

**FITOREMEDIASI LOGAM BERAT MERKURI (Hg) MENGGUNAKAN
TANAMAN *Myriophyllum aquaticum* DENGAN SISTEM BATCH**

TUGAS AKHIR

Diajukan guna memenuhi salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T) pada program studi Teknik Lingkungan



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

Disusun Oleh

MUFIDATUN WAFIQ
NIM. H75219027

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

2023

HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

PERNYATAAN KEASLIAN

Nama : Mufidatun Wafiq
Nim : H75219027
Program Studi : Teknik Lingkungan
Angkatan : 2019

Menyatakan bahwa saya tidak melakukan plagiat dalam penulisan tugas akhir saya yang berjudul **"FITOREMEDIASI LOGAM BERAT MERKURI (Hg) MENGGUNAKAN TANAMAN *Myriophyllum aquaticum* DENGAN SISTEM BATCH"**. Apabila suatu saat nanti saya terbukti melakukan Tindakan plagiat maka saya bersedia menerima saksi yang ditetapkan

Demikian pernyataan keaslian ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 14 Juni 2023

Yang Menyatakan



(MUFIDATUN WAFIQ)

Nim. H75219027

LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING



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 : Mufidatun Wafiq
NIM : H75219027
Judul Tugas Akhir : Fitoremediasi Logam Berat Merkuri (Hg) Menggunakan
Tanaman *Myriophyllum aquaticum* dengan Sistem Batch

Telah disetujui untuk pendaftaran Sidang Tugas Akhir

Surabaya, 27 Juni 2023

Dosen Pembimbing 1

Ida Munfarida, M.Si.,M.T.
NIP.198411302015032001

Dosen Pembimbing 2

Argowi Pribadi, M.Eng.
NIP.198701032014031001

HALAMAN PENGESAHAN

LEMBAR PENGESAHAN

Nama : Mufidatun Wafiq
NIM : H75219027
Judul Tugas Akhir : Fitoremediasi Logam Berat Merkuri (Hg) Menggunakan
Tanaman *Myriophyllum aquaticum* Dengan Sistem
Batch

Telah dipertahankan di depan tim penguji Skripsi

Di Surabaya, 6 Juli 2023

Mengesahkan,

Dewan Penguji,

Penguji I

Ida Munfarida, M.Si, M.T.
NIP. 198411302015032001

Penguji II

Arqow Pribadi, M.Eng.
NIP. 198701032014031001

Penguji III

Sarita Oktorina, M.Kes
NIP. 198710052014032003

Penguji IV

Ir. Shinfi Wazna Auvaria, M.T.
NIP. 198603282015032001

Mengetahui,

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Sunan Ampel Surabaya



Saepul Hamdani, M.Pd.
NIP. 196507312000031002

PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH



**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 : MUFIDATUN WAFIQ
NIM : H75219027
Fakultas/Jurusan : SAINS DAN TEKNOLOGI / TEKNIK LINGKUNGAN
E-mail address : mufidawafiq@gmail.com

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Perpustakaan UIN Sunan Ampel Surabaya, Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif atas karya ilmiah:
 Sekripsi Tesis Desertasi Lain-lain (.....)
yang berjudul:

FITOREMEDIASI LOGAM BERAT MERKURI (Hg) MENGGUNAKAN

TANAMAN *Myriophyllum aquaticum* DENGAN 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, 14 Juli 2023

Penulis

(MUFIDATUN WAFIQ)

FITOREMEDIASI LOGAM BERAT MERKURI (Hg) MENGGUNAKAN TANAMAN *Myriophyllum aquaticum* DENGAN SISTEM BATCH

ABSTRAK

Pencemaran air merupakan masuknya polutan yang besar di dalam air sehingga mempengaruhi kualitas air serta ada banyak jenis dan penyebab kontaminasi air. Merkuri atau air raksa (Hg) adalah logam murni yang merupakan satu-satunya logam paling berbahaya diantara logam berat lainnya. Salah satu cara pengolahan limbah yang dapat dilakukan secara biologi adalah penggunaan media tanam yang disebut dengan fitoremediasi. Salah satu tanaman yang mampu meremediasi limbah adalah *Myriophyllum aquaticum* tanaman yang mampu meremediasi limbah serta mampu mentolerir empat logam berat yakni Zn, Cu, Fe, dan Hg dari air yang terkontaminasi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kondisi morfologi (akar, batang, dan daun) berdasarkan pengamatan langsung ciri fisik tanaman *Myriophyllum aquaticum* selama fitoremediasi berlangsung, menganalisis pengaruh variasi konsentrasi Merkuri (Hg) terhadap kemampuan tanaman *Myriophyllum aquaticum* dalam menurunkan logam berat merkuri (Hg), serta nilai efisiensi removal logam berat merkuri pada fitoremediasi dengan tanaman *Myriophyllum aquaticum*. Metode dalam penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan menggunakan variasi konsentrasi sebesar 4,20 mg/L dan 9,62 mg/L, jumlah reaktor yang digunakan sebanyak 6 reaktor secara dua kali pengulangan, selama fitoremediasi berlangsung dilakukan pengukuran pH, suhu, dan konsentrasi. Pengujian statistik menggunakan uji statistik regresi untuk mengetahui pengaruh variasi konsentrasi. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tanaman mengalami perubahan warna menjadi coklat dan hitam pada reaktor A dan reaktor B baik dari daun maupun batang terjadi pada hari ke-19 fitoremediasi. Nilai signifikansi $0,756 > 0,05$ yang mengindikasikan bahwa H_0 diterima atau tidak ada pengaruh yang signifikan pada variasi konsentrasi sebesar 4,20 mg/L dan 9,62 mg/L terhadap penurunan konsentrasi setelah dilakukan perlakuan dengan sejumlah 18 tanaman. Nilai efisiensi pada reaktor 1 dengan konsentrasi 4,20 mg/L (kontrol) memiliki nilai tertinggi pada hari pengambilan sampel ke-21 sebesar 12,85% pada reaktor 2 dengan konsentrasi 9,70 mg/L (kontrol) memiliki nilai tertinggi pada hari pengambilan sampel ke-21 sebesar 5,4% pada reaktor 3 dengan konsentrasi 4,20 mg/L (perlakuan 18 tanaman) memiliki nilai tertinggi pada hari pengambilan sampel ke-14 sebesar 87,8% pada reaktor 4 dengan konsentrasi 9,62 mg/L (perlakuan 18 tanaman) memiliki nilai tertinggi pada hari pengambilan sampel ke-14 sebesar 40,5%.

Kata kunci : Merkuri (Hg), Fitoremediasi, *Myriophyllum aquaticum*, sistem batch, variasi konsentrasi

***PHYTOREMEDIATION OF MERCURY (Hg) HEAVY METAL USING
Myriophyllum aquaticum WITH BATCH SYSTEM***

ABSTRACT

Water pollution involves the entry of significant pollutants into the water, thus affecting water quality, and there are many types and causes of water contamination. Mercury or Hg is a pure metal that is the most hazardous among other heavy metals. One of the biological wastewater treatment methods is using a planting medium called phytoremediation. One plant capable of remediating waste is *Myriophyllum aquaticum*, which can remediate waste and tolerate four heavy metals from contaminated water, namely Zn, Cu, Fe, and Hg. The objective of this study was to determine the morphological conditions (roots, stems, and leaves) based on direct observations of the physical characteristics of *Myriophyllum aquaticum* plants during phytoremediation, analyze the effect of varying concentrations of mercury (Hg) on the ability of *Myriophyllum aquaticum* plants to reduce mercury (Hg) and assess the efficiency value of mercury heavy metal removal in phytoremediation using *Myriophyllum aquaticum* plants. The experimental method was employed in this study with concentration variations of 4,20 mg/L and 9,62 mg/L. Six reactors were used with two repetitions, and during the phytoremediation process, pH, temperature, and concentration measurements were conducted. Statistical testing involved regression analysis to determine the effect of concentration variations. The results showed that the plants changed color to brown and black in reactor A and reactor B, both in the leaves and stems, which occurred on the 19th day of phytoremediation. The significance value of $0.756 > 0.05$ indicated that H_0 was accepted, meaning there was no significant effect of concentration variations of 4.20 mg/L and 9.62 mg/L on concentration reduction after treatment with 18 plants. The efficiency value in reactor 1 with a concentration of 4.20 mg/L (control) had the highest value on the 21st day of sampling at 12.85%. In comparison, in reactor 2, with a concentration of 9.70 mg/L (control), the highest value was recorded on the 21st day of sampling at 5.4%. In reactor 3, with a concentration of 4.20 mg/L (treatment with 18 plants), the highest value was observed on the 14th day of sampling at 87.8%, and in reactor 4, with a concentration of 9.62 mg/L (treatment with 18 plants), the highest value was recorded on the 14th day of sampling at 40.5%

Keywords: Mercury (Hg), Phytoremediation, *Myriophyllum aquaticum*, batch system, concentration variations.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN.....	iii
PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	iv
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Manfaat Penelitian.....	6
1.5 Batasan Masalah.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Limbah Cair.....	7
2.1.1 Air Limbah Domestik	7
2.1.2 Air Limbah Industri	8
2.1.3 Karakteristik Air Limbah.....	8
2.2 Logam Berat Merkuri (Hg)	9
2.2.1 Karakteristik Logam Merkuri (Hg).....	10
2.2.2 Dampak Logam Berat Merkuri (Hg)	12
2.3 Teknologi Pengolahan Limbah	12
2.3.1 Pengolahan Limbah Cair Secara Biologi.....	14
2.3.2 Pengolahan Limbah Cair Secara Fisika	15
2.3.3 Pengolahan Limbah Cair secara Kimia	16
2.4 Fitoremediasi	16
2.4.1 Mekanisme Fitoremediasi	17
2.4.2 Tanaman Hiperakumulator	22
2.4.3 <i>Myriophyllum aquaticum</i>	24

2.4.4 Aklimatisasi	25
2.5 Jenis-jenis Reaktor	25
2.6 Penelitian Terdahulu.....	28
2.7 Integrasi Keilmuan	33
BAB III METODE PENELITIAN	35
3.1 Waktu Penelitian	35
3.2 Lokasi Penelitian	35
3.2 Variabel Penelitian	36
3.3 Tahap Penelitian	37
3. 4 Kerangka Penelitian	42
3.5 Rancangan Percobaan.....	44
3.6 Analisis Data	47
BAB IV PEMBAHASAN.....	49
4.1 Karakteristik Tanaman	49
4.2 Aklimatisasi.....	50
4.3 Fitoremediasi Tanaman <i>Myriophyllum aquaticum</i>	53
4.5 Analisis pH Air.....	65
4.6 Analisis suhu Air	67
4.7 Efisiensi Removal.....	68
4.9 Analisis Pengaruh Variasi Konsentrasi	71
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	75
5.1 Kesimpulan.....	75
5.2 Saran.....	75
DAFTAR PUSTAKA	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Reaksi Klorofil dengan Hg.....	18
Gambar 2. 2 Mekanisme Fitoremediasi tanaman dalam menyerap polutan	19
Gambar 2. 3 (a) Fitokelatin, (b) Kompleks Fitokelatin-Hg	21
Gambar 2. 4 Reaksi Sistein dengan Senyawa Dimetil Merkuri.....	21
Gambar 2. 5 Skema Sistem Fitoremediasi	23
Gambar 2. 6 Tanaman <i>Myriophyllum aquaticum</i>	24
Gambar 2. 7 Reaktor Batch.....	26
Gambar 2. 8 Reaktor Kontinyu	27
Gambar 2. 9 Reaktor Fed-batch	28
Gambar 3. 1 Diagram Alir Tahap Penelitian	37
Gambar 3. 2 Kerangka Penelitian	42
Gambar 3. 3 Reaktor A	46
Gambar 3. 4 Reaktor B.....	46
Gambar 3. 5 Reaktor C1 & C2.....	47
Gambar 3. 6 Reaktor D1 & D2	47
Gambar 4. 1 Panjang Tanaman <i>Myriophyllum aquaticum</i>	49
Gambar 4. 2 Berat Tanaman <i>Myriophyllum aquaticum</i>	50
Gambar 4. 4 Grafik Penurunan Kadar Logam Merkuri (Hg).....	62
Gambar 4. 5 Mekanisme Penyerapan Tumbuhan	63
Gambar 4. 8 Grafik Efisiensi Removal.....	69

UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Baku Mutu Air Sungai dan Sejenisnya	11
Tabel 2. 2 Rangkuman Penelitian Terdahulu	28
Tabel 3. 2 Rancangan Percobaan	44
Tabel 3. 3 Kolmogorov-Smirnov	71
Tabel 4. 1 Tahap Aklimatisasi	51
Tabel 4. 2 Kondisi Tanaman Selama Fitoremediasi	53
Tabel 4. 3 Hasil Pengukuran pH	66
Tabel 4. 4 Hasil Pengukuran Suhu	67
Tabel 4. 5 Hasil Efisiensi Removal	69
Tabel 4. 6 Uji Regresi Linear Sederhana	72
Tabel 4. 7 Model Summary	73



UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pencemaran air merupakan masuknya unsur atau senyawa berbahaya atau bahan yang tidak diinginkan di dalam air dengan polutan yang besar sehingga mempengaruhi kualitas air serta ada banyak jenis dan penyebab kontaminasi air. Manusia dan makhluk hidup lainnya menghasilkan sampah sebagai hasil dari aktivitasnya, kemudian dibuang ke sungai, danau, laut, dan badan air lainnya. Sumber kontaminan air yang sangat mungkin adalah limbah yang dihasilkan oleh industri dan akhirnya masuk ke dalam air. Limbah tersebut dapat menyebabkan kontaminasi bakteri dan kelimpahan nutrisi dalam konsentrasi berlebihan (*eutrofikasi*) (Pratiwi, 2020).

Tingkat pencemaran air sungai dan laut di Indonesia sangat tinggi. Pada tahun 2010 terdapat 79 kasus pencemaran lingkungan yang mencemari 65 sungai di Indonesia. Asian Development Bank pernah menyatakan bahwa pencemaran air merugikan Indonesia hingga 45 triliun pertahun dalam biaya, termasuk kerugian dari industri pariwisata. Salah satu penyumbang terbesar Indonesia terhadap pencemaran sungai dan lautannya adalah dari limbah rumah tangga. Limbah rumah tangga ringan (*greywater*) berasal dari air bekas cucian peralatan rumah tangga seperti piring, pakaian, dan barang-barang lainnya. Sedikitnya 1,3 juta meter kubik limbah cair rumah tangga dari 22 juta penduduk Jabodetabek dialirkan kesungai, belum termasuk penduduk dari daerah perkotaan lainnya (Saputra dkk., 2020).

Penelitian Suryani, dkk. (2021) menyatakan bahwa air sungai yang telah terpapar limbah merkuri bisa masuk ke sumur hingga jarak 10 meter. Peristiwa keracunan merkuri di Teluk Buyat Indonesia pernah terjadi, Pencemaran diduga disebabkan oleh limbah PT Newmont Minahasa salah satu penelitian menyampaikan bahwa kadar merkuri di dasar Sungai Rungan sebesar 0,554 mg/l dan di Sungai Kahayan, Kalimantan Tengah sebesar 0,789 mg/l. Sedangkan ambang batas untuk sedimen hanya 0,005 mg/l. Menurut Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No 2 tahun 1998 yang mengatur tentang kadar merkuri dalam

air sebesar 0,001 mg/l. Pencemaran tersebut diakibatkan oleh aktivitas penambangan emas tanpa izin (PETI) di wilayah tersebut

Limbah industri anorganik lebih sulit dikendalikan dan menimbulkan resiko yang lebih besar. Beberapa sumber pencemaran yaitu knalpot mobil, limbah dari operasi pertambangan, limbah dari industri peleburan, penggunaan bahan aditif pertanian (seperti lumpur atau kompos perkotaan), pestisida, dan pupuk mineral adalah beberapa sumber polusi. Karena bersifat karsinogenik dan mutagenik logam berat yang sulit terurai secara alami memerlukan perhatian khusus bagi manusia dan lingkungan. Industri kimia mengeluarkan limbah berbahaya yang mengandung senyawa yang bersifat toksik misalnya merkuri (Hg) (Suhar dkk., 2022).

Merkuri atau air raksa (Hg) adalah logam murni yang merupakan satu-satunya logam cair pada suhu ruang. Logam murni adalah cairan putih berwarna perak mengkilat, tidak berbau. Saat dipanaskan hingga 357°C, Hg akan menguap. Merkuri (Hg) adalah unsur renik pada kerak bumi hanya sekitar 0,08 mg/l dan logam ini banyak tertimbun di daerah pertambangan. Merkuri (Hg) dianggap sebagai logam berat yang paling beracun diantara logam berat lainnya di lingkungan. Proses industri seperti yang ada di industri farmasi, kertas, pertanian, klorin dan soda kaustik yang menghasilkan merkuri (Hg) serta dilepaskan ke lingkungan (Rahayu & Mangkoedihardjo, 2022). Ataksia, tremor, disartria, gangguan bicara dan pendengaran, efek samping yang terjadi akibat kadar merkuri yang tinggi. Gejala ini sering memburuk pada tahap akut dan menyebabkan kelumpuhan, demensia, koma, dan akhirnya kematian. Toksisitas merkuri dapat mempengaruhi orang dewasa dan janin. Ketika seorang ibu terpapar merkuri selama kehamilan, janin mungkin menderita kerusakan otak (Pratiwi, 2020).

Masalah utama dari logam berat di suatu lokasi yang terpenting adalah terakumulasinya dengan bahan-bahan yang merupakan penyedia makanan bagi mikroba dan bahan yang menyebabkan keracunan bahan-bahan yang terdapat pada tanah, udara maupun air. Logam-logam berat menjadi pencemar karena terbawa oleh air kedalam bahan makanan yang kemudian dikonsumsi oleh manusia dan hewan serta mikroba, sehingga memengaruhi metabolismenya yang tidak sedikit akan menyebabkan kematian (Wignyanto, 2020) .

Menjadi salah satu makhluk Allah SWT, manusia memainkan peran penting dalam melindungi dan memanfaatkan lingkungan dengan sebaik-baiknya agar sesuai dengan kebutuhan mereka. Namun, kerusakan ekosistem yang disebabkan oleh pembuangan limbah cair ke dalam air terutama buatan manusia. Allah SWT tidak menyukai adanya kemudharatan yang terjadi pada ciptaannya, sebagaimana Allah SWT berfirman dalam Surat Q.S Ar-Ruum ayat 41:

ظَهَرَ الْفَسَادُ فِي الْبَرِّ وَالْبَحْرِ بِمَا كَسَبَتْ أَيْدِي النَّاسِ لِيُذِيقَهُمْ بَعْضَ الَّذِي عَمِلُوا لَعَلَّهُمْ يَرْجِعُونَ ٤١

Terjemahan : “telah nampak kerusakan didarat dan dilaut disebabkan karena perbuatan tangan manusia, supaya Allah merasakan kepada mereka sebahagian dari (akibat) perbuatan mereka, agar mereka (Kembali ke jalan yang benar)(Q.S.Ar-ruum:41)”.

Salah satu solusi yang dapat dilakukan untuk mengurangi dampak pencemaran limbah adalah dengan melakukan upaya perbaikan pada kondisi lingkungan agar bumi tetap bersih. Limbah yang terkontaminasi dapat digunakan kembali dengan aman atau dengan mengolah limbah hingga limbah telah memenuhi ambang batas yang telah ditetapkan. Pengolahan limbah cair telah banyak dilakukan sebelumnya dari yang menggunakan konvensional seperti sistem biologis menggunakan aerob, anaerob dan kombinasi aerob-anaerob, menggunakan gabungan fisik kimiawi dengan pembubuhan koagulan, menggunakan tumbuhan melalui mekanisme *phytoremediation*, dan menggunakan teknologi membran (Maulana & Marsono, 2021). Salah satu cara pengolahan limbah yang dapat dilakukan secara biologi adalah penggunaan media tanam yang disebut dengan fitoremediasi. Fitoremediasi adalah penggunaan tanaman dan mikroorganisme terkait untuk mengurangi jumlah kandungan dari beban pencemar. Jenis tanaman yang digunakan dalam fitoremediasi juga sangat bermacam-macam. Tumbuhan ini harus memiliki kemampuan untuk menyerap kontaminan yang ada pada limbah. Hal tersebut harus diperhatikan dalam pemilihan tanaman fitoremediasi yang akan digunakan (Novita dkk., 2019).

Salah satu tanaman yang mampu meremediasi limbah adalah *Myriophyllum aquaticum* yang nantinya akan digunakan dalam penelitian. Berdasarkan penelitian terdahulu dari (Guo dkk., 2020) tentang evaluasi potensi hiperakumulasi cadmium

dan toleransi *Myriophyllum aquaticum* menyatakan tanaman *Myriophyllum aquaticum* mampu menyerap logam berat cadmium hingga kadar 40 mg/L dengan konsentrasi $17.970 \pm 1020,01$ mg/kg dan dapat menyerap Cadmium melalui akar dan daunnya. Menurut penelitian (Kamal dkk., 2004) Tanaman *Myriophyllum aquaticum* mampu mentolerir empat logam berat yakni Zn, Cu, Fe, dan Hg dari air yang terkontaminasi. Efisiensi penyisihan masing-masing adalah 99,8%, 76,7%, 41,62%, dan 33,9% untuk Hg, Fe, Cu, dan Zn. Tanaman *Myriophyllum aquaticum* memiliki toleransi paling besar serta dianggap sebagai tanaman hiperakumulator. Dalam penelitian terdahulu dari (Kuswantoro, 2020) tentang konservasi, potensi fitoremediasi dan status invasi koleksi tumbuhan akuatik kebun raya bali menyatakan salah satu koleksi tumbuhan di kebun raya bali yaitu *Myriophyllum aquaticum* dapat meremediasi logam berat nikel (Ni), timbal (Pb), seng (Zn), kobalt (Co), tembaga (Cu), besi (Fe), mangan (Mn). Berdasarkan penelitian terdahulu dari (Rondonuwu, 2014) tentang fitoremediasi limbah merkuri memakai tanaman dan sistem reaktor menyatakan jenis tanaman yang mencuat di permukaan air (*emergent*) dan akarnya tenggelam (*amphibious*) memiliki kemampuan lebih tinggi dalam mengakumulasi logam berat termasuk merkuri dibandingkan dengan jenis tanaman mengambang.

Tumbuhan merupakan salah satu makhluk hidup ciptaan Allah SWT sebagai bentuk kekuasaannya yang dapat digunakan dan dipelihara oleh manusia. Hal tersebut telah tertuang dan diperjelas dalam firman Allah SWT pada Q.S Al-Luqman ayat 10 :

خَلَقَ السَّمَوَاتِ بِغَيْرِ عَمَدٍ تَرْوَاهَا وَآلَقَى فِي الْأَرْضِ رَوَاسِيَ أَنْ تَمِيدَ بِكُمْ وَبَثَّ فِيهَا مِنْ كُلِّ دَابَّةٍ وَأَنْزَلْنَا مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَأَنْبَتْنَا فِيهَا مِنْ كُلِّ زَوْجٍ كَرِيمٍ ۝ ١٠

Terjemahan : “Dia menciptakan langit tanpa tiang sebagaimana kamu melihatnya, dan Dia meletakkan gunung-gunung (di permukaan) bumi agar ia (bumi) tidak menggoyangkan kamu dan memperkembangbiakkan segala macam jenis makhluk bergerak yang bernyawa di bumi. Dan kami turunkan air hujan dari langit, lalu kami tumbuhkan padanya segala macam tumbuh-tumbuhan yang baik (Q.S. Al-Luqman:10)”.

