TA/TL/2025/2040

JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

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

Anisa Utami
21513111

Dosen Pembimbing:
Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng.
Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D.

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

DEPARTMENT
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

BACHELOR THESIS

Combination of Biological Treatment and Phytoremediation in Degrading Metal Content in Leachate Wastewater

Anisa Utami
21513111

Supervisor:
Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng.
Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D.

Environmental Engineering Bachelor Program
Faculty of Civil Engineering and Planning
Universitas Islam Indonesia
2025

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

Kombinasi Pengolahan Biologis dan Fitoremediasi dalam Mendegradasi Kandungan Logam 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.

Anisa Utami

21513111

Tugas akhir ini telah diuji pada tanggal 12 September 2025 dan disetujui oleh:

19/9/25

Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng. (Pembimbing 1)

18/9/'25

Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D. (Pembimbing 2)

17/09-2025

Dr.Eng. Ir. Awaluddin Nurmiyanto, S.T., M.Eng. (Penguji)

Mengetahui,
Ketua Prodi Teknik Lingkungan Program Sarjana

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN

19/9-25

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

Dipindai dengan CamScanner

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, 11 September 2025

Yang membuat pernyataan,



Anisa Utami

21513111

PRAKATA

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Segala puji dan syukur penulis haturkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, petunjuk, serta karunia dan ridho-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul "**Kombinasi Pengolahan Biologis dan Fitoremediasi dalam Mendegradasi Kandungan Logam pada Air Limbah Lindi**."

Laporan Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi syarat akademis gelar sarjana teknik mahasiswa S1 Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada seluruh pihak yang telah mendukung serta membantu dalam penyusunan Tugas Akhir baik dalam bentuk dukungan moral maupun materi. Dengan ini saya mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT yang selalu memberikan banyak kenikmatan di dunia, kesehatan, kelancaran dan kemudahan sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini.
2. Ibu Any Juliani, S.T., M.Sc. (Res.Eng.)., Ph.D. selaku Ketua Program Studi Teknik Lingkungan FTSP UII.
3. Bapak Adam Rus Nugroho, S.T., M.T, Ph.D. selaku Koordinator Tugas Akhir.
4. Bapak Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir yang telah memberikan bimbingan, nasihat serta arahan selama penelitian ini berlangsung.
5. Ibu Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing 2 Tugas Akhir yang juga telah memberikan bimbingan selama penelitian ini berlangsung
6. Bapak Dr.Eng. Ir. Awaluddin Nurmiyanto, S.T., M.Eng., selaku Dosen Penguji Tugas Akhir yang telah memberikan masukan dan saran terkait penelitian ini.

7. Cinta pertama dan pintu surga penulis, Bapak H. Gunawan, S.AB. & Ibu Hj. Erny Yunita, serta Kaka Anas, Kaka Erwan, dan Adik Kiki yang sangat penulis cintai. Terima kasih atas segala doa dan dukungan yang tidak pernah berhenti. Memberikan cinta, kasih sayang, doa, dan pengorbanan yang mengiringi setiap langkah untuk menyelesaikan pendidikan ini. Terima kasih telah mengantarkan penulis sampai di titik ini. Terima kasih sudah berjuang untuk penulis, membesarkan dan mendidik penulis sampai bisa mendapat gelar sarjana ini. Semoga Allah SWT senantiasa menjaga kalian sampai bisa melihat penulis berhasil.
8. Teman-teman seperjuangan bimbingan Tugas Akhir Pak Joni yang sedari awal penelitian membantu dan memberikan semangat kepada penulis.
9. Lia, Afi, Ayong dan Fira, selaku teman-teman penulis yang selalu mendukung, menemani dan memberikan semangat dalam proses perkuliahan.
10. Seseorang yang tak kalah penting kehadirannya, Penulis berterima kasih kepada satu sosok laki-laki yang selama ini juga berjuang tanpa henti dengan impian besarnya, Fathur Rachman. Terimakasih karena sudah mau bertumbuh bersama selama proses perkuliahan ini.
11. Serta seluruh staf dan laboran di Laboratorium Kualitas Lingkungan yang telah memberikan bimbingan serta informasi yang diperlukan, penulis sampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya.
12. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, atas segala bentuk dukungan dan semangat yang telah diberikan kepada penulis.

Penulis berharap laporan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan menambah wawasan bagi para pembaca. Segala bentuk saran dan kritik

sangat diharapkan sebagai masukan yang membangun, baik bagi pengembangan diri penulis maupun penyempurnaan karya ilmiah ini.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Sleman, 11 September 2025

Anisa Utami

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

Mahasiswa : Anisa Utami
NIM : 21513111
Program Studi : Teknik Lingkungan - Program Sarjana
Pembimbing : Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng.

Abstrak

Air lindi yang mengandung logam berat berbahaya seperti Pb, Cd, dan Cr memerlukan pengolahan yang efektif serta ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kombinasi pengolahan biologis dan fitoremediasi dengan tanaman *Typha angustifolia* serta konsorsium bakteri untuk menurunkan kadar logam pada air lindi. Sistem reaktor terdiri atas bak penampung, anaerob, aerob, clarifier, Floating Treatment Wetland (FTW), dan Constructed Wetland (CW), FTW dan CW dibagi dengan dua perlakuan: menggunakan bakteri (*Bacillus cereus, Bacillus velezensis, Staphylococcus xylosus*, dan PGPR) dan tanpa bakteri. Sampel air lindi diambil dari TPA Piyungan dengan tiga konsentrasi yang akan diolah direaktor (20%, 50%, dan 100%) dan sampel air lindi dianalisis kandungan logamnya menggunakan metode AAS. Hasil analisis menunjukkan bahwa unit anaerob mampu menurunkan Pb hingga 86% pada lindi 20%, sedangkan CW tanpa bakteri mencapai 87%. Pada konsentrasi 50%, efisiensi Pb menurun drastis hingga bernilai negatif, menandakan pelepasan logam kembali ke air. Cd memiliki kinerja paling rendah, dengan hasil terbaik pada clarifier dan CW tanpa bakteri pada 20%, namun cenderung negatif pada 50%. Cr menunjukkan penurunan signifikan pada CW pada konsentrasi 100%, dengan akumulasi lebih dari 70 mg/kg pada akar *Typha angustifolia*. Pertumbuhan biomassa juga memperlihatkan dominasi akar dibanding batang, terutama pada CW bakteri dengan berat basah 104,24 g dan kering 20,87 g. Secara umum, kombinasi biologis dan fitoremediasi efektif menurunkan Pb dan Cr, sementara penghilangan Cd masih terbatas, dengan akar dan tanah berperan utama sebagai media akumulasi logam.

Kata kunci: Air lindi, Bioremediasi, Fitoremediasi, Logam berat, Typha angustifolia

Combination of Biological Treatment and Phytoremediation in Degrading Metal Content in Leachate Wastewater

Student : Anisa Utami
Student Number : 21513111
Study Program : Environmental Engineering – Bachelor Program
Supervisor : Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng.

Abstract

Leachate containing hazardous heavy metals such as Pb, Cd, and Cr requires effective and environmentally friendly treatment. This study aimed to evaluate the combination of biological treatment and phytoremediation using Typha angustifolia and a bacterial consortium to reduce heavy metal concentrations in landfill leachate. The reactor system consisted of a holding tank, anaerobic reactor, aerobic reactor, clarifier, Floating Treatment Wetland (FTW), and Constructed Wetland (CW). FTW and CW were divided into two treatments: with bacteria (Bacillus cereus, Bacillus velezensis, Staphylococcus xylosus, and PGPR) and without bacteria. Leachate samples were collected from Piyungan Landfill at three concentrations (20%, 50%, and 100%) and analyzed for metal content using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). The results indicated that the anaerobic unit reduced Pb by up to 86% at 20% leachate concentration, while CW without bacteria achieved 87%. At 50%, Pb removal efficiency decreased drastically, even showing negative values, indicating the release of metals back into the water. Cd exhibited the lowest performance, with the best results observed in the clarifier and CW without bacteria at 20%, but generally negative at 50%. Cr showed significant reduction in CW at 100%, with more than 70 mg/kg accumulated in the roots of Typha angustifolia. Biomass analysis revealed root growth dominance over shoots, particularly in CW with bacteria, where root fresh weight reached 104.24 g and dry weight 20.87 g. Overall, the combined biological–phytoremediation system effectively reduced Pb and Cr, while Cd removal remained limited, with roots and soil serving as the primary media for heavy metal accumulation.

Key words: Bioremediation, Heavy metals, Leachate, Phytoremediation, Typha angustifolia

DAFTAR ISI

PRAKATA		i
Abstrak		iv
DAFTAR ISI		vi
DAFTAR TABEL		viii
DAFTAR GAMBAR		ix
DAFTAR LAMPIRAN		x
BAB I PENDAHULUAN		1
1.1	Latar Belakang	1
1.2	Perumusan Masalah	3
1.3	Tujuan Penelitian	3
1.4	Manfaat Penelitian	4
1.5	Ruang Lingkup	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA		5
2.1	Air Lindi	5
2.2	Logam	6
2.3	Bioremediasi	6
2.4	Fitoremediasi	8
2.5	Typha angustifolia	8
2.6	*Floating Treatment Wetlands*	8
2.7	*Constructed Wetlands*	9
2.8	Penelitian Sebelumnya	10
BAB III METODE PENELITIAN		13
3.1	Waktu & Lokasi	13
3.2	Alur Penelitian	13
3.3	Alat dan Bahan	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		29
4.1	Karakteristik Air Lindi	29
4.2	Efektivitas Pengolahan Logam Berat dalam Air Lindi	30
4.2.1	Analisis Logam Timbal (Pb) dalam Air Lindi	31

4.2.2 Analisis Logam Kadmium (Cd) dalam Air Lindi 34
4.2.3 Analisis Logam Kromium (Cr) dalam Air Lindi 36
4.3 Efisiensi *Removal* (%) Logam Berat Pada Proses Pengolahan 39
4.4 Pengujian Konsentrasi Logam (Pb, Cd, Cr) Pada Tanaman 43
4.5 Biomassa Pada Tanaman *Typha angustifolia* 45
4.6 Kondisi Pertumbuhan & Kematian Tanaman *Typha angustifolia* 47
4.7 Pengujian Konsentrasi Logam Pada Tanah di Awal & Akhir 52
4.8 Derajat Keasaman (pH) Air 53
BAB V PENUTUP 57
5.1 Kesimpulan 57
5.2 Saran 57
DAFTAR PUSTAKA 59
LAMPIRAN 63
RIWAYAT HIDUP 1

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Konsentrasi Pada Bak Penampung 30
Tabel 4. 2 Hasil Uji Lindi TPA Piyungan..... 30
Tabel 4. 3 Efisiensi *Removal* (%) 39
Tabel 4. 4 Biomassa Pada Tanaman 45
Tabel 4. 5 Tingkat Kematian Tanaman *Typha angustifolia* 50

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Lokasi 13
Gambar 3. 2 Alur Penelitian 14
Gambar 3. 3 Desain Reaktor 15
Gambar 3. 4 Gambar Bak Penampung – Aerobik 16
Gambar 3. 5 Gambar Clarifier - CW 16
Gambar 3. 6 Tahapan Kulturisasi Bakteri 20
Gambar 3. 7 Proses *Centrifuge* Bakteri 21
Gambar 3. 8 Proses Penggantian Larutan NaCl 21
Gambar 3. 9 Desain Reaktor FTW 22
Gambar 3. 10 Desain Reaktor CW 23
Gambar 3. 11 Alur Pengujian Sampel Air Logam 26

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Alat dan Bahan 63
Lampiran 2 Dokumentasi..... 64
Lampiran 3 Konsentrasi Logam Pada Air 65
Lampiran 4 Rata- rata Tinggi Tanaman & Panjang Akar..... 65
Lampiran 5 Biomassa Tanaman..... 66
Lampiran 6 Konsentrasi Logam Pada Tanah CW (Bakteri dan Non) 66
Lampiran 7 Hasil Pengukuran pH..... 67
Lampiran 8 Data Konsentrasi Logam Pada Tanaman 69

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan penduduk dan kesadaran masyarakat merupakan faktor utama dalam permasalahan sampah yang terjadi di Indonesia. Berdasarkan data dari Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) pada tahun 2024, Indonesia sudah menghasilkan sekitar 25,66 juta ton sampah per tahun. Dari jumlah tersebut 62,3% (sekitar 15 juta ton) berhasil dikelola, sementara 37,7% (sekitar 9,68 juta ton) belum terkelola. Sebagian besar sampah berasal dari sektor rumah tangga, sementara 3,47% diantaranya terdiri dari logam yang berpotensi membahayakan lingkungan dan manusia (SIPSN, 2024). Sehingga dari permasalahan tersebut dapat menimbulkan potensi pencemaran logam berat pada tempat akhir pembuangan sampah yang dapat mencemari air lindi. Air lindi merupakan air limbah yang telah terkontaminasi dan mengandung banyak material terlarut dan terendapkan. Karakteristik dari air lindi tersebut tergantung dari proses yang terjadi dalam *landfill* di setiap kawasan pembuangan akhir sampah. Air lindi merupakan cairan yang terkontaminasi zat kimia dan logam berat yang berbahaya bagi lingkungan (Sari, 2017).

Logam berat sering ditemukan di area penimbunan sampah di tempat pembuangan akhir (TPA). Kandungan logam berat dalam air lindi bervariasi tergantung pada jenis dan karakteristik sampah yang tertimbun. Beberapa logam berat, seperti timbal (Pb) dan kadmium (Cd), yang dalam studi di TPA Pasuruhan, Kabupaten Magelang, ditemukan melebihi baku mutu, khususnya dalam air lindi inlet (0,83 mg/L untuk Pb dan 0,05 mg/L untuk Cd) serta kolam tampung (0,43 mg/L Pb dan 0,04 mg/L Cd). Hal ini menunjukkan bahwa peluruhan sampah menghasilkan kontaminan logam berat yang mampu mencemari air lindi dan berpotensi berdampak buruk terhadap kualitas lingkungan dan kesehatan masyarakat jika tidak dikelola dengan baik (Puspitarini et al., 2023). Selain itu, beberapa jenis logam berat lainnya dapat memicu gangguan sistem saraf, kelainan pada bayi, serta kerusakan sel hati dan ginjal ketika terakumulasi dalam tubuh manusia (Prastitianti & Purwanti, 2024).

Pengolahan air lindi dapat dilakukan dengan berbagai teknologi, mulai dari yang berbiaya tinggi hingga yang lebih ekonomis, seperti pengolahan air lindi menggunakan proses Fenton dimana metode ini melibatkan reaksi antara hidrogen peroksida (H_2O_2) dan ion besi (Fe^{2+}) untuk mengoksidasi zat pencemar organik dalam air lindi. Penelitian yang dilakukan di TPA Jatibarang menunjukkan bahwa teknik ini efektif dalam mengurangi kadar BOD, COD, serta warna dalam air lindi (Rezagama et al., 2017). Pengolahan biologis air lindi dapat dilakukan melalui kombinasi proses anaerob, aerob, dan fitoremediasi yang memiliki peran spesifik terhadap penurunan kandungan logam berat. Pada sistem anaerob, bakteri pereduksi sulfat berperan penting dalam mengendapkan logam, seperti Pb dan Cd, dalam bentuk senyawa sulfida, dengan produksi lumpur relatif rendah meskipun mengandung fraksi logam berbahaya. Selanjutnya, pada proses aerob, logam seperti Fe, Mn, dan Cr(III) dapat dihilangkan melalui mekanisme adsorpsi pada biomassa lumpur aktif dan presipitasi dalam bentuk hidroksida, namun menghasilkan akumulasi lumpur yang lebih banyak sehingga memerlukan pengelolaan lanjutan. Penerapan Fitoremediasi merupakan solusi yang hemat biaya dan ramah lingkungan dalam mengatasi permasalahan pencemaran logam berat pada air lindi, Fitoremediasi merupakan metode yang cukup sederhana berupa kolam penampungan yang didalamnya akan diberikan tanaman sebagai proses percepatan penurunan kandungan pencemar melalui proses *aerobic* dan *anaerobic*.

Beberapa jenis tumbuhan air yang berperan dalam fitoremediasi air lindi meliputi *Azolla pinnata*, yang mampu mengurangi kadar logam berat seperti kadmium (Cd), Purun Tikus *(Eleocharis dulcis*) yang efektif dalam menyerap logam besi (Fe), serta kombinasi *Ludwigia adscendens, Alternanthera sessilis*, dan *Typha angustifolia*, yang dapat menurunkan kadar nitrat, fosfat, dan BOD dalam air lindi (Khinanty & Retnaningdyah, 2017). Pemanfaatan tanaman ini dalam fitoremediasi menjadi metode alami yang efektif untuk mengurangi pencemaran air lindi.

Peran mikroba berfungsi untuk menguraikan bahan organik dan senyawa beracun secara biologis melalui aktivitas mikroorganisme yang dapat memecah kontaminan. Sedangkan fitoremediasi memanfaatkan tanaman yang mampu menyerap, mengakumulasi, dan menurunkan konsentrasi polutan serta logam berat

secara alami dengan biaya operasional yang rendah dan penerapan yang relatif mudah. Kombinasi kedua metode ini memberikan solusi yang lebih efektif dan ramah lingkungan dalam menurunkan parameter pencemar seperti BOD, COD, dan logam berat, sekaligus meningkatkan kualitas air limbah secara menyeluruh.

Kombinasi pengolahan biologis dan fitoremediasi memiliki keunggulan karena kedua proses ini saling melengkapi. Mikroorganisme berperan menguraikan senyawa organik dan menurunkan toksisitas, sehingga menciptakan kondisi yang mendukung tanaman. Selanjutnya, tanaman menyerap dan menstabilkan logam berat melalui mekanisme alami. Sinergi keduanya membuat penurunan kandungan logam pada lindi lebih efektif, ramah lingkungan, berbiaya rendah, dan berpotensi diterapkan secara berkelanjutan.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini yaitu :

1) Bagaimana efektivitas kombinasi *microbial treatment* dan fitoremediasi dalam menurunkan kadar logam berat (Pb, Cd, dan Cr) pada air lindi?
2) Apakah penambahan bakteri dan non-bakteri pada *Floating Treatment Wetland* (FTW) dan *Constructed Wetland* (CW) meningkatkan kinerja degradasi logam?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu :

1. Menganalisis penurunan kadar logam berat Pb, Cd, dan Cr pada setiap tahap pengolahan air lindi, mulai dari reaktor sekunder (Bak Penampung, Anaerob, Aerobik, Clarifier) hingga tahap lanjutan menggunakan sistem *Floating Treatment Wetland* (FTW) dan *Constructed Wetland* (CW).
2. Menganalisis pengaruh penambahan bakteri dan media non-bakteri pada FTW dan CW terhadap efektivitas degradasi logam berat dalam proses pengolahan air lindi.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini bermanfaat agar dapat membantu mengurangi kadar logam pada air lindi, sehingga dapat mencegah pencemaran pada lingkungan dan makhluk hidup, metode fitoremediasi juga merupakan metode yang relatif hemat biaya dibandingkan dengan metode pengolahan air lindi lainnya. Penelitian tentang fitoremediasi ini juga dapat membantu meningkatkan kesadaran masyarakat tentang bahaya yang ditimbulkan dari logam berat dan pentingnya pengelolaan air limbah yang berkelanjutan.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dari penelitian ini adalah :

1) Identifikasi kandungan logam dalam air lindi sebelum dan sesudah perlakuan dengan Typha angustifolia.
2) Jenis tanaman uji yaitu Typha angustifolia.
3) Lokasi pengambilan sampel air lindi yaitu di TPA Piyungan Kabupaten Bantul, Yogyakarta.
4) Pengambilan sampel air lindi menggunakan metode pengambilan sampel atau Grab Sampling
5) Metode pengukuran kandungan logam berat (Pb, Cd, Cr) menggunakan alat Atomic Absorbtion Spectrophotometri (AAS).

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Air Lindi

Air lindi adalah cairan yang terbentuk dari proses dekomposisi bahan organik dalam sampah yang meresap melalui tumpukan limbah, membawa partikel tersuspensi. Cairan ini memiliki kandungan senyawa organik dan anorganik yang tinggi, seperti hidrokarbon, natrium, kalium, sulfat, nitrogen, serta logam berat. Seiring waktu, kandungan tersebut meningkat, menyebabkan komposisi air lindi menjadi lebih kompleks dan sulit untuk diolah. Beberapa faktor yang mempengaruhi komposisi air lindi meliputi curah hujan, jenis sampah, serta kondisi di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) (Khinanty & Retnaningdyah, 2017).

Diperlukan adanya pengolahan air lindi yang bertujuan untuk mengurangi dan mencegah dampak negatif pada lingkungan sekitar. Pencemaran limbah cair (lindi) dari aktivitas di sekitar Tempat Pembuangan Akhir (TPA) dapat berdampak serius terhadap lingkungan perkebunan dan kesehatan masyarakat. Jika kondisi aliran air lindi dibiarkan mengalir ke permukaan tanah dapat menimbulkan efek negatif bagi lingkungan sekitarnya termasuk bagi manusia. Air lindi yang berada di permukaan tanah dapat menimbulkan polusi pada air tanah dan air permukaan, sebagai berikut:

1. Air permukaan yang terpolusi oleh air lindi dengan kandungan zat organik tinggi, pada proses penguraian secara biologis akan menghabiskan kandungan oksigen dalam air dan akhirnya seluruh kehidupan dalam air yang tergantung oleh keberadaan oksigen terlarut akan mati.

2. Air tanah yang terpolusi oleh air lindi dengan konsentrasi tinggi, polutan tersebut akan berada dan tetap ada pada air tanah tersebut dalam jangka waktu yang lama, karena terbatanya oksigen terlarut sehingga sumber air yang berasal dari air tanah tidak sesuai lagi untuk air bersih (Munawar, 2011). Dampak kesehatannya juga sangat mengkhawatirkan, karena kandungan logam berat seperti merkuri dan nikel dalam lindi dapat menyebabkan berbagai penyakit serius seperti tremor, kejang, anemia, gagal ginjal akut, iritasi kulit, dermatitis, diare, kolera, tifoid, hepatitis A, serta gangguan pada gusi. Oleh karena itu, pencemaran lindi merupakan masalah lingkungan yang harus ditangani dengan serius untuk menjaga kesehatan

manusia dan kelestarian lingkungan perkebunan(Terhadap Kualitas Air dan Lingkungan Perkebunan et al., 2024).

