

# Efektivitas Kombinasi *Lemna minor* dan Eco-enzyme dalam Menurunkan Kromium Heksavalen dalam Air

Yosephine Dita Apriliana, Sri Kasmiyati\*, dan Vincencia Irene Meitiniarti

Fakultas Biologi, Universitas Kristen Satya Wacana, Kota Salatiga, Indonesia; e-mail: [kas@uksw.edu](mailto:kas@uksw.edu)

## ABSTRAK

Kromium heksavalen dihasilkan dari erosi batuan mineral, air limbah industry, pertanian, dan pertambangan yang mengancam keberlanjutan ekosistem perairan. *Lemna minor* berpotensi sebagai agen fitoremediasi Cr<sup>6+</sup> di lingkungan air. Penelitian terdahulu menjelaskan bahwa *Lemna minor* dapat menyerap polutan namun mengalami toksisitas akut. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kontribusi kombinasi kerapatan tanaman *Lemna minor* (15%; 20% dan 25%) dan dosis eco-enzyme 0, 1, dan 2 mL/L dalam Upaya memitigasi toksisitas sekaligus meningkatkan efisiensi penurunan Cr<sup>6+</sup> di air. Penelitian ini dilakukan menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dua faktor. Parameter dalam penelitian ini adalah berat segar dan kering tanaman, kadar klorofil total tanaman, serta kadar Cr<sup>6+</sup> dalam air dan tanaman menggunakan metode spektrofotometri. Analisis data dilakukan dengan Uji Two Way ANNOVA dilanjutkan dengan Uji Tukey. Hasil uji *Two-Way* ANOVA menunjukkan interaksi kedua faktor berpengaruh signifikan ( $p < 0.05$ ) dengan ukuran efek tinggi. Kombinasi kerapatan *Lemna minor* 25% dan eco-enzyme 2 mL/L menghasilkan performa pemulihan lingkungan terbaik, dengan efisiensi penurunan Cr<sup>6+</sup> di air mencapai 69% dan akumulasi pada jaringan tanaman sebesar 5,73 ppm. Meskipun akumulasi logam berat tersebut memicu klorosis dan penurunan kadar klorofil total pada tanaman, intervensi eco-enzyme terbukti secara efektif meningkatkan kapasitas serap tanaman. Penelitian ini menyimpulkan bahwa sinergi *Lemna minor* dan eco-enzyme memiliki implikasi strategis sebagai teknologi bioremediasi yang murah, ramah lingkungan, dan aplikatif untuk memulihkan perairan tercemar serta mengoptimalkan sistem pengolahan limbah sekunder.

**Kata kunci:** Eco-enzyme, Fitoremediasi, Kromium heksavalen, *Lemna minor*

## ABSTRACT

Hexavalent chromium (Cr<sup>6+</sup>) is a persistent, toxic pollutant derived from mineral rock erosion, industrial wastewater, agriculture, and mining that threatens the sustainability of aquatic ecosystems. *Lemna minor* has strong potential as a phytoremediation agent for Cr<sup>6+</sup>; however, previous studies indicate that its pollutant absorption is often hindered by acute toxicity. This study aims to evaluate the contribution of combining *Lemna minor* plant density (15%, 20%, and 25%) and *eco-enzyme* dosages (0, 1, and 2 mL/L) to mitigate toxicity while enhancing Cr<sup>6+</sup> reduction efficiency in water. This experimental research was conducted using a two-factor Completely Randomized Design (CRD). The parameters evaluated included plant fresh and dry weight, total chlorophyll content, and Cr<sup>6+</sup> concentrations in both water and plant tissues, measured via spectrophotometry. Data were analyzed using a *Two-Way* ANOVA followed by Tukey's test. The *Two-Way* ANOVA results indicated a significant interaction between the two factors ( $p < 0.05$ ) with a large effect size. The combination of 25% *Lemna minor* density and 2 mL/L *eco-enzyme* yielded the best environmental recovery performance, achieving a 69% reduction efficiency of Cr<sup>6+</sup> in water and a plant tissue accumulation of 5.73 ppm. Although heavy metal accumulation triggered chlorosis and a decrease in total chlorophyll content, the *eco-enzyme* intervention effectively enhanced the plant's absorption capacity. This study concludes that the synergy between *Lemna minor* and *eco-enzyme* holds strategic implications as a low-cost, eco-friendly, and applicable bioremediation technology for restoring contaminated waters and optimizing secondary wastewater treatment systems.

**Keywords:** Eco-enzyme, Hexavalent chromium, *Lemna minor*, Phytoremediation

**Citation:** Apriliana, Y. D., Kasmiyati, S., dan Meitiniarti, V. I. (2026). Efektivitas Kerapatan *Lemna minor* dan Eco-enzyme dalam Menurunkan Kromium Heksavalen dalam Air. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(1), 211-221, doi:10.14710/jil.24.1.211-221

## 1. PENDAHULUAN

Salah satu logam berat pencemar air adalah kromium heksavalen yang bersumber dari air limbah industry, pertanian, perikanan, dan juga pertambangan (Vitasari *et al.* 2020). Lestari dan

Samsunar (2021) melaporkan adanya kandungan Cr<sup>6+</sup> 0,112 mg/L dalam air limbah industry tekstil. Fidiastuti dan Lathifah (2018) melaporkan adanya kandungan Cr<sup>6+</sup> sebesar 2,62 mg/L dalam air limbah batik X di Tulungagung. Zarkasi *et al.* (2018) juga

melaporkan adanya  $\text{Cr}^{6+}$  sebesar 29,6-38,2 mg/L dalam air limbah batik X di Kabupaten Jember.

Berdasarkan PP No. 82 tahun 2001 dan Kemenkes No. 907/MENKES/SK/VII/2002, batas maksimal  $\text{Cr}^{6+}$  air minum dan perikanan sebesar 0,05 mg/L (Mursidi 2015 dan Vitasari *et al.* 2020). Wulaningtyas (2018) melaporkan adanya kandungan  $\text{Cr}^{6+}$  dalam urine pekerja pabrik kerupuk rambak X di Magetan. Selain itu pengujian juga dilakukan pada kelompok mencit dengan memberikan paparan  $\text{Cr}^{6+}$ . Setelah pemberian paparan, diperoleh hasil adanya penurunan konsentrasi GSH dan aktivitas GPx hati dan ginjal mencit (Kotyzova *et al.* 2013), yang menyebabkan terjadi penumpukan radikal bebas di kedua organ tersebut. Bhakti *et al.* (2016), menemukan  $\text{Cr}^{6+}$  sebesar 1,920  $\mu\text{g/L}$  dan 1,840  $\mu\text{g/L}$  dalam urine 2 pekerja pabrik yang menyebabkan gangguan faal paru-paru berupa sesak nafas dan nafas berbunyi. Menurut Wulaningtyas (2018); Kotyzova *et al.* (2013); dan Bhakti *et al.* (2016),  $\text{Cr}^{6+}$  memberikan efek buruk terhadap kesehatan, sehingga perlu upaya mengurangi kadar  $\text{Cr}^{6+}$  di lingkungan, terutama di perairan. Pengolahan limbah cair sebelum dibuang dan bioremediasi lingkungan sudah tercemar adalah dua langkah yang dapat dilakukan untuk mengurangi paparan kromium heksavalen. Salah satu bioremediasi yang ramah lingkungan adalah fitoremediasi.

Fitoremediasi merupakan metode remediasi lingkungan tercemar menggunakan tanaman sebagai akumulator atau pengurai polutan. *L. minor* (Mata Lele) dapat menjadi akumulator polutan di lingkungan air karena dapat menyerap dan menyimpan polutan dalam sel tanaman di bagian tajuk dan akar (Hutabarat *et al.* 2022). Menurut Fitriana dan Kuntjoro (2020) tanaman *L. minor* dapat menurunkan kadar LAS Deterjen dalam air. Tanaman *Lemna minor* mampu menyerap LAS Deterjen sebanyak 5,05 ppm dalam waktu 10 hari. Menurut Harahap *et al.* (2022) menyatakan bahwa dengan penggunaan tanaman *L. minor* sebagai fitoremediator menunjukkan hasil yang signifikan terhadap penurunan kadar Cd dan COD pada air lindi TPA. Menurut Hutabarat *et al.* (2022) penggunaan 15 gram *L. minor* menunjukkan hasil penurunan kadar logam Pb paling tinggi yaitu dari yang semula 1,5 mg/L menjadi 0,09 mg/L dalam waktu 5 hari.

Selain tanaman, eco-enzyme juga diketahui dapat menurunkan kadar logam berat pada perairan. Menurut Sondang *et al.* (2023), pemberian eco-enzyme 10% dalam air lindi TPA dapat menurunkan kadar logam berat Arsen dan Cadmium dengan efisiensi berturut-turut sebesar 59% dan 67%. Toksisitas dari logam berat menurun karena eco-enzyme mengikat dan mengendapkan logam berat dalam bentuk senyawa kompleks lain yang lebih kecil toksisitasnya. Menurut Widyastuti *et al.* (2023), perlakuan eco-enzyme 10% memberikan efisiensi tertinggi dalam penurunan COD, BOD, dan TSS dalam air limbah tahu.

