

## **Efektivitas Tanaman Air Frogbit (*Hydrocharis* sp.) Terhadap Remediasi Logam Berat Timbal (Pb)**

### **Effectiveness of Frogbit (*Hydrocharis* sp.) Aquatic Plant Against Lead (Pb) Heavy Metal Remediation**

Dewi Retno Febriyanti, Ratna Djuniwati Lisminingsih, Hamdani Dwi Prasetyo  
Fakultas Mtematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Islam Malang

#### **ABSTRAK**

Pencemaran perairan oleh logam berat merupakan permasalahan lingkungan yang serius karena dapat menurunkan kualitas air dan mengancam keberlangsungan ekosistem akuatik. Salah satu logam berat yang bersifat toksik dan sering dijumpai dalam limbah industri, konstruksi bangunan, dan domestik, serta pertambangan adalah timbal (Pb). Masuknya timbal ke dalam lingkungan perairan, baik secara langsung maupun tidak langsung akibat aktivitas manusia berpotensi menimbulkan dampak ekologis yang merugikan terutama di Kawasan industri dan permukiman di sepanjang aliran sungai. Paparan timbal dalam jangka Panjang diketahui dapat mengganggu pertumbuhan serta kelangsungan hidup organisme perairan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kemampuan tanaman air frogbit (*Hydrocharis* sp.) dalam menyerap logam berat timbal (Pb), mengevaluasi efektivitasnya terhadap parameter pertumbuhan (bobot basah tanaman dan luas permukaan daun), serta menganalisis respon tanaman terhadap faktor abiotik media tanam sebagai variabel kontrol. Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari analisis secara lapang dan uji AAS konsentrasi timbal. Metode penelitian ini merupakan Rancangan Acak Kelompok (RAK) dengan empat perlakuan konsentrasi timbal, yaitu kontrol (0ppm), 0,43 ppm, 2,43 ppm, dan 4,43 ppm, masing-masing diulang sebanyak enam kali. Parameter yang diamati meliputi bobot basah tanaman, luas permukaan daun, konsentrasi serapan timbal (Pb) di bagian akar, dan faktor abiotik (pH, suhu, dan DO). Hasil penelitian menunjukkan tanaman air frogbit (*Hydrocharis* sp.) berpotensi menyerap logam berat pada konsentrasi 0,43 ppm sebesar 0,269 mg/L dengan penambahan bobot tanaman 115,24 g. Sedangkan luas permukaan daun tidak berbeda signifikan ( $p\text{-value} > 0,05$ ). Faktor abiotik suhu pada media tanaman *Hydrocharis* sp. berpengaruh positif terhadap bobot tanaman. Sedangkan DO dan pH berpengaruh negatif terhadap bobot tanaman dan luas permukaan.

**Kata Kunci:** Timbal (Pb), Frogbit, Efektivitas, Pertumbuhan, dan Faktor Abiotik

#### **ABSTRACT**

Pollution of waters by heavy metals is a serious environmental problem because it can reduce water quality and threaten the sustainability of aquatic ecosystems. One of the heavy metals that is toxic and often found in industrial, construction, and domestic waste, as well as mining is lead (Pb). The entry of lead into the aquatic environment, either directly or indirectly due to human activities, has the potential to cause adverse ecological impacts, especially in industrial areas and settlements along river flows. Long-term exposure to lead is known to interfere with the growth and survival of aquatic organisms. This study aims to examine the ability of frogbit aquatic plants (*Hydrocharis* sp.) to absorb lead heavy metals (Pb), evaluate their effectiveness on growth parameters (plant wet weight and leaf surface area), and analyze plant response to abiotic factors of plant media as control variables. The research method used in this study came from field analysis and lead concentration AAS test. This research method is a Group Random Design (RAK) with four lead concentration treatments, namely control (0ppm), 0.43 ppm, 2.43 ppm, and 4.43 ppm, each repeated as many times. The observed parameters included the wet weight of the plant, the leaf surface area, the concentration of lead absorption (Pb) in the roots, and abiotic factors (pH, temperature, and DO). The results showed that frogbit aquatic plants (*Hydrocharis* sp.) have the potential to absorb heavy metals at a concentration of 0.43 ppm of 0.269 mg/L with an increase in plant weight of 115.24 g. Meanwhile, the leaf surface area did not differ significantly ( $p\text{-value} > 0.05$ ). The temperature abiotic factor in the plant media of *Hydrocharis* sp. has a positive effect on the weight of the plant. Meanwhile, DO and pH have a negative effect on plant weight and surface area.

**Keywords:** Lead (Pb), Frogbit, Effectiveness, Growth, and Abiotic Factors

## Pendahuluan

Limbah yang mengandung logam berat pada kawasan perairan merupakan permasalahan lingkungan yang serius. Limbah yang mengandung logam berat memiliki dampak negatif, yakni kematian (*lethal*) dan non-kematian (*sublethal*) pada organisme akuatik seperti gangguan pertumbuhan, perilaku, dan karakteristik morfologi [6]. Logam yang masuk ke dalam tubuh organisme perairan melalui permukaan tubuh, saluran pencernaan, otot, hati, dan insang akan terakumulasi dan didistribusikan dengan cepat ke seluruh tubuh (Azaman dkk., 2015). Sedangkan dampak negatif logam berat pada ekosistem akuatik adalah penurunan kualitas air [1]. Salah satu logam berat yang bersifat toksik adalah timbal (Pb). Menurut Peraturan Menteri Kesehatan RI Nomor 492/MENKES/PER/IV/2010, konsentrasi timbal yang aman bagi lingkungan perairan adalah 0,01 mg/L [20].

Timbal sering ditemukan pada limbah pembuangan industri, limbah konstruksi bangunan, limbah rumah tangga, dan limbah pertambangan [46]. Timbal mencemari perairan melalui aktivitas manusia, seperti pembuangan limbah baik secara langsung maupun secara tidak langsung. Kualitas air di kawasan sekitar industri dan pemukiman sepanjang aliran sungai seringkali tercemar oleh emisi logam berat timbal yang mengancam kualitas air apabila dikonsumsi dan mengganggu pertumbuhan jumlah biota [28]. Meskipun pemerintah telah menetapkan regulasi mengenai pengolahan limbah yang tertuang dalam PP No. 22 Tahun 2021 yang menjelaskan persetujuan teknis terkait pemenuhan baku mutu air limbah, emisi, pengolahan limbah bahan berbahaya dan beracun (B3), serta analisis dampak lalu lintas sebelum mengajukan dokumen lingkungan hidup berupa analisis mengenai dampak lingkungan hidup. Pengolahan limbah yang kurang baik akan berdampak secara meluas terhadap kualitas hidup masyarakat dan kerusakan lingkungan yang serius.

Berbagai jenis metode diupayakan dalam meremediasi lingkungan agar pencemaran logam berat dapat diurai. Salah satu metode dalam mengatasi masalah tersebut adalah dengan menggunakan teknik fitoremediasi. Fitoremediasi merupakan suatu teknik yang ramah lingkungan dalam mengurangi konsentrasi timbal pada air. Teknik fitoremediasi menggunakan tanaman sebagai media detoksifikasi kontaminan timbal, sehingga berkontribusi dalam pemulihan ekosistem yang tercemar. Implementasi fitoremediasi membutuhkan pemahaman terkait pencemaran logam dan senyawa organik yang mempengaruhi serapan logam berat pada ekosistem. Efektivitas teknik fitoremediasi dalam menyerap logam berat dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk jenis kontaminan, spesies tanaman yang digunakan, serta kondisi perairan, dan lingkungan sekitarnya. Tanaman yang mampu melakukan fitoremediasi melalui penyerapan zat kontaminan secara alami maupun zat khusus dalam tubuhnya adalah tanaman air [43]. Tanaman air yang berpotensi dapat melakukan fitoremediasi dalam mengatasi pencemaran logam berat timbal diantaranya Frogbit (*Hydrocharis* sp.). Tanaman tersebut berkontribusi menyerap kontaminasi logam berat di air melalui fitoremediasi dengan mekanisme rhizofiltrasi [9]. Mekanisme fitoremediasi dibagi menjadi beberapa macam, yakni fitoekstraksi, fitostabilisasi, rhizodegradasi, rhizofiltrasi, gradasi fitode, dan fitovolatilisasi [4]. Tanaman frogbit yang berada di lingkungan tercemar mengalami pertumbuhan cepat dan biomassa tanaman bertambah sehingga banyak polutan yang terserap. Tanaman frogbit memiliki daya adaptasi terhadap kondisi lingkungan yang ekstrim, sistem akar yang ekstensif, dan bioakumulasi dalam konsentrasi tinggi daripada konsentrasi lingkungan.

Penelitian terkait efektivitas frogbit belum diteliti secara spesifik dalam mengakumulasi limbah timbal, namun potensi remediasi logam berat oleh tanaman dengan genus *Hydrocharis*, seperti *Hydrocharis morsus-ranae* menunjukkan bahwa tanaman tersebut mengakumulasi beberapa logam berat, seperti timbal, tembaga, dan seng dengan konsentrasi tinggi sehingga berpotensi sebagai fitoremediasi [9]. Meskipun terdapat bukti yang mendukung potensi tanaman frogbit dalam remediasi timbal, penelitian secara spesifik mengenai akumulasi dan translokasi timbal masih terbatas. Penelitian eksperimental mengenai kemampuan *Hydrocharis* sp. dalam mengakumulasi timbal, analisis terhadap faktor abiotik (pH, suhu, dan Dissolved Oxygen (DO)), dan mekanisme biologis yang mendasari memerlukan eksplorasi lebih lanjut.

