

**PEMANFAATAN *Cyperus papyrus* DALAM MENGURANGI
KADAR BOD/COD DAN NITROGEN AMONIA PADA AIR
LINDI TPA GALUGA**

Ketua:

Dr. Emil Wahdi, S.Si, M.Si

NPI. 201807197507041001

Anggota:

| | |
|-------------------------------------|--------------------|
| Najwa Amelia Rabbani | J0413241008 |
| Neng Apap Apiani | J0413241009 |
| Nixon A.F. Girsang | J0413241010 |
| Tirza Eirene Br Kaban | J0413241034 |
| Adyta Irianty | J0413241035 |
| Rachmadina Insani | J0413241053 |
| Nolyta Fahmaida Nur Shiddiqa | J0413241056 |
| Rizwa Syabani | J0413241083 |
| Muhammad Matin Nazzala | J0413241088 |
| Siti Nur Hapidza | J0413241145 |



**TEKNIK DAN MANAJEMEN LINGKUNGAN
SEKOLAH VOKASI
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

PERNYATAAN MENGENAI LAPORAN PROJECT AKHIR DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa proposal proyek akhir mata kuliah bioremediasi dengan judul “Pemanfaatan *Cyperus papyrus* dalam Mengurangi Kadar BOD/COD dan Nitrogen Amonia pada Air Lindi TPA Galuga” adalah karya milik Kelompok 2 Kelas B2 Program Studi Teknik dan Manajemen Lingkungan, yang diketuai oleh Dosen Matakuliah Bioremediasi dan Asisten Dosen belum diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir proposal proyek akhir ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Mei 2026

Tim Penyusun Project

ABSTRAK

Air lindi yang dihasilkan di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Galuga memiliki konsentrasi pencemar organik dan nitrogen yang sangat tinggi, sehingga berpotensi mencemari badan air dan mengganggu ekosistem sekitar. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas sistem *vertical flow constructed wetland* dengan menggunakan tanaman *Cyperus papyrus* sebagai agen fitoremediasi dalam menurunkan kadar BOD, COD, dan Nitrogen Amonia. Metode penelitian dilakukan melalui pengujian skala laboratorium dengan masa pengamatan selama 15 hari, mencakup pemantauan parameter fisik (suhu, pH, salinitas) dan analisis kimia air di laboratorium IPB. Hasil penelitian menunjukkan kinerja sistem yang sangat memuaskan dengan efisiensi penyisihan COD mencapai 97,19% (turun dari 791 mg/L menjadi 22,2 mg/L) dan Nitrogen Amonia mencapai 97,79% (turun dari 819 mg/L menjadi 18,07 mg/L). Penurunan drastis pada parameter Nitrogen Amonia didorong oleh mekanisme *rhizofiltration* dan peningkatan nilai pH sistem dari 6,3 menjadi 8,58 yang memicu proses volatilisasi gas amonia. Efluen akhir untuk parameter COD telah memenuhi baku mutu Peraturan Menteri LHK Nomor P.59 Tahun 2016, sementara kadar Nitrogen Amonia masih memerlukan waktu detensi tambahan untuk mencapai standar referensi yang lebih ketat.

Kata Kunci: Air lindi, Bioremediasi, *Constructed Wetland*, *Cyperus papyrus*, Nitrogen Amonia

ABSTRACT

Leachate produced at the Galuga Landfill contains high concentrations of organic and nitrogenous pollutants, which pose a significant threat to water bodies and surrounding ecosystems. This study aims to analyze the effectiveness of a vertical flow constructed wetland system using Cyperus papyrus as a phytoremediation agent in reducing BOD, COD, and Ammonia Nitrogen levels. The research was conducted through laboratory-scale testing with a 15-day observation period, including monitoring physical parameters (temperature, pH, salinity) and chemical analysis at the IPB laboratory. The results demonstrated excellent system performance, with COD removal efficiency reaching 97.19% (decreasing from 791 mg/L to 22.2 mg/L) and Ammonia Nitrogen removal efficiency reaching 97.79% (decreasing from 819 mg/L to 18.07 mg/L). The drastic reduction in Ammonia Nitrogen was driven by rhizofiltration mechanisms and an increase in the system's pH from 6.3 to 8.58, which triggered the ammonia gas volatilization process. The final effluent for COD met the environmental quality standards of the Minister of Environment and Forestry Regulation No. P.59 of 2016, while Ammonia Nitrogen levels still require additional detention time to reach stricter reference standards.

Keywords: Ammonia Nitrogen, Bioremediation, Constructed Wetland, Cyperus papyrus, Leachate.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.

| | | |
|--------------|---|--|
| Judul Proyek | : | Pemanfaatan <i>Cyperus papyrus</i> dalam Mengurangi Kadar COD/BOD dan Nitrogen Amonia pada Air Lindi TPA Galuga |
| Ketua | : | Dr. Emil Wahdi, S.Si, M.Si |
| Nama Anggota | : | Najwa Amelia Rabbani J0413241008 Neng Apap Apiani J0413241009 Nixon A.F. Girsang J0413241010 Tirza Eirene Br Kaban J0413241034 Adyta Irianty J0413241035 Rachmadina Insani J0413241053 Nolyta Fahmaida Nur SS J0413241056 Rizwa Syabani J0413241083 Muhammad Matin Nazzala J0413241088 Siti Nur Hapidza J0413241145 |

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga laporan proyek akhir ini berhasil diselesaikan. Tema yang di pilih dalam pelaksanaan proyek Bioremediasi yang dilaksanakan sejak bulan Maret ini ialah pengelolaan air lindi dengan judul “Pemanfaatan *Cyperus papyrus* dalam Mengurangi Kadar BOD/COD dan Nitrogen Amonia pada Air Lindi TPA Galuga”. Terima kasih penulis ucapkan kepada para pembimbing Bapak Dr. Emil Wahdi, S.Si., M.Si., Ibu Dr. Beata Ratnawati, S.T., M.T., serta Asisten Dosen yang telah membimbing dan banyak memberi saran. Di samping itu, penghargaan penulis sampaikan kepada pihak TPA Galuga yang telah memberikan izin untuk melaksanakan proyek ini serta kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan Laporan Proyek Akhir ini, baik secara langsung maupun tidak langsung.

Semoga Laporan Proyek Akhir ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan

Bogor, Mei 2026

Tim Penyusun Project

DAFTAR ISI

| | |
|---|----|
| DAFTAR TABEL | vi |
| DAFTAR GAMBAR | vi |
| DAFTAR LAMPIRAN | vi |
| I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 1 |
| 1.3 Tujuan | 2 |
| 1.4 Manfaat | 2 |
| II TINJAUAN PUSTAKA | 4 |
| 2.1 Air Lindi | 4 |
| 2.2 Fitoremediasi | 4 |
| 2.3 Tanaman <i>Cyperus papyrus</i> | 5 |
| 2.4 Identitas dan Klasifikasi Tanaman <i>Cyperus papyrus</i> | 5 |
| 2.5 Mekanisme <i>Cyperus papyrus</i> dalam Proses Bioremediasi | 6 |
| 2.6 Pengolahan Limbah Cair Air Lindi Menggunakan <i>Constructed Wetland</i> | 6 |
| 2.7 Baku Mutu | 7 |
| 2.7 Perubahan Parameter Ammonium menjadi ammoniak setelah Proses Fitoremediasi | 7 |
| III METODE | 8 |
| 3.1 Lokasi dan waktu | 8 |
| 3.2 Teknik Pengumpulan Data dan Analisis Data | 8 |
| 3.3 Prosedur Kerja | 9 |
| IV HASIL DAN PEMBAHASAN | 12 |
| 4.1 Hasil | 12 |
| 4.2 Pembahasan | 13 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | 22 |
| 5.1 Kesimpulan | 22 |
| 5.2 Saran | 22 |
| DAFTAR PUSTAKA | 23 |
| LAMPIRAN | 27 |

DAFTAR TABEL

| | | |
|---------|---|----|
| Tabel 1 | Parameter baku mutu air lindi | 7 |
| Tabel 2 | Data uji laboratorium parameter inti sebelum dilakukan bioremediasi | 12 |
| Tabel 3 | Perbandingan hasil uji laboratorium dengan baku mutu dan referensi | 12 |
| Tabel 4 | Hasil pengukuran parameter fisik dan kimia air lindi | 12 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|----------|-------------------|----|
| Gambar 1 | Lokasi TPA Galuga | 8 |
| Gambar 2 | Prosedur Kerja | 10 |

LAMPIRAN

| | | |
|-----------|--|----|
| Gambar 3 | Pengambilan air lindi | 27 |
| Gambar 4 | Hasil filtrasi pertama | 27 |
| Gambar 5 | Hasil pengukuran ph awal pengamatan | 27 |
| Gambar 6 | Hasil pengukuran ph akhir pengamatan | 27 |
| Gambar 7 | Hasil pengukuran salinitas dan suhu awal | 27 |
| Gambar 8 | Hasil pengukuran salinitas dan suhu akhir | 27 |
| Gambar 9 | Proses pembuatan alat | 28 |
| Gambar 10 | Penyerahan air lindi setelah bioremediasi ke lab | 28 |
| Gambar 11 | Hasil uji laboratorium parameter air lindi sebelum perlakuan | 28 |
| Gambar 12 | Hasil uji laboratorium parameter air lindi sesudah perlakuan | 28 |

I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peningkatan timbunan sampah organik di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) menyebabkan terbentuknya air lindi yang berpotensi mencemari lingkungan (Prisilla *et al.* 2024). Sampah organik seperti sisa makanan dan limbah pasar mengalami proses dekomposisi yang menghasilkan cairan dengan kandungan bahan organik, senyawa nitrogen, serta zat pencemar lainnya dalam konsentrasi tinggi. Air lindi umumnya memiliki nilai BOD, COD, dan amonium yang tinggi sehingga berpotensi menurunkan kualitas tanah maupun perairan apabila dibuang tanpa pengolahan yang memadai (Meyrita *et al.* 2023). Selain menimbulkan pencemaran lingkungan, kandungan zat pencemar dalam air lindi juga dapat mengganggu kesehatan masyarakat di sekitar TPA (Dari dan Suhartini 2024). Oleh karena itu, diperlukan sistem pengolahan yang efektif, ekonomis, dan berkelanjutan agar air lindi yang dihasilkan memenuhi baku mutu sebelum dilepas ke lingkungan.

Salah satu metode pengolahan yang dapat diterapkan adalah *constructed wetland*, yaitu sistem pengolahan limbah cair yang memanfaatkan interaksi antara tanaman air, media tanam, dan mikroorganisme untuk menguraikan serta menyaring polutan secara alami. Metode ini dinilai efektif dalam menurunkan kadar BOD, COD, dan amonium dengan biaya operasional yang relatif rendah serta lebih ramah lingkungan dibandingkan metode pengolahan konvensional (Meyrita *et al.* 2023). Pada sistem *constructed wetland*, tanaman berperan penting dalam proses penyerapan nutrisi, penyediaan oksigen di zona akar, serta mendukung pertumbuhan mikroorganisme yang membantu proses degradasi bahan pencemar. Oleh sebab itu, pemilihan jenis tanaman menjadi faktor penting dalam menentukan efektivitas pengolahan air lindi (Fajariyah dan Mangkoedihardjo 2017).

