi removal ammonia pada air lindi dengan variasi konsentrasi 20%, 50%, dan 100%, dapat disimpulkan bahwa kemampuan setiap unit pengolahan menunjukkan perbedaan yang signifikan tergantung pada jenis reaktor dan konsentrasi yang diuji. Reaktor clarifier menunjukkan efisiensi yang paling stabil dan tinggi dalam menghilangkan ammonia, dengan efisiensi mencapai hingga 99,8% pada konsentrasi 100%, menunjukkan keandalan sistem tersebut bahkan pada kondisi beban pencemar tinggi. Sementara itu, reaktor biologis aerob-anaerob menunjukkan penurunan efisiensi secara drastis seiring meningkatnya konsentrasi lindi, dari 66,9% pada konsentrasi 14% menjadi hanya 8,1% pada konsentrasi 63%, mengindikasikan adanya penurunan aktivitas mikroorganisme akibat tingginya kadar ammonia yang bersifat toksik. Reaktor dengan bakteri memiliki performa lebih baik dibandingkan reaktor non-bakteri, terutama pada konsentrasi 50% dengan efisiensi mencapai 74,0%, namun efisiensinya juga menurun pada konsentrasi 100% menjadi 54,7%. Di sisi lain, reaktor non-bakteri memiliki efisiensi yang relatif lebih rendah dan tidak konsisten, menunjukkan keterbatasannya dalam menghilangkan ammonia tanpa dukungan mikroorganisme. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa kehadiran bakteri dan sistem klarifikasi sangat

berpengaruh terhadap efektivitas proses fitoremediasi dalam menurunkan kadar ammonia pada air lindi, terutama dalam menghadapi variasi konsentrasi yang tinggi.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan dapat disimpulkan bahwa kadar ammonia pada serangkaian proses reaktor di masing-masing konsentrasi yaitu 20%, 50%, dan 100% penelitian ini membuktikan bahwa kombinasi antara pengolahan biologis menggunakan konsorsium bakteri endofit (*Bacillus velezensis*, *Bacillus cereus*, dan *Staphylococcus xylosus*) dan fitoremediasi dengan tanaman *Typha angustifolia* dalam sistem *constructed wetland* dan *floating wetland* mampu menurunkan kadar ammonia dari air lindi TPA Piyungan. Efisiensi penurunan kadar ammonia tertinggi terjadi pada konsentrasi air lindi 20%, dengan efektivitas pengolahan yang lebih optimal pada *Constructed Wetland* non-bakteri mencapai efisiensi hingga 99,9%. Sementara pada konsentrasi 100%, penurunan tetap terjadi namun dengan efisiensi lebih rendah karena tingginya beban ammonia dan fluktuasi parameter fisik seperti DO, suhu, serta SV30 dan MLSS yang mempengaruhi aktivitas mikroorganisme.

#### **5.2 Saran**

Adapun saran yang dapat diberikan berdasarkan penelitian yang telah dilakukan antara lain:

1. Diperlukan penelitian lanjutan untuk menguji stabilitas sistem dalam kondisi lingkungan.
2. Perlu dilakukan pemantauan jangka panjang terhadap kualitas effluent dan kondisi mikrobiologis substrat untuk mengevaluasi keberlanjutan sistem.

