

**FITOREMEDIASI LOGAM BERAT TEMBAGA (CU) DENGAN
MEMANFAATKAN TANAMAN *AZOLLA MICROPHYLLA*
MENGUNAKAN SISTEM BATCH**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik (S.T) Pada
Program Studi Teknik Lingkungan



**UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A**

Disusun Oleh

RHOVENIA SHALSA BAMIATI

NIM. H95219052

Dosen Pembimbing

Dedy Suprayogi, S.KM, M.KL

Arqowi Pribadi, M.Eng

**PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN AMPEL
SURABAYA**

2023

PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Rhovenia Shalsa Bamiati

NIM : H95219052

Program Studi : Teknik Lingkungan

Angkatan : 2019

Menyatakan bahwa saya tidak melakukan plagiat dalam penulisan penelitian Tugas Akhir saya yang berjudul **“FITOREMEDIASI LOGAM BERAT TEMBAGA (CU) DENGAN MEMANFAATKAN TANAMAN *AZOLLA MICROPHYLLA* MENGGUNAKAN SISTEM BATCH”**

Demikian pernyataan keaslian ini saya buat dengan sebenar-benarnya. Apabila suatu saat nanti saya melakukan tindakan plagiat, maka saya bersedia untuk menerima sanksi yang telah ditetapkan.

Surabaya, 13 Juli 2023

Yang menyatakan,



(Rhovenia Shalsa Bamiati)

NIM H95219052



UIN SUNAN AMPEL
SURABAYA

**KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN AMPEL SURABAYA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN**

Jl. Jend. A. Yani 117 Surabaya 60237 Telp. 031 - 8410298 Fax. 031 - 8413300
E-Mail : saintek@uinsby.ac.id Website : www.uinsby.ac.id

**LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING
SIDANG TUGAS AKHIR**

Nama : Rhovenia Shalsa Bamiati
NIM : H95219052
Judul Tugas Akhir : Fitoremediasi Logam Berat Tembaga (Cu) dengan
Memanfaatkan Tanaman Azolla Microphylla Menggunakan
Sistem Batch

Telah disetujui untuk pendaftaran Seminar Tugas Akhir pada Semester Genap Tahun
Akademik 2022-2023.

Surabaya, 26 Juni 2023

Dosen Pembimbing 1

Dedy Suprayogi, S.KM, M.KL
NIP. 198512112014031002

Dosen Pembimbing 2

Argowi Priyadi, M.Eng
NIP. 198701032014031001

PENGESAHAN TIM PENGUJI TUGAS AKHIR

Tugas Akhir Oleh,

Nama : Rhovenia Shalsa Bamiati

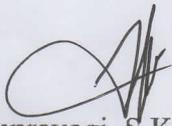
NIM : H95219052

Judul : "FITOREMEDIASI LOGAM BERAT TEMBAGA (CU) DENGAN MEMANFAATKAN TANAMAN AZOLLA MICROPHYLLA MENGGUNAKAN SISTEM BATCH"

Telah dipertahankan di depan tim penguji skripsi
Surabaya, 5 Juli 2023

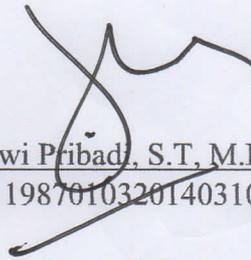
Mengetahui,
Dosen Penguji,

Penguji I



Dedy Suprayogi, S.KM, M.KL
NIP. 198512112014031002

Penguji II



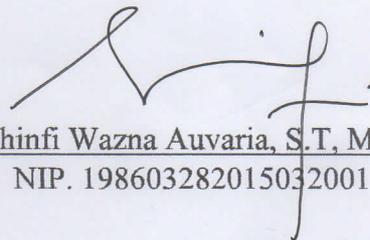
Arqowi Pribadi, S.T, M.Eng
NIP. 198701032014031001

Penguji III



Widya Nilandita, M.KL
NIP. 198410072014032002

Penguji IV



Shinni Wazna Auvaria, S.T, M.T
NIP. 198603282015032001

Mengetahui,

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Sunan Ampel Surabaya



Drs. Saepul Hamdani, M.Pd
NIP. 196507312000031002



UIN SUNAN AMPEL
SURABAYA

KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN AMPEL SURABAYA
PERPUSTAKAAN

Jl. Jend. A. Yani 117 Surabaya 60237 Telp. 031-8431972 Fax.031-8413300

E-Mail: perpus@uinsby.ac.id

LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademika UIN Sunan Ampel Surabaya, yang bertanda tangan di bawah ini, saya:

Nama : RHOVENIA SHALSA BAMIATI
NIM : H95219052
Fakultas/Jurusan : SAINS DAN TEKNOLOGI / TEKNIK LINGKUNGAN
E-mail address : rhovenia@gmail.com

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Perpustakaan UIN Sunan Ampel Surabaya, Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif atas karya ilmiah:

Skripsi Tesis Desertasi Lain-lain (.....)
yang berjudul:

**FITOREMEDIASI LOGAM BERAT TEMBAGA (CU) DENGAN MEMANFAATKAN
TANAMAN AZOLLA MICROPHYLLA MENGGUNAKAN SISTEM BATCH**

beserta perangkat yang diperlukan (bila ada). Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif ini Perpustakaan UIN Sunan Ampel Surabaya berhak menyimpan, mengalih-media/format-kan, mengelolanya dalam bentuk pangkalan data (database), mendistribusikannya, dan menampilkan/mempublikasikannya di Internet atau media lain secara *fulltext* untuk kepentingan akademis tanpa perlu meminta ijin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan atau penerbit yang bersangkutan.

Saya bersedia untuk menanggung secara pribadi, tanpa melibatkan pihak Perpustakaan UIN Sunan Ampel Surabaya, segala bentuk tuntutan hukum yang timbul atas pelanggaran Hak Cipta dalam karya ilmiah saya ini.

Demikian pernyataan ini yang saya buat dengan sebenarnya.

Surabaya, 17 Juli 2023

Penulis

(Rhovenia Shalsa Bamiati)

ABSTRAK

Pencemaran akibat logam berat menjadi perhatian yang berkembang di seluruh dunia. Permasalahan ini lebih banyak dijumpai pada negara – negara berkembang karena kurangnya fasilitas dan pengelolaan dalam pembuangan limbah. Tembaga (Cu) merupakan salah satu logam berat yang tergolong trace element. Dalam air limbah industri, tembaga pada umumnya ditemukan di industri pelapisan logam, keramik, kaca, dan elektroplating. Kadar Cu dalam beberapa kandungan air limbah industri dapat mencapai hingga melebihi 10 ppm. Potensi *Azolla* sebagai fitoremediator logam berat telah diteliti dalam tiga dekade terakhir pada dokumen penelitian yang melaporkan akumulasi logam berat seperti Pb, Cd, Cr, Cu, Zn, dan Ni. Penelitian yang bersifat eksperimental ini dilakukan pada skala laboratorium dimana dilakukan uji fitoremediasi logam berat tembaga (Cu) menggunakan tanaman *Azolla microphylla* dengan sistem batch. Tujuan dilakukan penelitian guna menganalisis perubahan morfologi tanaman *Azolla microphylla* selama proses fitoremediasi, menganalisis penurunan konsentrasi tembaga (Cu) menggunakan tanaman *Azolla microphylla*, dan menganalisis perbedaan penurunan konsentrasi menganalisis penurunan konsentrasi tembaga (Cu) menggunakan *Azolla microphylla*. Pendekatan kualitatif dan deskriptif digunakan dalam penelitian ini guna mengetahui kondisi yang terjadi selama masa uji fitoremediasi ini. Variasi massa yang digunakan pada penelitian ini berupa 200 gram pada reaktor A dan B, serta 300 gram pada reaktor C dan D. Variasi hari yang digunakan pada penelitian ini yakni 0, 4, 8, dan 12. Penyisihan logam berat Cu pada setiap reaktor memiliki hasil rata – rata sebesar 98,8%. Penyisihan logam berat tertinggi terjadi pada hari ke 4 pada setiap reaktornya, yakni reaktor A, B, C, dan D secara berurutan sebesar 98,1%, 98,4%, 99,9%, dan 99,8%. Berdasarkan uji analisis statistik menggunakan Uji Mann Whitney, didapat nilai signifikansi $0,057 > 0,05$, maka H_0 diterima dan H_1 ditolak sehingga tidak ada perbedaan yang signifikan pada variasi 200 dan 300 tanaman dalam meremoval logam berat Cu.

Kata Kunci : Fitoremediasi, Tembaga, *Azolla microphylla*

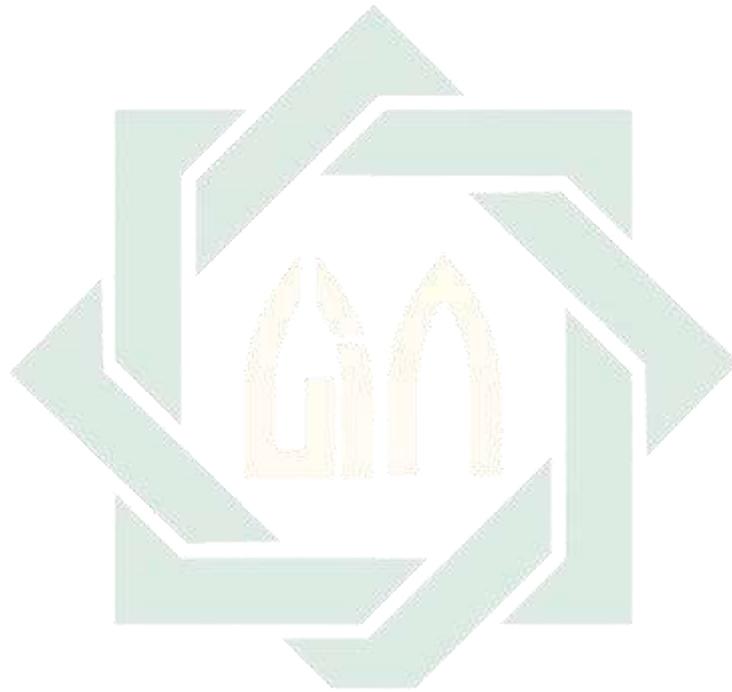
ABSTRAC

Pollution due to heavy metals is a growing concern worldwide. This problem is more common in developing countries due to the lack of facilities and management in waste disposal. Copper (Cu) is a heavy metal which is classified as a trace element. In industrial wastewater, copper is commonly found in metal plating, ceramic, glass and electroplating industries. Cu levels in some industrial wastewater can reach up to more than 10 ppm. The potential of Azolla as a heavy metal phytoremediator has been studied in the last three decades in research documents reporting the accumulation of heavy metals such as Pb, Cd, Cr, Cu, Zn, and Ni. This experimental research was carried out on a laboratory scale where a phytoremediation test for heavy metal copper (Cu) was carried out using Azolla microphylla with a batch system. The aim of this research was to analyze changes in the morphology of Azolla microphylla during the phytoremediation process, to analyze the decrease in copper (Cu) concentrations using Azolla microphylla, and to analyze differences in concentration reduction to analyze the decrease in copper (Cu) concentrations using Azolla microphylla. Qualitative and descriptive approaches were used in this study to determine the conditions that occurred during the phytoremediation test. The mass variations used in this study were 200 grams in reactors A and B, and 300 grams in reactors C and D. The variations in days used in this study were 0, 4, 8, and 12. The removal of heavy metal Cu in each reactor had the average yield is 98.8%. The highest removal of heavy metals occurred on day 4 in each reactor, namely reactors A, B, C, and D sequentially at 98.1%, 98.4%, 99.9% and 99.8%. Based on the statistical analysis test using the Mann Whitney test, a significance value of $0.057 > 0.05$ was obtained, then H_0 was accepted and H_1 was rejected so that there was no significant difference between the 200 and 300 plant variations in removing Cu heavy metal. Keyword : phytoremediation, copper, Azolla microphylla

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING	iii
PENGESAHAN TIM PENGUJI TUGAS AKHIR	iv
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
ABSTRAK	vi
ABSTRAC	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Limbah Cair Industri	5
2.2 Logam Berat (<i>Heavy Metal</i>).....	6
2.3 Cu (Tembaga).....	8
2.4 Baku Mutu Logam Berat.....	10
2.5 Metode Pengolahan Limbah.....	10
2.5.1 Proses Pengolahan Air Limbah secara Fisika	10
2.5.2 Proses Pengolahan Air Limbah secara Kimia.....	10
2.5.3 Proses Pengolahan Air Limbah secara Biologi.....	11
2.6 Fitoremediasi	11
2.6.1 Pengertian Fitoremediasi	11
2.6.2 Jenis Fitoremediasi.....	11
2.6.3 Faktor – Faktor yang Mempengaruhi Fitoremediasi	14
2.6.4 Kelebihan dan Kekurangan Fitoremediasi	15
2.6.5 Jenis Tanaman yang Ramah Fitoremediasi.....	16
2.6.6 <i>Azolla microphylla</i>	17
2.6.7 Aklimatisasi	20
2.7 Sistem Batch.....	20

LAMPIRAN II : HASIL LABORATORIUM.....79
LAMPIRAN III : DOKUMENTASI.....101



UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Tanaman <i>Azolla microphylla</i>	20
Gambar 2.2 Reaktor Batch	21
Gambar 2.3 Reaktor Kontinyu	21
Gambar 2.4 Reaktor Fed-Batch.....	22
Gambar 3.1 Bagan Tahapan Penelitian	34
Gambar 3.2 Bagan Kerangka Penelitian	38
Gambar 3.3 Reaktor Kontrol	40
Gambar 3.4 Reaktor A dan B (200 gram <i>Azolla microphylla</i>)	40
Gambar 3.5 Reaktor C dan D (300 gram <i>Azolla microphylla</i>)	40
Gambar 4.1 Kondisi Daun Tanaman Sebelum Fitoremediasi	52
Gambar 4.2 Kondisi Akar Tanaman Sebelum Fitoremediasi.....	52
Gambar 4.3 Kondisi Tanaman Setelah Fitoremediasi	53
Gambar 4.4 Kondisi Akar Tanaman Setelah Fitoremediasi.....	54
Gambar 4.5 Nilai pH Reaktor A.....	55
Gambar 4.6 Nilai pH Reaktor B	55
Gambar 4.7 Nilai pH Reaktor C	56
Gambar 4.8 Nilai pH Reaktor D.....	56
Gambar 4.9 Nilai Suhu Reaktor A	57
Gambar 4.10 Nilai Suhu Reaktor B.....	58
Gambar 4.11 Nilai Suhu Reaktor C.....	58
Gambar 4.12 Nilai Suhu Reaktor D	58
Gambar 4.13 Efisiensi Removal Reaktor A	64
Gambar 4.14 Efisiensi Removal Reaktor B	64
Gambar 4.15 Efisiensi Removal Reaktor C	65
Gambar 4.16 Efisiensi Removal Reaktor D	65

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kontaminan Penting dalam Pengolahan Air Limbah.....	5
Tabel 2.2 Karakteristik Utama dan Metode Pembuangan Limbah Industri.....	6
Tabel 2.3 Asal Industri dan Dampak Berbahaya dari Berbagai Logam Berat Terhadap Kesehatan Manusia.....	7
Tabel 2.4 Mekanisme Fitoremediasi Logam Berat	13
Tabel 2.5 Kecenderungan Spesies Tanaman yang Berbeda dalam Mengakumulasi Logam Berat ..	16
Tabel 2.6 Penyerapan Logam Berat oleh Tanaman Air	17
Tabel 3.1 Rancangan Penelitian	41
Tabel 4.1 Tahap Aklimatisasi.....	44
Tabel 4.2 Perbandingan Kondisi Optimum dengan Kondisi Lingkungan	46
Tabel 4.3 Morfologi Tanaman Selama Proses Fitoremediasi Berlangsung	48
Tabel 4.4 Nilai pH Selama Proses Fitoremediasi.....	54
Tabel 4.5 Nilai Suhu.....	57
Tabel 4.6 Nilai Kelembapan Udara.....	59
Tabel 4.7 Nilai Intensitas Cahaya	60
Tabel 4.8 Kadar Cu pada Reaktor	62
Tabel 4.9 Efisiensi Removal Cu.....	63
Tabel 4.10 Uji Normalitas	66
Tabel 4.11 Uji Mann Whitney.....	66

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan adanya urbanisasi dan industrialisasi yang berjalan cepat, menimbulkan lonjakan berbagai aktivitas industri yang dapat menyebabkan pencemaran lingkungan secara serius oleh logam berat dan metaloid (Kafle, dkk., 2022). Kegiatan tersebut secara tidak langsung telah banyak menyumbang kontaminan logam berat beracun melalui limbah dan limpasan yang sebagian besar berkontribusi dalam pencemaran air (Saleem, dkk., 2020). Pencemaran akibat logam berat menjadi perhatian yang berkembang di seluruh dunia (Goala, dkk., 2021). Lebih dari 80% air limbah dunia terbuang langsung di badan air tanpa dikelola, sehingga menyebabkan hampir 58% masalah kesehatan bagi manusia (Connor, dkk., 2017). Permasalahan ini lebih banyak dijumpai pada negara – negara berkembang karena kurangnya fasilitas dan pengelolaan dalam pembuangan limbah (Goala, dkk., 2021). Di antara beberapa logam berat yang sering ditemukan mencemari badan air adalah Cu, Ni, Pb, Cd, Cr, U, dan Zn (Prasad dan Freitas, 2005).

