

TA/TL/2025/2086



JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

Kombinasi Pengolahan Biologis dan Fitoremediasi dalam Mendegradasi Kandungan Fosfat Pada Air Limbah Lindi

Diana Intan Permana

21513034

Dosen Pembimbing:

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

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

Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana

Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan

Universitas Islam Indonesia

2025



DEPARTMENT
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

BACHELOR THESIS

The Combination of Biological Treatment and Phytoremediation for Phosphate Degradation in Landfill Leachate Wastewater

Diana Intan Permana

21513034

Supervisor:

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

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

Environmental Engineering Bachelor Program

Faculty of Civil Engineering and Planning

Universitas Islam Indones

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**Kombinasi Pengolahan Biologis dan Fitoremediasi dalam
Mendegradasi Kandungan Fosfat pada 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.

**Diana Intan Permana
21513034**

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



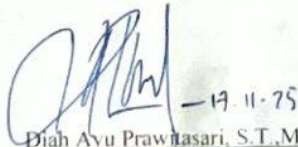
Dr. Joni Aldila Fajri, S.T., M.Eng

(Pembimbing 1)



Annisa Nur Lathifah, S.Si., M.Biotech., M.Agr., PhD

(Pembimbing 2)



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

(Penguji)

Mengetahui
Ketua Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana



Any J. H. M. S. 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, tanggal submit TA
Yang membuat pernyataan,



Diana Intan Permana
21513034

PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “Kombinasi Pengolahan Biologis dan Fitoremediasi dalam Mendegradasi Kandungan Fosfat pada Air Limbah Lindi”.

Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Dalam proses penyusunan tugas akhir ini, penulis menerima banyak bimbingan, bantuan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Warsito dan Ibu Sri Harnani selaku orang tua serta saudara Dhenny Tunggal Prayugo selaku kakak kandung penulis, yang memberikan doa, tenaga, dukungan moral maupun material yang tak terhingga selama proses perkuliahan hingga penyusunan tugas akhir ini. Terimakasih atas kasih sayang, kesabaran, dan pengorbanan yang selalu menjadi sumber kekuatan bagi penulis.
2. Dr. Joni Aldila Fajri, S.T., M.Eng., selaku dosen Pembimbing 1, atas segala arahan, perhatian, dan ilmu yang diberikan selama proses penelitian dan penulisan.
3. Annisa Nur Lathifah, S.Si., M.Sc., selaku dosen Pembimbing 2, atas dukungan, evaluasi, dan bimbingan yang sangat membantu dalam penyusunan tugas akhir ini.
4. Diah Ayu Puspita Sari, S.T., M.T., selaku Penguji, atas kritik dan saran konstruktif yang sangat berharga untuk penyempurnaan tugas akhir ini.
5. Ibu Any Juliani, S.T., M.Sc.(Res.Eng.), Ph.D., selaku Ketua Program Studi Teknik Lingkungan, yang telah memberikan dukungan dan kesempatan kepada penulis selama masa studi.

6. Seluruh Dosen, dan Staf Program Studi Teknik Lingkungan yang memberikan penulis ilmu, informasi, serta fasilitas selama penulis menempuh pendidikan di Program Studi Teknik Lingkungan.
7. Teman-teman terdekat penulis Al Hayyu Kumala Lailawati, Restu Magfirah, dan Silvanie Amelya yang telah menemani sejak awal perkuliahan hingga masa penyusunan tugas akhir ini. Terimakasih atas semangat, dukungan, dan kebersamaan yang tak ternilai selama perjalanan ini.
8. Tim Tugas Akhir Lindi yang telah banyak membantu, berbagi informasi, berdiskusi, dan saling menyemangati selama proses penyusunan tugas akhir ini.
9. Teman-teman angkatan 2021 yang membantu penulis selama perkuliahan.

Sleman, 29 Juli 2025

Diana Intan Permana

Kombinasi Pengolahan Biologis dan Fitoremediasi dalam Mendegradasi Kandungan Fosfat pada Air Limbah Lindi

Mahasiswa : Diana Intan Permana
NIM : 21513034
Program Studi : Teknik Lingkungan - Program Sarjana
Pembimbing : Dr. Joni Aldila Fajri, S.T ., M.Eng

Abstrak

Air limbah lindi dari tempat pembuangan akhir (TPA) mengandung polutan yang paduan nanotriplet berbentuk fosfat (PO_4^{3-}) yang dapat memicu proses eutrofikasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi paduan pengolahan biologis (sistem anaerob-aerob) yang dikombinasikan dengan fitoremediasi secara vegetatif dengan *Typha angustifolia* untuk meminimalisir kandungan fosfat dalam limbah hidrokarbon. Air limbah hidrokarbon diambil dari TPA Piyungan, Bantul dan diolah melalui tahapan. Penampungan, anaerob, aerob, dan wetland (*constructed* dan *floating*) serta mencoba pada tiga variasi konsentrasi limbah (20, 50, dan 100%) serta sistem dengan bakteri dan tanpa penambah bakteri. Bakteri pada sistem *constructed* wetland menunjukkan kemampuan menghilangkan fosfat di atas 90% pada volume limbah yang tinggi. *Thypha angustifolia* memiliki kemampuan toleransi yang baik terhadap pencemaran limbah serta didukung bakteri yang mempercepat proses biodegradasi pada fosfat, mempercepat biodegradasi pada fosfat, dan penggunaannya yang sederhana dan efisien. Adapun parameter fisik DO serta EC menunjukkan perbaikan yang progresif selama perlakuan. Penelitian menunjukkan bahwa kombinasi pengolahan biologis dan fitoremediasi sangat efektif untuk pengolahan limbah dengan meminimalisir dampak lingkungan. Kata kunci: *Fitoremediasi, Air Lindi, Thypha angustifolia, Fosfat, constructed wetland*

The Combination of Biological Treatment and Phytoremediation for Phosphate Degradation in Landfill Leachate Wastewater

Student : Diana Intan Permana
Student Number : 21513034
Study Program : Environmental Engineering – Bachelor Program
Supervisor : Dr. Joni Aldila Fajri, S.T ., M.Eng

Abstract

*Landfill leachate from final disposal sites (TPA) contains complex pollutants, including nanotriplet-structured phosphate (PO_4^{3-}), which can trigger eutrophication. This study aims to evaluate the combination of biological treatment (anaerobic-aerobic systems) and vegetative phytoremediation using *Typha angustifolia* to reduce phosphate content in hydrocarbon wastewater. The leachate samples were collected from TPA Piyungan, Bantul, and treated through several stages: storage, anaerobic, aerobic, and wetland systems (constructed and floating), with three levels of leachate concentration (20%, 50%, and 100%) and system variations with and without bacterial addition. The constructed wetland system with bacteria showed over 90% phosphate removal efficiency, even at high leachate concentrations. *Typha angustifolia* demonstrated strong tolerance to contaminated wastewater, supported by bacteria that enhanced the phosphate biodegradation process, making the system both simple and efficient. Physical parameters such as dissolved oxygen (DO) and electrical conductivity (EC) also showed progressive improvement throughout the treatment. The results indicate that the combination of biological treatment and phytoremediation is highly effective in treating leachate and minimizing its environmental impact.*

Key words: Phytoremediation, Leachate, Typha angustifolia, Phosphate, Constructed Wetland

DAFTAR ISI

PRAKATA	iii
Abstrak.....	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.6 Ruang Lingkup	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Air Lindi (<i>Leachate</i>)	6
2.2 Fosfat Dalam Air Lindi.....	7
2.3 Fitoremediasi dalam Pengolahan Air Lindi.....	9
2.4 Tanaman <i>Typha Angustifolia</i>	9
2.5 <i>Microbial Treatment</i>	10
2.6 <i>Constructed Wetland</i>	10
2.7 Proses CAS (Anaerobik-Aerobik) dalam Pengolahan Air Lindi.....	11
2.8 Peran Endofit Bakteri dalam Pengolahan Air Lindi	11
2.9 Penelitian Sebelumnya.....	12
BAB III METODE PENELITIAN	14
3.1 Kerangka Studi/Penelitian/Perencanaan.....	14
3.2 Prosedur Penelitian	14
3.2.2 Kultivasi Bakteri	20
3.4 Analisis Data	23
BAB IV PEMBAHASAN	24
4.1 Karakteristik Limbah	24

4.2	Efektivitas Pengolahan Biologis dalam Mereduksi Fosfat (PO_4^{3-})	25
4.3	Evektivitas <i>Floating Wetland</i> (FW) dan <i>Constructed Wetland</i> (CW) dalam Mereduksi Fosfat (PO_4^{3-})	28
4.4	Nilai SV30	Error! Bookmark not defined.
4.5	Paramater Fisik	30
4.5.1	<i>Dissolved Oxygen</i> (DO)	30
4.5.2	<i>Electrical Conductivity</i> (EC)	32
4.6	Analisis Efisiensi Removal Fosfat pada Sistem <i>Wetland</i>	41
4.7	Perubahan Tinggi Tanaman Pada Variasi Konsentrasi Lindi	43
BAB V PENUTUP		48
5.1	Kesimpulan	48
5.2	Saran	48
DAFTAR PUTAKA		49
LAMPIRAN		53
RIWAYAT HIDUP		61

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Refrensi Penelitian Sebelumnya **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 1 Kandungan Kadar Fosfat Limbah Lindi 25

Tabel 4. 2 Efeseiensi Removal Wetland ..**Error! Bookmark not defined.**

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Skema Kerangka Berpikir Penelitian	3
Gambar 3. 1 Prosedur Penelitian	15
Gambar 3. 2 Desain Reaktor	16
Gambar 3. 3 Desain Bak Aerobik	Error! Bookmark not defined.
Gambar 3. 4 Desain Bak Anerobik	Error! Bookmark not defined.
Gambar 3. 5 Proses Pendinginan Media	21
Gambar 3. 6 Proses Pergantian NB dengan NACL	21
Gambar 4. 1 Grafik Hasil Pengujian Fosfat Pada FW Bakteri, CW Bakteri, Fw Non Bakteri dan CW Non Bakteri	28
Gambar 4. 2 Grafik Perubahan Tinggi Tanaman	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4. 3 Tanaman pada Konsentrasi 20%	46
Gambar 4. 4 Tanaman Pada Konsentrasi 50%	47
Gambar 4. 5 Tanaman Pada Konsentrasi 100%	47
Gambar 4. 6 Grafik Pengujian DO Pada Pengolahan Biologis	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4. 7 Grafik Pengujian DO pada Wetland	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4. 8 Grafik Pengujian EC Pada Pengolahan Biologis	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4. 9 Grafik Pengujian EC Pada Wetland	Error! Bookmark not defined.

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil Perhitungan Pengujian Fosfat 20 % (Hari 0)	53
Lampiran 2 Hasil Perhitungan Pengujian Fosfat 50% (Hari 7)	53
Lampiran 3 Hasil Pengujian Fosfat 50 % (Hari 14)	54
Lampiran 4 Hasil Pengujian Fosfat 50% (Hari 21)	54
Lampiran 5 Hasil Pengujian 50% (Hari 28)	55
Lampiran 6 Hasil Pengujian Fosfat Trial 100% (Hari 35).....	55
Lampiran 7 Hasil Pengujian Fosfat 100% (Hari 42)	56
Lampiran 8 Hasil Pengujian Fosfat Hari 100% (Hari 49)	56
Lampiran 9 Hasil Pengujian Fosfat 100% (Hari 56)	57
Lampiran 10 Hasil Pengujian Fosfat 100% (Hari 63)	57
Lampiran 11 Kurva Kalibrasi	58
Lampiran 12 Rangkaian Reaktor	58
Lampiran 13 Dokumentasi.....	59

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara dengan jumlah penduduk terbanyak no 10 yaitu pada angka 277,77 jiwa, dan Indonesia pada tahun 2019 masuk kedalam negara penghasil sampah urutan nomor 2 didunia setelah Saudi Arabia. Sampah merupakan benda yang tidak terpakai aau hasil sisa dari barang atau benda yang berasal dari kegiatan manusia yang mana benda tersebut sudah tidak diinginkan, tidak digunakan, atau tidak disenangi (Wahid Iqbal dan Nurul C., 2009; 274). Sampah yang dihasilkan oleh masyarakat Indonesia tercatat dengan kalkulasi angka 17,651 juta Ton/tahun (Sistem Informasi Pengelolaan Sampah, 2023).

Air lindi yang dihasilkan dari tempat pembuangan sampah mengandung berbagai zat pencemar seperti bahan organik, logam berat, serta senyawa beracun lainnya yang dapat mencemari lingkungan jika tidak diolah dengan baik. Jika dibiarkan tanpa pengolahan yang memadai, air lindi dapat meresap ke dalam tanah dan mencemari air tanah maupun badan air di sekitarnya (Renou et al., 2008). Salah satu parameter yang cukup penting dalam air lindi adalah kandungan fosfat (PO_4^{3-}), yang jika dibuang langsung ke lingkungan perairan dapat menyebabkan eutrofikasi.

Salah satu pendekatan alternatif yang ramah lingkungan dan berbiaya rendah untuk pengolahan air lindi adalah fitoremediasi, yaitu pemanfaatan tanaman air dan mikroorganisme untuk menurunkan kadar pencemar dalam air limbah. Fitoremediasi dapat diterapkan melalui sistem Constructed Wetland (CW) dan Floating Treatment Wetland (FTW), yang meniru ekosistem rawa alami dan memanfaatkan interaksi antara tanaman, mikroba, dan media substrat untuk mengolah air secara biologis, kimiawi, dan fisik (Vymazal, 2011). Dalam sistem ini, tanaman berperan penting dalam menyerap dan mengakumulasi polutan, termasuk fosfat. Salah satu tanaman

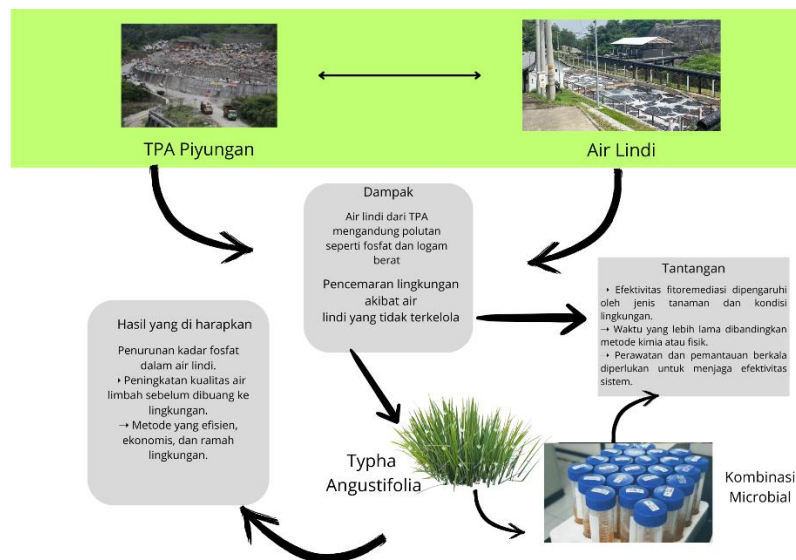
yang sering digunakan dalam sistem CW untuk pengolahan air lindi adalah *Typha angustifolia*. Tanaman ini memiliki kemampuan tinggi dalam menyerap polutan, termasuk nitrogen, fosfor, dan logam berat (Tanner, 2001). Akar dan rimpangnya yang lebat berperan dalam meningkatkan aktivitas mikroorganisme yang membantu proses degradasi senyawa organik dalam air lindi (Kadlec & Wallace, 2009).

Berbagai penelitian terdahulu telah membuktikan bahwa tanaman *Typha angustifolia* memiliki potensi yang tinggi dalam menyerap fosfat serta parameter pencemar lainnya dari berbagai jenis limbah cair, termasuk air lindi dan air limbah domestik maupun industri. Misalnya, penelitian oleh Wimbaningrum et al. (2020) menunjukkan bahwa penerapan sistem CW dengan tanaman *Typha angustifolia* mampu menurunkan kadar fosfat hingga 39% dari air limbah laundry, sedangkan studi Khinanty & Retnaningdyah (2017) membuktikan bahwa tanaman tersebut mampu menurunkan konsentrasi ortofosfat lebih dari 60% setelah masa inkubasi 30 hari. Penelitian Rahmani & Handajani (2014) juga menunjukkan bahwa sistem subsurface flow CW berbasis *Typha angustifolia* pada limbah industri tahu mampu menghilangkan fosfat hingga 85,15%.

