

Prof. Dr. Hilda Zulkifli, M.Si., DEA



Potensi Alga

Sebagai Agen Fitoremediasi Logam Berat dalam Pengolahan Air Limbah

**POTENSI ALGA SEBAGAI AGEN
FITOREMEDIASI LOGAM BERAT
DALAM PENGOLAHAN AIR LIMBAH**

Prof. Dr. Hilda Zulkifli, M.Si., DEA

Jurusan Biologi Dan Jurusan Kimia
Fakultas MIPA
Universitas Sriwijaya
2023

Potensi Alga Sebagai Agen Fitoremediasi Logam Berat Dalam Pengolahan Air Limbah

copyright © Februari 2023

Penulis : Prof. Dr. Hilda Zulkifli, M.Si., DEA

Setting Dan Layout : Didi Jaya Santri

Desain Cover : Sri Antika

Hak Penerbitan ada pada © Bening media Publishing 2023.

Anggota IKAPI No. 019/SMS/20

Hakcipta © 2023 pada penulis

Isi diluar tanggung jawab percetakan

Ukuran 16,25 cm x 25 cm

Halaman : vi + 73 hlm

Hak cipta dilindungi Undang-undang

Dilarang mengutip, memperbanyak dan menerjemahkan
sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari
Bening media Publishing

Cetakan I, Februari 2023

The logo for Bening media PUBLISHING features a stylized lowercase 'b' inside a circle, followed by the word 'Bening' in a large, bold, sans-serif font. Below 'Bening' is the text 'media PUBLISHING' in a smaller, all-caps, sans-serif font.

Jl. Padat Karya

Palembang – Indonesia

Telp. 0823 7200 8910

E-mail : bening.mediapublishing@gmail.com

Website: www.bening-mediapublishing.com

ISBN : 978-623-8006-70-0

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	ii
PENGANTAR	v
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1. Karakteristik Mikroalga.....	1
1.2. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan Mikroalga.....	3
BAB 2. KARAKTERISTIK LOGAM DALAM AIR LIMBAH	7
2.1. Sifat-Sifat Logam Berat.....	8
2.2. Faktor Yang Mempengaruhi Daya Racun Logam Berat Di Perairan	9
2.3. Berbagai Jenis Logam Berat Yang Umum Dideteksi Dalam Limbah Cair.....	10
BAB 3. MIKROALGA DALAM PENGOLAHAN LOGAM BERAT AIR LIMBAH	19
3.1. Biosorpsi.....	20
3.2. Mekanisme Proses Biosorpsi Logam Berat Oleh Mikroalga.....	24
BAB 4. PEMANFAATAN <i>SPIRULINA</i> Sp. SEBAGAI PENYERAPAN LOGAM BERAT Zn.....	27
4.1. <i>Spirulina</i> sp.....	27
4.2. Laju Pertumbuhan <i>Spirulina</i> sp. Dalam Media Di Laboratorium	30
4.3. Penyerapan Logam Berat Zing (Zn) Dalam Kondisi Laboratorium.....	33
BAB 5. PEMANFAATAN <i>OSCILLATORIA</i> Sp. SEBAGAI PENYERAPAN LOGAM BERAT Cd.....	35
5.1. <i>Oscillatoria</i> sp.	35
5.2. Laju Pertumbuhan <i>Oscillatoria</i> sp. Dalam Media Di Laboratorium.....	38
5.3. Kelimpahan <i>Oscillatoria</i> sp. Dalam Media Tumbuh Mengandung Logam	41
5.4. Penyerapan Logam Berat Cd Dalam Kondisi Laboratorium	43

5.5. Konsentrasi Logam Berat Cd Pada Media Kultur	44
BAB 6. PEMANFAATAN <i>Scenedesmus</i> sp. SEBAGAI PENYERAPAN LOGAM BERAT Zn DAN Cd.....	47
6.1. <i>Scenedesmus</i> Sp.	47
6.2. Biomassa Alga.....	49
6.3. Laju Pertumbuhan <i>Scenedesmus</i> sp. Dalam Media Di Laboratorium.....	51
6.4. Kelimpahan <i>Scenedesmus</i> sp. Dalam Media Tumbuh Mengandung Logam.....	55
6.5. Penyerapan Logam Berat Cd Dalam Kondisi Laboratorium	57
6.6. Konsentrasi Logam Berat Cd Pada Media Kultur	59
DAFTAR PUSTAKA.....	63

PENGANTAR

Alga merupakan organisme tanpa organ seperti akar, batang, daun. Dalam taksonomi, alga bukan dikelompokkan tersendiri berdasarkan kenyataan bahwa adanya alga yang bervariasi berdasarkan penemuan yang ada di alam. Berdasarkan sel yang ada alga dikelompokkan menjadi alga bersel tunggal dan bersel jamak. Dalam rantai makanan makhluk hidup alga menempati posisi pertama sebagai sumber bahan makanan seperti ikan-ikan di perairan. Alga dapat ditemukan baik di perairan tawar, laut, pegunungan, bukit, maupun di batuan. Alga umum yang ditemukan pada kebanyakan perairan air tawar yakni alga hijau (*Chloropiceae*) (Metting, 1996). Dalam perairan, alga bukan merupakan polutan dan banyak dimanfaatkan bagi perkembangan ilmu pengetahuan terutama dalam mempelajari proses fotosintesis di alam. Pemanfaatan alga pada saat ini berkembang pesat seiring jumlahnya yang tak habis dan banyak dijumpai di alam sekitar terutama pada perairan yang tenang dengan arus yang rendah. Pemanfaatan alga secara keilmuan didasarkan atas kandungan karbon/biomassa yang dimilikinya. Disamping itu alga dapat berfungsi sebagai *green materials* karena tidak memiliki efek racun dan tidak menghasilkan limbah yang berbahaya. Hal ini memberikan nilai yang signifikan terhadap pengembangan alga bagi kehidupan manusia.

Salah satu sumber perairan tenang dengan arus rendah adalah ekosistem habitat rawa. Ekosistem habitat rawa banyak ditemukan di Sumatera Selatan dengan topografi tanah yang rendah. Fenomena ini memberikan bukti bahwa ekosistem habitat rawa banyak dipenuhi oleh berbagai jenis alga yang merupakan sumber bahan makanan bagi berbagai jenis ikan air tawar. Kandungan biomassa yang tinggi alga

dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan melalui konversi menjadi biodiesel dan bioetanol (Alam dkk, 2015; Chisti, 2007; Ghirardi, 2000). Disamping itu alga juga memiliki potensi sebagai adsorben dalam penanganan cemaran logam-logam berat maupun radioaktif karena adanya gugus-gugus aktif yang dimilikinya (Anastopoulos & Kyzas, 2015; Kalin dkk, 2005). Beberapa alga hijau yang terdapat di perairan air tawar maupun di lautan telah digunakan sebagai adsorben logam-logam dalam mengatasi cemaran lingkungan (Bakatula dkk, 2014; Birungi & Chirwa, 2015; Bulgariu & Bulgariu, 2012; Jayakumar dkk, 2019).

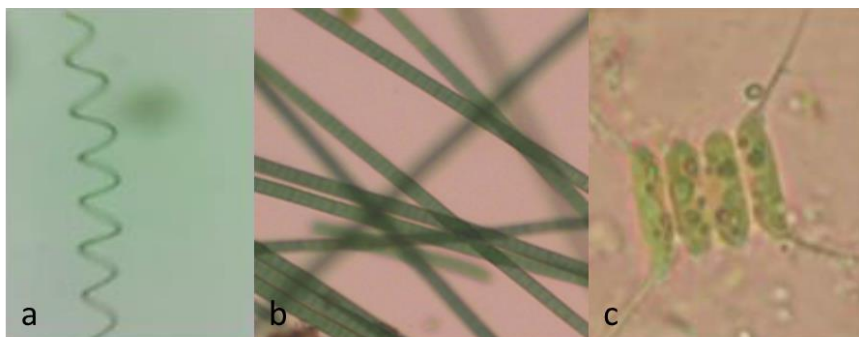
Berdasarkan hal tersebut, penulisan buku referensi ini berfugnsi untuk menyajikan keunggulan beberapa jenis alga (mikroalga) yang berasal dari habitat ekosistem air rawa sebagai adsorben berbagai jenis logam berat yakni Cu(II), Cr(III), Cd(II), Mn(II), dan Pb(II) yang merupakan logam-logam berat yang sering dijumpai baik disekitar wilayah industri maupun perairan alam di Sumatera Selatan.

Materi dalam buku referensi bersumber dari berbagai hasil penelitian yang dilakukan bersama dengan dosen maupun mahasiswa baik dari Program Studi Sarjana, Magister, maupun Doktor dari Fakultas MIPA Universitas Sriwijaya. Ucapan terima kasih terutama disampaikan kepada Dr.rer.nat Risfidian Mohadi yang telah bekerjasama sejak awal penelitian ini dilakukan dengan menggunakan dana Hibah Profesi Universitas Sriwijaya. Buku ini diharapkan dapat memberikan sumbangsih keilmuan bagi semua kalangan ilmuwan.

PENDAHULUAN

1.1. Karakteristik Mikroalga

Mikroalga merupakan kelompok organisme berukuran renik, baik bersel tunggal (uniseluler) maupun multiseluler yang hidup di seluruh wilayah perairan tawar dan perairan laut. Mikroalga lebih dikenal dengan sebutan fitoplankton. Mikroalga sama seperti tumbuhan membutuhkan karbondioksida (CO_2) dari udara, memerlukan cahaya matahari untuk proses fotosintesis. Sel mikroalga mampu tumbuh dengan cepat sehingga biomassa selnya dapat dipanen dalam waktu singkat yakni 7-10 hari (Setiarto, 2020b). Mikroalga memiliki kandungan selulosa dan hemiselulosa yang tinggi dan tidak mengandung lignin, terutama pada mikroalga hijau (Harun dkk, 2010).



Gambar 1.1. Mikroalga
a. *Spirulina* sp. b. *Oscillatoria* sp. c. *Scenedesmus* sp.

Habitat mikroalga umumnya di perairan tawar maupun laut ataupun di lokasi yang lembab. Mikroalga melakukan proses fotosintesa untuk menghasilkan makanannya sendiri dengan bantuan sinar matahari karena tergolong fotoautotrof, namun diwaktu yang sama mikroalga dapat mengambil CO₂ dari lingkungannya. Mikroalga merupakan jenis organisme unisel yang berkoloni atau soliter. Ukuran mikroalga bermacam-macam tergantung pada jenisnya, mulai dari beberapa μm hingga mencapai ratusan μm (Winahyu dkk, 2013).

Habitat mikroalga umumnya di perairan tawar maupun laut ataupun di lokasi yang lembab. Mikroalga melakukan proses fotosintesa untuk menghasilkan makanannya sendiri dengan bantuan sinar matahari karena tergolong fotoautotrof, namun diwaktu yang sama mikroalga dapat mengambil CO₂ dari lingkungannya. Mikroalga merupakan jenis organisme unisel yang berkoloni atau soliter. Ukuran mikroalga bermacam-macam tergantung pada jenisnya, mulai dari beberapa μm hingga mencapai ratusan μm (Winahyu dkk, 2013).

Pertumbuhan dan perkembangan mikroalga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan kandungan nutrisi dalam media tumbuhnya. Kemampuan mikroalga untuk merubah kandungan nutrisi akibat pengaruh lingkungan dapat dikelompokkan dalam tiga bentuk yaitu autotrof, heterotrof, dan miksotrof. Kultur autotrofik, mikroalga mempunyai klorofil yang dapat berfotosintesis dan hidup dari nutrisi anorganik serta menghasilkan zat-zat organik dari bantuan H₂O, CO₂ dan sinar matahari untuk menghasilkan energi. Kultur heterotrof memperoleh unsur-unsur dan energi yang diperlukan untuk proses metabolisme dari senyawa organik yang disintesis oleh organisme, sedangkan kultur miksotrof, mikroalga menggunakan keduanya yakni fotosintesis dan konsumsi nutrisi organik.

Diperkirakan bahwa 40% fotosintesis secara global dilakukan oleh mikroalga. Selain itu mikroalga juga memiliki berbagai potensi yang dapat dikembangkan seperti sebagai sumber pakan, pangan, dan bahan kimia lainnya. Mikroalga sudah dikenal sebagai bahan baku industri farmasi, kosmetika, dan biofuel (Kurniawan & Aunurohim, 2014). Mikroalga merupakan mikroorganisme fotosintetik yang mampu mengkonversi cahaya matahari, air dan karbondioksida menjadi biomassa. Biomassa mikroalga mengandung bahan-bahan penting di dalamnya seperti protein, karbohidrat, dan lipid.

Alga merupakan produsen di ekosistem perairan, keberadaanya sangat vital dalam menjaga ekosistem perairan. Dalam rantai makanan alga menempati posisi pertama sebagai sumber bahan makanan konsumen di perairan. Alga umum yang ditemukan di kebanyakan perairan air tawar yakni alga hijau (Chlorophyceae) (Metting, 1996). Pemanfaatan alga pada saat ini berkembang pesat seiring dengan populasinya di alam terutama pada perairan yang tenang dengan arus yang rendah. Pemanfaatan alga secara keilmuan didasarkan atas kandungan karbon/biomassa yang dimilikinya. Disamping itu alga dapat berfungsi sebagai green materials karena tidak memiliki efek racun dan tidak menghasilkan limbah yang berbahaya. Hal ini memberikan nilai yang signifikan terhadap pengembangan alga bagi kehidupan manusia (Spolaore dkk, 2006).

1.2. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan Mikroalga

Beberapa faktor yang mempengaruhi pertumbuhan mikroalga antara lain sebagai berikut:

a. Intensitas Cahaya

Cahaya menjadi faktor penting dalam pertumbuhan mikroalga karena dibutuhkan dalam proses fotosintesis. Aktivitas fotosintesis naik seiring kenaikan intensitas cahaya. Hal ini menjadi penting apabila mikroalga dibiakkan dalam kedalaman tertentu, semakin dalam medium mikroalga, intensitas cahaya yang dibutuhkan juga semakin tinggi (Hadiyanto & Azim, 2012). Menurut penelitian (Febriani, Hasibuan, & Syafriadiman, 2020), Intensitas cahaya berpengaruh terhadap kepadatan dan kandungan karotenoid *Dunaliella salina*. Hasil penelitian (Yusuf, 2014), menunjukkan intensitas cahaya yang optimum untuk *Spirulina platensis* adalah 1500-3000 lux.