Tembaga (Cu) merupakan salah satu logam berat yang tergolong *trace element* (Bhat, dkk., 2022). Dalam air limbah industri, tembaga umumnya ditemukan di industri pelapisan logam, keramik, kaca, dan elektroplating (Ali, dkk., 2016). Kadar Cu dalam beberapa kandungan air limbah industri dapat mencapai hingga melebihi 10 ppm (Enochs, 2023). Paparan berlebih terhadap tembaga (Cu) dapat mengakibatkan berbagai macam gangguan medis terhadap manusia, seperti mengakibatkan cedera otak dan ginjal, sirosis hati, serta radang lambung dan usus (Wuana dan Okieimen, 2011).

Pada Al – Quran surat Asy-Syu'ara' ayat 151 – 152, Allah SWT telah memperingatkan para manusia agar tidak berbuat berlebihan dan melebihi batas terhadap alam :

وَلَا تُطِيعُوا أَمْرَ الْمُسْرِفِينَ، الَّذِينَ يُفْسِدُونَ فِي الْأَرْضِ وَلَا يُصْلِحُونَ

Artinya : “dan janganlah kamu mentaati perintah orang-orang yang melewati batas, yang membuat kerusakan di muka bumi dan tidak mengadakan perbaikan.”

Menurut tafsir tahlili, ayat di atas menjelaskan agar kita tidak menaati para pemimpin yang melewati batas dan tidak menjadi manusia kafir yang berbuat

kejahatan, kemaksiatan, dan kerusakan di bumi ini. Manusia kafir dalam ayat ini, tidak hanya merujuk pada manusia yang menyekutukan Allah, namun juga terhadap manusia yang ingkar terhadap seluruh nikmat yang Allah berikan dan berbuat kerusakan terhadap alam sehingga menjadi kafir ekologis (*kufr al-bid'ah*) (Safrilsyah, 2014).

Dalam buku “*Ri’ayah al-Bid’ah fi Syari’ah al-Islam*”, Yusuf Qardhawi menjabarkan bahwasannya tidak dapat dikatakan sempurna iman seseorang apabila orang tersebut tidak memiliki rasa peduli terhadap lingkungannya. Dalam hal menjaga kesempurnaan iman tidak hanya diukur oleh banyaknya ibadah yang dilakukan namun juga dinilai dari peran manusia dalam menjaga dan memelihara lingkungannya.

Telah banyak pendekatan fisik, kimia, dan biologi yang digunakan dalam meremediasi polutan baik dalam tanah maupun air, namun dikarenakan penerapannya yang terbatas oleh biaya, bahaya keamanan, dan resiko terhadap ekosistem, maka salah satu alternatif andalan dalam meremediasi polutan adalah menggunakan fitoremediasi (Kafle, dkk., 2022). Fitoremediasi memanfaatkan tanaman untuk meremediasi karena tanaman memiliki kemampuan dalam menurunkan polutan dari berbagai media termasuk tanah, udara, dan air.

Pemanfaatan tanaman sebagai fitoremediator lingkungan tercemar telah tertulis dalam Al – Quran surat Asy – Syu’ara’ ayat 7 :

أَوَلَمْ يَرَوْا إِلَى الْأَرْضِ كَمْ أَنْبَتْنَا فِيهَا مِنْ كُلِّ زَوْجٍ كَرِيمٍ

Artinya: “*Dan apakah mereka tidak memperhatikan bumi, betapa banyak Kami tumbuhkan di bumi itu berbagai macam pasangan (tumbuh-tumbuhan) yang baik?*”

Menurut tafsir wajiz, ayat tersebut menjelaskan bahwasannya Allah SWT telah menunjukkan kebesarannya salah satunya yaitu menumbuhkan tumbuhan yang beraneka ragam sehingga dapat menjadi manfaat bagi umat manusia. Salah satu manfaat dari tumbuhan ialah mampu menjadi fitoremediator pada lingkungan yang tercemar polutan, termasuk logam berat.

Beberapa tanaman terapung terbukti dapat mengakumulasi logam berat (Pb, Fe, Cu, Cd, Cr, Zn, Hg, Ni dan As) seperti tanaman *Azolla filiculoides* (Bianchi, dkk, 2020), *Azolla pinnata* (Talebi, dkk., 2019), dan *Azolla microphylla*. Potensi *Azolla* sebagai fitoremediator logam berat telah diteliti dalam tiga dekade terakhir pada dokumen penelitian yang melaporkan akumulasi logam berat seperti Pb, Cd, Cr, Cu, dan Zn pada spesies tanaman *Azolla filiculoides*. Penelitian yang dilakukan oleh Wet, dkk (1990)

juga mengungkapkan kemampuan akumulasi dan penyerapan logam oleh *Azolla* terhadap logam berat Cu, Cd, Cr, Ni, dan Pb, serta nutrisi langsung dari air limbah maupun air limbah secara langsung. Menurut Jafari, dkk (2010) potensi removal tertinggi untuk Pb, Cu, Mn, dan Zn tercatat pada berbagai spesies *azolla*.

Pada proses fitoremediasi terdapat beberapa beberapa cara pengoperasian proses remediasi, salah satunya menggunakan sistem batch. Sistem *batch* sering kali digunakan karena memiliki keunggulan berupa variabel proses dapat dikontrol secara sempurna, mudah untuk mencapai kesetimbangan dan mendapatkan parameter kinetik, serta sistem ini memiliki pola kerja yang *flexibel* sehingga mudah dalam pengolahan data (Olivares, dkk., 2018). Pada penelitian yang dilakukan oleh Anam, dkk (2013) mengatakan bahwa sistem batch dinilai lebih efektif dilakukan dalam skala laboratorium apabila dibandingkan dengan sistem kontinyu. Oleh karena itu, dilakukan penelitian terkait reduksi tembaga (Cu) dengan fitoremediasi menggunakan *Azolla Microphylla* dengan sistem *batch*.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana perubahan morfologi tanaman *Azolla microphylla* selama fitoremediasi berlangsung?
2. Berapakah efisiensi penurunan konsentrasi tembaga (Cu) menggunakan tanaman *Azolla microphylla*?
3. Apakah ada perbedaan penurunan konsentrasi tembaga (Cu) menggunakan variasi massa tanaman *Azolla microphylla*?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Untuk menganalisis perubahan morfologi tanaman *Azolla microphylla* selama proses fitoremediasi
2. Untuk menganalisis penurunan konsentrasi tembaga (Cu) menggunakan tanaman *Azolla microphylla*
3. Untuk menganalisis perbedaan penurunan konsentrasi tembaga (Cu) menggunakan variasi massa tanaman *Azolla microphylla*

1.4 Batasan Penelitian

1. Tanaman *Azolla* yang digunakan berasal dari Kabupaten Kebumen yang didapat dari *e-commerce* dan telah divalidasi oleh Brin Indonesia
2. Air limbah yang digunakan berasal dari sampel limbah artificial tembaga (Cu) dengan konsentrasi 10 ppm

3. Massa basah tanaman yang telah ditetapkan yaitu 200 gram dan 300 gram
4. Volume air adalah pada setiap reaktor sebanyak 10 liter
5. Reaktor yang digunakan menggunakan sistem batch memiliki ukuran panjang 60 cm, lebar 40 cm, dan tinggi 15 cm dengan kapasitas 36 liter
6. Proses fitoremediasi menggunakan sistem *batch*
7. Pengambilan sampel dilakukan pada hari ke 0, 4, 8, 12 untuk mengetahui kadar tembaga (Cu)
8. Pengukuran pH air, temperatur, cahaya, kelembapan, dan ciri fisik tanaman dilakukan setiap hari selama 12 hari
9. Intensitas cahaya yang digunakan berasal dari cahaya matahari dan lampu LED
10. Pengambilan sampel pada tiap reaktor dilakukan secara duplo
11. Baku mutu yang diacu dalam penelitian sesuai dengan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021

1.5 Manfaat Penelitian

1. Bagi Akademisi

Melalui penelitian ini, dapat diharapkan sebagai cara dalam menambah wawasan dan pengetahuan sumber literasi tentang pemanfaatan tanaman *Azolla microphylla* sebagai fitoremediator dalam menurunkan kandungan logam berat tembaga (Cu) serta dapat menjadi pembanding dalam bidang fitoremediasi tanaman akuatik.

2. Bagi Masyarakat

Melalui penelitian ini, diharapkan dapat menjadi media untuk menambah pengetahuan masyarakat dalam pemanfaatan tanaman *Azolla microphylla* untuk fitoremediasi logam berat tembaga (Cu)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Limbah Cair Industri

Limbah cair merupakan campuran atau gabungan air dengan bahan – bahan tercemar yang terbawa oleh air dalam keadaan terlarut maupun tersuspensi yang terbangun dari berbagai sumber limbah, seperti limbah industri dan limbah domestik. Limbah cair industri berasal dari proses produksi dan umumnya sulit untuk dikelola.

Menurut Muralikrishna dan Manichan (2017), limbah cair industri sangat rentan menghasilkan kontaminan – kontaminan yang harus diperhatikan, yaitu :

Tabel 2.1 Kontaminan Penting dalam Pengolahan Air Limbah

Kontaminan	Alasan
Padatan Tersuspensi	Dapat menyebabkan pengendapan lumpur
Nutrisi	Seperti nitrogen dan fosfat serta karbon yang merupakan nutrisi penting dalam pertumbuhan, namun apabila zat tersebut berada di suatu ekosistem secara berlebihan maka dapat mengganggu hingga mencemari lingkungan, seperti pada ekosistem air maka akan menyebabkan pertumbuhan tanaman secara berlebihan, dan apabila di tanah juga akan menyebabkan pencemaran air tanah.
Logam Berat	Logam berat harus dihilangkan jika air limbah akan digunakan kembali
Anorganik Terlarut	Sama seperti logam berat, apabila air limbah akan digunakan kembali, maka komponen anorganik terlarut harus dihilangkan terlebih dahulu
Organik Refactory	Pengolahan senyawa organik ini cenderung tidak dapat dilakukan dengan metode air limbah konvensional dan memerlukan metode khusus, seperti senyawa surfaktan, fenol, dan pestisida pertanian.
Polutan Prioritas	Senyawa organik dan anorganik dalam polutan ini tergolong berdasarkan karsinogenisitas, mutagenisitas, teratogenisitas, maupun toksisitas yang tinggi.

Sumber : Muralikrishna dan Manichan (2017)

pertanian dapat dimanfaatkan sebagai racun, dan sebagainya. Dalam kegiatan industri, tembaga banyak ditemukan di kegiatan penambangan tembaga, peleburan loga, industri pelapisan logam, industri produksi baja, industri produksi plastik, dan industri pelapisan listrik. Tembaga memiliki beberapa sifat, baik sifat fisika maupun kimia. Diantara yaitu :

Sifat Fisika:

1. Tembaga memiliki warna kuning kemerah - merahan.
2. Unsur ini sangat mudah dibentuk, lunak, sehingga mudah dibentuk menjadi pipa, lembaran tipis, kawat.
3. Bersifat sebagai konduktor panas dan listrik yang bagus untuk aliran elektron.
4. Tembaga bersifat keras bila tidak murni.
5. Memiliki titik leleh pada 1084,62 °C, sedangkan titik didih pada 2562 °C.

Sifat Kimia :

1. Tembaga merupakan unsur yang relatif tidak reaktif sehingga tahan terhadap korosi.
2. Pada udara yang lembab, permukaan tembaga ditutupi oleh suatu lapisan yang berwarna hijau yang menarik dari tembaga karbonat basa, $\text{Cu}(\text{OH})_2\text{CO}_3$.
3. Pada suhu sekitar 300°C tembaga dapat bereaksi dengan oksigen membentuk CuO yang berwarna hitam. Sedangkan pada suhu yang lebih tinggi, sekitar 1000°C, akan terbentuk tembaga (I) oksida (Cu_2O) yang berwarna merah.
4. Tembaga tidak bereaksi dengan alkali, tetapi larut dalam amonia oleh adanya udara membentuk larutan yang berwarna biru dari kompleks $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4$
5. Tembaga panas dapat bereaksi dengan uap belerang dan halogen. Bereaksi dengan belerang membentuk tembaga(I) sulfida dan tembaga(II) sulfida dan untuk reaksi dengan halogen membentuk tembaga(I) klorida.

Dalam air limbah, Cu umumnya berasal dari kegiatan industri elektroplating, industri kaca, logam, keramik, dan pipa. Paparan Cu secara berlebihan dapat mengakibatkan cedera otak dan ginjal, sirosis hati, serta radang lambung dan usus bagi manusia yang terpapar(Wuana dan Okieimen, 2011). Untuk tanaman yang telah terkontaminasi Cu masih dari tumbuh optimal hingga konsentrasi 2-20 ppm dan apabila apabila paparan Cu lebih dari 20 mg/L akan mengganggu fungsi sel, menghambat pertumbuhan dan menyebabkan ketidakseimbangan penyerapan nutrisi (Chua, 2019)

2.4 Baku Mutu Logam Berat

Baku mutu logam berat pada perairan telah dimuat dalam berbagai peraturan yang telah diperbarui. Dijelaskan dalam Peraturan Pemerintah No 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup tentang baku mutu air sungai dan sejenisnya, baku mutu logam berat tembaga (Cu) untuk kelas 1, 2, dan 3 sebesar 0,02 mg/L. Sedangkan baku mutu untuk kelas 1, 2, dan 3 pada logam berat lainnya seperti arsen (As) yakni 0,05 mg/L, kadmium (Cd) sebesar 0,01 mg/L, kobalt (Co) sebesar 0,2 mg/L, nikel (Ni) sebesar 0,05 mg/L, seng (Zn) sebesar 0,05 mg/L, timbal (Pb) sebesar 0,03 mg/L, dan kromium heksavalen (Cr-(VI)) sebesar 0,05 mg/L.

2.5 Metode Pengolahan Limbah

Ada berbagai pengolahan limbah industri yang dapat digunakan. Secara umum metode pengolahan limbah dapat diklasifikasikan menjadi 3 jenis, yaitu fisika, kimia, dan biologi tergantung pada sifat limbah dan prinsip operasi serta metode penerapannya (Pratiwi, 2019). Proses pengolahan air limbah dapat menggunakan salah satu metode tersebut atau bisa juga menggunakan ketiganya.

2.5.1 Proses Pengolahan Air Limbah secara Fisika

Proses pengolahan secara fisika merupakan metode yang menggunakan cara sedimentasi, filterisasi, screening dan beberapa cara lainnya. Prinsip utama dari pengolahan air limbah secara fisika ini adalah untuk menghilangkan padatan yang tersuspensi pada air. Pengolahan air limbah secara fisika dapat dilakukan menggunakan unit pengolahan bak sedimentasi, *clarifier*, *bar screen*, dan lainnya (Penetu, 2018).

2.5.2 Proses Pengolahan Air Limbah secara Kimia

Proses pengolahan secara kimia merupakan metode yang melibatkan penambahan suatu zat maupun bahan kimia tertentu dalam mendestruksi pencemar (Puspitaningrum, 2019). Proses pengolahan air limbah menggunakan metode kimia biasanya dilakukan untuk menghilangkan partikel – partikel yang tidak mudah mengendap, logam – logam berat, senyawa fosfor, dan zat organik beracun. Pengolahan air limbah secara kimia dapat dilakukan menggunakan koagulasi dan flokulasi, oksidasi dan/atau reduksi, aerasi, adsorpsi, dan karbon

aktif. Khususnya pada penyisihan logam berat dan senyawa forfor dilakukan dengan membubuhkan larutan alkali.

2.5.3 Proses Pengolahan Air Limbah secara Biologi

Pengolahan biologis digunakan umumnya sebagai pengolahan sekunder, pada umumnya pengolahan ini memerlukan biaya yang murah dan efisien. Pada proses ini, digunakan bantuan organisme (Said, 2017). Prinsip dari pengolahan secara biologi yaitu secara aerob yang berarti melibatkan oksigen dan anaerob tidak melibatkan oksigen. Pengolahan air limbah secara biologi dapat dilakukan menggunakan fitoremediasi, *trickling filter*, *activated sludge*, dan lainnya.

