

## **Analisis Penurunan Kadar Zn(II) pada Biosorpsi Limbah Cair Artifisial Menggunakan Mikroalga *Tetraselmis chuii* dengan Pengaruh Konsentrasi dan Warna Cahaya**

### ***Analysis of Zn(II) Reduction in Artificial Liquid Waste Biosorption Using Tetraselmis chuii Microalgae with the Influence of Light Concentration and Color***

**Muhamad Hanif Dzulfikar<sup>1\*</sup>, Desita Ramadona Syah Putri<sup>2</sup>, Karina Larasati Gunawan<sup>3</sup>, Haekal Irfan Titan Prianto<sup>4</sup>, Rahmad Firnandi<sup>5</sup>, Tanti Utami Dewi<sup>6</sup>**

<sup>1,2,3,4,5,6</sup> Program Studi D4 Teknik Pengolahan Limbah, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Email: <sup>1</sup>muhamadhanif@student.ppns.ac.id, <sup>2</sup>desitaramadona01@student.ppns.ac.id, <sup>3</sup>karinalarasati@student.ppns.ac.id, <sup>4</sup>haekalirfan01@student.ppns.ac.id, <sup>5</sup>rahmadfirnandi29@student.ppns.ac.id, <sup>6</sup>tanti.dewi@ppns.ac.id

\*Penulis korespondensi: **muhamadhanif@student.ppns.ac.id**

Direview: 12 September 2023

Diterima: 30 September 2023

#### **ABSTRAK**

Zn(II) merupakan salah satu logam berat yang kehadirannya dalam jumlah besar dapat menyebabkan toksisitas pada badan air sehingga dapat menyebabkan kematian pada organisme yang ada pada perairan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh warna cahaya merah, waktu kontak, dan konsentrasi terhadap penurunan kadar Zn(II) dalam air limbah artifisial menggunakan mikroalga *Tetraselmis chuii*. Warna cahaya yang diaplikasikan adalah merah dengan panjang gelombang 620 – 760 nm. Sedangkan waktu kontak yang divariasikan adalah 30 menit, 45 menit, dan 60 menit dengan variasi konsentrasi 5 mg/L dan 15 mg/L. Analisis yang dilakukan untuk mengidentifikasi penurunan Zn(II) dengan menggunakan mikroalga *Tetraselmis chuii* yaitu analisis spektrofotometer UV-Vis. Efisiensi penyisihan Zn(II) terbaik ditunjukkan pada variasi waktu kontak 60 menit, dan konsentrasi awal 5 mg/L sebesar 51,0805 %.

**Kata Kunci :** *Biosorpsi, Zn(II), Mikroalga Tetraselmis chuii, warna cahaya, waktu kontak*

#### **ABSTRACT**

*Zn(II) is one of the heavy metals whose presence in large quantities can cause toxicity in water bodies so that it can cause death to organisms in the waters. The purpose of this study was to analyze the effect of red light color, contact time, and concentration on reducing Zn(II) levels in artificial wastewater using Tetraselmis chuii microalgae. The color of light applied was red with a wavelength of 620 – 760 nm. While the contact time varied was 30 minutes, 45 minutes, and 60 minutes with a concentration variation of 5 mg/L and 15 mg/L. The analysis conducted to identify the reduction of Zn(II) using Tetraselmis chuii microalgae is UV-Vis spectrophotometer analysis. The best Zn(II) removal efficiency was shown in the variation of contact time of 60 minutes, and initial concentration of 5 mg/L of 51.0805%.*

