

**PENURUNAN KONSENTRASI MERKURI
PADA LAHAN BEKAS TAMBANG BATUBARA
DI PT. GEA LESTARI PROVINSI JAMBI
MENGUNAKAN TANAMAN *Cyperus rotundus***

S K R I P S I



YOLI NOVELIA

F1G321018

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

**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS JAMBI**

2025

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan dengan kesadaran penuh bahwa skripsi ini adalah benar-benar hasil dari karya saya sendiri. Sepengetahuan saya, tidak terdapat karya ilmiah atau pendapat yang pernah dipublikasikan oleh pihak lain yang memiliki kesamaan dengan skripsi ini, kecuali kutipan atau referensi yang telah saya cantumkan sesuai dengan pedoman penulisan karya ilmiah yang berlaku.

Tanda tangan yang tertera pada halaman pengesahan adalah tanda tangan asli saya. Apabila di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian antara pernyataan ini dengan kenyataan, saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Jambi, 1 Juli 2025



Yoli Novelia

NIM. F1G321018

RINGKASAN

Penelitian ini berfokus pada remediasi tanah yang terkontaminasi logam berat seperti merkuri, dimana hasil dari pra-penelitian sebesar 0,631 mg/kg yang terkandung didalam tanah akibat aktivitas pertambangan. Salah satunya yaitu pertambangan di PT. Gea Lestari Provinsi Jambi yang meninggalkan jejak berupa lahan bekas tambang batubara yang terkontaminasi dan merusak lingkungan maupun kesehatan. Oleh karena itu, dilakukannya proses remediasi dengan memanfaatkan tanaman *Cyperus rotundus* sebagai agen fitoremediasi. Hasil pra-penelitian menunjukkan bahwa kandungan merkuri pada tanah tercemar bekas tambang batubara melebihi ambang batas baku mutu yang ditetapkan oleh Permenkes Nomor 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan dan Standar Baku Mutu Tanah yaitu 0,3 mg/kg untuk merkuri. Tujuan penelitian ini yaitu (a) menentukan konsentrasi merkuri pada tanah bekas tambang batubara setelah dilakukan fitoremediasi menggunakan tanaman *Cyperus rotundus*, (b) menentukan efektivitas tanaman *Cyperus rotundus* dalam menurunkan merkuri pada tanah tercemar bekas tambang batubara, (c) Menganalisis perbedaan yang signifikan antara kelompok dengan variasi waktu menggunakan uji ANOVA.

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan teknik fitoremediasi menggunakan tanaman *Cyperus rotundus*. Sampel tanah diambil disekitar lahan bekas tambang batubara, dihomogenkan, dan tanaman diaklimatisasi selama 7 hari. Percobaan disusun dalam Rancangan Acak Lengkap (RAL) yaitu rancangan dengan 2 perlakuan dan 3 kali pengulangan dengan variasi waktu 14 hari dan 28 hari. Parameter yang diamati meliputi konsentrasi merkuri pada tanah tanpa tanaman atau tanah kontrol, tanah dengan tanaman, akumulasi logam dalam tanaman, serta perkembangan tanaman. Konsentrasi logam dianalisis menggunakan *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy* (ICP-OES), dan data diuji dengan uji *Two Ways-ANOVA* untuk mengetahui perbedaan signifikan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanaman *Cyperus rotundus* efektif dalam menurunkan konsentrasi merkuri pada tanah tercemar. Pada hari ke-14, efektivitas penyerapan merkuri sebesar 64,34%, dengan penurunan konsentrasi merkuri dari 0,631 mg/kg menjadi 0,225 mg/kg. Selanjutnya pada hari ke-28, efektivitas penyerapan merkuri meningkat menjadi 83,36%, dan konsentrasi merkuri dalam tanah menurun lebih

lanjut menjadi 0,105 mg/kg. Berdasarkan uji *two ways* ANOVA didapatkan bahwa untuk nilai kelompok sig <0,05 yaitu 0,001, dan untuk nilai waktu sig <0,05 yaitu 0,005. Hasil dari nilai F_{hitung} untuk kelompok sebesar 1939,969 dan waktu sebesar 31,850 dan untuk nilai F_{tabel} nya sama yaitu sebesar 7,71. Jadi, dapat disimpulkan bahwa $F_{hitung} > F_{tabel}$ yaitu dengan nilai kelompok (1939,969) dan waktu (31,850) > 7,71. Berdasarkan nilai tersebut menyatakan bahwa H_0 ditolak dan H_1 diterima, artinya adanya perbedaan secara signifikan pada penurunan konsentrasi merkuri pada kelompok perlakuan tanpa menggunakan teknik fitoremediasi, kelompok perlakuan yang menggunakan teknik fitoremediasi dan variasi waktu dengan menggunakan tanaman *Cyperus rotundus*.

Penelitian ini menunjukkan bahwa tanaman *Cyperus rotundus* dapat digunakan untuk menurunkan konsentrasi merkuri pada tanah bekas tambang batubara di PT. Gea Lestari Provinsi Jambi. Tanaman ini juga memiliki kemampuan untuk mengakumulasi logam berat, sehingga berkontribusi dalam proses remediasi tanah yang terkontaminasi atau tercemar.

SUMMARY

*This research focuses on the remediation of soil contaminated with heavy metals such as mercury in the post-coal mining area of PT. Gea Lestari, Jambi Province. The remediation process was carried out by utilizing *Cyperus rotundus* plants as a phytoremediation agent. This research is motivated by the problem of soil pollution caused by high levels of mercury in the area. Preliminary research results showed that the mercury content in the contaminated soil from the former coal mine exceeded the quality standard threshold set by the Regulation of the Minister of Health Number 2 of 2023 concerning Regulations in the Implementation of Government Regulation Number 66 of 2014 concerning Environmental Health and Soil Quality Standards, which is 0.3 mg/kg for mercury. The objectives of this research were (a) to determine the mercury concentration in the post-coal mining soil after phytoremediation using *Cyperus rotundus* plants, and (b) to determine the effectiveness of *Cyperus rotundus* plants in reducing mercury in the contaminated post-coal mining soil, (c) Analyze significant differences between groups with time variation using ANOVA test.*

*This research used an experimental method with a phytoremediation technique employing *Cyperus rotundus* plants. Soil samples were taken from around the former coal mining area, homogenized, and the plants were acclimatized for 7 days. The experiment was arranged in a Completely Randomized Design (CRD), which was a design with 2 treatments and 3 repetitions with time variations of 14 days and 28 days. The observed parameters included mercury concentration in soil without plants or control soil, soil with plants, metal accumulation in plants, and plant growth. Metal content was analyzed using Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES), and the data were tested with a Two-Way ANOVA test to determine significant differences.*

*The research results showed that *Cyperus rotundus* plants were effective in reducing the mercury concentration in the contaminated soil. On the 14th day, the mercury absorption effectiveness was 64,34%, with a decrease in mercury concentration from 0.613 mg/kg to 0.225 mg/kg. Furthermore, on the 28th day, the mercury absorption effectiveness increased to 83,36%, and the mercury concentration in the soil further decreased to 0.105 mg/kg. Based on the two-way ANOVA test, the significance value for the group was <0.05 (0.001), and the significance value for time was <0.05 (0.005). The F-statistic value for the group was 1939.969 and for time was 31.850, while the F-table value was the same for both at 7.71. Thus, it can be*

concluded that the F-statistic > F-table, with values for the group (1939.969) and time (31.850) > 7.71. Based on these values, the null hypothesis (H0) was rejected and the alternative hypothesis (H1) was accepted, meaning there was a significant difference in the reduction of mercury concentration between the treatment group without using the phytoremediation technique, the treatment group using the phytoremediation technique, and the time variations using Cyperus rotundus plants.

This research indicates that Cyperus rotundus plants can be used to reduce mercury concentration in the post-coal mining soil at PT. Gea Lestari, Jambi Province. These plants also have the ability to accumulate heavy metals, thus contributing to the remediation process of contaminated or polluted soil.

**PENURUNAN KONSENTRASI MERKURI
PADA LAHAN BEKAS TAMBANG BATUBARA
DI PT. GEA LESTARI PROVINSI JAMBI
MENGUNAKAN TANAMAN *Cyperus rotundus***

S K R I P S I

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh Gelar Sarjana pada
Program Studi Teknik Lingkungan



YOLI NOVELIA

F1G321018

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

**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS JAMBI**

2025

PENGESAHAN

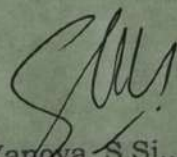
Skripsi dengan judul **Penurunan Konsentrasi Merkuri pada Lahan Bekas Tambang Batubara di PT. Gea Lestari Provinsi Jambi menggunakan Tumbuhan *Cyperus rotundus*** yang disusun oleh YOLI NOVELIA, NIM : F1G321018 telah dipertahankan dihadapan tim penguji pada tanggal dan dinyatakan lulus.

Susunan Tim Penguji

Ketua : Shally Yanova, S.Si., M.Si.
Sekretaris : Ir. Rinaldi, M.Si
Anggota : 1. Dr. Ir. Rizki Andre Handika, S.T, M.T, Ph.D (Eng)
2. Fernando Mersa Putra, S.T., M.Sc.
3. Ir. Lailal Gusri, S.T., M.Sc.

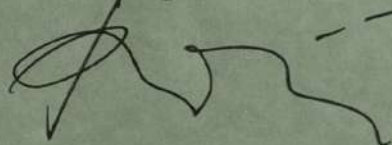
Disetujui

Pembimbing Utama



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

Pembimbing Pendamping



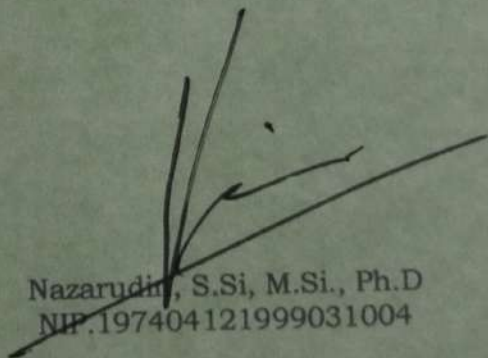
Ir. Rinaldi, M.Si
NIP. 196012171989021001

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



Yoli Novelia lahir di Mukai Tengah pada tanggal 22 Agustus 2003. Penulis merupakan anak bungsu dari tiga bersaudara, dari pasangan Bapak Sardi dan Ibu Rayalis. Penulis besar di lingkungan keluarga yang sederhana dan senantiasa memberikan dukungan serta kepercayaan kepada penulis dalam menjalankan kehidupan. Meskipun hidup dalam keterbatasan, orang tua penulis selalu menanamkan pentingnya Pendidikan. Mereka selalu mendorong penulis untuk belajar dengan giat dan meraih cita-cita setinggi mungkin. Oleh karena itu, penulis dapat menempuh Pendidikan formal di:

1. SD Negeri 122/III Mukai Tengah, 2010-2016
2. SMP Negeri 5 Kerinci, 2016-2018
3. SMA Negeri 4 Kerinci, 2018-2021

Pada tahun 2021 penulis melanjutkan ke perguruan tinggi di Universitas Jambi diterima melalui Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) pada Program Studi Teknik Lingkungan dan mendapat beasiswa yang disebut KIP-K. Keberhasilan ini merupakan kebanggaan tersendiri bagi keluarga penulis, karena penulis adalah orang pertama di keluarga yang berhasil menempuh Pendidikan tinggi. Selama menempuh Pendidikan tinggi, penulis aktif di dalam bidang akademik maupun non akademik. Penulis aktif mengikuti berbagai kegiatan organisasi kemahasiswaan, yang melatih kemampuan kepemimpinan bagi penulis. Tahun 2021 dan 2022 penulis di percaya untuk mengikuti lomba KN-MIPA dibidang Matematika, Pada tahun 2023 penulis pernah mengikuti Program Pengabdian Mahasiswa kepada Masyarakat di Kelurahan Eka Jaya sekaligus menjadi tempat penulis melakukan Kerja Praktik. Dengan judul “Peduli Perubahan Iklim Melalui Optimalisasi Pengelolaan Sampah Domestik Oleh Masyarakat Di Kelurahan Eka Jaya Dan Tempat Pengolahan Sampah Makmur Jaya”. Pada tahun 2023/2024 penulis mengikuti organisasi prodi yaitu Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan sebagai pengurus harian pada divisi Kewirausahaan. Setelah itu pada tahun 2024 penulis melakukan penyusunan Tugas Akhir dengan judul **“Penurunan Konsentrasi Merkuri pada Lahan Bekas Tambang Batubara di PT. Gea Lestari Provinsi Jambi menggunakan Tanaman *Cyperus rotundus*”** dibawah bimbingan Ibu Shally Yanova, S.Si., M.Si. dan Bapak Ir. Rinaldi, M.Si.

PRAKATA

Puji Syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas Rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyusun dan menyelesaikan Usulan penelitian dengan judul “Penurunan Konsentrasi Merkuri pada Lahan Bekas Tambang Batubara di PT. Gea Lestari Provinsi Jambi menggunakan Tanaman *Cyperus rotundus*”. Penulisan proposal ini bertujuan untuk memenuhi syarat untuk dilakukannya penelitian dan untuk mencapai gelar sarjana pada Program Studi Teknik Lingkungan, Jurusan Teknik Sipil, Kimia dan Lingkungan, Fakultas Sains dan Teknologi.

Dalam penyusunan proposal ini penulis tidak lepas dari bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati, penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang sudah membantu. Ucapan tersebut penulis sampaikan 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 Sains dan Teknologi 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 I yang telah membimbing, memberikan arahan, dan masukan bagi penulis dalam menyelesaikan penulisan Skripsi ini.
5. Bapak Ir. Rinaldi, M.Si., selaku Dosen Pembimbing II yang telah membimbing, memberikan arahan, dan masukan bagi penulis dalam menyelesaikan penulisan Skripsi ini.
6. Bapak Dr. Rizki Andre Handika, S.T., M.T, PHD (ENG)., selaku Dosen Penguji I yang memberikan masukan dan saran terhadap penulis Skripsi ini.
7. Bapak Fernando Mersa Putra, S.T., M.Sc., selaku Dosen Penguji II yang memberikan masukan dan saran terhadap penulis Skripsi ini.
8. Bapak Ir. Lailal Gusri, S.T., M.Sc., selaku Dosen Penguji III yang memberikan masukan dan saran terhadap penulis Skripsi ini.
9. Bapak/Ibu Dosen Teknik Lingkungan yang telah memberikan arahan dan ilmu dibidang keteknikan kepada penulis.
10. Kepada seluruh pihak Tambang Batubara PT. Gea Lestari Provinsi Jambi yang telah memberikan izin dan bantuan serta arahan selama melakukan penelitian untuk menyelesaikan Skripsi ini.

11. Kepada cinta pertama dan panutanku, Ayahanda Sardi dan pintu surgaku ibunda Rayalis. Terimakasih atas segala pengorbanan dan tulus kasih yang diberikan. Beliau memang tidak sempat merasakan Pendidikan yang tinggi, namun mereka mampu senantiasa memberikan yang terbaik, tak kenal lelah mendo'akan serta memberikan perhatian dan dukungan hingga penulis mampu menyelesaikan studinya sampai meraih gelar sarjana. Terimakasih atas setiap cucuran keringat dan kerja keras yang engkau tukarkan menjadi sebuah nafkah demi anakmu bisa sampai kepada tahap ini. Semoga ayah dan ibu sehat selalu, Panjang umur dan Bahagia selalu.
12. Kepada Yomi Adi Saldi dan Yovi Novia, selaku kakak penulis yang telah memberikan semangat dan dukungan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini.
13. Kepada Anteli, selaku sekaligus sahabat dari kecil penulis, terimakasih selalu memberikan semangat dan selalu menemani penulis serta selalu sabar mendengar keluh kesah penulis.
14. Kepada The Invincibles dan Kejora Bahagia selaku teman sekaligus saudara penulis diperantauan. Terimakasih sudah mau berjalan bersama, terimakasih sudah mau menemani penulis kesana-kemari yang kadang tidak jelas topiknyanya. Terimakasih sudah mau saling menguatkan untuk hari-hari yang berat di kota orang. Semoga kita kompak selalu walaupun pada akhirnya kita memilih jalan hidup masing-masing.
15. Seluruh teman-teman seperjuangan Teknik Lingkungan Universitas Jambi angkatan 2021 yang telah membantu dan memberikan semangat serta motivasi selama penyusunan Proposal ini.
16. Dan yang terakhir, penulis ingin berterimakasih kepada diri sendiri. Yoli Novelia. Terimakasih sudah bertahan sejauh ini. Terimakasih tetap memilih berusaha dan merayakan dirimu sendiri di titik ini, walau sering kali merasa putus asa atas apa yang diusahakan dan belum berhasil, namun terimakasih tetap menjadi manusia yang selalu mau berjuang dan pantang menyerah, ini merupakan pencapaian yang patut dibanggakan untuk diri sendiri.

Penulis menyadari bahwa Penulisan Skripsi ini masih terdapat kekurangan, dengan berbagai kekurangan yang ada penulis memohon maaf. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari berbagai pihak sehingga apa yang telah disusun dalam Skripsi ini dapat bermanfaat. Akhir kata, penulis berharap semoga

membangun dari berbagai pihak sehingga apa yang telah disusun dalam Skripsi ini dapat bermanfaat. Akhir kata, penulis berharap semoga pembaca bisa mengerti dan mengambil manfaat dari Penulisan Skripsi ini, dan bermanfaat bagi pembaca maupun penulis.

Jambi, 1 Juli 2025



Yoli Novelia

DAFTAR ISI

	Halaman
SURAT PERNYATAAN.....	ii
RINGKASAN.....	iii
SUMMARY.....	v
PENGESAHAN	viii
RIWAYAT HIDUP	ix
PRAKATA	x
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Hipotesis.....	3
1.5 Batasan Masalah	3
1.6 Manfaat Penelitian	3
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Pencemaran Tanah	5
2.2 Pencemaran Logam Berat Tanah	6
2.3 Merkuri (Hg)	8
2.4 Pertambangan Batubara	9
2.5 Fitoremediasi	11
2.5.1 Mekanisme Fitoremediasi	13
2.5.2 Aplikasi Fitoremediasi	15
2.6 Tanaman <i>Cyperus rotundus</i>	16
2.6.1 Ciri-Ciri Tanaman <i>Cyperus rotundus</i>	17
2.6.2 Keunggulan Tanaman <i>Cyperus rotundus</i>	17
2.7 Destruksi Basah	18
2.7.1 Prinsip Dasar Destruksi Basah	19
2.7.2 Mekanisme Destruksi Basah.....	19
2.8 <i>Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy</i>	19
(ICP-OES).....	19
2.8.1 Prinsip Kerja ICP-OES	21
2.8.2 Keunggulan ICP-OES.....	21
2.9 Pola Tanam.....	21

2.10 Penelitian Terdahulu	23
III. METODE PENELITIAN	26
3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian	26
3.1.1 Lokasi Penelitian	26
3.1.2 Waktu Penelitian	27
3.2 Alat dan Bahan.....	28
3.3 Skema Pelaksanaan Penelitian	29
3.4 Metode Penelitian.....	30
3.5 Tahapan Penelitian	31
3.5.1 Pengumpulan Data.....	31
3.5.2 Teknik Pengambilan Sampel	31
3.5.3 Destruksi Basah.....	34
3.5.4 Pengujian Sampel.....	35
3.5.5 Tahapan Pelaksanaan Eksperimen	35
3.6 Analisis Data	38
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	39
4.1 Analisis Awal Kandungan Merkuri Sebelum Fitoremediasi	39
4.2 Perkembangan dan Pertumbuhan Selama Fitoremediasi	39
4.2.1 Masa Aklimatisasi	39
4.2.2 Perkembangan <i>Cyperus rotundus</i> per variasi waktu.....	41
4.3 Analisis Konsentrasi Merkuri dalam Tanah Tercemar	44
4.3.1 Tanah Tanpa Fitoremediasi.....	44
4.3.2 Tanah dengan Fitoremediasi.....	45
4.4 Efektivitas Penggunaan Tanaman <i>Cyperus rotundus</i> dalam Menurunkan Merkuri pada Tanah Tercemar	47
4.5 Analisis Sidik Ragam (ANOVA) <i>Two Ways</i>	48
4.6 <i>Design</i> Pola Tanam <i>Cyperus rotundus</i> di Lahan Bekas Tambang Batubara	51
V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	54
5.1 Kesimpulan	54
5.2 Saran	54
LAMPIRAN	60

DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 1. Kelebihan dan Kekurangan Teknik Fitoremediasi.....	12
Tabel 2. Penelitian Terdahulu	23
Tabel 3. Parameter Logam Berat Tanah.....	31
Tabel 4. Tahapan Perlakuan	37
Tabel 5. Baku Mutu Tanah.....	38
Tabel 6. Pengujian Konsentrasi Awal Merkuri	40
Tabel 7. Perkembangan Berat Tanaman per variasi waktu.....	41
Tabel 8. Perkembangan Tinggi Tanaman per variasi waktu.....	42
Tabel 9. Tanah Tercemar Tanpa Perlakuan	44
Tabel 10. Perhitungan Efektivitas Konsentrasi Logam merkuri Berdasarkan Variasi Waktu	47
Tabel 11. Hasil Pengujian Normalitas.....	48
Tabel 12. Hasil Pengujian Homogenitas	49
Tabel 13. Hasil Pengujian <i>Two-Ways</i> ANOVA	50

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Pencemaran Tanah Akibat Aktivitas Pertambangan	7
Gambar 2. Mekanisme Fitoremediasi	13
Gambar 3. Tanaman <i>Cyperus rotundus</i>	16
Gambar 4. <i>Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy</i>	20
Gambar 5. Peta Lokasi Penelitian	26
Gambar 6. Lokasi Sekitar Titik Pengambilan Sampel	27
Gambar 7. Skema Pelaksanaan Penelitian	29
Gambar 8. Sampel Tanah dan Tanaman Sebelum Aklimatisasi	30
Gambar 9. Titik Pengambilan Sampel	32
Gambar 10. (a) Pemasangan <i>Ring Sampler</i> dan (b) Mengambil Tanah Bagian Permukaan	33
Gambar 11. (a) Pengeboran Sampel Tanah dan (b) Pengukuran Jarak Antar Titik	33
Gambar 12. Tanah Komposit	34
Gambar 13. Alur Pengujian Sampel Tanah	35
Gambar 14. Sketsa Penanaman Tanaman <i>Cyperus rotundus</i>	36
Gambar 15. Grafik Konsentrasi Merkuri pada Tanaman	43
Gambar 16. Grafik Konsentrasi Merkuri dalam Tanah	45
Gambar 17. Perbandingan Antara Tanah Tanpa Tanaman dan Tanah dengan Tanaman	46
Gambar 18. Pola Persebaran Tanaman <i>Cyperus rotundus</i> pada Lahan Pascatambang	52

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Perhitungan Standar Deviasi	60
Lampiran 2. Perhitungan Efektivitas.....	64
Lampiran 3. Hasil uji Laboratorium Sebelum Perlakuan Fitoremediasi	65
Lampiran 4. Dokumentasi Penelitian	66
Lampiran 5. Pengukuran Berat Tanaman dalam 14 Hari.....	70
Lampiran 6. Pengukuran Berat Tanaman dalam 28 Hari.....	71
Lampiran 7. Pengukuran Tinggi Tanaman dalam 14 Hari.....	72
Lampiran 8. Pengukuran Tinggi Tanaman Selama 28 Hari	73
Lampiran 9. Hasil Uji Laboratorium Parameter Merkuri Selama Proses Fitoremediasi	74
Lampiran 10. Hasil Pengujian Normalitas	75
Lampiran 11. Hasil Pengujian Homogenitas.....	75
Lampiran 12. Hasil Pengujian <i>Two-Ways</i> ANOVA.....	75

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertambangan batubara PT. Gea Lestari merupakan salah satu pertambangan di Provinsi Jambi yang masih aktif beroperasi dan seringkali meninggalkan jejak berupa lahan bekas tambang batubara yang terkontaminasi, sehingga berpotensi menyebabkan adanya penumpukan merkuri di dalam tanah dan menimbulkan kerusakan lingkungan yang serius, seperti hilangnya lapisan tanah *topsoil* dan senyawa kimia berbahaya, serta kerusakan ekosistem. Selain itu, lahan bekas tambang batubara juga sering mengalami erosi dan longsor, penurunan kualitas udara akibat debu batubara, serta pencemaran air tanah oleh logam berat (El-nour, 2020).