Mikroalga termasuk golongan mikroorganisme yang membutuhkan cahaya matahari dalam melakukan fotosintesis untuk pertumbuhannya. Pada kondisi tumbuh secara fototropik, mikroalga memperoleh energi dari cahaya matahari dan CO₂ dengan memanfaatkan klorofil dan pigmen lainnya yang berperan dalam proses fotosintesis. Akan tetapi, bagi jenis mikroalga yang mampu tumbuh secara heterotrofik, kehadiran cahaya matahari tidak dibutuhkan karena mikroalga mampu bertumbuh dengan memanfaatkan karbon organik sebagai sumber energi pada kondisi tanpa cahaya (Gultom, 2018).

b. Suhu

Suhu adalah salah satu faktor yang berpengaruh terhadap produktifitas mikroalga, karena setiap spesies mempunyai suhu optimalnya tersendiri. Peningkatan suhu air menyebabkan peningkatan aktivitas sel sehingga metabolisme berjalan lebih cepat. Akan tetapi suhu yang tinggi menyebabkan kematian dengan cepat. Suhu optimal untuk pertumbuhan mikroalga berkisar 15-30°C (Regista, Ambeng, Litaay, & Umar, 2017). Suhu air sangat berperan dalam kultur mikroalga di

laboratorium, karena sangat mempengaruhi aktivitas enzim dalam metabolisme sel (Endrawati & Riniatsih, 2013). Suhu yang optimal untuk pertumbuhan *Spirulina* sp. berkisar antara 20-30°C (Hariyati, 2008)

c. Nutrien

Nutrien adalah faktor penting dalam produksi biomassa alga. Sebagian besar mikroalga membutuhkan makronutrien seperti karbon (C), nitrogen (N), hidrogen (H), sulfur (S), kalium (K), magnesium (Mg), dan fosfor (P). Sedangkan mikronutrien digunakan untuk meningkatkan pertumbuhan sel dan metabolisme. Beberapa unsur mikronutrien di antaranya besi (Fe), boron (B), mangan (Mn), vanadium (V), silikon (Si), selenium (Se), cuprum (Cu), nikel (Ni), dan molybdenum (Mo) (Hadiyanto dan Azim, 2012).

d. Karbondioksida (CO₂)

Mikroalga dalam pertumbuhannya selain memerlukan cahaya matahari, unsur hara juga tidak kalah pentingnya yaitu CO₂. Kehadiran CO₂ dalam medium akan dimanfaatkan oleh sel mikroalga untuk melaksanakan fotosintesis. CO₂ digunakan oleh mikroalga sebagai sumber karbon karena sifat hidup yang fototrof. CO₂ dapat membantu mikroalga untuk melaksanakan fotosintesis yang lebih cepat, sehingga nutrisi yang ada di dalam medium masih ada dan dapat digunakan untuk pertumbuhan berikutnya. Dari proses fotosintesis tersebut akan dihasilkan karbohidrat sederhana yang dapat dirubah menjadi senyawa organik. Terbentuknya senyawa organik akan meningkatkan biomassa mikroalga tersebut.

e. Derajat Keasaman (pH)

Pada pertumbuhannya, mikroalga ini tergantung pada faktor lingkungan seperti derajat keasaman (pH), karena pH lingkungan akan mempengaruhi metabolisme sel mikroalga. Derajat keasaman media

menentukan kelarutan dan ketersediaan ion mineral sehingga dengan ketersediaan nutrient yang cukup akan mempengaruhi penyerapan nutrient oleh sel. Kisaran pH untuk pertumbuhan pada kebanyakan mikroalga antara 7-9 (Nurhayati, Hamzah, & Pambayun, 2014). pH mempengaruhi tingkat fotosintetik mikroalga dan kinerja enzim dalam proses metabolisme sel (Adi, Anggreni, & Arnata, 2015). pH yang optimal untuk pertumbuhan *Spirulina* sp. berkisar antara 7-11 (Muliani, Ayuzar, & Amri, 2018)

Derajat keasaman atau pH merupakan nilai yang menunjukkan aktivitas ion hidrogen dalam air. Nilai pH suatu perairan dapat mencerminkan keseimbangan antar asam dan basa dalam perairan tersebut. Penyerapan CO₂ bebas dan bikarbonat oleh mikroalga menyebabkan penurunan konsentrasi CO₂ terlarut dan mengakibatkan peningkatan nilai pH (Harmoko, Lokaria, & Misra, 2017).

2**KARAKTERISTIK LOGAM BERAT
DALAM AIR LIMBAH**

Logam dapat digolongkan ke dalam dua jenis, yaitu logam berat dan logam ringan. Logam berat adalah logam dengan berat lebih dari sama dengan 5 g/cm^3 . Logam berat digolongkan sebagai logam non esensial dan pada tingkat tertentu dapat menjadi beracun bagi makhluk hidup. Sedangkan logam ringan adalah logam dengan berat kurang dari 5 g/cm^3 . Logam berat tidak dapat didegradasi (*non degradable*) maupun dihancurkan. Senyawa ini dapat masuk ke dalam tubuh manusia melalui makanan, air minum, dan udara. Pada kadar rendah, logam berat diperlukan oleh makhluk hidup untuk pengaturan berbagai fungsi kimia dan fisiologi tubuh (Irianti, Kuswandi, Nuranto, & Budiyatni, 2017).

Berdasarkan sudut pandang toksikologi, logam berat ini dapat dibagi dalam dua jenis. Jenis pertama adalah logam berat esensial, di mana keberadaannya dalam jumlah tertentu sangat dibutuhkan oleh organisme hidup, namun dalam jumlah yang berlebihan dapat menimbulkan efek racun. Contoh logam berat ini adalah Zn, Cu, Fe, Co, Mn, dan lain sebagainya. Jenis kedua adalah logam berat tidak esensial atau beracun, di mana keberadaannya dalam tubuh masih belum diketahui manfaatnya atau bahkan dapat bersifat racun, seperti Hg, Cd, Pb, dan lain-lain. Logam berat ini dapat menimbulkan efek kesehatan

bagi manusia tergantung pada bagian mana logam berat tersebut terikat dalam tubuh (Said, 2018).

2.1. Sifat-Sifat Logam Berat

Logam berat seng (Zn), tembaga (Cu), besi (Fe), kadmium (Cd) dan timbal (Pb) adalah unsur-unsur logam berat yang secara alami ada di alam dan dapat bersifat racun bagi sel dalam dosis tertentu. Logam berat yang masuk ke dalam lingkungan perairan akan mengalami pengendapan, pengenceran dan dispersi, kemudian diserap oleh organisme yang hidup di perairan tersebut. Sebagian larut dalam air, sebagian tenggelam ke dasar dan terkonsentrasi ke sedimen, dan sebagian masuk ke dalam jaringan tubuh organisme laut termasuk fitoplankton, ikan, udang, cumi-cumi, kerang, rumput laut, dan lain-lain (Masitoh, Prajanti, Mustika, & Nurhasni, 2014).

Menurut Supriyantini & Soenardjo (2015), logam berat merupakan zat pencemar yang berbahaya karena tidak dapat terdegradasi secara alami dan cenderung terakumulasi dalam air, sedimen dasar perairan, dan tubuh organisme. Logam berat mempunyai sifat yang mudah mengikat bahan organik dan mengendap di dasar perairan dan berikatan dengan partikel-partikel sedimen.

Keberadaan logam berat di lingkungan sangat berbahaya jika melebihi ambang batas konsentrasi tertentu serta memiliki banyak efek yang merugikan kesehatan. Pada jangka waktu yang panjang, paparan logam berat terus meningkat di banyak bagian dunia. Berdasarkan Adhani & Husaini (2017), sifat logam berat yang dapat membahayakan lingkungan dan manusia adalah:

- a. Logam berat sulit didegradasi, sehingga cenderung akan terakumulasi pada lingkungan.

- b. Logam berat dapat terakumulasi dalam tubuh organisme dan konsentrasi dapat semakin tinggi, atau dapat mengalami bioakumulasi dan biomagnifikasi.
- c. Logam berat mudah terakumulasi pada sedimen, sehingga konsentrasi selalu lebih tinggi daripada konsentrasi logam dalam air.

2.2. Faktor Yang Mempengaruhi Daya Racun Logam Berat Di Perairan

Menurut Palar (2008), ada banyak faktor yang mempengaruhi daya racun dari logam berat yang terlarut dalam badan perairan. Dari banyak faktor tersebut yang menjadi penentu dari daya racun yang ditimbulkan oleh logam berat terlarut, ada 4 faktor yang sangat penting yaitu sebagai berikut:

a. Bentuk Logam Dalam Air

Apakah logam-logam tersebut berada dalam bentuk senyawa organik atau senyawa anorganik. Selanjutnya bentuk persenyawaan ini dibagi lagi, apakah berupa senyawa-senyawa organik dan senyawa-senyawa anorganik yang tidak dapat larut. Selanjutnya, senyawa-senyawa organik yang dapat larut dalam badan perairan akan dapat diserap dengan mudah oleh biota perairan.

b. Keberadaan Logam-Logam Lain

Adanya logam-logam lain dalam badan perairan dapat menyebabkan logam-logam tertentu menjadi sinergentis atau sebaliknya, menjadi antagonis bila telah membentuk suatu ikatan. Di samping itu interaksi antara logam-logam tersebut bisa juga gagal atau tidak terjadi sama sekali. Tetapi untuk logam-logam berat yang bersifat sinergentis, apabila bertemu dengan pasangan dan membentuk suatu persenyawaan dapat berubah fungsi menjadi racun yang sangat

berbahaya dan atau mempunyai daya racun berlipat ganda. Sebaliknya, untuk logam-logam berat yang bersifat antagonis, apabila terjadi persenyawaan dengan pasangannya maka daya racun yang ada pada logam berat tersebut akan berkurang atau semakin kecil.

c. Fisiologis Dari Biota (Organisme)

Proses fisiologis yang terjadi pada setiap biota turut mempengaruhi tingkat logam berat yang menumpuk (akumulasi) dalam tubuh dari biota perairan. Besar kecilnya jumlah logam berat yang terkandung dalam tubuh akan daya racun yang ditimbulkan oleh logam berat. Disamping itu, proses fisiologi turut mempengaruhi peningkatan kandungan logam berat dalam badan perairan. Ada biota-biota tertentu yang mempunyai kemampuan untuk menetralisasi (mentoleransi) logam-logam berat tertentu sampai pada konsentrasi tertentu pula (mempunyai toleransi tinggi). Sementara itu, ada biota-biota lain yang tidak memiliki kemampuan untuk menetralisasi daya racun dari logam-logam berat yang masuk (toleransi rendah).

d. Kondisi Biota

Kondisi dari biota-biota berkaitan dengan fase-fase kehidupan oleh biota tersebut. Pada fase-fase tertentu, dalam kehidupan suatu biota mungkin merupakan fase yang sangat sensitif. Sebagai contoh adalah fase telur. Namun demikian ada pula fase di mana biota memiliki daya tahan yang kuat dan biasanya berada pada fase dewasa.

2.3. Berbagai Jenis Logam Berat Yang Umum Dideteksi Dalam Limbah Cair

Kromium (Cr)

Kata kromium berasal dari bahasa Yunani (*Chroma*) yang berarti warna. Dalam bahan kimia, kromium dilambangkan dengan "Cr". Sebagai

salah satu logam berat, Cr mempunyai nomor atom 24 dan mempunyai berat atom 51,996 (Palar, 2008). Cr terletak pada periode 4, golongan IVB. Umumnya, di alam ditemukan dalam bentuk persenyawaan dengan unsur lain dan ditemukan dalam bentuk *chromite* ($\text{FeO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$) serta tidak dapat teroksidasi oleh udara yang lembab dan proses pemanasan cairan (Berniyanti, 2018). Pada lingkungan perairan krom (Cr) umumnya dalam bentuk kation Cr^{3+} dan anion Cr^{6+} . Cr^{6+} lebih toksik dibandingkan dengan Cr^{3+} , karena sifatnya yang berdaya larut dan mobilitas tinggi di lingkungan (Santosa, 2014).

Logam Cr termasuk bahan kimia yang bersifat persisten, bioakumulatif, dan toksik yang tinggi serta tidak mampu terurai dalam lingkungan. Sifat fisik dari kromium yaitu zat padat berbentuk kristal (*crystalline solids*), logam berkilau, getas, dan keras, serta berwarna perak abu-abu. Ketika dipanaskan, kromium membentuk oksida kromat hijau (Berniyanti, 2018)

Secara alami, keberadaan logam berat Cr pada suatu perairan memiliki jumlah yang sangat kecil bersumber dari proses pelapukan batuan dan *run-off* dari daratan, namun logam berat Cr dapat meningkat dengan jumlah yang besar akibat oleh kegiatan manusia seperti kegiatan industri, limbah rumah tangga, dan kegiatan lainnya yang kemudian limbah tersebut masuk ke dalam perairan. Masuknya bahan pencemar ke perairan akan mempengaruhi kualitas air dan organisme yang hidup di perairan tersebut (Nuraini, Endrawati, & Maulana, 2017). Dampak toksisitas Cr bagi organisme akuatik menyebabkan terganggunya metabolisme akibat terhalangnya kerja enzim dalam proses fisiologis (Kristianto et al., 2017)

Aktivitas manusia yang berkontribusi pada pencemaran Cr diantaranya berasal dari buangan industri-industri pelapisan krom,
Universitas Sriwijaya

pabrik tekstil, pabrik cat, penyamakan kulit, pabrik tinta dan pengilangan minyak (Adhani dan Husaini, 2017). Logam berat Cr dalam konsentrasi yang melewati baku mutu dapat membahayakan dan mencemari lingkungan. Pemerintah telah menentukan batas baku mutu logam berat Cr yang diijinkan di lingkungan. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup tercatat bahwa nilai maksimal yang diijinkan baku mutu logam berat Cr sebesar 1 mg/L.

Nikel (Ni)

Nikel adalah logam dengan nomor atom 28, massa atom 58,69 dan dilambangkan dengan "Ni". Pada sistem periodik unsur terletak pada periode 4, golongan VIII B. Wujud logam ini yaitu berwarna putih perak yang keras, bersifat liat, dapat ditempa, dan sangat kokoh. Ni melebur pada 1455°C dan bersifat sedikit magnetis (Adhani dan Husaini, 2017). Ni termasuk salah satu unsur kimia yang banyak terdapat di alam semesta. Ni memiliki sifat logam yang kekuatan dan kekerasannya menyerupai besi, lebih stabil dari besi dan lebih sulit teroksidasi. Daya tahan terhadap korosi dan karat lebih dekat dengan tembaga. Kombinasi dari sifat-sifat-sifat yang lebih baik yang menyebabkan penggunaan dari nikel sangat luas (Rasyid, 2019).

Ni dapat tersebar secara luas di lingkungan dan dapat di temukan di air, tanah, dan udara. Penggunaan logam Ni sangat banyak kegunaannya pada kegiatan industri. *Nickel Institute* menyebutkan bahwa nikel dapat ditemukan pada lebih dari 300.000 produk sebagai untuk konsumen, industri, militer, transportasi, kelautan, dan aplikasi arsitektur (Miaratiska & Azizah, 2015). Beberapa kegunaan nikel

diantaranya untuk pembuatan alat-alat laboratorium fisika dan kimia yang digunakan dalam bentuk paduan atau campuran, pembuatan baja tahan karat sebagai selaput penutup barang-barang yang terbuat dari besi atau baja, pembuatan alat-alat yang dipakai dalam industri mobil dan pesawat terbang, untuk pigmen cat, bahan pelapis uang koin (Berniyanti, 2018).

Penggunaan Ni dalam industri dapat memberikan dampak buruk jika tidak diperhatikan dengan baik untuk dosis dan penanganannya (Miaratiska & Azizah, 2015). Ni dari aktivitas pertambangan akan masuk ke muara sungai dan menuju perairan pesisir. (Zakir, Hamid, & Emiyarti, 2019). Proses biosorpsi menggunakan mikroalga dapat menjadi alternatif mengatasi pencemaran logam berat. Mikroalga *Nannochloropsis salina* dapat menyerap ion Ni^{2+} dengan efisiensi penyerapan 55,15%. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 tahun 2021, nilai maksimal yang diizinkan baku mutu logam berat Ni sebesar 0,1 mg/L.

Besi (Fe)

Besi adalah salah satu elemen kimiawi yang dapat ditemui pada hampir setiap tempat di bumi, pada semua lapisan geologis dan semua air, dilambangkan dengan "Fe" (Adeko, 2018). Pada umumnya besi yang ada dalam air dapat bersifat:

- a. Terlarut sebagai Fe^{2+} (ferro) atau Fe^{3+} (ferri)
- b. Tersuspensi sebagai butir koloidal (diameter < $1\mu\text{m}$) atau lebih besar
- c. Tergabung dengan zat atau zat padat yang inorganis (seperti tanah liat)

Pada air permukaan jarang ditemui kadar Fe lebih besar dari 1 mg/L, tetapi di dalam air tanah kadar Fe yang lebih tinggi ini dapat

dirasakan dan dapat menodai kain dan perkakas dapur. Dalam air minum, Fe menimbulkan rasa dan bekas warna (kuning). Pengendapan pada dinding pipa, pertumbuhan bakteri besi dan kekeruhan. Zat besi merupakan suatu komponen dari berbagai enzim yang mempengaruhi seluruh reaksi kimia yang penting didalam tubuh. Fe juga merupakan komponen dari hemoglobin yang memungkinkan sel darah merah membawa oksigen dan mengantarkan ke jaringan tubuh (Naingolan, 2011).

Fe dalam air berbentuk ion bervalensi dua (Fe^{2+}) dan bervalensi tiga (Fe^{3+}) tergantung kondisi pH dan oksigen terlarut dalam air. Dalam bentuk ikatan dapat berupa Fe_2O_3 , $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, atau FeSO_4 tergantung dari unsur lain yang mengikatnya. Besi dalam air bersumber dari dalam tanah sendiri disamping dari sumber lain, diantaranya dari larutnya pipa besi, reservoir air dari besi atau endapan-endapan buangan industry (Setiarto, 2020). Pada air permukaan jarang ditemui kadar $\text{Fe} > 12 \text{ mg/L}$, tapi dalam air tanah kadar Fe dapat jauh lebih tinggi. Pada air yang tidak mengandung O_2 seperti air tanah, sering kali berada sebagai Fe^{2+} teroksidasi menjadi Fe^{3+} . Fe^{3+} sulit larut pada pH 6-8, dapat menjadi ferihidroksida atau salah satu jenis oksida yang merupakan zat padat dan bisa mengendap. Dalam air sungai, Fe membentuk ion Fe^{2+} , Fe^{3+} terlarut dan Fe^{3+} dalam bentuk senyawa organik berupa koloid. Pada perairan alami dengan pH sekitar 7 dan kadar oksigen terlarut yang cukup, ion ferro yang bersifat mudah larut dioksidasi menjadi ion ferri. Pada oksidasi ini terjadi pelepasan elektron. Sebaliknya, pada reduksi ferri menjadi ferro terjadi penangkapan elektron. Proses oksidasi dan reduksi Fe tidak melibatkan oksigen dan hidrogen (Eckenfelder, 1989).