Beberapa tanaman yang umum digunakan dalam sistem *constructed wetland* antara lain eceng gondok (*Eichhornia crassipes*), kangkung air (*Ipomoea aquatica*), dan *cattail* (*Typha angustifolia*) karena mampu menyerap bahan organik dan nutrisi dari limbah cair (Salim 2021). Namun, dalam penelitian ini dipilih tanaman *papyrus* (*Cyperus papyrus*) sebagai agen bioremediasi karena memiliki sistem perakaran yang lebat dan biomassa yang tinggi sehingga mampu meningkatkan proses filtrasi, penyerapan polutan, serta menyediakan area yang luas bagi pertumbuhan mikroorganisme pengurai bahan pencemar. Selain itu, akar *papyrus* mampu meningkatkan aktivitas mikroorganisme pada zona *rizosfer* sehingga proses biodegradasi bahan organik berlangsung lebih optimal. *Cyperus papyrus* memiliki kemampuan yang baik dalam menyisihkan pencemar pada sistem *vertical subsurface flow constructed wetland*, dengan efisiensi penurunan BOD sebesar 80,69%, COD sebesar 69,87%, total fosfor sebesar 50%, dan amonium sebesar 69,69% (García-Ávila 2020). Selain efektif dalam menyisihkan bahan organik dan nutrisi, *C papyrus* juga memiliki toleransi yang baik terhadap limbah dengan kandungan pencemar tinggi sehingga dinilai berpotensi sebagai agen bioremediasi yang efektif dan berkelanjutan dalam pengolahan air lindi.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana karakteristik awal air lindi yang dihasilkan dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) sebelum dilakukan pengolahan?
2. Bagaimana kinerja sistem *constructed wetland* dalam menurunkan kadar parameter pencemar utama pada air lindi?
3. Bagaimana efektivitas tanaman papyrus (*Cyperus papyrus*) dalam proses fitoremediasi air lindi hasil pengolahan *constructed wetland*?
4. Bagaimana efisiensi kombinasi *constructed wetland* dan fitoremediasi dalam meningkatkan kualitas air lindi agar memenuhi baku mutu lingkungan?

1.3 Tujuan

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan

1. Menganalisis karakteristik awal air lindi sebelum proses pengolahan.
2. Mengevaluasi kemampuan *constructed wetland* dalam menurunkan konsentrasi parameter pencemar pada air lindi.
3. Menilai efektivitas tanaman papyrus (*Cyperus papyrus*) sebagai media fitoremediasi air lindi.
4. Mengetahui tingkat efisiensi sistem kombinasi *constructed wetland* dan fitoremediasi dalam menghasilkan kualitas air lindi yang lebih baik dan ramah lingkungan.

1.4 Manfaat

Berdasarkan tujuan diatas maka dapat diperoleh manfaat yaitu:

1. Menganalisis karakteristik awal air lindi sebelum proses pengolahan.
 - Mengetahui kondisi awal air lindi berdasarkan parameter kualitas air seperti BOD, COD, amonium, dan parameter pencemar lainnya.
 - Mengidentifikasi tingkat pencemaran air lindi sebelum dilakukan pengolahan.
2. Mengevaluasi kemampuan sistem *constructed wetland* dalam menurunkan konsentrasi parameter pencemar pada air lindi.
 - Mengetahui kemampuan sistem *constructed wetland* dalam menurunkan kadar pencemar pada air lindi.
 - Mengidentifikasi perubahan kualitas air lindi setelah proses pengolahan menggunakan sistem *constructed wetland*.
3. Menilai efektivitas tanaman papyrus (*Cyperus papyrus*) sebagai media fitoremediasi air lindi.
 - Mengetahui kemampuan tanaman papyrus dalam menyerap dan menurunkan kandungan bahan pencemar pada air lindi.
 - Mengidentifikasi peran tanaman papyrus sebagai agen bioremediasi dalam proses pengolahan air lindi.

4. Mengetahui tingkat efisiensi sistem kombinasi *constructed wetland* dan fitoremediasi dalam menghasilkan kualitas air lindi yang lebih baik dan ramah lingkungan.
 - Mengetahui efektivitas kombinasi sistem *constructed wetland* dan tanaman papyrus dalam meningkatkan kualitas air lindi.
 - Membandingkan hasil pengolahan air lindi dengan baku mutu lingkungan yang berlaku.

II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Air Lindi

Air lindi merupakan cairan yang dihasilkan dari proses pembusukan sampah organik dan infiltrasi air hujan pada timbunan sampah di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) (Sutaji *et al.* 2023). Air lindi terbentuk ketika air melewati tumpukan sampah dan melarutkan berbagai zat organik maupun anorganik yang terdapat di dalamnya. Cairan ini umumnya berwarna gelap, berbau menyengat, dan memiliki kandungan bahan pencemar yang tinggi (Angrianto *et al.* 2021). Komposisi air lindi dipengaruhi oleh jenis sampah, umur timbunan sampah, curah hujan, serta kondisi lingkungan di sekitar TPA. Semakin tinggi kandungan sampah organik, maka semakin besar pula potensi terbentuknya air lindi dengan konsentrasi pencemar yang tinggi. Kondisi tersebut menyebabkan air lindi perlu mendapatkan pengolahan sebelum dibuang ke lingkungan (Puspitaningsari *et al.* 2024).

Air lindi mengandung berbagai parameter pencemar seperti *Biological Oxygen Demand* (BOD), *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Total Suspended Solid* (TSS), amonium, logam berat, dan mikroorganisme patogen (Syahdoa'a *et al.* 2025). Tingginya kandungan bahan organik pada air lindi menyebabkan nilai BOD dan COD menjadi tinggi (Royani *et al.* 2021). Selain itu, proses dekomposisi bahan organik menghasilkan amonium yang dapat bersifat toksik bagi organisme perairan. Jika tidak diolah dengan baik, air lindi dapat meresap ke dalam tanah dan mencemari air tanah maupun badan air di sekitarnya (Said dan Hartaja 2018). Kondisi tersebut berpotensi menurunkan kualitas lingkungan dan mengganggu kesehatan masyarakat. Oleh karena itu, diperlukan sistem pengolahan yang efektif dan berkelanjutan agar air lindi memenuhi baku mutu sebelum dibuang ke lingkungan.

2.2 Fitoremediasi

Fitoremediasi merupakan metode pengolahan limbah yang memanfaatkan tanaman untuk menyerap, mengurangi, atau menguraikan bahan pencemar dari lingkungan. Metode ini termasuk teknologi ramah lingkungan karena menggunakan proses alami tanaman dan mikroorganisme yang berada di sekitar akar tanaman (Marlany *et al.* 2023). Dalam sistem fitoremediasi, tanaman berperan dalam menyerap nutrisi, bahan organik, maupun senyawa pencemar lainnya dari media air atau tanah (Irhamni *et al.* 2017). Selain itu, tanaman juga membantu meningkatkan kondisi lingkungan mikro di area perakaran sehingga mendukung aktivitas mikroorganisme pengurai. Proses tersebut menyebabkan kandungan pencemar dalam limbah dapat berkurang secara bertahap (Priantoro *et al.* 2025). Oleh karena itu, fitoremediasi banyak digunakan sebagai alternatif pengolahan limbah cair yang sederhana dan berkelanjutan.

Keberhasilan fitoremediasi dipengaruhi oleh jenis tanaman yang digunakan, karakteristik limbah, dan kondisi lingkungan. Tanaman yang digunakan umumnya memiliki kemampuan adaptasi tinggi terhadap lingkungan tercemar dan sistem akar yang baik (Irhamni *et al.* 2017). Beberapa tanaman air yang sering digunakan dalam fitoremediasi antara lain enceng gondok (*Eichhornia crassipes*), kangkung air (*Ipomoea aquatica*), cattail (*Typha angustifolia*), dan papyrus (*Cyperus papyrus*). Tanaman-tanaman tersebut mampu menyerap bahan organik, nutrisi, serta logam tertentu dari air limbah. Selain itu, sistem akar tanaman air dapat menjadi tempat

tumbuh mikroorganisme yang membantu proses biodegradasi bahan pencemar (Marlany *et al.* 2023). Dengan kemampuan tersebut, fitoremediasi dinilai efektif dalam menurunkan kadar BOD, COD, TSS, dan amonium pada limbah cair maupun air lindi.

2.3 Tanaman *Cyperus papyrus*

Cyperus papyrus merupakan tanaman air yang termasuk ke dalam famili *Cyperaceae* dan banyak ditemukan di daerah rawa maupun lahan basah (Sarah *et al.* 2022). Tanaman ini dikenal memiliki batang tinggi berbentuk segitiga dengan warna hijau dan tekstur yang cukup kuat (Dari *et al.* 2023). *Cyperus papyrus* dapat tumbuh pada lingkungan dengan kadar air tinggi sehingga cocok digunakan dalam sistem pengolahan limbah cair (Rahmawati 2022). Tanaman ini memiliki sistem akar serabut yang rapat dan menyebar luas pada media tanam. Akar tersebut berfungsi membantu proses penyaringan bahan pencemar yang terdapat di dalam air limbah. Selain itu, tanaman *papyrus* memiliki kemampuan adaptasi yang baik terhadap lingkungan dengan kandungan bahan organik tinggi (Wiraswati *et al.* 2021).

Secara morfologi, *Cyperus papyrus* terdiri atas akar, rimpang, batang, dan tajuk yang saling mendukung dalam proses fitoremediasi. Bagian akar berperan sebagai media penyerapan nutrisi dan tempat melekatnya mikroorganisme pengurai bahan organik. Batang tanaman membantu proses transportasi oksigen menuju area perakaran sehingga mendukung aktivitas mikroorganisme aerob. Pada bagian ujung batang terdapat susunan daun berbentuk payung yang membantu proses fotosintesis. Pertumbuhan tanaman yang cepat juga menjadi salah satu keunggulan *Cyperus papyrus* dalam pengolahan limbah (Wiraswati *et al.* 2021). Oleh karena itu, tanaman ini dinilai memiliki potensi yang baik sebagai tanaman bioremediator maupun fitoremediator pada pengolahan air lindi.