Sampai saat ini, segala upaya dilakukan untuk mengontrol polutan air lindi. Terdapat berbagai macam metode untuk mengolah air lindi, mulai dari teknik fisik seperti penyaringan dan pengendapan, metode kimia seperti koagulasi-flokulasi dan oksidasi, hingga teknik biologis seperti penggunaan kolam stabilisasi, reaktor anaerob, atau biofilter. Selain itu, penggunaan teknologi modern seperti filtrasi membran (reverse osmosis) dan elektrokoagulasi juga semakin berkembang untuk meningkatkan efektivitas pengolahan. Pemilihan metode tersebut umumnya disesuaikan dengan sifat air lindi serta kapasitas pengolahan yang diperlukan. Hasilnya pun sangat beragam dan tidak sepenuhnya efektif seratus persen.

2.2 Logam

Logam berat merupakan unsur kimia yang memiliki massa jenis lebih dari 5 g/cm³ dan umumnya bersifat beracun serta berbahaya bagi lingkungan maupun kesehatan manusia. Beberapa contoh logam berat antara lain arsenik (As), timbal (Pb), merkuri (Hg), dan kadmium (Cd). Paparan terhadap logam ini dapat menyebabkan keracunan baik dalam jangka pendek maupun panjang, dengan dampak merugikan pada sistem saraf, ginjal, hati, tulang, pernapasan, reproduksi, peredaran darah, kardiovaskular, serta pencernaan. Efek toksiknya terjadi akibat interaksi logam berat dengan molekul penting dalam sel, yang mengganggu struktur dan fungsi sel pada organ yang terkena dampak (Endrinaldi, 2009).

Beberapa logam diperlukan oleh organisme dalam jumlah tertentu, tetapi jika kadarnya berlebihan, dapat bersifat toksik. Oleh karena itu, limbah cair yang mengandung logam berat harus diolah terlebih dahulu sebelum dibuang ke perairan untuk mencegah dampak negatif terhadap lingkungan.

2.3 Bioremediasi

Pengolahan menggunakan mikroba, atau *microbial treatment*, merupakan teknik yang memanfaatkan mikroorganisme seperti bakteri, jamur, atau alga untuk menguraikan atau menghilangkan zat pencemar dari lingkungan yang terkontaminasi. Proses ini dikenal sebagai bioremediasi dan diterapkan dalam

upaya pembersihan tanah, air, serta udara dari berbagai polutan, termasuk logam berat dan senyawa organik beracun. Salah satu contoh penerapan bioremediasi adalah penelitian yang dilakukan untuk mengisolasi bakteri lokal dari tanah yang tercemar air lindi di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Supit Urang, Malang. Hasil penelitian ini menemukan bahwa bakteri dari genus *Bacillus* mampu menurunkan kadar logam berat timbal (Pb) dengan tingkat efektivitas mencapai 69,1%. pengolahan mikroba menawarkan solusi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk mengatasi berbagai jenis polusi, terutama yang disebabkan oleh aktivitas manusia. (Rahadi et al., 2019).

Bakteri endogen dan endofit berperan penting dalam bioremediasi. Bakteri endogen, yang hidup alami di lingkungan tercemar, membantu menguraikan polutan menjadi senyawa yang lebih aman. Sementara itu, bakteri endofit, yang berada di dalam jaringan tanaman tanpa menimbulkan kerusakan, meningkatkan ketahanan tanaman terhadap pencemar dan mendukung degradasi polutan, terutama dalam sistem seperti constructed wetland. Kolaborasi keduanya mempercepat proses pembersihan lingkungan. Bakteri endogen adalah mikroorganisme yang secara alami hidup di dalam tubuh makhluk hidup dan berperan dalam proses penting seperti pencernaan, menjaga sistem kekebalan tubuh, dan keseimbangan mikrobiota. Sementara itu, bakteri endofit adalah bakteri yang hidup di dalam jaringan tanaman, terutama di akar, batang, dan daun, tanpa menyebabkan penyakit. Keberadaan bakteri ini bermanfaat bagi tanaman karena membantu meningkatkan pertumbuhan dengan menyediakan nutrisi dan menghasilkan hormon pertumbuhan. Selain itu, bakteri endofit juga membantu tanaman melawan serangan penyakit dengan memperkuat sistem pertahanannya. Bakteri ini juga dapat digunakan dalam bioremediasi, yaitu proses membersihkan polutan seperti logam berat, pestisida, dan zat beracun dari lingkungan menggunakan makhluk hidup (Rifa Intan Tanjung, 2024).

2.4 Fitoremediasi

Fitoremediasi merupakan suatu metode pemanfaatan tumbuhan beserta bagian-bagiannya untuk mengatasi pencemaran lingkungan dan mendekontaminasi limbah. Teknik ini dapat diterapkan melalui dua pendekatan utama, yaitu ex-situ dan in-situ. Pendekatan ex-situ dilakukan di luar lokasi pencemaran dengan menggunakan kolam buatan atau reaktor untuk mengolah limbah sebelum dikembalikan ke lingkungan. Sementara itu, pendekatan in-situ diterapkan langsung di lokasi yang terkontaminasi, baik pada tanah maupun perairan, tanpa perlu memindahkan material tercemar. Dengan mekanisme ini, fitoremediasi berperan dalam menstabilkan, menyerap, atau menguraikan polutan secara alami, sehingga menjadi alternatif yang ramah lingkungan dalam pengelolaan limbah dan restorasi ekosistem yang telah tercemar (Amarullah & Triastianti, 2019).

2.5 Typha angustifolia

Tanaman *Typha angustifolia*, yang dikenal sebagai tanaman lembang, merupakan salah satu spesies tumbuhan yang dapat dimanfaatkan sebagai media remediasi lahan. Tumbuhan ini tergolong tanaman rawa yang memiliki sistem perakaran serabut yang kuat, memungkinkan pertumbuhannya tetap stabil di lingkungan berair. Keunggulan tanaman ini terletak pada daya adaptasinya yang tinggi, sehingga mampu bertahan dalam berbagai kondisi lingkungan tanpa mudah mati. Selain itu, akar serabutnya yang panjang dan lebat berperan penting dalam menyerap berbagai unsur hara secara optimal, bahkan dalam jumlah yang lebih besar dibandingkan tanaman lainnya. Hal ini menjadikannya pilihan ideal untuk meningkatkan kualitas tanah dan air dalam proses fitoremediasi (Thineza Ardea Pramesti & Mohamad Mirwan, 2023).

2.6 *Floating Treatment Wetlands*

Lahan Basah Terapung (Floating Treatment Wetlands/FTWs) adalah sistem alami untuk membersihkan air dari polutan dengan memanfaatkan tanaman air. Tanaman ini ditanam di rakit di wadah apung yang diletakkan di atas permukaan air. Akar tanaman menggantung ke dalam air dan menyerap zat-zat pencemar, seperti nutrisi berlebih yang menyebabkan pencemaran. FTWs terdiri dari tiga

komponen utama, yaitu : tanaman air, media tanam, dan bahan apung. Sistem ini juga dilengkapi dengan tali atau jangkar agar tetap pada posisinya. Selain membersihkan air, FTWs juga berfungsi sebagai habitat bagi ikan, tempat mencari makan, berkembang biak, dan berlindung karena akar tanaman menciptakan lingkungan yang ideal bagi kehidupan akuatik. FTWs sangat cocok diterapkan di daerah perkotaan karena tidak memerlukan lahan luas dan bisa mengikuti naik turunnya permukaan air, tidak seperti sistem lahan basah buatan biasa. Sistem ini juga efektif untuk mengatasi masalah eutrofikasi (ledakan pertumbuhan alga akibat nutrisi berlebih di air) (Sugiarti et al., 2020).

2.7 *Constructed Wetlands*

Constructed wetland adalah sistem pengolahan limbah yang dirancang secara terkontrol dengan memanfaatkan proses alami melalui interaksi antara vegetasi, media, dan mikroorganisme. Sistem ini memiliki konstruksi yang sederhana dan efisien karena menggunakan kemampuan tanaman air dalam mengolah limbah. Salah satu tanaman yang sering digunakan sebagai penyaring air tercemar melalui biofiltrasi adalah kangkung air (*Ipomoea aquatica*). Tanaman ini memiliki keunggulan berupa kemampuan adaptasi yang tinggi, umur panjang, dan perawatan yang mudah (Ananda Salim, 2021).

Constructed Wetlands ini dirancang agar lebih terkontrol, misalnya dengan mengatur waktu tinggal air (*Hydraulic Retention Time/HRT*) dan laju aliran air (*Hydraulic Loading Rate/HLR*) untuk menyesuaikan ukuran atau kapasitasnya.

Berdasarkan cara aliran airnya, *Constructed Wetlands* dibagi menjadi dua jenis:

1. Free Water Surface (FWS) – sistem dengan permukaan air terbuka.
2. Sub Surface Flow (SSF) – sistem di mana aliran air berada di bawah permukaan tanah atau media.

Selain itu, berdasarkan arah aliran, sistem ini dapat dibedakan menjadi aliran horizontal dan vertikal (Hidayah et al., 2018).

2.8 Penelitian Sebelumnya

Tabel 2. 1 Penelitian Sebelumnya

Referensi	Teknologi	Bakteri	Hasil
(Hadiwidodo et al., n.d.)	Biofilter Anaerob-Aerob	Bakteri anaerob pada biofilm	Efisiensi penyisihan COD meningkat dengan waktu tinggal 25 jam; peningkatan jumlah tanaman meningkatkan penurunan COD
Suryati dan Priyanto (2021)	Fitoremediasi	-	Tanaman kangkung air efektif menyerap logam berat dan menurunkan BOD/COD limbah tekstil.
Utami et al. (2022)	Sistem Constructed Wetland	-	Kombinasi tanaman air efektif menurunkan polutan organik dan anorganik pada air lindi.
(Thineza Ardea Pramesti & Mohamad Mirwan, 2023b)	Constructed Wetland	-	Efektif menurunkan TSS, COD, dan Total-N hingga 96,30%, 90%, dan 89,16% pada debit kecil (5L/hari) di hari ke-14.
(Suharyadi et al., 2022)	Constructed Wetland	-	Efektif meremidiasi air asam tambang dengan reduksi Fe dan Mn masing-masing hingga

			82,5% dan 70,7% setelah 30 hari proses.
(Alya Zakiyah Rahmayani, 2022)	Sistem Wetland	Bakteri Endofit	Pemberian bakteri endofit pada tanaman *Typha latifolia* meningkatkan penyerapan logam berat (Fe, Mn, Zn) di lingkungan gambut terbakar. Fe dan Zn lebih banyak terakumulasi di akar, sedangkan Mn di batang. Selain itu, bakteri endofit membantu mengurangi kadar fosfat di tanah dan air melalui peningkatan penyerapan oleh tanaman.
(Budiarsa Suyasa et al., 2024)	Pengolahan dengan sistem anaerobik berbasis Sulfate Reducing Bacteria (SRB) dikombinasikan fitoremediasi menggunakan biofiltrasi tanaman	Sistem biosistem tumbuhan (fitoremediasi)	Kombinasi bakteri SRB yang melakukan bioakumulasi anaerobik dan biofiltrasi tanaman Sansevieria trifasciata berhasil menurunkan kandungan logam berat hingga 80,6% serta mengurangi BOD, COD, dan logam berat

			sampai di bawah standar yang diizinkan dalam waktu 2,25 hari.
(Azzahra et al., n.d.)	Bioremediasi menggunakan isolat bakteri dari tanah bekas tambang.	Bakteri Bacillus cereus	B. cereus mampu mereduksi logam berat Fe, Mn, Pb, dan Cd; biosorpsi dan reduksi Cr(VI) menurunkan toksisitas logam berat.

Meskipun berbagai penelitian telah membuktikan efektivitas teknologi *constructed wetland* (CW) dalam mengolah air limbah, terutama dengan pemanfaatan tanaman seperti *Typha angustifolia* dan *Typha latifolia*, serta peran bakteri endofit dalam meningkatkan daya serap tanaman terhadap logam berat, masih terdapat sejumlah celah penelitian yang belum banyak dikaji. Sebagian besar studi dilakukan dalam skala laboratorium dengan debit air yang relatif kecil, sehingga belum diketahui secara pasti bagaimana kinerja sistem ini dalam skala besar atau pada kondisi lapangan yang lebih kompleks. Selain itu, kombinasi ideal antara berbagai jenis tanaman air dan strain bakteri endofit untuk meningkatkan efisiensi pengolahan limbah masih jarang dieksplorasi secara mendalam. Penelitian yang ada cenderung berfokus pada pengurangan satu jenis polutan, padahal limbah sebenarnya umumnya mengandung berbagai jenis pencemar secara bersamaan. Di sisi lain, studi jangka panjang yang mengevaluasi keberlanjutan dan kestabilan sistem CW juga masih terbatas. Tak kalah penting, aspek dampak lingkungan sekunder dan potensi penerapan sosial-ekonomi teknologi ini di tingkat masyarakat lokal belum menjadi fokus utama dalam banyak penelitian yang telah dilakukan.

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Waktu & Lokasi

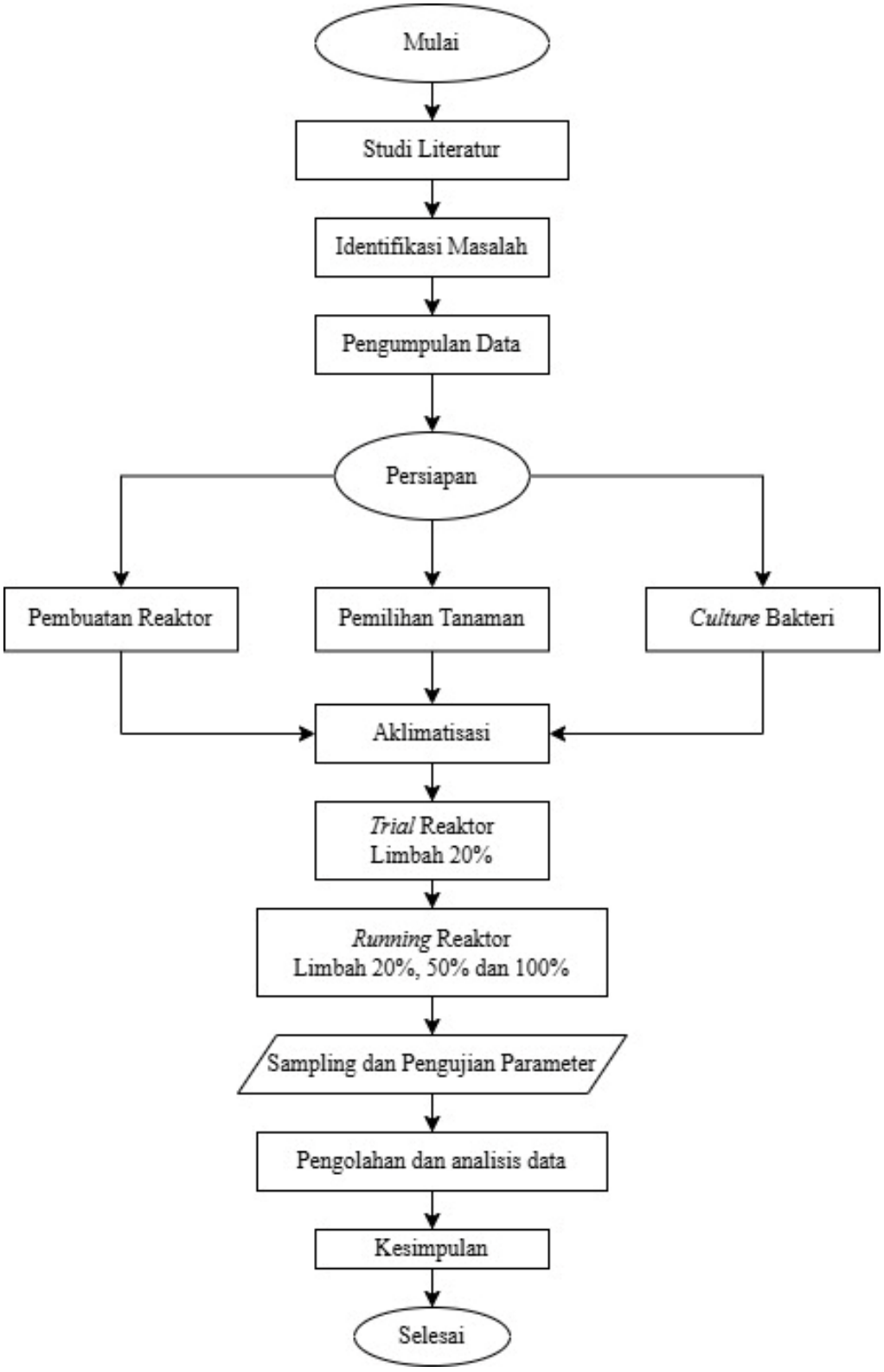
Lokasi Pengujian kandungan logam dilakukan di Laboratorium Bioteknologi Lingkungan, Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Proses pengoperasian reaktor dan pemeriksaan parameter fisik berlangsung di workshop Universitas Islam Indonesia. Sampel diambil dari IPL TPA Piyungan, Yogyakarta, dengan pengambilan lindi dilakukan pada proses anerobik. Penelitian ini dilaksanakan pada Februari hingga Juli 2025.



Gambar 3. 1 Lokasi

3.2 Alur Penelitian

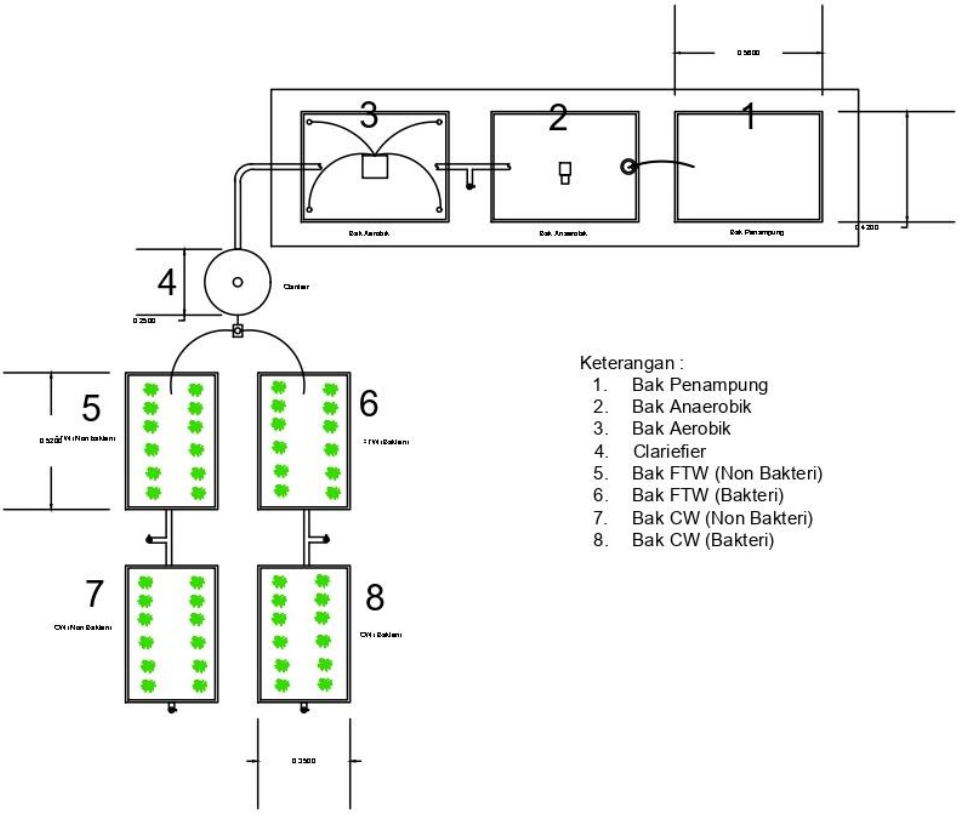
Penelitian ini menggunakan Kombinasi pengolahan biologis dengan tanaman *Typha angustifolia*, yang menggunakan pengolahan FTW dan CW. Tahapan yang akan dilakukan akan dijelaskan dengan diagram alir. Diagram alir penelitian ditunjukan sebagai berikut :



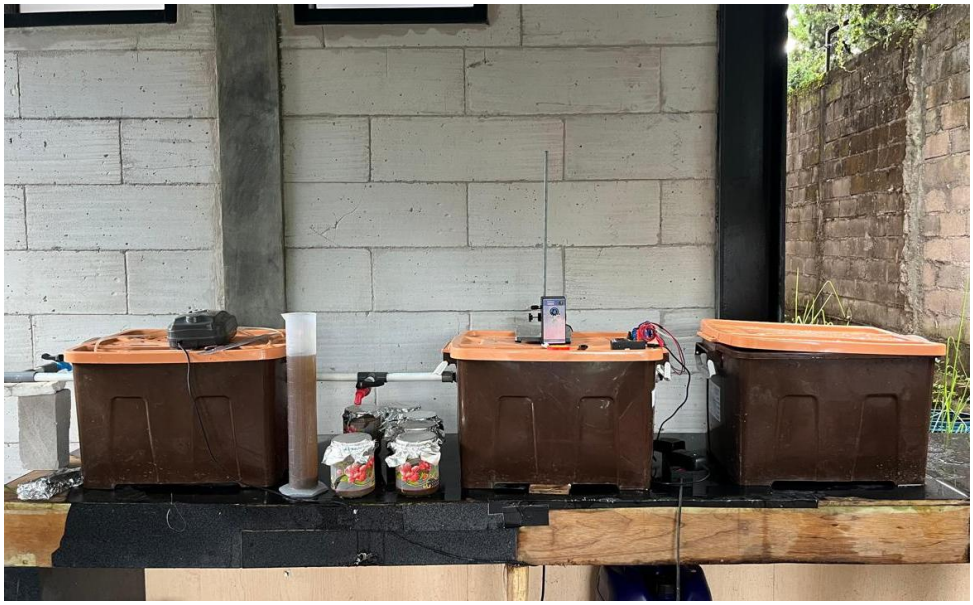
Gambar 3. 2 Alur Penelitian

3.2.1 Persiapan Reaktor

Reaktor dirancang untuk wadah proses fitoremediasi dan perlakuan mikroba berlangsung secara bersamaan. Ukuran dan desainnya disesuaikan dengan jenis tanaman yang digunakan serta volume air limbah yang akan diolah. Reaktor berupa container box plastik yang di rancang dengan urutan Bak Penampung – Bak anaerob – Bak aerobik – Clariefier – Bak Floating Wetland – Bak Constructed wetland.