Penelitian ini merupakan pengembangan dari riset terdahulu yang dilakukan oleh Asa Bagus Darussalam (2024) dan Rifa Intan Tanjung (2024), yang sama-sama menggunakan air lindi TPA sebagai objek studi. Penelitian Darussalam menyoroti penerapan sistem Floating Treatment Wetland (FTW) dengan integrasi tanaman *Typha latifolia* dan mikroorganisme untuk menurunkan parameter organik seperti *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan Total Suspended Solid (TSS). Meskipun sistem ini terbukti efektif dalam mengurangi polutan organik, pendekatannya masih terbatas pada fitoremediasi langsung di wetland tanpa adanya tahapan pengolahan biologis terstruktur menggunakan reaktor anaerob atau aerob. Sementara itu, penelitian Tanjung (2024) juga memanfaatkan FTW dengan fokus pada pengurangan amonia dan warna limbah. Walaupun hasilnya menunjukkan potensi positif dalam mereduksi beban pencemar, mekanisme pengolahan

tetap hanya mengandalkan zona rhizosfer tanaman, sehingga pengolahan secara bertingkat belum diterapkan.

Dari kedua penelitian tersebut terlihat bahwa penggunaan tanaman dan mikroorganisme di wetland memiliki potensi untuk mengurangi pencemar dalam air lindi. Namun, terdapat beberapa celah yang perlu ditindaklanjuti. Pertama, penelitian terdahulu belum secara khusus mengkaji parameter fosfat (PO_4^{3-}), yang merupakan komponen penting dalam air lindi dan dapat menimbulkan masalah lingkungan seperti eutrofikasi jika konsentrasinya tinggi (Renou et al., 2008). Kedua, penelitian sebelumnya belum mengintegrasikan tahap pengolahan biologis terstruktur sebelum air limbah masuk ke wetland, sehingga efektivitas penurunan polutan tertentu, termasuk fosfat, masih terbatas.



Gambar 1. 1 Skema Kerangka Berpikir Penelitian

1.2 Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini yaitu:

- 1) Apakah efektif metode fitoremediasi menggunakan tanaman *Typha angustifolia* dalam menurunkan kadar fosfat pada air limbah lindi?
- 2) Bagaimana kemampuan tanaman *Typha angustifolia* dan bakteri dalam menyerap dan menguraikan fosfat pada sistem *Constructed wetland* ?
- 3) Apakah metode fitoremediasi dengan tanaman *Typha angustifolia* dapat menjadi alternatif yang efisien dibandingkan metode konvensional dalam pengolahan air lindi?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu:

- 1) Menentukan efektivitas fitoremediasi dengan tanaman *Typha angustifolia* dalam menurunkan kadar fosfat pada air lindi
- 2) Menganalisis kemampuan tanaman *Typha angustifolia* dan bakteri dalam menyerap dan menguraikan fosfat pada sistem *Constructed wetland*
- 3) Mengevaluasi potensi fitoremediasi sebagai metode alternatif yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan dalam pengolahan air lindi

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini yaitu:

- 1) Menambah referensi terkait efektivitas fitoremediasi dalam pengolahan air lindi
- 2) Memberikan alternatif metode pengolahan air lindi yang lebih ekonomis dan mudah diterapkan

1.6 Ruang Lingkup

Adapun ruang lingkup dari penelitian ini yaitu:

- 1) Penelitian ini berfokus pada efektivitas fitoremediasi dengan *Typha angustifolia* dalam menurunkan kadar fosfat pada air lindi.

- 2) Sampel air lindi diambil di Tempat (TPA) Piyungan Kabupaten Bantul
- 3) Pengujian dilakukan dengan analisis parameter kualitas air sebelum dan sesudah perlakuan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Air Lindi (*Leachate*)

Lindi merupakan limbah cair yang meresap kedalam tanah melalui timbunan sampah/limbah kemudian melarutkan materi yang terdapat pada timbunan sampah/limbah tersebut. Air lindi dapat meresap melalui tanah dan memungkinkan akan mencemari air tanah dan tanah pada lokasi. Perembesan sangat bergantung pada sifat fisik tanah dasar TPA seperti porositas dan tekanan piezometric. Air lindi akan meresap melalui tanah dibawah lokasi TPA, maka air lindi akan mencemari aliran tersebut dengan kandungan zat berbahaya bagi lingkungan (Chairil Saleh, 2014). Air lindi meresap dibantu adanya air hujan sebagai media yang membantu membawa pencemar yang dihasilkan dari dekomposisi sampah yang akan masuk pada kolam penampungan. Cairan yang mengisi rongga-rongga pada tanah mengandung bahan-bahan organik yang terlarut dan ion-ion anorganik dengan konsentrasi tinggi.

Proses pembentukan dari air lindi terjadi karena adanya penumpukan sampah/limbah dengan diiringi perubahan fisik, biologis, dan perubahan kimia. Proses terjadi diawali dengan adanya penguraian dari bahan organik, oksidasi kimiawi, pelepasan gas dari timbunan sampah, adanya perpindahan materi terlarut, dan terakhir adanya penurunan permukaan yang terjadi karena pemdatan pada sampah (Chen, 1975).

Air lindi yang tidak dikelola dengan baik dapat menyebabkan pencemaran tanah dan air dengan kadar pencemar yang melampaui baku mutu lingkungan yang ditetapkan oleh peraturan nasional. Kandungan bahan organik yang tinggi dalam air lindi berkontribusi terhadap peningkatan Biochemical Oxygen Demand (BOD) dan Chemical Oxygen Demand (COD) di badan air, yang dapat menyebabkan penurunan kadar oksigen terlarut (DO) dan mengganggu kehidupan organisme akuatik (Wahyuni et al., 2022). Selain

itu, kandungan nutrisi seperti fosfat dan nitrogen dalam air lindi dapat memicu terjadinya eutrofikasi pada ekosistem perairan, yang ditandai dengan pertumbuhan alga secara berlebihan dan penurunan kualitas air (Pratiwi et al., 2022).

2.2 Fosfat Dalam Air Lindi

Fosfat merupakan salah satu nutrisi utama dalam air lindi yang berasal dari berbagai sumber, termasuk dekomposisi bahan organik, residu deterjen dari limbah domestik, dan sampah anorganik lainnya yang mengandung senyawa fosfor (Vymazal, 2011). Proses dekomposisi sampah organik oleh mikroorganisme menghasilkan fosfat sebagai produk sampingan yang kemudian larut dalam air lindi. Selain itu, limbah rumah tangga yang mengandung deterjen fosfat dapat meningkatkan kadar fosfat dalam air lindi, terutama di TPA yang menerima limbah domestik dalam jumlah besar (Pratiwi et al., 2022). Jika air lindi yang mengandung fosfat ini masuk ke badan air tanpa melalui proses pengolahan yang memadai, dapat terjadi peningkatan kadar nutrisi yang signifikan, yang berpotensi menimbulkan eutrofikasi.

Eutrofikasi merupakan kondisi di mana tingginya kadar fosfat dan nitrogen di perairan merangsang pertumbuhan alga dan fitoplankton secara masif (algal bloom), sehingga menyebabkan ketidakseimbangan ekosistem perairan (Vymazal, 2011). Pertumbuhan alga yang berlebihan dapat menghalangi penetrasi cahaya matahari ke dalam air, mengganggu fotosintesis tanaman air, serta menurunkan kadar oksigen terlarut akibat proses dekomposisi biomassa alga oleh bakteri aerobik. Hal ini dapat mengakibatkan kondisi hipoksia atau bahkan anoksia, yang berujung pada kematian organisme akuatik seperti ikan dan invertebrata air (Putri et al., 2023).

Kadar fosfat dalam air lindi di beberapa TPA di Indonesia berkisar antara 8-25 mg/L, jauh melebihi ambang batas yang diperbolehkan untuk air limbah domestik, yang umumnya berkisar di bawah 2 mg/L sesuai dengan

baku mutu lingkungan. Tingginya kadar fosfat dalam air lindi menunjukkan perlunya sistem pengolahan yang efektif sebelum air lindi dibuang ke lingkungan untuk mencegah dampak ekologis yang merugikan (Pratiwi et al. 2022).

Kelebihan fosfat dalam perairan tidak hanya menyebabkan eutrofikasi, tetapi juga berkontribusi terhadap perubahan struktur ekosistem perairan. Peningkatan biomassa fitoplankton yang berlebihan dapat menghambat pertumbuhan spesies akuatik lainnya dan mempengaruhi rantai makanan di ekosistem perairan (Putri et al., 2023). Fosfat memang dibutuhkan tanaman sebagai unsur hara makro, tetapi kadar fosfat yang berlebih pada air irigasi dapat menyebabkan ketidakseimbangan nutrisi yang merugikan. Kelebihan fosfat dapat menghambat penyerapan unsur mikro penting seperti besi (Fe), seng (Zn), dan mangan (Mn) melalui mekanisme antagonisme antarnutrien, sehingga tanaman menunjukkan gejala, pertumbuhan terhambat, serta penurunan produktivitas (Yang et al., 2024). Kondisi ini diperburuk ketika fosfat tinggi memicu pertumbuhan alga pada badan air, yang kemudian menurunkan kualitas air, mengurangi oksigen terlarut, dan memengaruhi kesehatan akar tanaman (Huang et al., 2022).

Pada manusia, fosfat tidak bersifat toksik secara langsung, namun keberadaannya dalam jumlah tinggi di badan air dapat memicu pertumbuhan berlebih cyanobacteria. Beberapa jenis cyanobacteria menghasilkan toksin seperti microcystin, yang dapat mencemari air minum dan bioakumulasi pada ikan. Paparan toksin ini berpotensi menyebabkan gangguan pencernaan, iritasi kulit, hingga kerusakan hati pada paparan kronis (Lad et al., 2022; WHO, 2019). Selain itu, tingginya fosfat dalam air permukaan menurunkan kualitas air baku domestik sehingga memerlukan proses pengolahan tambahan agar aman dikonsumsi (Paerl, 2018).

Oleh karena itu, diperlukan strategi pengelolaan yang efektif untuk mengurangi kadar fosfat dalam air lindi sebelum dibuang ke lingkungan. Salah satu metode yang dapat diterapkan adalah penggunaan sistem pengolahan berbasis fitoremediasi, yang memanfaatkan tanaman tertentu

untuk menyerap fosfat dan menstabilkan kadar nutrisi dalam air limbah (Sari et al., 2021). Metode ini tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga lebih ekonomis dibandingkan dengan metode pengolahan kimiawi seperti koagulasi dan presipitasi.

2.3 Fitoremediasi dalam Pengolahan Air Lindi

Fitoremediasi merupakan teknologi pengolahan limbah yang menggunakan tanaman untuk menyerap, menstabilkan, atau menghilangkan polutan dalam air limbah. Mekanisme utama fitoremediasi meliputi penyerapan oleh akar tanaman, akumulasi dalam jaringan tanaman, serta transformasi polutan melalui aktivitas mikroorganisme yang hidup di sekitar akar (Akratos & Tsihrintzis, 2007). Fitoremediasi efektif dalam menurunkan kandungan nutrisi dan logam berat dalam air lindi, dengan efisiensi penghilangan fosfat mencapai 60-85% tergantung pada jenis tanaman yang digunakan. Keunggulan lain dari fitoremediasi adalah biayanya yang relatif rendah serta ramah lingkungan dibandingkan metode konvensional seperti koagulasi dan presipitasi kimia (Hidayat et al., 2022).

2.4 Tanaman *Typha Angustifolia*

Salah satu tanaman yang sering digunakan dalam sistem constructed wetland adalah *Typha angustifolia*. Tanaman ini memiliki sistem perakaran yang luas dan lebat, yang berperan dalam meningkatkan aktivitas mikroorganisme serta mempercepat proses degradasi senyawa organik dalam air lindi (Kadlec & Wallace, 2009). *Typha angustifolia* mampu menurunkan kadar fosfat dalam air limbah hingga 75% dalam waktu 20 hari. Tanaman ini juga memiliki kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap lingkungan tercemar serta mampu bertahan dalam kondisi dengan kadar nutrisi yang tinggi. Selain itu, tanaman ini berfungsi sebagai bioindikator kualitas lingkungan karena sensitivitasnya terhadap perubahan kondisi perairan tercemar (Suryani et al., 2021).

2.5 Microbial Treatment

Microbial treatment adalah metode pengolahan yang memanfaatkan mikroorganisme, terutama bakteri dan jamur, untuk mendegradasi dan mengurangi kandungan polutan dalam air lindi. Mikroorganisme ini membantu dalam siklus nutrisi serta meningkatkan efisiensi penghilangan zat pencemar melalui proses biodegradasi (Akratos & Tsihrintzis, 2007). Kombinasi bakteri fosfatolitik dengan tanaman air dapat meningkatkan efisiensi penurunan kadar fosfat dalam air lindi, menjadikannya metode yang efektif dalam pengolahan air limbah secara biologis (Nugroho et al. 2021).

2.6 Constructed Wetland

Constructed wetland adalah sistem pengolahan air limbah yang dirancang untuk meniru ekosistem rawa alami dalam upaya mengurangi kadar polutan dalam air lindi. Sistem ini mengintegrasikan berbagai komponen biologis, fisik, dan kimiawi dalam proses pengolahan, termasuk tanaman air, mikroorganisme, dan media substrat seperti pasir, kerikil, serta bahan organik yang berfungsi sebagai penyaring dan tempat berkembangnya komunitas mikroba pengurai (Vymazal, 2011). Dalam prosesnya, *constructed wetland* bekerja dengan memanfaatkan interaksi antara tanaman dan mikroorganisme untuk mengurangi kandungan bahan pencemar, seperti bahan organik, nitrogen, fosfor, serta logam berat, sehingga meningkatkan kualitas air sebelum dibuang ke lingkungan.

Secara umum, terdapat dua jenis utama *constructed wetland*, yaitu *subsurface flow* dan *surface flow*. *Subsurface flow constructed wetland* terdiri dari sistem aliran horizontal (*horizontal subsurface flow*) dan aliran vertikal (*vertical subsurface flow*), di mana air limbah mengalir melalui media substrat seperti pasir dan kerikil, sehingga meningkatkan kontak dengan akar tanaman serta komunitas mikroba yang berperan dalam proses degradasi polutan (Akratos & Tsihrintzis, 2007). Sementara itu, *surface flow constructed wetland* bekerja dengan membiarkan air limbah mengalir secara terbuka di atas lapisan substrat, yang memungkinkan proses filtrasi,

sedimentasi, serta interaksi langsung dengan tanaman dan mikroba untuk meningkatkan efektivitas pengolahan (Kadlec & Wallace, 2009).

2.7 Proses CAS (Anaerobik-Aerobik) dalam Pengolahan Air Lindi

Proses Conventional Activated Sludge (CAS) dengan sistem anaerobik-aerobik merupakan metode biologis yang digunakan dalam pengolahan air lindi untuk menghilangkan zat organik dan nutrisi seperti fosfat dan nitrogen. Pada tahap anaerobik, mikroorganisme akan menguraikan bahan organik dalam kondisi tanpa oksigen, menghasilkan senyawa seperti metana dan karbon dioksida (Metcalf & Eddy, 2014). Sedangkan pada tahap aerobik, bakteri aerob akan mengoksidasi sisa bahan organik dan nutrisi yang masih tersisa sehingga menghasilkan air yang lebih bersih. Kombinasi proses anaerobik-aerobik dalam sistem CAS mampu menurunkan kadar fosfat dalam air lindi hingga 70% dengan efisiensi optimal pada waktu tinggal tertentu Rahmad et al. (2022)

2.8 Peran Endofit Bakteri dalam Pengolahan Air Lindi

Endofit bakteri adalah kelompok mikroorganisme yang hidup dalam jaringan tanaman dan dapat berkontribusi dalam proses fitoremediasi melalui degradasi polutan dan peningkatan pertumbuhan tanaman. Beberapa spesies bakteri endofit memiliki kemampuan untuk memfasilitasi penyerapan fosfat serta membantu proses detoksifikasi logam berat dalam air lindi (Doty et al., 2017). Penggunaan bakteri endofit dalam sistem constructed wetland dapat meningkatkan efisiensi penyerapan fosfat oleh tanaman hingga 30% dibandingkan dengan tanaman tanpa bakteri endofit. Integrasi bakteri endofit dengan tanaman air seperti *Typha angustifolia* memberikan hasil yang lebih baik dalam menurunkan kadar fosfat dan meningkatkan daya tahan tanaman terhadap kondisi tercemar oleh Lestari et al. (2021).