2.6 Fitoremediasi

2.6.1 Pengertian Fitoremediasi

Fitoremediasi berasal dari kata Phyto (Yunani/Greek) “phyton” yang berarti tumbuhan/tanaman (plant), dan remediare (to remedy) yang berarti memperbaiki atau membersihkan sesuatu. Jadi fitoremediasi (phytoremediation) merupakan sistem dimana tanaman tertentu yang bekerja sama dengan mikroorganisme dalam media untuk mengubah polutan menjadi berkurang bahkan menghilang. Menurut Ashraf, dkk (2019) fitoremediasi dianggap sebagai metode yang layak secara ekonomi hingga dikatakan lebih ekonomis 5 – 13 kali dalam meremediasi kontaminan, metode ini juga merupakan metode yang ramah lingkungan. Fitoremediasi merupakan teknologi yang memiliki potensi untuk mengatasi pencemaran yang disebabkan logam berat. Proses fitoremediasi didasarkan pada proses biologis sehingga efektivitasnya sangat dipengaruhi oleh bioavailabilitas kontaminan (Sitarska, dkk., 2023).

2.6.2 Jenis Fitoremediasi

Fitoremediasi tanaman terhadap air dan tanah yang telah terkontaminasi logam berat melibatkan beberapa mekanisme, termasuk degradasi (fitodegradasi), akumulasi (fitoekstraksi, rizofiltrasi), disipasi (fitovolatilisasi), dan imobilisasi (fitostabilisasi) untuk mendegradasi, menghilangkan, dan melumpukan polutan (Kafle, dkk., 2022) :

1. Fitovotalisasi

Fitovolatilisasi merupakan proses pelepasan kontaminan ke udara setelah terserap tumbuhan. Kontaminan terserap dapat berubah struktur kimianya sebelum lepas ke udara. Dalam proses ini, polutan diubah menjadi volatil yang tidak terlalu berbahaya yang kemudian dilepaskan ke atmosfer melalui sistem daun (Bhat, dkk., 2022). Pada proses ini dapat menghilangkan berbagai polutan organik serta logam berat. Beberapa tanaman yang mampu melakukan penyerapan secara fitoekstraksi seperti *Astragalus racemosus*, *Arabidopsis thaliana*, dan *Pteris vittate* (Awa dan Hadibarata, 2020).

2. Fitostabilisasi

Fitostabilisasi adalah proses perubahan senyawa dari toksik menjadi non toksik oleh tanaman tanpa melalui penyerapan terlebih dahulu. Proses ini terjadi di bagian akar (*rizosfer*). Senyawa kimia menempel dengan stabil di bagian akar sehingga tidak terbawa dengan aliran air. Salah satu tanaman yang mampu melakukan fitostabilisasi adalah *Vossia cuspidate* dan *Helianthus petiolaris* (Saran dkk., 2020).

3. Fitoekstraksi

Ekstraksi fito atau bisa disebut sebagai *phytoakumulasi*, *photoabsorption* atau *phytosequestration* merupakan mekanisme penyerapan logam berat oleh akar tanaman kemudian diserap ke pucuk dan mengendap pada vakulosa, dinding sel, membran sel, dan bagian lain yang tidak aktif secara metabolik dalam jaringan tanaman (Kafle, dkk., 2022). Atau dengan kata lain pada proses ini, senyawa kimia atau logam berat diserap oleh akar kemudian diakumulasi oleh bagian tumbuhan lainnya seperti batang dan daun. Spesies tanaman yang cocok pada mekanisme ini merupakan spesies yang dapat mentolerir dan menyerap logam berat secara efektif dan juga dapat memproduksi biomassa secara tinggi (Bian, dkk., 2020). Beberapa tanaman yang mampu melakukan penyerapan secara fitoekstraksi seperti *Azolla*, *Trifolium repens*, *A. spinous L*, dan *Ricinus communis*.

4. Rhizofiltrasi

Rhizofiltrasi merupakan proses dimana terjadinya penyerapan ke dalam akar. Rhizofiltrasi biasa digunakan untuk menghilangkan polutan dari air limbah. Eksudat akar dapat menyerab logam berat sehingga dapat mengubah pH rizosfer (Yan, dkk., 2020). Proses ini biasa terjadi untuk kontaminan yang memiliki perbedaan muatan akar. Ion akar, misalnya

penyerapan tanaman akan meningkat pula. Pada umumnya tanaman dapat tumbuh dengan baik pada kisaran suhu optimum, yaitu 25- 30 °C

f. pH

pH berperan sebagai salah satu faktor apakah suatu pertumbuhan tanaman dapat berjalan baik atau sebaliknya dapat menghambat pertumbuhan tanaman. Menurut Pancawati dan Yulianto (2016) pH ideal untuk tanaman khususnya tanaman hidroponik berkisar antara 5,5 hingga 6,5. Sotyohadi, dkk (2020) menambahkan bahwa tanaman apabila tanaman hidroponik tumbuh dengan pH berkisar 3 hingga 5 maka dapat menyebabkan pembusukan akar dan munculnya *fungi* pada tanaman.

g. Kadar Logam

William (2002) menyatakan bahwa meskipun fitoremediasi dapat digunakan sebagai cara untuk membersihkan lingkungan yang terkontaminasi zat berbahaya, namun tidak semua kadar logam dapat diremediasi oleh satu tanaman.

2.6.4 Kelebihan dan Kekurangan Fitoremediasi

Fitoremediasi memiliki kelebihan dalam penggunaannya, yaitu menjadi salah satu cara meremediasi lingkungan yang telah terkontaminasi menggunakan media tanaman. Cara ini merupakan cara yang ramah lingkungan hingga dapat menjadi estetika sendiri dalam suatu lingkup lingkungan. Proses pertumbuhan tanaman dalam fitoremediasi juga mudah dikontrol dan dapat dilakukan baik secara in-situ maupun ex-situ sehingga biaya operasional yang dikeluarkan juga relatif lebih murah jika dibandingkan dengan pengolahan konvensional. Fitoremediasi juga merupakan metode yang mudah dimodifikasi guna meningkatkan efisiensinya (Sitarska, dkk., 2023). Meskipun dapat dikatakan sebagai metode alternatif yang efektif dalam remediasi lingkungan, fitoremediasi memiliki beberapa keterbatasan dan kekurangan. Fitoremediasi sangat bergantung pada keberhasilan dan kecepatan pertumbuhan spesies tanaman yang digunakan dan hal tersebut juga bergantung pada kondisi iklim, sehingga dapat dikatakan teknik fitoremediasi khusus satu spesies tanaman di satu lokasi bisa saja tidak berfungsi di lokasi lain karena kondisi iklim yang

Sebagian besar orang menganggap bahwa tumbuhan ini hanya bermanfaat sebagai alternatif pakan ikan, namun jika menelaah penelitian – penelitian terdahulu, menyatakan bahwa *Azolla* toleran dan memiliki potensi yang besar untuk menurunkan kandungan logam berat seperti Cu, Fe, Zn, Hg, Mo, Co, As, Cd, Cr, dan Pb. Potensi *Azolla* sebagai fitoremediator logam berat telah diteliti dalam tiga dekade terakhir, salah satunya oleh Sela, dkk (1989) yang melaporkan akumulasi logam berat seperti Pb, Cd, Cr, Cu, dan Zn pada spesies tanaman *Azolla Filiculoides*. Penelitian yang dilakukan oleh Wet, dkk (1990) juga mengungkapkan kemampuan akumulasi dan penyerapan logam oleh *Azolla* terhadap logam berat Cu, Cd, Cr, Ni, dan Pb, serta nutrisi langsung dari air limbah maupun air limbah secara langsung. Menurut Jafari, dkk (2010) potensi removal tertinggi untuk Pb^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} , dan Zn^{2+} tercatat pada *Azolla microphylla* (94%), *Azolla filiculoides* (96%), *Azolla pinnata* (71%), dan *Azolla microphylla* (98%), secara berurutan. *Azolla microphylla* memiliki produktivitas biomassa yang tinggi karena bersimbiosis dengan cyanobacterium *Anabaena* dan mampu untuk mengkonsentrasikan logam berat beracun (Bennicelli, dkk., 2004).

Azolla memiliki beberapa jenis yaitu *Azolla caroliniana*, *Azolla filiculoides*, *Azolla mexicana*, *Azolla microphylla*, *Azolla pinnata*, *Azolla rubra*, dan *Azolla nilotica* (Marzouk, dkk., 2023). Di daerah Asia Tropis khususnya Indonesia, spesies *Azolla* yang paling banyak *Azolla Microphylla* dan *Azolla Pinnata*. *Azolla Microphylla* secara alami banyak ditemukan di kolam – kolam, tempat tergenang, sungai, danau, dan saluran air maupun padi (Viginati, dkk., 2017). Tumbuhan ini biasanya ditemukan dan tumbuh di atas permukaan dengan keadaan bergerombol dalam jumlah yang besar. Pertumbuhan *Azolla* bergantung pada pH, pH optimal untuk tanaman ini berkisar pada pH 4,5 hingga 7,5 namun tanaman ini masih bisa tumbuh secara optimal pada pH 3,5 hingga 10 jika seluruh nutrisinya tercukupi (Cary dan Weerts, 1992). Secara umum, spesies *Azolla* menunjukkan bahwa apabila berada di suhu di atas 30 °C atau berada di bawah 4 °C, akan menghambat pertumbuhannya. Suhu optimum bagi pertumbuhan *Azolla* adalah 18 °C hingga 28 °C. Namun ada beberapa spesies *Azolla* yang memiliki toleransi maupun sensitivitas suhu yang berbeda.

Azolla Microphylla awalnya menyebar di daerah Amerika Serikat, Amerika Tengah hingga India Barat. Tanaman ini memiliki toleransi yang baik terhadap suhu tinggi dimana sangat sesuai apabila ditanaman di negara tropis. *Azolla Pinnata* juga

merupakan salah satu spesies yang banyak tumbuh di wilayah Asia Tenggara dan Asia Timur (Marzouk, 2023), spesies ini dapat beradaptasi dengan baik pada daerah dengan kondisi iklim yang panjang, namun hal tersebut menyebabkan perlambatan pertumbuhan dari tanaman ini.

Jika dibandingkan keduanya memiliki morfologi yang hampir sama, namun bila dicermati lebih teliti terdapat perbedaan yang nampak. Bagian daun pada *Azolla Microphylla* lebih tebal dan memiliki warna hijau mudan dengan tepi hijau lebih pucat dibandingkan dengan *Azolla Pinnata* yang memiliki daun lebih tipis dan berwarna hijau dengan tepi kebiru – biruan. Tanaman *Azolla Microphylla* memiliki ciri – ciri daun yang tumpang tindih dan membentuk gugusan dengan ketebalan 1 – 3 cm, sedangkan pada *Azolla Pinnata* lebih berhimpitan dengan tepi daun saling melekat. Yang terakhir, jumlah spora *Azolla Microphylla* lebih banyak jika dibandingkan dengan *Azolla Pinnata*. Kemudian, ciri morfologi lainnya dari *Azolla Microphylla* yaitu memiliki warna batang hijau muda dan memiliki tinggi tanaman kurang dari 2,5 cm dengan tipe akar laterar berbentuk akar runcing atau tajam yang seperti rambut namun tidak berbulu dan tidak bercabang dengan panjang sekitar 1 hingga 3 cm (Mantang, dkk., 2018).

Klasifikasi *Azolla* menurut Gunawan (2012) adalah :

Kingdom : Plantae
Divisi : Pteridophyta
Kelas : Pteridopsida
Ordo : Salviniiales
Famili : Salviniaceae
Genus : *Azolla*

Spesies : *Azolla microphylla*



Gambar 2.1 Tanaman *Azolla microphylla*

Sumber : Dokumentasi pribadi, 2023

2.6.7 Aklimatisasi

Aklimatisasi biasa dilakukan pada proses fitoremediasi. Aklimatisasi dilakukan agar tanaman dapat beradaptasi dan menyesuaikan diri dengan lingkungan barunya. Mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Nilamsari dan Rachmadiarti (2020), aklimatisasi dilakukan selama 7 hari. Aklimatisasi dapat dilakukan dengan menggunakan air bersih maupun air yang diberi sampel limbah dengan konsentrasi air sampel limbah lebih rendah. Sebelum pelaksanaan aklimatisasi, tanaman dibersihkan dari tanah maupun kerikil yang menempel pada akar. Aklimatisasi dilakukan sampai tanaman benar – benar telah tumbuh dan kuat. Hal tersebut dapat dilihat dari akar dan batang yang masih berdiri kokoh (Karunia, 2014).

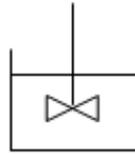
2.7 Sistem Batch

Reaktor dengan sistem batch merupakan sebuah proses dimana semua reaktan dimasukkan secara bersamaan pada awal proses dan produk dikeluarkan pada akhir proses. Pada proses ini semua reagen ditambahkan diawal proses dan tidak ada penambahan reagen kembali ketika proses berlangsung (Hidayat, 2019). Kelebihan dan kekurangan sistem *Batch* antara lain :

1. Lebih mudah pengoperasiannya
2. Biaya dan harga instrumental relatif murah
3. Penggunaan fleksibel dapat dihentikan secara mudah sewaktu – waktu
4. Dapat digunakan untuk campuran limbah kuat dan beracun
5. Lebih efektif apabila dilakukan dalam skala percobaan laboratorium (Anam, dkk., 2013)

Sedangkan kekurangan dari sistem Batch adalah :

1. Skala produksi relatif kecil
2. Dibutuhkan lebih banyak pekerja, karena diperlukan pengawasan dalam kondisi prosedur yang terus berubah dari awal sampai akhir



Gambar 2.2 Reaktor Batch

Sumber : Permadi, 2019

2.8 Sistem Kontinyu

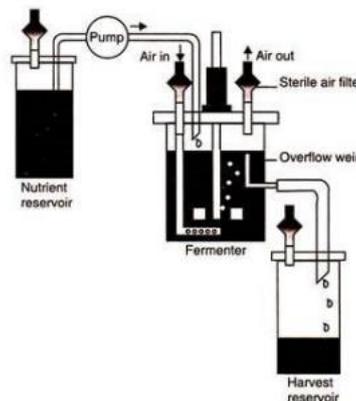
Reaktor dengan sistem kontinyu merupakan sebuah proses dimana suatu reaktan yang dimasukkan ke dalam reaktor dan produk atau produk sampingan dapat diambil pada saat proses masih berlangsung secara terus menerus.

Kelebihan :

1. Dapat digunakan pada skala industri yang besar
2. Biaya yang lebih murah apabila digunakan dalam skala besar

Kekurangan :

1. Apabila saluran tidak ditempatkan dengan benar, maka reaktan dapat keluar melewati batas

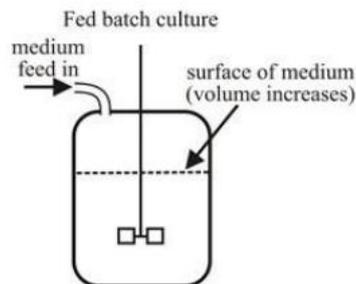


Gambar 2.3 Reaktor Kontinyu

Sumber : *Biotechnology Notes*, 2018

2.9 Sistem Fed Batch

Reaktor dengan sistem *fed-batch* bekerja dengan cara menumbuhkan media secara terus – menerus dalam kultur tertutup. Dalam proses ini substrat ditambahkan secara berkala seiring fermentasi berlangsung, karena itu substrat selalu pada konsentrasi optimal.



Gambar 2.4 Reaktor Fed-Batch

Sumber : *Biotechnology Notes*, 2018

2.10 Nekrosis dan Klorosis

Nekrosis adalah kematian sel dan kematian jaringan pada tubuh yang hidup. Nekrosis merupakan salah satu pola dasar kematian sel. Nekrosis terjadi setelah suplai darah hilang atau setelah terpajan toksin dan ditandai dengan pembengkakan sel, denaturasi protein dan kerusakan organel. Apabila suatu tanaman mengalami nekrosis, maka Salah satu gejala nekrosis khususnya pada tanaman mengapung adalah terjadinya kerontokan pada akar tanaman (Vigiyanti, dkk., 2017). Sedangkan Klorosis merupakan rusaknya atau tidak berfungsinya klorofil. Hal ini ditandai dengan perubahan warna pada daun yang berwarna hijau maupun hijau cerah menjadi kuning. Penyebab klorosis dapat disebabkan oleh penyakit nonparasit maupun penyakit fisiologis, seperti kekurangan maupun kelebihan unsur hara, air, sinar matahari, dan temperatur (Alamandaty dan Palgunadi, 2014).