Pada pH sekitar 7,5-7,7, ion ferri mengalami oksidasi dan berikatan dengan hidroksida membentuk $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yang bersifat tidak

larut dan mengendap (presipitasi) di dasar perairan, membentuk warna kemerahan pada substrat dasar. Oleh karena itu, Fe hanya ditemukan pada perairan yang berada dalam kondisi anaerob (anoksik) dan suasana asam (Cole, 1988 dalam Sembiring, 2010). Fenomena serupa terjadi pada badan sungai yang menerima aliran air asam dengan kandungan besi (ferro) cukup tinggi. Sebagai penanda terjadinya pemulihan (*recovery*) kualitas air, pada bagian hilir sungai dasar perairan berwarna kemerahan karena terbentuknya $\text{Fe}(\text{OH})_3$ sebagai konsekuensi dari meningkatnya pH dan terjadinya proses oksidasi Fe (ferro) (Cole, 1988 dalam Sembiring 2010). Pada perairan alami, Fe berikatan dengan anion membentuk senyawa FeCl_2 , $\text{Fe}(\text{HCO}_3)$, dan $\text{Fe}(\text{SO}_4)$. Zat besi yang terlalu banyak dalam tubuh bisa membuat reaksi reaktif yang dapat dengan mudah berikatan dengan radikal bebas dan menyebabkan stress oksidatif yang mempunyai potensi untuk merusak sel, organ, dan jaringan yang ada di dalam tubuh (Aldi dkk, 2019). Tingginya kandungan logam Fe akan berdampak terhadap kesehatan manusia diantaranya bisa menyebabkan keracunan, kanker, penuaan dini hingga kematian mendadak (Atikah, 2021). Pada perairan yang diperuntukkan bagi keperluan domestik, pengendapan ion ferri dapat mengakibatkan warna kemerahan pada porselin, bak mandi, pipa air, dan pakaian. Kelarutan besi meningkat dengan menurunnya pH.

Seng (Zn)

Seng umumnya dilambangkan dengan “Zn” merupakan unsur yang berguna pada manusia, binatang maupun tumbuhan. Menurut permenkes standar dalam air minum maksimum yang diperbolehkan adalah 15 mg/L. Efek racun Zn untuk manusia adalah pada konsentrasi yang tinggi antara 300-360 mg/L, yaitu menyebabkan gangguan fisik

seperti diare yang berat, kram perut dan muntah. Suatu sumber air minum yang mengandung Zn 26,6 mg/L tidak berbahaya bagi manusia, tetapi untuk air minum dengan kadar Zn 30,8 mg/L sudah menyebabkan mual dan mabuk. Dari segi estetika air yang mengandung Zn 30 mg/L akan tampak seperti susu dan bila direbus timbul suatu lapisan seperti minyak pada permukaan airnya (Suprijanto dan Agustina, 1988).

Konsentrasi tertinggi sebagai standar yang akan ditetapkan harus dibawah batas konsentrasi yang dapat menimbulkan rasa. Dalam jumlah kecil, Zn merupakan unsur yang penting untuk metabolisme karena kekurangan Zn dapat menyebabkan hambatan pada pertumbuhan anak. Dalam jumlah besar unsur ini dapat menimbulkan rasa pahit dan sepat pada air minum (Sutrisno, 1991). Masuknya Zn ke sungai sebagai akibat dari limpasan air permukaan tanah yang umumnya disebabkan oleh hujan. Zn yang berasal dari adisi limbah industri, umumnya terdapat dalam bentuk sphalerite (ZnS) dan smithsonite ($ZnCO_3$). Sekitar $\frac{3}{4}$ dari total Zn diperoleh dari pembentukan logam dan masing-masing komponen Zn tergantung jenis industrinya. Hutagalung (1984) menyatakan bahwa sumber logam Zn di perairan berasal dari material geokimia yang terbawa atau ada pada sungai, bahan baku minyak, besi, cat dan sisa-sisa kaleng bekas. Pada industri tekstil, logam seng dapat berfungsi sebagai bahan kimia tambahan pada proses penyempurnaan akhir juga untuk pengawetan serat khususnya anti jamur (fungisida) dan insektisida (Setiarto, 2020). Logam seng juga merupakan bagian dari penyusun zat warna tekstil terutama zat warna dari kompleks logam dan pigmen.

Kelarutan logam Zn dalam air relatif rendah. Logam Zn dengan gugusan klorida dan sulfat mudah terlarut ke dalam sedimen, sehingga logam Zn di perairan banyak mengendap di dasar. Menurut Bryan dalam

Efendi (2000) menyatakan bahwa pengendapan logam di perairan terjadi karena adanya anion karbonat, hidroksil, dan klorida. Permenkes Nomor 32 Tahun 2017 berisi tentang Standar Baku Mutu (kadar maksimum) Lingkungan untuk Zn dalam air minum maksimum yang diperbolehkan adalah 15 mg/L.

Kadmium (Cd)

Kadmium adalah logam berwarna putih perak, lunak, mengkilap, tidak larut dalam basa, mudah bereaksi, serta menghasilkan Kadmium Oksida bila dipanaskan. Kadmium (Cd) umumnya terdapat dalam kombinasi dengan klor (Cd Klorida) atau belerang (Cd Sulfit). Cd membentuk Cd^{2+} yang bersifat tidak stabil. Cd memiliki nomor atom 40, berat atom 112,4, titik leleh $321^{\circ}C$, titik didih $767^{\circ}C$ dan memiliki masa jenis $8,65 \text{ g/cm}^3$ (Hardian, 2011).

Cd merupakan golongan logam yang sifat fisiknya logam lunak, berwarna putih perak. Logam ini akan kehilangan kilapnya bila dalam udara yang basah atau lembab serta akan cepat mengalami kerusakan bila dikenai oleh uap amonia (NH_3) dan sulfur hidroksida. Cd merupakan unsur logam yang paling beracun setelah Hg. Cd merupakan logam penyebab toksisitas kronis yang biasanya terakumulasi di dalam tumbuh terutama dalam ginjal. Keracunan Cd dalam jangka waktu lama bersifat toksik terhadap beberapa macam organ, yaitu paru-paru, tulang, hati, dan ginjal (Palar, 2004).

Logam Cd memiliki karakteristik seperti logam aluminium, tahan panas, tahan terhadap korosi. Cd digunakan untuk elektrolisis, bahan pigmen untuk industri cat, enamel dan plastik. Logam Cd biasanya selalu dalam bentuk campuran dengan logam lain terutama dalam pertambangan timah hitam dan seng. Cd adalah metal berbentuk kristal

putih keperakan. Cd didapat bersama-sama Zn, Cu, Pb, dalam jumlah yang kecil. Cd dihasilkan dari industri alloy, pemurnian Zn, pestisida, dan lain-lain (Said, 2008).

Logam Cd banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari manusia. Prinsip utama dalam penggunaan Cd adalah sebagai bahan pewarna dalam industri plastik dan pada elektroplating. Umumnya logam Cd senyawa oksida dari kadmium (CdO), hidrat (CdH₂), dan kloridanya paling banyak digunakan dalam industri elektroplating. Logam Cd selalu dikeluarkan dalam suatu proses peleburan dan pemurnian logam timah, besi, tembaga maupun emas. Suatu pabrik yang memproduksi logam sulfida selalu menimbulkan pencemaran Cd di alam lingkungannya. Daya penguapan Cd di daerah industri logam dapat menaikkan pencemaran logam yang bersangkutan, tidak hanya udara bahkan tanah dan tanaman pun dapat tercemar (Nur, 2013).

Cd bervalensi dua (Cd²⁺) adalah bentuk terlarut stabil dalam lingkungan perairan laut pada pH dibawah 8,0. Kadar Cd di perairan alami berkisar antara 0,29-0,55 ppb dengan rata-rata 0,42 ppb. Di lingkungan alami yang bersifat basa, Cd mengalami hidrolisis, teradsorpsi oleh padatan tersuspensi dan membentuk ikatan 16 kompleks dengan bahan organik. Di perairan alami, Cd membentuk ikatan kompleks dengan ligan baik organik maupun anorganik, yaitu Cd²⁺, Cd(OH)⁺, CdCl⁺, CdSO₄, CdCO₃, dan Cd organik (Sanusi, 2006).

3**MIKROALGA DALAM PENGOLAHAN
LOGAM BERAT AIR LIMBAH**

Mikroalga sangat adaptif dan mampu hidup secara autotrof, heterotrof atau miksotrof. Pada lingkungan alami, alga berperan sangat penting dalam mengontrol konsentrasi logam di danau maupun laut. Hal ini berkaitan dengan kemampuannya dalam mendegradasi atau mengakumulasi logam berat toksik dan polutan organik seperti fenolik, hidrokarbon, pestisida, dan bipenil dari lingkungan dan mengakumulasinya, sehingga konsentrasi dalam alga lebih tinggi dari konsentrasi di polutan yang ada di lingkungan.

Pengambilan logam oleh mikroalga dilakukan dalam 2 cara yaitu adsorpsi dan absorpsi. Adsorpsi merupakan metabolisme sel yang dilakukan secara bebas, secara fisik terjadi pada permukaan sel kemudian logam menuju sitoplasma (kemoadsorpsi). Absorpsi merupakan metabolisme sel yang tergantung pada pengambilan logam berat secara intraseluler. Pb, Cu, Cd, Co, Hg, Zn, Mg, Ni dan Ti berikatan dengan polifosfat alga dan berfungsi sebagai penyimpan dan detoksifikasi logam (Dwivedi, 2012).

Proses sekuitrasi logam berat oleh mikroalga merupakan sumber multi fungsi polimer. Mikroalga juga mampu menghilangkan nitrogen dari air melalui proses biosorpsi dan menyimpannya sebagai biomassa. Ketika mikroalga mati, maka terdekomposisi dan melepaskan amonia

atau ureum ke badan air dan dapat dimanfaatkan sebagai sumber nitrogen lagi.

Pemanfaatan sistem adsorpsi untuk pengambilan logam-logam berat dari perairan telah banyak dilakukan. Beberapa spesies alga telah ditemukan mempunyai kemampuan yang cukup tinggi untuk mengadsorpsi ion-ion logam, baik dalam keadaan hidup maupun dalam bentuk sel mati (biomassa). Berbagai penelitian telah membuktikan bahwa gugus fungsi yang terdapat dalam alga mampu melakukan pengikatan dengan ion logam. Gugus fungsi tersebut terutama adalah gugus karboksil, hidroksil, sulfidril, amino, imidazol, sulfat, dan sulfonat yang terdapat di dinding sel dalam sitoplasma (Munifah, 2008).

Biomassa mikroba mati dapat digunakan untuk mengambil ion logam dari larutan, dengan efisiensi yang sama, lebih besar ataupun lebih kecil daripada biomassa mikrobia hidup. Menurut Triatmojo et al., (2001) biomassa mikroba mati mempunyai kemampuan menyerap ion logam lebih tinggi daripada yang hidup. Penggunaan sel mati mempunyai beberapa keuntungan, yaitu sistem tidak terpengaruhi oleh toksisitas logam berat, tidak memerlukan medium pertumbuhan dan nutrisi, dan ion logam yang terserap mudah didesorpsi.

3.1. Biosorpsi

Biosorpsi didefinisikan sebagai teknologi yang memanfaatkan kemampuan dari makhluk hidup dalam mengikat atau menyerap senyawa logam berat maupun limbah lain. Proses biosorpsi dapat terjadi dikarenakan adanya mekanisme penyerapan secara fisis dengan terikatnya logam di permukaan sel, terbentuknya ikatan ligan antara logam yang bermuatan positif dengan gugus fungsi dan logam diserap di dalam sel dengan cara pertukaran ion monovalen dan divalen.

Teknologi ini memiliki beberapa kelebihan antara lain efisiensi pengikatan logam berat yang tinggi, regeneratif, serta melimpahnya mikroorganisme yang dapat dijadikan biosorben. Pada umumnya sebagian besar mikroorganisme yang dapat dimanfaatkan sebagai biosorben yaitu bakteri, alga, dan ragi (Setiawan, Basyiruddin, & Dermawan, 2019). Menurut penelitian (Yusuf, 2014), salah satu mikroalga yang memiliki potensi biosorpsi yaitu *Spirulina platensis* dengan persentasi penyerapan Cu tertinggi yaitu 89,4% pada konsentrasi 1 mg/L.

Penyerapan logam berat oleh mikroorganisme dapat dilakukan melalui dua proses yaitu penyerapan yang terjadi secara absorpsi dan adsorpsi. Penyerapan secara adsorpsi terjadi di mana sejumlah molekul (senyawa, ion, maupun atom) terikat pada permukaan padatan atau cairan (Botahala, 2019). Proses penyerapan yang terjadi secara absorpsi disebut juga mekanisme resistensi. Mekanisme resistensi dapat dilakukan melalui peng ekskresian/perembesan senyawa pengkelat (*chelator*) ke luar sel, pengikatan ion logam oleh molekul intraseluler seperti metalotionin, atau akumulasi ion logam pada organ tertentu seperti vakuola dan mitokondria (Ratnawati et al., 2010).

Proses biosorpsi melibatkan fase padat (sorben atau biosorben; materi biologis) dan fase cair (pelarut, biasanya air) yang mengandung logam berat yang akan diserap (sorbat; ion logam) (Ahalya, Ramachandra, & Kanamadi, 2003). Dengan adanya larutan yang mengandung logam berat dengan afinitas yang tinggi sehingga mudah terikat dengan biosorben. Kompleksitas ion logam berat yang bermuatan positif berinteraksi dengan pusat aktif yang bermuatan negatif pada permukaan dinding sel atau dalam polimer ekstra seluler, seperti protein

dan polisakarida sebagai sumber gugus fungsi berperan penting dalam mengikat ion logam berat (Ratnawati et al., 2010).

Terlepas dari jenis dan bentuk kimia dari sorbat, sejumlah faktor fisika-kimia menentukan keseluruhan performa biosorpsi. Fomina dan Gadd (2013) menyebutkan beberapa faktor-faktor penting dalam biosorpsi, yakni:

- a. pH larutan yang merupakan regulator terpenting dari biosorpsi yang mempengaruhi larutan kimia dari polutan itu sendiri, aktivitas gugus fungsional dalam biosorben, dan persaingan untuk keberadaan berdampingan dalam larutan. Menaikkan pH meningkatkan penyisihan logam kationik atau zat pewarna dasar, tetapi mengurangi penyisihan logam anionik atau zat pewarna asam.
- b. Kekuatan ionik larutan yang ketika dinaikkan, mengurangi penyisihan biosorptif dari polutan adsorptif dengan bersaing dengan adsorbat untuk situs pengikatan pada biosorben.
- c. Konsentrasi awal polutan yang ketika dinaikkan, meningkatkan kuantitas polutan terserap per unit massa biosorben, tetapi menurunkan efisiensi penyisihan.
- d. Pengaruh polutan lain termasuk persaingan untuk situs pengikatan atau gangguan lainnya. Peningkatan konsentrasi polutan yang bersaing biasanya akan mengurangi penyisihan biosorptif dari polutan target. Namun, beban kation dari biomassa mungkin meningkatkan biosorpsi kation lain karena efek buffer dari pH. Dalam beberapa kasus, kation mungkin meningkatkan biosorpsi spesies anionic dengan meningkatkan pengikatan anion bermuatan negatif. Efek anionik pada kapasitas biosorpsi logam tergantung pada spesiasi logam, logam yang ada dan sifat biosorben.