**Keywords:** *Biosorption, Zn(II), Microalgae Tetraselmis chuii, light color, contact time*

## 1. PENDAHULUAN

Semakin berkembangnya era industri akibat tingginya kebutuhan yang semakin meningkat terutama di negara berkembang, menyebabkan munculnya permasalahan baru terutama permasalahan lingkungan akibat hasil samping dari kegiatan industri. Permasalahan lingkungan akibat limbah cair industri terutama di negara-negara berkembang belum diolah dengan maksimal. Industri seperti industri kertas, pestisida, penyamakan kulit, industri pelapisan logam, apabila membuang limbah logam berat ke lingkungan yang ternyata tidak dapat terurai secara hayati dan beracun atau berbahaya bagi fisiologi manusia dan sistem biologis lainnya. Logam beracun dapat tetap dalam bentuk kimia atau campuran, sehingga sulit untuk dihilangkan dari air limbah (Han dkk., 2016). Limbah yang dibuang dari industri biasanya mengandung bahan berbahaya dan beracun dan mengendap sebagai sedimen dasar di air sungai. Di negara-negara berkembang, penduduk perkotaan sebagian besar ikut terdampak akibat penggunaan air ini untuk keperluan rumah tangga. Adsorpsi unsur logam biasanya dipengaruhi oleh konsentrasi bahan kimia seperti logam berat yang terkonsentrasi pada bahan organik sedimen (Ilyas dkk., 2019).

Logam berat sendiri merupakan kelompok unsur heterogen yang bervariasi dalam fungsi dan sifat kimianya. Logam berat termasuk dalam unsur transisi pada Tabel Periodik. Logam berat adalah unsur yang mempunyai berat jenis lebih dari  $5 \text{ g/cm}^3$ . Logam yang setidaknya 5 kali lebih padat dari air juga didefinisikan sebagai logam berat (Bharti & Sharma, 2022). Sebagian besar unsur yang termasuk dalam kategori ini sangat larut dalam air, dan agen karsinogenik. Unsur-unsur logam berat, sebagai berikut: Tembaga, Perak, Seng, Kadmium, Emas, Merkuri, Timbal, Kromium, Besi, Nikel, Timah, Arsenik, Selenium, Molibdenum, Kobalt, Mangan, dan Aluminium. Logam-logam tersebut dapat menjadi ancaman serius bagi populasi manusia dan fauna serta flora di badan air penerima (Gunatilake, 2015). Logam berat Zn(II) dibutuhkan oleh manusia pada tingkat yang sangat rendah, hal itu menimbulkan beberapa masalah kesehatan pada tubuh manusia seperti nyeri, radang kulit, demam, muntah, dan anemia (Cristian dkk., 2015).

Pengolahan biologis dengan menggunakan mikroalga dapat menjadi solusi dalam permasalahan penanganan limbah industri. Mikroalga sendiri pertama kali dipelajari pada tahun 1950 untuk mengetahui nilai potensial dalam pengaplikasian pada industri dan komersial termasuk pengolahan air limbah (Johansen, 2012). Kelayakan penggunaan mikroalga dalam pengolahan air limbah sebagai penunjang untuk pengolahan air limbah tersier telah dibuktikan oleh banyak peneliti karena potensinya dalam menghilangkan nutrisi dan pencemar dalam pengolahan lanjutan air limbah kota, pertanian, dan industri (Li dkk., 2019). Pada penelitian oleh Li dkk. (2017) Genus *Tetraselmis* dianggap sebagai salah satu strain yang paling menjanjikan untuk menghilangkan Zn(II), karena tampaknya lebih toleran terhadap logam ini daripada mikroalga hijau lainnya.

Proses pertumbuhan mikroalga dipengaruhi oleh beberapa faktor yang salah satunya adalah cahaya. Apabila panjang gelombang cahaya semakin besar, maka kualitas cahaya yang dihasilkan lebih baik bagi mikroalga (Novianti dkk., 2017). Cahaya sendiri dapat mempengaruhi pertumbuhan dan proliferasi mikroalga dalam tiga situasi berbeda: keterbatasan cahaya, saturasi cahaya, dan penghambatan cahaya. Ketika cahaya terbatas, peningkatan intensitas cahaya berpengaruh positif terhadap pertumbuhan mikroalga. Namun, saturasi cahaya menyebabkan penurunan laju fotosintesis karena kelebihan penyerapan foton sehubungan dengan pergantian elektron. Peningkatan intensitas cahaya lebih lanjut menghasilkan kerusakan permanen pada alat fotosintesis, dan ini disebut sebagai *photoinhibition* (Rastogi dkk., 2017). Waktu paparan cahaya (juga disebut fotoperiode) juga mempengaruhi fotosintesis mikroalga. Paparan cahaya yang terlalu lama dapat menyebabkan peningkatan pertumbuhan spesies mikroalga tertentu yang mengarah ke kepadatan sel yang lebih tinggi. Secara umum, ganggang cenderung tumbuh dengan baik di bawah cahaya tetapi lebih suka membelah dan berkembang biak dalam gelap lebih disukai dengan pembelahan biner atau ganda. Mikroalga cenderung berkembang dalam cahaya biru dan merah yang masing-masing berada dalam kisaran  $\lambda \sim 420\text{-}470 \text{ nm}$  dan  $\lambda \sim 660 \text{ nm}$  (Jacob dkk., 2021).