2.11 Penelitian Terdahulu

No	Judul Penelitian	Tujuan	Rangkuman
1.	Enochs, dkk., 2023. "Short and long-term phytoremediation capacity of aquatic plants in Cu-polluted environments"	Untuk mengetahui kemampuan tanaman dalam menyerap tambaga (Cu) dari air yang tercemar dengan menguji apakah hasil dari	Penelitian ini dilakukan menggunakan tanaman <i>Lemna minor</i> dan <i>Vallisneria americana</i> yang telag diaklimatisasi selama 10 hari. Tanaman kemudian dimasukkan ke dalam air limbah artifisial

No	Judul Penelitian	Tujuan	Rangkuman
		fitoremediasi tersebut aman bila dilebas ke badan air melalui uji toksisitas terhadap bekicot.	Cu dengan variasi konsentrasi larutan rendah (1 ppm) dan tinggi (10 ppm), serta menggunakan perlakuan kontrol 0 ppm. Kadar pH, oksigen terlarut, konsentrasi klorofil dilakukan dalam penelitian ini untuk memastikan agar tidak adanya perbedaan antar spesie tanaman atau dalam perlakuan konsentrasi Cu. Dari pengujian toksisitas didapatkan hasil bahwa siput mampu hidup dalam kapasitas 0 dan 1 ppm, dan dalam pengujian ini siput tidak dapat bertahan hidup dalam kandungan Cu 10 ppm.
2.	Al-Badawi, dkk., 2022. "Removal of copper by <i>Azolla filiculoides</i> and <i>Lemna minor</i> : phyto remediation potential, adsorption kinetics and isotherms"	Untuk menyelidiki potensi dua spesies tanaman air yaitu (<i>Azolla Filiculoides</i> dan <i>Lemna Minor</i>) untuk menurunkan kadar Cu dalam air.	Penelitian dilakukan selama 7 hari dengan pengambilan sampel air limbah dan tanaman dilakukan hari ke-0, 1, 2, 5, dan 7 dengan rentang suhu tempat penelitian 21 °C hingga 27 °C. Setiap tanaman ditimbang dengan berat basah 3 gram kemudian dipindah ke dalam wadah kaca 100 mL dan diberi air kontaminan Cu dengan variasi konsentrasi (0 ppm, 0,25 ppm, 0,50 ppm, dan 0,75 ppm). Wadah dengan konsentrasi 0 ppm digunakan sebagai media kontrol, dan wadah lainnya dengan kadar 0,25 ppm, 0,50 ppm, dan 0,75 ppm digunakan sebagai perlakuan kontaminan. Air limbah yang digunakan berasal dari air limbah artificial yang dibuat dengan mengencerkan 0,86 gram $\text{CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dalam 1 liter air. Kandungan Cu yang diekstraksi dianalisis menggunakan Optima 7300DV ICP-OES instrument (PerkinElmer). Analisis statistik faktor dependen sesuai dengan konsentrasi Cu dalam air, kondisi, dan periode perawatan yang dilakukan dengan IBM SPSS Statistics Versi 23. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa, <i>Azolla</i>

No	Judul Penelitian	Tujuan	Rangkuman
			<i>Filiculoides</i> memiliki efisiensi penghilang Cu lebih tinggi sebanyak apabila dibandingkan dengan <i>Lemna Minor</i> yakni 100% pada hari ke 2 perlakuan.
3.	Goala, dkk., (2021). “Phytoremediation of dairy wastewater using <i>Azolla pinnata</i> : Application of image processing technique for leaflet growth simulation”	Untuk mengetahui efisiensi removal <i>Azolla pinnata</i> dalam pengolahan air limbah susu (DWW).	Penelitian ini dilakukan menggunakan sistem batch dengan masing – masing konsentrasi limbah 0, 25%, 50%, 75%, dan 100%. Perlakuan suhu ruang yaitu 20 °C dengan pencahayaan 2000lux. Penelitian ini dilakukan selama 14 hari. Hasil dari penelitian ini didapatkan bahwa <i>Azolla pinnata</i> mampu menurunkan kadar dww maksimum sebesar 75%.
4.	Saralegui, dkk., (2021). “Macrophyte biomass productivity for heavy metal adsorption”	Untuk mengetahui dan membandingkan produktivitas pertumbuhan makrofita yang didapat dari perhitungan dimensi wadah dan waktu yang efektif untuk mencapai jumlah biomassa yang ditentukan.	Pada penelitian ini dilakukan menggunakan 5 jenis tanaman, yakni <i>Azolla pinnata</i> , <i>Salvinia molesta</i> , <i>Limnobium leavigatum</i> , <i>Lemna minor</i> dan <i>Pistia stratiotes</i> . Penelitian dilakukan dengan mengambil 100 gram dari setiap jenis tanaman yang kemudian diberi 5 liter air pada waktu <i>growth tests</i> . Kemudian pada waktu eksperimen adsorpsi-desorpsi diberi perlakuan setiap 1 gram tanaman diberi perlakuan air limbah artifisial Cu, Pb, dan Cr dengan konsentrasi 200 ppm selama 24 jam. Didapatkan bahwa jenis tanaman tertinggi dalam <i>me-removal</i> logam berat dalam eksperimen ini adalah <i>Azolla pinnata</i> .
5.	Talebi, dkk., (2019). “Hyperaccumulation of Cu, Zn, Ni, and Cd in <i>Azolla</i> species inducing expression of methallothionein and phytochelatin synthase genes”	Untuk mengetahui potensi tanaman <i>Azolla</i> dalam menurunkan logam berat (Ni, Zn, Cu, dan Cd)	Penelitian ini dilakukan menggunakan <i>Azolla Pinnata</i> dan <i>Azolla Filiculoides</i> serta <i>Azolla</i> yang belum diidentifikasi yang berasal dari daerah Anzali, Iran. Tanaman selama diteliti selama 72 jam dengan setiap pembagian pencahayaan 16 jam terang dan 8 jam gelap. Kandungan logam berat yang digunakan dalam penelitian ini 0, 10, 50, dan 500 ppm pada

No	Judul Penelitian	Tujuan	Rangkuman
			<p>secara triplo. Dilakukan juga pengecekan parameter fisik setiap hari berupa pengecekan pH, temperatur, dan intensitas cahaya. Uji kadar klorofil yang dilakukan dilakukan dengan cara mengambil 1 gram tanaman yang kemudian diberi perlakuan berupa ditumbuh hingga halus dan kemudian diberi 95% alkohol dan diekstrak hingga 100 ml kemudian disaring dan menghasilkan filtrat. Kemudian diukur dengan spektrofotometer dan menghasilkan hasil bahwa kadar klorofil pada <i>Azolla Microphylla</i> dengan perlakuan konsentrasi Cu 15 ppm memiliki kadar terendah dibanding dengan konsentrasi uji lainnya yaitu dengan hasil 4,138. Sedangkan uji destruksi akar dilakukan dengan cara mengambil 2 gram akar <i>Azolla Microphylla</i> yang telah diberi perlakuan 10 hari, kemudian di keringkan hingga menjadi abu pada suhu 700 °C, bubuk kemudian diberi HNO₃ sebanyak 2 ml dan akuademin 10 ml, kemudian disaring dan diuji. Hasil menunjukkan bahwa dengan perlakuan konsentrasi Cu 15 ppm, akar menyerap konsentrasi Cu sebesar 2,424 ppm. Namun pada konsentrasi 15 ppm, fisiologis pada akar tanaman menunjukkan kondisi akar yang rapuh.</p>
7.	Chua, dkk., 2019. "Phytoremediation potential and copper uptake kinetics of Philippine bamboo species in copper contaminated substrate"	Untuk mengetahui pengaruh perbedaan spesies bambu (<i>Bambusa blumeana</i> , <i>Bambusa merilliana</i> dan <i>Dendrocalamus asper</i>) dan penentuan spesies bambu terbaik dalam proses fitoremediasi.	Penelitian ini dilakukan selama 21 hari dengan variasi pengambilan sampel pada hari ke 7, 14, dan 21 dan dengan variasi 40, 80, dan 120 µM. Pada setiap reaktor digunakan 30 tanaman. Pada variasi 40 µM, tanaman masi bisa mentoleransi kadar Cu dan masih dapat menyerap dengan optimal. Pada hari ke 14 dengan konsentrasi 80 µM, tanaman menunjukkan

No	Judul Penelitian	Tujuan	Rangkuman
			<p>penurunan dalam penyerapan kadar Cu, dan pada konsentrasi 120 μM pada hari ke 7 tanaman memiliki daya serap Cu paling tinggi namun menurun pada hari ke 21. Dari penelitian ini didapat hasil bahwa terjadi translokasi pada konsentrasi 80 μM di hari ke 21, peningkatan serapan pada konsentrasi 120 μM di hari 7 dan menurun dratis pada hari ke 12 dan 21.</p>
8.	<p>Asih dan Rachmadiarti (2019). "Azolla microphylla sebagai Fitoremediator Logam Pb"</p>	<p>Untuk mengetahui pengaruh konsentrasi Pb terhadap kadar Pb pada akar <i>Azolla microphylla</i> dan mendeskripsikan pengaruh konsentrasi Pb terhadap pertumbuhan zolla. <i>microphylla</i></p>	<p>Penelitian ini menggunakan <i>Azolla microphylla</i> dengan perlakuan 14 hari yang setelah itu diukur kadar penurunan timbal (Pb) dengan triplo. Variasi konsentrasi yang digunakan meliputi 5 mg/L, 10 mg/L, dan 15 mg/L. Tahap awal dimulai dengan mengaklimatisasi tanaman kemudian menyiapkan 100 gram tanaman untuk setiap reaktor. Dari hasil penelitian ini didapatkan bahwa <i>Azolla microphylla</i> kadar timbal tertinggi dalam akar terjadi pada variasi 15 mg/L dengan hasil 3,89 mg/L, sedangkan pertumbuhan tanaman <i>Azolla microphylla</i> dapat tumbuh dengan optimal pada konsentrasi 5 mg/L dan 10 mg/L.</p>
9.	<p>Naghipour, dkk., (2018). "Phytoremediation of heavy metals (Ni, Cd, Pb) by <i>Azolla filiculoides</i> from aqueous solution: A dataset".</p>	<p>Untuk mengetahui efisiensi penyisihan logam berat menggunakan <i>Azolla Filiculoides</i> dalam waktu retensi, massa tanaman, dan konsentrasi logam yang berbeda.</p>	<p>Penelitian ini dilakukan menggunakan <i>Azolla Filiculoides</i> dengan variasi massa dan yang berbeda, yaitu 0,2 gram, 0,4 gram, dan 0,8 gram. Kandungan logam yang digunakan dalam penelitian ini meliputi Ni, Cd, dan Pb dengan variasi konsentrasi 5mg/L, 10 mg/L, dan 25 mg/L. Pengambilan sampel dilakukan pada hari ke 5, 10, dan 15. Tanaman <i>Azolla Filiculoides</i> yang digunakan berasal dari Kota Rasht, Iran. Tanaman dicuci dan disterilkan menggunakan merkuri klorida 0,1% selama 30 detik dan dicuci kembali dengan air beberapa kali.</p>

No	Judul Penelitian	Tujuan	Rangkuman
		<p>potensi toksisitas air tercemar Cu pasca fitoremediasi terhadap tanah dan tanaman <i>Brassica rapa</i></p>	<p>hingga 94% dan pada konsentrasi 5 mg/L hingga 90%. Sedangkan tumbuhan kiambang mampu menurunkan kadar tembaga pada konsentrasi 2 mg/L hingga 96% dan pada 5 mg/L hingga 95% tanpa adanya kerusakan pada morfologi tanaman.</p>
11.	<p>Asih dan Rachmadiarti (2018). “<i>Azolla microphylla</i> sebagai Fitoremediator Logam Pb”</p>	<p>Untuk mengetahui dan mendeskripsikan pengaruh variasi konsentrasi Pb terhadap akar tanaman <i>Azolla Microphylla</i>.</p>	<p>Penelitian ini dilakukan selama 15 hari dengan varian pengambilan sampel pada hari ke 0, 5, 10, dan 15 dengan variasi triplo setiap pengambilan sampelnya. Variasi larutan Pb juga digunakan dalam penelitian ini, yaitu 5 mg/L, 10 mg/L, dan 15 mg/L. Tanaman <i>Azolla Micophylla</i> digunakan sebanyak 100 gram. Dalam penelitian ini selain mengukur kadar Pb turut mengukur pH, temperatur, dan <i>lux</i>. Uji statistik pada penelitian ini menggunakan uji ANAVA <i>one way</i> dan uji DMRT. Hasil dari penelitian ini didapatkan bahwa kadar Pb tertinggi pada akar didapat yaitu 3,89 mg/L (hasil rata – rata) pada perlakuan konsentrasi Pb sebesar 15 mg/l. sedangkan pertumbuhan tanaman terbaik didapat pada variasi konsentrasi 5 mg/L dan 10 mg/L dengan rata – rata kenaikan berat 10 gram dan 32, 67 gram.</p>
12.	<p>Berutu (2018) “Fitoremediasi Menggunakan Tanaman <i>Azolla</i> (<i>Azolla Pinnata</i>) Terhadap Konsentrasi Logam Kadmium (Cd) Pada Limbah Air Lindi”</p>	<p>Untuk mengetahui efisiensi removal Cd oleh tanaman <i>Azolla pinnata</i>.</p>	<p>Penerlitan ini dilakukans selama 9 hari dengan pengambilan sampel pada hari ke 0, 3, 6, dan 9 dengan 3 kali pengulangan. Perlakuan yang diberikan berupaa 40 gram tanaman dengan variasi limbah 75% dan 100% dalam 5 liter air. Dari penelitian ini didapat bahwa penurunan kadar Cd tertinggi terjadi pada hari ke 3 oleh kedua variasi konsentrasi limbah.</p>

أَوَلَمْ يَرَ الَّذِينَ كَفَرُوا أَنَّ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضَ كَانَتَا رَتْقًا فَفَتَقْنَاهُمَا^{٥٥} وَجَعَلْنَا مِنَ الْمَاءِ كُلَّ شَيْءٍ حَيٍّ أَفَلَا يُؤْمِنُونَ

Artinya : “Dan apakah orang-orang kafir tidak mengetahui bahwa langit dan bumi keduanya dahulunya menyatu, kemudian Kami pisahkan antara keduanya; dan Kami jadikan segala sesuatu yang hidup berasal dari air; maka mengapa mereka tidak beriman?”

Dari ayat tersebut, salah satu tafsiran yang dapat kita ambil bahwasannya air merupakan sumber kehidupan bagi segala makhluk hidup, air berperan penting mulai dari proses pembentukan bumi sehingga dapat menjadi tempat yang dapat ditinggali, dan juga segala makhluk yang hidup di bumi ini memerlukan air sebagai perenan penting keberlanjutan hidup.

Pada surat Al – A’raf ayat 58, Allah SWT telah berfirman :

وَالْبَلَدُ الطَّيِّبُ يَخْرُجُ نَبَاتُهُ بِإِذْنِ رَبِّهِ وَالَّذِي خَبثَ لَا يَخْرُجُ إِلَّا نَكْدًا^{٥٦} كَذَلِكَ نُصَرِّفُ الْآيَاتِ لِقَوْمٍ يَشْكُرُونَ

Artinya : “Dan tanah yang baik, tanaman-tanamannya tumbuh subur dengan seizin Allah; dan tanah yang tidak subur, tanaman-tanamannya hanya tumbuh merana. Demikianlah Kami mengulangi tanda-tanda kebesaran (Kami) bagi orang-orang yang bersyukur”

Menurut tafsir Zubdatur Tafsir Min Fathil Qadir, ayat tersebut mengandung makna atas seizin Allah, tanah yang baik dapat menumbuhkan tanaman yang baik dengan subur dan sempurna, namun pada tanah yang tidak subur tanaman – tanaman hanya akan tumbuh secara merana. Ayat ini memiliki perumpamaan bagi orang – orang yang bersyukur kepada Allah dan mengakui kenikmatan Allah atas segala karunia-Nya sama seperti tanah yang subur yang menghasilkan tanaman dengan baik, dan sebaliknya bagi orang – orang kafir yang tidak bersyukur kepada Allah.

Salah satu bentuk syukur terhadap nikmat Allah adalah senantiasa menjaga dan memelihara lingkungan. Dalam kaidah fiqih disebutkan bahwasannya sesuatu yang membawa kepada kewajiban, maka sesuatu itu hukumnya wajib. Menjaga kualitas lingkungan menurut Yusuf Qardhawi dalam buku “*Ri’ayah al-Bid’ah fi Syari’ah al-Islam*” sama halnya dengan menjaga lima tujuan dasar islam.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian yang bersifat eksperimental ini dilakukan pada skala laboratorium dimana dilakukan uji fitoremediasi logam berat tembaga (Cu) menggunakan tanaman *Azolla microphylla* dengan sistem batch. Pendekatan kualitatif dan deskriptif digunakan dalam penelitian ini guna mengetahui kondisi yang terjadi selama masa uji fitoremediasi ini.

3.2 Waktu Penelitian

Pelaksanaan penelitian dimulai dengan penentuan ide awal dilaksanakan mulai dari Januari 2023. Selanjutnya selama bulan Februari 2023 hingga Maret 2023 dilaksanakan pembuatan proposal. Kemudian pada bulan Maret hingga April 2023 dilakukan pengambilan sampel di lapangan dan pengujian sampel. Pada bulan Mei 2023 hingga Juni 2023 dilakukan penyusunan hasil penelitian, dan pada bulan Juli 2023 dilakukan sidang laporan tugas akhir.