Gambar 3. 3 Desain Reaktor



Gambar 3. 4 Gambar Bak Penampung – Aerobik



Gambar 3. 5 Gambar Clarifier - CW

1. Bak Penampung

Bak Penampung merupakan unit awal dalam sistem pengolahan air limbah yang berfungsi untuk mengatur variasi aliran dan konsentrasi zat pencemar. Tujuannya adalah untuk menstabilkan debit dan beban organik agar proses pengolahan selanjutnya berjalan lebih efisien serta untuk memungkinkan pengendapan awal partikel besar secara gravitasi. Bak ini berupa container box plastik dengan dimensi 56,5 cm x 40,2 cm x 34 cm dengan volume 55 L.

2. Bak Anaerob

Bak Anaerob adalah reaktor tertutup yang bekerja dalam kondisi tanpa oksigen. Reaktor yang penulis rancang yaitu reaktor anaerob dengan sistem pengadukan merupakan salah satu teknologi pengolahan limbah cair yang memanfaatkan aktivitas mikroorganisme anaerob dalam kondisi bebas oksigen untuk mendekomposisi bahan organik kompleks. Penambahan sistem pengaduk dalam reaktor berperan dalam menjaga distribusi suhu, homogenitas campuran, serta meningkatkan efisiensi kontak antara mikroorganisme dan substrat organik. Pengadukan juga membantu mencegah akumulasi padatan pada dasar reaktor yang dapat mengganggu stabilitas proses.

3. Bak Aerobik

Bak Aerobik berfungsi sebagai reaktor biologis yang memerlukan oksigen terlarut untuk mendukung pertumbuhan mikroorganisme aerob dalam menguraikan bahan organik dalam air limbah. Teknologi ini biasanya menerapkan sistem lumpur aktif yang dilengkapi dengan alat aerasi untuk mempertahankan kadar oksigen yang dibutuhkan dalam reaktor.

4. Bak Clariefier

Bak Clarifier digunakan untuk memisahkan lumpur aktif dari air setelah proses biologis. Endapan lumpur yang terbentuk sebagian dikembalikan ke sistem sebagai lumpur resirkulasi. Unit ini sangat penting untuk menjaga performa dan efisiensi unit pengolahan sebelumnya.

5. Bak *Floating Wetland*

Bak *Floating Wetland* merupakan teknologi pengolahan air limbah yang menggunakan tanaman air yang ditanam di atas rakit atau pelampung, dengan akar yang menggantung langsung dalam air. Akar ini menyediakan permukaan bagi mikroorganisme yang berperan dalam proses biologis, sekaligus menyerap nutrien dan polutan seperti logam berat dari air limbah.

6. Bak *Constructed Wetland*

Bak *Constructed Wetland* adalah sistem lahan basah buatan yang memanfaatkan media seperti kerikil dan tanaman air untuk mengolah air limbah melalui kombinasi proses fisik, kimia, dan biologis. Sistem ini terbagi menjadi beberapa tipe aliran, seperti horizontal dan vertikal, dan dikenal efektif untuk menurunkan kadar bahan organik, padatan tersuspensi, serta nutrien dalam limbah cair.

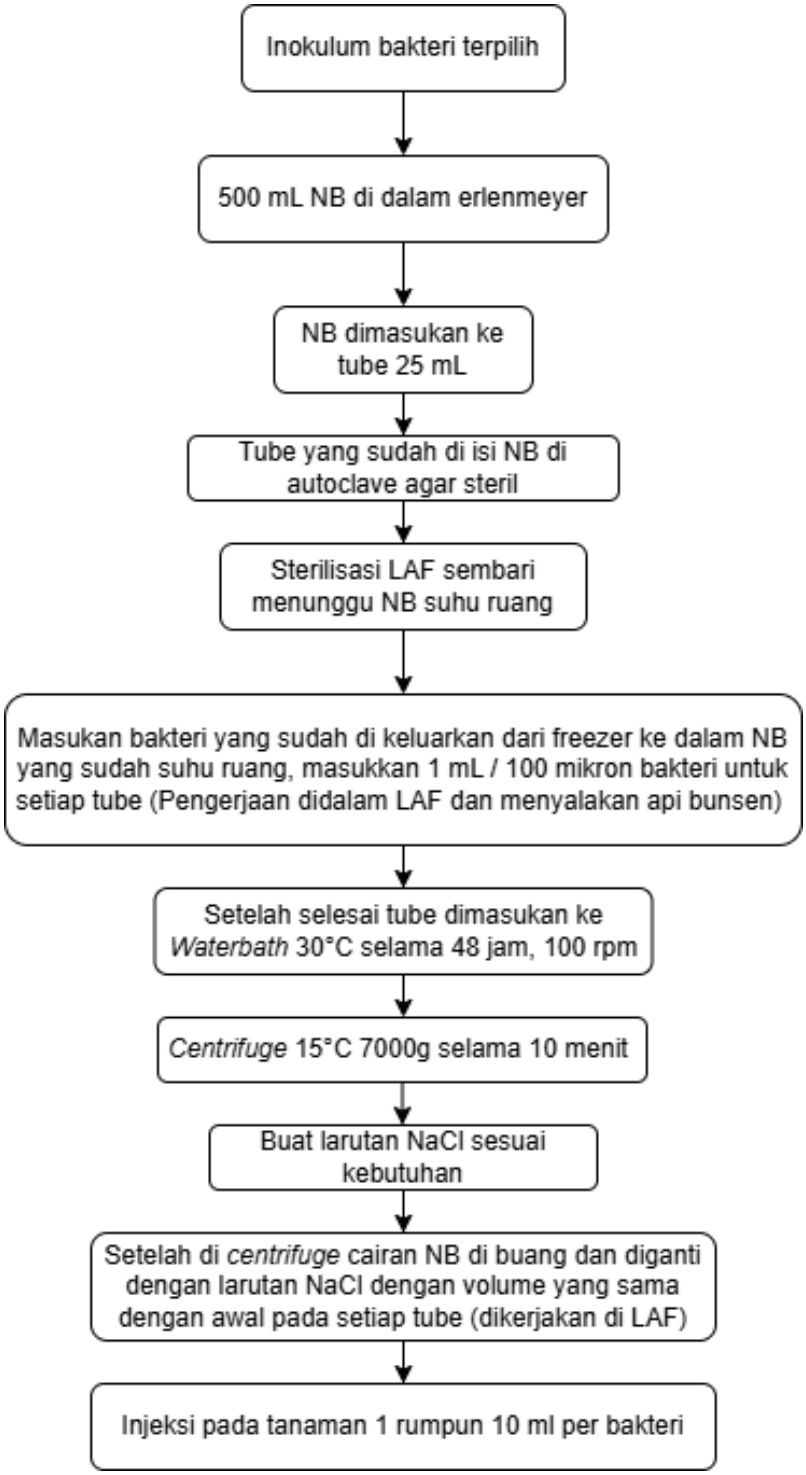
3.2.2 Pemilihan Tanaman

Tanaman air yang memiliki kemampuan fitoremediasi tinggi dipilih pada penelitian ini untuk menghilangkan logam berat dari air limbah. Tanaman yang digunakan yaitu Tanaman *Typha angustifolia*, yang dikenal sebagai tanaman lembang, merupakan salah satu spesies tumbuhan yang dapat dimanfaatkan sebagai media remediasi lahan. Tumbuhan ini tergolong tanaman rawa yang memiliki sistem perakaran serabut yang kuat, memungkinkan pertumbuhannya tetap stabil di lingkungan berair. Keunggulan tanaman ini terletak pada daya adaptasinya yang tinggi, sehingga mampu bertahan dalam berbagai kondisi lingkungan tanpa mudah mati. Tanaman ini diambil di Cilacap, Jawa Tengah.

3.2.3 Kulturisasi Bakteri

Bakteri yang digunakan dalam penelitian ini merupakan bakteri yang telah diidentifikasi pada studi sebelumnya (Fajri et al., 2024) dan (Widiastuti et al., 2020). Konsorsium bakteri yang terdiri dari *Bacilus cereus*, *Bacillus velezensis*, *Staphylococcus xylosus*, dan *Plant growt promoting rhizobacteria* (PGPR). Bakteri yang berhasil tumbuh dan membentuk koloni tunggal pada penelitian terdahulu ditanam dalam 500 mL *Nutrient Broth* (NB) di dalam erlenmeyer. Setelah media kultur dan bakteri dimasukkan, erlenmeyer ditempatkan di dalam waterbath selama 48 jam pada suhu 30°C dengan kecepatan pengadukan 100 rpm. Sebanyak 20 mL kultur kemudian diambil untuk diukur *Optical Density* (OD)-nya menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 600 nm. Setelah itu bakteri di centrifuge

sambil membuat larutan NaCl, bakteri yang sudah di centrifuge akan mengendapkan bakteri di bawah tube, setelah itu *Nutrient Broth* dibuang dan diganti dengan cairan NaCl (namun endapan jangan sampai terbuang) pengujian ini dilakukan di meja kerja steril yaitu *Laminar Air Flow* (LAF) yang sudah di sterilkan.



Gambar 3. 6 Tahapan Kulturisasi Bakteri



Gambar 3. 7 Proses *Centrifuge* Bakteri



Gambar 3. 8 Proses Penggantian Larutan NaCl

3.2.4 Aklimatisasi

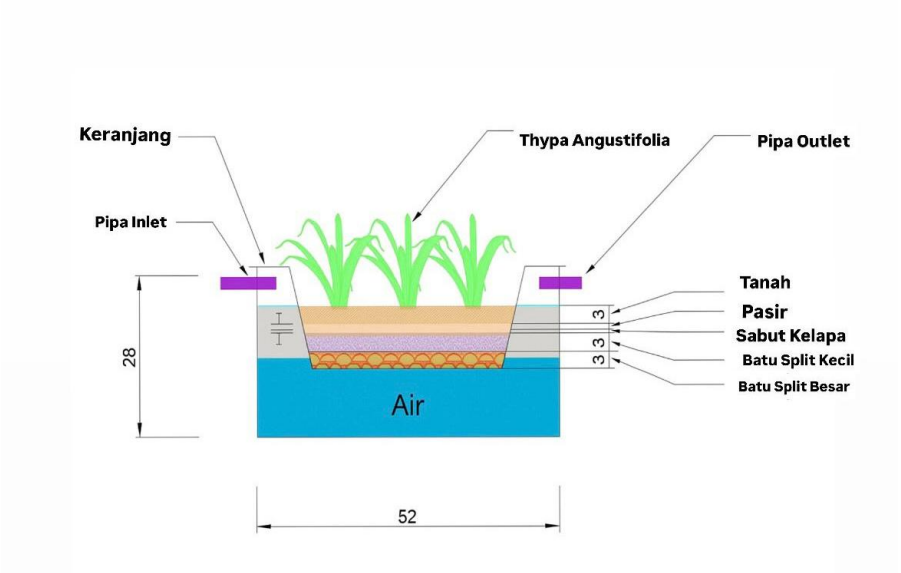
Sebelum memulai proses remediasi, tanaman dan bakteri diberikan periode aklimatisasi dari tanggal 29 September 2024 – 1 Januari 2025 dalam reaktor untuk beradaptasi dengan kondisi air limbah. Hal ini penting untuk memastikan bahwa kedua agen biologis tersebut dapat berfungsi optimal dalam mengolah polutan.

A. Aklimatisasi Reaktor

- Pembuatan Reaktor *Floating Treatment Wetland* (FTW)

Dalam sistem pengolahan FTW, digunakan tanaman *Typha angustifolia* (lembang). FTW dibuat menggunakan box kontainer plastik berkapasitas 40 L serta keranjang kotak plastik sebagai media untuk wadah tanaman. Setiap reaktor

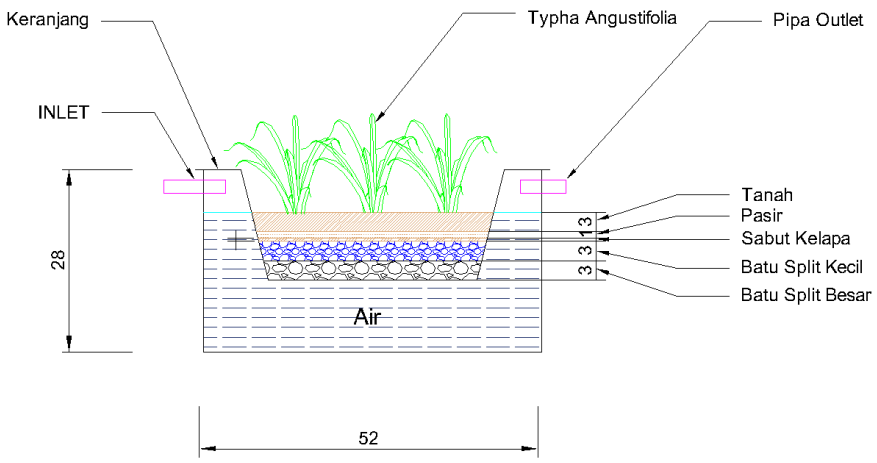
ditanami 9 rumpun *Typha angustifolia*, dalam satu reaktor terdapat 9 rumpun tanaman dengan masing-masing rumpun terdiri dari 3 batang. Media dalam pot disusun berlapis, mulai dari bawah ke atas adalah split besar (3 cm), split kecil (3 cm), sabut kelapa (menutup), pasir (1 cm), tanah (3 cm). Air bersih kemudian dimasukkan ke dalam reaktor sampai mengenai akar. Setiap rumpun diberikan 10 mL *culture* bakteri yang terdiri dari 3 strain bakteri (*Bacilus cereus*, *Bacillus velezensis*, *Staphylococcus xylosus*) dan *Plant growth promoting rhizobacteria* (PGPR) yang di injeksikan pada akar.



Gambar 3. 9 Desain Reaktor FTW

- Pembuatan Reaktor *Constructed Wetland* (CW)

Pada sistem pengolahan *Constructed Wetland* (CW), digunakan jenis tanaman dan box kontainer yang sama seperti sebelumnya. Setiap reaktor terdiri atas 9 rumpun, dengan masing-masing rumpun berisi 2–3 batang *Typha angustifolia*. Dasar reaktor dilapisi split besar (7 cm), lalu di atasnya split kecil (7 cm), sabut kelapa (menutup), pasir (2 cm), dan tanah (4 cm). Tanaman disiram dengan air bersih setiap hari. Setiap rumpun diberikan 10 mL *culture* bakteri yang terdiri dari 3 strain bakteri (*Bacilus cereus*, *Bacillus velezensis*, *Staphylococcus xylosus*) dan *Plant growth promoting rhizobacteria* (PGPR) yang diinjeksikan pada akar.



Gambar 3. 10 Desain Reaktor CW

B. Aklimatisasi Tanaman *Typha angustifolia*

Setelah reaktor selesai disusun, tahap berikutnya adalah proses aklimatisasi tanaman. Aklimatisasi bertujuan untuk membantu tanaman menyesuaikan diri dengan media dan kondisi lingkungan yang baru. Proses ini berlangsung selama kurang lebih tiga setengah bulan setelah penanaman. Pada tahap awal, daun tanaman dipangkas hingga tersisa sekitar 15 cm. Dalam satu reaktor terdapat 9 rumpun tanaman dengan masing-masing rumpun terdiri dari 3 batang. Pemupukan dilakukan seminggu sekali selama 2 bulan dengan menggunakan pupuk hidroponik. Aklimatisasi dimulai pada 29 September 2024 dan berakhir pada 3 Januari 2025. Proses aklimatisasi dianggap selesai ketika batang dan daun tanaman mulai menghijau serta akar tumbuh dengan lebat, menandakan tanaman telah beradaptasi dengan baik terhadap lingkungan barunya.

C. Aklimatisasi Lumpur

Proses aklimatisasi lumpur adalah tahap di mana mikroorganisme beradaptasi dengan substrat atau kondisi lingkungan baru dalam sistem pengolahan limbah, seperti reaktor anaerobik ataupun aerob. Lumpur di ambil dari IPAL dari Kawasan Industri di Kabupaten Batang,Jawa Tengah sebanyak 10 liter. Tujuan utama tahap ini adalah memastikan mikroba dapat tumbuh dan berfungsi secara

optimal dalam memenuhi kondisi operasional yang sebenarnya, sehingga penguraian bahan organik berlangsung secara efisien dan stabil. Proses aklimatisasi reaktor anerobik dan aerobik menggunakan air lindi dengan kosentrasi 20% dan ditambahkan substrate (gula dan urea) sebagai supplai carbon dan nitrogen untuk bakteri. Gula dan urea ditambahkan dengan rasio 10:1 yang dilarutkan dalam bak penampung dengan volume air lindi sebanyak 48 L. Selama aklimatisasi, parameter seperti pH, suhu, COD, dan SV30 dipantau setiap hari untuk menjaga mikroorganisme dapat tumbuh dengan baik. Proses aklimatisasi sludge pada reaktor aerasi selesai dengan ciri/indikator terjadi penambahan sludge dan nilai SVI mencapai 90-150 mL/g

Penambahan gula dan urea dihentikan apabila terjadi peningkatan lumpur atau fenomena *sludge bulking,* yaitu kondisi ketika lumpur aktif sulit mengendap karena adanya pertumbuhan berlebih. Pada prinsipnya, gula berfungsi sebagai sumber karbon dan urea sebagai sumber nitrogen untuk mendukung aktivitas mikroorganisme. Namun, jika diberikan secara berlebihan, keduanya dapat menyebabkan ketidakseimbangan rasio C/N yang justru memicu pertumbuhan mikroba yang tidak diinginkan. Akibatnya, flok lumpur menjadi kurang padat dan tidak stabil sehingga proses pengendapan terganggu. Oleh karena itu, penghentian sementara penambahan gula dan urea dilakukan untuk mengembalikan keseimbangan nutrien, menekan perkembangan bakteri filamentous, serta memperbaiki kualitas pengendapan lumpur. Hal ini sejalan dengan penelitian Hossain, (2004) dalam *Activated Sludge Bulking: A Review of Causes and Control Strategies*, yang menjelaskan bahwa tingginya beban organik dan ketidakseimbangan nutrisi merupakan penyebab utama terjadinya *sludge bulking,* sehingga penyesuaian suplai nutrien diperlukan sebagai langkah pengendalian.

3.2.5 *Trial* Reaktor

Percobaan awal dilakukan dengan mengoperasikan reaktor menggunakan campuran air lindi sebanyak 20% dari total volume reaktor. Penggunaan konsentrasi ini bertujuan untuk menguji kemampuan sistem dalam mengolah air lindi dengan beban polutan yang masih tergolong ringan, sekaligus memberikan kesempatan bagi mikroorganisme dan tanaman untuk beradaptasi dengan karakteristik air lindi. Selama masa *trial*, parameter fisik seperti pH, SV 30,

Oxidation Reduction Potential (ORP), *Electro Conductivity* (EC), *Total Dissolve Solid* (TDS), dan Suhu dipantau secara berkala untuk mengevaluasi kinerja reaktor dan menilai efektivitas proses biodegradasi. Hasil dari *trial* ini menjadi dasar untuk menentukan kesiapan reaktor sebelum masuk ke tahap pengolahan dengan konsentrasi air lindi yang lebih tinggi.

3.2.6 Proses *Running* Reaktor

Setelah trial, air limbah lindi dialirkan ke dalam reaktor. Proses ini dilakukan secara kontinu, dengan konsentrasi 20% air lindi. Selama operasi, parameter seperti pH dan sludge dipantau untuk memastikan kondisi optimal bagi aktivitas mikroba dan pertumbuhan tanaman.

Variasi konsentrasi air lindi yang digunakan adalah 20%, 50% dan 100% untuk menganalisis pengaruh beban terhadap pengolahan biologis dan wetland. Hydraulic Retention Time (HRT) pada reaktor anaerobik dan aerobik adalah 4 hari (30 mL/menit) menggunakan pompa prestaltik.

3.2.7 Sampling & Pengujian Sampel

Pengambilan sampel dilakukan 3 kali pada reaktor selama 2 bulan lebih dari h-0 dan h-64, pada konsentrasi 20% sampling dilakukan sekali di awal (h-0) untuk pengecekan kadar logam berat yang terkandung dengan 7 titik pengambilan (bak penampung → reaktor anaerob → reaktor aerob → clarifier → *Floating Treatment Wetland* (FTW) → *Constructed Wetland* (CW) dengan HRT 4 hari dengan konsentrasi air lindi 20% (h-0), 50% (h-28) dan 100% (h-64).

Sampel air lindi yang diambil dianalisis untuk mengukur konsentrasi logam berat menggunakan teknik seperti Spektrofotometri Serapan Atom (AAS). Selain itu, parameter lain seperti pH juga diukur menggunakan pH meter untuk menilai efektivitas proses remediasi. pH diukur setiap hari dimulai pada tanggal 1 Mei 2025 (20%), 7 Mei 2025 (50%) hingga 3 Juli 2025 (100%).