2.4 Identitas dan Klasifikasi Tanaman *Cyperus papyrus*

Tanaman *papyrus* memiliki nama ilmiah *Cyperus papyrus* L. dan termasuk kelompok tanaman monokotil (Ulumudin *et al.* 2022). Tanaman ini berasal dari wilayah tropis Afrika dan umumnya tumbuh di daerah rawa, tepi sungai, dan lahan basah (Wiraswati *et al.* 2021). *Cyperus papyrus* dikenal sebagai tanaman air yang mampu tumbuh pada kondisi lingkungan dengan kadar air tinggi (Ulumudin *et al.* 2022). Tanaman ini dapat mencapai tinggi sekitar 4 hingga 5 meter dengan batang tegak dan kuat (Wiraswati *et al.* 2021). Selain dimanfaatkan sebagai tanaman hias, *papyrus* juga banyak digunakan dalam sistem pengolahan limbah cair dan *constructed wetland* (Faridatuzzahro *et al.* 2015). Kemampuan adaptasinya terhadap lingkungan tercemar membuat tanaman ini berpotensi digunakan dalam proses bioremediasi.

Klasifikasi tanaman *Cyperus papyrus* yaitu Kingdom *Plantae*, Divisi *Magnoliophyta*, Kelas *Liliopsida*, Ordo *Poales*, Famili *Cyperaceae*, Genus *Cyperus*, dan Spesies *Cyperus papyrus*. Tanaman ini memiliki akar serabut yang panjang dan rapat sehingga mampu meningkatkan proses filtrasi pada media air. Bagian batang berbentuk segitiga dan berfungsi sebagai jalur transportasi nutrisi serta oksigen. Pada ujung batang terdapat helaian menyerupai payung yang membantu proses fotosintesis tanaman. Struktur morfologi tersebut mendukung kemampuan tanaman dalam menyerap bahan pencemar dan mendukung

pertumbuhan mikroorganisme di area akar (Wiraswati *et al.* 2021). Dengan karakteristik tersebut, *Cyperus papyrus* dianggap efektif digunakan sebagai tanaman fitoremediasi dalam pengolahan air lindi.

2.5 Mekanisme *Cyperus papyrus* dalam Proses Bioremediasi

Kemampuan *Cyperus papyrus* dalam proses bioremediasi dipengaruhi oleh karakteristik morfologi dan fisiologi tanaman tersebut. Sistem akar serabut yang lebat meningkatkan luas permukaan kontak antara akar dengan limbah cair sehingga proses penyerapan bahan pencemar menjadi lebih optimal (Priantoro *et al.* 2025). Selain menyerap nutrisi dan bahan organik, akar tanaman juga berfungsi sebagai media filtrasi alami terhadap padatan tersuspensi dalam air lindi. Pada area akar atau *rhizosfer*, mikroorganisme dapat tumbuh dan membantu proses biodegradasi bahan organik menjadi senyawa yang lebih sederhana (Azzahra *et al.* 2025). Aktivitas mikroorganisme tersebut berperan penting dalam menurunkan kadar BOD dan COD pada air limbah. Oleh karena itu, keberadaan akar tanaman menjadi faktor utama dalam proses bioremediasi.

Selain sistem akar, *Cyperus papyrus* juga mampu membantu suplai oksigen ke area perakaran melalui jaringan batang tanaman. Proses ini mendukung aktivitas bakteri aerob yang berperan dalam penguraian bahan organik dan senyawa nitrogen. Kemampuan tanaman dalam mentranslokasikan oksigen menyebabkan kondisi di sekitar akar menjadi lebih stabil untuk pertumbuhan mikroorganisme pengurai (Susilowati dan Arifin 2023). *Cyperus papyrus* juga memiliki toleransi yang tinggi terhadap lingkungan tercemar dengan kandungan organik dan nutrisi yang tinggi (Ulumudin dan Purnomo 2022). Hal tersebut memungkinkan tanaman tetap tumbuh dan berfungsi secara optimal pada media air lindi. Dengan kemampuan tersebut, penggunaan *Cyperus papyrus* dalam sistem bioremediasi diharapkan mampu menurunkan kadar BOD, COD, dan amonium secara efektif dan berkelanjutan.

2.6 Pengolahan Limbah Cair Air Lindi Menggunakan *Constructed Wetland*

Pengolahan air lindi menggunakan *Constructed Wetland* merupakan salah satu metode biologis yang efektif dalam menurunkan beban pencemar organik melalui aktivitas mikroorganisme. Sistem *Constructed Wetland* berlapis mampu meningkatkan proses degradasi bahan organik secara signifikan (Syafudin *et al.* 2023). Konsentrasi BOD dan COD pada air lindi mengalami penurunan yang nyata setelah melalui proses dalam *Constructed Wetland*, karena adanya kombinasi aktivitas mikroba aerob dan anaerob dalam media reaktor (Syafudin *et al.* 2023). Mekanisme pengolahan terjadi melalui proses biodegradasi, filtrasi, serta adsorpsi yang berlangsung secara simultan dalam lapisan media tanah dan bahan pendukung lainnya. Selain itu, sistem ini dinilai stabil terhadap fluktuasi karakteristik lindi dan dapat dioperasikan dengan biaya yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan metode kimia. Berdasarkan temuan tersebut, *Constructed Wetland* berlapis menunjukkan potensi yang kuat sebagai teknologi pengolahan awal air lindi sebelum dilanjutkan ke tahap fitoremediasi.

2.7 Baku Mutu

Baku mutu air lindi digunakan sebagai acuan untuk mengetahui kualitas air lindi sebelum dibuang ke lingkungan. Parameter yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *Biological Oxygen Demand* (BOD), *Chemical Oxygen Demand* (COD), dan amonium. Nilai BOD dan COD menunjukkan kandungan bahan organik dalam air lindi, sedangkan amonium menunjukkan kandungan senyawa nitrogen hasil dekomposisi bahan organik. Tingginya kandungan parameter tersebut dapat menyebabkan pencemaran lingkungan apabila tidak dilakukan pengolahan terlebih dahulu. Oleh karena itu, diperlukan proses pengolahan yang efektif agar kadar pencemar dapat diturunkan sesuai standar yang berlaku.

Acuan baku mutu yang digunakan mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.59/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2016 tentang baku mutu lindi TPA untuk parameter BOD dan COD. Sementara itu, parameter amonium mengacu pada Royani dan Fitriana (2023). Nilai baku mutu tersebut digunakan sebagai pembandingan untuk mengetahui efektivitas proses bioremediasi menggunakan *Cyperus papyrus* dalam menurunkan kadar pencemar pada air lindi.

Tabel 1 Parameter Baku Mutu Air Lindi

| No | Parameter | Satuan | Baku Mutu Lindi TPA (P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016) | Sumber Literatur |
|----|-----------|--------|--|-----------------------------------|
| 1 | BOD | mg/L | 150 mg/L | - |
| 2 | COD | mg/L | 300 mg/L | - |
| 3 | Amonium | mg/L | - | 2 mg/L (Royani dan Fitriana 2023) |
| 4 | Ammoniak | mg/L | - | 5 mg/L (Putri 2019) |

*Sumber: Permen LHK No. P.59/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2016, Royani dan Fitriana (2023), dan Putri (2019)

2.8 Perubahan Amonium (NH_4^+) menjadi Amoniak (NH_3) setelah Proses Fitoremediasi

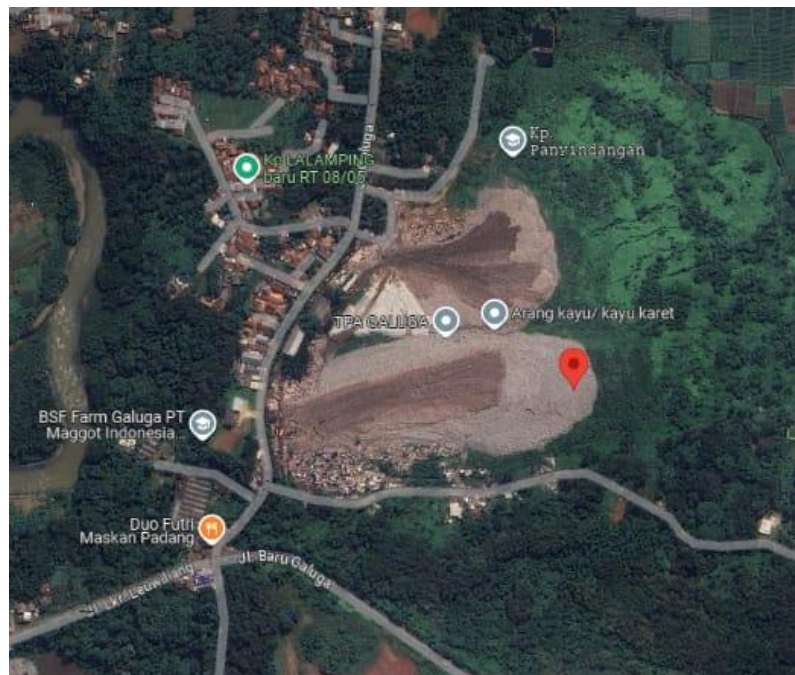
Dalam *constructed wetland*, amonium (NH_4^+) berada dalam kesetimbangan dengan amoniak (NH_3) yang dipengaruhi pH dan suhu. Kenaikan pH akibat aktivitas fotosintesis dapat menggeser kesetimbangan ke NH_3 yang lebih mudah menguap, sehingga membantu pengurangan nitrogen selain melalui nitrifikasi dan *uptake* tanaman. Proses nitrifikasi oleh mikroba di zona rizosfer juga mengubah NH_4^+ menjadi nitrit dan nitrat, sehingga menurunkan total nitrogen terlarut dalam air lindi (Nyer *et al.* 2022).

Peran *Cyperus papyrus* penting karena akar yang luas meningkatkan aktivitas mikroorganisme nitrifikasi serta kondisi oksigen di perakaran. *Constructed wetland* dengan *papyrus* terbukti efektif menurunkan ammoniacal nitrogen melalui kombinasi *plant uptake*, nitrifikasi, dan transformasi nitrogen lainnya (García-Ávila 2020). Selain itu, kondisi pH netral-alkalis selama pengolahan juga memperkuat konversi NH_4^+ menjadi NH_3 sehingga mempercepat pengurangan beban nitrogen secara keseluruhan.

III METODE

3.1 Lokasi dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan untuk melakukan analisis kualitas air lindi, pengujian efektivitas sistem *constructed wetland*, serta evaluasi sistem fitoremediasi. Pengambilan sampel dilakukan secara langsung di lapangan pada saluran drainase di sekitar Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Galuga, yang berlokasi di Desa Galuga, Kecamatan Cibungbulang, Kabupaten Bogor, Jawa Barat, pada titik koordinat $6^{\circ}33'57.1''S$ $106^{\circ}38'35.7''E$. Seluruh rangkaian kegiatan penelitian, mulai dari persiapan *constructed wetland*, penanaman *Cyperus papyrus*, hingga perlakuan sistem dilakukan di lokasi yang ditempatkan di bawah naungan/kanopi untuk menghindari pengaruh langsung curah hujan dan menjaga kestabilan kondisi percobaan. Pengujian parameter kualitas air dan seluruh analisis laboratorium dilaksanakan di Lab TIN. Seluruh kegiatan penelitian berlangsung pada tanggal 12 hingga 27 April sesuai dengan jadwal yang telah ditetapkan.