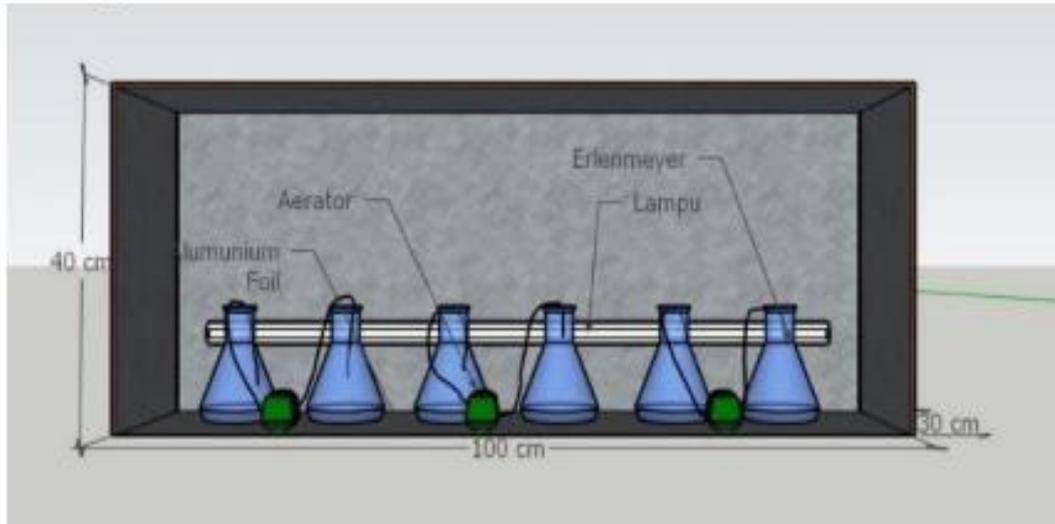
Penghapusan logam berat oleh mikroalga dicapai melalui dua tahap mekanisme. Tahap pertama adalah adsorpsi pasif ekstraseluler cepat (biosorpsi), sedangkan tahap kedua adalah difusi dan akumulasi pasif intraseluler lambat (bioakumulasi). Selain zat polimer sel seperti peptida dan eksopolisakarida dengan gugus uronik, dinding sel mikroalga terutama terdiri dari polisakarida (selulosa dan alginat), lipid dan protein organik, menyediakan banyak gugus fungsi (seperti amino, karboksil, hidroksil, imidazol, fosfat, sulfonat, tiol dan lain-lain) yang mampu mengikat logam berat (Priatni dkk., 2018). Adsorpsi logam berat pada permukaan mikroalga merupakan proses yang cepat dan dapat terjadi melalui jalur yang berbeda, yaitu pembentukan ikatan kovalen antara dinding sel terionisasi dengan logam berat, pertukaran ion logam berat antara kation logam berat dengan asam uronat eksopolisakarida mikroalga yang bermuatan negatif. Di sisi

lain, proses akumulasi logam berat di dalam sel jauh lebih lambat. Logam berat secara aktif diangkut melintasi membran sel dan ke dalam sitoplasma diikuti oleh difusi dan pengikatan selanjutnya dengan situs pengikatan internal protein dan peptida (Leong dkk., 2020).