2.9 Penelitian Sebelumnya

Penelitian sebelumnya menjadi dasar penting untuk mendukung dan memperkuat landasan teori dalam penelitian ini. Penelitian terdahulu memberikan gambaran mengenai efektivitas berbagai metode pengolahan air limbah, khususnya yang berhubungan dengan penggunaan *constructed wetland* menggunakan tanaman *Typha angustifolia*. Penelitian terdahulu ini memberikan pemahaman mengenai efektivitas teknologi tersebut dalam menurunkan berbagai parameter pencemar. Ringkasan beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan ditampilkan pada Tabel 2.1:

Tabel 2. 1 Refrensi Penelitian Sebelumnya

Refrensi	Metode / Media	Hasil
Asa Bagus Darussalam (2024)	Floating Wetland – <i>Typha latifolia</i> + Bakteri Endogenik & Endofit	Penurunan COD 57% dan TSS 80% setelah running reaktor 14 hari
Rifa Intan Tanjung (2024)	Floating Wetland – <i>Typha latifolia</i> + Bakteri Endogenik & Endofit	Penurunan Amonia 30–31% dan Warna belum memenuhi baku mutu
Anwar, F., & Yulianto, D. (2021).	Metode <i>Constructed wetland</i> – <i>Typha agustifolia</i>	Penurunan polutan dengan signifikan namun belum semua capai baku mutu
Hidayat, T., et al. (2022)	Fitoremediasi - Mikroorganisme	Penurunan fosfat 85%, dan logam berat 70-80%.

Hartini, S., & Prasetyo, A. (2020)	Metode <i>Constructed wetland – Typha angustifolia - Cyperus</i>	Penurunan COD hingga 81,67%, dan TSS 78,13%.
Nugroho, R., Sari, M., & Wulandari, P. (2022)	Metode <i>Constructed wetland – Typha angustifolia</i>	Penurunan TSS, COD, dan Total-N pada debit 5 L/hari
Setiawan, H., & Lestari, R. (2021)	Metode <i>Constructed wetland – Typha angustifolia</i>	Penurunan COD hingga 85% pada retensi 21 hari.
Khinanty & Retnaningdyah (2017)	Metode <i>Constructed wetland – Typha angustifolia</i>	Menurunkan ortofosfat > 60% setelah 30 hari inkubasi
Wimbaningrum et al. (2020)	Metode <i>Constructed wetland – Typha angustifolia</i>	Menurunkan fosfat 39% dari air limbah rumah tangga

Berdasarkan berbagai penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, metode *constructed wetland* dengan memanfaatkan tanaman air seperti *Typha angustifolia* telah terbukti cukup efektif dalam menurunkan berbagai parameter pencemar pada air limbah, termasuk air lindi. Efektivitas sistem ini dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jenis tanaman yang digunakan, waktu tinggal air dalam sistem, serta debit aliran. Penurunan kadar polutan seperti fosfat, nitrogen, COD, dan TSS umumnya menunjukkan hasil yang signifikan, terutama pada waktu retensi yang lebih panjang. Selain itu, kombinasi antara tanaman air dan mikroorganisme juga terbukti

meningkatkan efisiensi pengolahan, khususnya dalam menurunkan kandungan fosfat dan logam berat. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih menggunakan sistem yang berdiri sendiri, baik hanya tanaman maupun mikroorganisme, dan belum banyak yang menerapkan sistem terpadu secara berjenjang yang menggabungkan keduanya dalam pengolahan air lindi murni dari TPA. Hal ini menunjukkan adanya celah penelitian yang masih dapat dikembangkan, terutama dalam menguji efektivitas kombinasi tanaman dan bakteri dalam sistem pengolahan air lindi yang lebih berkelas.

BAB III

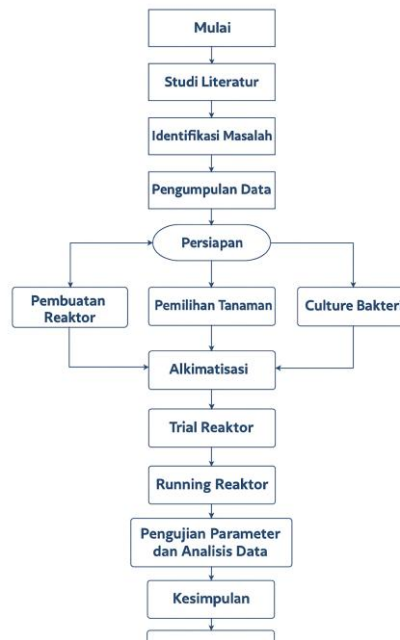
METODE PENELITIAN

3.1 Kerangka Studi/Penelitian/Perencanaan

Penelitian dilakukan di Laboratorium Bioteknologi Lingkungan, program studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan. Reaktor dan peletakan dan *Constructed wetland* di letakan di workshop Teknik Lingkungan. Sampel yang digunakan diambil dari IPAL TPA Piyungan. Penelitian mulai dilaksanakan pada bulan Februari 2025 – Juli 2025.

3.2 Prosedur Penelitian

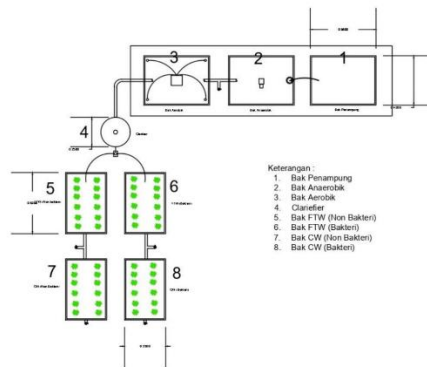
Penelitian kombinasi pengolahan biologis dan fitoremediasi mendegradasi kandungan fosfat pada air limbah lindi menggunakan tanaman *Typha angustifolia*, yang menggunakan pengolahan CTW dan FTW berdasarkan pada diagram alir tahapan penelitian berikut:



Gambar 3. 1 Prosedur Penelitian

3.2.1 Persiapan Reaktor

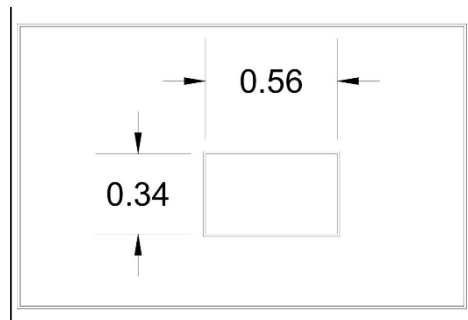
Sistem reaktor dalam penelitian ini dirancang untuk mengakomodasi proses pengolahan air lindi melalui pendekatan gabungan antara mikroorganisme dan tanaman air. Pemilihan ukuran dan bentuk reaktor mempertimbangkan kapasitas limbah yang diolah serta kebutuhan pertumbuhan tanaman yang digunakan dalam proses fitoremediasi. Reaktor terdiri dari beberapa unit yang disusun secara berurutan untuk membentuk alur pengolahan berkelanjutan, dimulai dari wadah penampungan awal, dilanjutkan ke unit reaktor anaerob dan aerob, kemudian menuju bak clarifier, sebelum akhirnya dialirkan ke unit *floating wetland* dan *constructed wetland* sebagai tahap akhir pemolesan kualitas air. Setiap unit memiliki peran spesifik untuk mendukung proses penguraian dan penyerapan zat pencemar secara bertahap (Kadlec & Wallace, 2009; Vymazal, 2011).



Gambar 3. 2 Desain Reaktor

1. Bak Penampung

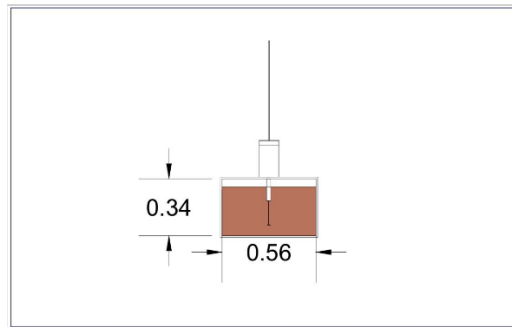
Bak penampung menggunakan kontainer box dengan volume 55L (56,5 cm x 40,2 c, x 34 cm). Bak penampung sebagai wadah untuk limbah lindi dengan campuran dan juga untuk limbah lindi murni.



Gambar 3. 3 Desain Bak Penampung

2. Reaktor Anaerobik

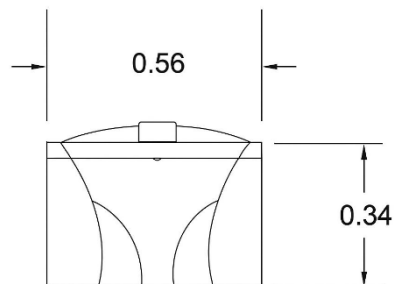
Reaktor anaerobik menggunakan kontainer box dengan volume 55L (56,5 cm x 40,2 c, x 34 cm). Reaktor anaerobik menggunakan sistem mixer yang atau pengaduk dengan tujuan untuk menyeimbangkan homogenitas dari campuran limbah dan bak anaerobik berisi slude aktif.



Gambar 3. 4 Desain Bak Anaerobik

3. Reaktor Aerobik

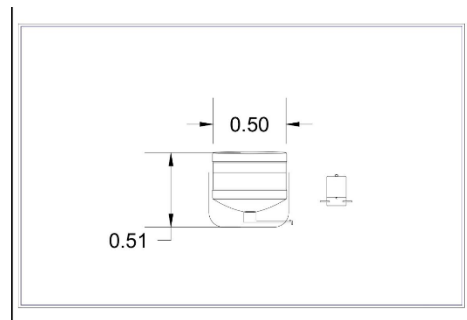
Reaktor anaerobik menggunakan kontainer box dengan volume 55L (56,5 cm x 40,2 c, x 34 cm). Reaktor berisi air limbah lindi dan sludge aktif. Reaktor aerobik menggunakan alat aerator sebagai penyuplai oksigen.



Gambar 3. 5 Desain Bak Aerobik

4. Clarifier

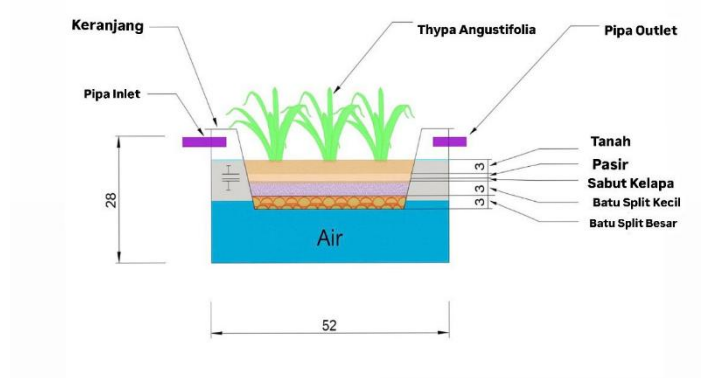
Reaktor clarifier di ranjang sendiri dengan menggunakan galon 15 air mineral dengan volume 15 L, yang kemudian dirangkai menjadi sebuah reaktor yang bisa memisahkan lumpur dan air limbah setelah proses bilogis.



Gambar 3. 6 Desain Clarifier

5. Reaktor Floating Wetland

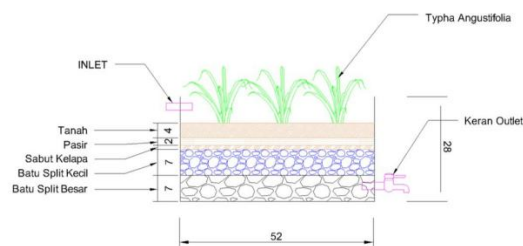
Bak *Floating* menggunakan wadah dengan volume 40 L (52 cm x 35 cm x 28 cm). *Typha angustifolia*, ditanam dalam wadah keranjang plastik berlubang sebagai media tanam. Setiap unit reaktor ditanami sebanyak 12 batang *Typha*. Media tanam di dalam keranjang disusun secara berlapis dengan urutan dari bawah ke atas yaitu: kerikil besar berukuran ± 3 cm, kerikil kecil ± 3 cm, sabut kelapa sebagai pelapis penuh, kemudian pasir setebal 1 cm, dan di bagian paling atas adalah tanah dengan ketebalan 3 cm. Selanjutnya, air bersih ditambahkan ke dalam kontainer hingga mencapai tinggi akar tanaman



6. Reaktor *Constructed Wetland* (CW)

Reaktor Constructed menggunakan wadah dengan volume 40 L (52 cm x 35 cm x 28 cm). Untuk sistem *Constructed Wetland*, jenis

kontainer dan tanaman yang digunakan sama seperti pada sistem FTW. Perbedaannya terletak pada jumlah dan pengaturan rumpun tanaman, di mana setiap unit reaktor berisi 12 rumpun dengan masing-masing rumpun terdiri dari 2 hingga 3 batang *Typha angustifolia*. Susunan media tanam dalam reaktor dimulai dari lapisan dasar berupa kerikil besar setebal 7 cm, diikuti dengan kerikil kecil 7 cm, lapisan sabut kelapa yang menutup penuh permukaan, pasir setebal 2 cm, dan lapisan tanah setebal 4 cm di bagian paling atas.



3.2.2 Aklimatisasi *Sludge*

Aklimatisasi *sludge* menggunakan *sludge* yang diambil di Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) KIT Batang, Semarang. Aklimatisasi bertujuan untuk membiasakan mikroorganisme dengan karakteristik air lindi sehingga mampu beradaptasi dan bekerja secara optimal dalam kondisi operasional yang menyerupai keadaan sebenarnya. Aklimatisasi diawali dengan membagi lumpur ke reaktor anaerob dan aerob dengan volume awal 10 liter dari kapasitas reaktor yaitu 48 liter.

Aklimatisasi dimulai dengan pemberian air lindi berkonsentrasi rendah (20%) untuk meminimalkan kejutan lingkungan bagi mikroorganisme dan memastikan pertumbuhan serta aktivitasnya dapat berkembang secara bertahap. Proses ini berlangsung selama 37 hari, terhitung sejak 14 Maret hingga 20 April 2025. Selama periode aklimatisasi, mikroorganisme diberikan tambahan nutrisi berupa gula dan urea sebagai sumber karbon dan nitrogen dengan perbandingan 10:1. Larutan nutrisi ini dicampurkan ke dalam bak penampung berisi air lindi sebanyak 48 liter. Untuk menjaga kondisi

optimal, parameter operasional utama seperti pH, suhu, dan SV30 dipantau secara berkala. Keberhasilan aklimatisasi ditandai oleh kondisi lumpur yang stabil dan nilai SV30 yang mencapai 60 mL.

3.2.3 Aklimatisasi Tanaman

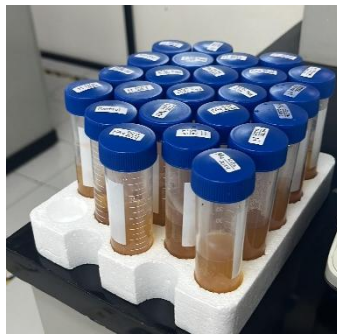
Sebelum dimulainya tahapan proses fitoremediasi, dilakukan fase aklimatisasi terhadap tanaman yang digunakan. Proses ini berlangsung dari tanggal 29 September 2024 hingga 1 Januari 2025, dengan tujuan memberikan waktu tanaman tersebut beradaptasi terhadap kondisi lingkungan.