3.3 Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Kampus Gunung Anyar UIN Sunan Ampel Surabaya dan pelaksanaan fitoremediasi dilakukan di Laboratorium Kampus Gunung Anyar UIN Sunan Ampel Surabaya. Kemudian untuk pengujian Cu hasil analisis fitoremediasi dilakukan di PT Axo Laboratory menggunakan instrumen AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometer*) sesuai dengan SNI 6989.7:2009.

3.4 Alat dan Bahan Penelitian

3.4.1 Alat

1. 5 buah reaktor dengan ukuran panjang 60 cm x lebar 40 cm x tinggi 15 cm
2. pH meter
3. Pipet
4. Termometer
5. Aplikasi Lighmeter
6. Hygrometer
7. Lampu
8. Timbangan digital
9. Cawan
10. Jerigen besar sebagai wadah air limbah artifisial

11. Botol gelap untuk pengujian laboratorium

3.4.2 Bahan

1. Aquades
2. Serbuk logam berat tembaga (Cu)
3. Sampel air limbah artifisial logam berat tembaga (Cu) 50 liter
4. Tanaman *Azolla microphylla* sebanyak 200 gram dan 300 gram yang dibeli di Kabupaten Kebumen melalui e-commerce dan telah diidentifikasi di Brin Bogor

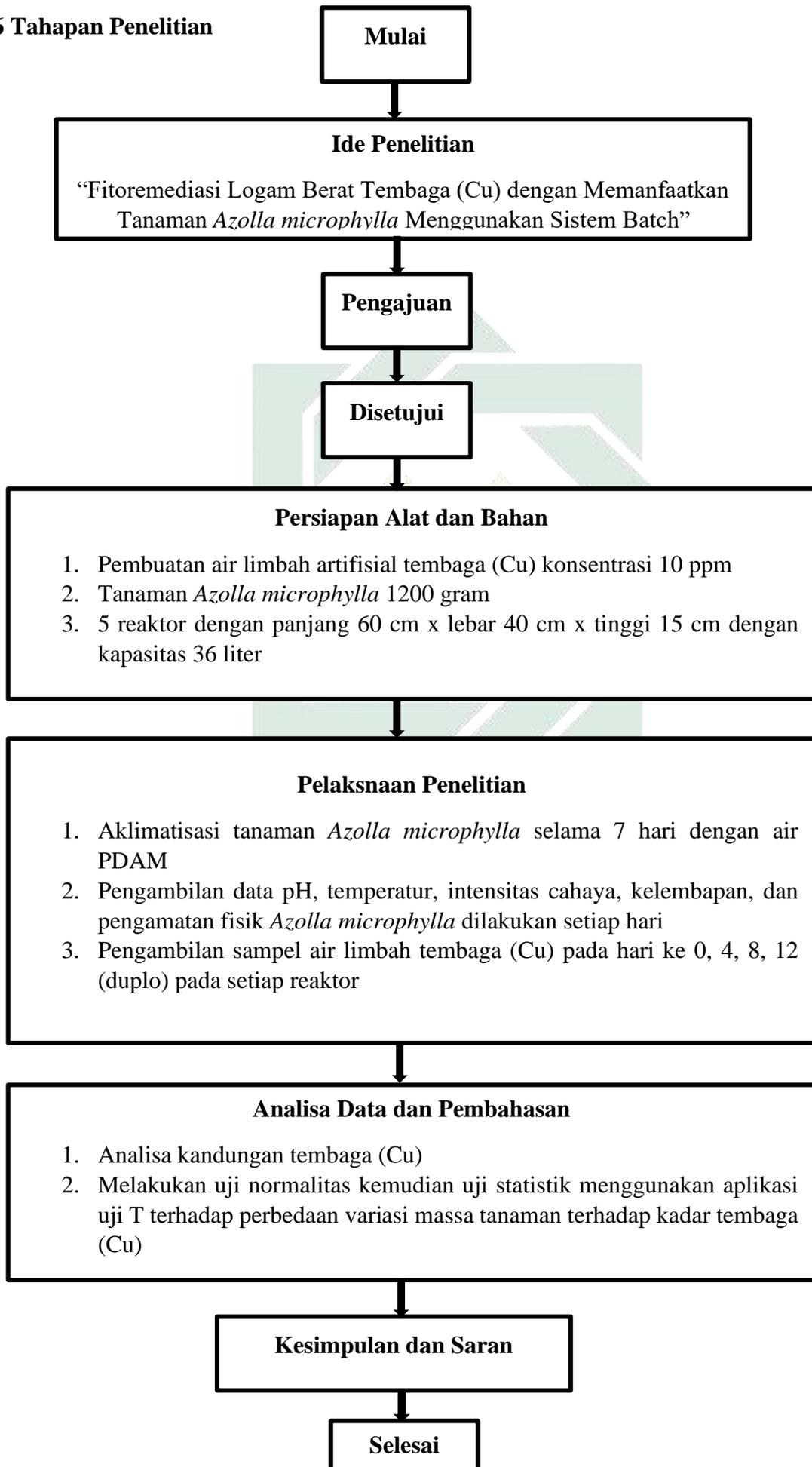
3.5 Variabel Penelitian

Pada suatu penelitian, umum ditetapkan suatu variabel yang berguna untuk dipelajari sehingga mendapatkan hasil sesuai dengan tujuan penelitian. Adapun variabel yang terdapat dalam penelitian ini adalah:

- a. Variabel bebas pada penelitian ini adalah massa tanaman *Azolla microphylla*
- b. Variabel terikat pada penelitian ini adalah kandungan tembaga (Cu) terlarut dalam air sampel

UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A

3.6 Tahapan Penelitian



Gambar 3.1 Bagan Tahapan Penelitian

3.6.1 Tahapan Persiapan Penelitian

Pada tahap persiapan penelitian dilakukan studi literatur terhadap objek penelitian dan penentuan judul penelitian. Pada tahap ini juga dipersiapkan alat dan bahan.

1. Alat

Pada penelitian ini alat-alat yang digunakan dalam penelitian meliputi reaktor fitoremediasi, termometer, pH meter, timbangan digital, jerigen besar sebagai wadah air limbah artifisial, dan botol untuk pengujian laboratorium. Reaktor yang digunakan merupakan reaktor *batch* dengan ukuran 60 x 40 x 15 cm dengan kapasitas 36 liter. Jumlah reaktor yang digunakan dalam penelitian ini yaitu 5 buah. Dengan pembagian 1 reaktor kontrol, 2 reaktor fitoremediasi 200 gram tanaman, dan 2 reaktor fitoremediasi 300 gram tanaman.

2. Bahan

Pada penelitian ini bahan yang digunakan adalah tanaman *Azolla microphylla*, aquades dan serbuk logam berat tembaga ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). Berikut merupakan persiapan penggunaan bahan yang digunakan dalam penelitian :

a. Tanaman *Azolla microphylla*

Tanaman yang digunakan berasal dari Kabupaten Kabumen dan didapat melalui *e-commerce*. Kriteria tanaman yang digunakan merupakan tanaman yang masih segar dan berwarna hijau dengan panjang 1 – 3 cm.

b. Pembuatan Air Limbah Artifisial

Air limbah artifisial yang dibuat dalam penelitian ini merupakan air limbah artifisial tembaga (Cu). Konsentrasi logam berat tembaga (Cu) yang digunakan dalam penelitian ini yaitu 10 mg/L atau 10 ppm. Hal ini divariasikan berdasarkan penelitian terdahulu oleh Nilamsari dan Rachmadiarti (2019) yang menyatakan bahwa tanaman *Azolla microphylla* yang diuji pada larutan tembaga (Cu) dengan konsentrasi 15 mg/L menunjukkan kondisi daun yang kekuningan dan akar yang lebih rapuh.

Berikut merupakan persamaan (1) pembuatan larutan artifisial logam berat tembaga (Cu) :

Sehingga larutan induk yang dibutuhkan untuk membuat 10 liter air limbah tembaga (Cu) dengan konsentrasi 10 mg/L sebanyak 100 mL.

Dari persamaan di atas didapat skema pembuatan air limbah tembaga (Cu) dengan konsentrasi 10 mg/L.

Serbuk $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

- a. Ditimbang $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ menggunakan timbangan digital sebanyak 1,95 gram
- b. Dimasukkan pada gelas beker

Aquades

- a. Ditambahkan 500 ml aquades ke dalam gelas beker yang berisi serbuk $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
- b. Dihomogenkan

Larutan Induk

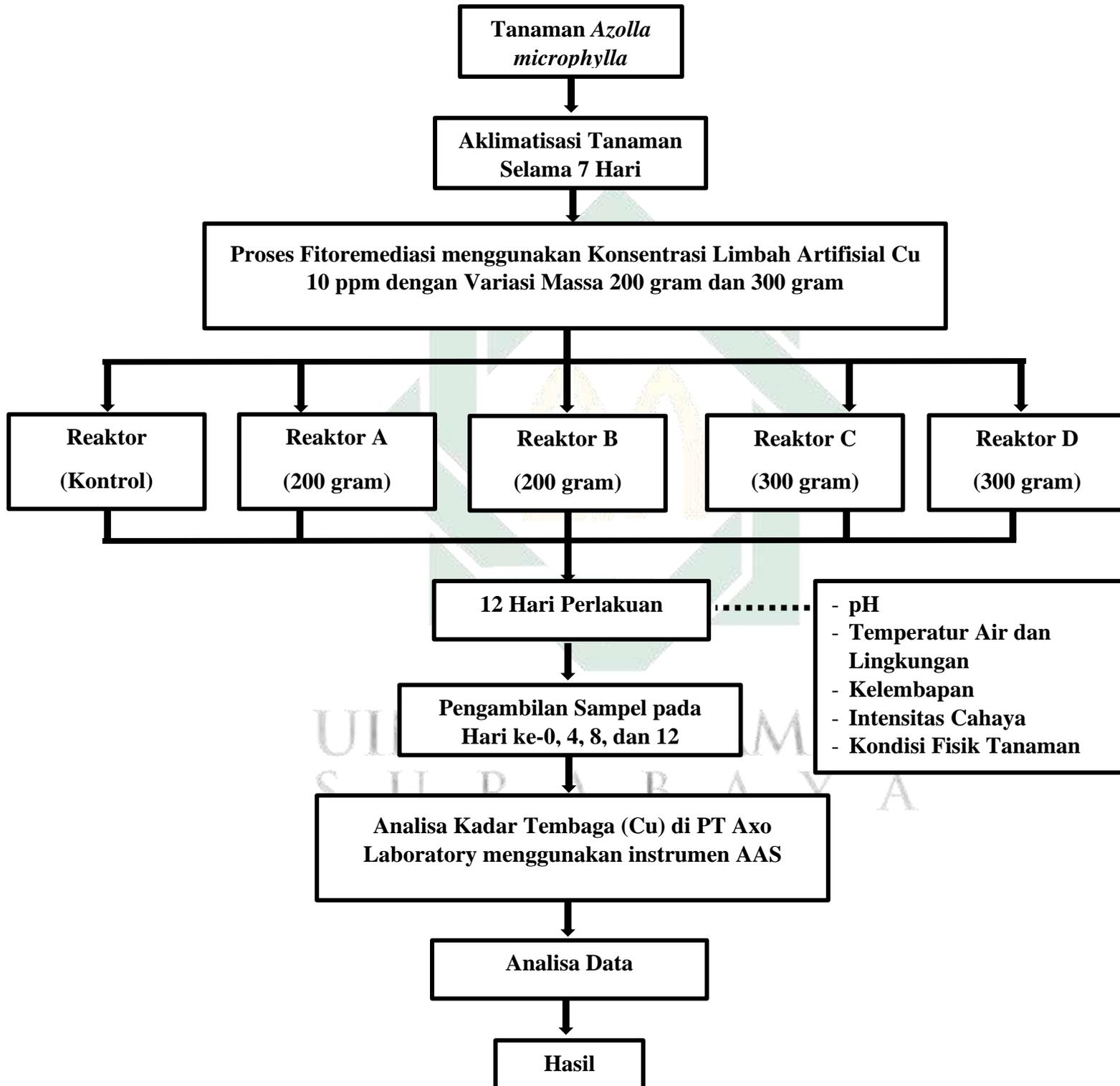
- a. Diambil 100 mL dan diisi menggunakan air PDAM (dengan pH netral) sampai dengan 10 L pada setiap reaktor

Hasil

UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A

3.6.2 Tahapan Pelaksanaan Penelitian

1. Kerangka Penelitian



Gambar 3.2 Bagan Kerangka Penelitian

2. Aklimatisasi Tanaman *Azolla microphylla*

Proses ini memiliki tujuan untuk menyesuaikan tanaman yang digunakan dalam penelitian ini (*Azolla microphylla*) dengan kondisi lingkungan yang baru diluar ekosistemnya. Pada proses ini tanaman dapat dialiri dengan air biasa atau dengan air limbah yang akan diuji. Pada penelitian ini, proses aklimatisasi dilakukan air PDAM dengan pembersihan terlebih dahulu. Tujuan pada proses ini agar *Azolla Microphylla* dapat hidup dengan baik dan tidak mengalami kematian ketika proses penelitian. Tahapan aklimatisasi sebagai berikut :

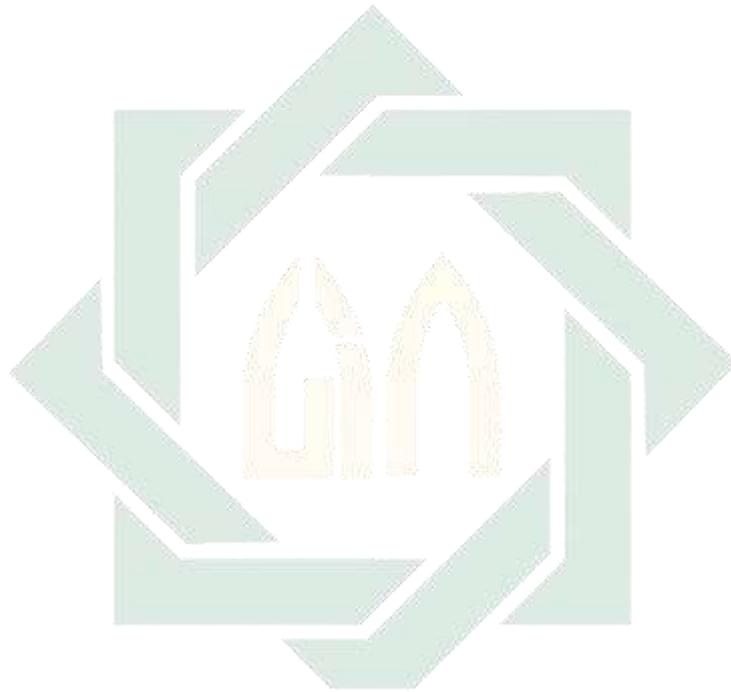
- a. Menyiapkan media tanam untuk uji tanaman uji (*Azolla microphylla*), yaitu air dengan pH netral.
- b. Pembersihan tanaman apabila pada akar maupun daun masih terdapat kotoran, pembersihan dilakukan menggunakan air PDAM.
- c. Proses aklimatisasi dilakukan selama 7 hari dengan pengamatan kondisis fisik tanaman yang nantinya akan digunakan tumbuhan yang masih segar dan sehat untuk diaplikasikan pada proses fitoremediasi.
- d. Apabila tahap aklimatisasi selesai, tanaman dapat dipindahkan ke dalam reaktor pada masing – masing variasi perlakuan.

3. Perlakuan

Pada proses ini dimasukkan sampel air limbah artifisial tembaga (Cu) sebanyak 10 liter (kemudian dimasukkan tanaman *Azolla microphylla* yang telah diaklimatisasi dimasukkan ke dalam reaktor dengan perlakuan 0 gram tanaman (kontrol), 200 gram, dan 300 gram tanaman. Digunakan 200 dan 300 gram tanaman *Azolla microphylla* mengacu pada penelitian Nilamsari (2019) dengan variasi jumlah tanaman yang dikali lipatkan. Hal yang perlu diperhatikan dalam proses ini adalah pemilihan tanaman yang memiliki kondisi fisik yang bagus. Pada proses fitoremediasi ini dilakukan menggunakan sistem *batch*.

H0 = Tidak ada perbedaan terhadap variasi massa tanaman *Azolla microphylla* dalam menurunkan kadar tembaga (Cu) pada air limbah.

H1 = Ada perbedaan terhadap variasi massa tanaman *Azolla microphylla* dalam menurunkan kadar tembaga (Cu) pada air limbah.



UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A

2	pH air berkisar 7,57, suhu air berkisar 25,8°C, intensitas cahaya berkisar 2239 lux, dan kelembapan berkisar 76,6%	Pada hari kedua aklimatisasi tanaman berwarna hijau segar dengan kondisi akar yang kuat	
3	pH air berkisar 6,95, suhu air berkisar 25,8°C, intensitas cahaya berkisar 2278 lux, dan kelembapan berkisar 76,1%	Pada hari ketiga aklimatisasi tanaman berwarna hijau segar dengan kondisi akar yang kuat	
4	pH air berkisar 7,05, suhu air berkisar 25,9°C, intensitas cahaya berkisar 2589 lux, dan kelembapan berkisar 81,6%	Pada hari keempat aklimatisasi tanaman berwarna hijau segar dengan kondisi akar yang kuat	
5	pH air berkisar 6,80, suhu air berkisar 24,6°C, intensitas cahaya berkisar 2241 lux, dan kelembapan berkisar 60,7%	Pada hari kelima aklimatisasi tanaman berwarna hijau segar dengan kondisi akar yang kuat	

Pada **Tabel 4.2**, maka dapat dikatakan bahwa selama proses aklimatisasi berlangsung, tanaman *Azolla microphylla* berada pada kondisi yang optimum untuk pertumbuhan.

4.2 Fitoremediasi Tanaman *Azolla microphylla*

Penelitian fitoremediasi logam berat tembaga (Cu) menggunakan tanaman *Azolla microphylla* dilakukan untuk mengetahui kemampuan penyerapan logam berat Cu pada tanaman tersebut. Penelitian dilakukan selama 12 hari dengan pengujian logam berat pada hari ke 0, 4, 8, dan 12. Laju penyerapan logam berat Cu dapat diketahui dari lamanya waktu pemaparan dan jumlah massa yang digunakan selama penelitian berlangsung. Selama penelitian berlangsung, dilakukan pengamatan fisik terhadap tanaman selama dan dilakukan pengukuran terhadap pH air, suhu, kelembapan udara, dan intensitas cahaya.

4.2.1 Morfologi Tanaman

Tanaman *Azolla microphylla* yang digunakan dalam penelitian ini memiliki panjang berkisar 1 hingga 2 cm. Tanaman yang digunakan dipilih dari proses aklimatisasi sebelumnya yang masih dalam kondisi baik. Selama 12 hari proses fitoremediasi, dilakukan pengamatan terhadap perubahan morfologi berupa kondisi fisik dan struktur tanaman yang tersaji dalam **Tabel 4.3** :

UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A

Tabel 4.3 Morfologi Tanaman Selama Proses Fitoremediasi Berlangsung

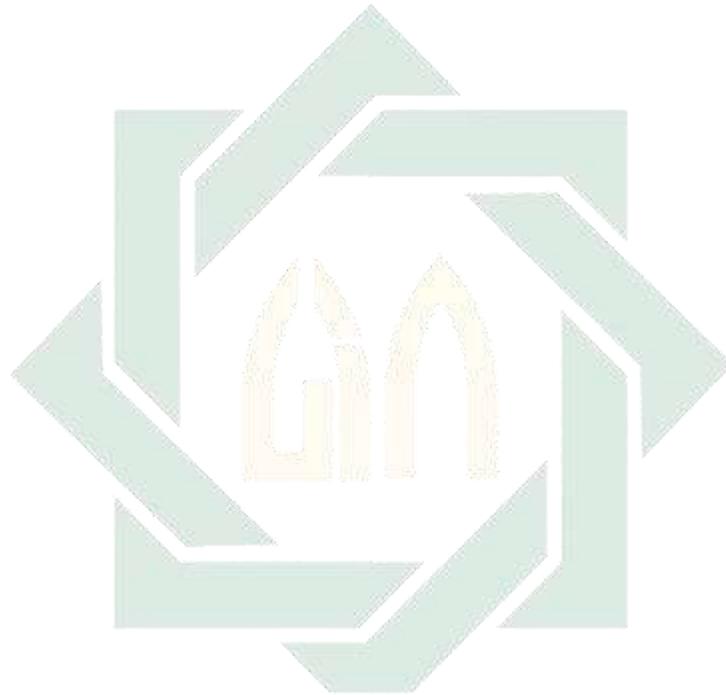
Hari Ke	Reaktor			
	A	B	C	D
0	Kondisi tanaman terlihat sama dengan kondisi aklimatisasi yakni berwarna hijau segar dengan kondisi akar yang kuat dan tidak adanya daun maupun akar yang rontok pada dasar reaktor	Kondisi tanaman terlihat sama dengan kondisi aklimatisasi yakni berwarna hijau segar dengan kondisi akar yang kuat dan tidak adanya daun maupun akar yang rontok pada dasar reaktor	Kondisi tanaman terlihat sama dengan kondisi aklimatisasi yakni berwarna hijau segar dengan kondisi akar yang kuat dan tidak adanya daun maupun akar yang rontok pada dasar reaktor	Kondisi tanaman terlihat sama dengan kondisi aklimatisasi yakni berwarna hijau segar dengan kondisi akar yang kuat dan tidak adanya daun maupun akar yang rontok pada dasar reaktor
1	Kondisi tanaman terlihat sama dengan hari sebelumnya yakni berwarna hijau segar dengan kondisi akar yang kuat dan tidak adanya daun maupun akar yang rontok pada dasar reaktor	Kondisi tanaman terlihat sama dengan hari sebelumnya yakni berwarna hijau segar dengan kondisi akar yang kuat dan tidak adanya daun maupun akar yang rontok pada dasar reaktor	Kondisi tanaman terlihat sama dengan hari sebelumnya yakni berwarna hijau segar dengan kondisi akar yang kuat dan tidak adanya daun maupun akar yang rontok pada dasar reaktor	Kondisi tanaman terlihat sama dengan hari sebelumnya yakni berwarna hijau segar dengan kondisi akar yang kuat dan tidak adanya daun maupun akar yang rontok pada dasar reaktor
2	Kondisi beberapa daun tanaman mulai menunjukkan perubahan warna menjadi hijau muda dengan kondisi akar yang telah rapuh karena beberapa telah rontok ke dasar reaktor	Kondisi beberapa daun tanaman mulai menunjukkan perubahan warna menjadi hijau muda dengan kondisi akar yang telah rapuh karena beberapa telah rontok ke dasar reaktor	Kondisi beberapa daun tanaman mulai menunjukkan perubahan warna menjadi hijau muda dengan kondisi akar yang telah rapuh karena beberapa telah rontok ke dasar reaktor	Kondisi beberapa daun tanaman mulai menunjukkan perubahan warna menjadi hijau muda dengan kondisi akar yang telah rapuh karena beberapa telah rontok ke dasar reaktor
3	Kondisi beberapa daun tanaman yang sebelumnya berwarna hijau muda mengalami perubahan menjadi berwarna kuning pada bagian luar daun dengan kondisi akar yang telah rapuh karena beberapa telah rontok ke dasar reaktor	Kondisi beberapa daun tanaman yang sebelumnya berwarna hijau muda mengalami perubahan menjadi berwarna kuning pada bagian luar daun dengan kondisi akar yang telah rapuh karena beberapa telah rontok ke dasar reaktor	Kondisi beberapa daun tanaman yang sebelumnya berwarna hijau muda mengalami perubahan menjadi berwarna kuning pada bagian luar daun dengan kondisi akar yang telah rapuh karena beberapa telah rontok ke dasar reaktor	Kondisi beberapa daun tanaman yang sebelumnya berwarna hijau muda mengalami perubahan menjadi berwarna kuning pada bagian luar daun dengan kondisi akar yang telah rapuh karena beberapa telah rontok ke dasar reaktor

Hari Ke	Reaktor			
	A	B	C	D
4	Kondisi tanaman sama seperti hari sebelumnya dimana beberapa daun mengalami perubahan warna menjadi kuning kecokelatan dan beberapa akar rontok ke dasar reaktor	Kondisi tanaman sama seperti hari sebelumnya dimana beberapa daun mengalami perubahan warna menjadi kuning kecokelatan dan beberapa akar rontok ke dasar reaktor	Kondisi tanaman sama seperti hari sebelumnya dimana beberapa daun mengalami perubahan warna menjadi kuning kecokelatan dan beberapa akar rontok ke dasar reaktor	Kondisi tanaman sama seperti hari sebelumnya dimana beberapa daun mengalami perubahan warna menjadi kuning kecokelatan dan beberapa akar rontok ke dasar reaktor
5	Kondisi tanaman sama seperti hari sebelumnya dimana beberapa daun mengalami perubahan warna menjadi kuning kecokelatan dan beberapa akar rontok ke dasar reaktor	Kondisi tanaman sama seperti hari sebelumnya dimana beberapa daun mengalami perubahan warna menjadi kuning kecokelatan dan beberapa akar rontok ke dasar reaktor	Kondisi tanaman sama seperti hari sebelumnya dimana beberapa daun mengalami perubahan warna menjadi kuning kecokelatan dan beberapa akar rontok ke dasar reaktor	Kondisi tanaman sama seperti hari sebelumnya dimana beberapa daun mengalami perubahan warna menjadi kuning kecokelatan dan beberapa akar rontok ke dasar reaktor
6	Kondisi tanaman yang mengalami perubahan warna pada daun menjadi kecokelatan semakin bertambah dan jumlah akar yang rontok ke dasar reaktor semakin bertambah	Kondisi tanaman yang mengalami perubahan warna pada daun menjadi kecokelatan semakin bertambah dan jumlah akar yang rontok ke dasar reaktor semakin bertambah	Kondisi tanaman yang mengalami perubahan warna pada daun menjadi kecokelatan semakin bertambah dan jumlah akar yang rontok ke dasar reaktor semakin bertambah	Kondisi tanaman yang mengalami perubahan warna pada daun menjadi kecokelatan semakin bertambah dan jumlah akar yang rontok ke dasar reaktor semakin bertambah
7	Kondisi daun tanaman yang sebelumnya kecokelatan telah menjadi kering dan mati serta akar yang dimiliki telah rontok ke dasar reaktor	Kondisi daun tanaman yang sebelumnya kecokelatan telah menjadi kering dan mati serta akar yang dimiliki telah rontok ke dasar reaktor	Kondisi daun tanaman yang sebelumnya kecokelatan telah menjadi kering dan mati serta akar yang dimiliki telah rontok ke dasar reaktor	Kondisi daun tanaman yang sebelumnya kecokelatan telah menjadi kering dan mati serta akar yang dimiliki telah rontok ke dasar reaktor
8	Kondisi daun yang mengalami perubahan kecokelatan semakin bertambah dengan jumlah akar yang rontok juga semakin bertambah	Kondisi tanaman sama seperti hari sebelumnya dan tidak adanya pertambahan daun yang berubah menjadi kecokelatan	Kondisi daun yang mengalami perubahan kecokelatan semakin bertambah dengan jumlah akar yang rontok juga semakin bertambah	Kondisi daun yang mengalami perubahan kecokelatan semakin bertambah dengan jumlah akar yang rontok juga semakin bertambah

Hari Ke	Reaktor			
	A	B	C	D
9	Kondisi tanaman seperti hari sebelumnya dimana banyak daun yang telah menjadi kecoklatan dan kering serta akar yang rontok	Kondisi tanaman sama seperti hari sebelumnya yakni beberapa daun telah berubah menjadi kecoklatan, namun bila dibandingkan dengan reaktor A, C, dan D, pada reaktor B tidak banyak daun yang berubah menjadi kecoklatan	Kondisi tanaman seperti hari sebelumnya dimana banyak daun yang telah menjadi kecoklatan dan kering serta akar yang rontok	Kondisi tanaman seperti hari sebelumnya dimana banyak daun yang telah menjadi kecoklatan dan kering serta akar yang rontok
10	Kondisi daun pada tanaman sama seperti hari sebelumnya namun jumlah akar yang rontok pada dasar reaktor semakin bertambah	Kondisi daun pada tanaman sama seperti hari sebelumnya namun jumlah akar yang rontok pada dasar reaktor semakin bertambah	Kondisi daun pada tanaman sama seperti hari sebelumnya namun jumlah akar yang rontok pada dasar reaktor semakin bertambah	Kondisi daun pada tanaman sama seperti hari sebelumnya namun jumlah akar yang rontok pada dasar reaktor semakin bertambah
11	Kondisi tanaman semakin banyak yang mengalami perubahan pada daun menjadi kecoklatan dan daun yang sebelumnya berwarna hijau segar menjadi hijau muda dengan kondisi akar yang rontok pada dasar reaktor semakin bertambah	Kondisi beberapa daun tanaman yang awalnya berwarna hijau segar berubah menjadi hijau muda dengan pinggiran kuning kecoklatan, jumlah akar yang rontok pada dasar reaktor semakin bertambah	Kondisi tanaman semakin banyak yang mengalami perubahan pada daun menjadi kecoklatan dan daun yang sebelumnya berwarna hijau segar menjadi hijau muda dengan kondisi akar yang rontok pada dasar reaktor semakin bertambah	Kondisi tanaman semakin banyak yang mengalami perubahan pada daun menjadi kecoklatan dan daun yang sebelumnya berwarna hijau segar menjadi hijau muda dengan kondisi akar yang rontok pada dasar reaktor semakin bertambah
12	Kondisi tanaman sama seperti hari sebelumnya dimana terdapat beberapa tanaman yang masih berwarna hijau segar, namun tidak sedikit yang telah berubah menjadi hijau muda maupun kuning kecoklatan namun jumlah akar	Kondisi tanaman sama seperti hari sebelumnya dimana terdapat beberapa tanaman yang masih berwarna hijau segar, namun tidak sedikit yang telah berubah menjadi hijau muda maupun kuning kecoklatan namun jumlah akar yang rontok pada dasar reaktor semakin bertambah, namun apabila dibandingkan dengan ketiga	Kondisi tanaman sama seperti hari sebelumnya dimana terdapat beberapa tanaman yang masih berwarna hijau segar, namun tidak sedikit yang telah berubah menjadi hijau muda maupun kuning kecoklatan namun jumlah akar	Kondisi tanaman sama seperti hari sebelumnya dimana terdapat beberapa tanaman yang masih berwarna hijau segar, namun tidak sedikit yang telah berubah menjadi hijau muda maupun kuning kecoklatan namun jumlah akar

Hari Ke	Reaktor			
	A	B	C	D
	yang rontok pada dasar reaktor semakin bertambah	reaktor lainnya, pada reaktor B memiliki lebih banyak tanaman yang masih berwarna hijau segar	yang rontok pada dasar reaktor semakin bertambah	yang rontok pada dasar reaktor semakin bertambah

Sumber : Hasil Analisa, 2023



UIN SUNAN AMPEL
SURABAYA

Tanaman *Azolla microphylla* sebelum perlakuan fitoremediasi memiliki kondisi morfologi daun yang tumpang tindih berwarna hijau tua dengan pinggiran hijau muda seperti pada **Gambar 4.1**. Akar yang berbentuk seperti rambut dan memiliki panjang 2 cm dengan kondisi yang kuat seperti yang tertera pada **Gambar 4.2**. Dari kondisi morfologi tersebut menandakan bahwa *Azolla microphylla* berada dalam kategori yang sehat, hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Dwicahya, dkk (2021) yang menyatakan bahwa *Azolla* dapat dikatakan dalam keadaan sehat apabila memiliki daun yang berwarna hijau tua.