Pada penelitian sebelumnya, aplikasi *L. minor* untuk fitoremediasi dilakukan secara Tunggal tanpa kombinasi agen pendukung. Namun, Harahap *et al.* (2022) menemukan bahwa *L. minor* yang digunakan dalam penyerapan logam berat Cadmium di air mengalami klorosis akut, daun mengecil, hingga kematian tanaman akibat toksisitas logam tanpa adanya tambahan nutrisi esensial. Di sisi lain, meskipun pemberian probiotik atau mikroorganisme terbukti membantu *L. minor* menguraikan polutan seperti ammonia (Nurrasyida *et al.* 2024), pemanfaatan eco-enzyme sebagai intervensi hibrida bersama tanaman air belum banyak dieksplorasi. Kesenjangan ini menjadi landasan rumusan masalah dalam penelitian ini, yaitu bagaimana mengoptimalkan kerjasama antara *L. minor* dan eco-enzyme untuk mengatasi polusi logam berat  $\text{Cr}^{6+}$  sekaligus memitigasi Risiko kematian tanaman. Penelitian ini berhipotesis bahwa intervensi eco-enzyme tidak hanya membantu mendegradasi polutan di dalam air, namun juga bertindak sebagai *booster* yang mendorong kapasitas akumulasi logam berat  $\text{Cr}^{6+}$  pada *L. minor* sebelum mencapai ambang batas toksisitasnya. Oleh karena itu penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah baru dengan pendekatan remediasi hibrida yang murah dan aplikatif. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh kombinasi terbaik antara kerapatan tanaman *L. minor* dan dosis eco-enzyme dalam memaksimalkan efisiensi penurunan kadar  $\text{Cr}^{6+}$  di dalam air serta mengevaluasi respons fisiologis tanaman berdasarkan berat segar, berat kering, dan kadar klorofil total tanaman setelah perlakuan.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian yaitu neraca analitik, cawan petri, labu takar 25; 50; dan 1000 mL, pipet ukur 10 mL dan pilus, pipet mikro, pipet tetes, tabung reaksi, vortex, spektrofotometer UV-VIS merk Shimadzu, bak uji dengan luas permukaan sebesar 272,2  $\text{cm}^2$ , botol film, mortar, kertas saring, corong, *furnance*, *hotplate*, dan botol vial sampel.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah air limbah buatan yang mengandung kromium heksavalen 5 ppm, air PDAM, larutan induk kromium heksavalen 500 ppm, diphenylcarbazine, aseton, aquades,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , eco-enzyme komersial berbahan dasar kulit buah jeruk: molase: air dengan perbandingan 3:1:10 (shoppee), *L. minor* usia 3 minggu dari KPTT Salatiga,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , dan alcohol 95%.

### 2.2. Metode

Penelitian dilakukan di Laboratorium Fakultas Biologi, Universitas Kristen Satya Wacana, Salatiga pada bulan September sampai November 2024. Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental skala laboratorium dengan Rancangan Acak Lengkap (RAL) menggunakan 2 faktor, yaitu kerapatan tanaman *L. minor* (per luas permukaan bak uji dengan

berat segar tanaman sebesar 0,25 gram/cm<sup>2</sup>) dan dosis eco-enzyme. Faktor kerapatan *L. minor* diberikan dalam tiga taraf, yaitu 15, 20, dan 25%. Faktor dosis eco-enzyme diberikan dalam tiga taraf, yaitu 0, 1, dan 2 mL per 1000 mL limbah buatan. Konsentrasi kromium heksavalen yang diberikan dalam penelitian ini adalah sebesar 5 ppm, sesuai konsentrasi yang umum dijumpai di air limbah seperti pada penelitian Fidiastuti dan Lathifah (2018) melaporkan adanya kandungan Cr<sup>6+</sup> sebesar 2,62 mg/L dalam air limbah batik X di Tulungagung. Besar kadar Cr<sup>6+</sup> juga disesuaikan dengan batas maksimal logam berat yang dapat ditoleransi oleh tanaman *L. minor* dalam media tumbuh. Hal ini didukung oleh penelitian dari Saffarida *et al.* (2015) yang menunjukkan bahwa batas toleransi kadar logam berat Cr<sup>6+</sup> dalam media tumbuh tanaman *L. minor* berkisar pada 1-8 ppm. Semakin besar kadar logam berat yang diberikan menunjukkan penurunan laju pertumbuhan biomassa tanaman secara signifikan. Pemilihan dosis eco-enzyme sebanyak 2 mL didasarkan pada kemampuan tanaman untuk beradaptasi pada keberadaan eco-enzyme dalam media tumbuh. Berdasarkan penelitian dari Fadillah *et al.* (2024) menunjukkan dengan pemberian dosis eco-enzyme sebanyak 1,75 mL/liter mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman seledri. Pemberian eco-enzyme di atas 1,75 mL justru menghambat pertumbuhan tanaman. Pemberian eco-enzyme pada dosis 5 mL – 9 mL menurunkan pH cukup drastis di air dan mengganggu keseimbangan parameter air (Yama *et al.* 2024). Setiap perlakuan diulang 5 kali. Secara lebih rinci, perlakuan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1.

**Table 1.** Kombinasi Perlakuan dalam Pengujian Bioremediasi Cr<sup>6+</sup> dengan 2 Faktor

Kerapatan <i>L. minor</i> (L)	Eco-enzyme (E)		
	E <sub>0</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>
L <sub>15</sub>	L <sub>15</sub> E <sub>0</sub>	L <sub>15</sub> E <sub>1</sub>	L <sub>15</sub> E <sub>2</sub>
L <sub>20</sub>	L <sub>20</sub> E <sub>0</sub>	L <sub>20</sub> E <sub>1</sub>	L <sub>20</sub> E <sub>2</sub>
L <sub>25</sub>	L <sub>25</sub> E <sub>0</sub>	L <sub>25</sub> E <sub>1</sub>	L <sub>25</sub> E <sub>2</sub>

Keterangan:

L : Kerapatan *Lemna minor* (persentase penutupan luas permukaan)

L<sub>15</sub> : Kerapatan *Lemna minor* 15%

L<sub>20</sub> : Kerapatan *Lemna minor* 20%

L<sub>25</sub> : Kerapatan *Lemna minor* 25%

E : Volume eco-enzyme yang ditambahkan per liter air

E<sub>0</sub> : tanpa penambahan eco-enzyme (0 mL)

E<sub>1</sub> : penambahan eco-enzyme 1 mL

E<sub>2</sub> : penambahan eco-enzyme 2 mL

### 2.3. Aklimatisasi Tanaman Uji

Aklimatisasi tanaman uji dilakukan selama 8 hari dalam air PDAM tanpa tambahan nutrisi sebanyak 10 Liter pada bak ukuran 35 x 32 x 13 cm. Pergantian air dilakukan sebanyak 25% dari air total setiap 3 hari sekali. Bak aklimatisasi diletakkan di tempat yang terpapar sinar matahari cukup.

### 2.4. Uji bioremediasi Cr<sup>6+</sup> Menggunakan Tanaman *Lemna minor*

Disiapkan 45 wadah uji bioremediasi dan diisi dengan air PDAM yang mengandung 5 ppm Cr<sup>6+</sup> dengan volume kerja 1000 mL. Setelah itu tambah eco-enzyme sesuai perlakuan dan aduk hingga homogen. Terakhir, tempatkan tanaman *L. minor* sesuai perlakuan.

Penelitian dilakukan selama 15 hari dan setiap 3 hari dilakukan pengambilan sampel air. Pada setiap kali pengambilan sampel air, dilakukan penentuan konsentrasi Cr<sup>6+</sup> dalam air. Selain konsentrasi Cr<sup>6+</sup> dalam air, juga dilakukan penentuan konsentrasi Cr<sup>6+</sup> dalam tanaman, kadar klorofil, berat segar dan berat kering tanaman *L. minor*, yang diukur pada awal dan akhir penelitian.

### 2.5. Pengukuran Parameter Penelitian

#### a. Penentuan berat segar dan kering tanaman.

Berat segar dan berat kering tanaman ditentukan dengan metode gravimetri.

#### b. Penentuan klorofil total tanaman (Mataradja dan Kasmiyati, 2023)

Klorofil tanaman diukur dengan menggunakan hasil filtrasi sampel daun sebanyak 0,5 gram yang telah dihaluskan dan dilarutkan dalam methanol 96% sebanyak 10 mL dan diukur menggunakan spektrofotometer Uv-Vis pada panjang gelombang 665 dan 649 nm. Konsentrasi klorofil total dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$C_a = 13,7 A_{665} - 5,76 A_{649}$$

$$C_b = 25,8 A_{649} - 7,7 A_{665}$$

$$C_{a+b} = 20 A_{649} + 6,1 A_{665}$$

Keterangan :

C<sub>a</sub> = kadar klorofil a

C<sub>b</sub> = kadar klorofil b

C<sub>a+b</sub> = kadar klorofil total

#### c. Penentuan konsentrasi Cr<sup>6+</sup> di air

Konsentrasi Cr<sup>6+</sup> dalam sampel air ditentukan secara spektrofotometrik menggunakan reagen diphenyl carbasite (Meitiniarti *et al.* 2022). Sebanyak 100 µL sampel air dimasukkan ke dalam tabung reaksi kemudian ditambahkan akuades 10 mL, 1 mL diphenyl carbazide (0,25% dalam aseton), dan 1 tetes H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. Homogenkan menggunakan vortex dan inkubasi 30 menit pada suhu ruang (di ruang terbuka). Absorbansi sampel diukur menggunakan spektrofotometer Uv-Vis pada panjang gelombang 540 nm. Konsentrasi Cr<sup>6+</sup> ditentukan dengan mengonversikan nilai absorbansi ke konsentrasi Cr<sup>6+</sup> menggunakan persamaan Y=aX+b yang sudah diperoleh dari kurva standart (Y=0,0062X-0,0029, R<sup>2</sup> = 0,9901).