- e. Sifat biosorben dan ketersediaan situs pengikat, prasejarah pertumbuhan dan pengolahan, modifikasi fisik atau kimia, dosis dan ukuran sangat penting untuk performa.
- f. Temperatur, yang biasanya meningkatkan penyisihan biosorptif dari polutan adsorptif ketika dinaikkan dengan meningkatkan aktivitas permukaan dan energi kinetik dari adsorbat, tetapi juga mungkin merusak struktur fisik dari biosorben tersebut.
- g. Menaikkan kecepatan pengadukan dalam sistem cair yang sesuai meningkatkan tingkat penyisihan biosorptif dari polutan adsorptif dengan meminimalisir penentangan transfer massa, tetapi mungkin merusak struktur fisik dari biosorben tersebut.
- h. Dosis adsorben merupakan parameter penting proses untuk menentukan kapasitas adsorben terhadap jumlah adsorben pada kondisi beroperasi. Secara umum persen penyisihan zat pewarna meningkat dengan meningkatnya dosis adsorben, dimana kuantitas atau jumlah dari situs sorpsi pada permukaan adsorben akan meningkat dengan meningkatnya jumlah adsorben. Pengaruh dari dosis adsorben memberikan ide untuk kemampuan adsorpsi zat pewarna untuk di adsorpsi dengan jumlah adsorben terkecil, untuk mengetahui kemampuan zat pewarna dari sudut pandang ekonomis (Yagub *et al.*, 2014).
- i. Kontak antara adsorben dengan adsorbat meningkatkan kemungkinan adsorpsi dan peningkatannya dengan waktu kontak yang lebih lama. Pengaruh waktu kontak terhadap adsorpsi zat pewarna yaitu seiring dengan peningkatan waktu kontak, kapasitas adsorpsi (q_e , mg/g) dari adsorben juga meningkat (Wasti dan Awan, 2014).

3.2. Mekanisme Proses Biosorpsi Logam Berat Oleh Mikroalga

Mikroalga mempunyai kemampuan mengakumulasi logam berat dalam tubuhnya, karena itu dapat dimanfaatkan sebagai biosorben dalam penanganan kontaminasi logam berat di perairan. Proses biosorpsi ion logam berat umumnya terdiri dari dua mekanisme yang melibatkan proses penyerapan pasif (*passive uptake*) dan penyerapan aktif (*active uptake*).

a. Penyerapan Pasif (Passive Uptake)

Proses penyerapan pasif terjadi dengan dua cara yang berbeda, pertama pertukaran ion dan yang kedua adalah pengikatan ion logam berat oleh gugus fungsi yang terdapat pada permukaan sel. Penyerapan pasif dikenal juga dengan proses adsorpsi (Dewi, 2015a). Pertukaran ion pada dinding sel yaitu terjadinya pertukaran ion monovalen dan divalen seperti Na, Mg, dan Ca yang akan digantikan oleh ion-ion logam berat. (Kurniawan & Aunurohim, 2014).

Pengikatan ion logam oleh gugus fungsi akan menyebabkan pembentukan senyawa kompleks antara ion logam dengan gugus fungsi yang terdapat pada permukaan sel. Dinding sel mikroalga umumnya terdiri atas selulosa yang memiliki gugus fungsional seperti hidroksil yang dapat berikatan dengan logam berat. Selulosa berpotensi sebagai penangkap ion logam karena gugus OH yang terikat dapat berinteraksi dengan adsorbat. Gugus OH tersebut menyebabkan terjadinya mekanisme pertukaran ion logam dengan selulosa (Dewi, 2015b).

Dinding sel mikroalga tidak hanya tersusun atas gugus fungsi OH tetapi juga terdapat beberapa gugus fungsi misalnya, karboksil (-COOH), hidroksil (-OH), fosfat (PO₃), amina (-NH₂), dan sulfhidril (-SH) yang memiliki muatan negatif sehingga dapat berikatan dengan ion logam yang bermuatan positif (Monteiro, Castro, & Malcata, 2012). Proses

bioadsorpsi ini bersifat bolak-balik dan cepat. Proses bolak-balik ikatan logam berat di permukaan sel ini dapat terjadi pada sel mati dan sel hidup dari suatu biomassa (Ratnawati et al., 2010). Dalam proses adsorpsi, *Spirulina* sp. mengadakan ikatan dengan logam berat karena *Spirulina* sp. memiliki gugus karboksil dari protein dan gugus hidroksil dari polisakarida. Mekanismenya yaitu dengan cara gugus karboksil dan hidroksil dari dinding sel berperan sebagai anion yang akan mengikat kation logam berat (Masithah et al., 2011).

b. Penyerapan Aktif (Active Uptake)

Mekanisme biosorpsi setelah proses adsorpsi adalah *active uptake* yang dimana sel mikroalga memindahkan ion logam yang telah terikat di dinding sel ke organel sel yang lebih dalam (bioakumulasi/absorpsi). Mekanisme ini terjadi sejalan dengan penggunaan ion logam yang digunakan untuk pertumbuhan sel dan akumulasi ion logam tersebut (Purnamawati et al., 2014). Proses penyerapan aktif terjadi melalui transport aktif dan prosesnya berlangsung lebih lambat daripada adsorpsi. Logam berat yang terabsorpsi akan terakumulasi di dalam sel yang akan berikatan dengan protein pengikat logam seperti metalotionein dan fitokelatin, selanjutnya logam berat tersebut akan diakumulasi di vakuola (Dewi, 2015b). Proses absorpsi logam berat oleh mikroalga terjadi di dalam sel hidup (Monteiro et al., 2012). Dalam proses absorpsi logam berat oleh *Spirulina* sp. terjadi melalui pembentukan protein pengikat logam yaitu fitokelatin dan metalotionein (Nalimova et al., 2005).

Penyerapan diawali dengan ion logam berat melalui transport aktif terjadi pengikatan pada gugus sulfur (S) dari asam amino sistein pada dinding sel. Asam amino sistein dengan 2 atom S akan berikatan dengan logam berat. Protein reseptor akan mengenali logam asing,

kemudian gen akan mengkode pembentukan metallothioenin (MT). Selanjutnya terjadi transport pasif pengikatan ion logam dengan MT didalam sel. Kemudian MT akan membentuk struktur seperti jepit rambut dan logam berat akan terdetoksifikasi dalam strukturnya. Logam berat yang berikatan dengan MT akan ditransport ke vakuola sebagai tempat penyimpanan ion-ion dan metabolit. Sel akan terus menerus mensintesis MT selama ion logam berat masih ada yang terikat pada gugus S dari protein dinding sel sampai pada saat tertentu sel akan mengalami kejenuhan dan berada pada fase kematian (Kurniawatiningrum, 2019).

4

PEMANFAATAN *Spirulina* sp. SEBAGAI PENYERAPAN LOGAM BERAT Zn

4.1. *Spirulina* sp.

Spirulina merupakan organisme autotrof berwarna hijau kebiruan memiliki sel-sel silindris yang membentuk koloni dan filamennya terpilin berbentuk spiral (*helix*) disebut juga alga biru hijau berfilamen sesuai Gambar 4.1 (Yasir, Wiranti, & Wulantika, 2019). *Spirulina* mengandung fikosianin tinggi sehingga warna cenderung hijau biru. Mikroalga ini dapat tumbuh dengan baik di air laut, air tawar, danau, dan media tanah. Suhu yang baik untuk menunjang pertumbuhan optimal *Spirulina platensis* berkisar antara 25-35°C (Christwardana, Nur, & Hadiyanto, 2013). Panjang trikoma *Spirulina* sp. sekitar 20 mm. Diameter sel spirulina berukuran 1-3 µm pada tipe yang kecil dan pada tipe yang lebih besar berukuran 3-12 µm (Kabinawa, 2006).

Spirulina mempunyai nutrisi yang sangat kompleks diantaranya yaitu protein 60-71%, lemak 8%, karbohidrat 16%, klorofil a 1,6%, fikosianin 18%, β-Karoten 17%, γ-asam linoleat 20–30 % dari total asam lemak dan vitamin. Tingginya kandungan nutrisi yang terkandung pada mikroalga ini menjadikan *Spirulina* dimanfaatkan dan digunakan dalam berbagai macam olahan. *Spirulina* juga sebagai bahan pakan tambahan dalam bidang perikanan, pembuatan parfum, industri makanan, dan obat-obatan (Wahyuni et al., 2018).

Secara taksonomi klasifikasi *Spirulina* adalah sebagai berikut:

Divisi : *Cyanophyta*

Kelas : *Cyanophyceae*

Ordo : *Nostocales*

Famili : *Oscillatoriaceae*

Genus : *Spirulina*

Spesies: *Spirulina* sp.

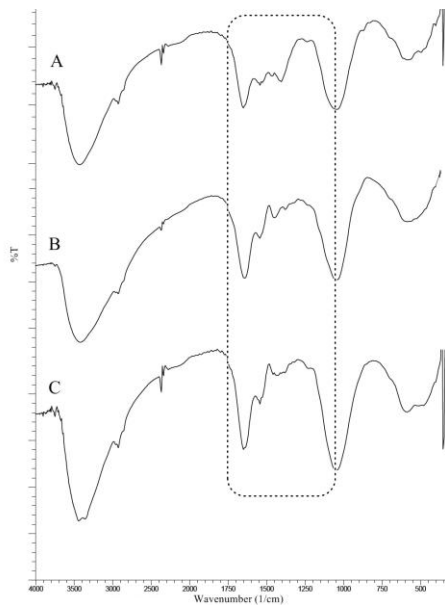


Gambar 4.1. Morfologi *Spirulina* sp. (Perbesaran 400x) (Henrikson, 2009).

Faktor lingkungan yang menyebabkan perubahan pada bentuk spiralnya dipengaruhi oleh kondisi pertumbuhan tertentu terutama faktor temperatur dan fisika-kimianya (Vonshak, 1997). *Spirulina* mempunyai dinding sel yang tipis. Dinding sel *Spirulina* memiliki 4 lapisan, yaitu LI (terdalam), LII, LIII, dan LIV (terluar). Lapisan LI mengandung β -1,2-glucan, yang merupakan polisakarida yang sukar dicerna. LII terbuat atas peptidoglikan yang membuat dinding sel kuat. LIII tersusun lapisan protein fibril dan LIV merupakan lapisan terluar (Pangkey, 2009).

Spirulina sp. termasuk mikroalga yang dapat ditemukan secara luas di alam dan terdapat di berbagai tipe lingkungan, baik di lingkungan perairan tawar, laut dan payau. Habitat *Spirulina* biasanya ditemukan pada tempat yang lembab atau lahan yang sering dialiri aliran air dan dapat hidup hampir di semua tempat yang memiliki cukup sinar matahari, air dan CO₂. *Spirulina* dapat bertahan pada kondisi lingkungan yang ekstrim serta tidak membutuhkan nutrisi yang banyak dan dapat tumbuh dengan baik pada pH netral serta bisa mentolerir kondisi lingkungan yang bersifat alkali atau kondisi basa (Nainggolan, Tanjung, & Effendi, 2018). Beberapa spesies *Spirulina* dapat dijumpai di perairan dengan suhu tinggi dan bersifat mesofilik (Pangkey, 2009).

Analisis terhadap struktur gugus fungsional *Spirulina*. Selanjutnya dilakukan menggunakan spektrofotometer FTIR. Hasil analisis menggunakan spektrofotometer FTIR terhadap *Spirulina* dibandingkan dengan *Spirulina* yang telah di interaksikan dengan ion tembaga(II) dan ion kromium(III) yang mewakili ion-ion logam berat dengan perbedaan tingkat oksidasi terdapat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Spektra FTIR *Spirulina* sp (A), *Spirulina* sp+Cr(III) (B) dan *Spirulina* sp+Cu(II) (C)

Pada Gambar 4.2 terlihat bahwa *Spirulina* memiliki gugus fungsional yang dapat bertindak sebagai ligan/pengikat ion-ion logam yakni OH, C=O, C-H, maupun C-C (Gambar 4.2 (A)). Setelah *Spirulina* terikat ion Cr(III) tidak terlihat adanya perubahan pada spektra FTIR (Gambar 4.2 (B)). Perbedaan yang cukup signifikan terlihat pada spektra FTIR Gambar 4.2 (C) dimana ion Cu(II) terikat pada *Spirulina*. Perubahan bilangan gelombang disekitar 1500-1600 cm^{-1} mengindikasikan bahwa ion logam Cu(II) dengan tingkat oksidasi +2 terikat pada gugus C=O. Gugus C=O diketahui merupakan gugus karbonil yang dalam deret spektrokimia merupakan ligan kuat yang memiliki afinitas terhadap ion logam.

4.2. Laju Pertumbuhan *Spirulina* sp. Dalam Media Di Laboratorium

Pertumbuhan *Spirulina* pada logam Zn dilakukan selama 14 hari dengan kelimpahan awal sebesar 1×10^4 ind/L (OD=0,0015). Pengamatan

pertumbuhan dilakukan dengan menggunakan Spektrofotometer UV-VIS berdasarkan nilai OD dan kemudian dikonversi menjadi kelimpahan *Spirulina* dengan satuan ind/L.

Tabel 4.1. Laju Pertumbuhan *Spirulina* sp. (1×10^4 ind/L) pada berbagai konsentrasi logam berat Zn

Konsentrasi (mg/L)	Waktu Pengamatan (Hari)							
	0	2	4	6	8	10	12	14
0	10	31,7	78,3	187,1	432,8	934,7	721,9	623,8
1	10	30,5	68,9	169,4	381,4	834,5	692,3	532,1
3	10	22,6	59,4	149,3	289,2	632,4	541,3	298,7
5	10	17,8	50,3	121,7	52,1	28,9	12,5	6,7
7	10	14,2	44,1	82,6	48,2	19,2	12,7	3,2

Berdasarkan Tabel 4.1 diketahui bahwa pola pertumbuhan pada perlakuan Zn 1 dan 3mg/L cenderung sama dengan perlakuan kontrol sedangkan pertumbuhan pada perlakuan Zn 5 mg/L cenderung menyerupai Zn 7 mg/L. Semakin tinggi konsentrasi logam berat Zn maka pertumbuhan *Spirulina* akan semakin menurun. Berdasarkan penelitian Pranajaya et al. (2014), konsentrasi logam berat Cu yang semakin tinggi telah mengurangi pertumbuhan *Spirulina* karena tidak mampu mengimbangi efek toksik Zn.

Fase pertumbuhan *Spirulina* sp. terdiri atas 4 fase diantaranya fase lag, fase eksponensial, fase stasioner dan fase kematian. Berdasarkan Tabel 4.1, fase lag tidak terlihat pada perlakuan kontrol, Zn 1, 3, dan 5 mg/L diduga fase tersebut terjadi dalam waktu yang singkat dan kultur awal yang digunakan berasal dari fase eksponensial. Namun pada perlakuan 7 mg/L fase lag terjadi hingga hari ke-2, hal tersebut

diduga karena konsentrasi logam yang terlalu tinggi sehingga *Spirulina* membutuhkan waktu yang cukup lama untuk beradaptasi.

Fase eksponensial pada perlakuan kontrol, Zn 1 dan 3 mg/L terjadi hingga hari ke-10, sedangkan pada perlakuan Zn 5 dan 7 mg/L terjadi hari ke-4 hingga ke-6. Fase stasioner pada seluruh perlakuan tidak dapat terlihat dan diduga terjadi dalam waktu yang singkat. Fase kematian pada perlakuan kontrol, Zn 1 dan 3 mg/L terjadi pada hari ke-12, sedangkan pada perlakuan 5 dan 7 mg/L terjadi pada hari ke-8 ditandai dengan menurunnya kelimpahan *Spirulina*.

Fase yang terjadi dalam kurun waktu yang pendek yaitu fase lag pada beberapa perlakuan dan fase stasioner pada seluruh perlakuan dikarenakan fase tersebut terjadi secara cepat dan diperkirakan kurang dari 24 jam sedangkan pengamatan dilakukan dengan selang waktu 2 hari sekali. Selain itu, pada fase sebelumnya nutrisi yang digunakan pada fase sebelumnya sangat tinggi sehingga nutrisi yang dibutuhkan pada fase stasioner sangat sedikit. Hal ini sesuai dengan pernyataan Meritasari et al. (2012), fase stasioner terjadi dalam waktu yang singkat sehingga fase stasioner tidak muncul pada setiap perlakuan.

Faktor yang mempengaruhi pertumbuhan *Spirulina* yaitu pH. Pada penelitian ini, pH berada pada nilai 6-7. Selain pH, suhu dan cahaya juga memiliki peran penting dalam pertumbuhan *Spirulina*. Suhu lingkungan sebesar 28°C dan intensitas cahaya 3000 lux. Menurut Santosa dan Limantara (2007), intensitas cahaya mempengaruhi pertumbuhan *Spirulina*, apabila intensitas cahaya terlalu tinggi maka akan terjadi fotoinhibisi sedangkan jika intensitas cahaya rendah maka akan terjadi penurunan aktivitas fotosintesis. Intensitas cahaya yang optimum untuk *Spirulina* yaitu 2000-3500 lux.