Gambar 4.1 Kondisi Daun Tanaman Sebelum Fitoremediasi
Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2023



Gambar 4.2 Kondisi Akar Tanaman Sebelum Fitoremediasi
Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2023

Setelah perlakuan 12 hari fitoremediasi, terdapat beberapa tanaman yang masih hidup dengan daun berwarna hijau muda hingga kekuningan dengan kondisi akar yang rapuh dan tidak sedikit tanaman mengalami perubahan warna pada daun menjadi kecoklatan serta akar yang rontok bahkan dengan kondisi tanaman yang telah mati. Dari kondisi tersebut, menandakan bahwa setelah proses fitoremediasi, daun dan akar tanaman *Azolla microphylla* mengalami klorosis dan nekrosis serta secara tidak langsung akan mengalami penurunan biomassa (Kumar, dkk., 2021). Perubahan morfologi *Azolla microphylla* mulai terlihat sejak hari ke – 2 fitoremediasi, dimana daun yang

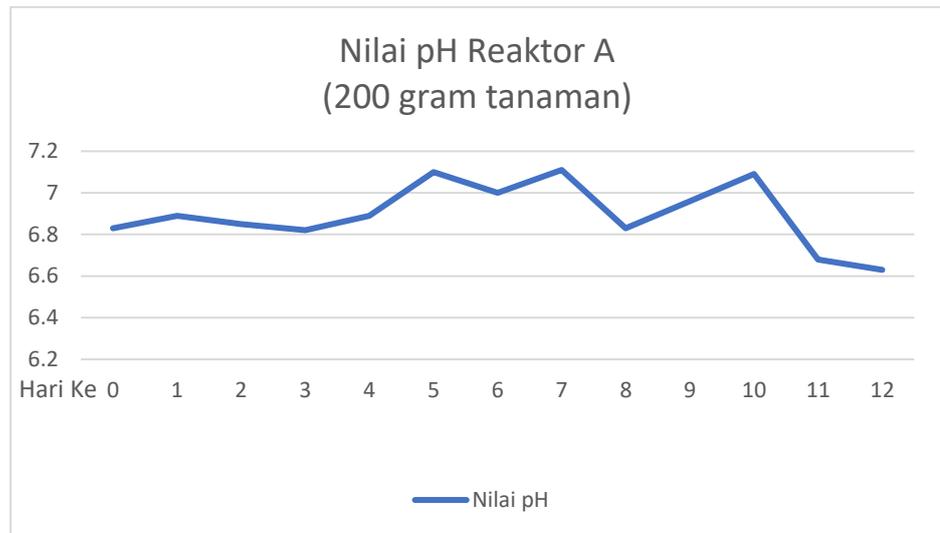
awalnya berwarna hijau segar menjadi hijau muda yang kemudian berubah menjadi kecoklatan sejak hari ke – 5 serta kondisi akar yang rontok sejak hari ke – 2. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Rohmah, dkk (2019) yang menyatakan perubahan pada daun *Azolla pinnata* menjadi kecoklatan terlihat sejak hari ke – 4 akibat proses fitoremediasi kadar COD yang dilakukan selama 7 hari. Daun yang mengalami perubahan warna juga didukung oleh penelitian Nilamsari dan Rachmadiarti (2019) yang menyatakan semakin tinggi kadar logam berat yang diserap oleh *Azolla microphylla* akan menyebabkan kadar klorofil dalam daun menurun sehingga warna hijau pada daun akan semakin memudar. Hal ini juga didukung oleh penelitian Al – Badawi, dkk (2022) yang menyatakan perubahan pada daun *Azolla filiculoides* dan *Lemna minor* setelah 7 hari perlakuan fitoremediasi, hal ini dikarenakan daun mengalami klorosis yang diakibatkan dari penyerapan logam berat Cu yang berlebih. Daun pada tanaman *Azolla* akan mudah berubah menjadi kecoklatan dan kemudian mati apabila akar tanaman telah rontok, hal ini dikarenakan rontoknya akar tanaman dapat menjadi indikasi utama *Azolla* yang tidak sehat bahkan akan mati (Yuliawan, 2017). Kondisi akar tanaman setelah proses fitoremediasi memiliki panjang yang relatif sama dengan panjang sebelum proses fitoremediasi, namun dengan kondisi akar yang tidak lebat dan tidak berambut, hal ini disebabkan karena telah banyak akar yang rontok pada dasar reaktor saat perlakuan fitoremediasi. Kondisi akar tanaman setelah fitoremediasi dapat dilihat pada **Gambar 4.4**.



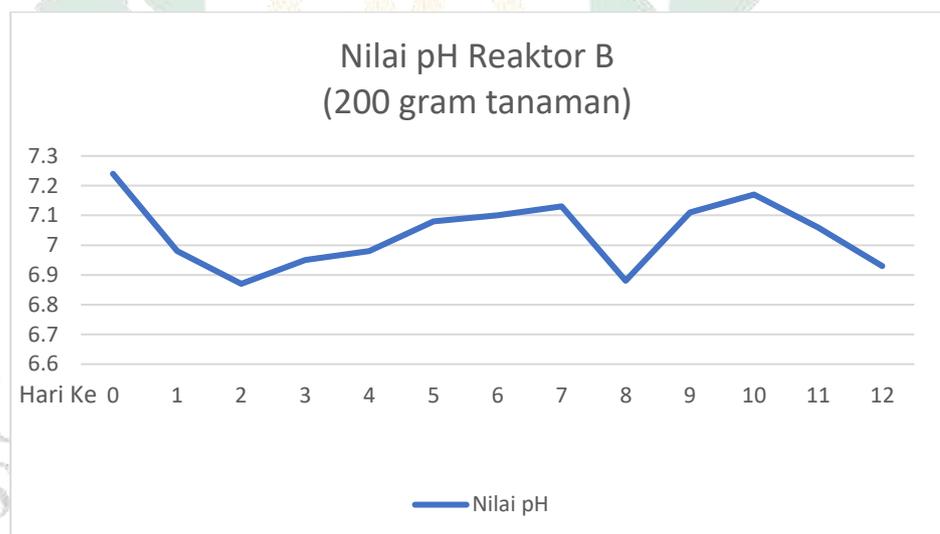
Gambar 4.3 Kondisi Tanaman Setelah Fitoremediasi

Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2023

berkisar anatar 6,25 hingga 7,38 dengan rata – rata pH 7. pH tersebut masih dinyatakan dalam kondisi optimum bagi pertumbuhan *Azolla*.



Gambar 4.5 Nilai pH Reaktor A



Gambar 4.6 Nilai pH Reaktor B

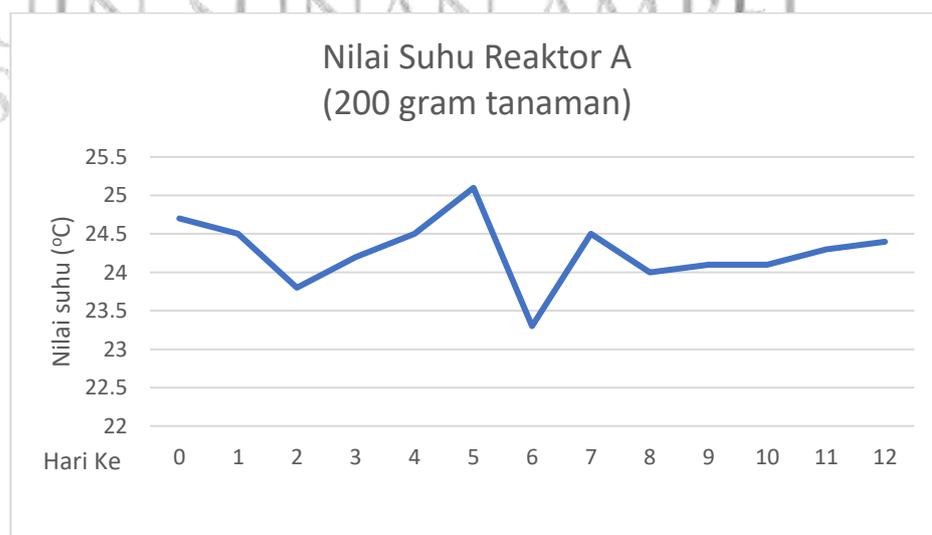
4.2.3 Suhu

Suhu merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi pertumbuhan tanaman (Marzouk,dkk., 2023). Suhu air sangat dipengaruhi oleh suhu lingkungan maupun perubahan cuaca di lingkungan (Soheti, dkk., 2020). Tanaman umumnya dapat tumbuh optimal pada lingkungan dengan rentang suhu 25- 30 °C. Suhu optimum bagi pertumbuhan Azolla adalah 18 °C hingga 28 °C. Apabila *Azolla* berada pada lingkungan dengan suhu di bawah 4 °C maupun di atas 30 °C maka akan menghambat pertumbuhannya (Marzouk, dkk., 2023). Nilai suhu dalam penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 4.5**:

Tabel 4.5 Nilai Suhu

Reaktor	Nilai suhu (°C)												
	Hari ke 0	Hari ke 1	Hari ke 2	Hari ke 3	Hari ke 4	Hari ke 5	Hari ke 6	Hari ke 7	Hari ke 8	Hari ke 9	Hari ke 10	Hari ke 11	Hari ke 12
A (200 gram tanaman)	24.7	24.5	23.8	24.2	24.5	25.1	23.3	24.5	24	24.1	24.1	24.3	24.4
B (200 gram tanaman)	24.9	24.1	23.8	24.6	24.1	25.1	23.7	24.4	23.9	23.8	24.1	24.2	24.4
C (300 gram tanaman)	25.1	24	23.8	24.5	24	25.3	23.7	24.5	24	24.1	24.1	24	24.3
D (300 gram tanaman)	25.1	23.9	23.7	24.4	23.9	25.2	23.9	24.8	24.2	24	23.9	23.8	24.1

Sumber : Hasil Analisa, 2023



Gambar 4.9 Nilai Suhu Reaktor A

Tabel 4.8 Kadar Cu pada Reaktor

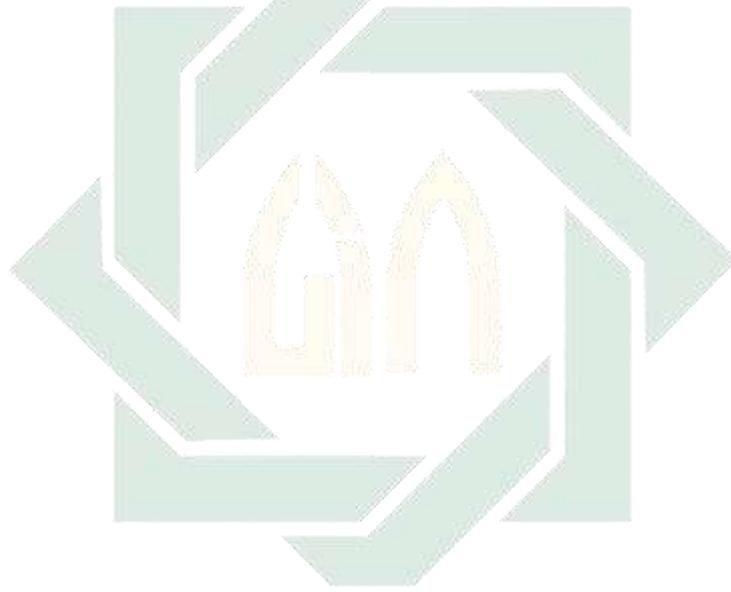
Hari Ke-	Kadar Cu dalam Reaktor				
	Kontrol	A (200 gram tanaman)	B (200 gram tanaman)	C (300 gram tanaman)	D (300 gram tanaman)
0	10,09	10,09	10,09	10,09	10,09
4	10,09	0,1946	0,16	0,0115	0,0172
8	9,73	0,226	0,173	0,0278	0,027
12	9,58	0,305	0,182	0,0353	0,0298

Sumber : Hasil Analisa, 2023

Jika dilihat pada **Tabel 4.8**, reaktor C dan D di hari ke 4 memiliki kadar logam berat Cu dalam air yang dapat dikatakan telah memenuhi baku mutu sesuai dengan Peraturan Pemerintah No 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup tentang baku mutu air sungai dan sejenisnya, baku mutu tembaga (Cu) untuk kelas 1, 2, dan 3 sebesar 0,02 mg/L. Namun pada hari ke – 8 dan 12 fitoremediasi, kadar logam berat Cu dalam air belum memenuhi baku mutu tersebut. Hal tersebut dikarenakan tanaman mengalami titik jenuh.

Titik jenuh merupakan batas maksimum yang dapat ditolerir tanaman dalam menyerap kontaminan. Tingkat jenuh logam berat pada tanaman tergantung pada jenis spesies tanaman, media pertumbuhan atau konsentrasi kontaminasi logam berat dalam media pertumbuhan dan lama waktu kontak (Shingadgaon dan Chavan, 2016). Berdasarkan tabel 4.7, reaktor A, B, C, dan D pada hari ke 8 telah menunjukkan kenaikan konsentrasi logam berat Cu. Hal ini menunjukkan bahwa tanaman *Azolla microphylla* pada semua reaktor mengalami titik jenuh di hari yang sama. Pada penelitian yang dilakukan oleh Udiharto (2009), *Azolla microphylla* mampu menurunkan Pada penelitian yang dilakukan oleh Naghipour, dkk (2018), titik jenuh tanaman *Azolla filiculoides* terhadap logam berat Cd dengan konsentrasi 25 mg/L terjadi pada hari ke-15 penelitian, sedangkan titik jenuh terhadap logam berat Ni terjadi pada konsentrasi 25 mg/L di hari ke-10, dan titik jenuh pada logam berat Pb terjadi pada konsentrasi 25 mg/L di hari ke- 10 penelitian. Sedangkan, pada penelitian yang dilakukan oleh Sari, dkk (2017) *Azolla pinnata* mengalami titik jenuh dalam meremoval logam berat Pb dan Cd pada hari ke-15 fitoremediasi,

logam berat Pb serta penelitian yang dilakukan oleh Taurisna (2020) yang menyatakan tidak adanya perbedaan terhadap perlakuan 10 dan 20 tanaman kayu apu dalam meremoval kadar COD. Pada penelitian yang dilakukan oleh Susilo, dkk (2021) menggunakan uji Mann Whitney, dikatakan bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan terhadap kemampuan tanaman eceng gondok dalam meremoval limbah industri batik dalam konsentrasi 5% dan 10%. Pengujian hipotesis menggunakan uji Mann Whitney juga dilakukan pada penelitian Rummyantseva, dkk (2021) dalam meremoval Cu menggunakan variasi tanaman *Alisma plantago-aquatica* dengan habitat yang berbeda, didapatkan hasil bahwa tidak ada perbedaan signifikan pada penggunaan variasi tersebut.



UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Selama proses fitoremediasi berlangsung, terjadi perubahan morfologi pada tanaman *Azolla microphylla* baik pada daun yang mulai berubah warna menjadi hijau muda dan akar yang mengalami kerontokan pada hari ke-2 penelitian, hal ini dapat disebabkan oleh terjadinya klorosis dan nekrosis pada tanaman *Azolla microphylla* akibat penyerapan Cu yang berlebih.
2. Efisiensi penurunan logam berat Cu menggunakan tanaman *Azolla microphylla* selama 12 hari penelitian memiliki rata – rata sebesar 98,8%. Efisiensi penyisihan logam berat tertinggi terjadi pada hari ke 4 pada setiap reaktornya, yakni reaktor A, B, C, dan D secara berurutan sebesar 98,1%, 98,4%, 99,9%, dan 99,8%.
3. Berdasarkan hasil uji statistik Mann Whitney didapatkan hasil bahwa pada penelitian ini tidak terdapat perbedaan yang nyata (signifikan) pada variasi berat tanaman *Azolla microphylla* dalam meremoval logam berat tembaga (Cu).

5.2 Saran

1. Pada penelitian selanjutnya disarankan menggunakan spesies *Azolla* yang berbeda agar dapat membandingkan kemampuan removal logam berat Cu
2. Pada penelitian selanjutnya disarankan memvariasi waktu kontak dan waktu pengambilan sampel uji
3. Pada penelitian selanjutnya disarankan menggunakan jenis reaktor yang berbeda, seperti reaktor kontinyu untuk membandingkan kemampuan removal logam berat Cu

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Baldawi, Israa Abdulwahab et al. "Removal of copper by *Azolla filiculoides* and *Lemna minor*: phytoremediation potential, adsorption kinetics and isotherms." *Heliyon* vol. 8, 11 e11456. 8 Nov. 2022, doi:10.1016/j.heliyon.2022.e11456
- Antoniadis, V., Levizou, E., Shaheen, S. M., Ok, Y. S., Sebastian, A., Baum, C., Prasad, M. N. V., Wenzel, W. W., & Rinklebe, J. (2017). Trace elements in the soil-plant interface: Phytoavailability, translocation, and phytoremediation—A review. *Earth-Science Reviews*, 171, 621–645. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.005>
- Ashraf, S., Ali, Q., Zahir, Z. A., Ashraf, S., & Asghar, H. N. (2019). Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 174(November 2018), 714–727. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.068>
- Asih, D. W., & Rachmadiarti, F. (2019). *Azolla Microphylla* Sebagai Fitoremediator Logam Pb. *LenteraBio: Berkala Ilmiah Biologi*, 8(1), 85–90.
- Asriyani, L. (2017). *IDENTIFIKASI PENENTUAN WAKTU OPTIMAL PEMBUKAAN STOMATA ALANG-ALANG (Imperata cylindrica L.) DI UIN RADEN INTAN LAMPUNG*.
- Bennicelli, R., Stepniewska, Z., Banach, A., Szajnocha, K., & Ostrowski, J. (2004). The ability of *Azolla caroliniana* to remove heavy metals (Hg(II), Cr(III), Cr(VI)) from municipal waste water. *Chemosphere*, 55(1), 141–146. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.11.015>
- 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). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134788>
- Bian, F., Zhong, Z., Zhang, X., Yang, C., & Gai, X. (2020). Bamboo – An untapped plant resource for the phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Chemosphere*, 246, 125750. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125750>
- Bian, X., Cui, J., Tang, B., & Yang, L. (2018). Chelant-induced phytoextraction of heavy metals from contaminated soils: A review. *Polish Journal of Environmental Studies*, 27(6), 2417–2424. <https://doi.org/10.15244/pjoes/81207>
- Bianchi, E., Biancalani, A., Berardi, C., Antal, A., Fibbi, D., Coppi, A., Lastrucci, L., Bussotti, N., Colzi, I., Renai, L., Scordo, C., Del Bubba, M., & Gonnelli, C. (2020). Improving the efficiency of wastewater treatment plants: Bio-removal of heavy-metals and pharmaceuticals by *Azolla filiculoides* and *Lemna minuta*. *Science of the Total Environment*, 746, 141219. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141219>
- Bocchi, S., & Malgioglio, A. (2010). *Azolla-Anabaena* as a Biofertilizer for Rice Paddy Fields in the Po Valley, a Temperate Rice Area in Northern Italy. *International Journal of Agronomy*, 2010, 1–5. <https://doi.org/10.1155/2010/152158>