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1. Photobioreactor

*Photobioreactor* dibuat dengan sistem *semi continous* dilengkapi lampu LED berwarna merah. *Photobioreactor* memiliki dimensi 100 cm, lebar 40 cm, dan tinggi 30 cm. Reaktor dilengkapi dengan lampu LED berwarna merah yang memiliki panjang gelombang  $\lambda \sim 660$  nm dengan posisi lampu berjarak 15 cm dari bawah dan diberikan 6 buah erlenmayer kemudian dindingnya dilapsisi dengan aluminium foil seperti pada **Gambar-1**.



**Gambar-1.** Desain *Photobioreactor*

### 2.2. Pembuatan Larutan Induk

Larutan induk yang dibuat yaitu larutan induk limbah artifisial logam berat Zn(II). Larutan induk dibuat dengan melarutkan  $ZnCl_2$  pada aquadest. Pengujian Zn(II) dilakukan dengan menambahkan reagen zincover 5 kemudian dilakukan analisis nilai adsorbansi menggunakan spektrofotometer UV-Vis.

### 2.3. Pembuatan Kurva Standar

Pembuatan kurva standar dilakukan dengan mengencerkan Zn(II) dari larutan induk menjadi 5 titik yaitu 2 ppm, 4 ppm, 6 ppm, dan 8 ppm dan 10 ppm. Tujuan pembuatan kurva standar adalah untuk mengidentifikasi hubungan linearitas konsentrasi Zn(II) dengan nilai absorbansinya.

### 2.4. Aklimatisasi

Aklimatisasi dilakukan untuk mengadaptasi sel mikroalga untuk meningkatkan tekanan logam berat pada budidaya fotoautotrofik (Kumar dkk., 2020). Dalam penelitian ini, proses ini bertujuan untuk adaptasi mikroalga terhadap lingkungan yang sudah ditentukan kondisinya yaitu dengan menambahkan pencemar berupa logam Zn(II) artifisial dengan konsentrasi 5 mg/L dan 15 mg/L.

### 2.5. Biosorpsi

Proses biosorpsi dengan logam berat Zn(II) konsentrasi 5 mg/L dan 15 mg/L dilakukan saat media kultur berada di fase eksponensial dan stasioner. Sampel uji sebanyak 2 kali (duplo) pengujian dengan volume kerja 100 mL dengan perbandingan volume 7:3 untuk 70 mL logam berat Zn(II) masing-masing konsentrasi, yaitu 5 mg/L dan 15 mg/L seperti pengambilan konsentrasi 5 mg/L digunakan 7,5 mL Zn(II) dan 30 mL mikroalga yang sudah dikultur lalu ditambahkan aquades hingga tanda batas labu ukur volume 100 mL, setelah itu dilakukan diaerasi. Sampel yang akan diuji akan diambil pada saat tertentu kemudian dipisahkan dengan menggunakan sentrifuge dengan kecepatan 1500 rpm kemudian dilakukan pengukuran kadar Zn(II) dengan

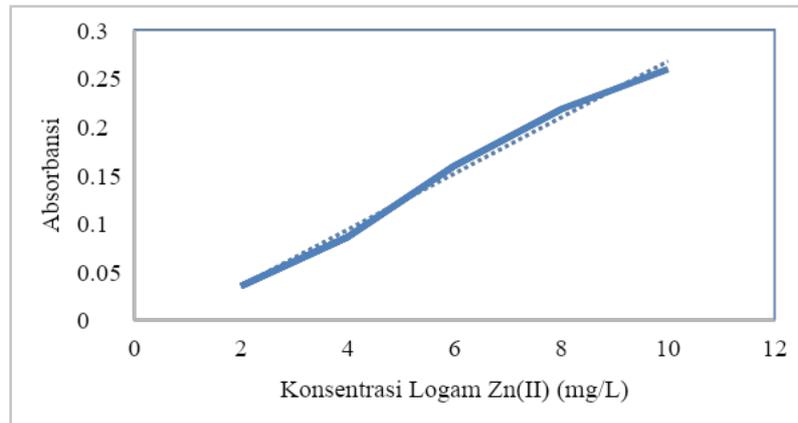


metode Hach-8009. Metode Hach-8009 membutuhkan pengenceran logam Zn(II) karena ketentuan konsentrasi sebesar 0,01-3 mg/L.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Penentuan Garis Standar Regresi Zn(II)