Logam berat Zn merupakan salah satu mikronutrien yang terdapat pada media pertumbuhan *Spirulina* sp. Menurut Hartanto et al. (2013), Zn memiliki efek beracun terhadap mikroalga berkaitan dengan interaksi permukaan atau akumulasi di dalam sel. Puspitasari et al. (2018) juga menjelaskan bahwa Zn dapat mengganggu metabolisme mikroalga dengan berkompetisi dengan enzim. Konsentrasi Zn yang tinggi pada dinding sel dapat berubah bentuk (deformasi) dan setae menghilang.

Hasil analisis of varian (ANOVA) pada pengaruh logam berat Zn terhadap pertumbuhan *Spirulina* menunjukkan hasil yang berbeda nyata ($p < 0.05$), kemudian dilanjutkan dengan Uji DMRT. Berdasarkan hasil uji DMRT, didapatkan hasil bahwa pada perlakuan kontrol dan 1 mg/L tidak memiliki perbedaan nyata terhadap pertumbuhan *Spirulina*, pada perlakuan Cu 3 mg/L menunjukkan hasil pertumbuhan yang berbeda nyata dengan perlakuan kontrol, 1, 5, dan 7 mg/L, pada perlakuan Zn 5 mg/L tidak memiliki perbedaan nyata terhadap pertumbuhan *Spirulina*.

4.3. Penyerapan Logam Berat Zing (Zn) Dalam Kondisi

Laboratorium

Hasil analisis pengukuran konsentrasi logam berat Zn pada media kultur selama 14 hari dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4.2. Penurunan Konsentrasi Zn

Konsentrasi Zn pada media (mg/L)		Penurunan (mg/L)	Efisiensi penyerapan (%)
Awal	Kultur		
1	0,34	0,66	66
3	2,38	0,62	21
5	4	1	20
7	5,91	1,09	16

Penurunan konsentrasi tertinggi terdapat pada perlakuan Zn 1 mg/L sebanyak 66%. Pada perlakuan 1, 3, 5, dan 7 mg/L menunjukkan adanya penurunan konsentrasi logam. Pada perlakuan kontrol tetap menunjukkan konsentrasi yang sama dari awal hingga akhir penelitian. Hal tersebut diduga karena Cu diserap oleh mikroalga Spirulina.

Pada perlakuan Zn 1 mg/L, pertumbuhan Spirulina hampir menyerupai perlakuan kontrol. Pada konsentrasi awal 1 mg/L Spirulina mampu menyerap Zn sebanyak 0,66 mg/L. Penyerapan Zn oleh Spirulina pada perlakuan ini cukup tinggi, hal tersebut dikarenakan Zn dengan konsentrasi rendah diperlukan dalam pertumbuhan Spirulina.

5

PEMANFAATAN *Oscillatoria* sp. SEBAGAI PENYERAPAN LOGAM BERAT Cd

5.1. *Oscillatoria* sp.

Oscillatoria adalah jenis genus cyanobacterium yang berserabut dan dinamai osilasi dalam gerakannya. Filamen dalam koloni *oscillatoria* dapat meluncur maju mundur satu sama lainnya hingga seluruh massa diorientasikan kembali ke sumber cahayanya. Biasanya *oscillatoria* ditemukan di perairan palung air, terutama biru hijau atau coklat hijau seperti Gambar 5.1. *Oscillatoria* berkembang biak secara vegetatif dengan fragmentasi dan membentuk filamen sel panjang yang dapat pecah menjadi fragmen yang disebut hormogonia.



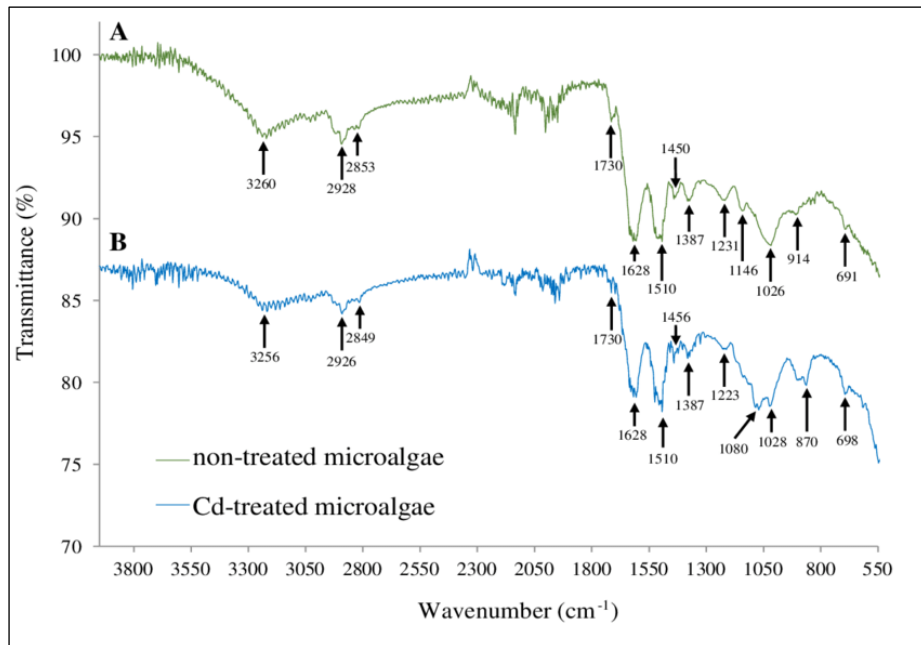
Gambar 5.1. Struktur Morfologis *Oscillatoria* Sp.

Hormogonia tersebut tumbuh menjadi filamen baru yang lebih panjang. Pecahnya filamen disebabkan karena terjadi di mana sel-sel mati hadir dan terjadi di kolam air tawar. *Oscillatoria* termasuk kedalam makhluk hidup autotrof yang membuat makanannya sendiri melalui fotosintesis. Setiap filamen *oscillatoria* terdiri dari trikoma yang terdiri dari deretan sel, dimana ujung trikoma berosilasi seperti pendulum.

Trikom dari *oscillatoria* memiliki bentuk silindris dan tidak bercabang. *Oscillatoria* juga hanya memiliki satu membran saja dan trikoma yang berada di *oscillatoria* sering berada di massa pelampung atau bagian mengkilap pada tanah lembap. Selnya pendek dan lebar kecuali untuk sel ujungnya yang mungkin tertutup dan tipis. Trikom *oscillatoria* menunjukkan pertumbuhan yang meluncur, rotasi dan gerakan *oscillatori*.

Oscillatoria dapat ditemukan di beberapa lingkungan perairan seperti danau, laut dan sungai namun *oscillatoria* banyak ditemukan di perairan palung air tawar yang menuju ke laut dan beberapa ada yang hidup di rawa-rawa. Pada saat tertentu, *oscillatoria* yang hidup di air muncul berlimpah yang menyebabkan air tampak berwarna merah dan membuat laut di daerah Timur Tengah berwarna merah hingga disebut laut merah. Berikut klasifikasi taksonomi dari *Oscillatoria* sp. menurut Bold & Wynne (1985):

Domain : Bakteri
Divisi : *Cyanobacteria*
Kelas : *Cyanophyceae*
Ordo : *Osillator*
Famili : *Oscillatoriaceae*
Genus : *Oscillatoria*
Spesies : *Oscillatoria* sp.

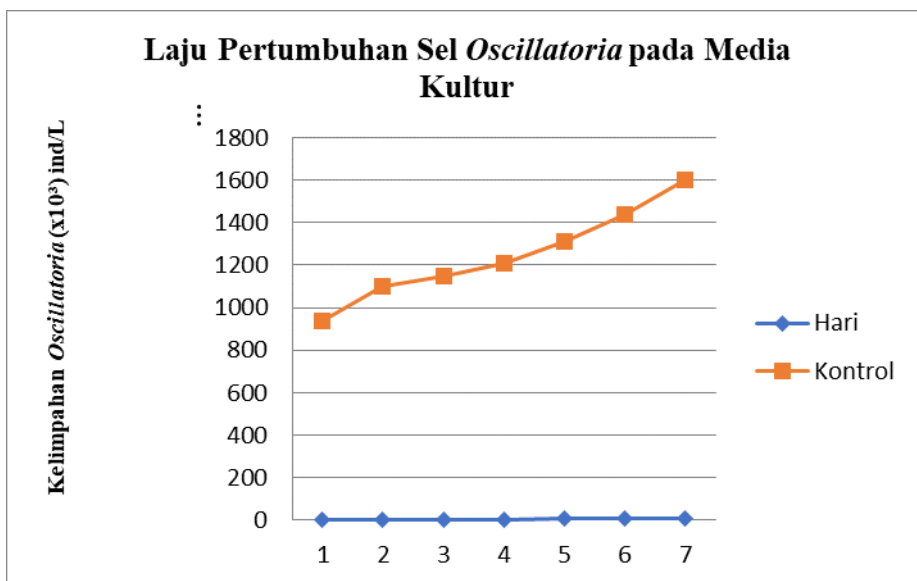


Gambar 5.2. Analisis FTIR Untuk *Oscillatoria* Sp.

Analisis terhadap struktur *Oscillatoria* untuk setiap gugus fungsinya dilakukan berdasarkan analisis FTIR berdasarkan penelitian Bon dkk. (2021). Pita lebar pada 3500-3050 cm⁻¹ dicirikan sebagai gugus fungsi -OH dan -NH, sedangkan pada 2928 dan 2853 cm⁻¹ merupakan ciri getara yang dihasilkan oleh metil (-CH₂). Pada pita didaerah 1730 cm⁻¹ mewakili ikatan C=O dan pita pada rentang 1500-1000 cm⁻¹ mewakili gugus fungsi ester. Selain itu, pita teramati yang lain ada pada: 1628 cm⁻¹ mewakili gugus fungsi -NH₂ dan C-N, 1520 cm⁻¹ mewakili ikatan -N-H, pada 1387 cm⁻¹ merupakan regangan -CH₃, 1231 merupakan regangan -NO₂ yang asimetrik, 1146 cm⁻¹ merupakan regangan -C-O, dan 1026 merupakan getaran dari peregangan gugus fungsi -C-N dan -C-C. Pita khusus dibawah daerah ,930 cm⁻¹ yang merupakan daerah sidik jadi mewakili gugus fungsi fosfat dan sulfur.

5.2. Laju Pertumbuhan *Oscillatoria* sp. Dalam Media Di Laboratorium

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan sebanyak 10,000 ind/L bibit *Oscillatoria* dalam Medium BG-11, pertumbuhan dan kelimpahan dihitung (ind/mL) dengan bantuan *Sedgwick Rafter Counting Cell* (SRCC) menggunakan mikroskop dengan perbesaran 40x. Pertumbuhan sel *Oscillatoria* pada konsentrasi logam Cd setiap hari selama 7 hari rata-rata mengalami kenaikan, terutama pada fase eksponensial, dimana pembelahan sel sangat optimal. Pengamatan laju pertumbuhan sel *Oscillatoria* selama 7 hari dapat dilihat pada Gambar 5.2.



Gambar 5.3. Grafik Laju Pertumbuhan Alga *Oscillatoria* dalam Media BG-11 (ind/L)

Laju pertumbuhan *Oscillatoria* selama penelitian dapat dilihat pada Gambar 5.3. Apabila nilai laju pertumbuhan lebih besar hal ini menunjukkan bahwa proses pembelahan *Oscillatoria* menjadi lebih cepat sehingga pertumbuhan sel per satuan waktu akan lebih besar dari

penambahan waktu itu sendiri. Berdasarkan Gambar 5.3, terlihat bahwa waktu tumbuh *Oscillatoria* pada hari ke-7 mengalami keadaan optimal. Menurut Isnanstyo dan Kurniastuti (1995), waktu tumbuh terbaik pada mikroalga adalah saat akhir fase eksponensial karena pada fase ini kondisi mikroalga berada dalam kondisi yang paling optimal, sehingga kandungan nutrisi dalam selnya sangat tinggi.

Pada pengamatan pertumbuhan *Oscillatoria* hari ke-4 sampai hari ke-7 mengalami kenaikan pertumbuhan, hal tersebut menunjukkan bahwa pertumbuhan *Oscillatoria* ini berada pada fase eksponensial. Jumlah kelimpahan sel *Oscillatoria* terus meningkat. Berdasarkan penelitian Hayati (2008) mengatakan bahwa pada fase eksponensial sel sedang aktif berkembang biak dan mengalami pembelahan sel hal ini menyebabkan pertumbuhan sel berjalan dengan cepat.

Pertumbuhan *Oscillatoria* dalam Media BG-11, dapat dilihat nilai rata-rata laju pertumbuhan alga meningkat dan cukup baik. Hal ini dapat menunjukkan bahwa pada kultivasi dari hari ke-1 sampai hari ke-4 mengalami fase adaptasi berkisar 1-3 hari, menurut Pujiono (2012), menyatakan beberapa parameter yang dipengaruhi ukuran inokulum dan kondisi media tumbuh. Apabila sel tumbuh dalam medium yang kekurangan nutrisi, maka waktu fase adaptasi lebih lama, karena sel harus menghasilkan enzim yang sesuai dengan jenis nutrisi yang ada.

Faktor-faktor yang mempengaruhi jumlah kelimpahan sel yang dihasilkan antara lain suhu, aerasi, cahaya dan pH. Pertumbuhan *Oscillatoria* selain dipengaruhi oleh kandungan nutrisi juga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan. Faktor lingkungan yang mendukung pertumbuhan *Oscillatoria* adalah suhu, pH. Data hasil pengukuran pH selama penelitian diperoleh pH, nilai keasaman pH merupakan faktor yang penting bagi pertumbuhan *Oscillatoria*. Menurut Hariyati (2008)

menyatakan kebanyakan alga hijau biru tumbuh baik pada pH 7 dan lebih mentolerir kondisi basa dari pada kondisi asam karena mampu memanfaatkan karbon dioksida yang tersedia pada konsentrasi rendah.

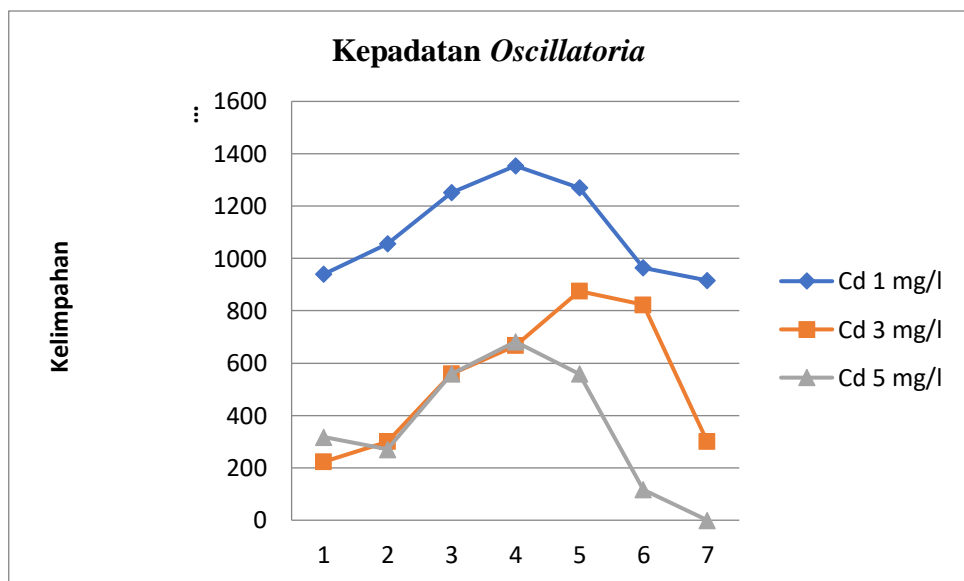
Penelitian ini menggunakan aerasi dengan tujuan agar sel *Oscillatoria* dapat memperoleh nutrisi dalam media kultivasi secara merata karena adanya sirkulasi air dalam wadah kultur. Dalam penambahannya, mikroalga membutuhkan cahaya, karena cahaya digunakan dalam proses fotosintesis. Intensitas cahaya yang diterima mikroalga berpengaruh terhadap kelimpahan. Pertumbuhan alga dipengaruhi oleh intensitas cahaya karena cahaya yang didapat diserap oleh sel dalam kultur berkurang menyebabkan laju fotosintesis berjalan lambat, sehingga mengakibatkan pertumbuhan sel menurun.