3. Penelitian ke depan dapat mempertimbangkan kombinasi *Typha angustifolia* dengan tanaman fitoremediasi lain guna meningkatkan efektivitas dan ketahanan sistem terhadap variasi kualitas air lindi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, A. A., Jingsong, G., Ping, L. Z., Ya, P. Y., & Al-Rekabi, W. S. (2009). Review on landfill leachate treatments. *American Journal of Applied Sciences*, 6(4), 672–684. <https://doi.org/10.3844/ajas.2009.672.684>
- Abdulgani, H., Izzati, M., & S, S. (2014). Kemampuan Tumbuhan Typha Angustifolia Dalam Sistem Subsurface Flow Constructed Wetland Untuk Pengolahan Limbah Cair Industri Kerupuk (Studi Kasus Limbah Cair Sentra Industri Kerupuk Desa Kenanga Kecamatan Sindang Kabupaten Indramayu Jawa Barat). *Bioma : Berkala Ilmiah Biologi*, 16(2), 90.
- Ramadhani, J., Asrifah, R. D., & Wahyuning, I. (2019). Pengolahan Air Lindi Menggunakan Metode *Constructed Wetland* di TPA Sampah Tanjungrejo, Desa Tanjungrejo, Kecamatan Jekulo, Kabupaten Kudus. *Jurnal Ilmiah Lingkungan Kebumihan*, 1(2), 1–8. <http://jurnal.upnyk.ac.id/index.php/kebumihan/article/view/3280>
- Rezagama, A., Purwono, P., Hadiwidodo, M., Yustika, M., & Prabowo, Z. N. (2017). Pengolahan Air Lindi TPA Jatibarang Menggunakan (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> – Fe). *Jurnal Presipitasi : Media Komunikasi Dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 14(1), 30. <https://doi.org/10.14710/presipitasi.v14i1.30-36>
- Suharti. (2018). *Teknik Pengelolaan Sampah Di Tpa Piyungan Sebagai Sumber Belajar Pengelolaan Limbah Padat*. 1–10.
- Suhartini. (2008). Pengaruh Keberadaan Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Sampah Piyungan terhadap Kualitas Air Sumur Penduduk di Sekitarnya. *Naskah Jurnal Saintek 2008*, 0–16.

- Wulandari, D. I. (2023). Efektifitas kombinasi reaktor aerasi dan spesifik bakteri untuk mendegradasi polutan air limbah lindi tpa piyungan.
- Abdulgani, H., Izzati, M., & S, S. (2014). Kemampuan Tumbuhan *Typha Angustifolia* Dalam Sistem *Subsurface Flow Constructed Wetland* Untuk Pengolahan Limbah Cair Industri Kerupuk (Studi Kasus Limbah Cair Sentra Industri Kerupuk Desa Kenanga Kecamatan Sindang Kabupaten Indramayu Jawa Barat). *Bioma: Berkala Ilmiah Biologi*, 16(2), 90.
- Aziz, H. A., Aziz, S. Q., & Ng, W. J. (2010). Landfill leachate treatment using sequential anaerobic–aerobic process. *Desalination*, 264(1–2), 132–138.
- Badrah, B., Susilo, S., & Rusdiansyah, A. (2021). Performance of constructed wetland system in reducing ammonium concentration from leachate. *Journal of Environmental Science and Sustainable Development*, 4(1), 64–72.
- Boyd, C. E. (1998). *Water quality: An introduction*. Springer.
- Budhi, J. (2018). Fitoremediasi sebagai Teknologi Hijau untuk Remediasi Lingkungan. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*, 10(1), 25–34.
- Diana, F. N. (2019). Karakteristik Air Lindi di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) dan Dampaknya terhadap Lingkungan. *Jurnal Ilmiah Lingkungan*, 3(2), 112–119.
- Hargreaves, J. A., Tucker, C. S., & Kingsbury, M. (2004). Managing ammonia in fish ponds. *Southern Regional Aquaculture Center Publication No. 4603*.
- Juhaiti, R. A., Widodo, M. S., & Widodo, R. H. (2017). Efektivitas Fitoremediasi dalam Menurunkan Kadar Logam Berat dalam Air. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 15(2), 88–94.

- Kartikasari, M. A., Yuniastuti, E., & Putra, P. D. (2020). Karakteristik Air Lindi di TPA Piyungan Yogyakarta. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 9(1), 56–63.
- Kurniaty, Y., Nararaya, W. H. B., Turawan, R. N., & Nurmuhamad, F. (2016). Mengefektifkan Pemisahan Jenis Sampah Sebagai Upaya Pengelolaan Sampah Terpadu. *Varia Justicia*, 12(1), 135–150.
- Mangimbulude, J. C., Sutaryo, I., & Widiastuti, M. (2012). Kandungan Amonia pada Air Lindi dan Dampaknya terhadap Kualitas Lingkungan. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 10(1), 44–52.
- Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Ng, C. A., Shu, L., & Lin, Y. F. (2017). Ammonia removal from leachate by hybrid wetland systems: Field and modeling studies. *Ecological Engineering*, 103, 232–241.
- Niam, R., Haryani, G. S., & Suprihatin, S. (2013). Efektivitas Tanaman *Thypha Angustifolia* dan *Eceng Gondok* (*Eichornia crassipes*) dalam Menurunkan Kadar Logam Berat pada Limbah TPA. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 14(1), 28–35.
- Pusporini, M. A. (2016). Pengaruh Bakteri Endofit terhadap Pertumbuhan dan Kemampuan Fitoremediasi Tanaman Air. *Jurnal Biologi Tropis*, 16(2), 77–85.
- Rahmad, F., Rahayu, I., & Wahyuni, S. (2022). Efektivitas Proses Anaerobik-Aerobik dalam Mengurangi Polutan pada Air Limbah. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 11(1), 21–29.
- Setiyanto, T. W., Nurhadi, B., & Widodo, M. (2016). Efektivitas Sistem Constructed Wetland dalam Menurunkan Kandungan COD dan Ammonia. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 12(2), 76–84.