Penelitian fitoremediasi ini menggunakan sistem reaktor batch karena sistem batch dalam pola kerjanya sangat flexibel dan mudah serta semua reaktan ditambahkan di awal proses dan tidak ada penambahan atau pengeluaran ketika proses berlangsung. Proses batch beroperasi secara konstan karena reaktan akan melakukan proses dengan tanaman dan media secara fitoremediasi selama waktu genang tersebut. Dalam industri, reaktor batch biasanya digunakan untuk fase larutan, jarang untuk fase gas, karena dengan adanya pengaduk resiko kebocoran akan cukup tinggi (Suharto dkk., 2011)

Berdasarkan pemaparan diatas, dilakukan penelitian tentang “Fitoremediasi Logam Berat Merkuri (Hg) Menggunakan Tanaman *Myriophyllum aquaticum* Dengan Sistem Batch”.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini yaitu :

1. Bagaimana kondisi morfologi (akar, batang dan daun) berdasarkan pengamatan langsung ciri fisik tanaman *Myriophyllum aquaticum* selama fitoremediasi berlangsung?
2. Bagaimana pengaruh variasi konsentrasi Merkuri (Hg) terhadap kemampuan tanaman *Myriophyllum aquaticum* dalam menurunkan logam berat merkuri (Hg)?
3. Berapa nilai efisiensi removal dari logam berat merkuri pada fitoremediasi dengan tanaman *Myriophyllum aquaticum*?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu :

1. Mengetahui kondisi morfologi (akar, batang, dan daun) berdasarkan pengamatan langsung ciri fisik tanaman *Myriophyllum aquaticum* selama fitoremediasi berlangsung.
2. Menganalisis pengaruh variasi konsentrasi Merkuri (Hg) terhadap kemampuan tanaman *Myriophyllum aquaticum* dalam menurunkan logam berat merkuri (Hg).
3. Menganalisis nilai efisiensi removal logam berat merkuri pada fitoremediasi dengan tanaman *Myriophyllum aquaticum*.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun penelitian yang telah dilakukan, manfaat yang diperoleh adalah sebagai berikut :

1. Bagi peneliti

Manfaat penelitian bagi peneliti untuk memperluas ilmu pengetahuan peneliti tentang alternatif pengolahan limbah cair dengan memanfaatkan tanaman *Myriophyllum aquaticum* dengan cara fitoremediasi

2. Bagi masyarakat

Manfaat penelitian bagi masyarakat untuk sumber referensi dan informasi bagi penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan upaya pengolahan limbah cair dengan Teknik fitoremediasi, serta menambah pengetahuan bagi masyarakat pada umumnya.

1.5 Batasan Masalah

Adapun Batasan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Air limbah yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan air limbah artificial Merkuri (Hg)
2. Tanaman yang digunakan adalah *Myriophyllum aquaticum*
3. Tanaman pada tahap aklimatisasi menggunakan air aquades sebanyak 2 liter
4. Jumlah tanaman yang ditetapkan dalam reaktor sebanyak 18 tanaman dari spesies yang sama dan berat 1 g
5. Reaktor yang digunakan sejumlah 6 buah dengan sistem batch atau menggenang dan memiliki Panjang 30 cm, lebar 20 cm, dan tinggi 20 cm.
6. Volume air limbah dalam reaktor sebanyak 7 liter
7. Pengukuran dilakukan pada hari ke 0,7,14,21 meliputi kadar Merkuri (Hg), dan pengukuran pH air, suhu air dan pengamatan langsung ciri fisik tanaman *Myriophyllum aquaticum* meliputi warna daun, batang setiap hari.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Limbah Cair

Limbah cair adalah air limbah yang dihasilkan dari rumah tangga, perdagangan, perkantoran, industri atau ruang publik lainnya dan biasanya mengandung unsur atau senyawa yang berbahaya bagi kesehatan atau kehidupan manusia dan dapat mempengaruhi kelestarian lingkungan. Jika dikelola tidak tepat, limbah cair dapat menyebabkan degradasi lingkungan dan menjadi sumber penyakit bagi masyarakat umum, serta dapat memberikan pengaruh negatif yang signifikan terhadap ekosistem. Karena unit perusahaan dan kegiatan membuang air limbah ke badan air, pemerintah menetapkan batas ukuran polutan yang dapat diterima yang disebut dengan standar baku mutu kualitas air (Sandra dkk., 2022). Limbah cair terbagi menjadi dua yakni limbah domestik dan limbah industri.

2.1.1 Air Limbah Domestik

Air limbah domestik adalah air limbah dari kegiatan usaha atau pemukiman, rumah makan, perkantoran, tempat usaha, apartemen. Kamar mandi, dapur, air bekas cucian, dan semua limbah cair rumah lainnya adalah sumber utama timbulan air limbah domestik. Air limbah domestik dapat diolah secara biologis karena seringkali memiliki tingkat kontaminan organik yang relatif tinggi. seringkali mengandung senyawa organik pencemar yang relatif tinggi dan dapat diolah dengan proses pengolahan secara biologis. Air limbah domestik harus diolah di unit pengolahan air limbah (IPAL) sebelum dilepaskan ke lingkungan (Sulistia dkk., 2019).

Berdasarkan hasil dari buangan endapan air limbah terbagi menjadi dua yakni *Grey water* dan *Black water*. *Grey water* adalah air limbah yang dihasilkan dari air bekas cucian, kamar mandi, dan dapur. Sedangkan *black water* adalah air limbah yang berasal dari kotoran manusia dalam hal ini tinja dan urin manusia. Biasanya, Instalasi Pengolahan Lumpur Tinja bertanggung jawab untuk mengelola limbah *black water* lebih lanjut. Sebagai pilihan untuk meminimalisir produksi lumpur tinja di IPLT, lumpur dari residu pengolahan dari IPLT dapat di daur ulang menjadi kompos (Najibullah dkk., 2022).

2.1.2 Air Limbah Industri

Limbah cair industri merupakan salah satu sumber limbah yang berdampak besar terhadap kualitas lingkungan. Meskipun pihak terkait menyadari hal tersebut, namun sejauh ini masih banyak air limbah industri yang tidak memenuhi baku mutu yang dibuang ke sungai, danau, rawa dan tanah. Hal ini dapat menyebabkan masalah lingkungan yang berakibat negatif bagi ekosistem dan kehidupan makhluk hidup (Saptati & Himma, 2018).

Industri yang berbeda pasti akan menghasilkan limbah cair dalam jumlah dan karakteristik yang berbeda. Kemampuan proses dan produksi masing-masing sektor menentukan kondisi limbah cair yang ada di industri yang berbeda. Karena adanya keragaman jenis, karakteristik dan volume limbah cair pada industri yang berbeda-beda, maka tidak memungkinkan untuk menyesuaikan dengan baku mutu limbah cair pada seluruh industri. Baku mutu untuk limbah cair industri di Indonesia diatur melalui Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No.5 Tahun 2014 tentang Baku Air Limbah bagi usaha atau kegiatan (Saptati & Himma, 2018).

2.1.3 Karakteristik Air Limbah

Karakteristik yang harus diketahui dalam menentukan air limbah terbagi menjadi 3 yaitu, karakteristik fisik, karakteristik kimia, dan karakteristik biologi. 3 karakteristik tersebut dapat dijabarkan sebagai berikut (Sandra dkk., 2022) :

1. Karakteristik Fisik

Karakteristik fisik dari suatu limbah cair baik limbah domestik maupun limbah industri ditentukan oleh :

- a. Temperatur
- b. Jumlah Padatan Terlarut (*Total Dissolved Solid/TDS*)
- c. Jumlah Padatan Tersuspensi (*Total Suspended Solid/TSS*)
- d. Kekeruhan
- e. Warna
- f. Salinitas
- g. Bau

2. Karakteristik Kimia

Karakteristik kimia berdampak pada limbah cair selain karakteristik fisik. Karakteristik kimia adalah sifat-sifat tertentu yang dihasilkan dari reaksi kimia unsur ionik, unsur atau senyawa kimia yang masuk ke dalam air, dan proses kimia yang dapat mempengaruhi zat atau unsur aslinya. Berikut adalah beberapa contoh karakteristik kimia, yakni :

- a. pH
- b. Logam, seperti : Timbal, Kadmium, Kromium, Besi. Fosfat.
- c. Oksigen Terlarut/Disolved Oxygen (DO)
- d. Kebutuhan oksigen biokimiawi/Biochemical Oxygen Demand (BOD)
- e. Kebutuhan Oksigen Kimiawi/Chemical Oxygen Demand (COD)
- f. Minyak /lemak

3. Karakteristik Biologi

Analisis biologis harus dilakukan untuk menentukan apakah bakteri patogen ada atau tidak ada dalam air limbah. Adanya banyak bakteri dalam limbah cair merupakan hal yang sangat berbahaya karena dapat menyebarkan penyakit. Selain itu, dapat dimanfaatkan untuk mengukur tingkat pencemaran limbah cair sebelum dilepaskan ke sungai. Bakteri coliform, khususnya *E.coli* adalah salah satu mikroorganisme yang mungkin menunjukkan kualitas air.

2.2 Logam Berat Merkuri (Hg)

Logam adalah unsur kimia yang memiliki konduktivitas tinggi, kelenturan, dan kilau, dan secara sukarela kehilangan trons mereka untuk membentuk kation. Distribusi logam di atmosfer dipantau oleh sifat dari logam yang diberikan dan faktor lingkungan. Logam berat berbahaya disebabkan sistem bioakumulasi yaitu peningkatan konsentrasi unsur kimia di dalam tubuh makhluk hidup. Logam-logam berat dapat menimbulkan efek kesehatan bagi manusia tergantung pada bagian mana logam berat tersebut terikat dalam tubuh. Daya racun yang dimiliki akan bekerja sebagai penghalang kerja enzim sehingga proses metabolisme tubuh terputus (Rosita dkk., 2022)

Merkuri merupakan polutan yang sangat berbahaya dan sangat beracun bagi organisme perairan dan manusia. Merkuri tidak dapat diuraikan oleh bakteri sehingga dapat terakumulasi dalam air. Merkuri dapat masuk ke dalam air melalui kegiatan kegiatan pertambangan, sisa pembakaran batu bara, limbah pabrik, fungisida, pestisida, limbah rumah tangga, dan lain-lain. Pada tahun 1956, di Teluk Minamata, Jepang, terjadi kasus keracunan merkuri di sebuah pabrik kimia. Limbah pabrik yang mengandung merkuri masuk ke Teluk Minamata dan kemudian terakumulasi pada ikan dan kerang. Ikan dan kerang kemudian dikonsumsi oleh manusia, sehingga merkuri juga terakumulasi pada manusia. Kadar merkuri yang tinggi dapat menyebabkan ataksia, gangguan bicara dan pendengaran, tremor, dan disartria. Pada tingkat akut, gejala ini seringkali memburuk dengan kelumpuhan, demensia, koma, dan akhirnya kematian. Keracunan merkuri tidak hanya terjadi pada orang dewasa tetapi juga pada janin. Merkuri dapat menyebabkan kerusakan otak pada janin dari ibu yang terinfeksi merkuri (Pratiwi, 2020).

2.2.1 Karakteristik Logam Merkuri (Hg)

Merkuri atau air raksa (Hg) adalah logam alami yang merupakan satu-satunya logam cair pada suhu kamar (25°C) dan mudah menguap. Dalam tabel periodik, unsur air raksa atau merkuri (Hg) mempunyai nomor atom (Na) 80 dan termasuk golongan II B. Diantara semua unsur logam, merkuri menduduki urutan pertama paling beracun dibandingkan dengan kadmium (Cd), perak (Ag), Nikel (Ni), Timbal (Pb), Aksen (As), Kromium (Cr), Timah (Sn), dan Seng (Zn) (Rosita dkk., 2022). Logam murni adalah cairan putih keperakan yang mengkilap, tidak berbau. Hg sebagian besar terdapat di lokasi penambangan, meskipun faktanya hanya ada di kerak bumi pada konsentrasi 0,08 mg/kg. Merkuri logam berat dianggap yang paling berbahaya bagi lingkungan. Acrodynia, atau penyakit merah muda, adalah nama lain untuk keracunan merkuri. Farmasi, pengawet pulp dan kertas, sektor pertanian, sektor klorin, dan soda kaustik adalah beberapa contoh operasi industri yang melepaskan merkuri ke lingkungan. Merkuri memiliki kemampuan untuk bergabung dengan unsur lain dan membentuk merkuri organik dan anorganik. Paparan terhadap peningkatan kadar logam organik dan anorganik serta merkuri dapat membahayakan otak, ginjal, dan janin yang sedang berkembang (Adhani & Husaini, 2017).

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 baku mutu untuk kadar logam berat Merkuri (Hg) pada air sungai dan sejenisnya sebagai berikut :

Tabel 2. 1 Baku Mutu Air Sungai dan Sejenisnya

No.	Parameter	Unit	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3	Kelas 4
1.	Arsen (As)	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,10
2.	Selenium (Se) terlarut	mg/L	0,01	0,05	0,05	0,05
3.	Merkuri (Hg) terlarut	mg/L	0,001	0,002	0,002	0,005
4.	Besi (Fe) terlarut	mg/L	0,3	-	-	-
5.	Kadmium (Cd) terlarut	mg/L	0,01	0,01	0,01	0,01
6.	Mangan (Mn) terlarut	mg/L	0,1	-	-	-
7.	Nikel (Ni) terlarut	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,1
8.	Seng (Zn) terlarut	mg/L	0,05	0,05	0,05	2
9.	Tembaga (Cu) terlarut	mg/L	0,02	0,02	0,02	0,2
10.	Timbal (Pb) terlarut	mg/L	0,03	0,03	0,03	0,5
11.	Kromium heksavalen (Cr-VI)	mg/L	0,05	0,05	0,05	1
12.	Minyak dan lemak	mg/L	1	1	1	10
13.	Deterjen total	mg/L	0,2	0,2	0,2	-
14.	Barium (Ba) terlarut	mg/L	1,0	-	-	-
15.	Boron (B) terlarut	mg/L	1,0	1,0	1,0	1,0
16.	Padatan terlarut total (TDS)	mg/L	1.000	1.000	1.000	2.000
17.	Padatan tersuspensi total (TSS)	mg/L	40	50	100	400
18.	Derajat keasaman (pH)		6-9	6-9	6-9	6-9
19.	Kebutuhan oksigen biokimiawi (BOD)	mg/L	2	3	6	12
20.	Kebutuhan oksigen kimiawi (COD)	mg/l	10	25	40	80
21.	Oksigen terlarut (DO)	mg/l	6	4	3	1

Sumber : (PP No. 22 Tahun 2021)

2.2.2 Dampak Logam Berat Merkuri (Hg)

Kerusakan spesies akuatik dan manusia telah di analisis dalam beberapa penelitian. Zulfahmi (2017) melakukan penelitian dampak paparan merkuri terhadap kelangsungan hidup ikan nila, tingkat pertumbuhan berat badan, indeks hati, indeks gonad, harapan hidup, efisiensi reproduksi, dan diameter telur ikan nila. Hasil penelitian menunjukkan bahwa 96 jam paparan merkuri pada 1,64 mg/l dapat mengakibatkan 50% ikan nila mati. Hal ini disebabkan kerusakan pada insang sehingga menghambat pernapasan ikan. Merkuri klorida dapat menurunkan kesuburan ikan nila dan indeks gonad pada nilai 0,196 mg/l. Efek merkuri pada gejala perimenstrual pada 394 pekerja dan 296 pekerja wanita di pabrik pengolahan makanan di China. Hasil penelitian menunjukkan bahwa paparan merkuri dapat menyebabkan peningkatan insiden ketidakaturan menstruasi dan dismenore (Pratiwi, 2020).

Mikroorganisme mengubah merkuri di tanah dan air menjadi metilmerkuri, racun yang dapat menumpuk seiring bertambahnya usia ikan dan meningkatnya tingkat nutrisi. EPA telah menyatakan merkuri klorida dan metilmerkuri sangat karsinogenik. Paparan merkuri yang tinggi dapat mengubah fungsi otak dan menyebabkan rasa malu, tremor, masalah ingatan, mudah marah, dan mengurangnya penglihatan atau pendengaran (Adhani & Husaini, 2017)

2.3 Teknologi Pengolahan Limbah

Teknologi pengolahan air limbah merupakan perilaku untuk menjaga keberlanjutan lingkungan. Apapun jenis teknologi pengolahan air limbah industri yang dibangun harus dapat dioperasikan dan dipelihara oleh perusahaan setempat. Berbagai teknik pengolahan air limbah untuk menghilangkan polutan telah dilakukan, diuji dan dikembangkan selama ini. Beberapa jenis industri yang banyak mengandung logam berat adalah industri yang berhubungan dengan pekerjaan permesinan, metalurgi, pelapisan logam, cat, kulit, serta industri pertambangan. Air limbah yang mengandung logam berat termasuk golongan limbah bahan berbahaya dan beracun (B3). Salah satu pengolahan air limbah secara konvensional dapat dapat dirancang dengan sedemikian rupa agar cara operasinya mudah dan biaya operasionalnya murah (Said, 2010). yakni :

a. Pertukaran ion

Logam berat dapat dihilangkan dengan cara pertukaran ion baik menggunakan resin anion maupun resin kation, tetapi dengan konsentrasi yang besar dapat mengoksidasi resin sehingga umur resin menjadi pendek (Said, 2010).

b. Presipitasi

Presipitasi dilakukan dengan menambahkan NaOH untuk menyisihkan logam berat terlarut. Dalam konteks ini ini diinginkan sebanyak mungkin terbentuk padatan logam hidroksida sehingga dapat dipisahkan dari cairan secara fisik, misalnya dengan sedimentasi (Said, 2010; Suprihatin & Indrasti, 2010).

c. Netralisasi

Netralisasi menggunakan bahan kimia dilakukan dengan menambahkan bahan atau agent yang bersifat asam kuat atau basa kuat. Netralisasi digunakan untuk mereduksi kandungan logam berat dan menaikkan kadar pH. Netralisasi limbah diperlukan jika kondisi limbah masih diluar range pH baku mutu (pH 6-9) limbah yang diperlukan, sebab dalam diluar kondisi tersebut bersifat asam (Said, 2010)

d. Biosorpsi

Biosorpsi merupakan teknologi pengolahan limbah terbaru yang dapat menyisihkan/menghilangkan logam-logam beracun dalam limbah cair, oleh karena itu biosorpsi dapat dipertimbangkan sebagai teknologi alternatif untuk pengolahan limbah cair industri. Proses biosorpsi dapat terjadi karena adanya material biologis yang disebut biosorben dan adanya larutan yang mengandung logam berat dengan afinitas yang tinggi sehingga mudah dengan biosorben (Ratnawati dkk., 2010).

e. Adsorpsi

Adsorpsi dapat dilakukab dengan menggunakan karbon aktif teknis bentuk granular dan bubuk secara curah (batch). Selama proses

adsorpsi dilakukan pengadukan (pengocokan) dengan shaker (Suprihatin & Indrasti, 2010).

Pengembangan teknologi pengolahan air limbah biasanya dibagi menjadi tiga metode pengolahan yakni, (Zulkifli, 2014) :

2.3.1 Pengolahan Limbah Cair Secara Biologi

Seluruh air buangan yang bersifat biodegradable dapat diolah secara biologi. Sebagai pengolahan sekunder, pengolahan secara biologi dipandang sebagai pengoahan yang paling efisien dan murah. Dalam beberapa periode telah berkembang berbagai metode pengolahan biologi dengan segala modifikasinya. Pada dasarnya, proses penguraian secara biologi dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu :

- a. Proses aerob, yang berlangsung dengan hadirnya oksigen.

Pengolahan limbah secara aerob merupakan pengolahan air dengan cara penambahan oksigen kedalam air. Penambahan oksigen dilakukan sebagai salah satu usaha pengambilan zat pencemar yang terkandung didalam air, sehingga konsentrasi zat pencemar akan hilang atau bahkan dapat dihilangkan sama sekali. Pada praktek dilapangannya terdapat dua cara untuk menambahkan oksigen kedalam air yaitu dengan memasukkan udara kedalam air atau memaksa air keatas untuk berkontak dengan oksigen (Yuniarti & Biyatmoko, 2019)

- b. Proses anaerob, yang berlangsung tanpa adanya oksigen.

Pengolahan limbah secara anaerobik merupakan proses degradasi senyawa organik seperti karbohidrat, protein dan lemak yang terdapat dalam limbah cair oleh bakteri anaerobik tanpa adanya kehadiran oksigen . waktu tinggal limbah cair di dalam kolam anaerobic adalah selama 30 hari dimana proses anaerobic terjadi didalam kolam dapat menurunkan kadar BOD dan COD limbah cair hingga 70%

Pada dasarnya, reaktor pengolahan secara biologi dapat dibedakan atas dua jenis, yaitu :

- a. Reaktor pertumbuhan tersuspensi (*suspended growth reactor*)
- b. Reaktor pertumbuhan lekat (*attached growth reactor*)

Mikroorganisme tumbuh dan berkembang dalam keadaan tersuspensi di dalam reaktor. Dalam jenis reaktor ini, proses lumpur aktif berlangsung. Oxidation ditch dan kontak stabilisasi adalah dua dari beberapa perubahan pada proses lumpur aktif yang telah dilakukan. Dibandingkan dengan metode lumpur aktif umumnya, efisiensi penghilang BOD dapat mendekati 85%-90% dan sedikit lumpur yang dihasilkan.

Kolam oksidasi dan lagoon, baik yang diaerasi ataupun tidak, juga termasuk dalam jenis reaktor pertumbuhan tersuspensi. Waktu detensi hidrolisis selama 12-18 hari di dalam kolam oksidasi atau dalam lagoon yang tidak di aerasi sudah cukup bagi iklim tropis seperti Indonesia untuk menghasilkan limbah- dengan kualitas yang dapat memenuhi persyaratan yang ditetapkan. Waktu detensi selama 3-5 hari saja, di dalam *lagoon* yang diaerasi sudah cukup.

2.3.2 Pengolahan Limbah Cair Secara Fisika

Pengolahan secara fisika dimulai dari membuang material tersuspensi yang berukuran besar, mudah mengendap atau bahan-bahan yang terapung. Untuk menghilangkan padatan tersuspensi yang berukuran besar dengan cara yang efisien dan mudah, dilakukan penyaringan atau screening. Bahan tersuspensi yang mudah mengendap dapat dengan mudah dihilangkan dengan pengendapan.

Pengolahan fisik proses flotasi banyak digunakan untuk menghilangkan material yang mengapung seperti minyak dan lemak agar tidak mengganggu proses pengolahan selanjutnya. Flotasi juga dapat digunakan sebagai sarana untuk menghilangkan padatan tersuspensi (*clarification*) atau pemekatan lumpur endapan (*sludge thickening*) dengan memberikan aliran udara ke atas (*air flotation*).

Pengolahan air limbah pada proses filtrasi, biasanya dilakukan untuk menghindari gangguan pada proses adsorpsi atau penyumbatan membran yang digunakan dalam proses reverse osmosis, serta dilakukan untuk menghilangkan sebanyak mungkin partikel tersuspensi dari air. Saat menghilangkan senyawa aromatik (misalnya fenol) dan senyawa organik terlarut lainnya melalui proses

adsorpsi biasanya dengan karbon aktif, terutama jika air limbah akan digunakan kembali.

2.3.3 Pengolahan Limbah Cair secara Kimia

Pengolahan secara kimia dilakukan dengan cara menambahkan bahan kimia tertentu yang diperlukan untuk menghilangkan partikel yang sulit mengendap (koloid), logam berat, senyawa fosfor, dan zat organik beracun. Penyisihan bahan-bahan tersebut pada prinsipnya dilakukan dengan mengubah sifat-sifat bahan tersebut, yaitu tidak dapat mengendap (flokulasi-koagulasi), baik dengan ataupun tanpa reaksi oksidasi-reduksi, dan juga dilakukan setelah reaksi oksidasi.

Koagulasi dan flokulasi adalah penyisihan bahan-bahan organik beracun seperti fenol dan sianida pada konsentrasi rendah dapat dilakukan dengan mengoksidasinya dengan klor (Cl), kalsium permanganate, aerasi, ozon hidrogen peroksida. Pengolahan secara kimia merupakan pengolahan paling efektif tetapi biaya yang dibutuhkan sangat mahal. Sementara kelebihan pengolahan secara biologi yaitu membutuhkan biaya yang relatif murah dan ramah lingkungan.