Logam berat terutama merkuri, merupakan logam berat beracun, sulit terurai di alam, dan sering mencemari lingkungan, terutama di sekitar area pertambangan. Limbah pertambangan yang mengandung merkuri dapat mencemari air dan tanah, serta masuk ke dalam rantai makanan. Merkuri memiliki sifat toksik yang tinggi dan tidak diperlukan oleh tubuh karena dapat menyebabkan berbagai penyakit. Paparan merkuri dalam jangka Panjang dapat merusak sistem saraf, ginjal, dan hati. Limbah-limbah tersebut seringkali mengandung merkuri dalam konsentrasi yang tinggi dan jika tidak dikelola dengan baik, sehingga dapat mencemari tanah di sekitarnya (Hidayat, 2020).

Pencemaran logam berat, terutama merkuri merupakan masalah serius yang terjadi di berbagai daerah, terutama di sekitar lahan bekas tambang batubara. Berdasarkan hasil pra-penelitian diperoleh kandungan logam berat pada lahan bekas tambang batubara di PT. Gea Lestari Provinsi Jambi untuk merkuri sebesar 0,631 mg/kg (Lampiran 3). Sehingga perlu dilakukan penelitian untuk menurunkan konsentrasi merkuri menggunakan teknik fitoremediasi dengan tanaman *Cyperus rotundus* agar lahan bekas tambang batubara tersebut memenuhi standar baku mutu tanah menurut Permenkes Nomor 2 Tahun 2023, dimana nilai ambang batas logam berat pada tanah untuk merkuri sebesar 0,3 mg/kg. Namun, ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk mengatasi tanah tercemar oleh logam berat, salah satunya adalah fitoremediasi menggunakan tanaman *Cyperus rotundus*.

Tanaman *Cyperus rotundus* yang sering dianggap sebagai gulma pengganggu di lahan pertanian, ternyata memiliki potensi yang luas biasa sebagai agen fitoremediasi. Fitoremediasi merupakan salah satu teknik remediasi yang dapat digunakan sebagai solusi alternatif, untuk proses remediasi logam berat dan juga merupakan metode yang cukup murah, efisien, ramah lingkungan dalam penggunaannya untuk mengurangi akumulasi logam di lahan tercemar. Teknik

fitoremediasi merupakan alternatif sistem yang paling sederhana Dimana tanaman tertentu yang bekerjasama dengan mikroorganisme didalam air yang mengubah berupa zat kontaminan menjadi tidak berbahaya atau kurang berbahaya (Sumiahadi & Acar, 2018). Berdasarkan penelitian (Titahena *et al.*, 2023), *Cyperus rotundus* memang menunjukkan potensi sebagai agen fitoremediasi merkuri, dengan kemampuan menyerap 56,61% yang terdeteksi pada akar dan daun setelah 28 hari. Namun, perlu dicatat bahwa studi tersebut dilakukan pada tanah yang sengaja diberi tambahan larutan merkuri, bukan pada tanah yang terkontaminasi secara alami dari lingkungan pertambangan sesungguhnya, serta tidak adanya perbandingan langsung antara hasil penurunan konsentrasi merkuri di tanah dengan standar baku mutu yang berlaku.

Berdasarkan regulasi tersebut, dapat di ketahui bahwa lahan bekas tambang batubara PT. Gea Lestari di Provinsi Jambi belum memenuhi standar baku mutu tanah yang ditetapkan oleh Permenkes Nomor 2 Tahun 2023. Jadi, upaya yang dapat dilakukan yaitu penurunan konsentrasi merkuri pada lahan bekas tambang batubara dengan menggunakan tanaman *Cyperus rotundus*.

1.2 Identifikasi Rumusan Masalah

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Titahena *et al.*, 2023), potensi tanaman *Cyperus rotundus* dalam menyerap merkuri sudah teridentifikasi, tetapi tidak secara langsung menguji efektivitas tanaman tersebut pada tanah yang terkontaminasi secara alami seperti pada lahan bekas tambang batubara. Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini, sebagai berikut:

1. Berapa konsentrasi merkuri pada tanah bekas tambang batubara setelah dilakukan fitoremediasi menggunakan tanaman *Cyperus rotundus*?
2. Bagaimana efektivitas penggunaan tanaman *Cyperus rotundus* dalam menurunkan merkuri pada tanah tercemar bekas tambang batubara?
3. Apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara kelompok dengan variasi waktu menggunakan uji ANOVA?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan uraian rumusan masalah, penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk:

1. Menentukan konsentrasi merkuri pada tanah bekas tambang batubara setelah dilakukan fitoremediasi menggunakan tanaman *Cyperus rotundus*.
2. Menentukan efektivitas tanaman *Cyperus rotundus* dalam menurunkan merkuri pada tanah tercemar bekas tambang batubara.
3. Menganalisis perbedaan yang signifikan antara kelompok dengan variasi waktu menggunakan uji ANOVA.

1.4 Hipotesis

Hipotesis pada penelitian ini yaitu, sebagai berikut:

1. H_0 = Tidak adanya perubahan perbedaan secara signifikan pada penurunan konsentrasi merkuri pada kelompok perlakuan tanpa menggunakan teknik fitoremediasi, kelompok perlakuan menggunakan teknik fitoremediasi dan variasi waktu dengan menggunakan tanaman *Cyperus rotundus*.
2. H_1 = Adanya perubahan perbedaan secara signifikan pada penurunan konsentrasi merkuri pada kelompok perlakuan tanpa menggunakan teknik fitoremediasi, kelompok perlakuan menggunakan teknik fitoremediasi dan variasi waktu dengan menggunakan tanaman *Cyperus rotundus*.

1.5 Batasan Masalah

Untuk membatasi permasalahan dalam penelitian ini, maka perlu adanya batasan masalah. Batasan masalah tersebut sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan pada lahan bekas tambang batubara PT. Gea Lestari Provinsi Jambi dengan penanaman *ex-situ* dengan ukuran *polybag* 15 x 15 cm.
2. Parameter merkuri yang akan diturunkan menggunakan tanaman *Cyperus rotundus*.
3. Perlakuan fitoremediasi dengan tanaman dan tanpa tanaman
4. Metode yang digunakan adalah metode eksperimental dengan rancangan acak lengkap.
5. Baku mutu yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada Permenkes Nomor 2 tahun 2023 yaitu 0,3 mg/kg untuk merkuri.
6. Variasi waktu fitoremediasi dalam penelitian ini yaitu selama 7 hari masa aklimatisasi dengan variasi waktu 14 hari dan 28 hari masa fitoremediasi.

1.6 Manfaat Penelitian

Manfaat yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Bagi penulis, yaitu penelitian ini memberikan pengalaman berharga bagi penulis dalam menerapkan ilmu yang telah diperoleh pada bangku kuliah serta mengembangkan pemahaman yang lebih mendalam terkait permasalahan lingkungan.
2. Bagi program studi, penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai sumber referensi yang berguna dalam proses pembelajaran serta dapat mendukung penelitian lanjutan yang dilaksanakan oleh para mahasiswa di masa mendatang.
3. Bagi perusahaan, hasil penelitian dapat menjadi informasi bagi perusahaan mengenai tanaman yang mampu menurunkan konsentrasi logam berat pada

lahan bekas tambang batubara, serta menjadi pertimbangan untuk mengolah tanah dengan baik.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pencemaran Tanah

Pencemaran tanah akibat pertambangan merupakan masalah lingkungan yang serius, disebabkan oleh buruknya penanganan limbah pertambangan. Banyak produk limbah yang dihasilkan selama proses penambangan, termasuk air asam tambang, limbah padat yang disebut tailing dan senyawa berbahaya lainnya. Limbah ini dapat mencemari tanah di sekitar area penambangan karena mengandung bahan kimia berbahaya, logam berat, dan partikel halus. Degradasi tanah ini dapat merusak ekosistem, menurunkan kualitas air tanah dan membahayakan kesehatan manusia. Selain itu, kondisi polusi dapat buruk oleh erosi tanah yang disebabkan oleh operasi penambangan. Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan operasi rehabilitasi dan reklamasi pascatambang yang signifikan, serta penerapan teknologi pengolahan limbah yang ramah lingkungan (Nurfitriani *et al.*, 2019).

Pencemaran tanah merupakan etika zat berbahaya atau kontaminan lainnya meresap ke dalam tanah dan mengubah ekologi alamnya. Dampak luas dari masalah ini terhadap kesehatan manusia dan lingkungan menjadikannya semakin memprihatinkan. Sejumlah aktivitas manusia, termasuk pertanian, pertambangan, limbah industri, dan aktivitas lainnya, dapat mencemari tanah. Bahan organik dan anorganik merupakan jenis pencemaran yang dapat mencemari tanah. Pupuk kimia dan pestisida, yang sering digunakan di bidang pertanian, merupakan contoh kontaminasi organik. Sementara itu, logam berat dari limbah pertambangan dan industri seperti timbal, merkuri, dan kadmium merupakan sumber utama pencemaran anorganik. Upaya dalam menanggulangi pencemaran tanah, dimana tanah yang terkontaminasi dapat dibersihkan dengan remediasi (Susanto, 2021).

Teknik remediasi yang umum digunakan menurut (Zakariah *et al.*, 2023) dibagi menjadi 3 bagian yaitu sebagai berikut:

1. Bioremediasi

Bioremediasi merupakan pemanfaatan mikroorganisme untuk menguraikan zat-zat pencemar yang ada di dalam tanah dan dapat mengatasi permasalahan pencemaran tanah dengan memberdayakan kemampuan alami mikroorganisme. Proses ini memanfaatkan beragam jenis mikroba, seperti bakteri, fungi, dan alga, yang secara metabolis mampu mendegradasi atau mentransformasi senyawa-senyawa berbahaya menjadi bentuk yang kurang toksik atau bahkan tidak berbahaya sama sekali

2. Fitoremediasi

Fitoremediasi adalah pemanfaatan tumbuhan untuk menyerap dan mengakumulasi zat-zat pencemar di dalam tanah, air atau bahkan udara. Keunggulan utama fitoremediasi terletak pada biayanya yang relatif rendah, potensi untuk pemulihan *in-situ*, peningkatan kualitas tanah, serta nilai estetika dan ekologis tambahan yang ditawarkan oleh vegetasi. Meskipun demikian, efektivitas fitoremediasi dipengaruhi oleh jenis tumbuhan, jenis dan konsentrasi kontaminan, serta kondisi lingkungan tumbuh.

3. Fisikomediasi

Fisikomediasi yaitu membersihkan tanah dengan cara fisik atau kimia, seperti mencuci, mengekstraksi, atau menstabilkan tanah untuk menghilangkan, memisahkan, atau mengurangi mobilitas zat-zat pencemar. Pemilihan metode fisikomediasi yang tepat sangat bergantung pada karakteristik spesifik lokasi tercemar, jenis dan konsentrasi kontaminan, serta pertimbangan biaya dan dampak lingkungan.

Kawasan yang mengalami gangguan akibat operasi penambangan batubara disebut sebagai lahan terkontaminasi. Ekstraksi, pengangkutan, dan penggunaan bahan peledak selama operasi penambangan dapat mengubah komposisi dan struktur tanah asli, sehingga menyebabkan wilayah daratan mengalami kerusakan fisik dan terkontaminasi logam berat. Permukaan tanah yang tidak rata selalu disebabkan oleh metode eksplorasi penggalian dalam yang digunakan pada operasi penambangan sebelumnya, dan hal ini tentu saja berdampak pada ekosistem. Hal ini menyebabkan pemanfaatan lahan bekas pertambangan menjadi kurang berkelanjutan (Ningrum & Navastara, 2015).

2.2 Pencemaran Logam Berat Tanah

Pencemaran logam berat pada tanah merupakan masalah lingkungan yang serius, Logam berat seperti timbal, merkuri, kadmium, kromium, dan arsenic secara alami terdapat dalam tanah dengan konsentrasi rendah. Namun, aktivitas manusia dapat meningkatkan konsentrasi logam-logam ini secara signifikan, melampaui ambang batas aman bagi lingkungan dan kesehatan manusia. Sumber utama pencemaran ini meliputi pembuangan limbah industri yang tidak diolah, tumpahan bahan kimia, penggunaan pestisida dan pupuk yang mengandung logam berat, emisi dari pembakaran bahan bakar fosil, pelapukan material akibat aktivitas pertambangan (Haghighizadeh *et al.*, 2024).

Penambangan batubara merupakan salah satu dampak degradasi tanah yang mengakibatkan terjadinya pencemaran tanah oleh logam berat. Salah satu perilaku negatif manusia yang diakibatkan oleh penambangan batu bara adalah ditinggalkannya lokasi penambangan sebelumnya yang akan berdampak pada

lingkungan. Tingkat kesuburan yang menurun di area tersebut dikarenakan tidak adanya pengolahan tanah, yang berarti bahwa logam berat seperti timbal, kadmium, seng, kromium, aluminium, besi, dan merkuri masih ada di area sekitar area penambangan batu bara sebelumnya (Oktavian *et al.*, 2024).



Gambar 1. Pencemaran Tanah Akibat Aktivitas Pertambangan

Aktivitas penambangan batubara, seperti yang dilakukan oleh PT. Gea Lestari di Provinsi Jambi sering kali meninggalkan jejak berupa pencemaran lingkungan, khususnya pada tanah. Salah satu pencemaran yang paling serius adalah kontaminasi logam berat. Logam berat seperti cadmium dan merkuri yang terkandung dalam batubara dan material tambang lainnya yang dapat terakumulasi di tanah, mencemari tanah dan air tanah disekitarnya. Sifat logam berat yang sulit terurai secara alami menjadikan akumulasi ini sangat mengkhawatirkan. Seiring waktu, logam-logam berat ini dapat terserap oleh tumbuhan dan hewan, memasuki rantai makanan, dan pada akhirnya menimbulkan risiko Kesehatan yang serius bagi Masyarakat lokal melalui konsumsi tanaman atau hewan yang terkontaminasi. Selain itu, pencemaran logam berat juga dapat mengganggu keseimbangan ekosistem, merusak keanekaragaman hayati, dan menurunkan kualitas lingkungan secara keseluruhan di Provinsi Jambi. Penanganan dan pemulihan lahan yang terkontaminasi logam berat akibat aktivitas penambangan memerlukan solusi yang tepat dan berkelanjutan untuk meminimalkan dampak negatif jangka panjang terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat.

Kontaminasi logam berat pada lahan bekas tambang batubara memiliki dampak yang sangat serius terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Logam berat yang terakumulasi di tanah dapat mencemari tanah dan air tanah. Akibatnya, kualitas air menjadi buruk dan tidak layak untuk dikonsumsi

maupun digunakan untuk keperluan sehari-hari. Selain itu, logam berat juga dapat terakumulasi dalam tanaman yang tumbuh di lahan yang tercemar. Jika tanaman tersebut dikonsumsi oleh manusia atau hewan, maka logam berat akan masuk ke dalam tubuh dan dapat menyebabkan berbagai penyakit, seperti kerusakan ginjal, gangguan sistem saraf, dan kanker (Herniti & Kiky, 2020).

2.3 Merkuri (Hg)

Logam berat adalah kelompok unsur logam yang memiliki densitas, berat atom, atau nomor atom yang relatif tinggi. Kriteria yang digunakan untuk mengklasifikasikan suatu unsur sebagai logam berat memiliki berat jenis lebih dari 5 g/cm³. Logam berat bersifat sulit untuk diuraikan secara alami di lingkungan. Jika logam berat terpapar ke lingkungan, maka dapat mencemari tanah, air, dan udara. Sehingga dapat menimbulkan masalah serius bagi kesehatan dan lingkungan. Salah satu contoh logam berat yang umum adalah merkuri. Merkuri adalah logam berat yang bersifat sangat toksik dan berbahaya bagi kesehatan manusia dan lingkungan yang merupakan satu-satunya logam yang berwujud cair pada suhu kamar. Logam berat ini mudah menguap dan dapat terbawa oleh angin, mencemari udara, air, dan tanah. Pencemaran merkuri terutama berasal dari aktivitas manusia seperti pertambangan, pembakaran bahan bakar fosil, dan industri kimia. Paparan merkuri dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan, mulai dari kerusakan sistem saraf, ginjal, dan reproduksi, hingga gangguan perkembangan pada anak. Bentuk metil merkuri (senyawa organik merkuri) merupakan bentuk yang paling berbahaya karena mudah terakumulasi dalam tubuh organisme hidup melalui rantai makanan (Barokah *et al.*, 2019).

Merkuri adalah logam berat yang sangat beracun dan memiliki dampak buruk bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Berikut beberapa alasan mengapa merkuri sangat berbahaya menurut (Klein *et al.*, 2020) sebagai berikut:

a. Toksisitas tinggi

Merkuri memiliki tingkat toksisitas yang sangat tinggi. Ketika masuk ke dalam tubuh, baik melalui pernapasan, konsumsi makanan yang terkontaminasi, atau kontak langsung dengan kulit, merkuri dapat merusak sel-sel tubuh, terutama sel-sel saraf

b. Bioakumulasi dan biomagnifikasi

Merkuri mudah terakumulasi dalam tubuh organisme hidup melalui proses yang disebut bioakumulasi. Artinya, Ketika makhluk hidup seperti ikan memakan organisme kecil yang mengandung merkuri, kandungan merkuri dalam tubuh ikan akan semakin tinggi. Proses ini berlanjut sepanjang rantai makanan, sehingga predator puncak seperti manusia akan memiliki

konsentrasi merkuri yang jauh lebih tinggi dibandingkan organisme di tingkat trofik yang lebih rendah. Proses ini dikenal sebagai biomagnifikasi.

2.4 Pertambangan Batubara

Pertambangan batubara adalah proses ekstraksi batubara dari dalam bumi. Proses penambangan batubara secara umum dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu penambangan terbuka (*surface mining*) dan penambangan bawah tanah (*underground mining*).

1. Penambangan terbuka (*surface mining*)

Proses penggalian pada penambangan terbuka dapat menyebabkan kerusakan lahan, hilangnya habitat, dan perubahan tata air. Selain itu, debu dan partikel halus yang dihasilkan dari aktivitas penambangan dapat mencemari udara dan mengganggu kesehatan masyarakat. Untuk mengurangi dampak lingkungan dari penambangan terbuka yaitu dengan mengembalikan fungsi lahan setelah penambangan selesai (Goodwin, 2017). Jenis-jenis penambangan terbuka menurut (Subowo, 2017) yaitu sebagai berikut:

a. *Open pit*

Open pit merupakan penambangan dengan membentuk logam terbuka yang terus membesar. Metode ini umumnya diterapkan untuk deposit mineral yang relatif dekat dengan permukaan tanah dan tersebar dalam area yang luas, seperti batubara, bijih besi, tembaga, dan emas. Proses penambangan terbuka melibatkan serangkaian tahapan, mulai dari pembersihan lahan, penggalian lapisan penutup untuk mencapai bijih, peledakan batuan, hingga pengangkutan material hasil tambang menggunakan alat berat seperti truk dan konveyor.

b. *Quarry*

Quarry merupakan bahan galian non-logam seperti batu kapur, pasir, dan *gravel* (kerikil), andesit, granit, dan berbagai jenis batuan serta mineral industri lainnya. Proses penambangan di *quarry* umumnya melibatkan penggalian, pemecahan, dan pengayakan material untuk mendapatkan ukuran dan kualitas yang sesuai dengan kebutuhan. Pengelolaannya yang baik perlu memperhatikan aspek lingkungan, termasuk pengendalian debu, pengelolaan air limpasan, serta reklamasi lahan pasca-penambangan untuk meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan sekitar dan masyarakat.

c. *Strip mining*

Strip mining yaitu penambangan dengan membuat sayatan-sayatan panjang pada lapisan mineral yang relatif dangkal dan memanjang, seperti

batubara dan lignit. Metode ini dapat menyebabkan perubahan bentang alam yang signifikan, fragmentasi habitat, dan potensi erosi serta sedimentasi yang tinggi jika tidak dikelola dengan baik. Oleh karena itu, perencanaan yang cermat, pengelolaan *overburden* yang tepat, dan reklamasi lahan pasca-penambangan menjadi sangat penting untuk meminimalkan dampak lingkungan dan memastikan pemulihan area yang terdampak.

d. *Mountaintop removal*

Mountaintop removal yaitu penghancuran puncak gunung untuk mencapai lapisan batubara. Proses ini biasanya melibatkan penggunaan bahan peledak dalam skala besar untuk memecah batuan dan tanah, yang kemudian dipindahkan menggunakan alat berat ke lembah-lembah di sekitarnya, menciptakan apa yang disebut *valley fills* yang dapat mengubah aliran sungai dan sumber air. Debu dan partikulat dari kegiatan peledakan dan pemindahan material juga dapat mencemari udara dan mengganggu Kesehatan Masyarakat sekitar.

2. Penambangan bawah tanah (*underground mining*)

Penambangan bawah tanah bertujuan untuk mencapai cadangan mineral yang tidak dapat diakses dari permukaan, serta meminimalkan dampak lingkungan pada area permukaan. Penambangan bawah tanah memiliki tantangan dan risiko yaitu diantaranya suhu yang tinggi, kelembaban tinggi, ventilasi yang buruk dan rawan longsor mengakibatkan pekerja mudah mengalami kecelakaan kerja.

Penambangan bawah tanah ini memiliki karakteristik dan penerapan yang berbeda. Beberapa metode yang digunakan menurut antara lain:

- a. *Room and pillar* yaitu metode yang melibatkan penggalian ruangan-ruangan yang dipisahkan oleh pilar-pilar batuan untuk menopang atap atau teknik penambangan bawah tanah yang umum digunakan, terutama untuk deposit mineral yang relatif datar atau memiliki kemiringan landai, seperti batubara, garam, potas, dan bijih besi. Metode ini relatif sederhana dan memungkinkan penggunaan peralatan mekanis untuk meningkatkan efisiensi, *room and pillar* seringkali meninggalkan Sebagian sumber daya mineral di dalam pilar, yang dapat mempengaruhi tingkat pemulihan keseluruhan. Setelah penambangan di area tertentu selesai, terkadang dilakukan teknik *pillar robbing* atau *retreat mining*, yaitu pengambilan pilar-pilar penyangga secara hati-hati saat area tersebut ditinggalkan, yang memerlukan perhitungan yang sangat cermat untuk menghindari keruntuhan yang berbahaya.

- b. *Longwall* merupakan metode yang menggunakan mesin pemotong untuk memotong lapisan batubara secara terus-menerus yang digunakan untuk mengekstraksi lapisan batubara yang tebal dan relatif datar. Dalam metode ini, sebuah panel batubara yang panjang (bisa mencapai ratusan meter) diekstraksi secara keseluruhan dalam satu operasi yang berkelanjutan. Keunggulan utama metode ini adalah Tingkat pemulihan Batubara yang sangat tinggi, seringkali mencapai 80-90%, serta tingkat produksi yang besar dalam waktu yang singkat. Namun, metode ini memerlukan investasi awal yang signifikan untuk peralatan dan perencanaan yang matang untuk memastikan keamanan dan efisiensi operasi. Selain itu, dampak permukaan seperti penurunan tanah perlu dipertimbangkan dan dikelola dengan baik.
- c. *Sublevel caving* melibatkan penggalian tingkat-tingkat dibawah zona runtuh untuk memicu runtuhnya batuan secara terkendali yang diterapkan untuk mengekstraksi deposit bijih yang besar, memiliki kemiringan curam, dan batuan di sekitarnya relatif lemah sehingga mudah runtuh. Teknik ini melibatkan pembuatan serangkaian tingkat yang sejajar di bawah zona bijih yang akan ditambang. *Sublevel caving* dikenal karena biaya penambangannya yang relatif rendah dan kemampuannya untuk menangani deposit bijih yang besar. Namun, tantangannya terletak pada pengendalian proses peruntuhan, pemisahan bijih dari batuan penutup, dan potensi kehilangan bijih akibat bercampur dengan material runtuh. Perencanaan yang matang dan pemahaman geologi yang baik sangat penting untuk keberhasilan dan keamanan metode ini.
- d. *Block caving* yaitu pemotongan blok-blok batuan besar secara bertahap hingga runtuh. Teknik ini melibatkan pemotongan dan pelemahan bagian bawah blok bijih secara bertahap melalui serangkaian terowongan dan *undercut* (pemotongan di bawah blok). Metode ini dikenal karena biaya produksi per ton bijih yang rendah dan potensi produksi yang sangat tinggi, namun memerlukan investasi awal yang besar untuk pengembangan infrastruktur bawah tanah dan *drawpoint*, dan manajemen aliran material yang runtuh menjadi kunci keberhasilan dan keamanan operasi *block caving*.

2.5 Fitoremediasi

Fitoremediasi adalah sebuah teknik yang ramah lingkungan dan dimanfaatkan untuk kemampuan alami tumbuhan yang dapat menyerap, menstabilkan, atau mendegradasi polutan, termasuk logam berat yang

mencemari tanah dan air. Pada lahan bekas tambang batubara, fitoremediasi menjadi solusi untuk menurunkan konsentrasi logam berat yang seringkali tertinggal dalam tanah akibat aktivitas pertambangan. Proses ini melibatkan pemilihan jenis tanaman tertentu yang memiliki toleransi tinggi terhadap kondisi ekstrem dan mampu mengakumulasi logam berat dalam biomasnya. Akar tanaman akan menyerap logam berat dari tanah, kemudian logam tersebut akan terakumulasi pada bagian tanaman di atas tanah. Setelah tanaman dipanen, biomassa tanaman yang mengandung logam berat dapat diolah lebih lanjut atau dikelola dengan aman. Dengan demikian, fitoremediasi tidak hanya membersihkan tanah dari logam berat, tetapi juga dapat menghasilkan biomassa tanaman yang berpotensi dimanfaatkan untuk berbagai keperluan (Hasyim, 2016).

Fitoremediasi adalah pengelolaan lingkungan yang memanfaatkan kecerdasan alam. Metode ini mengandalkan kemampuan alami tumbuhan, terutama tanaman yang dapat menyerap dan mengakumulasi logam berat yang mencemari tanah. Dengan demikian, fitoremediasi menawarkan solusi ramah lingkungan yang efektif dalam mengatasi masalah pencemaran tanah. Proses ini juga lebih hemat biaya dibandingkan metode konvensional yang seringkali melibatkan penggunaan bahan kimia berbahaya. Mekanisme fitoremediasi melibatkan penyerapan logam berat oleh akar tanaman, translokasi ke bagian tanaman di atas tanah, dan akumulasi pada organ-organ tertentu. Melalui proses ini, konsentrasi logam berat dalam tanah dapat secara signifikan berkurang, sehingga memulihkan kualitas tanah dan mengurangi risiko kontaminasi pada lingkungan sekitar. Keunggulan lain dari fitoremediasi adalah kemampuannya untuk diterapkan pada berbagai jenis tanah dan kondisi lingkungan, serta potensinya dalam meningkatkan estetika lahan yang tercemar (Ratnawati & Fatmasari, 2018).

Adapun penerapan Teknik fitoremediasi menurut (Ahmad *et al.*, 2017) mengenai kelebihan dan kekurangan fitoremediasi dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 1. Kelebihan dan Kekurangan Teknik Fitoremediasi

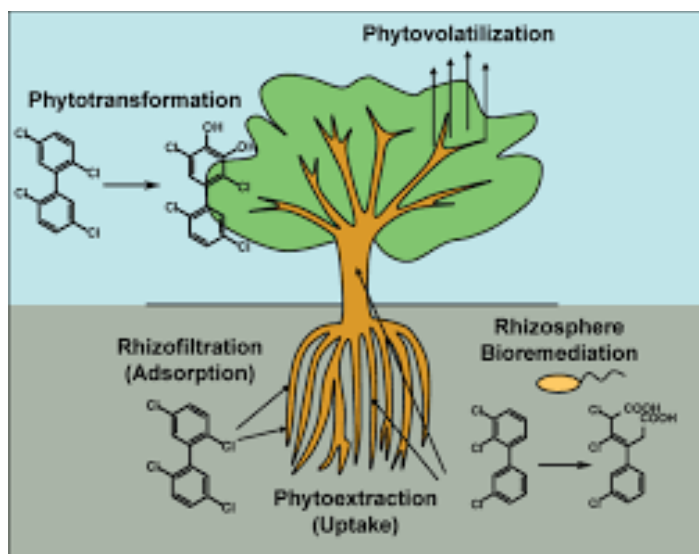
Kelebihan	Kekurangan
Membutuhkan biaya operasional yang kecil	Lebih lambat dari teknologi konvensional
Ramah lingkungan	Potensi kontaminan masuk ke dalam rantai makanan

Kelebihan	Kekurangan
Membutuhkan energi yang lebih kecil	Tidak bisa mengetahui jenis kontaminan yang terdegradasi
Menghasilkan lebih sedikit limbah sekunder	Terbatas pada kontaminan yang rendah
Lebih sedikit menghasilkan karbon	
Dapat diaplikasikan untuk beragam jenis limbah	

Sumber: Penelitian (Ahmad et al., 2017)

2.5.1 Mekanisme Fitoremediasi

Fitoremediasi memanfaatkan kemampuan unik tumbuhan untuk membersihkan atau mensterilkan kontaminan berbahaya seperti logam berat dan senyawa organik dari lingkungan. Proses ini melibatkan berbagai mekanisme yang saling terkait dan bergantung pada jenis tanaman, jenis kontaminasi. Serta kondisi lingkungan. Adapun mekanisme fitoremediasi dapat dilihat pada **Gambar 2** berikut:



Gambar 2. Mekanisme Fitoremediasi

Sumber: Penelitian (Nursagita & Sulistyaning, 2021)

Pada **Gambar 2** merupakan fitoremediasi logam berat pada tumbuhan, dimana pada proses ini terdapat translokasi logam dari akar ke tajuk. Translokasi ini dikendalikan oleh dua proses utama yaitu pergerakan ion ke silem dan fluks dalam silem. Tumbuhan mengeluarkan senyawa organik dan enzim melalui akar yang disebut eksudat akar. Berikut penjelasan mengenai mekanisme fitoremediasi menurut (Nursagita & Sulistyaning, 2021):

1. Fitoekstraksi

Fitoekstraksi yaitu bahan pencemar yang dapat diserap oleh akar tanaman kemudian berpindah atau terakumulasi di bagian tanaman lain seperti daun dan tajuk. Dalam proses fitoekstraksi, kemampuan akar tanaman untuk menyerap berbagai jenis kontaminan, terutama logam berat seperti timbal, kadmium, seng, dan arsenik, dimanfaatkan secara aktif. Keberhasilan fitoekstraksi sangat dipengaruhi oleh pemilihan spesies tanaman yang tepat, kondisi tanah, jenis dan konsentrasi kontaminan, serta praktik pengelolaan tanaman yang optimal.

2. Rhizofiltrasi merupakan proses dimana akar tanaman mengambil, mengendapkan, dan menyerap logam berat dan bahan kimia lainnya dari aliran limbah dalam upaya menjernihkan lingkungan sekitar. Efisiensinya dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk jenis dan konsentrasi kontaminan, pH air, laju aliran air, jenis dan umur tanaman, serta luas permukaan dan kepadatan sistem perakaran. Metodenya yang relatif murah dan ramah lingkungan untuk remediasi air.

3. Fitodegradasi adalah upaya yang dapat dilakukan untuk mengubah atau memetabolisme kontaminan dalam jaringan dan kemampuan tanaman untuk menguraikan atau mengubah struktur kimia kontaminan organik yang telah diserap oleh akar dan diangkut ke bagian atas tanaman, seperti batang dan daun. Proses ini melibatkan enzim-enzim yang dihasilkan oleh tanaman untuk memecahkan molekul polutan menjadi produk yang kurang berbahaya atau tidak bahaya sama sekali. Contoh kontaminan organik yang dapat didegradasi melalui fitodegradasi meliputi hidrokarbon minyak bumi, pelarut terklorinasi, pestisida, dan herbisida.

4. Fitostabilisasi merupakan cara untuk menstabilkan tanah yang terkontaminasi dengan menghasilkan senyawa kimia tertentu menggunakan tanaman. Tanaman menghasilkan senyawa kimia di akarnya yang mengikat kontaminan, membuatnya tidak bergerak dan sulit diserap oleh makhluk hidup. Akar tanaman juga secara fisik menahan tanah, mencegah erosi dan penyebaran kontaminan. Metode ini lebih murah dan ramah lingkungan, namun tidak menghilangkan kontaminan sepenuhnya. Pemilihan jenis tanaman yang tepat penting untuk keberhasilannya.

5. Fitovolatilisasi terjadi ketika polutan diserap oleh tumbuhan dan kemudian dilepaskan ke atmosfer melalui daunnya. Proses ini efektif untuk beberapa jenis kontaminan organik, seperti selenium dan merkuri (diubah menjadi bentuk yang kurang beracun dan lebih menguap). Meskipun dapat menghilangkan kontaminan dari tanah atau air, fitovolatilisasi

memindahkannya ke udara, sehingga perlu dipertimbangkan potensi dampak terhadap kualitas udara di sekitar area tersebut.

6. Fitotransformasi merupakan proses pengubahan zat berbahaya menjadi bentuk yang tidak terlalu berbahaya, seperti karbon dioksida, air, dan metana, serta bahan organik akan diuraikan oleh tanaman dengan memanfaatkan air sebagai bahan bakarnya. Air berperan penting dalam proses metabolisme ini sebagai pelarut dan reaktan. Metode ini efektif dalam berbagai jenis herbisida, pestisida, dan senyawa organik lainnya.

Untuk menciptakan lingkungan yang lebih bersih dan sehat, mekanisme kerja fitoremediasi ini diharapkan dapat membantu menghilangkan kontaminan organik dari tanah dan air. Selain itu, fitoremediasi terjangkau, layak, efektif dalam mengurangi tingkat polutan yang signifikan, dan mudah digunakan. Memanfaatkan kapasitas tanaman untuk menyerap dan mengakumulasi logam berat merupakan salah satu cara untuk mengelola polusi. Syarat tanaman sebagai fitoremediator yaitu tanaman yang harus cepat tumbuh, memiliki toleransi yang tinggi terhadap kontaminan, dapat cepat menyerap dan mengonsumsi air, serta mampu meremediasi beberapa bahan pencemar.

2.5.2 Aplikasi Fitoremediasi

Teknologi fitoremediasi merupakan salah satu upaya untuk membersihkan kawasan kotor yang ramah lingkungan. Selain mengekstraksi dan menghilangkan zat berbahaya, seperti logam berat, fitoremediasi tanaman juga dapat membuat suatu area termineralisasi. Kemampuan tanaman dalam menahan stres akibat polutan tersebut akan menimbulkan berbagai reaksi stres. Meskipun beberapa tanaman sensitif dan tidak dapat menahan stres, tanaman lainnya resisten karena memiliki mekanisme yang memungkinkan tanaman menjadi toleran terhadap stres dan mengakumulasi ion logam di organnya (Bhat *et al.*, 2022).

Hiperakumulator adalah tumbuhan yang dapat mengakumulasi ion logam 100 kali lebih banyak dibandingkan tumbuhan akumulator lainnya karena mampu bertahan hidup di lingkungan dengan unsur hara tinggi dan menyerap unsur hara dalam konsentrasi tinggi (Skuza *et al.*, 2022). Kemampuan tanaman untuk menyerap bahan kimia dari tanah merupakan faktor penting yang perlu dipertimbangkan ketika menggunakannya untuk membersihkan lahan yang terkontaminasi. Ciri-ciri tumbuhan yang dapat menyerap logam berat dari lingkungan antara lain adalah hiper toleransi yang memungkinkan tumbuhan mengakumulasi logam berat, kemampuannya menyerap logam berat dalam konsentrasi tinggi, dan kemampuannya memindahkan logam berat dari akar ke bagian tumbuhan lain. Akar tanaman yang tingginya mencapai beberapa meter

ke dalam tanah dapat dimanfaatkan untuk membersihkan dan mensterilkan tanah yang tercemar. Mereka juga akan mendorong aktivitas bakteri di dalam tanah, memungkinkan kapasitas metabolisme bakteri yang lebih besar serta perbaikan kimia dan fisik tanah (Soumik & Sabyasachi, 2019).

Tanaman yang berbeda-beda yang dapat memperbaiki kondisi tanah memiliki kapasitas yang berbeda-beda dalam menyerap dan menyimpan logam berat. Tindakan perbaikan diperlukan karena konsentrasi senyawa logam berat yang besar di dalam tanah akan menghambat proses dekomposisi tanah. tanaman di dalam tanah yang dapat menahan unsur hara yang dibutuhkan untuk kelangsungan hidup. Penyerapan ini tentunya sesuai dengan jenis tanamannya, dan proses fitoremediasi yang terbaik akan dihasilkan jika komposisinya seimbang (Khan *et al.*, 2022).

2.6 Tanaman *Cyperus rotundus*

Terdapat beberapa tanaman yang dapat digunakan untuk fitoremediasi seperti tanaman *Cyperus rotundus*, tanaman paku (*Pteris vittata*), bunga matahari (*Helianthus annuus*) dan lain sebagainya. Namun mempertimbangkan kemampuan hiperakumulasi, penyebaran akar yang kuat, stabilitas tanaman, kemampuan meregenerasi tanah, dan kecocokannya untuk digunakan dalam skala besar, tanaman *Cyperus rotundus* dipilih sebagai metode remediasi yang efektif untuk mengurangi tingkat pencemaran tanah.



Gambar 3. Tanaman *Cyperus rotundus*

Taksonomi tumbuhan rumput teki (Moenandir, 1993), yaitu;

Kingdom : Plantae (Tumbuhan)

Subkingdom : Tracheobionta (Tumbuhan berpembuluh)

Super Divisi : Spermatophyta (Menghasilkan biji)

<i>Divisi</i>	: <i>Magnoliophyta (Tumbuhan berbunga)</i>
<i>Kelas</i>	: <i>Liliopsida (Berkeping satu/monokotil)</i>
<i>Sub Kelas</i>	: <i>Commelinidae</i>
<i>Ordo</i>	: <i>Cyperales</i>
<i>Famili</i>	: <i>Cyperaceae</i>
<i>Genus</i>	: <i>Cyperus</i>
<i>Spesies</i>	: <i>Cyperus rotundus L.</i>

2.6.1 Ciri-Ciri Tanaman *Cyperus rotundus*

Tanaman *Cyperus rotundus* mempunyai ciri morfologi (Purnamasari *et al.*, 2014) sebagai berikut:

- Akar serabut yang tumbuh menyamping dengan membentuk umbi yang banyak, tiap umbi mempunyai mata tunas, umbi tidak tahan kering selama 14 hari dibawah sinar matahari maka daya tumbuhnya akan hilang
- Batang tumbuh tegak, berbentuk tumpul atau segitiga
- Daun berbentuk garis, mengelompok dekat pangkal batang, terdiri dari 4-10 helai, pelepah daun tertutup tanah, helai daun berwarna hijau mengkilat
- Tinggi dapat mencapai 50 cm.
- Perbungaan berupa bunga majemuk payung yang bertingkat atau berbentuk bongkol, terletak diujung batang.
- Bunga berukuran kecil, berwarna coklat kemerahan atau keunguan, berkelamin dua (hermafrodit).
- Habitat umumnya tumbuh di tempat-tempat yang lembab atau basah, seperti sawah, perkebunan, tepi jalan, dan lahan-lahan terlantar.

2.6.2 Keunggulan Tanaman *Cyperus rotundus*

Berikut adalah keunggulan tanaman *Cyperus rotundus* untuk fitoremediasi menurut (Ssenku *et al.*, 2023):

- Sistem akar serabut yang ekstensif meningkatkan luas permukaan untuk penyerapan unsur hara dan kontaminan logam berat dari tanah
- Sebagai gulma, *Cyperus rotundus* memiliki kemampuan tinggi dalam menyerap unsur hara dari tanah, yang juga berpotensi berkorelasi dengan penyerapan logam berat
- Adaptasi *Cyperus rotundus* yang tinggi memungkinkannya tumbuh diberbagai jenis tanah dan kondisi lingkungan, termasuk lahan tercemar
- Sebagai gulma yang *invasive*, *Cyperus rotundus* umumnya tidak memerlukan perawatan yang intensif untuk tumbuh dan berkembang

- e) Ketahanan *Cyperus rotundus* terhadap berbagai tekanan lingkungan, seperti kekeringan atau kondisi tanah yang buruk, meningkatkan keandalannya dalam proses fitoremediasi di berbagai Lokasi
- f) Siklus hidup yang pendek memungkinkan akumulasi biomassa yang cepat, yang penting untuk penyerapan dan pemindahan kontaminan dalam waktu yang relatif singkat.

2.7 Destruksi Basah

Destruksi adalah suatu perlakuan pemecahan senyawa menjadi unsur-unsur yang dapat dianalisis. Destruksi sering disebut dengan perombakan suatu senyawa dari bentuk organik menjadi logam anorganik. Destruksi basah merupakan teknik penguraian menggunakan pereaksi asam untuk memecahkan sampel, dimana prosesnya dapat mengubah bahan organik, khususnya logam, menjadi logam anorganik. Destruksi basah ini memiliki dua variasi metode yaitu destruksi basah (oksida basa) dan destruksi kering (oksida kering). Karena lebih sedikit bahan yang hilang selama proses pengabuan akibat suhu tinggi dalam destruksi basah, destruksi basah lebih banyak digunakan daripada destruksi kering. Selain itu, waktu yang dibutuhkan lebih sedikit dibandingkan dengan destruksi kering (Asmorowati *et al.*, 2020).

Destruksi basah merupakan suatu metode persiapan sampel yang melibatkan penggunaan asam kuat atau campuran asam untuk mengoksidasi bahan organik dalam sampel menjadi bentuk anorganik yang dapat dianalisis. Metode ini umumnya digunakan dalam analisis unsur jejak dalam berbagai jenis sampel, seperti tanah, tanaman, dan jaringan hewan. Keunggulan destruksi basah adalah efisiensi dalam mengoksidasi bahan organik yang kompleks, reproduktibilitas yang baik, dan kemampuan untuk menganalisis berbagai jenis sampel. Namun, metode ini juga memiliki beberapa kelemahan, seperti penggunaan asam kuat yang bersifat korosif dan berpotensi berbahaya, serta risiko kontaminasi sampel selama proses destruksi. Oleh karena itu, perlu dilakukan prosedur kerja yang hati-hati dan penggunaan peralatan yang sesuai untuk meminimalkan risiko tersebut (Kristianingrum, 2012).

Teknik destruksi basah ini prosesnya menggunakan pelarut pengoksidasi untuk memfasilitasi oksidasi, sampel asam kuat dicampur secara tunggal atau dalam campuran. Asam nitrat digunakan dalam produksi basah untuk memecah bahan organik pada suhu rendah. Hidrat peroksida atau asam perklorat dipengaruhi oleh proses pencernaan ini., ada tiga macam. Menurut (Farmasi & Bonjol, 2023) cara destruksi basah, yaitu:

1. Destruksi basah digunakan untuk HClO_4 serta HNO_3
2. Destruksi basah digunakan untuk H_2SO_4 , HClO_4 , serta HNO_3

3. Destruksi basah digunakan untuk H_2SO_4 , HNO_3

2.7.1 Prinsip Dasar Destruksi Basah

Destruksi basah merupakan bagian dari proses persiapan sampel, komponen organik kompleks dipecah menjadi bentuk anorganik yang lebih sederhana yang berpengaruh pada suhu tinggi, asam kuat mengoksidasi molekul organik. Tujuan dari prinsip dasar destruksi basah ini adalah untuk melarutkan komponen-komponen yang perlu diperiksa untuk mengukurnya. Memilih asam yang tepat sangat penting karena berdampak pada efektivitas pencernaan dan jenis zat yang dapat diperiksa. Karena asam nitrat (HNO_3) dapat mengoksidasi sebagian besar molekul organik, asam nitrat sering digunakan sebagai oksidan utama. Sebagai dehidrator, asam sulfat (H_2SO_4) mengekstrak molekul air dari sampel dan menaikkan suhu reaksi. Sementara itu, asam perklorat (HClO_4) merupakan oksidator yang sangat kuat namun penggunaannya harus sangat hati-hati karena sifatnya yang eksplosif (Alim & Sativa, 2024).

2.7.2 Mekanisme Destruksi Basah

Ada beberapa fase reaksi kimia yang rumit dalam proses pencernaan basah. Bahan organik sampel terlebih dahulu akan melalui proses yang disebut hidrolisis, yaitu upaya molekul air untuk memutuskan ikatan kimia dengan bahan organik akibat reaksi asam-air. Selanjutnya asam nitrat akan mengoksidasi atom karbon pada zat organik sehingga menghasilkan karbon dioksida (CO_2). Dengan menghilangkan molekul air dari sampel dan menaikkan suhu reaksi, asam sulfat berfungsi sebagai dehidrator. Pada akhirnya, larutan asam akan melarutkan ion anorganik yang dihasilkan oleh proses oksidasi dan hidrolisis. Efisiensi pencernaan basah dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti jenis sampel, suhu, konsentrasi asam, durasi pencernaan, dan rasio sampel terhadap volume asam. Untuk memastikan tidak ada unsur yang hilang selama proses pencernaan dan semua komponen yang akan diperiksa telah dicerna sepenuhnya, kondisi pencernaan harus dioptimalkan (Amalia *et al.*, 2020).

2.8 Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy

(ICP-OES)

Inductively Coupled Plasma (ICP) adalah teknik spektroskopi atom yang sangat sensitif dan akurat untuk analisis unsur dalam berbagai sampel, termasuk sampel lingkungan. Dalam fitoremediasi, ICP mengukur konsentrasi logam berat pada tanaman yang digunakan pada tanah atau air yang tercemar. ICP terbagi menjadi dua jenis, yaitu ICP-OES (*Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*) dan ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*). ICP-OES dapat menganalisis cahaya yang dipancarkan oleh atom-atom yang tereksitasi dengan mengukur intensitas cahaya pada Panjang

gelombang karakteristik yang dipancarkan oleh setiap unsur yang tereksitasi dalam plasma argon bersuhu tinggi, memberikan informasi kuantitatif mengenai konsentrasi masing-masing logam. Sedangkan ICP-MS menawarkan sensitivitas yang bahkan lebih tinggi dengan cara memisahkan dan mengukur ion-ion berdasarkan rasio massa ke muatan setelah diionisasi dalam plasma. Kemampuan ICP-MS untuk mendeteksi konsentrasi logam berat pada tingkat *parts per billion* (ppb) atau bahkan *parts per trillion* (ppt) menjadikannya alat yang sangat berharga untuk memantau penyerapan dan akumulasi kontaminan dalam jaringan tanaman, terutama pada penelitian dengan tingkat pencemaran yang rendah atau untuk mendeteksi jejak kontaminan (Kristianingrum, 2012).

Masing-masing kombinasi ICP dengan instrumen lain mempunyai manfaat, keunggulan, dan keterbatasannya sendiri. Perbedaan utama dari penggabungan ICP dengan OES, AES, maupun MS terletak pada cara pembacaan hasil analisis, yang menghasilkan satuan ukuran yang berbeda.



Gambar 4. *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy*

Gambar 4 merupakan alat ICP-OES, dimana alat tersebut adalah suatu teknik analisis instrumen yang digunakan untuk menentukan komposisi unsur suatu sampel. Prinsip dasar dari ICP-OES adalah memanfaatkan plasma argon yang sangat panas untuk mengeksitasi atom-atom sampel. Ketika atom-atom yang tereksitasi ini kembali ke tingkat yang lebih rendah, mereka memancarkan cahaya pada panjang gelombang karakteristik untuk setiap elemen. Cahaya yang dipancarkan ini kemudian diukur intensitasnya pada panjang gelombang spesifik menggunakan spektrometer optik. Intensitas cahaya yang terukur berbanding lurus dengan konsentrasi elemen dalam sampel, memungkinkan analisis kuantitatif yang akurat. ICP-OES dikenal karena kemampuannya untuk menganalisis berbagai macam elemen secara simultan dengan batas deteksi yang rendah dan rentang konsentrasi yang lebar, menjadikannya alat yang sangat berguna dalam berbagai bidang seperti analisis lingkungan, geokimia, ilmu material, dan kontrol kualitas industri (Hagen & Sneddon, 2020).

2.8.1 Prinsip Kerja ICP-OES

Menurut penelitian (Hardiantika *et al.*, 2023), Adapun prinsip kerja dari ICP-OES adalah sebagai berikut:

- a) Larutan sampel dialirkan melalui kapiler menuju nebulizer, yang mengubahnya menjadi aerosol (kabut halus)
- b) Aerosol sampel diinjeksikan ke dalam ICP-OES *torch*, yang menghasilkan plasma bersuhu tinggi
- c) Di dalam plasma, sampel teratomisasi (dipecah menjadi atom-atom individual) dan tereksitasi (elektron-elektronnya bergerak ke tingkat energi yang lebih tinggi)
- d) Ketika elektron-elektron yang tereksitasi kembali ke tingkat energi dasar (*ground state*), mereka memancarkan radiasi (cahaya) pada Panjang gelombang yang spesifik untuk setiap elemen
- e) Radiasi yang dipancarkan melewati sistem transfer optik dan dideteksi oleh detektor. Intensitas cahaya pada Panjang gelombang tertentu diubah menjadi sinyal Listrik
- f) Intensitas sinyal listrik berbanding lurus dengan konsentrasi elemen dalam sampel. Sistem pengolahan data kemudian menganalisis sinyal ini untuk menentukan konsentrasi elemen-elemen yang ada.

2.8.2 Keunggulan ICP-OES

Berikut adalah keunggulan ICP-OES menurut (Subianto, 2020):

- a) Mampu mengidentifikasi dan mengukur berbagai elemen dalam satu waktu
- b) Cocok untuk menentukan konsentrasi elemen dari tingkat *ultratrace* hingga komponen utama
- c) Umumnya memiliki deteksi yang sangat rendah, berkisar antara 1 hingga 100 µg/L untuk banyak elemen
- d) Proses pengukuran dapat diselesaikan dalam waktu singkat, sekitar 30 detik
- e) Hanya memerlukan volume sampel yang relatif kecil, berkisar ±5 ml
- f) Secara teoritis dapat menganalisis hampir semua unsur kecuali argon.

2.9 Pola Tanam

Lahan bekas tambang batubara merupakan salah satu bentuk kerusakan lingkungan yang paling parah akibat aktivitas eksploitasi sumber daya alam. Proses penambangan terbuka menghilangkan lapisan topsoil, merusak struktur tanah, mengurangi kandungan bahan organik, serta meninggalkan tanah dengan pH ekstrem dan kandungan logam berat tinggi. Kondisi ini menjadikan lahan

tidak subur dan berbahaya bagi kehidupan biotik di sekitarnya. Oleh karena itu, proses rehabilitasi lahan menjadi suatu keniscayaan dalam rangka restorasi ekosistem dan pemulihan fungsi tanah. Salah satu pendekatan ekologis yang banyak dikembangkan dalam dekade terakhir adalah fitoremediasi, yaitu teknik menggunakan tanaman untuk menyerap, menstabilkan, atau mendekomposisi kontaminan dari tanah dan air.

Salah satu spesies tanaman yang telah terbukti memiliki potensi besar untuk fitoremediasi adalah *Cyperus rotundus*, atau dikenal juga sebagai rumput teki. Tanaman ini tergolong gulma, tetapi memiliki toleransi tinggi terhadap kondisi lingkungan yang buruk. *Cyperus rotundus* mampu tumbuh di tanah yang miskin hara, bersifat asam, bahkan yang terkontaminasi logam berat seperti merkuri. Penelitian dari (Njonge, 2023) menunjukkan bahwa *Cyperus rotundus* mampu menyerap dan mengakumulasi logam berat dalam jaringannya, terutama di bagian akar dan rimpang, tanpa mengalami penurunan pertumbuhan yang signifikan. Selain itu, akar dan rimpangnya juga berperan dalam memperbaiki porositas tanah dan menurunkan potensi erosi, dua masalah utama di lahan bekas tambang.

Untuk mendukung keberhasilan fitoremediasi menggunakan *Cyperus rotundus*, pemilihan pola tanam menjadi faktor penting. Di lahan bekas tambang, pola tanam yang direkomendasikan adalah sistem grid atau persegi panjang dengan luas lahan sekitar 2 x 1 meter dan jarak antar tanaman yaitu 50cm. Pola ini memungkinkan sistem akar tanaman untuk menjangkau area yang luas dan mengoptimalkan penyerapan logam berat dari tanah. Pada lahan dengan kemiringan tertentu, pola tanam kontur atau zig-zag lebih sesuai karena membantu mengurangi aliran permukaan dan memperkuat struktur tanah. Menurut, penerapan pola tanam kontur mampu menurunkan laju erosi hingga 45% dibandingkan pola tanam barisan biasa.

Selanjutnya, strategi *intercropping* (tanam campuran) juga menjadi pilihan yang baik untuk meningkatkan efektivitas pemulihan lahan. *Cyperus rotundus* dapat ditanam bersama tanaman lain seperti *Vetiveria zizanioides* atau legum penutup tanah seperti *Centrosema pubescens* yang mampu menambah nitrogen ke dalam tanah. Interaksi antar tanaman ini tidak hanya meningkatkan tutupan lahan, tetapi juga memperbaiki kesuburan tanah secara alami dan mempercepat proses suksesi vegetasi (Diop *et al.*, 2022). Sistem ini dikenal sebagai strategi revegetasi multi-strata yang meniru pola vegetasi alami.

Aspek biologis lain yang penting adalah peran mikroorganisme tanah, terutama bakteri pemacu pertumbuhan tanaman (PGPR - *Plant Growth Promoting Rhizobacteria*). Bakteri ini terbukti dapat meningkatkan ketersediaan unsur hara

seperti fosfat dan nitrogen, serta membantu akar tanaman beradaptasi terhadap stres lingkungan, termasuk kontaminasi logam berat. (Gupta *et al.*, 2024) melaporkan bahwa inokulasi PGPR pada tanaman *Cyperus rotundus* meningkatkan tinggi tanaman, berat kering, dan akumulasi logam berat secara signifikan. Hal ini mempertegas pentingnya pendekatan integratif antara tanaman dan mikroorganisme dalam fitoremediasi.

Tidak kalah penting, monitoring dan evaluasi berkala perlu dilakukan untuk menilai efektivitas pola tanam dan keberhasilan revegetasi. Indikator yang dapat digunakan antara lain adalah tingkat tutupan lahan, kandungan logam berat pada jaringan tanaman dan tanah, indeks kehijauan (NDVI), dan parameter biologis tanah. Hasil monitoring dapat dijadikan dasar untuk menyesuaikan pola tanam, jenis tanaman, maupun teknik pengelolaan lanjutan.

Secara keseluruhan, pola tanam *Cyperus rotundus* yang tepat di lahan bekas tambang batubara mencakup aspek spasial (jarak dan formasi tanam), ekologis (interaksi dengan tanaman dan mikroba lain), dan teknis (adaptasi terhadap kontur dan iklim lokal). Strategi ini menawarkan pendekatan yang ramah lingkungan, berbasis sumber daya lokal, dan ekonomis untuk mempercepat pemulihan fungsi ekologis lahan pascatambang.

2.10 Penelitian Terdahulu

Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian mengenai fitoremediasi konsentrasi logam berat menggunakan tanaman *Cyperus rotundus* pada tanah. Di antaranya yaitu penelitian yang terdapat pada tabel dibawah ini.

Tabel 2. Penelitian Terdahulu

No.	Nama Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1.	(Titahena <i>et al.</i> , 2023)	Studi Remediasi Tanah Tercemar Merkuri (Hg) Menggunakan Tumbuhan Teki <i>Cyperus Rotundus</i>)	Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi merkuri (Hg) yang diserap oleh tumbuhan teki pada reaktor 1 (14 hari), bahwa efektivitas penyerapan logam berat yaitu sebesar 41,61%, dimana akar menyerap sebesar 0,32 ppm dan daun sebesar 0,35 ppm.

No.	Nama Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
			Sedangkan pada reaktor 2 (28 hari), efektivitas penyerapannya yaitu 56,16%, dimana pada akar sebesar 0,98 ppm dan daun sebesar 0,16 ppm. Dengan kurun waktu yang digunakan tersebut dapat membuktikan bahwa tumbuhan teki (<i>Cyperus rotundus</i>) dapat menyerap 1,14 ppm merkuri dari tanah yang mengandung 2,03 ppm merkuri.
2.	(Candra <i>et al.</i> , 2019)	Fitoremediasi Merkuri Dari Tanah Tercemar Limbah Bekas Tambang Emas Rakyat Dengan Rumput Teki (<i>Cyperus rotundus</i>)	Penelitian ini dilakukan dengan menanam rumput teki dalam <i>polybag</i> 5 kg dengan perbandingan 70% : 30% tanah dan tailing emas. <i>Cyperus rotundus</i> dapat menyerap merkuri sebesar 89,97 mg/kg pada kanopi dan 78 mg/kg pada akar dalam kurun waktu 2 bulan.
3.	(Sugiono, 2015)	Potensi <i>Cyperus rotundus</i> Untuk Fitoremediasi Tanah Tercemar Merkuri Limbah Tambang Emas Dengan Penambahan Ligan Amonium Thiosulfat	Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui potensi tanaman teki dalam menurunkan merkuri pada tailing amalgamasi dan sianidasi dengan penambahan ligan <i>ammonium thiosulfate</i> . Sampel yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sampel tanah yang tidak

No.	Nama Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
			terkontaminasi dicampur dengan sampel tailing dengan perbandingan 30% : 70%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa <i>Cyperus rotundus</i> dapat digunakan untuk fitoremediasi tanah tercemar merkuri limbah tambang emas rakyat karena mampu menyerap merkuri sebesar 122,53 mg/kg (tajuk) dan 77,9 mg/kg (akar) selama 2 bulan masa tanam.

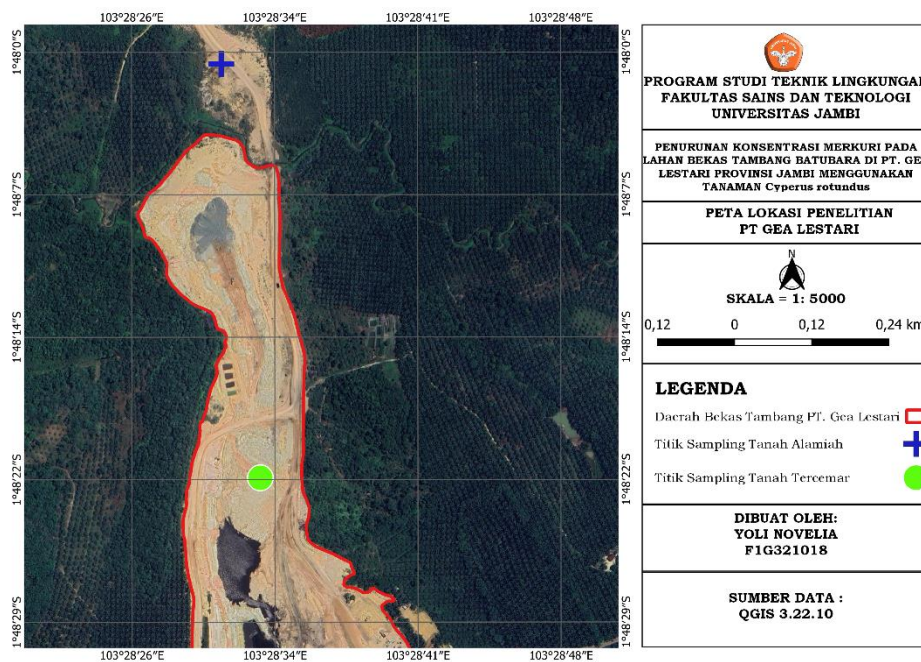
III. METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

3.1.1 Lokasi Penelitian

Adapun lokasi penelitian ini dilakukan pada area bekas lahan tambang batubara yang berada di Tanjung Pauh Km. 32, Kecamatan Mestong, Kabupaten Muaro Jambi, Jambi. Titik koordinat Lokasi penelitian berada pada garis lintang $8^{\circ} 30' 44.3''\text{LS}$ dan garis bujur $103^{\circ} 1' 56.9''\text{BT}$. Menurut penelitian (Putra *et al.*, 2024) mengatakan bahwa ada 2 titik tambang batubara aktif, 12 titik tambang Batubara non aktif, dan 15 titik potensial batubara yang tersebar di area tambang PT. Gea Lestari.

Titik *sampling* tanah tercemar diambil pada lahan bekas tambang batubara yang sudah ditutup dengan *top soil* yang terkontaminasi oleh partikel-partikel batubara, sedangkan titik *sampling* tanah kontrol diambil pada tanah yang jaraknya mencapai 432 m^2 dari pertambangan batubara. Lokasi ini dipilih karena PT. Gea Lestari merupakan pertambangan yang menerapkan metode pertambangan terbuka (*open pit*). Area pertambangan ini, mempunyai luas mencapai 1000 Ha, dengan produksi batubara sekitar 500 ton per hari yang di angkut menggunakan 5 truk besar dan 2 truk gandeng berdasarkan hasil wawancara yang dilakukan bersama Kepala Teknik Tambang (KTT), Yogi (2024). Peta Lokasi dapat dilihat pada **Gambar 5** sebagai berikut:



Gambar 5. Peta Lokasi Penelitian

Adapun pertimbangan dalam memilih tempat untuk melakukan penelitian ini yaitu:

1. Tempat penelitian ini adalah tempat yang digunakan untuk proses penambangan batubara yang memiliki potensi tingkat pencemaran logam berat yang tinggi dikarenakan proses penambangannya yang kurang ramah lingkungan
2. Tempat penelitian ini belum adanya penelitian mengenai logam berat di pertambangan batubara tepatnya pada tanah
3. Titik *sampling* khususnya pada tanah yang mengandung konsentrasi sebaran logam berat yang terlalu banyak harus ditangani dengan solusi yang efektif dan praktis
4. Adanya dukungan atau izin dari pihak pertambangan untuk melakukan penelitian di lokasi tersebut.



Gambar 6. Lokasi Sekitar Titik Pengambilan Sampel

3.1.2 Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan pada bulan Agustus 2024 - selesai dan pengambilan data selama 28 hari penelitian dimulai dengan 7 hari masa aklimatisasi tanaman fitoremediasi dalam waktu 14 hari dan 28 hari masa fitoremediasi. Pengujian logam berat merkuri dilakukan di laboratorium Lingkungan Universitas Andalas.

3.2 Alat dan Bahan

1. Alat

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu berupa:

- a. Cangkul
- b. Karung
- c. Timbangan Analitik
- d. *Hand Auger* (Alat bor manual)
- e. Polibag
- f. Oven
- g. Erlenmeyer
- h. *Beaker glass*
- i. Labu ukur
- j. *Hot Plate*
- k. *Inductively Coupled Plasma- Optical Emission Spectroscopy* (ICP-OES)
- l. Meteran
- m. Tali
- n. *Microwave Digestion*
- o. Ember
- p. Sekop
- q. Plastik
- r. Alat tulis
- s. Kertas label
- t. Sarung tangan
- u. Kertas saring

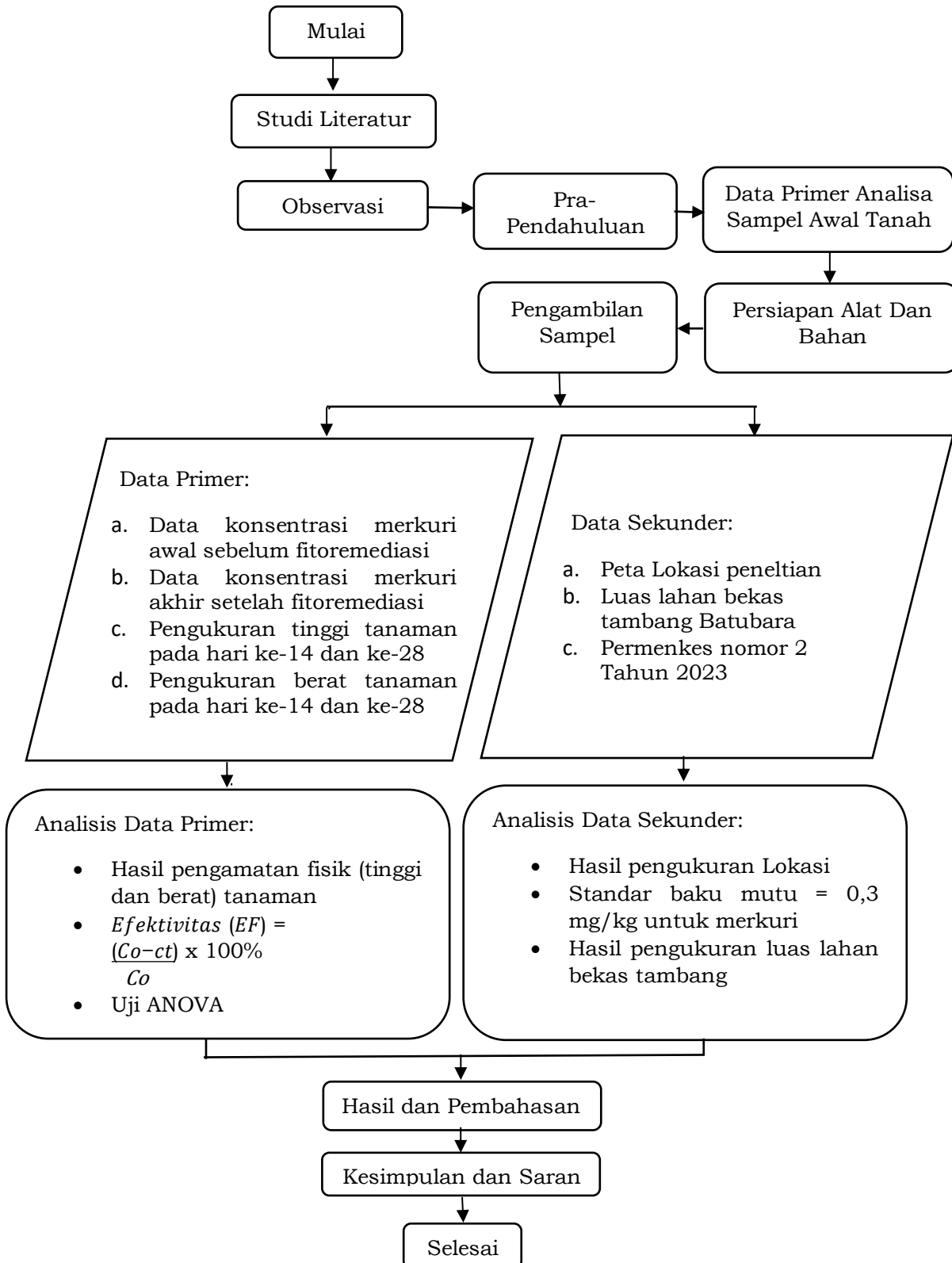
2. Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

- a. Sampel tanah tercemar
- b. Sampel tanah terkontrol
- c. Tanaman *Cyperus rotundus*
- d. Larutan Nitrat (HNO_3)
- e. Asam perklorat (HClO_4)
- f. Aquades
- g. Hidrogen peroksida (H_2O_2)

3.3 Skema Pelaksanaan Penelitian

Adapun tahapan yang dilakukan oleh peneliti dalam melaksanakan penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 7** berikut ini:



Gambar 7. Skema Pelaksanaan Penelitian

3.4 Metode Penelitian

Jenis penelitian yang dilakukan pada penelitian ini adalah penelitian yang bersifat eksperimental dengan destruksi basah dilanjutkan dengan pengujian sampel di laboratorium menggunakan alat *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy* (ICP-OES) dan percobaan disusun dalam RAL (Rancangan Acak Lengkap) yaitu rancangan dengan 2 perlakuan dan 3 kali pengulangan dengan variasi waktu 14 hari dan 28 hari. Tanaman remediator yang digunakan adalah jenis tanaman yang memiliki potensi untuk menurunkan merkuri yaitu tanaman *Cyperus rotundus*. Sebelum ditanam, tanaman dibersihkan dari tanah dan kotoran, lalu diaklimatisasi selama 7 hari. Pengambilan sampel tanah tercemar di area pertambangan batubara PT. Gea Lestari Provinsi Jambi diambil sekitaran tanah yang sudah ditutup *top soil* yang terkontaminasi oleh partikel-partikel batubara. Pengambilan sampel tanah diambil dengan kedalaman 0-20 cm pada 5 titik yang berbeda di lokasi bekas tambang dengan jarak 50 meter setiap titiknya, kemudian digunakan untuk penanaman *ex-situ*. Pada setiap titik diambil sampel tanah sebesar 4000 gram. Sampel tanah kemudian dihomogenkan dan dianalisis di laboratorium untuk mengetahui konsentrasi merkuri dan sebagian dari tanah tersebut dijadikan sebagai media percobaan menggunakan *polybag* ukuran 15 x 15 cm.



Gambar 8. Sampel Tanah dan Tanaman Sebelum Aklimatisasi

Pada gambar diatas menunjukkan bahwa gambar tersebut adalah sampel tanah dan tanaman sebelum aklimatisasi atau sampel awal yang akan dianalisis untuk mengetahui konsentrasi merkuri yang terkandung didalamnya. Hasil analisis ini digunakan sebagai acuan dasar untuk menentukan bahwa kandungan merkuri dalam tanah maupun tanaman dapat memenuhi kriteria untuk penelitian remediasi. Selanjutnya sebelum memasuki tahap penelitian, proses aklimatisasi dilakukan terlebih dahulu selama 7 hari. Setelah itu perlakuan dilakukan dengan variasi waktu 14 hari dan 28 hari dengan tiga kali

pengulangan. Selama percobaan, tinggi dan berat tanaman juga diukur pada setiap variasi waktu dengan tujuan memberikan informasi mengenai pertumbuhan serta perkembangan tanaman pada tanah tercemar. Setelah perlakuan, sampel tanah diambil sebanyak 10 gram dan sampel tanaman dipotong kecil-kecil untuk dianalisis di Laboratorium Lingkungan Universitas Andalas.

Parameter tanah yang diukur menurut standar baku mutu Permenkes Nomor 2 Tahun 2023 bisa dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Parameter Logam Berat Tanah

No	Parameter	Satuan	Baku Mutu
1	Merkuri (Hg)	Mg/L	0,3

Sumber: Permenkes Nomor 2 Tahun 2023

3.5 Tahapan Penelitian

3.5.1 Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini pengumpulan data menggunakan data primer dan data sekunder. Adapun data primer dan data sekunder yaitu sebagai berikut:

1. Data Primer

Pengumpulan data primer dilakukan dengan menganalisis hasil konsentrasi merkuri awal sebelum fitoremediasi dan akhir setelah fitoremediasi, pengukuran tinggi dan berat tanaman pada hari ke-14 dan ke-28.

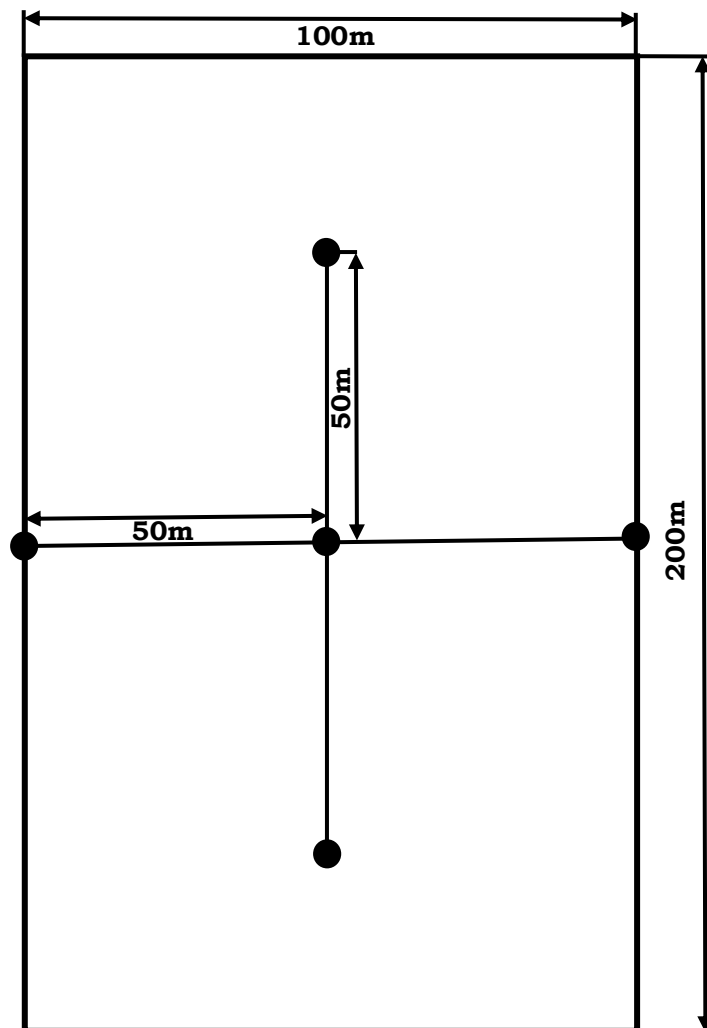
2. Data Sekunder

Pengumpulan data sekunder didasarkan pada observasi lapangan, literatur-literatur penelitian terdahulu, jurnal dan buku. Dalam hal ini data yang diperlukan adalah luas lahan bekas tambang dan peta lokasi penelitian yang didapat ditambang batubara PT. Gea Lestari Provinsi Jambi.

3.5.2 Teknik Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel tanah pada penelitian ini dilakukan pada lahan bekas tambang batubara PT. Gea Lestari Provinsi Jambi, seluas 200 x 100 m. Pengambilan sampel dilakukan menggunakan alat manual yaitu *hand auger* digunakan untuk mengebor tanah hingga kedalaman yang relevan untuk analisis kontaminasi akibat aktivitas pertambangan. Sekop berfungsi untuk membersihkan material organik permukaan sebelum pengambilan sampel, menghindari kontaminasi yang tidak diinginkan. Tali dan meteran digunakan untuk memastikan akurasi dalam penentuan jarak antar titik sampel sesuai dengan rencana *sampling*. Ember digunakan sebagai wadah penampung sementara selama proses pengambilan sampel di lapangan. Sampel tanah diambil

pada 5 titik dengan jarak antar titik yaitu 50 meter, dan setiap titik menghasilkan tanah seberat 4000 gram, dapat dilihat pada **Gambar 9**.



Keterangan:

- : Titik Sampel

Berikut cara pengambilan sampel tanah menggunakan alat *hand auger* berdasarkan SNI 4148.1:2000 tentang standar pengambilan sampel tanah berbutir halus dengan tabung berdinding tipis untuk keperluan geoteknik sebagai berikut:

1. Sebelum pengambilan sampel tanah, batasi area dengan *sampling frame* 15 x 15 cm dengan tali terlebih dahulu, agar dapat menentukan batasan area yang akan dianalisis. lalu ambil tanah bagian permukaan dapat dilihat pada **Gambar 10**.



(a)



(b)

Gambar 10. (a) Pemasangan Ring Sampler dan (b) Mengambil Tanah Bagian Permukaan

2. Proses pengeboran tanah dengan meletakkan mata bor pada permukaan tanah, kemudian putar pegangan bor secara perlahan searah jarum jam sambil memberikan tekanan hingga seluruh bagian kepala bor tenggelam ke dalam tanah dengan kedalaman 0-20 cm di 5 titik. Menurut LIPTAN BPTP Yogyakarta (2021) Pengambilan sampel tanah dilakukan secara diagonal, dengan tahapan sebagai berikut:
 - a. Ditetapkan satu titik pusat di tengah area yang akan diambil untuk contoh tanahnya.
 - b. Ditentukan 4 buah titik di sekeliling titik pusat dengan jarak antar titik yaitu 50 meter.



(a)



(b)

Gambar 11. (a) Pengeboran Sampel Tanah dan (b) Pengukuran Jarak Antar Titik

3. Sampel tanah yang diambil sebanyak 200 gram pada setiap titik, selanjutnya akan dikumpulkan dan dicampur secara merata di dalam ember.



Gambar 12. Tanah Komposit

Kemudian sampel 10 gram tanah akan diambil dan dimasukkan ke dalam plastik dengan sekop, lalu diberi label. Sebelum dianalisis di laboratorium, menggunakan alat ICP-OES, sampel tanah akan didestruksi basah terlebih dahulu.

3.5.3 Destruksi Basah

Sebelum analisis menggunakan ICP-OES dilakukan, sampel tanah memerlukan preparasi yang dikenal sebagai destruksi basah. Proses ini melibatkan pemecahan matriks sampel menggunakan campuran asam kuat, diikuti dengan oksidasi. Tujuan utama dari destruksi basah adalah untuk melarutkan logam-logam berat yang terikat dalam berbagai fase padat tanah ke dalam larutan asam. Selain itu, proses ini juga bertujuan untuk menghilangkan atau memisahkan kandungan ion-ion lain yang mungkin terdapat dalam sampel dan berpotensi mengganggu atau menyebabkan kesalahan selama analisis menggunakan ICP-OES. Dengan menghilangkan interferensi matriks dan ion-ion pengganggu, hasil analisis ICP-OES diharapkan menjadi lebih akurat dan spesifik dalam mengukur konsentrasi logam berat yang ditargetkan. Proses destruksi basah ini memastikan bahwa logam-logam berat dalam sampel berada dalam bentuk larutan yang sesuai untuk diinjeksikan ke dalam instrument ICP-OES.

Adapun Langkah-langkah dalam destruksi basah pada sampel tanah menurut Balai Penelitian Tanah Bogor yang dipakai mengikuti ketentuan analisis kimia, tanah, tanaman, air dan pupuk yaitu sebagai berikut:

1. Sampel tanah yang telah dihaluskan ditimbang sebesar 0,5 gram menggunakan timbangan analitik, kemudian masukkan kedalam *digestion*

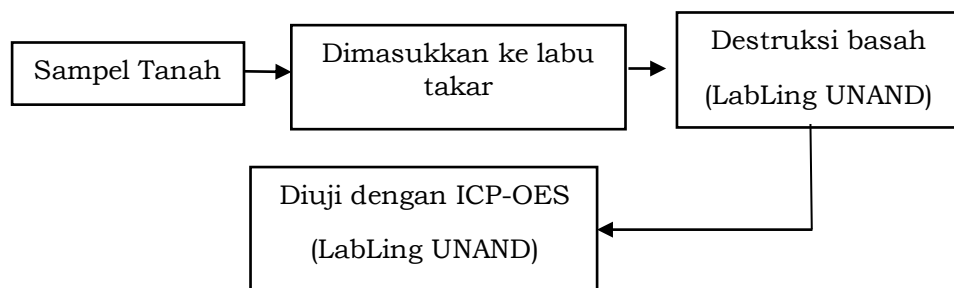
vessel, tambahkan 5 ml HNO_3 p.a *predegister power* berdasarkan *vessel* yang digunakan.

2. Selanjutnya naikan suhu ke 200°C dalam waktu 15 menit.
3. Kemudian panaskan *microwave digester* pada suhu 200°C selama 30-60 menit.
4. Dinginkan *vessel*, pindahkan ekstrak ke labu 25 ml, encerkan dengan H_2N dan volume ditempatkan hingga tanda tera, kocok hingga homogen. Saring menggunakan kertas saring untuk mendapatkan ekstrak jernih.

3.5.4 Pengujian Sampel

Setelah melalui proses destruksi basah, sampel tanah yang telah dipreparasi akan dianalisis menggunakan ICP-OES menurut prosedur ICPE-9000 Shimadzu mengenai cara uji konsentrasi logam dalam contoh uji limbah padat, sedimen dan tanah dengan metode destruksi asam. Dalam penelitian ini, ICP-OES akan difokuskan pada penentuan kandungan merkuri yang terdapat dalam sampel tanah tercemar. ICP-OES akan mengukur intensitas emisi cahaya pada panjang gelombang karakteristik merkuri setelah sampel yang telah terdestruksi ke dalam plasma argon bersuhu tinggi. Penggunaan prosedur ICPE-9000 Shimadzu memastikan bahwa pengujian dilakukan dengan metode yang terstandarisasi dan valid untuk mendapatkan hasil yang akurat dan dapat digunakan dalam mengidentifikasi dan mengukur konsentrasi merkuri dalam sampel tanah tercemar.

Adapun alur pengujian sampel tanah dapat dilihat pada **Gambar 13** berikut ini:



Gambar 13. Alur Pengujian Sampel Tanah

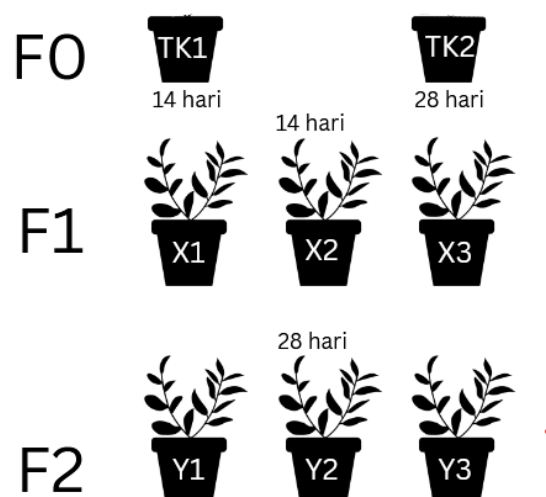
3.5.5 Tahapan Pelaksanaan Eksperimen

Adapun Langkah-langkah dalam penelitian ini yaitu:

1. Persiapan bahan yaitu 10 *polybag* (1 tanah alamiah, 1 untuk aklimatisasi, 2 tanah kontrol, 6 tanah tercemar dengan tanaman) yang berukuran 15 x 15 cm dengan kapasitas 2500 gram tanah. Kemudian menyiapkan 6 tanaman *Cyperus rotundus* dengan tinggi 22 cm dan berat basah sekitar 19 gram.

2. Mengetahui konsentrasi awal logam berat yang terkandung pada sampel tanah tercemar, tanaman, dan tanah alamiah sebelum dilakukannya proses aklimatisasi.
3. Sebelum proses fitoremediasi, sampel tanah dan tanaman harus melewati proses aklimatisasi terlebih dahulu selama 7 hari, kemudian sampel tanah dan tanaman di analisis di laboratorium lingkungan Universitas Andalas.
4. Setelah diaklimatisasi, lanjut dengan proses fitoremediasi dimana sampel tanah kontrol dibuat dalam 2 variasi waktu tanpa pengulangan F0 (TK1 dan TK2) dan tanah tercemar dengan tanaman dibuat kedalam 2 variasi waktu dan 3 kali pengulangan untuk X1, X2, dan X3 selama 14 hari (F1) sedangkan Y1, Y2, dan Y3 selama 28 hari (F2).
5. Selama proses percobaan untuk sampel F1 dan F2 tanah tercemar terdapat 6 *polybag* (masing-masing 3 *polybag*), tiap *polybag* berukuran 15 x 15 cm dengan tiap *polybag* berisi 2500 gram tanah yang akan ditanam tanaman teki.
6. Mengukur bobot tanaman teki secara fisik dengan mendokumentasikan tanaman dan mengukur berat tanaman dan tinggi tanaman selama percobaan.
7. Mengukur sampel tanah F1 yang telah ditanam tanaman teki dan mengukur sampel tanah F0 yang tidak ditanam tanaman teki
8. Kemudian dilanjutkan dengan uji akhir sampel di laboratorium untuk mengetahui penurunan konsentrasi merkuri yang terkandung pada tanah berdasarkan variasi waktu tanam.

Berikut sketsa penanaman tanaman *Cyperus rotundus* dapat dilihat pada **Gambar 13** dibawah ini:



Gambar 14. Sketsa Penanaman Tanaman *Cyperus rotundus*

Keterangan:

- F0 (TK1 dan TK2) : Tanah kontrol tanpa tanaman (14 hari dan 28 hari)
- F1, F2 : Variasi waktu tanah tercemar (14 hari dan 28 hari)
- X1, X2, X3 : Tanaman *Cyperus rotundus* pada tanah lahan bekas bekas tambang batubara selama 14 hari
- Y1, Y2, Y3 : Tanaman *Cyperus rotundus* pada tanah lahan bekas bekas tambang batubara selama 28 hari.

Adapun tahap penelitian yang menggunakan 2 variasi waktu dan 3 kali pengulangan dengan mengamati dan menganalisa sampel, yaitu sebagai berikut:

Tabel 4. Tahapan Perlakuan

No	Nama Sampel	Konsentrasi		
		Pengulangan Ke-1	Pengulangan Ke-2	Pengulangan Ke-3
1	X1	✓	✓	✓
2	X2			
3	X3			
4	TK1	✓	-	-
5	Y1	✓	✓	✓
6	Y2			
7	Y3			
8	TK2	✓	-	-

Dari tabel diatas dijelaskan bahwa sampel tanah kontrol F0 (TK1 dan TK2), variasi waktu 14 hari (X1, X2, X3) dan 28 hari (Y1, Y2, Y3) akan dilakukan pengamatan dan menganalisa tanaman teki pada media tanah bekas tambang batubara dengan ukuran *polybag* 15 x 15 cm dengan 2 perlakuan yaitu 2 variasi waktu dan 3 kali pengulangan. Rancangan penelitian ini memungkinkan peneliti untuk mengevaluasi pengaruh perbedaan waktu kontak antara tanaman teki dan tanah tercemar terhadap efektivitas fitoremediasi merkuri,

3.6 Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini yaitu data yang dikumpulkan secara langsung di lapangan kemudian dianalisis dengan:

1. Analisis data perubahan ciri fisik atau morfologi dari tanaman yang digunakan dalam fitoremediasi dengan mendokumentasikan tanaman dan mengukur berat dan tinggi tanaman selama proses fitoremediasi
2. Analisis logam berat dapat dilakukan menggunakan alat *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry* (ICP-OES)
3. Untuk efektivitas penurunan logam berat dapat menggunakan rumus:

$$\text{Efektivitas (EF)} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100\%$$

Keterangan:

Ef : Efektivitas tanaman *Cyperus rotundus*

co : Konsentrasi awal sampel

ct : Konsentrasi akhir sampel

4. Uji ANOVA dua (*Two Ways* – ANOVA) dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi waktu terhadap penurunan merkuri. Uji ini digunakan untuk menentukan apakah ada interaksi yang signifikan antara kedua faktor tersebut. Hasil hipotesis ditentukan dengan membandingkan F_{hitung} dengan F_{tabel} dengan kriteria uji sebagai berikut:

a) $F_{hitung} \geq F_{tabel} = H_0$ ditolak, H_1 diterima

b) $F_{hitung} \leq F_{tabel} = H_0$ diterima, H_1 ditolak

5. Penelitian eksperimental ini disusun berdasarkan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan 2 variasi waktu (14 hari dan 28 hari) dan 3 kali ulangan.
6. Hasil fitoremediasi terhadap merkuri dianalisa melalui grafik konsentrasi logam merkuri
7. Hasil uji merkuri setelah fitoremediasi dibandingkan dengan standar baku mutu Permenkes Nomor 2 Tahun 2023. Adapun baku mutu tanah dapat dilihat pada **Tabel 5** sebagai berikut:

Tabel 5. Baku Mutu Tanah

No	Parameter	Satuan	Baku Mutu
1	Merkuri	Mg/L	0,3

Sumber : Permenkes Nomor 2 Tahun 2023

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian yang berjudul Penurunan Konsentrasi Merkuri pada Lahan Bekas Tambang Batubara di PT. Gea Lestari Provinsi Jambi menggunakan Tanaman *Cyperus rotundus*. Pada penelitian ini, tanah dan tanaman *Cyperus rotundus* di destruksi basah dilanjutkan dengan pengujian sampel di laboratorium menggunakan ICP-OES.

4.1 Analisis Awal Kandungan Merkuri Sebelum Fitoremediasi

Sebelum melakukan penelitian, peneliti telah melakukan pra-penelitian atau aklimatisasi tanah dan tanaman terlebih dahulu sebelum melakukan fitoremediasi. Hal ini dilakukan untuk mengetahui konsentrasi merkuri pada sampel tanah tercemar dan tanaman *Cyperus rotundus* agar lebih mudah mengidentifikasi hasil penurunan di akhir penelitian dapat dilihat pada **Tabel 7**, dimana hasil pengujian awal sebelum aklimatisasi yaitu sebesar 0,631 mg/kg dan melebihi standar baku mutu tanah Permenkes No. 2 Tahun 2023, yaitu untuk merkuri sebesar 0,3 mg/kg.

Berdasarkan data tersebut dilakukan penurunan konsentrasi logam berat yaitu dengan menggunakan teknik fitoremediasi menggunakan media tanaman *Cyperus rotundus* dengan metode eksperimental dengan destruksi basah dan percobaan disusun dalam Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan 2 perlakuan dan 3 kali pengulangan dengan variasi waktu 14 hari dan 28 hari. Metode variasi waktu ini sejalan dengan penelitian (Titahena *et al.*, 2023) yang mengkaji efektivitas *Cyperus rotundus* dalam menyerap merkuri pada tanah tercemar. Penelitian ini juga sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Candra *et al.*, 2019) mengenai fitoremediasi merkuri dari tanah tercemar limbah bekas tambang emas rakyat dengan *Cyperus rotundus* serta penambahan ligan Amonium *Thiosulfat* yang sejalan dengan penelitian (Sugiono, 2015).

4.2 Perkembangan dan Pertumbuhan Selama Fitoremediasi

Perkembangan dan pertumbuhan *Cyperus rotundus* selama proses fitoremediasi diamati dengan menanam tanaman tersebut dalam *polybag* yang berukuran 15 x 15 cm yang berisi 2500 gram tanah di dalamnya.

4.2.1 Masa Aklimatisasi

Aklimatisasi adalah suatu proses dilakukannya penyesuaian peralihan tanaman dari lingkungan awal ke lingkungan yang baru. Aklimatisasi merupakan tahapan paling penting karena rentan untuk tanaman ketika dipindahkan langsung tanpa aklimatisasi akan mati. Oleh karena itu, aklimatisasi memberikan kesempatan bagi tanaman untuk menyesuaikan diri dengan karakteristik fisiokimia tanah yang baru, serta kondisi lingkungan yang baru. Kegagalan dalam proses aklimatisasi dapat mengakibatkan stres pada tanaman,

menghambat pertumbuhan, dan secara signifikan mempengaruhi kemampuan tanaman dalam melakukan fitoremediasi merkuri. Dengan demikian, alokasi waktu yang memadai untuk aklimatisasi bertujuan untuk memastikan bahwa setiap individu tanaman mencapai kondisi fisiologis yang stabil dan optimal sebelum dimulainya paparan terhadap kontaminan merkuri. Keberhasilan pada fase ini menjadi landasan penting untuk memperoleh data yang valid dan representative terkait efektivitas *Cyperus rotundus* dalam meremediasi tanah bekas tambang batubara yang tercemar merkuri (Nikmah *et al.*, 2017).

Cyperus rotundus adalah tanaman yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari perkebunan yang memiliki kondisi lingkungan yang berbeda dengan lokasi penelitian. Aklimatisasi dilakukan dengan menanam tanaman *Cyperus rotundus* ke dalam *polybag* berukuran 15 x 15 cm cm yang telah diisi dengan tanah sebagai media. Tahap aklimatisasi berlangsung selama 7 hari dengan menganalisis kandungan logam berat pada tanah dan tanaman sebelum maupun sesudah. Setelah masa aklimatisasi selama 7 hari, dilakukan pengujian konsentrasi merkuri pada tanah dan tanaman. Perbandingan kandungan logam berat sebelum dan sesudah aklimatisasi bertujuan untuk mengetahui apakah terjadi perubahan serapan atau akumulasi logam berat selama masa adaptasi tanaman pada media tanah yang baru. Hasil analisis ini akan menjadi dasar untuk memastikan kondisi awal tanaman sebelum dipindahkan ke tempat penelitian yang tercemar, dimana dapat dilihat pada **Tabel 6**.

Tabel 6. Pengujian Konsentrasi Awal Merkuri

No	Pengukuran	Hasil Pengukuran Konsentrasi Logam Merkuri (mg/kg)	Standar baku mutu ^a
1	Tanah alamiah	0,223	0,3
2	Tanah tercemar		
	a. Sebelum aklimatisasi	0,631	
	b. Sesudah aklimatisasi	0,312	
3	Tanaman <i>Cyperus rotundus</i>		
	a. Sebelum aklimatisasi	0,039	
	b. Sesudah aklimatisasi	0,121	

Keterangan: ^a: Permenkes Nomor 2 Tahun 2023

Berdasarkan data yang tersaji dalam tabel, dapat diketahui bahwa konsentrasi merkuri awal pada tanah tercemar tercatat sebesar 0,631 mg/kg, jauh melampaui standar baku mutu tanah menurut Permenkes Nomor 2 Tahun 2023 yaitu 0,3 mg/kg. Sebaliknya, konsentrasi merkuri pada tanah alamiah

masih berada dalam batas normal dengan nilai 0,223 mg/kg. Setelah proses aklimatisasi selama 7 hari, terjadi penurunan konsentrasi merkuri dalam tanah tercemar menjadi 0,312 mg/kg, mengindikasikan adanya serapan merkuri oleh tanaman *Cyperus rotundus* dan dapat diketahui pada peningkatan konsentrasi merkuri dalam biomassa tanaman *Cyperus rotundus* dari 0,039 mg/kg sebelum aklimatisasi menjadi 0,121 mg/kg sesudahnya. Hal ini menunjukkan potensi *Cyperus rotundus* dalam mengakumulasi merkuri dari tanah yang tercemar, meskipun dalam waktu aklimatisasi yang singkat belum mampu menurunkan konsentrasi merkuri tanah dibawah standar baku mutu. Oleh karena itu, perlu adanya penelitian lanjutan dengan variasi waktu fitoremediasi yang lebih panjang untuk mengevaluasi efektivitas *Cyperus rotundus* dalam remediasi tanah yang terkontaminasi merkuri.

4.2.2 Perkembangan *Cyperus rotundus* per variasi waktu

Teknik fitoremediasi pada penelitian ini dilakukan selama 28 hari terhitung setelah masa aklimatisasi dengan masa analisis setiap 14 dan 28 hari. Selama proses fitoremediasi per variasi waktu *Cyperus rotundus* dilihat perkembangan pertumbuhannya dimana diukur berat dan tinggi tanaman dimana sebelum fitoremediasi berat dan tinggi tanaman diukur dengan nilai 19 gram dan 22 cm. Sebelum dilakukan analisis pengujian konsentrasi logam berat yang mampu diserap oleh *Cyperus rotundus* dilakukan pengeringan terlebih dahulu dengan menjemur tanaman tersebut langsung dibawah sinar matahari agar tanamannya kering dan tidak busuk selama perjalanan menuju lokasi pengujian sampel, yaitu di Laboratorium Lingkungan Universitas Andalas. Adapun data perkembangan *Cyperus rotundus* selama proses fitoremediasi dapat dilihat pada **Tabel 7** dan **Tabel 8** dibawah ini:

Tabel 7.Perkembangan Berat Tanaman per variasi waktu

No	Sampel	Berat Tanaman (Gram)	Pertambahan (gram)
1	14 Hari		9
	X1	21	
	X2	22	
	X3	21	
	Rata-rata (cm)	21	
	Standar Deviasi (s)	±0,707	

No	Sampel	Berat Tanaman (Gram)	Pertambahan (gram)
2	28 Hari		
	Y1	29	
	Y2	32	
	Y3	30	
	Rata-rata (cm)		
Standar Deviasi (s)		±1,581	

Tabel 8.Perkembangan Tinggi Tanaman per variasi waktu

No	Sampel	Tinggi Tanaman (cm)	Pertambahan (cm)
1	14 Hari		4
	X1	24	
	X2	25	
	X3	24	
	Rata-rata (cm) Standar Deviasi (s)		
2	28 Hari		
	Y1	27	
	Y2	29	
	Y3	29	
	Rata-rata (cm) Standar Deviasi (s)		

Tabel tersebut menunjukkan adanya peningkatan berat tanaman dan tinggi tanaman seiring dengan bertambahnya waktu selama periode pengamatan yaitu berat tanaman sebesar 9 gram dan tinggi tanaman sebesar 4 cm. Data perkembangan *Cyperus rotundus* berupa berat dan tinggi tanaman yang diukur pada hari ke-14 dan ke-28 akan dibandingkan untuk melihat laju pertumbuhan selama periode fitoremediasi dapat dihitung dengan rumus:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

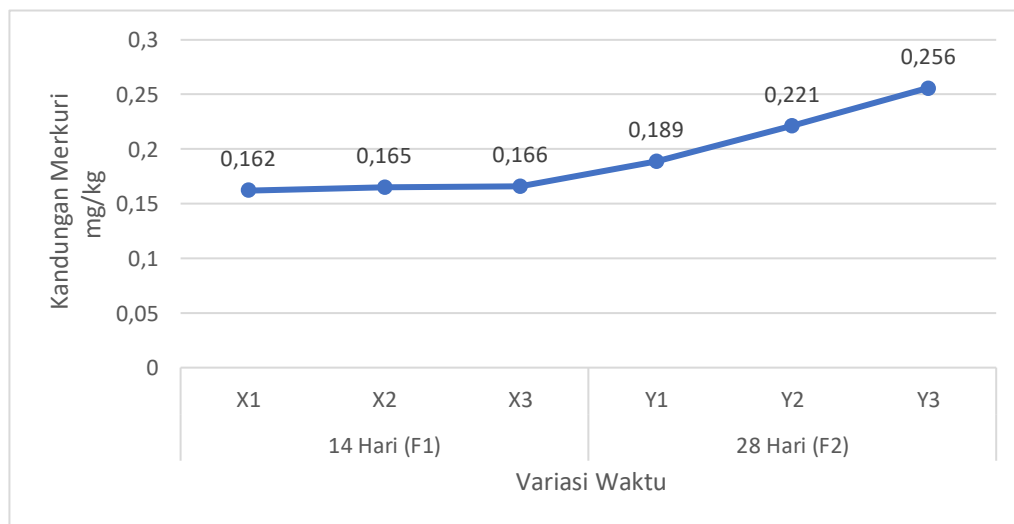
Keterangan: s = Standar deviasi sampel

n = Jumlah data sampel

x_i = Data ke-i

$\bar{x}$ = Rata-rata sampel

Selain berat dan tinggi tanaman yang diukur, tanaman *Cyperus rotundus* juga dianalisis selama proses fitoremediasi per variasi waktu. Tanaman ini dianalisis untuk melihat kemampuan dalam menyerap merkuri yang ada di dalam tanah untuk membantu membersihkan lingkungan yang tercemar logam berat. Berikut adalah tabel akumulasi daya serap konsentrasi logam merkuri pada **Gambar 15**.



Gambar 15. Grafik Konsentrasi Merkuri pada Tanaman

Pada **Gambar 15** menunjukkan bahwa adanya peningkatan kandungan merkuri yang terakumulasi dalam tanaman *Cyperus rotundus* seiring dengan bertambahnya waktu fitoremediasi. Pada variasi waktu 14 hari, rata-rata kandungan merkuri dalam tanaman tercatat 0,164 mg/kg (Lampiran 1), dengan nilai pengukuran antara 0,162 mg/kg hingga 0,166 mg/kg pada

tiga pengulangan. Setelah periode fitoremediasi diperpanjang menjadi 28 hari, terjadi peningkatan rata-rata kandungan merkuri dalam tanaman menjadi 0,222 mg/kg (Lampiran 1), dengan nilai pengukuran yang lebih bervariasi antara 0,189 mg/kg hingga 0,256 mg/kg. Peningkatan rata-rata kandungan merkuri ini menyatakan bahwa *Cyperus rotundus* sangat efektif menyerap merkuri dari tanah yang tercemar selama proses fitoremediasi, dengan mekanisme penyerapannya yang disebut fitoekstraksi, dimana tanaman menyerap dan mengangkut merkuri dari tanah, lalu menyimpannya di bagian daun. Hal ini sejalan dengan penelitian (Titahena *et al.*, 2023), dimana tanaman *Cyperus rotundus* ini mampu menyerap logam berat secara cepat dan dapat mengakumulasi pada bagian akar dan daun selama 28 hari.

4.3 Analisis Konsentrasi Merkuri dalam Tanah Tercemar

4.3.1 Tanah Tanpa Fitoremediasi

Dalam proses fitoremediasi terhadap *Cyperus rotundus* peneliti juga melakukan analisis terhadap tanah tanpa ditanami *Cyperus rotundus* dengan variasi waktu yang sama, dengan tujuan untuk membandingkan tanah yang dibiarkan saja tanpa tanaman remediator selama variasi waktu yang sama dan dengan tanah yang ditanami tanaman remediator.

Analisis terhadap tanah tanpa tanaman atau tanah kontrol yang bertujuan untuk menyediakan data pembanding untuk mengevaluasi pengaruh keberadaan *Cyperus rotundus* secara spesifik terhadap perubahan konsentrasi merkuri dalam media tanah tercemar. Melalui perbandingan antara tanah dengan tanaman selama periode waktu 14 dan 28 hari dengan tanah kontrol yang dibiarkan tanpa tanaman selama kurun waktu yang sama, peneliti dapat mengisolasi dan mengukur kontribusi tanaman dalam proses remediasi. Tanah tanpa fitoremediasi dilakukan pengujian di Laboratorium Lingkungan Universitas Andalas setiap variasi waktu yang mana untuk menjadi tanah kontrol dengan metode tanpa tanaman apakah logam berat merkuri akan turun dengan sendirinya atau sebaliknya dapat dilihat pada **Tabel 9** berikut:

Tabel 9. Tanah Tercemar Tanpa Perlakuan

No	Variasi Waktu	Kandungan merkuri (mg/kg)	Regulasi Permenkes No. 2 Tahun 2023
1	14 Hari (F1)	0,631	0,3
2	28 hari (F2)	0,631	

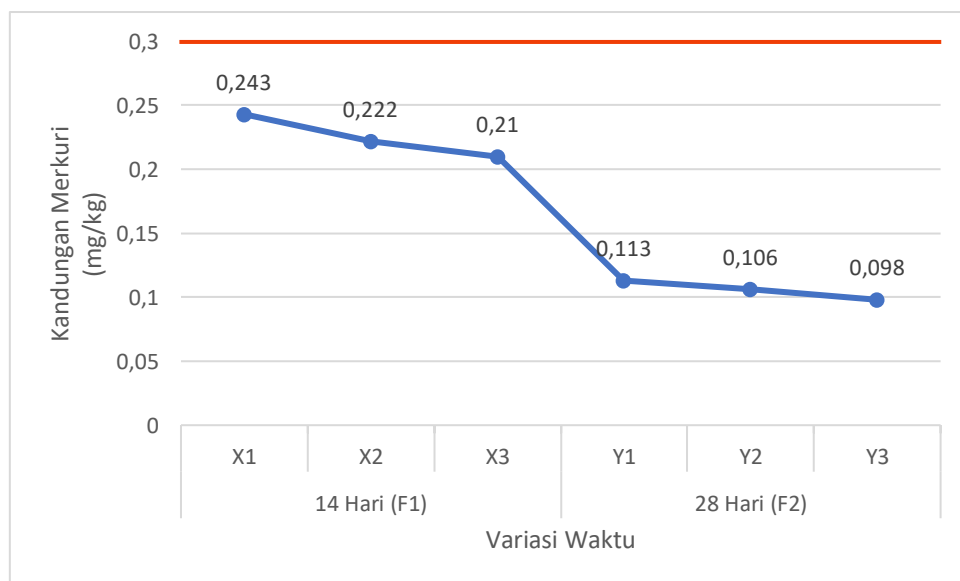
Sumber: Laboratorium Lingkungan Universitas Andalas, 2025

Berdasarkan tabel diatas, dapat diketahui bahwa logam berat pada tanah tanpa fitoremediasi atau tanpa ditanami tanaman *Cyperus rotundus*

tidak dapat turun dengan sendirinya, dengan konsentrasi logam berat merkuri yang sama yaitu 0,631 mg/kg dengan didiamkan setiap variasi waktu. Hasil pengujian tersebut masih menunjukkan bahwa tanah kontrol mengandung logam berat merkuri yang melebihi baku mutu yang dipersyaratkan, berdasarkan Permenkes No. 2 Tahun 2025 yaitu 0,3 mg/kg. Sehingga dilakukan penurunan logam berat merkuri dengan teknik fitoremediasi menggunakan tanaman *Cyperus rotundus*.

4.3.2 Tanah dengan Fitoremediasi

Konsentrasi logam berat merkuri yang ada di dalam tanah bekas tambang batubara setelah dilakukan pengujian awal pada saat pra-penelitian sebesar 0,631 mg/kg dimana nilai tersebut melebihi baku mutu tanah yang dipersyaratkan. Maka dilakukannya fitoremediasi pada tanah tersebut agar logam berat pada tanah mengalami penurunan. Diperoleh kandungan logam berat merkuri dalam tanah yang ditanami tanaman *Cyperus rotundus* dapat dilihat pada grafik berikut:

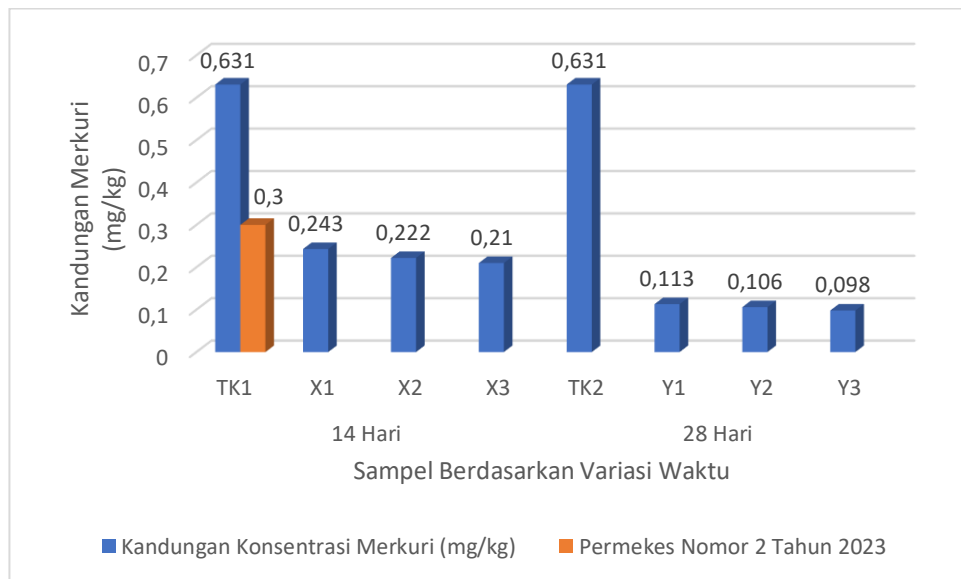


Gambar 16. Grafik Konsentrasi Merkuri dalam Tanah

Keterangan: — Permenkes Nomor 2 Tahun 2023

Berdasarkan data pada tabel, terjadi penurunan konsentrasi merkuri dalam tanah tercemar setelah aplikasi fitoremediasi menggunakan tanaman *Cyperus rotundus* selama dua variasi waktu. Pada variasi waktu 14 hari (F1), rata-rata kandungan merkuri dalam tanah adalah 0,225 mg/kg (Lampiran 1), dengan nilai pengukuran berkisar antara 0,210 mg/kg hingga 0,243 mg/kg pada tiga pengulangan. Nilai rata-rata ini menunjukkan penurunan dibandingkan

konsentrasi awal tanah tercemar (0,631 mg/kg), dan sudah berada dibawah standar baku mutu tanah menurut Permenkes Nomor 2 Tahun 2023 untuk merkuri, yaitu 0,3 mg/kg. Setelah waktu fitoremediasi diperpanjang menjadi 28 hari (F2), terjadi penurunan lebih lanjut pada rata-rata kandungan merkuri dalam tanah menjadi 0,105 mg/kg (Lampiran 1), dengan nilai pengukuran antara 0,089 mg/kg hingga 0,113 mg/kg. Setelah 28 hari, konsentrasi merkuri dalam tanah jauh berada di bawah standar baku mutu yang telah ditetapkan. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Titahena *et al.*, 2023) dimana semakin lama waktu tanam, semakin banyak logam merkuri yang diserap oleh tanaman yaitu pada hari ke-28.



Gambar 17. Perbandingan Antara Tanah Tanpa Tanaman dan Tanah dengan Tanaman

Pada **Gambar 17** menunjukkan perbandingan kandungan konsentrasi merkuri (mg/kg) antara tanah tanpa tanaman dan tanah dengan tanaman pada variasi waktu 14 hari dan 28 hari. Pada sampel tanpa tanaman (TK1 dan TK2), kandungan merkuri tercatat sebesar 0,631 mg/kg baik pada hari ke-14 maupun hari ke-28. Sementara itu, pada sampel tanah dengan tanaman, terlihat penurunan konsentrasi merkuri seiring bertambahnya waktu. Pada 14 hari, kandungan merkuri pada sampel X1, X2, dan X3 berturut-turut sebesar 0,243 mg/kg, 0,222 mg/kg, dan 0,21 mg/kg. Sedangkan pada 28 hari, kandungan merkuri pada sampel Y1, Y2, dan Y3 masing-masing menurun menjadi 0,113 mg/kg, 0,106 mg/kg, dan 0,098 mg/kg. Data ini menunjukkan bahwa keberadaan tanaman, yang dalam penelitian ini diduga adalah *Cyperus rotundus* mampu menurunkan konsentrasi merkuri dalam tanah tercemar, dan semakin lama waktu tanam maka semakin besar pula penurunan konsentrasi merkuri.

Hasil tersebut juga memperlihatkan bahwa kandungan merkuri pada tanah dengan tanaman sudah berada di bawah ambang batas yang ditetapkan oleh Permenkes Nomor 2 Tahun 2023, sementara tanah tanpa tanaman masih melampaui batas aman tersebut.

4.4 Efektivitas Penggunaan Tanaman *Cyperus rotundus* dalam Menurunkan Merkuri pada Tanah Tercemar

Berdasarkan data hasil pengujian konsentrasi merkuri dalam tanah bekas tambang batubara dengan 2 perlakuan yaitu 2 variasi waktu dan 3 kali pengulangan. Adapun jenis analisis yang digunakan adalah pengaruh waktu kontak fitoremediasi tanaman *Cyperus rotundus* terhadap penyerapan serta akumulasi logam berat. Efektivitas penurunan konsentrasi merkuri dalam tanah dengan menggunakan tanaman *Cyperus rotundus* diamati selama 14 hari dan 28 hari. Perubahan konsentrasi awal dan akhir dari logam merkuri serta persentase efektivitas penurunannya dapat dilihat pada **Tabel 13** berikut ini:

Tabel 10. Perhitungan Efektivitas Konsentrasi Logam merkuri Berdasarkan Variasi Waktu

No	Variasi Waktu	Konsentrasi Merkuri awal (mg/kg)	Konsentrasi Merkuri Akhir (mg/kg)	Efektivitas Penyerapan (%)
1	14 Hari	0,631	0,225	64,34%
2	28 Hari	0,631	0,105	83,36%

Berdasarkan data efektivitas penyerapan merkuri oleh *Cyperus rotundus*, terlihat bahwa tanaman ini menunjukkan kinerja yang baik dalam mengurangi konsentrasi merkuri dalam tanah tercemar. Setelah 14 hari aplikasi fitoremediasi, efektivitas penyerapan merkuri mencapai 64,34%, Dimana konsentrasi merkuri dalam tanah menurun dari 0,631 mg/kg menjadi 0,225 mg/kg. Pada variasi waktu 28 hari memberikan hasil yang lebih signifikan, dengan efektivitas penyerapan merkuri meningkat menjadi 83,36%, dan konsentrasi merkuri dalam tanah menurun lebih lanjut menjadi 0,105 mg/kg. Hasil perhitungan dapat dilihat pada (Lampiran 2) dan dihitung dengan rumus:

$$\text{Efektivitas (EF)} = \frac{(C_o - C_t)}{C_o} \times 100\%$$

Keterangan:

- Ef : Efektivitas tanaman *Cyperus rotundus*
- co : Konsentrasi awal sampel
- ct : Konsentrasi akhir sampel

Data efektivitas yang diperoleh menunjukkan bahwa semakin lama waktu perlakuan, semakin tinggi kemampuan penyerapannya terhadap merkuri. Hal ini menunjukkan bahwa waktu tanam yang lebih lama meningkatkan kemampuan tanaman dalam menyerap logam merkuri dari tanah. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Titahena *et al.*, 2023) menyatakan bahwa efektivitas penyerapan merkuri oleh tanaman *Cyperus rotundus* pada tanah tercemar paling tinggi penyerapannya yaitu pada hari ke-28 sebesar 56,16%. Hal ini menunjukkan bahwa tanaman *Cyperus rotundus* sangat efektif dalam menurunkan konsentrasi merkuri pada tanah tercemar dan berpotensi sebagai agen fitoremediasi untuk mengurangi pencemaran logam berat di tanah bekas tambang batubara.

4.5 Analisis Sidik Ragam (ANOVA) *Two Ways*

Uji analisis statistika menggunakan *Analysis Of Variance* (ANOVA) ragam dua arah berdasarkan kelompok waktu diolah secara statistik dengan menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dua arah berdasarkan kelompok, waktu dan konsentrasi akhir pada tanah. Syarat dilakukannya uji *Two Ways* ANOVA yaitu sebagai berikut:

- Sampel berasal dari kelompok independen: kelompok 1 (Tanah dengan Tanaman) dan kelompok 2 (Tanah Kontrol)
- Variabel faktor bersifat non metrik (Data Kategori): kelompok, waktu dan konsentrasi akhir
- Nilai *Residual Standard* berdistribusi Normal

Adapun kriteria dalam pengujian normalitas adalah jika nilai Sig. <0,05 maka nilai *residual standard* berdistribusi tidak normal. Sebaliknya, jika nilai Sig. >0,05 maka nilai *residual standard* berdistribusi normal.

Berikut dapat dilihat hasil dari uji normalitas pada tabel dibawah ini:

Tabel 11. Hasil Pengujian Normalitas

Tests of Normality			
	Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.
Standardized Residual for Konsentrasi_Akhir	0.954	8	0.752

Berdasarkan pada tabel diatas, diketahui bahwa nilai signifikansi pada Shapiro-wilk yaitu sebesar 0,752 yang mana artinya nilai $0,752 > 0,05$. Hal ini menunjukkan bahwa nilai residual standard pada uji normalitas berdistribusi secara normal.

d. Varian data antar kelompok harus homogen

Sebelum melakukan uji *two ways* ANOVA, salah satu syarat yang harus dipenuhi adalah homogenitas varians untuk memastikan bahwa varians antar kelompok adalah sama. Kriteria pengambilan keputusan pada uji ini adalah jika nilai Sig. $< 0,05$ maka varian data tidak homogen. Sebaliknya, jika nilai Sig. $> 0,05$ maka varian data homogen.

Adapun output dari uji homogenitas varians yang digunakan untuk menguji kesamaan varians antar kelompok sebagai berikut:

Tabel 12. Hasil Pengujian Homogenitas

Levene's Test of Equality of Error Variances^{a,b}					
		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
Konsentrasi_A khir	Based on Mean	1.776	1	4	0.253

Hasil pada tabel diatas menunjukkan bahwa nilai signifikansi berdasarkan mean atau rata-rata adalah sebesar 0,253. Karena nilai tersebut $> 0,05$, maka dapat disimpulkan bahwa varians antar kelompok adalah homogen dan syarat untuk melakukan uji ANOVA telah terpenuhi.

e. Jenis data yang digunakan adalah kategorik dengan numerik

Setelah dilakukan pemeriksaan terhadap data, dapat disimpulkan bahwa seluruh syarat untuk melakukan uji ANOVA telah terpenuhi. Uji normalitas menunjukkan bahwa data dalam masing-masing kelompok berdistribusi secara normal. Selanjutnya, uji homogenitas varians menunjukkan bahwa varians antar kelompok adalah homogen. Dengan terpenuhinya semua syarat tersebut, analisis dapat dilanjutkan ke tahap uji ANOVA untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan antar kelompok.

Adapun kriteria dalam uji *two ways* ANOVA yaitu sebagai berikut:

a) Jika nilai Sig. $< 0,05$ maka ada perbedaan secara signifikan pada konsentrasi akhir berdasarkan variabel faktor.

- b) Jika nilai signifikansi $>0,05$ maka tidak ada perbedaan secara signifikan pada konsentrasi akhir berdasarkan variabel faktor.

Untuk mengetahui ada atau tidaknya perbedaan secara signifikan, dapat dilihat pada tabel berikut ini:

Tabel 13. Hasil Pengujian *Two-Ways* ANOVA

Tests of Between-Subjects Effects					
Dependent Variable: Konsentrasi_Akhir					
Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Kelompok	0.325	1	0.325	1939.969	0.001
Waktu	0.005	1	0.005	31.850	0.005
Kelompok * Waktu	0.005	1	0.005	31.850	0.005
Error	0.001	4	0.000		
Total	0.982	8			

Hasil dari uji *two ways* ANOVA diatas, dapat disimpulkan bahwa:

1. Kelompok

Nilai signifikansi sebesar 0,001, nilai tersebut $<0,05$ maka artinya ada perbedaan secara signifikan pada konsentrasi akhir berdasarkan kelompok. Dari hasil uji diatas, diketahui bahwa nilai F_{hitung} adalah sebesar 1939,969. Sementara itu, nilai F_{tabel} pada taraf signifikansi yaitu 0,05 dengan df kelompok 1 dan df error 4 adalah sebesar 7,71. Jadi, dapat diketahui bahwa $F_{hitung} > F_{tabel}$ yaitu dengan nilai $1939,969 > 7,71$ dimana H_0 ditolak dan H_1 diterima, artinya adanya perbedaan antara kelompok tanah tanpa fitoremediasi dan tanah dengan fitoremediasi.

2. Waktu

Nilai signifikansi sebesar 0,005, nilai tersebut $<0,05$ maka bisa disimpulkan bahwa ada perbedaan secara signifikan pada konsentrasi akhir berdasarkan waktu dan diketahui bahwa nilai F_{hitung} adalah sebesar 31,850. Sementara itu, nilai F_{tabel} pada taraf signifikansi yaitu 0,05 dengan df kelompok 1 dan df error 4 adalah sebesar 7,71. Jadi, dapat diketahui bahwa $F_{hitung} > F_{tabel}$ yaitu dengan nilai $31,850 > 7,71$ dimana H_0 ditolak

dan H1 diterima, artinya adanya perbedaan antara variasi waktu 14 hari dan 28 hari.

3. Interaksi antara Kelompok dengan Waktu

Nilai signifikansi sebesar 0,005, nilai tersebut $< 0,05$ maka dapat disimpulkan bahwa ada interaksi antara kelompok dengan waktu pada konsentrasi akhir dan diketahui bahwa nilai F_{hitung} adalah sebesar 31,850. Sementara itu, nilai F_{tabel} pada taraf signifikansi yaitu 0,05 dengan df kelompok 1 dan df error 4 adalah sebesar 7,71. Jadi, dapat diketahui bahwa $F_{hitung} > F_{tabel}$ yaitu dengan nilai $31,850 > 7,71$ dimana H_0 ditolak dan H_1 diterima, artinya adanya perbedaan antara kelompok dengan waktu.

Dari uraian diatas, seluruh $F_{hitung} > F_{tabel}$, maka dapat disimpulkan bahwa H_0 ditolak dan H_1 diterima yang artinya adanya perbedaan antara kelompok tanah tanpa fitoremediasi, kelompok tanah dengan fitoremediasi, dan variasi waktu dengan menggunakan tanaman *Cyperus rotundus*.

4.6 Design Pola Tanam *Cyperus rotundus* di Lahan Bekas Tambang

Batubara

Reklamasi lahan pascatambang merupakan upaya strategis untuk memulihkan kembali fungsi ekologis dan produktivitas lahan yang telah rusak akibat kegiatan pertambangan. Salah satu pendekatan yang digunakan dalam proses pemulihan ini adalah fitoremediasi, yaitu metode pemanfaatan tanaman untuk menyerap, menstabilkan, atau mengurangi kontaminan logam berat di tanah. Pemilihan jenis tanaman menjadi aspek penting dalam keberhasilan metode ini. Tanaman yang digunakan harus memiliki daya adaptasi tinggi terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem serta kemampuan akumulasi logam berat dalam jaringan tubuhnya (Ariyachandra *et al.*, 2023).

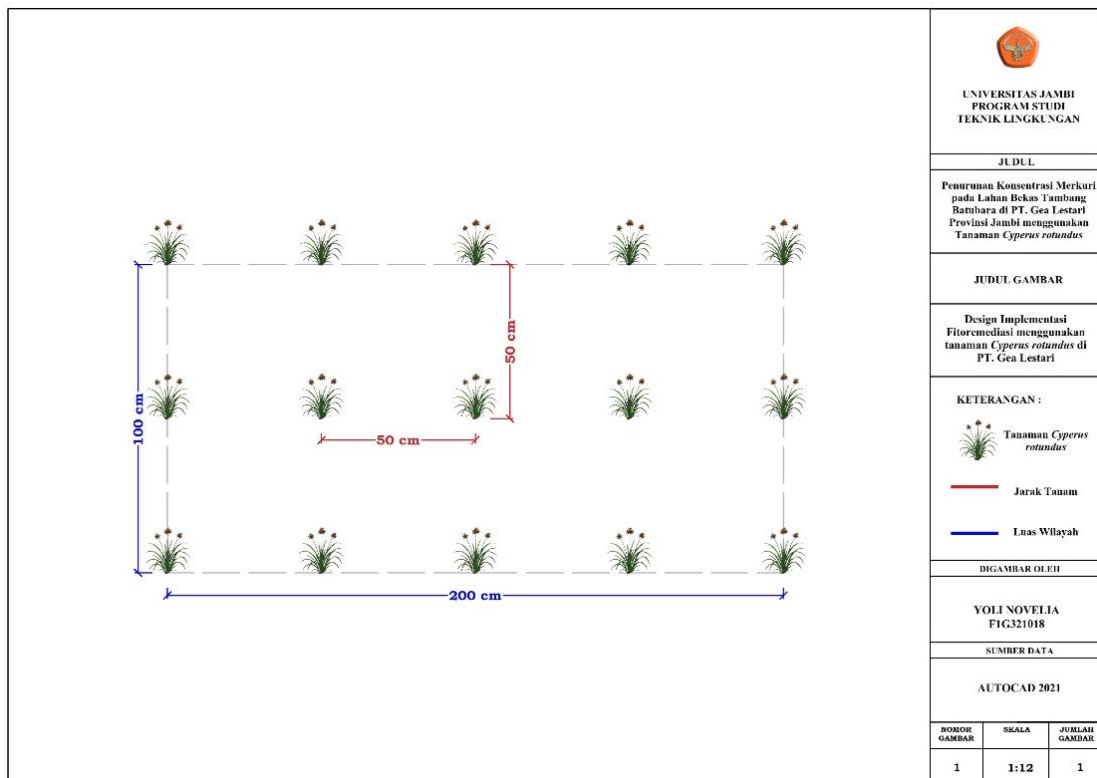
Salah satu spesies yang menunjukkan potensi besar dalam teknik ini adalah *Cyperus rotundus*, atau dikenal juga sebagai rumput teki. Tanaman ini termasuk golongan rumput liar yang memiliki sistem akar kuat dan menyebar luas, serta mampu tumbuh di lahan dengan tingkat kesuburan rendah. Kemampuannya dalam mengakumulasi logam berat menjadikan *Cyperus rotundus* sebagai kandidat ideal untuk rehabilitasi tanah tercemar di lokasi pascatambang.

Dalam upaya mendukung efektivitas revegetasi dan optimalisasi proses fitoremediasi, pola tanam menjadi faktor penting yang perlu diperhatikan. Pola tanam yang tepat tidak hanya mempercepat penutupan lahan secara vegetatif, tetapi juga memaksimalkan daya serap tanaman terhadap kontaminan dalam tanah. Oleh karena itu, pengaturan jarak tanam dan susunan tanaman seperti

yang ditunjukkan dalam gambar berikut menjadi bagian integral dari strategi pemulihan lingkungan berbasis vegetatif (Rohmanna *et al.*, 2025).

Untuk memberikan Gambaran lebih jelas mengenai penerapan dilapangan, berikut disajikan ilustrasi *design* pola tanam *Cyperus rotundus* yang digunakan dalam kegiatan fitoremediasi. *Design* ini menjadi acuan dalam menentukan posisi dan jarak tanaman pada lahan yang direklamasi. Susunan tanam yang teratur juga membantu memastikan setiap tanaman mendapat paparan cahaya matahari yang cukup dan tidak saling bersaing secara berlebihan untuk nutrisi tanah. Hal ini penting agar proses serapan logam oleh akar tanaman dapat berjalan optimal. Selain itu, tata letak seperti ini memungkinkan evaluasi pertumbuhan tanaamn dan pengambilan sampel dilakukan secara lebih sistematis. *Design* ini diharapkan dapat menjadi model awal dalam pengembangan fitoremediasi berbasis vegetasi di lokasi-lokasi tambang lainnya.

Berikut pola tanam *Cyperus rotundus* pada lahan pascatambang:



Gambar 18. Pola Persebaran Tanaman *Cyperus rotundus* pada Lahan Pascatambang

Gambar tersebut menunjukkan pola penanaman *Cyperus rotundus* di lahan pascatambang dengan luas 2 x 1 meter dan jarak antar tanaman yaitu 50 cm. Pola tanam ini dirancang untuk mengoptimalkan ruang tumbuh bagi setiap individu tanaman, memungkinkan perkembangan sistem akar yang lebih luas, serta mendukung efisiensi dalam proses rehabilitasi lahan. *Cyperus rotundus*

dikenal sebagai spesies pionir yang tahan terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem, seperti tanah yang miskin unsur hara dan terkontaminasi logam berat. Oleh karena itu, tanaman ini sering digunakan dalam strategi fitoremediasi, yaitu teknik pembersihan tanah tercemar menggunakan tanaman hijau.

Penelitian yang dilakukan oleh (Ariyachandra *et al.*, 2023) menunjukkan bahwa *Cyperus rotundus* memiliki kemampuan menyerap dan mengakumulasi berbagai logam berat seperti merkuri baik melalui akar maupun daunnya. Tanaman ini diklasifikasikan sebagai *possible hyperaccumulator* karena nilai faktor biokonsetrasi (BCF) dan translokasinya yang tinggi pada lingkungan tercemar logam berat. Selain itu, menurut (Rohmanna *et al.*, 2025), efektivitas tanaman ini dalam proses fitoremediasi dapat ditingkatkan dengan bantuan mikroorganisme rizosfer, yang bekerja secara sinergis untuk memobilisasi unsur logam dari tanah ke jaringan tanaman. Pola penanaman seperti yang terlihat dalam gambar tidak hanya mempertimbangkan aspek ekologi, tetapi juga aspek teknis untuk memastikan keberhasilan revegetasi lahan pascatambang.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai penurunan konsentrasi merkuri pada lahan bekas tambang batubara di PT. Gea Lestari Provinsi Jambi menggunakan tanaman *Cyperus rotundus* dapat diambil Kesimpulan sebagai berikut:

1. Konsentrasi awal merkuri pada lahan bekas tambang batubara sebesar 0,631 mg/kg. Setelah perlakuan selama 14 hari dan 28 hari, konsentrasi merkuri berturut-turut mengalami penurunan menjadi 0,225 mg/kg dan 0,105 mg/kg. Hal ini telah membuktikan bahwa tanaman *Cyperus rotundus* sangat efektif dalam menurunkan konsentrasi merkuri dalam tanah tercemar bekas tambang batubara.
2. Efektivitas tanaman *Cyperus rotundus* dalam menurunkan konsentrasi merkuri dalam tanah tercemar bekas tambang batubara dihitung dengan rumus efektivitas. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa efektivitas penurunan merkuri pada variasi waktu 14 hari dan 28 hari yaitu sebesar 64,34% dan 83,36%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada hari ke-28, merkuri mengalami penurunan konsentrasi hingga 0,105 mg/kg (83,36%). Hal ini telah memenuhi standar baku mutu yang ditetapkan dalam Permenkes Nomor 2 Tahun 2023 yaitu sebesar 0,3 mg/kg.
3. Hasil uji *two ways* ANOVA menunjukkan bahwa nilai F_{hitung} (1939,969) (13,850) $> F_{tabel}$ (7,71), sehingga hipotesis nol (H_0) ditolak dan hipotesis alternatif (H_1) diterima. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antara perlakuan dengan tanaman *Cyperus rotundus* dan tanpa tanaman *Cyperus rotundus* dalam menurunkan konsentrasi merkuri, sehingga dapat disimpulkan bahwa tanaman *Cyperus rotundus* sangat efektif dalam fitoremediasi tanah tercemar bekas tambang batubara.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari penelitian yang telah dilakukan yaitu sebagai berikut:

1. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa pada hari ke-14, penurunan merkuri sudah dibawah standar baku mutu. Jadi, perlu adanya penelitian serupa dengan variasi waktu di bawah 14 hari, misalnya pada hari ke-3, ke-5, ke-7, atau ke-10, untuk menemukan hari ke berapa merkuri sudah di bawah standar baku mutu (0,3 mg/kg)
2. Perlu adanya penelitian lanjutan untuk menguji efektivitas tanaman *Cyperus rotundus* terhadap logam berat lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, J., Abdullah, Sheikh, S. R., Abu Hassan, H., Abdul Rahman, R. A., & Idris, M. (2017). Screening Of Tropical Native Aquatic Plants For Polishing Pulp And Paper Mill Final Effluent. *Malaysian Journal Of Analytical Science*, 21(1), 105–112.
- Asmorowati, D. S., Sumarti, S. S., & Kristanti, I. I. (2020). Perbandingan Metode Destruksi Basah Dan Destruksi Kering Untuk Analisis Timbal Dalam Tanah Di Sekitar Laboratorium Kimia Fmipa Unnes. *Indonesian Journal Of Chemical Science*, 09(03), 169–173.
- Barokah, G. R., Nugroho, I., Besar, B., Pengolahan, R., Kelautan, B., Ks, J., & Petamburan, T. (2019). Kontaminasi Logam Berat (Hg , Pb , Dan Cd) Dan Batas Aman Konsumsi Kerang Hijau (Perna Viridis) Dari Perairan Teluk Jakarta Di Musim Penghujan Heavy Metals Contamination (Hg , Pb And Cd) And Safety Level For Consumption Of Green Mussels (Perna Viridis) At Jakarta Bay In Rainy Season. 5, 95–106.
- Bhat, S. A., Bashir, O., Ul Haq, S. A., Amin, T., Rafiq, A., Ali, M., Américo-Pinheiro, J. H. P., & Sher, F. (2022). Phytoremediation Of Heavy Metals In Soil And Water: An Eco-Friendly, Sustainable And Multidisciplinary Approach. *Chemosphere*, 303(January).
- Candra, Y. A., Pratama Ningtyas, S., & Nugroho, Y. A. (2019). Fitoremediasi Merkuri Dari Tanah Tercemar Limbah Bekas Tambang Emas Rakyat Dengan Rumput Teki (*Cyperus Kyllingia*). *Agrika*, 13(1), 33.
- Christofer, F., Puspita Sari, S., Sapulette, K., Anggrayni, M., Hutagalung, E., & Irawati, W. (2022). Mikorizoremediasi: Asosiasi Fungi Mikoriza Arbuskula Dalam Meningkatkan Kemampuan Penyerapan Logam Pada Tanaman Hiperakumulator Di Lahan Pertambangan Mycorrhiza Remediation: Association Of Arbuscular Mycorrhizal Fungi To Increase Metal Absorption Ability In. *Teknologi Lingkungan, Jurnal*, 23(1), 118–125.
- Diop, M., Chirinda, N., Beniaich, A., El Gharous, M., & El Mejahed, K. (2022). Soil and Water Conservation in Africa: State of Play and Potential Role in Tackling Soil Degradation and Building Soil Health in Agricultural Lands. *Sustainability (Switzerland)*, 14(20).
- El-Nour, E. A. E. A. A. (2020). Phytoremediation Of Heavy Metals Principles, Mechanisms, Enhancements With Several Efficiency Enhancer Methods And Perspectives: A Review. *Middle East Journal Of Agriculture Research*, 09(May),

- Eviati, E., Sulaeman, S., Herawaty, L., Anggria, L., Eka Tantika, H., Prihatini, R., & Wuningrum, P. (2023). Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air, Dan Pupuk. In *Petunjuk Teknis Edisi*. <https://Tanahpupuk.Bsip.Pertanian.Go.Id>
- Fahmi, A., Syamsudin, Utami, S. N. H., & Radjagukguk, B. (2009). Peran Pemupukan Fosfor Dalam Pertumbuhan Tanaman Jagung (*Zea Mays L.*) Di Tanah Regosol Dan Latosol 1. *Berita Biologi*, 9(6), 745–750.
- Fajri, Namria, Hemon, M. T., Suleman, D., & Alam, S. (2022). Pengaruh Vermikompos Dan Kompos Kulit Buah Kakao Terhadap Kualitas Tanah Oxisol Dan Pertumbuhan Tanaman Jagung Pulut (*Zea Mays Ceratina L.*) Effect Of Vermicompost And Cocoa Peel Compost On Soil Quality Of Oxisol And Growth Of Waxy Corn (*Zea Mays Cerati*. *Journal Of Agricultural Sciences*, 02(03), 153–160.
- Farmasi, A., & Bonjol, I. (2023). Mega Yulia, Anna Fadilla, Devahimer Harsep Rosi 2023. *Farmagazine*, X (1), 57–62.
- Goodwin, B. Y. T. W. (2017). *The Nature And Properties Of Soils* (Nomor 2).
- Grandjean, P. (2019). Developmental Fluoride Neurotoxicity: An Updated Review. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 18(1), 1–17.
- Gupta, R., Khan, F., Alqahtani, F. M., Hashem, M., & Ahmad, F. (2024). Plant Growth–Promoting Rhizobacteria (PGPR) Assisted Bioremediation of Heavy Metal Toxicity. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 196(5), 2928–2956.
- Habibi, A. (2022). Pencemaran Lingkungan Akibat Tambang Batu Bara Di Desa Serongga Kabupaten Kota Baru. *Pendidikan Lingkungan Hidup-Akbk3308*, 1(1), 1–9.
- Hagen, J. P., & Sneddon, J. (2020). Determination Of Copper, Iron, And Zinc In Crayfish (*Procambrus Clarkii*) By Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry. *Spectroscopy Letters*, 42(1), 58–61.
- Haghighizadeh, A., Rajabi, O., Nezarat, A., Hajyani, Z., Haghmohammadi, M., Hedayatikhah, S., Asl, S. D., & Aghababai Beni, A. (2024). Comprehensive analysis of heavy metal soil contamination in mining Environments: Impacts, monitoring Techniques, and remediation strategies. *Arabian Journal of Chemistry*, 17(6), 105777.
- Hardiantika, W., Suprihatin, S., Astuti, W., Haryono, T., & Eskani, I. N. (2023). Pengaruh Variasi Suhu Dan Waktu Pemanasan Terhadap Struktur Kristal,

- Komposisi Kimia, Morfologi Dan Konsentrasi Logam Pada Sintesis Nanopartikel Zno Menggunakan Metode Hidrotermal. *Jurnal Rekayasa Proses*, 17, 77–82.
- Kementerian Kesehatan. (2023). Permenkes No. 2 Tahun 2023. *Kemenkes Republik Indonesia*, 55, 1–175.
- Khan, A. U., Khan, A. N., Waris, A., Ilyas, M., & Zamel, D. (2022). Phytoremediation Of Pollutants From Wastewater: A Concise Review. *Open Life Sciences*, 17(1), 488–496.
- Klein, R., Gray, R., Chiger, A., Beins, K., Derrick, H., Diskin, K., & Juergens, M. (2020). Toxicological Profile For Acetone. In *Atsdr's Toxicological Profiles* (Nomor June).
- Kristianingrum, S. (2012). Kajian Berbagai Proses Destruksi Sampel Dan Efeknya. *Jurusan Pendidikan Kimia Fmipa Uny*, 2(3), 195–202.
- Lisdiyanti, M., Sarifuddin, & Guchi, H. (2018). Pengaruh Pemberian Bahan Humat Dan Pupuk Sp-36 Untuk Meningkatkan Ketersediaan Fosfor Pada Tanah Ultisol. *Jurnal Pertanian Tropis*, 3(2), 91–102.
- Mirdad, Y. S., Patadungan, & Isrun. (2013). Status Merkuri (Hg) Dalam Tanah Pada Kawasan Pengelolaan Tambnag Emas Di Kelurahan Poboya, Kota Palu. *E-Journal Agrotekbis*, 1(2), 127–134.
- Ningrum, L. P., & Navastara, A. M. (2015). Pemanfaatan Lahan Pada Lokasi Bekas Tambang Tanah Urug Di Kecamatan Ngoro, Mojokerto. *Jurnal Teknik Its*, 4(1), 36–40.
- Nikmah, Z. C., Slamet, W., & Kristanto, B. A. (2017). Aplikasi Silika Dan Naa Terhadap Pertumbuhan Anggrek Bulan (*Phalaenopsis Amabilis* L.) Pada Tahap Aklimatisasi. *Journal Of Agro Complex*, 1(3), 101.
- Njonge, T. (2023). *Influence of Psychological Well-Being and School Factors on Delinquency , During the Covid-19 Period Among Secondary School Students in Selected Schools in Nakuru County : Kenya*. VII(2454), 1175–1189.
- Nurfitriani, S., Chasanah, U., Nuraini, Y., Fiqri, A., & Handayanto, E. (2019). Kemampuan Akumulasi Merkuri Oleh Bakteri Yang Diisolasi Dari Tailing Tambang Emas Skala Kecil. *Seminar Nasional Lahan Suboptimal*, 366–375.
- Nursagita, Y. Dan, & Sulistyaning, H. (2021). Kajian Fitoremediasi Untuk Menurunkan Konsentrasi Logam Berat Di Wilayah Pesisir Menggunakan

Tumbuhan Mangrov. *Teknik Its*, 10(1), 22–28.

- Oktavian, P., Anas, M., Kasman, Sudiana, I. N., Safaani, J., & Agus, L. (2024). Studi Kajian Literatur: Pengaruh Keberadaan Logam Berat Terhadap Tingkat Kesuburan Tanah di Indonesia. *Einstein's: Research Journal of Applied Physics*, 2(1), 20–23.
- Purnamasari, R. K., Zaman, B., & Hadi Widodo, M. (2014). Pengaruh Jumlah Koloni Rumput Teki (*Cyperus Rotundus* L.) Pada Media Pasir Terhadap Penurunan Konsentrasi Bod Dan Cod (Studi Kasus Tpa Jatibarang – Semarang). *Jurnal Teknik Lingkungan*, 3(2), 1–10.
- Putra, N. T., Informasi, M. S., Bangsa, U. D., Jend, J., & Telp, S. T. (2024). Implementasi Sistem Informasi Geografis Lokasi Pertambangan Batu Bara Menggunakan Quantum Gis. *Manajemen Sistem Informasi*, 9(1), 105–117
- Ratnawati, R., & Fatmasari, R. D. (2018). Fitoremediasi Tanah Tercemar Logam Timbal (Pb) Menggunakan Tanaman Lidah Mertua (*Sansevieria Trifasciata*) Dan Jengger Ayam (*Celosia Plumosa*). *Al-Ard: Jurnal Teknik Lingkungan*, 3(2), 62–69.
- Rohmanna, N. A., Agustina, L., Saputra, R. A., Sari, N., Noor, I., & Majid, Z. A. N. M. (2025). Enhancing phytoremediation of heavy metals: A comprehensive review of performance microorganism-assisted *Cyperus rotundus* L. *Journal of Ecological Engineering*, 26(6), 391–401.
- Roliya, S. (2021). *Penurunan Konsentrasi Pencemar Limbah Binatu Dengan Metode Constructed Wetland Menggunakan Tanaman Rumput Teki (Cyperus Rotundus)*.
- Rosianty, Y., Syahroni, S. H., & Ariansyah, A. (2021). Kajian Pemanfaatan Lahan Gambut Oleh Masyarakat Di Desa Pangkalan Damai Kecamatan Air Sugihan Kabupaten Ogan Komering Ilir. *Journal Of Global Sustainable Agriculture*, 1(1), 14.
- Subowo, G. (2017). Penambangan Sistem Terbuka Ramah Lingkungan Dan Upaya Reklamasi Pasca Tambang Untuk Memperbaiki Kualitas Sumberdaya Lahan Dan Hayati Tanah. *J. Sdl*, 5(2), 61–116.
- Sugiono, C. (2015). Potensi *Cyperus Kyllingia* Endl. Untuk Fitoremediasi Tanah Tercemar Merkuri Limbah Tambang Emas Dengan Penambahan Ligan Amonium Thiosulfat. *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*, 1(1), 1–8.
- Susanto, R. (2021). Pencemaran Tanah dan Air Tanah Oleh Pestisida dan Cara

- Menanggulangnya. In *Jurnal Perlindungan Tanaman Indonesia* (Vol. 7, Nomor 1, hal. 9–15).
- Septiningsih, E.-. (2012). Peningkatan Produktivitas Tanah Pasir Untuk Pertumbuhan Tanaman Kedelai Dengan Inokulasi Mikoriza Dan Rhizobium. *Bioma : Berkala Ilmiah Biologi*, 9(2), 58.
- Setel, L. R. (2019). Perubahan Beberapa Sifat Fisik Dan Kimia Tanah Atas Perlakuan Bahan Organik Dengan Berbagai Waktu Inkubasi Pada Tanah Podsolik Merah Kuning. *Prospek Agroteknologi*, 8(No. 2), 130–147.
- Skuza, L., Szućko-Kociuba, I., Filip, E., & Bożek, I. (2022). Natural Molecular Mechanisms Of Plant Hyperaccumulation And Hypertolerance Towards Heavy Metals. *International Journal Of Molecular Sciences*, 23(16).
- Soumik, C., & Sabyasachi, C. (2019). *Phytoremediation Technology : A Review*. *International Journal Of Scientific Research And Reviews*, 08(04), 268–281.
- Ssenku, J. E., Naziriwo, B., Kutesakwe, J., Mustafa, A. S., Kayeera, D., & Tebandeke, E. (2023). Mercury Accumulation In Food Crops And Phytoremediation Potential Of Wild Plants Thriving In Artisanal And Small-Scale Gold Mining Areas In Uganda. *Pollutants*, 3(2), 181–196.
- Sumiahadi, A., & Acar, R. (2018). A Review Of Phytoremediation Technology: Heavy Metals Uptake By Plants. *Iop Conference Series: Earth And Environmental Science*, 142(1), 1–10.
- Titahena, M. F., Mariwy, A., & Sunarti, S. (2023). Studi Remediasi Tanah Tercemar Merkuri (Hg) Menggunakan Tumbuhan Teki (*Cyperus Rotundus*). *Jurnal Reka Lingkungan*, 11(2), 95–104.
- Utama. (2022). *Impact Of Adding Natural And Simulated Root Exudates On The Functioning Of Contaminated Soil*. 9(August), 356–363.
- Widiasmadi, N. (2023). Sistem Agro Konservasi Smart Biosoil Dam Untuk Peningkatan Daya Dukung Tanah Litosol. *Journal On Education*, 5(3), 1–11.
- Yekkirala, S., Srividya, A., & Raov, U. (2014). An Overview On Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry And Its Applications. *International Journal Of Chemical And Pharmaceutical Sciences*, 5(3), 18–23.
- Zakariah, M., Juhriah, & Umar, M. R. (2023). Fitoremediasi Tanaman Hias Bunga Impatiens Balsamina L., Dan Zinnia Elegans (Jacq.) Kuntze Terhadap Polutan Merkuri Pada Tanah. *Biologi Makassar*, 8(2), 1–10.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Perhitungan Standar Deviasi

Mengukur penyebaran data menggunakan Standar Deviasi agar dapat membandingkan kelompok data untuk melihat kelompok mana yang memiliki tingkat variasi yang lebih tinggi atau lebih rendah, dapat dihitung dengan rumus:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2}$$

1. Konsentrasi Merkuri dalam Tanah

Variasi Waktu	Pengulangan	Kandungan Merkuri (mg/kg)	Rata- Rata (mg/kg)	Standar Deviasi
14 Hari	X1	0,243	0,225	±0,0167
	X2	0,222		
	X3	0,210		
28 Hari	Y1	0,113	0,105	±0,0075
	Y2	0,106		
	Y3	0,098		

a) 14 Hari

$$\begin{aligned}
 s &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{3-1} [(0,243 - 0,225)^2 + (0,222 - 0,225)^2 + (0,210 - 0,225)^2]} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{2} [0,000324 + 0,000009 + 0,000225]} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{2} \times 0,000558} = \sqrt{0,000279} \\
 &= \pm 0,0167
 \end{aligned}$$

b) 28 Hari

$$\begin{aligned}
 s &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{3-1} [(0,113 - 0,105)^2 + (0,106 - 0,105)^2 + (0,098 - 0,105)^2]} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{2} [0,000064 + 0,000001 + 0,000049]} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{2} \times 0,000114} = \sqrt{0,000057} \\
 &= \pm 0,0075
 \end{aligned}$$

2. Penyerapan Konsentrasi Merkuri oleh Tanaman

Variasi Waktu	Pengulangan	Kandungan Merkuri (mg/kg)	Rata- Rata (mg/kg)	Standar Deviasi
14 Hari	X1	0,162	0,164	$\pm 0,0021$
	X2	0,165		
	X3	0,166		
28 Hari	Y1	0,189	0,222	$\pm 0,0531$
	Y2	0,221		
	Y3	0,256		

a) 14 Hari

$$\begin{aligned}
 s &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{3-1} [(0,162 - 0,164)^2 + (0,165 - 0,164)^2 + (0,166 - 0,164)^2]} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{2} [0,000004 + 0,000001 + 0,000004]} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{2} \times 0,000009} = \sqrt{0,0000045} \\
 &= \pm 0,0021
 \end{aligned}$$

b) 28 Hari

$$\begin{aligned}
 s &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{3-1} [(0,189 - 0,222)^2 + (0,221 - 0,222)^2 + (0,256 - 0,222)^2]} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{2} [0,001089 + 0,000001 + 0,001156]} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{2} \times 0,002246} = \sqrt{0,001123} \\
 &= \pm 0,0531
 \end{aligned}$$

3. Berat Tanaman

No	Sampel	Berat Tanaman (Gram)	Rata-rata (Gram)	Standar Deviasi (s)
1	14 Hari			
	X1	21	21	±0,707
	X2	22		
	X3	21		
2	28 Hari			
	Y1	29	30	±1,581
	Y2	32		
	Y3	30		
Pertambahan			9	

a) 14 Hari

$$\begin{aligned}
 s &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{3-1} [(21 - 21)^2 + (22 - 21)^2 + (21 - 21)^2]} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{2} [0 + 1 + 0]} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{2} \times 1} = \sqrt{0,5} \\
 &= \pm 0,707
 \end{aligned}$$

b) 28 Hari

$$\begin{aligned}
 s &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{3-1} [(29 - 30)^2 + (32 - 30)^2 + (30 - 30)^2]} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{2} [1 + 4 + 0]} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{2} \times 5} = \sqrt{2,5} \\
 &= \pm 1,581
 \end{aligned}$$

4. Tinggi Tanaman

No	Sampel	Tinggi Tanaman (cm)	Rata-rata (cm)	Standar Deviasi (s)
1	14 Hari			
	X1	24	24	±0,707
	X2	25		
	X3	24		
2	28 Hari			
	Y1	27	28	±1,225
	Y2	29		
	Y3	29		
Pertambahan			4	

a) 14 Hari

$$\begin{aligned}
 s &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{3-1} [(24 - 24)^2 + (25 - 24)^2 + (24 - 24)^2]} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{2} [0 + 1 + 0]} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{2} \times 1} = \sqrt{0,5} \\
 &= \pm 0,707
 \end{aligned}$$

b) 28 Hari

$$\begin{aligned}
 s &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{3-1} [(27 - 28)^2 + (29 - 28)^2 + (29 - 28)^2]} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{2} [1 + 1 + 1]} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{2} \times 3} = \sqrt{1,5} \\
 &= \pm 1,225
 \end{aligned}$$

Lampiran 2. Perhitungan Efektivitas

Perhitungan efektivitas adalah cara untuk mengukur sejauh mana suatu tujuan atau target telah tercapai. Dapat dihitung dengan rumus:

$$\text{Efektivitas (EF)} = \frac{(C_o - C_t)}{C_o} \times 100\%$$

No	Variasi Waktu	Konsentrasi Merkuri awal (mg/kg)	Konsentrasi Merkuri Akhir (mg/kg)	Efektivitas Penyerapan (%)
1	14 Hari	0,631	0,225	64,34%
2	28 Hari	0,631	0,105	83,36%

a) 14 Hari

$$\begin{aligned}\text{Efektivitas (EF)} &= \frac{(C_o - C_t)}{C_o} \times 100\% \\ &= \frac{(0,631 - 0,225)}{0,631} \times 100\% \\ &= \frac{0,406}{0,631} \times 100\% = 64,34 \%\end{aligned}$$

b) 28 Hari

$$\begin{aligned}\text{Efektivitas (EF)} &= \frac{(C_o - C_t)}{C_o} \times 100\% \\ &= \frac{(0,631 - 0,105)}{0,631} \times 100\% \\ &= \frac{0,526}{0,631} \times 100\% = 83,36 \%\end{aligned}$$

Lampiran 3. Hasil uji Laboratorium Sebelum Perlakuan Fitoremediasi



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN,
RISET, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ANDALAS
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
LABORATORIUM AIR
Alamat: Kampus Limau Manis, Padang – Sumatera Barat, Kode Pos 25163

HASIL ANALISIS No : 016/II/IIA-LA/2025
SAMPEL : Tanah dan Tanaman
ANALISIS : Merkuri(Hg)

No	Sampel	Satuan	Hasil Data
1	Tanah alamiah	mg/kg	0,223
2	Tanah tercemar sebelum aklimatisasi	mg/kg	0,631
3	Tanaman teki sebelum aklimatisasi	mg/kg	0,039

Padang, 24 Februari 2025



Tembusan:
1. Arsip



Prodi Sarjana Terakreditasi "Unggul"
SK No. 6093/SK/BAN-PT/Akred-Itl/5/IX/2020
Prodi Magister Terakreditasi "B"
SK No. 3116/SK/BAN-PT/Akred/M/VIII/2019



Engineering
Accreditation
Commission

Terakreditasi ABET (Prodi Sarjana)



Prodi Sarjana
Terakreditasi
IABEE
Sertifikat Akreditasi
No. 00072 A

Lampiran 4. Dokumentasi Penelitian

Gambar	Keterangan
	Observasi awal (Penentuan lokasi titik pengambilan sampel)
	Pengukuran jarak antar titik pengambilan sampel
	Pengukuran <i>ring sampler</i> pengambilan sampel
	Pengeboran titik pengambilan sampel

Gambar	Keterangan
	Pengambilan sampel tanah untuk analisis awal
	Pengambilan sampel tanah
	Proses aklimatisasi tanaman
	Tanah kontrol dan tanah alamiah tanpa perlakuan

Gambar	Keterangan
	Proses fitoremediasi pada tanah tercemar yang ditanami tanaman <i>Cyperus rotundus</i>
	Pengukuran tinggi tanaman selama proses fitoremediasi
	Pengukuran berat tanaman selama proses fitoremediasi

Gambar	Keterangan
	Sampel tanah dan tanaman pada hari ke-14 (F1)
	Sampel tanah dan tanaman pada hari ke-28 (F2)

Lampiran 5. Pengukuran Berat Tanaman dalam 14 Hari

Pengulangan	Berat Tanaman		Dokumentasi
	Awal	Akhir	
X1	19gram	21gram	
X2	19gram	22gram	
X3	19gram	21gram	

Lampiran 6. Pengukuran Berat Tanaman dalam 28 Hari

Pengulangan	Berat Tanaman		Dokumentasi
	Awal	Akhir	
Y1	19gram	29gram	
Y2	19gram	32gram	
Y3	19gram	30gram	

Lampiran 7. Pengukuran Tinggi Tanaman dalam 14 Hari

Pengulangan	Tinggi Tanaman		Dokumentasi
	Awal	Akhir	
X1	20cm	24cm	
X2	20cm	25cm	
X3	20cm	24cm	

Lampiran 8. Pengukuran Tinggi Tanaman Selama 28 Hari

Pengulangan	Tinggi Tanaman		Dokumentasi
	Awal	Akhir	
Y1	20cm	27cm	
Y2	20cm	29cm	
Y3	20cm	29cm	

Lampiran 9. Hasil uji Laboratorium Parameter merkuri selama proses fitoremediasi



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN,
RISET, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ANDALAS
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
LABORATORIUM AIR
Alamat: Kampus Limau Manis, Padang – Sumatera Barat, Kode Pos 25163

HASIL ANALISIS No : 017/II/HA-LA/2025
SAMPEL : Tanah dan Tanaman
ANALISIS : Merkuri(Hg)

No	Sampel	Satuan	Hasil Data
1	Tanah tercemar setelah aklimatisasi	mg/kg	0,312
2	Tanaman teki setelah aklimatisasi	mg/kg	0,121
	Tanah tercemar 14 hari (F1)		
3	X1	mg/kg	0,243
4	X2	mg/kg	0,222
5	X3	mg/kg	0,210
6	TK1	mg/kg	0,631
	Tanah tercemar 28 hari (F2)		
7	Y1	mg/kg	0,113
8	Y2	mg/kg	0,106
9	Y3	mg/kg	0,098
10	TK2	mg/kg	0,631
	Tanaman teki 14 hari (F1)		
11	X1	mg/kg	0,162
12	X2	mg/kg	0,165
13	X3	mg/kg	0,166
	Tanaman teki 28 hari (F2)		
14	Y1	mg/kg	0,189
15	Y2	mg/kg	0,221
16	Y3	mg/kg	0,256

Padang, 24 Februari 2025



Tembusan:
1, Arsip



Prodi Sarjana Terakreditasi "Unggul"
SK No. 6093/SK/BAN-PT/Akred-Itnl/S/IX/2020
Prodi Magister Terakreditasi "B"
SK No. 3116/SK/BAN-PT/Akred/M/VIII/2019



Terakreditasi ABET (Prodi Sarjana)

Engineering
Accreditation
Commission



Prodi Sarjana
Terakreditasi
IABEE
Sertifikat Akreditasi
No. 00072 A

Lampiran 10. Hasil Pengujian Normalitas

Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Standardized Residual for Konsentrasi_Akhir	.236	8	.200 [*]	.954	8	.752

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

Lampiran 11. Hasil Pengujian Homogenitas

Levene's Test of Equality of Error Variances^{a,b}

		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
Konsentrasi_Akhir	Based on Mean	1.776	1	4	.253
	Based on Median	.831	1	4	.414
	Based on Median and with adjusted df	.831	1	2.665	.437
	Based on trimmed mean	1.706	1	4	.262

Tests the null hypothesis that the error variance of the dependent variable is equal across groups.

a. Dependent variable: Konsentrasi_Akhir

b. Design: Intercept + Kelompok + Waktu + Kelompok * Waktu

Lampiran 12. Hasil Pengujian Two-Ways ANOVA

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: Konsentrasi_Akhir

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	.347 ^a	3	.116	689.123	<.,001
Intercept	.951	1	.951	5673.281	<.,001
Kelompok	.325	1	.325	1939.969	<.,001
Waktu	.005	1	.005	31.850	.005
Kelompok * Waktu	.005	1	.005	31.850	.005
Error	.001	4	.000		
Total	.982	8			
Corrected Total	.347	7			

a. R Squared = ,998 (Adjusted R Squared = ,997)