Kelimpahan sel *Oscillatoria* yang di kultivasi pada media kultur BG-11 diduga karena pada media ini terdapat unsur P dan K dalam senyawa KH_2PO_4 dan K_2HPO_4 yang berperan penting dalam proses pertumbuhannya. Menurut Putra (2014) fungsi KH_2PO_4 adalah sebagai sumber fosfor untuk sintesis senyawa penghasil energi bagi aktivitas sel, sementara itu unsur K berperan dalam proses pemanjangan sel, memperkuat tubuh alga, memperlancar metabolisme, dan penyerapan makanan.

Menurut hariati (2008) suhu adalah faktor yang penting bagi penyebaran dan tingkah laku alga biru hijau. Kebanyakan alga biru hijau bersifat eurythermal dengan temperatur optimal bagi pertumbuhan alga jenis biru hijau berkisar antara 20-30°C. Pada penelitian ini selama kultur dilakukan dengan suhu 25°C, sehingga dalam kultur *Oscillatoria* ini dapat dikatakan dalam keadaan cukup optimal. Suhu juga merupakan salah satu faktor yang berpengaruh terhadap produktifitas mikroalga, karena setiap spesies mempunyai suhu optimalnya tersendiri.

5.3. Kelimpahan *Oscillatoria* sp. Dalam Media Tumbuh Mengandung Logam

Pertumbuhan *Oscillatoria* dihitung setiap hari sampai hari ke-7, dalam pertumbuhan ini dihitung kelimpahan *Oscillatoria*. Semua perlakuan dihitung kelimpahannya baik perlakuan dengan penambahan logam berat maupun tanpa penambahan logam berat, pengambilan data pertumbuhan ini bertujuan untuk mengetahui daya serap terhadap logam berat serta pengaruhnya logam berat untuk *Oscillatoria*.



Gambar 5.4. Kepadatan Sel *Oscillatoria* Dalam Perlakuan Konsentrasi Cd

Berdasarkan Gambar 5.4, hasil pengamatan terhadap pertumbuhan kepadatan kultivasi alga *Oscillatoria* selama 7 hari, pertumbuhan alga yang diukur dengan menggunakan Media BG-11 dengan 6 kali ulangan maka dapat dilihat kepadatan populasi yang digunakan pada awal kultur *Oscillatoria* sebanyak 10.000 ind/L, rata-rata yang didapatkan pertumbuhan alga dalam dalam waktu hari ke-1 uji

kontrol jumlahnya mencapai 938 ind/L. Pada hari ke-2 uji control, jumlahnya 1098 ind/L, dari hari ke-1 hingga hari ke-3 masih mengalami pertumbuhan yang lambat dengan peningkatan kepadatan yang tidak terlalu signifikan. Hal ini dikarenakan masih dalam fase adaptasi, dimana dalam fase ini individu melakukan penyesuaian diri dengan media kultur. Fase adaptasi dengan penambahan inokulum ke dalam media kultur pada populasi tidak mengalami perubahan sehingga organisme mengalami metabolisme tetapi belum terjadi pembelahan sel sehingga kepadatan belum meningkat dengan cepat.

Pengamatan pada konsentrasi Cd 1 mg/L pada hari-4 masih mampu ditoleransi oleh *Oscillatoria* yaitu 1345 sel/mL. Hal ini karena pada perlakuan Cd 1 mg/L menunjukkan fase eksponensial dimana pada fase ini dimulai dengan pembelahan sel dengan laju pertumbuhan yang meningkat secara intensif. Jika kondisi kultur optimum maka laju pertumbuhan dapat mencapai nilai maksimal. Menurut Hadiyanto dan Azim (2010), durasi fase eksponensial bergantung pada volume inokulum, kecepatan pertumbuhan, medium dan kondisi lingkungan untuk mensupport pertumbuhan alga. Fase eksponensial ditandai dengan terjadinya periode pertumbuhan yang cepat, sel membelah dengan laju konstan dan keadaan pertumbuhan seimbang antara penyerapan makanan dan kenaikan jumlah mikroalga.

Pada konsentrasi Cd 3 mg/L, dihari ke-6 mulai mengalami fase stasioner dimana pada fase ini pertumbuhan *Oscillatoria* mengalami penurunan. Menurut Isnansetyo dan Kurniastuty (1995), fase stasioner merupakan fase dimana medium pertumbuhan mikroorganisme kekurangan nutrisi yang dibutuhkan untuk mikroorganisme tumbuh sehingga pembelahan sel tidak secepat fase eksponensial.

Pada fase stasioner, komposisi mikroalga berubah secara signifikan karena terbatasnya kandungan nitrat pada media kultur yang mengakibatkan kandungan karbohidrat meningkat hingga dua kali lipat dari kandungan protein. Pada fase tersebut, laju reproduksi atau pembelahan sel sama dengan laju kematian, artinya penambahan dan pengurangan mikroalga relatif sama sehingga kelimpahan mikroalga cenderung tetap.

Pada konsentrasi Cd 5 mg/L merupakan fase kematian dimana pada fase ini alga *Oscillatoria* mengalami penurunan sel inokulum secara drastis. Setelah diamati di bawah mikroskop sel tampak pecah dan mati secara visual tampak kultur berwarna kehijauan, lalu berubah warna menjadi hijau kekuningan sebelum akhirnya memucat dan akhirnya mati. Pada penelitian yang dilakukan oleh Imani dkk (2011) menyatakan bahwa peningkatan konsentrasi ion Cd dan Hg menghambat pertumbuhan sel alga. Namun, *Dunaliella* merupakan salah satu alga yang cukup toleran dengan konsentrasi ion logam Cd dan Hg yang tinggi hingga 40 mg/L.

5.4. Penyerapan Logam Berat Cd Dalam Kondisi Laboratorium

Hasil penelitian terhadap penurunan konsentrasi logam berat Cd pada penebaran bibit *Oscillatoria* hari ke-1 sampai hari ke-7 pada masing-masing konsentrasi 1, 3, dan 5 mg/L menunjukkan penurunan konsentrasi logam berat Cd seiring dengan semakin sedikit konsentrasi yang di masukkan kedalam medium maka semakin banyak penyerapan logam berat yang diserap oleh *Oscillatoria*. Hubungan laju pertumbuhan maksimal *Oscillatoria* dengan perlakuan konsentrasi logam berat Cd yang berbeda menunjukkan bahwa perlakuan dengan penambahan logam berat 1 mg/L dibutuhkan untuk pertumbuhan tetapi semakin

tinggi konsentrasi logam berat Cd yang diberikan maka semakin rendah kepadatan *Oscillatoria*.

Pertumbuhan tertinggi dapat dilihat pada hari ke-4 dengan perlakuan Cd 1 mg/L yaitu 1345 sel/mL, hal ini karena pada perlakuan Cd 1 mg/L masih mampu ditoleransi oleh *Oscillatoria*. Logam berat Cd mempunyai sifat yang hampir sama dengan seng (Zn) sehingga Cd dapat menggantikan fungsi Zn dalam reaksi enzimasi dan mengubah struktur enzim dan mempengaruhi aktivitasnya. Dalam jumlah yang sangat sedikit Zn dapat berperan dalam mendorong perkembangan pertumbuhan. Sehingga dengan kemampuan logam Cd yang dapat menggantikan fungsi Zn dalam mensintesis enzim karbonik anhidrase yang menghasilkan ion hidrogen dan digunakan untuk pembelahan sel sehingga menyebabkan pertumbuhan semakin maksimal (Andersen, 2005).

5.5. Konsentrasi Logam Berat Cd Pada Media Kultur

Analisis varian (ANOVA) oleh *Oscillatoria* pada uji penurunan logam berat didapatkan hasil tidak berpengaruh nyata terhadap penurunan kadar logam berat Cd. Oleh karena itu maka tidak dilakukan uji lanjut (duncan's).

Tabel 5.1. Konsentrasi logam terukur pada proses biosorpsi

	Cd (mg/L)		Rata-Rata Penurunan Kadar Cd (mg/L)
	Awal	Akhir	
1		0,7595	0,2405 ± 0,17
3		2,8385	0,1614 ± 0,28
5		4,9276	0,0723 ± 0,11

Dapat dilihat Tabel 5.1, hasil analisa logam berat mengalami penurunan terbesar pada perlakuan Cd 1 mg/L yakni sebesar 0,2405 mg/L. Dalam hal ini, semangkin tinggi konsentrasi logam berat maka semakin kecil penurunan logam Cd tersebut. Jika konsentrasinya rendah, maka kemampuan *Oscillatoria* dalam penurunan logam tersebut juga tinggi. Sebagaimana penelitian Setyaningsih f, dkk (2015) mengatakan bahwa besarnya penurunan konsentrasi dari kelompok 1, 3, dan 5 mg/L berturut-turut yang artinya menunjukkan semakin tingginya konsentrasi logam yang ditambahkan prosentase penyerapan ion logam semakin rendah.

Cd 1 mg/L memiliki nilai BCf yang tinggi sebanding dengan pertumbuhan populasi yang paling tinggi dan puncak pertumbuhan yang tercepat di bandingkan konsentrasi 3 dan 5 mg/L, pada hari ke- 7 adalah 0,2405 ppm, Yusuf (2014), menggunakan logam berat Cu menyatakan bahwa konsentrasi logam berat Cu mempengaruhi populasi *S. platensis*. Konsentrasi Cu 1 mg/L mempercepat pertumbuhan populasi, konsentrasi Cu 3 mg/L menghambat dan konsentrasi Cu 5 mg/L. *S. platensis* mampu menurunkan konsentrasi logam berat Cu dalam media kultur. Semangkin besar populasi maka semakin besar penyerapan logam berat Cu oleh sel, persentase penurunan logam berat Cu dalam medium berbanding lurus dengan waktu papar yang dibutuhkan.

Mekanisme penyerapan Cd oleh *Oscillatoria* terdiri atas dua proses yaitu adsorpsi dan absorbs. Mekanismenya berupa pertukaran ion dan pengikatan ion logam berat oleh gugus fungsi yang terdapat pada permukaan sel. Dinding sel mikroalga umumnya terdiri atas selulosa yang memiliki gugus fungsional seperti hidroksil yang dapat berikatan dengan logam berat. Selulosa berpotensi sebagai penangkap ion logam karena gugus OH yang terikat dapat berinteraksi

dengan adsorbat (logam Cd). Adanya gugus OH tersebut menyebabkan terjadinya mekanisme pertukaran ion logam berat Cd dengan selulosa. Absorpsi berlangsung melalui transport aktif dan prosesnya berlangsung lebih lambat dari pada absorpsi. Logam berat yang terasorpsi akan terakumulasi di dalam sel yang akan berikatan dengan protein pengikat logam seperti metalotionein dan fitikelatin, selanjutnya logam berat tersebut akan diakumulasi di vakuola (Devinta *et al.*, 2013).

Menurut konsep HSBA (*Hard Soft Acid Base*) yang dikemukakan oleh Pearson (Wetipo, *et al.*, 2013), ion Cd^{2+} merupakan asam lunak yang dapat bereaksi dengan gugus fungsi yang terdapat di dinding sel *Oscillatoria* seperti gugus fungsi hidroksil yang bersifat basa. Gugus fungsi pada dinding sel *Oscillatoria* berinteraksi kuat dengan asam yang bersifat lemah seperti ion Cd^{2+} sehingga ion Cd lebih mudah dijerap pada dinding sel *Oscillatoria*.

6

PEMANFAATAN *Scenedesmus* sp. SEBAGAI PENYERAPAN LOGAM BERAT Zn DAN Cd

6.1. *Scenedesmus* Sp.

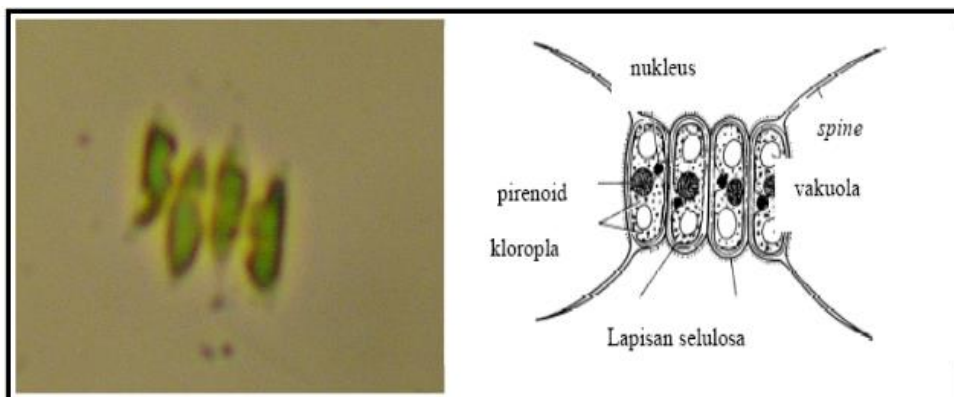
Kata *Scenedesmus* berasal dari bahasa Yunani. *Scene* yang artinya susunan papan dan *desmos* yang berarti ikatan. *Scenedesmus* termasuk ke dalam kelas *Chlorophyceae*, bangsa *Chlorococcales*, dan suku *Scenedesmus*. Marga *Scenedesmus* merupakan mikroalga eukariotik yang termasuk anggota divisi *Chlorophyta* (alga hijau). *Scenedesmus* merupakan mikroalga yang dapat berbentuk uniseluler atau koloni yang umumnya terdiri atas 2, 4, 8, atau 16 sel secara lateral. Koloni *Scenedesmus* merupakan koloni caenobitic. Jumlah sel dalam koloni *Scenedesmus* bervariasi tergantung dari jenis.

Scenedesmus dapat dibagi menjadi 10 divisi dan 8 divisi alga merupakan bentuk uniseluler. Dari 8 divisi alga, 6 divisi telah digunakan untuk keperluan budidaya perikanan sebagai pakan alami. Koloni *Scenedesmus* dapat terbentuk apabila kondisi lingkungan memiliki konsentrasi nutrisi yang rendah terutama dari unsur nitrogen, sedangkan bentuk uniseluler terbentuk apabila kondisi lingkungan memiliki konsentrasi nutrisi yang tinggi. Selain konsentrasi nutrisi, pembentukan koloni *Scenedesmus* juga dipengaruhi oleh suhu. *Scenedesmus* yang diinkubasi pada suhu rendah (10°C) memiliki persentase koloni yang lebih banyak jika dibandingkan dengan

Universitas Sriwijaya

Scenedesmus yang diinkubasi pada suhu ruang. Sel *Scenedesmus* berbentuk silindris, ukuran bervariasi, panjang sekitar 8-20 μm dan lebar sekitar 3-9 μm . *Scenedesmus* memiliki struktur sel yang sederhana.

Sel *Scenedesmus* diselubungi oleh dinding yang tersusun atas tiga lapisan, tiap satu sel diselubungi lapisan dalam yang merupakan lapisan selulosa dan lapisan tengah merupakan lapisan tipis yang strukturnya seperti membran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.1. Pada beberapa jenis terdapat ornamen pada ujung terminalnya yang disebut *spine*. *Spine* berfungsi untuk keseimbangan, mendeteksi keberadaan pemangsa atau membantu sel mencapai tempat yang mendapat cahaya dan nutrisi yang optimum, setiap satu sel *Scenedesmus* mengandung satu inti sel dan mempunyai lapisan kloroplas yang mengandung pirenoid.



Gambar 6.1. Struktur Morfologis *Scenedesmus* sp.

Berikut adalah klasifikasi taksonomi dari *Scenedesmus* sp. menurut Meyen (1829):

Kingdom : *Plantae*
 Filum : *Chlorophyta*
 Kelas : *Chlorophyceae*

Ordo : *Chlorococcales*
 Famili : *Scenedesmaceae*
 Genus : *Scenedesmus*
 Spesies : *Scenedesmus* sp.

Pigmen *Scenedesmus* terdiri atas klorofil a, klorofil b, dan karotenoid. Klorofil a berfungsi untuk mengubah energi cahaya menjadi energi kimia dan klorofil b berfungsi sebagai pengumpul cahaya untuk diteruskan ke klorofil a. Karotenoid berfungsi sebagai tempat pengumpul cahaya dan antioksidan yang berperan untuk mencegah kerusakan sel radikal bebas. Banyak jenis *Scenedesmus* yang ditemukan di perairan yang tercemar logam berat, contohnya *Scenedesmus bijuga*, *S. obliquus*, *S. quadricauda*, *S. armatus*, *S. serratus*, dan *S. iongus*.

