

**EFEKTIVITAS *Cyperus papyrus* DALAM  
MENURUNKAN KADAR LOGAM BESI PADA AIR ASAM  
TAMBANG BATUBARA DI PT GEA LESTARI  
KECAMATAN MESTONG KABUPATEN  
MUARO JAMBI**

SKRIPSI



**IBNU SINA AL AMIN**

**F1G321046**

**PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN  
JURUSAN TEKNIK SIPIL, KIMIA DAN LINGKUNGAN**

**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS JAMBI**

**2025**

### SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi ini benar karya sendiri. Sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali sebagai acuan atau kutipan dengan mengikuti tata penulisan ilmiah yang telah lazim.

Tanda tangan yang tertera dalam halaman pengesahan adalah asli. Jika tidak asli, saya siap menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Jambi, 03 Juli 2025



Ibnu Sina Al Amin

## RINGKASAN

Permasalahan pencemaran air akibat aktivitas penambangan batubara menghasilkan air asam tambang (AAT) dengan kandungan logam berat, terutama besi (Fe), yang melebihi ambang batas aman lingkungan. Konsentrasi besi yang tinggi dapat membahayakan ekosistem dan kesehatan manusia. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini menggunakan metode fitoremediasi dengan tumbuhan *Cyperus papyrus* dalam sistem *constructed wetland* sebagai solusi pengolahan yang ramah lingkungan, murah, dan mudah diterapkan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis konsentrasi Fe setelah fitoremediasi menggunakan *Cyperus papyrus* dengan variasi waktu 3, 9, dan 14 hari, menganalisis efektivitas penurunan konsentrasi Fe dengan dan tanpa perlakuan tanaman, serta menilai adanya perbedaan signifikan antara perlakuan menggunakan tanaman dan tanpa tanaman berdasarkan uji statistik. Penelitian dilakukan di PT Gea Lestari, Kecamatan Mestong, Kabupaten Muaro Jambi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Cyperus papyrus* mampu menurunkan kadar logam besi secara signifikan dari 10,85 mg/L menjadi 2,315 mg/L dalam waktu 14 hari, sehingga memenuhi baku mutu air limbah pertambangan berdasarkan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 113 Tahun 2003 sebesar 7 mg/L. Uji statistik T menunjukkan bahwa penurunan kadar Fe tersebut signifikan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa fitoremediasi menggunakan *Cyperus papyrus* efektif sebagai metode pengolahan air asam tambang yang tercemar logam berat, serta dapat dijadikan solusi alternatif dalam pengelolaan lingkungan di kawasan pertambangan.

## **SUMMARY**

*The issue of water pollution caused by coal mining activities has resulted in the formation of acid mine drainage (AMD) containing heavy metals, particularly iron (Fe), which exceeds the environmental safety limits. High concentrations of iron can harm both ecosystems and human health. To address this issue, this study employed a phytoremediation method using *Cyperus papyrus* in a constructed wetland system as an environmentally friendly, low-cost, and easily applicable treatment solution. The objectives of this research were to analyze the Fe concentration after phytoremediation using *Cyperus papyrus* with variations in exposure time (3, 9, and 14 days), to evaluate the effectiveness of Fe reduction with and without plant treatment, and to assess whether the differences observed were statistically significant. The study was conducted at PT Gea Lestari, Mestong Subdistrict, Muaro Jambi Regency.*

*The results showed that *Cyperus papyrus* significantly reduced iron levels from 10.85 mg/L to 2.315 mg/L within 14 days, thereby meeting the effluent standard set by the Decree of the State Minister for the Environment No. 113 of 2003, which stipulates a maximum Fe concentration of 7 mg/L. Statistical analysis using a T-test confirmed that the reduction in Fe levels was significant. Therefore, it can be concluded that phytoremediation using *Cyperus papyrus* is an effective method for treating acid mine drainage contaminated with heavy metals and can serve as an alternative solution for environmental management in mining areas.*

**EFEKTIVITAS *Cyperus papyrus* DALAM  
MENURUNKAN KADAR LOGAM BESI PADA AIR ASAM  
TAMBANG BATUBARA DI PT GEA LESTARI  
KECAMATAN MESTONG KABUPATEN  
MUARO JAMBI**

Diajukan sebagai salah satu syarat dalam melakukan penelitian dalam rangka  
penulisan skripsi pada Program Studi Teknik Lingkungan



**IBNU SINA AL AMIN**

**F1G321046**

**PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN  
JURUSAN TEKNIK SIPIL, KIMIA DAN LINGKUNGAN**

**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS JAMBI**

**2025**

## HALAMAN PENGESAHAN

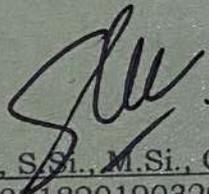
Skripsi dengan Judul **Efektivitas *Cyperus Papyrus* dalam Menurunkan Kadar Logam Besi pada Air Asam Tambang Batubara di PT Gea Lestari Kecamatan Mestong Kabupaten Muaro Jambi**, yang telah disusun oleh **Ibnu Sina Al Amin**, **NIM : F1G321046** telah dipertahankan didepan tim penguji tanggal 2025 dan dinyatakan lulus.

Susunan Tim Penguji :

- Ketua : Shally Yanova, S.Si., M.Si., CCSME.  
Sekretaris : Ir. Lailal Gusri, S.T., M.Sc  
Anggota : 1. Ir. Febri Juita Anggraini, S.T., M.T.  
2. Ir. Rinaldi, M.Si.  
3. Tri Syukria Putra, S.T., M.Si

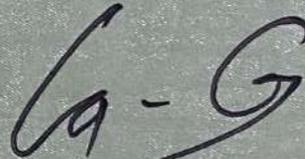
Disetujui,

Pembimbing Utama



Shally Yanova, S.Si., M.Si., CCSME.  
NIP. 198908182019032021

Pembimbing Pendamping



Ir. Lailal Gusri, S.T., M.Sc.  
NIP 197308172009031001

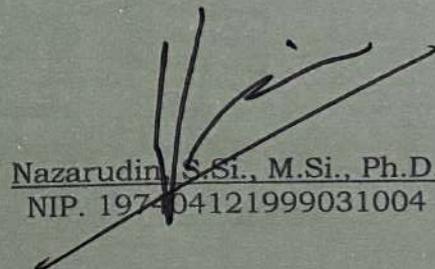
Diketahui,

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi



Drs. Jefri Marzal, M.Sc., D.I.T  
NIP. 196806021993031004

Ketua Jurusan Teknik Sipil, Kimia dan Lingkungan



Nazarudin, S.Si., M.Si., Ph.D.  
NIP. 197404121999031004

## **RIWAYAT HIDUP**



Ibnu Sina Al Amin, yang akrab di panggil Ibnu lahir di Jambi pada tanggal 21 September 2003. Saya merupakan anak kedua dari dua bersaudara, putra dari pasangan Sarial dan Heldawati. Sejak kecil, saya dibesarkan dalam lingkungan keluarga yang menjunjung tinggi nilai-nilai agama Islam. Saya tinggal di Kelurahan Mayang Mangurai, Kecamatan Alam Barajo, Kota Jambi. Pendidikan dasar saya tempuh di SDN 130 Kota Jambi, kemudian melanjutkan pendidikan ke Pondok Pesantren Sa'adatuddarain Jambi. Saya menyelesaikan jenjang menengah atas di MA Laboratorium Kota Jambi dan lulus pada tahun 2021. Selama menjalani masa perkuliahan, Saya aktif mengikuti berbagai kegiatan organisasi dan pengabdian masyarakat. Saya pernah menjadi pengurus harian di Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL) periode 2023/2024 pada divisi Kewirausahaan. Saya juga berkesempatan mengikuti Program Inovasi Desa (Pro-IDE) di Desa Gambut Jaya pada tahun 2023. Pengalaman-pengalaman tersebut sangat berharga dalam membentuk karakter, tanggung jawab, serta semangat Saya untuk terus belajar dan berkontribusi bagi masyarakat.

## PRAKATA

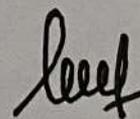
Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Efektivitas *Cyperus Papyrus* Dalam Menurunkan Kadar Logam Besi Pada Air Asam Tambang Batubara Di PT Gea Lestari Kecamatan Mestong Kabupaten Muaro Jambi”**. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi. Penulis berharap hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi positif dalam upaya pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan, khususnya dalam pengolahan air asam tambang. Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, dukungan, serta bimbingan dari berbagai pihak. Dengan segala kerendahan hati, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Drs. Jefri Marzal, M.Sc.,D.I.T., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Jambi.
2. Bapak Nazarudin, S.Si, M.Si., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Kimia, dan Lingkungan Universitas Jambi.
3. Ibu Febri Juita Anggraini, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Jambi.
4. Ibu Shally Yanova, S.Si.,M.Si., CCSME., selaku Dosen Pembimbing Skripsi 1 yang selalu membimbing dan mengarahkan penulis dalam proses penulisan skripsi ini.
5. Bapak Ir. Lailal Gusri S.T., M.SC., selaku Dosen Pembimbing Skripsi 2 yang selalu membimbing dan mengarahkan penulis dalam proses penulisan skripsi ini.
6. Terima kasih kepada Dosen Penguji, yaitu Ibu Ir. Febri Juita Anggraini, S.T., M.T., Bapak Ir. Rinaldi, M.Si., dan Bapak Tri Syukria Putra, S.T., M.Si., atas semua saran dan masukan yang sangat berharga selama penulisan skripsi ini.
7. Bapak dan Ibu dosen Teknik Lingkungan yang telah berjasa memberikan ilmunya selama penulis menempuh perkuliahan sehingga penulis dapat sampai ke tahap tugas akhir ini.
8. Kepada kedua orang tua saya yang sangat saya cintai dan terkasih Ayahanda Sarial S.H., M.H., dan ibunda Heldawati yang selalu mendoakan, memberikan kasih dukungan dan penyemangat saya dalam menyelesaikan studi.

9. Kepada Bapak Yogi, Bang Alfian, serta seluruh staf PT Gea Lestari atas segala bantuan, arahan, dan dukungan yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini.
10. Kepada teman seperjuangan yang saling membantu, saling menguatkan, mendoakan serta memberikan motivasi dukungan tanpa henti hingga terselesaikannya penulisan skripsi ini.
11. Kepada saudari Salwa Khairunisa yang telah membantu dan menemani penulis hingga terselesaikannya tugas akhir ini.
12. Kepada sahabat-sahabat tercinta: M. Reyhan Alviano, M. Alvito Dif Putra, Fadelin Luqyana, M. Syamlan Kamal, Rama Febrian, Anggelisa Anugerah Fitri, Sindy Purwanti, dan Apriliana Saputri, yang telah menjadi teman seperjuangan selama masa perkuliahan. Terima kasih atas kebersamaan, semangat, tawa, serta dukungan yang tak ternilai yang telah kalian berikan. Kehadiran kalian menjadikan setiap langkah dalam perjalanan ini lebih berarti dan penuh kenangan. Semoga harapan persahabatan ini tetap terjalin erat hingga di masa mendatang.
13. Kepada Farhan dan seluruh rekan-rekan Teknik Lingkungan Angkatan 2021 atas segala dukungan, semangat, dan doa yang senantiasa diberikan selama proses penyusunan skripsi ini. Kebersamaan dan solidaritas Kalian menjadi penyemangat tersendiri dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
14. Kepada diri sendiri, atas keteguhan hati, rasa tanggung jawab, dan komitmen untuk menyelesaikan apa yang telah dimulai. Meskipun dihadapkan pada berbagai tantangan selama proses penulisan ini, penulis berhasil bertahan dan terus melangkah hingga akhir. Terima kasih telah tidak menyerah dan tetap setia pada tujuan.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa skripsi ini masih memiliki berbagai kekurangan. Penulis memohon maaf atas segala keterbatasan yang terdapat dalam penulisan ini, dan sangat mengharapkan kritik serta saran yang membangun dari berbagai pihak demi perbaikan di masa mendatang. Akhir kata, penulis berharap agar skripsi ini dapat memberikan manfaat dan pemahaman yang berharga bagi para pembaca, serta menjadi pengalaman yang berarti bagi penulis secara pribadi.

Jambi, 03 Juli 2025



Ibnu Sina Al Amin

## DAFTAR ISI

	Halaman
SURAT PERNYATAAN.....	i
RINGKASAN.....	ii
SUMMARY .....	iii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL .....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xiii
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.4. Manfaat Penelitian .....	3
1.5. Hipotesis .....	3
1.6. Batasan Masalah .....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1 Air Asam Tambang.....	5
2.1.1 Pembentukan dan Karakteristik Air Asam Tambang .....	6
2.2 Parameter Kualitas Air .....	7
2.3 Logam berat Air Asam Tambang.....	7
2.3.1. Besi (Fe).....	8
2.4 <i>Cyperus papyrus</i> .....	9
2.4.1. Mekanisme Penyerapan Logam Berat Fe Oleh Tumbuhan <i>Cyperus Papyrus</i> .....	10
2.5 <i>Constructed wetland</i> .....	11
2.6 Fitoremediasi .....	12
2.6.1. Fitoremediasi menggunakan <i>constructed wetland</i> .....	12
2.7 Destruksi Basah .....	13
2.8 Analisis Spektrofotometri Serapan Atom.....	14
2.9 Uji T 14	
2.10 <i>Quantum Geographic Information System (QGIS)</i> .....	15
2.11 Penelitian Terdahulu.....	17
III. METEDOLOGI PENELITIAN .....	19
3.1 Tempat dan waktu Penelitian .....	19
3.1.1 Tempat Penelitian .....	19
3.1.2 Waktu Penelitian.....	20
3.2 Alat dan Bahan.....	20
3.3 Diagram Alir .....	22

3.4	Metode Penelitian.....	23
3.5	Teknik Pengambilan Sampel .....	26
	3.5.1 Penentuan Titik Pengambilan Sampel Air .....	26
	3.5.2 Pengambilan Sampel Air.....	27
	3.5.3 Cara Pengambilan Untuk Pengujian Kualitas Air Secara Umum .....	27
3.6	Teknik Pengujian Logam Berat Besi.....	29
3.7	Pengumpulan Data .....	30
3.8	Analisis Data .....	30
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN .....	32
4.1	Analisis Konsentrasi Logam Berat Fe.....	32
	4.1.1 Analisis Awal Konsentrasi Logam Berat Fe Pada Air Asam Tambang .....	32
	4.1.2 Konsentrasi Logam Berat Fe pada Reaktor Menggunakan Tumbuhan.....	33
	4.1.3 Konsentrasi Logam Berat Fe pada Reaktor Tanpa Tumbuhan .....	35
4.2	Efektivitas Penurunan Logam Berat Fe pada Reaktor.....	38
	4.2.1 Reaktor Dengan Tumbuhan .....	38
	4.2.2 Reaktor Tanpa Tumbuhan .....	40
4.3	Analisi Uji T Kadar Besi Perbandingan Perlakuan Dengan dan Tanpa Tumbuhan .....	42
V.	PENUTUP .....	44
	5.1. Kesimpulan .....	44
	5.2. Saran .....	44
	DAFTAR PUSTAKA .....	46
	LAMPIRAN .....	51

## DAFTAR TABEL

	Halaman
1. Komposisi Air Asam Tambang .....	7
2. Penelitian Terdahulu .....	17
3. Alat Penelitian.....	20
4. Bahan Penelitian.....	21
5. Parameter Air Asam Tambang .....	25
6. Kadar Besi (Fe) dan pH Air Sebelum Fitoremediasi.....	32
7. Hasil Uji Fe dengan Tumbuhan .....	33
8. Konsentrasi Logam Berat Fe pada Reaktor Kontrol.....	35
9. Efektivitas Penurunan Logam Berat Fe pada Reaktor Menggunakan Tumbuhan .....	38
10. Efektivitas Penurunan Logam Berat Fe pada Reaktor Tanpa Perlakuan .	40
11. Hasil Uji T-test konsentrasi Fe dengan dan tanpa <i>Cyperus papyrus</i> .....	43

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
1. Tumbuhan <i>Cyperus papyrus</i> .....	10
2. Peta Lokasi Penelitian .....	19
3. Diagram Alir Penelitian.....	22
4. Desain Bak Reaktor Tanpa Tumbuhan .....	25
5. Desain Bak Reaktor Dengan Tumbuhan .....	25
6. Air Asam Tambang .....	26
7. Titik Hulu,Tengah dan Hilir .....	27
8. Alat yang Digunakan .....	27
9. Membilas Wadah Sampel .....	28
10. Menghomogenkan Sampel Air .....	28
11. Memasukan Sampel Air .....	28
12. Mengawetkan Sampel Air .....	29
13. Sampel Air Asam Tambang.....	29
14. Grafik Perubahan Konsentrasi Fe dengan Tumbuhan .....	34
15. Grafik Perubahan Konsentrasi Fe Tanpa Tumbuhan .....	36
16. Perbandingan Konsentrasi Fe pada Reaktor dengan Tumbuhan dan Tanpa Tumbuhan.....	37
17. Perbandingan Efektivitas Penurunan Logam Berat Fe pada Reaktor Menggunakan Tumbuhan dan Tanpa Tumbuhan.....	42

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
1. Hasil Analisis Laboratorium .....	51
2. Dokumentasi Penelitian .....	52
3. Pengukuran Suhu pada Tiap Variasi Waktu .....	55
4. Perhitungan Efektivitas dengan Tumbuhan .....	55
5. Perhitungan Efektivitas tanpa Tumbuhan.....	56
6. Alur Pembuatan Peta Qgis.....	56
7. Desain Reaktor <i>Constructed wetland</i> .....	59

## I. PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Pertambangan dengan metode *open mining* menyebabkan kerusakan ekosistem secara fisik dan kimiawi, salah satunya melalui pembentukan air asam tambang (AAT) atau *acid mine drainage* (AMD), yang merupakan salah satu sumber utama pencemaran kualitas air akibat proses senyawa hasil oksidasi mineral sulfida (Kaharapenni & Hendrawan, 2015). Proses ini terjadi akibat terbukanya lapisan batuan yang mengandung senyawa sulfur yang bereaksi dengan air dan oksigen, membentuk senyawa sulfat yang bersifat asam (Wahyudin *et al.*, 2018). Salah satu karakteristik utama AAT adalah tingginya kadar logam berat, khususnya besi (Fe), yang sangat berbahaya bagi lingkungan.

Keberadaan Fe dalam konsentrasi tinggi dapat menurunkan kualitas air, menyebabkan kekeruhan, endapan merah kecoklatan, serta menurunkan kadar oksigen terlarut (Rasman & Saleh, 2016). Hal ini berdampak langsung terhadap kehidupan organisme akuatik karena logam besi dapat menghambat respirasi ikan, merusak insang, serta mengganggu pertumbuhan dan reproduksi organisme perairan lainnya (Herliyanto *et al.*, 2014). Kadar Fe yang berlebihan juga menghambat fiksasi unsur hara penting seperti fosfor dan nitrogen, yang berakibat pada penurunan produktivitas ekosistem (Kiswanto *et al.*, 2018).

Kondisi tersebut berpotensi meningkatkan risiko pencemaran logam berat terhadap lingkungan perairan, khususnya pada sungai-sungai di sekitar lokasi penambangan (Kaharapenni & Hendrawan, 2015). Analisis kualitas air di area pertambangan batubara menjadi penting untuk menilai potensi pencemaran yang terjadi. Berdasarkan hasil analisis awal di wilayah pertambangan PT Gea Lestari, kadar logam Fe terdeteksi sebesar 10,850 mg/L, melebihi baku mutu mengacu pada Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 113 Tahun 2003 yang menetapkan ambang batas maksimum sebesar 7 mg/L.

Diperlukan tindakan pengolahan yang efektif dan ramah lingkungan untuk mengatasi pencemaran akibat kadar logam berat yang tinggi dalam air asam tambang. Fitoremediasi merupakan salah satu metode bioremediasi yang terbukti efektif dan berkelanjutan, dengan memanfaatkan Tumbuhan untuk menyerap, mengakumulasi, atau menetralkan logam berat dari media tanah maupun air (Ghosh & Singh, 2005). Metode ini memiliki keunggulan dalam hal efisiensi biaya, kemudahan aplikasi di lapangan, serta minimnya risiko pencemaran sekunder. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Manarfa *et al.*, (2024), fitoremediasi menunjukkan potensi besar dalam pemulihan lingkungan tambang karena

kemampuan Tumbuhan dalam beradaptasi terhadap kondisi ekstrem serta kemampuannya dalam menurunkan konsentrasi logam secara signifikan.

Beberapa Tumbuhan telah dikaji sebagai agen fitoremediasi, antara lain *Eichhornia crassipes* yang menurunkan kadar Fe hingga <0,033 mg/L dalam 4 hari namun memerlukan substrat organik tambahan (Fridtriyanda *et al.*, 2024). *Eleocharis dulcis* yang mampu mengakumulasi Fe hingga 91,76 mg/g dalam waktu 12 minggu (Ariyani *et al.*, 2014). Penelitian lain yang dilakukan oleh Habibullah *et al.*, (2021), menyatakan bahwa tumbuhan *Typha angustifolia* mampu menurunkan kadar Fe sebesar 57,93% dalam 4 minggu dengan bantuan fungi mikoriza. Meskipun efektif, sebagian besar metode tersebut memerlukan bahan tambahan, waktu yang lama, atau biaya operasional tinggi.

*Cyperus papyrus* menunjukkan efektivitas tinggi dalam menurunkan kadar Fe tanpa perlakuan tambahan. Berdasarkan penelitian Nirtha *et al.*, (2021), tumbuhan *Cyperus papyrus* efektif dalam menurunkan kadar logam berat Fe sebesar 99,94%. Penelitian yang dilakukan oleh Tosepu (2012), menunjukkan bahwa tanaman papirus memiliki kemampuan menyerap logam berat melalui jaringan akar dan batangnya. Kemampuan ini didukung oleh struktur morfologi tanaman yang terdiri atas batang yang tebal dan akar yang kuat, serta kandungan senyawa aktif seperti alkaloid, glikosida, dan flavonoid yang berperan dalam menetralkan polutan. Kandungan senyawa tersebut memungkinkan papirus untuk menstabilkan dan mengakumulasi logam berat dari lingkungan tercemar. Tumbuhan ini juga mudah ditemukan, tidak memerlukan substrat tambahan, dan memiliki adaptasi tinggi di lahan basah, menjadikannya pilihan tepat untuk pengolahan air tambang yang efisien dan ekonomis.