Gambar 1 Lokasi TPA Galuga

3.2 Teknik Pengumpulan Data dan Analisis Data

Data dalam penelitian ini merupakan data primer, yaitu data yang diperoleh secara langsung melalui pengukuran dan pengujian laboratorium selama proses penelitian berlangsung. Teknik pengumpulan data dilakukan dengan pengambilan sampel air lindi sebelum (*inlet*) dan sesudah (*outlet*) proses pengolahan menggunakan sistem kombinasi bioreaktor dan fitoremediasi. Selanjutnya, data dianalisis secara deskriptif kuantitatif untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam menurunkan beban pencemar pada air lindi. Langkah-langkah analisis data meliputi:

1. Analisis Efisiensi Penurunan Parameter BOD, COD, dan Amonium

Data konsentrasi pencemar yang diperoleh dari uji laboratorium sebelum (*inlet*) dan sesudah (*outlet*) pengolahan akan dihitung persentasenya untuk menentukan hasil penelitian. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\text{Efisiensi Removal} = \frac{(a-b)}{a} \times 100\%$$

Keterangan:

a = konsentrasi pencemaran di *inlet* (mg/L)

b = konsentrasi pencemaran di *outlet* (mg/L)

Sumber: Putri dan Hardiansyah (2022)

2. Analisis Komparatif terhadap Baku Mutu Lingkungan

Hasil pengukuran parameter pasca-remediasi akan dibandingkan secara langsung dengan ambang batas yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.59 Tahun 2016. Evaluasi ini bertujuan untuk menentukan apakah air hasil olahan telah memenuhi standar kelayakan buang ke lingkungan.

3. Analisis Stabilitas Kondisi Fisik-Kimia

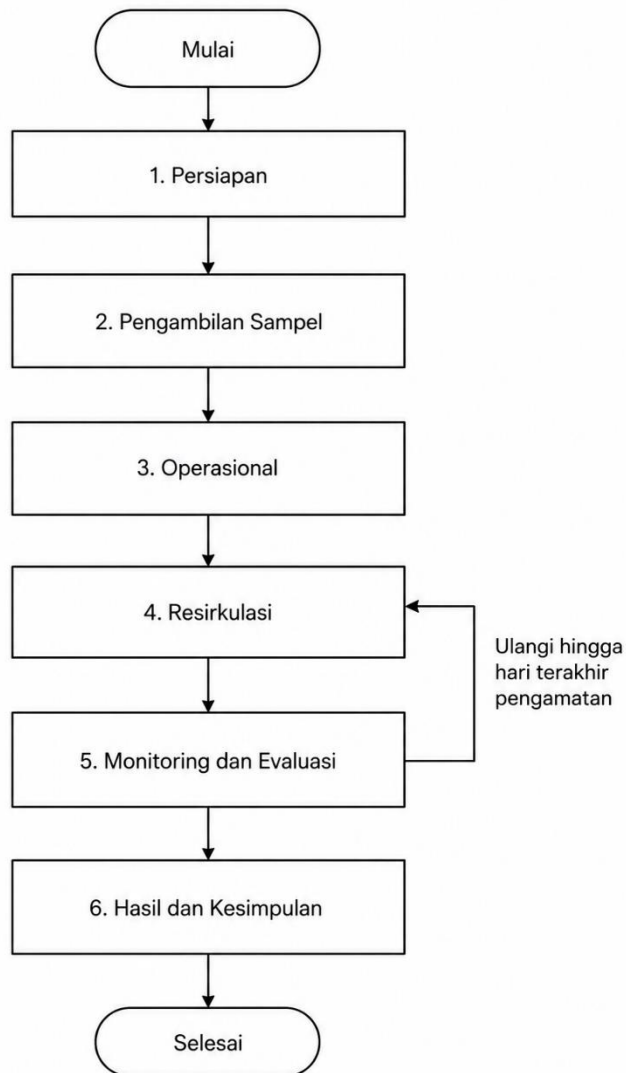
Data parameter pH dan suhu dianalisis untuk memastikan bahwa selama proses bioremediasi berlangsung, kondisi lingkungan sistem tetap berada pada rentang optimal yang mendukung aktivitas mikroorganisme rizosfer dan metabolisme tanaman *Cyperus papyrus*.

4. Evaluasi Performa Keseluruhan

Data penurunan konsentrasi disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk menunjukkan tren efisiensi sistem. Keberhasilan sistem dinilai berdasarkan kemampuan reaktor dalam mencapai target efisiensi (merujuk pada penelitian sebelumnya yang mencapai penurunan signifikan hingga 76.09%).

3.3 Prosedur Kerja

Prosedur Penelitian dibagi menjadi enam tahapan untuk memastikan penelitian berjalan sistematis:



Gambar 2 Prosedur Kerja

1. Persiapan

Tahap persiapan merupakan langkah awal dalam penelitian yang meliputi penyiapan seluruh alat dan bahan yang digunakan. Alat yang dipersiapkan antara lain *constructed wetland*, bak fitoremediasi, pH meter, serta perlengkapan pengukuran parameter kualitas air. Selain itu, bahan penelitian berupa media tanam seperti tanah, pasir, dan kerikil serta tanaman *Cyperus papyrus* juga disiapkan. Pada tahap ini dilakukan pula pembersihan dan pengecekan instalasi untuk memastikan sistem dalam kondisi siap digunakan sebelum proses penelitian dimulai.

2. Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel dilakukan secara langsung di lapangan pada saluran drainase di sekitar Tempat Pembuangan Akhir (TPA) yang memiliki tingkat kontaminasi lindi tinggi. Sampel air lindi diambil dengan prosedur yang sesuai dan kemudian disimpan dalam wadah tertutup untuk menjaga kondisi awal sampel. Pada tahap ini juga dilakukan pengukuran parameter awal sebagai data *baseline* yang akan digunakan sebagai pembandingan pada tahap evaluasi.

3. Operasional (*Constructed Wetland*)

Tahap operasional dilakukan dengan mengalirkan sampel air lindi ke dalam sistem *constructed wetland* untuk melalui proses filtrasi dan biodegradasi. Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan media filtrasi serta tanaman *Cyperus papyrus* untuk membantu menyerap dan menguraikan polutan yang terkandung dalam air lindi. Proses ini berlangsung selama 24 jam sebagai bagian dari perlakuan penelitian.

4. Resirkulasi

Tahap resirkulasi dilakukan dengan mengukur parameter pH, suhu, dan salinitas pada air yang telah terfiltrasi, kemudian air tersebut disiram kembali ke tanaman dalam sistem. Resirkulasi bertujuan untuk meningkatkan efektivitas proses penyerapan dan pengolahan polutan oleh sistem *constructed wetland*. Proses ini diulang secara berkala hingga hari terakhir pengamatan sesuai dengan rancangan penelitian.

5. Monitoring dan Evaluasi

Monitoring dilakukan dengan mengukur kembali parameter kualitas air setelah perlakuan, kemudian membandingkannya dengan nilai awal (*baseline*). Parameter yang dianalisis meliputi pH, suhu, dan salinitas untuk mengetahui perubahan yang terjadi selama proses pengolahan. Hasil perbandingan ini digunakan untuk menilai efektivitas sistem berdasarkan standar atau baku mutu yang berlaku.

6. Hasil dan Kesimpulan

Pada tahap ini dilakukan analisis terhadap seluruh data yang diperoleh selama penelitian. Hasil pengukuran dievaluasi untuk menentukan tingkat penurunan parameter kualitas air serta efektivitas sistem *constructed wetland* dan fitoremediasi menggunakan *Cyperus papyrus*. Berdasarkan analisis tersebut, ditarik kesimpulan mengenai kinerja sistem dalam mengolah air lindi.

IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

Tabel 2 Data uji laboratorium parameter inti sebelum dilakukan bioremediasi

| No | Parameter | Satuan | Hasil Uji Laboratorium | Metode |
|----|-----------|--------|------------------------|--------------------------------|
| 1 | BOD | mg/L | 273 | APHA ed. 24th 5210 B, 2023 |
| 2 | COD | mg/L | 791 | APHA ed. 24th 5220 C, 2023 |
| 3 | Amonium | mg/L | 819 | APHA ed. 24th 4500-NH, C, 2023 |

Tabel 3 Data Uji Laboratorium Parameter Inti Setelah Dilakukan Bioremediasi

| No | Parameter | Satuan | Hasil Uji Laboratorium | Metode |
|----|-----------|--------|------------------------|--|
| 1 | COD | mg/L | 22,2 | APHA ed. 24th 5220 C, 2023 |
| 2 | Ammoniak | mg/L | 18,07 | APHA ed. 24th 4500-NH ₃ , C, 2023 |

Tabel 4 Perbandingan hasil uji laboratorium dengan baku mutu dan referensi

| No | Parameter | Satuan | Hasil Uji Laboratorium (Sebelum) | Hasil Uji Laboratorium (Setelah) | Baku Mutu Lindi TPA (PP P.59/Menlhk/Setjen/K um.1/7/2016) | Sumber Literatur |
|----|-----------|--------|----------------------------------|----------------------------------|---|------------------------------|
| 1 | BOD | mg/L | 273 | - | 150 | - |
| 2 | COD | mg/L | 791 | 22,2 | 300 | - |
| 3 | Ammonium | mg/L | 819 | - | - | 2 (Royani dan Fitriana 2023) |
| 4 | Ammoniak | mg/L | - | 18,07 | - | 5 (Putri 2019) |

Tabel 5 Hasil pengukuran parameter fisik dan kimia air lindi

| Hari Pengamatan | Tanggal | pH | Suhu (°C) | Salinitas (%) |
|-----------------|---------------|------|-----------|---------------|
| Hari ke-1 | 12 April 2026 | 6,3 | 30 | 0,235 |
| Hari ke-3 | 14 April 2026 | 7,3 | 27,4 | 0,331 |
| Hari ke-5 | 16 April 2026 | 7,2 | 32,8 | 0,292 |
| Hari ke-7 | 18 April 2026 | 7,10 | 29,3 | 0,253 |
| Hari ke-9 | 20 April 2026 | 7,14 | 29,9 | 0,267 |
| Hari ke-11 | 22 April 2026 | 7,14 | 25,8 | 0,199 |

| Hari Pengamatan | Tanggal | pH | Suhu (°C) | Salinitas (%) |
|-----------------|---------------|------|-----------|---------------|
| Hari ke-13 | 24 April 2026 | 8,33 | 29 | 0,2 |
| Hari ke-15 | 26 April 2026 | 8,58 | 25,9 | 0,209 |

4.2 Pembahasan

4.2.1 Karakteristik Awal Air Lindi Sebelum Proses Bioremediasi

Hasil uji laboratorium menunjukkan bahwa air lindi sebelum proses bioremediasi memiliki kandungan pencemar organik yang cukup tinggi. Secara fisika, air lindi yang diamati berwarna hitam pekat dan mengeluarkan bau menyengat yang khas, menandakan tingginya kandungan senyawa organik hasil dekomposisi sampah. Warna hitam pekat pada air lindi umumnya disebabkan oleh tingginya kandungan bahan organik terlarut, senyawa humat, serta hasil dekomposisi anaerob yang telah berlangsung dalam jangka waktu tertentu di dalam timbunan sampah. Bau yang sangat kuat menunjukkan adanya pembentukan gas dan senyawa volatil seperti amonium dan sulfida akibat aktivitas mikroorganisme anaerob. Kondisi visual dan aroma tersebut mengindikasikan bahwa air lindi berada dalam kondisi pencemaran berat dan berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan apabila tidak dilakukan pengolahan terlebih dahulu. Selain itu, karakteristik fisik tersebut juga menunjukkan bahwa proses degradasi bahan organik di dalam TPA masih berlangsung secara aktif.