2.4 Fitoremediasi

Phyto dalam bahasa Yunani yakni phyton yang berarti tumbuhan/tanaman, remediation yaitu memperbaiki atau untuk membersihkan sesuatu (Latin: *remediare*). Oleh karena itu, fitoremediasi (*phytoremediation*) merupakan proses dimana tanaman dapat mengubah polutan menjadi berkurang atau tidak berbahaya bahkan menjadi bahan yang dapat digunakan kembali. Meskipun metode ini dapat menyelesaikan masalah lingkungan saat ini, masyarakat umum masih hanya tahu sedikit tentang pengetahuan mengolah air limbah dengan media tanaman. Untuk menghilangkan logam berat dan B3 dari lingkungan, fitoremediasi adalah teknik yang cukup efisien dan terjangkau. Sangat cocok untuk digunakan di tempat pembuangan akhir (TPA) dengan menanam tumbuhan pada lapisan penutup terakhir TPA dan menggunakan sistem *Wetland* (lahan basah) bagi kolam leachit (Sukono dkk., 2020).

Fitoremediasi adalah teknologi remediasi pencemaran logam berat yang ramah lingkungan dan hemat biaya. Metode ini menggunakan kemampuan tanaman untuk menghilangkan, mendegradasi dan memperbaiki bahan kimia berbahaya,

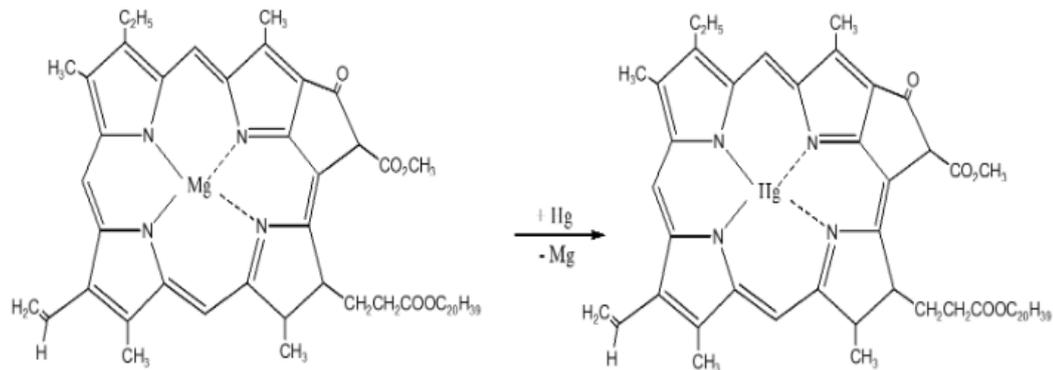
polutan logam berat untuk mengurangi resiko pencemaran tanah, sedimen dan air. Fitoremediasi adalah proses mendegradasi, menghilangkan, menstabilkan atau menghancurkan kontaminan menggunakan tumbuhan (Guo dkk., 2020). Keuntungan dari fitoremediasi dibandingkan dengan metode pengolahan limbah lainnya adalah proses pengolahan dapat dilakukan secara insitu dan eksitu sehingga mudah diterapkan dan tidak memerlukan biaya yang tinggi. Fitoremediasi juga dapat bekerja pada senyawa organik dan anorganik serta dapat mereduksi kontaminan dalam jumlah yang besar serta fitoremediasi merupakan metode pengolahan air limbah yang ramah lingkungan (Soheti dkk., 2020).

Fitoremediasi umumnya menggunakan tumbuhan yang bersifat hiperakumulator. Tumbuhan hiperakumulator ini memiliki tingkat laju penyerapan dan translokasi logam serratatus kali lebih tinggi dibandingkan dengan tumbuhan normal saat mengalami penurunan produksi dan keracunan logam .(Soheti dkk., 2020).

2.4.1 Mekanisme Fitoremediasi

Jenis kontaminan, ketersediaan hayatinya, dan karakteristik tanah semuanya mempengaruhi metode dan efisiensi pembersihan polutan. Tanaman dapat membersihkan atau merehabilitasi lingkungan yang terkontaminasi dengan beberapa cara, karena tanaman terutama menyerap polutan melalui sistem akarnya, ini adalah metode utama untuk mencegah toksisitas. Sistem akar menyediakan area permukaan yang sangat luas yang membantu menyerap dan mengakumulasi air dan nutrisi yang dibutuhkan untuk pertumbuhan serta kontaminan lain yang tidak dibutuhkan (Rinanti, 2019). Terjadinya perubahan warna daun seperti daun berubah warna dari hijau ke kuning hingga coklat sedangkan perubahan warna batang dari hijau kuning coklat hingga hitam. Hal tersebut dinamakan dengan gejala klorosis di duga akibat tumbuhan mengalami efek toksisitas akibat kelebihan logam merkuri dari sampel air limbah artificial. Penyebab klorosis dan nekrosis pada tanaman yang terpapar logam secara berlebihan cukup lama untuk menghambat sintesis klorofil. Klorosis juga dapat terjadi jika logam berat menghambat aktivitas enzim yang mempercepat proses sintesis klorofil. Secara kualitatif, penurunan konsentrasi merkuri ditandai melalui sejumlah daun yang mengalami perubahan warna dari hijau menjadi kuning. Perubahan warna daun tersebut merupakan gejala

klorosis yang disebabkan oleh toksisitas dari logam berat. Klorosis adalah defisiensi magnesium (Mg) sehingga tidak mampu membentuk klorofil akibatnya daun berubah warna menjadi kuning dan kemudian akan mati. Perubahan fisik disebabkan karena logam berat telah menggantikan Mg pada klorofil dalam daun yang tertuang pada gambar 2.1.

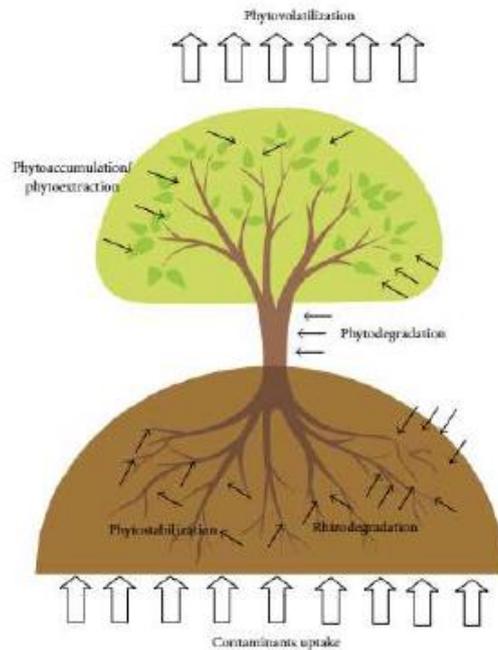


Gambar 2. 1 Reaksi Klorofil dengan Hg

Sumber : (Dulanlebit dkk., 2021)

Sedangkan nekrosis adalah kematian sel tumbuhan, jaringan, atau organ tumbuhan sehingga timbul bercak, bintik atau noda (Nurlina; dkk., 2016). Logam berat dapat menggantikan ion magnesium dalam molekul klorofil. Sehingga menyebabkan ketidakmampuan untuk menangkap foton dan menurunkan aktivitas fotosintesis (Harguinteguy dkk., 2013).

Mekanisme fitoremediasi dilakukan oleh tumbuhan dengan diambilnya pencemar dari tanah oleh akar. Proses fitoremediasi secara umum dibedakan berdasarkan mekanisme fungsi dan struktur tumbuhan. Berikut tanaman dalam menyerap polutan disajikan pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Mekanisme Fitoremediasi tanaman dalam menyerap polutan

Sumber : (Sukono dkk., 2020)

1. Fitoekstraksi

Fitoekstraksi juga dikenal sebagai akumulasi tanaman, Metode ini menggunakan tanaman untuk menghilangkan kontaminasi tanah dengan menyerap, mengkonsentrasikan dan mengendapkan logam berat dari tanah yang tercemar menjadi biomassa di atas tanah (pucuk, daun, dan anggota tumbuhan lainnya).

Fitoekstraksi memiliki beberapa keunggulan. Biaya fitoekstraksi cukup murah, selain itu memungkinkan untuk secara permanen mengurangi atau menghilangkan kontaminan dari tanah. Jumlah polutan yang perlu diserap berkurang secara signifikan (hingga 95%) dan dalam beberapa kasus kontaminan dapat didaur ulang dari biomassa tanaman yang terkontaminasi (Sukono dkk., 2020)

2. Rhizofiltrasi

Rhizofiltrasi Sebagian besar digunakan untuk pemulihan air tanah, air permukaan, dan air limbah yang di ekstraksi yang mengandung kontaminan dalam konsentrasi rendah. Metode ini, kontaminan dalam cairan atau endapan pada akar tanaman di zona akar dapat diserap.

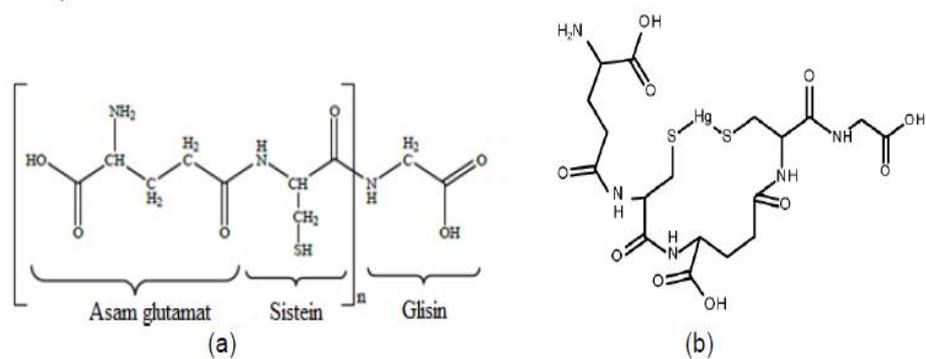
Rhizofiltrasi biasanya digunakan logam atau senyawa organik dari air tanah (in situ atau diekstraksi), air permukaan atau air limbah. Rhizofiltrasi dapat digunakan untuk Pb, Cd, Cu, Ni, Zn dan Cr, yang tertahan di akar.

Rhizofiltrasi mirip dengan fitoekstraksi, tetapi tanaman terutama digunakan untuk mengolah air tanah yang terkontaminasi daripada tanah yang terkontaminasi. Tanaman pembersih ditanam di rumah kaca dengan akarnya di air daripada di tanah. Ketika tanaman telah menumbuhkan sistem akar yang substansial dan sesuai, air yang terkontaminasi dari lokasi pembuangan limbah dikumpulkan dan dibawa ke tanaman untuk digunakan sebagai sumber air tanaman. (Sukono dkk., 2020).

3. Fitodegradasi

Fitodegradasi adalah proses yang dilakukan oleh tanaman menggunakan enzim untuk mengurai polutan yang kompleks menjadi senyawa yang tidak berbahaya. Fitodegradasi, pengurai polutan yang diserap oleh metabolisme tumbuhan atau aktivitas enzimatis oleh organ tumbuhan. Bakteri yang membantu dalam fitodegradasi termasuk *Marinobacter*, *Oceanobacter*, *Alcanivorax*, *Thalassospira*, *Stappia*, *Bacillus*, *Novospingobium*, *Pseudomonas*, *Spingobium*, *Rhodobacter*. Bakteri ini dapat mengubah polutan minyak menjadi senyawa tidak beracun dengan memutus rantai karbonnya. Sedangkan mekanisme penguraian tumbuhan membutuhkan enzim tertentu untuk mengurai bahan pencemar organik seperti bahan pencemar minyak bumi atau hidrokarbon minyak bumi. Enzim yang mengalami degradasi tanaman adalah enzim dehalogenase dan oksigenase (Astuti & Titah, 2022).

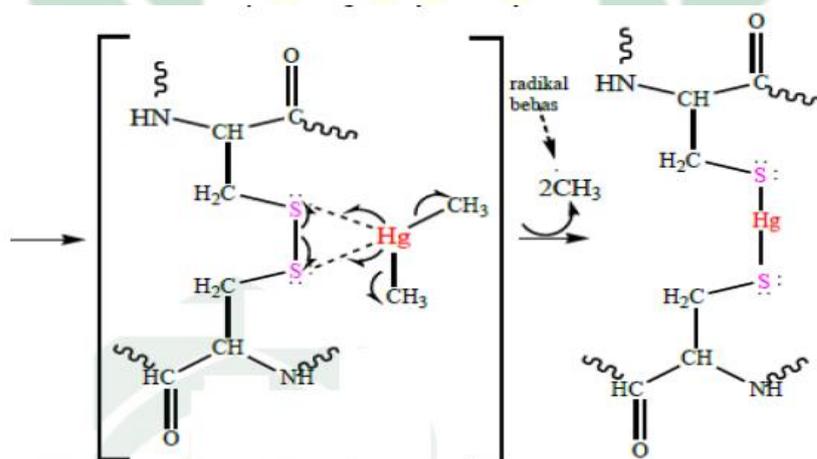
Komponen terbesar dalam tanaman adalah protein dan asam amino, komponen ini dapat digunakan untuk membentuk fitokelatin serta menjadi faktor dalam mempengaruhi mekanisme translokasi logam. Senyawa fitokelatin berfungsi untuk mengikat unsur logam dan membawanya ke sel melalui peristiwa transport aktif.



Gambar 2. 3 (a) Fitokelatin, (b) Kompleks Fitokelatin-Hg

Sumber : (Dulanlebit dkk., 2021)

Jika tanaman tidak mensintesis fitokelatin maka akan berujung pada kematian tanaman. Apabila fitokelatin berikatan dengan logam berat maka fitokelatin akan membentuk ikatan sulfida pada sistein dan membentuk senyawa kompleks sehingga polutan nantinya akan terbawa atau ditranslokasikan kedalam jaringan tumbuhan melalui pengangkut yaitu xylem dan floem



Gambar 2. 4 Reaksi Sistein dengan Senyawa Dimetil Merkuri

Sumber : (Dulanlebit dkk., 2021)

Fitokelatin akan bereaksi dengan polutan membentuk senyawa kompleks maka akan terjadi toleransi logam dari dalam tanaman. Tanaman dapat menyerap merkuri kedalam akar, batang kemudian di distribusikan pada bagian daun. Dalam fitoremediasi ini Hg anorganik dapat berubah menjadi organik dan sebaliknya karena ada adanya interaksi dengan enzim.

4. Fitostabilisasi

Fitostabilisasi adalah tanaman yang digunakan untuk mengimobilisasi dan menstabilkan polutan. Dalam metode ini, tanaman berfungsi sebagai remediator dengan menyimpan logam berat di akarnya dan mengubah kontaminan menjadi zat tidak beracun. Kelebihan dari fitostabilisasi yakni meningkatkan keanekaragaman hayati, aman digunakan, memiliki biaya operasional yang murah, tidak menghasilkan limbah sekunder, serta membersihkan tanah yang tercemar. Kriteria untuk memilih tanaman yang akan digunakan mampu menyerap logam berat, kapasitas untuk produksi biomassa yang tinggi, toleransi kontaminan dan kondisi lingkungan yang ekstrim, dan kapasitas untuk pertumbuhan yang cepat (Napitupulu & Purwanti, 2022).

5. Fitovolatilisasi

Fitovolatilisasi adalah proses tanaman yang mengubah polutan menjadi bahan yang mudah menguap dan tidak berbahaya bagi lingkungan. Polutan diserap oleh tanaman dan dilepaskan sebagai uap cair ke atmosfer melalui proses yang dikenal sebagai fitovolatilisasi. Polutan sebelum dilepaskan ke atmosfer dapat mengalami transformasi (Astuti & Titah, 2022).

2.4.2 Tanaman Hiperakumulator

Hiperakumulator adalah tumbuhan yang dapat mengakumulasi polutan pada akar, batang, dan daunnya dan digunakan dalam teknik fitoremediasi. Tidak semua tumbuhan yang menyerap kontaminan memenuhi syarat sebagai hiperakumulator. Ketahanan logam berat, siklus hidup pendek, distribusi luas dan biomassa tunas yang besar dan faktor translokasi > 1 adalah karakteristik hiperakumulator. Beberapa tanaman hias dan tanaman air berpotensi hiperakumulator yang digunakan dalam remediasi kontaminan. Tergantung pada jenis tanaman, beberapa metode digunakan pada tanaman hiperakumulator untuk menyerap polutan, terutama logam berat (Widyasari, 2021). Skema sistem fitoremediasi disajikan pada gambar 2.5



Gambar 2. 5 Skema Sistem Fitoremediasi

Sumber : (Rinanti, 2019)

Tiga faktor berkontribusi terhadap akumulasi logam berat pada tanaman hiperakumulator, yakni penyerapan unsur logam oleh akar, perpindahan unsur logam dari akar ke bagian lain tanaman seperti batang atau daun, dan lokalisasi logam pada bagian tertentu untuk menjaga metabolisme tanaman (Widyasari, 2021).

1. Penyerapan oleh akar

Unsur logam harus dalam larutan agar dapat diserap oleh akar selama proses penyerapan logam berat oleh tanaman. Akar tanaman akan menyerap zat larut bersama dengan air. Permukaan tanaman menyerap zat hidrofobik.

2. Translokasi logam dari akar ke bagian lain dari tanaman

Akar tanaman dipindahkan selama translokasi dari bagian bawah tanaman ke bagian atas tanaman melalui jaringan transportasi (xilem dan floem) ke bagian tanaman lain.

3. Lokalisasi logam dalam sel dan jaringan

Tumbuhan berusaha mencegah keracunan logam dalam sel dengan cara mengakumulasi logam pada organ tertentu seperti akar agar tidak menghambat metabolisme tumbuhan.

2.4.3 *Myriophyllum aquaticum*



Gambar 2. 6 Tanaman *Myriophyllum aquaticum*

Sumber : (Dokumentasi Pribadi,2023)

Klasifikasi tanaman *Myriophyllum aquaticum*

- Kingdom : Plantae
Clade : Tracheophytes
Clade : Angiosperms
Clade : Eudicots
Order : Saxifragales
Family : Haloragaceae
Genus : *Myriophyllum*
Species : *M. aquaticum*

Tanaman air semi-terendam yang dikenal sebagai *Myriophyllum aquaticum* (Haloragaceae) membentuk kelompok yang menyerupai gundukan lumut. Daun berbulu halus dikelompokkan dalam kelompok di sekitar batang, dengan rata-rata empat tangkai daun di sekitar lingkaran kelompok daun dan kelenjar transparan di bagian bawah daun. Batangnya bulat, bagian yang terendam berwarna coklat, dan

bagian di atas air berwarna hijau. Tumbuh 400-500 meter di atas permukaan laut di ladang, kolam, dan parit. Brasil, Argentina, dan Chili semuanya adalah rumah bagi pabrik. Secara umum, tanaman ini sering digunakan sebagai tanaman hias, dan mekar sepanjang tahun (Irawanto, 2010). Diantara tumbuhan yang terendam dan terapung *Myriophyllum aquaticum* merupakan tumbuhan khas yang tumbuh di daerah tropis dan subtropis dengan pH air umumnya antara 6.0 - 8.6 serta suhu air sebesar 31°C (Wersal dkk., 2011).

2.4.4 Aklimatisasi

Aklimatisasi tanaman adalah langkah terakhir dalam proses perbanyakan tanaman dengan menggunakan teknik kultur jaringan. Aklimatisasi dilakukan dengan memindahkan tanaman ke media aklimatisasi dalam kondisi lapang. Tahap aklimatisasi dilakukan selama 7 hari (Rizal, 2021). Tahapan dalam proses aklimatisasi :

1. Proses aklimatisasi dilakukan selama 7 hari
2. Menggunakan air aquades 2 liter untuk beradaptasi dengan lingkungan baru
3. Tahap aklimatisasi selesai tanaman dipindahkan ke dalam reaktor pada masing-masing konsentrasi.

Tahap ini penting karena kondisi iklim di rumah kaca dan dilapangan sangat berbeda dengan di dalam botol kultur. Pertumbuhan tanaman yang rendah diakibatkan oleh perbedaan antara kondisi lingkungan secara *in vivo* dan *in vitro* apabila fase aklimatisasi tidak dilakukan dengan benar. Keberhasilan teknik kultur jaringan pada akhirnya dapat ditentukan oleh proses aklimatisasi. Tumbuhan dapat hidup dalam kondisi autotrof Ketika faktor lingkungan seperti suhu, cahaya, dan kelembaban tidak steril dan tidak terkendali. Tingkat keberhasilan proses aklimatisasi ditentukan oleh pengelolaan bibit yang tepat dan terkendali (Dewi dkk., 2019).

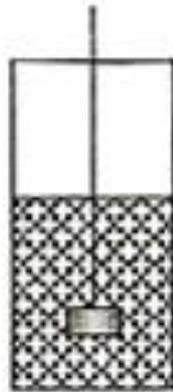
2.5 Jenis-jenis Reaktor

Reaktor adalah suatu alat proses dimana suatu reaksi berlangsung, baik itu reaksi nuklir maupun reaksi kimia, bukan reaksi fisik. Reaktor adalah jantung dari proses kimia. Reaktor adalah proses pengubahan bahan baku menjadi produk, perancangan reaktor untuk industri kimia harus memenuhi persyaratan sebagai

berikut : faktor kimia, faktor perpindahan panas, faktor perpindahan massa, faktor keselamatan (Wahyuningsi & Amna, 2020).

1. Reaktor Batch

Sistem batch pada dasarnya memiliki pola kerja yang sederhana. Pada sistem ini reaktan dirancang tergenang pada perlakuan. Dengan asumsi selama waktu genang tersebut, reaktan akan berproses dengan tanaman dan media secara fitoremediasi. Tingkat dimana reaktan tambahan ditambahkan ke sistem ini dipertimbangkan. Penambahan ini dipengaruhi oleh kondisi lingkungan perlakuan (Greenhouse) selama penelitian berlangsung. Suhu dan kelembaban lingkungan menyebabkan sistem bereaksi yang kemudian menguap ke lingkungan (Suharto dkk., 2011). Contoh reaktor batch disajikan pada gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Reaktor Batch

Sumber : (Nurfitriani dkk., 2014)

Kelebihan dari reactor sistem batch antara lain (Utami, 2022):

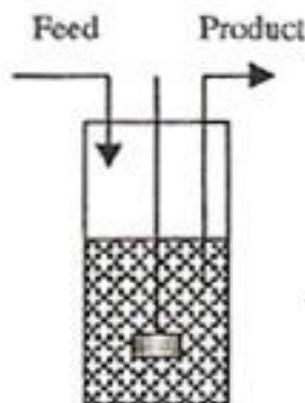
- a. Biaya dan harga instrumentasi rendah
- b. Penggunaannya fleksibel, artinya dapat dihentikan secara mudah kapan saja dan secara tepat.
- c. Penggunaannya yang multi fungsi
- d. Mudah untuk dibersihkan

Kekurangan dari reactor batch antara lain :

- a. Dibutuhkan lebih banyak pekerja, karena diperlukan untuk pengawasan kondisi prosedur yang terus berubah dari awal sampai akhir
- b. Skala produksi yang kecil

2. Reaktor Kontinu

Reaktor kontinu adalah reaktor yang beroperasi secara kontinu dimana reaktan akan terus mengalir dan akan mengikuti reaksi di seluruh reaktor (Wahyuningsi & Amna, 2020). Pengolahan air limbah menggunakan sistem kontinu dipengaruhi dengan waktu tinggal dan debit limbah yang akan digunakan nantinya. Berbeda dengan sistem batch dimana hanya dipengaruhi oleh waktu tinggal saja. Perubahan debit pada sistem kontinu akan berdampak pada perubahan waktu tinggal kinerja sistem wetland pada pengolahan air limbah (Nurfitriana, 2019). Contoh reaktor kontinu disajikan pada gambar 2.8.



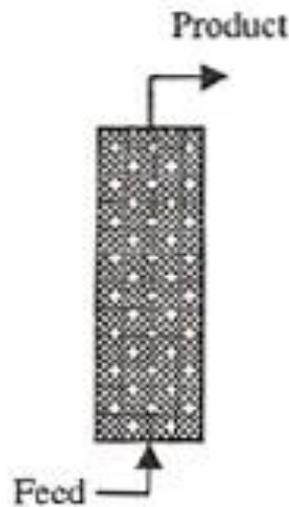
Gambar 2. 8 Reaktor Kontinu

Sumber : (Nurfitriani dkk., 2014)

3. Reaktor Fed-Batch

Sistem fed-batch adalah dalam proses batch umpan, nutrisi/substrat dapat diberikan secara berurutan selama bio-pemrosesan. Sehingga volume semakin bertambah dan lebih lama dalam reactor. Stanbury dan Whitaker (1984) juga menyebutkan istilah Kultur fed-batch adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan kultur batch di mana pelepasan cairan kultur tidak diperbolehkan dan pasokan substrat sedang berlangsung atau

bertahap. Meningkat seiring berjalannya waktu adalah volume. Dampak berbahaya dari komponen media juga dapat dihindari dengan metode ini. Contoh reactor Fed-batch disajikan pada gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Reaktor Fed-batch

Sumber : (Nurfitriani dkk., 2014)

2.6 Penelitian Terdahulu

Berikut ini daftar penelitian terdahulu yang digunakan sebagai bahan rujukan dalam penelitian ini :

Tabel 2. 2 Rangkuman Penelitian Terdahulu

No.	Penulis	Judul Penelitian	Rangkuman Penelitian
1.	Han Guo, Jiwei Jiang, Jingqing Gao, Jingshen Zhang, Leiyuan Zeng, Ming Cai, Jingliang Zhang (2020).	Evaluation of cadmium hyperaccumulation and tolerance potential of <i>Myriophyllum aquaticum</i>	Tujuan utama dalam penelitian ini yakni untuk menguji kemampuan akumulasi logam berat cadmium terhadap tanaman <i>Myriophyllum aquaticum</i> dan menentukan apakah <i>M.aquaticum</i> termasuk tanaman hiperakumulator. Hasil dari penelitian ini percobaan dilakukan selama 28 hari dengan membentuk kelompok percobaan dengan konsentrasi cadmium yang berbeda (0,10,20,40,80, dan 160 mg/l) hasilnya menunjukkan bahwa <i>M.aquaticum</i> hiperakumulator cd. Tidak ada kerusakan yang mencolok pada kelompok perlakuan 40 mg/l, dan kemampuan penyerapan cd

No.	Penulis	Judul Penelitian	Rangkuman Penelitian
			mencapai $17.970 \pm 1020,01$ mg/kg. <i>M.aquaticum</i> memiliki kemampuan bioremediasi cd yang tinggi dan toleransi dalam air serta dapat digunakan untuk fitoremediasi air sungai yang tercemar cd.
2.	Qingyang Zhou, Jingqing Gao, Ruimin Zhang, Ruiqin Zhang (2017)	Ammonia stress on nitrogen metabolism in tolerant aquatic plant- <i>Myriophyllum aquaticum</i>	Amonia telah menjadi alasan utama dalam penurunan makrofita di lingkungan air. <i>Myriophyllum aquaticum</i> dipilih dan diperlakukan dengan berbagai konsentrasi ion ammonium pada waktu yang berbeda. Konsentrasi NH_4^+ pada tanaman <i>M.aquaticum</i> mengalami penurunan sedangkan kandungan NO_3^- mengalami peningkatan. Sehingga penelitian ini dapat mendukung tentang remediasi ion NH_4^+ terhadap makrofit terendam yang toleran.
3.	Sendy B. Rondonuwu (2014).	Fitoremediasi Limbah Merkuri Menggunakan Tanaman dan Sistem Reaktor.	Penelitian ini untuk mengetahui seberapa efektif aktivitas tanaman menurunkan kadar merkuri. Tanaman <i>Typha sp</i> selama tiga hari dalam reaktor lahan basah buatan . <i>Nelubium nelumbo</i> sebesar 80.78%, tanaman <i>Eichhornia crassipes</i> 84,18%, <i>Ipomoae aquatic</i> 83,84%, dan <i>Hydrilla verticillate</i> 83,96%. Dibandingkan dengan tanaman laib seperti <i>Typha sp.</i> , <i>Ipomoae aquatic</i> , dan <i>Hydrilla verticillate</i> memiliki kapasitas yang lebih baik untuk mengurangi merkuri.
4.	Yulita, Winardi, Jumiati (2022).	Remediasi Air Tercemar Merkuri Menggunakan Purun Tikus (<i>ELEOCHARIS DULCIS</i>) Pada Lahan Basah Buatan	Penelitian ini adalah untuk memastikan seberapa efektif tanaman purun tikus dalam mengurangi limbah merkuri. Purun tikus (<i>Eleocharis dulcis</i>) merupakan tanaman yang tumbuh liar di tanah sulfat masam, penelitian ini menggunakan lahan basah buatan (constructed wetland) dengan sistem tetap/batch. Metode lahan basah buatan menggunakan reaktor berukuran 60 cm x 30 cm, air

No.	Penulis	Judul Penelitian	Rangkuman Penelitian
			<p>limbah yang digunakan sebanyak 19 liter, dan media berupa tanah dan kerikil setebal 5 cm untuk setiap lapisannya. Menggunakan simulasi nilai konsentrasi 1 ppm, 5 ppm dan 10 ppm selama 20 hari. Tanaman purun tikus (<i>Eleocharis dulcis</i>) menyerap 96%, 16% dan 4% Hg pada konsentrasi masing-masing 1 ppm, 5 ppm, dan 10 ppm.</p>
5.	<p>Hanies Ambarsari, Aulia Qisthi (2017).</p>	<p>Remediasi Merkuri (Hg) pada Air Limbah Tambang Emas Rakyat dengan Metode Lahan Basah Buatan Terpadu</p>	<p>Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi seberapa baik pendekatan remediasi lahan basah buatan terhadap tanaman dan mikroba di zona akarnya mengolah air limbah dari tailing tambang emas (rhizosfer). Limbah asli dari tambang emas rakyat pongkor, yang memiliki konsentrasi 0,27 ppm, dan limbah buatan, yang memiliki konsentrasi 0,03 ppm, 0,06 ppm, dan 0,09 ppm, merupakan komponen penelitian air limbah yang digunakan dalam penelitian tersebut. Hasil penelitian menunjukkan tingkat efisiensi 99,8% pada air limbah buatan dengan konsentrasi 0,06 ppm dan 0,09 ppm serta tingkat efisiensi 99,6% pada air limbah asli dan air limbah buatan dengan konsentrasi 0,03 ppm dalam mengurangi konsentrasi Hg yang dihasilkan.</p>
6.	<p>Farid Kuswantoro (2020).</p>	<p>Conservation, Phytoremediation Potential and Invasiveness Status of Bali Botanic Garden Aquatic Plant Collection</p>	<p>Kebun raya bali (BBG) berkeinginan untuk melakukan konservasi dan penelitian jenis tumbuhan Indonesia timur, termasuk jenis tumbuhan air. Empat belas spesies tumbuhan air yang dikoleksi terbukti memiliki potensi fitoremediasi terhadap berbagai polutan logam berat, sedangkan enam spesies tercatat sebagai spesies tumbuhan asing invasif di Indonesia. Salah satu koleksi tumbuhan di kebun raya bali yang mempunyai kemampuan fitoremediasi yakni</p>

No.	Penulis	Judul Penelitian	Rangkuman Penelitian
			Myriophyllum aquaticum yang mampu mereduksi logam berat Ni,Pb,Zn,Co,Cu,Fe,Mn. Semua data yang tersedia harus memungkinkan para pemangku kepentingan kebun raya untuk memunculkan ide-ide dalam upaya penelitian dan pemeliharaan koleksi tumbuhan air BBG.
7.	Muhammad Rizal (2021).	Fitoremediasi Tanah Tercemar Merkuri (Hg) Menggunakan Tanaman Hanjuang (<i>Cordyline fruticose</i>)	Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memastikan kapasitas tanaman hanjuang untuk mengakumulasi logam berat merkuri ke dalam biomassa tanaman dan pengaruh konsentrasi merkuri tanah terhadap perkembangan tanaman hanjuang. Konsentrasi loga berat 0,5, 1, 2, dan 3 ppm digunakan saat menanam tanaman, dengan penyesuaian panen diterapkan pada hari ke 7, 14, dan 21. 12,5788 g/g, 12,698 g/g, 12,3516 g/g, dan 12,3285 g/g, serta 0,2893 g/g, 0,3204 g/g, 0,4569 g/g, dan 0,5051 g/g, memiliki akumulasi merkuri tertinggi pada akar segala macam perubahan konsentrasi.
8.	Lailan Ni'mah, Muhammad Adzhari Anshari, Hari Apriyan Saputra (2019).	Pengaruh Variasi Massa dan Lama Kontak Fitoremediasi Tumbuhan Parupuk (PHRAGMITES KARKA) Terhadap Derajat Keasaman (pH) dan Penurunan Kadar Merkuri pada Perairan Bekas Penambangan Intan dan Emas Kabupaten Banjar	Tanaman parut memiliki kapasitas untuk hyperacculat, sehingga cocok untuk digunakan dalam prosedur fitoremediasi. Dalam penyelidikan ini, bobot tanaman 0,5 kg, 1 kg, dan 1,5 kg digunakan, bersama dengan waktu perendaman 8 jam, 80 jam, 152 jam, dan 224 jam. Temuan mengungkapkan bahwa pada variasi massa 1 kg dan waktu perendaman 80 jam, dengan nilai pH 7,8, terjadi peningkatan pH yang signifikan. Pengurangan kadar merkuri, sementara itu, berkinerja terbaik pada 1,5 kg variasi massa dan 0,001679 mg/l konsentrasi merkuri setelah 152 jam perendaman.
9.	S.D. Fathia, H.Hamim, T. Triadiati (2019).	Morpho-physiological analysis of aquatic	Tujuan penelitian ini untuk menganalisis kemampuan tumbuhan air dalam proses

No.	Penulis	Judul Penelitian	Rangkuman Penelitian
		plants for phytoremediation of wastewater from gold mine wastewater treatment installation (IPAL)	fitoremediasi sianida dan logam berat limbah cair tambang emas berdasarkan pertumbuhan dan pengendapan logam berat pada akar dan pucuk. Penelitian dilakukan menggunakan rancangan acak dengan dua faktor yaitu konsentrasi air limbah tambang emas Pb = 0,070; Hg = 0,016; Cn = 0,0243 dan kombinasi dua tanaman air dari 4 spesies (<i>Eichhornia crassipes</i> , <i>Neomarica longifolia</i> , <i>Hydrilla verticillata</i> , dan <i>Pistia stratiotes</i>). Perlakuan dengan air limbah tambang emas menyebabkan peningkatan peroksidasi lipid yang ditandai dengan peningkatan kandungan akar dan daun, sedangkan kandungan klorofil daun menurun secara signifikan. Kombinasi tanaman air terbaik untuk fitoremediasi tambang emas ditunjukkan oleh <i>N. longifolia</i> dan <i>P. Stratiotes</i> berdasarkan reduksi berat kering terkecil dan reduksi sianida
10.	Ilaria Colzi, Lorenzo Lastrucci, Mattia Rangoni, Andrea Coppi, Cristina Gonnelli (2018)	Using <i>Myriophyllum aquaticum</i> (vell.) to remove heavy metals from contaminated water: Better dead or alive?	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui potensi invasive makrofita <i>Myriophyllum aquaticum</i> terhadap menghilangkan logam berat. Unsur-unsur yang di uji adalah Cd, Cr, Ni, dan Zn. Dalam hal penghilangan logam oleh tumbuhan hidup, unsur yang paling banyak dihilangkan adalah Zn, Cd menunjukkan konsentrasi tertinggi pada pucuk tanaman. Logam Cr teradsorpsi sangat rendah sehubungan dengan akar, sehingga menyebabkan pengikatan apoplastik lebih rendah.

Sumber : Diolah dari berbagai sumber, (2023)

2.7 Integrasi Keilmuan

Umat muslim khususnya selalu diutamakan menjaga kebersihan baik dalam diri maupun dalam lingkungan tempat tinggalnya. Suasana yang bersih dapat meningkatkan kenyamanan serta kesehatan baik bagi jasmani maupun rohani. Allah SWT berfirman dalam surat Al-A'raf ayat 56 mengenai larangan membuat kerusakan.

وَلَا تُفْسِدُوا فِي الْأَرْضِ بَعْدَ إِصْلَاحِهَا وَادْعُوهُ خَوْفًا وَطَمَعًا إِنَّ رَحْمَتَ اللَّهِ قَرِيبٌ مِّنَ الْمُحْسِنِينَ

Artinya : *“Dan janganlah kamu membuat kerusakan dimuka bumi, sesudah (Allah) memperbaikinya dan berdoalah kepada-Nya dengan rasa takut (tidak akan diterima) dan harapan (akan dikabulkan). Sesungguhnya rahmat Allah amat dekat kepada orang-orang yang berbuat baik (Q.s. Al-A'raf :56)”*.

Ayat tersebut menekankan bagaimana larangan bagi manusia untuk merusak permukaan bumi. Kehadiran gunung-gunung, lembah, daratan, lautan, sungai diciptakan oleh Allah untuk digunakan dan dimanfaatkan sebaik mungkin. Allah menciptakan bumi dengan sangat hati-hati. Kerusakan tersebut tidak hanya akan merugikan manusia namun juga makhluk hidup lainnya. Selain itu, pencemaran di perairan sungai akan merusak lingkungan sungai dan tidak dapat dimanfaatkan oleh masyarakat setempat (Al Farobi, 2019).

Upaya untuk menjaga lingkungan dapat dilakukan dengan cara memanfaatkan makhluk hidup lainnya, seperti tumbuhan dan hewan. Tumbuhan diciptakan dengan segala manfaat yang terkandung di dalamnya. Allah SWT berfirman dalam surat Al-Jasiyah ayat 13.

وَسَخَّرَ لَكُم مَّا فِي السَّمٰوٰتِ وَمَا فِي الْأَرْضِ جَمِيعًا مِّنْهُ ۗ إِنَّ فِي ذٰلِكَ لَآيٰتٍ لِّقَوْمٍ يَتَفَكَّرُونَ

Artinya : *“Dan dia telah menundukkan untukmu apa yang di langit dan apa yang di bumi semuanya, (sebagai rahmat) daripada-Nya. Sesungguhnya pada yang demikian itu benar-benar terdapat tanda-tanda (kekuasaan Allah) bagi kaum yang berfikir. (Q.s. Al-Jasiyah : 13)”*.

Segala sesuatu di langit, termasuk matahari, bulan, bintang, galaksi dan awan ditundukkan oleh Allah SWT bagi hamba-hambanya. Agar para hambanya dapat menggunakan segala sesuatu di bumi, termasuk makhluk hidup dan benda mati, dia juga tundukkan (Al Farobi, 2019).



UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Waktu Penelitian

Proposal disusun mulai bulan Februari 2023 sampai Maret 2023 dan penelitian dilaksanakan pada bulan Maret 2023 sampai Mei 2023

3.2 Lokasi Penelitian

Penelitian dan pembuatan sampel dilakukan di Laboratorium Water Quality and Processing Teknik Lingkungan UINSA Gunung Anyar. Pengujian hasil analisis fitoremediasi logam berat merkuri dilaksanakan di Balai Standardisasi dan Pelayanan Jasa Industri Surabaya.

Alat dan Bahan Penelitian

Alat :

1. 6 buah kaca reaktor dengan memiliki Panjang 30 cm, lebar 20 cm, dan tinggi 20 cm
2. pH meter
3. Thermometer
4. Kertas label
5. 24 Botol Kaca Sampel
6. HgCl₂
7. Neraca analitik
8. Cawan patri
9. Gelas ukur
10. Pipet
11. Labu ukur

Bahan :

1. Aquades
2. 72 tanaman *Myriophyllum Aquaticum* dengan berat 1 g
3. Limbah artificial merkuri (Hg)
4. Tanaman *Myriophyllum aquaticum* yang sudah di identifikasi

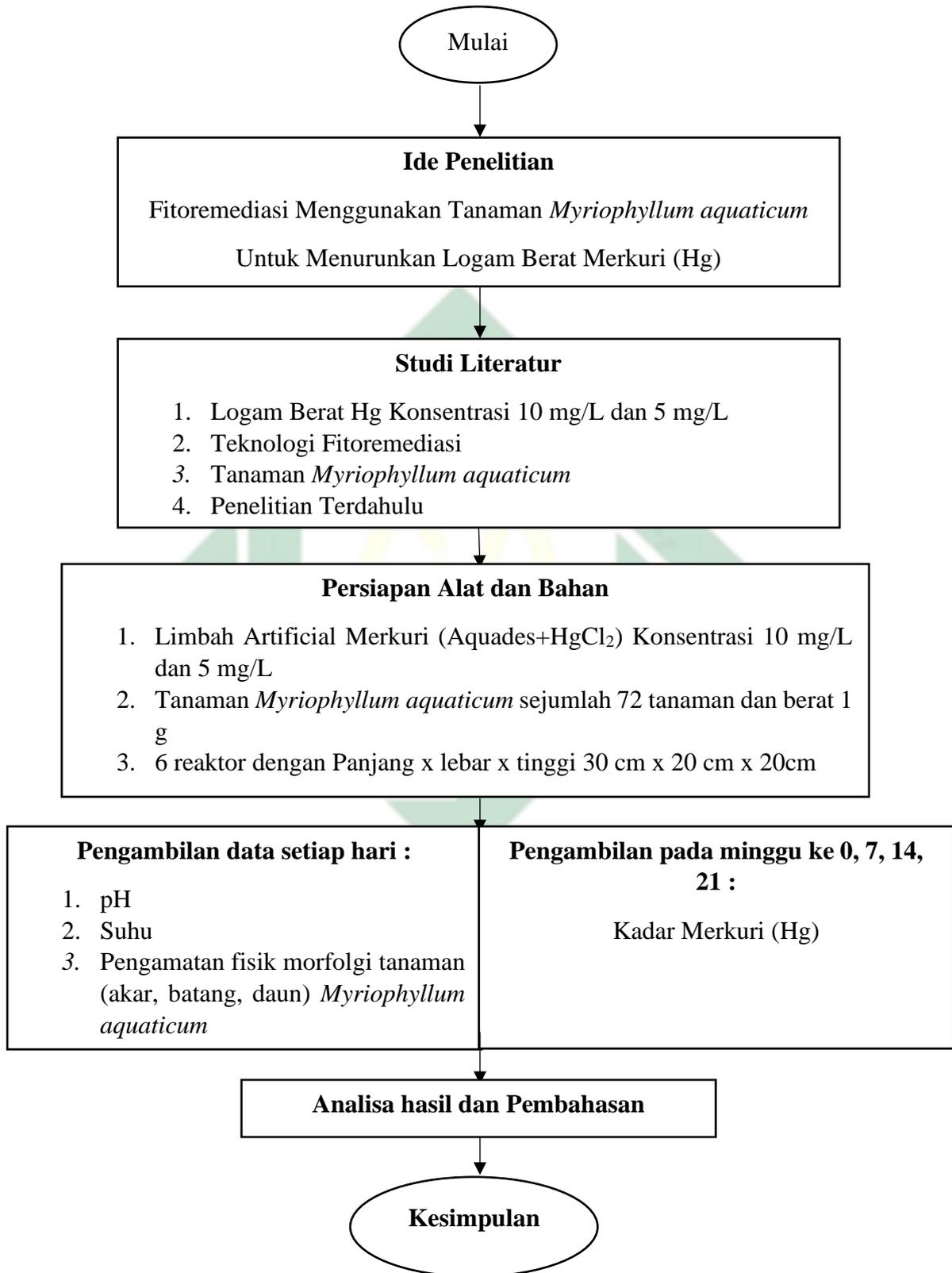
3.2 Variabel Penelitian

- a. Variabel bebas yaitu Variasi Konsentrasi Merkuri (Hg) penyerapan logam berat pada tanaman *Myriophyllum aquaticum*
- b. Variabel terikat yaitu penyerapan logam berat pada tanaman *Myriophyllum aquaticum*



UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A

3.3 Tahap Penelitian



Gambar 3. 1 Diagram Alir Tahap Penelitian

Sumber : (Hasil Analisa,2023)

Dari gambar 3.1 tersebut, pada tahap penelitian dapat dijelaskan sebagai berikut :

a. Persiapan Bahan

Persiapan penelitian ini menggunakan 6 reaktor akuarium yang berukuran Panjang 30 cm lebar 20 cm dan tinggi 20 cm, kapasitas reaktor adalah 12 liter dan air limbah dalam reaktor sebanyak 7 liter pada masing-masing reaktor. Kemudian menyiapkan 72 tanaman dengan berat yang sama seberat 1 g dengan masing-masing reaktor C1, reaktor C2, reaktor D1, reaktor D2 sejumlah 18 Tanaman *Myriophyllum aquaticum*. Tanaman *Myriophyllum aquaticum* dengan jumlah tanaman 18 mampu mentolerir kadar paparan sebesar 40 mg/L dengan konsentrasi akumulasi 17.970 mg/kg (Guo dkk., 2020).

b. Definisi Operasional

Tanaman *Myriophyllum aquaticum* yang digunakan selama fitoremediasi pada setiap reaktor yaitu dipilih tanaman yang mempunyai panjang epikal 10 cm dimana panjang epikal yang dimaksud panjang dari ujung batang hingga batang sebelum akar. Tanaman mempunyai berat yang sama yakni masing-masing kurang lebih dengan berat 1 gr. Setiap reaktor berisi sejumlah 18 tanaman *Myriophyllum aquaticum*. Pemilihan sampel tanaman *Myriophyllum aquaticum* dilakukan dengan purposive sampling. Purposive sampling adalah pengambilan sampel yang didasarkan pada suatu pertimbangan tertentu yang dibuat oleh peneliti sendiri, berdasarkan ciri atau sifat yang sudah diketahui sebelumnya (Cahyani dkk., 2020).

c. Proses Aklimatisasi

Proses ini bertujuan agar tanaman dapat beradaptasi dengan lingkungan baru. Dalam penelitian (Rizal, 2021) tanaman hajuang atau tanaman hias terlebih dahulu dibersihkan dengan air mengalir sebelum proses aklimatisasi agar kotoran tanaman menghilang dilakukan selama 7 hari menggunakan tanah tercemar. Berikut tahapan dalam proses aklimatisasi :

1. Proses aklimatisasi dilakukan selama 7 hari
2. Menggunakan air aquades 2 liter untuk beradaptasi dengan lingkungan baru

3. Tahap aklimatisasi selesai tanaman dipindahkan ke dalam reaktor pada masing-masing konsentrasi.

d. Proses Penanaman

Aklimatisasi telah dilakukan pada tanaman, kemudian tanaman *Myriophyllum aquaticum* dibagi menjadi 4 reaktor yakni reaktor A dan B tanpa tanaman karena sebagai kontrol, reaktor C1, C2, D1, dan D2 berisikan tanaman sejumlah 18 tanaman *Myriophyllum aquaticum* dan dengan berat yang sama masing-masing tanaman dengan berat kurang lebih 1 g. Uji fitoremediasi dilakukan selama 21 hari dengan pengambilan sampel 7 hari sekali yakni di hari ke 0,7,14,21. Prosedur ini dilakukan karena pada penelitian (Sinulingga dkk., 2015) dilakukan pengukuran konsentrasi Hg menggunakan tanaman *Myriophyllum aquaticum* dilakukan selama 21 hari dengan konsentrasi awal sebesar 0,501 mg/l menjadi 0,00015 mg/l dengan nilai efisiensi sebesar 99,97%. Selain itu, perlakuan dan kuantitas tanaman yang sama diterapkan pada tiga konsentrasi Ketika limbah buatan ditempatkan kedalam 6 reaktor terpisah. Ketiga limbah buatan dilakukan dengan running duplo (dua ulangan) secara bersamaan (Ambarsari & Qisthi, 2017).