Berdasarkan tinggi kadar pencemaran logam Fe yang melebihi ambang batas, serta efektivitas *Cyperus papyrus* dalam menyerap logam tersebut, penelitian ini dilakukan dengan menggunakan tumbuhan *Cyperus papyrus* sebagai metode fitoremediasi pada air asam tambang batubara PT Gea Lestari, sebagai upaya pemulihan lingkungan yang aplikatif dan berkelanjutan.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Tingginya kadar logam berat pada AAT, salah satunya Fe dapat mencemari lingkungan bila logam berat tersebut tidak dikelola dengan benar sehingga perlu dilakukannya penurunan Fe dengan menggunakan metode fitoremediasi. Dengan rumusan masalah, seperti :

1. Berapa konsentrasi Fe setelah fitoremediasi menggunakan *Cyperus papyrus* dengan variasi waktu 6 hari, 9 hari, dan 14 hari pada air asam tambang batubara PT Gea Lestari Kecamatan Mestong, Kabupaten Muaro Jambi?

2. Berapa efektivitas penurunan konsentrasi Fe menggunakan tumbuhan dan tanpa tumbuhan *Cyperus papyrus* pada air asam tambang batubara PT Gea Lestari, Kecamatan Mestong, Kabupaten Muaro Jambi?
3. Apakah terdapat perbedaan signifikan terhadap penurunan Konsentrasi Fe dengan perlakuan tumbuhan dan perlakuan tanpa tumbuhan?

### **1.3. Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini seperti:

1. Menganalisis konsentrasi Fe fitoremediasi menggunakan *Cyperus papyrus* dengan variasi waktu 6 hari, 9 hari, serta 14 hari pada air asam tambang batubara PT Gea Lestari Kecamatan Mestong, Kabupaten Muaro Jambi.
2. Menganalisis efektivitas penurunan konsentrasi Fe menggunakan Tumbuhan dan tanpa tumbuhan *Cyperus papyrus* pada air asam tambang batubara PT Gea Lestari, Kecamatan Mestong, Kabupaten Muaro Jambi.
3. Menganalisis perbedaan penurunan Konsentrasi Fe dengan perlakuan tumbuhan dan tanpa perlakuan tumbuhan

### **1.4. Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat penelitian yang ditemukan pada Tugas Akhir ini seperti:

1. Bagi penulis, memperbanyak ilmu pengetahuan menyangkut Efektivitas tumbuhan *Cyperus papyrus* dalam menurunkan Fe pada bekas lahan tambang batubara PT Gea Lestari, Kecamatan Mestong, Kabupaten Muaro Jambi.
2. Bagi pembaca, bisa membagi pengetahuan menyangkut tumbuhan *Cyperus papyrus* serta penerapan dalam melestarikan lingkungan.
3. Sebagai data tambahan dan bahan kajian untuk penelitian berikutnya.

### **1.5. Hipotesis**

Pada penelitian ini yang termasuk dalam hipotesis penelitian yaitu:

1.  $H_0$  : Tidak terjadi penurunan kadar Fe untuk air asam tambang PT Gea Lestari, Kecamatan Mestong, Kabupaten Muaro Jambi menggunakan tumbuhan *Cyperus papyrus*.
2.  $H_1$  : Terjadi penurunan kadar Fe pada air asam tambang PT Gea Lestari, Kecamatan Mestong, Kabupaten Muaro Jambi menggunakan tumbuhan *Cyperus papyrus*.

### **1.6. Batasan Masalah**

Berdasarkan latar belakang serta rumusan masalah yang telah disusun. Adapun batasan masalah pada tugas akhir yaitu :

1. Penelitian dilakukan di PT Gea Lestari Muaro Jambi dengan pengambilan sampel air asam tambang di batubara pada area PT Gea Lestari Muaro Jambi.

2. Parameter yang diturunkan adalah konsentrasi logam berat besi menggunakan tumbuhan *Cyperus papyrus*.
3. Fitoremediasi akan di uji cobakan pada konsentrasi logam berat tertinggi menggunakan tumbuhan.
4. Tumbuhan *Cyperus papyrus* yang dipakai pada penelitian ini didapat melalui toko tumbuhan.
5. Metode yang dipakai seperti eksperimental pada analisis lahan basah buatan menggunakan spektrofotometri serapan atom.
6. Pengujian ini dilakukan dengan pengambilan sampel sebelum pengolahan.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Air Asam Tambang

Air asam tambang (AAT), pada istilah asing disebut sebagai *Acid Mine Drainage* (AMD) atau *Acid Rock Drainage* (ARD), tercipta oleh reaksi antara air, oksigen (Nasir *et al.*, 2014). AAT merupakan salah satu permasalahan lingkungan pada industri pertambangan batubara. Drainase asam tambang adalah air asam yang tercipta berhubung ditemukannya mineral sulfida yang terekspos oleh penggalian serta pembuangan batuan di atasnya kemudian bereaksi bersama oksigen pada udara dalam lingkungan berair.

Pembangunan saluran air asam tambang dapat memengaruhi kualitas air tanah pada wilayah pertambangan. Drainase asam tambang bisa membuat penurunan kualitas air tanah, seperti air sumur yang keruh, sedikit berbau, dan terkadang sedikit berasa. Keadaan ini dapat membahayakan kesehatan warga jika menggunakan air tersebut sebagai sumber air minum. Munculnya air asam tambang disebabkan oleh reaksi mineral sulfida dengan air dan udara. Kegiatan pemindahan lapisan penutup mengekspos mineral sulfida, mineral sulfidanya terpapar serta bereaksi bersama oksigen serta menciptakan air asam tambang (Rahmatullah *et al.*, 2023).

Mineral sulfida teroksidasi mengganti sifat kimia dengan drastis, sehingga air tambang bersifat asam memiliki pH rendah dan mengandung senyawa organik, anorganik, serta logam berat. AAT menimbulkan pencemaran lingkungan, di mana daerah terkena AAT berkurangnya kesuburan tanah, dapat menghambat kesehatan masyarakat sekitar, serta menimbulkan korosi untuk peralatan pertambangan. Batuan ini berisi sulfida melalui ditemukannya oksigen serta air teroksidasi menyusun menjadi asam sulfat, bisa merubah pH air menjadi rendah. pH rendah menaikkan kelarutan logam berat untuk air. AAT kaya akan logam berat dan memiliki tingkat keasaman tinggi memiliki potensi besar untuk menjadi sumber pencemaran lingkungan (Yunus & Prihatini, 2018).

Selain menjadi sumber pencemar, logam berat pada AAT juga berperan dalam mempercepat proses pelindian logam dari batuan induk, sehingga kandungan logam dalam air meningkat secara signifikan. Proses pelindian ini dipicu oleh reaksi oksidasi mineral sulfida, terutama pirit ( $\text{FeS}_2$ ), yang membentuk asam sulfat saat bereaksi dengan oksigen dan air. Asam sulfat yang terbentuk menyebabkan pelarutan logam-logam seperti Fe, Mn, Cu, dan Zn dalam jumlah besar ke dalam lingkungan perairan (Younger *et al.*, 2002). AAT juga memiliki potensi menimbulkan dampak ekotoksikologis, seperti menurunnya keanekaragaman hayati dan terganggunya keseimbangan ekosistem akuatik akibat tingginya kadar logam dan pH rendah (Skousen, 2014). Pengelolaan AAT

tidak hanya penting untuk perlindungan kualitas air, tetapi menjadi prioritas dalam upaya pemulihan lingkungan pasca tambang.

### **2.1.1 Pembentukan dan Karakteristik Air Asam Tambang**

AAT adalah fenomena yang terjadi jika mineral-mineral yang berisi sulfida terpapar air serta oksigen selama proses penambangan. Proses oksidasi pirit ( $\text{FeS}_2$ ) menghasilkan ion besi ( $\text{Fe}^{2+}$ ), sulfat, dan proton yang meningkatkan keasaman lingkungan. Fenomena ini umum terjadi baik pada pertambangan batubara terbuka maupun bawah tanah. Penyebab utama terbentuknya AAT adalah kandungan sulfur dalam batuan yang mengalami oksidasi. Kondisi alam kemudian mendukung perubahan oksida sulfur menjadi asam. Proses ini dipercepat oleh tingginya curah hujan di area pertambangan. Efek kumulatif dari reaksi kimia dan faktor lingkungan mengakibatkan peningkatan keasaman yang signifikan pada air di area pertambangan, yang dikenal sebagai air asam tambang. Pembentukan air ini memiliki pH antara 3 dan 5 disebabkan oleh oksidasi alami mineral belerang (mineral sulfida) untuk batuan yang terpapar sepanjang penambangan. Operasi penambangan, tidak mungkin untuk menghindari hal ini, karena penambangan pada dasarnya ialah proses mengekstraksi mineral oleh batuan induk supaya bisa dibawa, diproses, serta dipergunakan (Hidayat, 2017).

Asam sulfat serta endapan besi hidroksida dihasilkan oleh reaksi antara besi, oksigen, serta air. Endapan besi hidroksida juga dikenal sebagai (*Yellowboy*) berwarna kuning di dasar saluran tambang. Proses oksidasi mineral sulfida mengubah sifat parameter kimia secara drastis, menurunkan pH air hingga 3 dan meningkatkan konsentrasi logam terlarut berbahaya seperti Al, Fe, Mn, Cd, Cu, Sn, Zn, As, serta Hg. Konsentrasi khusus, ini bisa membahayakan lingkungan (Yunus & Prihatini, 2018).

Reaksi kimia yang terjadi dalam pembentukan air asam tambang dapat berlangsung secara abiotik maupun biotik. Pada proses abiotik, oksidasi pirit oleh oksigen dalam udara akan menghasilkan ion feri ( $\text{Fe}^{3+}$ ) dan asam sulfat. Namun, dalam kondisi lingkungan tambang yang lembap dan kaya oksigen, reaksi ini juga dipercepat oleh aktivitas mikroorganisme, terutama bakteri *Acidithiobacillus ferrooxidans* yang mampu mengoksidasi  $\text{Fe}^{2+}$  menjadi  $\text{Fe}^{3+}$ , sehingga mempercepat proses produksi asam dan pelepasan logam berat ke lingkungan (Johnson & Hallberg, 2005). Karakteristik utama AAT adalah pH yang sangat rendah, tingginya konsentrasi logam berat terlarut, serta tingginya kadar sulfat. Ciri-ciri ini menyebabkan AAT sangat bersifat korosif dan beracun terhadap organisme air serta merusak struktur tanah di sekitarnya. Jika tidak ditangani dengan baik, air ini dapat mencemari badan air permukaan dan air tanah, serta

berdampak jangka panjang terhadap ekosistem dan kesehatan masyarakat sekitar area tambang.

## 2.2 Parameter Kualitas Air

Peningkatan kadar parameter fisika, yaitu parameter warna, dapat menunjukkan penurunan kualitas air. Meningkatnya kadar parameter warna juga menunjukkan bahwa ada bahan kimia, seperti logam, dalam air yang digali dari pertambangan batubara air asam tambang. Mengetahui kualitas air sangat penting bagi siapa saja yang menggunakan air, baik itu pribadi, komunitas, maupun industri. Kualitas air harus dipahami untuk mengetahui kandungan senyawa kimia, faktor fisika, serta mikroorganisme dalam air, baik secara kualitatif maupun kuantitatif. Parameter kualitas air ini menjadi indikator untuk menentukan apakah air layak digunakan sesuai kebutuhan dan tujuannya. Parameter pemilihan kualitas air bersih seperti nilai TDS, kekeruhan, suhu, warna, kadar Besi ( $\text{Fe}^{2+}$ ), kadar fluorida (F), kadar klorida, kadar mangan (Mn), kadar nitrit ( $\text{NO}_2$ ), keasaman (pH), sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), serta kadar total *coliform* (Hudiyah *et al.*, 2019).

AAT mengandung berbagai komponen pencemar yang berbahaya bagi lingkungan, terutama logam berat seperti Fe dan Mn, TSS yang tinggi dan tingkat keasaman (pH) yang rendah. komposisi Berdasarkan Kepmen LH Nomor 113 Tahun 2003.

**Tabel 1.** Komposisi Air Asam Tambang

Parameter	Satuan	Kadar
Derajat Keasaman (pH)		6-9
Padatan tersuspensi total (TSS)	mg/l	400
Besi (Fe)	mg/l	7
Mangan (Mn)	mg/l	4

*Sumber* : Kepmen LH No 113 Tahun 2003

## 2.3 Logam berat Air Asam Tambang

Logam berat termasuk salah satu dari banyak jenis logam yang dapat ditemukan di tanah dengan alami. Berhubung sifatnya belum dapat terurai secara hayati, logam ini termasuk kontaminan utama bagi lingkungan. Berbagai logam, misalnya mangan (Mn), seng (Zn), kromium (Cr), molibdenum (Mo), besi (Fe), serta nikel (Ni), paling berguna untuk konsentrasi rendah berhubungan pada fungsi biota tanah. Namun, untuk konsentrasi yang semakin tinggi, logam-logam ini bisa bersifat racun (Yan *et al.*, 2020).

Logam berat termasuk bagian alami tanah dengan berat jenis di atas 5 g/cm<sup>3</sup>, yang bersifat racun. Belum bisa didegradasi oleh mikroorganisme, logam berat masuk ke tubuh manusia lewat air, makanan, serta udara. Bahayanya terletak pada sistem bioakumulasi, yakni kenaikan konsentrasi unsur kimia pada tubuh makhluk hidup (Harling, 2018). Logam berat bisa bersifat sangat beracun di dalam tanah. Dampak oleh logam berat terhadap tanah serta Tumbuhan termasuk bergantinya kualitas tanah, tanah bisa berubah jadi tidak subur serta bisa menimbulkan racun untuk Tumbuhan (Sari *et al.*, 2022).

Proses penambangan pengambilan mineral dari batuan induk dapat menyebabkan meningkatnya logam berat. Mineral sulfida yang terekspos air dan oksigen selama penambangan bereaksi, mengakibatkan naiknya konsentrasi logam-logam terlarut di daerah pertambangan. Logam berat memiliki peran penting dalam metabolisme makhluk hidup. Logam berat *esensial* misalnya Se, Cu, Fe, serta Zn diperlukan dalam jumlah tertentu untuk menjaga fungsi tubuh. Sebaliknya, logam berat *non-esensial* tidak memiliki fungsi biologis dan berpotensi menyebabkan keracunan pada manusia (Yudo, 2018).

pencemaran logam Fe dan Mn dan kenaikan keasaman air bukan sekedar bermula oleh AAT di kolam pengendapan. Rembesan air dari tumpukan batubara dan endapan lumpur juga bisa menimbulkan logam berat. Hal ini diakibatkan oleh kegiatan tambang batubara meliputi penggalian, pengangkutan, serta penimbunan batuan penutup yang telah memiliki pH asam serta mengandung logam (Maulida & Purwanti, 2023).

### **2.3.1. Besi (Fe)**

Fe sangat penting untuk organisme hidup berhubung kegiatan biologisnya, seperti beralih tempat oksigen serta elektron dan menjadi kompleks porfirin pada hemoglobin, mioglobin, serta sitokrom. Sifat kimia besi, misalnya valensi, kelarutan, serta tingkat pembentukan kompleksnya, menentukan aktivitas biologis dan lingkungannya (Shen *et al.*, 2005).

Besi pada air bisa menyebabkan rasa anyir, warna kuning, dan kekeruhan air secara keseluruhan. Dalam air, besi adalah ion bervalensi dua (Fe<sup>2+</sup>) serta bervalensi tiga (Fe<sup>3+</sup>). Jika mereka terikat, mereka dapat berupa *ferric oxide* (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Fe(OH)<sub>2</sub>, Fe(OH)<sub>3</sub> maupun *ferrous sulfate* (FeSO<sub>4</sub>) tergantung oleh unsur lain yang mengikatnya (Kurniawan *et al.*, 2020).

Besi adalah logam *esensial* yang sangat penting bagi organisme hidup, tetapi jika logam ini berlebihan dapat bersifat toksik. Kandungan logam Fe yang tinggi berpotensi menimbulkan dampak serius terhadap kesehatan manusia (Supriyantini & Endrawati, 2015).

Besi adalah unsur keempat terbanyak di kerak bumi. Besi biasanya ditemukan dalam bentuk ion ferro ( $\text{Fe}^{2+}$ ) dan ferri ( $\text{Fe}^{3+}$ ). Di air alami dengan pH sekitar 7 serta cukup oksigen terlarut, ion ferro mudah berubah menjadi ion ferri karena melepaskan elektron. Sebaliknya, ion ferri bisa kembali menjadi ferro dengan menangkap elektron. Kelebihan kadar besi dapat menghambat fiksasi unsur-unsur lain dalam lingkungan (Kiswanto *et al.*, 2018).

Kehadiran Fe dalam air asam tambang menjadi salah satu indikator utama pencemaran logam berat. Dalam kondisi lingkungan yang asam dan kaya oksigen seperti pada area pertambangan batubara,  $\text{Fe}^{2+}$  mudah teroksidasi menjadi  $\text{Fe}^{3+}$  dan membentuk senyawa endapan seperti ferri hidroksida ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) yang tampak sebagai lumpur berwarna kekuningan (*yellowboy*) pada dasar saluran air. Endapan ini dapat menyelimuti dasar perairan dan mengganggu respirasi organisme akuatik serta proses fotosintesis oleh fitoplankton (Prihatini *et al.*, 2016). Kadar Fe yang tinggi dalam air tidak hanya menyebabkan perubahan warna dan kekeruhan, tetapi juga dapat mempercepat proses karat pada pipa dan infrastruktur logam lainnya. Hal ini berpengaruh terhadap efisiensi sistem distribusi air yang jadi kurang optimal. Jika air dengan kandungan Fe tinggi dikonsumsi tanpa melalui proses pengolahan yang baik, dalam jangka panjang bisa memicu gangguan kesehatan seperti penumpukan zat besi di tubuh (hemokromatosis), masalah pencernaan, hingga gangguan fungsi hati (Nirtha *et al.*, 2021). Pengelolaan kadar Fe dalam air limbah tambang sangat penting untuk menjamin kualitas lingkungan yang aman dan berkelanjutan.

#### **2.4 *Cyperus papyrus***

Tumbuhan akuatik memiliki kemampuan menyerap logam berat di perairan. Hal itu dibuktikan dengan tidak adanya gangguan proses metabolisme di dalam tumbuhan. Salah satu tumbuhan akuatik yang memiliki kemampuan dalam menyerap logam adalah tumbuhan papirus atau alang-alang air (*Cyperus papyrus*) (Ulumudin *et al.*, 2022).

*Cyperus papyrus*, dikenal sebagai papirus, tumbuhan ini berasal dari daerah rawa di Afrika. Tumbuhan papirus terkenal karena tangkai yang kuat dan tinggi yang dapat tumbuh hingga lebih dari 4 meter, papirus dikenal karena batangnya yang tinggi dan berbentuk segitiga, serta kelompok bunga berbentuk payung di bagian atas batangnya. Di habitat aslinya, papirus sering ditemukan tumbuh di tepi sungai, danau, atau rawa-rawa. Tumbuhan *Cyperus papyrus* bisa digunakan sebagai tumbuhan fitoremediasi karena mempunyai daya serap tinggi dalam menurunkan logam berat biasanya tumbuhan ini digunakan dalam penelitian dengan mempunyai tinggi rata-ratanya 50-100 cm, panjang akar 8-10

cm, serta panjang daun rata-rata 11 cm, lebar daun rata-rata 9 cm (Tosepu, 2012).

Salah satu penelitian yang dilakukan oleh Nirtha *et al.*, (2021), menggunakan air dari sumur bor menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan logam besi (Fe) menggunakan tumbuhan *Cyperus papyrus* mencapai angka yang sangat tinggi, yaitu sekitar 99,94%. Efisiensi tersebut diperoleh dalam kondisi waktu kontak selama tiga hari, yang menunjukkan bahwa tumbuhan ini mampu bekerja secara efektif dalam waktu relatif singkat.



**Gambar 1.** Tumbuhan *Cyperus papyrus*

Klasifikasi Papyrus (*Cyperus papyrus*) menurut Sitoresmi, (2015) sebagai berikut:

- Kingdom : *Plantae*
- Super Divisi : *Angiospermae*
- Divisi : *Monokotil*
- Kelas : *Commelinids*
- Ordo : *Poales*
- Family : *Cyperaceae*
- Genus : *Cyperus*
- Spesies : *Cyperus papyrus*

#### **2.4.1. Mekanisme Penyerapan Logam Berat Fe Oleh Tumbuhan *Cyperus Papyrus***

Tumbuhan *Cyperus papyrus* merupakan salah satu spesies tumbuhan air yang terbukti efektif dalam menyerap logam berat dari lingkungan tercemar, khususnya logam Fe yang banyak ditemukan dalam air asam tambang.

Berdasarkan jenis fitoremediasi, *Cyperus papyrus* bekerja melalui dua mekanisme utama, yaitu *rhizofiltrasi* dan fitostabilisasi. *Rhizofiltrasi* adalah proses penyerapan atau pengikatan logam berat oleh sistem perakaran tumbuhan yang terendam dalam air, sementara fitostabilisasi merupakan proses penahanan logam berat di zona akar agar tidak bergerak lebih jauh ke lingkungan sekitar (Moosavi & Seghatoleslami, 2021; Sitoresmi, 2015).

Proses penyerapan logam berat oleh tumbuhan ini dimulai dari penempelan ion logam ( $\text{Fe}^{2+}$  dan  $\text{Fe}^{3+}$ ) pada permukaan akar melalui proses adsorpsi. Akar tumbuhan memiliki permukaan yang luas dan kaya akan senyawa aktif seperti lignin dan polisakarida, sehingga memungkinkan ion logam untuk tertarik dan menempel. Selanjutnya, ion logam diserap ke dalam jaringan akar melalui mekanisme transportasi, baik secara pasif maupun aktif (Ulumudin *et al.*, 2022).

Ion logam yang telah masuk dalam jaringan tumbuhan senyawa pengkelat seperti fitokelatin atau metalotionein, yang berfungsi untuk menetralkan toksisitas logam dalam tubuh Tumbuhan. Ion logam yang telah dinetralkan kemudian disimpan dalam vakuola sel atau jaringan tumbuhan lainnya, seperti batang dan daun. Proses ini dikenal sebagai bioakumulasi, di mana logam berat disimpan di dalam tubuh tumbuhan tanpa mengganggu proses metabolisme normal (Nurina & Sulistiyaning, 2022). Mikroorganisme yang hidup di sekitar akar Tumbuhan (wilayah *rhizosfer*) juga membantu dalam proses remediasi. Mikroba tersebut dapat mempercepat oksidasi logam  $\text{Fe}^{2+}$  menjadi  $\text{Fe}^{3+}$  dan membentuk endapan logam dalam bentuk yang lebih stabil, seperti  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , yang kemudian dapat diserap lebih mudah atau tertahan di media basah (Johnson & Hallberg, 2005).