Nilai *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) sebesar 273 mg/L menunjukkan tingginya kebutuhan oksigen oleh mikroorganisme untuk menguraikan bahan organik *biodegradable* yang terkandung dalam air lindi. Nilai tersebut telah melebihi baku mutu lindi TPA berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016 yaitu sebesar 150 mg/L. Tingginya nilai BOD mengindikasikan bahwa air lindi masih mengandung senyawa organik aktif hasil dekomposisi sampah domestik maupun organik lainnya. Apabila dibuang langsung ke badan air tanpa pengolahan, kondisi ini dapat menyebabkan penurunan kadar oksigen terlarut (*Dissolved Oxygen* atau DO) sehingga mengganggu kehidupan biota perairan. Selain itu, tingginya kandungan bahan organik juga menunjukkan bahwa proses biodegradasi di dalam timbunan sampah masih berlangsung secara intensif. Semakin tinggi kandungan BOD, maka semakin besar pula potensi pencemaran organik yang dapat terjadi pada lingkungan perairan di sekitar lokasi TPA.

Nilai *Chemical Oxygen Demand* (COD) yang diperoleh sebesar 791 mg/L juga menunjukkan bahwa kandungan bahan organik total dalam air lindi tergolong tinggi. Nilai tersebut melampaui baku mutu COD untuk lindi TPA yaitu sebesar 300 mg/L. Tingginya nilai COD menunjukkan keberadaan senyawa organik baik yang dapat terdegradasi maupun yang sulit diuraikan secara biologis. Perbedaan nilai COD yang jauh lebih tinggi dibandingkan BOD mengindikasikan adanya senyawa organik *non-biodegradable* dalam air lindi. Kondisi ini umum ditemukan pada air lindi yang berasal dari *landfill* dengan umur tertentu karena proses humifikasi menghasilkan senyawa organik kompleks yang lebih stabil. Menurut Kurniawan *et al.* (2016), tingginya rasio COD terhadap BOD menunjukkan bahwa air lindi memerlukan proses

pengolahan lanjutan agar kandungan pencemar dapat diturunkan secara optimal sebelum dilepas ke lingkungan.

Konsentrasi amonium yang diperoleh sebesar 819 mg/L menunjukkan bahwa air lindi memiliki kandungan nitrogen yang sangat tinggi. Nilai tersebut jauh lebih besar dibandingkan konsentrasi amonium sebesar 2 mg/L yang dilaporkan oleh Royani dan Fitriana (2023). Tingginya kandungan amonium disebabkan oleh proses deaminasi bahan organik yang mengandung nitrogen selama dekomposisi sampah berlangsung. Amonium merupakan salah satu parameter penting dalam pengolahan air lindi karena bersifat toksik terhadap organisme akuatik pada konsentrasi tinggi (Nindrasari *et al.* 2023). Selain itu, amonium juga dapat menyebabkan *eutrofikasi* apabila masuk ke badan air dan memicu pertumbuhan alga secara berlebihan. Kandungan amonium yang tinggi menunjukkan bahwa air lindi masih berada dalam kondisi pencemaran berat sehingga memerlukan proses pengolahan biologis yang efektif untuk menurunkan konsentrasi nitrogen. Tingginya kadar amonium juga menjadi salah satu faktor penyebab munculnya bau menyengat pada air lindi akibat terbentuknya gas amonium selama proses dekomposisi berlangsung.

4.2.2 Kinerja Sistem *Constructed Wetland* dalam Menurunkan Parameter Pencemar

4.2.2.1 Perubahan Kualitas Parameter Pencemar Inti Selama Proses Bioremediasi

Berdasarkan hasil uji laboratorium yang telah dilakukan, sistem pengolahan air lindi menggunakan *constructed wetland* dengan agen fitoremediator *Cyperus papyrus* menunjukkan kinerja yang sangat memuaskan dalam menurunkan beban pencemar inti. Hal ini terlihat dari tingkat efisiensi penurunan konsentrasi yang sangat masif, baik pada parameter pencemar organik (COD) maupun parameter senyawa nitrogen (Amonia).

Pada parameter *Chemical Oxygen Demand* (COD), terjadi penurunan konsentrasi yang sangat drastis dari nilai awal 791 mg/L menjadi 22,2 mg/L setelah melewati proses bioremediasi. Angka ini menunjukkan tingkat efisiensi penyisihan (*removal*) COD yang mencapai angka 97,19%. Penurunan masif ini membuktikan bahwa senyawa-senyawa organik kompleks yang sebelumnya mendominasi dan mencemari air lindi telah berhasil dirombak serta didegradasi secara optimal. Proses biodegradasi ini sangat didukung oleh interaksi mekanis pada media *constructed wetland* serta tingginya aktivitas mikroorganisme yang hidup subur di area zona perakaran (rizosfer) tanaman *Cyperus papyrus* (Oktavia *et al.* 2023). Hasil akhir COD sebesar 22,2 mg/L ini membuktikan bahwa kualitas air telah pulih secara signifikan dan berada jauh di bawah ambang batas baku mutu lindi TPA yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016, yaitu sebesar 300mg/L.

Kinerja penyisihan yang luar biasa juga terlihat pada parameter nitrogen. Hasil pengujian menunjukkan adanya efisiensi penurunan *Total Ammonia Nitrogen* (TAN) sebesar 97,79%, di mana konsentrasi

amonium pada sampel inlet sebesar 819 mg/L berhasil ditekan hingga hanya menyisakan 18,07 mg/L amoniak pada sampel outlet. Keberhasilan penyisihan beban nitrogen yang melebihi angka 97% ini dapat terjadi berkat kemampuan fisiologis *Cyperus papyrus* dalam menyerap dan mengasimilasi nitrogen dari air lindi sebagai nutrisi pertumbuhannya. Selain itu, jaringan batang tanaman ini juga mampu mentranslokasikan suplai oksigen ke area perakaran. Hal ini menciptakan kondisi yang ideal bagi bakteri nitrifikasi-denitrifikasi di sekitar zona rizosfer untuk mengoksidasi senyawa amonia menjadi gas nitrogen yang terlepas ke udara (Fatma 2023).

Dalam analisis ini parameter yang digunakan adalah Nitrogen Amonia. Pada kondisi awal air lindi (Hari ke-1) dengan pH cenderung asam (6,3), nitrogen mayoritas hadir dalam bentuk Ammonium (NH_4^+) yang terlarut stabil dalam air. Namun, seiring berjalannya proses bioremediasi menggunakan Constructed Wetland, terjadi peningkatan pH hingga mencapai 8,58 (basa) pada Hari ke-15. Secara kinetika kimia, kenaikan pH dan suhu ini menggeser kesetimbangan dari bentuk ion Ammonium (NH_4^+) menjadi amonia bebas (NH_3) yang bersifat volatil (mudah menguap). Transformasi ini menjelaskan mengapa kadar nitrogen total dalam sistem dapat menurun drastis, karena selain diserap oleh tanaman, nitrogen juga terlepas ke atmosfer dalam bentuk gas amonia akibat dinamika pH yang diciptakan oleh aktivitas fotosintesis tanaman dan metabolisme mikroba.

Pada parameter senyawa nitrogen, hasil uji laboratorium menunjukkan efisiensi penyisihan beban pencemar yang sangat tajam, yakni turun dari 819 mg/L pada sampel *inlet* menjadi hanya 18,07 mg/L pada sampel *outlet*. Penurunan yang mencapai lebih dari 97% ini mengonfirmasi bahwa sistem bioremediasi telah secara nyata menyerap dan mengeliminasi sebagian besar polutan nitrogen dari dalam air lindi. Di samping penurunan kadar yang drastis, temuan ini juga mencatat adanya perubahan wujud senyawa yang terdeteksi oleh laboratorium, yaitu dari amonium (NH_4^+) pada sampel awal menjadi amoniak bebas (NH_3) pada sampel akhir. Pergeseran bentuk kimiawi ini merupakan respons kinetik langsung terhadap dinamika pH dan suhu air selama proses pengolahan berlangsung. Berdasarkan data pemantauan lingkungan mikro, kondisi pH air lindi pada hari pertama berada di angka 6,3 (cenderung asam), sebuah rentang di mana nitrogen secara alami mendominasi dalam bentuk ion amonium yang terlarut. Namun, seiring berjalannya perlakuan, pH mengalami tren peningkatan secara signifikan hingga menyentuh kondisi basa pada angka 8,58 di hari kelima belas. Peningkatan pH ini dikombinasikan dengan paparan suhu air yang berfluktuasi dan cukup hangat hingga menyentuh 32,8°C pada hari kelima menjadi katalis utama yang menggeser kesetimbangan kimia ($\text{NH}_4^+ \rightleftharpoons \text{NH}_3 + \text{H}^+$) ke arah kanan. Interaksi antara pH basa dan temperatur yang tinggi memaksa sisa ion amonium di dalam kolom air lindi untuk melepaskan ion hidrogennya dan berubah wujud menjadi amoniak bebas. Oleh karena itu, meskipun bentuk senyawanya bergeser ke fase amoniak akibat dinamika fisika dan kimia reaktor, pencapaian

utamanya tetap bertumpu pada fakta bahwa sistem bioremediasi ini terbukti sangat andal dalam menyusutkan massa total nitrogen secara masif.