Pengambilan sampel tanaman hanya diambil di akhir penelitian (h-64) pada reaktor FTW dan CW (Bakteri maupun Non Bakteri) kemudian konsentrasi logam diuji menggunakan teknik AAS dengan acuan dari buku (Pengujian Standar Instrumen Tanah dan Pupuk Penyusun et al., n.d.). Untuk pengujian logam pada

tanah di reaktor CW (Bakteri & Non Bakteri) sampling dilakukan di awal (20%) dan akhir (100%) menggunakan acuan SNI 8910:2021.



Gambar 3. 11 Alur Pengujian Sampel Air Logam

Dalam penelitian ini dilakukan pengujian dengan parameter kimia yang meliputi logam berat (Pb, Cd dan Cr) serta parameter fisika yaitu pH.

Berikut tabel parameter beserta metode yang akan digunakan :

Tabel 3. 1 Parameter Fisika & Kimia

No.	Parameter	Satuan	Metode	SNI
1.	Pb (Timbal)	mg/L	Spektrofotometri	SNI 6989-84:2019
2.	Cd (Kadmium)	mg/L	Spektrofotometri	SNI 6989-84:2019
3.	Cr (Kromium)	mg/L	Spektrofotometri	SNI 6989-84:2019
4.	pH	-	pH Meter	SNI 6989-11:2019

Setelah proses pengujian menggunakan rangkaian reaktor selesai, dilakukan analisis untuk mengetahui seberapa efektif sistem tersebut dalam menurunkan kandungan logam berat di dalam limbah. Hasil analisis kemudian dibandingkan dengan standar baku mutu yang berlaku, agar dapat dievaluasi kemampuan bakteri dan tanaman dalam mengolah air limbah sesuai ketentuan peraturan yang ada.

Berikut disajikan standar baku mutu yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini :

Tabel 3. 2 Baku Mutu Yang Berlaku

Parameter	Baku Mutu (Kadar Paling Tinggi)	Satuan	Referensi
Pb	0,1	mg/L	Perda DIY No. 7/2016
Cd	0,1	mg/L	Permen LHK No. 59/2016
Cr	0,5	mg/L	Perda DIY No. 7/2016
pH	6,0-9,0	-	Perda DIY No.7/2016)

3.2.9 Analisis

Data yang diperoleh dari pengujian sampel dianalisis untuk menentukan efisiensi kombinasi perlakuan mikroba dan fitoremediasi dalam mengurangi konsentrasi logam berat. Analisis statistik dapat digunakan untuk menguji signifikansi perbedaan sebelum dan sesudah perlakuan, serta untuk membandingkan efektivitas antara berbagai kombinasi perlakuan. Tingkat efektivitas setiap metode pengolahan dalam limbah cair lindi dapat dideteksi melalui persentase pengurangan parameter hasil pengujian serta kondisi tanaman sebagai pendukung data. Data hasil uji tersebut kemudian disajikan dalam bentuk grafik untuk memadukan pola proses pengolahan. Hasil uji ini juga dapat dibandingkan dengan peraturan standar yang berlaku terkait baku mutu air limbah lindi.

Analisis kandungan logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), dan kromium (Cr) dilakukan menggunakan alat SSA. SSA digunakan untuk menguji air limbah lindi serta tanaman yang dipakai dalam sistem lahan basah, dengan pengujian gelombang yang disesuaikan berdasarkan jenis logam berat yang dianalisis. Perhitungan konsentrasi logam berat dilakukan dengan metode sebagai berikut :

$$Kadar\ Logam\ \left(\frac{mg}{L}\right) = \frac{(C\ x\ V_2\ x\ Fp)}{V_1}$$

Keterangan :

C = Konsentrasi dari hasil pembacaan (mg/L)

Fp = Faktor Pengenceran

V_1 = Volume sampel yang diuji (mL)

V_2 = Volume akhir larutan setelah persiapan (mL)

3.3 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu berupa container box plastik dengan 2 dimensi yang berbeda yang pertama dengan dimensi 35 cm x 52 cm x 28 cm dengan volume 40 L, yang kedua dengan dimensi 56,5 cm x 40,2 cm x 34 cm dengan volume 55 L, botol sampel, dan jerigen. Bahan yang digunakan adalah sampel air limbah (air lindi). Limbah dikumpulkan selama beberapa hari hingga dapat memenuhi kebutuhan penelitian kemudian dihomogenkan. Limbah tersebut kemudian siap digunakan dalam proses penelitian. Metode pengolahan limbah yang digunakan adalah fitoremediasi tumbuhan *Typha angustifolia* dengan sistem *wetland*. Fitoremediasi menggunakan *Typha angustifolia* dalam sistem *wetland* merupakan metode pengolahan limbah air lindi yang memanfaatkan kemampuan tanaman tersebut untuk menyerap dan mengakumulasi kontaminan dari air tercemar secara bertahap.

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Air Lindi

Sebelum reaktor dioperasikan, karakteristik limbah yang akan diolah terlebih dahulu harus diketahui, dengan tujuan untuk menentukan konsentrasi awal logam berat seperti Timbal (Pb), Kadmium (Cd), dan Kromium (Cr). *Running* reaktor dilakukan secara kontinyu selama 2 hingga 4 minggu.

Penelitian ini menggunakan kombinasi perlakuan mikrobial dan fitoremediasi karena keduanya saling melengkapi dalam mengolah air lindi yang memiliki kandungan pencemar tinggi dan kompleks. Perlakuan mikrobial bekerja dengan memanfaatkan mikroorganisme untuk menguraikan bahan organik serta senyawa beracun menjadi bentuk yang lebih sederhana. Di sisi lain, fitoremediasi memanfaatkan tanaman air yang mampu menyerap, mengakumulasi, dan menurunkan kadar polutan maupun logam berat secara alami. Dukungan terhadap pendekatan ini dapat dilihat pada penelitian Muryani et al., (2018) yang menggunakan tanaman air seperti teratai (*Nymphaea sp.*) dan apu-apu (*Pistia stratiotes*). Tanaman tersebut bekerja bersama mikroorganisme di tanah dan akar sebagai biofilter yang membantu menurunkan kadar polutan dalam air lindi. Hasilnya, kombinasi antara mikroorganisme dan tanaman terbukti memberikan pengolahan yang lebih optimal.

. Variasi konsentrasi limbah cair lindi yang digunakan berkisar antara 20% hingga 100%. Penggunaan beberapa tingkat konsentrasi tersebut merujuk pada penelitian (Tangahu & Ningsih, 2016) yang melaporkan bahwa konsentrasi limbah 10% dan 20% tidak memberikan efek kematian pada tanaman, sedangkan pada konsentrasi 30%, 40%, dan 50%, ditemukan tingkat kematian tanaman berturut-turut sebesar 25%, 50%, dan 87,5%. Data hasil pengujian awal karakteristik limbah cair lindi disajikan pada tabel berikut 4.3.

Tabel 4. 1 Konsentrasi Pada Bak Penampung

Konsentrasi Limbah Lindi	Logam (mg/L)						pH	Baku Mutu
	Pb	Baku Mutu	Cd	Baku Mutu	Cr	Baku Mutu		
20%	1,65 ± 0,09	0,1	0,45 ± 0,03	0,1	1,33 ± 0,07	0,5	8	6,0 - 9,0
50%	0,09 ± 0,01		0,04 ± 0,02		0,00 ± 0,01		8,15	
100%	0,82 ± 0,07		0,04 ± 0,00		0,31 ± 0,01		7,73	

Hasil uji lindi di TPA piyungan pada penelitian (Astuti et al., 2023) dapat dilihat pada tabel dibawah.

Tabel 4. 2 Hasil Uji Lindi TPA Piyungan

Parameter	Satuan	Hasil Uji	Baku Mutu	Metode Uji
Timbal (Pb)	mg/kg	Tidak terdeteksi	0,1	SSA-nyala
Kromium (Cr)	mg/kg	0,13	0,5	SSA-nyala

Sumber data diolah dari hasil uji lindi TPA Piyungan Peneliti 2022)* Baku Mutu Air Limbah untuk Kegiatan TPA Sampah, Peraturan Daerah Istimewa Yogyakarta Nomor 7 Tahun

4.2 Efektivitas Pengolahan Logam Berat dalam Air Lindi

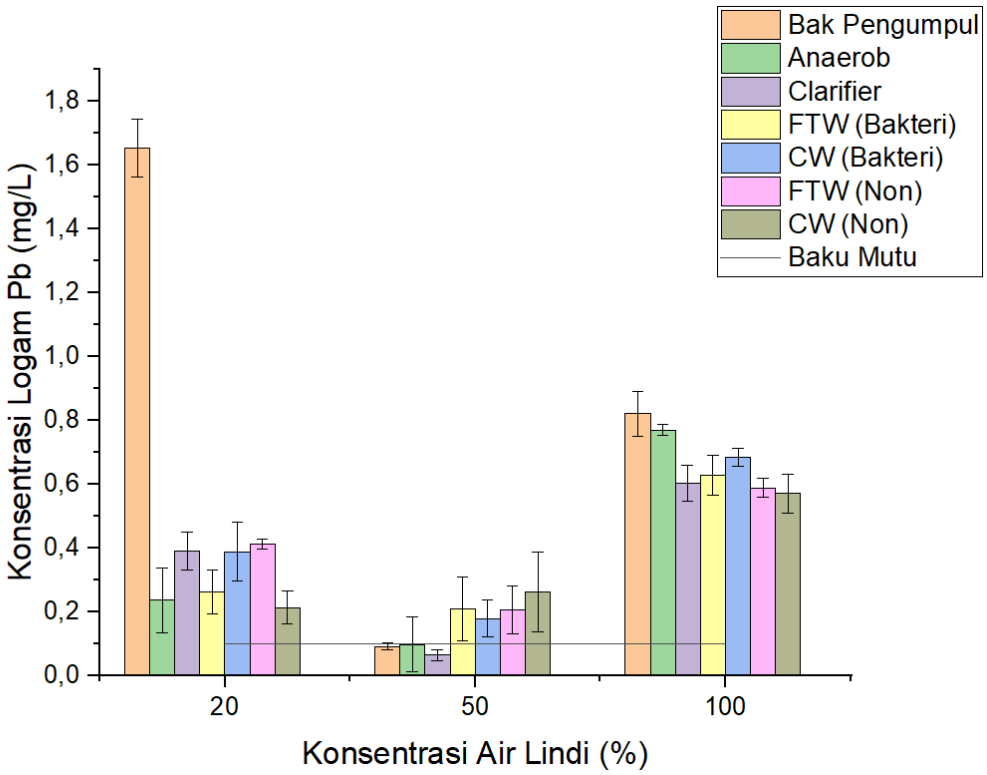
Pengolahan air limbah lindi pada penelitian ini dilakukan melalui serangkaian unit proses sistem kombinasi pengolahan biologis dan fitoremediasi yaitu dari Bak penampung, Anaerob, Clarifier, *Floating Treatment Wetland* (FTW) dan *Constructed Wetland* (CW) dengan dan tanpa penambahan bakteri. Tanaman yang digunakan adalah *Typha angustifolia* dan bakteri yang digunakan yaitu *Bacilus cereus*, *Bacillus velezensis*, *Staphylococcus xylosus*, dan *Plant growt promoting rhizobacteria* (PGPR) yang diinjeksikan di 1 rumpun sebanyak 10 mL/bakteri secara langsung pada bagian akar tanaman menggunakan bakteri yang telah disiapkan pada salah satu reaktor FTW dan CW. Bakteri *Bacillus cereus, Bacillus*

velezensis, dan *Staphylococcus xylosus* digunakan kembali karena ketiganya telah terbukti efektif dalam penelitian terdahulu dalam meningkatkan proses fitoremediasi dan pengolahan limbah cair. Bakteri ini memiliki sifat *plant growth-promoting bacteria* (PGPB) yang dapat menghasilkan hormon pertumbuhan, enzim, dan senyawa metabolit yang mendukung pertumbuhan tanaman serta mengurangi stres akibat paparan logam berat. Selain itu, bakteri tersebut dikenal toleran terhadap kondisi limbah yang toksik, termasuk pH ekstrem, kandungan zat warna sintetis, dan konsentrasi logam yang tinggi. Hasil penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa keberadaan bakteri ini mampu meningkatkan akumulasi logam berat dalam jaringan akar dan tunas tanaman serta mempercepat degradasi senyawa organik. Oleh karena itu, penggunaan kembali bakteri ini dalam penelitian sekarang bertujuan untuk memastikan konsistensi hasil, memperkuat validitas data, dan memanfaatkan potensi sinergis antara mikroba dan tanaman dalam sistem pengolahan biologis–fitoremediasi

Konsentrasi logam berat yang diamati meliputi Timbal (Pb), Kadmium (Cd), dan Kromium (Cr), pada tiga variasi konsentrasi (20%, 50%, 100%), kemudian konsentrasinya dibaca dengan menggunakan alat Spektrofotometri Serapan Atom (SSA).

4.2.1 Analisis Logam Timbal (Pb) dalam Air Lindi

]Pengujian kadar logam Timbal (Pb) bertujuan untuk mengetahui seberapa besar kemampuan sistem pengolahan dalam menurunkan kandungan logam berat berbahaya di dalam air lindi. Pengambilan data dilakukan pada setiap tahapan proses pengolahan serta pada variasi konsentrasi air lindi, yaitu 20%, 50%, dan 100%. Hasil pengukuran disajikan dalam bentuk grafik. Gambar di bawah ini menunjukkan perbandingan kadar logam Pb pada setiap tahap pengolahan air lindi.



Gambar 4. 1 Konsentrasi Logam Pb

- **Konsentrasi Limbah 20%**

Konsentrasi kadar Pb tertinggi berada pada bak pengumpul (1,6542 mg/L), mencerminkan karakter awal air lindi sebelum pengolahan. Setelah melewati bak anaerob, terjadi penurunan yang signifikan menjadi 0,2370 mg/L, menunjukkan kemampuan sistem dalam menurunkan logam melalui adsorpsi oleh biomassa dan lumpur aktif. Pada clarifier, nilai menurun menjadi 0,3912 mg/L, sedikit lebih tinggi dibanding anaerob, bisa disebabkan sebagian partikel logam tersuspensi masih belum mengendap sepenuhnya. Pada FTW dan CW, CW non-bakteri justru memberikan konsentrasi kadar Pb terendah yaitu 0,2137 mg/L, mengindikasikan kontribusi kuat dari media dan tanaman dalam mereduksi logam Pb walau tanpa penambahan bakteri, sedangkan FTW dengan bakteri (0,2625 mg/L) juga cukup efektif, dan menunjukkan bahwa mikroorganisme pada FTW bakteri dapat memperkuat proses biosorpsi (Ratnawati et al., 2010). Penurunan ini menunjukkan efektivitas awal dari sistem biologis dan fitoremediasi, namun belum optimal pada konsentrasi rendah.

- **Konsentrasi Limbah 50%**

Pada konsentrasi 50%, kadar logam Pb menunjukkan perubahan yang berbeda di setiap unit reaktor. Nilai awal konsentrasi Pb di bak pengumpul tercatat sebesar 0,0917 mg/L, kemudian sedikit meningkat menjadi 0,0973 mg/L setelah melalui reaktor anaerob. Kenaikan ini dapat dikaitkan dengan proses peluruhan atau pelepasan Pb dari endapan ke bentuk terlarut yang umum terjadi pada kondisi anaerobik, perubahan kondisi redoks dan degradasi senyawa organik dapat menyebabkan remobilisasi logam berat dalam sistem tanpa oksigen (Andrya Prasidya et al., 2025). Setelah melewati clarifier, konsentrasi Pb menurun menjadi 0,0640 mg/L, menandakan bahwa proses sedimentasi yang terjadi di unit ini cukup efektif dalam menghilangkan partikel tersuspensi yang mengikat logam.

Selanjutnya, pada tahap *Floating Treatment Wetland* (FTW) dan *Constructed Wetland* (CW), konsentrasi Pb mengalami peningkatan kembali. FTW dengan penambahan bakteri mencatatkan konsentrasi 0,2093 mg/L, sementara tanpa bakteri sebesar 0,2060 mg/L. Pada sistem CW, unit dengan bakteri menunjukkan konsentrasi 0,1794 mg/L dan CW tanpa bakteri mencapai 0,2625 mg/L. Nilai-nilai ini mencerminkan bahwa sistem FTW dan CW pada skala atau kondisi tertentu belum sepenuhnya optimal dalam mereduksi logam Pb. Menurut Headley & Tanner (2012), efektivitas wetland dalam menurunkan logam berat sangat bergantung pada faktor-faktor seperti jenis tanaman, aktivitas mikroba, karakteristik substrat, serta lama waktu retensi. Konsentrasi logam yang lebih tinggi pada unit-unit akhir tersebut dapat dikaitkan dengan dinamika sistem seperti terbatasnya adsorpsi pada substrat, efisiensi serapan akar tanaman yang bervariasi, atau kemampuan bakteri yang belum maksimal dalam kondisi lingkungan tertentu. (Vymazal, 2011) juga menjelaskan bahwa efektivitas sistem wetland tidak hanya ditentukan oleh keberadaan tanaman dan mikroorganisme, tetapi juga oleh integrasi desain hidrologis dan pengelolaan beban kontaminan secara berkelanjutan.

- **Konsentrasi Limbah 100%**

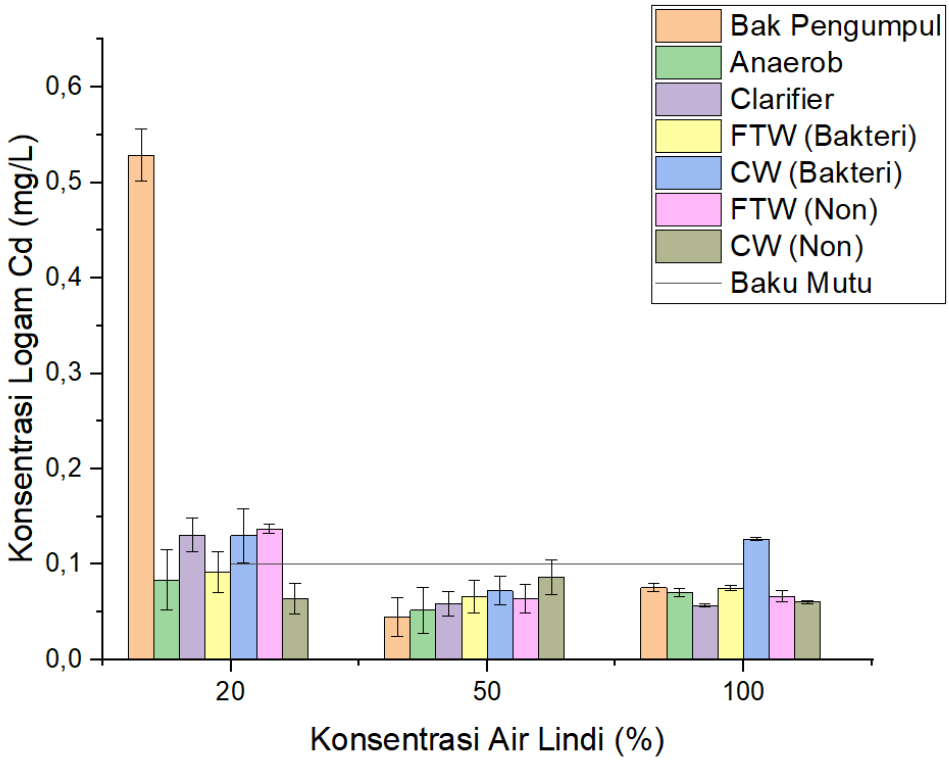
Pada konsentrasi limbah 100% pada bak pengumpul Pb awal mencapai 0,8219 mg/L jauh di atas baku mutu. Penurunan konsentrasi cukup signifikan, setelah anaerobik menjadi 0,7695 mg/L, dan pada Clarifier menjadi 0,6028 mg/L. Sistem CW (non-bakteri) menghasilkan konsentrasi akhir paling rendah yaitu

0,5711 mg/L, tetapi tetap tidak memenuhi baku mutu.

Ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi tinggi, efisiensi penyerapan menurun drastis. Menurut Puspitasari, (2019), pada beban logam tinggi, kapasitas penyerapan media dan tanaman mengalami kejenuhan lebih cepat dan perlu diganti atau diperkuat dengan agen biosorben tambahan.

4.2.2 Analisis Logam Kadmium (Cd) dalam Air Lindi

Logam Kadmium (Cd) termasuk logam berat yang bersifat racun dan dapat membahayakan kesehatan serta lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Oleh sebab itu, penting untuk memantau perubahan kadar Cd selama proses pengolahan air lindi. Pengujian dilakukan pada setiap tahapan reaktor dengan menggunakan variasi konsentrasi air lindi, yaitu 20%, 50%, dan 100%, untuk menilai sejauh mana proses pengolahan mampu menurunkan kadar Cd.



Gambar 4. 2 Konsentrasi Logam Cd

- **Konsentrasi Limbah 20%**

Konsentrasi awal Cd pada lindi 20% adalah 0,5285 mg/L, jauh di atas baku

mutu air limbah (0,05 mg/L). Proses pengolahan selanjutnya melalui reaktor anaerob menurunkan konsentrasi menjadi 0,0837 mg/L, menunjukkan adanya penurunan yang signifikan akibat aktivitas mikroorganisme anaerob yang mampu mengendapkan atau mengadsorpsi Cd. Selanjutnya di clarifier, nilai Cd justru meningkat menjadi 0,1309 mg/L, hal ini bisa disebabkan oleh desorpsi kembali dari partikel-partikel flok atau karena waktu tinggal yang tidak cukup lama untuk proses sedimentasi yang optimal.

Pada unit FTW (bakteri), kadar Cd turun menjadi 0,0915 mg/L, lalu kembali naik sedikit di CW (bakteri) menjadi 0,1299 mg/L, yang menunjukkan kemungkinan desorpsi dari media atau penurunan efisiensi bakteri akibat pH, nutrien, atau senyawa pengganggu lainnya. Penurunan yang paling efektif terlihat pada CW (non-bakteri) yaitu hingga 0,0637 mg/L, mendekati baku mutu. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem CW tanpa bakteri sekalipun masih cukup efektif dalam menurunkan Cd, dikarenakan kemampuan tanaman dalam menyerap Cd melalui akar secara pasif dan akumulatif.