## **2.5 Constructed wetland**

*Constructed wetland* termasuk lahan basah buatan yang dibuat mirip pada lahan basah alami yang berguna menjadi lahan pemurnian air asam tambang (Prihatini & Iman, 2015). Lahan basah buatan ini mampu mengoptimalkan simbiosis antara tumbuhan air dan media di sekitar sistem perakarannya agar menaikkan pH serta mengurangi konsentrasi Fe, Mn terlarut, serta TSS untuk air asam tambang. Metode ini menimbulkan beberapa keunggulan oleh segi hemat biaya, ramah lingkungan, efisien dalam mengolah logam berat, dengan biaya perencanaan serta penjagaan terjangkau, serta belum memerlukan keahlian tenaga kerja tinggi (Wibowo *et al.*, 2022).

*Wetland* (lahan basah) memiliki fasilitas alami yang bermanfaat untuk membersihkan air dari pencemaran logam dan menetralkan air asam yang berasal dari kegiatan pertambangan. Kandungan sulfida dan zat besi (dalam bentuk mineral pirit) yang membuat air menjadi sangat asam (pH rendah).

pemilihan jenis Tumbuhan yang tepat di lahan basah buatan sangat penting, tumbuhan tersebut harus mampu menyerap logam yang berbahaya dan membantu mengembalikan pH air ke tingkat yang normal sesuai dengan kondisi lingkungan setempat (Sucahyo *et al.*, 2018).

## **2.6 Fitoremediasi**

Fitoremediasi menggunakan dua teknik cara pengolahan baik secara *in-situ* maupun *non-destruktif*. Fitoremediasi termasuk metode pengolahan yang hemat biaya dan bisa digunakan untuk membersihkan tanah yang tercemar. Di daerah tropis, teknologi ini punya potensi besar karena iklimnya mendukung pertumbuhan Tumbuhan serta meningkatkan kegiatan mikroba (Saier & Trevors, 2010).

Fitoremediasi adalah teknik membersihkan lingkungan tercemar menggunakan tumbuhan. Teknik ini menggunakan dua jenis tumbuhan, yaitu tumbuhan yang mampu membersihkan berbagai jenis pencemaran sekaligus dan tumbuhan yang hanya bisa membersihkan satu jenis pencemaran. Cara kerja tumbuhan ini dengan menyerap zat-zat pencemar dari lingkungan melalui dinding sel mereka. Proses ini terjadi secara alami dimana tumbuhan mengambil zat-zat tersebut dari lingkungan lalu mengubahnya menjadi zat yang lebih sederhana atau menyimpannya dalam jaringan tumbuhan. Keberhasilan Fitoremediasi bergantung pada tumbuhan mana yang dapat mengakumulasi logam berat dalam jumlah besar (Gholamreza & Seghatoleslami, 2021).

Metode pengolahan fitoremediasi memanfaatkan kemampuan tumbuhan untuk menyerap dan mengurangi zat pencemar, khususnya pada logam berat, di dalam tanah dan air di area pertambangan. Tumbuhan khusus ini mampu mengikat logam berat melalui mekanisme penyerapan, yang secara efektif menurunkan tingkat pencemaran di area tersebut (Nurina & Sulistiyaning, 2022).

Tumbuhan fitoremediasi dimanfaatkan untuk membersihkan dan mengurangi kontaminasi di tanah, air, dan udara. Melalui proses penyerapan akar, kemampuan tumbuhan ini mampu mengakumulasi logam berat, pestisida, bahan peledak, dan minyak dalam jaringannya, efektif menurunkan polusi. Selain itu, tumbuhan berperan mencegah penyebaran polutan melalui udara, hujan, dan aliran air tanah, sehingga membantu menjaga kualitas lingkungan (Antoniadis *et al.*, 2017).

### **2.6.1. Fitoremediasi menggunakan *constructed wetland***

Fitoremediasi pada *constructed wetland* sudah terbukti efektif dalam menghilangkan logam berat dan kontaminan organik oleh berbagai jenis limbah, termasuk limbah tambang, pertanian, limpasan permukaan, serta limbah industri lainnya (Sitoresmi, 2015).

*Constructed wetland* adalah sistem buatan yang dirancang menyerupai ekosistem lahan basah alami, di mana air limbah dialirkan melalui media seperti kerikil, pasir, dan tanah yang ditanami dengan tumbuhan akuatik tertentu. Dalam sistem ini, tumbuhan air seperti *Cyperus papyrus* berfungsi sebagai agen fitoremediasi yang mampu menyerap logam berat, termasuk besi Fe, dari air asam tambang melalui akar dan jaringan tubuhnya. *Constructed wetland* terbukti sangat efektif dalam menangani air asam tambang dan air tercemar logam melalui pengolahan terintegrasi dengan fisik, kimia, serta biologis. Keberhasilan proses penghilang logam berat tergantung dengan berapa faktor antara karakteristik tumbuhan, jenis kontaminan, waktu operasi, dan komponen fisik-kimia *wetland* yang digunakan (Wibowo *et al.*, 2022).

## **2.7 Destruksi Basah**

Proses pemecah suatu senyawa menjadi komponen-komponen yang dapat dianalisis dikenal sebagai destruksi. Perubahan suatu senyawa dari bentuk organik menjadi logam anorganik dikenal sebagai destruksi. Destruksi basah, juga dikenal sebagai oksida basah, dan destruksi kering, adalah dua jenis destruksi yang berbeda dalam ilmu kimia. Proses pengerjaan dan waktu pendestruksian kedua berbeda. perubahan sampel dengan asam kuat tunggal atau campuran kemudian dioksidasi dengan menggunakan zat oksidator dikenal sebagai destruksi basah. Asam sulfat, asam nitrat, asam klorida, dan asam perklorat adalah pelarut-pelarut yang digunakan dalam destruksi basah, dan mereka dapat digunakan baik secara tunggal maupun dalam campuran. Jika larutan yang beraduk memiliki warna yang jelas, proses destruksi telah berhasil, yang menunjukkan bahwa senyawa yang ada telah terlarut secara sempurna dan bekerja dengan baik (Asmorowati *et al.*, 2020).

Asam nitrat pada dasarnya digunakan dalam destruksi basah untuk memecah bahan organik pada suhu rendah. Mineral anorganik akan tertinggal dan larut dalam larutan asam kuat akibat dari penguapan. Kation logam membentuk mineral, dan ikatan kimia dengan senyawa organik telah terurai, karena pengaruh asam perklorat atau hidrogen peroksida pada tahap selanjutnya, prosesnya seringkali sangat cepat. Proses setelah penyaringan, solusinya disiapkan untuk analisis. Analisis arsenik, tembaga, timbal, timah, dan seng biasanya dilakukan menggunakan destruksi basah. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Hidayati *et al.*, (2014), mengatakan bahwa dekstruksi basah dapat dilakukan dengan salah satu dari tiga cara, yaitu:

1. Dekstruksi basah menggunakan  $\text{HNO}_3$  dan  $\text{HClO}_4$
2. Dekstruksi basah menggunakan  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  dan  $\text{HClO}_4$
3. Dekstruksi basah menggunakan  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  dan  $\text{H}_2\text{O}_2$

## 2.8 Analisis Spektrofotometri Serapan Atom

Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) termasuk teknik agar menganalisis unsur dengan kuantitatif yang menggunakan penyerapan cahaya oleh atom logam dalam kondisi bebas pada panjang gelombang khusus. Dilandasi dengan penyerapan energi sinar dari atom netral, SSA biasanya menggunakan sinar tampak serta ultraviolet. Pada garis besar, prinsip SSA sama dengan prinsip spektrofotometri sinar tampak serta ultraviolet (Candra & Romadona, 2020).

SSA membakar atom bahan untuk mengukur kadar logam, jenis logam berbeda-beda dalam cara atom-atom ini menyerap cahaya. Misalnya, besi dan tembaga tidak sama menyerap cahaya. Perbedaan penyerapan cahaya ini memungkinkan untuk mengidentifikasi jenis logam dan jumlah logam yang terkandung dalam bahan. Semakin banyak cahaya yang diserap, semakin banyak logam yang ditemukan pada bahan yang diuji (Farkhatu, 2019).

Berhubung metode ini paling sensitif, selektif, serta relatif sederhana, metode SSA dengan flame gas asetilen-udara biasanya digunakan dalam mengukur konsentrasi logam besi untuk sampel air. Metode ini juga dipakai agar mengukur konsentrasi logam besi untuk beragam sampel, yang memiliki hasil analisis yang baik (Nurhaini & Arief, 2016).

## 2.9 UJI T

Uji *t-test* merupakan salah satu teknik statistik inferensial yang digunakan untuk menguji hipotesis tentang perbedaan rata-rata antara dua kelompok. Uji ini banyak digunakan dalam penelitian eksperimental untuk mengetahui pengaruh suatu perlakuan terhadap suatu variabel terikat. Dalam penelitian ini, uji *t-test* digunakan untuk membandingkan efektivitas penurunan logam berat Fe antara reaktor dengan tumbuhan *Cyperus papyrus* dan reaktor tanpa tumbuhan. Jenis uji yang digunakan adalah *independent samples t-test*, yang tepat digunakan ketika dua kelompok data berasal dari sampel yang tidak saling berhubungan, seperti dua kondisi perlakuan yang berbeda (Nuryadi *et al.*, 2017).

Uji *independent t-test* memiliki beberapa asumsi dasar, yaitu data harus berdistribusi normal dan memiliki varian yang homogen. Jika asumsi ini terpenuhi, maka uji ini dapat memberikan hasil yang valid dan dapat diandalkan dalam menentukan signifikansi statistik (Muhid, 2019). Jenis uji yang digunakan adalah *independent samples t-test*, yaitu uji-t dua sampel bebas yang digunakan saat dua kelompok data berasal dari perlakuan berbeda dan tidak saling berhubungan.

Uji-t dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (1)$$

Keterangan :

$\bar{X}_1 - \bar{X}_2$  : Rata-rata kelompok 1 dan kelompok 2

$S_1^2, S_2^2$  : Varians masing-masing kelompok

$n_1, n_2$  : Jumlah sampel masing-masing kelompok

Nilai  $t$ -hitung kemudian dibandingkan dengan nilai  $t$ -tabel pada derajat kebebasan tertentu  $df = n_1 + n_2$  dan taraf signifikansi ( $\alpha = 0,05$ ). Kriteria pengambilan keputusan adalah sebagai berikut:

- a) Jika  $p\text{-value} < 0,05$ , maka  $H_0$  ditolak, artinya terdapat perbedaan yang signifikan.
- b) Jika  $p\text{-value} \geq 0,05$ , maka  $H_0$  diterima, artinya tidak terdapat perbedaan yang signifikan (Muhid, 2019).

Penggunaan uji- $t$  dalam penelitian ini bertujuan untuk memastikan bahwa penggunaan *Cyperus papyrus* dalam sistem *constructed wetland* memberikan pengaruh yang nyata terhadap penurunan kadar logam besi (Fe) dalam air asam tambang. Uji ini membantu menilai apakah perbedaan rata-rata antar kelompok tersebut terjadi secara kebetulan atau secara signifikan dipengaruhi oleh perlakuan. Selain digunakan untuk membuktikan hipotesis penelitian, uji  $t$ -test juga memberikan informasi yang relevan tentang tingkat signifikansi ( $p\text{-value}$ ), selisih rata-rata antar kelompok (*mean difference*), serta interval kepercayaan (*confidence interval*), yang semuanya berguna untuk mendukung interpretasi hasil Putri *et al.*, (2023), metode ini sangat sesuai diterapkan dalam penelitian fitoremediasi yang memerlukan perbandingan antar kondisi perlakuan. Dalam penelitian ini, uji *independent t-test* dilakukan menggunakan perangkat lunak SPSS versi 2025, yang dijalankan melalui lisensi *Education School* untuk keperluan akademik.

## **2.10 Quantum Geographic Information System (QGIS)**

Sistem Informasi Geografis (SIG) merupakan alat penting dalam analisis data spasial yang mendukung berbagai penelitian, khususnya yang berhubungan dengan pemetaan dan pengelolaan lingkungan. QGIS adalah perangkat lunak SIG *open-source* yang terus berkembang dan banyak digunakan oleh peneliti dan praktisi di seluruh dunia. QGIS menawarkan platform yang fleksibel dan gratis, dengan fitur lengkap yang memungkinkan pengguna melakukan berbagai analisis spasial dengan tingkat akurasi tinggi. Selain itu, QGIS juga mendukung banyak format data spasial, sehingga memudahkan integrasi dengan sumber data lainnya (Chavoya *et al.*, 2022).

Dalam konteks penelitian mitigasi bencana dan pengelolaan sumber daya alam, QGIS sangat efektif untuk pembuatan peta lokasi dan analisis spasial. Studi oleh Ariyani *et al.*, (2023), menunjukkan bahwa QGIS dapat digunakan untuk pemetaan bahaya banjir melalui analisis spasial yang terperinci, membantu mengidentifikasi wilayah rawan dan mendukung pengambilan keputusan berbasis data spasial. Peta yang dihasilkan oleh QGIS sangat berguna bagi perencana dan pengambil kebijakan dalam menyiapkan langkah mitigasi yang efektif, sehingga meningkatkan kesiapsiagaan dan ketahanan wilayah terhadap bencana (Ariyani *et al.*, 2023). Dalam penelitian ini, pembuatan peta lokasi penelitian menggunakan QGIS versi 3.22.10 untuk memastikan akurasi data spasial dan kemudahan dalam pengolahan informasi. Penggunaan QGIS mendukung proses analisis dan visualisasi data lapangan secara efisien, sehingga memperkuat hasil penelitian.

Output yang dihasilkan berupa peta spasial titik lokasi penelitian yang mencakup batas wilayah pengamatan, area kolam *sump*, dan zona sekitarnya yang berpotensi terpapar pencemaran logam berat. Peta tersebut juga telah dilengkapi dengan elemen kartografis seperti skala, arah utara, legenda, dan sistem koordinat *Universal Transverse Mercator* (UTM). Visualisasi hasil pemetaan dapat dilihat pada **Gambar 2**.

Berikut adalah langkah-langkah membuat peta di QGIS (Krygier & Wood, 2016):

1. Tentukan tujuan dan *audiens* dari peta yang akan dibuat.
2. Buka QGIS dan buat proyek baru.
3. Tambahkan data vektor atau raster yang relevan ke dalam QGIS.
4. Tambahkan *basemap* menggunakan plugin *QuickMapServices*.
5. Atur sistem koordinat dan proyeksi sesuai wilayah pemetaan.
6. Sesuaikan tampilan layer melalui menu *Symbology*.
7. Aktifkan label pada layer yang diperlukan.
8. Buka Layout Manager dan buat *Print Layout* baru.
9. Tambahkan elemen-elemen kartografis seperti judul, legenda, skala, arah utara, dan sumber data.
10. Gunakan warna, simbol, dan teks yang konsisten dan mudah dibaca.
11. Evaluasi hasil peta untuk memastikan pesan yang disampaikan jelas.
12. Ekspor peta ke format PDF, PNG, atau JPEG.

Tahapan dalam pembuatan peta ini disusun ke dalam bentuk alur kerja dan disajikan pada **Lampiran 6**.

### 2.11 Penelitian Terdahulu

Ditemukan berbagai penelitian terdahulu yang bersangkutan pada penelitian menyangkut fitoremediasi kadar logam berat memakai Tumbuhan *Cyperus papyrus* terdapat pada **Tabel 2**.

**Tabel 2.** Penelitian Terdahulu

No	Nama penelitian	Tujuan penelitian	Hasil Penelitian
1.	" <i>Phytoremediation Of Chromium From Tannery Wastewater Using Local Plant Species</i> "(Kassaye <i>et al.</i> , 2017)	Limbah penyamakan konsentrasi 0,1, 0,5, dan 1 mg/l dengan menggunakan Tumbuhan rawa-rawa seperti <i>Polygonum coccineum</i> , <i>Brachiara mutica</i> , <i>Cyperus Papyrus</i> L. (Kassaye)	rendah dibandingkan dengan Tumbuhan <i>Brachiara mutica</i> , <i>Cyperus papyrus</i> L. Pada Tumbuhan <i>Cyperus Papyrus</i> L. relatif lebih tinggi (masing-masing 1,260, 83,08% dan 1,715, 73,77%). Temuan ini menunjukkan bahwa semua Tumbuhan rawa yang diuji dapat digunakan untuk fitoremediasi Cr.
2.	Analisis Kandungan Logam Berat Timbal (Pb) pada Tumbuhan Papirus ( <i>Cyperus papyrus</i> L.) di Sungai Wangi Pasuruan(Ulumudin <i>et al.</i> , 2022)	Menganalisis kandungan logam berat timbal (Pb) pada air Sungai Wangi dan Tumbuhan papirus ( <i>Cyperus papyrus</i> L.), serta mengevaluasi hubungan antara kadar Pb dengan biomassa Tumbuhan tersebut.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar Pb di Sungai Wangi berkisar antara 0,019±0,002 hingga 0,041±0,004 ppm, sementara pada Tumbuhan papirus berkisar antara 0,089±0,007 hingga 0,117±0,005 ppm. Hubungan antara kadar Pb dan biomassa Tumbuhan papirus menunjukkan korelasi positif, di mana semakin tinggi biomassa Tumbuhan, semakin tinggi kandungan Pb yang dapat diserap
3.	Fitoremediasi Logam Fe dalam Air Asam Tambang Menggunakan Eceng Gondok ( <i>Eichhornia Crassipes</i> )(Yustika <i>et al.</i> , 2022)	Menganalisis kandungan logam Fe dalam air asam tambang dengan metode fitoremediasi menggunakan Tumbuhan eceng gondok	hasil penelitian menunjukkan bahwa kandungan logam Fe dalam air asam tambang awalnya sebesar 0,382 mg/l dan mengalami penurunan menjadi 0,379 mg/l setelah fitoremediasi, hingga akhirnya tidak terdeteksi. Hal ini

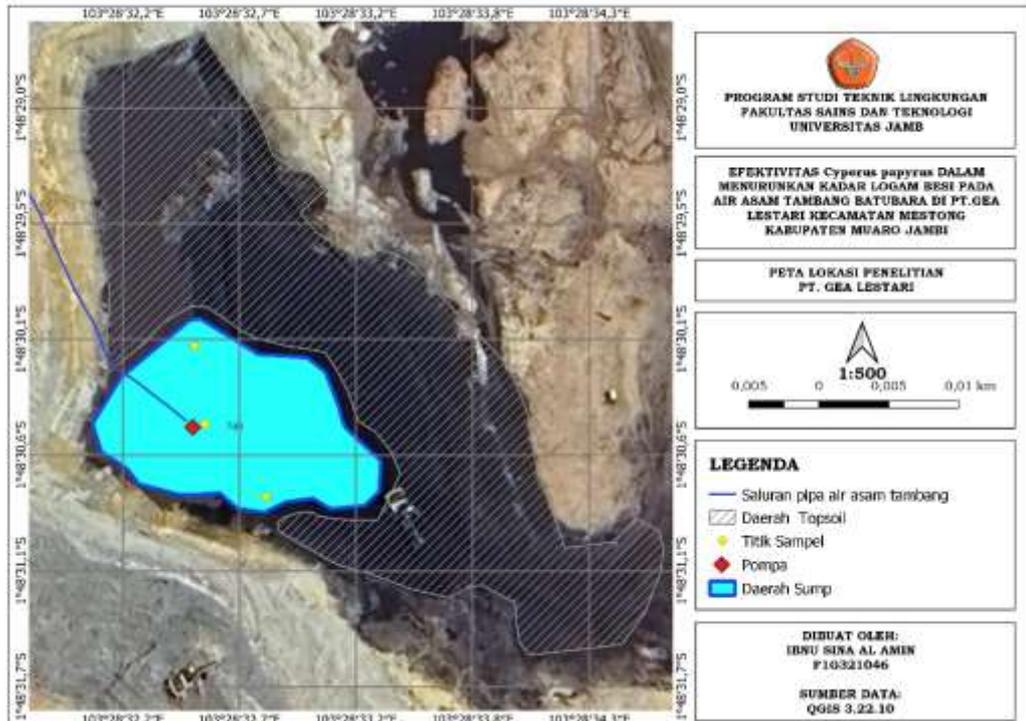
No	Nama penelitian	Tujuan penelitian	Hasil Penelitian
			menunjukkan bahwa eceng gondok mampu menurunkan kadar logam Fe dalam air
4.	Pemanfaatan Rawa Buatan ( <i>Constructed Wetland</i> ) dengan Menggunakan Tumbuhan Lembang ( <i>Typha Angustifolia</i> ) untuk Remediasi di Wilayah Tambang (Suharyadi <i>et al.</i> , 2023)	Mengkaji efektivitas metode fitoremediasi menggunakan <i>Cyperus papyrus</i> dalam sistem <i>constructed wetland</i> untuk menurunkan kadar logam berat besi (Fe) pada air asam tambang, serta mengevaluasi pengaruh variasi waktu tinggal terhadap efisiensi pengolahan di wilayah tambang	Hasil Penelitian Metode <i>constructed wetland</i> dengan Tumbuhan <i>Typha angustifolia</i> mampu menurunkan konsentrasi Fe hingga 82,5% dan Mn hingga 70,7%, dengan akumulasi logam pada Tumbuhan masing-masing sebesar 137,86 mg/kg dan 87,15 mg/kg dalam 30 hari, menjadikannya solusi efektif dan ramah lingkungan untuk pengelolaan air asam tambang.
5.	Fitoremediasi Menggunakan Variasi Kombinasi Tumbuhan Kiambang ( <i>Salvinia Molesta M</i> ) dan Tumbuhan Kayu Apu ( <i>Pistia Stratiotes L</i> ) dalam Menurunkan Besi (Fe) dengan Sistem <i>Batch</i> (Oktorina <i>et al.</i> , 2020)	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efisiensi penurunan konsentrasi besi (Fe) pada air tanah menggunakan kombinasi Tumbuhan kiambang ( <i>Salvinia molesta M</i> ) dan kayu apu ( <i>Pistia stratiotes L</i> ) dengan variasi rasio.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi kedua Tumbuhan paling efektif pada rasio 1:1 (150 gram kiambang dan 150 gram kayu apu), yang mampu menurunkan kadar Fe hingga 93% setelah 12 hari proses fitoremedias

### III. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Tempat dan waktu Penelitian

##### 3.1.1 Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di area air asam tambang batubara PT Gea Lestari yang berlokasi di Desa Tanjung Pauh Km 32, Kecamatan Mestong, Kabupaten Muaro Jambi, Provinsi Jambi, dengan titik koordinat  $1^{\circ} 48' 30,53''$  LS dan  $103^{\circ} 28' 32,67''$  BT. Peta lokasi penelitian ditampilkan pada **Gambar 2**.