- Suharyadi, S., Fadhil, M., & Wibowo, A. (2022). Pemanfaatan *Thypha angustifolia* dalam Penurunan Kandungan Logam Berat Air Asam Tambang. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 18(2), 103–112.
- Syakib, M. (2019). Dampak Lingkungan dari Tempat Pembuangan Akhir Sampah. *Jurnal Teknologi dan Manajemen Lingkungan*, 20(1), 55–61.
- Trimanto, R. (2012). Proses Aklimatisasi Bakteri dalam Pengolahan Air Limbah. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 10(2), 78–84.
- Utami, A. P., Priyambodo, T., & Suryadi, E. (2002). Efektivitas Tanaman Air dalam Menurunkan Pencemaran Air Lindi pada Sistem Constructed Wetland. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 9(2), 112–118.
- Wahyuningsih, S., Sunaryo, H., & Nuraini, E. (2020). Pengaruh Suhu terhadap Efisiensi Nitrifikasi dalam Pengolahan Air Limbah. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 14(1), 67–74.
- Yatim, B., & Mukhis, M. (2017). Teknologi Fitoremediasi dalam Pengolahan Air Lindi. *Jurnal Lingkungan dan Pembangunan*, 8(2), 99–107.
- Zaman, M. (2013). Biologi dan Teknologi Pengolahan Amonia dalam Limbah Cair. *Environmental Science Journal*, 4(1), 55–66.

## LAMPIRAN

Hari	Bak Penampung	Anaerob	Clarifier	FW Bakteri	CW Bakteri	FW Non Bakteri	CW Non Bakteri
0	452,532	199,306	149,904	0,98	0,65	0,83	0,773
7	299,0850	298,1970	18,6530	96,4547	53,0829	119,9229	65,2216
14	1259,1522	1222,7360	1202,5048	760,5877	515,1445	755,3276	410,7514
21	905,7418	448,1118	437,5915	296,1464	219,1908	300,1927	226,4740
28	1810,3854	1555,8767	1863,1985	626,3006	679,5568	1020,8092	774,2389
35	2915,2216	2814,0655	2358,6898	1025,3950	758,8439	1716,8015	984,6243
42	2902,505	2630,597	1871,676	1201,310	1312,832	1974,470	1409,942
49	3340,462	3061,272	2183,622	1798,844	1144,990	2369,364	1409,634
56	3984,586	3482,852	2916,378	1264,740	1236,590	1507,514	1640,809
63	3579,961	3288,632	2997,303	1641,040	1199,229	2005,202	1620,039

Lampiran 1 Average Hasil Pengujian (20%,50%,100%)

Sampel	Duplo	Absorbansi (A)	C (mg/L)	f	Kadar NH <sub>3</sub>	SE	AVG	Efisiensi Removal
Bak Penampung	1	0,114	0,9395	350	452,532	0,0105	452,532	
	2	0,093	0,7696		452,532			
Anaerob-Aerob	1	0,077	0,6401	300	192,023	0,003	199,306	55,96%
	2	0,083	0,6886		206,590			
Clarifier	1	0,075	0,6239	250	155,973	0,003	149,904	66,87%
	2	0,069	0,5753		143,834			
FW Bakteri	1	0,065	0,0970	1	0,097	0,0075	0,098	99,98%
	2	0,05	0,0980		0,098			
CW Bakteri	1	0,092	0,0670	1	0,067	0,0285	0,065	99,99%
	2	0,035	0,0630		0,063			
FW Non Bakteri	1	0,094	0,0850	1	0,085	0,022	0,084	99,98%
	2	0,05	0,0820		0,082			
CW Non Bakteri	1	0,1	0,0740	1	0,074	0,0215	0,077	99,98%
	2	0,057	0,0790		0,079			