- **Konsentrasi Limbah 50%**

Pada air lindi dengan konsentrasi 50%, kadar awal logam Cd di bak pengumpul adalah 0,0449 mg/L, yang berarti sudah memenuhi standar baku mutu. Setelah diproses di reaktor anaerob, kadarnya sedikit naik menjadi 0,0521 mg/L, dan kemudian bertambah lagi menjadi 0,0588 mg/L setelah melalui clarifier. Kenaikan ini bisa disebabkan oleh logam yang sebelumnya mengendap atau menempel pada partikel kembali larut ke dalam air.

Selanjutnya, saat melewati FTW yang menggunakan bakteri, kadar Cd turun sedikit menjadi 0,0660 mg/L, dan di CW dengan bakteri menjadi 0,0723 mg/L. Secara umum, penurunan kadarnya kurang optimal. Bahkan, di CW tanpa bakteri, kadarnya justru meningkat menjadi 0,0862 mg/L lebih tinggi dari awalnya. Hal ini menguatkan dugaan bahwa pada kadar Cd yang sudah rendah, logam bisa keluar kembali dari media atau substrat ke dalam air, dipicu oleh proses biokimia (Murtafi'ah & Aeni, 2023).

- **Konsentrasi Limbah 100%**

Pada konsentrasi 100%, Cd dalam bak pengumpul mencapai 0,0756 mg/L.

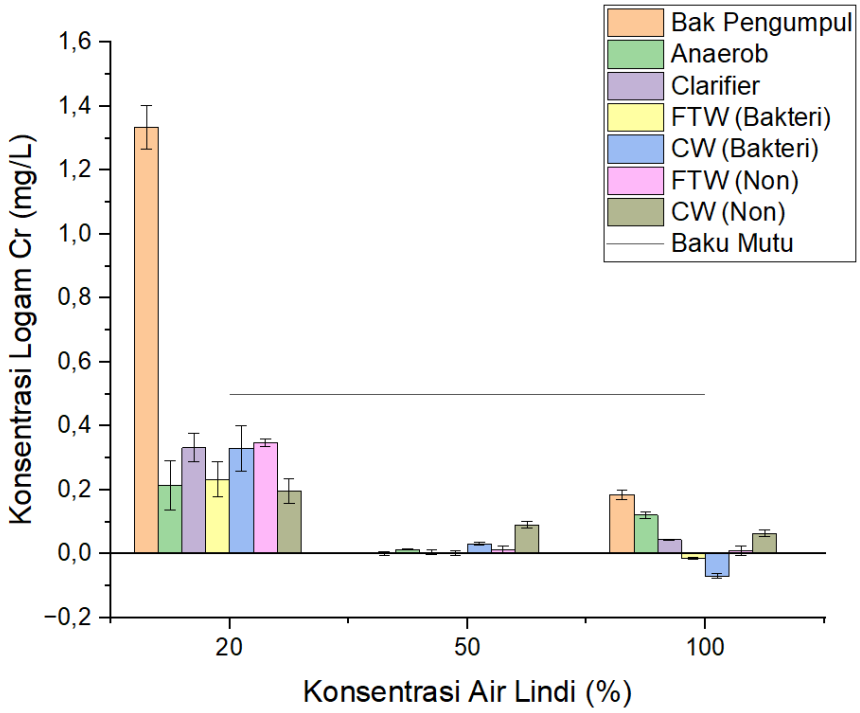
Setelah pengolahan anaerobik, nilai menurun menjadi 0,0705 mg/L, di clarifier menjadi 0,0570 mg/L. Pada unit FTW (bakteri), terjadi sedikit kenaikan menjadi 0,0749 mg/L dan CW (bakteri) justru menunjukkan peningkatan tajam menjadi 0,1266 mg/L, tertinggi dari seluruh rangkaian, hal ini bisa disebabkan oleh kejenuhan substrat dan gangguan aktivitas mikroba akibat beban organik dan logam berat yang tinggi.

Namun, sistem CW (non-bakteri) menunjukkan hasil yang baik dengan penurunan hingga 0,0604 mg/L, mendekati ambang baku mutu. Ini menunjukkan bahwa meskipun sistem fitoremediasi tanpa bakteri dapat membantu percepatan pengolahan.

4.2.3 Analisis Logam Kromium (Cr) dalam Air Lindi

Kromium (Cr) merupakan salah satu logam berat yang dapat memberikan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan apabila terdapat dalam jumlah berlebih. Dalam penelitian ini, dilakukan analisis terhadap kadar Cr untuk mengetahui perubahan konsentrasinya pada setiap tahapan proses pengolahan air lindi dengan variasi konsentrasi 20%, 50%, dan 100%. Tujuan dari analisis ini

adalah untuk menilai seberapa efektif proses pengolahan dalam menurunkan kandungan Cr.



Gambar 4. 3 Konsentrasi Logam Cr

- **Konsentrasi Limbah 20%**

Pada air lindi dengan konsentrasi 20%, kadar awal logam Cr di bak pengumpul mencapai 1,3338 mg/L, jauh lebih tinggi dari batas aman yang ditetapkan, yaitu 0,5 mg/L. Setelah diproses melalui reaktor anaerob, kadar Cr menurun cukup besar menjadi 0,2144 mg/L, menunjukkan bahwa proses biologis ini cukup efektif dalam mengurangi logam berat dengan bantuan mikroorganisme anaerob. Namun, saat masuk ke tahap clarifier, kadar Cr justru naik menjadi 0,3236 mg/L, hal ini bisa dikarenakan logam yang sebelumnya mengendap kembali terlepas dari lumpur. Pada tahap berikutnya, kadar Cr di unit FTW dengan bakteri turun lagi menjadi 0,2339 mg/L, tetapi justru naik di CW dengan bakteri menjadi 0,3300 mg/L. Sementara itu, pada sistem tanpa bakteri, FTW mencatat kadar Cr sebesar 0,3488 mg/L, dan hasil terbaik ditunjukkan oleh CW tanpa bakteri dengan kadar 0,1965 mg/L. Secara keseluruhan, semua sistem menunjukkan penurunan kadar Cr dibandingkan awal, meskipun tidak semuanya mampu menurunkan hingga di bawah baku mutu. Hasil ini menandakan bahwa sistem FTW dengan

tambahan mikroba (bioaugmentasi) mampu mempercepat pengurangan logam berat secara lebih efektif namun tidak dengan CW bakteri.

- **Konsentrasi Limbah 50%**

Pada konsentrasi air lindi 50%, kadar awal logam Cr dari bak pengumpul sangat rendah yaitu 0,0009 mg/L, sudah jauh di bawah ambang batas baku mutu (0,5 mg/L). Meski demikian, setelah melewati reaktor anaerob, kadar Cr sedikit meningkat menjadi 0,0145 mg/L, hal ini disebabkan oleh pelepasan logam dari material organik atau endapan. Penurunan kembali terjadi di clarifier hingga mencapai 0,0051 mg/L. Pada unit FTW bakteri, kadar Cr menjadi sangat rendah yaitu 0,0017 mg/L, menunjukkan performa optimal sistem tersebut dalam menghilangkan logam berat Cr melalui kombinasi proses fitoremediasi dan aktivitas mikroba. Sistem CW bakteri menghasilkan kadar Cr 0,0323 mg/L, sementara sistem FTW non bakteri menghasilkan kadar 0,0145 mg/L dan 0,0910 mg/L pada CW non bakteri. Semua hasil akhir tetap jauh di bawah nilai ambang batas yang ditetapkan, mencerminkan kinerja yang baik dari seluruh sistem.

- **Konsentrasi Limbah 100%**

Pada air lindi dengan konsentrasi 100%, kadar awal logam Cr tercatat sebesar 0,1846 mg/L. Meskipun angka ini masih berada di bawah batas aman menurut baku mutu (0,5 mg/L), tetap saja berpotensi mencemari lingkungan jika tidak ditangani dengan baik. Setelah melewati proses anaerob, kadar Cr turun menjadi 0,1220 mg/L, yang menunjukkan bahwa mikroorganisme anaerob cukup efektif dalam membantu mengurangi kandungan logam ini. Kemudian, saat masuk ke tahap clarifier, kadar Cr menurun menjadi 0,0443 mg/L. Hasil pengolahan yang paling baik terlihat pada sistem FTW dan CW yang menggunakan bakteri, di mana kadar Cr bahkan menjadi negatif, yaitu -0,0134 mg/L pada FTW bakteri dan -0,0685 mg/L pada CW bakteri. Nilai negatif ini menunjukkan bahwa logam telah terserap atau mengendap sepenuhnya hingga tidak terdeteksi oleh alat ukur SSA (<LOQ). Sistem tanpa bakteri pun memberikan hasil yang sangat baik, yaitu 0,0100 mg/L pada FTW dan -0,0568 mg/L pada CW. Secara keseluruhan, semua tahapan pengolahan mampu menurunkan kadar Cr hingga jauh di bawah ambang batas, bahkan ada yang tidak terdeteksi sama sekali. Hasil ini sejalan dengan penelitian Renaud et al., (2021) yang menjelaskan bahwa kombinasi proses biologis dan

tanaman air dalam sistem wetland sangat efektif dalam menghilangkan logam berat seperti Cr(VI) dari air limbah.

4.3 Efisiensi *Removal* (%) Logam Berat Pada Proses Pengolahan

Data efesiensi *removal* pada proses pengolahan untuk kadar timbal (Pb), kadmium (Cd) dan kromium (Cr) selama pengolahan selama 64 hari dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4. 3 Efisiensi *Removal* (%)

Treatment	Efisiensi *Removal* (%)								
	Pb			Cd			Cr		
	20 %	50 %	100 %	20 %	50 %	100 %	20 %	50 %	100 %
Bak Pengumpul	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Anaerob	86	0	6	84	0	7	84	0	34
Clarifier	76	30	27	75	0	25	75	0	76
FTW (Bakteri)	84	0	23	83	0	1	82	0	107
CW (Bakteri)	77	0	17	75	0	0	75	0	137
FTW (Non Bakteri)	75	0	28	74	0	12	74	0	95
CW (Non Bakteri)	87	0	31	88	0	20	85	0	131

Berdasarkan Tabel 4.3, efisiensi removal logam berat (Pb, Cd, dan Cr) menunjukkan variasi yang signifikan pada masing-masing unit pengolahan. Pada bak pengumpul, tidak terjadi penurunan kandungan logam (0%) karena unit ini hanya berfungsi sebagai tempat penampungan awal tanpa adanya proses biologis maupun fitoremediasi.

Pada reaktor anaerob, efisiensi removal Pb dan Cd relatif tinggi pada konsentrasi 20% (masing-masing 86% dan 84%), namun menurun drastis pada konsentrasi 100% (6% dan 7%). Hal ini menunjukkan bahwa bakteri anaerob berperan melalui mekanisme presipitasi logam sebagai senyawa sulfida serta biosorpsi pada biomassa. Akan tetapi, pada konsentrasi tinggi terjadi efek toksik yang menekan aktivitas mikroba sehingga kemampuan degradasi logam menurun. Pola serupa terlihat pada Cr dengan penurunan dari 84% (20%) menjadi 34% (100%).

Pada clarifier, efisiensi removal berkisar 27–76% untuk Pb, 25–75% untuk Cd, dan 30–76% untuk Cr. Mekanisme utama yang terjadi adalah pengendapan (sedimentasi) partikel tersuspensi yang mengikat logam. Namun, efektivitas clarifier menurun pada konsentrasi tinggi karena partikel yang tersedia untuk mengikat logam semakin terbatas.

Sementara itu, pada FTW (bakteri), efisiensi removal cukup tinggi terutama pada konsentrasi 20% (Pb 84%, Cd 83%, dan Cr 82%). Mekanisme ini terjadi akibat adanya kombinasi antara fitoremediasi oleh tanaman terapung dan aktivitas mikroba yang membentuk biofilm pada akar, sehingga terjadi biosorpsi, bioakumulasi, dan transformasi logam. Namun, pada konsentrasi 100% efisiensi Pb dan Cd menurun, yang mengindikasikan adanya hambatan akibat toksisitas logam terhadap mikroba. Menariknya, pada Cr justru terjadi peningkatan removal hingga 107%, yang diduga berkaitan dengan kemampuan bakteri dan tanaman dalam mereduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) yang lebih mudah mengendap.

Hasil serupa terlihat pada CW (bakteri), di mana efisiensi Pb menurun dari 77% (20%) menjadi 17% (100%), sedangkan Cr meningkat hingga 137% pada konsentrasi 100%. Hal ini mengindikasikan bahwa mekanisme fitoremediasi oleh tanaman Typha yang didukung bakteri rizosfer lebih efektif untuk logam Cr dibanding Pb maupun Cd.

Pada unit FTW (non bakteri), efisiensi removal hanya mengandalkan fitoremediasi oleh tanaman, sehingga hasilnya lebih rendah dibandingkan unit dengan bakteri tambahan (Pb 75–28%, Cd 74–12%, dan Cr 74–95%). Mekanisme penyerapan logam terbatas pada akumulasi oleh akar dan jaringan tanaman, sehingga kapasitasnya berkurang pada konsentrasi tinggi.

Hal yang sama juga terjadi pada CW (non bakteri), dengan efisiensi Pb cukup tinggi (87–31%) dan Cr stabil (85–131%), namun Cd relatif rendah (0–20%). Kondisi ini menunjukkan bahwa tanaman Typha lebih efektif dalam mengakumulasi Pb dan Cr dibanding Cd, yang kemungkinan berkaitan dengan perbedaan sifat kimia logam dan kemampuan transpor ion pada jaringan tanaman.

Secara umum, efisiensi removal logam berat lebih tinggi pada konsentrasi rendah (20%) karena tanaman dan mikroba masih mampu menoleransi logam. Namun, pada konsentrasi tinggi (100%) sebagian besar efisiensi menurun akibat

efek toksik terhadap mikroba serta saturasi kapasitas penyerapan tanaman, kecuali pada Cr yang justru mengalami peningkatan removal karena mekanisme reduksi dan pengendapan yang lebih dominan.

Pengolahan biologis didahulukan dalam rangkaian pengolahan air lindi karena tahap ini mampu menurunkan beban organik, amonia, serta sebagian fraksi logam terlarut yang bersifat toksik, sehingga kualitas efluen menjadi lebih stabil dan aman bagi tanaman pada tahap fitoremediasi. Lindi mentah umumnya memiliki karakteristik kandungan COD, BOD, serta NH_4^+ yang tinggi dengan toksisitas logam yang dapat menghambat pertumbuhan tanaman apabila langsung diterapkan pada sistem fitoremediasi (Wang & Qiao, 2024). Selain itu, proses biologis dapat mengubah spesiasi logam melalui mekanisme biosorpsi, presipitasi, maupun transformasi redoks, sehingga menurunkan bioavailabilitas logam berat yang berpotensi meracuni tanaman. Beberapa studi juga menunjukkan bahwa keberhasilan fitoremediasi meningkat apabila air limbah terlebih dahulu dipretreatment secara biologis, karena kondisi tersebut mendorong pertumbuhan tanaman dan aktivitas mikroorganisme rizosfer yang lebih optimal (Gupta et al., 2020; Kaushik et al., 2023). Dengan demikian, urutan biologis → fitoremediasi dinilai lebih efektif dan efisien dibandingkan apabila fitoremediasi ditempatkan di awal, karena lindi mentah cenderung terlalu toksik untuk mendukung keberlangsungan hidup tanaman (Jamrah et al., 2024).

4.3.1 *Removal* Logam Timbal (Pb)

Efisiensi pengurangan logam Pb menunjukkan hasil yang fluktuatif berdasarkan tingkat konsentrasi dan unit pengolahan yang digunakan. Pada lindi 20%, penghilangan terbaik terjadi pada CW tanpa bakteri (87%), diikuti unit anaerob (86%) dan FTW dengan bakteri (84%). Sebaliknya, pada konsentrasi 50%, efisiensi pada sebagian besar unit menunjukkan nilai negatif, yang mengindikasikan bahwa logam Pb mengalami pelepasan kembali ke dalam air, terutama pada FTW dan CW non-bakteri. Saat konsentrasi meningkat ke 100%, efisiensi tertinggi tetap ditunjukkan oleh CW non-bakteri (81%), sedangkan beberapa unit lain seperti FTW bakteri masih memperlihatkan kinerja yang

menurun. Hal ini menandakan bahwa efektivitas unit CW non-bakteri lebih stabil dalam menangani Pb pada berbagai konsentrasi.

4.3.2 *Removal* Logam Kadmium (Cd)

Logam Cd cenderung sulit dihilangkan secara konsisten oleh sistem yang digunakan. Pada lindi 20%, clarifier dan CW tanpa bakteri menunjukkan hasil cukup baik, namun unit lain seperti CW bakteri dan anaerob mengalami efisiensi negatif. Kondisi serupa terjadi pada konsentrasi 50%, di mana seluruh unit mencatatkan penurunan efisiensi, bahkan menunjukkan peningkatan kadar Cd setelah proses. Hanya pada lindi 100% beberapa unit seperti clarifier dan CW tanpa bakteri kembali mencatatkan efisiensi positif, meskipun masih tergolong rendah. Ini menunjukkan bahwa sistem pengolahan memiliki keterbatasan dalam mengatasi Cd, khususnya pada kadar yang sudah rendah.

4.3.3 *Removal* Logam Kromium (Cr)

Efisiensi pengolahan Cr menunjukkan hasil yang ekstrem dan tidak stabil. Pada konsentrasi 20%, banyak unit mencatat efisiensi negatif sangat tinggi, terutama pada CW tanpa bakteri dan reaktor anaerob, yang mengindikasikan kemungkinan pelepasan kembali Cr dari substrat atau lumpur. Namun demikian, FTW bakteri dan clarifier masih mencatat penurunan yang positif. Ketika konsentrasi naik ke 50%, hanya sebagian unit yang menunjukkan efisiensi positif. Sementara itu, pada konsentrasi 100%, efisiensi meningkat secara signifikan di hampir seluruh unit, terutama CW bakteri dan CW non-bakteri. Hal ini menunjukkan bahwa sistem lebih optimal dalam menangani Cr saat konsentrasi awalnya cukup tinggi.

Secara umum, efektivitas sistem pengolahan dalam menurunkan logam berat dipengaruhi oleh jenis logam, konsentrasi awal, serta karakteristik masing-masing unit. Logam Pb lebih mudah dikendalikan dibandingkan Cd dan Cr, khususnya oleh unit CW non-bakteri. Cd menunjukkan kecenderungan sulit dihilangkan, terutama pada konsentrasi menengah. Cr memiliki efisiensi yang sangat bergantung pada konsentrasi, dengan kinerja terbaik tercapai saat konsentrasi tinggi. Secara keseluruhan, sistem CW non-bakteri memberikan performa paling stabil,

sedangkan penambahan bakteri tidak selalu meningkatkan efisiensi dan perlu dikaji lebih lanjut dalam konteks lingkungan operasionalnya.

4.4 Pengujian Konsentrasi Logam (Pb, Cd, Cr) Pada Tanaman

Pengujian konsentrasi logam berat dalam jaringan tanaman dilakukan untuk mengetahui sejauh mana kemampuan tanaman *Typha angustifolia* dalam menyerap logam Pb, Cd, dan Cr selama proses pengolahan limbah lindi berlangsung. Analisis ini penting sebagai indikator efektivitas sistem lahan basah terhadap akumulasi logam pada biomassa tanaman, baik pada sistem Floating Treatment Wetland (FTW) maupun Constructed Wetland (CW). Pengujian dilakukan terhadap empat jenis reaktor, yaitu :

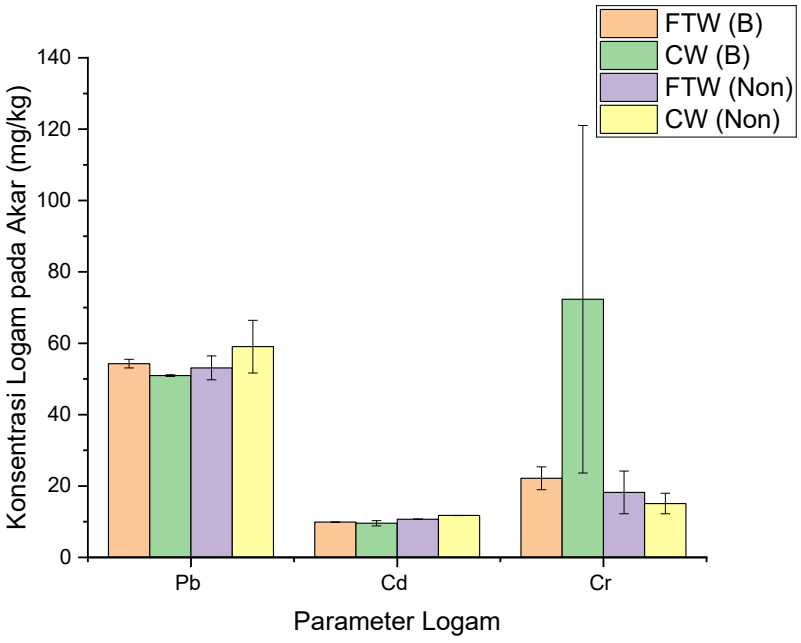
FTW (Bakteri)

CW (Bakteri)

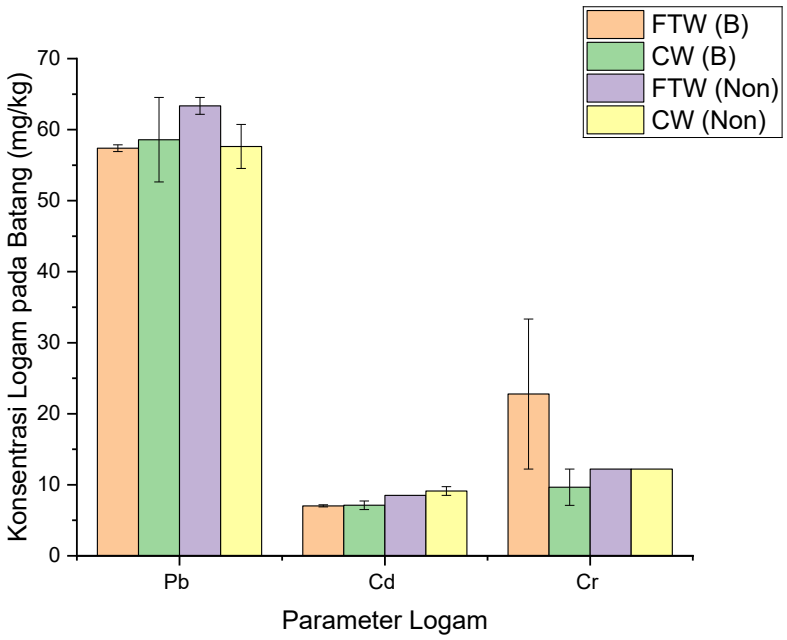
FTW (Non)

CW (Non)

Hasil pengukuran konsentrasi logam pada tanaman dari masing-masing reaktor dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan 4.5 , yang mencerminkan perbedaan kemampuan fitoremediasi antar sistem yang digunakan.