4.2.2.2 Perubahan pH, Suhu dan Salinitas sebagai Parameter Pemantauan Bioremediasi

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa nilai pH selama proses bioremediasi cenderung berada pada kondisi netral hingga sedikit basa sehingga masih mendukung aktivitas mikroorganisme pengurai dan proses penyerapan nutrisi oleh tanaman dalam sistem *constructed wetland*. Kondisi pH yang relatif stabil menunjukkan bahwa proses biologis di dalam media berlangsung dengan baik dan tidak mengalami gangguan yang signifikan. Menurut Ananta (2025), pH netral merupakan kondisi optimum bagi pertumbuhan bakteri pengurai dan pembentukan biofilm yang stabil sehingga proses degradasi bahan organik dapat berlangsung lebih efektif. Kondisi tersebut juga mendukung aktivitas mikroorganisme pada zona rizosfer tanaman *Cyperus papyrus* dalam membantu penyisihan pencemar selama proses bioremediasi.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa suhu air selama penelitian berkisar antara 25,3–35,3°C. Fluktuasi suhu dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan intensitas cahaya matahari saat pengukuran dilakukan. Rentang suhu tersebut masih termasuk kondisi optimum bagi aktivitas mikroorganisme mesofilik sehingga proses penguraian bahan organik dalam sistem *constructed wetland* dapat berlangsung dengan baik. Suhu yang stabil membantu meningkatkan aktivitas metabolik mikroorganisme dan mendukung penyerapan nutrisi oleh tanaman *Cyperus papyrus*. Selain itu, kondisi suhu yang sesuai juga mendukung pertumbuhan akar dan aktivitas mikroba pada zona rizosfer sehingga proses penyisihan pencemar menjadi lebih efektif. Menurut Ananta (2025), suhu mesofilik mendukung aktivitas metabolik mikroorganisme dan meningkatkan efisiensi degradasi bahan organik dalam sistem biofilter.

Nilai salinitas selama penelitian menunjukkan kecenderungan menurun dari 2350 ppm (0,235%) pada awal pengamatan menjadi sekitar 2020 ppm (0,202%) pada akhir penelitian meskipun sempat mengalami peningkatan pada beberapa hari pengamatan. Penurunan salinitas menunjukkan adanya proses penyerapan ion dan zat terlarut oleh tanaman serta aktivitas mikroorganisme dalam sistem *constructed wetland*. Akar *Cyperus papyrus* membantu meningkatkan proses filtrasi dan penyerapan nutrisi sehingga kandungan zat terlarut di dalam air berkurang secara bertahap. Selain itu, kondisi fisik air yang awalnya keruh mulai menjadi lebih jernih dan bau menyengat khas air lindi mulai berkurang menunjukkan adanya penurunan kandungan bahan organik selama proses bioremediasi berlangsung. Menurut Ananta (2025), aktivitas mikroorganisme dan tanaman pada sistem *biofilter*

mampu membantu proses degradasi bahan organik dan menurunkan kandungan pencemar melalui proses biologis dan penyerapan zat terlarut.

4.2.3 Efektivitas Tanaman Papyrus (*Cyperus papyrus*) dalam Proses Bioremediasi Air Lindi

4.2.3.1 Perubahan Karakteristik Fisika Air Lindi Selama Fitoremediasi

Selama proses fitoremediasi menggunakan tanaman *Cyperus papyrus*, pengamatan visual menunjukkan adanya perbaikan kualitas fisik air lindi yang sangat nyata. Pada awal perlakuan, air lindi memiliki karakteristik fisik berupa warna hitam pekat dan mengeluarkan bau menyengat yang kuat akibat tingginya kandungan senyawa organik serta gas hasil dekomposisi anaerob. Namun seiring berjalannya masa pengamatan, warna air lindi berangsur menjadi lebih jernih dan intensitas bau menyengat tersebut mengalami penurunan secara signifikan. Kejernihan air ini sangat berkaitan erat dengan berkurangnya padatan atau sedimen yang berada di dalam reaktor. Sistem akar serabut pada *Cyperus papyrus* bekerja sangat efektif sebagai media filtrasi alami yang mampu mengikat partikel tersuspensi sehingga tingkat kekeruhan air limbah menurun drastis.

Pada aspek salinitas, pengujian menunjukkan adanya tren penurunan konsentrasi yang cukup stabil. Nilai salinitas yang awalnya terukur sebesar 2350 ppm pada hari pertama perlahan menyusut menjadi 2090 ppm pada observasi hari kelima belas. Penurunan tingkat salinitas ini sejalan dengan temuan Indrawati dan Prasetyo (2025) yang menjelaskan bahwa proses fitoremediasi memfasilitasi penyerapan bahan anorganik berupa berbagai ion yang terlarut di dalam air limbah oleh akar tanaman. Selain itu kondisi suhu lingkungan mikro yang berfluktuasi cukup hangat pada rentang 25,3 derajat Celcius hingga 35,3 derajat Celcius turut memengaruhi dinamika fisik reaktor. Suhu yang hangat tersebut secara langsung memicu penyusutan volume air lindi di dalam sistem pengolahan. Penyusutan volume cairan ini merupakan fenomena fisik dan biologis yang terukur karena lindi secara konstan mengalami pelepasan uap air melalui kombinasi proses evaporasi serta evapotranspirasi aktif oleh tajuk daun tanaman (Sente 2017).

4.2.3.2 Perubahan Karakteristik Kimia Air Lindi Selama Fitoremediasi

Selama proses fitoremediasi berlangsung terjadi dinamika perubahan karakteristik kimia air yang sangat signifikan salah satunya adalah fluktuasi parameter tingkat keasaman atau pH. Berdasarkan hasil pengukuran kualitas lingkungan mikro nilai pH air lindi mengalami peningkatan secara bertahap dari kondisi sedikit asam pada angka 6,3 di hari pertama menjadi kondisi netral dan berlanjut ke arah basa pada angka 8,58 di hari kelima belas. Perubahan ke arah basa ini

memiliki kaitan yang sangat erat dengan tingginya aktivitas metabolisme mikroorganisme pengurai serta penyerapan karbon dioksida oleh tanaman secara masif selama proses fotosintesis. Rentang pH yang berada pada kondisi netral hingga basa ini pada kenyataannya memberikan lingkungan yang sangat ideal bagi pertumbuhan dan aktivitas bakteri pada zona perakaran atau *rhizosphere* (Shakila *et al.* 2024). Kondisi tersebut sangat krusial karena laju biodegradasi bahan pencemar sangat bergantung pada keseimbangan pH di area tersebut.

Kondisi lingkungan mikro yang stabil tersebut secara langsung bermuara pada tingginya tingkat keberhasilan penurunan parameter pencemar kimia utama yaitu *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), *Chemical Oxygen Demand* (COD), dan amonium. Penurunan konsentrasi bahan organik dan senyawa nitrogen ini dimotori oleh dua mekanisme utama yang berjalan secara beriringan. Mekanisme pertama adalah penyerapan nutrisi secara langsung oleh sistem perakaran *Cyperus papyrus*. Tanaman ini terbukti secara aktif menyerap senyawa nitrogen bebas serta berbagai unsur hara kimiawi lainnya dari media air lindi untuk digunakan sebagai suplai utama pembentukan biomassa dan pertumbuhan selulernya. Semakin lebat pertumbuhan tanaman maka akan semakin banyak beban pencemar kimia yang terserap dari kolom air melalui mekanisme *phytoextraction* (Priantoro 2025).

Mekanisme kedua yang melengkapi proses penyerapan nutrisi adalah aktivitas perombakan biologis melalui siklus nitrifikasi dan denitrifikasi oleh konsorsium mikroorganisme di sekitar perakaran. Dalam kondisi aerobik ini bakteri nitrifikasi akan leluasa mengoksidasi amonium beracun menjadi nitrit dan selanjutnya diubah menjadi nitrat yang lebih stabil bagi ekosistem lingkungan (Hendrawan *et al.* 2021). Sebagian sisa nitrat yang tidak diserap oleh tanaman kemudian akan direduksi lebih lanjut menjadi gas nitrogen bebas melalui proses denitrifikasi oleh bakteri anaerobik di lapisan sedimen bagian bawah. Sinergi sempurna antara penyerapan hara oleh tanaman dan perombakan senyawa kimia oleh bakteri inilah yang memastikan beban polutan organik dan anorganik pada air lindi dapat terdegradasi secara tuntas.

4.2.3.3 Mekanisme Bioremediasi Konsep Fitoremediasi oleh *Cyperus papyrus*

Mekanisme utama yang terjadi dalam sistem ini meliputi rizofiltrasi dan *phytoextraction* yang memecah zat organik. Sistem perakaran serabut *Cyperus papyrus* yang sangat rapat berfungsi sebagai filter mekanis untuk menyaring partikel tersuspensi (rizofiltrasi). Rizofiltrasi terutama digunakan untuk memulihkan air tanah yang diekstraksi, air permukaan, dan air limbah dengan konsentrasi kontaminan rendah. Metode ini merupakan metode adsorpsi atau pengendapan ke akar tanaman atau penyerapan kontaminan dalam larutan yang mengelilingi zona area (Sukono *et al.* 2020). Keuntungan pada metode rizofiltrasi

adalah kemampuan untuk menggunakan tanaman darat dan air baik untuk aplikasi in-situ maupun ex-situ. Keuntungan lainnya adalah kontaminan tidak harus dipindahkan ke tunas. Batang berongga (aerenkim) tanaman juga mentransfer oksigen ke akar, menciptakan zona aerobik yang mendukung bakteri nitrifikasi. Dengan demikian, spesies selain hiperakumulator dapat digunakan. Tanaman terestrial lebih disukai karena memiliki sistem perakaran yang berserat dan lebih panjang sehingga meningkatkan jumlah luas perakaran. Biaya fitoekstraksi cukup murah jika dibandingkan dengan metode konvensional. Selain itu kontaminan dapat dikurangi atau dihilangkan secara permanen dari tanah. Selanjutnya, jumlah polutan yang harus diserap secara substansial berkurang (hingga 95%) dan dalam beberapa kasus, kontaminan dapat didaur ulang dari biomassa tanaman yang terkontaminasi. Secara biokimia, *Cyperus papyrus* menyerap Nitrogen Amonia melalui akarnya untuk digunakan sebagai sumber nutrisi pertumbuhan jaringan (phytoextraction). Selain itu, batang *Cyperus papyrus* yang berongga (aerenkim) memfasilitasi transfer oksigen dari atmosfer ke area perakaran (rhizosfer), menciptakan zona aerobik yang mendukung bakteri nitrifikasi untuk mendegradasi bahan organik dan senyawa nitrogen secara lebih efektif.