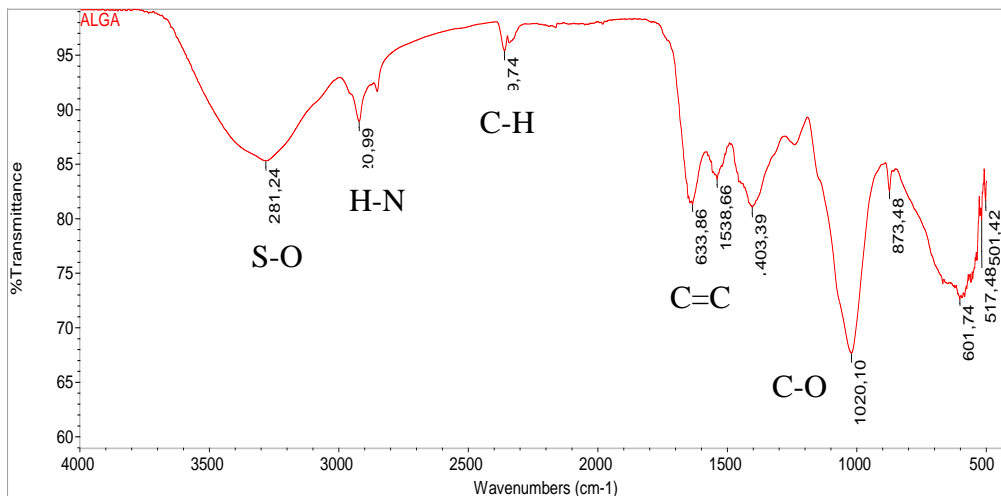
6.2. Biomassa Alga

Hasil penelitian di laboratorium populasi *Scenedesmus* yang diperoleh dari perairan lahan basah di wilayah Inderalaya, Sumatera Selatan untuk perhitungan biomassa alga dilakukan dengan pengukuran berat basah dan berat kering alga selama 4 minggu berdasarkan pada Tabel 6.1.

Tabel 6.1. Biomassa alga dalam berat basah dan berat kering

Media Kultur Pengulangan	Berat Basah (gr/L)	Berat Kering (gr/L)
I	132,4078	42,544
II	106,4208	1,9781
III	10,1960	0,6150
	249,0246	45,1371
		Berat keseluruhan: 4,9683

Berdasarkan Tabel 6.1, biomassa alga *Scenedesmus* sp. pada media kultur dalam bentuk biomassa basah dan biomassa kering menunjukkan bahwa alga memiliki kandungan air yang sangat tinggi.



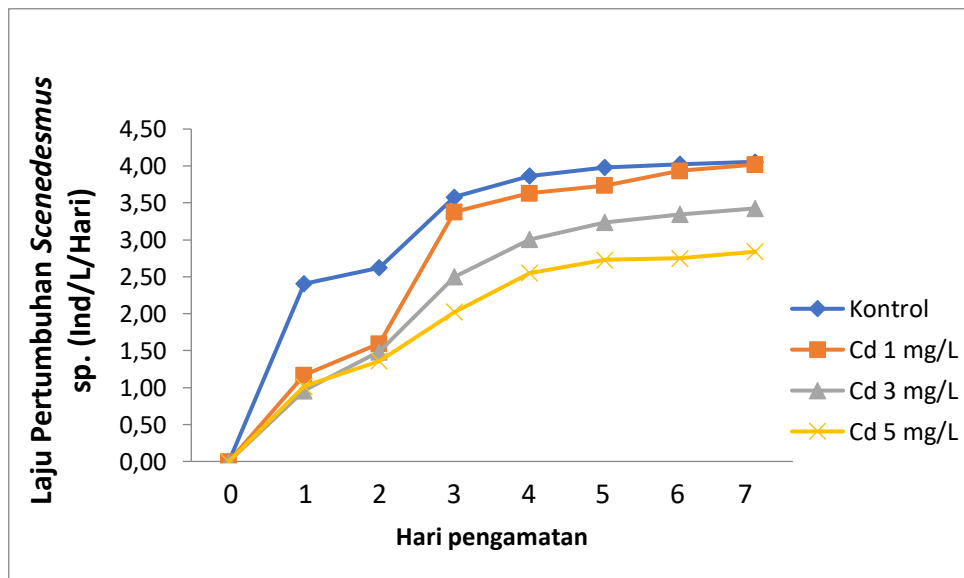
Gambar 6.2. Grafik pengukuran FTIR

Berdasarkan analisis FTIR diketahui sebagian gugus fungsi yang terkandung pada biomassa alga diantaranya adalah S-O dari SO_2 pada bilangan gelombang sekitar 3500 cm^{-1} , kemudian gugus N-H pada bilangan gelombang sekitar 300 cm^{-1} yang mengindikasikan adanya gugus C-H pada bilangan gelombang 2500 cm^{-1} . Tampak ikatan rangkap C=C dari gugus fenil, dan gugus C-O pada bilangan gelombang sekitar $1200\text{-}1000 \text{ cm}^{-1}$. Menurut Muhammad Faesal Bakhri (2011), pada spektrum FTIR biomassa alga hijau yang telah dikontakkan dengan larutan logam terdapat perbedaan profil spektrum ataupun pergeseran bilangan gelombang, hal ini mengindikasikan bahwa gugus-gugus tersebut mungkin berperan dalam proses adsorpsi logam berat.

Berdasarkan spektrum spektroskopi FTIR dan komposisi unsur penyusun biomassa di atas dapat disimpulkan bahwa makromolekul

penyusun alga hijau murni mengandung gugus-gugus amina, karboksil, hidroksil, alkil, fosfat, dan sulfat. Menurut Ratih Kumala Dewi (2009) hasil FTIR alga hijau *Scenedesmus* sp. diharapkan dapat menyerap ion logam yang terkandung didalam suatu limbah dan dapat berikatan dengan gugus fungsi khususnya gugus amina, karboksil, hidroksil, alkil, fosfat, sulfat melalui interaksi ionik maupun polar. Dimana kemampuan ion logam membentuk kompleks tergantung pada kemampuan untuk mempolarisasi yaitu perbandingan muatan/jari-jari ion logam tersebut serta sifat kebasan ligan. Pusat muatan positif dengan kerapatan yang tinggi, sehingga mendapatkan interaksi yang kuat.

6.3. Laju Pertumbuhan *Scenedesmus* sp. Dalam Media Di Laboratorium



Gambar 6.3. Laju pertumbuhan *Scenedesmus* sp. (Ind/L/Hari)

Pada Gambar 6.3, laju pertumbuhan *Scenedesmus* sp. menunjukkan bahwa mikroalga *Scenedesmus* sp. mengalami pertumbuhan yang baik pada setiap perlakuan yang diberikan.

Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa mikroalga *Scenedesmus* sp. masuk pada fase eksponensial pada hari ke-0 hingga hari ke-4. Ini sesuai dengan pernyataan Hadiyanto dan Maulana (2012) yang menyatakan bahwa fase eksponensial ditandai dengan terjadinya periode pertumbuhan yang cepat, sel membelah dengan laju konstan, aktivitas metabolik konstan, dan keadaan pertumbuhan seimbang antara suplai makanan dan kenaikan mikroalga, sedangkan ciri metabolisme selama fase logaritmik atau eksponensial yaitu ditandai dengan tingginya aktivitas fotosintesis yang berguna untuk pembentukan protein dan komponen-komponen plasma sel yang dibutuhkan dalam pertumbuhan. Secara alami pertumbuhan dari mikroalga akan menurun setelah mencapai kondisi optimum. Hal ini terjadi karena jumlah nutrisi pada medium menurun dengan bertambahnya kepadatan mikroalga.

Hari ke-7, mikroalga *Scenedesmus* sp. mengalami laju pertumbuhan tertinggi yang terdapat pada perlakuan kontrol yakni mencapai 4,06 ind/L/Hari, dilanjutkan dengan laju pertumbuhan dengan Cd 1 mg/L mencapai 4,02 ind/L/Hari, serta laju pertumbuhan dengan Cd 3 mg/L mencapai 3,43 ind/L/Hari dan laju pertumbuhan terendah terdapat pada perlakuan Cd 5 mg/L yaitu sebesar 2,84 ind/L/Hari.

Scenedesmus sp. dengan perlakuan tanpa logam memiliki adaptasi yang sangat baik terhadap media kultur, dapat dilihat dari nilai laju pertumbuhan pada hari ke-1 sebesar 2,41 ind/L/Hari. Hal tersebut menggambarkan bahwa dalam waktu yang kurang dari satu hari, *Scenedesmus* sp. memiliki adaptasi yang sangat baik terhadap lingkungan kultur. Fase lag pada pertumbuhan *Scenedesmus* sp. ini berlangsung selama kurang dari 24 jam. Jumlah populasi mikroalga terus meningkat hingga dari hari ke-0 hingga memasuki fase pertumbuhan eksponensial sampai hari ke-4. Salah satu faktor yang menentukan lamanya fase

adaptasi adalah umur kultur yang digunakan sebagai inokulum. Fase adaptasi akan menjadi lebih singkat atau bahkan tidak terlihat apabila sel-sel yang diinokulasikan berasal dari kultur yang berada dalam fase eksponensial (Prihantini *et al.*, 2007).

Sedangkan, laju pertumbuhan *Scenedesmus* sp. dengan perlakuan Cd 5 mg/L terjadi sangat lambat, dimana pada hari ke-1 laju pertumbuhannya sebesar 1,02 ind/L/Hari dan pada hari ke-7 laju pertumbuhannya hanya sebesar 2,84 ind/L/Hari. Pada medium yang diberikan perlakuan logam berat Cd, pertumbuhan mikroalga tersebut terhambat akibat dari pemberian logam berat Cd, tetapi pada perlakuan Cd 1 mg/L masih terlihat pertumbuhan yang signifikan pada hari ke-3 yakni 132×10^3 Individu/L, dan peningkatan pada hari ke-7 sebesar 250×10^3 Individu/L, hal ini dikarenakan pada perlakuan Cd 1 mg/L logam tersebut masih bisa ditoleransi oleh mikroalga *Scenedesmus* sp, sesuai dengan pernyataan Andersen (2005) bahwa Cd memiliki sifat yang hampir sama dengan seng (Zn) sehingga Cd dapat menggantikan fungsi Zn dalam reaksi enzimasasi dan mengubah struktur enzim dan mempengaruhi aktivitasnya. Dimana dalam jumlah yang sedikit Zn mampu mendorong perkembangan pertumbuhan, sehingga logam Cd mampu mendorong pembelahan sel.

Pada perlakuan Cd 3 mg/L mulai terjadi penurunan pertumbuhan dimana pada hari ke-7 pertumbuhan mikroalga hanya sebesar 144×10^3 Ind/L, penurunan pertumbuhan ini terjadi akibat logam kadmium yang terdapat di dalam filtrat mulai mempengaruhi pertumbuhan mikroalga *Scenedesmus* sp. dikarenakan oleh konsentrasi logam yang cukup tinggi serta mulai berkurangnya asupan nutrisi yang terdapat di dalam filtrat. Konsentrasi logam yang cukup tinggi tersebut dan berkurangnya asupan

nutrient yang terdapat di dalam filtrat mengakibatkan pembelahan sel yang dilakukan oleh mikroalga menjadi lambat. Umumnya, mikroalga menduplikasikan diri dalam jangka waktu 24 jam atau bahkan 3,5 jam selama fasa pertumbuhan eksponensial. Nutrien atau unsur hara merupakan parameter penting yang mendukung pertumbuhan mikroalga dan terdiri atas mikronutrien dan makronutrien. Makronutrien tersebut antara lain adalah C, H, N, P, K, S, Mg, dan Ca, sedangkan mikronutrien yang dibutuhkan adalah Fe, Cu, Mn, Zn, Co, Mo, Bo, Vn, dan Si (Kawaroe *et al.*, 2009).

Kelimpahan pertumbuhan mikroalga *Scenedesmus* sp. pada media tanpa logam sangat baik jika dibandingkan dengan media yang diberikan perlakuan logam berat Cd. Ini menunjukkan bahwa pemberian logam berat Cd ke dalam media sangat mempengaruhi pertumbuhan mikroalga tersebut sebagaimana pernyataan Purnamawati (2015) bahwa beberapa jenis logam berat berguna untuk metabolisme makhluk hidup dalam kadar rendah. Kadar logam berat yang tinggi bersifat toksik dan berbahaya bagi makhluk hidup, ini sesuai dengan grafik dimana kelimpahan pada media yang terpapar logam berat Cd 5 mg/L hanya mencapai 86×10^3 Ind/L pada hari ke-7.

Kelimpahan mikroalga *Scenedesmus* sp. pada perlakuan Cd 5 mg/L jelas sangat rendah jika dibandingkan dengan kelimpahan mikroalga *Scenedesmus* sp. pada perlakuan tanpa logam dan dengan perlakuan Cd 1 dan 3 mg/L. Selain faktor konsentrasi logam Cd yang tinggi di dalam filtrat, kelimpahannya juga bisa dipengaruhi oleh berkurangnya nutrisi yang terdapat di dalam filtrat serta sudah mulai berkurangnya kemampuan mikroalga tersebut untuk melakukan reproduksi sel akibat logam Cd yang bersifat racun terhadap mikroalga *Scenedesmus* sp. itu sendiri.

6.4. Kelimpahan *Scenedesmus* sp. Dalam Media Tumbuh Mengandung Logam

Masa pertumbuhan mikroalga dapat diukur berdasarkan biomassa maupun jumlah sel dalam mediumnya dan menunjukkan bahwa populasi dapat tumbuh dengan baik dalam media buatan BG-11 seperti ditunjukkan dalam Tabel 6.1 berikut.

Tabel 6.1. Kelimpahan (individu/mL) *Scenedesmus* sp. dalam media kultur BG-11 di Laboratorium selama 4 minggu pengamatan

Kultur Media Ulangan	Minggu ke-				
	T ₀ (Ind/mL)	T ₁ (Ind/mL)	T ₂ (Ind/mL)	T ₃ (Ind/mL)	T ₄ (Ind/mL)
1	329	458	487	358	327
2	158	321	361	280	224
3	137	289	295	267	138

Pada minggu kedua (T₁) kultur *Scenedesmus* sp. dalam medium BG-11 mengalami pertumbuhan jumlah individu alga. Disini alga telah memasuki fase eksponensial dimana jumlah laju pertumbuhan alga sendiri terus bertambah dari sebelumnya hal ini dikarenakan pada minggu kedua (T₁) mengalami Fase Lag (Adaptasi). Menurut Isnansetyo dan Kurniastuty (1995), Selama fase ini pertumbuhan tidak secara nyata terlihat, karena itu fase ini juga dinamakan fase adaptasi dimana sesaat setelah penambahan inokulum ke dalam media kultur, populasi belum mengalami pertumbuhan. Ukuran sel pada saat ini pada umumnya meningkat. Secara fisiologis fitoplankton sangat aktif dan terjadi proses

sintesis protein baru. Organisme mengalami metabolisme, tetapi belum terjadi pembelahan sel hingga kepadatan sel belum meningkat.

Pada minggu ketiga (T_2) merupakan puncak kenaikan pada pertumbuhan alga tersebut karena sedang mengalami Fase logaritmik (log) atau Eksponensial. Menurut Hexa A. H (2013), Fase ini dimulai dengan pembelahan sel dengan laju pertumbuhan yang meningkat secara intensif. Bila kondisi kultivasi optimum maka laju pertumbuhan pada fase ini dapat mencapai nilai maksimum. Pada fase ini merupakan fase terbaik memanen mikroalga untuk keperluan pakan ikan atau industri.

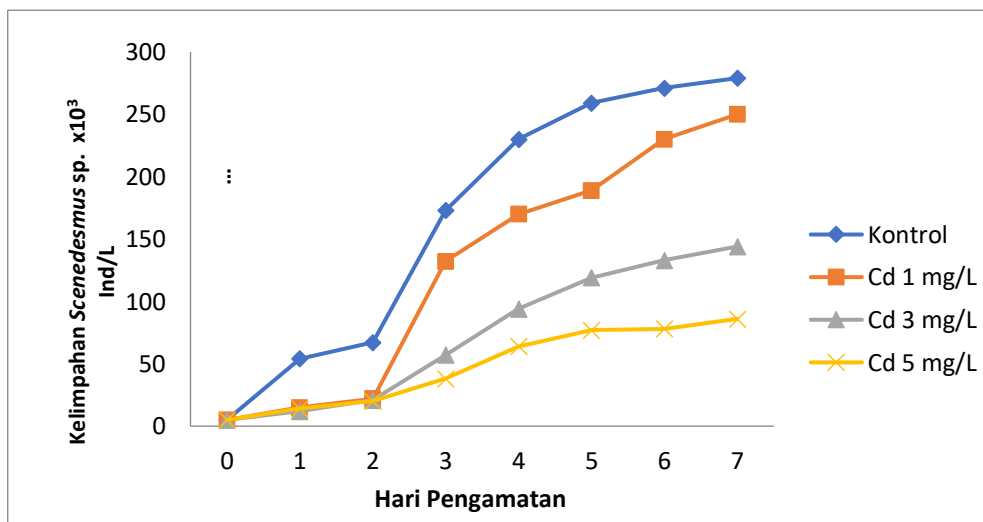
Sebaliknya, minggu keempat (T_3) untuk kultur media dari tiga ulangan yang dilakukan menunjukkan bahwa pada minggu ini mengalami Fase Stasioner dimana pada fase ini laju pertumbuhan berbanding lurus dengan laju kematian sehingga penambahan maupun pengurangan mikroalga relatif sama, oleh karena itu kepadatan kultur menjadi tetap.