Dalam penelitian ini, beberapa parameter yang diamati adalah akumulasi kadar timbal setelah perlakuan menggunakan tanaman frogbit, faktor abiotik pada media air serta pertumbuhan tanaman berupa luas permukaan daun dan bobot tanaman yang menunjukkan keberhasilan proses fitoremediasi. Penelitian ini diharapkan berkontribusi dalam pengembangan teknologi pengolahan limbah logam berat yang ramah lingkungan serta meningkatkan potensi tanaman frogbit sebagai fitoremediator. Implikasi penelitian ini tidak hanya terbatas pada peningkatan kualitas air daerah tercemar timbal namun juga memperluas penerapan fitoremediasi di kawasan lain. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi efektivitas tanaman frogbit terhadap remediasi timbal.

## Material dan Metode

### Alat dan Bahan

Aquarium 15 L, Gunting, Timbangan Analitik, Gunting, Gelas Beaker 1000 mL, Gelas beaker 500 mL, Corong kaca, Pipet, Kertas saring, Erlenmeyer 500 mL, Spatula stainless, pH meter, DO meter, Termometer, Labu ukur 100 mL, Meteran jahit, Jerigen, dan AAS (AA 6300) Merk Shimadzu. Serbuk timbal ( $\text{PbNO}_3$ )<sub>2</sub>, Tanaman *Hydrocharis* sp. yang berumur 2 bulan dengan jumlah daun 2-3 serta tidak memiliki stolon, dan Air Sumur *Greenhouse* Universitas Islam Malang.

### Metode

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Februari sampai April 2025 di Green House Universitas Islam Malang dan Laboratorium Halal Center Universitas Islam Malang. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah kuantitatif dengan metode eksperimental yaitu perlakuan konsentrasi timbal (Pb) pada Tanaman Air Frogbit (*Hydrocharis laevigata*) sebagai fitoremediator yang diacak secara Rancangan Acak Kelompok Lengkap (RAKL). Penelitian ini menggunakan 4 konsentrasi yang terdiri atas kontrol, 0,43 ppm, 2,43 ppm, dan 4,43 ppm yang diulang sebanyak 6 kali pengulangan dan diamati faktor abiotik (pH, suhu, DO) setiap minggu. Sedangkan luas permukaan daun dan bobot tanaman diamati sebelum dan setelah proses panen.

### Cara Kerja

**Persiapan Media Tanaman:** media tanam yang digunakan adalah tanaman air frogbit (*Hydrocharis* sp.), aquarium 15 L, dan air 10 L. Air yang digunakan diambil di air sumur *Green House* Universitas Islam Malang, Kecamatan Dinoyo, Kota Malang.

**Penanaman Tanaman Frogbit (*Hydrocharis laevigata*):** Setelah persiapan media tanam selesai, maka dapat dilakukan penanaman tanaman air *Hydrocharis* sp. yang diperoleh dari budidaya tanaman air *aquascape* yang berumur 2 bulan. Penanaman dilakukan dengan menimbang tanaman air frogbit sebanyak 100 g/aquarium menggunakan timbangan analitik. Bibit tanaman *Hydrocharis* sp. memiliki jumlah daun 2-3 dengan ukuran tinggi tanaman  $\pm 10$  cm, serta tidak memiliki stolon. *Hydrocharis* sp.

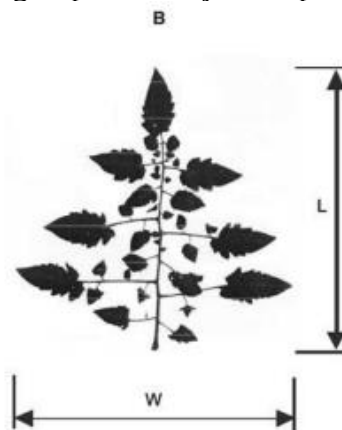
ditanam pada 10 L air dan disebarakan secara merata agar tidak bertumpang tindih dengan tanaman yang lain.

**Aklimatisasi Tanaman Air Frogbit (*Hydrocharis laevigata*):** aklimatisasi merupakan proses penyesuaian tanaman terhadap adaptasi dengan lingkungan. Objek penelitian yang digunakan berasal dari budidaya tanaman air frogbit (*Hydrocharis* sp.), kemudian melalui proses aklimatisasi selama 7 hari agar tanaman dapat beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang berbeda dari lokasi asal. Pada proses aklimatisasi dilakukan pengamatan suhu menggunakan termometer, pengamatan pH menggunakan pH meter, dan pengamatan DO menggunakan DO meter. Pengamatan dilakukan setiap hari untuk memastikan tanaman dapat beradaptasi dengan lingkungan.

**Pembuatan Larutan Timbal:** Timbal diperoleh dari toko bahan kimia laboratorium. Timbal ditimbang seberat 10 g kemudian dilarutkan ke dalam 1 liter air. Larutan timbal dimasukkan ke dalam galon air 2 L. Larutan stok dibagi menjadi beberapa konsentrasi yang telah ditentukan. Apabila larutan stok habis, dapat diulang pembuatannya setiap 10 g/L air. Timbal yang dipaparkan setiap 3 hari sekali antar kelompok. Setiap kelompok terdapat 4 aquarium.

**Analisis Bobot Basah Tanaman:** Analisis bobot tanaman dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui besarnya biomassa awal dan akhir tanaman air frogbit ketika sebelum dan setelah perlakuan. Pengamatan bobot tanaman dilakukan dengan membersihkan tanaman menggunakan air sumur setelah proses panen, kemudian tanaman ditimbang menggunakan timbangan analitik.

**Analisis Luas Permukaan Daun:** Analisis luas permukaan daun dilakukan sebelum dan setelah pemaparan timbal (Pb) untuk mengetahui perbedaan rerata antar perlakuan. Analisis luas permukaan daun dilakukan dengan menggunakan meteran jahit. Daun yang diukur bagian lebar dan panjang daun, kemudian dihitung luas permukaan daun menggunakan rumus. Panjang daun diukur dari pangkal daun hingga ujung daun, sedangkan luas diukur dari helai daun bagian kanan ke bagian kiri. Tanaman *Hydrocharis* sp. dianggap berbentuk persegi seperti ditunjukkan pada **Gambar 1**.



**Gambar 1.** Rumus Luas Permukaan Daun

(Sumber: Blanco & Folegatti, 2003)

Keterangan:

W (Wide): Lebar daun (cm)

L (Long): Panjang daun (cm)

**Ekstraksi Akar Tanaman:** Pembuatan konsentrasi ekstrak sebagai bahan uji AAS. Bagian akar tanaman ditimbang menggunakan timbangan analitik sebanyak 1 g kemudian dimasukkan ke dalam Erlenmeyer 100 ml. membuat larutan HCl + HNO<sub>3</sub> dengan perbandingan 3:1 (HCl 30 ml dan HNO<sub>3</sub> 10 ml), kemudian menambahkan HNO<sub>3</sub> dan larutan HCl + HNO<sub>3</sub> sebanyak 4 mL ke dalam Erlenmeyer dan distruksi menggunakan suhu 150°C selama 1 jam (tunggu hingga suhu turun). Tambahkan kembali HNO<sub>3</sub> dan HCl + HNO<sub>3</sub> sebanyak 4 mL ke Erlenmeyer kemudian distruksi 100°C selama 20 menit (tunggu hingga suhu turun). Aquades ditambahkan ke dalam Erlenmeyer hingga batas 40 mL kemudian saring ekstrak ke dalam beaker glass dan dipindahkan ke labu ukur 100 mL kemudian tambahkan aquades hingga tanda batas dan kocok sampai tercampur.

**Analisis Konsentrasi Timbal:** Analisis konsentrasi timbal dilakukan setelah pemanenan. Uji logam berat dilakukan dengan alat AAS (AA 6300) Merk Shimadzu selama 3-14 hari diperoleh dari Laboratorium Halal Center Universitas Islam Malang. Analisis konsentrasi timbal menggunakan AAS dilakukan dengan membuka aliran gas C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> yang diatur pada tekanan 5-9 bar, kemudian membuka kompresor yang diatur pada tekanan 5-9 bar. Menyalakan mesin AAS kemudian komputer dinyalakan, kemudian masuk ke dalam aplikasi WizAARD dan login. Pilih *select element* dan parameter yang akan diujikan dan menekan send parameter, tunggu hingga parameter siap. Setelah muncul kelengkapan instrumen, kemudian centang *lamp on* untuk menyalakan lampu indikator, kemudian klik *line search* dan tunggu. Sampel dimasukkan pada selang AAS dan pencet tombol *start* untuk memulai analisa. Apabila pembacaan selesai maka *file* dapat disimpan dengan menekan tombol *save*.

**Pengamatan faktor abiotik:** Pengamatan faktor abiotik terdiri dari pengamatan pH, suhu, dan DO. Pengamatan dilakukan setiap minggu untuk mengamati nilai variabel kontrol sesuai dengan standar baku mutu lingkungan. Penggunaan peralatan dilakukan dengan mencelupkan alat ke dalam media kemudian ditunggu 5 menit hingga nilai yang tertera stabil.