Setiap reaktor berisikan limbah artificial logam berat Hg dengan konsentrasi 10 mg/L dan 5 mg/L, karena dalam penelitian (Yulita dkk., 2022) melakukan fitoremediasi selama 20 hari menggunakan Hg artifisial dengan konsentrasi 1 ppm, 5 ppm, dan 10 ppm. Tanaman purun tikus (*Eleocharis dulcis*) menyerap Hg pada konsentrasi masing-masing 1 ppm, 5 ppm, dan 10 ppm sebesar 96%, 16%, dan 4%. Dalam penelitian Kamal, dkk. (2004) tanaman *Myriophyllum aquaticum* dalam remediasi limbah merkuri dengan konsentrasi awal 0,501 mg/l dapat menurunkan hingga 0,00015 mg/l dengan nilai efisiensi 99,97%. Pemberian kadar logam sebanyak 10 mg/L dan 5 mg/l karena merkuri dianggap logam berat paling beracun diantara logam berat lainnya yang ada dilingkungan. Serta unsur yang sangat beracun yang banyak tersebar di atmosfer, litosfer, dan air permukaan (Rahayu & Mangkoedihardjo, 2022). Limbah artificial merkuri dibuat berdasarkan pada perhitungan konsentrasi dan molaritas yang di

inginkan. Konsentrasi merkuri yang digunakan pada penelitian ini sebesar 10 mg/L dan 5 mg/L. Berikut pembuatan larutan sampel merkuri dari serbuk HgCl₂.

Diketahui :

Ar. Hg = 200

Ar. Cl₂ = (2 x 35,5) = 71

Mr. HgCl₂ = 271

Volume 500 mL

Kemurnian = 99%

Membuat larutan induk 1000 ppm, 500 ml

$$M = \frac{n}{v}$$

$$M = \frac{gr}{Ar.Hg. L}$$

$$M = \frac{gr}{200 L}$$

$$\frac{gr}{L} = 0,005 M$$

Larutan induk Hg yang akan dibuat molaritasnya 0,005 M, 500 ml

$$M = \frac{gr}{Mr.HgCl_2} \times \frac{1000}{mL}$$

$$0,005 M = \frac{gr}{271} \times \frac{1000}{500}$$

$$gr = \frac{0,005 \times 271}{2}$$

$$= 0,68 \text{ gram HgCl}_2$$

Jadi jumlah serbuk HgCl₂ yang dibutuhkan sebesar 0,68 gram menggunakan neraca analitik dengan tingkat ketelitian hingga 0,0001 gram kemudian serbuk HgCl₂ dilarutkan kedalam 500 mL aquades. Setelah itu dalam pembuatan sampel air limbah dengan konsentrasi 10 mg/l, larutan induk diencerkan lagi dengan aquades.

$$C_1.V_1 = C_2.V_2$$

$$1000 \text{ mg/l} \times V_1 = 10 \text{ mg/l} \times 7000 \text{ ml}$$

$$V_1 = \frac{10 \frac{mg}{l} \times 7000 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} = 70 \text{ ml}$$

Jadi untuk membuat 7 liter limbah Hg dengan konsentrasi 10 mg/l dibutuhkan larutan induk sebanyak 70 ml. Setelah itu pembuatan sampel air

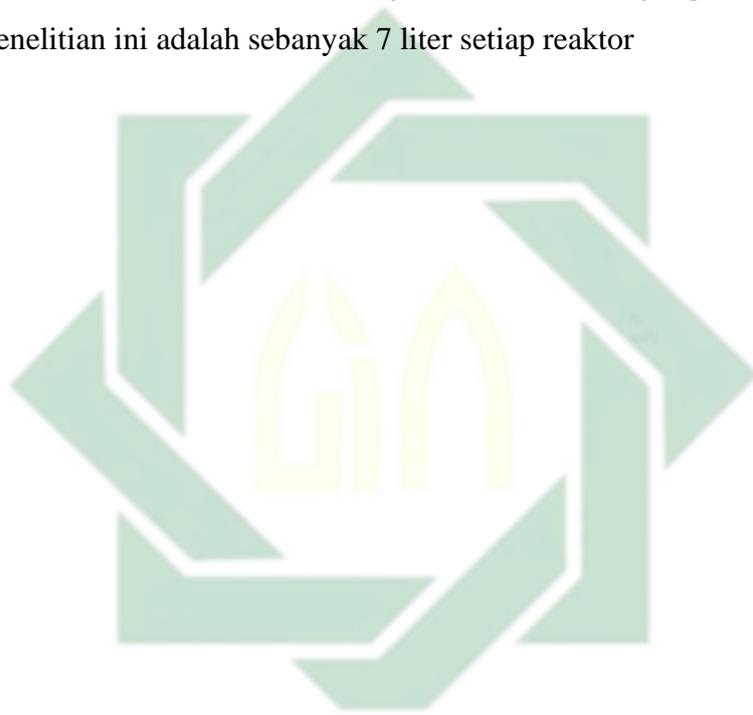
limbah dengan konsentrasi 5 mg/l, larutan induk diencerkan lagi dengan aquades.

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2$$

$$1000 \text{ mg/l} \times V_1 = 5 \text{ mg/l} \times 7000 \text{ ml}$$

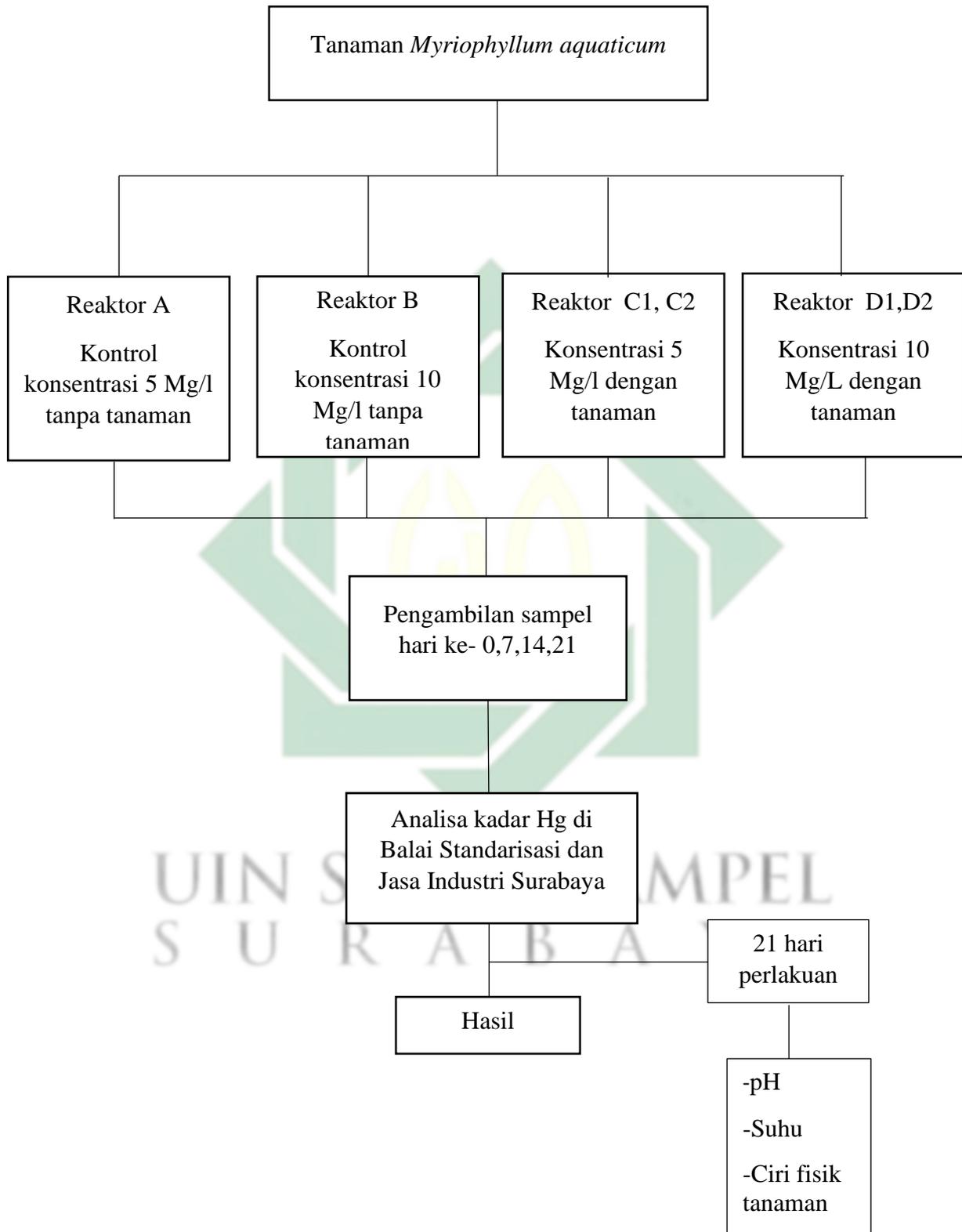
$$V_1 = \frac{5 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \times 7000 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} = 35 \text{ ml}$$

Jadi untuk membuat 7 liter limbah Hg dengan konsentrasi 5 mg/l dibutuhkan larutan induk sebanyak 35 ml. limbah yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah sebanyak 7 liter setiap reaktor



UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A

3. 4 Kerangka Penelitian



Gambar 3. 2 Kerangka Penelitian

Sumber : (Hasil Analisis23)

a. Perlakuan

Limbah artificial dimasukkan kedalam reaktor dengan masing-masing 7 liter. Reaktor A dan B hanya menggunakan limbah artificial tanpa penambahan tanaman karena sebagai kontrol. Setelah itu menanam tanaman yang sudah diaklimatisasi kedalam reaktor yang telah diisi air limbah yakni reaktor C1, C2, D1 dan D2 dengan jumlah 18 tanaman *Myriophyllum aquaticum*. Kondisi tanaman yang digunakan adalah memiliki daun yang berwarna hijau, batang yang kaku, berat yang sama yakni 1 gram serta tidak ada kerusakan pada tanaman. Pada fitoremediasi ini menggunakan sistem batch.

b. Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan dengan mengambil air limbah sebanyak 200 ml di hari ke- 0,7,14,21 menggunakan pipet bulb. Sebelum air limbah diambil air limbah yang berada di 6 reaktor tersebut dihomogenkan terlebih dahulu dengan mengaduknya agar tidak ada sedimen yang mengendap kemudian air limbah di masukkan kedalam botol kaca berwarna gelap untuk dibawa ke Balai Standardisasi dan Pelayan Jasa Industri Surabaya untuk analisis uji raksa (Hg). Selain itu dilakukan setiap hari pengukuran pH dan suhu. Karena apabila pH lebih rendah atau tinggi akan mempengaruhi proses fotosintesis pada tumbuhan. Dan suhu dapat mempengaruhi terhadap tingkat penyerapan karena suhu berkaitan dengan proses metabolisme dan fotosintesis (Oktavia dkk., 2016).

1. Pengukuran Ph

pH diukur setiap hari dengan menggunakan alat pH meter dengan prosedur sebagai berikut :

- a. Menyiapkan alat pH meter yang akan digunakan
- b. Kalibrasi pH meter dengan air aquades hingga netral
- c. Ambil sampel kurang lebih 200 ml untuk di lakukan pengukuran pH
- d. Mencatat hasil pengukuran

2. Pengukuran Suhu

Suhu diukur setiap hari menggunakan alat thermometer dengan prosedur sebagai berikut :

- a. Menyiapkan alat thermometer yang akan digunakan
- b. Memasukkan thermometer ke dalam reaktor yang berisi sampel air limbah
- c. Mendinginkan sampai hasil pengukuran konstan.

c. Data Sekunder

Data sekunder merupakan data yang didapat dari dokumen dari referensi yang berkaitan dengan judul penelitian. Pengumpulan data sekunder yang diperukan berupa :

1. Data literasi, yang merupakan di dapat dari jurnal, makalah, tugas akhir, maupun laporan penelitian terdahulu
 - a. Data-data lain sebagai pendukung

3.5 Rancangan Percobaan

Rancangan percobaan ini memiliki vsriabel bebas yakni jumlah tanaman dan waktu pengambilan sampel. Adapun kombinasi dari kedua variable ditampilkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Rancangan Percobaan

Hari Pengambilan sampel	Kontrol tanpa tanaman		18 tanaman	
	10 mg/l	5 mg/l	10 mg/l	5 mg/l
A,B	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
B ₀	A ₁ , B ₀	A ₂ , B ₀	A ₃ , B ₀	A ₄ , B ₀
B ₁	A ₁ , B ₁	A ₂ , B ₁	A ₃ , B ₁	A ₄ , B ₁
B ₂	A ₁ , B ₂	A ₂ , B ₂	A ₃ , B ₂	A ₄ , B ₂
B ₃	A ₁ , B ₃	A ₂ , B ₃	A ₃ , B ₃	A ₄ , B ₃

Sumber : (Hasil Analisa,2023)

A = Jumlah tanaman

A₁ = Kontrol tanpa tanaman konsentrasi 10 mg/l

A₂ = Kontrol tanpa tanaman konsentrasi 5 mg/l

A₃ = 18 tanaman konsentrasi 10 mg/l

A₄ = 18 tanaman konsentrasi 5 mg/l

B = Jumlah pengambilan sampel

B₀ = hari ke- 0, B₁ = hari ke- 7, B₂ = hari ke- 14, B₃ = hari ke-21

A₁, B₀ = Kontrol konsentrasi 10 mg/l hari ke-0

A₂, B₀ = Kontrol konsentrasi 5 mg/l hari ke-0

A₁, B₁ = Kontrol konsentrasi 10 mg/l hari ke-7

A₁, B₂ = Kontrol konsentrasi 10 mg/l ke-14

A₁, B₃ = Kontrol konsentrasi 10 mg/l ke-21

A₂, B₀ = Kontrol konsentrasi 5 mg/l ke-0

A₂, B₁ = Kontrol konsentrasi 5 mg/l ke-7

A₂, B₂ = Kontrol konsentrasi 5 mg/l ke-14

A₂, B₃ = Kontrol konsentrasi 5 mg/l ke-21

A₃, B₀ = 18 tanaman konsentrasi 10 mg/l ke-7

A₃, B₁ = 18 tanaman konsentrasi 10 mg/l ke-7

A₃, B₂ = 18 tanaman konsentrasi 10 mg/l ke-14

A₃, B₂ = 18 tanaman konsentrasi 10 mg/l ke-21

A₄, B₀ = 18 tanaman konsentrasi 5 mg/l ke-0

A₄, B₁ = 18 tanaman konsentrasi 5 mg/l hari ke-7

A₄, B₂ = 18 tanaman konsentrasi 5 mg/l hari ke-14

A₄, B₂ = 18 tanaman konsentrasi 5 mg/l hari ke-21

Dari setiap kombinasi perlakuan pada proses fitoremediasi selama 21 hari dengan rincian pengambilan sampel sebanyak 200 ml pada setiap reaktor dengan jumlah keseluruhan yaitu sebanyak 24 sampel yang ditampilkan sebagai berikut :

H0* 1	H0* 1	H0* 1	H0* 2	H0* 1	H0* 2
H7* 1	H7* 1	H7* 1	H7* 2	H7* 1	H7* 2
H14* 1	H14* 1	H14* 1	H14* 2	H14* 1	H14* 2
H21* 1	H21* 1	H21* 1	H21* 2	H21* 1	H21* 2

Keterangan :

 = Kontrol konsentrasi 10 mg/l (tanpa tanaman)

 = Kontrol konsentrasi 5 mg/l (tanpa tanaman)

 = 18 tanaman konsentrasi 10 mg/l

 = 18 tanaman konsentrasi 5 mg/l

H0 = Hari ke 0 pengambilan sampel

H7 = Hari ke 7 pengambilan sampel

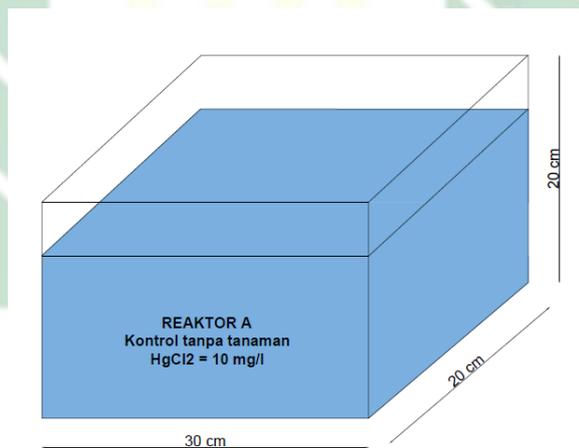
H14 = Hari ke 14 pengambilan sampel

H21 = Hari ke 21 pengambilan sampel

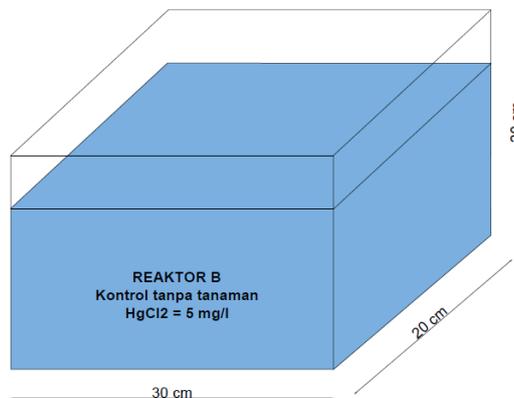
*1 = reaktor 1

*2 = reaktor 2

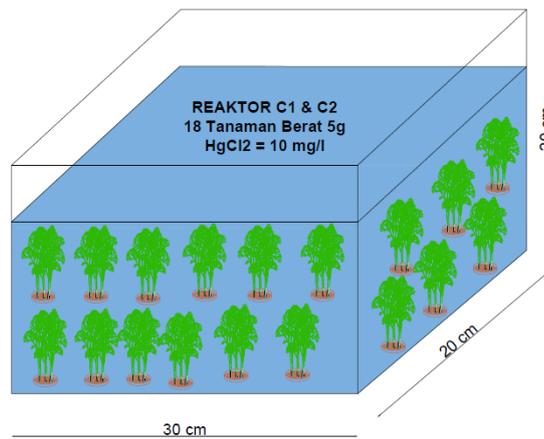
Gambar reaktor pada percobaan penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.3 hingga 3.6.



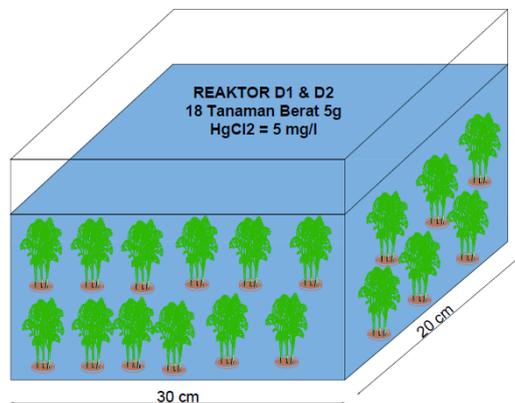
Gambar 3. 3 Reaktor A



Gambar 3. 4 Reaktor B



Gambar 3. 5 Reaktor C1 & C2



Gambar 3. 6 Reaktor D1 & D2

3.6 Analisis Data

Perubahan ciri fisik dilakukan dengan mendokumentasikan tanaman dan di analisis selama penelitian berlangsung. Untuk analisis penurunan kandungan logam berat merkuri dilakukan dengan cara mengamati penurunan nilai parameter merkuri, kemudian nilai efisiensi dihitung dengan persentase pengurangan konsentrasi parameter air limbah dengan menggunakan persamaan (Novita dkk., 2020):

$$\text{Efisiensi (EF)} = \frac{C_o - C_i}{C_i} \times 100\%$$

Keterangan :

EF = Persentase efisiensi penurunan (%)

Co = Konsentrasi awal parameter air limbah (mg/L)

Ci = Konsentrasi akhir parameter air limbah (mg/L)

Analisis data dan pembahasan akan dilakukan secara deskriptif serta dibuat kedalam bentuk grafik dan tabel yang akan ditampilkan dalam penelitian ini. Selanjutnya data akan diolah menggunakan uji statistik regresi. Uji regresi untuk mengetahui ada atau tidaknya pengaruh dua atau lebih variabel bebas/independen (X) terhadap variabel terikat/dependen. Nilai variasi konsentrasi logam merkuri digunakan sebagai variabel bebas (X) dan interval waktu sebagai variabel terikat (Y). jika (Sig.) bernilai $> 0,05$ maka tidak terdapat pengaruh variabel X terhadap variabel Y. sedangkan jika data $< 0,05$ maka terdapat pengaruh variabel X terhadap variabel Y (Fatmawati & Lubis, 2020). Pengujian statistik ditentukan hipotesis awal (H_0) variasi konsentrasi tidak berpengaruh yang signifikan terhadap penurunan logam merkuri. Hipotesis alternatif (H_1) variasi konsentrasi berpengaruh yang signifikan terhadap penurunana pada logam merkuri.



UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A

BAB IV PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Tanaman

Karakteristik tanaman merupakan organ generative yang dipengaruhi oleh organ tanaman yang lain seperti akar, batang, dan daun. Penelitian fitoremediasi ini menggunakan tanaman *Myriophyllum aquaticum* yang mempunyai karakteristik tanaman dalam proses fitoremediasi yang meliputi massa, dimensi (Panjang dan diameter), dan warna. Tanaman yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan tanaman dengan berat masing-masing tanaman kurang lebih 1 gr, dengan Panjang 10 cm dari ujung batang tanaman hingga ujung batang sebelum akar tanaman. Tanaman dipilih dengan daun masih berwarna hijau atau dalam keadaan segar. Pemilihan sampel tanaman *Myriophyllum aquaticum* dilakukan menggunakan metode purposive sampling. Purposive sampling adalah pengambilan sampel yang didasarkan pada suatu pertimbangan tertentu yang dibuat oleh peneliti sendiri, berdasarkan ciri atau sifat yang sudah diketahui sebelumnya (Cahyani dkk., 2020).

Dalam penelitian (Guo dkk., 2020). Tanaman *Myriophyllum aquaticum* dalam meremediasi logam berat cadmium menggunakan tanaman dengan Panjang dari ujung apical sepanjang 8-10 cm serta tanaman yang dipilih tidak mengalami kerusakan. Pengukuran Panjang dan berat tanaman *Myriophyllum aquaticum* disajikan pada gambar 4.1 dan 4.2.



Gambar 4. 1 Panjang Tanaman *Myriophyllum aquaticum*

Sumber: (Dokumentasi Pribadi,2023)



Gambar 4. 2 Berat Tanaman *Myriophyllum aquaticum*

Sumber : (Dokumentasi Pribadi,2023)

4.2 Aklimatisasi

Proses aklimatisasi ini bertujuan agar tanaman yang akan digunakan dalam proses fitoremediasi dapat beradaptasi atau menyesuaikan dengan lingkungan baru. Tanaman *myriophyllum aquaticum* yang digunakan dalam proses fitoremediasi tidak berasal dari benih, melainkan tumbuhan yang sudah tumbuh sebelumnya. Dalam proses aklimatisasi ada beberapa tahapan yang perlu untuk dilakukan yakni :

1. Pengisian air aquades kedalam bak sebanyak 2 liter
2. Menempatkan tanaman kedalam bak yang berisi air aquades
3. Melakukan proses aklimatisasi selama 7 hari
4. Melakukan pengamatan pada perubahan fisik tanaman dan pengukuran suhu selama proses aklimatisasi.
5. Menggunakan 3 bak reaktor dengan ukuran bak diameter 31 cm dan ketinggian 15 cm
6. Bak ke-1 berisi 30 tanaman, bak ke-2 dan ke-3 berisi 25 tanaman

Tabel 4. 1 Tahap Aklimatisasi

Hari Ke-	Deskripsi Tanaman	Gambar
Hari ke- 1	Tanaman <i>Myriophyllum aquaticum</i> pada hari ke-1 masih berwarna hijau, batang yang kaku, tidak berakar, Panjang tanaman 10 cm. suhu air pada bak 1 sebesar 30,4°C, bak 2 sebesar 30,3°C, bak 3 sebesar 29,3°C	
Hari ke- 2	Tanaman <i>Myriophyllum aquaticum</i> pada hari ke-2 masih berwarna hijau, batang yang kaku, tidak berakar, Panjang tanaman 10 cm. suhu air pada bak 1 sebesar 30,6°C, bak 2 sebesar 30,5°C, bak 3 sebesar 29,9°C	
Hari ke- 3	Tanaman <i>Myriophyllum aquaticum</i> pada hari ke-3 mulai menguning pada daun bagian bawah karena tanaman air <i>Myriophyllum aquaticum</i> adalah tanaman yang mencuat ke air dan ciri fisik pada daun bagian bawah yang terkena air berwarna kuning atau kecoklatan. Batang tanaman masih kaku, akar mulai bermunculan sedikit. Suhu air bak 1 sebesar 30,4°C, bak 2 sebesar 30,4°C, bak 3 sebesar 29,7°C.	
Hari ke- 4	Tanaman <i>Myriophyllum aquaticum</i> pada hari ke-4 sudah ada perubahan warna daun pada bagian bawah berwarna menguning karena tanaman air <i>Myriophyllum aquaticum</i> adalah tanaman yang mencuat ke air dan ciri fisik pada daun bagian bawah yang terkena air berwarna kuning atau kecoklatan. Batang tanaman masih kaku, tunas mulai bermunculan sedikit. Suhu air bak 1 sebesar 30,0°C, bak 2 sebesar 30,6°C, bak 3 sebesar 29,6°C	

Hari Ke-	Deskripsi Tanaman	Gambar
Hari ke- 5	Tanaman <i>Myriophyllum aquaticum</i> pada hari ke-5 berubah berwarna kecoklatan pada daun bagian bawah karena tanaman air <i>Myriophyllum aquaticum</i> adalah tanaman yang mencuat ke air dan ciri fisik pada daun bagian bawah yang terkena air berwarna kuning atau kecoklatan. Batang tanaman masih kaku, tunas mulai bermunculan dan bertambah panjang. Suhu air bak 1 sebesar 30,8°C, bak 2 sebesar 30,4°C, bak 3 sebesar 29,6°C	
Hari ke- 6	Tanaman <i>Myriophyllum aquaticum</i> pada hari ke-6 berubah berwarna kecoklatan pada daun bagian bawah karena tanaman air <i>Myriophyllum aquaticum</i> adalah tanaman yang mencuat ke air dan ciri fisik pada daun bagian bawah yang terkena air berwarna kuning atau kecoklatan. Batang tanaman masih kaku, tunas mulai bertambah Panjang, kondisi daun mulai menguncup tidak mekar seperti dihari ke 1 hingga ke 5. Suhu air bak 1 sebesar 31,7°C, bak 2 sebesar 30,1°C, bak 3 sebesar 29,5°C	
Hari ke- 7	Tanaman <i>Myriophyllum aquaticum</i> pada hari ke-7 berubah berwarna kecoklatan pada daun bagian bawah karena tanaman air <i>Myriophyllum aquaticum</i> adalah tanaman yang mencuat ke air dan ciri fisik pada daun bagian bawah yang terkena air berwarna kuning atau kecoklatan. Batang tanaman masih kaku, tunas bertambah Panjang, kondisi daun mulai menguncup tidak mekar seperti dihari ke 1 hingga ke 5. Suhu air bak 1 sebesar 30,6°C, bak 2 sebesar 30,1°C, bak 3 sebesar 29,5°C	

Sumber : (Data Primer,2023)

4.3 Fitoremediasi Tanaman *Myriophyllum aquaticum*

Fitoremediasi merupakan teknologi yang memanfaatkan tumbuhan terpilih di alam, mudah dan sederhana melaksanakannya, serta biayanya rendah. Salah satu tumbuhan yang dapat dijadikan agen fitoremediasi yaitu tumbuhan air. Kemampuan tumbuhan air banyak digunakan untuk menyerap senyawa pencemar dalam air buangan (Sukono dkk., 2020).

Proses aklimatisasi telah dilakukan melakukan tahap selanjutnya yakni uji fitoremediasi tanaman *Myriophyllum aquaticum* dimana masing-masing reaktor berisi air limbah artificial Merkuri (Hg) dengan konsentrasi yang berbeda yakni menggunakan konsentrasi 4.20 mg/L dan konsentrasi 9.70 mg/L. Berikut analisis morfologi tanaman *Myriophyllum aquaticum* di tunjukkan pada tabel 4.2 .



Tabel 4. 2 Kondisi Tanaman Selama Fitoremediasi

Hari ke-	Kondisi Tanaman Pada Reaktor					
	Reaktor A (Kontrol 4,20 mg/L)	Reaktor B (Kontrol 9,70 mg/L)	Reaktor C1 (4,20 mg/L)	Reaktor C2 (4,20 mg/L)	Reaktor D1 (9,55 mg/L)	Reaktor D2 (9,62 mg/L)
0	 <p>Pada hari ke-0 pengamatan, air limbah merkuri berwarna putih tanpa adanya pengendapan atau gumpalan padatan pada air limbah. pH air menunjukkan</p>	 <p>Pada hari ke-0 pengamatan, air limbah merkuri berwarna putih tanpa adanya pengendapan atau gumpalan padatan pada air limbah. pH air menunjukkan</p>	 <p>Pada hari ke-0 pengamatan, tanaman masih terlihat sama pada proses aklimatisasi yakni daun yang mencuat ke air berwarna hijau dan daun yang</p>	 <p>Pada hari ke-0 pengamatan, tanaman masih terlihat sama pada proses aklimatisasi yakni daun yang mencuat ke air berwarna hijau dan daun</p>	 <p>Pada hari ke-0 pengamatan, tanaman masih terlihat sama pada proses aklimatisasi yakni daun yang mencuat ke air berwarna hijau dan daun</p>	 <p>Pada hari ke-0 pengamatan, tanaman masih terlihat sama pada proses aklimatisasi yakni daun yang mencuat ke air berwarna hijau dan daun yang</p>

	angka dengan 23.2°C. 6,26 suhu	angka dengan 23.2°C. 6,27 suhu	tenggelam berwarna kuning kecoklatan, batang tanaman masih kaku, tunas masi berwarna putih dan Panjang. pH air menunjukkan angka 6,10 dengan suhu 23,1°C.	yang tenggelam berwarna kuning kecoklatan, batang tanaman masih kaku, tunas masi berwarna putih dan Panjang. pH air menunjukkan angka 6,50 dengan suhu 23.3°C.	yang tenggelam berwarna kuning kecoklatan, batang tanaman masih kaku, tunas masi berwarna putih dan Panjang. pH air menunjukkan angka 6,26 dengan suhu 23.1°C.	tenggelam berwarna kuning kecoklatan, batang tanaman masih kaku, tunas masi berwarna putih dan Panjang. pH air menunjukkan angka 6,26 dengan suhu 23.2°C.
7.	 Pada hari ke-7 pengamatan, air limbah merkuri berwarna putih tidak ada	 Pada hari ke-7 pengamatan, air limbah merkuri berwarna putih tidak ada	 Pada hari ke-7 pengamatan, daun tanaman yang mencuat ke air berwarna	 Pada hari ke-7 pengamatan, daun tanaman yang mencuat ke air berwarna	 Pada hari ke-7 pengamatan, daun tanaman yang mencuat ke air berwarna	 Pada hari ke-7 pengamatan, daun tanaman yang mencuat ke air berwarna

	gumpalan padatan pada air limbah. pH air menunjukkan angka 7,23 dengan suhu 25.7°C.	gumpalan padatan pada air limbah. pH air menunjukkan angka 6,89 dengan suhu 25.5°C.	hijau dan daun yang tenggelam berwarna abu perak kecoklatan, batang tanaman berwarna hijau kekuningan, tunas berwarna putih dan Panjang. Air berubah menjadi warna kuning kecoklatan pH menunjukkan angka 6,57 dengan suhu 24.2°C.	hijau dan daun yang tenggelam berwarna abu perak kecoklatan, batang tanaman berwarna hijau kekuningan, tunas berwarna putih dan Panjang. Air berubah menjadi warna kuning kecoklatan pH menunjukkan angka 6,57 dengan suhu 24.2°C.	hijau dan daun yang tenggelam berwarna coklat, batang tanaman terdapat 2 yang sudah berubah warna coklat dan sisanya masih berwarna hijau, tunas berwarna coklat dan Panjang. Air berubah menjadi warna kuning kecoklatan pH menunjukkan angka 6,27 dengan suhu 24.9°C.	hijau dan daun yang tenggelam berwarna coklat, batang tanaman terdapat 1 yang sudah berubah warna coklat kehitaman dan sisanya masih berwarna hijau, tunas berwarna putih dan Panjang. Air berubah menjadi warna kuning kecoklatan pH menunjukkan angka 6,25 dengan suhu 24.6°C.
--	---	---	--	--	---	--

14.	 <p>Pada hari ke-14 pengamatan, air limbah merkuri berwarna putih tidak ada gumpalan padatan pada air limbah. pH air menunjukkan angka 6.73 dengan suhu 25.7°C.</p>	 <p>Pada hari ke-14 pengamatan, air limbah merkuri berwarna putih tidak ada gumpalan padatan pada air limbah. pH air menunjukkan angka 6.82 dengan suhu 25.2°C.</p>	 <p>Pada hari ke-14 pengamatan, daun tanaman yang mencuat ke air berwarna hijau dan daun yang tenggelam berwarna coklat. batang tanaman berwarna coklat hitam dan hijau kekuningan, tunas berwarna coklat. Air berubah menjadi warna kuning kecoklatan pH menunjukkan</p>	 <p>Pada hari ke-14 pengamatan, daun tanaman yang mencuat ke air berwarna hijau dan daun yang tenggelam berwarna coklat, batang tanaman berwarna coklat dan hijau kekuningan tunas berwarna coklat. Air berubah</p>	 <p>Pada hari ke-14 pengamatan, daun tanaman yang mencuat ke air berwarna hijau dan daun yang tenggelam berwarna coklat, 3 batang tanaman berwarna hitam dan sisanya berwarna coklat dan kuning. tunas berubah</p>	 <p>Pada hari ke-14 pengamatan, daun tanaman yang mencuat ke air berwarna hijau dan daun yang tenggelam berwarna coklat, batang tanaman terdapat 1 yang sudah berubah warna hitam, 3 berwarna coklat dan sisanya masih berwarna hijau, kekuningan. tunas berwarna coklat.</p>

			angka dengan 24.7°C.	6.18 suhu	menjadi warna kuning kecoklatan pH menunjukkan angka 6.21 dengan suhu 24.6°C.	menjadi coklat. Air berubah menjadi warna kuning kecoklatan pH menunjukkan angka 6.13 dengan suhu 25.0°C.	Air berubah menjadi warna kuning kecoklatan pH menunjukkan angka 6.20 dengan suhu 24.9°C.
21.							<p>Pada hari ke-21 pengamatan, air limbah merkuri berwarna putih tidak ada gumpalan padatan pada air limbah. pH air menunjukkan angka 7.40</p> <p>Pada hari ke-21 pengamatan, air limbah merkuri berwarna putih tidak ada gumpalan padatan pada air limbah. pH air menunjukkan angka 7.20</p> <p>Pada hari ke-21 pengamatan, daun tanaman yang mencuat ke air berwarna hijau dan daun yang tenggelam berwarna coklat. batang tanaman berwarna hitam semuanya dan</p> <p>Pada hari ke-21 pengamatan, daun tanaman yang mencuat ke air berwarna hijau dan daun yang tenggelam berwarna coklat, batang tanaman</p> <p>Pada hari ke-21 pengamatan, daun tanaman yang mencuat ke air berwarna hijau dan daun yang tenggelam berwarna coklat, dan beberapa daun</p> <p>Pada hari ke-21 pengamatan, daun tanaman yang mencuat ke air berwarna hijau dan daun yang tenggelam berwarna coklat, dan beberapa daun mengering,</p>

	dengan suhu 22.4°C.	dengan suhu 22.0°C.	tidak kaku, tunas mengalami patah, Air berubah menjadi warna coklat. pH menunjukkan angka 6.74 dengan suhu 21.2°C.	berwarna hitam semuanya dan tidak kaku. Tunas mengalami patah, Air berubah menjadi warna coklat. pH menunjukkan angka 6.96 dengan suhu 21.1°C.	ada yang mengering, batang tanaman berwarna hitam semuanya dan kaku. tunas mengalami patah Air berubah menjadi warna coklat. pH menunjukkan angka 6.50 dengan suhu 21.5°C.	batang tanaman berwarna hitam semuanya dan kaku. tunas mengalami patah Air berubah menjadi warna coklat. pH menunjukkan angka 6.52 dengan suhu 21.3°C.
--	---------------------	---------------------	--	--	--	--

Sumber : (Data Primer,2023)

Proses fitoremediasi pada penelitian ini menggunakan sistem batch dimana saat perlakuan pada tanaman *Myriophyllum aquaticum* dilakukan dengan cara mendiamkan atau menggenang tanaman *Myriophyllum aquaticum* ke dalam reaktor yang berisi limbah artificial merkuri (Hg). Reaktor A dengan konsentrasi 4.20 mg/L dan Reaktor B dengan konsentrasi 9.70 mg/L sebagai kontrol sedangkan Reaktor C dengan konsentrasi 4,20 mg/L dan Reaktor D dengan konsentrasi 9,62 mg/L berisi dengan 18 tanaman *Myriophyllum aquaticum*. Proses fitoremediasi dilakukan selama 21 hari dan dilakukan pengujian penurunan limbah merkuri pada hari ke-0,7,14,21 dan setiap hari dilakukan pengukuran pH, suhu air serta kondisi ciri fisik tanaman. Hasil analisis fisik yang di dapatkan selama proses fitoremediasi bahwa tanaman *Myriophyllum aquaticum* mengalami perubahan morfologi. Proses aklimatisasi pada tanaman *Myriophyllum aquaticum* mengalami perubahan bagian warna daun. Perubahan tersebut yakni daun yang semula berwarna hijau kemudian menjadi warna kekuningan hal tersebut dikarenakan ciri fisik atau karakteristik dari tanaman *Myriophyllum aquaticum*. Tanaman *Myriophyllum aquaticum* apabila di rendam di dalam air daunnya berubah menjadi kuning kecoklatan. Batangnya bulat, bagian yang terendam berwarna coklat, dan bagian di atas air berwarna hijau (Irawanto, 2010). Perubahan warna daun yang terendam di bagian air karena daun yang terendam kekurangan akan nutrisi sehingga terjadi perubahan warna menjadi kuning kecoklatan. *Myriophyllum aquaticum* menunjukkan toleransi yang tinggi terhadap ketinggian air yang berbeda, porositas pucuk lebih tinggi pada substrat nutrisi sehingga bagian daun tanaman yang tidak terendam masih berwarna hijau (Hussner dkk., 2009).

Proses uji tanaman *Myriophyllum aquaticum* selama 21 hari dengan konsentrasi 4.20 mg/L dan 9.62 mg/L mengalami perubahan warna daun dan batang tanaman. Setiap reaktor satu persatu daun dan batang tanaman *Myriophyllum aquaticum* berubah warna secara bertahap, perubahan warna daun tersebut meliputi daun berubah warna dari hijau ke kuning hingga coklat sedangkan perubahan warna batang dari hijau kuning coklat hingga hitam. Hal tersebut dinamakan dengan gejala klorosis di duga akibat tumbuhan mengalami efek toksisitas akibat kelebihan logam merkuri dari sampel air limbah artificial. Penyebab klorosis dan nekrosis pada tanaman yang terpapar logam secara berlebihan cukup lama untuk menghambat

sintesis klorofil. Klorosis juga dapat terjadi jika logam berat menghambat aktivitas enzim yang mempercepat proses sintesis klorofil. Secara kualitatif, penurunan konsentrasi merkuri ditandai melalui seumlah daun yang mengalami perubahan warna dari hijau menjadi kuning. Perubahan warna daun tersebut merupakan gejala klorosis yang disebabkan oleh toksisitas Hg. Klorosis adalah defisiensi magnesium (Mg) sehingga tidak mampu membentuk klorofil akibatnya daun berubah warna menjadi kuning dan kemudian akan mati. Perubahan fisik disebabkan karena Hg telah menggantikan Mg pada klorofil dalam daun.

Sedangkan nekrosis adalah kematian sel tumbuhan, jaringan, atau organ tumbuhan sehingga timbul bercak, bintik atau noda (Nurlina; dkk., 2016). Logam berat dapat menggantikan ion magnesium dalam molekul klorofil. Sehingga menyebabkan ketidakmampuan untuk menangkap foton dan menurunkan aktivitas fotosintesis (Harguinteguy dkk., 2013).

Penelitian selama 21 hari ditemukan adanya perubahan pada warna air yang muncul sejak hari pertama. Air berubah warna menjadi kekuningan seperti warna daun. Selama 21 hari ditemukan beberapa tanaman muncul tunas baru sekitar 5-7 tanaman di setiap reaktornya. Hal tersebut terjadi karena tanaman *Myriophyllum aquaticum* memiliki sistem kekebalan yang cukup kuat serta telah sering digunakan untuk studi biomonitoring pada air tercemar, baik sebagai bioindikator kualitas air melalui perubahan respon fisiologis organisme, atau sebagai bioakumulator polutan air melalui konsentrasi logam berat di jaringan tumbuhan (Harguinteguy dkk., 2013).

4.4 Kadar Logam Merkuri (Hg) Selama Fitoremediasi

Proses fitoremediasi menggunakan variasi konsentrasi. Selama penelitian fitoremediasi konsentrasi yang awalnya akan digunakan sebesar 5 mg/L dan 10 mg/L tidak sesuai dengan konsentrasi yang diinginkan. Setelah pembuatan limbah artificial dan dilakukan pengujian air limbah merkuri (Hg) hasil yang didapat dengan konsentrasi 4.20 mg/L dan 9.62 mg/L. Hal tersebut dikarenakan sebelum dilakukan uji konsentrasi limbah merkuri sudah terjadi penguapan karena sifat merkuri yang mudah untuk menguap. Merkuri merupakan salah satu unsur kimia yang dimiliki dalam tabel periodik dengan simbol Hg dan nomor atom 80. Unsur

golongan logam transisi ini merupakan logam yang ada secara alami dan satu-satunya logam yang pada suhu ruang berwujud cair. Sifat-sifat merkuri sama dengan sifat kimianya yang stabil terutama pada lingkungan sedimen yaitu mengikat protein, mudah menguap dan meng-emisi atau melepaskan uap merkuri beracun walaupun pada suhu ruang (Tapriziah dkk., 2022). Tingginya presentasi akumulasi Hg pada air hal ini dikarenakan terjadinya reaksi antara HgCl₂ dengan H₂O yang dapat terlihat pada reaksi persamaan berikut :



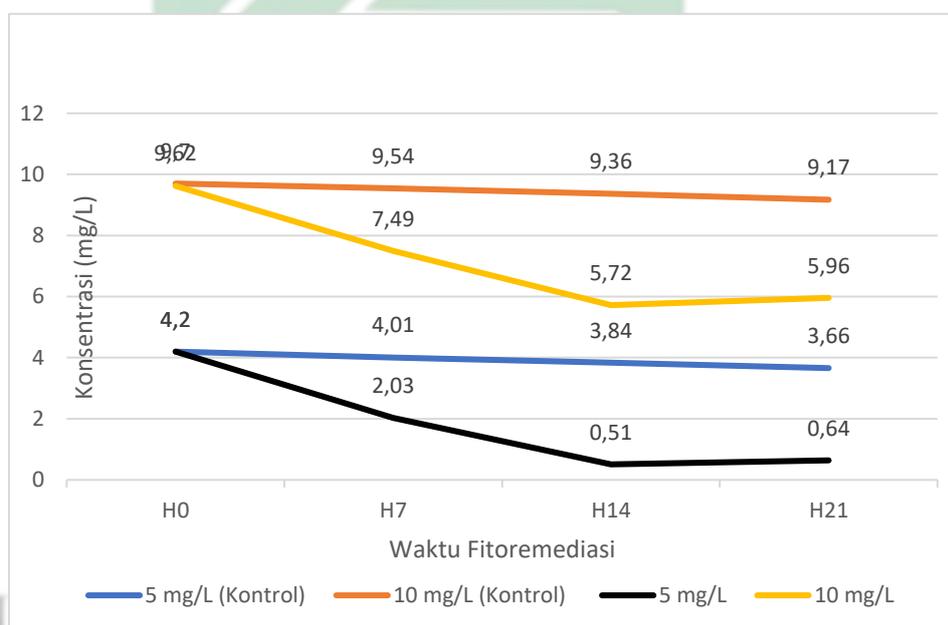
Senyawa Hg(OH)Cl merupakan produk yang dihasilkan dari pencampuran reaksi antara HgCl₂ dengan H₂O.

Pengujian penurunan konsentrasi merkuri yang terkandung dalam air limbah ini menggunakan metode pengujian kadar merkuri dalam air dengan alat spektrofotometer serapan atom secara ekstraksi atau sebutan dari Atomic Absorption Spectro. Spektrofotometer (AAS) merupakan alat yang menerapkan prinsip kerja untuk menentukan konsentrasi logam berat pada kandungan air. Prinsip kerja alat ini mempunyai prinsip penyerapan sinar dengan 8 variabel gelombang yang telah ditentukan oleh atom-atom yang dibebaskan oleh api dan nyala. Untuk memperkuat prinsip kerja ini didasarkan dengan hukum AAS yaitu Hukum Lambert dan Hukum Beer yang dikombinasikan menjadi Hukum Lambert Beer. Hukum Lambert berbunyi “Bila suatu sinar monokromatik melewati medium transparan, maka intensitas sinar yang diteruskan berkurang dan bertambahnya ketebalan medium yang dilalui sinar”, dan Hukum Beer berbunyi “Intensitas sinar yang diteruskan berkurang secara eksponensial dengan bertambahnya konsentrasi unsur yang menyerap sinar tersebut” (Raheem, 2022) . Metode ini beracuan pada SNI 6989.84:2019. Berikut hasil penurunan konsentrasi air limbah merkuri selama 21 hari.

Tabel 4.1 Hasil Penurunan Kadar Logam Merkuri (Hg)

Waktu Kontak (Hari)	Penyerapan Logam Hg (mg/L)			
	Reaktor A (5 mg/L Kontrol)	Reaktor B (10 mg/L Kontrol)	Reaktor C (5 mg/L) (18 tanaman)	Reaktor D (10 mg/L) (18 tanaman)
0	4.20	9.70	4.20	9.62
7	4.01	9.54	2.03	7.49
14	3.84	9.36	0.51	5.72
21	3.66	9.17	0.64	5.96

Sumber : (Data Primer,2023)



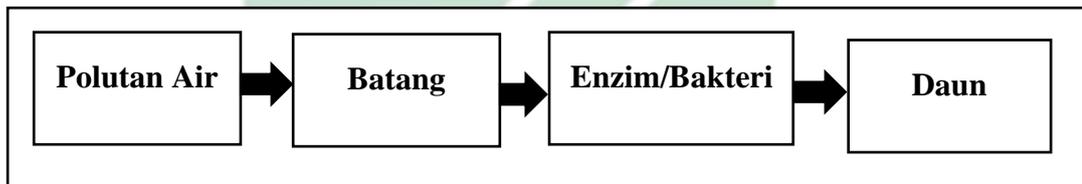
Gambar 4.3 Grafik Penurunan Kadar Logam Merkuri (Hg)

Sumber : (Hasil Analisis, 2023)

Pada gambar 4.1 diatas menunjukkan bahwa konsentrasi logam berat merkuri pada reaktor A dan reaktor B yang sebagai kontrol tanpa tanaman mengalami penurunan hanya hingga 3.66 mg/L dan 9.17 mg/L. sedangkan reaktor C, dengan konsentrasi 4,20 mg/L dan reaktor D dengan konsentrasi 9,62 mg/L mengalami penurunan yang signifikan karena terjadi proses fitoremediasi dengan tanaman *Myriophyllum aquaticum* sebanyak 18 tanaman, penurunan tersebut hingga 0,645mg/L dengan konsentrasi 4,20 mg/L, sedangkan konsentrasi 9,62 mg/L terjadi penurunan hingga 5.96 mg/L. penyisihan konsentrasi limbah merkuri

dengan tanaman lebih besar dibandingkan dengan tanpa tanaman atau disebut sebagai kontrol, hal ini membuktikan bahwa tumbuhan mempunyai peranan penting dalam menurunkan zat pencemar meskipun penurunan konsentrasi belum sampai memenuhi baku mutu Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No.22 Tahun 2021 dengan baku mutu air sungai kelas 3 sebesar 0,002 mg/L.