- Chua, J., Banua, J. M., Arcilla, I., Orbecido, A., de Castro, M. E., Ledesma, N., Deocarís, C., Madrazo, C., & Belo, L. (2019). Phytoremediation potential and copper uptake kinetics of Philippine bamboo species in copper contaminated substrate. *Heliyon*, 5(9), e02440. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02440>
- Connor, Richard, et al. "The united nations world water development report 2017. wastewater: the untapped resource." The United Nations World Water Development Report (2017).
- Cruz-Olivares, J., Barrera-Díaz, C. E., Martínez-Barrera, G., Pérez-Alonso, C., & Roa-Morales, G. (2018). Comparative application of an irradiated and non-irradiated calcite-type material to improve the removal of Pb in batch and continuous processes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(5), 6297–6307. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.09.051>
- De Wet, L. P. D., et al. "Bioaccumulation of selected heavy metals by the water fern, *Azolla filiculoides* Lam. in a wetland ecosystem affected by sewage, mine and industrial pollution." *Water SA* 16.4 (1990): 281-286.
- Duruibe, J. O., Ogwuegbu, M. O. C., & Egwurugwu, J. N. (2007). Heavy metal pollution and human biotoxic effects. *International Journal of Physical Sciences*, 2(5), 112–118. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.146>
- Dwicahya, N., Yuliana, M., Saputra, A., & Suryana, Y. (2021). Uji Coba Perlakuan pada Media Tumbuh *Azolla* (*Azolla pinnata* R. Br.) di Instalasi Penelitian dan Pengkajian Teknologi Pertanian (IP2TP) Kayuagung. *Prosiding SEMNAS BIO 2021*, 1, 400–411.
- Enochs, B., Meindl, G., Shidemantle, G., Wuerthner, V., Akerele, D., Bartholomew, A., Bulgrien, B., Davis, A., Hoyt, K., Kung, L., Molina, M., Miller, E., Winship, A., Zhang, Y., Graney, J., Collins, D., & Hua, J. (2023). Short and long-term phytoremediation capacity of aquatic plants in Cu-polluted environments. *Heliyon*, 9(1), e12805. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12805>
- Fatonah, S., Asih, D., Mulyanti, D., & Iriani, D. (2013). Penentuan waktu pembukaan stomata pada gulma *Melastoma malabathricum* L. di Perkebunan Gambir Kampar, Riau. *Jurnal Biospecies*, 6(2), 15–22.
- Goala, M., Yadav, K. K., Alam, J., Adelodun, B., Choi, K. S., Cabral-Pinto, M. M. S., Hamid, A. A., Alhoshan, M., Ali, F. A. A., & Shukla, A. K. (2021). Phytoremediation of dairy wastewater using *Azolla pinnata*: Application of image processing technique for leaflet growth simulation. *Journal of Water Process Engineering*, 42(March), 102152. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102152>
- Gunawan, R., & Harianto, B. (2011). *Dongkrak Produksi Lele dengan Probiotik Organik*. Jakarta: PT. AgroMedia Pustaka. Retrieved from [https://books.google.co.id/books?id=wG_OR9ANRWYC&pg=PA70&dq=klasifikasi+azolla+microphylla&hl=id&sa=X&ved=0ahUKEwjBiOCIX7TjAhX1jOYKHjzC8gQ6AEIKTAA#v=onepage&q=klasifikasi azolla microphylla&f=true](https://books.google.co.id/books?id=wG_OR9ANRWYC&pg=PA70&dq=klasifikasi+azolla+microphylla&hl=id&sa=X&ved=0ahUKEwjBiOCIX7TjAhX1jOYKHjzC8gQ6AEIKTAA#v=onepage&q=klasifikasi%20azolla%20microphylla&f=true)
- Handayani, Ika Furi, Elly Setyowati, A. M. S. (2013). *EFISIENSI FITOREMEDIASI PADA AIR TERKONTAMINASI Cu MENGGUNAKAN *Salvinia molesta* Mitchel*. 2, 73–78.

- Hasanpour, M., & Hatami, M. (2020). Application of three dimensional porous aerogels as adsorbent for removal of heavy metal ions from water/wastewater: A review study. *Advances in Colloid and Interface Science*, 284, 102247. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102247>
- Jafari, Nicole & Senobari, Z. & Pathak, R.K.. (2010). Biotechnological potential of *Azolla filiculoides*, *Azolla microphylla* and *Azolla pinnata* for biosorption of Pb(II), Mn (II), Cu (II) and Zn(II). *Ecology, Environment and Conservation*. 16. 443-449.
- John B. Williams (2002) Phytoremediation in Wetland Ecosystems: Progress, Problems, and Potential, *Critical Reviews in Plant Sciences*, 21:6, 607-635, DOI: 10.1080/0735-260291044386
- Kafle, A., Timilsina, A., Gautam, A., Adhikari, K., Bhattarai, A., & Aryal, N. (2022). Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents. *Environmental Advances*, 8(November 2021), 100203. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100203>
- Kösesakal, T., & Yildiz, M. (2019). Growth performance and biochemical profile of *Azolla pinnata* and *Azolla caroliniana* grown under greenhouse conditions. *Archives of Biological Sciences*, 71(3), 475–482. <https://doi.org/10.2298/ABS190131030K>
- Kumar, V., Pandita, S., Singh Sidhu, G. P., Sharma, A., Khanna, K., Kaur, P., Bali, A. S., & Setia, R. (2021). Copper bioavailability, uptake, toxicity and tolerance in plants: A comprehensive review. *Chemosphere*, 262, 127810. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127810>
- Kumar, S.S., Kadier, A., Malyan, S.K., Ahmad, A., Bishnoi, N.R. (2017). Phytoremediation and Rhizoremediation: Uptake, Mobilization and Sequestration of Heavy Metals by Plants. In: Singh, D., Singh, H., Prabha, R. (eds) *Plant-Microbe Interactions in Agro-Ecological Perspectives*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6593-4_15
- Kurniawan, F., Cahyadi, T. A., Ernawati, R., Sb, W., & Amri, N. A. (2022). *Overview Metode Fitoremediasi Terhadap Penyerapan Logam Berat Pada Air Terkontaminasi Menggunakan Jenis Tumbuhan Air*. 2022(November).
- Lidiana, R., Suprayogi, D., & Nengse, S. (2022). Kemampuan Tanaman Genjer (*Limnocharis Flava*) Dalam Menurunkan Kadar Logam Berat Timbal Pada Air Limbah Artifisial. *Jukung (Jurnal Teknik Lingkungan)*, 8(1), 72–83. <https://doi.org/10.20527/jukung.v8i1.13034>
- Majeti, Prasad & Freitas, Helena. (2005). Metal-tolerant plants: Biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Trace Elements in the Environment*. CRC Press, pp. 501-524
- Mantang, W., Mantiri, F. R., & Kolondam, B. J. (2018). Identifikasi Tumbuhan Paku Air (*Azolla* sp.) Secara Morfologi dan Molekuler dengan Menggunakan Gen *rbcL* (Identification of Water Ferns (*Azolla* sp.) Based on Morphological Traits and Molecular Marker Using *rbcL* Gene). *Jurnal Bios Logos*, 8(2), 38. <https://doi.org/10.35799/jbl.8.2.2018.21445>

- Marzouk, S. H., Tindwa, H. J., Amuri, N. A., & Semoka, J. M. (2023). An overview of underutilized benefits derived from *Azolla* as a promising biofertilizer in lowland rice production. *Heliyon*, 9(1), e13040. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13040>
- Muralikrishna, I. V., & Manickam, V. (2017). Industrial Wastewater Treatment Technologies, Recycling, and Reuse. In *Environmental Management*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811989-1.00013-0>
- Naghipour, D., Ashrafi, S. D., Gholamzadeh, M., Taghavi, K., & Naimi-Joubani, M. (2018). Phytoremediation of heavy metals (Ni, Cd, Pb) by *Azolla filiculoides* from aqueous solution: A dataset. *Data in Brief*, 21, 1409–1414. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.10.111>
- Nilamsari, D. D., & Rachmadiarti, F. (2019). Kemampuan *Azolla microphylla* dalam menyerap logam berat tembaga (cu) pada konsentrasi yang berbeda. *LenteraBio*, 8(3), 207–212. <https://jurnalmahasiswa.unesa.ac.id/index.php/lenterabio/article/view/30638>
- Oktaviani, L. (2020). Fitoremediasi Logam Berat Seng (Zn) dengan Memanfaatkan Tanaman Apu- Apu (*Pistia Stratiotes*) Menggunakan Sistem Batch. [Http://Digilib.Uinsa.Ac.Id/Id/Eprint/42507](http://Digilib.Uinsa.Ac.Id/Id/Eprint/42507), 21(1), 1–9.
- Pancawati, D., & Yulianto, A. (2016). Implementasi Fuzzy Logic Controller untuk Mengatur Ph Nutrisi pada Sistem Hidroponik Nutrient Film Technique (NFT). *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 5(2), 278. <https://doi.org/10.25077/jnte.v5n2.284.2016>
- Prieto, M. J., Acevedo, S. O. A., Prieto, G. F., & Nallely, T. G. (2018). Phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. *Biodiversity Int J*, 2(4), 362-376.
- Raissa, D. G. (2017). Fitoremediasi Air yang Tercemar Limbah Laundry dengan Menggunakan Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes*) dan Kayu Apu (*Pistia stratiotes*). <Http://Repository.Its.Ac.Id/Id/Eprint/42976>, 1–153. <http://repository.its.ac.id/id/eprint/42976>
- Rohmah, S. N., IW, H. R., & Hilal, N. (2019). EFISIENSI TANAMAN *Azolla pinnata* DALAM MENURUNKAN KADAR COD (Chemical Oxygen Demand) PADA LIMBAH CAIR SOHUN DI DESA ARCAWINANGUN KECAMATAN PURWOKERTO TIMUR KABUPATEN BANYUMAS TAHUN 2018. *Buletin Keslingmas*, 38(1), 37–47. <https://doi.org/10.31983/keslingmas.v38i1.4072>
- Rumyantseva, A., Neporozhniaia, I., Denisova, E., & Mazurkevich, A. (2021). Estimation of the phytoremediation potential of *Alisma plantago-aquatica* L. taken from different stations during water contamination by Cu and Pb (Russia, Vologda region). *E3S Web of Conferences*, 265. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126504004>
- Sadeghi, R., Zarkami, R., Sabetraftar, K., & Van Damme, P. (2013). A review of some ecological factors affecting the growth of *Azolla* spp. *CJES Caspian Journal of Environmental Sciences Caspian J. Env. Sci*, 11(1), 65–76. <http://research.guilan.ac.ir/cjes>
- Safirliyah. (2014). Agama Dan Kesadaran Menjaga Lingkungan Hidup. *Substantia*, 16(April), 61–78.

- Saleem, M. H., Ali, S., Rehman, M., Rana, M. S., Rizwan, M., Kamran, M., Imran, M., Riaz, M., Soliman, M. H., Elkelish, A., & Liu, L. (2020). Influence of phosphorus on copper phytoextraction via modulating cellular organelles in two jute (*Corchorus capsularis* L.) varieties grown in a copper mining soil of Hubei Province, China. *Chemosphere*, 248, 126032. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126032>
- Saralegui, A. B., Willson, V., Caracciolo, N., Piol, M. N., & Boeykens, S. P. (2021). Macrophyte biomass productivity for heavy metal adsorption. *Journal of Environmental Management*, 289(March). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112398>
- Sarkar, A., Bhakta, J. N., Bubai bhakta, & Ohnishi, K. (2023). Evaluating growth-dependent enhanced carbon dioxide sequestration potential of *Azolla pinnata* using cattle wastes (cow dung and cow urine). *Heliyon*, 9(3), e14610. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14610>
- Sari, E. M., Hanifah, T. A., & Kartika, G. F. (n.d.). POTENSI TANAMAN AZOLLA (*Azolla pinnata*) SEBAGAI FITOREMEDIATOR ION TIMBAL (II), ION KADMIUM (II) DAN ION KROMIUM (VI). <Http://Repository.Unri.Ac.Id/Xmlui/Handle/123456789/8848>, *Ii*, 1–8.
- SELA, M., GARTY, J., & TEL-OR, E. (1989). The accumulation and the effect of heavy metals on the water fern *Azolla filiculoides*. *New Phytologist*, 112(1), 7–12. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1989.tb00302.x>
- Singhal, A. (2021). Heavy metals in drinking water and their impact on human health. *Asian Journal of Research in Social Sciences and Humanities*, 11(11), 586–591. <https://doi.org/10.5958/2249-7315.2021.00270.7>
- Sitarska, M., Traczewska, T., Filarowska, W., Hołtra, A., Zamorska-Wojdyła, D., & Hanus-Lorenz, B. (2023). Phytoremediation of mercury from water by monocultures and mixed cultures pleustophytes. *Journal of Water Process Engineering*, 52(February). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103529>
- Soheti, P., Sumarlin, L. O., & Marisi, D. P. (2020). Fitoremediasi Limbah Radioaktif Cair Menggunakan Kayu Apu (*Pistia stratiotes*) Untuk Menurunkan Kadar Torium. *Eksplorium*, 41(2), 139. <https://doi.org/10.17146/eksplorium.2020.41.2.6092>
- Sotyohadi, Wahyu Surya Dewa, & I Komang Somawirata. (2020). Perancangan Pengatur Kandungan TDS dan PH pada Larutan Nutrisi Hidroponik Menggunakan Metode Fuzzy Logic. *ALINIER: Journal of Artificial Intelligence & Applications*, 1(1), 33–43. <https://doi.org/10.36040/alinier.v1i1.2520>
- Susilo, H., Oktavia, S., & Roudotussaadah, R. (2021). Phytoremediation of batik industry wastewater using water hyacinth plant as a medium for maintaining *Cyprinus Carpio* L. *Biological Environment and Pollution*, 1(1), 11–18. <https://doi.org/10.31763/bioenvipo.v1i1.382>
- Talebi, M., Tabatabaei, B. E. S., & Akbarzadeh, H. (2019). Hyperaccumulation of Cu, Zn, Ni, and Cd in *Azolla* species inducing expression of methallothionein and phytochelatin synthase genes. *Chemosphere*, 230, 488–497. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.098>

- Tan, C. Y., Shan, X. Q., Xu, G. Z., Lin, Y. M., & Chen, Z. L. (2011). Phytoaccumulation of cadmium through *Azolla* from aqueous solution. *Ecological Engineering*, 37(11), 1942–1946. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.01.010>
- Tan, H. W., Pang, Y. L., Lim, S., & Chong, W. C. (2023). A state-of-the-art of phytoremediation approach for sustainable management of heavy metals recovery. *Environmental Technology and Innovation*, 30, 103043. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103043>
- Tripathi, R. D., Srivastava, S., Mishra, S., Singh, N., Tuli, R., Gupta, D. K., & Maathuis, F. J. M. (2007). Arsenic hazards: strategies for tolerance and remediation by plants. *Trends in Biotechnology*, 25(4), 158–165. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2007.02.003>
- Vigiyanti, K. A., Lise, C., & Eko, S. (2017). Pengaruh umur tanaman terhadap penyerapan logam pb pada *Azolla microphylla* dimanfaatkan sebagai sumber belajar biologi. *Jurnal*, 1(4), 304–307. <http://research-report.umm.ac.id/index.php/research-report/article/view/1003>
- Wuana, R. A., & Okieimen, F. E. (2011). Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *ISRN Ecology*, 2011, 1–20. <https://doi.org/10.5402/2011/402647>
- Yan, A., Wang, Y., Tan, S. N., Mohd Yusof, M. L., Ghosh, S., & Chen, Z. (2020). Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land. *Frontiers in Plant Science*, 11(April), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00359>
- Yenita Putri, S., Budijono, B., & Purwanto, E. (2020). Akumulasi Logam Berat Timbal dan Seng dalam Kiambang dan *Azolla* Menggunakan Rakit Apung Aquatic Plant Di Sungai Siak Kota Pekanbaru Oleh. *Jurnal Online Mahasiswa*, 7(2).
- Zhang, X., Lin, A. J., Zhao, F. J., Xu, G. Z., Duan, G. L., & Zhu, Y. G. (2008). Arsenic accumulation by the aquatic fern *Azolla*: Comparison of arsenate uptake, speciation and efflux by *A. caroliniana* and *A. filiculoides*. *Environmental Pollution*, 156(3), 1149–1155. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.04.002>