## Hasil dan Diskusi

### Hasil Serapan Timbal (Pb) pada Organ Akar *Hydrocharis sp.*

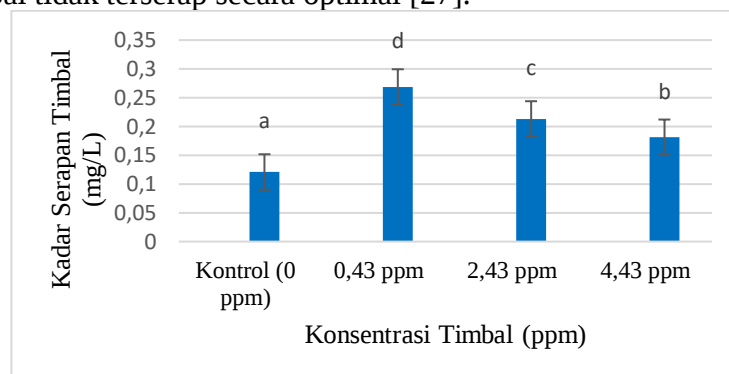
Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanaman frogbit mempengaruhi penyerapan konsentrasi timbal. Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa paparan timbal memberikan pengaruh nyata ( $P < 0,05$ ) terhadap konsentrasi timbal. Hal ini disebabkan karena kemampuan tanaman frogbit dalam beradaptasi. Tanaman frogbit memiliki batas maksimal dalam menyisihkan unsur pencemar timbal [58]. Rataan konsentrasi timbal yang terserap tanaman frogbit disajikan pada tabel 1.

**Tabel 1.** Nilai rata-rata konsentrasi timbal yang terserap pada tanaman *Hydrocharis sp.*

| No | Perlakuan<br>(ppm) | Konsentrasi $\pm$ St.Dev<br>(mg/L) | Presentase Serapan<br>Timbal (%) |
|----|--------------------|------------------------------------|----------------------------------|
|----|--------------------|------------------------------------|----------------------------------|

|    |      |              |        |
|----|------|--------------|--------|
| 1. | 0    | 0,121±0,0021 | 0      |
| 2. | 0,43 | 0,269±0,0022 | 122,31 |
| 3. | 2,43 | 0,213±0,0041 | 75,21  |
| 4. | 4,43 | 0,181±0,0041 | 49,58  |

Hasil rerata tabel 3 menunjukkan bahwa kemampuan tanaman frogbit dalam menyerap timbal berkisar 0,121 – 0,269 mg/L. Rerata penyerapan tertinggi yang diberikan pada frogbit yaitu 0,269 dengan penambahan konsentrasi timbal 0,43 ppm untuk perlakuan P2, sedangkan rerata terendah terdapat pada penambahan konsentrasi timbal 4,43 ppm untuk P4. Pada uji Tukey, perbedaan penyerapan konsentrasi timbal menunjukkan hasil bahwa tanaman frogbit dengan pemaparan timbal 0,43 ppm berbeda sangat nyata ( $P < 0,05$ ) terhadap 0 ppm. Pemaparan konsentrasi timbal 2,43 ppm oleh frogbit tidak berbeda nyata ( $P > 0,05$ ) terhadap frogbit dengan pemaparan timbal 4,43 ppm. Hal ini dapat terjadi karena dengan pemaparan timbal yang tinggi akan mempengaruhi pertumbuhan tanaman yang ditunjukkan dengan perubahan warna daun sehingga timbal tidak terserap secara optimal [27].



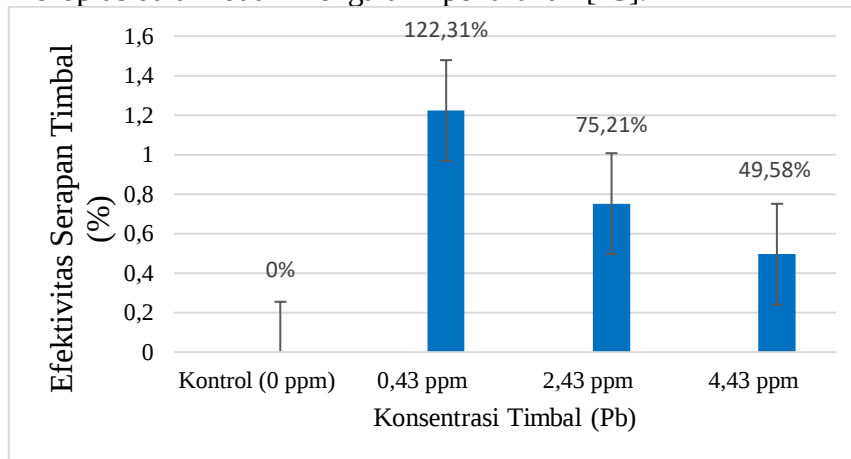
**Gambar 2.** Kadar Timbal pada Tanaman Hydrocharis sp.

(Sumber: Doc.Pribadi, 2025)

Berdasarkan gambar 6 daya akumulasi logam berat timbal menunjukkan bahwa kandungan timbal di atas ambang batas baku mutu. Jika dibandingkan dengan nilai baku mutu pada kawasan air tawar, yaitu 0,00005 g/L [6]. Sedangkan menurut ukuran internasional kadar timbal berada di bawah ambang batas yang berkisar 0,15 g/L, penelitian tersebut masih dikategorikan di bawah ambang batas [34]. Kadar timbal yang diserap tanaman dalam jumlah tertentu dapat membantu pertumbuhan tanaman sebagai respon positif namun juga menyebabkan kematian pada tanaman sebagai respon negatif [29]. Proses penyerapan ion timbal oleh tanaman dilakukan melalui membran sel. Kation unsur timbal dalam molekul air akan berdifusi ke rambut akar kemudian menuju membran sel. Tingginya molekul air yang terserap tanaman mengakibatkan ion timbal yang terserap tanaman cukup banyak [51].

Efektivitas penyerapan timbal tertinggi pada konsentrasi 0,43 ppm sebesar 122,31% pada gambar 3. Hal ini berbanding terbalik dengan pemaparan timbal pada konsentrasi 4,43 ppm sebesar 49,58%. Konsentrasi timbal yang tinggi menyebabkan tingginya konsentrasi gas polutan yang terserap sehingga jaringan daun mengalami kerusakan (nekrosis) dalam waktu singkat [22]. Nekrosis disebabkan oleh kematian jaringan tanaman. Paparan tinggi timbal pada jaringan daun mengganggu kadar klorofil

dimana timbal menyebabkan berkurangnya unsur magnesium (Mg) dan besi (Fe) yang berperan pembentukan struktur kloroplas. Hal ini mengakibatkan volume dan jumlah kloroplas dalam daun mengalami penurunan [13].



**Gambar 3.** Presentase Efektivitas Timbal

(Sumber: Doc.Pribadi, 2025)

Perubahan fisik pada tanaman frogbit disebabkan perpindahan logam dari media air ke dalam tanaman melalui mekanisme penyerapan dalam tanaman. Mekanisme fitoremediasi yang mungkin terjadi pada frogbit adalah rhizofiltrasi. Rhizofiltrasi adalah proses absorbs kontaminan oleh akar diikuti sebagian air akan translokasi ke xilem daun [25]. Tanaman memiliki mekanisme tertentu yang dapat menimbun logam pada akar dengan cara mencegah keracunan pada sel [45]. Keracunan pada sel tanaman akan mengakibatkan stress metal dengan membentuk zat fitokhelatin di bagian akar sebagai bentuk adaptasi. Fitokhelatin merupakan peptide yang mengandung asam amino dan belerang. Belerang akan mengikat logam berat melalui jaringan meristem [41]. Senyawa tersebut berfungsi mengikat timbal kemudian membawa ke dalam sel melalui transport aktif. Kemampuan menyerap logam yang efektif pada frogbit memungkinkan tanaman melakukan penyerapan melalui dua mekanisme, yaitu aktif dan pasif [37]. Penyerapan aktif dan pasif menggunakan gugus fungsional jaringan tanaman [33]. Penyerapan secara aktif melibatkan zat khelat sehingga timbal bergerak ke dinding sel dalam vakuola dan berikatan dengan senyawa organik lainnya. Selain timbal terakumulasi pada akar, timbal akan terakumulasi di bagian jaringan tanaman lain seperti daun. Tingginya akumulasi timbal di akar disebabkan frogbit menyerap unsur hara yang membawa logam dan air melalui akar.

### **Hasil Pengujian Efektivitas Tanaman *Hydrocharis sp.* pada Bobot Basah Tanaman Menggunakan Konsentrasi Timbal yang Berbeda**

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemaparan timbal mempengaruhi bobot basah tanaman. Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa pemaparan timbal memberikan pengaruh sangat nyata ( $p < 0,05$ ) terhadap bobot basah tanaman frogbit. Hal ini disebabkan karena terjadi remediasi timbal secara rhizofiltrasi oleh tanaman frogbit. Hal ini didukung oleh Hawrot-Paw dkk (2020) yang menyatakan karakteristik tanaman dapat menjadi faktor utama fitoremediasi dengan mekanisme jenis rhizofiltrasi. Bobot basah tanaman frogbit disajikan pada tabel 2.

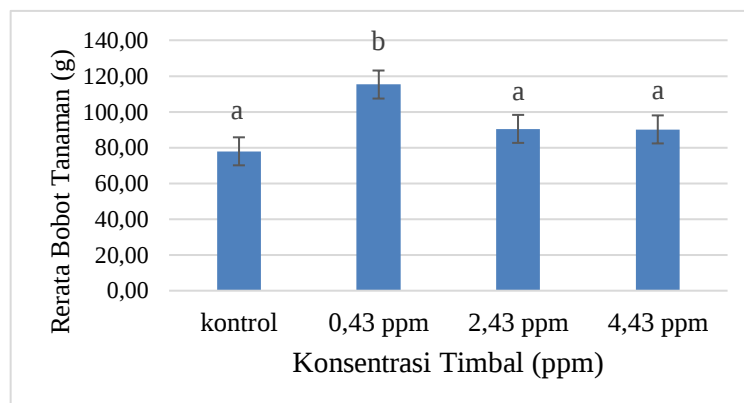
**Tabel 2.** Hasil Pengujian Bobot Basah Tanaman Frogbit Terhadap Pemaparan Timbal

| No. | Konsentrasi (ppm) | Mean±St.Dev (g) | Keterangan                          |
|-----|-------------------|-----------------|-------------------------------------|
| 1.  | 0                 | 77,91±19,93     | Bobot basah tanaman tidak bertambah |
| 2.  | 0,43              | 115,24±12,06    | Bobot basah tanaman bertambah       |
| 3.  | 2,43              | 90,45±5,15      | Bobot basah tanaman bertambah       |
| 4.  | 4,43              | 90,16±6,76      | Bobot basah tanaman bertambah       |

Hasil bobot pada gambar 4 menunjukkan bahwa bobot tanaman frogbit berkisar 77,91 – 115,24 g. Bobot tanaman frogbit tertinggi yaitu 115,24 g dengan pemaparan logam berat timbal 0,43 ppm untuk perlakuan P2, sedangkan rata-rata bobot tanaman terendah terdapat pada pemaparan timbal 0 ppm untuk P1. Pada uji *Games Howell*, perbedaan bobot tanaman menunjukkan hasil bahwa bobot tanaman dengan pemaparan timbal 0,43 ppm berbeda sangat nyata ( $P < 0,05$ ) terhadap semua konsentrasi. Perbedaan bobot tanaman dengan pemaparan 2,43 ppm dan 4,43 ppm tidak berbeda nyata ( $P > 0,05$ ).

Konsentrasi timbal mempengaruhi kemampuan tanaman frogbit dalam meremediasi sehingga menghasilkan bobot tanaman yang berbeda. Konsentrasi timbal yang rendah mampu mengakumulasi timbal ke bagian akar kemudian disebarkan ke organ lain dalam skala kecil [21]. Pada penelitian ini konsentrasi 0,43 ppm memungkinkan tanaman frogbit untuk mengalami pertumbuhan.

Mekanisme akumulasi timbal oleh tumbuhan terdiri dari tiga proses, yaitu penyerapan oleh akar, translokasi logam timbal, dan lokalisasi logam yang bertujuan mencegah sel dari keracunan logam [19]. Timbal dalam skala kecil (0,43 ppm) yang dipaparkan pada frogbit membantu akar menyerap timbal melalui aksi kapiler (epidermis akar). Timbal yang diserap oleh akar melalui dua jalur, yaitu simplas dan apoplas menuju endodermis.



**Gambar 4.** Bobot Tanaman Frogbit

Timbal yang masuk ke dalam endodermis akan terikat dengan dinding sel serta membran plasma [8]. Sel endodermis mampu menghalangi timbal melalui jalur simplast dan apoplast [24]. Endodermis akar menyerap timbal dalam bentuk ion kemudian masuk ke jaringan secara difusi menuju sel tumbuhan. Akumulasi ion timbal dilakukan oleh pita caspari. Pita caspari memblokir jalur apoplast sehingga sisa-sisa ion timbal melanjutkan proses translokasi melalui jalur simplast menuju daun. Pada daun vakuola akan mengurangi konsentrasi timbal melalui jalur transportasi. Sisa ion timbal akan

berpartisipasi dalam fotosintesis dan berikatan dengan asam amino dalam proses transpirasi membentuk kompleks timbal dan bergerak ke ruang antar sel mesofil [39].

Ion timbal pada sel mesofil daun akan berinteraksi dengan berbagai komponen sel termasuk enzim dan protein yang terlibat fotosintesis yang mengakibatkan bobot tanaman bertambah. Hal ini sesuai dengan penelitian Muchtar (1933) menyatakan timbal mampu meningkatkan bobot tanaman eceng gondok hingga 1.700% dengan serapan timbal 0,255 mg/L. Penelitian tersebut juga memaparkan bahwa penggunaan timbal dalam fotosintesis memiliki fungsi yang sama dengan besi [32]. Timbal juga membantu pembentukan karbohidrat dari fotosintesis semakin besar melebihi penggunaan logam besi. Pertambahan bobot tanaman pada konsentrasi 0,43 ppm juga menyebabkan tanaman mengalami pertumbuhan meristem lateral berupa stolon pada gambar 5. Stolon merupakan perubahan tunas yang tumbuh secara sejajar dengan permukaan media pertumbuhan serta termasuk organ perbanyakkan secara vegetatif [38].

Perkembangan tanaman pada metode tersebut merupakan bagian dari strategi penghindaran karena akumulasi logam berat tidak terjadi pada organ yang sedang aktif berfotosintesis. Faktor lain yang melindungi tanaman akibat paparan logam berat dapat berupa peningkatan aktivitas peroksidase pada tanaman. Perlakuan logam berat mengakibatkan peningkatan produksi ROS [16]. Perlakuan logam berat secara bertahap atau dosis kecil menjadi investasi terhadap toleransi yang terinduksi pada tanaman, dimana pertumbuhan tanaman akan meningkat jika dilakukan pemaparan konsentrasi rendah [10]. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kondisi stress tanaman air frogbit akibat logam berat mengatasi keadaan tersebut dengan membentuk organ baru berupa stolon melalui mekanisme metabolik. Hal ini yang menyebabkan frogbit mengalami pertambahan bobot pada konsentrasi rendah.



**Gambar 5.** Pertumbuhan Stolon pada Tanaman *Hydrocharis* sp.

(Sumber: Doc.Pribadi, 2025)

Sedangkan pemaparan timbal dengan konsentrasi 2,43 ppm untuk P3 dan 4,43 ppm untuk P4 pada tanaman frogbit mengakibatkan tanaman mengalami penurunan bobot tanaman. Penurunan bobot tanaman disebabkan toksisitas timbal mengganggu penyerapan air akibat efek osmotik larutan timbal yang tinggi sehingga air tidak dapat masuk ke dalam jaringan xilem daun [53]. Jika jumlah air yang diserap tanaman tidak memenuhi kebutuhan fisiologi, terdapat beberapa faktor yang berpotensi terjadi akibat peristiwa tersebut, yaitu:

1. Kerusakan sel dan nekrosis

Konsentrasi timbal yang tinggi akan terserap ke dalam sitoplasma menghalangi kinerja enzim pada biosintesis klorofil sehingga mengakibatkan jumlah dan volume klorofil berubah. Enzim yang bekerja pada proses ini adalah *porphobilinogen deaminase* (PBGD) dan *aminolevulinic acid* yang mensintesis porifirin (senyawa induk klorofil) [52]. Penurunan kadar klorofil terjadi akibat rusaknya struktur kloroplas daun. Struktur kloroplas dipengaruhi oleh mineral Fe dan Mg. Masuknya timbal secara berlebihan akan menggantikan Fe dan Mg dalam klorofil. Perubahan struktur mineral tersebut memicu stress pada tanaman frogbit berupa kematian sel daun (nekrosis) [35].

## 2. Gangguan penyerapan nutrisi

Paparan timbal yang melewati jalur simplast dapat mengganggu biosintesis senyawa metabolit primer (karbohidrat, lemak, dan protein) yang berperan sebagai bahan respirasi berupa ATP untuk pembelahan ujung akar, pembelahan meristem, pembentukan tunas, dan inisiasi sel stomata [14].

### Hasil Pengujian Efektivitas Tanaman *Hydrocharis sp.* pada Luas Permukaan Daun Menggunakan Konsentrasi Timbal yang Berbeda

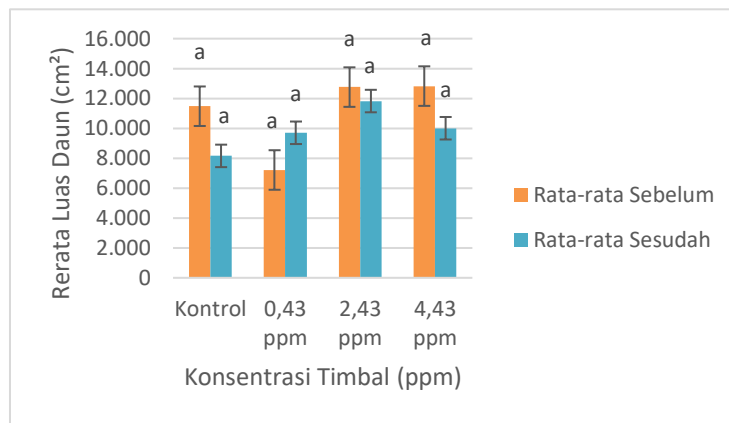
Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemaparan timbal tidak mempengaruhi luas permukaan daun. Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa pemaparan timbal tidak memberikan pengaruh nyata ( $P > 0,05$ ) terhadap luas permukaan daun. Hal ini disebabkan karena keterbatasan air yang terserap oleh tanaman akibat paparan timbal. Timbal mengakibatkan penyerapan air terganggu akibat efek osmotik larutan timbal yang tinggi sehingga air tidak dapat masuk ke dalam jaringan xilem (Ulumudin & Purnomo, 2022). Rataan luas permukaan daun dengan pemaparan timbal disajikan pada tabel 3.

**Tabel 3.** Hasil Pengujian Luas Permukaan Daun Frogbit Terhadap Pemaparan Timbal

| Perlakuan<br>(ppm) | Rerata<br>Sebelum<br>(cm <sup>2</sup> ) | St.Dev<br>sebelum | Rerata<br>Sesudah<br>(cm <sup>2</sup> ) | St.Dev<br>Sesudah |
|--------------------|-----------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------|-------------------|
| 0                  | 11.478                                  |                   | 8.156                                   |                   |
| 0,43               | 7.212                                   |                   | 9.702                                   |                   |
| 2,43               | 12.758                                  | ±2.341            | 11.825                                  | ±1.303            |
| 4,43               | 12.824                                  |                   | 10.005                                  |                   |

Pada penelitian ini timbal dapat menurunkan kadar air pada tanaman frogbit melalui dua jalur, yaitu penyerapan melalui akar dan lapisan daun yang bersentuhan langsung dengan media air. Proses penyerapan timbal di akar terjadi secara simplas, pergerakan air menuju sitoplasma akar melibatkan plasmodesmata. Air yang tidak dapat diserap secara efisien oleh akar mengakibatkan penyerapan secara simplas terhambat sehingga jaringan xilem akar mengalami penurunan kadar air (stress hidrik) sedangkan evatranspirasi daun melebihi laju absorbs air [30]. Respons tanaman terhadap kekurangan air dapat dilihat dari pertumbuhan sel. Kekurangan air mempengaruhi turgor

sel yang berdampak terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman, seperti luas permukaan daun [47].



**Gambar 6.** Luas Permukaan Daun

(Sumber: Doc.Pribadi, 2025)

Sebagian air yang membawa timbal berhasil masuk ke hingga sel daun melalui xilem dan memenuhi ruang diantara mesofil. Peningkatan kandungan timbal pada mesofil mempengaruhi pembelahan sel sehingga luas permukaan daun tidak berkembang [36]. Tanaman frogbit yang terpapar timbal menghasilkan metabolit sekunder sebagai hasil sampingan pertahanan. Secara fisiologis logam dengan konsentrasi 2,43 ppm maupun 4,43 ppm pada gambar 5 memicu respon tanaman dengan membentuk ion logam dan mencegah bereaksi dengan bahan protoplasma yang sensitif terhadap enzim. Penyimpanan timbal di bagian vakuola mengantisipasi efek toksisitas pada tanaman tersebut agar pertumbuhan sel, jaringan, dan morfogenesis terjaga [23].

Jalur tanaman frogbit yang bersentuhan langsung dengan media air timbal menimbulkan bercak di sekitar kutikula daun. Kutikula daun yang terlapisi timbal cukup lama akan memicu nekrosis pada tanaman (Gambar 6).



**Gambar 7.** Nekrosis pada Daun dengan Konsentrasi Tinggi

(Sumber: Doc.Pribadi, 2025)

Menurut Stefanov dkk (1995) air yang terpapar timbal mengakibatkan perubahan pada organ daun, yaitu:

1. Sintesis klorofil

Ketika tanaman terpapar timbal, ion akan masuk ke dalam sel daun. Timbal yang terpapar pada frogbit akan mengganggu sintesis klorofil dengan cara menghambat aktivitas enzim ( $\alpha$ -amino laevulinate dehidrogenase) yang membentuk klorofil a dan b. Apabila klorofil a dan b menurun, maka dapat mengganggu penyerapan magnesium (komponen utama klorofil) dan besi (katalisator pembentukan klorofil). Tanaman yang kekurangan klorofil a dan b serta penurunan kadar magnesium dan besi akan menyebabkan gangguan fisiologis berupa luas permukaan daun [55].

2. Perubahan struktur kloroplas

Perubahan yang terjadi pada klorofil maupun kloroplas diawali kerusakan mikro pada daun. Apabila timbal melalui daun akan mempengaruhi proses metabolisme dalam sel mesofil daun yang dapat merusak kloroplas dan fotosintesis [17].

3. Defisiensi karbondioksida akibat penutupan stomata

Daun frogbit yang bersentuhan langsung dengan air dengan kandungan timbal mengakibatkan tanaman tersebut memiliki bercak-bercak putih. Bercak timbal tersebut mengakibatkan stomata daun tertutupi sehingga pertukaran karbondioksida dan oksigen melalui proses respirasi berkurang. Bercak timbal juga mengakibatkan jumlah proses transpirasi menurun yang mengakibatkan jumlah air berkurang [11].

**Hasil Analisis Korelasi Faktor Abiotik dengan Bobot Tanaman dan Luas Permukaan Daun *Hydrocharis* sp. Setelah Perlakuan Timbal**

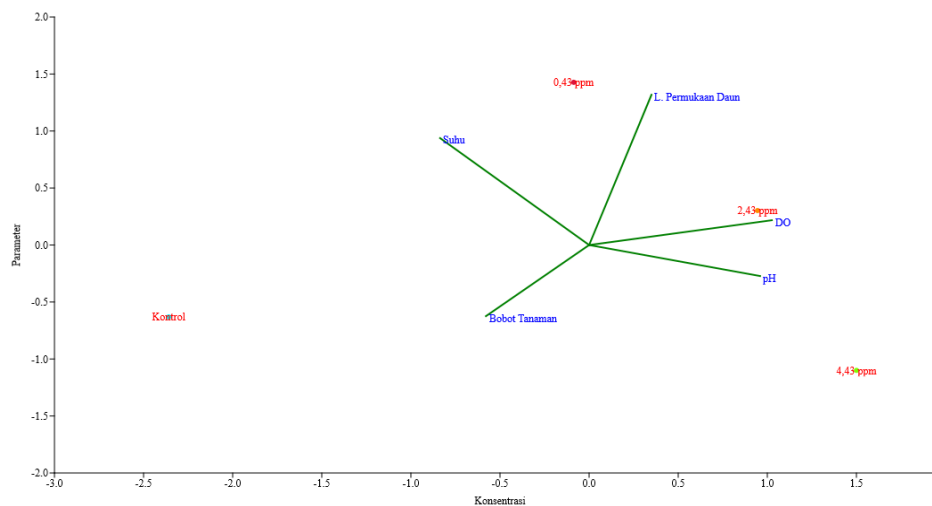
Berdasarkan hasil analisis korelasi faktor abiotik pada **Gambar 12** dengan bobot tanaman dan luas permukaan daun *Hydrocharis* sp. dapat diketahui bahwa parameter luas permukaan daun, nilai koefisien korelasi sebesar 0,169 dengan nilai signifikansi 0,564 (**Tabel 6**) juga menunjukkan adanya hubungan positif yang lemah dengan perubahan DO pada media tanaman.

**Tabel 4.** Korelasi Faktor Abiotik Terhadap Bobot Tanaman dan Luas Permukaan Daun

| Parameter Kualitas |                   | R      | P     |
|--------------------|-------------------|--------|-------|
| Air dan Tanaman    |                   |        |       |
| Konsentrasi        | DO                | 0,247  | 0,395 |
|                    | Suhu              | -0,044 | 0,881 |
|                    | pH                | 0,094  | 0,749 |
|                    | L. Permukaan Daun | 0,169  | 0,564 |
|                    | Bobot Tanaman     | -0,562 | 0,037 |

R = koefisien korelasi, P = Nilai Signifikansi, level signifikansi 0,05.

Hal ini menunjukkan kadar DO berpengaruh secara lemah terhadap luas permukaan daun sehingga luas permukaan daun tidak menunjukkan perkembangan. Faktor abiotik pH memiliki korelasi negatif atau tidak mempengaruhi perkembangan luas permukaan daun. Sedangkan faktor abiotik suhu tidak memiliki korelasi yang kuat terhadap luas permukaan daun. Pada bobot tanaman diperoleh koefisien korelasi sebesar -0,562 dengan nilai signifikansi sebesar 0,037. Hasil ini menunjukkan faktor abiotik suhu memiliki korelasi positif terhadap pertambahan bobot tanaman. Sedangkan faktor abiotik DO dan pH memiliki korelasi negatif terhadap bobot tanaman.