Setelah reaktor dirakit dan media tanam disusun, langkah selanjutnya adalah melakukan aklimatisasi terhadap tanaman *Typha angustifolia*. Proses aklimatisasi ini bertujuan untuk memberi waktu kepada tanaman agar dapat beradaptasi dengan lingkungan barunya, terutama media tanam dan kondisi fisik maupun kimia dari sistem reaktor. Pada awal masa aklimatisasi, dilakukan pemangkasan terhadap daun tanaman hingga tersisa sekitar 15 cm dari pangkal batang, dengan perlakuan seragam pada seluruh unit tanam. Pemupukan dilakukan satu kali setiap minggu selama dua bulan pertama untuk mendukung pertumbuhan awal tanaman. Proses aklimatisasi dinyatakan selesai ketika terlihat perubahan visual yang menandakan tanaman sudah stabil, seperti pertumbuhan akar yang padat serta daun dan batang yang mulai menghijau.

3.2.4 Kultivasi Bakteri

Kultivasi mikroorganisme dalam penelitian ini menggunakan konsorsium bakteri yang sebelumnya telah berhasil diidentifikasi dan dimanfaatkan dalam studi serupa. Konsorsium tersebut terdiri dari beberapa jenis bakteri dari penelitian sebelumnya, antara lain *Bacillus cereus*, *Bacillus velezensis*, *Staphylococcus xylosus*, dan bakteri *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR). Tahapan kultur dimulai dengan penanaman koloni tunggal ke dalam media cair Nutrient Broth (NB) sebanyak 500 mL dalam

erlenmeyer. Kultur kemudian diinkubasi menggunakan waterbath selama 48 jam pada suhu 30°C dengan kecepatan 100 rpm. Setelah inkubasi, sebanyak 20 mL larutan diambil untuk diukur nilai kekeruhannya (OD) menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 600 nm. Selanjutnya, dilakukan proses sentrifugal untuk memisahkan biomassa bakteri dari medium. Endapan hasil sentrifugasi kemudian dipisahkan dari medium NB dan dilarutkan kembali dengan larutan NaCl steril. Proses ini dilakukan di bawah kondisi aseptik menggunakan meja kerja steril (Laminar Air Flow) yang telah disterilkan sebelumnya, guna menjaga kemurnian dan kelangsungan hidup mikroba yang akan digunakan dalam sistem pengolahan (Glick, 2012; Sari et al., 2022).



Gambar 3. 7 Proses Pendinginan Media



Gambar 3. 8 Proses Pergantian NB dengan NACL

3.2.5 *Trial* Reaktor

Uji coba awal terhadap sistem pengolahan dilakukan melalui fase *trial* dengan mengalirkan campuran air lindi sebanyak 20% dari total kapasitas

reaktor. Tahap ini bertujuan untuk menguji ketahanan sistem terhadap limbah berkadar polutan ringan serta untuk memastikan kesiapan tanaman dan mikroba sebelum menghadapi konsentrasi air lindi yang lebih tinggi. Selama fase ini, parameter-parameter penting seperti pH, settling velocity 30 (SV30), electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), dan suhu dipantau secara berkala. Data hasil pemantauan digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi stabilitas dan performa awal sistem reaktor.

3.2.6 Running Reaktor

Setelah tahap *trial* dianggap berhasil, reaktor mulai dioperasikan secara kontinu menggunakan air lindi murni dengan konsentrasi 50% dan 100%. Selama proses berlangsung, dilakukan pengamatan terhadap parameter penting seperti pH dan volume lumpur (*sludge*) untuk menjaga kondisi lingkungan internal yang mendukung aktivitas mikroorganisme serta pertumbuhan tanaman. Sludge yang digunakan dalam proses running merupakan sludge yang diambil dari IPAL Batang.

Dalam pengoperasiannya, sistem menggunakan variasi waktu tinggal hidrolis atau *Hydraulic Retention Time* (HRT) selama 4 hari. Penerapan HRT ini dimaksudkan agar air limbah berada dalam sistem lebih lama, sehingga proses biologis oleh mikroba dan tanaman dapat berlangsung secara lebih maksimal. HRT yang cukup panjang diharapkan mampu meningkatkan efektivitas dalam menurunkan kandungan fosfat dan parameter pencemar lainnya. Namun, lamanya waktu retensi juga perlu diatur secara seimbang untuk menghindari risiko terbentuknya kondisi anaerob apabila aerasi tidak memadai.

3.2.7 Sampling dan Pengujian

Pengambilan sampel dilakukan pada dua titik waktu, yakni saat awal pengolahan (hari ke-0) dan akhir pengolahan (hari ke-28) untuk masing-masing reaktor. Sampel diambil selama periode reaktor beroperasi penuh selama dua bulan. Titik sampling ditentukan sebanyak tujuh lokasi berbeda,

untuk memperoleh gambaran distribusi konsentrasi fosfat di berbagai bagian reaktor. Pengujian dilakukan dengan tiga variasi konsentrasi air lindi, yaitu 20%, 50% dan 100%. Setelah dilakukan sampling pada reaktor adalah melakukan pengujian. Pengujian kadar fosfat dalam air limbah lindi bertujuan untuk mengetahui sejauh mana sistem pengolahan mampu menurunkan konsentrasi ortofosfat. Metode yang digunakan mengacu pada SNI 6989-31:2021 dengan menggunakan spektrofotometri askorbat pada panjang gelombang 880 nm.

Sampel air diambil dari masing-masing reaktor pada hari ke-0 hingga hari ke-63 dari total 7 titik pengambilan. Seluruh sampel disaring menggunakan kertas saring bebas fosfat dan disimpan dalam botol gelap pada suhu 4°C hingga waktu analisis. Sebanyak 25 mL sampel digunakan untuk pengujian, kemudian ditambahkan reagen molibdat dan asam askorbat sesuai prosedur standar. Setelah reaksi selama ± 10 menit, larutan yang terbentuk diukur absorbansinya menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 880 nm. Nilai absorbansi tersebut dibandingkan dengan kurva kalibrasi yang disusun dari larutan standar KH_2PO_4 dengan berbagai konsentrasi.

3. 3. Analisis Data

Data hasil penelitian dianalisis dengan menghitung konsentrasi fosfat menggunakan metode spektrofotometri berdasarkan SNI 06-6989.31-2005. Konsentrasi diperoleh melalui pembacaan absorbansi pada panjang gelombang 880 nm, kemudian dikonversi menggunakan kurva standar.

Selanjutnya, efisiensi penurunan fosfat dihitung menggunakan rumus:

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

BAB IV

PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Limbah

Karakteristik limbah lindi yang digunakan dalam penelitian ini diuji berdasarkan konsentrasi kandungan fosfat (PO_4^{3-}), yang dikenal sebagai salah satu indikator pencemaran nutrisi di badan air (Bastian et al. 2020). Pada penelitian ini, terdapat tiga konsentrasi limbah yang digunakan yaitu 20%, 50%, dan 100%, tiga konsentrasi ini mewakili tiga tingkat pencemaran yang berbeda serta berfungsi untuk mengevaluasi efektivitas sistem reaktor dalam mengurangi kadar kandungan fosfat. Uji reaktor dilakukan dari 7 -28 hari untuk berbagai tingkat konsentrasi, kecuali untuk konsentrasi 20% yang digunakan untuk fase awal sebagai fase aklimatisasi sistem reaktor. Fase adaptasi terhadap sistem dengan tujuan mengaklimatisasi tanaman dan bakteri agar dapat beradaptasi dengan limbah sebelum running untuk konsentrasi yang lebih tinggi (Yadaf et al., 2021).

Berdasarkan pertumbuhan dan observasi visual selama fase aklimatisasi, konsentrasi 20% tidak menunjukkan efek negatif pada tanaman dalam hal perubahan warna dan morfologi daun serta penurunan vitalitas. Ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi ini, tingkat toksisitas percolate terhadap tanaman cukup rendah untuk menghindari stres fisiologis yang signifikan (Putri et al., 2022). Sementara itu, pada awal running reaktor dengan konsentrasi 50% DO (Dissolved Oxygen) mencatat sebesar 0.8 mg/L, artinya kondisi perairan dengan kadar oksigen terlarut yang relatif rendah meski suportif untuk proses biologis aerob. Pada saat yang sama, nilai EC (Electrical Conductivity) tercatat sebesar 2.61 mS/cm, yang menunjukkan ion-ion terlarut pada tingkat konsentrasi yang tinggi, serta merefleksikan kompleksitas senyawa dalam limbah (Kamaruddin et al., 2019). Berikut merupakan hasil uji kandungan fosfat (PO_4^{3-}) pada kondisi awal running masing-masing konsentrasi limbah:

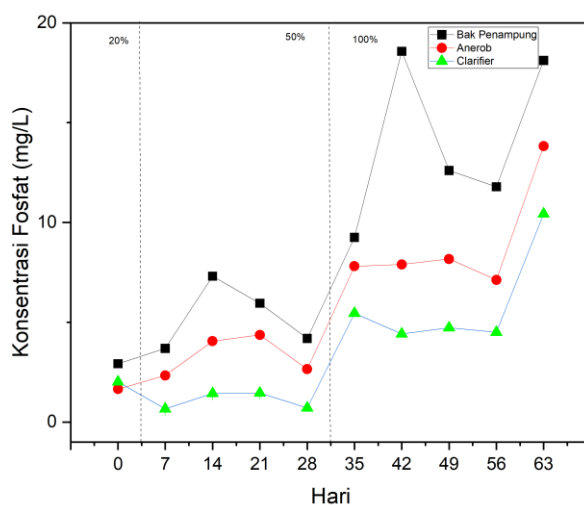
Tabel 4. 1 Kandungan Kadar Fosfat Limbah Lindi

Konsentrasi	Fosfat (PO ₄) (mg/L)
20%	2.92
50%	3.69
100%	9.25

Dari tabel di atas, dapat dilihat bahwa semakin tinggi konsentrasi limbah yang digunakan, semakin signifikan pengukuran fosfat yang terkandung meningkat. Ini menunjukkan bahwa konsentrasi polutan dalam air lindi memiliki hubungan linear dengan konsentrasinya, sehingga strategi tersebut memerlukan teknik pengelolaan yang efektif untuk mengurangi kadar fosfatnya (Sarkar & Banerjee, 2020).

4.2 Efektivitas Pengolahan Biologis dalam Mereduksi Fosfat (PO₄³⁻)

Tiga tahap utama terdiri dari sistem yang digunakan: Bak Penampung, Reaktor Anaerob, dan Clarifier. Dalam reaktor anaerob, proses biologis dilakukan tanpa oksigen dengan bantuan pengaduk untuk menjaga homogenitas, sedangkan reaktor aerob memiliki alat aerasi untuk menyediakan oksigen untuk pertumbuhan mikroorganisme aerobik. Untuk meningkatkan efektivitas kedua reaktor, kultur bakteri juga ditambahkan ke kedua reaktor (Tchobanoglous et al., 2003).



Gambar 4. 1 Grafik Pengujian Fosfat Bak Penampung, Anaerob, dan Clarifier

Selama 63 hari, konsentrasi fosfat dipantau dalam tiga variasi konsentrasi lindi yaitu 20%, 50%, dan 100%. Pada konsentrasi 20% (hari pertama), fosfat di Bak Penampung sebesar 2,92 mg/L, menurun menjadi 1,6485 mg/L di reaktor anaerob, dan 2,01277 mg/L di clarifier. Hal ini menunjukkan sistem mulai menyesuaikan diri dengan beban limbah pada tahap awal.

Pada konsentrasi 50% (hari ke-28), kadar fosfat di Bak Penampung 4,19 mg/L, turun menjadi 2,6480 mg/L di reaktor anaerob, dan mencapai 0,7130 mg/L di clarifier. Uji coba awal konsentrasi 100% (hari ke-35) menunjukkan kenaikan kadar fosfat di Bak Penampung (9,25 mg/L), dengan penurunan di reaktor anaerob (7,8050 mg/L) dan clarifier (5,4530 mg/L). Kondisi ini menandakan adanya akumulasi beban pencemar.

Pada konsentrasi 100% (hari ke-42 hingga 63), kadar fosfat semakin meningkat. Pada hari ke-42, fosfat di Bak Penampung 18,57 mg/L, menurun menjadi 7,895 mg/L di reaktor anaerob dan 4,412 mg/L di clarifier. Pada hari ke-63, konsentrasi akhir di Bak Penampung tercatat 18,12 mg/L, dengan penurunan di reaktor anaerob (13,822 mg/L) dan clarifier (10,429 mg/L). Penurunan ini menunjukkan bahwa sistem biologis masih dapat mengolah sebagian fosfat meskipun beban pencemar tinggi.

Secara umum, peningkatan konsentrasi lindi berbanding lurus dengan kenaikan kadar fosfat. Semakin tinggi konsentrasi, semakin besar tekanan pada proses biologis dan mikroorganisme reaktor, sehingga efisiensi penurunan menurun. Pada konsentrasi rendah (20%), sistem relatif stabil, sedangkan pada 100% sistem menunjukkan keterbatasan kapasitas olah (Tchobanoglous et al., 2003). Penurunan fosfat pada sistem ini tidak terjadi karena degradasi secara kimia, melainkan melalui mekanisme biologis berupa asimilasi. Mikroorganisme menyerap fosfat dari air untuk kebutuhan pembentukan DNA, membran sel, dan proses metabolisme. Pada sistem anaerob-aerob seperti penelitian ini, bakteri akumulasi fosfat (*Phosphate Accumulating Organisms/PAO*) berperan penting. Pada fase anaerob, PAO melepaskan sebagian fosfat internal untuk mendapatkan energi, sedangkan pada fase aerob bakteri menyerap fosfat dalam jumlah lebih besar dan menyimpannya sebagai polifosfat di dalam sel. Ketika biomassa bakteri mengendap di *clarifier*, fosfat yang telah tersimpan ikut terbuang bersama lumpur, sehingga konsentrasinya dalam air menurun.

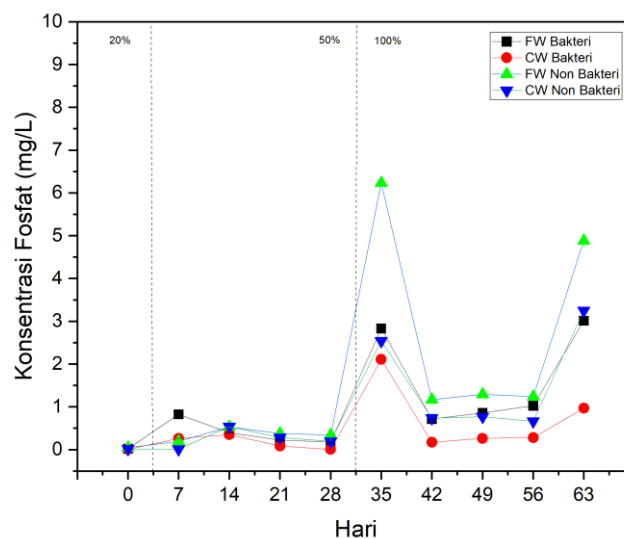
Jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu, penelitian Asa (2023) dan Rifa Intan (2022) menggunakan *constructed wetland* dengan *Typha angustifolia* untuk menurunkan parameter organik dan nutrisi, tetapi tanpa tahapan biologis serta tidak meneliti fosfat. Hal ini menjadi pembeda, karena penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi pengolahan biologis mampu menurunkan fosfat secara bertahap sebelum tahap fitoremediasi.

Selain itu, penelitian biologis sebelumnya juga memperlihatkan efektivitas yang tinggi terhadap fosfat. Hidayat et al. (2022) menunjukkan bahwa kombinasi fitoremediasi dengan mikroorganisme dapat menurunkan fosfat hingga 85%, sedangkan Rahmani & Handajani (2014) mencatat efisiensi penghilangan fosfat sebesar 85,15% pada sistem subsurface flow *constructed wetland* dengan *Typha angustifolia*. Hasil-hasil tersebut konsisten dengan penelitian ini, meskipun keunggulannya terletak pada penjelasan tahapan penurunan fosfat dari unit bak penampung, reaktor

anaerob, hingga clarifier yang belum banyak dikaji pada penelitian sebelumnya.

4.3 Efektivitas *Floating Wetland* (FW) dan *Constructed Wetland* (CW) dalam Mereduksi Fosfat (PO_4^{3-})

Penelitian ini mengevaluasi efektivitas dua tipe sistem wetland *Floating Wetland* (FW) dan *Constructed Wetland* (CW) dalam mereduksi konsentrasi fosfat (PO_4^{3-}) dari lindi dengan beban bertingkat, yaitu 20%, 50%, dan 100%. Masing-masing tipe diuji dalam dua perlakuan, yaitu dengan dan tanpa penambahan bakteri. Tanaman air yang digunakan adalah *Typha angustifolia*, yang diketahui efektif dalam penyerapan nutrisi dan mendukung zona akar mikroba (Brix, 1997; Chen et al., 2009).