**Gambar 2.** Peta Lokasi Penelitian

Berdasarkan hasil wawancara dengan Kepala Teknik Tambang, diketahui bahwa PT Gea Lestari merupakan perusahaan tambang terbesar di Kecamatan Mestong dengan luas lahan tambang mencapai 1.000 hektare. Kegiatan pertambangan dilakukan secara kontinu, di mana lahan yang telah dieksploitasi akan ditutup kembali setelah terlebih dahulu membuka lahan baru. Material *overburden* dipindahkan ke lahan bekas tambang sebagai bagian dari proses reklamasi. Pada tahap selanjutnya, lahan yang telah ditutup menggunakan topsoil akan ditanami pohon akasia dan sengon guna memperkuat struktur tanah bekas galian.

Jenis tanah di area tambang ini merupakan tanah mineral, yaitu jenis tanah yang memiliki kandungan bahan organik rendah dan didominasi oleh fraksi mineral seperti pasir, lanau, dan lempung. Tanah mineral umum ditemukan di area tambang karena proses penggalian dan pemindahan lapisan

tanah menyebabkan hilangnya lapisan tanah atas (*topsoil*) yang biasanya mengandung bahan organik. Salah satu area penting dalam pengelolaan air tambang di lokasi ini adalah kolam sump yang berfungsi sebagai penampungan air asam tambang sebelum dilakukan proses pengolahan atau pembuangan. Berdasarkan analisis spasial menggunakan perangkat lunak QGIS, luas area sump pada lokasi penelitian diperkirakan mencapai 741 m<sup>2</sup>, yang menunjukkan kapasitasnya sebagai titik kumpul utama aliran permukaan di area tambang.

Produksi batubara harian mencapai 500 ton yang diangkut menggunakan lima unit *dump truck* dan dua unit *articulated dump truck*. Pengambilan sampel air dalam penelitian ini tidak dilakukan pada musim hujan. Hal ini dikarenakan curah hujan yang tinggi pada musim tersebut dapat meningkatkan volume air di area tambang sehingga menyebabkan pengenceran konsentrasi logam, terutama besi (Fe). Keadaan ini dapat mengakibatkan data yang diperoleh tidak merepresentasikan konsentrasi sesungguhnya dari logam berat yang dihasilkan oleh aktivitas pertambangan.

### 3.1.2 Waktu Penelitian

Analisis awal ini diselenggarakan pada bulan Juli 2024. Penelitian dilakukan selama 7 hari masa aklimatisasi dan 14 hari dengan pengambilan sampel setiap hari ke-3, ke-9 dan ke-14. Pengujian logam berat akan pada uji pada Laboratorium Sentral Universitas Andalas.

## 3.2 Alat dan Bahan

### 3.2.1 Alat Penelitian

Adapun alat yang digunakan selama penelitian dapat dilihat pada **Tabel 3** berikut:

**Tabel 3.** Alat Penelitian

Alat	Fungsi
Botol sampel	Menyimpan air sampel
Kertas label	Memberi identitas sampel
Pipet tetes	Mengambil larutan secara presisi
<i>Handscoon</i>	Melindungi tangan
Kertas saring <i>Whatman</i>	Menyaring partikel dari sampel
<i>Coolbox</i>	Menjaga suhu sampel
Neraca analitik	Menimbang bahan kimia
Corong blub	Memindahkan cairan
pH meter portable	Mengukur pH di lapangan
Beaker glass 500 mL	Menampung/mencampur larutan
Labu takar 500 mL	Mengukur volume larutan

<b>Alat</b>	<b>Fungsi</b>
Cawan aluminium	Mengeringkan sampel
Timbangan	Menimbang media seperti tanah
Spektrofotometri Serapan Atom	Mengukur kadar Fe
Tabung kimia 20 mL	Menampung larutan uji
Labu ukur 50 mL	Menyiapkan larutan tepat volume
Labu ukur 25 mL	Untuk pengenceran larutan kecil
<i>Hotplate</i>	Memanaskan larutan
Kerikil dan tanah	Media filtrasi reaktor
Tumbuhan <i>Cyperus papyrus</i>	Agen fitoremediasi logam Fe

### 3.2.2 Bahan Penelitian

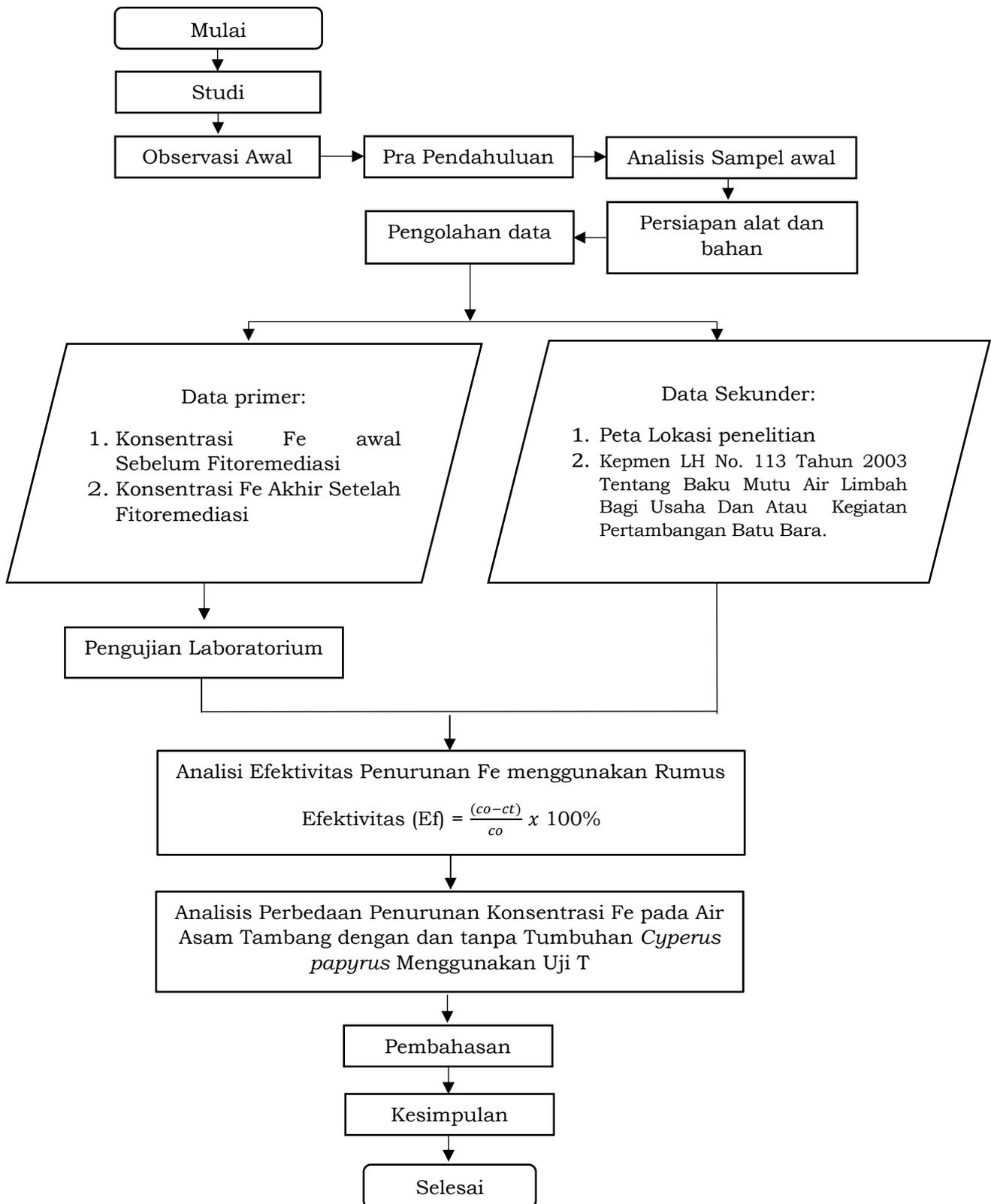
Adapun bahan yang digunakan selama penelitian dapat dilihat pada **Tabel 4** berikut:

**Tabel 4.** Bahan Penelitian

<b>Bahan Kimia</b>	<b>Fungsi</b>
Air Bebas Mineral	Sebagai pelarut dan pembilas alat
Asam Nitrat (HNO <sub>3</sub> )	Mengasamkan dan melarutkan logam
Larutan Standar Logam Besi (Fe)	Kalibrasi spektrofotometer
Larutan Pengencer HNO <sub>3</sub> 0,05 M	Menstabilkan ion Fe dalam larutan
Larutan Pencuci HNO <sub>3</sub> 5% (v/v)	Membersihkan alat dari logam sisa

### 3.3 Diagram Alir

Adapun diagram pelaksanaan penelitian seperti :



**Gambar 3.** Diagram Alir Penelitian

### 3.4 Metode Penelitian

#### 1. Persiapan Alat dan Bahan

Persiapan dilakukan dengan menyiapkan seluruh peralatan dan bahan yang digunakan dalam penelitian, yaitu bak kaca berukuran 60 × 30 × 60 cm. Bahan yang digunakan meliputi air asam tambang yang diambil dari tiga titik lokasi di PT Gea Lestari, yakni hulu, tengah, dan hilir. Titik pertama berada di hulu dan merepresentasikan kondisi air sebelum memasuki zona pertambangan. Titik kedua terletak di tengah area pertambangan, di mana air telah berinteraksi langsung dengan aktivitas penambangan. Titik ketiga berada di hilir, menggambarkan kualitas air setelah melewati seluruh kawasan tambang. Pengambilan sampel dari tiga titik ini bertujuan untuk memperoleh gambaran yang representatif dan menyeluruh mengenai perubahan kualitas air akibat aktivitas pertambangan batubara. Bahan lainnya yang digunakan dalam penelitian ini meliputi pasir, kerikil, tanah, serta sembilan Tumbuhan *Cyperus papyrus*.

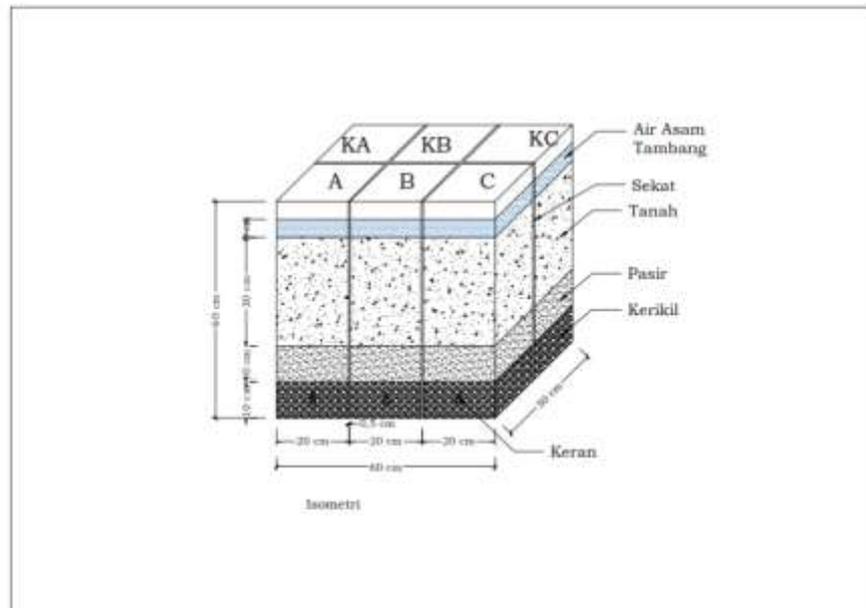
#### 2. Proses aklimatisasi

Tumbuhan *Cyperus papyrus* yang digunakan dalam penelitian ini bukan berasal dari benih, melainkan diperoleh dari toko Tumbuhan dengan usia sekitar 2 bulan. Sebelum perlakuan dimulai, Tumbuhan terlebih dahulu melalui proses aklimatisasi selama 7 hari dengan menggunakan air asam tambang. Proses ini bertujuan agar Tumbuhan dapat menyesuaikan diri dengan karakteristik kimia air asam tambang dan kondisi lingkungan penelitian. Aklimatisasi dilakukan untuk memastikan Tumbuhan berada dalam kondisi stabil dan mampu beradaptasi dengan baik sebelum ditanam ke dalam media sistem *constructed wetland*.

#### 3. Proses penanaman di media *constructed wetland*

Pada tahap ini, Tumbuhan *Cyperus papyrus* yang telah melalui proses aklimatisasi selama 7 hari ditanam ke dalam media tanah pada masing-masing sekatan reaktor. Penanaman dilakukan dengan jarak antar rumpun sekitar 15 cm guna memberikan ruang tumbuh yang optimal bagi setiap individu Tumbuhan. Reaktor dibagi menjadi beberapa unit berdasarkan variasi waktu tinggal air, yang ditandai dengan simbol A, B, dan C untuk masing-masing durasi 3 hari, 9 hari, dan 14 hari. Sementara itu, simbol KA, KB, dan KC menunjukkan perlakuan yang sama namun berfungsi sebagai replikasi atau ulangan dari masing-masing waktu perlakuan. Setiap sekatan dalam reaktor dirancang dengan sistem media berlapis yang terdiri dari pasir setebal 10 cm di bagian dasar, diikuti oleh lapisan kerikil setebal 10 cm, dan lapisan tanah setebal 20 cm di bagian atas sebagai tempat tumbuh Tumbuhan. Selanjutnya, air asam

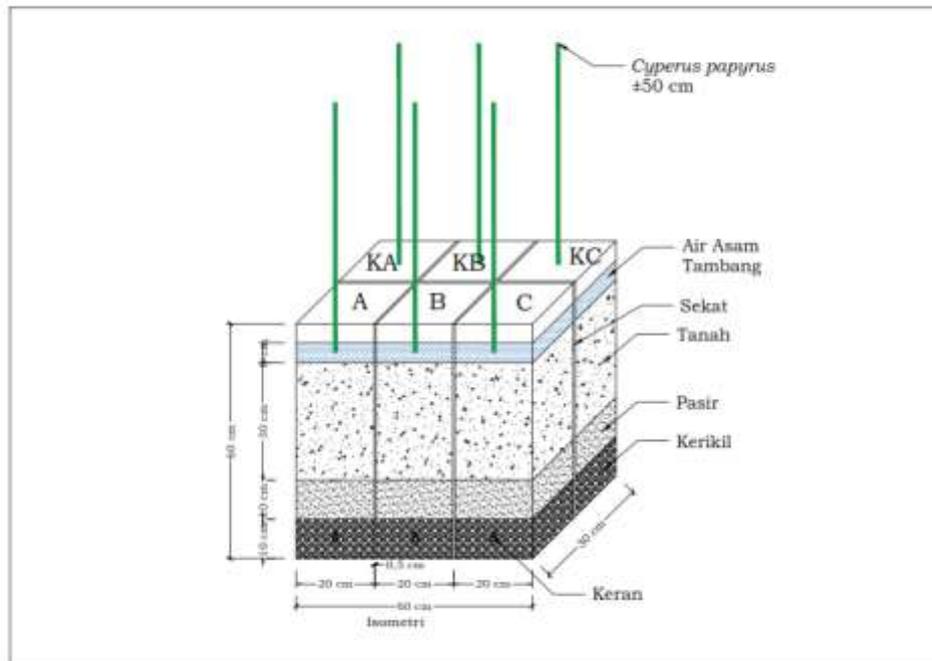
tambang dimasukkan ke dalam masing-masing reaktor dengan volume sebesar 50 liter. Volume ini dipilih berdasarkan kapasitas efektif bak reaktor berukuran 60 × 30 × 60 cm, setelah dikurangi dengan volume media substrat, sehingga ketinggian air berada dalam batas optimal untuk merendam akar Tumbuhan tanpa menyebabkan luapan. Desain reaktor Tumbuhan dan kontrol dapat dilihat pada **Gambar 4** dan **Gambar 5**.



Keterangan :

- A : sampel air variasi waktu 3 hari
- B : sampel air variasi waktu 9 hari
- C : sampel air variasi waktu 14 hari
- KA : sampel air kontrol variasi 3 hari
- KB : sampel air kontrol variasi 9 hari
- KC : sampel air kontrol variasi 14 hari
- Kerikil : 10 cm
- Pasir : 10 cm
- Tanah : 30 cm

**Gambar 4.** Desain Bak Reaktor Tanpa Tumbuhan



**Gambar 5.** Desain Bak Reaktor Dengan Tumbuhan

Keterangan:

- A : sampel air variasi waktu 3 hari
- B : sampel air variasi waktu 9 hari
- C : sampel air variasi waktu 14 hari
- KA : sampel air kontrol variasi 3 hari
- KB : sampel air kontrol variasi 9 hari
- KC : sampel air kontrol variasi 14 hari
- Kerikil : 10 cm
- Pasir : 10 cm
- Tanah : 30 cm
- Tanaman : *Cyperus papyrus*

Sampel air yang telah selesai diteliti kemudian dilakukan pengujian logam berat besi (Fe) menggunakan metode SSA, sesuai dengan Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia, 2003 Tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha Dan Atau Kegiatan Pertambangan Batu Bara berikut parameter air asam tambang bisa dilihat pada **Tabel 5.**

**Tabel 5.** Parameter Air Asam Tambang

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum
pH		6-9

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum
Residu Tersuspensi	Mg/l	400
Besi (Fe) Total	Mg/l	7
Mangan (Mn) total	Mg/l	4

Sumber: Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup tahun 2003

#### 4. Pengujian konsentrasi logam berat besi menggunakan Uji-T

Setelah data konsentrasi Fe ditemukan melalui hasil pengujian awal dan setelah perlakuan menggunakan *Constructed wetland*, dilakukan analisis statistik untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan signifikan antara konsentrasi logam berat sebelum serta setelah tindakan. Analisis data dibuat melalui metode statistik Uji-T.

Data konsentrasi Fe yang ditemukan disajikan pada wujud tabel data serta grafik, nanti dianalisis menggunakan perangkat lunak SPSS versi 2025, yang dijalankan melalui lisensi *Education School* untuk keperluan akademik 19 mei 2025.

### 3.5 Teknik Pengambilan Sampel

#### 3.5.1 Penentuan Titik Pengambilan Sampel Air

Prosedur pengambilan sampel air mengikuti Badan Standardisasi Nasional, 2008, Air serta Air Limbah. Langkah pertama adalah menentukan lokasi pengambilan di area air asam tambang di area PT Gea Lestari. Sebelum pengambilan, tentukan titik di mana area air asam tambang yang paling berpotensi terkontaminasi logam berat. Lokasi pengambilan sampel dapat dilihat pada **Gambar 6**.



**Gambar 6.** Air Asam Tambang

### 3.5.2 Pengambilan Sampel Air

Pengambilan sampel air di PT Gea Lestari ditentukan berdasarkan keperluan pengujian air asam tambang dimana diambil dari 3 titik seperti hulu tengah serta hilir **Gambar 7**. Titik pertama berada pada hulu, mewakili kondisi air sebelum memasuki zona pertambangan. Titik kedua terletak di bagian tengah area air asam tambang, di mana air telah berinteraksi dengan aktivitas penambangan. Titik ketiga berada di hilir, menggambarkan kualitas air setelah melewati keseluruhan kawasan tambang.



**Gambar 7.** Titik Hulu, Tengah dan Hilir

### 3.5.3 Cara Pengambilan Untuk Pengujian Kualitas Air Secara Umum

Cara pengambilan dibuat melalui tahapan seperti:

- a) Alat pengambil disiapkan menurut keadaan sumber airnya (**Gambar 8**).



**Gambar 8.** Alat yang Digunakan

- b) Menunjukkan Alat pengambil dibilas bersama air yang nanti diambil sebanyak 3 (tiga) kali (**Gambar 9**).



**Gambar 9.** Membilas Wadah Sampel

- c) Diambil menurut peruntukan analisis serta dilarutkan pada penampung sementara, lalu dihomogenkan (**Gambar 10**).



**Gambar 10.** Menghomogenkan Sampel Air

- d) Masukkan sampel ke dalam wadah yang sesuai dengan tujuan dan jenis analisis yang akan dilakukan (**Gambar 11**).



**Gambar 11.** Memasukan Sampel Air

- e) Sampel air diawetkan dengan penambahan  $\text{HNO}_3$  (**Gambar 12**).



**Gambar 12.** Mengawetkan Sampel Air

- f) Parameter lapangan diuji, dan hasilnya dicatat dalam buku catatan khusus (**Gambar 13**).



**Gambar 13.** Sampel Air Asam Tambang

### **3.6 Teknik Pengujian Logam Berat Besi**

Prosedur pengujian Fe mengikuti Badan Standardisasi Nasional, 2019 menyangkut cara uji Fe dengan SSA-nyala:

#### **3.6.1. Pembuatan larutan induk logam besi 100 mg Fe/L**

1. Alat dan bahan di siapkan
2. 0,100 g logam besi ditimbang, kemudian dimasukkan ke dalam labu ukur 1000 ml.
3. Campuran 10 ml HCl (1+1) serta 3 ml HNO<sub>3</sub> pekat ditambahkan hingga larut ( $\approx$  100 mg Fe/L).
4. Sebanyak 5 ml HNO<sub>3</sub> pekat ditambahkan, kemudian dicairkan bersama air bebas mineral sampai tanda batas.
5. Kadar sebenarnya dihitung sesuai hasil penimbangan.

#### **3.6.2. Pembuatan Larutan Baku Logam Besi 10 mg Fe/L**

1. 10 ml larutan induk logam besi 100 mg Fe/L dipipet, lalu dimasukkan ke dalam labu ukur 100 ml.
2. Larutan pengencer ditambahkan hingga tepat pada tanda batas, kemudian dihomogenkan.

### **3.6.3. Pengukuran Kadar Larutan Standar Logam Besi**

Deret larutan kerja dibuat pada 1 blanko serta sekurangnya 3 konsentrasi yang tidak sama dengan proporsional serta terletak dengan rentang pengukuran.

### **3.6.4. Pembuatan Kurva Kalibrasi**

1. Alat dioperasikan serta dioptimalkan mengikuti arahan pemakaian alat pada pengukuran besi.
2. Larutan blanko diasprasikan ke dalam SSA-nyala, lalu serapan diatur sampai nol.
3. Larutan kerja diasprasikan satu per satu ke dalam SSA-nyala, lalu serapannya diukur untuk panjang gelombang 248,3 nm, lalu dicatat.
4. Pembilasan untuk selang aspirator dilakukan pada larutan pengencer.
5. Persamaan garis lurus ditentukan.
6. Bila koefisien regresi linier ( $r$ ) < 0,995, keadaan alat diperiksa, serta langkah-langkah diulang sampai ditemukan nilai koefisien  $r \geq 0,995$ .