Pembuatan garis standar regresi menggunakan aplikasi Excel kemudian didapatkan persamaan garis regresi linier hubungan antara absorbansi dan konsentrasi larutan standar sebagai berikut :  $y = 0,029x - 0,0227$  dimana  $y$  = nilai absorbansi dan  $x$  = kandungan kadar seng (Zn(II)) didalam air. Nilai koefisien korelasi ( $R^2=99,23\%$ ) berarti kurva pada **Gambar-2** mempunyai keakuratan dalam menentukan konsentrasi sebesar 99,23%.

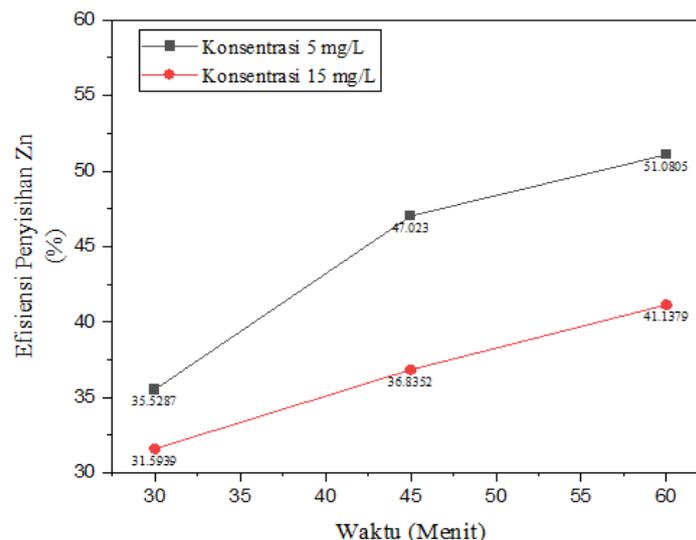


**Gambar-2.** Kurva Kalibrasi Larutan Standar Zn(II)

#### 3.2. Hubungan Warna Cahaya dan Waktu Kontak terhadap Removal Zn(II)

Proses fotosintesis pada mikroalga dipengaruhi oleh panjang gelombang cahaya. Panjang gelombang cahaya yang efektif untuk proses fotosintesis berapa pada rentang 400 - 700 nm. Pada penelitian yang dilakukan oleh Wang dkk (2014), cahaya warna merah dengan spektrum sempit 600 - 700 nm adalah panjang gelombang yang optimal untuk pertumbuhan sebagian besar spesies mikroalga.

Pada penelitian ini, spektrum cahaya warna merah memiliki efisiensi penyerapan logam berat Zn(II) tinggi. Hal tersebut menandakan bahwa gelombang cahaya spektrum merah lebih banyak diserap sehingga dapat meningkatkan kandungan klorofil. Klorofil-a baik dalam menyerap spektrum merah (Wicaksono., 2014). Cahaya merah dapat lebih efisien dalam menyerap klorofil dibandingkan dengan panjang gelombang cahaya lainnya (Wang dkk., 2014).



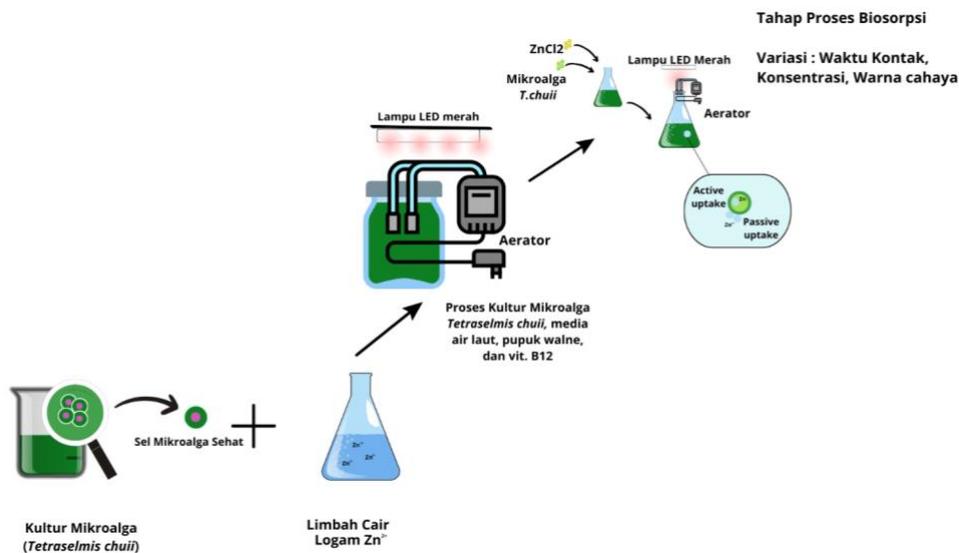
**Gambar-3.** Hubungan Waktu Kontak terhadap Removal Zn(II)