4.2.3.4 Pertumbuhan dan Adaptasi Tanaman Papyrus

Selama 15 hari pengamatan, tanam *Cyperus papyrus* menunjukkan kemampuan adaptasi yang sangat baik terhadap air lindi TPA Galuga yang memiliki konsentrasi pencemar tinggi. Hal ini sejalan dengan temuan Musarofa *et al.* (2018) yang menyatakan bahwa pada fase awal pengolahan (aklimatisasi), *Cyperus papyrus* mampu beradaptasi dengan cepat terhadap limbah dengan konsentrasi bahan organik tinggi tanpa menunjukkan gejala kerusakan fisik yang signifikan. Secara visual, daun tanaman tetap berwarna hijau segar tanpa adanya tanda-tanda klorosis (menguning) atau nekrosis (kematian jaringan) yang signifikan. Pertumbuhan tunas baru juga teramati pada beberapa rumpun, yang mengindikasikan bahwa konsentrasi BOD, COD, dan Nitrogen Amonia dalam lindi tidak bersifat toksik akut bagi tanaman ini, melainkan justru dimanfaatkan sebagai nutrisi untuk pembentukan biomassa. Kemampuan *Cyperus papyrus* dalam menyisihkan polutan organik sangat tinggi meskipun Musarofa *et al.* (2018) mencatat adanya potensi titik jenuh tanaman pada waktu pengolahan yang terlalu lama, durasi 15 hari dalam penelitian ini terbukti merupakan waktu kontak yang optimal (HRT) di mana tanaman tetap berada dalam kondisi prima untuk menyerap polutan secara maksimal. *Cyperus papyrus* memiliki kemampuan menyerap polutan organik dan anorganik melalui jaringan akarnya secara intensif. Proses ini didukung oleh pembentukan lapisan biofilm pada permukaan akar dan media tanam. Lapisan biofilm ini merupakan koloni mikroorganisme yang berfungsi mengurangi konsentrasi zat organik kompleks dalam air lindi menjadi senyawa yang

lebih sederhana, sehingga memudahkan tanaman dalam menyerap nutrisi tersebut (Oktavia *et al.* 2023).

4.2.3.5 Faktor yang Mempengaruhi Efektivitas Fitoremediasi

Tingginya efisiensi penyisihan polutan dalam penelitian ini dipengaruhi oleh interaksi beberapa faktor kunci, di antaranya adalah nilai pH, suhu, dan waktu tinggal (*Hydraulic Retention Time/HRT*). Perubahan nilai pH dari 6,3 menjadi 8,58 terbukti sangat krusial dalam memicu proses volatilisasi nitrogen amonia, di mana kenaikan kondisi basa memfasilitasi pelepasan nitrogen ke atmosfer dalam bentuk gas. Selain faktor kimiawi, kondisi fisik berupa suhu lingkungan yang terjaga pada rentang hangat antara 25,8°C hingga 32,8°C sangat mendukung aktivitas metabolik mikroorganisme mesofilik di dalam media tanam untuk mendegradasi bahan organik secara optimal. Faktor penentu lainnya adalah waktu tinggal (HRT) selama 15 hari yang memberikan durasi kontak cukup lama bagi sistem perakaran tanaman dan koloni mikroba di area rizosfer untuk melakukan serangkaian proses filtrasi, penyerapan nutrisi, serta degradasi polutan secara menyeluruh hingga mencapai titik efisiensi maksimal.

Tingginya efisiensi penyisihan polutan dalam penelitian ini dipengaruhi oleh interaksi beberapa faktor kunci, di antaranya adalah nilai pH, suhu, dan waktu tinggal (*Hydraulic Retention Time/HRT*). Berdasarkan pengamatan, penggunaan media tanah dalam sistem ini memiliki peran vital sebagai unit penyaring sekaligus buffer alami. Media tanah berfungsi menstabilkan tingkat keasaman (pH) air lindi yang melewati sistem, sehingga efluen cenderung menuju rentang netral. Kondisi pH yang stabil ini sangat mendukung aktivitas metabolisme mikroorganisme pengurai untuk bekerja secara optimum.

Selain faktor kimiawi, faktor fisik berupa suhu lingkungan yang terjaga pada rentang hangat antara 25,8°C hingga 32,8°C mendukung pertumbuhan mikroorganisme mesofilik di dalam media tanam untuk mendegradasi bahan organik. Faktor penentu yang paling signifikan dalam penelitian ini adalah durasi waktu tinggal (HRT) selama 15 hari. Durasi kontak antara air lindi dengan sistem perakaran tanaman dan koloni mikroba sangat menentukan tingkat penyisihan polutan; semakin lama waktu detensi yang diberikan, maka proses filtrasi, penyerapan nutrisi, dan perombakan senyawa organik kompleks oleh bakteri akan berlangsung lebih sempurna. Waktu detensi 15 hari dalam penelitian ini memberikan kesempatan kontak yang jauh lebih lama dibandingkan standar operasional minimum (2-4 hari), sehingga mampu mencapai titik efisiensi penyisihan yang maksimal.

4.2.3.6 Efisiensi Kombinasi *Constructed Wetland* dan Fitoremediasi dalam Meningkatkan Kualitas Air Lindi

Kombinasi sistem *Constructed Wetland* dengan agen hayati *Cyperus papyrus* terbukti sangat efektif meningkatkan kualitas air lindi secara signifikan. Efisiensi penyisihan COD mencapai 97,19% dan

Nitrogen Amonia mencapai 97,79%. Meskipun hasil akhir Nitrogen Amonia (18,07 mg/L) masih di atas referensi standar 2 mg/L, penurunan yang mencapai hampir 98% menunjukkan bahwa teknologi ini sangat potensial untuk diaplikasikan sebagai pengolahan pendahuluan (*pre-treatment*) yang ekonomis dan ramah lingkungan sebelum lindi dibuang ke badan air penerima.

Meskipun kadar akhir Nitrogen Amonia tercatat sebesar 18,07 mg/L yang mana secara nominal masih berada di atas ambang batas referensi standar sebesar 2 mg/L perlu ditekankan bahwa terjadi penurunan konsentrasi yang mencapai hampir 98% dari nilai awal sebesar 819 mg/L. Fakta ini menunjukkan bahwa sistem bioremediasi ini memiliki kapasitas penyisihan beban pencemar yang sangat tinggi dalam waktu detensi yang relatif singkat. Di sisi lain, hasil akhir parameter COD yang mencapai 22,2 mg/L menunjukkan kepatuhan yang sangat baik terhadap baku mutu lingkungan menurut Peraturan Menteri LHK Nomor P.59 Tahun 2016 (limit 300 mg/L).

Efisiensi penyisihan yang mencapai 97,19% (COD) dan 97,79% (Nitrogen Amonia) dalam sistem ini merupakan pencapaian yang sangat tinggi bagi sebuah sistem pengolahan biologis. Tingkat keberhasilan ini jauh mengungguli penelitian Muryani dan Widiarti (2018) yang hanya mampu mencapai efisiensi penyisihan COD sebesar 23,6% menggunakan fitoremediasi tanaman teratai. Rendahnya efisiensi pada penelitian tersebut disebabkan oleh ketidakmampuan tanaman dalam menghadapi toksisitas lindi yang ekstrem sehingga proses biokimia terhenti saat tanaman mati. Keberhasilan kelompok kami dalam menjaga stabilitas kondisi sistem selama 15 hari menjadi faktor penentu utama yang memungkinkan mikroorganisme rizosfer dan akar *Cyperus papyrus* mereduksi polutan organik dan nitrogen secara hampir menyeluruh.

Berdasarkan data-data tersebut, teknologi *constructed wetland* berbasis *Cyperus papyrus* memiliki potensi strategis untuk diaplikasikan secara luas sebagai unit pengolahan pendahuluan (*pre-treatment*) dalam sistem pengelolaan sampah di TPA. Keunggulan utamanya terletak pada biaya operasional yang rendah, pemeliharaan yang sederhana, serta sifatnya yang ramah lingkungan karena tidak melibatkan penggunaan bahan kimia sintetis. Implementasi sistem ini secara kontinu diharapkan dapat meminimalisir risiko degradasi kualitas lingkungan pada badan air penerima serta menjadi solusi berkelanjutan dalam menanggulangi permasalahan pencemaran air lindi secara ekonomis dan efektif.

BAB V SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penerapan sistem *constructed wetland* dengan menggunakan tanaman *Cyperus papyrus* terbukti sangat efektif dalam mereduksi beban pencemar pada air lindi di TPA Galuga. Kinerja sistem ini ditunjukkan oleh persentase efisiensi penyisihan yang sangat signifikan, yaitu mencapai 97,19% untuk parameter COD (turun dari 791 mg/L menjadi 22,2 mg/L) dan 97,79% untuk parameter Nitrogen Amonia (turun dari 819 mg/L menjadi 18,07 mg/L). Secara kualitas, kadar akhir COD telah berhasil mencapai nilai di bawah ambang batas yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri LHK Nomor P.59 Tahun 2016, sehingga dinyatakan aman untuk dibuang ke lingkungan. Namun, untuk parameter Nitrogen Amonia, meskipun terjadi penurunan massa yang sangat tajam, hasil akhirnya masih berada di atas standar referensi yang ditetapkan oleh Royani dan Fitriana (2023). Keberhasilan penyisihan polutan ini didorong oleh sinergi mekanisme biologis dan kimiawi, yang meliputi penyerapan nutrisi oleh sistem perakaran tanaman (*phytoextraction*), aktivitas penguraian oleh mikroorganisme pada lapisan biofilm di media tanam, serta proses volatilisasi gas amonia ke atmosfer yang dipicu oleh peningkatan nilai pH sistem menjadi basa (8,58) selama masa pengamatan.