### **3.6.5. Pengukuran Kadar Besi (Fe)**

1. Sampel diasprasikan ke dalam SSA-nyala, kemudian serapannya dihitung untuk panjang gelombang 248,3 nm jika diinginkan, pengenceran dibuat.
2. Hasil pengukuran dicatat.

## **3.7 Pengumpulan Data**

Pada penelitian ini pengambilan data memakai data primer yang dengan langsung bermula oleh pengamatan lapangan serta perhitungan langsung pada lapangan. Pengambilan sampel diadakan sebelum pengolahan serta setelah pengolahan terhadap air asam tambang

Data Primer : data di dapat oleh hasil konsentrasi Fe awal sebelum Fitoremediasi, konsentrasi Fe akhir setelah fitoremediasi

Data Sekunder : pengumpulan data sekunder dilandasi dengan peta lokasi penelitian dan Kepmen LH No. 113 Tahun 2003 Tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha Dan Atau Kegiatan Pertambangan Batu Bara

## **3.8 Analisis Data**

1. Uji T dilakukan untuk mengukur perbedaan penurunan logam berat melalui fitoremediasi dengan menggunakan statistik uji T. Pengujian ini dilakukan dengan membandingkan nilai hipotesis hasil perhitungan dengan nilai pada tabel berdasarkan kriteria uji yang ditetapkan

- a.  $t_{hitung} > t_{tabel} = H_0$  ditolak,  $H_1$  diterima
  - b.  $t_{hitung} < t_{tabel} = H_0$  diterima,  $H_1$  ditolak
  - c. Nilai sig  $> 0,05 = H_0$  diterima,  $H_1$  ditolak
  - d. Nilai sig  $< 0,05 = H_0$  ditolak,  $H_1$  diterima
2. Penentuan efisiensi penyisihan pencemar dilakukan dengan menggunakan rumus:

$$\text{Efektivitas (Ef)} = \frac{(c_0 - c_t)}{c_0} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan:

Ef: efektivitas Tumbuhan *Cyperus papyrus*

Co: konsentrasi awal sampel

Ct: kontrasi akhir sampel.

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### 4.1 Analisis Konsentrasi Logam Berat Fe

###### 4.1.1 Analisis Awal Konsentrasi Logam Berat Fe Pada Air Asam Tambang

Pengukuran awal konsentrasi Fe dalam air asam tambang di PT Gea Lestari dilakukan di Laboratorium Sentral Universitas Andalas. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat pencemaran logam Fe sebelum diterapkannya teknik fitoremediasi. Proses fitoremediasi dilakukan dengan menggunakan Tumbuhan *Cyperus papyrus* dalam sistem *constructed wetland* untuk menurunkan konsentrasi Fe. Pengukuran ini juga berfungsi sebagai parameter awal yang akan dibandingkan dengan hasil akhir setelah perlakuan, guna menentukan persentase efektivitas penurunan logam.

Data hasil pengujian ini menjadi dasar dalam melihat efektivitas *Cyperus papyrus* dalam meningkatkan kualitas air asam tambang melalui teknik fitoremediasi. Hasil pengujian konsentrasi awal Fe dapat dilihat pada **Tabel 6** berikut:

**Tabel 6.** Kadar Besi (Fe) dan pH Air Sebelum Fitoremediasi

No	Sampel	Parameter	Satuan	Hasil Data
1.	Air Asam Tambang dengan Tumbuhan	Fe	mg/L	10,850
2.	Air asam tambang tanpa Tumbuhan	Fe	mg/L	10,850
3.	pH air asam tambang	pH		3,53

Berdasarkan data pada **Tabel 6**, analisis awal tercatat sebesar 10,85 mg/L dimana nilai ini melebihi baku mutu mengacu pada Kepmen LH No. 113 Tahun 2003 tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha Dan Atau Kegiatan Pertambangan Batu Bara seberat 7 mg/L. Hasil analisis menunjukkan bahwa konsentrasi besi dalam air asam tambang melebihi ambang batas yang ditetapkan dalam regulasi kualitas air limbah. Kondisi ini mencerminkan potensi pencemaran yang serius, mengingat Fe dalam konsentrasi tinggi berpotensi menimbulkan dampak serius terhadap kesehatan manusia (Supriyantini & Endrawati, 2015).

Pemantauan serta pengelolaan kadar Fe secara sistematis menjadi langkah krusial dalam strategi mitigasi pencemaran yang ditimbulkan oleh aktivitas pertambangan. AAT perlu dilakukan pengolahan sebelum dialirkan ke perairan. Pada penelitian ini, menggunakan metode *constructed wetland* dengan Tumbuhan *Cyperus papyrus* dalam variasi waktu 3, 9 dan 14 hari. Metode variasi waktu ini sejalan dengan penelitian Choirunnisa (2020), yang melakukan

penelitian tentang Fitoremediasi Logam Berat Fe Menggunakan Tumbuhan Kayu Apu (*Pistia Stratiotes L.*) dan Papyrus (*Cyperus Papyrus*) pada limbah laundry.

#### 4.1.2 Konsentrasi Logam Berat Fe pada Reaktor Menggunakan Tumbuhan

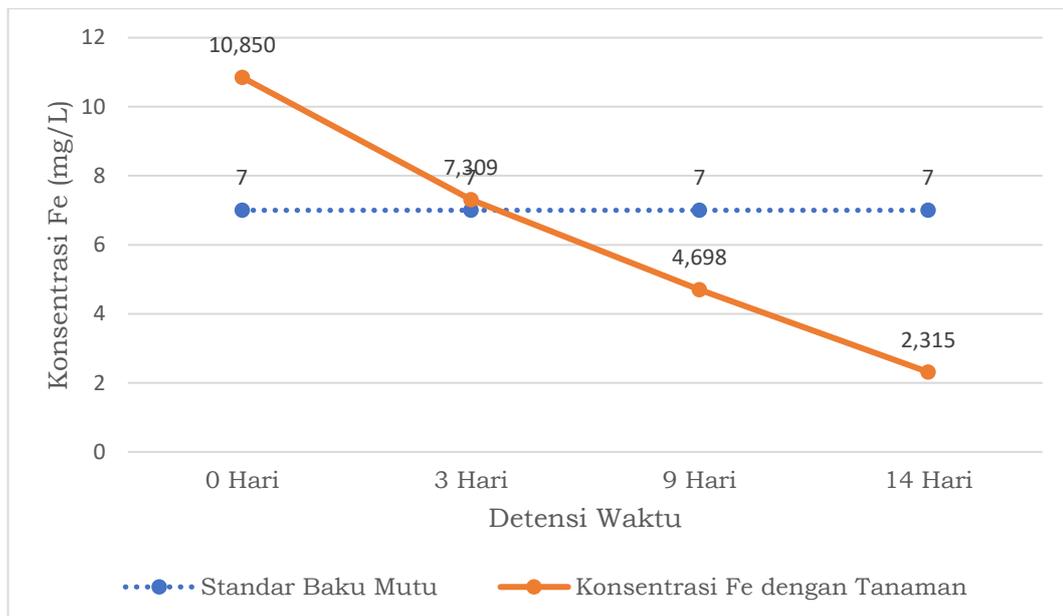
Konsentrasi logam Fe pada pengujian awal di air asam tambang PT Gea Lestari tercatat sebesar 10,850 mg/L. Nilai ini melebihi ambang batas baku mutu air limbah untuk kegiatan pertambangan yaitu sebesar 7 mg/L, sebagaimana tercantum dalam Kepmen LH No. 113 Tahun 2003. Diperlukan adanya upaya pengolahan yang efektif untuk menurunkan kadar logam berat Fe. Metode yang digunakan dalam penelitian ini fitoremediasi menggunakan Tumbuhan *Cyperus papyrus*. Penurunan konsentrasi Fe setelah proses fitoremediasi dapat dilihat pada **Tabel 7** berikut ini :

**Tabel 7.** Hasil Uji Fe dengan Tumbuhan

No.	Variasi Waktu	Konsentrasi Fe (mg/L)		Rata-Rata	Standar Deviasi	Baku Mutu *
		Ulangan 1	Ulangan 2			
		1.	0 hari			
2.	3 hari	7,411	7,207	7,309 ± 0,144		7 mg/L
3.	9 hari	4,694	4,702	4,698 ± 0,006		7 mg/L
4.	14 hari	2,318	2,311	2,315 ± 0,005		7 mg/L

\* Kepmen LH No 113 Tahun 2003 Tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan Atau Kegiatan Pertambangan Batu Bara

Hasil yang tercatat pada **Tabel 7** menunjukkan konsentrasi logam Fe dalam air asam tambang mengalami penurunan yang signifikan selama periode pengamatan 14 hari. Pada hari ke-0, kadar Fe tercatat sebesar 10,850 mg/L. Setelah tiga hari, terjadi penurunan menjadi 7,309 mg/L, masih melebihi ambang batas yang diperkenankan tetapi hampir mendekati dengan batas baku mutu yang ada. Penurunan lanjutan tercatat pada hari kesembilan, dengan konsentrasi mencapai 4,698 mg/L, sudah dibawah standar baku mutu menurut Kepmen LH Nomor 113 Tahun 2003 sebesar 7 mg/L. Pada hari ke-14, kadar Fe terus menurun hingga mencapai 2,315 mg/L, berada di bawah batas maksimum yang diperbolehkan. Hasil ini menunjukkan bahwa penerapan fitoremediasi menggunakan Tumbuhan *Cyperus papyrus* efektif dalam menurunkan kandungan Fe pada air asam tambang hingga mencapai standar kualitas lingkungan yang ditetapkan.



**Gambar 14.** Grafik Perubahan Konsentrasi Fe dengan Tumbuhan

Pada **Gambar 14** grafik ini menunjukkan bahwa Tumbuhan memiliki kemampuan menyerap logam berat secara bertahap, dengan efisiensi yang cukup tinggi terutama pada fase awal proses fitoremediasi. Proses fitoremediasi menunjukkan efektivitas sejak awal perlakuan, ditandai dengan penurunan konsentrasi Fe yang berlangsung secara konsisten mulai hari ke-3 hingga hari ke-14. Efektivitas fitoremediasi semakin meningkat, dan pada akhir periode pengamatan, kadar Fe telah berada di bawah baku mutu mengacu pada Kepmen LH No. 113 Tahun 2003 seberat 7 mg/L. menunjukkan penggunaan Tumbuhan *Cyperus papyrus* dalam sistem reaktor mampu menurunkan kandungan Fe secara bertahap dan berkelanjutan.

*Cyperus papyrus* bekerja melalui dua mekanisme utama dalam fitoremediasi, yaitu *rhizofiltrasi* dan fitostabilisasi. *Rhizofiltrasi* merupakan proses penyerapan atau pengikatan logam berat oleh sistem perakaran Tumbuhan yang terendam dalam air, sementara fitostabilisasi adalah proses penahanan logam berat di zona akar agar tidak tersebar lebih luas ke lingkungan sekitar (Moosavi & Seghatoleslami, 2021; Sitoresmi, 2015). Pada awal penelitian, tinggi Tumbuhan *Cyperus papyrus* berkisar antara 55 cm hingga 100 cm. Setelah menjalani proses fitoremediasi selama 14 hari, tinggi Tumbuhan mengalami peningkatan menjadi 110 cm. Peningkatan tinggi Tumbuhan ini menunjukkan adanya pertumbuhan yang baik selama proses remediasi berlangsung.

#### 4.1.3 Konsentrasi Logam Berat Fe pada Reaktor Tanpa Tumbuhan

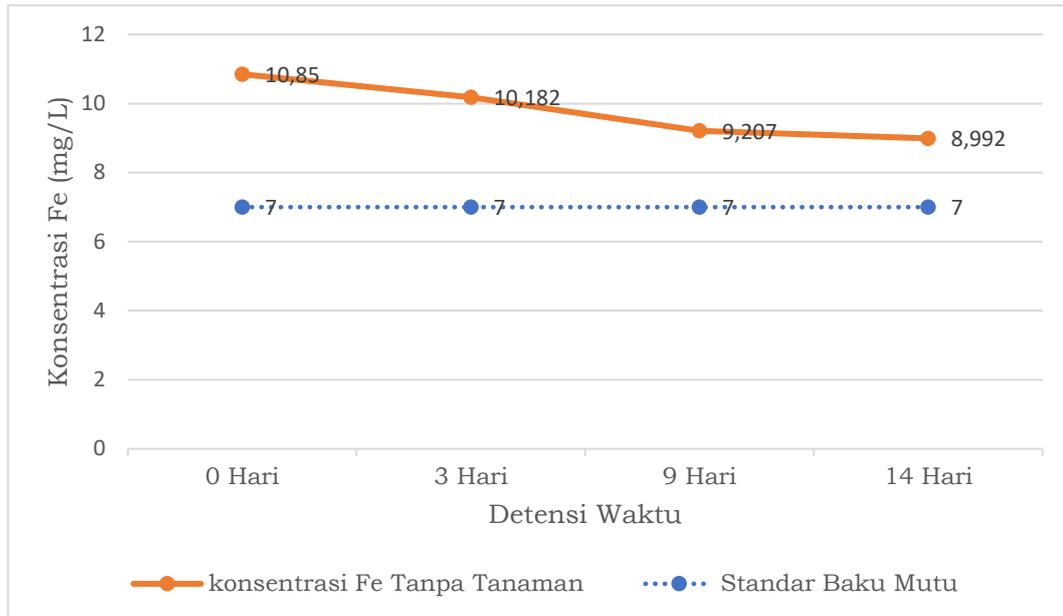
Pengujian Fe juga dilakukan dengan sistem reaktor kontrol dimana perlakuan ini bertujuan untuk membandingkan metode *constructed wetland* dengan perlakuan Tumbuhan dan tanpa perlakuan Tumbuhan, serta untuk melihat sejauh mana kemampuan Tumbuhan *Cyperus papyrus* dalam menurunkan logam berat Fe.

**Tabel 8.** Konsentrasi Logam Berat Fe pada Reaktor Kontrol

No.	Variasi Waktu	Konsentrasi Fe (mg/L)	Baku Mutu *
1.	0	10,850	
2.	3	10,182	7 mg/L
3.	9	9,207	7 mg/L
4.	14	8,992	7 mg/L

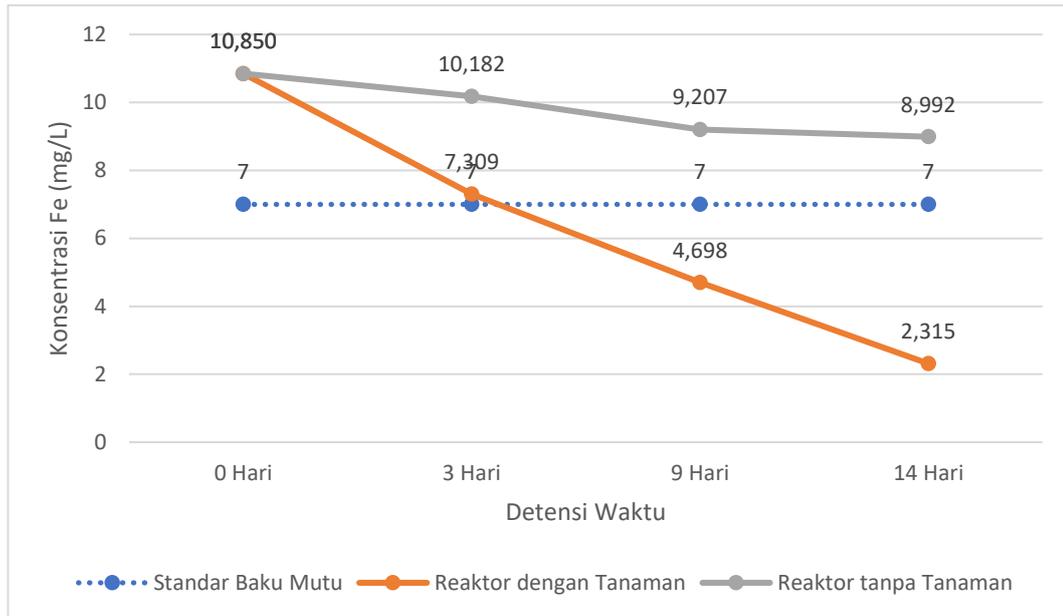
\* Kepmen LH No 113 Tahun 2003 Tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan Atau Kegiatan Pertambangan Batu Bara

Pada **Tabel 8** diatas menunjukkan bahwa penurunan konsentrasi logam Fe pada reaktor kontrol, terlihat bahwa penurunan kadar Fe berlangsung secara lambat dan tidak menunjukkan penurunan yang signifikan selama periode 14 hari. Meskipun terdapat sedikit penurunan sejak hari ke-3 hingga hari ke-14, perubahan konsentrasi cenderung tidak konsisten dan berada jauh di atas ambang batas baku mutu. Pada reaktor tanpa Tumbuhan, penurunan kadar Fe berlangsung melalui proses filtrasi pasif oleh tiga lapisan media, yaitu tanah, pasir, dan kerikil. Tanah memiliki daya adsorpsi tinggi karena kandungan mineral lempung dan bahan organik yang mampu mengikat ion Fe secara efektif. Lapisan pasir berfungsi menyaring partikel halus sekaligus memfasilitasi oksidasi  $Fe^{2+}$  menjadi endapan  $Fe(OH)_3$ . Adapun kerikil berperan sebagai media penyangga dan penyaring tahap awal yang membantu proses sedimentasi partikel berukuran besar. Namun demikian, efektivitas penyisihan Fe dalam reaktor ini relatif lebih rendah dibandingkan dengan reaktor yang menggunakan Tumbuhan, karena tidak terdapat mekanisme biologis aktif yang dapat mempercepat proses penyerapan logam. Dengan demikian, hasil ini memperkuat bahwa kontribusi Tumbuhan dalam metode fitoremediasi sangat penting untuk mencapai hasil pengolahan yang optimal dan berkelanjutan.



**Gambar 15.** Grafik Perubahan Konsentrasi Fe Tanpa Tumbuhan

Pada **Gambar 15** tanpa kehadiran Tumbuhan, terlihat adanya perubahan konsentrasi logam berat besi dari waktu ke waktu, meskipun nilainya relatif kecil. Pada periode hari ke-0 hingga hari ke-3, tercatat penurunan konsentrasi sebesar 0,665 mg/L. Kemudian, pada hari ke-3 hingga hari ke-9, terjadi penurunan lebih besar, yakni sebesar 0,978 mg/L. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun tanpa Tumbuhan, masih terdapat proses fisikokimiawi seperti pengendapan yang berkontribusi terhadap pengurangan kadar logam dalam larutan. Namun, pada interval hari ke-9 hingga hari ke-14, penurunan konsentrasi logam besi justru menurun secara signifikan, hanya sebesar 0,215 mg/L. Penurunan yang mengecil mengindikasikan bahwa proses alami tanpa intervensi biologis memiliki efektivitas yang terbatas dan cenderung melambat seiring waktu. Untuk melihat secara lebih menyeluruh perbedaan konsentrasi penurunan logam berat Fe antara reaktor yang menggunakan Tumbuhan *Cyperus papyrus* dan reaktor kontrol tanpa Tumbuhan, maka disajikan grafik perbandingan konsentrasi logam Fe pada kedua perlakuan selama periode waktu 14 hari.



**Gambar 16.** Perbandingan Konsentrasi Fe pada Reaktor dengan Tumbuhan dan Tanpa Tumbuhan

Pada **Gambar 16** menunjukkan tren penurunan konsentrasi Fe yang jauh lebih tajam pada reaktor dengan Tumbuhan dibandingkan tanpa Tumbuhan. Perbedaan terlihat mulai hari ke-3, dan semakin signifikan hingga hari ke-14, menegaskan kontribusi aktif Tumbuhan dalam mempercepat proses penurunan logam. Sementara reaktor tanpa Tumbuhan hanya mengalami penurunan lambat, reaktor dengan Tumbuhan berhasil menurunkan kadar Fe hingga di bawah baku mutu dalam waktu dua minggu. Dengan demikian, grafik ini memperkuat temuan sebelumnya bahwa penggunaan Tumbuhan dalam sistem *constructed wetland* memberikan hasil yang jauh lebih signifikan dalam menurunkan konsentrasi logam berat dibandingkan sistem tanpa Tumbuhan.

Jika dibandingkan dengan Tumbuhan lain, efektivitas *Cyperus papyrus* dalam menurunkan logam Fe tergolong tinggi dan efisien. Dalam penelitian ini, Tumbuhan mampu menurunkan konsentrasi Fe secara signifikan dalam waktu singkat, yakni hanya dalam 3–9 hari, tanpa perlu tambahan bahan seperti substrat organik atau mikroorganisme. Keunggulan ini menjadi nilai lebih dibandingkan beberapa penelitian sebelumnya. Fridtriyanda *et al.* (2024), melaporkan bahwa kombinasi eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) dan 2 kg kotoran kambing sebagai substrat organik berhasil menurunkan kadar Fe dari 5,858 mg/L menjadi di bawah 0,033 mg/L hanya dalam 4 hari. Meskipun hasilnya sangat cepat dan signifikan, keberhasilan ini sangat bergantung pada keberadaan substrat organik yang berfungsi sebagai penyumbang bahan organik dan agen peningkat pH.

Selain itu, penelitian oleh Ariyani *et al.*, (2014), menunjukkan bahwa Tumbuhan purun tikus (*Eleocharis dulcis*) mampu mengakumulasi logam Fe dalam jaringan Tumbuhan sebesar 26,92 hingga 91,76 mg/g berat kering, namun memerlukan waktu hingga 12 minggu. Hal ini menjadikan purun tikus lebih cocok untuk aplikasi jangka panjang. Sementara itu, Habibullah *et al.*, (2021), menggunakan *Typha angustifolia* yang dipadukan dengan *fungi mikoriza arbuskular* (FMA) dan berhasil menurunkan kadar Fe sebesar 57,93% dalam 4 minggu. Namun, metode ini memerlukan perlakuan tambahan dan biaya operasional lebih tinggi dibandingkan sistem sederhana menggunakan *Cyperus papyrus*.

Beberapa studi sebelumnya mendukung pentingnya pengendalian durasi proses. Ghosh & Singh, (2005), menyatakan bahwa Tumbuhan yang telah mencapai ambang akumulasi logam dapat mengalami remobilisasi, yaitu pelepasan kembali logam yang sebelumnya terserap ke dalam media. Hal ini dapat menurunkan efektivitas sistem dan memicu risiko pencemaran ulang. Selain itu, Muthusaravanan *et al.*, (2018), menunjukkan bahwa durasi remediasi yang terlalu panjang cenderung menurunkan laju transpor logam ke jaringan Tumbuhan, sehingga efisiensinya menurun.