Gambar 4. 2 Grafik Hasil Pengujian Fosfat Pada FW Bakteri, CW Bakteri, Fw Non Bakteri dan CW Non Bakteri

Pada konsentrasi 20% (hari 0/adaptasi awal), konsentrasi fosfat relatif rendah. Nilai terendah dicapai oleh CW Bakteri (0,0059 mg/L) dan tertinggi pada FW Non Bakteri (0,0423 mg/L). Hasil ini menunjukkan bahwa pada beban rendah, baik CW maupun FW masih mampu menurunkan fosfat secara efektif meskipun tanpa bantuan bakteri.

Pada konsentrasi 50% (hari ke-7 hingga ke-28), terjadi akumulasi fosfat, terutama pada FW Non Bakteri (0,3400 mg/L) dan CW Non Bakteri (1,1950 mg/L). Sementara itu, FW Bakteri (0,1770 mg/L) dan CW Bakteri (0,0050 mg/L) mampu menekan peningkatan fosfat, mengindikasikan peran bakteri dalam menjaga stabilitas sistem (Vymazal, 2007).

Pada konsentrasi 100% (hari ke-35, trial awal), fosfat meningkat di semua sistem, terutama FW Non Bakteri (6,2340 mg/L) dan CW Non Bakteri (2,5430 mg/L). Sistem CW Bakteri masih mencatat nilai relatif rendah (2,1090 mg/L), sedangkan FW Bakteri sebesar 2,832 mg/L. Pada hari ke-42 hingga ke-63, CW Bakteri konsisten mempertahankan konsentrasi fosfat di rentang 0,715–1,023 mg/L. FW Bakteri juga menunjukkan performa baik (0,860–3,013 mg/L), meskipun lebih fluktuatif. Sebaliknya, CW Non Bakteri mencapai 3,249 mg/L, sedangkan FW Non Bakteri menjadi yang terendah efisiensinya dengan nilai hingga 4,8823 mg/L.

Penurunan fosfat pada Floating Wetland (FW) dan Constructed Wetland (CW) terjadi melalui kerja sama antara tanaman *Typha angustifolia*, bakteri PGPR, dan media wetland. *Typha* menyerap fosfat dalam bentuk ortofosfat melalui akar, lalu menggunakannya untuk membentuk ATP, DNA, dan membran sel sehingga fosfat berpindah dari air ke jaringan tanaman (Brix, 1997; Vymazal, 2007). Akar *Typha* juga melepaskan enzim fosfatase yang mampu memecah fosfat organik menjadi fosfat bebas sehingga lebih mudah diserap (Chen et al., 2009). Pada sistem dengan penambahan bakteri, PGPR dan bakteri fosfatolitik yang menempel pada akar dan media ikut menyerap fosfat melalui proses asimilasi dan menyimpannya sebagai polifosfat di dalam sel, sehingga fosfat terikat dalam biomassa mikroba dan tidak kembali ke air.

Jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu, Khinanty & Retnaningdyah (2017) mencatat bahwa *Typha angustifolia* mampu menurunkan ortofosfat dari sekitar 2,5 mg/L menjadi 1,0 mg/L setelah inkubasi 30 hari, sedangkan Wimbaningrum et al. (2020) menemukan bahwa sistem *constructed wetland* menurunkan fosfat dari 0,057 mg/L menjadi

0,035 mg/L pada limbah laundry. Kedua penelitian tersebut menggunakan pendekatan fitoremediasi tanpa tambahan bakteri. Perbedaan dengan penelitian ini terletak pada kontribusi mikroorganismenya, di mana penambahan bakteri fosfatolitik terbukti meningkatkan efisiensi penurunan fosfat, terutama pada konsentrasi tinggi (100%).

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengonfirmasi efektivitas *Typha angustifolia* dalam mereduksi fosfat sebagaimana penelitian sebelumnya, tetapi juga memperlihatkan bahwa integrasi dengan mikroorganismenya mampu meningkatkan ketahanan sistem terhadap beban pencemar tinggi dan mempertahankan konsentrasi fosfat pada level lebih rendah dibandingkan CW atau FW tanpa bakteri.

4.4 Paramater Fisik

Parameter fisika dalam penelitian ini diuji menggunakan alat multimeter digital, dengan pengambilan data dilakukan secara berkala mulai dari hari ke-0 hingga hari ke-63 masa pengamatan. Pengukuran dilakukan setiap hari kerja, sementara pada hari Sabtu dan Minggu pengujian *Dissolved Oxygen* (DO) tidak dilakukan karena keterbatasan alat pengukur portabel. Pada hari nonaktif kuliah, pengukuran hanya dilakukan menggunakan *Multifunction Pen*, yang tidak memiliki fitur pengukuran DO secara langsung.

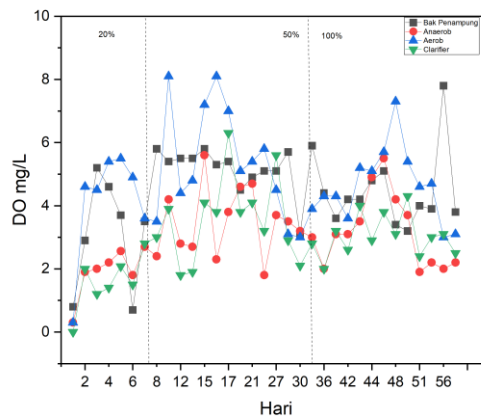
Parameter fisika dapat menunjukkan kondisi lingkungan sistem secara keseluruhan, menjadikannya salah satu komponen penting dalam proses pengolahan air limbah. Dalam penelitian ini, parameter fisika yang dianalisis adalah konduktivitas listrik (EC) dan oksigen terlarut (DO). Parameter-parameter ini dipilih karena dapat menunjukkan tingkat ketersediaan oksigen terlarut dan jumlah zat terlarut dalam air selama proses pengolahan limbah land.

4.4.1 *Dissolved Oxygen* (DO)

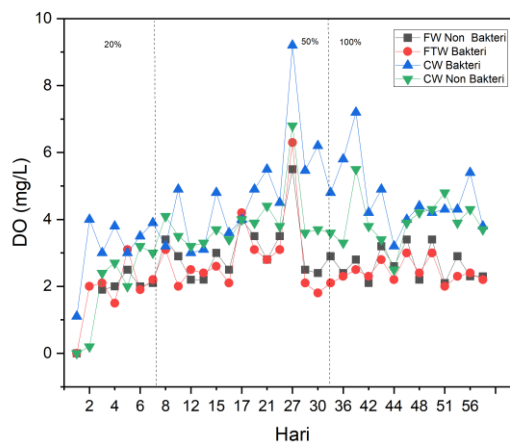
Oksigen terlarut (DO) merupakan parameter fisik yang sangat penting untuk mengevaluasi kualitas air dan efektivitas sistem pengolahan limbah

secara biologis. DO menunjukkan jumlah oksigen bebas yang tersedia dalam air, yang dapat dimanfaatkan oleh mikroorganisme dan akar tanaman selama proses metabolisme. Keberadaan DO yang cukup menjadi indikator bahwa proses oksidasi biologis dapat berjalan dengan baik, terutama pada sistem pengolahan yang bergantung pada aktivitas mikroorganisme aerob (Metcalf & Eddy, 2014).

Kadar DO dalam sistem pengolahan dapat mengalami fluktuasi yang dipengaruhi oleh berbagai faktor. Peningkatan DO umumnya terjadi akibat proses aerasi, baik melalui difusi alami dari atmosfer, turbulensi aliran, maupun aerasi mekanis (USEPA, 2000). Selain itu, aktivitas fotosintesis oleh tanaman air seperti *Typha angustifolia* juga berperan penting dalam meningkatkan kadar DO di siang hari, ketika intensitas cahaya tinggi (Brix, 1997; Kadlec & Wallace, 2009). Tanaman ini mampu mentransfer oksigen ke zona perakaran dan kolom air, mendukung terciptanya kondisi aerobik lokal di sekitar akar. Sebaliknya, penurunan DO umumnya terjadi pada malam hari akibat dominasi proses respirasi oleh tanaman dan mikroorganisme yang terus berlangsung meskipun tidak ada suplai oksigen dari fotosintesis (Tanner, 2001; Wu et al., 2014). Selain itu, tingginya beban bahan organik dalam limbah juga dapat menyebabkan konsumsi oksigen yang cepat, karena mikroorganisme memerlukan oksigen dalam jumlah besar untuk proses dekomposisi senyawa organik. Faktor lain seperti suhu, waktu tinggal air, dan kecepatan aliran juga berpengaruh. Suhu yang tinggi cenderung menurunkan kelarutan oksigen dalam air, sementara aliran yang lambat mengurangi difusi oksigen dari atmosfer (Kadlec & Wallace, 2009). Oleh karena itu, menjaga keseimbangan antara suplai dan konsumsi oksigen sangat penting untuk memastikan bahwa sistem pengolahan biologis tetap berada dalam kondisi aerobik yang optimal.



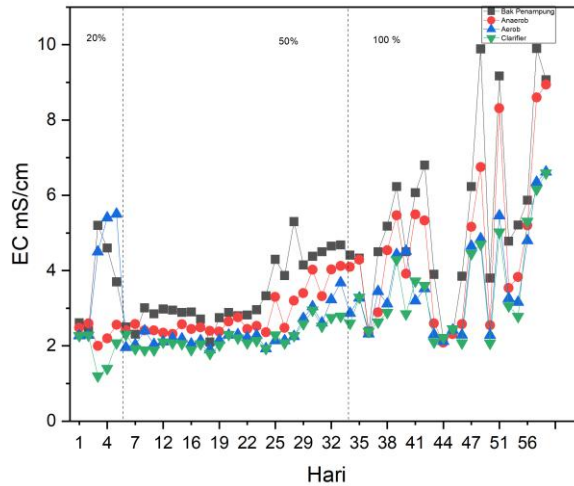
Gambar 4. 3 Grafik Pengujian DO pada Bak Penampung, Anaerob, Aerob, dan Clarifier



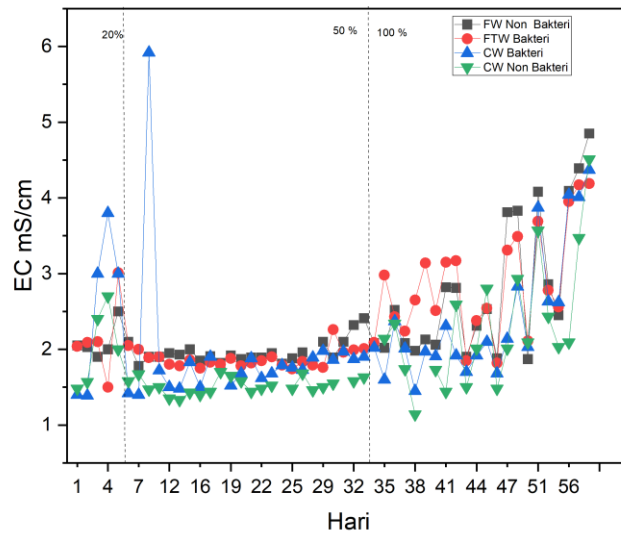
Gambar 4. 4 Grafik Pengujian DO pada FW Bakteri, CW Bakteri, FW Non Bakteri dan CW Non Bakteri

4.4.2 *Electrical Conductivity (EC)*

Electrical Conductivity (EC) adalah ukuran yang menunjukkan jumlah ion terlarut dalam air. Nilai EC yang tinggi biasanya dikaitkan dengan kandungan zat terlarut, seperti garam, logam, dan senyawa anorganik lainnya, dalam air limbah lindi. Ini karena lindi mengandung banyak senyawa terlarut yang berasal dari dekomposisi sampah organik dan anorganik (Renou et al., 2008).



Gambar 4. 5 Grafik Pengujian EC pada Bak Penampung, Anaerob, Aerob, dan Clarifier



Gambar 4. 6 Grafik Pengujian EC pada FW Bakteri, CW Bakteri, FW Non Bakteri dan CW Non Bakteri

Nilai EC dalam suatu sistem pengolahan limbah dapat mengalami peningkatan maupun penurunan, tergantung pada proses yang terjadi di dalam masing-masing unit pengolahan. Peningkatan EC umumnya terjadi saat

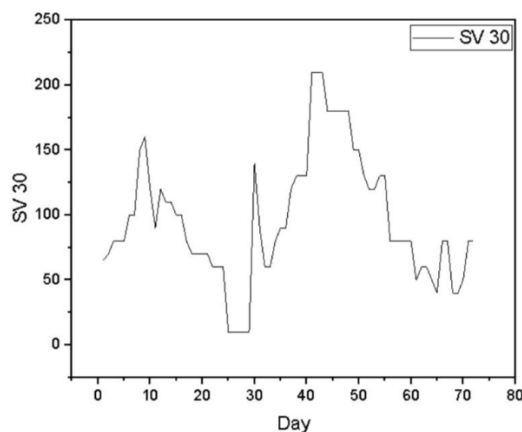
senyawa organik kompleks mengalami dekomposisi menjadi bentuk yang lebih sederhana dan lebih larut, seperti amonium, nitrat, dan berbagai kation atau anion lainnya. Proses ini banyak terjadi dalam tahapan biologis seperti reaktor anaerob dan aerob, di mana mikroorganisme mengubah senyawa organik menjadi ion-ion yang meningkatkan konduktivitas (Tchobanoglous et al., 2003). Selain itu, pelindian senyawa anorganik dari padatan, seperti logam berat dan garam mineral, juga dapat berkontribusi terhadap peningkatan EC, terutama dalam kondisi lingkungan yang asam atau bersifat pelarut tinggi. EC juga cenderung meningkat akibat akumulasi ion yang tidak terdegradasi selama proses pengolahan, atau akibat masuknya air hujan yang melarutkan material dari timbunan sampah ke dalam sistem pengolahan (Kjeldsen et al., 2002).

Di sisi lain, penurunan EC dapat terjadi akibat proses penyerapan ion oleh tanaman atau mikroorganisme, terutama pada sistem wetland. Tanaman seperti *Typha angustifolia* mampu menyerap dan menstabilkan ion nutrisi maupun logam melalui proses bioakumulasi atau fitoremediasi (Brix, 1997). Mikroorganisme juga dapat berperan dalam mengubah ion-ion tertentu menjadi bentuk yang kurang larut, sehingga menurunkan EC secara keseluruhan (Wu et al., 2014).

Namun, dalam jangka panjang, EC juga dapat meningkat kembali, terutama ketika tanaman mengalami stres fisiologis akibat akumulasi logam berat atau perubahan lingkungan seperti fluktuasi suhu dan pH. Stres ini dapat menyebabkan kerusakan jaringan tanaman dan pelepasan kembali ion ke dalam air. Selain itu, kapasitas penyerapan ion oleh tanaman dan mikroba bersifat terbatas; setelah titik jenuh tercapai, kemampuan sistem dalam menurunkan EC akan menurun (Zhang et al., 2014). Secara umum, EC merupakan indikator penting untuk menilai beban ionik dalam sistem pengolahan dan memberikan gambaran mengenai efektivitas penyerapan dan transformasi senyawa terlarut selama proses pengolahan berlangsung.

4.4.3 SV30

Sludge Volume in 30 Minutes (SV30) merupakan parameter penting yang digunakan untuk menggambarkan volume lumpur yang dapat mengendap dalam waktu 30 menit, dan sering digunakan sebagai indikator kuantitatif terhadap jumlah biomassa mikroorganisme dalam sistem pengolahan biologis. Parameter ini sangat berguna dalam mengevaluasi stabilitas dan performa proses biologis, terutama pada reaktor anaerob dan aerob. Nilai SV30 dapat mengalami fluktuasi yang dipengaruhi oleh berbagai faktor, baik dari aspek biologi maupun operasional sistem. Peningkatan SV30 umumnya menunjukkan pertumbuhan biomassa yang aktif, di mana mikroorganisme berkembang biak dengan baik sebagai respons terhadap ketersediaan substrat (bahan organik) dan kondisi lingkungan yang mendukung. Dalam banyak kasus, pemberian tambahan nutrisi eksternal seperti karbon sederhana (gula) atau nitrogen (urea) juga dapat memicu pertumbuhan mikroorganisme secara signifikan, yang berdampak pada peningkatan volume sludge dalam waktu singkat.