**Gambar 8** Uji Biplot Suhu, pH, dan DO pada Media Tanaman *Hydrocharis* sp.

(Sumber: Doc.Pribadi, 2025)

Hubungan antara korelasi dan kadar DO menunjukkan koefisien korelasi sebesar 0,247 dengan nilai signifikansi sebesar 0,395. Hal ini bahwa hubungan antara keduanya bersifat positif lemah dan tidak signifikan sehingga dapat disimpulkan peningkatan konsentrasi tidak memberikan pengaruh yang nyata terhadap kadar DO. Sedangkan, parameter suhu menunjukkan koefisien korelasi yang diperoleh adalah -0,044 dengan nilai signifikansi sebesar 0,881. Korelasi ini sangat lemah dan bersifat negatif dan tidak signifikan secara statistik sehingga dapat disimpulkan perubahan konsentrasi tidak mempengaruhi suhu secara nyata. Selanjutnya, parameter pH menunjukkan nilai korelasi yang diperoleh adalah 0,094 dengan nilai signifikansi sebesar 0,749 yang tergolong sangat lemah dan tidak signifikan. Variasi konsentrasi tidak memberikan dampak yang berarti terhadap pH. Nilai rerata Suhu, DO, dan pH ditampilkan pada tabel 5 di bawah ini:

**Tabel 5.** Hasil Rerata Suhu,DO,dan pH pada Media Tanaman Frogbit

| No | Konsentrasi<br>(ppm) | Suhu<br>(°C) | DO<br>(mg/L) | pH |
|----|----------------------|--------------|--------------|----|
|----|----------------------|--------------|--------------|----|

|    |      |       |      |      |
|----|------|-------|------|------|
| 1. | 0    | 26,64 | 8,28 | 7,20 |
| 2. | 0,43 | 26,64 | 8,77 | 7,21 |
| 3. | 2,43 | 26,60 | 8,97 | 7,21 |
| 4. | 4,43 | 26,56 | 8,97 | 7,22 |

### 1. Dissolved Oxygen (DO)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa korelasi kadar DO yang terikat di dalam media tanaman *Hydrocharis* sp. dengan luas permukaan daun berpengaruh positif lemah atau tidak berpengaruh secara nyata sehingga luas permukaan daun tidak menunjukkan perkembangan tanaman. Sedangkan korelasi DO dengan bobot tanaman berpengaruh negatif sehingga dapat disimpulkan kadar DO tidak mempengaruhi bobot tanaman gambar 8. Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa pemaparan timbal tidak memberikan pengaruh sangat nyata ( $p > 0,05$ ) terhadap DO. Hal ini disebabkan karena DO bukanlah variabel terikat yang dipaparkan melainkan variabel kontrol yang diperlakukan dan memiliki perlakuan sama dalam penelitian. Nilai DO dipaparkan pada tabel 5. Berdasarkan tabel tersebut kandungan DO tertinggi dengan pemaparan 4,43 ppm untuk perlakuan P4, sedangkan DO terendah terdapat pada pemaparan timbal 0 ppm untuk P1. Pemaparan timbal tertinggi diasumsikan dapat mempengaruhi aktivitas respirasi mikroorganisme dalam media tanaman *Hydrocharis* sp. Sifat toksik timbal menekan laju respirasi mikroorganisme yang berperan mengkonsumsi DO dalam air. Berkurangnya aktivitas respirasi mengakibatkan konsumsi oksigen oleh mikroorganisme menjadi rendah. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan DO tidak selalu mencerminkan kondisi perairan yang lebih baik tetapi menjadi indikasi terganggunya aktivitas biologis akibat paparan timbal [12]. DO merupakan rangkaian proses yang saling berinteraksi yang terdiri atas reaerasi atmosfer, fotosintesis, oksidasi, dan respirasi tanaman akuatik [54]. Oksigen memainkan peranan penting dalam air dengan menguraikan berbagai komponen kimia menjadi lebih sederhana. Oksigen dapat beroksidasi dengan zat pencemar (komponen organik) menjadi zat yang tidak berbahaya [2]. Nilai DO yang besar dalam air mengindikasikan air tersebut memiliki kualitas yang bagus. Pengukuran DO bertujuan untuk melihat badan air mampu menampung biota air (ikan dan mikroorganisme). Berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 mengenai standar baku mutu air menetapkan untuk air yang diklasifikasikan dalam kategori mutu kelas 1 kandungan DO harus dijaga pada level minimum 6 mg/L. Peningkatan konsentrasi timbal mempengaruhi kadar DO media tanaman. Kadar DO yang lebih tinggi menunjukkan kondisi perairan yang lebih baik karena oksigen yang cukup sangat penting untuk proses metabolisme tanaman frogbit termasuk respirasi dan fotosintesis, namun pada penelitian tersebut DO tertinggi terdapat pada konsentrasi tertinggi. Hal ini dikarenakan mikroorganisme berperan dalam mensuplai oksigen dalam media tanaman. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Siregar (2020) menyatakan isolasi bakteri pada tanaman sagu berpotensi menyumbang unsur hara tanaman dengan didapatkan sebagian besar isolat bakteri tidak bersifat patogen. Isolat bakteri menunjukkan kemampuan sebagai pelarut fosfat dan menunjukkan daya hambat tinggi terhadap *Fusarium* sp sebesar 40% [44]. Penelitian lain menyatakan meningkatnya aktivitas mikroorganisme dalam limbah mendorong peningkatan DO sehingga konversi logam berat kromium (VI) yang bersifat toksik menjadi kromium (III). Aktivitas yang tinggi dari bakteri *Arthrobacter*

*chlorophenolicus* mampu menghasilkan bioelektrisitas sebagai sumber reaksi elektrokimia dalam reduksi kromium [42].

## 2. pH

Hasil penelitian menunjukkan bahwa korelasi kadar pH yang terikat di dalam media tanaman *Hydrocharis* sp. dengan luas permukaan daun dan bobot tanaman berpengaruh negatif sehingga luas permukaan daun maupun bobot tanaman tidak menunjukkan perkembangan tanaman gambar 8. pH pada gambar tersebut juga tidak mempengaruhi perubahan suhu maupun DO. Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa pemaparan timbal tidak memberikan pengaruh sangat nyata ( $p > 0,05$ ) terhadap pH. Hal ini disebabkan karena pH bukanlah variabel terikat yang dipaparkan melainkan variabel kontrol yang diperlakukan dan memiliki perlakuan sama dalam penelitian. Nilai pH dipaparkan pada tabel 5. Berdasarkan tabel tersebut kandungan pH tertinggi dengan pemaparan 4,43 ppm untuk perlakuan P4, sedangkan pH terendah terdapat pada pemaparan timbal 0 ppm untuk P1. Kadar pH merupakan parameter yang mempengaruhi ketersediaan unsur hara serta aktivitas biologis tanaman serta mikroorganisme. Secara ilmiah, pH didefinisikan sebagai logaritma negatif dari aktivitas ion hidrogen yang terlarut dalam larutan tersebut. Nilai pH mencerminkan konsentrasi ion hidrogen dan menjadi indikator penting dalam proses kimia maupun biologis [48].

Pada umumnya frogbit dapat tumbuh air dengan pH yang netral hingga sedikit asam, yakni 6,5-7,5 [1]. Nilai rerata pH pada penelitian tersebut menunjukkan semua perlakuan berada dalam kisaran yang relatif stabil. Nilai pH yang cenderung netral mengindikasikan kondisi media cukup ideal bagi pertumbuhan tanaman frogbit karena ketersediaan unsur hara berada pada tingkat optimal. Nilai pH yang rendah (asam) mengakibatkan akumulasi logam berat semakin tinggi [50]. Sedangkan nilai pH yang tinggi (basa) mampu menurunkan kelarutan logam dalam air karena pH akan mengalami deposisi sukar larut dalam air karena berbentuk partikel tersuspensi akibat ikatan langsung dengan partikel air [7]. Kondisi pH netral pada penelitian tersebut dapat dikaitkan dengan penyerapan logam berat yang optimal dan kemampuan tanaman akuatik mempertahankan kestabilan kimia lingkungan perairan melalui mekanisme fisiologis, seperti penyerapan ion serta pelepasan senyawa metabolik yang bersifat penyeimbang. Selain itu, frogbit yang berakar menggantung dalam air mampu menstabilkan pH melalui aktivitas respirasi dan fotosintesis yang terjadi sepanjang hari [31]. Hal tersebut menunjukkan bahwa dalam jangka waktu penelitian, timbal dengan berbagai variasi konsentrasi yang dipaparkan tidak mempengaruhi keseimbangan ionik dalam media secara signifikan.