Berdasarkan hasil penelitian ini, waktu 14 hari terbukti cukup untuk mencapai penurunan konsentrasi Fe yang signifikan dan memenuhi standar baku mutu. Waktu tersebut dapat dianggap sebagai titik optimum dalam proses fitoremediasi menggunakan *Cyperus papyrus*. Disarankan agar dilakukan pergantian Tumbuhan secara berkala setelah periode ini untuk mencegah penurunan efisiensi, menjaga stabilitas sistem, dan menghindari potensi akumulasi logam yang berlebihan pada jaringan Tumbuhan.

## **4.2 Efektivitas Penurunan Logam Berat Fe pada Reaktor**

### **4.2.1 Reaktor Dengan Tumbuhan**

Efektivitas penurunan Fe menggunakan Tumbuhan *Cyperus papyrus* dilakukan dengan beberapa variasi waktu. Konsentrasi awal sebesar 10,850 mg/L. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwasannya fitoremediasi menggunakan reaktor dengan perlakuan Tumbuhan *Cyperus papyrus* secara signifikan mampu menurunkan kadar Fe.

**Tabel 9.** Efektivitas Penurunan Logam Berat Fe pada Reaktor Menggunakan Tumbuhan

<b>Variasi waktu</b>	<b>Konsentrasi Awal Fe</b>	<b>Konsentrasi Akhir Fe</b>	<b>Efektivitas (Ef) Fe</b>
<b>3 Hari</b>	10,850	7,309	32,63%

Variasi waktu	Konsentrasi Awal Fe	Konsentrasi Akhir Fe	Efektivitas (Ef) Fe
9 Hari	10,850	4,698	56,70%
14 Hari	10,850	2,3145	78,66%

Hasil analisis pada **Tabel 9** efektivitas penurunan kadar Fe menunjukkan tren penurunan yang konsisten selama 14 hari masa fitoremediasi. Pada hari ketiga, penurunan kadar Fe mencapai efektivitas sebesar 32,63%, yang mencerminkan bahwa proses penyerapan logam oleh Tumbuhan telah mulai berjalan sejak awal perlakuan. Efektivitas meningkat secara signifikan pada hari kesembilan, mencapai 56,70%, yang menunjukkan peningkatan kemampuan Tumbuhan dalam mengakumulasi dan menstabilkan logam Fe dari air asam tambang. Efisiensi tertinggi tercapai pada hari ke-14, yaitu sebesar 78,66%, menandakan bahwa proses fitoremediasi berlangsung secara konsisten dan semakin efektif seiring waktu. Efektivitas dapat di hitung dengan rumus berikut ini:

$$\begin{aligned}
 \text{Efektivitas (Ef)}_{Fe} &= \left( \frac{co - ct}{co} \right) \times 100\% & (3) \\
 &= \left( \frac{10,85 - 2,3145}{10,85} \right) \times 100\% = \frac{8,5355}{10,85} = 78,66\%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, sistem fitoremediasi yang menggunakan Tumbuhan *Cyperus papyrus* terbukti mampu menurunkan konsentrasi logam Fe secara efektif. Penurunan ini menunjukkan bahwa *Cyperus papyrus* memiliki kemampuan yang baik dalam menyerap dan mengakumulasi logam berat dari media air tercemar, sehingga dapat berperan sebagai agen fitoremediasi yang potensial dalam upaya pemulihan kualitas lingkungan di air asam tambang. Efektivitas tersebut sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Choirunnisa, (2020), yang menyatakan bahwa Tumbuhan *Cyperus papyrus* mampu menurunkan kadar logam Fe dalam air limbah secara signifikan melalui proses fitoremediasi dengan sistem *batch*. Penelitian tersebut membuktikan bahwa Tumbuhan ini memiliki kemampuan adaptasi dan akumulasi logam berat yang baik, bahkan dalam media tercemar. Penelitian ini dapat dibandingkan dengan hasil yang diperoleh oleh Nirtha (2021), di mana *Cyperus papyrus* mampu menurunkan kadar Fe hingga 99,94% hanya dalam waktu tiga hari. Media yang digunakan dalam penelitian tersebut adalah air sumur bor dengan kondisi lingkungan yang relatif netral.

Perbedaan kondisi lingkungan ini menjadi salah satu alasan mengapa efektivitas penurunan kadar Fe dalam penelitian ini tidak sebesar yang dilakukan oleh Nirtha (2021). Air asam tambang yang digunakan dalam penelitian ini

memiliki pH sebesar 3,53, yang tergolong sangat asam, lingkungan yang sangat asam dapat memengaruhi kemampuan Tumbuhan dalam menyerap logam berat, terutama karena aktivitas akar. Dengan demikian, efektivitas penurunan kadar Fe yang hanya mencapai 78,66% dalam penelitian ini masih dapat dikatakan sejalan, Hal ini juga menunjukkan bahwa *Cyperus papyrus* memiliki potensi sebagai Tumbuhan fitoremediasi meskipun berada dalam kondisi yang kurang ideal.

Penelitian lainnya yang dilakukan oleh Hasani (2021), menunjukkan bahwa *Azolla pinnata* mampu menurunkan kadar Fe hingga 75% dalam waktu relatif singkat. Hamad (2023), juga menyatakan efektivitas *Cyperus papyrus* dalam menghilangkan logam berat Fe dari air limbah dengan penurunan kadar mencapai 70-75% dalam waktu 10-14 hari, dibandingkan dengan Tumbuhan *Typha domingensis* yang mencapai efektivitas sekitar 65% dalam waktu yang sama. Meskipun hasil ini tergolong tinggi, dalam penelitian ini Tumbuhan *Cyperus papyrus* menunjukkan efektivitas yang lebih besar, yaitu sebesar 78,66% dalam menurunkan kadar Fe dari air asam tambang.

#### 4.2.2 Reaktor Tanpa Tumbuhan

Pengamatan terhadap efektivitas penurunan logam berat Fe pada reaktor tanpa perlakuan Tumbuhan menunjukkan bahwa penurunan kadar Fe berlangsung dengan laju yang relatif lambat. Meskipun terdapat sedikit penurunan dari konsentrasi awal sebesar 10,850 mg/L, perubahan tersebut tidak signifikan.

**Tabel 10.** Efektivitas Penurunan Logam Berat Fe pada Reaktor Tanpa Perlakuan

Variasi waktu	Konsentrasi Awal	Konsentrasi Akhir	Efektivitas (Ef)
	Fe	Fe	Fe
<b>3 Hari</b>	10,850	10,182	6,16%
<b>9 Hari</b>	10,850	9,207	15,14%
<b>14 Hari</b>	10,850	8,992	17,12%

Hasil analisis **Tabel 10** efektivitas penurunan logam berat Fe pada reaktor tanpa perlakuan Tumbuhan menunjukkan bahwa penurunan konsentrasi berlangsung secara lambat dan tidak signifikan selama periode 14 hari pengamatan. Pada hari ketiga, efektivitas penurunan tercatat sebesar 6,16%, kemudian meningkat menjadi 15,14% pada hari kesembilan, dan mencapai 17,12% pada hari ke-14. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa meskipun terjadi sedikit penurunan kadar Fe secara alami, proses tersebut tidak berlangsung secara konsisten maupun efisien. Hal ini menunjukkan bahwa tanpa Tumbuhan

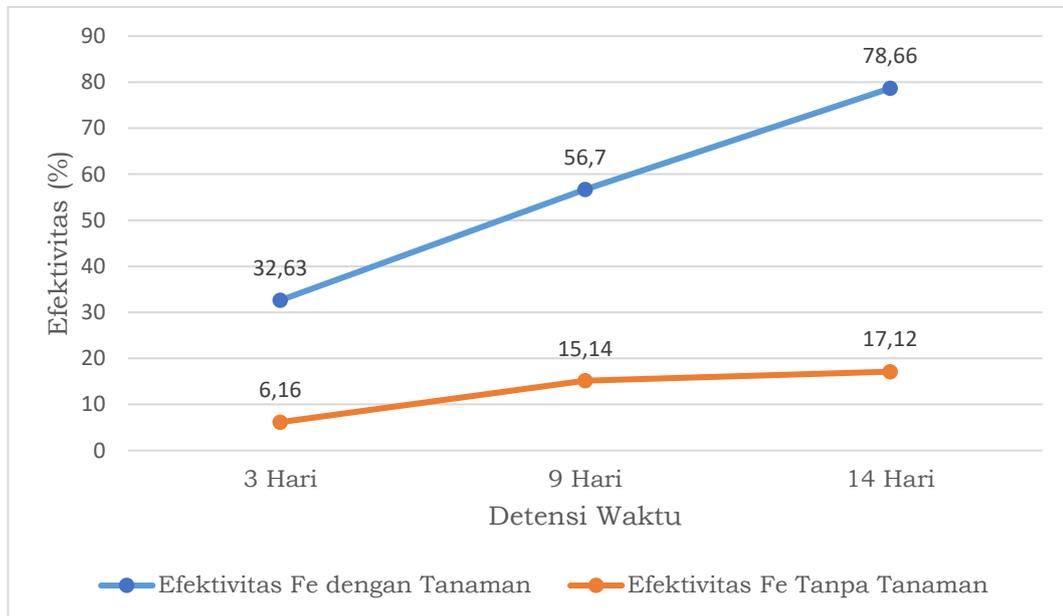
*Cyperus papyrus*, tidak terjadi penurunan yang signifikan. Perhitungan efektivitas rumus yang sama sebagaimana digunakan pada reaktor dengan perlakuan, yaitu:

$$\begin{aligned} \text{Efektivitas (EF)}_{Fe} &= \left( \frac{co - ct}{co} \right) \times 100\% & (4) \\ &= \left( \frac{10,85 - 8,992}{10,85} \right) \times 100\% = \frac{1,858}{10,85} = 17,12\% \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan Efektivitas penurunan logam Fe pada reaktor tanpa perlakuan Tumbuhan menunjukkan hasil yang kurang optimal. Penurunan konsentrasi Fe hanya mencapai 17,12% setelah 14 hari, dengan kadar akhir sebesar 8,992 mg/L, yang masih melebihi ambang batas baku mutu menurut Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 113 Tahun 2003 yaitu 7 mg/L. Penurunan ini berasal dari proses alami seperti oksidasi dan pengendapan logam, namun belum mampu mengurangi kandungan Fe secara signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa tanpa perlakuan Tumbuhan *Cyperus papyrus*, sistem pengolahan tidak cukup efektif dalam menurunkan kandungan logam berat dalam air asam tambang. Dibandingkan dengan reaktor yang menggunakan Tumbuhan, hasil ini menunjukkan peran penting fitoremediasi dalam mempercepat dan meningkatkan efektivitas proses penurunan logam berat. Sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Prihatini (2016), juga menunjukkan hasil serupa. Dalam penelitian tersebut, sistem *constructed wetland* tanpa Tumbuhan hanya mampu menyisihkan logam berat dari air asam tambang batubara sebesar 15,53%, jauh lebih rendah dibandingkan dengan sistem yang ditanami Tumbuhan. Hal ini mengindikasikan bahwa *Cyperus papyrus* memegang peranan penting dalam meningkatkan efisiensi sistem lahan basah buatan.

Penelitian lain yang dilakukan oleh Vymazal (2011), menunjukkan bahwa sistem *constructed wetland* tanpa Tumbuhan tetap memiliki kemampuan untuk menurunkan konsentrasi logam berat, termasuk Fe, meskipun efektivitasnya relatif rendah. Penurunan ini terjadi melalui proses fisika-kimia alami seperti pengendapan (sedimentasi), oksidasi, dan adsorpsi oleh material substrat di dalam sistem *wetland*. Meskipun tidak seefisien sistem yang dilengkapi Tumbuhan, hasil ini membuktikan bahwa keberadaan Tumbuhan bukan satu-satunya faktor yang memengaruhi penurunan logam berat. Dalam konteks penelitian ini, temuan Vymazal (2011), mendukung bahwa reaktor tanpa Tumbuhan masih dapat menurunkan kadar Fe secara terbatas, sebagaimana dibuktikan dengan efektivitas sebesar 17,12% setelah 14 hari yang menunjukkan

bahwa proses alami di lingkungan *wetland* tetap berkontribusi terhadap penurunan logam, meskipun secara signifikan lebih rendah dibandingkan dengan sistem yang menggunakan Tumbuhan seperti *Cyperus papyrus*.



**Gambar 17.** Perbandingan Efektivitas Penurunan Logam Berat Fe pada Reaktor Menggunakan Tumbuhan dan Tanpa Tumbuhan

Pada **Gambar 17** menjelaskan Tingkat efektivitas yang dicapai oleh reaktor dengan Tumbuhan menunjukkan peningkatan yang konsisten dan signifikan dari hari ke-3 hingga hari ke-14. Nilai efektivitas hampir menyentuh 80% pada akhir periode, sementara pada reaktor tanpa Tumbuhan, peningkatannya relatif lambat dan cenderung stagnan. mencerminkan kinerja yang lebih unggul dari sistem yang melibatkan intervensi biologis Tumbuhan dalam mengakumulasi logam. Perbedaan ini sejalan dengan kecenderungan konsentrasi akhir yang telah dijelaskan sebelumnya, dan menguatkan bahwa mekanisme fitoremediasi berperan aktif dalam meningkatkan efisiensi penurunan logam. Dengan nilai efektivitas yang tinggi dalam waktu relatif singkat, sistem ini tidak hanya efektif, tetapi juga efisien secara waktu dan operasional.

#### **4.3 Analisis Uji T Kadar Besi Perbandingan Perlakuan Dengan Dan Tanpa Tumbuhan**

Analisis statistik menggunakan uji *t-test* dilakukan untuk mengidentifikasi signifikansi perbedaan rata-rata kadar logam Fe antara kelompok kontrol dan kelompok perlakuan setelah proses fitoremediasi menggunakan Tumbuhan *Cyperus papyrus*. Uji ini bertujuan untuk menguji hipotesis bahwa perlakuan fitoremediasi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap penurunan kadar

logam Fe dalam tanah bekas tambang batubara di PT Gea Lestari selama periode 14 hari. Hasil pengujian secara rinci disajikan pada tabel berikut :

**Tabel 11.** Hasil Uji *T-test* konsentrasi Fe dengan dan tanpa *Cyperus papyrus*

		<i>t-test for Equality of Means</i>					95% Confidence Interval of the Difference	
		<i>t</i>	<i>df</i>	<i>Sig. (2-tailed)</i>	<i>Mean</i>	<i>Std. Error Difference</i>	<i>Lower</i>	<i>Upper</i>
Konsentrasi Akhir	Equal variances assumed	-3.453	7	0.011	-4686.500	1357.189	-7895.742	-1477.258
	Equal variances not assumed	-4.766	6.329	<b>0.003</b>	-4686.500	983.272	-7062.463	-2310.537

Hasil uji *t-test* pada **Tabel 11**, menunjukkan nilai signifikansi (*Sig. 2-tailed*) pada kondisi *equal variances not assumed* sebesar 0,003. Nilai ini lebih kecil dari taraf signifikansi  $\alpha = 0,05$ , mengindikasikan adanya perbedaan yang signifikan antara kelompok kontrol dan kelompok perlakuan. Nilai *t* hitung yang diperoleh adalah -4,766, sedangkan *t* tabel untuk derajat kebebasan (*df*)  $\approx 6$  pada taraf signifikansi 5% (dua arah) adalah sebesar 2,447. Nilai *t* negatif mengindikasikan bahwa konsentrasi Fe pada kelompok perlakuan lebih rendah dibandingkan kelompok kontrol.

Berdasarkan hasil analisis statistik tersebut, hipotesis nol ( $H_0$ ) yang menyatakan tidak ada perbedaan signifikan antara kelompok kontrol dan perlakuan ditolak, sedangkan hipotesis alternatif ( $H_1$ ) yang menyatakan adanya perbedaan signifikan diterima pada taraf kepercayaan 95%. Temuan ini secara empiris membuktikan bahwa implementasi Tumbuhan *Cyperus papyrus* dalam sistem *constructed wetland* memberikan kontribusi yang signifikan terhadap penurunan konsentrasi logam Fe dalam air asam tambang. Nilai *t* yang diperoleh mencerminkan besarnya perbedaan rata-rata kadar Fe antara kedua kelompok dibandingkan dengan variasi data dalam masing-masing kelompok, yang menunjukkan efektivitas Tumbuhan dalam menyerap logam berat.

Signifikansi statistik yang diperoleh memperkuat validitas metode fitoremediasi sebagai teknologi pengolahan air tercemar yang efektif dan dapat diandalkan untuk aplikasi skala lapangan. Perbedaan yang diamati mencerminkan efektivitas sistem dalam memperbaiki kualitas air selama periode pengamatan, sehingga dapat disimpulkan bahwa perlakuan fitoremediasi menggunakan Tumbuhan *Cyperus papyrus* memberikan kontribusi yang signifikan terhadap remediasi air asam tambang yang mengandung logam Fe.

## V. PENUTUP

### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai efektivitas Tumbuhan *Cyperus papyrus* dalam menurunkan kadar logam besi (Fe) pada air asam tambang batubara di PT Gea Lestari Kecamatan Mestong, Kabupaten Muaro Jambi, maka dapat disimpulkan:

1. Konsentrasi Fe setelah fitoremediasi menggunakan Tumbuhan *Cyperus papyrus* mengalami penurunan secara bertahap seiring bertambahnya waktu. Pada hari ke-3 kadar Fe tercatat sebesar 7,309 mg/L, hari ke-9 menjadi 4,698 mg/L, dan hari ke-14 menjadi 2,315 mg/L dari konsentrasi awal sebesar 10,85 mg/L. Nilai ini menunjukkan bahwa *Cyperus papyrus* mampu menurunkan kadar logam Fe secara signifikan hingga di bawah ambang batas baku mutu limbah pertambangan menurut Kepmen LH No. 113 Tahun 2003 yaitu 7 mg/L.
2. Efektivitas penurunan konsentrasi Fe pada reaktor dengan Tumbuhan *Cyperus papyrus* jauh lebih tinggi dibandingkan reaktor tanpa Tumbuhan. Rata-rata efektivitas penurunan pada reaktor dengan Tumbuhan mencapai 78,66%, sedangkan reaktor tanpa Tumbuhan hanya sebesar 17,12%. Hal ini menunjukkan bahwa peran Tumbuhan sangat signifikan dalam proses fitoremediasi logam berat Fe pada air asam tambang.
3. Hasil uji statistik *independent t-test* menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antara perlakuan dengan Tumbuhan dan tanpa Tumbuhan, dengan nilai signifikansi (*p-value*) sebesar  $0,003 < 0,05$ . Hal ini mengindikasikan bahwa penurunan kadar Fe yang terjadi pada reaktor dengan Tumbuhan bukanlah hasil kebetulan, melainkan dipengaruhi secara nyata oleh keberadaan Tumbuhan *Cyperus papyrus* dalam sistem constructed wetland. Dengan demikian, hipotesis alternatif ( $H_1$ ) diterima, dan hipotesis nol ( $H_0$ ) ditolak.

### 5.2. Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan oleh penulis adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini menunjukkan bahwa Tumbuhan *Cyperus papyrus* efektif menurunkan kadar logam besi (Fe) setelah hari ke-9 dan jauh dari baku mutu menurut Kepmen LH Nomor 113 tahun 2003. Penelitian selanjutnya disarankan fokus pada minggu pertama untuk mengetahui kecepatan penurunan logam Fe oleh Tumbuhan *Cyperus papyrus*.
2. Dalam penerapan di lapangan, perusahaan disarankan untuk melakukan pemantauan rutin terhadap kondisi Tumbuhan fitoremediasi dan mengganti

Tumbuhan yang menunjukkan gejala penurunan fungsi, agar efektivitas penurunan logam tetap optimal secara berkelanjutan.

3. Disarankan agar metode fitoremediasi menggunakan Tumbuhan *Cyperus papyrus* dengan sistem *constructed wetland* diterapkan dalam skala yang lebih besar di lokasi pertambangan untuk pengolahan air asam tambang secara berkelanjutan dan ramah lingkungan.
4. Penelitian selanjutnya diharapkan dapat menentukan masa jenuh Tumbuhan *Cyperus papyrus* untuk mengetahui waktu penggantian yang optimal, serta mengkaji status limbah Tumbuhan yang telah mati pasca penyerapan logam berat apakah termasuk kategori limbah B3 sesuai peraturan yang berlaku.

## DAFTAR PUSTAKA

- Antoniadis, V., Levizou, E., Shaheen, S. M., Ok, Y. S., Sebastian, A., Baum, C., Prasad, M. N. V., Wenzel, W. W., & Rinklebe, J. (2017). Trace Elements In The Soil-Plant Interface: Phytoavailability, Translocation, And Phytoremediation—A Review. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 171, Pp. 621–645).
- Ariyani, D., Balqis, A. K., Abdaa, D., Arini, R. N., Dewi, A. P., & Kp, S. P. (2023). Flood Hazard Mapping Using Qgis Spatial Analysis In Bangko And Masjid Watershed At Riau, Indonesia. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, 13(3), 362–371.
- Ariyani, D., Syam, R., Baroroh, U., Utami, L., & Nirtha, R. I. (2014). Kajian Absorpsi Logam Fe Dan Mn Oleh Tumbuhan Purun Tikus (*Eleocharis Dulcis*) Pada Air Asam Tambang Secara Fitoremediasi Study Of Fe And Mn Metals Absorption Phytoremediation By Purun Tikus (*Eleocharis Dulcis*) On Acid Mine Water. *Sains Dan Terapan Kimia*, 8(2), 87–93.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). *Air Dan Air Limbah – Bagian 57: Metoda Pengambilan Contoh Air Permukaan*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *Air Dan Air Limbah – Bagian 84: Cara Uji Kadar Logam Terlarut Dan Logam Total Secara Spektrometri Serapan Atom (Ssa) – Nyala*.
- Candra Purnama, R., & Romadona Putri, H. (2020). Penetapan Kadar Timah (Sn) Pada Susu Kemasan Kaleng Dengan Metode Spektrofotometri Serapan Atom (Ssa). *Jurnal Analis Farmasi*, 5(1), 51–58.
- Choirunnisa, A. (2020). *Fitoremediasi Logam Berat Besi (Fe) Menggunakan Tumbuhan Kayu Apu (*Pistia Stratiotes L.*) Dan Papyrus (*Cyperus Papyrus L.*)*. Universitas Islam Negeri Sunan Ampel Surabaya.
- Dhianti Putri, A., Sayyida Hilmiya, R., Almaliyah, S., & Permana, S. (2023). *Pengaplikasian Uji T Dalam Penelitian Eksperimen*. 4(3).
- Farkhatu, D. (2019). Penentuan Kadar Tembaga (Ii) Pada Sampel Menggunakan Spektroskopi Serapan Atom (Ssa) Perkin Erlmer Analyst 100 Metode Kurva Kalibrasi. *Jurnal Ilmiah Indonesia*, 4, 2548–1398.
- Fridtriyanda, A., Sukmawatie, N., & Iashania, Y. (2024). Efektivitas Tumbuhan Eceng Gondok (*Eichornia Crassipes*) Dan Substrat Organik Dalam Mengelola Kualitas Air Asam Tambang Batubara. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 24, 83–91.
- Gholamreza Moosavi, S., & Seghatoleslami, M. (2021). Phytoremediation: A Review Of Plant-Based Remediation Of Contaminated Soils And Waters. *Agriculture And Biology*, 1(1), 5–11.
- Ghosh, M., & Singh, S. P. (2005). Asian Journal On Energy And Environment A Review On Phytoremediation Of Heavy Metals And Utilization Of It's By Products. *As. J. Energy Env*, 6(04), 214–231.