Gambar 4. 8 Grafik SV30 Pada Bak Aerobik

Namun, nilai SV30 yang tinggi tidak selalu menandakan bahwa mikroorganisme berada dalam kondisi optimal. Terlalu banyak lumpur yang terbentuk dapat memicu terjadinya sludge bulking, yaitu kondisi di mana

lumpur tidak dapat mengendap dengan baik karena struktur flokulasi yang buruk atau dominasi mikroorganisme filamentous. Hal ini justru dapat menurunkan efisiensi sistem dan mengganggu proses pemisahan padatan-cairan (Tchobanoglous et al., 2003).

Sebaliknya, penurunan nilai SV30 bisa terjadi karena berkurangnya substrat, ketidakseimbangan nutrien, atau adanya stres lingkungan yang menyebabkan mikroorganisme mati atau tidak aktif. Namun, nilai SV30 yang menurun tidak selalu berdampak negatif; dalam beberapa kasus, kualitas sludge justru membaik ketika mikroorganisme dalam kondisi stabil, aktif, dan efisien dalam melakukan proses biologis, meskipun volumenya tidak terlalu besar. Hal ini mencerminkan bahwa kualitas mikroorganisme (aktivitas biologis) lebih penting daripada kuantitas sludge semata (Metcalf & Eddy, 2014). Secara umum, fluktuasi SV30 dalam sistem pengolahan limbah biologis merupakan hal yang wajar dan perlu dianalisis bersamaan dengan parameter lain seperti konsentrasi fosfat, DO, dan kondisi operasi sistem, untuk mendapatkan gambaran menyeluruh tentang performa dan stabilitas proses.

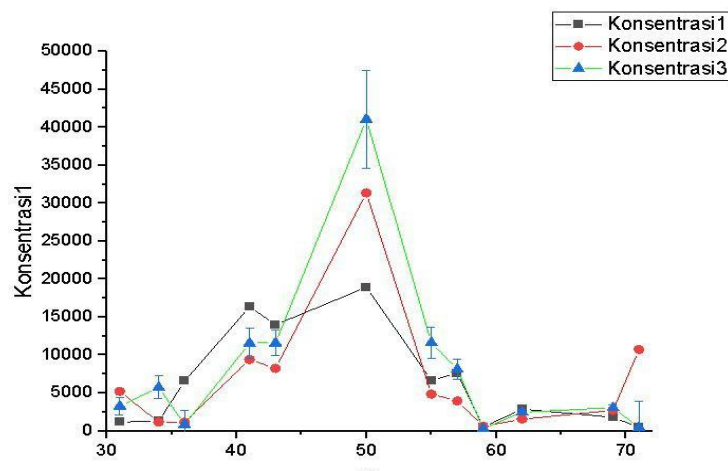
4.4.4 MLSS

Nilai MLSS (Mixed Liquor Suspended Solids) menunjukkan jumlah total padatan tersuspensi, terutama biomassa mikroorganisme, dalam sistem pengolahan biologis. Grafik menunjukkan bahwa selama periode pengamatan, terjadi peningkatan konsentrasi MLSS yang cukup signifikan, terutama pada hari ke-49 hingga 51, dengan nilai tertinggi mencapai ± 45.000 mg/L pada konsentrasi tertinggi (Konsentrasi 3).

Peningkatan tajam ini mengindikasikan terjadinya akumulasi biomassa mikroba, kemungkinan akibat beban organik yang tinggi, sehingga merangsang pertumbuhan mikroorganisme secara masif. Namun, setelah puncak tersebut, nilai MLSS menurun drastis hingga mendekati nol, yang

dapat disebabkan oleh overloading, washout mikroorganisme, atau kerusakan struktur lumpur aktif karena lingkungan yang tidak stabil.

Rentang optimal MLSS untuk sistem lumpur aktif konvensional adalah 2.000–4.000 mg/L, sedangkan untuk sistem dengan beban tinggi (extended aeration) dapat mencapai 6.000–8.000 mg/L (Tchobanoglous et al., 2003; Metcalf & Eddy, 2014). Untuk pengolahan limbah kompleks seperti lindi, nilai MLSS dapat ditoleransi hingga ± 15.000 mg/L, namun nilai di atas ambang tersebut berpotensi menurunkan efisiensi proses dan menyebabkan ketidakstabilan sistem (Metcalf & Eddy, 2014).



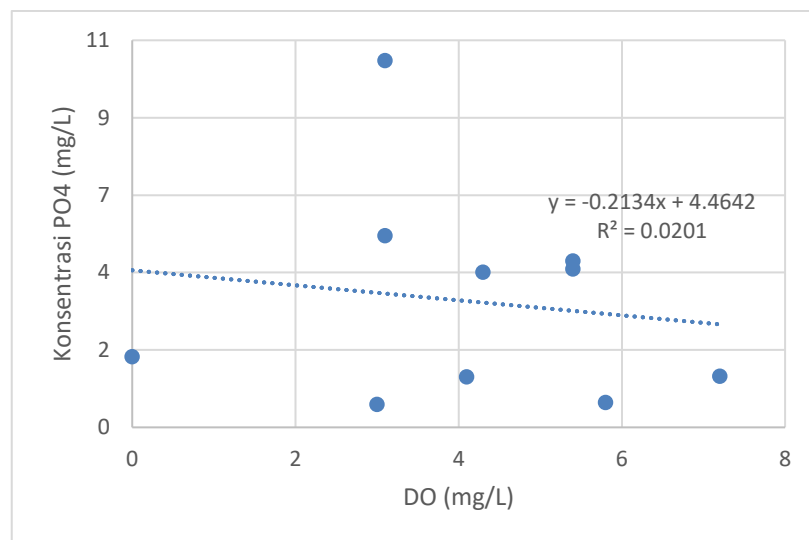
4.5 Korelasi Antara Sludge dengan Kadar Fosfat

4.5.1 *Dissolved Oxygen (DO)*

Hasil analisis menunjukkan korelasi negatif yang sangat lemah antara DO dan konsentrasi fosfat, dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,0201$. Ini berarti hanya sekitar 2,01% variasi fosfat yang bisa dijelaskan oleh perubahan

kadar DO. Meskipun grafik menunjukkan sedikit penurunan kadar fosfat seiring meningkatnya DO, hubungan ini sangat tidak signifikan.

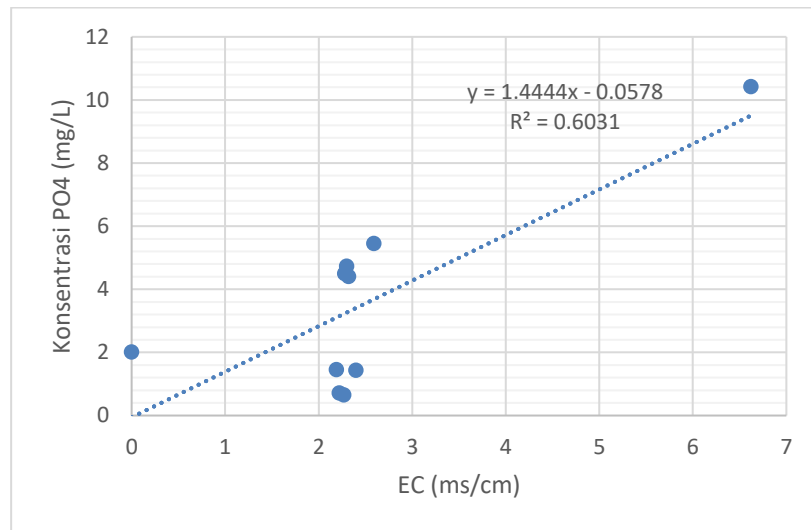
Secara teori, DO berperan penting dalam mendukung aktivitas mikroorganisme aerob, termasuk *phosphate accumulating organisms* (PAOs) yang bertanggung jawab dalam penyerapan fosfat selama fase aerobik. Dalam sistem lumpur aktif, mikroba ini menyerap fosfat dalam jumlah besar di bawah kondisi kaya oksigen, dan melepaskannya dalam kondisi anaerobik sebagai bagian dari siklus penyimpanan energi (Metcalf & Eddy, 2014).



Gambar 4. 7 Grafik Korelasi DO dan Fosfat

4.5.2 *Electrical Conductivity* (EC)

Hasil analisis hubungan antara *Electrical Conductivity* (EC) dan konsentrasi fosfat menunjukkan adanya korelasi positif yang cukup kuat, dengan koefisien determinasi $R^2=0,6031$. Nilai ini mengindikasikan bahwa sekitar 60,31% variasi konsentrasi fosfat dapat dijelaskan oleh perubahan nilai EC. Semakin tinggi EC, cenderung diikuti oleh peningkatan konsentrasi fosfat, yang menunjukkan keterkaitan antara tingginya ion terlarut dan kandungan fosfat dalam air limbah.



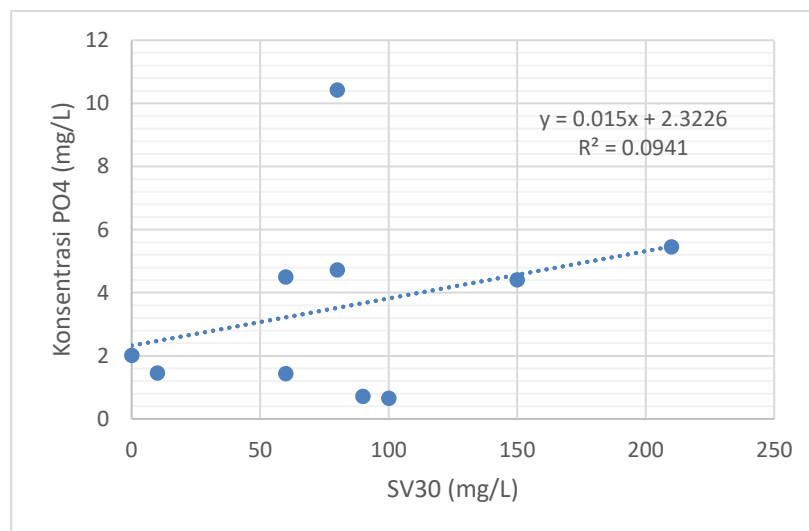
Gambar 4. 8 Grafik Korelasi EC dan Kadar Fosfat

EC merupakan indikator yang umum digunakan untuk menggambarkan jumlah total ion-ion terlarut dalam air, termasuk fosfat dalam bentuk fosfat, nitrat, amonium, serta kation logam seperti Na^+ , K^+ , Ca^{2+} dan Mg^{2+} (Tchobanoglous et al., 2003). Fosfat yang tidak terserap oleh tanaman atau mikroorganisme cenderung tetap berada dalam bentuk terlarut, yang turut meningkatkan nilai EC. Korelasi positif antara EC dan nutrisi seperti fosfat dapat terlihat terutama pada limbah dengan kandungan beban organik tinggi, di mana proses mineralisasi menghasilkan senyawa ionik yang meningkatkan konduktivitas (Wu et al., 2014).

Namun demikian, EC juga bisa meningkat karena akumulasi ion lain yang tidak berkaitan langsung dengan fosfat. EC dalam limbah lindi dipengaruhi oleh banyak faktor, termasuk pelindian logam berat dan garam anorganik dari timbunan sampah. Oleh karena itu, meskipun korelasi yang teramati dalam penelitian ini cukup kuat, EC tetap tidak dapat dijadikan indikator tunggal untuk konsentrasi fosfat, namun tetap bermanfaat sebagai indikator umum terhadap beban ionik sistem pengolahan (Kjeldsen et al., 2002)

4.5.3 SV30

Analisis korelasi antara nilai SV30 dan konsentrasi fosfat pada unit clarifier menunjukkan hubungan yang sangat lemah dengan koefisien determinasi R^2 sebesar 0,0941. Hal ini menunjukkan bahwa hanya sekitar 9,41% variasi konsentrasi fosfat dapat dijelaskan oleh perubahan nilai SV30. Secara umum, nilai SV30 yang tinggi menunjukkan tingginya volume sludge yang mengendap, yang dapat diasumsikan sebagai keberadaan biomassa mikroorganisme.



Gambar 4. 9 Korelasi SV30 dan Kadar Fosfat

Namun demikian, dalam konteks ini, korelasi positif lemah justru menunjukkan bahwa peningkatan sludge tidak selalu berbanding lurus dengan efektivitas penurunan fosfat. Kemungkinan besar, sludge yang mengendap di clarifier tidak seluruhnya berasal dari mikroba akumulator fosfat (PAOs), melainkan merupakan akumulasi padatan tersuspensi atau mikroba yang sudah tidak aktif. Selain itu, struktur sludge yang tidak stabil (misalnya floc yang tidak kompak) juga dapat menyebabkan fosfat tidak tertangkap secara efisien dan tetap lolos ke effluent. Hal ini sejalan dengan hasil studi oleh Wang et al. (2018), yang menunjukkan bahwa efisiensi penurunan fosfat dalam sistem biologis lebih ditentukan oleh kualitas sludge

dan dominasi mikroorganisme fungsional seperti PAOs, bukan semata-mata oleh kuantitas lumpur. Dalam kondisi sludge bulking atau tingginya mikroorganisme non-akumulator, fosfat dapat tetap tinggi dalam effluent meskipun volume sludge terlihat meningkat. Metcalf & Eddy (2014) juga menjelaskan bahwa efisiensi penurunan fosfat tidak hanya ditentukan oleh jumlah sludge yang mengendap, tetapi sangat dipengaruhi oleh kualitas mikroba, komposisi lumpur, serta kondisi proses sebelumnya (seperti rasio nutrien, waktu tinggal lumpur, dan keberadaan oksigen yang cukup). Oleh karena itu, SV30 di clarifier lebih mencerminkan hasil dari proses biologis sebelumnya dan belum tentu menjadi indikator langsung keberhasilan penurunan fosfat di unit tersebut (Metcalf & Eddy., 2014)

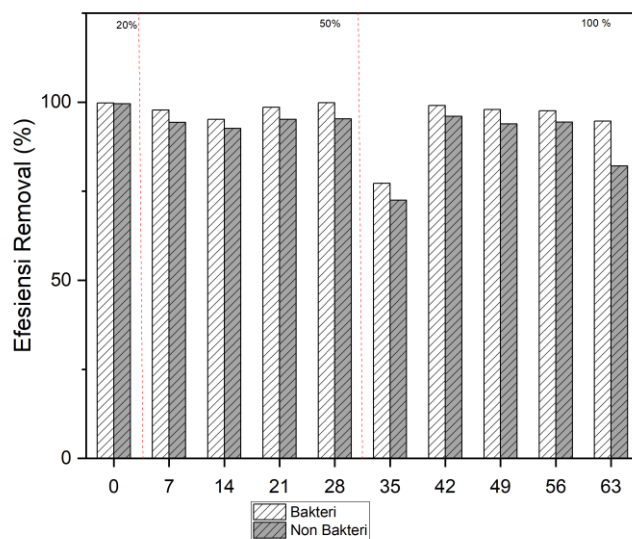
4.6 Analisis Efisiensi Removal Fosfat pada Sistem *Wetland*

Lindi TPA adalah limbah cair kompleks dengan kandungan organik dan anorganik tinggi. Ini termasuk fosfat yang berasal dari dekomposisi limbah organik dan produk pembersih rumah tangga yang terbuang; efisiensi penghilangan fosfat pada sistem wetland dengan dan tanpa bakteri menunjukkan perbedaan yang signifikan dalam menghadapi beban limbah lindi dengan variasi konsentrasi 20%, 50%, dan 100% (Renou et al., 2008).

Tidak terdapat baku mutu spesifik untuk kandungan fosfat dalam lindi, jadi Permen LHK No. 03 Tahun 2010 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik tetap digunakan sebagai pembanding ambang batas fosfat yang diizinkan, yaitu 2 mg/L, meskipun lindi tidak termasuk dalam kategori limbah domestik.