Gambar 4. 4 Konsetrasi Logam Pada Akar Tanaman



Gambar 4. 5 Konsentrasi Logam Pada Batang Tanaman

Hasil analisis menunjukkan bahwa akumulasi logam berat Pb, Cd, dan Cr pada tanaman Typha angustifolia umumnya lebih tinggi pada bagian akar dibandingkan batang. Konsentrasi Pb tertinggi ditemukan pada akar tanaman yang tumbuh di reaktor CW tanpa bakteri dan CW dengan bakteri, yang mencerminkan efektivitas sistem wetland, khususnya pada zona perakaran, dalam menjerap logam. Hal ini sejalan dengan pernyataan (Rezania et al., 2015), yang menyebutkan bahwa akar tanaman air memiliki peran penting dalam menyerap dan menahan logam melalui mekanisme bioakumulasi.

Pada logam Cd, meskipun kadarnya lebih rendah dibandingkan Pb, akumulasi tetap dominan di akar, terutama pada reaktor FTW dan CW dengan bakteri. Temuan ini menunjukkan adanya dukungan dari mikroorganisme dalam meningkatkan penyerapan logam oleh tanaman.

Sementara itu, logam Cr menunjukkan akumulasi yang sangat tinggi, khususnya pada akar tanaman dari reaktor CW tanpa bakteri, dengan nilai mencapai lebih dari 120 mg/kg. Hal ini menunjukkan kemampuan Typha angustifolia dalam menyerap Cr secara signifikan di akar tanpa banyak transpor ke batang. Penelitian (Ali et al., 2013) juga menyatakan bahwa sebagian besar tanaman air memiliki

kecenderungan untuk menyimpan logam berat di akar sebagai mekanisme pertahanan terhadap organ yang lebih sensitif.

Secara keseluruhan, akar menjadi bagian utama dalam proses akumulasi logam berat, dengan CW non-bakteri menunjukkan performa paling tinggi, terutama terhadap logam Cr. Ini membuktikan bahwa keberadaan tanaman itu sendiri memainkan peran kunci dalam proses fitoremediasi, meskipun mikroorganisme tetap berperan dalam mendukung efektivitasnya tergantung pada kondisi sistem dan jenis logam yang diolah.

4.5 Biomassa Pada Tanaman *Typha angustifolia*

Biomassa tanaman merupakan indikator penting dalam menilai efektivitas sistem pengolahan limbah menggunakan teknologi lahan basah. Data berat basah dan kering pada bagian batang dan akar tanaman, baik pada sistem Floating Treatment Wetland (FTW) maupun Constructed Wetland (CW) dengan atau tanpa penambahan bakteri, memberikan gambaran tentang respon tanaman terhadap berbagai perlakuan pengolahan limbah. Hasil biomassa pada jaringan batang dan akar pada tanaman dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 4 Biomassa Pada Tanaman

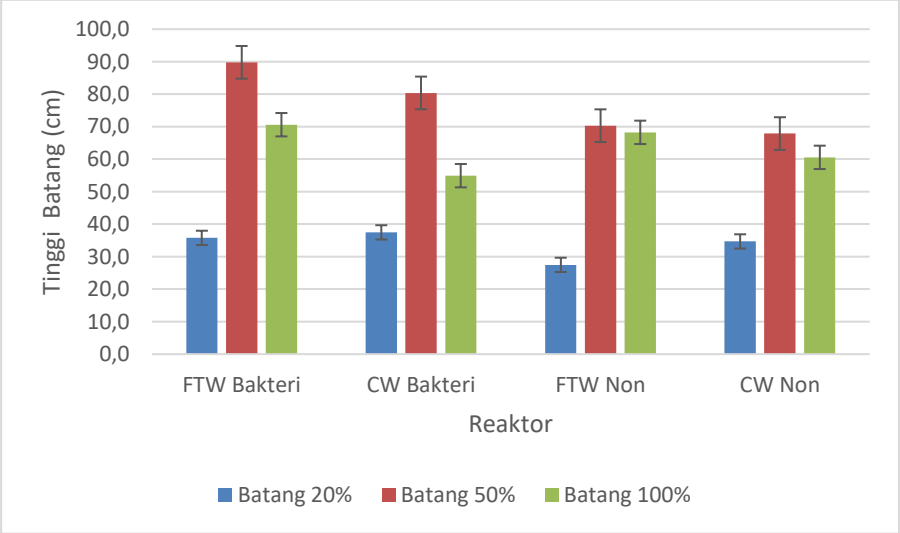
Reaktor	Kode	Batang (g)		Akar (g)		SE			
		Berat Basah	Berat Kering	Berat Basah	Berat Kering	Berat Basah Batang	Berat Kering Batang	Berat Basah Akar	Berat Kering Akar
FTW (Bakteri)	A1	9,5002	1,6569	75,2545	22,3502	2,27	0,39	23,71	5,88
	A2	9,1360	1,4438	125,3671	29,0328				
	A3	2,2965	0,2822	24,7255	3,3462				
	A4	0,7530	0,1596	27,7615	9,3135				
	Average	**5,4214**	**0,8856**	**63,2772**	**16,0107**				
CW (Bakteri)	B1	7,8689	1,7696	132,8810	37,8382	0,69	0,11	22,38	6,82
	B2	6,4958	1,5416	91,0392	16,1160				
	B3			146,0074	24,08085				
	B4			47,0483	5,4405				
	Average	**7,1824**	**1,6556**	**104,2440**	**20,8689**				
FTW (Non)	C1	3,7161	0,5680	104,4021	27,2029	0,95	0,32	16,80	5,10
	C2	3,0168	1,1903	43,6716	5,9446				
	C3	0,5723	0,0909	27,1919	5,2159				
	C4			68,7660	12,3801				
	Average	**2,4351**	**0,6164**	**61,0079**	**12,6859**				
CW (Non)	D1	4,1329	2,4280	9,5865	2,7015	1,13	0,62	2,71	0,79
	D2	5,3147	2,2042	13,5451	3,7951				
	D3	1,5010	0,4610	18,9375	5,4170				
	Average	**3,6495**	**1,6977**	**14,0230**	**3,9712**				

Data yang menunjukkan berat basah dan kering dari batang dan akar tanaman pada sistem Floating Treatment Wetland (FTW) dan Constructed Wetland (CW), baik yang diberi tambahan bakteri maupun tanpa bakteri, menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan dalam hal biomassa tanaman. Pada FTW dengan penambahan bakteri, rata-rata berat basah batang mencapai 5,42 gram dan berat keringnya 0,89 gram, sementara berat basah dan kering pada akar masing-masing adalah 63,28 gram dan 16,01 gram. Hal ini menunjukkan bahwa akar tanaman tumbuh lebih dominan dibandingkan dengan batang, menandakan adaptasi tanaman untuk meningkatkan penyerapan nutrisi dan udara dari lingkungan pengolahan limbah. Di sisi lain, pada CW yang diperkaya dengan bakteri, berat basah batang sedikit lebih tinggi, yaitu 7,18 gram dengan berat kering 1,66 gram, sedangkan akar menunjukkan berat basah 104,24 gram dan berat kering 20,87 gram, yang mengandung biomassa akar yang lebih besar dibandingkan FTW. Hal ini mengimplikasikan efektivitas pengolahan limbah menggunakan CW dengan dukungan bakteri dalam menunjang pertumbuhan akar tanaman, yang sangat penting dalam proses fitoremediasi. Sebaliknya, pada FTW tanpa penambahan bakteri, berat tanaman menurun baik pada batang maupun akar, dengan rata-rata berat batang basah hanya 2,44 gram dan berat kering 0,62 gram. Sedangkan, CW tanpa bakteri menunjukkan angka yang sedikit lebih tinggi yaitu berat basah batang 3,65 gram dan berat kering 1,70 gram. Berat basah dan berat kering akar pada kedua sistem tanpa bakteri juga menurun secara signifikan dibandingkan dengan yang menggunakan bakteri.

Data ini memperkuat temuan dalam literatur ilmiah yang mengemukakan bahwa bakteri endofit dan rhizosfer berperan penting dalam merangsang pertumbuhan tanaman, terutama pada bagian akar, sehingga meningkatkan kemampuan tanaman dalam mengambil nutrisi dan menghilangkan polutan. Menurut Khare (2018), bakteri endofit dapat membantu meningkatkan pertumbuhan tanaman dengan memperbaiki kondisi fisik dan kimia tanah serta membantu tanaman beradaptasi di lingkungan yang tercemar.

4.6 Kondisi Pertumbuhan & Kematian Tanaman *Typha angustifolia*

Selain meneliti seberapa baik masing-masing reaktor serta kemampuan tanaman Typha angustifolia dan bakteri dalam mendegradasi logam berat (Pb, Cd dan Cr) pada limbah lindi, penelitian ini juga mengamati pertumbuhan tanaman berdasarkan tinggi batang dan panjang akar. Pada reaktor FTW dan CW, terdapat 6 rumpun tanaman di setiap reaktor, dengan jumlah tanaman antara 2 hingga 3 per rumpun. Perbandingan dapat dilihat pada Gambar 4.6 dan 4.7.

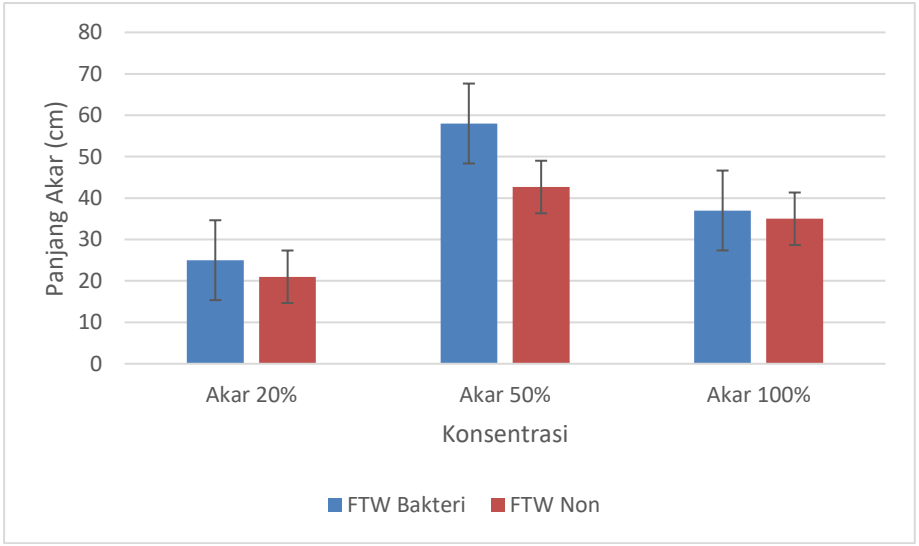


Gambar 4. 6 Tinggi Tanaman Typha angustifolia

Pada air lindi dengan konsentrasi 20%, tinggi batang tanaman tertinggi terdapat pada CW Bakteri sebesar 37,5 cm, diikuti oleh CW Non Bakteri (34,7 cm), FTW Bakteri (35,8 cm), dan FTW Non Bakteri (27,5 cm). Ini menunjukkan bahwa sistem CW memberikan kondisi pertumbuhan batang yang lebih stabil pada konsentrasi rendah. Panjang akar pada sistem FTW juga menunjukkan hasil yang baik, di mana FTW Bakteri menghasilkan akar sepanjang 25 cm, lebih tinggi dibandingkan FTW Non Bakteri 21 cm. Perbedaan ini menunjukkan bahwa penambahan bakteri dalam sistem FTW dapat mendukung pertumbuhan akar tanaman yang lebih baik. Hal ini diperkuat oleh temuan dari (Taha et al., 2024) yang menyatakan bahwa konsentrasi lindi 20% justru dapat meningkatkan biomassa tunas dan pemanjangan akar karena kemampuannya menyediakan unsur hara nitrogen dan elemen lain yang bersifat nutrien bagi tanaman.

Pada konsentrasi air lindi 50%, terlihat adanya pertumbuhan batang yang sangat tinggi terutama pada FTW Bakteri (89,8 cm) dan CW Bakteri (80,4 cm), menunjukkan bahwa pada konsentrasi sedang, kombinasi sistem wetland dengan bakteri mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal. Hal serupa terlihat pada panjang akar, di mana FTW Bakteri menunjukkan panjang akar tertinggi (58 cm), dibandingkan FTW Non Bakteri (42,7 cm). Hasil ini mengindikasikan bahwa kehadiran bakteri berperan dalam mendorong pertumbuhan baik batang maupun akar tanaman.

Pada konsentrasi air lindi 100%, tinggi batang mengalami penurunan dibanding konsentrasi 50%. FTW Bakteri mencatat tinggi batang sebesar 70,6 cm, sedangkan CW Bakteri 54,9 cm. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi lindi yang lebih tinggi mulai memberikan tekanan atau stres terhadap pertumbuhan tanaman. Namun, FTW Non Bakteri memiliki hasil penurunan cukup stabil dengan batang setinggi 68,3 cm dan CW Non bakteri dengan batang setinggi 60,6 cm, hasil ini menunjukkan bahwa tanaman tanpa bakteri memiliki toleransi terhadap kondisi ekstrem. Untuk panjang akar, FTW Bakteri menunjukkan hasil sedikit lebih baik (37 cm) dibandingkan FTW Non Bakteri (35 cm). Meskipun terjadi penurunan, kedua sistem masih menunjukkan kemampuan tanaman dalam bertahan di lingkungan dengan beban polutan tinggi.



Gambar 4. 7 Tinggi Akar Pada Reaktor FTW Bakteri dan FTW Non

Berdasarkan hasil pengukuran konsentrasi pencemar selama penelitian dan pengamatan kondisi fisik tanaman, penggunaan tanaman *Typha angustifolia* dalam sistem wetland yang dipadukan dengan penambahan konsorsium bakteri terbukti dapat menjadi alternatif yang efektif untuk mengolah limbah dari industri lindi.

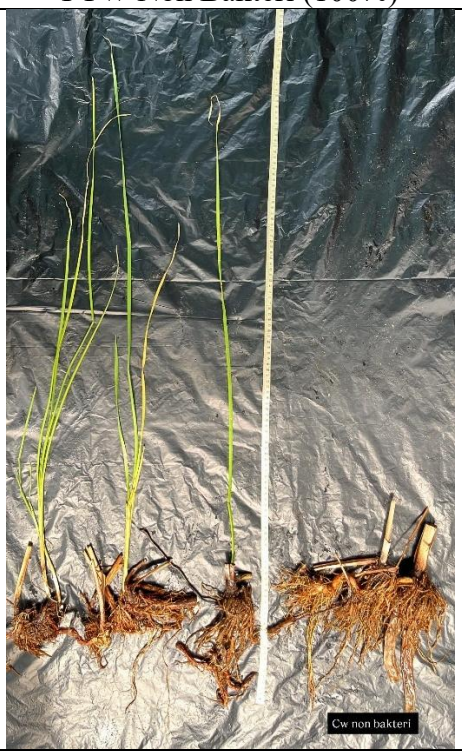
Pada konsentrasi lindi 20%, sistem Constructed Wetland (CW) dengan perlakuan bakteri menghasilkan pertumbuhan batang tanaman paling baik, menandakan bahwa sistem ini menyediakan kondisi yang lebih stabil untuk pertumbuhan pada konsentrasi rendah. Selain itu, pada sistem Floating Treatment Wetland (FTW), penambahan bakteri juga mendukung pertumbuhan akar yang lebih panjang dibandingkan tanpa bakteri. Hal ini dapat dijelaskan karena air lindi pada konsentrasi rendah menyediakan nutrisi penting seperti nitrogen yang bermanfaat bagi tanaman, sementara mikroorganisme membantu mengoptimalkan kondisi pertumbuhan dengan meningkatkan ketersediaan nutrisi dan mengurangi senyawa beracun. Kombinasi perlakuan ini memberikan lingkungan yang menguntungkan bagi pertumbuhan tanaman dalam sistem pengolahan air lindi. (Taha et al., 2024)

Tingkat kematian tanaman per-reaktor juga dihitung selain mengamati pertumbuhan tanaman, dengan data yang tercantum pada tabel 4.5. Reaktor yang diinokulasi dengan bakteri endofit menunjukkan tingkat kematian yang lebih rendah dibandingkan reaktor yang hanya menggunakan air limbah tanpa penambahan bakteri. Hal ini disebabkan oleh kemampuan bakteri endofit dalam membantu tanaman beradaptasi dengan berbagai kondisi lingkungan. Data mortalitas tanaman pada sistem Floating Treatment Wetland (FTW) dan Constructed Treatment Wetland (CW), baik dengan maupun tanpa penambahan bakteri, menunjukkan variasi yang cukup signifikan pada berbagai konsentrasi limbah lindi. Pada konsentrasi 20%, tingkat kematian tanaman di kedua sistem ini relatif rendah dan hampir sama, yaitu 33,33% pada FTW (baik dengan bakteri maupun tanpa bakteri) dan nol pada CW. Hal ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi rendah tanaman tersebut masih dapat bertahan dengan baik. Namun, ketika konsentrasi meningkat menjadi 50%, mortalitas tanaman juga meningkat. Di FTW, tingkat kematian tetap sama pada 44,44% untuk perlakuan dengan dan tanpa bakteri, sedangkan di CW mortalitas naik menjadi 55,56% pada kedua perlakuan.

Kondisi ini menunjukkan bahwa tanaman di CW mengalami tekanan lebih besar pada tingkat konsentrasi limbah dibandingkan di FTW. Pada konsentrasi tertinggi yaitu 100%, kematian tanaman meningkat tajam, terutama pada FTW tanpa bakteri yang mencapai angka 83,33%, sementara FTW dengan bakteri tetap bertahan di angka 44,44%. Di CW, angka mortalitas mencapai 66,67% tanpa bakteri dan 44,44% dengan bakteri. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan bakteri dapat secara signifikan membantu tanaman untuk lebih tahan terhadap stres akibat limbah dengan konsentrasi tinggi. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian yang menyatakan bahwa bakteri endofit dan rhizosfer berperan penting dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap kondisi stres lingkungan dan polutan logam berat pada sistem lahan basah. Studi oleh Khare (2018) menyatakan bahwa bakteri endofit dapat memperbaiki kualitas tanah dan membantu tanaman beradaptasi dengan lingkungan yang tercemar, sehingga mengurangi kematian tanaman secara signifikan.

Tabel 4. 5 Tingkat Kematian Tanaman *Typha angustifolia*

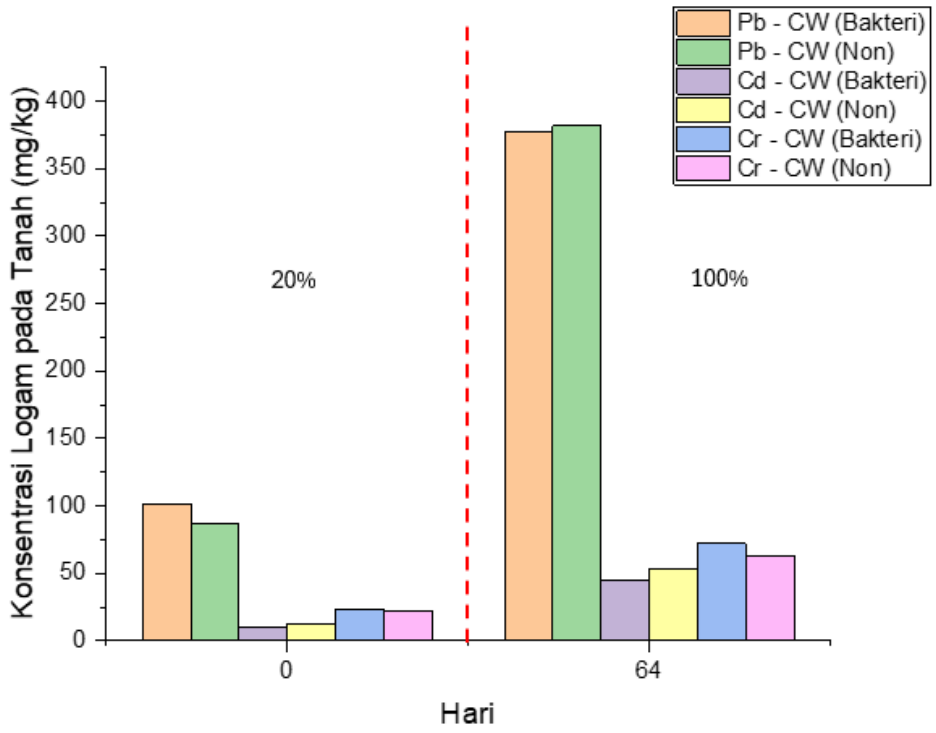
Konsentrasi	Floating Treatment Wetland		Constructed Treatment Wetland	
	Reaktor	Mortalitas	Reaktor	Mortalitas
20%	Bakteri	33,33 %	Bakteri	0 %
	Non	33,33 %	Non	0 %
50%	Bakteri	44,44 %	Bakteri	55,56 %
	Non	44,44 %	Non	55,56 %
100%	Bakteri	44,44 %	Bakteri	44,44 %
	Non	83,33 %	Non	66,67 %

	
FTW Bakteri (100%)	FTW Non Bakteri (100%)
	
CW Bakteri (100%)	CW Non Bakteri (100%)

Gambar 4. 8 Kondisi Tanaman Konsentrasi 100%

4.7 Pengujian Konsentrasi Logam Pada Tanah di Awal & Akhir

Pengujian konsentrasi logam berat (Pb, Cd, Cr) pada tanah dalam penelitian ini untuk memahami efektivitas aplikasi sistem pengolahan limbah Constructed Wetland terhadap pergerakan, akumulasi, dan remobilisasi logam berat dari air lindi ke media tanah. Pengujian konsentrasi pada tanah sebelum (awal) dan sesudah (akhir) perlakuan memberikan gambaran efektivitas sistem pengolahan menggunakan CW dengan dan tanpa penambahan bakteri. Hasil pengukuran disajikan untuk konsentrasi limbah 20% dan 100%, baik pada tanah CW dengan bakteri maupun tanpa bakteri, sebagaimana ditampilkan pada gambar 4.9.