Selain faktor panjang gelombang warna cahaya, efisiensi removal juga dipengaruhi oleh lamanya waktu kontak antara mikroalga *Tetraselmis chuii* dengan limbah cair logam berat Zn(II). Berdasarkan **Gambar-3**, dapat dilihat bahwa peningkatan persen removal logam Zn(II) konsentrasi 5 mg/L dan konsentrasi 15 mg/L berbanding lurus dengan waktu kontak, hal tersebut didukung dengan penelitian yang dilakukan oleh Ameen

dkk (2021). Konsentrasi 5 mg/L menunjukkan persen removal tertinggi pada menit ke-60 hal ini juga terjadi pada konsentrasi 15 mg/L, tetapi persen removal tertinggi didapatkan pada konsentrasi 5 mg/L yaitu 51.0805%. Perbedaan presentase removal ini disebabkan karena presentase optimal penghilangan logam berat pada mikroalga terjadi pada konsentrasi logam awal yang rendah (Irianto dkk., 2022). Selain itu, presentase penyerapan logam berat akan semakin kecil apabila konsentrasi logam berat yang diberikan semakin tinggi. Hal tersebut disebabkan semakin tinggi konsentrasi Zn(II) menimbulkan efek toksik pada mikroalga. Oleh karena itu, mikroalga membutuhkan proses adaptasi yang menyebabkan penurunan efektifitas penyerapan logam berat Zn(II) dan membuat mikroalga stres, hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Pranajaya dkk pada tahun 2014.

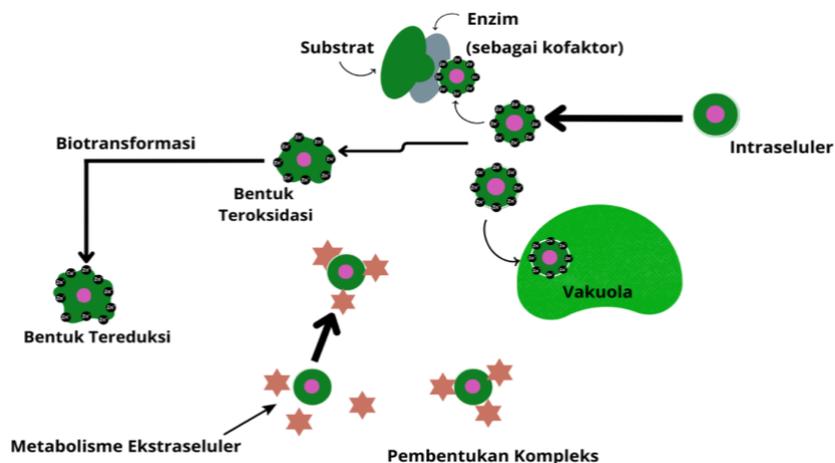
### 3.3 Mekanisme Biosorpsi pada Photobioreaktor

Photobioreaktor memiliki beberapa komponen penunjang untuk mendapatkan kondisi ideal untuk pertumbuhan mikroalga. Terdapat aerator untuk menginjeksikan oksigen ke dalam larutan sehingga kebutuhan *Dissolved Oxygen* (DO) memenuhi.