Tabel 4. 2 Efisiensi Removal Wetland

Reaktor	Konsentrasi 20 %			Konsentrasi 50%			Konsentrasi 100%			
	0	7	14	21	28	35	42	49	56	63
CW Bakteri	99.8	97.8	95.2	98.6	99.9	77.2	99.1	97.9	97.6	94.7
CW Non Bakteri	99.5	94.3	92.6	95.2	95.3	72.5	96.1	93.9	94.4	82.1



Gambar 4. 10 Efisiensi Removal Pada Wetland

Pada hari ke- 0, efisiensi penghilangan fosfat sangat tinggi: 99,8% pada CW bakteri dan 99,5% pada CW non-bakteri. Dengan konsentrasi lindi yang rendah, sistem dapat menurunkan fosfat dengan cara yang paling efisien. Tanaman *Typha angustifolia* adalah komponen penting dari *wetland*, selain substrat yang masih aktif mengadsorpsi fosfat. Tanaman ini memiliki kemampuan untuk menyerap fosfat langsung dari area akar serta menyimpannya dalam jaringan (Brix, 1997).

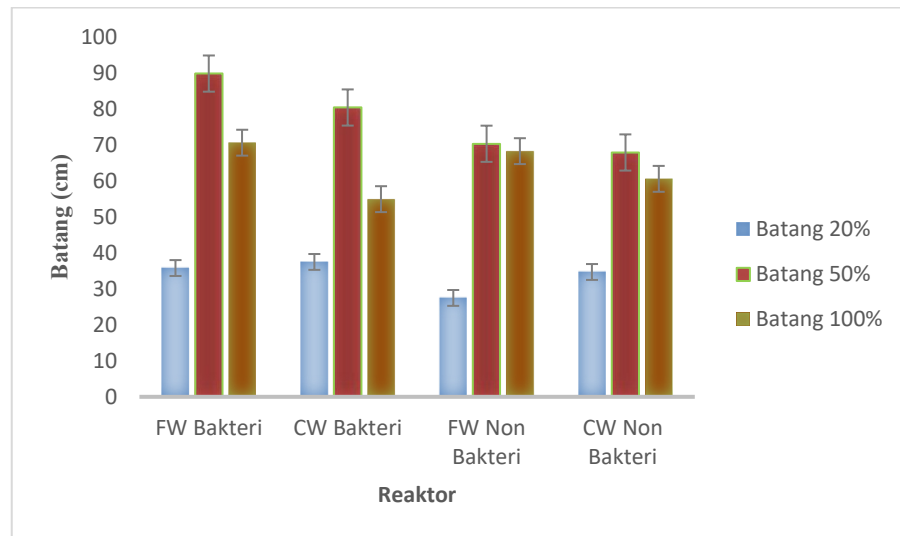
Dengan bantuan aktivitas mikroorganisme pelarut fosfat, juga dikenal sebagai bakteri yang menguraikan fosfat, bakteri CW menghasilkan hasil yang lebih baik. Bakteri ini meningkatkan *bioavailabilitas* fosfat untuk diserap tanaman atau diendapkan dalam substrat (Khan et al., 2009).

Grafik menunjukkan bahwa kedua sistem bekerja paling baik pada awal waktu kontak, mendukung teori bahwa sistem *wetland* bekerja paling baik saat media dan tanaman belum mengalami kejenuhan. Sementara CW bakteri tetap tinggi (95.2%–99.9%), CW non-bakteri mulai berubah (terendah 92.6% pada hari ke-14). Hal ini menunjukkan bahwa saat beban fosfat meningkat, fungsi alami *wetland* yaitu tanaman dan media mulai membutuhkan bantuan tambahan, dalam hal ini bakteri. Sementara tanaman *Typha* tetap berfungsi sebagai agen fitoremediasi utama, bakteri mempercepat transformasi fosfat organik menjadi ortofosfat. *Typha* tidak hanya menyerap tetapi juga menyediakan rhizosfer (Wu et al., 2014). Ketika beban meningkat, *wetland* tanpa dukungan mikroba cenderung mengalami penurunan efisiensi yang lebih cepat, seperti yang ditunjukkan oleh CW non-bakteri.

Sistem mengalami tekanan tinggi pada konsentrasi lindi 100%. CW bakteri masih mencatat efisiensi 77.2%–94.7%, sedangkan CW non-bakteri menurun signifikan menjadi 72.5%–82.1%. Ini menunjukkan bahwa kombinasi tanaman + mikroorganisme jauh lebih kuat daripada sistem yang hanya bergantung pada tanaman dan media. Kondisi ini menunjukkan bahwa *Typha angustifolia* tetap aktif dalam menyerap nutrisi, tetapi ketika konsentrasi polutan tinggi, fungsinya sebagai "pengolah tunggal" menjadi terbatas. Kemungkinan stres fisiologis pada tanaman dan kerusakan media adsorben juga dapat menyebabkan penurunan efisiensi (Brix, 1997; Zhang et al., 2014). Gambar menunjukkan penurunan efisiensi pada sistem non-bakteri.

4.7 Perubahan Tinggi Tanaman Pada Variasi Konsentrasi Lindi

Dengan melihat tinggi batang tanaman *Typha angustifolia*, variasi konsentrasi lindi dan sistem *wetland* yang berbeda menunjukkan perbedaan pertumbuhan. Salah satu indikator yang dapat menunjukkan kondisi fisiologis tanaman adalah tinggi batangnya, terutama dalam hal kemampuan tanaman untuk menyerap dan memanfaatkan nutrisi dari media air limbah. Perubahan tinggi tanaman dapat dilihat pada grafik berikut:



Gambar 4. 11 Grafik Perubahan Tinggi Tanaman

Hasil pengamatan tinggi tanaman dalam penelitian ini memperlihatkan adanya variasi pertumbuhan yang dipengaruhi oleh konsentrasi lindi, keberadaan bakteri, serta perbedaan sistem CW dan FW. Pada konsentrasi 20%, rata-rata tinggi tanaman masih rendah, misalnya CW Bakteri hanya mencapai 37,5 cm dan FW Non Bakteri 27,5 cm. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada tahap awal, nutrisi terutama fosfat masih terbatas sehingga belum mampu mendorong pertumbuhan yang optimal. Fosfat diketahui berperan penting dalam pembentukan energi (ATP), asam nukleat, dan struktur sel tanaman, sehingga kekurangan fosfat dapat menyebabkan pertumbuhan batang lebih lambat serta daun tampak kusam (Salisbury & Ross, 1992).

Pada konsentrasi 50%, terjadi peningkatan tinggi batang yang signifikan. Tanaman pada FW Bakteri mencapai 89,8 cm dan CW Bakteri 80,4 cm, menunjukkan kondisi nutrisi berada pada kisaran yang mendukung pertumbuhan optimal. Hal ini sejalan dengan peran bakteri fosfatolitik yang membantu mempercepat pelarutan fosfat organik menjadi ortofosfat yang mudah diserap tanaman (Yadav et al., 2018). Selain fosfat, unsur hara makro lain seperti nitrogen dan kalium yang terdapat dalam lindi juga mendukung perkembangan jaringan tanaman. Nitrogen berfungsi dalam pembentukan daun, fosfat mendorong pertumbuhan batang dan akar, sementara kalium

berperan penting dalam regulasi air dan perlindungan terhadap stres lingkungan (Sánchez-Rodríguez et al., 2011).

Namun, pada konsentrasi 100% terlihat adanya penurunan tinggi tanaman. CW Bakteri hanya mencapai 54,9 cm dan CW Non Bakteri 60,6 cm, sementara FW Bakteri dan FW Non Bakteri masing-masing 70,6 cm dan 68,3 cm. Meski masih lebih tinggi dari CW, pertumbuhan ini tetap menurun dibandingkan konsentrasi 50%. Kondisi ini menunjukkan gejala stres fisiologis, seperti batang yang tidak tegak dan ujung daun yang menguning. Stres tersebut diduga akibat tingginya beban polutan yang terkandung dalam lindi, termasuk amonia, senyawa organik, logam berat, dan kelebihan fosfat. Kelebihan fosfat justru dapat menghambat penyerapan unsur mikro seperti Fe dan Zn yang dibutuhkan untuk sintesis klorofil, sehingga daun menguning dan pertumbuhan menurun (Mengel & Kirkby, 2001).

Fenomena ini sejalan dengan hasil penelitian Rifa Intan (2022) yang menggunakan sistem CW dengan tanaman *Typha angustifolia* pada pengolahan lindi. Dalam penelitiannya, pertumbuhan *Typha angustifolia* juga sangat dipengaruhi oleh konsentrasi nutrisi dalam lindi. Rifa Intan mencatat bahwa tanaman menunjukkan pertumbuhan yang baik pada konsentrasi nutrisi sedang, namun pertumbuhan melambat ketika beban pencemar tinggi karena terjadi akumulasi senyawa toksik yang menekan fisiologi tanaman. Temuan dalam penelitian ini memperluas hasil tersebut dengan menunjukkan bahwa sistem CW lebih rentan terhadap stres dibanding FW. Hal ini diduga terkait dengan kondisi substrat CW yang cenderung anaerob sehingga membatasi difusi oksigen ke zona akar (Brix, 1997). Sebaliknya, pada FW akar tanaman menggantung bebas di air sehingga lebih terbuka dan teroksigenasi, yang mendukung penyerapan nutrisi secara lebih efisien (Zhang et al., 2014).

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengonfirmasi hasil Rifa Intan (2022) terkait pengaruh nutrisi terhadap pertumbuhan *Typha angustifolia*, tetapi juga menambahkan perspektif baru bahwa kombinasi sistem CW/FW dan penambahan bakteri dapat memengaruhi tinggi tanaman.

CW tanpa bakteri menunjukkan pertumbuhan yang lebih tertekan dibanding CW dengan bakteri, sedangkan FW dengan bakteri menunjukkan pertumbuhan terbaik. Hal ini menegaskan pentingnya peran bakteri dalam membantu ketersediaan nutrisi sekaligus menunjukkan bahwa sistem FW lebih adaptif terhadap kondisi limbah dengan beban pencemar tinggi.



Gambar 4. 12 Tanaman pada Konsentrasi 20%



Gambar 4. 13 Tanaman Pada Konsentrasi 50%



Gambar 4. 14 Tanaman Pada Konsentrasi 100%

BAB V

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem Constructed Wetland (CW) dengan *Typha angustifolia* efektif menurunkan kadar fosfat pada air lindi, terutama dengan penambahan bakteri fosfatolitik (*Bacillus cereus*, *B. velezensis*, *Staphylococcus sp.*, dan PGPR). Pada konsentrasi 50%, kadar fosfat turun dari 3,69 mg/L menjadi 0,005 mg/L (efisiensi 99,86%) pada CW dengan bakteri, sedangkan tanpa bakteri hanya menurun hingga 1,195 mg/L (67,6%). Pada konsentrasi 100%, kadar fosfat berkurang dari 18,12 mg/L menjadi 1,023 mg/L (94,36%) dengan bakteri, lebih tinggi dibandingkan CW non-bakteri yang hanya mencapai 3,249 mg/L (82,06%). Dengan demikian, kombinasi tanaman dan bakteri terbukti lebih efektif dibandingkan penggunaan tanaman saja, serta berpotensi diaplikasikan sebagai teknologi pengolahan limbah lindi yang ramah lingkungan dan berbiaya rendah.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian terdapat beberapa saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya:

1. Diperlukan pengujian dengan waktu retensi yang lebih panjang untuk menilai stabilitas dan efektivitas sistem dalam jangka waktu yang lebih lama. Selain itu, kombinasi jenis tanaman air lain yang lebih tahan terhadap limbah dengan beban pencemar tinggi juga patut dieksplorasi, serta pemanfaatan lebih lanjut jenis bakteri lokal yang potensial untuk meningkatkan efisiensi fitoremediasi.
2. Diperlukan pengujian lebih lanjut terkait fosfat yang terakumulasi pada jaringan tanaman (terutama batang) dan media tanah. Oleh karena itu, diperlukan studi lanjutan yang mengevaluasi distribusi fosfat dalam sistem untuk memahami mekanisme penyerapan secara menyeluruh.

DAFTAR PUTAKA

- Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2007). Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 29(2), 173–191.
- Al, M. (2011). *Rembesan air lindi (leachate): Dampak pada tanaman pangan dan kesehatan*. Surabaya: UPN Press.
- Alufasi, M., Zhou, Y., & Mupfiga, P. (2024). Performance of a Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland Planted with *Typha latifolia* in Treating Domestic Wastewater in Zimbabwe. *Water*, 16(19), 2843.
- Anwar, F., & Yulianto, D. (2021). Pengolahan Air Lindi Menggunakan Metode Constructed Wetland di TPA Sampah Tanjungrejo, Kabupaten Kudus. *Jurnal Kebumihan*, 11(2), 45–56.
- Aris, A., Abdullah, M. J., & Prabowo, A. (2015). Pengaruh Penambahan Karbon Aktif Terhadap Proses Nitrifikasi Dan Denitrifikasi Pada Reaktor Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR). *Jurnal Teknik ITS*, 4(2), A246–A250.
- Astuti, I. D. (2019). *Pengaruh Variasi Konsentrasi Lindi Terhadap Efektivitas Fitoremediasi Tanaman Ekor Kuda (Equisetum debile Roxb)*. Skripsi. UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
- Azza, M. S. (2013). *Kombinasi Fitoremediasi dan Bioremediasi Untuk Mengurangi Kandungan Logam Berat Pada Air Lindi*. Skripsi. Universitas Indonesia.
- Brix, H. (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Science and Technology*, 35(5), 11–17.
- Budianto, E. (2010). *Kimia Lingkungan*. Jakarta: Rineka Cipta.
- Chairil Saleh, H. P. (2014). *Analisis Efektifitas Instalasi Pengolahan Limbah Lindi Di TPA Supit Kota Malang*. Malang: Universitas Muhammadiyah Malang.
- Chen, Y., Liu, J., & Wu, W. (2009). Study on phosphorus removal from wastewater by sediment-plant system. *Ecological Engineering*, 35(10), 1467–1474.

- Darmawan, A. (2016). *Pengaruh Variasi Konsentrasi Lindi Terhadap Efektivitas Fitoremediasi Menggunakan Tanaman Kangkung Air (Ipomoea Aquatica Forsk)*. Skripsi. UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
- Hartini, S., & Prasetyo, A. (2020). Potensi Tanaman Cattail (*Typha angustifolia*) dalam Pengolahan Limbah Air Lindi. *Jurnal Teknik Lingkungan ITN Malang*, 18(1), 67–79.
- He, H., Duan, Z., Wang, Z., & Yue, B. (2017). Treatment of leachate through constructed wetlands using *Typha angustifolia* in combination with catalytic ozonation on Fe-zeolite A. *Environmental Science and Pollution Research*.
- Hidayat, T., et al. (2022). Efektivitas fitoremediasi dalam pengolahan air limbah menggunakan kombinasi tanaman air dan mikroorganisme. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 23(1), 45–60.
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands*.
- Keizer-Vlek, H. E., Verdonshot, P. F. M., Verdonshot, R. C. M., & Dekkers, D. (2014). The contribution of plant uptake to nutrient removal by floating treatment wetlands. *Ecological Engineering*, 73, 684–690.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2016). *Peraturan Menteri LHK Nomor P.68/Menlhk-Setjen/2016 Tentang Baku Mutu Air Limbah*.
- Kjeldsen, P., et al. (2002). Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32(4), 297–336.
- Mahindrakar, A. B., Joshi, P., & Kalburgi, P. B. (2016). Performance of Constructed Wetland for Domestic Wastewater Treatment using *Typha latifolia*. *International Journal of ChemTech Research*, 9(11), 87–95.
- Meutia, D., & Yulianti, R. (2012). Kajian Pengolahan Air Lindi Dengan Menggunakan Wetland Buatan. *Jurnal Teknik ITS*, 1(1), A111–A114.
- Nugroho, R., Sari, M., & Wulandari, P. (2022). Penurunan TSS, COD, dan Total-Nitrogen pada Air Lindi dengan Metode Constructed Wetland Tanaman *Typha angustifolia*. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 14(3), 112–125.