- Habibullah, A., Khamidah, N., & Saputra, R. (2021). Pemanfaatan *Typha Angustifolia* Dan Fungi Mikoriza Arbuskular Untuk Fitoremediasi Air Asam Tambang. *Jurnal Teknologi Mineral Dan Batubara*, 17(2), 95–105.
- Hamad, M. T. M. H. (2023). Comparing The Performance Of *Cyperus Papyrus* And *Typha Domingensis* For The Removal Of Heavy Metals, Roxithromycin, Levofloxacin And Pathogenic Bacteria From Wastewater. *Environmental Sciences Europe*, 35(1), 35–61.
- Harling, V. (2018). Kualitas Air Tanah Berdasarkan Kandungan Tembaga [Cu(Ii)], Mangan [Mn(Ii)] Dan Seng [Zn(Ii)] Di Dusun-Dusun Sekitar Tempat Pembuangan Akhir (Tpa) Sampah Ngronggo, Salatiga. *Soscied*, 1(1), 5–19.
- Hasani, Q., Pratiwi, N. T. M., Effendi, H., Wardiatno, Y., Guk, J. A. R. G., Maharani, H. W., & Rahman, M. (2021). *Azolla Pinnata* As Phytoremediation Agent Of Iron (Fe) In Ex Sand Mining Waters. *Chiang Mai University Journal Of Natural Sciences*, 20(1), 1–12.
- Herliyanto, Hermansyah, & Budianta, D. (2014). Toksisitas Logam Besi (Fe) Pada Ikan Air Tawar. *Jurnal Penelitian Sains*, 17, 26–33.
- Hidayat, L. (2017). Pengelolaan Lingkungan Areal Tambang Batubara (Studi Kasus Pengelolaan Air Asam Tambang (Acid Mining Drainage) Di Pt. Bhumi Rantau. *Adhum*, VII(1), 44–52.
- Hidayati, E. N., Alauhdin, M., & Prasetya, A. T. (2014). Jurusan Kimia Fmipa Universitas Negeri Semarang Gedung D6 Kampus Sekaran Gunungpati Telp. (024)8508112 Semarang 50229 Sejarah Artikel: Diterima Maret. *J. Chem. Sci*, 3(1), 37–41.
- Hudiyah, M., Satyanto, & Saptomo, K. (2019). Analisis Kualitas Air Pada Jalur Distribusi Air Bersih Di Gedung Baru Fakultas Ekonomi Dan Manajemen Institut Pertanian Bogor (Analysis Of Water Quality Of Water Distribution Channels In New Building Of Faculty Of Economics And Management Bogor Agricultural University (Ipb)). *Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 04(01), 13–23.
- Johnson, D. B., & Hallberg, K. B. (2005). Acid Mine Drainage Remediation Options: A Review. *Science Of The Total Environment*, 338(1-2 Spec. Iss.), 3–14.
- Kaharapenni, M., & Hendrawan Noor, R. (2015). Pencemaran Kualitas Air Dari Adanya Potensi Air Asam Tambang Akibat Penambangan Batubara (Studi Kasus Pada Sungai Patangkep) Pollution Water Quality Of Any Potential Acid Mine Drainage The Result Coal Mining (Study Case In Patangkep River). *Jurnal Intekna*, 15(2), 156–160.
- Kassaye, G., Gabbiye, N., & Alemu, A. (2017). Phytoremediation Of Chromium From Tannery Wastewater Using Local Plant Species. *Water Practice And Technology*, 12(4), 894–901.
- Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia. (2003). *Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 113 Tahun 2003 Tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha Dan/Atau Kegiatan Pertambangan Batu Bara*.
- Kiswanto, Susanto, H., & Sudarno. (2018). Seminar Dan Konferensi Nasional Idec Karakteristik Air Asam Batubara Di Kolam Bekas Tambang Batubara Pt. Bukit Asam (Ptba). *Seminar Dan Konferensi Nasional Idec*, 1–6.

- Kurniawan, P., Kasmiyatun, M., & Soebiyono. (2020). Reduksi Kandungan Logam Berat Fe Pada Air Sungai Jetis Salatiga Secara Adsorpsi Menggunakan Karbon Aktif. *Journal Of Chemical Engineering*, 1(1), 12–17.
- Krygier, J., & Wood, D. (2016). *Making maps: A visual guide to map design for GIS* (3rd ed.). The Guilford Press.
- Manarfa, L. Ode, Rustan, A., Nashriany, N., Lely, J., Nasution, A., Anselmus, R., Natanael, N. A., Gunawan, Shadikin, A., Aptu, N., Kurniawan, A., Puspitafuri, C., Kurniawan, A., Mukaddas, J., & Adimu, E. (2024). *Pengelolaan Lingkungan Pasca Tambang Pt. Kamiya Jaya Aquatic*.
- Maulida, S., & Purwanti, I. (2023). Kajian Pengolahan Air Asam Tambang Industri Pertambangan Batu Bara Dengan Constructed Wetland. *Jurnal Teknik*, 12, 46–51.
- Muhid, A. (2019). *Analisis Statistik 5 Langkah Praktis Analisis Statistik Dengan Spss For Windows Edisi Ke 2*.
- Muthusarayanan, S., Sivrajasekar, N., Vivek, J. S., Paramasivan, T., Naushad, M., Prakashmaran, J., Gayathri, V., & Al-Duaij, O. K. (2018). Phytoremediation Of Heavy Metals: Mechanisms, Methods And Enhancements. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 16, Issue 4, Pp. 1339–1359). Springer Verlag.
- Nasir, S., Purba, M., & Sihombing, O. (2014). Pengolahan Air Asam Tambang Dengan Menggunakan Membran Keramik Berbahan Tanah Liat, Tepung Jagung Dan Serbuk Besi. *Jurnal Teknik Kimia*, 20(3), 22–30.
- Nirtha, I., Stiyati, N., & Pronawati, L. (2021). Penggunaan Lahan Basah Buatan Aliran Vertikal Bawah Permukaan Dengan Tumbuhan Typha Latifolia Dan Cyperus Papyrus Dalam Menyisihkan Besi (Fe) Dan Mangan (Mn) Pada Air Sumur Bor. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 7, 95–102.
- Nurhaini, R., & Arief, A. (2016). Analisa Logam Besi (Fe) Di Sungai Pasar Daerah Belangwetan Klaten Dengan Metode Spektrofotometri Serapan Atom. *Ilmiah Manuntung*, 2(1), 39–43.
- Nurina, K., & Sulistyaning, H. (2022). Kajian Fitoremediasi Untuk Rehabilitasi Lahan Pertanian Akibat Tercemar Limbah Industri Pertambangan Emas. *Jurnal Teknik Its*, 11, 2301–9271.
- Nuryadi, Astuti, T., Utami, E., & Budiantara. (2017). *Dasar-Dasar Statistik Penelitian*.
- Oktorina, S., Wazna Auvaria, S., & Diah Nugraheni Setyowati, R. (2020). Al-Ard: Jurnal Teknik Lingkungan Fitoremediasi Menggunakan Variasi Kombinasi Tumbuhan Kiambang (Salvinia Molesta M) Dan Tumbuhan Kayu Apu (Pistia Stratiotes L) Dalam Menurunkan Besi (Fe) Dengan Sistem Batch. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 6(1), 29–36.
- Rahmatullah Muhammad, Widyati Sri, & Solihin. (2023). Pengelolaan Air Asam Tambang Menggunakan Karbon Aktif Fine Coal Di Penambangan Batubara. *Jurnal Riset Teknik Pertambangan*, 3(1), 47–54.

- Rasman, & Saleh. (2016). Penurunan Kadar Besi (Fe) Dengan Sistem Aerasi Dan Filtrasi Pada Air Sumur Gali (Eksperimen). *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 2, 160–167.
- Rosas-Chavoya, M., Gallardo-Salazar, J. L., López-Serrano, P. M., Alcántara-Concepción, P. C., & León-Miranda, A. K. (2022). Qgis A Constantly Growing Free And Open-Source Geospatial Software Contributing To Scientific Development. *Geographical Research Letters*, 48(1), 197–213.
- Saier, M. H., & Trevors, J. T. (2010). Phytoremediation. *Water, Air, And Soil Pollution*, 205(1), 61–63.
- Sari, R., Palupi, N., Kesumaningwati, R., & Jannah, R. (2022). Penyerapan Logam Berat Besi (Fe) Dengan Metode Fitoremediasi Pada Tanah Sawah Menggunakan Tumbuhan Kangkung Air (Ipomoea Aquatica) Absorption Of Heavy Metal Iron (Fe) By Phytoremediation Method In Rice Fields Using Water Kangkung Plants (Ipomoea Aquatic). *Jurnal Agroekoteknologi Tropika Lembab*, 5(1), 9–19.
- Shen, X. H., Jiang, C. Y., Huang, Y., Liu, Z. P., & Liu, S. J. (2005). Functional Identification Of Novel Genes Involved In The Glutathione-Independent Gentsiate Pathway In *Corynebacterium Glutamicum*. *Applied And Environmental Microbiology*, 71(7), 3442–3452.
- Sitoresmi, W. (2015). *Pemanfaatan Constructed Wetland Dengan Tumbuhan Papyrus (Cyperus Papyrus) Untuk Pengolahan Surfaktan Dalam Air Limbah Laundry*.
- Skousen, J. (2014). Overview Of Acid Mine Drainage Treatment With Chemicals. *Wiley Blackwell* 6, 325–337.
- Sri Asmorowati, D., Susilogati Sumarti, S., & Ida Iryani Kristanti. (2020). Perbandingan Metode Destruksi Basah Dan Destruksi Kering Untuk Analisis Timbal Dalam Tanah Di Sekitar Laboratorium Kimia Fmipa Unnes. *Journal Of Chemical Science*, 3, 170–173.
- Stiyati Prihatini, N., Nirtha, I., & Sadiqul Iman, M. (2016). Role Of Purun Tikus In Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland In Treating Manganese (Mn) From Coal Mine Drainage. *Tujj Volume*, 2(Maret), 1–3.
- Stiyati Prihatini, N., & Sadiqul Iman, Dan M. (2015). Pengolahan Air Asam Tambang Menggunakan Sistem Lahan Basah Buatan: Penyisihan Mangan (Mn). *Jukung Jurnal Teknik Lingkungan*, 1(1), 16–21.
- Sucahyo, A. P. A., Bargawa, W. S., Nurcholis, M., & Cahyadi, T. A. (2018). Penerapan Wetland Untuk Pengelolaan Air Asam Tambang. *Kurvatek*, 3(2), 41–46.
- Suharyadi, H., Lusantono, O. W., Cusna, I. A., Pangestu, W. I., & Qaushar, L. (2023). Pemanfaatan Rawa Buatan (Constructed Wetland) Dengan Menggunakan Tumbuhan Lembang (Typha Angustifolia) Untuk Remediasi Di Wilayah Tambang. *Jurnal Teknologi Pertambangan*, 60–65.
- Supriyantini, E., & Endrawati, H. (2015). Kandungan Logam Berat Besi (Fe) Pada Air, Sedimen, Dan Kerang Hijau (Perna Viridis) Di Perairan Tanjung Emas Semarang. *Jurnal Kelautan Tropis*, 1, 38–45.

- Tosepu, R. (2012). Laju Penurunan Logam Berat Plumbum (Pb) Dan Cadmium (Cd) Oleh Eichornia Crassipes Dan Cyperus Papyrus (The Diminution Rate Of Heavy Metals, Plumbum And Cadmium By Eichornia Crassipes And Cyperus Papyrus). *J. Manusia Dan Lingkungan*, 19, 37–45.
- Ulumudin, M. M., Tarzan, D., Program, P., Biologi, S., Biologi, J., Matematika, F., Pengetahuan, I., Universitas, A., & Surabaya, N. (2022a). Analisis Kandungan Logam Berat Timbal (Pb) Pada Tumbuhan Papyrus (Cyperus Papyrus L.) Di Sungai Wangi Pasuruan Analysis Of The Heavy Metal Content Of Lead (Pb) In Papyrus (Cyperus Papyrus L.) In Wangi River Pasuruan. 11(2), 273–283.
- Vymazal, J. (2011). Constructed Wetlands For Wastewater Treatment: Five Decades Of Experience. *Environmental Science And Technology*, 45(1), 61–69.
- Wahyudin, I., Widodo, S., & Nurwaskito, A. (2018). Analisis Penanganan Air Asam Tambang Batubara. In *Jurnal Geomine* (Vol. 6, Issue 2). Agustus.
- Wibowo, Y. G., Safri, M., Wijaya, C., Halomoan, P., & Yudhoyono, A. (2022). Jurnal Presipitasi Constructed Wetlands For Treatment Of Acid Mine Drainage: A Review. *Jurnal Presipitasi*, 19(2), 436–450.
- Yan, A., Wang, Y., Tan, S. N., Mohd Yusof, M. L., Ghosh, S., & Chen, Z. (2020). Phytoremediation: A Promising Approach For Revegetation Of Heavy Metal-Polluted Land. *Frontiers In Plant Science*, 11.
- Yudo, S. (2018). Kondisi Pencemaran Logam Berat Di Perairan Sungai Dki Jakarta. *Jurnal Air Indonesia*, 2(1), 1–15.
- Yunus, R., & Stiyati Prihatini, N. (2018a). Fitoremediasi Fe Dan Mn Air Asam Tambang Batubara Dengan Eceng Gondok (Eichornia Crassipes) Dan Purun Tikus (Eleocharis Dulcis) Pada Sistem Lbb Di Pt Phytoremediation Of Fe And Mn Acid Of Coal Mine With Eceng Gondok (Eichornia Crassipes) And Lbb System At Pt. Jbg South Kalimantan. *Jurnal Sainsmat*, VII(1), 73–85.
- Yunus, R., & Stiyati Prihatini, N. (2018b). Fitoremediasi Fe Dan Mn Air Asam Tambang Batubara Dengan Eceng Gondok (Eichornia Crassipes) Dan Purun Tikus (Eleocharis Dulcis) Pada Sistem Lbb Di Pt Phytoremediation Of Fe And Mn Acid Of Coal Mine With Eceng Gondok (Eichornia Crassipes) And Lbb System At Pt. Jbg South Kalimantan. VII(1), 73–85.
- Yustika, F., Asrifah, R. D., & Santoso, D. H. (2022). Fitoremediasi Logam Besi (Fe) Dan Mangan (Mn) Pada Air Limbah Pengolahan Tambang Emas Rakyat Di Desa Pancurendang Dengan Genjer (Limnocharis Flava). *Jurusan Teknik Lingkungan*, 221–234.

## LAMPIRAN

### Lampiran 1. Hasil Analisis Laboratorium



**LABORATORIUM SENTRAL**  
**UNIVERSITAS ANDALAS**

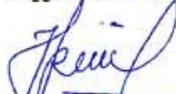
Gedung Laboratorium Sentral Universitas Andalas  
Kampus Universitas Andalas, Limau Manis, Padang 25163  
Email: labsentral@unand.ac.id | www.labsentral.unand.ac.id  
Telp./WA: +62 822-8792-3348

#### HASIL PENGUJIAN

Sampel	Logam	Konsentrasi (mg/L)
AAT AA	Fe	10,850
AAT A1	Fe	7,411
AAT A2	Fe	7,207
AAT B1	Fe	4,694
AAT B2	Fe	4,702
AAT C1	Fe	2,318
AAT C2	Fe	2,311
AAT AK1	Fe	10,182
AAT AK2	Fe	9,207
AAT AK3	Fe	8,992

Spesifikasi Alat : Flame AAS Shimadzu AA 7000

Tanggal Pemeriksaan: 28 April 2025

  
Dirrnat Muldarisnur  
Manajer Teknik

Tanggal Verifikasi: 28 April 2025

  
Dr. Eng. Yulia Eka Putri  
Kepala UPT Laboratorium Sentral

Note: -

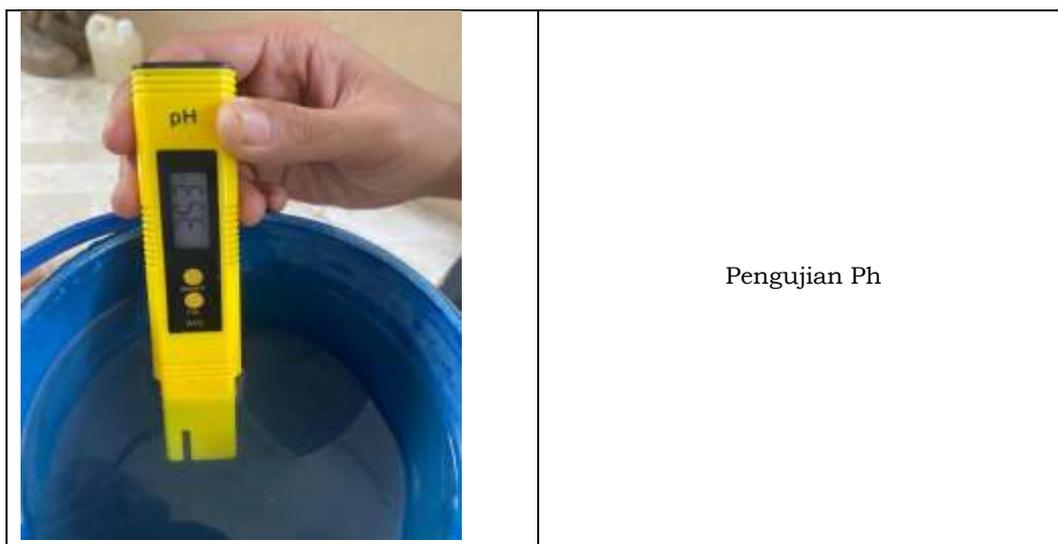
Hasil uji ini hanya berlaku untuk sampel yang diujikan  
*This report is valid specifically for the tested sample(s).*

**Lampiran 2.** Dokumentasi Penelitian

<b>Gambar</b>	<b>Keterangan</b>
	Observasi Awal
	Pengambilan Sampel Air Asam tambang
	Pengambilan sampel Air Asam Tambang untuk Pengujian Fe

	<p>Proses Aklimatisasi</p>
	<p>Reaktor Constructed wetland dengan Tumbuhan</p>
	<p>Reaktor Constructed Wetland tanpa Tumbuhan</p>

	<p>Pengambilan sampel dari bak reaktor dengan Tumbuhan</p>
	<p>Pengambilan Sampel dari Bak reaktor tanpa Tumbuhan</p>
	<p>Pengawetan sampel Menggunakan HNO<sub>3</sub></p>



**Lampiran 3.** Pengukuran suhu pada tiap variasi waktu

Hari dan tanggal	Sampel	Ulangan	Variasi waktu	pH
<b>Jum'at 7 Maret 2025</b>	Analisis Awal		0	3.53
<b>Senin 10 Maret 2025</b>	Dengan Tumbuhan	Perlakuan 1	3	5.72
<b>Senin 10 Maret 2025</b>	Dengan Tumbuhan	Perlakuan 2	3	5.68
<b>Senin 10 Maret 2025</b>	Tanpa Perlakuan Tumbuhan	Kontrol	3	5.19
<b>Jum'at 14 Maret 2025</b>	Dengan Tumbuhan	Perlakuan 1	7	6.08
<b>Jum'at 14 Maret 2025</b>	Dengan Tumbuhan	Perlakuan 2	7	6.10
<b>Jum'at 14 Maret 2025</b>	Tanpa Perlakuan Tumbuhan	Kontrol	7	5.91
<b>Jum'at 21 Maret 2025</b>	Dengan Tumbuhan	Perlakuan 1	14	6.21
<b>Jum'at 21 Maret 2025</b>	Dengan Tumbuhan	Perlakuan 2	14	6.35
<b>Jum'at 21 Maret 2025</b>	Tanpa Perlakuan Tumbuhan	Kontrol	14	6.04

**Lampiran 4.** Perhitungan efektivitas dengan Tumbuhan

$$\begin{aligned}
 \text{Efektivitas (Ef)Fe} &= \left( \frac{co - ct}{co} \right) \times 100\% \quad (1) \\
 &= \left( \frac{10,85 - 7,309}{10,85} \right) \times 100\% = \frac{3,541}{10,85} = 32,63\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Efektivitas (Ef)Fe} &= \left( \frac{co - ct}{co} \right) \times 100\% & (2) \\ &= \left( \frac{10,85 - 4,698}{10,85} \right) \times 100\% = \frac{6,152}{10,85} = 56,70\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Efektivitas (Ef)Fe} &= \left( \frac{co - ct}{co} \right) \times 100\% & (3) \\ &= \left( \frac{10,85 - 2,3145}{10,85} \right) \times 100\% = \frac{8,5355}{10,85} = 78,66\% \end{aligned}$$