**Gambar-4.**Ilustrasi Proses Kultur Mikroalga *Tetraselmis chuii* dan Biosorpsi Logam Zn(II)

Pada proses kultur atau perkembangbiakan mikroalga, juga ditambahkan Pupuk Walne, disebabkan kontrol kultur murni yang dibudidayakan dengan menggunakan media Walne, dapat memiliki kandungan lipid tertinggi dibandingkan dengan menggunakan media kimia lainnya (Rizkytata dkk., 2014). Untuk menunjang pertumbuhan mikroalga juga ditambahkan vitamin B12 yang memiliki kegunaan untuk fungsi dari isoform enzim sintase metionin mikroalga (Luo & Moran, 2014). Selain itu, juga terdapat lampu warna merah sebagai perlakuan seperti pada **Gambar-4**.



**Gambar-5** Ilustrasi Penyerapan Logam Zn(II) oleh Mikroalga *Tetraselmis chuii*

Proses biosorpsi (*passive uptake*) terjadi saat ion logam berat mengikat dinding sel dengan cara yang berbeda, yaitu melakukan pertukaran ion antara ion monovalen dan divalen pada dinding sel yang digantikan oleh ion - ion logam berat, terdapat pembentukan kompleks antara ion - ion logam berat dan gugus fungsi seperti karboksil, amino, dan hidroksil yang berada pada dinding sel.

Proses biosorpsi (*passive uptake*) seperti yang ditunjukkan oleh Gambar-5 dapat dilihat bahwa sel mikroalga *Tetraselmis chuii* yang berperan dalam proses adsorpsi mampu menyerap ion logam berat Zn(II). Hal tersebut disebabkan karena pada mikroalga *Tetraselmis chuii* terdapat gugus -OH yang berperan dalam proses biosorpsi. Logam berat Zn(II) yang terserap akan terakumulasi di vakuola.

#### 4. KESIMPULAN

Variasi warna cahaya, waktu kontak, dan konsentrasi logam berat Zn(II) berpengaruh terhadap penyisihan logam berat Zn(II). Warna cahaya merah pada waktu kontak 60 menit dengan konsentrasi logam berat Zn(II) 5 mg/L mampu menyisihkan logam berat Zn(II) dengan persentase sebesar 51.0805%. Penelitian ini telah menunjukkan bahwa mikroalga *Tetraselmis chuii* dapat dimanfaatkan sebagai biosorben untuk menyisihkan air limbah logam berat Zn(II).

#### SARAN

Saran yang dapat disampaikan melalui penelitian yang telah dilakukan untuk mendukung penelitian mendatang adalah meningkatkan tingkat removal dengan cara memodifikasi variasi baik warna cahaya, waktu kontak, dan konsentrasi air limbah artifisial.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dapat dilaksanakan dengan baik berkat bantuan dari berbagai pihak, untuk itu peneliti mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Jenderal Pembelajaran dan Kemahasiswaan kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi republik Indonesia melalui Program Kreativitas Mahasiswa 2023 yang telah memberikan bantuan pendanaan sehingga penelitian dapat terlaksana dengan baik.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Ameen, Mahy M., Mustofa, Abdelraouf A., Mofeed, Jelan., Hasnaoui, Mustapha., Olanrewaju, Oladokun Sulaiman., Lazzaro, Umberto, Guerriero, Giulia. (2021). Factors Affecting Efficiency of Biosorption of Fe (III) and Zn (II) by *Ulva lactuca* and *Corallina officinalis* and Their Activated Carbons. *Water*. 13(23). 2-20. <https://doi.org/10.3390/w13233421>.
- Bharti, R., & Sharma, R. (2022). Effect of heavy metals: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 51, 880-885.
- Cristian, P., Violeta, P., Anita-Laura, R., Raluca, I., Alexandrescu, E., Andrei, S., ... & Ioana, C. A. (2015). Removal of zinc ions from model wastewater system using bicopolymer membranes with fumed silica. *Journal of Water Process Engineering*, 8, 1-10.
- Gunatilake, S. K. (2015). Methods of removing heavy metals from industrial wastewater. *Methods*, 1(1), 14.
- Han, W., Fu, F., Cheng, Z., Tang, B., & Wu, S. (2016). Studies on the optimum conditions using acid-washed zero-valent iron/aluminum mixtures in permeable reactive barriers for the removal of different heavy metal ions from wastewater. *Journal of hazardous materials*, 302, 437-446.
- Ilyas, M., Ahmad, W., Khan, H., Yousaf, S., Yasir, M., & Khan, A. (2019). Environmental and health impacts of industrial wastewater effluents in Pakistan: a review. *Reviews on environmental health*, 34(2), 171-186.
- Irianto, C. N. D., Yulianti, L. I. M., & Sidharta, B. B. R. (2022). Mikroalga *Chlorella* sp. Sebagai Bioremediator Logam Berat. *Bioeksperimen: Jurnal Penelitian Biologi*, 8(1), 45-56.
- Jacob, J. M., Ravindran, R., Narayanan, M., Samuel, S. M., Pugazhendhi, A., & Kumar, G. (2021). Microalgae: A prospective low cost green alternative for nanoparticle synthesis. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 20, 100163.
- Johansen, M. N. (Ed.). (2012). *Microalgae: biotechnology, microbiology, and energy*. Nova Science Publisher's.