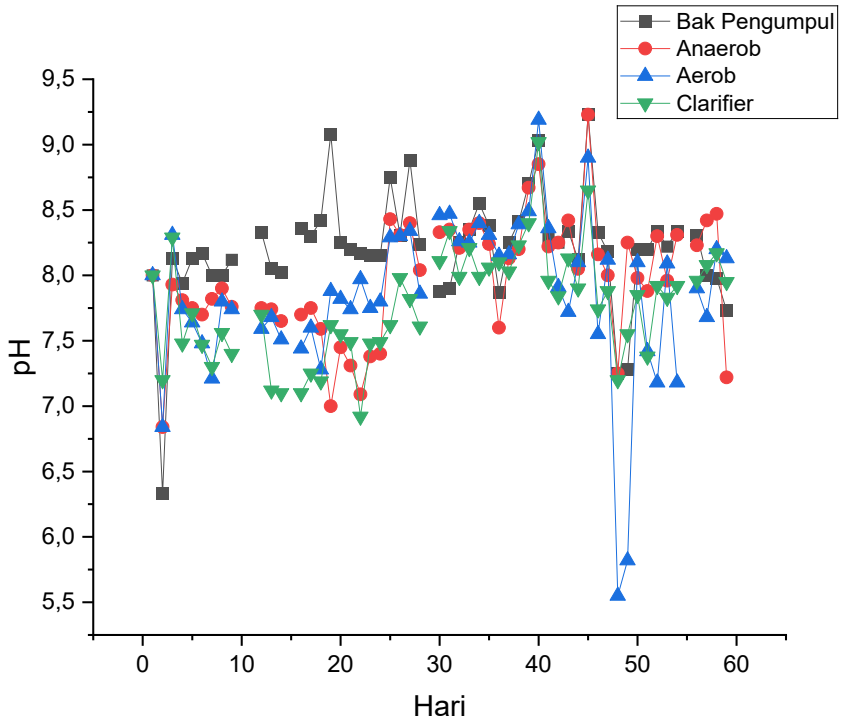
Gambar 4. 9 Konsentrasi Logam Pada Tanah CW (Bakteri dan Non)

Hasil pengujian menunjukkan bahwa akumulasi logam berat pada tanah sistem Constructed Wetland (CW) dipengaruhi oleh jenis logam, konsentrasi lindi, dan keberadaan bakteri. Untuk Pb, konsentrasinya meningkat tajam dari 20% pada hari ke-0 hingga mencapai 100% pada hari ke-64, dengan nilai tertinggi 377,88 mg/kg (CW bakteri) dan 382,02 mg/kg (CW non-bakteri). Hal ini menunjukkan bahwa tanah berperan dominan sebagai media penjerap Pb, sementara penambahan bakteri tidak memberikan perbedaan signifikan. Pada Cd, meskipun akumulasinya

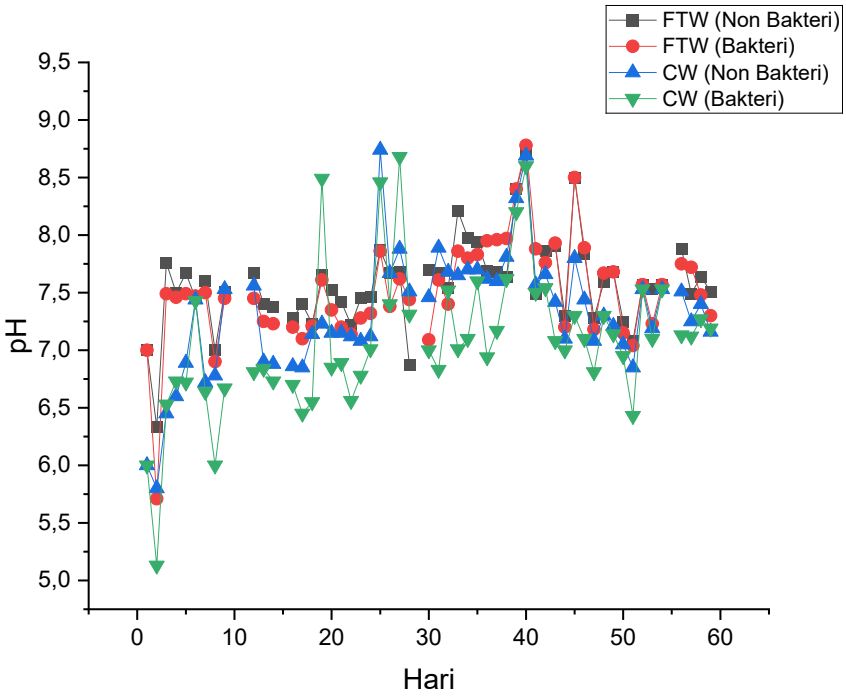
lebih rendah dibanding Pb, terjadi peningkatan dari 10,60 mg/kg menjadi 44,89 mg/kg pada CW bakteri, dan dari 12,83 mg/kg menjadi 52,99 mg/kg pada CW non-bakteri. Kondisi ini menunjukan Cd relatif lebih mudah terlarut sehingga lebih banyak terikat pada media tanpa bakteri. Sementara itu, Cr menunjukkan akumulasi cukup tinggi pada konsentrasi 100%, yaitu 71,88 mg/kg pada CW bakteri dan 63,11 mg/kg pada CW non-bakteri, yang menegaskan bahwa Cr cenderung stabil terserap di tanah, terutama pada beban polutan tinggi. Secara keseluruhan, tanah pada sistem CW berfungsi sebagai penyerap utama logam berat, dengan kecenderungan ikatan tertinggi untuk Pb, diikuti Cr, sedangkan Cd relatif lebih sulit diikat. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menjelaskan bahwa tanah dalam wetland mampu menahan logam melalui mekanisme presipitasi, adsorpsi, dan interaksi dengan bahan organik serta mikroorganisme (Rezania et al., 2015; Vymazal, 2011).

4.8 Derajat Keasaman (pH) Air

Dilakukan pengujian parameter harian berupa derajat keasaman (pH) air pada setiap reaktor selama pengolahan. Grafik pengukuran pH pada masing masing reaktor dapat dilihat pada gambar 4.10. dan 4.11.



Gambar 4. 10 Hasil Pengukuran pH Pada Reaktor Bak Pengumpul-Clarifier



Gambar 4. 11 Hasil Pengukuran pH Pada Reaktor FTW dan CW

Berdasarkan Peraturan Daerah Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) Nomor 7 Tahun 2016 mengenai Pengelolaan Air Limbah Domestik, nilai ambang pH yang diperbolehkan untuk limbah cair yang dibuang ke perairan adalah dalam kisaran 6,0-9,0. Batas ini ditetapkan guna menjaga kestabilan ekosistem akuatik serta mencegah kerusakan lingkungan dan gangguan terhadap organisme air. Pengamatan terhadap pH air lindi dilakukan selama ± 60 hari melalui beberapa tahapan proses pengolahan, yaitu melalui reaktor Bak Pengumpul, Anaerob, Aerob, Clarifier, FTW (Floating Treatment Wetland) tanpa bakteri, FTW dengan bakteri, CW (Constructed Wetland) tanpa bakteri, serta CW dengan bakteri.

Pada tahapan awal pengolahan, yaitu dari Bak Pengumpul hingga Clarifier, nilai pH rata-rata berkisar antara 7,1-8,3 yang masih memenuhi syarat baku mutu. Namun, pada hari tertentu seperti hari ke-48 dan ke-49, terjadi penurunan pH yang cukup drastis pada unit Aerob hingga di bawah batas minimum (sekitar 5,5 dan 5,9). Penurunan ini bisa disebabkan oleh akumulasi senyawa organik yang belum sepenuhnya terurai atau karena proses anaerobik yang berlangsung tidak maksimal.

Sistem FTW dan CW tanpa bakteri menunjukkan kestabilan pH yang cukup baik namun cenderung lebih rendah dibandingkan dengan sistem yang mengandung bakteri. Rata-rata pH pada FTW Non Bakteri berada pada kisaran 7,0–7,6, sedangkan CW Non Bakteri berada pada rentang 7,1–7,5. Walaupun nilai ini masih sesuai dengan standar baku mutu, sistem ini lebih rentan mengalami fluktuasi, terutama saat terjadi lonjakan beban pencemar. Sebaliknya, sistem pengolahan yang mengintegrasikan fitoremediasi dengan mikroorganisme (baik pada FTW maupun CW) menunjukkan kestabilan pH yang lebih baik. Rata-rata nilai pH dalam sistem ini berkisar antara 7,2 hingga 7,8, yang merupakan kondisi optimal untuk aktivitas mikroorganisme dan efektivitas proses bioremediasi.

Data grafik menunjukkan bahwa variasi nilai pH pada sistem CW dengan bakteri lebih kecil dibandingkan unit lainnya, mengindikasikan kestabilan yang lebih tinggi. Hal ini membuktikan bahwa keberadaan mikroba tidak hanya berfungsi dalam mempercepat penurunan logam berat, tetapi juga mampu menjaga keseimbangan parameter kimia seperti pH. Stabilitas pH ini sangat krusial dalam sistem pengolahan limbah karena memengaruhi efisiensi proses biokimia oleh mikroorganisme, kelarutan logam berat, serta kinerja fitoremediasi secara

keseluruhan. Penelitian oleh Barir & Dwiratna Wulandari (2022) menunjukkan bahwa *wetland* buatan yang menggunakan tanaman Typha angustifolia dan bakteri nitrifikasi mampu mempertahankan pH dalam kisaran ideal (6,5–8,0), serta efektif dalam menurunkan konsentrasi BOD, COD, dan logam berat.

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa sistem kombinasi pengolahan biologis dan fitoremediasi menggunakan *Typha angustifolia* mampu menurunkan konsentrasi logam berat Pb, Cd, dan Cr pada air lindi dengan efektivitas yang bervariasi sesuai dengan konsentrasi awal dan unit pengolahan. Pada konsentrasi rendah (20%), reaktor anaerob menunjukkan kinerja paling baik dalam menurunkan Pb hingga 86%, sementara unit CW non-bakteri juga efektif dengan efisiensi 87%. Untuk Cd, penghilangan relatif rendah dan tidak konsisten, dengan efisiensi tertinggi pada clarifier dan CW non-bakteri meskipun masih di bawah 50%. Sementara itu, Cr menunjukkan hasil yang fluktuatif, tetapi pada konsentrasi tinggi (100%) CW non-bakteri mencatat efisiensi signifikan hingga 81%, menandakan efektivitas sistem meningkat pada beban polutan tinggi.

Penambahan konsorsium bakteri (*Bacillus cereus, Bacillus velezensis, Staphylococcus xylosus*, dan PGPR) pada FTW dan CW cenderung mempercepat penurunan logam, khususnya pada Pb dan Cr, meskipun peningkatannya tidak selalu konsisten dibanding sistem tanpa bakteri. Hasil analisis biomassa menunjukkan bahwa logam lebih banyak terakumulasi di akar dibanding batang, dengan akumulasi tertinggi Pb sebesar 382,02 mg/kg pada CW non-bakteri dan Cr hingga 71,88 mg/kg pada CW bakteri. Cd juga terdeteksi pada akar, namun konsentrasinya relatif rendah (<53 mg/kg). Secara keseluruhan, sistem ini terbukti sebagai pendekatan alternatif yang layak dikembangkan untuk pengolahan air lindi secara efisien dan berkelanjutan.

5.2 Saran

Agar sistem pengolahan ini dapat berfungsi lebih optimal, terdapat beberapa saran yang dapat diperhatikan :

1. Perlu dilakukan penyesuaian terhadap desain dan operasional unit reaktor, seperti pengaturan waktu tinggal, jenis media tanam, dan pemantauan parameter kualitas air seperti pH dan suhu secara rutin.

2. Penelitian lanjutan juga perlu mengkaji kombinasi yang lebih adaptif antara tanaman lokal dan mikroorganisme untuk mengoptimalkan proses remediasi.
3. Pengujian sistem pada skala lebih besar perlu dilakukan untuk mengevaluasi performa dan stabilitasnya dalam kondisi nyata. Mengingat efektivitas CW tanpa bakteri yang tinggi, pendekatan ini dapat menjadi alternatif pengolahan air lindi yang lebih terjangkau secara ekonomi dan lebih mudah diimplementasikan, terutama di daerah yang memiliki keterbatasan fasilitas teknologi dan sumber daya.

DAFTAR PUSTAKA

Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere*, *91*(7), 869–881. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075

Alya Zakiyah Rahmayani. (2022). *Potensi Restorasi Lahan Gambut Menggunakan Aplikasi Bakteri Endofit Dengan Tanaman Typha Latifolia Dalam Sistem Wetland*.

Amarullah, Z. M., & Triastianti, R. D. (2019). PEMANFAATAN FLOATING PLANT DALAM HORIZONTAL SAND FILTER TERHADAP PENURUNAN KADAR PO4 3- PADA LIMBAH CAIR LAUNDRY. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, *19*(2). https://doi.org/10.37412/jrl.v2i2.7

Ananda Salim, Y. (2021). EFEKTIVITAS SISTEM CONSTRUCTED WETLAND SEBAGAI PENGOLAHAN LIMBAH BATIK ECOPRINT MENGGUNAKAN TANAMAN KANGKUNG AIR. *Jurnal Syntax Fusion*, *1*(08), 299–311. https://doi.org/10.54543/fusion.v1i08.48

Andrya Prasidya, D., Sa'adah, N., Wilda Aniriani, G., & Rahadian Wicaksono, R. (2025). Isolasi dan Penapisan Bakteri Yang Resisten Terhadap Logam Pb (Timbal) dari Air Tambak Sekitar Bekas Pabrik Peleburan Aki di Pucuk-Lamongan. *JURNAL ENVIROTEK*, *16*(2). https://doi.org/10.33005/envirotek.v16i2.375

Astuti, F. A., Syafrudin, S., & Susilowati, I. (2023). Kajian Status Mutu Air Sungai Akibat Buangan Air Lindi TPA Piyungan di Kabupaten Bantul. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, *21*(4), 881–887. https://doi.org/10.14710/jil.21.4.881-887

Azzahra, S., Mia, M., Rustama, M. &, Suryanti, S. P., & Si, M. (n.d.). *Test of the Bacillus cereus Bacterial Capabilities of Ex-Mining Soil Isolates in Reducing Heavy Metals of Fe, Mn, Pb, and Cd*.

Barir, M., & Dwiratna Wulandari Program Studi Teknik Lingkungan, C. (2022). *POTENSI TANAMAN CATTAIL (Typha angustifolia) DAN PAPIRUS (Cyperus papyrus) DALAM MENURUNKAN KADAR POLUTAN COD DAN TSS PADA OUTLET INSTALASI PENGOLAHAN LINDI TPA KLOTOK KOTA KEDIRI MENGGUNAKAN METODE CONSTRUCTED WETLAND*.

Budiarsa Suyasa, I. W., Sukarta, I. N., & Diantariani, N. P. (2024). Laboratory Wastewater Treatment Using a Combination of Anaerobic Bioaccumulation Systems and Plant Biofiltration. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, *25*(4), 197–204. https://doi.org/10.12912/27197050/183610

Endrinaldi, E. (2009). LOGAM-LOGAM BERAT PENCEMAR LINGKUNGAN DAN EFEK TERHADAP MANUSIA. *Jurnal Kesehatan Masyarakat Andalas*, *4*(1), 42–46. https://doi.org/10.24893/jkma.v4i1.42

Fajri, J. A., Nurmiyanto, A., Sa'adah, N. N., Nuryana, I., Anfaresi, S. L. N., & Lathifah, A. N. (2024). Effectiveness of Endophytes Bacteria in Enhancing Floating Treatment Wetland to Treat Textile Wastewater. *Journal of Ecological Engineering*, *25*(3), 12–24. https://doi.org/10.12911/22998993/177593

Hadiwidodo, M., Oktiawan, W., Primadani, A. R., Parasmita, B. N., & Gunawan, I. (n.d.). *PENGOLAHAN AIR LINDI DENGAN PROSES KOMBINASI BIOFILTER ANAEROB-AEROB DAN WETLAND*.

Headley, T. R., & Tanner, C. C. (2012). Constructed Wetlands With Floating Emergent Macrophytes: An Innovative Stormwater Treatment Technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *42*(21), 2261–2310. https://doi.org/10.1080/10643389.2011.574108

Hidayah, E. N., Djalalembah, A., Asmar, G. A., & Cahyonugroho, O. H. (2018). Pengaruh Aerasi Dalam Constructed Wetland Pada Pengolahan Air Limbah Domestik. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, *16*(2), 155. https://doi.org/10.14710/jil.16.2.155-161

Hossain, F. (2004). Activated sludge bulking: a review of causes and control strategies. . *Journal of the Institution of Engineers(India), Part EN, Environmental Engineering Division, 86*, 1–6.

Jamrah, A., AL-Zghoul, T. M., & Al-Qodah, Z. (2024). An Extensive Analysis of Combined Processes for Landfill Leachate Treatment. *Water*, *16*(12), 1640. https://doi.org/10.3390/w16121640

Khare, E., Mishra, J., & Arora, N. K. (2018). Multifaceted interactions between endophytes and plant: Developments and Prospects. In *Frontiers in Microbiology* (Vol. 9, Issue NOV). Frontiers Media S.A. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02732

Khinanty, R. D., & Retnaningdyah, C. (2017). Potensi Beberapa Hidromakrofita Lokal untuk Meningkatkan Kualitas Air Lindi Tempat Pemrosesan Akhir Sampah Talangagung, Kecamatan Kepanjen, Kabupaten Malang. *Biotropika: Journal of Tropical Biology*, *5*(1), 1–7. https://doi.org/10.21776/ub.biotropika.2016.005.01.1

Munawar, A. (2011). *REMBESAN AIR LINDI (LEACHATE) DAMPAK PADA TANAMAN PANGAN DAN KESEHATAN - CORE Reader*. https://core.ac.uk/reader/19892260

Murtafi'ah, N., & Aeni, S. R. N. (2023). Identifikasi Bakteri Pereduksi Logam Pb dalam Bioremediasi Sampel Air Sungai Citarum Menggunakan Analisis Gen 16s rRNA. *Borneo Journal of Medical Laboratory Technology*, *5*(2), 303–315. https://doi.org/10.33084/bjmlt.v5i2.5102

Muryani, E., Wahyuning, I., Prodi, W., Lingkungan, T., Mineral, T., Veteran, U. ", & Yogyakarta, ". (2018). Kadar BOD Dan COD Air Lindi Dengan Perlakuan Fitoremediasi Tanaman Teratai (Nymphaea Sp.) Dan Apu-Apu (Pistia Stratiotes L.) (Studi Kasus TPA Jetis Purworejo). In *Ika Wahyuning Widiarti ~* (Vol. 2, Issue 2).

Pengujian Standar Instrumen Tanah dan Pupuk Penyusun, B., Sulaeman Lenita Herawaty Linca Anggria Usman Hesti Eka Tantika Rini Prihatini Puji Wuningrum Penyunting, E., Adamy Sipahutar Heri Wibowo Adha Fatmah Siregar Ladiyani Retno Widowati Tia Rostaman, I., Supardi Ulfa Mutamimah Ananda Febrian, D., Pertanian Republik Indonesia Jl Tentara Pelajar No, K., & Penelitian Pertanian, K. (n.d.). ANALISIS KIMIA TANAH, TANAMAN, AIR, DAN PUPUK Penerbit. In *Petunjuk Teknis Edisi* (Vol. 3). https://tanahpupuk.bsip.pertanian.go.id

Perda Daerah DIY No.7 Tentang "Baku Mutu Air Limbah Untuk Kegiatan IPAL Domestik Komunal." (2016).