#### d. Penentuan konsentrasi Cr<sup>6+</sup> di tanaman

Penentuan konsentrasi Cr<sup>6+</sup> pada *L. minor* dilakukan dengan metode yang sama dengan penentuan konsentrasi Cr<sup>6+</sup> di air. Sampel tanaman

di oven dahulu di suhu 80°C selama 48 jam, lalu diabukan dengan *furnance* pada suhu 550°C selama 6 jam. Sebanyak 0.2gram sampel dimasukkan ke dalam tabung reaksi dan ditambah 3 mL HNO<sub>3</sub>, 1 mL HCl, dan 0,5 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> hingga larutan menjadi bening. Larutan diambil sebanyak 1 mL dimasukkan ke dalam tabung reaksi dan ditambah 9 mL akuades, 3 tetes H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pekat, 0,1 mL diphenyl carbazide 5%. Sampel kemudian divortex dan inkubasi selama 15 menit. Selanjutnya absorbansi sampel diukur menggunakan spektrofotometer Uv-Vis pada panjang gelombang 540 nm. Konsentrasi Cr<sup>6+</sup> ditentukan dengan mengonversikan nilai absorbansi ke konsentrasi Cr<sup>6+</sup> menggunakan persamaan  $Y=aX+b$  yang sudah diperoleh dari kurva standart ( $Y=0,0062X-0,0029$ ,  $R^2 = 0,9901$ ).

## 2.6. Validasi dan Kontrol Kualitas Data

Guna menjamin akurasi, presisi, dan validitas data yang dihasilkan, seluruh rangkaian eksperimen dan pengukuran instrumen dilakukan dengan prosedur kontrol kualitas yang ketat. Pembuatan larutan stok dan kurva standar kromium heksavalen menggunakan bahan kimia tingkat analitis (*analytical grade*). Pengukuran konsentrasi Cr<sup>6+</sup> dengan metode kolorimetri *diphenylcarbazine* menggunakan Spektrofotometer UV-Vis divalidasi melalui pembuatan kurva kalibrasi linier dengan nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) harus memenuhi syarat standar yaitu >0,99. Seluruh unit perlakuan eksperimen dan pengambilan sampel air serta tanaman dilakukan dalam 3 kali pengulangan (*triplicate*) untuk meminimalkan kesalahan acak (*random error*). Selain itu, pengukuran blanko (media tanpa logam) tetap dilakukan secara berkala sebagai koreksi latar belakang (*background correction*) untuk mengeliminasi potensi interferensi nilai absorbansi dari matriks organik *eco-enzyme* di dalam larutan uji.

## 2.7. Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan perangkat lunak SPSS menggunakan Uji Homogenitas dan Normalitas kemudian dilanjutkan dengan Uji Two Anova dan Uji Tukey. Operasional perhitungan dan analisis data menggunakan program SPSS versi 25.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Pengaruh Kerapatan Tanaman *Lemna minor* dan Dosis *Eco-enzyme* Terhadap Kadar Cr<sup>6+</sup> di Air

Konsentrasi Cr<sup>6+</sup> di awal penelitian ini adalah 5 ppm, namun pada penentuan konsentrasi Cr<sup>6+</sup> dalam air berkisar pada 6,5 ppm. Perbedaan konsentrasi Cr<sup>6+</sup> antara metode penelitian dan saat perlakuan dapat dikarenakan beberapa factor seperti karena adanya kontribusi unsur logam bawaan dari bahan baku *eco-enzyme* yang digunakan yaitu kulit buah dan molase. Kromium heksavalen dalam *eco-enzyme* dapat terlepas dalam fase cair selama proses lisis sel pada masa fermentasi, setelah pengaplikasian maka ion ini

juga akan terlarut dalam media air perlakuan sehingga meningkatkan nilai total dari Cr<sup>6+</sup> pada media perlakuan. Selain faktor cekaman logam dan intervensi *eco-enzyme*, stabilitas parameter lingkungan abiotik berupa suhu, intensitas cahaya, dan pH media memegang peranan krusial dalam menjaga homeostasis dan laju proliferasi sel *Lemna minor*. Kondisi suhu ruangan yang terjaga pada kisaran optimal 25°C hingga 28°C bersama dengan suplai intensitas cahaya yang konstan sangat dibutuhkan untuk mendukung aktivitas enzimatis selama fase reaksi terang fotosintesis tanpa memicu cekaman termal atau fotoinhibisi. Sementara itu, fluktuasi nilai pH media akibat penambahan *eco-enzyme* yang bersifat asam (pH 5-6) secara langsung memengaruhi spesiasi kimiawi, tingkat kelarutan, serta *bioavailability* dari kation logam Cr<sup>6+</sup> di kolom air, sekaligus mendikte integritas muatan elektrostatik negatif pada dinding sel akar tanaman dalam menarik atau menolak ion polutan tersebut.

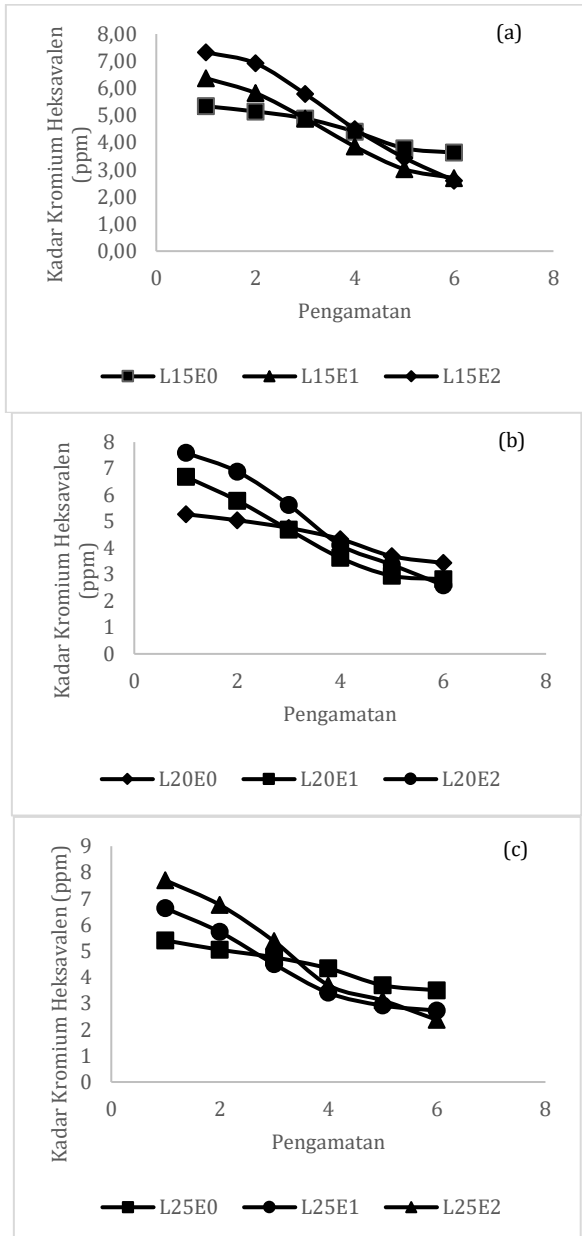
Selama 15 hari percobaan, terjadi penurunan Cr<sup>6+</sup> secara bertahap menurun menjadi 2-4 ppm (**Gambar 1**). Antara faktor kerapatan tanaman dan dosis *eco-enzyme* menunjukkan bahwa kedua faktor tersebut saling memberikan pengaruh atau saling berinteraksi. Hal ini dibuktikan dengan hasil uji statistika berupa Two Way Anova yang menghasilkan nilai sig. <0,05 sehingga memberikan hasil yang berbeda jika dibandingkan dengan tanaman yang tidak diberikan *eco-enzyme*. Pengujian dilanjutkan dengan uji Tukey untuk menentukan perlakuan yang memberikan pengaruh paling nyata terhadap penurunan kadar kromium heksavalen di dalam air dibandingkan dengan perlakuan lainnya. Berdasarkan hasil analisis Uji Tukey, diperoleh perlakuan kerapatan tanaman 25% dengan dosis *eco-enzyme* 2 mL menjadi yang paling berbeda nyata.

Pada **Gambar 1** dan **Gambar 2** menunjukkan adanya kadar Cr<sup>6+</sup> dalam air terendah terdapat pada perlakuan kerapatan tanaman 25% dengan dosis *eco-enzyme* 2 mL (L25E2). Hal tersebut juga dibuktikan dengan nilai efisiensi penurunan tertinggi sebesar 69% (**Tabel 2**). Kombinasi kerapatan tanaman 25% dengan dosis *eco-enzyme* 2 mL menjadi kombinasi paling efektif dalam mereduksi kandungan Cr<sup>6+</sup> di air.