- Nurhasanah, N. (2016). *Efektivitas Fitoremediasi Dengan Tanaman Eceng Gondok (Eichhornia crassipes) Terhadap Air Limbah Batik*. Skripsi. UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
- Pemerintah RI. (2021). *Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*.
- Rahmawati, I., et al. (2021). Dampak air lindi terhadap kualitas air tanah di sekitar TPA. *Jurnal Ilmu Lingkungan*.
- Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*.
- Sembiring, E. T. J., & Muntalif, B. S. (2017). Optimasi Efisiensi Pengolahan Lindi dengan Variasi Jenis Vegetasi dan Waktu Detensi dalam Sistem Subsurface Flow Constructed Wetland. *Jurnal Teknik Lingkungan ITB*, 23(1), 88–102.
- Setiawan, H., & Lestari, R. (2021). Pengolahan Air Lindi TPA Jabon Griya Mulyo Sidoarjo dengan Metode Constructed Wetland untuk Menyisihkan Parameter COD. *Jurnal Sains dan Energi*, 5(2), 33–44.
- Setiawan, Y. (2015). *Dasar-Dasar Teknologi Pengolahan Limbah*. Bandung: Alfabeta.
- Sial, T. A., Teewno, A. M., Memon, S. A., Mahar, R. B., & Korai, M. S. (2023). Municipal Solid Waste Landfill Leachate Treatment by *Phragmites australis*, *Typha latifolia* and *Scirpus validus* through Constructed Wetlands. *Journal of Ecological Engineering*, 24(6), 303–314.
- Siregar, F. R. (2008). *Pencemaran dan Pemantauan Kualitas Air*. Jakarta: Bumi Aksara.
- Sonavane, V. P., Joshi, P., & Mahindrakar, A. B. (2016). Potential of *Typha latifolia* for Phosphorous Removal in Batch Constructed Wetland. *ResearchGate*.
- Susanti, R. D., & Widyastuti, R. (2017). Fitoremediasi Air Limbah Menggunakan Tanaman *Typha angustifolia*. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 6(2), 101–107.

- Tanner, C. C. (2001). Plants as ecosystem engineers in subsurface-flow treatment wetlands. *Water Science and Technology*, 44(11–12), 9–17.
- Vymazal, J. (2011). *Constructed wetlands for wastewater treatment*.
- Widyarini, I., Kurniawan, A., & Yuniarti, Y. (2021). Studi Potensi Tanaman Typha angustifolia Sebagai Agen Fitoremediasi Air Limbah Lindi. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 10(2), 57–64.
- Wu, S., Wallace, S., Brix, H., et al. (2014). Treatment of industrial wastewater by constructed wetlands: A review. *Ecological Engineering*, 64, 25–35.
- Zhang, D. Q., et al. (2014). Application of constructed wetlands for wastewater treatment in developing countries – A review. *Journal of Environmental Management*, 141, 116–131.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil Perhitungan Pengujian Fosfat 20 % (Hari 0)

Pengujian 1 (21 April)						
Sampel	Duplo	Absorbansi (A)	C (mg/L)	f	Kadar PO4	AVG
Bak Penampung	1	0.09	0.1452	20	2.905	2.90486
Anaerob-Aerob	1	0.055	0.0819	20	1.638	1.63820
Clarifier	1	0.065	0.1000	20	2.000	2.00010
FW Bakteri	1	0.02	0.0186	1	0.019	0.01858
CW Bakteri	1	0.013	0.0059	1	0.006	0.00591
FW Non Bakteri	1	0.033	0.0421	1	0.042	0.04210
CW Non Bakteri	1	0.017	0.0131	1	0.013	0.01315

Lampiran 2 Hasil Perhitungan Pengujian Fosfat 50% (Hari 7)

Pengujian 1 (7 Mei)							
Sampel	Duplo	Absorbansi (A)	C (mg/L)	f	Kadar PO4	SE	AVG
Bak Penampung	1	0.056	0.0837	5	4.186	0.00	3.6
	2	0.045	0.0638	0	3.191	55	88
Anaerob-Aerob	1	0.036	0.0475	5	2.376	0.00	2.3
	2	0.035	0.0457	0	2.286	05	31
Clarifier	1	0.016	0.0113	5	0.567	0.00	0.6
	2	0.018	0.0150	0	0.748	1	57
FW Bakteri	1	0.015	0.0095	2	0.191	0.00	0.3
	2	0.023	0.0240	0	0.480	4	35
CW Bakteri	1	0.014	0.0077	2	0.154	0.00	0.0
	2	0.01	0.0005	0	0.010	2	82
FW Non Bakteri	1	0.020	0.0186	2	0.372	0.00	0.5
	2	0.03	0.0367	0	0.733	5	52
CW Non Bakteri	1	0.011	0.0023	2	0.046	0.00	0.2
	2	0.02	0.0186	0	0.372	5	09

Lampiran 3 Hasil Pengujian Fosfat 50 % (Hari 14)

Pengujian 2 (16 Mei)							
Sampel	Duplo	Absorbansi (A)	C (mg/L)	f	Kadar PO4	SE	AVG
Bak Penampung	1	0.092	0.1489	5	7.443	0.001	7.307
	2	0.089	0.1434	0	7.172		
Anaerob-Aerob	1	0.056	0.0837	5	4.186	0.001	4.050
	2	0.053	0.0783	0	3.915		
Clarifier	1	0.043	0.0602	2	1.505	0.001	1.437
	2	0.04	0.0548	5	1.369		
FW Bakteri	1	0.033	0.0421	1	0.421	0.001	0.394
	2	0.03	0.0367	0	0.367		
CW Bakteri	1	0.028	0.0331	1	0.331	0.001	0.358
	2	0.031	0.0385	0	0.385		
FW Non Bakteri	1	0.040	0.0548	1	0.548	0.001	0.530
	2	0.038	0.0511	0	0.511		
CW Non Bakteri	1	0.039	0.0530	1	0.530	0.000	0.539
	2	0.04	0.0548	0	0.548		

Lampiran 4 Hasil Pengujian Fosfat 50% (Hari 21)

Pengujian 3 (22 Mei)							
Sampel	Duplo	Absorbansi (A)	C (mg/L)	f	Kadar PO4	SE	AVG
Bak Penampung	1	0.075	0.1181	5	5.905	0.000	5.950
	2	0.076	0.1199	0	5.995		
Anaerob-Aerob	1	0.059	0.0891	5	4.457	0.001	4.367
	2	0.057	0.0855	0	4.276		
Clarifier	1	0.039	0.0530	2	1.324	0.003	1.460
	2	0.045	0.0638	5	1.595		
FW Bakteri	1	0.02	0.0186	1	0.186	0.002	0.222
	2	0.024	0.0258	0	0.258		
CW Bakteri	1	0.01	0.0005	1	0.005	0.004	0.086
	2	0.019	0.0168	0	0.168		
FW Non Bakteri	1	0.030	0.0367	1	0.367	0.000	0.376
	2	0.031	0.0385	0	0.385		
CW Non Bakteri	1	0.022	0.0222	1	0.222	0.003	0.285
	2	0.029	0.0349	0	0.349		

Lampiran 5 Hasil Pengujian 50% (Hari 28)

Pengujian 4 (28 Mei)							
Sampel	Duplo	Absorbansi (A)	C (mg/L)	f	Kadar PO4	SE	AVG
Bak Penampung	1	0.055	0.0819	5	4.095	0.001	4.186
	2	0.057	0.0855	0	4.276		
Anaerob-Aerob	1	0.037	0.0493	5	2.467	0.002	2.648
	2	0.041	0.0566	0	2.829		
Clarifier	1	0.023	0.0240	2	0.600	0.0025	0.713
	2	0.028	0.0331	5	0.826		
FW Bakteri	1	0.019	0.0168	1	0.168	0.0005	0.177
	2	0.02	0.0186	0	0.186		
CW Bakteri	1	0.01	0.0005	1	0.005	0	0.005
	2	0.01	0.0005	0	0.005		
FW Non Bakteri	1	0.029	0.0349	1	0.349	0.0005	0.340
	2	0.028	0.0331	0	0.331		
CW Non Bakteri	1	0.02	0.0186	1	0.186	0.0005	0.195
	2	0.021	0.0204	0	0.204		

Lampiran 6 Hasil Pengujian Fosfat Trial 100% (Hari 35)

Pengujian Trial (4 juni)				
Sampel	Absorbansi (A)	C (mg/L)	f	Kadar PO4
Bak Penampung	0.112	0.1851	50	9.253
Anaerob-Aerob	0.096	0.1561	50	7.805
Clarifier	0.07	0.1091	50	5.453
FW Bakteri	0.088	0.1416	20	2.832
CW Bakteri	0.068	0.1054	20	2.109
FW Non Bakteri	0.182	0.3117	20	6.234
CW Non Bakteri	0.08	0.1271	20	2.543

Lampiran 7 Hasil Pengujian Fosfat 100% (Hari 42)

Pengujian 1 (13 juni)							
Sampel	Duplo	Absorbansi (A)	C (mg/L)	f	Kadar PO4	SE	AVG
Bak Penampung	1	0.219	0.3787	5	18.934	0.004	18.572
	2	0.211	0.3642	0	18.210		
Anaerob-Aerob	1	0.098	0.1597	5	7.986	0.001	7.895
	2	0.096	0.1561	0	7.805		
Clarifier	1	0.063	0.0964	5	4.819	0.0045	4.412
	2	0.054	0.0801	0	4.005		
FW Bakteri	1	0.031	0.0385	2	0.770	0.0015	0.715
	2	0.028	0.0331	0	0.661		
CW Bakteri	1	0.016	0.0113	2	0.227	0.0015	0.172
	2	0.013	0.0059	0	0.118		
FW Non Bakteri	1	0.045	0.0638	2	1.276	0.003	1.168
	2	0.039	0.0530	0	1.059		
CW Non Bakteri	1	0.03	0.0367	2	0.733	0.0000	0.733
	2	0.03	0.0367	0	0.733		

Lampiran 8 Hasil Pengujian Fosfat Hari 100% (Hari 49)

Pengujian 2 (juni)							
Sampel	Duplo	Absorbansi (A)	C (mg/L)	f	Kadar PO4	SE	AVG
Bak Penampung	1	0.189	0.3244	5	16.219	0.04	12.600
	2	0.109	0.1796	0	8.981		
Anaerob-Aerob	1	0.101	0.1651	5	8.257	0.001	8.167
	2	0.099	0.1615	0	8.076		
Clarifier	1	0.066	0.1018	5	5.091	0.004	4.729
	2	0.058	0.0873	0	4.367		
FW Bakteri	1	0.035	0.0457	2	0.914	0.0015	0.860
	2	0.032	0.0403	0	0.806		
CW Bakteri	1	0.018	0.0150	2	0.299	0.001	0.263
	2	0.016	0.0113	0	0.227		
FW Non Bakteri	1	0.049	0.0711	2	1.421	0.0035	1.294
	2	0.042	0.0584	0	1.168		
CW Non Bakteri	1	0.031	0.0385	2	0.770	0.0000	0.770
	2	0.031	0.0385	0	0.770		

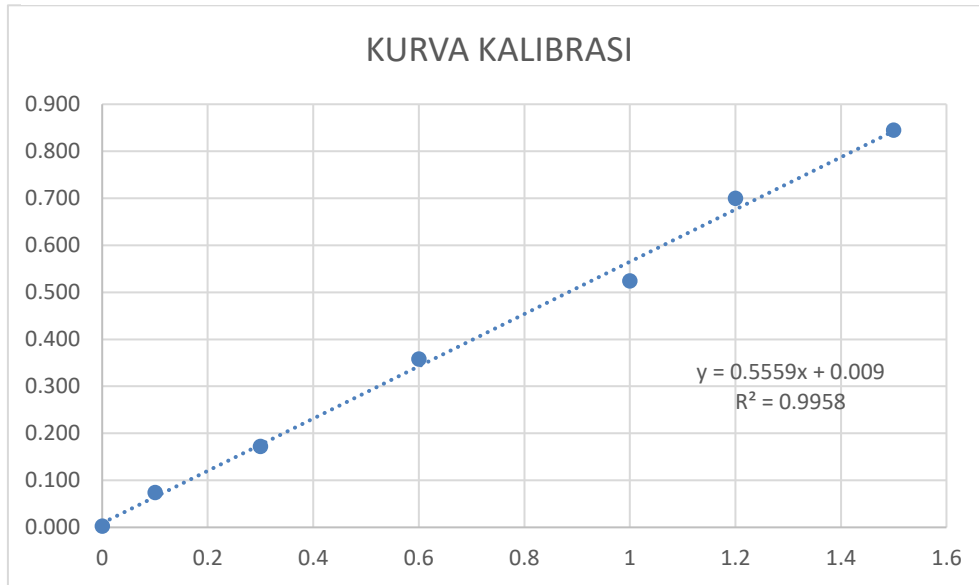
Lampiran 9 Hasil Pengujian Fosfat 100% (Hari 56)

Pengujian 3 (25 juni)							
Sampel	Duplo	Absorbansi (A)	C (mg/L)	f	Kadar PO4	SE	AV G
Bak Penampung	1	0.18	0.3081	5	15.405	0.04	11.786
	2	0.1	0.1633	0	8.167		
Anaerob-Aerob	1	0.097	0.1579	5	7.895	0.0085	7.126
	2	0.08	0.1271	0	6.357		
Clarifier	1	0.063	0.0964	5	4.819	0.0035	4.503
	2	0.056	0.0837	0	4.186		
FW Bakteri	1	0.033	0.0421	2	0.842	0.005	1.023
	2	0.043	0.0602	0	1.204		
CW Bakteri	1	0.015	0.0095	2	0.191	0.0025	0.281
	2	0.02	0.0186	0	0.372		
FW Non Bakteri	1	0.047	0.0674	2	1.349	0.003	1.240
	2	0.041	0.0566	0	1.132		
CW Non Bakteri	1	0.023	0.0240	2	0.480	0.0050	0.661
	2	0.033	0.0421	0	0.842		

Lampiran 10 Hasil Pengujian Fosfat 100% (Hari 63)



Pengujian 4 (3 Juli)							
Sampel	Duplo	Absorbansi (A)	C (mg/L)	f	Kadar PO4	SE	AV G
Bak Penampung	1	0.235	0.4076	5	20.381	0.025	18.119
	2	0.185	0.3171	0	15.857		
Anaerob-Aerob	1	0.16	0.2719	5	13.595	0.0025	13.822
	2	0.165	0.2810	0	14.048		
Clarifier	1	0.152	0.2574	5	12.872	0.027	10.429
	2	0.098	0.1597	0	7.986		
FW Bakteri	1	0.095	0.1543	2	3.857	0.002	3.767
	2	0.091	0.1471	5	3.676		
CW Bakteri	1	0.035	0.0457	2	0.914	0.0015	0.969
	2	0.038	0.0511	0	1.023		
FW Non Bakteri	1	0.145	0.2448	2	4.895	0.002	4.823
	2	0.141	0.2375	0	4.751		
CW Non Bakteri	1	0.099	0.1615	2	3.231	0.0005	3.249
	2	0.1	0.1633	0	3.267		

Lampiran 11 Kurva Kalibrasi



Lampiran 12 Rangkaian Reaktor



<p>Clarifier</p> 	<p>Wetland</p> 
--	---

Lampiran 13 Dokumentasi

<p>Pengecekan Akar Sebelum Running</p> 	<p>Pemasangan Reaktor</p> 
<p>Pembuatan Reaktor</p> 	<p>Pengambilan Sampel Lindi</p> 
<p>Injeksi Bakteri Ke Tanaman</p>	<p>Pengukuran Tinggi Tanaman</p>



Sampling

Pengujian



RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Diana Intan Permana, lahir di Lamandau, Kalimantan Tengah, pada tanggal 26 Juli 2002. Penulis merupakan anak keempat dari pasangan Bapak Warsito dan Ibu Sri Harnani. Riwayat pendidikan formal penulis adalah TK Pancha Dharma (2007–2009), SD Negeri Perigi (2009–2015), SMP Negeri 6 Mentohi Raya (2015–2018), SMA Negeri 1 Mentohi Raya (2018–2021), dan Universitas Islam Indonesia, Program Studi Teknik Lingkungan (2021 sekarang)

akademik, seperti mengikuti program sosial Dusun Binaan sebagai staf sosial, serta berpartisipasi dalam berbagai kepanitiaan di tingkat fakultas. Penulis juga pernah bergabung dalam organisasi kemahasiswaan Lembaga Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan.