

**Efektivitas Fitoremediasi Genjer (*Limnocharis flava*) dalam Menurunkan
Konsentrasi Logam Besi (Fe) dan Mangan (Mn)
pada Air Asam Tambang Sintetis**

(Skripsi)

Disusun Oleh :

Maudi Abelya Faradiva

2215014043



FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

2026

**Efektivitas Fitoremediasi Genjer (*Limnocharis flava*) dalam Menurunkan
Konsentrasi Logam Besi (Fe) dan Mangan (Mn)
pada Air Asam Tambang Sintetis**

**Oleh
MAUDI ABELYA FARADIVA**

**SKRIPSI
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

**Pada

Prodi Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG**

2026

Judul Skripsi

**: EFEKTIVITAS FITOREMEDIASI GENJER
(*Limnocharis flava*) DALAM MENURUNKAN
KONSENTRASI LOGAM BESI (Fe) DAN
MANGAN (Mn) PADA AIR ASAM TAMBANG
SINTETIS**

Nama Mahasiswa

: Maudi Abelya Faradiva

Nomor Pokok Mahasiswa : 2215014043

Program Studi

: S1 Teknik Lingkungan

Fakultas

: Teknik



MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Rizka Mayasari, S.T., M.T.
NIP 19900328 201903 2 021

Ir. Rosalia Dwi Werena, S.ST., M.Eng.
NIP 19891015 201903 2 015

2. Ketua Jurusan Teknik Sipil

**3. Koordinator Program Studi
Teknik Lingkungan**

Sasana Putra, S.T., M.T.
NIP 19691111 200003 1 002

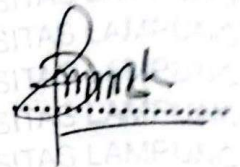
Ir. Amril Ma'ruf Siregar, S.T., M.T.
NIP 19850228 201212 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

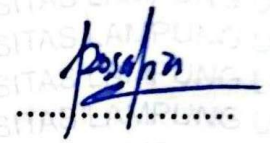
Ketua

: **Rizka Mayasari, S.T., M.T.**



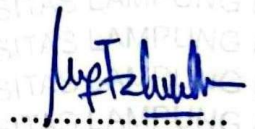
Sekretaris

: **Ir. Rosalia Dwi Werena, S.ST., M.Eng.**



Anggota

: **Miftahul Djana, S.T., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



: **Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.**

NIP. 19691030 200003 1 001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 19 Juni 2026

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : **Maudi Abelya Faradiva**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2215014043**

Judul Skripsi : **Efektivitas Fitoremediasi Genjer (*Limnocharis flava*) dalam Menurunkan Konsentrasi Logam Besi (Fe) dan Mangan (Mn) pada Air Asam Tambang Sintetis**

Program Studi : **S1 Teknik Lingkungan**

Jurusan : **Teknik Sipil**

Fakultas : **Teknik**

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi ini adalah hasil pekerjaan saya sendiri dan semua tulisan yang tertuang dalam skripsi ini telah mengikuti kaidah karya penulisan ilmiah Universitas Lampung

Bandar Lampung, 19 Juni 2026
Penulis,



Maudi Abelya Faradiva

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Maudi Abelya Faradiva, yang akrab disapa Maudi, lahir di Lahat pada tanggal 21 April 2005. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara, putri dari pasangan Bapak Sahrun dan Ibu Heni Susanti. Penulis memiliki seorang kakak laki-laki bernama M. Ronny Syahputra. Penulis tumbuh dan dibesarkan dalam keluarga yang harmonis, dengan dukungan dan kasih sayang dari kedua orang tua yang senantiasa menjadi motivasi dalam menempuh pendidikan.

Penulis memulai perjalanan di TK Kartika II-8 Lahat pada tahun 2010, kemudian menempuh pendidikan dasar di SD Negeri 23 Lahat pada tahun 2011-2017. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 2 Lahat dan lulus pada tahun 2019 dan Pendidikan menengah atas ditempuh di SMA Negeri 1 Lahat dan lulus pada tahun 2022. Pada bulan Juni 2022, penulis diterima sebagai mahasiswa Program Studi S1 Teknik Lingkungan, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN)

Penulis aktif menjalani masa studi dengan 8 semester selama 4 tahun. Pada Januari hingga Februari 2025, penulis mengikuti program Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Setia Bakti, Kecamatan Seputih Banyak, Kabupaten Lampung Tengah, Provinsi Lampung. Pada bulan Juli hingga Agustus 2025, penulis melaksanakan kegiatan Kerja Praktik di PT Bukit Asam Tbk, Tanjung Enim, Sumatera Selatan, pada satuan kerja pengelolaan lingkungan dan penunjang tambang dengan fokus kerja praktik di pengolahan air asam tambang. Penulis mengambil tugas akhir dengan judul “Efektivitas Fitoremediasi Genjer (*Limnocharis flava*) dalam Menurunkan Konsentrasi Logam Besi (Fe) dan Mangan (Mn) pada Air Asam Tambang Sintetis”.

PERSEMBAHAN

Alhamdulillahirabbil'alamin, segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat, taufik, hidayah, serta kemudahan yang senantiasa diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan karya tulis ini.

Dengan penuh rasa syukur, hormat, cinta, dan kasih sayang penulis mempersembahkan karya ini kepada:

Ayahanda tercinta, **Sahrin** dan Ibunda tercinta, **Heni Susanti**. Serta kakak tersayang, **Muhammad Ronny Syahputra**.

yang senantiasa menjadi tempat pulang, sumber kekuatan, serta penyemangat terbesar dalam setiap perjalanan hidup penulis.

Terima kasih atas segala kasih sayang, pengorbanan, dukungan moril maupun materi, serta untaian doa yang tidak pernah terputus. Melalui cinta dan kehangatan yang diberikan, penulis belajar untuk terus berjuang, tidak mudah menyerah, serta senantiasa bersyukur atas setiap nikmat dan kesempatan yang Allah SWT anugerahkan.

MOTTO

فَإِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا

"Maka sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan."

(QS. Al-Insyirah: 6)

لَا يُكَلِّفُ اللَّهُ نَفْسًا إِلَّا وُسْعَهَا

"Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya."

(QS. Al-Baqarah: 286)

"Tak ada yang lebih mulia daripada pengetahuan, dan tak ada yang lebih penting daripada pendidikan."

(R.A. Kartini)

"The future belongs to those who believe in the beauty of their dreams."

(Eleanor Roosevelt)

ABSTRAK

Efektivitas Fitoremediasi Genjer (*Limnocharis flava*) dalam Menurunkan Konsentrasi Logam Besi (Fe) dan Mangan (Mn) pada Air Asam Tambang Sintetis

Oleh

Maudi Abelya Faradiva

Air Asam Tambang (AAT) dicirikan oleh pH rendah serta tingginya konsentrasi logam terlarut seperti besi (Fe), mangan (Mn), dan total padatan tersuspensi (TSS). Pengolahan AAT memerlukan metode yang efektif dan berkelanjutan untuk meningkatkan kualitas air, salah satunya melalui pendekatan fitoremediasi menggunakan tanaman genjer (*Limnocharis flava*).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas tanaman genjer dalam menurunkan konsentrasi Fe, Mn, dan TSS serta meningkatkan pH pada AAT sintetis. Metode yang digunakan adalah eksperimen laboratorium dengan sistem *batch*, menggunakan variasi biomassa 100, 200, dan 300 gram selama 14 hari (hari ke-0, 7, dan 14). Sebelum fitoremediasi, dilakukan pretreatment menggunakan Ca(OH)_2 untuk menyesuaikan pH awal.

Hasil menunjukkan bahwa genjer mampu menurunkan Fe hingga 99,90%, Mn 99,88% pada perlakuan P3 (300 gr), dan TSS 69,86% pada perlakuan P1 (100 gr), serta meningkatkan pH hingga 7,43 pada perlakuan P3 (300 gr) pada hari ke-14. Perbedaan biomassa dan waktu kontak menunjukkan variasi terhadap efektivitas penurunan parameter pencemar. Dengan demikian, genjer berpotensi sebagai agen fitoremediasi yang efektif dan ramah lingkungan dalam pengolahan AAT sintetis, serta mampu menurunkan konsentrasi parameter hingga memenuhi baku mutu sesuai Peraturan Menteri LHK No. 5 Tahun 2022.

Kata kunci: air asam tambang, fitoremediasi, genjer (*Limnocharis flava*), Fe, Mn, TSS, pH.

ABSTRACT

The Effectiveness of Phytoremediation Using Genjer (*Limnocharis flava*) in Reducing Iron (Fe) and Manganese (Mn) Concentrations in Synthetic Acid Mine Drainage

By

Maudi Abelya Faradiva

Acid Mine Drainage (AMD) is characterized by low pH and high concentrations of dissolved metals such as iron (Fe), manganese (Mn), and total suspended solids (TSS). AMD treatment requires effective and sustainable methods to improve water quality, one of which is through a phytoremediation approach using genjer (*Limnocharis flava*).

This study aims to analyze the effectiveness of genjer in reducing the concentrations of Fe, Mn, and TSS and increasing the pH in synthetic AMD. The method used was a laboratory experiment with a batch system, employing biomass variations of 100, 200, and 300 grams over 14 days (days 0, 7, and 14). Prior to phytoremediation, pretreatment was performed using $\text{Ca}(\text{OH})_2$ to adjust the initial pH.

The results showed that genjer was able to reduce Fe by up to 99.90%, Mn by 99.88% in treatment P3 (300 gr), and TSS by 69.86% in treatment P1 (100 gr), as well as increase the pH to 7.43 in treatment P3 (300 gr) on day 14. Differences in biomass and contact time indicated variations in the effectiveness of pollutant parameter reduction. Thus, genjer has the potential to serve as an effective and environmentally friendly phytoremediation agent in the treatment of synthetic AMD, and is capable of reducing pollutant concentrations to meet quality standards in accordance with Ministry of Environment and Forestry Regulation No. 5 of 2022.

Keywords: acid mine drainage, phytoremediation, genjer (*Limnocharis flava*), Fe, Mn, TSS, pH.

SANWACANA

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyusun dan menyelesaikan skripsi yang berjudul “Efektivitas Fitoremediasi Genjer (*Limnocharis flava*) dalam Menurunkan Konsentrasi Logam Besi (Fe) dan Mangan (Mn) pada Air Asam Tambang Sintetis” dengan lancar dan tepat waktu. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan Strata 1 pada Program Studi Teknik Lingkungan, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Dalam penyusunan skripsi ini tentu bukan hasil dari usaha penulis semata. Banyak pihak yang telah memberikan bantuan, dorongan, doa dan semangat selama proses ini berlangsung. Pada kesempatan ini, dengan penuh rasa hormat dan tulus penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., selaku ketua Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung.
2. Bapak Ir. Amril Ma'ruf Siregar, S.T., M.T., IPM selaku koordinator Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Lampung.
3. Ibu Rizka Mayasari, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta motivasi kepada penulis selama proses penyusunan skripsi ini sehingga dapat terselesaikan dengan baik.
4. Ibu Ir. Rosalia Dwi Werena, S.ST., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan saran, dukungan, dan ilmu yang bermanfaat kepada penulis selama proses penyusunan skripsi ini.
5. Ibu Miftahul Djana, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan kritik, saran, dan masukan yang membangun demi skripsi ini.
6. Ibu Tiara, S.ST., M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing dan memberikan arahan serta masukan bagi penulis.
7. Bapak/Ibu dosen serta staf administrasi Program Studi Teknik Lingkungan yang telah memberikan ilmu, bantuan, serta dukungan kepada penulis.

8. Kedua orang tua tercinta, Bapak Sahrin dan Ibu Heni Susanti, S.E., yang selalu memberi doa dan dukungan yang tiada henti hingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.
9. Saudara tercinta, Muhammad Ronny Syahputra dan Diana Ayu Fransiska, yang selalu memberikan dukungan dan semangat kepada penulis.
10. Teman-teman Baleratu Mojang; Clara, Melan, Vera, Vina dan Tasya yang menjadi saksi perjuangan selama masa perkuliahan di perantauan.
11. Teman-teman seperjuangan di Teknik Lingkungan khususnya Dhea, Selvi, dan Sisi yang telah menemani dan menjadi bagian dari setiap proses selama masa perkuliahan sehingga perjalanan ini terasa lebih ringan.
12. Teman-teman masa sekolah penulis, Kuncoro dan Melisa yang telah menjadi bagian dari perjalanan panjang yang begitu berarti bagi penulis.
13. Almamater tercinta, Universitas Lampung serta kota Bandar Lampung yang menjadi saksi bisu dari perjalanan dan proses pendewasaan penulis.
14. Untuk seseorang yang telah hadir dan menjadi bagian dari cerita yang tumbuh bersama perjalanan penulis.
15. Terakhir, untuk diri sendiri yang telah mampu bertahan dan tidak menyerah hingga akhirnya dapat menyelesaikan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Segala keterbatasan dan kekurangan dalam penulisan ini semata-mata karena keterbatasan pengetahuan dan pengalaman penulis. Oleh karena itu, penulis sangat terbuka terhadap segala bentuk kritik dan saran yang membangun demi perbaikan kedepan. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak yang berkepentingan.

Bandar Lampung, 19 Juni 2026
Penulis,

Maudi Abelya Faradiva

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSETUJUAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
SURAT PERNYATAAN	iv
RIWAYAT HIDUP	v
PERSEMBAHAN.....	vi
MOTTO	vii
ABSTRAK	viii
SANWACANA	x
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Batasan Masalah	4
1.4. Tujuan	4
1.5. Manfaat	5
BAB II LANDASAN TEORI	6
2.1. Air Asam Tambang.....	6
2.1.1 Reaksi Pembentukan Air Asam Tambang.....	7
2.1.2 Karakteristik Air Asam Tambang	8
2.1.3 Dampak Air Asam Tambang	9
2.2 Logam Berat.....	10
2.2.1 Logam Besi (Fe)	10
2.2.2 Logam Mangan (Mn).....	12
2.3 <i>Potential of Hydrogen</i> (pH)	13
2.4 <i>Total Suspended Solid</i> (TSS)	15

2.5 Kriteria Baku Mutu Air.....	15
2.6 Fitoremediasi.....	16
2.7 Genjer (<i>Limnocharis flava</i>).....	19
2.8 State Of The Art.....	22
2.9 Hipotesis	23
BAB III METODE PENELITIAN	24
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian	24
3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	24
3.3 Desain Penelitian	25
3.4 Tahapan Penelitian.....	26
3.4.1 Persiapan Sampel dan Tanaman	26
3.4.2 Pelaksanaan Fitoremediasi.....	27
3.5 Variabel Penelitian.....	27
3.6 Teknik Pengumpulan Data.....	28
3.6.1 Pengujian Parameter Kualitas Air	29
3.6.2 Prosedur Pengumpulan Data.....	29
3.7 Teknik Analisis Data.....	30
3.7.1 Analisis Efektivitas Penurunan Beban Pencemar	30
3.7.2 Analisis Perbandingan Secara Deskriptif Kuantitatif.....	30
3.8 Diagram Alir Penelitian	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1 Uji Fitoremediasi Tanaman Genjer.....	34
4.1.1 Kondisi Awal Air Asam Tambang Sintetis	34
4.1.2 Observasi Visual Selama Proses Fitoremediasi	35
4.2 Perubahan Kualitas Air Selama Fitoremediasi	40
4.2.1 Penurunan Konsentrasi Fe	40
4.2.2 Penurunan Konsentrasi Mn.....	42
4.2.3 Penurunan Konsentrasi TSS	44
4.2.4 Perubahan pH	46
4.3 Efisiensi Penurunan Berdasarkan Beban Pencemar.....	48
4.3.1 Efisiensi Penurunan Logam Fe.....	48
4.3.2 Efisiensi Penurunan Logam Mn	50
4.3.3 Efisiensi Penurunan TSS	52

4.4 Analisis Regresi Linear Berganda.....	55
4.4.1 Parameter Fe.....	55
4.4.2. Parameter Mn	56
4.4.3. Parameter TSS	56
4.4.4. Parameter pH.....	57
4.5 Mekanisme Fitoremediasi oleh Tanaman Genjer	58
BAB V PENUTUP	60
5.1 Kesimpulan	60
5.2 Saran	60
DAFTAR PUSTAKA	62
LAMPIRAN.....	64

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Karakteristik Fisika dan Kimia	11
Tabel 2. 2 Karakteristik Fisik dan Kimia Logam Mangan (Mn)	13
Tabel 2. 3 Kriteria Baku Mutu Air.....	16
Tabel 4. 1 Hasil Pengujian AAT Sintetis	34
Tabel 4. 2 Hasil Observasi Visual Proses Fitoremediasi	35
Tabel 4. 3 Penurunan Konsentrasi Logam Fe	40
Tabel 4. 4 Penurunan Konsentrasi Logam Mn	42
Tabel 4. 5 Penurunan Konsentrasi TSS	44
Tabel 4. 6 Perubahan pH.....	46
Tabel 4. 7 Efisiensi Penurunan Logam Fe	49
Tabel 4. 8 Efisiensi Penurunan Logam Mn.....	50
Tabel 4. 9 Efisiensi Penurunan TSS.....	52

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Dampak AAT bagi lingkungan	9
<i>Gambar 2. 2 Logam Besi (Fe)</i>	10
Gambar 2. 3 Logam Mangan (Mn)	12
Gambar 2. 4 pH Meter	14
Gambar 2. 5 Total Suspended Solid (TSS)	15
Gambar 2. 6 Fitoekstraksi	17
Gambar 2. 7 Fitostabilisasi.....	17
Gambar 2. 8 Fitovolati	18
Gambar 2. 9 Fitodegradasi	18
Gambar 2. 10 Rhizofiltrasi	19
Gambar 2. 11 Tanaman Genjer	20
Gambar 2. 12 State Of The Art	22
Gambar 3. 1 Desain Penelitian.....	25
Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian	31
Gambar 4. 1 Grafik Penurunan Konsentrasi Logam Fe.....	41
Gambar 4. 2 Grafik Penurunan Konsentrasi Logam Mn	43
Gambar 4. 3 Grafik Penurunan Konsentrasi TSS	44
Gambar 4. 4 Grafik Perubahan Nilai pH.....	47
Gambar 4. 5 Grafik Efisiensi Penurunan Logam Fe.....	49
Gambar 4. 6 Grafik Efisiensi Penurunan Logam Mn	51
Gambar 4. 7 Grafik Efisiensi Penurunan TSS	53

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Proses Aklimatisasi, Pengukuran Biomassa dan Pengecekan pH ...	65
Lampiran 2. Perhitungan Perkiraan Dosis AAT Sintetis.....	66
Lampiran 3. Perhitungan Efisiensi Penurunan Logam Fe, Mn dan TSS.....	68
Lampiran 4. Regresi Linear Berganda.....	73
Lampiran 5. Hasil Pengujian Logam Fe dan Mn	74
Lampiran 6. Hasil Pengujian TSS.....	76
Lampiran 7. Lembar Asistensi Pembimbing.....	77

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pertambangan merupakan suatu bidang usaha yang memberikan manfaat bagi peningkatan ekonomi negara, juga berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Salah satu dampak yang umum terjadi adalah terbentuknya air limpasan permukaan (*surface runoff*), yaitu air hujan yang tidak meresap ke dalam tanah dan mengalir di atas permukaan lahan bekas tambang, maupun area *stockpile* dan membawa partikel tersuspensi, sisa material batubara, logam berat, serta senyawa kimia yang terdapat di permukaan lahan tambang. Ketika air tersebut bersinggungan dengan batuan yang mengandung mineral sulfida seperti pirit (FeS_2), akan terjadi reaksi oksidasi yang menghasilkan air asam tambang (*acid mine drainage*), yang dicirikan oleh pH rendah serta kandungan logam terlarut seperti besi (Fe), mangan (Mn), dan total padatan tersuspensi (TSS) yang berpotensi mencemari badan air apabila dibuang tanpa pengolahan (Hidayat, 2017). Proses pembentukan air asam tambang diawali dengan reaksi pirit dengan oksigen dan air yang menghasilkan ion besi ferro (Fe^{2+}), kemudian teroksidasi menjadi besi ferri (Fe^{3+}) dan selanjutnya terhidrolisis membentuk endapan FeOOH disertai pelepasan ion hidrogen (H^+) yang meningkatkan keasaman. Selain itu, aktivitas mikroorganisme turut mempercepat oksidasi mineral sulfida. Ion mangan (Mn^{2+}) dalam air juga dapat teroksidasi menjadi mangan oksihidroksida (MnOOH), yang menghasilkan ion hidrogen tambahan sehingga memperparah kondisi keasaman air (Kusdarini, 2024).

Logam besi (Fe) dan mangan (Mn) merupakan logam yang dominan terkandung dalam air asam tambang. Pada kondisi tertentu AAT dapat mengandung kadar logam Fe 9,1 mg/L dan Mn 6,4 mg/L, pH 4,28 disertai dengan *Total Suspended Solid* (TSS) sebesar 377 mg/L. Apabila konsentrasinya melebihi baku mutu yang telah ditetapkan, kondisi ini dapat membahayakan lingkungan serta masyarakat di sekitar lokasi pertambangan. Selain itu,

terbentuknya air asam tambang akibat proses oksidasi pirit juga berkontribusi terhadap penurunan kualitas air permukaan secara signifikan.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, berbagai metode konvensional telah diterapkan, salah satunya melalui proses netralisasi atau alkalisasi kimia. Proses ini bertujuan untuk menaikkan pH dan mengendapkan logam terlarut dengan menambahkan bahan bersifat basa seperti natrium hidroksida (NaOH), kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), atau batu kapur (CaCO_3). Penambahan bahan kimia secara luas digunakan karena mampu menetralkan keasaman dan mengendapkan logam berat dalam bentuk hidroksida seperti $\text{Fe}(\text{OH})_3$ dan $\text{Mn}(\text{OH})_2$. Sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan, metode fitoremediasi mulai banyak dikembangkan.

Fitoremediasi merupakan proses pengolahan yang memanfaatkan tanaman air untuk menyerap, menstabilkan, atau mengendapkan logam berat secara alami. Berbagai penelitian sebelumnya telah menggunakan jenis tanaman seperti eceng gondok (*Eichhornia crassipes*), kangkung air (*Ipomoea aquatica*), kiambang (*Salvinia molesta*) serta genjer (*Limnocharis flava*) dalam pengolahan air limbah tambang. Namun demikian, tanaman seperti eceng gondok cenderung memiliki pertumbuhan yang sangat cepat (invasif) sehingga sulit dikontrol dan dapat menutupi permukaan air secara berlebihan. Tanaman kangkung air dan kiambang juga memiliki keterbatasan karena sensitif terhadap logam berat, sehingga efisiensi penyerapannya menurun pada air dengan kandungan Fe dan Mn tinggi.

Berbeda dengan tanaman-tanaman tersebut, genjer (*Limnocharis flava*) memiliki beberapa keunggulan, antara lain tahan pada pH rendah kisaran 4-6, mampu bertahan di air tercemar, serta memiliki sistem perakaran yang luas yang membantu proses penyerapan logam. Penelitian oleh Yustika dkk (2022) membuktikan bahwa tanaman Genjer sangat efektif dalam menurunkan kadar logam berat pada air limbah pertambangan emas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar besi (Fe) menurun dari 866,7 mg/L menjadi 7,211 mg/L dengan efektivitas 99,168%, sedangkan kadar mangan (Mn) menurun dari 206,83 mg/L menjadi 62,295 mg/L dengan efektivitas 68,24%. Efektivitas tinggi ini

menunjukkan bahwa fitoremediasi dengan tanaman genjer mampu memperbaiki kualitas air secara signifikan.

Dengan mempertimbangkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menentukan efektivitas fitoremediasi menggunakan tanaman genjer (*Limnocharis flava*) dalam menurunkan konsentrasi logam Fe dan Mn pada air asam tambang sintesis. Dalam pengolahan air limbah tambang, acuan baku mutu yang digunakan adalah Permen LHK RI Nomor 5 Tahun 2022 Lampiran II (Batubara) yang mensyaratkan pH 6–9, Fe maksimum 7 mg/L, Mn maksimum 4 mg/L dan TSS 400 mg/L. Berdasarkan uraian sebelumnya, tanaman genjer (*Limnocharis flava*) memiliki kemampuan dalam menyerap logam Fe dan Mn. Meskipun beberapa penelitian telah mengkaji efektivitas genjer dalam menurunkan logam berat pada limbah pertambangan, kajian yang secara khusus mengevaluasi efektivitas genjer pada air asam tambang batubara sintesis dengan kombinasi *pretreatment* pH serta variasi biomassa dalam sistem *batch* terkontrol masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengisi kekosongan tersebut.

Peneliti melakukan penelitian berjudul “Efektivitas Fitoremediasi Genjer (*Limnocharis flava*) dalam Menurunkan Konsentrasi Logam Besi (Fe) dan Mangan (Mn) pada Air Asam Tambang Sintesis” untuk menentukan efektivitas tanaman genjer dalam menurunkan logam Fe dan Mn serta mengetahui kemampuannya dalam memperbaiki kualitas air secara alami, efisien, dan berkelanjutan.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana efektivitas tanaman genjer (*Limnocharis flava*) dalam menurunkan konsentrasi logam Fe, Mn dan TSS pada air asam tambang sintesis?
2. Bagaimana pengaruh lama waktu kontak antara tanaman genjer (*Limnocharis flava*) dengan air asam tambang sintesis terhadap efektivitas penyerapan logam Fe dan Mn?

3. Bagaimana kemampuan tanaman genjer (*Limnocharis flava*) dalam mempengaruhi nilai pH air asam tambang sintetis selama proses fitoremediasi?

1.3. Batasan Masalah

Penelitian ini dilakukan dengan batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian difokuskan pada kemampuan tanaman Genjer (*Limnocharis flava*) dalam menurunkan kadar Fe, Mn dan TSS pada air asam tambang sintetis dengan penambahan $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, dan H_2SO_4 98%. Sebelum proses fitoremediasi, sampel melalui tahap *pretreatment* dengan penambahan kapur ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) hingga mencapai kisaran pH ± 5 untuk mengurangi tingkat keasaman yang ekstrem sehingga proses fitoremediasi dapat berlangsung lebih stabil dan optimal.
2. Penelitian dilakukan menggunakan tanaman genjer (*Limnocharis flava*) dengan berat biomassa 100, 200, dan 300 gram basah dan tanaman telah diaklimatisasi selama 7 hari.
3. Dalam penelitian ini, variabel yang dikaji dibatasi sebagai berikut: variabel bebas berupa variasi waktu kontak (0, 7 dan 14 hari), variabel terikat mencakup perubahan konsentrasi Fe, Mn, TSS dan nilai pH selama proses fitoremediasi serta variabel kontrol meliputi penambahan nutrisi yang hanya dilakukan pada proses aklimatisasi dengan menggunakan NPK 10%, dan dengan suhu serta pencahayaan yang diasumsikan seragam.
4. Penelitian dilakukan skala laboratorium dengan sistem *batch* (air diam/tidak mengalir) menggunakan wadah reaktor plastik yang dilakukan pada teras tempat tinggal peneliti.

1.4. Tujuan

Adapun tujuan penelitian sebagai berikut:

1. Menganalisis kemampuan tanaman genjer (*Limnocharis flava*) dalam menurunkan kadar logam Fe, Mn dan TSS pada air asam tambang sintetis.
2. Mengetahui pengaruh lama waktu kontak antara tanaman genjer (*Limnocharis flava*) dan air asam tambang sintetis terhadap efektivitas penyerapan logam Fe dan Mn.

3. Menganalisis kemampuan tanaman genjer (*Limnocharis flava*) dalam mempengaruhi perubahan nilai pH air asam tambang sintetis selama proses fitoremediasi.

1.5. Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Manfaat Teoritis

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam menganalisis, mengetahui, dan memahami kemampuan tanaman Genjer (*Limnocharis flava*) dalam menurunkan konsentrasi logam Fe, Mn, TSS serta meningkatkan nilai pH pada air asam tambang, sehingga dapat memperkaya kajian mengenai mekanisme fitoremediasi pada lingkungan perairan tercemar.

2. Manfaat Praktis

1. Bagi Industri Pertambangan:

Memberikan masukan bagi industri pertambangan mengenai potensi pemanfaatan tanaman genjer (*Limnocharis flava*) sebagai pendukung pengolahan air asam tambang yang ramah lingkungan pada sistem pengolahan pasif.

2. Bagi Pemerintah/Instansi Terkait:

Menyediakan masukan teknis terkait penerapan metode fitoremediasi sebagai bagian dari strategi pengelolaan sehingga dapat mendukung pemenuhan baku mutu air limbah sesuai Permen LHK No. 5 Tahun 2022.

3. Bagi Masyarakat:

Meningkatkan pemahaman mengenai potensi tanaman genjer sebagai tanaman yang dapat memperbaiki kualitas air di daerah terdampak aktivitas pertambangan. Namun, genjer yang digunakan dalam proses fitoremediasi tidak layak untuk dikonsumsi sehingga pemanfaatannya dibatasi hanya untuk tujuan pengelolaan lingkungan.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Air Asam Tambang

Air Asam Tambang (AAT) merepresentasikan salah satu konsekuensi ekologis negatif dari kegiatan eksploitasi mineral, yang berbentuk sebagai air lindi (*leachate*) atau rembesan. Karakteristik umum dari limbah cair ini mengandung konsentrasi logam terlarut seperti besi (Fe), mangan (Mn), cadmium (Cd), aluminium (Al), sulfat (SO_4^{2-}) dan keasaman tinggi serta konsentrasi oksigen terlarut yang rendah. Meskipun demikian, sifat kimiawi AAT bersifat dinamis dan tidak selalu menonjolkan nilai pH asam, limbah ini dapat memiliki nilai pH yang mendekati netral namun membawa beban padatan tersuspensi (*Suspended Solids*) yang sangat pekat. Pembentukan AAT terjadi karena adanya singkapan batuan pembawa mineral sulfida yang memicu reaksi oksidasi. Rantai reaksi oksidasi tersebut menyebabkan penurunan pH serta multiplikasi kadar senyawa sulfat, yang kemudian terbawa oleh limpasan air permukaan hingga mengikis sekaligus melarutkan logam yang terkandung dalam batuan pascatambang.

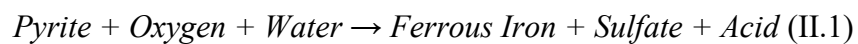
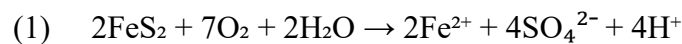
Pada sektor pertambangan batubara, risiko pembentukan senyawa asam utamanya diakibatkan oleh kehadiran mineral sulfida berupa pirit dan markasit. Jika sejumlah besar batuan yang mengandung pirit terpecah atau terpapar akibat kegiatan penambangan, maka pirit akan langsung berinteraksi dengan oksigen dan kelembapan sehingga menghasilkan ion logam, sulfat, dan H^+ yang berujung pada kontaminasi cadangan air tanah maupun badan air permukaan. Air tambang secara geokimia terbagi menjadi 3 kategori, yaitu:

- a. *Acid rock drainage* (AMD) yang dikenal dengan air asam tambang (AAT) ditandai dengan nilai pH lebih kecil dari 6, kandungan sulfat (SO_4^{2-}) dan logam terlarut tinggi.
- b. *Neutral mine drainage* (NMD) ditandai dengan nilai pH lebih besar dari 6 dengan kecenderungan kandungan sulfat dan logam terlarut rendah hingga sedang.

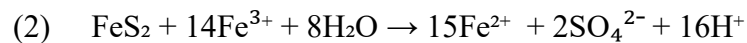
- c. *Saline drainage* (SD) ditandai dengan nilai pH lebih besar dari 6 dengan kandungan sulfat lebih tinggi dari NMD, dan logam terlarut rendah. (Agustian., 2024)

2.1.1 Reaksi Pembentukan Air Asam Tambang

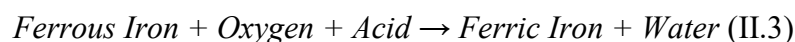
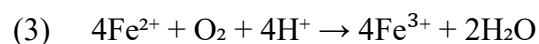
Mekanisme pembentukan AAT berlangsung melalui serangkaian tahapan reaksi kimia dengan degradasi mineral pirit sebagai pemicu utamanya. Kontak langsung antara mineral pirit dengan oksigen membentuk Fe^{2+} dan secara stoikiometri melepaskan dua mol keasaman. Terjadinya reaksi awal tersebut dapat terjadi secara abiotik maupun dipengaruhi oleh aktivitas metabolisme mikroorganisme spesifik secara biotik (Qurniawan., 2020)



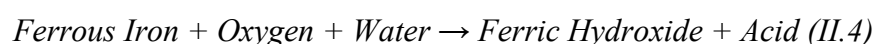
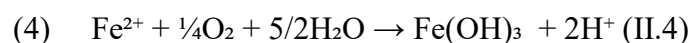
Siklus berikutnya merupakan proses oksidasi pirit akibat paparan ion ferri. Keterlibatan ion ferri mempercepat reaksi hingga 2 sampai 3 kali dibandingkan oksidasi yang dilakukan oleh oksigen dan menghasilkan jumlah mol keasamaan yang lebih banyak per mol pirit. reaksi ini hanya terjadi pada kondisi asam.



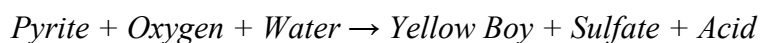
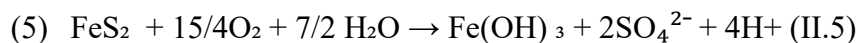
Kehadiran ion ferri (Fe^{3+}) merupakan produk konversi ion ferro (Fe^{2+}) yang terbentuk dari persamaan II.1 dan mengonsumsi satu mol keasamaan sebagaimana reaksi di bawah. Pada reaksi tersebut dapat dilihat bahwa untuk mengoksidasi ion ferro menjadi ferri diperlukan kehadiran oksigen.



Ion ferri yang dihasilkan pada reaksi (II.3) berpeluang mengalami kombinasi proses oksidasi dan hidrolisis lanjutan hingga memicu presipitasi ferri hidroksida. Pembentukan endapan ferri hidroksida lebih banyak pada pH diatas 3,5.



Gabungan dari keseluruhan reaksi (II.1) hingga (II.4) menghasilkan persamaan stoikiometri total dari oksidasi mineral pirit sebagai representasi umum dari mekanisme pembentukan utama AAT:



2.1.2 Karakteristik Air Asam Tambang

Beberapa limpasan air yang mengalir dari kegiatan penambangan, pengolahan air sisa tambang, dam tailing, ataupun pond akan bersifat asam. Secara umum, indikator yang paling mudah diamati di lapangan untuk mengidentifikasi keberadaan AAT meliputi karakteristik fisik, kimia, dan biologi (Arifwati., 2018)

- Karakteristik Fisika

AAT biasanya berwarna variasi kuning-merah-coklat yang disebabkan oleh kehadiran partikel besi hidroksida tersuspensi. Presipitasi besi-kaya solid (seperti *yellow boy*) yang menutupi aliran air. Kehadiran variasi warna kuning-merah-coklat di dasar aliran air, merupakan indikasi bahwa proses pembentukan AAT sedang berlangsung.

- Karakteristik Kimia

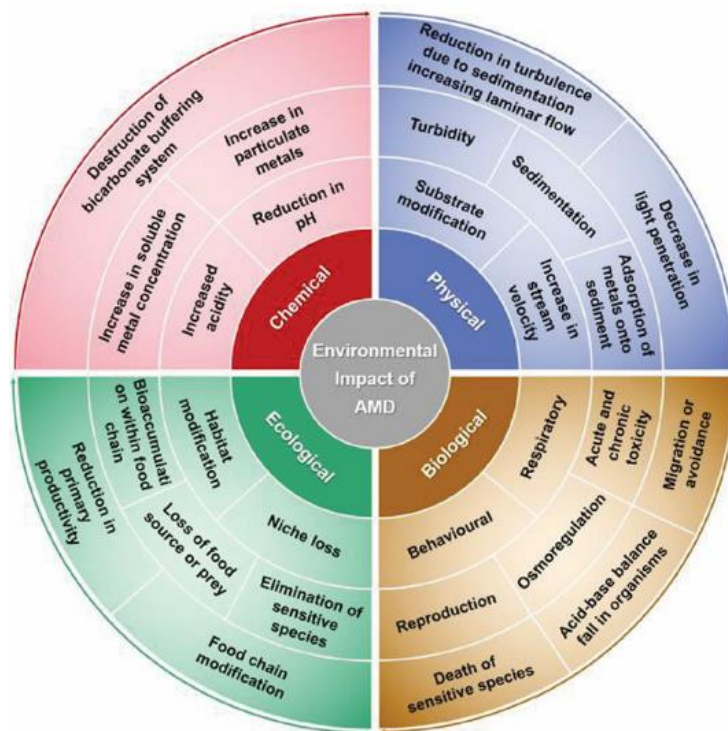
Karakteristik kimia dapat dilihat dari pH yang kurang dari 5,5. Kebanyakan air permukaan bersifat sedikit asam (pH mencapai 5,6) yang disebabkan oleh hubungan atmosfer yang mengandung karbon dioksida di air sehingga menghasilkan asam karbonat. Ketika pH air kurang dari 5,5 maka asamnya itu berasal dari oksidasi mineral sulfida.

- Karakteristik Biologi

AAT yang mempunyai pH rendah mengandung logam berat, metalloid, sulfat, dan *total dissolved Solid* (TDS) yang tinggi. Hal ini menyebabkan degradasi dan ketidakhadiran dari hewan dan tumbuhan yang hidup di air. Bahkan dapat menimbulkan kehadiran alga dan bakteri slimmes. Variasi level AAT akan menyebabkan pertumbuhan alga, serta air asam akan menimbulkan aliran alga yang berwarna hijau atau coklat.

2.1.3 Dampak Air Asam Tambang

Keasaman dan kromatisitas AAT yang melebihi standar pembuangan air limbah industri, dan disertai dengan polutan seperti logam berat telah menyebabkan masalah pencemaran lingkungan yang serius. Dampak lingkungan AAT dapat dikelompokkan menjadi empat kategori: kimia (seperti peningkatan keasaman dan logam di lingkungan), fisik (seperti berkurangnya penetrasi cahaya di kolom air sekitarnya), biologis (seperti perilaku, pernapasan, cacat reproduksi, dan kematian organisme) dan ekologis (seperti perubahan rantai makanan dan habitat, hilangnya sumber makanan/mangsa) seperti yang dirinci dalam Gambar 2.1 (Agustian., 2024).



Gambar 2. 1 Dampak AAT bagi lingkungan

Sumber: Agustian, 2024

2.2 Logam Berat

Logam berat umumnya bersifat mengkilap, dapat dileburkan, tidak tembus pandang, serta bertindak sebagai konduktor termal. Logam berat didefinisikan melalui kepadatan massa yang melebihi 5 gr/cm^3 dan dapat mencemari lingkungan baik udara, tanah, dan air apabila konsentrasinya melebihi ambang batas (Rustam., 2023).

2.2.1 Logam Besi (Fe)

Besi (Fe) merupakan salah satu unsur makro kimiawi yang terdistribusi secara luas di kerak bumi, serta dapat dijumpai di hampir semua badan air akibat kelarutannya yang meningkat pada kondisi pH rendah. Besi di dalam air umumnya terbagi menjadi dua fase terlarut utama, yaitu besi valensi dua (II) atau besi valensi tiga (III). Besi berada dalam tanah dan batuan sebagai besi(III) oksida (Fe_2O_3) dan besi(III) hidroksida ($\text{Fe}(\text{OH})_3$). Pada air, besi berbentuk besi(II) bikarbonat ($\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$), besi(II) hidroksida ($\text{Fe}(\text{OH})_2$), besi(II) sulfat (FeSO_4), dan kompleks organik besi. Apabila air dari dalam tanah dieksploitasi ke permukaan sehingga terpapar oleh oksigen bebas di atmosfer, ion besi(II) terlarut akan mengalami oksidasi spontan menjadi senyawa besi(III) hidroksida ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) yang secara visual memberikan kontaminasi warna kuning kecoklatan pada air (Zahrah., 2021).

Keberadaan efluen industri yang membawa kontaminan memicu efek ekotoksikologi bagi vegetasi, fauna dan mengancam kesehatan manusia karena berkorelasi erat dengan karakteristik dari logam berat yang resisten terhadap proses degradasi biologis (Wulandari.,2023).



Gambar 2. 2 Logam Besi (Fe)

Sumber: *Geologyscience.com*

Secara umum, karakteristik fisik dan kimia dari logam besi (Fe) ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 2. 1 Karakteristik Fisika dan Kimia

Kategori	Properti	Deskripsi / Nilai
Sifat Fisik	Fase	Padat
	Warna	Putih keperakan (metalik)
	Titik Leleh	1.538 °C
	Titik Didih	2.862 °C
	Massa Jenis	7,874 g/cm ³
	Kemagnetan	Feromagnetik (magnet kuat)
	Konduktivitas	Tinggi (penghantar panas & listrik)
	Mekanik	<i>Ductile</i> (liat) dan <i>malleable</i>
Sifat Kimia	Simbol / Nomor Atom	Fe / 26
	Massa Atom Standar	55,845 u
	Bilangan Oksidasi	+2 (Fero), +3 (Feri) paling umum
	Reaktivitas Utama	Mudah teroksidasi di udara lembap
	Reaksi Asam	Larut dalam asam encer, menghasilkan gas H ₂
	Elektronegativitas	1,83 (Skala Pauling)
	Konfigurasi Elektron	[Ar] 3d ⁶ 4s ²

Sumber: Penulis

2.2.2 Logam Mangan (Mn)

Mangan (Mn) diklasifikasikan sebagai unsur kimia yang tergolong dalam kelompok logam transisi. Umumnya dijumpai dalam bentuk senyawa seperti pirolusit (MnO_2) dan manganit ($\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Mangan dalam air berbentuk mangan (II) bikarbonat ($\text{Mn}(\text{HCO}_3)_2$), mangan (II) klorida (MnCl_2), dan mangan (II) sulfat (MnSO_4). Apabila kondisi lingkungan cenderung basa disertai dengan kondisi aerobik yang kaya oksigen, akan membentuk senyawa tidak larut seperti MnO_2 , Mn_3O_4 , atau MnCO_3 , meskipun laju oksidasi dari mangan(II) relatif lambat. Dari aspek karakteristik fisik material, mangan memiliki densitas yang sangat keras namun bersifat sangat rapuh (*brittle*), menunjukkan resistensi tinggi untuk dilebur atau disatukan dengan unsur lain, akan tetapi sangat reaktif dan mudah mengalami proses oksidasi. Dalam ekosistem perairan, Mn berlebih dapat bersifat toksik bagi organisme akuatik sehingga menurunkan keanekaragaman hayati. Pada tanah disekitar area tambang, akumulasi Mn dapat mengganggu pertumbuhan tanaman dan merusak struktur tanah. Secara tidak langsung, Mn yang terbawa ke sungai dapat mempengaruhi kesehatan manusia jika masuk kedalam air sehingga dapat menimbulkan gangguan kesehatan dan dapat menyebabkan keracunan (Zahrah., 2021).



Gambar 2. 3 Logam Mangan (Mn)

Sumber: *Geologyscience.com*

Secara umum, karakteristik fisik dan kimia dari logam mangan (Mn) ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 2. 2 Karakteristik Fisik dan Kimia Logam Mangan (Mn)

Kategori	Properti	Deskripsi / Nilai
Sifat Fisik	Fase	Padat
	Warna	Abu-abu perak (kadang tampak rona merah muda)
	Titik Leleh	1.246 °C
	Titik Didih	2.061 °C
	Massa Jenis (Densitas)	7,44 g/cm ³
	Kekerasan	Sangat keras (Skala Mohs: 6,0)
	Sifat Mekanik	Sangat rapuh (mudah pecah/retak)
	Kemagnetan	Paramagnetik (ditarik lemah oleh magnet)
Sifat Kimia	Simbol / Nomor Atom	Mn / 25
	Massa Atom Standar	54,938 u
	Bilangan Oksidasi	+2, +3, +4, +6, +7 (paling stabil: +2)
	Konfigurasi Elektron	[Ar] 3d ⁵ 4s ²
	Reaktivitas Udara	Memudar perlahan dan membentuk oksida
	Reaktivitas Asam	Larut dalam asam encer menghasilkan gas H ₂
	Elektronegativitas	1,55 (Skala Pauling)

Sumber: Penulis

2.3 Potential of Hydrogen (pH)

pH atau derajat keasaman merupakan representasi dari aktivitas ion hidrogen (H⁺) di dalam suatu larutan yang menentukan sifat asam atau basa. Menurut Tiwari dan Mahalpure (2022), konsep pH diperkenalkan untuk menyederhanakan rentang konsentrasi ion hidrogen yang sangat luas ke dalam

skala logaritmik yang lebih praktis, yaitu antara 0 hingga 14. Secara matematis, nilai pH dirumuskan sebagai $pH = -\log[H^+]$, di mana perubahan satu unit pada skala pH menunjukkan perubahan sepuluh kali lipat dalam konsentrasi ion hidrogen. Oleh karena itu, pengendalian parameter pH menjadi sangat sensitif dan krusial dalam berbagai reaksi kimia maupun sistem biologis.

pH merupakan konsep kunci dalam kimia dan memiliki peran penting di berbagai bidang ilmiah, termasuk biokimia, biologi, pertanian, dan ilmu lingkungan. Dalam konteks ilmu lingkungan, nilai pH sangat memengaruhi kelarutan, mobilitas, dan ketersediaan hayati unsur kimia di dalam air, sehingga perubahan pH dapat mengubah perilaku zat pencemar serta memengaruhi stabilitas sistem lingkungan. Oleh karena itu, pemantauan dan pengendalian pH menjadi parameter krusial dalam menjaga keseimbangan reaksi kimia dan proses biologis di lingkungan perairan. Di samping pemanfaatan kertas lakmus konvensional, tingkat keasaman atau kebasaan suatu media cair dapat dianalisis secara lebih presisi mengadopsi instrumen pH meter (Gambar 2.4). Mekanisme kerja instrumen digital ini didasarkan pada prinsip pengukuran beda potensial elektrokimia, konduktivitas listrik, serta aktivitas ionik larutan elektrolit yang diuji.

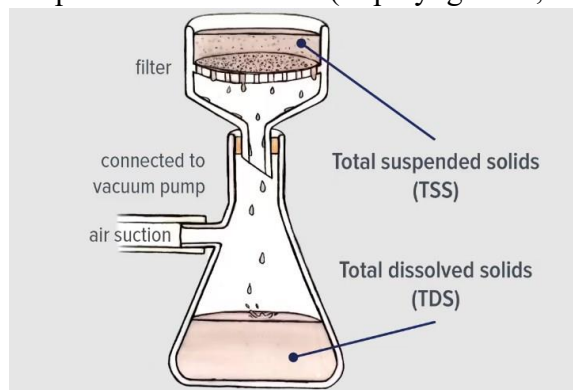


Gambar 2. 4 pH Meter

Sumber: Hanna Indonesia.com

2.4 Total Suspended Solid (TSS)

Total Suspended Solid (TSS) atau Total Padatan Tersuspensi didefinisikan sebagai material partikulat mikro di dalam badan air dengan ukuran diameter $> 1 \mu\text{m}$ serta densitas massa yang relatif lebih rendah jika dibandingkan dengan fraksi sedimen kasar (mudah mengendap). TSS mencakup komponen biotik seperti fitoplankton, zooplankton, fungi dan bakteri sedangkan komponen abiotik mencakup zat detritus, pasir, lumpur, dan lempung. TSS bertindak sebagai laju sedimentasi awal yang berpotensi membatasi kemampuan produktivitas organisme dan tempat terjadinya interaksi reaksi-reaksi kimia berskala heterogen. TSS diukur dalam satuan miligram per liter (mg/L) yang apabila terlalu tinggi berisiko merusak kualitas air (keruh, bau dan perubahan rasa), penurunan kelarutan gas oksigen terlarut (*Dissolved Oxygen/DO*), dan meningkatkan risiko pertumbuhan bakteri (Suprayogi dkk.,2024).



Gambar 2. 5 Total Suspended Solid (TSS)

Sumber: Sentra Kalibrasi Industri.com

2.5 Kriteria Baku Mutu Air

Baku mutu air merupakan ukuran batas kadar makhluk hidup, zat, energi atau komponen yang ada atau unsur pencemar yang ditenggang keberadaannya dalam air agar kualitas air tetap terjaga. Setiap kegiatan yang menghasilkan limbah cair yang dibuang ke perairan harus memenuhi standar baku mutu, sehingga kerusakan air atau pencemaran air sungai dapat dihindari atau dikendalikan. Peraturan Menteri LHK No. 5 Tahun 2022 Lampiran II (Batubara), menjadi acuan pada pengelolaan air asam tambang dan ketentuannya dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 2. 3 Kriteria Baku Mutu Air

Parameter	Satuan	Baku Mutu Lingkungan
pH	-	6-9
TSS	mg/L	400
Fe	mg/L	7
Mn	mg/L	4

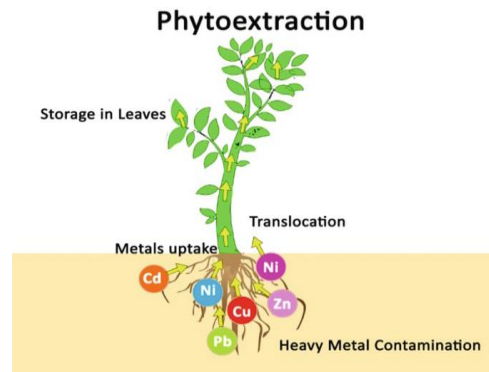
Sumber: PerMen LHK No. 5 Tahun 2022

2.6 Fitoremediasi

Istilah fitoremediasi berasal dari mengombinasikan dua kata yaitu “*phyto*” yang berarti tumbuhan dan “*remedium*” berarti memperbaiki. Fitoremediasi diartikan sebagai rekayasa pemanfaatan biomassa tanaman untuk mengeliminasi, mentransformasikan, atau mengurai polutan baik berupa logam berat toksik maupun polutan organik yang mencemari tanah dan air. Tumbuhan mendemonstrasikan kinerja fisiologis yang andal dalam mengasimilasi pencemar dari tempat tumbuhnya sekaligus mereduksi level toksisitas dari kontaminan yang telah diabsorpsi melalui berbagai mekanisme (Asrul.,2022). Terdapat beberapa tahapan yang terjadi dalam fitoproses tanaman sebagai berikut:

1. Fitoekstraksi

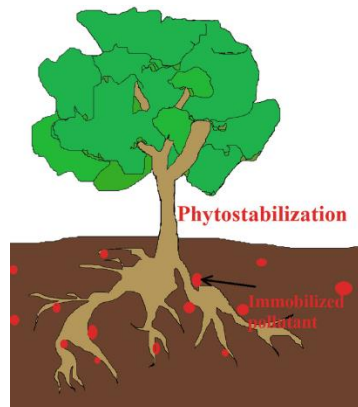
Fitoekstraksi mengacu pada mekanisme penyerapan senyawa pencemar dari tanah atau air oleh akar tanaman serta proses translokasi serta bioakumulasi kontaminan pada jaringan di atas permukaan tanah, seperti batang, tajuk, dan daun. Pada mekanisme ini, logam yang telah diserap oleh akar akan ditransportasikan ke batang dan daun tanaman melalui jaringan xilem.



Gambar 2. 6 Fitoekstraksi
Sumber: Inamuddin (2020)

2. Fitostabilisasi atau fitomobilisasi

Fitostabilisasi yang juga dikenal sebagai fitomobilisasi merujuk pada pemanfaatan spesies tumbuhan spesifik guna menstabilkan bahan pencemar dalam tanah dengan meminimalkan mobilitas serta menekan ketersediaan hayati dari polutan. Melalui pembatasan pergerakan polutan dapat memutus jalur akumulasi zat toksik ke dalam ekosistem sekitar.

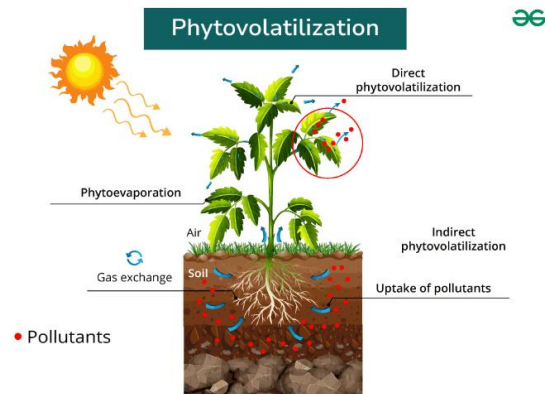


Gambar 2. 7 Fitostabilisasi

Sumber: Sophia, S., dan hetty K.V. (2020)

3. Fitovolatilisasi

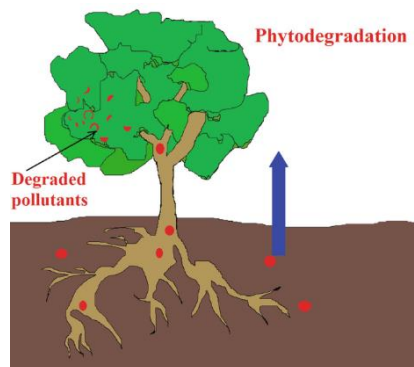
Fitovolatilisasi adalah penggunaan tumbuhan untuk menyerap unsur beracun dan kemudian mengkonversi dan melepaskannya dalam bentuk kurang beracun ke atmosfer, menyerap unsur logam yang mudah menguap dari dalam tanah dan menguapkannya ke daun



Gambar 2. 8 Fitovolatilisasi
Sumber: *GeeksforGeeks* (2023)

4. Fitodegradasi

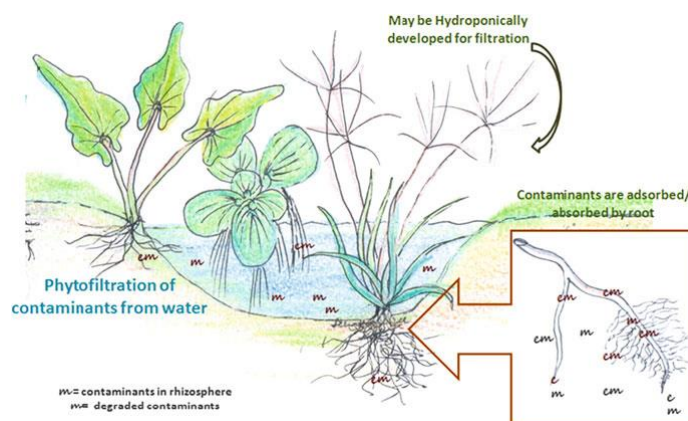
Fitodegradasi merepresentasikan proses pemutusan rantai senyawa polutan organik dalam jaringan tumbuhan dengan bantuan enzim dehalogenase dan oksigenase dan tidak bergantung pada interaksi aktivitas mikroorganisme pada zona perakaran.



Gambar 2. 9 Fitodegradasi
Sumber: Sophia, S., dan hetty K.V. (2020)

5. Rhizofiltrasi

Mekanisme rhizofiltrasi bertumpu pada akar tumbuhan untuk menyaring kontaminan dan difokuskan untuk mengadsorpsi serta mengendapkan logam terutama dari air, tanah, maupun air limbah. Tumbuhan yang digunakan tidak ditanam langsung tetapi di aklimatisasi lebih dulu untuk menyesuaikan kondisi lingkungan yang tercemar.



Gambar 2. 10 Rhizofiltrasi
Sumber: Datta dkk (2013)

Berdasarkan karakteristik tanaman air, mekanisme fitoremediasi yang dominan terjadi pada tanaman air seperti *Limnocharis flava* adalah rhizofiltrasi dan fitoekstraksi. Rhizofiltrasi terjadi melalui proses penyerapan dan adsorpsi logam oleh akar tanaman secara langsung dari media air, sedangkan fitoekstraksi terjadi ketika logam yang telah diserap oleh akar ditranslokasikan dan diakumulasikan ke jaringan tanaman bagian atas. Pada kondisi tertentu, akumulasi logam yang berlebihan dapat menyebabkan gangguan fisiologis pada tanaman seperti klorosis, layu, dan penurunan pertumbuhan.

Nilai plus dari implementasi teknologi fitoremediasi adalah dapat bekerja pada senyawa organik dan anorganik, prosesnya dapat dilakukan secara *insitu* dan *exsitu*, mudah diterapkan, dapat meminimalkan biaya operasional serta mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan yang berwawasan lingkungan (*eco-friendly*).

2.7 Genjer (*Limnocharis flava*)

Tanaman genjer sering dianggap sebagai tanaman gulma, padahal tanaman genjer teridentifikasi sebagai tanaman akumulator terhadap beberapa logam berat. Akar tumbuhan menyerap logam berat dalam bentuk ion-ion yang larut dan protein fitokelatin membantu mengikat logam berat yang masuk ke dalam tubuh tanaman sehingga kandungan logam dalam air limbah dapat dikurangi oleh tanaman genjer. Tanaman genjer dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

Kingdom	: <i>Plantae</i>
Subkingdom	: <i>Tracheobionta</i>
Superdivisi	: <i>Spermatophyta</i>
Divisi	: <i>Magnoliophyta</i>
Kelas	: <i>Liliopsida</i>
Subkelas	: <i>Alismatidae</i>
Ordo	: <i>Alismatales</i>
Famili	: <i>Alismataceae</i>
Genus	: <i>Limnocharis</i>
Spesies	: <i>Limnocharis flava</i>



Gambar 2. 11 Tanaman Genjer
Sumber: Harlani (2017)

Habitat alamiah vegetasi genjer umumnya ditemukan pada kawasan yang tergenang seperti persawahan, rawa, serta parit. Selain itu, tumbuhan ini mengindikasikan kemampuan adaptasi dan pertumbuhan yang optimal pada media air dengan karakteristik derajat keasaman (pH) berkisar antara 4–6 serta temperatur lingkungan pada rentang 25°C–30°C. Struktur morfologi dari genjer dapat diuraikan sebagai berikut:

a. Daun

Genjer memiliki struktur daun lengkap berwarna hijau yang tersusun atas tiga komponen utama, yaitu tangkai daun, pelepah daun, serta helai daun. Morfologi helai daunnya berbentuk elips dengan pola meruncing dan bagian ujung yang tumpul. Ukuran daun genjer yaitu berkisar antara 4 sampai 25 cm dan 5 hingga 50 cm untuk panjang daun.

b. Batang

Berdasarkan karakteristik fisiknya, batang genjer diklasifikasikan ke dalam tipe batang basah (*herbaceus*) akibat tingginya kandungan kadar air dalam jaringannya. Panjang batang berkisar antara 5 hingga 75 cm, penampang batang genjer berbentuk segitiga (*triangularis*) dan memiliki banyak rongga udara (*aerenkim*) di bagian dalam.

d. Akar

Sistem perakaran yang dimiliki oleh tanaman genjer merupakan tipe akar serabut. Dalam sistem fitoremediasi, organ akar pada tumbuhan ini bertindak sebagai agen adsorpsi dan absorpsi utama untuk menyerap unsur hara serta memobilisasi senyawa polutan yang terakumulasi di dasar perairan.

e. Bunga

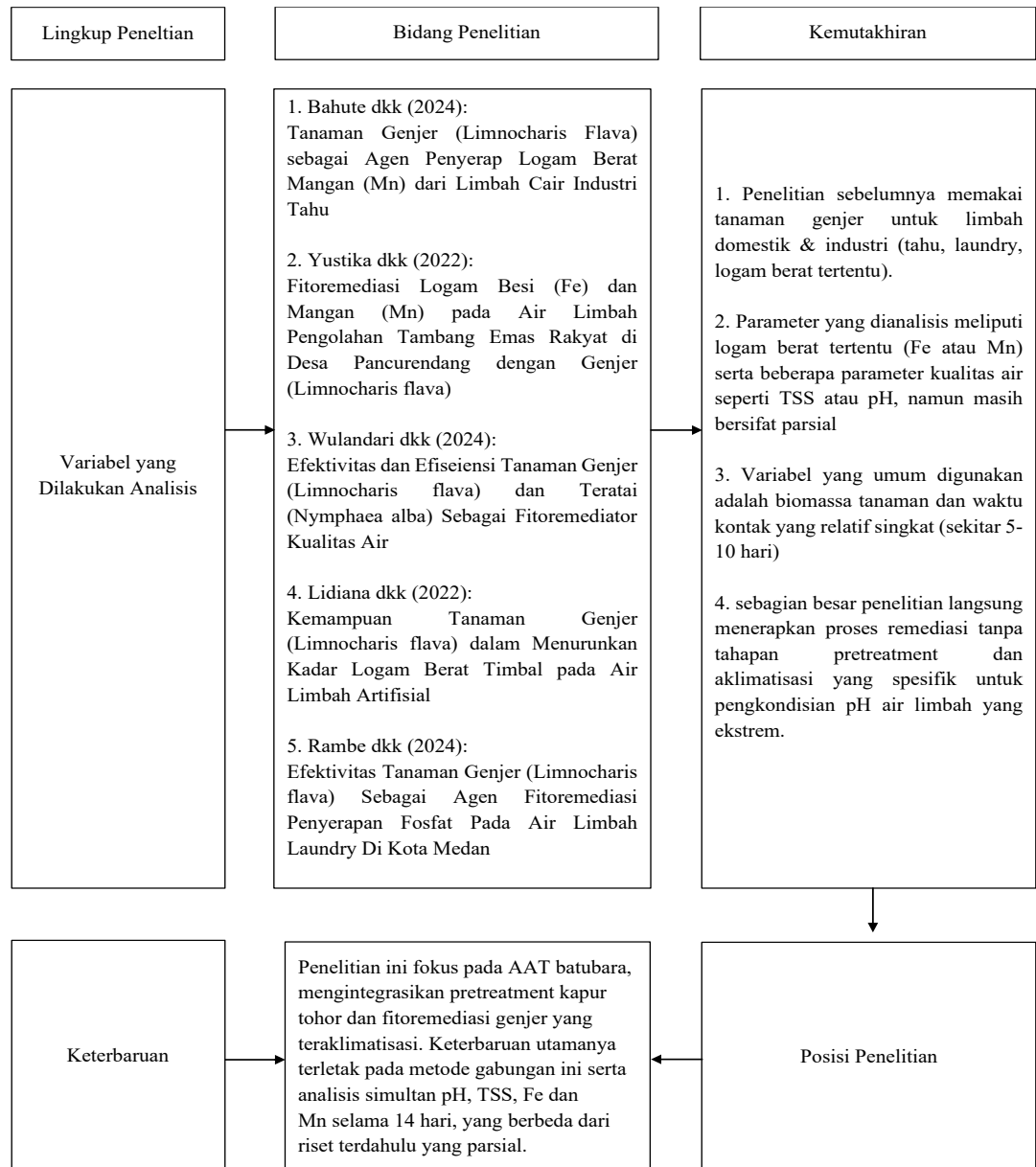
Pertumbuhan perbungaan pada genjer berlangsung di sela pelepah daun. Secara morfologis, formasi bunga berkisar 3 sampai 15 kuntum dan diklasifikasikan dalam kelompok bunga majemuk yang menonjolkan pigmentasi warna kuning cerah dengan panjang bagian tangkai berada pada rentang skala 15 hingga 25 cm.

f. Buah dan biji

Buah genjer dikelompokkan sebagai buah semu. Pada bagian dalam buah, tersimpan struktur biji yang berwarna hitam dengan dimensi ukuran mikro dan bertindak sebagai salah satu media utama dalam menunjang siklus perkembangbiakan genjer di habitat akuatiknya.

Akar serabut yang dimiliki oleh tanaman genjer memiliki manfaat penting dalam proses fitoremediasi air limbah. Sifat akar serabut yang cenderung kecil, ringan, dan rimbun, memudahkan akar untuk mengapung pada permukaan air dan menyebar kesegala arah sehingga akar dapat dengan mudah untuk menyerap kandungan logam berat dengan baik (Lidiana., 2022).

2.8 State Of The Art



Gambar 2. 12 State Of The Art

Sumber: Penulis

Berdasarkan kajian penelitian terdahulu, fitoremediasi menggunakan tanaman genjer telah terbukti mampu menurunkan beberapa parameter pencemar, namun sebagian besar studi masih terbatas pada limbah domestik dan industri ringan, serta hanya menilai satu atau dua parameter kualitas air. Penelitian ini memiliki keunggulan karena mengintegrasikan *pretreatment*

menggunakan kapur dengan fitoremediasi genjer teraklimatisasi, serta menganalisis empat parameter utama (pH, TSS, Fe, dan Mn) secara bersamaan. Pendekatan ini lebih komprehensif dan menghasilkan gambaran yang lebih jelas mengenai efektivitas genjer pada kondisi limbah tambang.

2.9 Hipotesis

Hipotesis dalam penelitian ini disusun berdasarkan kerangka teoritis serta hasil penelitian terdahulu terkait pemanfaatan tanaman genjer (*Limnocharis flava*) dalam proses fitoremediasi. Hipotesis ini merupakan dugaan sementara yang akan dibuktikan melalui pengujian secara eksperimental. Adapun hipotesis yang diajukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- H₁: Tanaman genjer (*Limnocharis flava*) memiliki kemampuan dalam menurunkan konsentrasi logam besi (Fe), mangan (Mn), dan *total suspended solid* (TSS) pada air asam tambang sintetis selama proses fitoremediasi.
- H₂: Lama waktu kontak antara tanaman genjer (*Limnocharis flava*) dan air asam tambang sintetis berkaitan dengan tingkat efektivitas penurunan konsentrasi logam Fe dan Mn, dimana semakin lama waktu kontak maka kecenderungan penurunan konsentrasi logam semakin besar.
- H₃: Proses fitoremediasi menggunakan tanaman genjer (*Limnocharis flava*) menyebabkan terjadinya perubahan nilai pH air asam tambang sintetis selama proses fitoremediasi.

BAB III

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan eksperimen laboratorium dengan metode fitoremediasi sistem *batch* untuk mengkaji kemampuan tanaman genjer (*Limnocharis flava*) dalam menurunkan konsentrasi logam Fe dan Mn serta perubahan nilai pH dan TSS pada air asam tambang sintesis.

3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian akan dilaksanakan dalam beberapa tahap yang berlangsung dari Bulan Februari – Maret 2026. Adapun penelitian ini dilaksanakan di lingkungan tempat tinggal peneliti untuk proses penyusunan dan pemeliharaan reaktor fitoremediasi, serta Laboratorium BSPJI Lampung untuk analisis parameter kualitas air.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Adapun bahan-bahan dan alat-alat yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Alat :

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Bak tertutup berukuran 50 liter untuk membuat AAT sintesis.
2. Reaktor fitoremediasi berupa wadah plastik dengan diameter atas 19,5 cm, diameter bawah 16,5 cm, dan tinggi 19,5 cm, serta memiliki volume maksimum ± 5 liter sebagai tempat perlakuan tanaman dan AAT sintesis.
3. Timbangan digital untuk menimbang variasi biomassa tanaman genjer dan konsentrasi bahan kimia yang digunakan.
4. Gelas ukur, pipet tetes, corong dan botol sampel untuk pengukuran volume dan wadah pengambilan sampel.
5. pH meter untuk memantau dan mengukur derajat keasaman air.
6. Peralatan spesifik laboratorium untuk analisis Fe dan Mn (*Atomic Absorption Spectrophotometry* – AAS) dan TSS (oven atau desikator).
7. Alat pelindung diri (masker dan sarung tangan).

Bahan :

Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Tanaman Genjer (*Limnocharis flava*) 100, 200 dan 300 gram yang telah diaklimatisasi selama 7 hari menggunakan air bersih dan diberi pupuk NPK sebagai sumber nutrisi.
2. Air Asam Tambang Sintetis, dibuat menggunakan perkiraan campuran $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1,785 gr, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0,736 gr, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ 9,19 gr, dan H_2SO_4 98% 0,344 ml.
3. Kapur $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ditambahkan untuk proses *pretreatment* dan dilakukan penambahan sedikit demi sedikit sambil dilakukan pengukuran pH hingga mencapai pH target ± 5 .

3.3 Desain Penelitian

Gambar 3. 1 Desain Penelitian

Sumber: Penulis

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental skala laboratorium dengan Rancangan Acak Lengkap (RAL) melalui metode sampling destruktif. Desain penelitian memanfaatkan sistem *batch* dengan dua rangkaian reaktor yang identik, masing-masing terdiri atas empat perlakuan: kontrol tanpa tanaman, genjer 100, 200 dan 300 gram. Rangkaian pertama (Bak A) digunakan untuk pengambilan sampel pada hari ke-7, sedangkan rangkaian kedua (Bak B) digunakan untuk pengambilan sampel

pada hari ke-14. Pendekatan ini bertujuan untuk menghindari gangguan sistem akibat pengambilan sampel berulang dan memastikan kondisi dan volume air limbah eksperimen tetap stabil. Penelitian ini ditujukan untuk menganalisis hubungan antara variasi biomassa tanaman serta waktu kontak terhadap efektivitas penurunan parameter pencemar pada air asam tambang sintetis, meliputi besi (Fe), mangan (Mn), pH dan total padatan tersuspensi (TSS).

3.4 Tahapan Penelitian

penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan prosedur, diantaranya sebagai berikut :

3.4.1 Persiapan Sampel dan Tanaman

- Persiapan Air Asam Tambang Sintetis
 1. Air asam tambang sintetis dibuat menggunakan penambahan $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1,785 gr, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0,736 gr, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ 9,19 gr, dan H_2SO_4 98% 0,344 ml untuk menyesuaikan karakteristik AAT sesuai kondisi lapangan. Perhitungan kebutuhan bahan untuk pembuatan AAT sintetis terlampir.
 2. Setelah dicampurkan, larutan dihomogenkan hingga seluruh komponen larut sempurna.
 3. Sampel melalui tahap *pretreatment* menggunakan larutan kapur $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hingga pH meningkat pada kisaran ± 5 .
 4. Parameter awal (pH, Fe, Mn, TSS) diukur sebagai nilai dasar sebelum perlakuan fitoremediasi.
 5. Sampel disimpan dalam wadah tertutup untuk mencegah perubahan konsentrasi akibat penguapan atau kontaminasi.
- Aklimatisasi Tanaman Genjer
 1. Tanaman Genjer (*Limnocharis flava*) dipilih dalam kondisi sehat, memiliki daun hijau segar, perakaran baik dan serupa, dan bebas hama.
 2. Aklimatisasi dilakukan dengan merendam tanaman pada air bersih selama 7 hari, dengan tujuan menstabilkan fisiologi tanaman sebelum dimasukkan ke air asam tambang sintetis.

3. Selama aklimatisasi, ditambahkan pupuk NPK sebagai sumber nutrisi untuk mendukung pertumbuhan tanaman serta mencegah stres fisiologis seperti daun menguning, akar busuk, atau pertumbuhan terhambat.
4. Tanaman dengan kondisi abnormal tidak digunakan pada penelitian.
5. Setelah aklimatisasi, berat biomassa awal ditentukan sesuai perlakuan yaitu 100 gr, 200 gr, dan 300 gr kemudian dicatat sebagai data awal.

3.4.2 Pelaksanaan Fitoremediasi

1. Air asam tambang sintetis yang telah dilakukan *pretreatment* dimasukkan ke dalam reaktor berukuran 5 liter berbahan plastik dengan volume 2,5 liter untuk setiap bak.
2. Tanaman genjer dengan variasi biomassa (100 gr, 200 gr, dan 300 gr) dimasukkan ke dalam masing-masing reaktor secara hati-hati agar struktur akar tidak rusak.
3. Penelitian dilakukan menggunakan sistem *batch* (air tidak mengalir), berlangsung selama 14 hari dengan pengamatan pada hari ke-0, ke-7, dan ke-14.
4. Selama periode fitoremediasi, kondisi lingkungan dikontrol meliputi: pH awal reaktor, intensitas cahaya alami, tidak menambahkan nutrisi, tidak menggunakan aerasi untuk menjaga kondisi alami fitoremediasi pasif.
5. Pengambilan sampel dilakukan pada hari ke-0, ke-7, dan ke-14 untuk dianalisis konsentrasi Fe, Mn, TSS, dan nilai pH air.
6. Efektivitas fitoremediasi dihitung dengan membandingkan konsentrasi parameter sebelum dan sesudah perlakuan menggunakan rumus penurunan efisiensi.

3.5 Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini, variabel penelitian diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama, yaitu variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol. Pengelompokan ini dilakukan untuk memastikan bahwa setiap tahap eksperimen dapat berjalan secara sistematis serta menghasilkan data yang valid.

- Variabel bebas dalam penelitian ini adalah variasi perlakuan fitoremediasi menggunakan tanaman genjer (*Limnocharis flava*) dengan variasi jumlah biomassa tanaman. Perlakuan terdiri dari empat variasi, yaitu:

- P0 = kontrol (tanpa tanaman)
- P1 = genjer 100gr
- P2 = genjer 200gr
- P3 = genjer 300gr

Variasi tersebut digunakan untuk mengetahui pengaruh jumlah biomassa tanaman terhadap efektivitas penurunan parameter pencemar dalam air asam tambang sintesis.

- Variabel terikat dalam penelitian ini adalah perubahan kualitas air asam tambang sintesis setelah proses fitoremediasi. Parameter yang diamati meliputi Fe, Mn, pH dan TSS. Parameter ini dipilih karena merupakan karakteristik pencemar utama pada air asam tambang dan menjadi parameter baku mutu menurut regulasi lingkungan. Pengujian dilakukan pada hari ke-0, hari ke-7, dan hari ke-14 untuk melihat efektivitas penurunan masing-masing parameter selama waktu kontak.
- Variabel kontrol adalah faktor-faktor yang dijaga tetap konstan agar tidak mempengaruhi hasil pengujian. Variabel kontrol tersebut meliputi:
 - Volume air asam tambang sintesis pada setiap reaktor (2,5 liter).
 - Waktu kontak fitoremediasi selama 14 hari.
 - Parameter lingkungan pendukung (meliputi suhu, kelembaban, dan kondisi pencahayaan yang relatif seragam).
 - Jenis reaktor yang sama untuk seluruh perlakuan.

3.6 Teknik Pengumpulan Data

Proses pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan yang berkaitan dengan tahap *pretreatment* menggunakan kapur Ca(OH)_2 dan proses fitoremediasi menggunakan tanaman genjer (*Limnocharis flava*). Data dikumpulkan dari hasil pengukuran parameter kualitas air sebelum dan sesudah perlakuan, meliputi konsentrasi logam besi (Fe), mangan (Mn) pH serta *Total Suspended Solid* (TSS). Seluruh pengukuran dilakukan

menggunakan metode dan peralatan yang sesuai dengan standar pengujian kualitas air agar data yang diperoleh akurat dan dapat dibandingkan antarperlakuan.

3.6.1 Pengujian Parameter Kualitas Air

Analisis parameter logam besi (Fe) mangan (Mn) dan *Total Suspended Solid* (TSS) dilakukan oleh pihak Balai Standardisasi dan Pelayanan Jasa Industri (BSPJI) Lampung menggunakan metode *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) untuk Fe dan Mn dan menggunakan metode gravimetri untuk pengukuran TSS sesuai dengan SNI yang berlaku. Sementara itu, pengukuran pH dilakukan secara langsung oleh peneliti menggunakan pH meter dengan cara mencelupkan elektroda pH meter ke dalam sampel air hingga diperoleh nilai pH. Pengukuran pH dilakukan sebelum dan sesudah perlakuan untuk mengetahui perubahan tingkat keasaman air asam tambang sintesis selama proses fitoremediasi.

3.6.2 Prosedur Pengumpulan Data

Prosedur penelitian meliputi sebagai berikut:

1. Data Setelah *Pretreatment*

Setelah dilakukan tahap *pretreatment* pada sampel air asam tambang sintesis dengan penambahan kapur $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hingga pH mencapai kisaran ± 5 , dilakukan pengambilan data awal kualitas air. Pada tahap ini dilakukan pengukuran nilai pH menggunakan pH meter, serta pengambilan sampel air untuk analisis konsentrasi logam besi (Fe), mangan (Mn) dan *Total Suspended Solid* (TSS) di laboratorium.

2. Data Setelah Fitoremediasi

Data selanjutnya dikumpulkan setelah sampel air menjalani proses fitoremediasi menggunakan tanaman genjer (*Limnocharis flava*). Pengambilan data dilakukan sesuai dengan variasi berat biomassa tanaman dan waktu kontak yang telah ditentukan. Pada tahap ini dilakukan pengukuran ulang terhadap pH, TSS, serta konsentrasi logam Fe dan Mn untuk mengetahui perubahan kualitas air akibat proses fitoremediasi. Selain itu, dilakukan pengamatan terhadap kondisi fisik tanaman genjer selama proses

penelitian, meliputi warna daun, tingkat kesegaran, dan adanya gejala kerusakan atau pembusukan tanaman, guna mendukung interpretasi hasil fitoremediasi.

3.7 Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi biomassa tanaman terhadap perubahan kualitas air asam tambang sintetis.

3.7.1 Analisis Efektivitas Penurunan Beban Pencemar

Analisis efektivitas dilakukan untuk mengetahui kemampuan tanaman genjer dalam menurunkan beban pencemar selama proses fitoremediasi. Perhitungan efektivitas didasarkan pada perubahan konsentrasi parameter dari kondisi awal hingga waktu pengamatan tertentu dengan mempertimbangkan volume larutan. Efektivitas penurunan beban pencemar dihitung menggunakan persamaan:

$$E = \frac{(C_0 \times V_0) - (C_t \times V_t)}{C_0 \times V_0} \times 100\%$$

dengan:

E = efektivitas penurunan beban pencemar (%)

C₀ = konsentrasi awal sebelum perlakuan (mg/L)

V₀ = volume awal larutan (L)

C_t = konsentrasi pada waktu ke-t (mg/L)

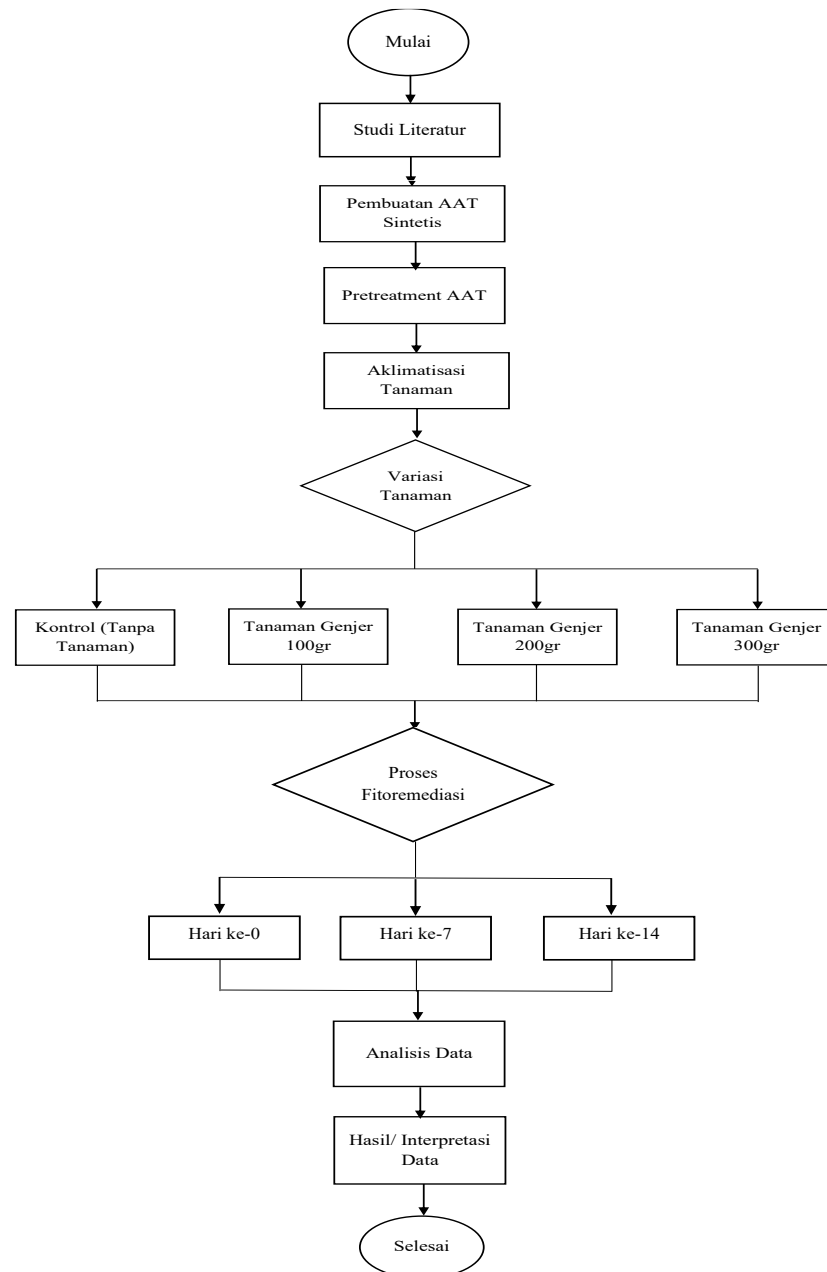
V_t = volume larutan pada waktu ke-t (L)

3.7.2 Analisis Perbandingan Secara Deskriptif Kuantitatif

Setelah nilai persentase penurunan masing-masing parameter dihitung, dilakukan analisis untuk membandingkan efektivitas variasi berat biomassa tanaman genjer dan lama waktu kontak dalam menurunkan konsentrasi pencemar. Perbandingan dilakukan dengan mengamati perubahan nilai konsentrasi masing-masing parameter, persentase efektivitas penurunan, serta kecenderungan perubahan yang terjadi selama waktu kontak. Hasil analisis disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memperjelas pola perubahan yang terjadi, sehingga dapat diketahui hubungan antara biomassa

tanaman dan efektivitas pengolahan. Melalui analisis ini, perlakuan dengan nilai efektivitas tertinggi dapat diidentifikasi sebagai kondisi yang paling optimal, sedangkan reaktor kontrol digunakan sebagai pembanding untuk melihat perubahan kualitas air tanpa perlakuan fitoremediasi.

3.8 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian

1. Studi Literatur

Tahap awal penelitian dimulai dengan studi literatur yang bertujuan untuk memperoleh dasar teoritis dan empiris terkait topik penelitian. Literatur yang dikaji meliputi jurnal ilmiah, buku, peraturan terkait kualitas air, serta hasil penelitian terdahulu yang membahas air asam tambang, mekanisme fitoremediasi, serta potensi tanaman genjer (*Limnocharis flava*) dalam menyerap dan menurunkan kandungan logam berat. Hasil studi literatur digunakan sebagai acuan dalam penyusunan metodologi penelitian, penentuan variabel penelitian, serta perancangan perlakuan dan parameter pengujian.

2. Pembuatan AAT Sintetis

Proses ini dilakukan dengan melarutkan *ferrous sulfate heptahydrate* ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$), *manganese sulfate monohydrate* ($MnSO_4 \cdot H_2O$), *aluminium sulfate octadecahydrate* ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) dan asam sulfat (H_2SO_4) ke dalam air untuk menghasilkan kandungan Fe, Mn, TSS dan pH yang menyerupai karakteristik AAT.

3. Pretreatment AAT Sintetis

Pretreatment dilakukan dengan penambahan kapur $Ca(OH)_2$ untuk menaikkan pH AAT sintetis ke kondisi yang lebih stabil bagi tanaman selama proses fitoremediasi.

4. Aklimatisasi Tanaman

Tanaman genjer (*Limnocharis flava*) dibersihkan dan diaklimatisasi dalam media air bersih selama beberapa hari. Aklimatisasi bertujuan untuk menyesuaikan tanaman terhadap kondisi lingkungan penelitian serta meminimalkan stres fisiologis sebelum digunakan dalam percobaan.

5. Variasi Tanaman

Penelitian menggunakan variasi biomassa tanaman genjer sebagai perlakuan, yaitu 100 gram, 200 gram, dan 300 gram tanaman segar. Variasi ini ditentukan berdasarkan penelitian terdahulu dan pertimbangan rasio antara biomassa tanaman dan volume air yang digunakan.

6. Proses Fitoremediasi

Proses fitoremediasi dilakukan dengan membiarkan tanaman genjer berinteraksi langsung dengan AAT sintetis. Penurunan pencemar terjadi melalui mekanisme rhizofiltrasi dan pengendapan logam pada sistem perakaran tanaman. Pengambilan sampel dilakukan secara destruktif pada Hari ke-0, Hari ke-7, dan Hari ke-14, dimana setiap unit percobaan hanya digunakan untuk satu kali pengambilan sampel.

7. Analisis Data

Parameter kualitas air meliputi Fe, Mn, TSS dan pH dianalisis secara deskriptif dan inferensial untuk mengetahui perubahan kualitas air serta efektivitas variasi biomassa tanaman genjer.

8. Hasil dan Interpretasi Data

Tahap akhir penelitian berupa interpretasi hasil analisis data untuk menarik kesimpulan mengenai pengaruh variasi biomassa tanaman genjer dan lama waktu kontak terhadap efektivitas fitoremediasi AAT sintetis.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pemanfaatan tanaman genjer (*Limnocharis flava*) dalam proses fitoremediasi air asam tambang sintetis, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem fitoremediasi menggunakan genjer (*Limnocharis flava*) menunjukkan efektivitas dalam menurunkan konsentrasi Fe, Mn, dan TSS pada air asam tambang sintetis, dengan efisiensi penurunan yang mencapai 99,90% untuk Fe dan 99,88% untuk Mn pada perlakuan P3 (300 gr genjer) di hari ke-14, serta 69,86% untuk TSS pada perlakuan P1 (100 gr genjer) di hari ke-14. Hasil ini menunjukkan bahwa konsentrasi parameter Fe, Mn, dan TSS setelah perlakuan telah memenuhi baku mutu yang ditetapkan yaitu Fe < 7 mg/L, Mn < 4 mg/L dan TSS < 400 mg/L.
2. Lama waktu kontak (0, 7, dan 14 hari) berpengaruh terhadap penurunan parameter Fe, Mn, dan TSS. Pada perlakuan terbaik (P3) konsentrasi Fe menurun dari 8,32 mg/L pada hari ke-0 menjadi 3,36 mg/L pada hari ke-7 dan 0,01 mg/L di hari ke-14, sedangkan Mn menurun dari 6,76 mg/L menjadi 4,27 mg/L dan 0,01 mg/L. Untuk TSS, konsentrasi terendah diperoleh pada P1 yaitu dari 93 mg/L menjadi 58 mg/L dan 32 mg/L.
3. Tanaman genjer menunjukkan kemampuan dalam meningkatkan nilai pH air asam tambang sintetis selama proses fitoremediasi, yang ditunjukkan dengan kenaikan pH dari kondisi awal yang asam menuju mendekati netral hingga mencapai nilai 7,43. Nilai tersebut telah berada dalam rentang baku mutu pH (6–9), sehingga menunjukkan bahwa proses fitoremediasi mampu menetralkan kondisi air asam tambang sintetis.

5.2 Saran

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

1. Penelitian selanjutnya diharapkan dapat mempertimbangkan adanya pengulangan (replikasi) pada setiap perlakuan guna meningkatkan keandalan serta validitas data yang diperoleh.
2. Karena waktu kontak dominan, penelitian selanjutnya disarankan memperpanjang durasi (>14 hari) dengan interval lebih rapat untuk menentukan titik jenuh penyerapan Fe dan Mn secara lebih akurat.
3. Disarankan untuk melakukan analisis kandungan logam pada jaringan tanaman setelah proses fitoremediasi guna mengetahui tingkat akumulasi logam serta sebagai dasar dalam pengelolaan biomassa tanaman pasca perlakuan.
4. Disarankan untuk menggunakan air asam tambang (AAT) langsung dari lapangan pada penelitian selanjutnya, sehingga dapat merepresentasikan kondisi nyata yang lebih kompleks, termasuk variasi konsentrasi pencemar serta keberadaan parameter lain yang tidak terdapat pada AAT sintetis.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustian, R. (2024). Simulasi pengolahan air asam tambang (AAT) serta potensi adsorpsi unsur logam tanah jarang (*rare earth element*) menggunakan *fly ash* dalam skala laboratorium [Tesis, Institut Teknologi Bandung].
- Arifwati, Y. (2018). Mekanisme penetralan air asam tambang menggunakan batu kapur (*limestone*): Studi kasus *settling pond* 13 tambang batubara Asam-Asam PT Arutmin Indonesia Provinsi Kalimantan Selatan [Tesis, Institut Teknologi Bandung].
- Asrul. (2022). Efektivitas metode kombinasi fitoremediasi dan filtrasi dalam menurunkan kadar BOD, COD, dan TSS limbah cair industri tahu pada usaha tahu Ridwan di Kota Makassar [Skripsi, Universitas Hasanuddin].
- Datta, S., Chatterjee, S., Mitra, A., & Veer, V. (2013). *Phytoremediation Protocols: An Overview*. Springer.
- Hidayat, L. (2017). Pengelolaan lingkungan areal tambang batubara (Studi kasus pengelolaan air asam tambang *acid mine drainage* di PT. Bhumi Rantau Energi Kabupaten Tapin Kalimantan Selatan). Jurnal ADHUM, VII(1), 44–55.
- Inamuddin, Ahamed, M. I., Lichtfouse, E., & Asiri, A. M. (Eds.). (2020). *Methods for bioremediation of water and wastewater*.
- Kusdarini, E., Sania, P. R., & Budianto, A. (2024). Netralisasi air asam tambang menggunakan pengolahan aktif dan pasif. Jurnal Ilmu Lingkungan, 22(3), 808–815.
- Lidiana, R. (2022). *Efektivitas dan efisiensi tanaman genjer (Limnocharis flava) dalam menurunkan kadar logam berat timbal (Pb) menggunakan sistem batch* [Tugas akhir, Universitas Islam Negeri Sunan Ampel Surabaya].

- Qurniawan, R. (2020). Studi pengelolaan air tambang terintegrasi (pencampuran air tambang tinggi *total suspended solid* dengan air tambang tinggi sulfat) [Tesis, Institut Teknologi Bandung].
- Rustam, R. M. (2023). Kuantitasi logam berat Mn dan Fe dalam air dan rumput laut (*Eucheuma cottonii*) di sekitar perairan Pantai Pokko Kabupaten Takalar menggunakan spektrofotometri serapan atom [Skripsi, Universitas Hasanuddin].
- Sophia, S., & Kodialbail, V. S. (2020). *Phytoremediation of soil for removal of metal and organic pollutants*.
- Suprayogi, D., Utama, T. T., Amrullah, & Oktarina, S. (2024). Analisis kualitas fisika-kimia air Sungai Goa bawah tanah kawasan karst Malang Selatan, Jawa Timur. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 12(2), 395–402.
- Tiwari, R., & Mahalpure, P. (2025). *A detailed review of pH and its applications*. *Journal of Pharmaceutical and Biopharmaceutical Research*, 6(2), 492–505.
- Wulandari, R. (2023). Penentuan kandungan logam berat besi (Fe), kromium (Cr), dan tembaga (Cu) pada sedimen, air, dan plankton pesisir Pulau Sertung secara spektrofotometri serapan atom (SSA) [Skripsi, Universitas Lampung].
- Yustika, F., Asrifah, R. D., & Santoso, D. H. (2022). Fitoremediasi logam besi (Fe) dan mangan (Mn) pada air limbah pengolahan tambang emas rakyat di Desa Pancurendang dengan genjer (*Limnocharis flava*). Dalam *Prosiding Seminar Nasional Teknik Lingkungan Kebumihan Ke-IV* (hlm. 165–171). Jurusan Teknik Lingkungan, UPN “Veteran” Yogyakarta.
- Zahrah, N. A. (2021). Analisis besi, mangan, tembaga, klorida, dan sulfat pada mata air pegunungan di Desa Tongko Kecamatan Baroko Kabupaten Enrekang [Skripsi, Universitas Hasanuddin].