Dari hasil penelitian diperoleh data bahwa pada kerapatan tanaman *L. minor* 25% dan dosis *eco-enzyme* 2 mL/L menurunkan kadar Cr<sup>6+</sup> hingga dengan efisiensi 69%. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang juga telah membuktikan dengan adanya pemberian tambahan probiotik seperti EM4 pada tanaman *L. minor* terbukti membantu dalam meningkatkan kemampuan penyerapan polutan pada tanaman *L. minor*. Penelitian Nurrasyida *et al.* (2024) yang menunjukkan dengan pemberian EM4 pada tanaman *L. minor* mampu meningkatkan serapan polutan amonia sebesar 70,06-91,81%, fosfat sebesar 73,5-92,6%, dan BOD sebesar 28,8-42,8%. Selain itu penelitian Saputra *et al.* (2016) menunjukkan dengan pemberian mikroorganisme pada media tumbuh tanaman *L.*

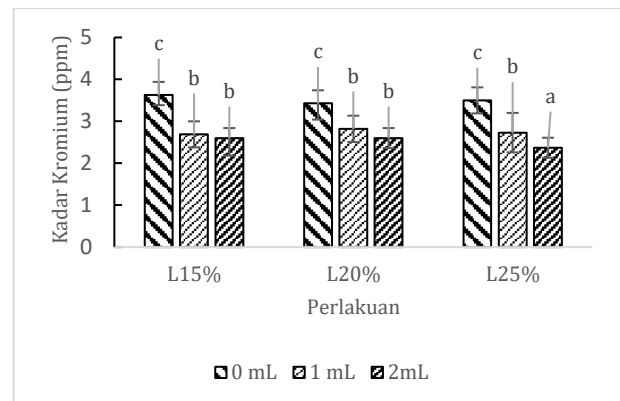
*minor* dapat meningkatkan kemampuan serapan polutan dibandingkan perlakuan tanpa tambahan mikroorganisme. Penelitian tersebut menunjukkan penyerapan ammonia sebesar 40,85% - 74,03%, nitrit berkisar antara 42,21% - 74,10%, dan nitrat berkisar antara 3,19% - 34,65%. Hasil tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan hanya tanaman saja.

tertinggi pada kadar Pb dibanding massa yang lebih tinggi karena pada kerapatan yang lebih tinggi terjadi persaingan antar tanaman sehingga menyebabkan kematian tanaman dan pelepasan kembali polutan ke dalam air.



**Gambar 1.** Kadar Cr<sup>6+</sup> dalam Air Selama 15 Hari Perlakuan (a) Kerapatan Tanaman 15% dan Dosis Eco-Enzyme 0; 1; dan 2 mL (b) Kerapatan Tanaman 20% dan Dosis Eco-Enzyme 0; 1; dan 2 mL (c) Kerapatan Tanaman 25% dan Dosis Eco-Enzyme 0; 1; dan 2 mL

Pada kerapatan 25% jumlah tanaman tidak terlalu banyak atau sedikit sehingga proses reduksi lebih maksimal. Kerapatan yang berlebihan menyebabkan kematian tanaman dan logam berat pada tanaman akan kembali lagi ke air. Hutabarat *et al.* (2022) pada massa 15 gram *L. minor* menghasilkan penurunan



**Gambar 2.** Kadar Cr<sup>6+</sup> dalam Air pada Hari Terakhir

Sebaliknya, pada kerapatan yang terlalu rendah menyebabkan akar tanaman bekerja lebih keras untuk menyerap polutan, hal ini dikarenakan jumlah akar tanaman cenderung tidak sebanding dengan jumlah polutan. Saputra *et al.* (2016) semakin besar biomassa tanaman, maka jumlah akar untuk menyerap polutan akan semakin banyak sehingga laju penurunan kadar logam berat semakin tinggi.

Pada penelitian ini, pemberian eco-enzyme memberikan nilai efisiensi penurunan kadar kromium heksavalen yang lebih besar dibandingkan dengan perlakuan yang tidak diberikan tambahan eco-enzyme. Sondang *et al.* (2023) dan Zhu *et al.* (2020), eco-enzyme mengandung mikroorganisme yang dapat berperan dalam mengikat logam berat dan menurunkan kadar polutan di dalam air serta meningkatkan daya serap logam berat pada tanaman. Mikroorganisme tersebut membantu dalam transformasi logam berat sehingga lebih mudah diserap oleh tanaman atau membantu dengan cara mengikat logam berat dengan protein yang dihasilkan seperti protein metallothionein. Protein metallothionein merupakan protein yang banyak mengandung sistein dan banyak dihasilkan oleh mikroba seperti bakteri. Protein ini berperan dalam proses pengikatan logam berat. Logam berat seperti Pb, Cd, As, Zn akan terikat pada sisi aktif metallothionein. Antara logam berat dan protein tersebut akan membentuk ikatan kompleks protein-ion logam (ikatan tiolat). Metallothionein memiliki molekul thiol atau sulfidril. Pada saat mengikat logam berat, maka sulfidril tersebut akan mengalami residu dari protein sistein dan membentuk tetrahedral tetrathiolate. Metallothionein akan mengikat kuat logam berat sehingga tidak dapat masuk ke dalam organel sel. Protein ini akan mencegah organisme dari stress oksidatif dan kerusakan akibat adanya logam berat non-essensial (Tega *et al.* 2023).

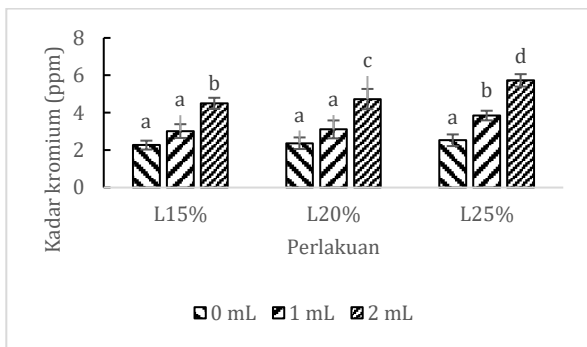
**Tabel 2.** Nilai Efisiensi Penurunan Kadar Logam Berat Cr<sup>6+</sup> di Dalam Air

Perlakuan	Sampel Awal (ppm)	Sampel Akhir (ppm)	Cr <sup>6+</sup> yang Tereduksi (ppm)	Efisiensi Penurunan Kadar Cr <sup>6+</sup> (%)
L <sub>15</sub> E <sub>0</sub>	5.34±0.24 <sup>ab</sup>	3.61±0.24 <sup>c</sup>	1.71 <sup>a</sup>	33 <sup>a</sup>
L <sub>20</sub> E <sub>0</sub>	5.50±0.57 <sup>a</sup>	2.69±0.31 <sup>c</sup>	2.81 <sup>a</sup>	51 <sup>a</sup>
L <sub>25</sub> E <sub>0</sub>	5.44±0.78 <sup>ab</sup>	2.60±0.42 <sup>c</sup>	2.84 <sup>a</sup>	52 <sup>ab</sup>
L <sub>15</sub> E <sub>1</sub>	6.37±0.21 <sup>b</sup>	3.44±0.39 <sup>b</sup>	2.93 <sup>ab</sup>	45 <sup>b</sup>
L <sub>20</sub> E <sub>1</sub>	6.69±0.34 <sup>b</sup>	2.82±0.31 <sup>b</sup>	3.87 <sup>ab</sup>	57 <sup>b</sup>
L <sub>25</sub> E <sub>1</sub>	6.63±0.62 <sup>bc</sup>	2.60±0.24 <sup>b</sup>	4.03 <sup>b</sup>	60 <sup>b</sup>
L <sub>15</sub> E <sub>2</sub>	7.33±0.18 <sup>c</sup>	3.50±0.31 <sup>b</sup>	3.82 <sup>c</sup>	52 <sup>c</sup>
L <sub>20</sub> E <sub>2</sub>	7.60±0.31 <sup>c</sup>	2.73±0.47 <sup>b</sup>	4.87 <sup>c</sup>	64 <sup>cd</sup>
L <sub>25</sub> E <sub>2</sub>	7.69±0.49 <sup>cd</sup>	2.37±0.24 <sup>a</sup>	5.32 <sup>cd</sup>	69 <sup>cd</sup>

\*angka dengan notasi huruf berbeda menunjukkan perlakuan yang berbeda nyata dibandingkan perlakuan lain

**3.2. Pengaruh Kerapatan Tanaman *Lemna minor* dan Dosis Eco-enzyme Terhadap Kadar Cr<sup>6+</sup> di Tanaman**

Kadar kromium heksavalen dalam tanaman tertinggi terdapat pada perlakuan kerapatan tanaman 25% dan dosis eco-enzyme 2 mL (5,73 ppm) sedangkan kadar terendah terdapat pada kerapatan tanaman 15% dengan dosis eco-enzyme 0 mL (2,27 ppm) (**Gambar 3**). Dari hasil tersebut menjelaskan bahwa kerapatan tanaman dan dosis eco-enzyme terlihat saling berinteraksi sehingga memberikan pengaruh yang berbeda dibandingkan dengan perlakuan tanpa tambahan eco-enzyme.



**Gambar 3.** Kadar Cr<sup>6+</sup> dalam Tanaman *L. minor* pada Hari Terakhir

**Tabel 3.** Kadar Cr<sup>6+</sup> dalam Tanaman *L. minor*

Parameter	Sampel		
	15%	20%	25%
0	2.27±0.24 <sup>a</sup>	2.37±0.31 <sup>a</sup>	2.53±0.31 <sup>a</sup>
1	3.02±0.36 <sup>a</sup>	3.11±0.47 <sup>a</sup>	3.85±0.26 <sup>b</sup>
2	4.5±0.30 <sup>bc</sup>	4.73±0.54 <sup>c</sup>	5.73±0.33 <sup>d</sup>

notasi huruf berbeda menunjukkan perlakuan yang memberikan pengaruh berbeda nyata dibandingkan perlakuan lain

**Tabel 4.** Korelasi Pearson antara Parameter Cr<sup>6+</sup> dalam Air dan Cr<sup>6+</sup> dalam Tanaman

Parameter	Cr <sup>6+</sup>	
	Cr <sup>6+</sup> Air	Cr <sup>6+</sup> Tanaman
Cr <sup>6+</sup> Air	1	
Cr <sup>6+</sup> Tanaman	-0,45709	1

\*r hitung > r table = korelasi signifikan;

\*nilai korelasi positif maka peningkatan satu parameter maka parameter lain juga akan meningkat

Kombinasi kerapatan tanaman 25% dengan dosis eco-enzyme 2 mL menjadi kombinasi paling efektif dalam penyerapan kadar Cr<sup>6+</sup>. Hasil uji statistik menunjukkan bahwa kombinasi tersebut memiliki

nilai yang berbeda nyata dibandingkan kombinasi lainnya (nilai sig. <0,05) (**Gambar 3** dan **Tabel 3**). Perlakuan dengan mengkombinasikan kerapatan tanaman *L. minor* 25% dengan dosis eco-enzyme 2 mL menunjukkan peningkatan kadar kromium heksavalen dalam tanaman tertinggi dibandingkan perlakuan lainnya.

Peningkatan kadar kromium heksavalen dalam tanaman ini sejalan dengan penurunan kadar kromium heksavalen di dalam air. Pada saat kromium heksavalen dalam tanaman meningkat, maka kadar kromium heksavalen dalam air menjadi menurun. Hal ini menunjukkan bahwa tanaman melakukan penyerapan sehingga kadar logam berat di dalam media tumbuh menjadi menurun. Hal tersebut dapat dibuktikan berdasarkan nilai korelasi pearson yang menunjukkan adanya korelasi negatif antara kromium di air dan tanaman (**Tabel 4**). Berdasarkan analisis Korelasi Pearson pada **Tabel 4**, diperoleh nilai koefisien korelasi (r) sebesar -0,45709 antara parameter konsentrasi Cr<sup>6+</sup> dalam air dengan Cr<sup>6+</sup> dalam jaringan tanaman. Nilai negatif ini memiliki makna biologis yang sangat penting, yaitu mengonfirmasi terjadinya mekanisme fitoekstraksi aktif oleh *Lemna minor*. Hubungan berbanding terbalik ini membuktikan bahwa penurunan kadar polutan kromium di media air secara langsung dikontrol oleh laju absorpsi dan akumulasi ion logam ke dalam organel sel tanaman.

Namun, kekuatan korelasi yang berada pada tingkat sedang, secara fisiologis menunjukkan bahwa pembersihan logam dari kolom air tidak bersifat tunggal akibat serapan tanaman saja. Fenomena ini mengindikasikan adanya peran hibrida dari komponen eco-enzyme, di mana konsorsium mikroba dan agen penghelat organik di dalam media ikut bekerja mereduksi sebagian kation di luar sistem perakaran, sehingga menghasilkan titik kesetimbangan reduksi polutan yang simultan antara jalur fitoekstraksi oleh tanaman dan jalur bioremediasi oleh mikroba.

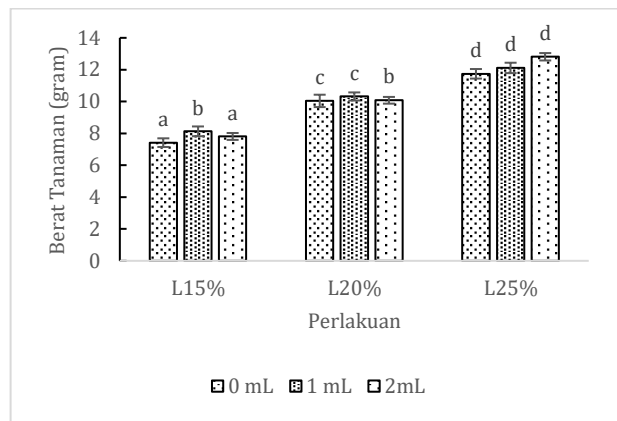
Pada perlakuan kerapatan tanaman *L. minor* 25% dan dosis eco-enzyme 2 mL memiliki kadar Cr<sup>6+</sup> tanaman tertinggi dan berbeda nyata dibandingkan perlakuan lain (**Gambar 3** dan **Tabel 2**). Tanaman air seperti *L. minor* dapat melakukan penyerapan logam berat seperti kromium heksavalen melalui sel-sel akar yang berada di dalam air. Akar tanaman akan melakukan adsorpsi pada logam berat karena adanya

perbedaan muatan. Dinding sel akar cenderung memiliki muatan negatif, sedangkan logam berat memiliki muatan positif sehingga akan terjadi gaya tarik menarik. Menurut Halimah *et al.* (2024) sel akar tanaman memiliki muatan ion hidroksida (OH<sup>-</sup>) sehingga bermuatan negatif, sedangkan logam berat merupakan kation (bermuatan positif). Adanya perbedaan muatan antara akar tanaman dan logam berat menyebabkan logam berat menempel dan masuk ke sel akar akibat daya tarik elektrostatis yang dihasilkan akar. Menurut Fatikasari dan Purnomo (2022), membran plasma akar dan xilem menjadi bagian yang berperan dalam penyerapan logam berat pada tanaman *L. minor*. Lebih lanjut, Munandar *et al.* (2018) menyatakan bahwa tanaman *L. minor* akan menyimpan logam berat yang diserap oleh akar tanaman pada bagian tajuk. Pada penelitian lain oleh Othman *et al.* (2015) juga menjelaskan bahwa tanaman *L. minor* mampu menyerap logam berat Cu dan Zn karena system transpor logam berat dari sel akar menuju tajuk tanaman yang menyebabkan adanya fitoekstraksi.

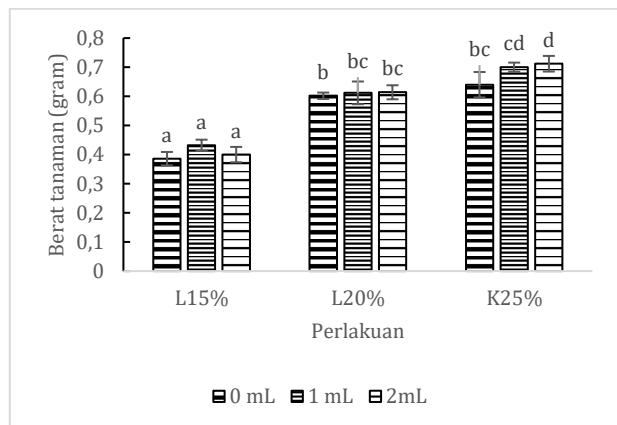
Kemampuan akar untuk menyerap logam berat juga didukung dengan adanya eco-enzyme. Hal ini terlihat dari serapan kromium heksavalen yang cukup banyak pada perlakuan yang diberikan dosis eco-enzyme tertentu. Serapan akar dapat mengalami peningkatan akibat pemberian eco-enzyme dikarenakan adanya mikroorganisme dalam eco-enzyme yang berperan dalam menguraikan senyawa seperti logam berat menjadi bentuk yang lebih sederhana sehingga akan mempermudah tanaman dalam melakukan penyerapan. Hal ini sesuai dengan pernyataan Zhu *et al.* (2022) bahwa kemampuan tanaman dalam menyerap logam berat saat di media tumbuh meningkat ketika diberikan tambahan eco-enzyme. Mikroorganisme dan jamur dalam eco-enzyme memiliki peran untuk menguraikan senyawa organik dan anorganik serta mentransformasi logam berat menjadi bentuk yang lebih tidak toksik.

### 3.3. Pengaruh Dosis Eco-enzyme Terhadap Pertumbuhan Tanaman *L. minor*

Berdasarkan pengukuran berat segar dan kering tanaman di akhir penelitian, terjadi penurunan pada seluruh perlakuan. Pada saat awal, rata-rata berat segar tanaman pada kerapatan 15, 20, dan 25% berturut-turut adalah 8, 11, dan 13 gram. Pada akhir pengamatan diperoleh rata-rata berat segar tanaman adalah 7, 10, dan 12 gram (**Gambar 4**). Hal tersebut juga terjadi pada berat kering tanaman (**Gambar 5**). Selain penurunan berat segar dan kering, terjadi penurunan klorofil total. Berdasarkan hasil yang diperoleh, perlakuan tanpa eco-enzyme dan yang diberikan eco-enzyme tidak memberikan pengaruh yang berbeda nyata terhadap pertumbuhan tanaman.



**Gambar 4.** Berat Segar Akhir Tanaman *L. minor*



**Gambar 5.** Berat Kering Akhir Tanaman *L. minor*



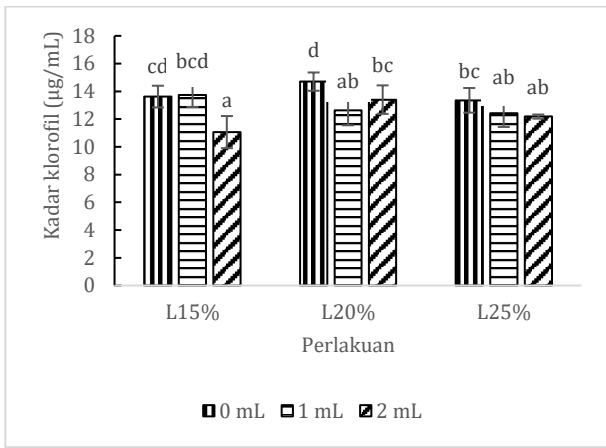
**Gambar 6.** Kondisi Tanaman *L. minor* Selama Perlakuan Tanpa Tambahan Eco-Enzyme



**Gambar 7.** Kondisi Tanaman *L. minor* Selama Perlakuan dengan Tambahan Eco-Enzyme Sebesar 1 mL



**Gambar 8.** Kondisi Tanaman *L. minor* Selama Perlakuan dengan Tambahan Eco-Enzyme Sebesar 2 mL



Gambar 9. Kadar Klorofil Total Tanaman *L. minor*

Tabel 5. Korelasi Pearson antar Parameter

Parameter	Parameter		Klorofil Total
	Berat Segar	Berat Kering	
Cr <sup>6+</sup> Air	1		
Cr <sup>6+</sup> Tanaman	0.833386	1	
Klorofil Total	0.185303	0.0030928	1

Uji Two Way ANNOVA menunjukkan nilai sig. >0,05 pada parameter kandungan klorofil total, berat segar, dan berat kering tanaman. Hasil tersebut membuktikan bahwa tidak ada pengaruh dengan adanya kombinasi pemberian dosis eco-enzyme dan kerapatan tanaman terhadap pertumbuhan tanaman. Hasil tersebut juga didukung dengan hasil dari uji Tukey yang memberikan notasi huruf yang tidak berbeda pada perlakuan tertentu (Gambar 4; Gambar 5; dan Gambar 6). Berdasarkan hasil uji statistic membuktikan bahwa kombinasi kedua factor tidak menghasilkan kombinasi yang paling efektif dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman setelah diberikan polutan berupa kromium heksavalen.

Berdasarkan analisis korelasi Pearson pada Tabel 5, ditemukan hubungan mekanistik yang kuat antara parameter pertumbuhan dengan kapasitas fitoakumulasi logam. Nilai koefisien korelasi (*r*) antara Cr<sup>6+</sup> Tanaman dengan Berat Segar menunjukkan korelasi positif yang sangat kuat sebesar 0,833386. Makna biologis dari korelasi linear yang kuat ini mengindikasikan bahwa kapasitas penyerapan kromium secara langsung didikte oleh volume biomassa vegetatif *Lemna minor*. Tanaman dengan berat segar yang optimal menyediakan kompartemen vakuola yang lebih luas untuk sekuestrasi seluler ion logam, serta memiliki jaringan perakaran yang lebih masif untuk memanen kation dari kolom air. Di samping itu, korelasi positif ini merefleksikan strategi osmoregulasi tanaman air, di mana sel melakukan retensi molekul air ke dalam vakuola guna mengencerkan fitotoksitas ion Cr<sup>6+</sup> yang terserap di dalam simplas.

Sebaliknya, analisis matriks pada Tabel 5 juga mengungkap fakta fisiologis yang kritis di mana kadar Klorofil Total menunjukkan nilai korelasi yang sangat lemah terhadap Berat Segar (*r* = 0,185303) dan hampir tidak berkorelasi terhadap Berat Kering (*r* =

0,0030928). Secara biologis, keterputusan korelasi ini membuktikan terjadinya disrupsi total pada aparatus fotosintesis akibat cekaman akut logam berat. Keberadaan ion kromium heksavalen merusak struktur membran tilakoid dan memutuskan jalur metabolisme asimilasi karbon konvensional (*uncoupled metabolism*). Akibatnya, fluktuasi sintesis pigmen klorofil tidak lagi linear dalam mengontrol pembentukan berat kering atau berat organik tanaman, karena energi seluler sisa dialokasikan penuh untuk mekanisme detoksifikasi metabolik demi mempertahankan viabilitas sel makrofit tersebut dari cekaman oksidatif letal.

Pada penelitian ini klorofil total justru menurun, awalnya klorofil total berkisar pada 18-19 µg/mL namun setelah perlakuan berkisar pada 11-15 µg/mL. Berdasarkan grafik terlihat antara perlakuan yang tidak diberikan eco-enzyme dan yang diberikan eco-enzyme seluruhnya hampir seluruhnya memiliki nilai klorofil total yang tidak jauh berbeda. Kadar klorofil total pada tanaman yang diberikan eco-enzyme tidak berbeda jauh dengan yang tidak diberikan tambahan eco-enzyme. Hal ini menunjukkan bahwa adanya tambahan eco-enzyme tidak memberikan pengaruh yang berbeda nyata dibandingkan dengan perlakuan tanpa adanya tambahan eco-enzyme (Gambar 9). Logam berat yang diserap akar tanaman terbukti mendisrupsi proses fisiologis vital, terutama pada laju biosintesis klorofil. Akumulasi logam berat dalam beberapa bagian sel tanaman akan menghambat pembentukan klorofil. Organel sel tanaman seperti plastida dapat mengikat dan menyimpan logam berat melalui sistem kompartemenisasi sel, yang berakibat pada penurunan laju pembentukan klorofil karena organel dialihfungsikan secara metabolic untuk mengakumulasi logam berat yang telah diabsorpsi oleh perakaran tanaman. Fenomena ini selaras dengan pendapat Fatikasari dan Purnomo (2022) bahwa logam berat yang terserap akan menghambat unsur hara lain untuk masuk ke dalam jaringan tanaman. Secara biofisika tanaman, kompetisi penyerapan ini dikontrol oleh sifat elektrokimia ion. Dijelaskan lebih lanjut oleh Harianto dan Pohan (2018) bahwa unsur hara dan logam berat merupakan kelompok kation, namun akibat nilai valensi polutan logam berat lebih tinggi dibandingkan unsur hara mikro maupun makro yang dibutuhkan tanaman, maka logam berat memiliki afinitas pengikatan yang lebih superior dan lebih mudah tertarik oleh sel-sel akar. Masuknya unsur hara yang terlambat serta terjadinya penimbunan logam berat di sel tanaman terutama pada organel sel seperti plastida, mengganggu struktur membrane internal dan menghambat diferensiasi serta proses pembentukan kloroplas utuh, sehingga kadar klorofil total tanaman merosot tajam (Monita *et al.* 2013). Kation esensial seperti Mg dan Fe yang bertindak sebagai kofaktor dan penyusun inti struktur klorofil memiliki nilai valensi (+2 dan +3) yang lebih kecil dibandingkan dengan logam berat Cr<sup>6+</sup>. Akibatnya, unsur-unsur hara tersebut kalah bersaing dalam menempati situs

pengikatan pada permukaan akar, sulit terserap dan memicu kondisi klorosis atau tanaman kehilangan kapasitas fisiologisnya untuk menyintesis klorofil (Siregar *et al.* 2020).

Pemberian eco-enzyme tidak memberikan pengaruh terhadap pertumbuhan tanaman *Lemna minor*. Hal tersebut terlihat pada (**Gambar 6** dan **Gambar 7**) yang menunjukkan adanya tren penyusutan berat segar dan berat kering tanaman pada akhir masa pengamatan dibandingkan dengan kondisi awal perlakuan. Secara fisiologis, penurunan berat biomassa tanaman dikontrol kuat oleh degradasi kadar klorofil, yang secara linier menurunkan laju reaksi terang fotosintesis. Hasil ini sejalan dengan penelitian Siregar *et al.* (2020); Khafid *et al.* (2021); dan Nuranisa *et al.* (2020) bahwa destruksi oleh logam berat mengacaukan integritas struktural kloroplas dan menghambat aksi enzimatis daun. Secara biofisika, keberadaan kromium merusak sistem transpor elektron dengan mengganggu stabilitas molekul *plastoquinone* pada membran tilakoid kloroplas, yang berakibat pada terhentinya aliran elektron menuju fotosistem. Hambatan fotofosforilasi ini menyebabkan laju fotosintesis melambat secara ekstrem, sehingga pasokan energi kimia berupa ATP dan NADPH sisa asimilasi bersih tidak mencukupi untuk mendukung pembelahan sel (*mitotic inhibition*) maupun pemanjangan jaringan. Dampak sistemik dari defisit energi ini adalah terhentinya laju pertumbuhan tanaman.

Selain merusak aparatus fotosintesis, akumulasi logam berat dalam jaringan interseluler mengganggu sistem homeostasis air dan hidrodinamika tanaman. Menurut Monita *et al.* (2013), aktivitas dan konduktansi stomata daun dikontrol ketat oleh konsentrasi logam berat di dalam tubuh tanaman. Penumpukan logam mengacaukan potensial osmotik sel penjaga (*guard cells*), memicu penutupan stomata secara prematur, yang pada gilirannya menghambat difusi dan penyerapan gas karbondioksida. Penurunan suplai karbondioksida ke dalam stroma ini berujung pada penurunan laju fotosintesis pada fase reaksi gelap.

Vasilachi *et al.* (2023) menegaskan bahwa semakin tinggi nilai valensi suatu logam berat, maka kation tersebut akan semakin responsif dan mudah tertarik oleh gugus fungsi bermuatan negatif (seperti karboksil dan hidrosil pada pektin dinding sel) di dalam apoplas akar. Valensi yang lebih besar menghasilkan interaksi elektrostatis yang jauh lebih kuat pada permukaan perakaran, sehingga mempermudah logam untuk terikat kuat dan melakukan penetrasi ke dalam simplas tanaman. Meskipun eco-enzyme berbahan dasar kulit buah mengandung unsur hara makro dan mikro esensial seperti Mg, Ca, N, P, dan K (Listiana *et al.* 2024), unsur-unsur hara tersebut secara termodinamika memiliki muatan valensi yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan muatan valensi kromium heksavalen. Magnesium hanya memiliki valensi +2 dan kalium sebesar +1, sedangkan Cr<sup>6+</sup> memiliki valensi +6.

Berdasarkan hukum Coulomb, interaksi elektrostatis antara ion negatif pada membran akar akan selalu lebih dominan dan atraktif terhadap kromium heksavalen dibandingkan terhadap nutrisi bawaan eco-enzyme. Hal tersebut memperjelas mekanisme fisiologis mengapa akar tanaman tetap menyerap Cr<sup>6+</sup> secara masif meskipun media telah diperkaya oleh nutrisi mikro dari eco-enzyme, sebuah fenomena kompetisi ionik yang sesuai dengan penjelasan teoritis dalam penelitian Zhao *et al.* (2014).

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian ini, membuktikan kombinasi tanaman *L. minor* dan eco-enzyme efektif untuk menurunkan kadar Cr<sup>6+</sup> dalam air. Kombinasi kerapatan tanaman *L. minor* 25% dengan dosis eco-enzyme 2 mL/L memberikan penurunan kadar Cr<sup>6+</sup> dalam air tertinggi dengan efisiensi penurunan sebesar 69% dan akumulasi logam berat Cr<sup>6+</sup> pada jaringan tanaman sebesar 5,73 ppm selama 15 hari. Pemberian eco-enzyme mengoptimalkan fitoremediasi logam berat oleh tanaman *L. minor* namun tetap terdapat gejala klorosis dan penurunan berat biomassa serta klorofil total tanaman. Secara praktis, teknologi murah dan ramah lingkungan ini sangat aplikatif untuk diadopsi oleh industri sebagai sistem pengolahan limbah sekunder pada kolam sedimentasi dengan aliran yang lambat. Keterbatasan dalam penelitian ini adalah pengujian skala batch laboratorium yang belum mencerminkan fluktuasi pada kondisi nyata di lapangan dan penggunaan limbah buatan berpolusi tunggal. Penelitian lanjutan direkomendasikan untuk meningkatkan skala pengujian ke sistem mengalir menggunakan air limbah industri asli serta mengkaji tata Kelola pembuangan akhir biomassa *L. minor* pasca remediasi agar tidak mencemari rantai makanan di ekosistem.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Bhakti, A. N., Sujoso, A. D., Ellyke. (2016). Pajanan Kromium (Cr) dan Gangguan Faal Paru Pekerja di Industri Elektroplating Vila Chrome Kabupaten Jember. Jember: Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Jember
- Banyo, Y. E. Ai, N. S., Siahaan, P., Tangapo, A. M. (2013). Konsentrasi Klorofil Daun Padi pada saat Kekurangan Air yang Diinduksi dengan Politilen Glikol. *Jurnal Ilmiah Sains*. 13(1): 1-8. DOI: [10.35799/jis.13.1.2013.1615](https://doi.org/10.35799/jis.13.1.2013.1615)
- Fatikasari, R. N., dan Purnomo, T. (2022). Efektivitas *Hydrilla verticillata* dan *Lemna minor* sebagai Fitoremediasi LAS pada Deterjen Limbah Domestik. *Jurnal LenteraBio*. 11(2): 263-272. DOI: [10.26740/lenterabio.v11n2.p263-272](https://doi.org/10.26740/lenterabio.v11n2.p263-272)
- Fidiastuti, H. R., dan Lathifah, A. S. (2018). Uji Karakteristik Limbah Cair Industri Batik Tulungagung: Penelitian Pendahuluan. Seminar Nasional Pendidikan Biologi dan Saintek III 2018. 296-300.
- Fitriana, N., dan Kuntjoro, S. (2020). Kemampuan *Lemna minor* dalam Menurunkan Kadar Linear Alkyl Benzene Sulphonate. *Jurnal LenteraBio*. 9(2): 109-

114. DOI: <https://doi.org/10.26740/lenterabio.v9n2.p109-114>
- Halimah, N., Rahmadina., Idris, M. (2024). Kapabilitas Tumbuhan Air sebagai Agen Fitoremediator Logam Berat Kromium (Cr) Pada Limbah Cair Industri Tekstil. *Jurnal EDUPROXIMIA*. 6(4): 1288-1296. DOI: [10.29100/v6i4.5581](https://doi.org/10.29100/v6i4.5581)
- Harahap, J., Irhamni, Adhiani, N., Ashari, T. M. (2022). Efektivitas Rumput Bebek (*Lemna Minor*) Dalam Penyisihan Kadmium (Cd) Dan Chemical Oxygen Demand (Cod) Pada Lindi Tpa Sampah Gampong Jawa Kota Banda Aceh. *Jurnal Lingkar*. 3(2): 13-25. DOI: <https://doi.org/10.22373/ljee.v3i2.2304>
- Harianto, V., dan Pohan, S. D. (2018). Respon Pertumbuhan dan Fisiologis Tanaman Sawi (*Brassica Rapa* Var. *Parachinensis*) Yang Dipapar Timbal (Pb). *Jurnal Biosains*. 4(3): 154-160. DOI: [10.24114/jbio.v4i3.11212](https://doi.org/10.24114/jbio.v4i3.11212)
- Hitsmi, M., Firdaus, M. L., Nurhamidah. 2020. Pengembangan Metode Citra Digital Berbasis Aplikasi Android untuk Analisis Ion Logam Cr(VI). *Jurnal ALOTROP*. 4(2): 117-124. DOI: [10.33369/atp.v4i2.13835](https://doi.org/10.33369/atp.v4i2.13835)
- Hutabarat, E. D., Amizera, S., Santri, D. J. (2024). Potensi Tumbuhan Lemna minor L. sebagai Agen Fitoremediasi Limbah Cair Pewarna Jumputan. *Jurnal Bios Logos*. 14(3): 64-73. DOI: <https://doi.org/10.35799/jbl.v14i3.55819>
- Khafid, A., Suedy, S. W. A., Nurchayati, Y. (2021). Kandungan Klorofil dan Karotenoid Daun Salam (*Syzgium polyanthum* (Wight) Walp.) pada Umur yang Berbeda. *Jurnal Buletin Anatomi dan Fisiologi*. 6(1): 74-80. DOI: [10.14710/baf.v6i1.2021.74-80](https://doi.org/10.14710/baf.v6i1.2021.74-80)
- Kotyzova, D., Hodkova, A., Bludovska, M., Eybl, V. (2013). Effect of Chromium (VI) Exposure on Antioxidant Defense Status and Trace Element Homeostasis in Acute Experiment in Rat. *Journal of Toxicology and Industrial Health*. 1(1): 1-7. DOI: [10.1177/0748233713487244](https://doi.org/10.1177/0748233713487244)
- Kurniawati, S., Nurjazuli., Raharjo, M. 2017. Risiko Kesehatan Lingkungan Pencemaran Logam Berat Kromium Heksavalen (Cr VI) pada Ikan Nila (*Oreochromis niloticus*) di Aliran Sungai Garang Kota Semarang. *Jurnal Higiene*. 3(3): 152-160. DOI: [10.24252/higiene.v3i3.4654](https://doi.org/10.24252/higiene.v3i3.4654)
- Lestari, A., dan Samsunar, S. (2021). Analisis Kadar Padatan Tersuspensi Total (TSS) dan Logam Krom Total (Cr) pada Limbah Tekstil di Dinas Lingkungan Hidup Sukoharjo. *Indonesian Journal of Chemical Research*. 6(1): 32-41. DOI: [10.20885/ijcr.vol6.iss1.art4](https://doi.org/10.20885/ijcr.vol6.iss1.art4)
- Listiana, I., Ayuni, T., Saputri, D. A., Amelia, I. (2024). Pemanfaatan Eco-enzyme pada Tanaman Kangkung Darat (*Ipomoea reptans* poir.) dengan Sistem Hidroponik Desain Wick. *Jurnal BIOSPECIES*. 17(2): 22-28. DOI: [10.22437/biospecies.v17i2.35787](https://doi.org/10.22437/biospecies.v17i2.35787)
- Mataradja, G. L., dan Kasmiyati, S. (2023). Effect Interaction of Sulfate (So<sub>4</sub><sup>2-</sup>) dan Chromate (CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) on Growth and Cr<sup>6+</sup> Accumulation in *Tagetes erecta* L. *Jurnal AGRIC*. 35(1): 45-60. DOI: [10.24246/agric.2023.v35.i1.p45-60](https://doi.org/10.24246/agric.2023.v35.i1.p45-60)
- Meitiniarti, V. I., Putri, E. K., Runtu, A. E., Nugroho, R. A., Kasmiyati, S. 2022. Isolation and identification of Cr-resistant bacteria from the rhizosphere of *Tagetes* sp. and their ability to reduce Cr(VI), *Biodiversitas, Journal of Biological Diversity* 23 (8): 4117-4123. DOI: [10.13057/biodiv/d230832](https://doi.org/10.13057/biodiv/d230832)
- Monita, R., Purnomo, T., Budiono, D. (2013). Kandungan Klorofil Tanaman Kangkung Air (*Ipomoea aquatica*) Akibat Pemberian Logam Kadmium (Cd) pada Berbagai Konsentrasi. *Jurnal LenteraBio*. 2(3): 247-251.
- Muhammad, S., Anjum, S., Ali, B., & Ahmad, R. (2026). Biochemical and physiological insights into *Lemna minor* as a remediator of multi metal-microplastic contaminated waters. *Scientific Reports*, 16(1), Artikel 4321. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-12345-x>
- Munandar, A. A., Kusuma, Z., Prijono, S., Irawanto, R. 2018. Fitoremediasi Air Tercemar Timbal (Pb) dengan *Lemna minor* dan *Ceratophyllum demersum* serta Pengaruhnya Terhadap Pertumbuhan *Lactuca sativa*. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*. 5(2): 867-874.
- Mursidi, A. 2015. Analisis Risiko Kandungan Logam Kromium Heksavalen (Cr<sup>6+</sup>) dan Arsen (As) dalam Air Minum. *Jurnal Vokasi Kesehatan*. 1(6): 195-204. DOI: [10.30602/jvk.v1i6.41](https://doi.org/10.30602/jvk.v1i6.41)
- Nuranisa, S., Suidiana, E., Yani, E. (2020). Hubungan Umur dengan Stok Karbon Pohon Duku (*Lansium parasiticum*) di Desa Kalikajar Kecamatan Kaligondang Kabupaten Purbalingga. *Jurnal BioEksakta*. 2(1): 146-151. DOI: [10.20884/1.bioe.2020.2.1.1866](https://doi.org/10.20884/1.bioe.2020.2.1.1866)
- Nurrasyida, F. U., Kasmiyati, S., Suchahyo. (2024). Efektivitas Tumbuhan Mata Lele (*Lemna minor* L.) dengan Kombinasi Probiotik dalam Menurunkan Kadar Amonia dan Fosfat pada Air Kolam Budidaya Ikan Lele. *Jurnal Ilmu Lingkungan*. 22(5): 1108-1113.
- Othman, R., Ramya, R., Baharuddin, Z. M., Hashim, K. S. H-Y., Yaman, M. (2015). Response of *Lemna minor* and *Salvinia natans* as Phytoremediation Agents Towards Fe, Cu, and Zn Toxicities via *in vivo* Model System. *Jurnal Teknologi*. 77(30): 101-109. DOI: [10.11113/jt.v77.6873](https://doi.org/10.11113/jt.v77.6873)
- Pamungkas, I. P., Andriani, Y., Junianto., Iskandar. 2019. *Lemna* sp. as a Chromium Heavy Metal Phytoremediator on Tannery Wastewater and Its Potential Use as Fish Feed. *Asian Plant Research Journal*. 3(1): 1-7. DOI: [10.9734/aprj/2019/v3i130057](https://doi.org/10.9734/aprj/2019/v3i130057)
- Safarrida, A., Ngadiman., Widada, J. 2015. Fitoremediasi Kandungan Kromium pada Limbah Cair Menggunakan Tanaman Air. *Jurnal Bioteknologi dan Biosains Indonesia*. 2(2): 55-59.
- Saputra, A. D., Haeruddin., Widyorini, N. 2016. Efektivitas Kombinasi Mikroorganisme dan Tumbuhan Air *Lemna minor* sebagai Bioremediator dalam Mereduksi Senyawa Amoniak, Nitrit, dan Nitrat pada Limbah Pencucian Ikan. *Diponegoro Journal of Maquares*. 5(3): 80-90. DOI: [10.14710/marj.v5i3.14393](https://doi.org/10.14710/marj.v5i3.14393)
- Siregar, R. S., Irwan, S. N. R., Putra, E. T. S. (2020). Kandungan Logam Berat Timbal (Pb) dan Pengaruhnya pada Angsana (*Pterocarpus indicus*), Tanjung (*Mimusops elengi*), dan Asam Jawa (*Tamarindus indica*) di Jalan Lingkar Alun – Alun Yogyakarta. *Jurnal Vegetalika*. 9(1): 316-329. DOI: [10.22146/veg.42694](https://doi.org/10.22146/veg.42694)
- Sondang, M. R., Riogilang, H., Riogilang, H. 2023. Analisis Aplikasi Eco-Enzyme Terhadap Kandungan Logam Berat pada Air Lindi di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Sumompo. *Jurnal TEKNO*. 21(85): 1377-1385. DOI: [10.35793/jts.v21i85.50161](https://doi.org/10.35793/jts.v21i85.50161)

- Apriliana, Y. D., Kasmiyati, S., dan Meitiniarti, V. I. (2026). Efektivitas Kerapatan *Lemna minor* dan Eco-enzyme dalam Menurunkan Kromium Heksavalen dalam Air. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(1), 211-221, doi:10.14710/jil.24.1.211-221
- Sudiro. 2014. Kajian Efektivitas Tanaman Air *Lemna minor* dan *Hydrilla verticillata* dalam Mereduksi BOD dan COD sebagai Upaya Perbaikan Kualitas Limbah Cair Industri Tahu. *Jurnal Spectra*. 21(11): 53-67.
- Tega, Y. R., Herawati, E. Y., Kilawati, Y. (2023). Peran dan Keberadaan Enzim *Metallothionein* sebagai Pengikat Logam Berat Pb pada Pangkal dan Ujung Rumput Laut *Gracilaria sp.* *Jurnal Ilmu Perikanan dan Kelautan*. 5(1): 159-172.
- Vasilachi, L. C., Stoleru, V., Gavrilesco, M. (2023). Analysis of Heavy Metal Impacts on Cereal Crop Growth and Development in Contaminated Soils. *Journal Agriculture*. 13(10).
- Violita, L., Apriani, I., Sulastri, A. 2022. Kemampuan Tanaman Kangkung Air Dalam Menurunkan Krom Heksavalen (Cr<sup>6+</sup>) pada Limbah Cair Sablon. *Jurnal Rekayas Lingkungan Tropis*. 3(1): 37-44.
- Vitasari, M., Darundiati, Y. H., Setiani, O. 2020. Biokonsentrasi Faktor Logam Berat Kromium Heksavalen (Cr VI) Pada Ikan Nila (*Oreochromis niloticus*) di Sungai Tenggang Semarang Timur. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa*. 10(1): 6-9.
- Widyastuti, S., Sutrisno, J., Wiyarno, Y., Gunawan, W., Nurhayati, I. (2023). Eco enzim untuk Pengolahan Air Limbah Tahu. *Jurnal WAKTU*. 21(2): 51-59. DOI: [10.36456/waktu.v21i02.7260](https://doi.org/10.36456/waktu.v21i02.7260)
- Wulaningtyas, F. A. 2018. Karakteristik Pekerja Kaitannya dengan Kandungan Kromium dalam Urine Pekerja di Industri Kerupuk Rambak X Magetan. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*. 10(1): 127-137. DOI:[10.20473/jkl.v10i1.2018.127-137](https://doi.org/10.20473/jkl.v10i1.2018.127-137)
- Zaeni, A., Ambardini, S., Sartinah, A., Ramadhani, A.N., Sartini, Amin, A., Patiung, G.W., Susilowati, P.E. (2021). Studi Bioakumulasi Logam Crom (Cr), Seng (Zn) dan Nikel (Ni) pada Tanaman Obat Binahong (*Anredera cordifolia* (Ten) Steenis.). *Jurnal Akta Kimindo*. 6(1): 12-27.
- Zarkasi, K., Moelyaningrum, A. D., Ningrum, P. T. (2018). Penggunaan Arang Aktif Kulit Durian (*Durio zibethinus* Murr) Terhadap Tingkat Adsorpsi Kromium (Cr<sup>6+</sup>) Pada Limbah Batik. *Jurnal EFEKTOR*. 5(2): 67-73. DOI: [10.29407/e.v5i2.12069](https://doi.org/10.29407/e.v5i2.12069)
- Zhao, F. J *et al.* (2014). Bioavailability of Trace Elements in Soils and Plants. *Journal of Environmental Science and Technology*. 48(10): 5491-5500.
- Zhu, G., Cheng, D., Liu, X., Nie, P., Zuo, R., Zhang, H., Wang, X. (2020). Effects of Garbage Enzyme on the Heavy Metal Contents and the Growth of Castor under Mine Tailing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1-7. DOI: [10.1088/1755-1315/474/2/022010](https://doi.org/10.1088/1755-1315/474/2/022010)