**Lampiran 5.** Perhitungan efektivitas tanpa Tumbuhan

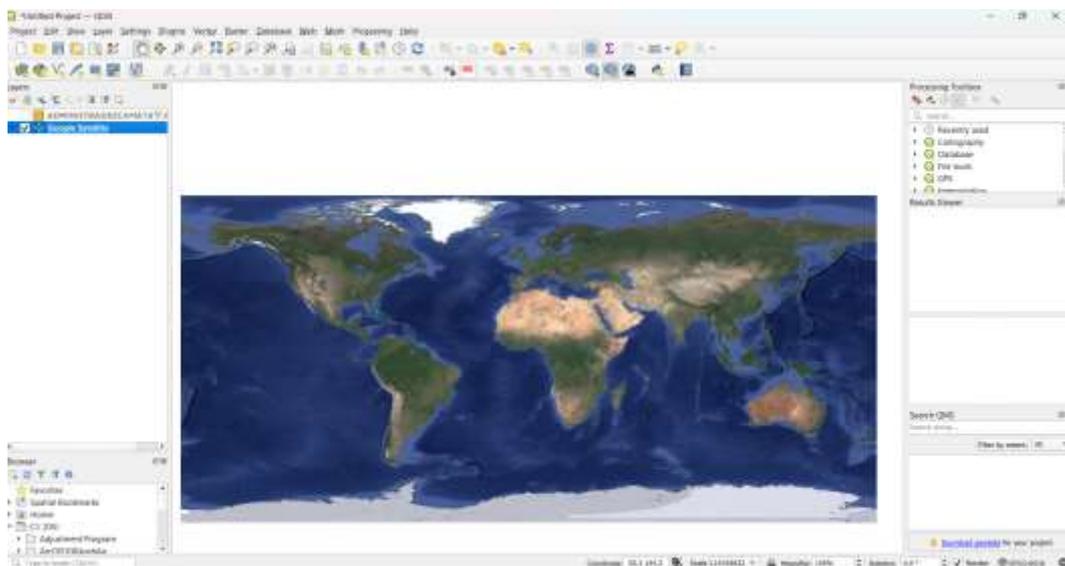
$$\begin{aligned} \text{Efektivitas (EF)Fe} &= \left( \frac{co - ct}{co} \right) \times 100\% & (4) \\ &= \left( \frac{10,85 - 10,182}{10,85} \right) \times 100\% = \frac{0,668}{10,85} = 6,16\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Efektivitas (EF)Fe} &= \left( \frac{co - ct}{co} \right) \times 100\% & (5) \\ &= \left( \frac{10,85 - 9,207}{10,85} \right) \times 100\% = \frac{1,643}{10,85} = 15,14\% \end{aligned}$$

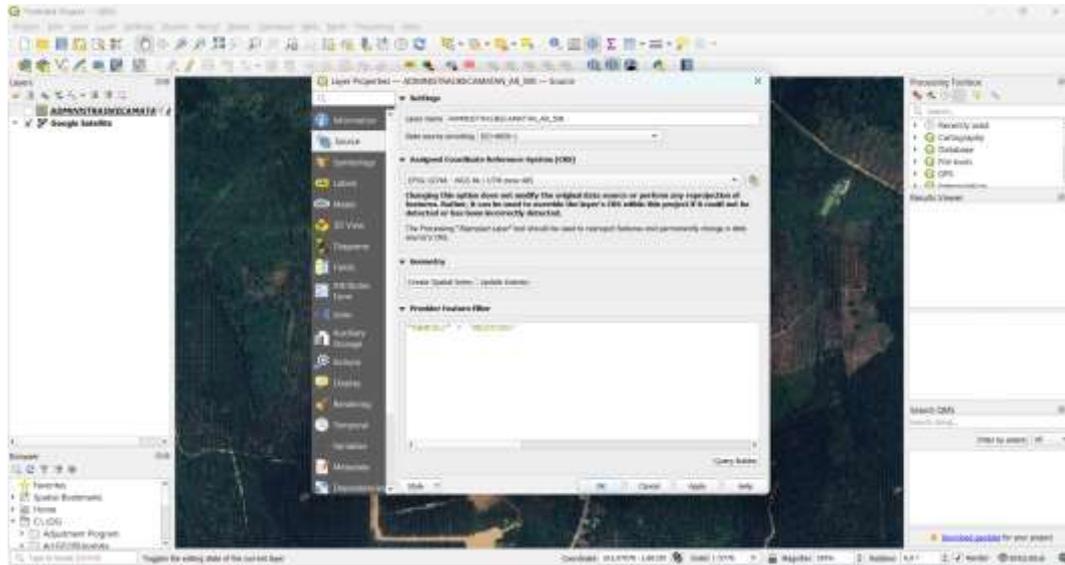
$$\begin{aligned} \text{Efektivitas (EF)Fe} &= \left( \frac{co - ct}{co} \right) \times 100\% & (6) \\ &= \left( \frac{10,85 - 8,992}{10,85} \right) \times 100\% = \frac{1,858}{10,85} = 17,12\% \end{aligned}$$

**Lampiran 6.** Alur pembuatan peta Qgis

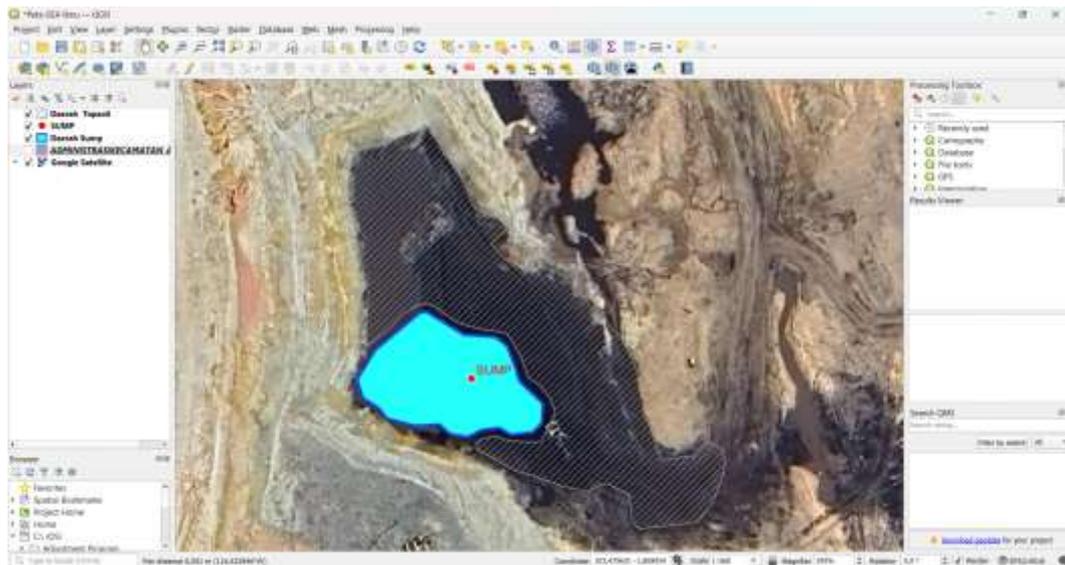
- 1) Masuk ke menu web untuk menambah basemap, pilih Quick Map Service lalu Google Satellite diaktifkan



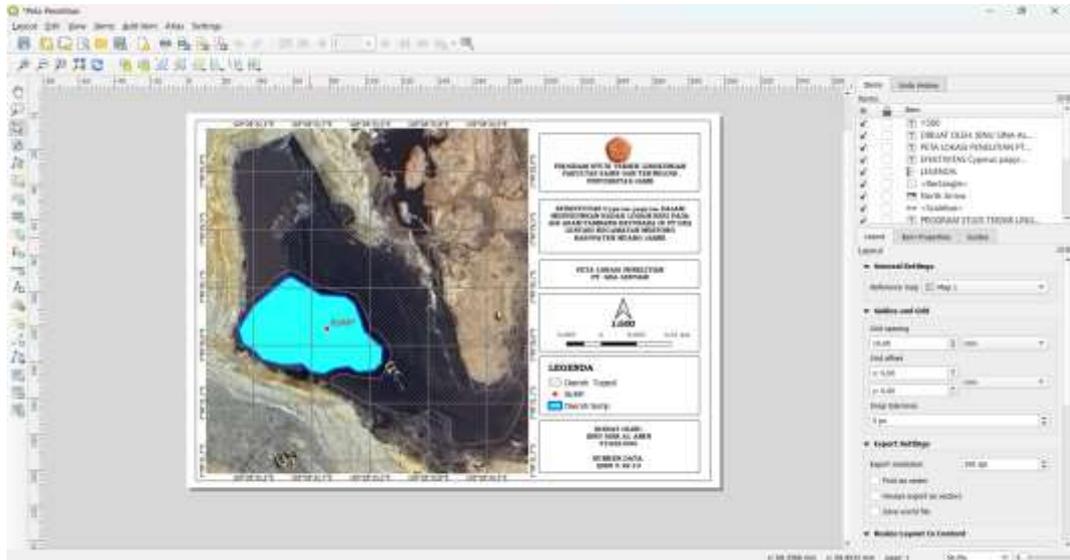
- 2) Proyeksi sistem koordinat UTM zona 48S (EPSG:32748) agar sesuai dengan wilayah Provinsi Jambi.



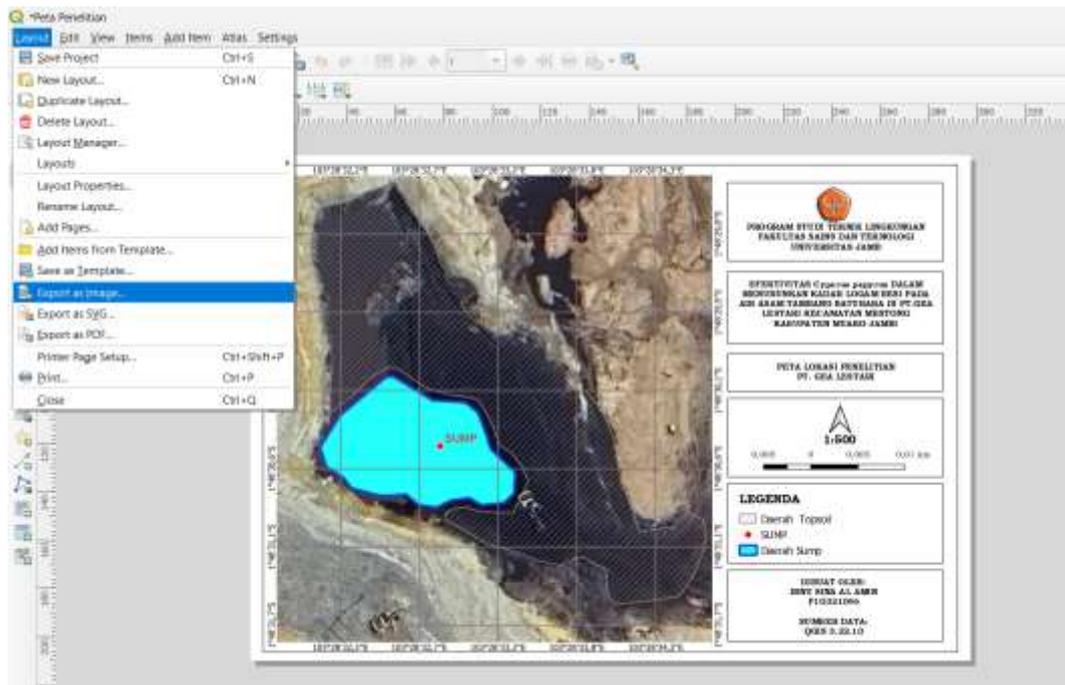
- 3) Memilih lokasi penelitian dan lakukan digitasi spasial



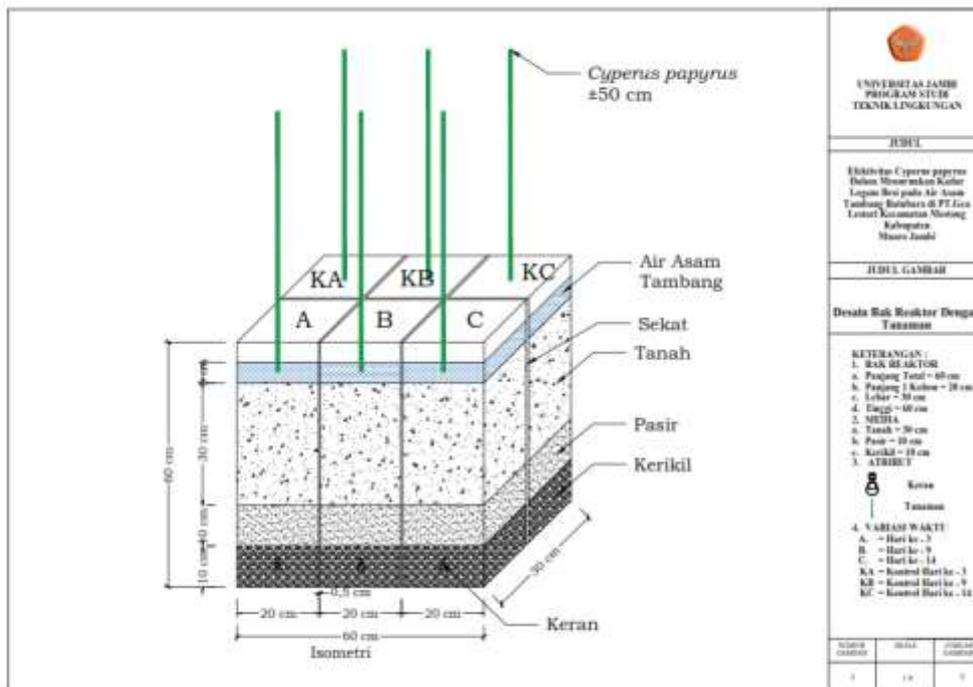
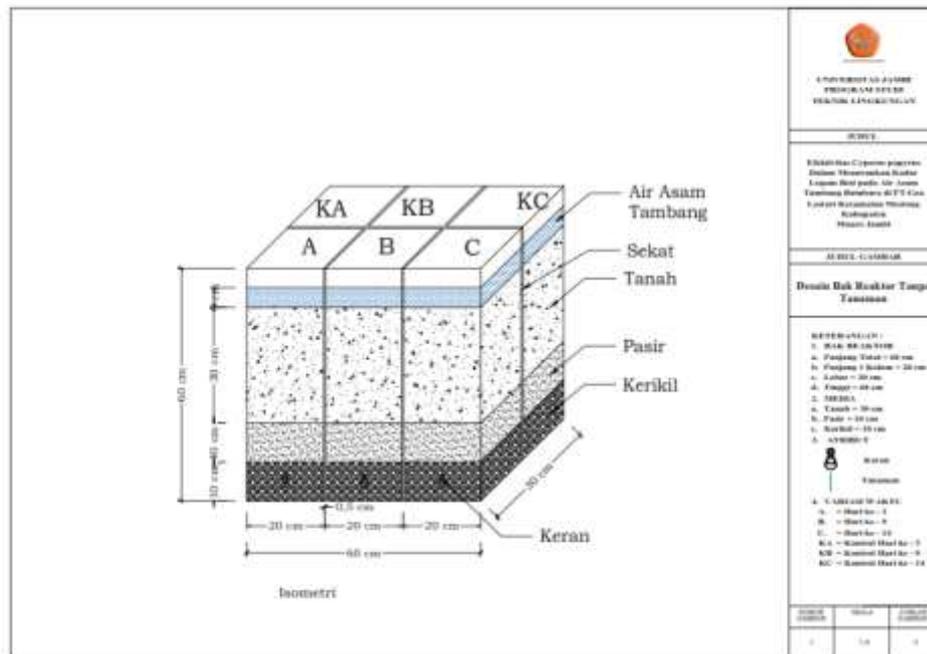
- 4) Membuat layout pada menu layout manager tambahkan elemen judul, legenda, skala, arah utara, dan sumber peta.

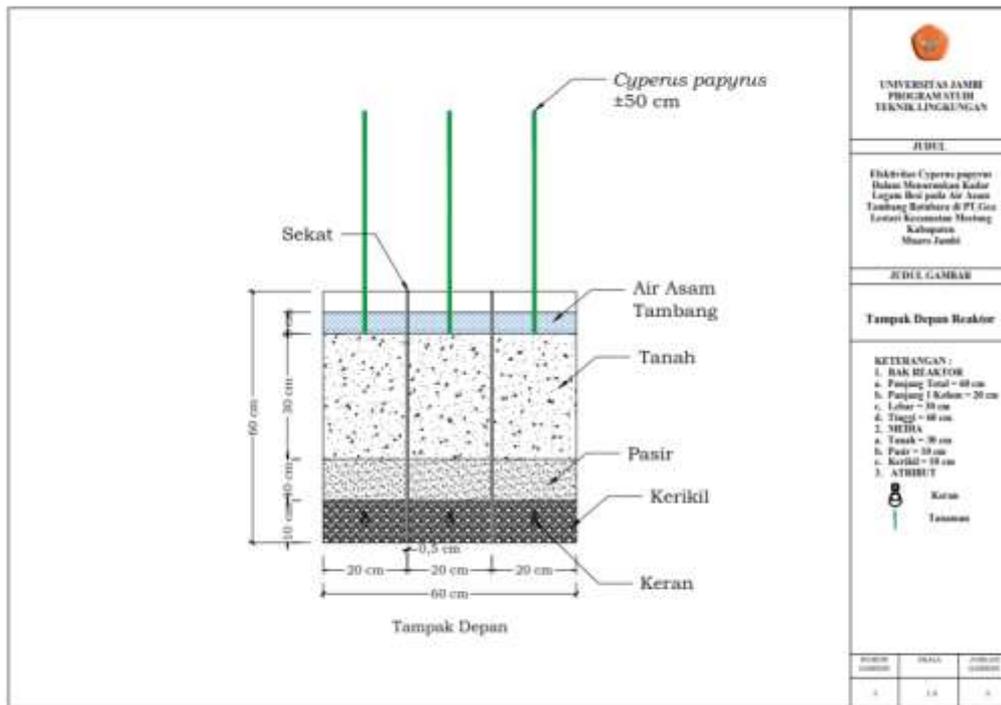


- 5) Ekspor peta

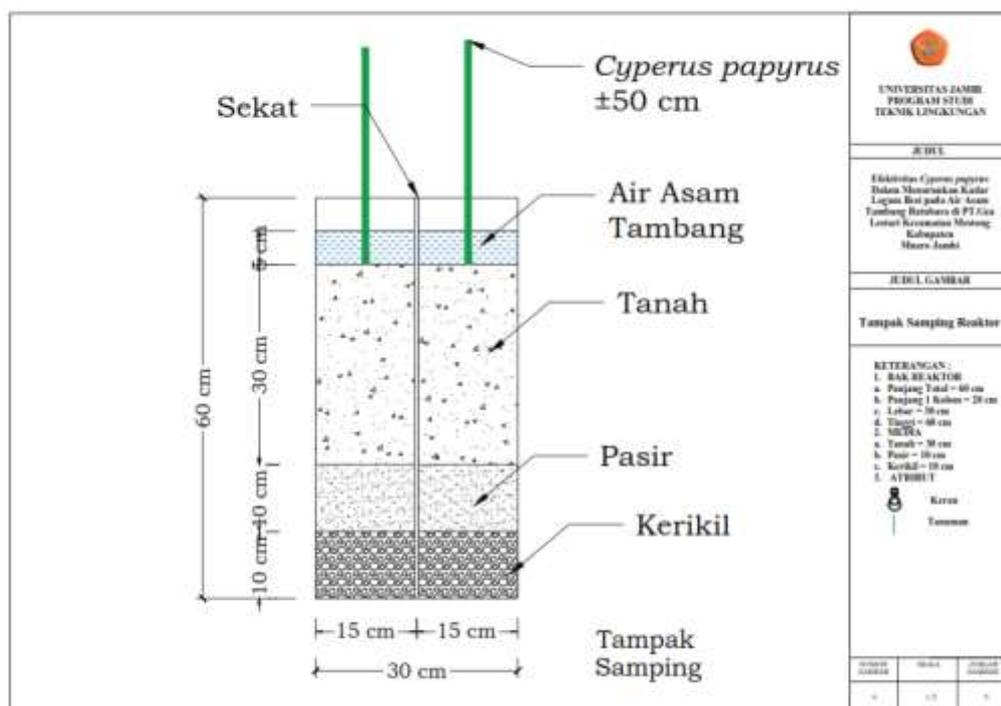


**Lampiran 7. Desain Reaktor *Constructed wetland***





 UNIVERSITAS JEMBER PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN		
<b>JUDUL</b>		
Efektivitas <i>Cyperus papyrus</i> Dalam Menurunkan Kadar Logam Berat pada Air Asam Tambang Batu bara di PT Gea Lestari Kecamatan Mubang Kabupaten Muro Jember		
<b>JUDUL GAMBAR</b>		
<b>Tampak Depan Reaktor</b>		
<b>KETERANGAN :</b> 1. BAK REAKTOR a. Panjang Total = 60 cm b. Panjang 1 Kolom = 20 cm c. Lebar = 30 cm d. Tinggi = 60 cm 2. MEDIA a. Tanah = 30 cm b. Pasir = 10 cm c. Kerikil = 10 cm 3. ATRIBUT  Keran  Tamanas		
NO. GAMBAR	HALAMAN	JUMLAH HALAMAN
1	14	5



 UNIVERSITAS JEMBER PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN		
<b>JUDUL</b>		
Efektivitas <i>Cyperus papyrus</i> Dalam Menurunkan Kadar Logam Berat pada Air Asam Tambang Batu bara di PT Gea Lestari Kecamatan Mubang Kabupaten Muro Jember		
<b>JUDUL GAMBAR</b>		
<b>Tampak Samping Reaktor</b>		
<b>KETERANGAN :</b> 1. BAK REAKTOR a. Panjang Total = 60 cm b. Panjang 1 Kolom = 20 cm c. Lebar = 30 cm d. Tinggi = 60 cm 2. MEDIA a. Tanah = 30 cm b. Pasir = 10 cm c. Kerikil = 10 cm 3. ATRIBUT  Keran  Tamanas		
NO. GAMBAR	HALAMAN	JUMLAH HALAMAN
1	14	5



JUDUL

Efektivitas Operasi pembersihan  
Bahan Menyerapkan Karbon  
Lingpan dari pada Air Asam  
Tambang Berbahaya di PT. Lina  
Lestari Kecamatan Mestong  
Kabupaten  
Muaro Jambi

JURUSAN GAMBAR

Tampak Atas Reaktor

- KELETERANGAN:
1. BAK REAKTOR
    - a. Panjang Total = 60 cm
    - b. Panjang 1 Kolom = 20 cm
    - c. Lebar = 30 cm
    - d. Tinggi = 60 cm
  2. MEDIA
    - a. Lapisan = 30 cm
    - b. Pasir = 10 cm
    - c. Karbit = 10 cm
  3. ALYBIUM
    - Keran
    - Tutupan
  4. VARIASI WAKTU
    - A. = Hari ke - 1
    - B. = Hari ke - 4
    - C. = Hari ke - 14
    - KA = Kontrol Hari ke - 1
    - KB = Kontrol Hari ke - 4
    - KC = Kontrol Hari ke - 14

NO	REVISI	REVISI
1	01	01