Penurunan kadar konsentrasi membuktikan bahwa tanaman *Myriophyllum aquaticum* merupakan tanaman yang mampu menyerap logam berat dalam air. Selama fitoremediasi tanaman *Myriophyllum aquaticum* yang digunakan mempunyai ciri fisik tidak berakar tetapi mempunyai tunas. Menurut (Harguinteguy dkk., 2016) tanaman *Myriophyllum aquaticum* termasuk makrofita yang terendam dapat memasukkan logam ke dalam daunnya langsung dari air dan tidak hanya melalui akar dengan translokasi selanjutnya ke jaringan tanaman bagian atas. Tanaman *Myriophyllum aquaticum* salah satu makrofit semi-terendam tumbuhan air yang bagian vegetatifnya terendam di badan air dan akarnya melekat pada tanah atau tanpa sistem perakaran. Makrofita semi terendam menggunakan daunnya sebagai jalur utama penyerapan ion logam berat. Makrofit yang terendam mampu menghilangkan ion logam berat dari air melalui penyerapan oleh gerakan pasif kutikula (Tan dkk., 2023).



Penurunan kadar konsentrasi logam merkuri membuktikan bahwa tanaman *Myriophyllum aquaticum* merupakan tanaman hiperakumulator yang mampu menyerap logam berat dalam air. Tanaman *Myriophyllum aquaticum* menyerap logam ke batang kemudian logam atau senyawa mengikuti aliran translokasi ke bagian atas tanaman melalui jaringan pengangkut *xylem* dengan bantuan enzim atau bakteri sebagai pemecah rantai karbonnya ke bagian atas yaitu pada bagian daun tanaman atau di translokasikan ke sel daun kemudian dari sel daun logam berat dikeluarkan menjadi uap ke udara. *Myriophyllum aquaticum* tidak hanya dapat menyerap logam di dalam substrat melalui akar, tetapi juga dapat menyerap dan menghilangkan pencemaran logam di dalam air melalui daun dengan cara

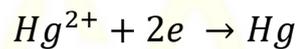
mensistensisnya menjadi komponen struktural. Kemampuan beradaptasi yang kuat dari tanaman ini dengan meningkatkan aktivitas enzim yang mengubah ion berbahaya menjadi tidak berbahaya (Jiang dkk., 2023). Proses penyerapan ini bisa disebut dengan fitodegradasi. Fitodegradasi adalah proses yang dilakukan oleh tanaman untuk memecah kontaminan dengan rantai molekul kompleks menjadi bahan-bahan yang tidak berbahaya dengan menggunakan enzim. Fitodegradasi, yaitu organ tumbuhan yang mengurai polutan yang diserap oleh proses metabolisme tumbuhan atau oleh enzim. Bakteri pembantu proses rizodegradasi yaitu *Maniobacter*, *Oceanobacter*, *Alcanivorax*, *Thalassopira*, *Stappia*, *Bacillus*, *Novospingobium*, *Pseudomonas*, *Spingobium*, dan *Rhodobacter* (Astuti & Titah, 2020). Bakteri ini mampu meremediasi polutan logam merkuri menjadi senyawa non-toksik dengan memecah rantai karbonnya. Selain mekanisme fitodegradasi yang digunakan pada tanaman *Myriophyllum aquaticum* yaitu menggunakan mekanisme fitovolatilisasi merupakan proses menyerap dan mentranspirasikan zat kontaminan oleh tanaman dalam bentuk larutan terurai sebagai zat yang tidak berbahaya lagi untuk selanjutnya diupayakan ke atmosfer (Widyasari, 2021). Polutan yang telah diserap oleh tanaman setelah proses fitodegradasi dan polutan ini kemudian dikeluarkan dalam bentuk uap air ke atmosfer.

Penurunan merkuri pada media belum memenuhi baku mutu Peraturan Pemerintah No.22 tahun 2021. Hal ini dapat dilihat konsentrasi akhir merkuri masih sebesar 0.645 mg/L dan 5.965mg/L. Hal itu karena penyerapan logam berat yang kurang maksimal penyerapan logam berat terbanyak terdapat pada bagian akar sedangkan tanaman *Myriophyllum aquaticum* tidak terdapat akar. Kandungan logam diakar secara garis besar lebih tinggi daripada bagian organ lainnya seperti daun dan batang. Setiap organ mempunyai kemampuan akumulasi yang berbeda-beda, akumulasi logam pada akar cukup tinggi daripada organ lainnya, karena perakarannya yang sangat luas, sehingga mampu menyerap air dan logam berat lebih banyak (Widyaningrum dkk., 2019).

Komponen terbesar dalam tanaman adalah protein dan asam amino, komponen ini dapat digunakan untuk membentuk fitokelatin serta menjadi faktor dalam mempengaruhi mekanisme translokasi logam. Senyawa fitokelatin berfungsi

untuk mengikat unsur logam dan membawanya ke sel melalui peristiwa transport aktif. Jika tanaman tidak mensintesis fitokelatin maka akan berujung pada kematian tanaman. Apabila fitokelatin berikatan dengan Hg maka fitokelatin akan membentuk ikatan sulfida pada sistein dan membentuk senyawa kompleks sehingga Hg nantinya akan terbawa atau ditranslokasikan kedalam jaringan tumbuhan melalui pengangkut yaitu xylem dan floem (Dulanlebit dkk., 2021)

Fitokelatin akan bereaksi dengan Hg membentuk senyawa kompleks maka akan terjadi toleransi logam dalam tanaman. Tanaman dapat menyerap merkuri kedalam akar, batang kemudian di distribusikan pada bagian daun. Dalam fitoremediasi ini Hg anorganik dapat berubah menjadi organik dan sebaliknya karena ada adanya interaksi dengan enzim. Diantaranya dapat mereduksi Hg^{2+} menjadi Hg elemental. Berikut reduksi dari Hg^{2+} (Havermans dkk., 2015)



Pengujian di hari ke- 21 logam merkuri mengalami kenaikan karena tanaman sudah tidak dapat melakukan penyerapan dikarenakan terlalu banyaknya logam berat yang sudah ditampung oleh tanaman sehingga tanaman mengalami gejala nekrosis yaitu kematian sel, jaringan pada organ tumbuhan. Gejala perubahan fisik tanaman *Myriophyllum aquaticum* menghitamnya batang serta daun berwarna coklat atau membusuknya daun. Kemampuan penyerapan logam oleh tanaman dipengaruhi oleh waktu pemaparan, Ketika tanaman sudah tidak mampu menyerap logam pada lama pemaparan tertentu, hal tersebut menunjukkan bahwa tanaman telah mencapai titik jenuhnya. Titik jenuh adalah waktu batas maksimum yang dapat di tolerir tanaman dalam menyerap kontaminan (Nurlina dkk., 2016).

4.5 Analisis pH Air

Nilai pH merupakan salah satu parameter kontrol yang ditinjau pada penelitian ini. Nilai pH atau derajat keasaman memainkan peranan penting dalam pertumbuhan mikroorganisme dan proses fotosintesis tanaman serta sebagai parameter kualitas air karena dapat mengontrol reaksi kimia yang terjadi dalam penguraian logam berat (Ambarsari & Qisthi, 2017). Berikut hasil pengukuran pH

larutan logam berat selama proses fitoremediasi dapat dilihat pada tabel 4.3 dibawah ini.

Tabel 4. 3 Hasil Pengukuran pH

Hari Ke-	Reaktor A Konsentrasi 5 mg/L (Kontrol)	Reaktor B Konsentrasi 10 mg/L (Kontrol)	Reaktor C Konsentrasi 5 mg/L	Reaktor D Konsentrasi 10 mg/L
0	6,26	6,27	6,30	6,26
1	6,68	6,66	6,77	6,75
2	6,55	6,28	6,18	6,14
3	6,98	6,88	6,30	6,44
4	6,73	6,69	6,45	6,32
5	6,78	6,55	6,51	6,35
6	6,99	6,85	6,68	6,52
7	7,23	6,89	6,47	6,26
8	7,16	6,79	6,25	6,13
9	7,12	6,84	6,27	6,17
10	7,32	7,15	6,20	6,35
11	7,28	7,15	6,19	6,40
12	7,03	6,84	6,18	6,29
13	7,21	6,87	6,24	6,27
14	6,73	6,82	6,19	6,16
15	6,55	6,87	6,15	6,09
16	6,85	6,69	6,28	6,23
17	6,89	6,85	6,41	6,32
18	6,98	7,02	6,67	6,40
19	7,14	7,15	6,68	6,41
20	7,36	7,03	6,83	6,51
21	7,40	7,20	6,83	6,51

Sumber : (Data Primer, 2023)

Berdasarkan tabel 4.1 dapat terlihat adanya perubahan pH pada air limbah selama penelitian berlangsung. Pada reaktor A sebagai kontrol tanpa tanaman di hari ke-0 hingga 6 memiliki Ph 6,2 – 6,9 hal tersebut masih tergolong pH rendah (asam) namun di hari ke-7 hingga 21 mengalami kenaikan pH hingga 7,4 sehingga dikatakan pH semakin netral. Reaktor B sebagai kontrol tanpa tanaman pada hari ke- 0 hingga 9 memiliki pH 6,2 – 6,8 masih tergolong pH rendah (asam) sedangkan pH semakin netral dari hari ke- 10 sampai hari ke- 21 yakni sebesar 7,1-7,2. Peningkatan yang terjadi terhadap parameter pH ini dapat dipengaruhi oleh waktu tinggal yang digunakan karena terjadinya proses atau pelepasan kadar CO₂ ke lingkungan (Yulita dkk., 2022).

Reaktor C dari hari ke-0 hingga ke- 21 mengalami peningkatan berkisar 6,3 – 6,8 pH tersebut masih tergolong pH rendah (asam) namun sedikit mengalami peningkatan yang tidak terlalu signifikan. Hal itu sama terjadi pada reaktor D mengalami peningkatan berkisar 6,2 – 6,5. Kestabilan Hg dapat dipengaruhi oleh kenaikan pH dari bentuk yang mudah diserap oleh tanaman menjadi sulit diserap oleh tanaman. Semakin kecil kelarutan logam maka semakin naik nilai pH dan begitu sebaliknya (Yulita dkk., 2022).

4.6 Analisis suhu Air

Suhu adalah derajat atau tingkatan panas atau faktor lingkungan yang berpengaruh secara langsung maupun tidak langsung terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman (Yulianto dkk., 2021) . Pengukuran suhu dalam penelitian ini bertujuan untuk mengetahui suhu dari larutan logam merkuri. Berikut hasil pengukuran suhu larutan logam merkuri selama proses fitoremediasi dapat dilihat pada tabel 4.4 dibawah ini :

Tabel 4. 4 Hasil Pengukuran Suhu

Hari Ke-	Reaktor A Konsentrasi 5 mg/L (Kontrol)	Reaktor B Konsentrasi 10 mg/L (Kontrol)	Reaktor C Konsentrasi 5 mg/L	Reaktor D Konsentrasi 10 mg/L
0	23,2°	23,2°	23,2°	23,1°
1	24,7°	23,6°	22,8°	23,2°
2	24,7°	24,5°	23,8°	24,1°
3	24,0°	23,6°	23,7°	23,7°
4	24,3°	23,8°	23,7°	23,8°
5	24,2°	23,8°	23,8°	23,8°
6	24,9°	25,4°	24,3°	24,7°
7	25,7°	25,5°	24,3°	24,7°
8	24,5°	24,1°	23,4°	23,7°
9	24,4°	24,1°	23,4°	23,7°
10	26,1°	25,6°	24,8°	25,2°
11	26,1°	25,5°	24,8°	25,2°
12	25,4°	25,3°	25,0°	25,5°
13	25,4°	25,1°	24,8°	25,4°
14	25,7°	25,2°	24,6°	24,9°
15	25,5°	25,2°	24,4°	24,8°
16	25,3°	25,5°	25,3°	25,5°
17	25,6°	25,4°	25,2°	25,2°
18	29,4°	28,9°	27,7°	28,3°
19	29,2°	28,7°	27,5°	28,2°
20	22,3°	22,3°	21,3°	21,6°

Hari Ke-	Reaktor A Konsentrasi 5 mg/L (Kontrol)	Reaktor B Konsentrasi 10 mg/L (Kontrol)	Reaktor C Konsentrasi 5 mg/L	Reaktor D Konsentrasi 10 mg/L
21	22,4°	22,0°	21,1°	21,4°

Sumber : (Data Primer,2023)

Berdasarkan tabel 4.4 pada reaktor A rata-rata suhu larutan uji 25,1°, reaktor B rata-rata suhu 24,8°, reaktor C sebesar 24,2°, reaktor D sebesar 24,5°. Suhu dapat mempengaruhi proses fotosintesis dan metabolisme makhluk hidup, suhu pertumbuhan tumbuhan air berkisar antara 22-30°. Di hari ke-20 dan 21 suhu mengalami penurunan yang signifikan yaitu berkisar 21,1 – 22,4 hal tersebut terjadi karena tanaman mengalami gejala nekrosis sehingga tidak dapat menyerap logam. Suhu dibawah minimum atau maksimum akan menghambat pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Akibatnya waktu yang diperlukan untuk melengkapi siklus hidup tanaman akan menjadi lebih lama, seiring dengan penurunan suhu hingga mencapai titik kritisnya, tanaman akan mengalami kerusakan hingga kematian (Mildaerizanti & Pangestuti, 2016) .

4.7 Efisiensi Removal

Efisiensi remediasi logam merkuri merupakan hubungan selisih antara konsentrasi logam merkuri sebelum fitoremediasi (C_{awal}) dan konsentrasi logam merkuri setelah (C_{akhir}) (Soheti dkk., 2020). Efisiensi remediasi logam merkuri dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$EF = \frac{C_{awal} - C_{akhir}}{C_{awal}} \times 100\%$$

Keterangan :

EF = Persentase efisiensi penurunan (%)

C_{awal} = Konsentrasi awal parameter air limbah (mg/L)

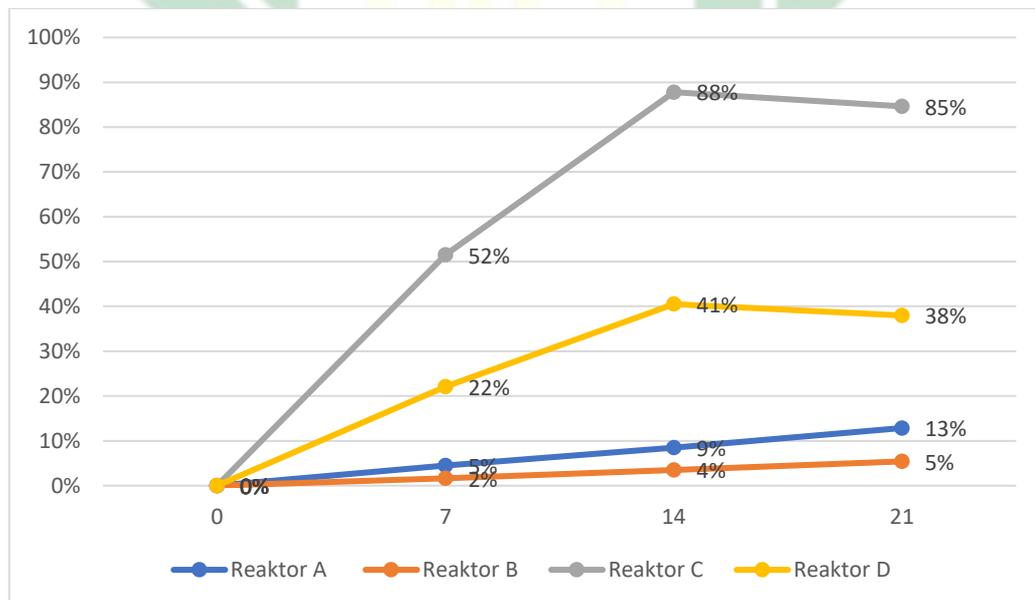
C_{akhir} = Konsentrasi akhir parameter air limbah (mg/L)

Hasil efisiensi removal dari tanaman *Myriophyllum aquaticum* dapat dilihat pada tabel 4.5 dibawah ini.

Tabel 4. 5 Hasil Efisiensi Removal

Kontak Hari	Reaktor A Konsentrasi 5 mg/L (Kontrol)	Reaktor B Konsentrasi 10 mg/L (Kontrol)	Reaktor C Konsentrasi 5 mg/L	Reaktor D Konsentrasi 10 mg/L
H0	4,20	9,70	4,20	9,62
H7	4,01	9,54	2,03	7,49
Efisiensi Removal (%)	4,52%	1,64%	51,5%	22,1%
H14	3,84	9,36	0,51	5,72
Efisiensi Removal (%)	8,5%	3,5%	87,8%	40,5%
H21	3,66	9,17	0,64	5,96
Efisiensi Removal (%)	12,85%	5,4%	84,6%	38%

Sumber : (Data Primer,2023)



Gambar 4. 5 Grafik Efisiensi Removal

Sumber : (Hasil Analisis,2023)

Data yang diperoleh dari tabel diatas bahwa nilai efisiensi tertinggi pada reaktor C dengan konsentrasi 4,20 mg/L dihari ke-14 yakni sebesar 87,8%. Di hari ke-21 kemampuan penyerapan tanaman dalam menyerap limbah merkuri berkurang menjadi 84,6% dengan konsentrasi 4,20 mg/L dan 38% dengan konsentrasi 9,62

mg/L. Penurunan efisiensi removal ini disebabkan oleh tanaman mengalami titik jenuh sehingga kemampuan penyerapan tanaman menjadi berkurang dan menyebabkan tanaman tersebut mengeluarkan kembali logam yang telah diserap dari media air hal tersebut juga di dukung pada hasil pengukuran suhu yang secara langsung menurun di hari ke 20 dan 21.

Semakin lama waktu kontak tumbuhan dengan sampel air, akumulasi logam merkuri dalam tubuh tumbuhan akan semakin tinggi hingga batas tertentu kadar merkuri yang dapat ditolerir oleh tumbuhan (Nurlina dkk., 2016). Hal ini ditunjukkan dari tingginya kadar Fe yang diserap oleh tumbuhan pada hari ke-7 dan penurunan yang terjadi pada hari ke-21. Kemampuan penyerapan logam oleh tumbuhan dipengaruhi oleh waktu paparan, Ketika tumbuhan sudah tidak mampu menyerap logam pada lama paparan tertentu, hal tersebut menunjukkan bahwa tumbuhan telah mencapai titik jenuhnya. Titik jenuh adalah waktu batas maksimum yang dapat di tolerir tumbuhan dalam menyerap kontaminan (Nurlina dkk., 2016).

Hasil analisis penelitian dalam meremoval logam merkuri (Hg) dengan sistem batch di dapatkan kurang maksimal dalam menurunkan logam berat merkuri sehingga terdapat alternatif lain yakni menggunakan sistem *Sub Surface Flow Constructed Wetland (SSF-CW)* yaitu perpaduan sistem fitoremediasi secara kontinyu dan lahan basah buatan. Proses fitoremediasi ini biasanya dilakukan dalam sistem pengolahan air limbah yang disebut *Constructed Wetland (CW)*. Sistem *Constructed Wetland* atau lahan basah buatan adalah proses pengolahan limbah yang meniru/menerapkan proses penjernihan air yang terjadi dilahan basah/rawa (*wetlands*), tumbuh-tumbuhan air (*Hydrophita*) yang tumbuh dikawasan tersebut berperan penting dalam pemulihan alami kualitas air limbah (*self-cleaning*). Di negara tropis seperti Indonesia, pola aliran horizontal lebih sering diterapkan aliran kontinyu dalam *Sub Surface Flow Constructed Wetlands*. *Sub Surface Flow* air tidak menggenang diatas media tanaman, tetapi mengalir dibawah media tanaman sehingga tanaman yang sesuai adalah jenis tanaman setengah tenggelam dalam air (Warisaura dkk., 2019).

Dalam penelitian (Warisaura dkk., 2019) tahap penelitian ini dilakukan dengan aklimatisasi tanaman melati air yang ditanamkan dalam media zeolite setinggi 45 cm selama 30 hari . proses removal Hg dari air limbah HgCl₂ artificial dengan konsentrasi 14,94 mg/L yang dilakukan dalam 2 tahap, yakni :

1. Kontinyu selama 12 jam dari jam 08.00-20.00 dengan flowrate 7,62 L/jam, sampling dilakukan pada jam ke 0,4,8, dan 12
2. Batch selama 12 jam dari jam 20.00-08.00 pada saat batch air limbah HgCl₂ berhenti dialirkan sampel effluent yang diambil setiap setiap 0 jam, 4 jam, 8 jam, 12 jam setiap harinya untuk dianalisis kadar merkuri menggunakan DMA (Direct Mercury Analyzer).

Hasil dari penelitian tersebut stabilitas sistem *Sub-Surface Flow Constructed Wetland* yang mengkombinasikan antara media tanam berupa zeolit dan tanaman melati air terlihat cukup baik untuk mendukung proses penurunan kadar logam Hg dalam air limbah dengan efisiensi penurunan sebesar 98,99%. Hal tersebut dibuktikan dari tanaman melati yang mampu beradaptasi serta penurunan limbah merkuri hingga 1,17 mg/L. Sehingga metode *Sub Surface Flow Constructed Wetland (SSF-CW)* tersebut yang dilakukan secara kontinyu sangat efektif dalam menurunkan limbah merkuri pada air yang tercemar.

4.9 Analisis Pengaruh Variasi Konsentrasi

Hasil data yang diperoleh selanjutnya dilakuakn uji normalitas terlebih dahulu untuk mengetahui apakah data telah berdistribusi normal atau tidak normal. Berikut uji normalitas di sajikan pada tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Kolmogorov-Smirnov

		Unstandardized Residual
N		24
Normal Parameters	Mean	.0000000
	Std. Deviation	3.20825525
Most Extreme Differences	Absolute	.146
	Positive	.098
	Negative	-.146

Kolmogorov-Smirnov Z	.717
Asymp. Sig. (2-tailed)	.682

Sumber : (Data SPSS,2023)

Uji normalitas yang digunakan pada penelitian ini adalah menggunakan uji Kolmogorov-smirnov uji ini digunakan untuk menguji *goodness of fit* antara distribusi sampel dan distribusi lainnya serta membandingkan serangkaian data pada sampel terhadap distribusi normal serangkaian nilai dengan dengan *mean* dan standar deviasi yang sama (Quraisy, 2020). Data diatas menunjukkan bahwa data hasil yang telah di dapat berdistribusi normal, hal itu dikarenakan sig α bernilai 0,682 sehingga $0,682 > 0,05$ maka dapt di interpretasikan bahwa data telah berdistribusi normal. Setelah data berdistribusi normal maka dilanjutkan untuk uji regresi linear sederhana.