Prastitianti, D., & Purwanti, I. F. (2024). KAJIAN FITOREMEDIASI AIR TANAH TERCEMAR LINDI TPA DENGAN KANDUNGAN LOGAM (STUDI KASUS: FITOREMEDIASI FE DAN BESI DI LAHAN BEKAS

TPA KEPUTIH). *Jurnal Purifikasi*, *23*(1), 17–26. https://doi.org/10.12962/purifikasi.v23i1.457

Puspitarini, R., Ismawati, R., Nuryono, & Wildan Mizana, M. (2023). STUDI PENYEBARAN LOGAM BERAT TIMBAL DAN KADMIUM AIR LINDI DAN AIR SUMUR DI TPA PASURUHAN KABUPATEN MAGELANG. *Jurnal Sains &Teknologi Lingkungan*, *15*(2), 134–145. https://doi.org/10.20885/jstl.vol15.iss2.art3

Puspitasari, R. F., Prasetya, A., & Rahayuningsih, E. (2019). Penurunan Logam Hg dalam Air Menggunakan Sistem Sub-Surface Flow Constructed Wetland: Studi Efektivitas. *Jurnal Rekayasa Proses*, *13*(1), 41. https://doi.org/10.22146/jrekpros.39339

Rahadi, B., Susanawati, L. D., & Agustianingrum, R. (2019). Bioremediasi Logam Timbal (Pb) Menggunakan Bakteri Indigenous Pada Tanah Tercemar Air Lindi (Leachate). *Jurnal Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, *6*(3), 11–18. https://doi.org/10.21776/ub.jsal.2019.006.03.2

Ratnawati, E., Ermawati dan Siti Naimah Balai Besar Kimia dan Kemasan, R., Perindustrian Jl Balai Kimia No, D. R., Rebo, P., & Timur, J. (2010). TEKNOLOGI BIOSORPSI OLEH MIKROORGANISME, SOLUSI ALTERNATIF UNTUK MENGURANGI PENCEMARAN LOGAM BERAT (BIOSORPTION TECHNOLOGY BY MICROORGANISMS, AN ALTERNATIVE SOLUTION FOR DECREASE HEAVY METAL POLLUTION). In *Jurnal Kimia dan Kemasan* (Vol. 32, Issue 1).

Renaud, M., El Morabet, H., Reis, F., da Silva, P. M., Siciliano, S. D., Sousa, J. P., & Natal-da-Luz, T. (2021). Are structural and functional endpoints of soil communities similarly affected by metal mixtures? – A terrestrial model ecosystem approach. *Science of The Total Environment*, *795*, 148909. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148909

Rezagama, A., Purwono, P., Hadiwidodo, M., Yustika, M., & Prabowo, Z. N. (2017). PENGOLAHAN AIR LINDI TPA JATIBARANG MENGGUNAKAN FENTON (H2O2 – Fe). *Jurnal Presipitasi : Media Komunikasi Dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, *14*(1), 30. https://doi.org/10.14710/presipitasi.v14i1.30-36

Rezania, S., Ponraj, M., Talaiekhozani, A., Mohamad, S. E., Md Din, M. F., Taib, S. M., Sabbagh, F., & Sairan, F. M. (2015). Perspectives of phytoremediation using water hyacinth for removal of heavy metals, organic and inorganic pollutants in wastewater. *Journal of Environmental Management*, *163*, 125–133. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.08.018

Rifa Intan Tanjung. (2024). *SELEKSI BAKTERI ENDOGENIK DAN ENDOFIT UNTUK PENGOLAHAN LIMBAH LINDI MENGGUNAKAN FLOATING WETLAND DALAM MENURUNKAN KADAR AMONIA DAN WARNA*.

Sari, R. N. , & A. A. (2017). *Karakteristik air lindi (leachate) di tempat pembuangan akhir sampah air dingin Kota Padang*.

Sugiarti, S., Setiadewi, N., Oktaviyani, D., & Rohaningsih, D. (2020). Penyisihan Nutrien Nitrogen Pada Limbah Cair Artifisial NPK Menggunakan Sistem Floating Treatment Wetlands (FTWs). *Jurnal Ilmu Lingkungan*, *18*(3), 595–601. https://doi.org/10.14710/jil.18.3.595-601

Suharyadi, H., Lusantono, O. W., Cusna, I. A., Pangestu, W. I., & Qaushar, L. (2022). Pemanfaatan Rawa Buatan (Conctructed Wetland) dengan

Menggunakan Tanaman Lembang (Typha Angustifolia) untuk Remediasi di Wilayah Tambang. *Jurnal Teknologi Pertambangan*, *8*(2), 63. https://doi.org/10.31315/jtp.v8i2.9288

Taha, R. S., AlKassasbeh, J. Y. M., Alharbi, O. M. L., Bouqellah, N. A., Sweity, A., & Al-Shawabkeh, J. D. (2024). Characterization of Landfill Leachate and their Toxic Effects on Germination and Seedling Growth of Various Plant Species – A Case Study. *Journal of Ecological Engineering*, *25*(11), 335–353. https://doi.org/10.12911/22998993/193481

Tangahu, B. V., & Ningsih, D. A. (2016). Uji Penurunan Kandungan COD, BOD pada Limbah Cair Pewarnaan Batik Menggunakan Scirpus Grossus dan Iris Pseudacorus dengan Sistem Pemaparan Intermittent. *Jurnal Sains &Teknologi Lingkungan*, *8*(2), 121–130. https://doi.org/10.20885/jstl.vol8.iss2.art6

Terhadap Kualitas Air dan Lingkungan Perkebunan, J., Literatur, S., Prisilla, C., Nur Insani, I., Rizky, M., Syamsia, S., Arsat, Y., Yusuf, H., & Yani, A. (2024). Analisis Dampak Pencemaran Lindi Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Desa Artikel Review. *Jurnal Kolaboratif Sains*, *7*(5), 1806–1812. https://doi.org/10.56338/jks.v7i5.5254

Thineza Ardea Pramesti, & Mohamad Mirwan. (2023a). Penurunan TSS, COD, dan Total-Nitrogen pada Air Lindi dengan Metode Constructed Wetland Tanaman Typha Angustifolia. *INSOLOGI: Jurnal Sains Dan Teknologi*, *2*(4), 745–753. https://doi.org/10.55123/insologi.v2i4.2309

Vymazal, J. (2011). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience. *Environmental Science & Technology*, *45*(1), 61–69. https://doi.org/10.1021/es101403q

Wang, J., & Qiao, Z. (2024). A comprehensive review of landfill leachate treatment technologies. In *Frontiers in Environmental Science* (Vol. 12). Frontiers Media SA. https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1439128

Widiastuti, H., Wulandari, D., & Zarate, J. (2020). Utilization of selected microorganisms in enhancing the growth of selected plant in ex gold mining soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *583*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/583/1/012007

LAMPIRAN

Lampiran 1 Alat dan Bahan



Botol Kaca



Erlenmeyer 100 mL



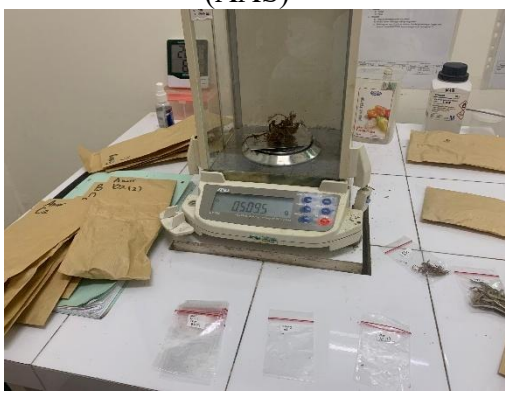
Hot Plate



Spektrofotometer Serapan Atom (AAS)



Corong gekas & Labu Ukur



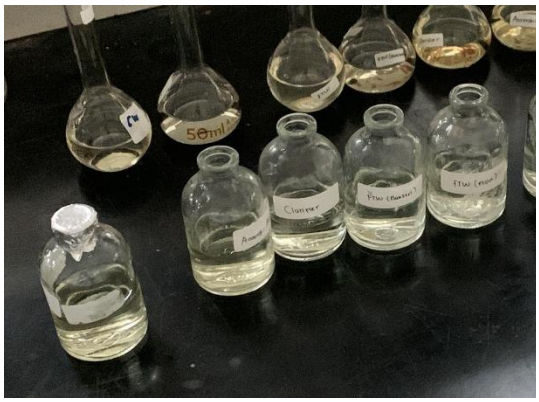
Timbangan Analitik



Mortar



Ruang Asam



Botol Vial



pH Meter

Lampiran 2 Dokumentasi



Pengambilan Sample



Pemisahan Jaringan Tanaman



Proses Penyaringan Sample



Injeksi Bakteri Pada Tanaman

Lampiran 3 Konsentrasi Logam Pada Air

Konsentrasi (mg/L)									
Reaktor	**Logam Pb**			**Logam Cd**			**Logam Cr**		
	20%	**50%**	**100 %**	**20%**	**50%**	**100 %**	**20%**	**50%**	**100 %**
	0	**28**	**64**	**0**	**28**	**64**	**0**	**28**	**64**
Bak Pengumpul	1,6542	0,0917	0,8219	0,5285	0,0449	0,0756	1,3338	0,0009	0,1846
Anaerob	0,2370	0,0973	0,7695	0,0837	0,0521	0,0705	0,2144	0,0145	0,1220
Clarifier	0,3912	0,0640	0,6028	0,1309	0,0588	0,0570	0,3326	0,0051	0,0443
FTW (Bakteri)	0,2625	0,2093	0,6290	0,0915	0,0660	0,0749	0,2339	0,0017	-0,0134
CW (Bakteri)	0,3879	0,1794	0,6855	0,1299	0,0723	0,1266	0,3300	0,0323	-0,0685
FTW (Non Bakteri)	0,4123	0,2060	0,5890	0,1373	0,0642	0,0665	0,3488	0,0145	0,0100
CW (Non Bakteri)	0,2137	0,2625	0,5711	0,0637	0,0862	0,0604	0,1965	0,0910	-0,0568

Lampiran 4 Rata- rata Tinggi Tanaman & Panjang Akar

Treatment	Batang 20%	Batang 50%	Batang 100%
FTW Bakteri	35,8	89,8	70,6
CW Bakteri	37,5	80,4	54,9
FTW Non	27,5	70,3	68,3
CW Non	34,7	67,9	60,6

Treatment	Akar 20%	Akar 50%	Akar 100%
FTW Bakteri	25	58	37
FTW Non	21	42,7	35

Lampiran 5 Biomassa Tanaman

Reaktor	Kode	Batang (g)		Akar (g)	
		Berat Basah	Berat Kering	Berat Basah	Berat Kering
FTW (Bakteri)	A1	9,5002	1,6569	75,2545	22,3502
	A2	9,1360	1,4438	125,3671	29,0328
	A3	2,2965	0,2822	24,7255	3,3462
	A4	0,7530	0,1596	27,7615	9,3135
	Average	**5,4214**	**0,8856**	**63,2772**	**16,0107**
CW (Bakteri)	B1	7,8689	1,7696	132,8810	37,8382
	B2	6,4958	1,5416	91,0392	16,1160
	B3			146,0074	24,08085
	B4			47,0483	5,4405
	Average	**7,1824**	**1,6556**	**104,2440**	**20,8689**
FTW (Non)	C1	3,7161	0,5680	104,4021	27,2029
	C2	3,0168	1,1903	43,6716	5,9446
	C3	0,5723	0,0909	27,1919	5,2159
	C4			68,7660	12,3801
	Average	**2,4351**	**0,6164**	**61,0079**	**12,6859**
CW (Non)	D1	4,1329	2,4280	9,5865	2,7015
	D2	5,3147	2,2042	13,5451	3,7951
	D3	1,5010	0,4610	18,9375	5,4170
	Average	**3,6495**	**1,6977**	**14,0230**	**3,9712**

Lampiran 6 Konsentrasi Logam Pada Tanah CW (Bakteri dan Non)

Konsentrasi (mg/kg)						
Reaktor	**Logam Pb**		**Logam Cd**		**Logam Cr**	
	20%	**100%**	**20%**	**100%**	**20%**	**100%**
	0	**64**	**0**	**64**	**0**	**64**
Tanah CW (Bakteri)	101,6280	377,8822	10,5987	44,8872	23,3926	71,8762
Tanah CW (Non)	86,7414	382,0174	12,8280	52,9936	22,6271	63,1117

Lampiran 7 Hasil Pengukuran pH

Hari	Bak Pengumpul	Anaerob	Aerob	Clarifier	FTW (Non Bakteri)	FTW (Bakteri)	CW (Non Bakteri)	CW (Bakteri)
1	8	8	8	8	7	7	6	6
2	6,3	6,8	6,8	7,2	6,3	5,7	5,8	5,1
3	8,13	7,93	8,31	8,29	7,76	7,49	6,45	6,53
4	7,94	7,81	7,74	7,48	7,5	11.02	6,6	6,73
5	8,13	7,75	7,64	7,71	7,67	7,49	6,89	6,72
6	8,17	7,7	7,48	7,47	7,45	7,47	7,44	7,43
7	8	7,82	7,21	7,3	7,6	7,5	6,72	6,64
8	8	7,9	7,8	7,56	7	6,9	6,78	6
9	8,12	7,76	7,74	7,4	7,51	7,45	7,53	6,67
10								
11								
12	8,33	7,75	7,59	7,7	7,67	7,45	7,56	6,81
13	8,05	7,74	7,68	7,12	7,4	7,25	6,9	6,84
14	8,02	7,65	7,51	7,1	7,38	7,23	6,88	6,73
15								
16	8,36	7,7	7,44	7,1	7,28	7,2	6,86	6,7
17	8,3	7,75	7,6	7,25	7,4	7,1	6,85	6,45
18	8,42	7,59	7,28	7,19	7,23	7,21	7,14	6,55
19	9,08	7	7,88	7,62	7,65	7,61	7,23	8,49
20	8,25	7,45	7,82	7,55	7,52	7,35	7,15	6,85
21	8,2	7,31	7,74	7,49	7,42	7,2	7,15	6,89
22	8,17	7,09	7,97	6,92	7,22	7,14	7,12	6,56
23	8,15	7,38	7,75	7,48	7,45	7,28	7,08	6,78
24	8,15	7,4	7,8	7,49	7,46	7,32	7,12	7,01
25	8,75	8,43	8,29	7,62	7,87	7,86	8,74	8,46
26	8,31	8,31	8,3	7,98	7,67	7,38	7,67	7,4
27	8,88	8,4	8,34	7,82	7,68	7,62	7,88	8,68
28	8,24	8,04	7,86	7,61	6,87	7,44	7,51	7,31
29								

30	7,88	8,33	8,46	8,11	7,7	7,09	7,46	7
31	7,9	8,35	8,47	8,34	7,67	7,61	7,89	6,83
32	8,25	8,21	8,26	7,99	7,54	7,4	7,68	7,52
33	8,35	8,35	8,25	8,21	8,21	7,86	7,65	7,01
34	8,55	8,4	8,4	7,99	7,98	7,8	7,7	7,1
35	8,38	8,24	8,31	8,06	7,94	7,83	7,7	7,6
36	7,87	7,6	8,15	8,1	7,69	7,95	7,62	6,94
37	8,25	8,13	8,16	8,03	7,68	7,96	7,6	7,17
38	8,41	8,2	8,39	8,23	7,64	7,97	7,81	7,62
39	8,7	8,67	8,49	8,4	8,4	8,4	8,32	8,2
40	9,03	8,85	9,19	9,02	8,72	8,78	8,69	8,6
41	8,29	8,22	8,36	7,96	7,49	7,88	7,57	7,5
42	8,25	8,25	7,91	7,84	7,86	7,76	7,66	7,54
43	8,34	8,42	7,72	8,13	7,91	7,93	7,42	7,08
44	8,12	8,05	8,1	7,9	7,3	7,2	7,1	7
45	9,23	9,23	8,9	8,65	8,5	8,5	7,8	7,3
46	8,33	8,16	7,55	7,74	7,84	7,89	7,44	7,1
47	8,18	8	8,12	7,88	7,28	7,18	7,08	6,81
48	7,25	7,25	5,55	7,2	7,59	7,67	7,3	7,3
49	7,28	8,25	5,82	7,55	7,68	7,68	7,21	7,14
50	8,2	7,98	8,1	7,85	7,25	7,15	7,05	6,95
51	8,2	7,9	7,4	7,4	7,1	7,0	6,9	6,4
52	8,34	8,3	7,18	7,92	7,57	7,57	7,53	7,53
53	8,22	7,96	8,09	7,83	7,53	7,23	7,19	7,1
54	8,3	8,3	7,2	7,9	7,6	7,6	7,5	7,5
55								
56	8,31	8,23	7,9	7,96	7,88	7,75	7,51	7,13
57	8	8,42	7,68	8,08	7,49	7,72	7,25	7,12
58	7,98	8,47	8,2	8,17	7,64	7,48	7,4	7,27
59	7,73	7,22	8,13	7,95	7,51	7,3	7,16	7,19

Lampiran 8 Data Konsentrasi Logam Pada Tanaman

Pb

Root (Akar)								
	Y	X						
Treatments	**Replicates Abs**	**Konsentrasi (mg/L)**	**V (mL)**	**W (g)**	**fp**	**Konsentrasi Logam Pb (mg/kg)**	**Average (mg/kg)**	**SE**
A1		0,5311	50	0,5	1	53,11	54,30	0,16
A2		0,5549	50	0,5	1	55,49		0,11
B1		0,5120	50	0,5	1	51,20	50,96	0,13
B2		0,5072	50	0,5	1	50,72		0,11
C1		0,5644	50	0,5	1	56,44	53,11	0,15
C2		0,4977	50	0,5	1	49,77		0,18
D1		0,5168	50	0,5	1	51,68	59,07	0,14
D2		0,6645	50	0,5	1	66,45		0,11

Shoot (Batang)								
Treatments	**Replicates Abs**	**Konsentrasi (mg/L)**	**V (mL)**	**W (g)**	**fp**	**Konsentrasi Logam Pb (mg/kg)**	**Average (mg/kg)**	**SE**
A1		0,5692	50	0,5	1	56,92	57,40	0,36
A2		0,5787	50	0,5	1	57,87		0,15
B1		0,5263	50	0,5	1	52,63	58,59	0,18
B2		0,6454	50	0,5	1	64,54		0,09
C1		0,6454	50	0,5	1	64,54	63,35	0,14
C2		0,6216	50	0,5	1	62,16		0,14
D1		0,6073	50	0,5	1	60,73	57,63	0,32
D2		0,5453	50	0,5	1	54,53		0,24

Cd

Root (Akar)								
	Y	X						
Treatments	**Replicates Abs**	**Konsentrasi (mg/L)**	**V (mL)**	**W (g)**	**fp**	**Konsentrasi Logam Pb (mg/kg)**	**Average (mg/kg)**	**SE**
A1		0,0986	50	0,5	1	9,86	9,88	0,01
A2		0,0990	50	0,5	1	9,90		0,01
B1		0,0884	50	0,5	1	8,84	9,57	0,02
B2		0,1030	50	0,5	1	10,30		0,02
C1		0,1066	50	0,5	1	10,66	10,71	0,01
C2		0,1075	50	0,5	1	10,75		0,01
D1		0,1173	50	0,5	1	11,73	11,75	0,01
D2		0,1177	50	0,5	1	11,77		0,01

Shoot (Batang)								
Treatments	**Replicates Abs**	**Konsentrasi (mg/L)**	**V (mL)**	**W (g)**	**fp**	**Konsentrasi Logam Pb (mg/kg)**	**Average (mg/kg)**	**SE**
A1		0,0688	50	0,5	1	6,88	7,04	0,02
A2		0,0719	50	0,5	1	7,19		0,01
B1		0,0652	50	0,5	1	6,52	7,12	0,02
B2		0,0772	50	0,5	1	7,72		0,02
C1		0,0852	50	0,5	1	8,52	8,52	0,01
C2		0,0852	50	0,5	1	8,52		0,01
D1		0,0852	50	0,5	1	8,52	9,13	0,01
D2		0,0973	50	0,5	1	9,73		0,01

Cr

Root (Akar)

	Y	X						
Treatments	**Replicates Abs**	**Konsentrasi (mg/L)**	**V (mL)**	**W (g)**	**fp**	**Konsentrasi Logam Pb (mg/kg)**	**Average (mg/kg)**	**SE**
A1		0,1895	50	0,5	1	18,95	22,16	0,06
A2		0,2537	50	0,5	1	25,37		0,06
B1		1,2105	50	0,5	1	121,05	72,34	0,07
B2		0,2362	50	0,5	1	23,62		0,07
C1		0,2420	50	0,5	1	24,20	18,21	0,06
C2		0,1222	50	0,5	1	12,22		
D1		0,1798	50	0,5	1	17,98	15,10	0,06
D2		0,1222	50	0,5	1	12,22		

Shoot (Batang)								
Treatments	**Replicates Abs**	**Konsentrasi (mg/L)**	**V (mL)**	**W (g)**	**fp**	**Konsentrasi Logam Pb (mg/kg)**	**Average (mg/kg)**	**SE**
A1		0,1222	50	0,5	1	12,22	22,78	
A2		0,3334	50	0,5	1	33,34		0,09
B1		0,0710	50	0,5	1	7,10	9,66	
B2		0,1222	50	0,5	1	12,22		
C1		0,1222	50	0,5	1	12,22	12,22	
C2		0,1222	50	0,5	1	12,22		
D1		0,1222	50	0,5	1	12,22	12,22	
D2		0,1222	50	0,5	1	12,22		

RIWAYAT HIDUP



Anisa Utami, biasa dipanggil Ica. Lahir di Banjarmasin, Kalimantan Selatan, pada tanggal 4 Desember 2002. Penulis merupakan putri ketiga dari pasangan Bapak Gunawan dan Ibu Erny Yunita. Pendidikan dasar ditempuh di SDN Pemda 5 Banjarmasin, kemudian melanjutkan jenjang menengah di SMPN 19 Banjarmasin dan SMAN 3 Banjarmasin. Setelah menyelesaikan pendidikan menengah atas, penulis melanjutkan studi pada Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Selama menempuh pendidikan di perguruan tinggi, penulis aktif dalam berbagai kegiatan akademik maupun non-akademik, di antaranya terlibat dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan sebagai Sekertaris Dapartemen Terbaik Pengabdian Masyarakat, mengikuti kegiatan kerelawanan, serta berbagai kepanitiaan di lingkungan kampus seperti Kunjungan Panti Asuhan, Bersih Sungai, Bersih Pantai, dan Dusun Binaan. Penulis menjalani program kerja praktik di kota kelahirannya, tepatnya di PT Air Minum Banjarmasin, dengan fokus pada pemantauan pengolahan air minum.

Pada tahun terakhir masa studi, penulis melaksanakan penelitian yang berjudul "*Kombinasi Pengolahan Biologis dan Fitoremediasi dalam Mendegradasi Kandungan Logam pada Air Limbah Lindi*" sebagai bagian dari pemenuhan syarat kelulusan program Sarjana Teknik Lingkungan FTSP UII.