- Kumar, N., Hans, S., Verma, R., & Srivastava, A. (2020). Acclimatization of microalgae *Arthrospira platensis* for treatment of heavy metals in Yamuna River. *Water Science and Engineering*, 13(3), 214-222.
- Leong, Y. K., & Chang, J. S. (2020). Bioremediation of heavy metals using microalgae: Recent advances and mechanisms. *Bioresource technology*, 303, 122886.
- Li, J., Schiavo, S., Rametta, G., Miglietta, M. L., La Ferrara, V., Wu, C., & Manzo, S. (2017). Comparative toxicity of nano ZnO and bulk ZnO towards marine algae *Tetraselmis suecica* and *Phaeodactylum tricorutum*. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 6543-6553
- Li, K., Liu, Q., Fang, F., Luo, R., Lu, Q., Zhou, W., ... & Ruan, R. (2019). Microalgae-based wastewater treatment for nutrients recovery: A review. *Bioresource technology*, 291, 121934.
- Luo, H., & Moran, M. A. (2014). Evolutionary ecology of the marine *Roseobacter* clade. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 78(4), 573-587.
- Novianti, T. (2019). Kandungan Betakaroten Dari Mikroalga *Chlorella vulgaris* yang Dikultur Dengan Perlakuan Sumber Cahaya dan Kepadatan Awal Inokulum (KAI) yang Berbeda. *Jurnal Biologi dan Pendidikan Biologi*, Vol. 4(1): 46 – 61.
- Pranajaya, R. H., Djunaedi, A., & Yulianto, B. (2014). Pengaruh Tembaga Terhadap Kandungan Pigmen dan Pertumbuhan Mikroalga Merah *Porphyridium cruentum*. Vol. 19(2): 97-104.
- Priatni, S., Ratnaningrum, D., Warya, S., & Audina, E. (2018, June). Phycobiliproteins production and heavy metals reduction ability of *Porphyridium* sp. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 160, p. 012006). IOP Publishing.
- Rastogi, R. P., Sonani, R. R., & Madamwar, D. (2017). UV photoprotectants from algae—synthesis and bio-functionalities. In *Algal green chemistry* (pp. 17-38). Elsevier.
- Rizkytata, B. T., Gumelar, M. T., & Abdullah, T. H. (2014). Industrial tofu wastewater as a cultivation medium of microalgae *Chlorella vulgaris*. *Energy Procedia*, 47, 56-61.
- Wang, S. K., Stiles, A. R., Guo, C., & Liu, C. Z. (2014). Microalgae cultivation in photobioreactors: An overview of light characteristics. *Engineering in Life Sciences*, 14(6), 550–559. <https://doi.org/10.1002/elsc.201300170>.
- Wicaksono, Gantheng. (2014). Pengaruh Pemberian Spektrum Cahaya Berbeda Terhadap Kandungan Klorofil *Spirulina* sp. Surabaya : Universitas Airlangga. Artikel Ilmiah Skripsi Program Studi Budidaya Perikanan.