Mengetahui arah hubungan dan seberapa besar pengaruh variasi konsentrasi terhadap penurunan konsentrasi pada perlakuan 18 tanaman, maka pengujian dilakukan dengan menggunakan ujianalisis regresi linear sederhana. Analisis linear sederhana merupakan analisis statistika dimana data yang digunakan harus memiliki skala pengukuran sekurang-kurangnya interval dan berdistribusi normal (Fatmawati & Lubis, 2020). Berikut pengujian hipotesis pada penelitian ini :

1. H_0 = tidak ada pengaruh variasi konsentrasi terhadap penurunan konsentrasi pada logam merkuri
2. H_1 = ada pengaruh variasi konsentrasi terhadap penurunan konsentrasi pada logam merkuri

Tabel 4. 6 Uji Regresi Linear Sederhana

Model	Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
1 Regression	1.066	1	1.066	.099	.756
Residual	236.737	22	10.761		
Total	237.803	23			

Sumber : (Data SPSS,2023)

Dari hasil output uji regresi tersebut diketahui bahwa nilai F hitung = 0,099 dengan tingkat signifikansi sebesar $0,756 > 0,05$ maka artinya H_0 diterima artinya

variasi konsentrasi tidak berpengaruh secara signifikan terhadap penurunan konsentrasi setelah dilakukannya perlakuan pada 18 tanaman

Tabel 4. 7 Model Summary

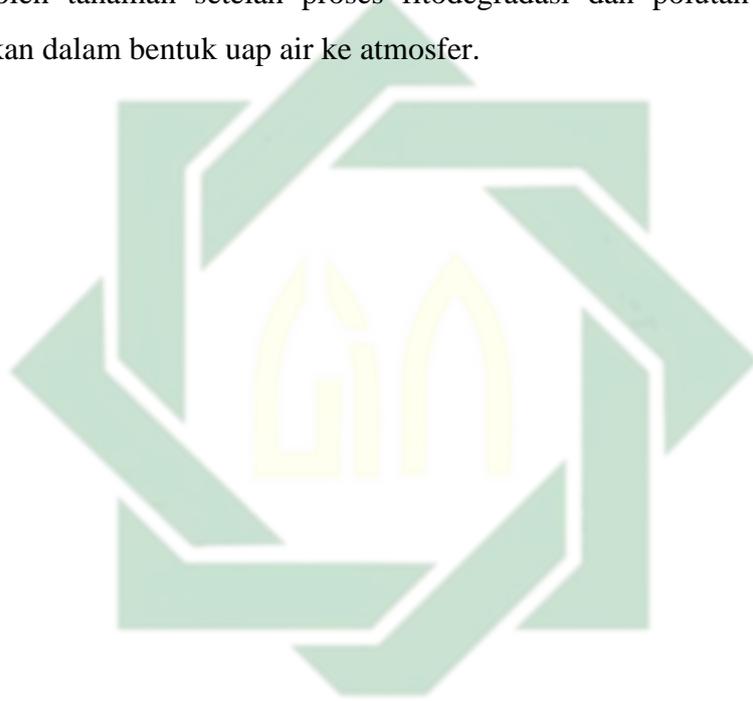
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.919	.004	-.041	3.28036

Sumber : (Data SPSS,2023)

Berdasarkan hasil output di atas diketahui nilai R Square sebesar 0,04 hal ini mengandung arti bahwa pengaruh variasi konsentrasi terhadap kemampuan terhadap penurunan konsentrasi setelah adanya perlakuan adalah sebesar 0,04%. Hal tersebut dibuktikan pada perhitungan efisiensi removal bahwa hasil penurunan logam merkuri selama 21 hari antara konsentrasi 4,20 mg/L dan 9,70 mg/L tidak jauh beda dan gejala klorosis tanaman berdasarkan ciri fisik mengalami secara bersamaan yaitu di hari ke-19 hingga ke-21 sehingga tanaman *Myriophyllum aquaticum* efektif dalam menurunkan logam merkuri di konsentrasi 4,20 mg/L dan 9,62 mg/L. hal tersebut dibuktikan pada penelitian (Guo dkk., 2020) bahwa pada perlakuan konsentrasi Cd 10 mg/L dan 20 mg/L sebanyak 18 tanaman *Myriophyllum aquaticum* mengalami penyerapan yang semakin meningkat .

Penyerapan yang dilakukan oleh tanaman *Myriophyllum aquaticum* tidak dibantu dengan sistem perakaran melainkan dibantu dengan enzim atau bakteri yang disebut dengan mekanisme Fitodegradasi. Fitodegradasi adalah proses yang dilakukan oleh tanaman untuk memecah kontaminan dengan rantai molekul kompleks menjadi bahan-bahan yang tidak berbahaya dengan menggunakan enzim. Fitodegradasi, yaitu organ tumbuhan yang mengurai polutan yang diserap oleh proses metabolisme tumbuhan atau oleh enzim (Astuti & Titah, 2020). Tanaman *Myriophyllum aquaticum* menyerap logam ke batang kemudian logam atau senyawa mengikuti aliran translokasi ke bagian atas tanaman melalui jaringan pengangkut *xylem* dengan bantuan enzim atau bakteri sebagai pemecah rantai karbonnya ke bagian atas yaitu pada bagian daun tanaman atau di translokasikan ke sel daun. *Myriophyllum aquaticum* tidak hanya dapat menyerap logam di dalam substrat melalui akar, tetapi juga dapat menyerap dan menghilangkan pencemaran logam di dalam air melalui daun dengan cara mensistensinya menjadi komponen

struktural. Kemampuan beradaptasi yang kuat dari tanaman ini dengan meningkatkan aktivitas enzim yang mengubah ion berbahaya menjadi tidak berbahaya (Jiang dkk., 2023). Selain mekanisme fitodegradasi yang digunakan pada tanaman *Myriophyllum aquaticum* yaitu menggunakan mekanisme fitovolatilisasi merupakan proses menyerap dan mentranspirasikan zat kontaminan oleh tanaman dalam bentuk larutan terurai sebagai zat yang tidak berbahaya lagi untuk selanjutnya diupkan ke atmosfer (Widyasari, 2021). Polutan yang telah diserap oleh tanaman setelah proses fitodegradasi dan polutan ini kemudian dikeluarkan dalam bentuk uap air ke atmosfer.



UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pembahasan pada penelitian ini dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Tanaman *Myriophyllum aquaticum* mengalami perubahan fisik selama fitoremediasi berlangsung. Daun yang mencuat ke air berwarna hijau sedangkan daun yang tenggelam berubah warna menjadi kuning ke coklat, tanaman mengalami pertumbuhan tunas, batang tanaman mengalami perubahan berwarna coklat dan hitam. Tanaman mengalami perubahan warna menjadi coklat dan hitam pada reaktor A dan reaktor B baik dari daun maupun batang terjadi pada hari ke-19 fitoremediasi.
2. Nilai signifikansi $0,756 > 0,05$ yang mengindikasikan bahwa H_0 diterima atau tidak ada pengaruh yang signifikan pada variasi konsentrasi sebesar 4,20 mg/L dan 9,62 mg/L terhadap penurunan konsentrasi setelah dilakukan perlakuan dengan sejumlah 18 tanaman.
3. Nilai efisiensi pada reaktor 1 dengan konsentrasi 4,20 mg/L (kontrol) memiliki nilai tertinggi pada hari pengambilan sampel ke-21 sebesar 12,85% pada reaktor 2 dengan konsentrasi 9,70 mg/L (kontrol) memiliki nilai tertinggi pada hari pengambilan sampel ke-21 sebesar 5,4% pada reaktor 3 dengan konsentrasi 4,20 mg/L (perlakuan 18 tanaman) memiliki nilai tertinggi pada hari pengambilan sampel ke-14 sebesar 87,8% pada reaktor 4 dengan konsentrasi 9,62 mg/L (perlakuan 18 tanaman) memiliki nilai tertinggi pada hari pengambilan sampel ke-14 sebesar 40,5%.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian ini yaitu :

1. Pada penelitian selanjutnya disarankan menggunakan tanaman yang berakar agar penyerapan logam berat lebih efisien
2. Kontak hari tidak terlalu lama dalam melakukan fitoremediasi sehingga menghindari terjadinya kematian tanaman. Dikarenakan tanaman bertahan dengan konsentrasi 4,20 mg/L dan 9,62 mg/L hanya sampai selama 18 hari.

3. Penelitian selanjutnya dalam remediasi limbah merkuri disarankan untuk menggunakan sistem lainnya seperti menggunakan *Sub Surface Flow Constructed Wetland (SSF-CW* yakni perpaduan sistem fitoremediasi secara kontinyu dan lahan basah buatan



UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A

DAFTAR PUSTAKA

- Adhani, R., & Husaini. (2017). *Logam Berat Sekitar Manusia* (S. Kholishotunnisa, Ed.; Cetakan II). Lambung Mangkurat University Press.
- Al Farobi, A. W. (2019). *FITOREMEDIASI OLEH Hydrilla verticillata (L.f) Royle DANAU RANU GRATI PASURUAN DENGAN VARIASI KONSENTRASI LOGAM TIMBAL (Pb)*. Univeristas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim .
- Ambarsari, H., & Qisthi, A. (2017). Remediasi Merkuri (Hg) pada Air Limbah Tambang Emas Rakyat dengan Metode Lahan Basah Buatan Terpadu. *Jurnal Teknologi Lingkungan* , 18(2), 148–156.
- Astuti, D. A., & Titah, H. S. (2022). Studi Fitoremediasi Polutan Minyak Bumi di Wilayah Pesisir Tercemar Menggunakan Tumbuhan Mangrove (Studi Kasus : Tumpahan Minyak Mentah Sumur YYA-1 Pesisir Karawang Jawa Barat). *Jurnal Teknik ITS*, 9(2), 111–116.
- Astuti, D. A., & Titah, S. H. (2020). Studi Fitoremediasi Polutan Minyak Bumi di Wilayah Pesisir Tercemar Menggunakan Tumbuhan Mangrove (Studi Kasus: Tumpahan Minyak Mentah Sumur YYA-1 Pesisir Karawang Jawa Barat). *Jurnal Teknik ITS* , 9, 111–116.
- Cahyani, P. P. A., Hakam, F., & Nurbaya, F. (2020). EVALUASI PENERAPAN SISTEM INFORMASI MANAJEMEN PUSKESMAS (SIMPUS) DENGAN METODE HOT-FIT DI PUSKESMAS GATAK. *Jurnal Manajemen Informasi dan Administrasi Kesehatan*, 03(02), 20–26.
- Dewi, P., Karti, M. H., Wijayanti, I., & Pramadi, S. D. (2019). TEKNIK AKLIMATISASI PADA TANAMAN LAMTORO (*Leucaena leucocephala*) DENGAN PERBEDAAN MEDIA TANAM DAN SIFAT TUMBUH. *Pastura*, 10(1), 46–52.
- Dulanlebit, Y. H., Unwakoly, S., & Sangadji, R. P. (2021). Studi Potensi *Pteris vitata*, *Amaranthus spinosus*, *Ipomoea reptans* sebagai Fitoremediator Tanah Tercemar Merkuri (Hg). *Molluca Journal of Chemistry Education*, 11(1), 32–38.
- Fatmawati, F., & Lubis, A. S. (2020). PENGARUH PERILAKU KEWIRAUSAHAAN TERHADAP KEMAMPUAN MANAJERIAL PADA PEDAGANG PAKAIAN PUSAT PASAR KOTA MEDAN. *Jurnal Muhammadiyah Manajemen Bisnis*, 1(1), 1. <https://doi.org/10.24853/jmmb.1.1.1-10>
- Guo, H., Jiang, J., Gao, J., Zhang, J., Zeng, L., Cai, M., & Zhang, J. (2020). Evaluation of cadmium hyperaccumulation and tolerance potential of *Myriophyllum aquaticum*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110502>

- Harguinteguy, C. A., Noelia Cofré, M., Fernández-Cirelli, A., & Luisa Pignata, M. (2016). The macrophytes *Potamogeton pusillus* L. and *Myriophyllum aquaticum* (Vell.) Verdc. as potential bioindicators of a river contaminated by heavy metals. *Microchemical Journal*, 124, 228–234. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.08.014>
- Harguinteguy, C. A., Schreiber, R., & Pignata, M. L. (2013). *Myriophyllum aquaticum* as a biomonitor of water heavy metal input related to agricultural activities in the Xanaes River (Córdoba, Argentina). *Ecological Indicators*, 27, 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.11.018>
- Havermans, J., Dekker, R., & Sportel, R. (2015). The effect of mercuric chloride treatment as biocide for herbaria on the indoor air quality. *Heritage Science*, 3(1). <https://doi.org/10.1186/s40494-015-0068-8>
- Hussner, A., Meyer, C., & Busch, J. (2009). The influence of water level and nutrient availability on growth and root system development of *Myriophyllum aquaticum*. *Journal Compilation*, 73–80.
- Irawanto, R. (2010). FITOREMEDIASI LINGKUNGAN DALAM TAMAN BALI. *Lokal Wisdom*, 2(4), 29–35.
- Jiang, C., Xu, S., Wang, R., Sun, Q., Zuo, J., & Zhuang, X. (2023). Transcriptomics Insights into Phosphorus Stress Response of *Myriophyllum aquaticum*. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(5). <https://doi.org/10.3390/ijms24054874>
- Kamal, M., Ghaly, A. E., Mahmoud, N., & CoteCôté, R. (2004). Phytoaccumulation of heavy metals by aquatic plants. *Environment International*, 29(8), 1029–1039. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00091-6](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00091-6)
- Kuswanto, F. (2020). Conservation, Phytoremediation Potential and Invasiveness Status of Bali Botanic Garden Aquatic Plant Collection. *Journal of Tropical Biodiversity and Biotechnology*, 5(1), 16–26. <https://doi.org/10.22146/jtbb.49312>
- Maulana, R., & Marsono, D. B. (2021). Penerapan Teknologi Membran untuk Mengolah Limbah Cair Industri Tahu (Studi Kasus: UKM Sari Bumi, Kabupaten). *Jurnal Teknik ITS*, 10(2), 54–60.
- Mildaerizanti, & Pangestuti, R. (2016). *PENGARUH CEKAMAN SUHU RENDAH TERHADAP TANAMAN*. 185–193.
- Najibullah, N. M., Khaer, A., & Marlina, D. (2022). *PENAMBAHAN LUMPUR GREY WATER DAN BLACK WATER PADA PENGURAIAN SAMPAH ORGANIK RUMAH TANGGA*. 22(1), 854–624.
- Napitupulu, S. L., & Purwanti, F. I. (2022). Kajian Fitostabilisasi Limbah Hasil Tambang Tembaga (Tailing). *Jurnal Teknik ITS*, 11(3), 99–104.

- Novita, E., Arunggi Gaumanda Hermawan, A., & Wahyuningsih, S. (2019). *KOMPARASI PROSES FITOREMEDIASI LIMBAH CAIR PEMBUATAN TEMPE MENGGUNAKAN TIGA JENIS TANAMAN AIR*. 13(01), 16–24.
- Novita, E., Wahyuningsih, S., Andriana Na, D., Jannah, imatul, & Andiananta Pradana, H. (2020). FITOREMEDIASI AIR LIMBAH LABORATORIUM ANALITIK UNIVERSITAS JEMBER DENGAN PEMANFAATAN TANAMAN ECENG GONDOK DAN LEMBANG. *Bioteknologi Biosains* , 7(1), 121–135. <http://ejurnal.bppt.go.id/index.php/JBBI>
- Nurfitriana, F. (2019). *Fitoremediasi Air Tercemar Timbal (Pb) Menggunakan Tanaman Apu-apu (Pistia Stratiotes) Dengan Sistem Kontinyu*. Universitas Islam Negeri Sunan Ampel.
- Nurfitriani, I., Anggraeni, K. N., & Merdekawati Agustin Rima. (2014). *Immobilisasi Sel Dan Evaluasi Kinerja Immobilisasi Sel Dalam Reaktor Kolom*.
- Nurlina, Suhadiyah, S., & Umar, R. M. (2016). Akumulasi Logam Berat Besi (Fe) Pada Kiapu Pistia stratiotes L. dari Air Sumur Sekitar Workshop Unhas. *Basic Science to Comprehensive Education*, 151–155.
- Nurlina, Suhadiyah Sri, & Umar, R. M. (2016). Akumulasi Logam Berat Besi (Fe) Pada Kiapu Pistia stratiotes L. dari Air Sumur Sekitar Workshop Unhas. *Prosiding Seminar Nasional*, 151–155.
- Oktavia, Z., Astorina Yunita Dewanti Bagian Kesehatan Lingkungan, N., & Kesehatan, F. (2016). PENGARUH VARIASI LAMA KONTAK FITOREMEDIASI TANAMAN KIAMBANG (SALVINIA MOLESTA) TERHADAP KADAR KADMIUM (Cd) PADA LIMBAH CAIR HOME INDUSTRY BATIK “X” MAGELANG. *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 4(5), 2356–3346. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jkm>
- PP No. 22 Tahun 2021. (2021). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021*.
- Pratiwi, D. Y. (2020). DAMPAK PENCEMARAN LOGAM BERAT (TIMBAL, TEMBAGA, MERKURI, KADMIUM, KROM) TERHADAP ORGANISME PERAIRAN DAN KESEHATAN MANUSIA. *Jurnal Akuatek*, 1(1), 59–65.
- Quraisy, A. (2020). Normalitas Data Menggunakan Uji Kolmogorov-Smirnov dan Saphiro-Wilk. *Journal of Health, Education, Economics*, 3(1), 7–11.
- Rahayu, R. D., & Mangkoedihardjo, S. (2022). Kajian Bioaugmentasi Untuk Menurunkan Konsentrasi Logam Berat di Wilayah Perairan Menggunakan Bakteri (Studi Kasus : Pencemaran Merkuri di Sungai Krueng Sabee, Aceh Jaya). *Jurnal Teknik ITS*, 11(1), 15–22.

- Raheem, A. F. (2022). *Uji Kandungan Logam Berat Cu, Fe, dan Pb, Menggunakan Metode Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) Pada Air Lindi TPA Piyungan, Bantul*. Universitas Islam Indonesia .
- Ratnawati, E., Ermawati, R., & Naimah, S. (2010). TEKNOLOGI BIOSORPSI OLEH MIKROORGANISME, SOLUSI ALTERNATIF UNTUK MENGURANGI PENCEMARAN LOGAM BERAT. *Jurnal Kimia dan Kemasan*, 32(1), 34–40.
- Rinanti, A. (2019). *PENGANTAR BIOTEKNOLOGI LINGKUNGAN*.
- Rizal, M. (2021). *FITOREMEDIASI TANAH TERCEMAR MERKURI (Hg) MENGGUNAKAN TANAMAN HANJUANG (Cordyline fruticosa)*. Universitas Islam Negeri Ar-Raniry .
- Rondonuwu, S. B. (2014). FITOREMEDIASI LIMBAH MERKURI MENGGUNAKAN TANAMAN DAN SISTEM REAKTOR. *Jurnal Ilmiah Sains*, 14(1).
- Rosita, M., Santoso, T., Aminah, S., & Pulukadang, S. H. V. (2022). Analisis Logam Merkuri (Hg) pada Air Sungai Janja di Derah Pertambangan. *Media Eksakta*, 18(2), 138–142. <https://doi.org/10.22487/me.v18i2.2374>
- Said, I. N. (2010). METODA PENGHILANGAN LOGAM BERAT (As, Cd, Cr, Ag, Cu, Pb, Ni dan Zn) DI DALAM AIR LIMBAH INDUSTRI Nusa Idaman Said. *JAI*, 6(2), 136–148.
- Sandra, L., M. F., Jasin, Pido, R., Makbul, R., Udyani, K., Patimah, Sari, D. K., Satriawan, D., Fajar, H., Ningsih, E., & Sinaga, J. (2022). *Proses Pengolahan Limbah* (M. Sar & R. M. Sahara, Ed.). PT.Global Eksekutif Teknologi.
- Saptati, D., & Himma, N. (2018). *Perlakuan Fisiko-Kimia Limbah Cair Industri*. UB Proses.
- Saputra, W. I., Hasyim, M., & Junus, F. G. (2020). Perspektif Media Prancis dalam Pemberitaan Pencemaran Air di Indonesia. *Al-Munzir*, 13(1), 19–34.
- Sinulingga, N., Nurtjahja, K., & Karim, A. (2015). FITOREMEDIASI LOGAM MERKURI (Hg) PADA MEDIA AIR OLEH KANGKUNG AIR (*Ipomoea aquatica* Forsk.). *Jurnal Biologi Lingkungan, Industri, Kesehatan*, 2(1), 75–81. <http://ojs.uma.ac.id/index.php/biolink>
- Soheti, P., Sumarlin, L. O., & Marisi, D. P. (2020a). 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>
- Soheti, P., Sumarlin, L. O., & Marisi, D. P. (2020b). 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>
- Suhar, Mistara, E. M., Hasmita, I., & Zulfikar, T. M. (2022). EFEKTIVITAS TANAMAN KANGKUNG AIR (*Ipomoea aquatic forsk*) SEBAGAI MEDIA PENYERAP MERKURI (Hg). *Jurnal Perisai*, 01(01), 83–89.
- Suharto, B., Dewi Susanawati, L., & Betha Ika Wilistien. (2011). PENURUNAN KANDUNGAN LOGAM PB DAN CR LEACHATE MELALUI FITOREMEDIASI BAMBUI AIR (*EQUISETUM HYEMALE*) DAN ZEOLIT. *AGROINTEK*, 5(2).
- Sukono, G. A. B., Hikmawan, F. R., Evitasari, E., & Satriawan, D. (2020). Mekanisme Fitoremediasi: Review. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, 2(2), 40–47. <https://doi.org/10.35970/jppl.v2i2.360>
- Sulistia, S., Cahaya Septisya, A., Teknologi Lingkungan -BPPT dan Program Studi Analisis Kimia Sekolah Vokasi, P., & Pertanian Bogor, I. (2019). ANALISIS KUALITAS AIR LIMBAH DOMESTIK PERKANTORAN. *Analisis Kualitas Air.... JRL*, 12(1), 41–57.
- Suprihatin, & Indrasti, S. N. (2010). PENYISIHAN LOGAM BERAT DARI LIMBAH CAIR LABORATORIUM DENGAN METODE PRESIPITASI DAN ADSORPSI. *Makara*, 14(1), 44–50.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103043>
- Tapriziah, E. R., Nazir, E., & Suryatama, M. I. (2022). Uji Kestabilan Kadar Merkuri pada Beberapa Larutan Pengawet. *Ecolab*, 16(2), 109–116. <https://doi.org/10.20886/jklh.2022.16.2.109-116>
- Utami, A. L. (2022). *Pengolahan Limbah Cair Menggunakan Tanaman Kiambang (Salvinia cucullata) dan Eceng Gondok (Eichornia crassipes) Di Ipal RSI Fatimah Cilacap*. Politeknik Negeri Cilacap.
- Wahyuningsi, A., & Amna, S. (2020). PERANCANGAN REAKTOR KOMPOS. *Jurnal Teknik Patra Akademika*, 11(2), 4–9. www.daunijo.com
- Warisaura, D. A., Fadlilah, I., Prasetya, A., & Fahrurrozi, M. (2019). STUDI STABILITAS SISTEM SUB SURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLAND (SSF-CW) MENGGUNAKAN TANAMAN MELATI AIR DAN MEDIA TANAM ZEOLIT UNTUK MENURUNKAN LOGAM Hg. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, 1(01). <https://doi.org/10.35970/jppl.v1i1.41>
- Wersal, R. M., Cheshier, J. C., Madsen, J. D., & Gerard, P. D. (2011). Phenology, starch allocation, and environmental effects on *Myriophyllum aquaticum*.

- Widyaningrum, L., Purnomo, T., & Putri, E. K. (2019). Kemampuan *Cyperus esculentus* sebagai Fitoremediator Logam Berat Timbal (Pb) pada Sedimen Perairan yang Tercemar Lumpur Lapindo di Porong Sidoarjo The Ability of *Cyperus esculentus* as a Fitoremediator Heavy Metals Lead (Pb) in Aquatic Sediments Contaminated Lapindo Mud in Porong Sidoarjo. *Lentera Bio*, 8, 12–16. <http://ejournal.unesa.ac.id/index.php/lenterabio>
- Widyasari, N. L. (2021). KAJIAN TANAMAN HIPERAKUMULATOR PADA TEKNIK REMEDIASI LAHAN TERCEMAR LOGAM BERAT. *Jurnal Ecocentrism*, 1(1), 17–24.
- Wignyanto. (2020). *Bioremediasi dan Aplikasinya* (Tim UB Press, Ed.; Pertama). UB Press.
- Yulianto, R. M., Safitri, E., Sintya, I., Savira, W., Fitrihidajati, H., Rachmardiarti, F., & Lailani, I. (2021). Kemampuan Enceng Gondok (*Eichhornia crassipes*) Sebagai Agen Fitoremediasi LAS (Linier Alkyl Benzene Sulphonate) Detergen. *Prosiding SEMNAS BIO*, 952–960.
- Yulita, Winardi, & Jumiati. (2022). Remediasi Air Tercemar Merkuri Menggunakan Purun Tikus (*Eleocharis Dulcis*) Pada Lahan Basah Buatan. *Jurnal Reka Lingkungan*, 10(3), 212–221.
- Yuniarti, Y., & Biyatmoko, D. (2019). Analisis Kualitas Air Dengan Penentuan Status Mutu Air Sungai Jaing Kabupaten Tabalong. *Jukung (Jurnal Teknik Lingkungan)*, 5(2), 52–69. <https://doi.org/10.20527/jukung.v5i2.7319>
- Zulkifli, A. (2014). *Dasar-dasar Ilmu Lingkungan* (A. Sulia, Ed.). Salemba Teknika

UIN SUNAN AMPEL
S U R A B A Y A