5.2 Saran

Melakukan penyesuaian terhadap variabel waktu tinggal (*Hydraulic Retention Time/HRT*). Penambahan durasi waktu detensi di atas 15 hari atau peningkatan densitas tanaman per unit area diperkirakan dapat memberikan kesempatan kontak yang lebih lama bagi akar tanaman dan koloni mikroba rizosfer untuk melakukan proses degradasi secara lebih menyeluruh. Selain itu, perlu dilakukan monitoring berkala terhadap kondisi fisik tanaman untuk mencegah terjadinya titik jenuh pada media tanam, sehingga efisiensi penyisihan polutan dapat tetap terjaga secara konsisten dalam jangka panjang sebelum air hasil olahan dilepaskan ke badan air penerima.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfithri AS, Widiarti IW. 2024. Pemanfaatan air lindi dalam mempercepat waktu pengomposan sampah organik. Prosiding Seminar Nasional Teknik Lingkungan Kebumian SATU BUMI: Tantangan Pengelolaan Lingkungan Industri Menuju Net Zero Emission. Yogyakarta (ID): Jurusan Teknik Lingkungan Fakultas Teknologi Mineral dan Energi UPN “Veteran” Yogyakarta. hlm 30–38.
- Angrianto NL, Manusawai J, Sinery AS. 2021. Analisis kualitas air lindi dan permukaan pada areal TPA Sowi Gunung dan sekitarnya di Kabupaten Manokwari Papua Barat. *J Cassowary*. 4(2): 221-233.
- Azzahra SAS, Susilowati LE, Suriadi A. 2025. Populasi mikroba tanah rhizosfer tanaman jagung akibat pemberian berbagai jenis bahan organik serta pengaruhnya terhadap pertumbuhan tanaman. *J Keteknikan Pertanian Tropis Biosistem*. 13(1): 108-120.
- Barir R, Sudiro, Wulandari CD. 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*. *J Enviro*. 1.
- Dari CA, Hardiansyah H, Noorhidayati N. 2023. Keanekaragaman jenis rumput (genus *Cyperus*) di kawasan persawahan pasang surut Desa Beringin Kencana Kecamatan Tabungane. *Wahana-Bio: J Biologi Pembelajarannya*. 14(2): 65-73.
- Dari HW, Suhartini S. 2024. Dampak pengolahan air lindi terhadap kualitas air sungai dan sumur di sekitar TPA Regional Piyungan Yogyakarta. *Bioscientist: J Ilmiah Biologi*. 12(1): 71-91.
- Dimiati DD, Hadi W. 2017. Uji pemanfaatan pupuk organik cair lindi dengan penambahan bakteri starter terhadap pertumbuhan tanaman hortikultura (*Solanum melongena* dan *Capsicum frutescens*). *J Teknik ITS*. 6(2):F349–F354.
- Fajariyah C, Mangkoedihardjo S. 2017. Kajian literatur pengolahan lindi tempat pemrosesan akhir sampah dengan teknik lahan basah menggunakan tumbuhan air. *J Teknik ITS*. 6(2): 190-195.
- Faridatuzzahro L, Sedyawati SM, Widiarti N. 2015. Penurunan nilai BOD dan COD limbah tahu menggunakan tanaman *Cyperus papyrus* sistem wetland. *Indonesian J Chemical Science*. 4(1): 1-12.
- Fatma YS, Lesmana D, Handayani L, Sulistyorini E, Arrasyid B, Soimin M, dkk. 2023. *Mikrobiologi Lingkungan*. Makassar: Tohar Media.
- García-Ávila F. 2020. Treatment of municipal wastewater by vertical subsurface flow constructed wetland: data collection on removal efficiency using *Phragmites australis* and *Cyperus papyrus*. *Data Brief*. 30(1):1-9.
- Hendrawan AKF, Afiati N, Rahman A. 2021. Laju nitrifikasi pada bioremediasi air limbah organik menggunakan *Chlorella* sp. dan bakteri nitrifikasi-denitrifikasi. *J Pengelolaan Sumberdaya Alam Lingkungan (J Natural Resources Environmental Management)*. 11(2):309–323.
- Indrawati R, Prasetyo HD. 2025. Efektivitas variasi biomassa *Ipomoea aquatica* terhadap penurunan parameter kualitas air limbah domestik. *Bioma: J Biologi Pembelajaran Biologi*. 10(2):108–121.

- Irhamni I, Pandia S, Purba E, Hasan W. 2017. Kajian akumulator beberapa tumbuhan air dalam menyerap logam berat secara fitoremediasi. *J Serambi Engineering*. 1(2): 75-84.
- Marlany R, Setiawati S, Tamburaka RS. 2023. Pemanfaatan tanaman air untuk menurunkan parameter pencemar pada Kali Kadia Kota Kendari menggunakan metode fitoremediasi: Indonesia. *AJIE (Asian J Innovation Entrepreneurship)*. 2(1): 100-117.
- Meyrita, Sandria SF, Najmi I, Firdus, Rizki SA, Nasir M. 2023. Kontaminasi logam berat pada air sumur warga akibat air lindi dari Tempat Pemrosesan Akhir (TPA). *J Teknologi Lingkungan Lahan Basah* . 11(2): 425-433.
- Muryani E, Widiarti IW. 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). *J Mineral, Energi Lingkungan*. 2(2): 72-86.
- Musarofa. 2018. Penurunan TSS, BOD, Escherichia coli pada limbah tangki septik menggunakan tanaman *Cyperus papyrus* pada pengolahan constructed wetland. *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan*.
- Nindrasari G, Meitiniarti VI, Mangimbulude JC. 2023. Pengurangan amonium dengan metode nitrifikasi dan anammox pada air lindi dari Tempat Pembuangan Akhir Sampah Jatibarang, Semarang. Dalam: Prosiding Seminar Nasional VIII Pendidikan Biologi: Biologi, Sains, Lingkungan, dan Pembelajarannya Menuju Pembangunan Karakter. Surakarta (ID): Program Studi Pendidikan Biologi FKIP Universitas Sebelas Maret. hlm 192–195.
- Nyer SC, Volkenborn N, Aller RC, Graffam M, Zhu Q, Price RE. 2022. Nitrogen transformations in constructed wetlands: A closer look at plant-soil interactions using chemical imaging. *Science Total Environment*. 816.151560. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151560>.
- Oktavia L, Hidayat ADN, Purnama AR, Taqwanur T. 2023. Efektifitas kombinasi media dalam penyisihan BOD dan TSS limbah cair rumah makan menggunakan *constructed wetland* dengan tanaman *Cyperus papyrus*: *the effectiveness of media combination in BOD and TSS removal of restaurant liquid waste using constructed wetland with Cyperus papyrus plants*. *Media Ilmiah Teknik Lingkungan (MITL)*. 8(2):74–82.
- Priantoro EA, Suryaatmana P, Sumiarsa D, Sembiring T. 2025. Fitoremediasi logam berat sistem lahan basah terapung menggunakan tanaman akar wangi (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) sebagai hiperakumulator. *J Teknologi Lingkungan*. 26(1): 114-127.
- Prisilla C, Insani IN, Rizky M, Syamsia S, Arsat Y, Yusuf H, Yani A. 2024. Analisis dampak pencemaran lindi Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Desa Jononunu terhadap kualitas air dan lingkungan perkebunan: studi literatur. *J Kolaboratif Sains*. 7(5): 1806-1812.
- Puspitaningsari A, Joegijantoro R, Yuniastuti T. 2024. Analisis kualitas air lindi di TPA Lempeni Kabupaten Lumajang. *Media Husada J Environmental Health Science*. 4(1): 25-33.
- Rahmawati A. 2022. Perencanaan sistem lahan basah buatan dalam pengolahan limbah cair domestik menggunakan tanaman *Cyperus papyrus*. *Envirotek: J Ilmiah Teknik Lingkungan*. 14(2): 164-168.

- Royani S, Fitriana AS, Enarga AB, Bagaskara HZ. 2021. Kajian COD dan BOD dalam air di lingkungan tempat pemrosesan akhir (TPA) sampah Kaliori Kabupaten Banyumas. *J Sains Teknologi Lingkungan*. 13(1): 40-49.
- Royani S, Fitriana AS. 2023. Ammoniacal nitrogen contaminant in water of Kaliori landfill area in Banyumas. *INSOLOGI: J Sains Teknologi*. 2(3):462–467. doi:10.55123/insologi.v2i3.1885.
- Said NI, Hartaja DR. 2018. Pengolahan air lindi dengan proses biofilter anaerob-aerob dan denitrifikasi. *Jurnal Air Indonesia*. 8(1): 1-20.
- Salim YA. 2021. Efektivitas sistem *constructed wetland* sebagai pengolahan limbah batik ecoprint menggunakan tanaman kangkung air. *Jurnal Syntax Fusion*. 1(8): 299-311.
- Sarah S, Dharmono D, Riefani MK. 2022. Rumput (Cyperaceae) di habitat rawa bervegetasi galam di Kecamatan Bati-Bati, Kalimantan Selatan. *Wahana-Bio: J Biologi Pembelajarannya*. 14(1): 11-21.
- Sente EMT. 2017. Studi efisiensi penyisihan COD dalam lindi dengan sistem evapotranspirasi menggunakan tumbuhan sente (*Alocasia macrorrhiza*) dan rumput belulang (*Eleusine indica*). *J Presipitasi: Media Komunikasi Pengembangan Teknik Lingkungan*. 14(2):82.
- Shakila NA, Susilowati LE, Dewi RAS, Suriadi A. 2024. Population of phosphate solubilizing bacteria in maize rhizosphere with different irrigation volume and organic matter. *J Biologi Tropis*. 24(2):730–739.
- Sukono GAB, Hikmawan FR, Evitasari, Satriawan D. 2020. Mekanisme fitoremediasi: review. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*. 2(2).
- Suryawan IWK. 2018. Fitoremediasi COD, fosfat, dan ammonia air limbah domestik bersalinitas dengan eceng gondok (*Eichhornia crassipes*). *J Ris Kaji Teknol Lingkung*. 1(2):95–100.
- Susilowati LE, Arifin Z. 2023. Pengaruh aplikasi pupuk kompos dan biochar terhadap populasi bakteri di rizosfer dan pertumbuhan tanaman padi gogo (*Oryza sativa L.*). *Agroteksos*. 33(1): 312-324.
- Sutaji HI, Sianturi HL, Warsito A. 2023. Estimasi sebaran air lindi bawah permukaan berdasarkan data elektromagnetik pada area tempat pembuangan akhir (TPA) Noinbila Kabupaten Timor Tengah Selatan. *J Fisika: Fisika Sains Aplikasinya*. 8(1): 60-68.
- Syafrudin, Hadiwidodo M, Widodo WI, Budihardjo AM, Ramadan SB, Puspita SA, Wati RH. 2023. The use of multiple-soil layer bioreactors to boost decomposition of fresh leachate. *Global NEST J*. 25(6): 41-47.
- Syahdoa'a D, Khair A, Haris A, Arifin A. 2025. Pengaruh jenis pasir terhadap kadar BOD dan COD pada air lindi di Kecamatan Pulau Sebuku Kabupaten Kotabaru. *J Penelitian Multidisiplin Bangsa*. 1(11): 1970-1983.
- Ulumudin MM, Purnomo T. 2022. Analisis kandungan logam berat timbal (Pb) pada tumbuhan papyrus (*Cyperus papyrus L.*) di Sungai Wangi Pasuruan. *LenteraBio: Berkala Ilmiah Biologi*. 11(2): 273-283.
- Wiraswati HL, Kodir RA, Saputra YH, Anwar C. 2021. *Tumbuhan Obat: Ragam dan Potensi Area Reklamasi Tambang Batubara Site Kusan-Girimulya, Kalimantan Selatan*. Pasuruan: Penerbit NEM.

LAMPIRAN



Gambar 3 Pengambilan air lindi



Gambar 4 Hasil filtrasi pertama



Gambar 5 Hasil pengukuran pH awal pengamatan



Gambar 6 Hasil pengukuran pH akhir pengamatan



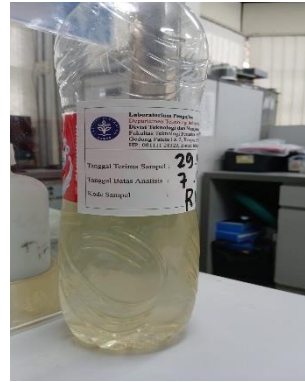
Gambar 7 Hasil pengukuran salinitas dan suhu awal



Gambar 8 Hasil pengukuran salinitas dan suhu akhir



Gambar 9 Proses pembuatan alat



Gambar 10 Penyerahan air lindi setelah bioremediasi ke lab



Gambar 11 Hasil uji laboratorium parameter air lindi sebelum Perlakuan



Gambar 12 Hasil uji laboratorium parameter air lindi sesudah Perlakuan