Lampiran 2 Hasil Pengujian 20% Minggu ke 0

Sampel	Duplo	Absorbansi (A)	C (mg/L)	f	Kadar NH <sub>3</sub>	SE	AVG	Efisiensi Removal
Bak Penampung	1	0,114	0,9395	350	328,825	0,0105	299,085	
	2	0,093	0,7696		269,345			
Anaerob-Aerob	1	0,077	0,6401	300	329,199	0,003	298,197	0,30%
	2	0,083	0,6886		267,195			
Clarifier	1	0,0695	0,9330	20	18,660	0,01225	18,650	93,76%
	2	0,094	0,9320		18,640			
FW Bakteri	1	0,094	0,5522	200	110,440	0,022	96,450	67,75%
	2	0,05	0,4123		82,460			
CW Bakteri	1	0,069	0,5753	100	57,534	0,005	53,487	82,12%
	2	0,059	0,4944		49,441			
FW Non Bakteri	1	0,079	0,6563	200	131,252	0,0075	119,114	60,17%
	2	0,064	0,5349		106,975			
CW Non Bakteri	1	0,092	0,7615	100	76,146	0,013	65,626	78,06%
	2	0,066	0,5511		55,106			

Lampiran 3 Hasil Pengujian 50% Minggu 1

Sampel	Duplo	Absorbansi (A)	C (mg/L)	f	Kadar NH <sub>3</sub>	SE	AVG	Efisiensi Removal
Bak Penampung	1	0,153	1,2551	1000	1255,106	0,0005	1259,152	
	2	0,154	1,2632		1263,198			
Anaerob-Aerob	1	0,149	1,2227	1000	1222,736	0	1222,736	0,00%
	2	0,149	1,2227		1222,736			
Clarifier	1	0,147	1,2066	1000	1206,551	0,0005	1202,505	1,65%
	2	0,146	1,1985		1198,459			
FW Bakteri	1	0,141	1,1580	650	752,697	0,0015	760,588	37,80%
	2	0,144	1,1823		768,478			
CW Bakteri	1	0,111	0,9152	600	549,133	0,007	515,145	57,87%
	2	0,097	0,8019		481,156			
FW Non Bakteri	1	0,145	1,1904	650	773,738	0,0035	755,328	38,23%
	2	0,138	1,1337		736,917			
CW Non Bakteri	1	0,079	0,6563	600	393,757	0,0035	410,751	66,41%
	2	0,086	0,7129		427,746			

Lampiran 4 Hasil Pengujian 50% Minggu ke 2

Sampel	Dupl o	Absorbansi (A)	C (mg/L)	f	Kadar COD	SE	AVG	Efisiensi Removal
Bak Penampung	1	0,069	0,5753	130 0	747,938	0,015	905,74 2	
	2	0,099	0,8181		1063,545			
Anaerob- Aerob	1	0,036	0,3083	130 0	400,771	0,004 5	448,11 2	0,00%
	2	0,045	0,3811		495,453			
Clarifier	1	0,035	0,3002	130 0	390,250	0,004 5	437,59 2	2,35%
	2	0,044	0,3730		484,933			
FW Bakteri	1	0,034	0,2921	100 0	292,100	0,000 5	296,14 6	33,91%
	2	0,035	0,3002		300,193			
CW Bakteri	1	0,028	0,2435	900	219,191	0	219,19 1	51,09%
	2	0,028	0,2435		219,191			
FW Non Bakteri	1	0,034	0,2921	100 0	292,100	0,001	300,19 3	33,01%
	2	0,036	0,3083		308,285			
CW Non Bakteri	1	0,029	0,2516	900	226,474	0	226,47 4	49,46%
	2	0,029	0,2516		226,474			