## 3. Suhu

Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu yang terdapat dalam media tanaman *Hydrocharis* sp. memiliki hubungan yang berbeda terhadap dua parameter pertumbuhan tanaman. Korelasi suhu dengan luas permukaan daun bersifat negatif yang mengindikasikan peningkatan suhu tidak berpengaruh secara langsung dengan perluasan daun pada gambar 8. Sedangkan korelasi antara suhu dengan bobot tanaman menunjukkan hubungan positif dimana semakin tinggi suhu dapat mempengaruhi peningkatan bobot tanaman. Hal ini menunjukkan bahwa suhu berperan penting dalam metabolisme tanaman yang berkontribusi pertambahan biomassa. Hubungan ini terlihat dalam gambar 12 yang menunjukkan suhu cenderung searah dengan vektor bobot tanaman dan berlawanan arah dengan vektor luas permukaan daun. Hasil analisis ragam pada menunjukkan bahwa pemaparan timbal tidak memberikan pengaruh sangat nyata

( $p > 0,05$ ) terhadap suhu. Hal ini disebabkan karena suhu bukanlah variabel terikat yang dipaparkan melainkan variabel kontrol yang diperlakukan dan memiliki perlakuan sama dalam penelitian. Berdasarkan tabel 5 kandungan suhu tertinggi dengan pemaparan 0 dan 0,43 ppm untuk perlakuan P1 dan P2, sedangkan suhu terendah terdapat pada pemaparan timbal 4,43 ppm untuk P4. Hal tersebut menunjukkan paparan timbal dalam konsentrasi tinggi mampu menurunkan media akibat terganggunya penyerapan energi oleh *Hydrocharis* sp. Suhu merupakan faktor lingkungan yang sangat penting dalam proses fotosintesis. menurut Damanik (2018) peningkatan suhu umumnya akan meningkatkan produksi energi yang dibutuhkan tanaman untuk tumbuh [5]. Pada tanaman air seperti *Hydrocharis* sp. suhu mempengaruhi efektivitas tanaman dalam menyerap logam berat seperti timbal. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Waykar dkk (2012) yang menyatakan bahwa peningkatan suhu perairan dapat meningkatkan akumulasi timbal oleh tanaman karena suhu tinggi membantu reduksi timbal oleh jaringan tanaman [56]. Namun apabila suhu terlalu tinggi mengakibatkan denaturasi enzim dan gangguan penyerapan nutrisi. Sebaliknya, suhu yang terlalu rendah dapat memperlambat atau menghambat pertumbuhan akibat terganggunya aktivitas enzimatik tanaman [26]. Data pada tabel 5 menunjukkan perlakuan 4,43 ppm memiliki suhu yang paling rendah. Hal ini sejalan dengan pengamatan morfologis luas permukaan daun dimana daun *Hydrocharis* sp. memiliki bercak putih yang menutupi kutikula. Bercak tersebut mengganggu penyerapan sinar matahari sehingga menghambat proses fotosintesis. Meskipun demikian, jika dibandingkan dengan baku mutu lingkungan berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 yang menyebutkan kisaran suhu perairan normal antara 27 - 30°C, maka suhu dalam penelitian ini masih berada dalam ambang batas yang dapat ditoleransi [40].

## Kesimpulan

1. Tanaman *Hydrocharis* sp. memiliki potensi dalam menyerap logam berat timbal (Pb) pada konsentrasi tertentu. Penyerapan terbaik terjadi pada konsentrasi rendah (0,433 ppm), yang menunjukkan bahwa tanaman ini mampu berperan sebagai agen fitoremediasi secara alami di perairan yang tercemar ringan.
2. Efektivitas *hydrocharis* sp. dalam proses remediasi logam berat timbal terlihat dari adanya peningkatan bobot tanaman setelah pemaparan. Peningkatan bobot tersebut mengindikasikan proses pertumbuhan yang baik selama penyerapan timbal berlangsung. Namun, luas permukaan daun tidak menunjukkan perubahan yang berarti, sehingga parameter ini tidak dapat dijadikan ukuran utama dalam menilai keberhasilan remediasi oleh tanaman *Hydrocharis* sp.
3. Faktor abiotik dalam media tanaman turut mempengaruhi efektivitas remediasi. Suhu berperan positif dalam mendukung pertumbuhan bobot tanaman, sementara pH dan kadar oksigen terlarut (DO) menunjukkan pengaruh negatif terhadap pertumbuhan tanaman jika berada di luar batas normal. Hal ini menegaskan bahwa keberhasilan fitoremediasi tidak hanya bergantung pada kemampuan tanaman, tetapi juga pada kondisi lingkungan yang mendukung.

## Ucapan Terima Kasih

Ucapan Terima Kasih disampaikan kepada contributor dalam penelitian ini sehingga penelitian dapat diselesaikan dengan baik dan dengan hasil yang baik.

## Daftar Pustaka

- [1] Arkianti, N., Dewi, K. N., & Martuti, T. K. (2019). Kandungan logam berat timbal (Pb) pada ikan di Sungai Lamat, Kabupaten Magelang. *Life Science Journal*, 8(1), 54–63. Retrieved from <https://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/LifeSci>
- [2] Aruan, R. G. (2017). Penentu kadar *dissolved oxygen* (DO) pada air Sungai Sidorasi di daerah Butar, Kecamatan Pagaran, Kabupaten Tapanuli Utara. *Jurnal Analisis Laboratorium Medik*, 2. Retrieved from <https://e-journal.sari-mutiara.ac.id/index.php/ALM>
- [3] Azaman, A., Juahir, H., Yunus, K., Azida, A., Kamarudin, M. A., & Toriman, M. E. (2015). Heavy metal in fish: Analysis and human health – A review. *Jurnal Teknologi*, 77(1), 61–69. <https://doi.org/10.11113/jt.v77.4182>
- [4] Aznur, S. B., Nisa, K. S., & Septiono, A. W. (2022). Agen biologis potensial untuk bioremediasi logam berat. *Jurnal Maiyah*, 1(4), 186–198. <https://doi.org/10.20884/1.maiyah.2022.1.4.7442>
- [5] Damanik, M. O. (2018). *Phytotreatment limbah cair tempe dengan menggunakan Cyperus rotundus L. dan Scirpus grossus* (Tugas akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya).
- [6] Effendi, H., & Hefni. (2003). *Telaah kualitas air bagi pengelolaan sumber daya lingkungan perairan*. Yogyakarta: PT Kanisius.
- [7] Emilia, I., Suheryanto, & Hanafiah, Z. (2013). Distribusi logam kadmium dalam air dan sedimen di Sungai Musi, Kota Palembang. *Jurnal Penelitian Sains*, 16(2). <https://doi.org/10.36706/jps.v16i2.73>
- [8] Engwa, G. A., Ferdinand, P. U., Nwalo, F. N., & Unachukwu, M. N. (2019). Mechanism and health effects of heavy metal toxicity in humans. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.82511>
- [9] Galczynska, M., Gamrat, R., & Ciemniak, A. (2023). An analysis of the reaction of frogbit (*Hydrocharis morsus-ranae* L.) to cadmium contamination with a view to its use in the phytoremediation of water bodies. *Applied Sciences*, 13(2), 1197. <https://doi.org/10.3390/app13021197>
- [10] Georgieva, M., & Vassileva, V. (2023). Stress management in plants: Examining provisional and unique dose-dependent responses. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(6), 5105. <https://doi.org/10.3390/ijms24065105>
- [11] Greene, & Deni. (1993). *Effects of lead on the environment* (Vol. 1). *Lead Action News*.
- [12] Hafsan. (2022). *Prospek dan perkembangan bioteknologi mikroba*. Depok: PT Rajagrafindo Persada.

- [13] Hardiyanti, Y. M. (2017). *Akumulasi logam berat timbal (Pb) dan pengaruhnya pada daun Glodokan Tiang (Polyalthia longifolia) di Jalan A. P. Pettrani Kota Makassar* (Skripsi, Universitas Hasanuddin, Makassar).
- [14] Haryanti, S., Setiari, N., Hastuti, B. R., Hastuti, E. D., & Nurchayati, Y. (2009). Respon fisiologi dan anatomi eceng gondok (*Eichornia crassipes* (Mart.) Solm) di berbagai perairan tercemar. *Jurnal Penelitian Sains dan Teknologi*, 10(1), 30–40.
- [15] Hawrot-Paw, M., Koniuszy, A., Galczyńska, M., Zajac, G., & Szażlak-Bargłowicz, J. (2020). Production of microalgal biomass using aquaculture wastewater as growth medium. *Water*, 12(1), 106. <https://doi.org/10.3390/w12010106>
- [16] Hayat, K., Khan, A., Bibi, F., Salahuddin, Murad, W., Fu, Y., ... Al-Harrasi, A. (2021). Effect of cadmium and copper exposure on growth, physiochemicals and medical properties of *Cajanus cajan* L. (pigeon pea). *Metabolites*, 11(11), 769. <https://doi.org/10.3390/metabo11110769>
- [17] Inayah, S. N. (2010). *Studi kandungan Pb dan kadar debu pada daun angkana (Pterocarpus indicus) dan rumput gajah mini (Axonopus sp.) di pusat kota Tangerang* (Skripsi, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta, Tangerang).
- [18] Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang penyelenggaraan perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup*.
- [19] Irhamni, I., Pandia, S., Purba, E., & Hasan, W. (2017). Kajian akumulator beberapa tumbuhan air dalam menyerap logam berat secara fitoremediasi. *Jurnal Serambi Engineering*, 1(2), 75–84.
- [20] Kabuhung, A., Sembel, D., & Rumengan, I. F. (2013). Kadar logam berat (Pb, Cd, Hg, dan As) pada sumber dan air minum isi ulang (AMIU) di Kota Manado. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Pangan*, 1(1), 30–40.
- [21] Kumar, B., Smita, K., & Flores, L. C. (2017). Plant mediated detoxification of mercury and lead. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, 2335–2342. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.08.010>
- [22] Kusumastuty, D. A. (2018). *Analisis perubahan morfologi dan kadar klorofil pada tanaman kersen (Muntingia calabura L.) di area pertambangan minyak bumi Wonocolo, Kabupaten Bojonegoro* (Skripsi, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya).
- [23] Koryati, T., Purba, D. W., Surjaningsih, D. R., Herawati, J., Sagala, D., Purba, S. R., ... Fitra, R. A. (2021). *Fisiologi tumbuhan* (R. Watrianthos, Ed.). Medan: Yayasan Kita Menulis.
- [24] Lane, S. D., & Martin, E. S. (1977). A histochemical investigation of lead uptake in *Raphanus sativus*. *New Phytologist*, 79(2), 281–286. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1977.tb02206.x>