Lampiran 5 Hasil Pengujian 50% Minggu ke 3

Sampel	Dupl o	Absorbansi (A)	C (mg/L)	f	Kadar NH <sub>3</sub>	SE	AVG	Efisiensi Removal
Bak Penampung	1	0,13	1,0690	170 0	1817,264	0,000 5	1810,38 5	
	2	0,129	1,0609		1803,507			
Anaerob- Aerob	1	0,11	0,9071	170 0	1542,119	0,001	1555,87 7	0,00%
	2	0,112	0,9233		1569,634			
Clarifier	1	0,102	0,8424	170 0	1432,062	0,001	1418,30 4	8,84%
	2	0,1	0,8262		1404,547			
FW Bakteri	1	0,044	0,3730	150 0	559,538	0,005 5	626,301	59,75%
	2	0,055	0,4620		693,064			
CW Bakteri	1	0,064	0,5349	130 0	695,337	0,001 5	679,557	56,32%
	2	0,061	0,5106		663,776			
FW Non Bakteri	1	0,088	0,7291	150 0	1093,642	0,006	1020,80 9	34,39%
	2	0,076	0,6320		947,977			
CW Non Bakteri	1	0,073	0,6077	130 0	790,019	0,001 5	774,239	50,24%
	2	0,07	0,5834		758,459			

Lampiran 6 Hasil Pengujian 50% Minggu Ke 4

Sampel	Dupl o	Absorbansi (A)	C (mg/L)	f	Kadar NH <sub>3</sub>	SE	AVG	Efisiensi Removal
Bak Penampung	1	0,144	1,1823	2500	2955,684	0,002	2915,222	
	2	0,14	1,1499		2874,759			
Anaerob-Aerob	1	0,135	1,1094	2500	2773,603	0,002	2814,066	0,00%
	2	0,139	1,1418		2854,528			
Clarifier	1	0,1231	1,0131	2500	2532,852	0,0086	2358,863	16,18%
	2	0,1059	0,8739		2184,875			
FW Bakteri	1	0,057	0,4782	2200	1052,100	0,0015	1025,395	63,56%
	2	0,054	0,4539		998,690			
CW Bakteri	1	0,051	0,4297	1800	773,410	0,001	758,844	73,03%
	2	0,049	0,4135		744,277			
FW Non Bakteri	1	0,092	0,7615	2200	1675,222	0,003	1621,811	42,37%
	2	0,086	0,7129		1568,401			
CW Non Bakteri	1	0,066	0,5511	1800	991,908	0,0005	984,624	65,01%
	2	0,065	0,5430		977,341			

Lampiran 7 Hasil Pengujian Trial 100%

Sampel	Dupl o	Absorbansi (A)	C (mg/L)	fp	Kadar NH <sub>3</sub>	SE	AVG	Efisiensi Removal
Bak Penampung	1	0,129	1,0609	2800	2970,482	0,003	2902,505	
	2	0,123	1,0123		2834,528			
Anaerob-Aerob	1	0,117	0,9638	2800	2698,574	0,003	2630,597	9,37%
	2	0,111	0,9152		2562,620			
Clarifier	1	0,081	0,6724	2800	1882,852	0,003	1871,522	35,52%
	2	0,08	0,6644		1860,193			
FW Bakteri	1	0,051	0,4297	2600	1117,148	0,004	1201,310	58,61%
	2	0,059	0,4944		1285,472			
CW Bakteri	1	0,064	0,5349	2400	1283,699	0,0015	1312,832	54,77%
	2	0,067	0,5592		1341,965			
FW Non Bakteri	1	0,072	0,5996	2500	1499,037	0,0015	1559,730	46,26%
	2	0,078	0,6482		1620,424			
CW Non Bakteri	1	0,072	0,5996	2400	1439,075	0,0015	1409,942	51,42%
	2	0,069	0,5753		1380,809			

Lampiran 8 Hasil Pengujian 100% Minggu Ke 1

Sampel	Duplo	Absorbansi (A)	C (mg/L)	fp	Kadar NH <sub>3</sub>	SE	AVG	Efisiensi Removal
Bak Penampung	1	0,136	1,1175	3000	3352,601	0,0005	3340,462	
	2	0,135	1,1094		3328,324			
Anaerob-Aerob	1	0,125	1,0285	3000	3085,549	0,001	3061,272	8,36%
	2	0,123	1,0123		3036,994			
Clarifier	1	0,097	0,8019	3000	2405,780	0,009	2187,283	34,52%
	2	0,079	0,6563		1968,786			
FW Bakteri	1	0,076	0,6320	3000	1895,954	0,004	1798,844	46,15%
	2	0,068	0,5672		1701,734			
CW Bakteri	1	0,050	0,4216	2500	1053,950	0,0045	1144,990	65,72%
	2	0,059	0,4944		1236,031			
FW Non Bakteri	1	0,091	0,7534	3000	2260,116	0,0045	2369,364	29,07%
	2	0,1	0,8262		2478,613			
CW Non Bakteri	1	0,084	0,6967	2500	1741,811	0,001	1762,042	47,25%
	2	0,086	0,7129		1782,274			

Lampiran 9 Hasil Pengujian 100% Minggu Ke 2

Sampel	Duplo	Absorbansi (A)	C (mg/L)	f	Kadar NH <sub>3</sub>	SE	AVG	Efisiensi Removal
Bak Penampung	1	0,119	0,9800	4000	3919,846	0	3984,586	
	2	0,123	1,0123		4049,326			
Anaerob-Aerob	1	0,108	0,8909	4000	3563,776	0,0025	3482,852	12,59%
	2	0,103	0,8505		3401,927			
Clarifier	1	0,089	0,7372	4000	2948,748	0,001	2916,378	26,81%
	2	0,087	0,7210		2884,008			
FW Bakteri	1	0,051	0,4297	3000	1289,017	0,001	1264,740	68,26%
	2	0,049	0,4135		1240,462			
CW Bakteri	1	0,050	0,4216	2700	1138,266	0,0045	1236,590	68,97%
	2	0,059	0,4944		1334,913			
FW Non Bakteri	1	0,062	0,5187	3000	1556,069	0,002	1507,514	62,17%
	2	0,058	0,4863		1458,960			
CW Non Bakteri	1	0,071	0,5915	2700	1597,110	0,002	1640,809	58,82%
	2	0,075	0,6239		1684,509			

Lampiran 10 Hasil pengujian 100% Minggu Ke 3

Sampel	Duplo	Absorbansi (A)	C (mg/L)	f	Kadar NH <sub>3</sub>	SE	AVG	Efisiensi Removal
Bak Penampung	1	0,109	0,8990	4000	3596,146	0	3579,961	
	2	0,108	0,8909		3563,776			
Anaerob-Aerob	1	0,101	0,8343	4000	3337,187	0,0015	3288,632	8,14%
	2	0,098	0,8100		3240,077			
Clarifier	1	0,092	0,7615	4000	3045,857	0,0015	2997,303	16,28%
	2	0,089	0,7372		2948,748			
FW Bakteri	1	0,068	0,5672	3000	1701,734	0,0025	1641,040	54,16%
	2	0,063	0,5268		1580,347			
CW Bakteri	1	0,075	0,6239	2000	1247,784	0,003	1199,229	66,50%
	2	0,069	0,5753		1150,674			
FW Non Bakteri	1	0,082	0,6805	3000	2041,618	0,0015	2005,202	43,99%
	2	0,079	0,6563		1968,786			
CW Non Bakteri	1	0,099	0,8181	2000	1636,224	0,001	1620,039	54,75%
	2	0,097	0,8019		1603,854			

Lampiran 11 Hasil Pengujian 100% Minggu Ke 4

Lampiran 12 rangkaian reaktor



Lampiran 12 Rangkaian Reaktor

Bak anaerob



Bak aerob



Clarifier



Wetland Treatment



Lampiran 13 Rangkaian Reaktor

Lampiran 9 dokumentasi penelitian

Pengujian Ammonia di Labolatorium



Pemberian Nutrisi pada Bakteri



Injeksi Bakteri pada *Typha angustifolia*



Pembuatan Kurva Kalibrasi



## **RIWAYAT HIDUP**



Penulis bernama Silvanie Amelya, lahir di Tasikmalaya, Jawa Barat, pada tanggal 2 April 2003. Penulis merupakan anak keempat dari pasangan Bapak Didi Rudinur dan Ibu Tati Yuliati, S.Pd., Riwayat pendidikan formal penulis adalah TK Negeri Manonjaya (2007–2009), SD Negeri 5 Manonjaya (2009–2015), SMP Negeri 1 Manonjaya (2015–2018), SMA Negeri 3 Kota Tasikmalaya (2018–2021), dan Universitas Islam Indonesia, Program Studi Teknik Lingkungan (2021 sekarang).