- [25] Lestari, Y. P., Aminatun, & Tien. (2018). Efektivitas variasi biomassa tanaman *Hydrilla verticillata* dalam fitoremediasi limbah batik. *Jurnal Prodi Biologi*, 7(4).
- [26] Mahardika, P. (2018). *Fito-pengolahan limbah greywater menggunakan Typha angustifolia dan Scirpus grossus dengan mengadaptasi teknik pitcher irrigation system* (Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya).
- [27] Mahyatun, W. O. (2014). *Fitoremediasi logam Cd menggunakan kombinasi eceng gondok dan kayu apu aliran kontinyu* (Skripsi, Universitas Hasanuddin, Makassar).
- [28] Mardani, S. N., Restu, W. I., & Sari, W. A. (2018). Kandungan logam berat timbal (Pb) dan kadmium (Cd) pada badan air dan ikan di perairan Teluk Benoa, Bali. *Current Trends in Aquatic Science*, 1(1), 106–113.
- [29] Mangkoedihardjo, S., & Samudro, G. (2010). *Ekotoksikologi teknosfer*. Surabaya: Guna Widya.
- [30] Mathius, N. G., Wijayana, E., Guharja, H., Aswindinnoor, Y., Sudirman, & Subroto. (2001). *Tanaman kelapa sawit (Elaeis guineensis Jacq.) terhadap cekaman kekeringan* (Vol. 69). Menara Perkebunan.
- [31] Maulana, R. M. (2023). *Efektivitas beberapa jenis macrophyta sebagai fitoremediator air irigasi tercemar di sekitar TPA Taman Krocok Bondowoso* (Skripsi, Universitas Jember, Bondowoso).
- [32] Muchtar, R. (1993). *Pengaruh timbal dan cadmium pada pertumbuhan eceng gondok*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- [33] Mohammad, & Erni. (2011). *Fitoremediasi logam berat kadmium (Cd) pada tanah dengan menggunakan bayam dari duri (Amaranthus spinosus)*. Universitas Negeri Gorontalo.
- [34] Nuraini, & Devi, S. (2001). *Pencemaran udara oleh timbal (Pb) serta penanggulangannya*. Medan: Universitas Sumatra Utara.
- [35] Novita, Y., & Purnomo, T. (2012). Penyerapan logam timbal (Pb) dan kadar klorofil *Elodea canadensis* pada limbah cair pabrik pulp dan kertas. *Jurnal Lentera Bio*, 1(1), 1–8.
- [36] Probosari, R. M., Ramli, M., Harlita, M., & Indrowati, M. (2016). Profil keterampilan argumentasi ilmiah mahasiswa Pendidikan Biologi FKIP UNS pada mata kuliah Anatomi Tumbuhan. *Bioedukasi Journal*, 9(1), 29–33.
- [37] Puspita, U. R., Siregar, S. A., & Hidayanti, V. N. (2011). Kemampuan tumbuhan air sebagai agen fitoremediator logam berat kromium (Cr) yang terdapat pada limbah cair industri batik. *Jurnal Penelitian Berkala Perikanan Terubuk*, 39(1).

- [38] Putri, Y. R., Siregar, K., & Devianti. (2020, Februari). Pertumbuhan tanaman stroberi (*Fragaria* sp.) secara hidroponik di dataran rendah pada berbagai nilai EC (electrical conductivity). *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*, 5(1), 482–490. Retrieved from <http://www.jim.unsyiah.ac.id/JFP>
- [39] Rahimzadeh, M. R., Kazemi, S., & Moghadamnia, A. A. (n.d.). Cadmium toxicity and treatment: An update. *Caspian Journal of Internal Medicine*, 8(3), 135–145. <https://doi.org/10.22088/cjim.8.3.135>
- [40] Rosyidah, F. N. (2023). *Salvinia molesta* sebagai agen fitoremediasi logam berat zink (Zn) di perairan. *Lentera Bio*, 12(3), 430–438.
- [41] Salisbury, F. B., & Ross, C. W. (1995). *Fisiologi tumbuhan* (Vol. 3). Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- [42] Shi, L., Li, R., Bu, Y., Wei, Y., Cai, W., Huang, Z., & Ma, B. (2023). Hybrid granule-floc sludge distribution and its potential for upgrading a tropical continuous-flow wastewater treatment plant. *Journal of Water Process Engineering*, 55, 104178. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104178>
- [43] Sila, N., Azizah, R., & Birawida, B. A. (2024). Fitoremediasi sebagai solusi efektif menurunkan kadar Biological Oxygen Demand (BOD) pada air limbah domestik: *Scoping review* (2018–2023). In *Proceedings of The Conference on Social, Science, Technology, Language, and Education Research* (pp. 1–9). Jakarta: Universitas Negeri Jakarta.
- [44] Siregar, A. B. (2020). Isolasi karakterisasi biologi bakteri endofit, filosfer, dan rizosfer dari tanaman sagu (*Metroxylon sagu*). In *Prosiding Seminar Nasional Biotik 2020* (pp. 335–340). Palopo.
- [45] Siswoyo, E. (2006). Fitoremediasi logam berat khrom (Cr) menggunakan tanaman air kiapu (*Pistia stratiotes*). *Jurnal Jurusan Teknik Lingkungan*, 8.
- [46] Sofiana, J. M., Fitri, I., Helena, S., & Warsidah. (2021). Analisis proksimat, mineral esensial, dan cemaran logam berat pada teripang (*Acaudina molpadioides*) dari perairan Paloh, Kalimantan Barat. *Journal of Fisheries and Marine Research*, 5(3), 634–638.
- [47] Solichatun, Anggarwulan, E., & Mudyantini, W. (2005). Pengaruh ketersediaan air terhadap pertumbuhan dan kandungan bahan aktif saponin tanaman ginseng jawa (*Talinum paniculatum* Gaertn.). *Jurnal Biofarmasi*, 3(2), 47–51.
- [48] Sonia, V. A. (2022). Aktivitas bakteri pelarut fosfat terhadap peningkatan ketersediaan fosfat pada tanah masam. *Jurnal Agroekoteknologi*.
- [49] Stefanov, K., Seizova, K., & Popova, K. (1995). Effects of lead ions on the phospholipid composition in leaves of *Zea mays* and *Phaseolus vulgaris*. *Journal of Plant Physiology*, 147(2), 243–246.

- [50] Sukoasih, A. T., Widiyanti, & Suparmin. (2017). Hubungan antara suhu, pH, dan berbagai variasi jarak dengan kadar timbal (Pb) pada badan air Sungai Rompang dan air sumur gali industri batik Sokaraja Tengah tahun 2016. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 36(4), 360–368.
- [51] Syahputra, Y. (2005). *Pertumbuhan dan kandungan keraginan budaya rumput laut Eucheuma pada kondisi lingkungan yang berbeda dan perlakuan jarak tanam di Teluk Lhok Seudu* (Skripsi, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh).
- [52] Ulfah, M., Rachmadiarti, F., & Rahayu, Y. S. (2017). Pengaruh timbal (Pb) terhadap kandungan klorofil kiambang (*Salvinia molesta*). *Jurnal Lentera Bio*, 6(2).
- [53] Ulumudin, M. M., & Purnomo, T. (2022). Analisis kandungan logam berat timbal (Pb) pada tumbuhan papirus (*Cyperus papyrus* L.) di Sungai Wangi Pasuruan. *Jurnal Lentera Bio*, 11(2), 273–283.
- [54] Utami, B. L. (2024). Fitoremediasi air limbah laundry menggunakan eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) untuk meningkatkan kualitas air. In *Proceeding Biology Education Conference* (pp. 20–25). Universitas Ahmad Dahlan.
- [55] Vodnik, D., Jentschke, G., & Fritz, E. (1999). Root-applied cytokinin reduces lead uptake and affects its distribution in Norway spruce seedlings. *Physiologia Plantarum*, 105(1), 75–80.
- [56] Waykar, B., & Deshmukh, G. (2012). Evaluation of bivalves as bioindicators of metal pollution in freshwater. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 88, 48–53.
- [57] Widiasari, N. L., Rai, I., Dharma, I. G. B. S., & Mahendra, M. S. (2023). Analisis kandungan logam berat Pb, Cu, Cd, Cr pada tanaman padi dan jagung yang sistem pengairannya berasal dari Sungai Badung. *ECOTROPHIC: Jurnal Ilmu Lingkungan*, 17(2), 165–174. <https://doi.org/10.24843/EJES.2023.v17.i02.p01>
- [58] Yuliani, M., Tengku, S. R., & Zulfikar, A. (2013). Efektivitas dan efisiensi fitoremediasi orthofosfat pada detergen dengan menggunakan eceng gondok (*Eichhornia crassipes*). *Journal of Marine Science and Fisheries Maritim*, 1, 1–6.