Penurunan kelimpahan laju pertumbuhan alga *Scenedesmus* sp. dapat dilihat pada minggu kelima (T_4). Hal ini terjadi dikarenakan pada T_4 masa pertumbuhan alga *Scenedesmus* sp. telah hampir mencapai fase kematian. Dianursati (2012) menjelaskan bahwa fase kematian merupakan fase dimana jumlah populasi sel berkurang dan semakin menurun dari waktu ke waktu, jumlah sel mati per satuan waktu perlahan-lahan dan akhirnya kecepatan mati dari sel-sel menjadi konstant, selain itu fase kematian alga dapat dipengaruhi juga oleh ketersediaan nutrisi seperti media yang dipakai, sumber cahaya dan akumulasi oksigen yang dihasilkan dari reaksi fotosintesis. Jumlah sel yang semakin banyak dapat menghalangi cahaya yang masuk ke dalam

medium yang menyebabkan sel mati karena sulit untuk berfotosintesis dan tumbuh kembali.

6.5. Penyerapan Logam Berat Cd Dalam Kondisi Laboratorium

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa mikroalga *Scenedesmus* sp. mengalami kelimpahan pertumbuhan yang baik tanpa dan dengan logam sesuai Gambar 6.4. Jumlah kelimpahan mikroalga *Scenedesmus* sp. pada awal kultivasi adalah $\pm 5 \times 10^3$ Ind/L. Berdasarkan pengamatan, mikroalga *Scenedesmus* sp. terus mengalami peningkatan pertumbuhan baik di dalam media tanpa logam maupun di dalam media dengan perlakuan variasi konsentrasi Cd yaitu sebagai berikut:



Gambar 6.4. Kelimpahan *Scenedesmus* sp. ($\times 10^3$ Ind/L) dalam berbagai perlakuan logam Cd dalam kondisi laboratorium

Pada Gambar 6.4 terlihat bahwa kelimpahan mikroalga *Scenedesmus* sp. dari hari ke-0 hingga hari ke-7 menunjukkan pertumbuhan mikroalga *Scenedesmus* sp. pada medium tanpa logam mencapai 279×10^3 Ind/L, selanjutnya pada perlakuan Cd 1 mg/L

mencapai 250×10^3 Ind/L, dan pada perlakuan Cd 3 mg/L mencapai 144×10^3 Ind/L, serta perlakuan pada Cd 5 mg/L mencapai 86×10^3 Ind/L. Kelimpahan sel *Scenedesmus* sp. yang tinggi ini disebabkan oleh proses kultivasi yang dilakukan dengan menggunakan media *Bold Basal Medium*, dimana *Bold Basal Medium* ini sesuai dengan karakteristik mikroalga *Scenedesmus* sp. yang memiliki habitat yang berada di perairan air tawar dan payau serta termasuk ke dalam divisi *Chlorophyta* (Prihantini, 2007) juga diduga karena pada *Bold Basal Medium* terdapat unsur P dan K dalam senyawa KH_2PO_4 dan K_2HPO_4 yang berperan penting dalam proses pertumbuhannya. Menurut Kuhl (1974), fungsi K_2HPO_4 adalah sebagai sumber fosfor untuk sintesis senyawa penghasil energi bagi aktivitas sel, sementara itu unsur K berperan dalam proses pemanjangan sel, memperkuat sel tubuh alga, memperlancar metabolisme dan penyerapan nutrisi, serta sesuai dengan pernyataan Stein (1973) bahwa *Bold Basal Medium* adalah media tumbuh sintetik yang digunakan untuk mikroalga hijau jenis air tawar, BG-11 untuk jenis mikroalga hijau biru jenis air laut, dan medium mikroalga hijau jenis air laut menggunakan medium HSM (*high salt medium*) atau Sueoka.

Putra, Dewi dan Wayan (2015) juga telah melakukan penelitian tentang pengaruh jenis media yang terhadap konsentrasi biomassa dan klorofil mikroalga *Tetraselmis chuii* dimana penelitian ini membandingkan media *Walne*, *Bold basal medium* dan Media *MQ*. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa *Tetraselmis chuii* yang dikultivasi pada media *Walne* memiliki kepadatan yang lebih rendah dibandingkan *Bold basal medium*. *Tetraselmis chuii* yang dikultivasi pada media *MQ* memiliki kepadatan yang terendah. Hal ini diduga karena terjadi penurunan atau defisiensi unsur N yang diakibatkan oleh pertumbuhan sel yang cepat pada awal fase (Goksan et al., 2006). Selain

itu pada media *MQ* tidak terdapat unsur mikro (Mn, Cl, Zn, dan Fe) seperti yang terdapat dalam *Bold basal medium* dan *Media Walne*. Peningkatan pertumbuhan *Scenedesmus* sp. juga terjadi karena tersedianya nutrisi yang cukup disertai dengan kondisi lingkungan yang menunjang pertumbuhan mikroalga tersebut.

6.6. Konsentrasi Logam Berat Cd Pada Media Kultur

Pengukuran konsentrasi logam berat Cd dilakukan dengan menggunakan Analisa *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS) dengan masing-masing konsentrasi 1 mg/L, 3 mg/L, dan 5 mg/L pada media kultur. Tabel 6.2 menunjukkan konsentrasi Cd pada berbagai perlakuan dalam filtrat selama 7 hari sebagai berikut:

Tabel 6.2. Konsentrasi logam terukur pada proses biosorpsi

Konsentrasi Cd Pada Media Kultur (mg/L)		Penurunan (mg/L)
Awal	Akhir	
1	0,16	0,84
3	0,68	2,32
5	2,83	2,17

Tabel 6.2 menunjukkan penurunan konsentrasi logam berat Cd tertinggi terdapat pada perlakuan Cd 3 mg/L yakni 2,32 mg/L, lalu disusul dengan perlakuan Cd 5 mg/L sebesar 2,17 mg/L dan penurunan konsentrasi terendah terdapat pada perlakuan Cd 1 mg/L yaitu 0,84 mg/L, serta persentase penurunan konsentrasi logam berat Cd tertinggi terdapat pada perlakuan Cd 1 mg/L yakni 84% dan persentase penurunan konsentasi terendah terdapat pada perlakuan Cd 5 mg/L

yaitu 43,4%. Berdasarkan data ini dapat dibuktikan bahwa konsentrasi logam yang tinggi menyebabkan penurunan konsentrasi logam Cd oleh mikroalga *Scenedesmus* sp. terjadi tidak secara maksimal. Hal ini dikarenakan oleh konsentrasi logam yang terdapat di dalam media kultur yang melewati ambang batas dan bersifat toksik terhadap mikroalga tersebut. Data tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Purnamawati (2015) yang mengatakan bahwa semakin tingginya konsentrasi logam yang ditambahkan maka persentase penyerapan ion logam semakin rendah dan berdasarkan penelitian Puspasari (2006) yang menjelaskan bahwa pada konsentrasi rendah logam dibutuhkan oleh organisme hidup untuk pertumbuhan dan perkembangan, namun bila kadar meningkat logam akan berubah menjadi racun.

Kelimpahan sel *Scenedesmus* sp. dalam media tumbuh ikut serta dalam mempengaruhi penurunan logam berat Cd di dalam media, ini dikarenakan kelimpahan sel *Scenedesmus* sp. yang melimpah membutuhkan banyak nutrisi di dalam media tumbuhnya serta proses penurunan konsentrasi logam berat Cd oleh *Scenedesmus* sp. juga di pengaruhi oleh konsentrasi logam berat Cd itu sendiri. Seperti penelitian Soeprbowati dan Haryati (2012) yang melakukan penelitian menggunakan logam Pb dan Cd dan hasil dari penelitian tersebut menunjukkan besarnya prosentase penurunan Pb oleh *Chlorella* 90% dengan populasi kurang dari 300×10^2 Ind/mL, sedangkan presentase penurunan Cd 62% dengan populasi 350×10^2 Ind/mL karena daya toksik ion Cd lebih kuat dibandingkan ion Pb sehingga kerusakan sisi adsorpsi dinding sel karena ion Cd lebih besar, akibatnya ion Cd tidak dapat teradsorpsi lebih banyak dibandingkan ion Pb.

Logam Cd di dalam media akan diserap oleh mikroalga *Scenedesmus* sp. sebagai tambahan nutrisi karena sifat dari logam kadmium itu sendiri mirip dengan seng (Zn) dimana dalam jumlah sedikit akan membantu pertumbuhan dan perpanjangan sel dari mikroalga *Scenedesmus* sp. sesuai dengan pernyataan Andersen (2005) tentang logam Cd yang memiliki sifat yang hampir sama dengan seng (Zn) sehingga logam Cd mampu menggantikan fungsi seng (Zn) dalam mensintesis enzim karbonik anhidrase yang menghasilkan ion hidrogen yang digunakan untuk pembelahan sel.

Kemampuan sel *Scenedesmus* sp. dalam menurunkan kandungan logam berat dipengaruhi oleh faktor lingkungan baik biotik dan abiotik. *Scenedesmus* sp. juga memiliki kemampuan dalam melakukan mekanisme detoksifikasi ekstraseluler yang terjadi akibat interaksi Cd dengan gugus hidroksil pada selulosa yang melapisi dinding sel *Scenedesmus* sp. (Fauziah (2011). Purnamawati (2015) menambahkan bahwa fitoplankton dapat digunakan sebagai agen bioadsorben untuk logam berat yang terlarut di dalam air. Beberapa senyawa organik dalam fitoplankton (termasuk klorofil) mampu mengikat logam berat membentuk senyawa kompleks melalui gugus-gugus yang reaktif terhadap logam berat seperti sulfidril dan amina. Ikatan kompleks tersebut menyebabkan logam berat menjadi lebih stabil dan terakumulasi dalam sel fitoplankton.

Gugus fungsi pada dinding sel mikroalga seperti karboksil, tiol dan beberapa enzim yang mengandung Zn dapat berinteraksi dengan ion logam Cd melalui ikatan kovalen atau melalui pertukaran ion. Gugus C=O dan S-H merupakan basa lunak yang akan terikat kuat oleh ion logam Zn, sedangkan dalam setiap sel terdapat 260 jenis enzim yang

membutuhkan ion logam Zn yang dapat digantikan oleh ion logam Cd sehingga dapat merusak kerja enzim dan mengganggu jaringan sel fitoplankton (Liljas, 1972) dan pada kadar 0,01-0,1 mg/L CdCl₂ dapat mereduksi ATP, klorofil dan konsumsi O₂ oleh fitoplankton (Sanusi, 2006). Menurut penelitian yang dilakukan oleh Fauziah (2011) *Scenedesmus dimorphus* memiliki kemampuan dalam memanfaatkan logam Cd, hal ini juga berkaitan dengan kemampuan *Scenedesmus dimorphus* melakukan mekanisme detoksifikasi ekstraseluler yang terjadi akibat interaksi kadmium dengan gugus hidroksil pada selulosa yang melapisi dinding sel *Scenedesmus dimorphus* penyerapan Cd oleh dinding sel dapat mencegah Cd masuk ke dalam sel atau mengurangi jumlah yang masuk ke dalam sel.

DAFTAR PUSTAKA

- Adeko, R. (2018). PENGARUH CANGKANG KOPI SEBAGAI ADSORBEN DALAM MENURUNKAN KADAR BESI (Fe) PADA AIR SUMUR GALI. *Journal of Nursing and Public Health*, 6(2), 85–88. <https://doi.org/10.37676/jnph.v6i2.641>
- Ahalya, N., Ramachandra, T. v, & Kanamadi, R. D. (2003). Biosorption of Heavy Metals Research Journal Of Chemistry And Environment. *Research Journal of Chemistry and Environment*. <http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/water/paper/biosorption/biosorption.htm>
- Alam, F., Mobin, S., & Chowdhury, H. (2015). Third Generation Biofuel from Algae. *Procedia Engineering*, 105, 763–768. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.05.068>
- Anastopoulos, I., & Kyzas, G. Z. (2015). Progress in batch biosorption of heavy metals onto algae. *Journal of Molecular Liquids*, 209, 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.05.023>
- Atikah, A. (2021). PENYISIHAN LOGAM DALAM LIMBAH CAIR KERAJINAN TENUN SONGKET DENGAN METODE ELEKTROKIMIA. *Jurnal Redoks*, 6(1), 17. <https://doi.org/10.31851/redoks.v6i1.5613>
- Ayu Adi, I., Made Dewi Anggreni, A., & Wayan Arnata, I. (2015). OPTIMASI SALINITAS DAN pH AWAL MEDIA BG-11 TERHADAP KONSENTRASI BIOMASSA DAN KLOROFIL Tetraselmis chuii. *Jurnal Rekayasa Dan Manajemen Agroindustri*, 3(4), 51–61.
- Azizah, R., Nuraini, T., Endrawati, H., & Riza Maulana, I. (2017). Analisis Kandungan Logam Berat Kromium (Cr) Pada Air, Sedimen Dan Kerang Hijau (*Perna viridis*) Di Perairan Trimulyo Semarang. *Jurnal Kelautan Tropis Maret*, 20(1), 48–55. www.ejournal2.undip.ac.id/index.php/jkt
- Bakatula, E. N., Cukrowska, E. M., Weiersbye, I. M., Mihaly-Cozmuta, L., Peter, A., & Tutu, H. (2014). Biosorption of trace elements from aqueous systems in gold mining sites by the filamentous green algae (*Oedogonium* sp.). *Journal of Geochemical Exploration*, 144, 492–503. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.02.017>
- Bakhri, M. F. (2011). *Modifikasi Alga Hijau Scenedesmus sp. yang Terimmobilisasi Pada Polisulfon Sebagai Penyerap Ion Logam Cd⁺²*.
- Berniyanti, T. (2018). *Biomarker Toksisitas: Paparan Logam Tingkat Molekuler*. Airlangga University Pers.

- Birungi, Z. S., & Chirwa, E. M. N. (2015). The adsorption potential and recovery of thallium using green micro-algae from eutrophic water sources. *Journal of Hazardous Materials*, 299, 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.06.011>
- Bold, H. C., & Wynne, M. J. (1985). *Introduction to the Algae: Structure and Reproduction* (Second Edition). Prectice-Hall.
- Bon, I. C., Salvatierra, L. M., Lario, L. D., Morató, J., & Pérez, L. M. (2021). Prospects in Cadmium-Contaminated Water Management Using Free-Living Cyanobacteria (*Oscillatoria* sp.). *Water*, 13(4), 542. <https://doi.org/10.3390/w13040542>
- Botahala, L. (2019). *PERBANDINGAN EFEKTIVITAS DAYA ADSORPSI SEKAM PADI DAN CANGKANG KEMIRI TERHADAP LOGAM BESI Fe PADA AIR SUMUR GALI*. Deepublish.
- Bulgariu, D., & Bulgariu, L. (2012). Equilibrium and kinetics studies of heavy metal ions biosorption on green algae waste biomass. *Bioresource Technology*, 103(1), 489–493. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.016>
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>
- Christwardana, M., Nur, M. M. A., & Hadiyanto. (2013). Spirulina platensis : POTENSINYA SEBAGAI BAHAN PANGAN FUNGSIONAL. *Jurnal Aplikasi Teknologi Pangan*, 2(1), 1–4.
- Cole, F. L. (1988). Content Analysis. *Clinical Nurse Specialist*, 2(1), 53–57. <https://doi.org/10.1097/00002800-198800210-00025>
- Dewi, P. A. S. K., Suarya, P., & Sibarani, J. (2015). ADSORPSI ION LOGAM Pb²⁺ DAN Cu²⁺ OLEH BENTONIT TERAKTIVASI BASA (NaOH). *Chemistry*.
- Dewi, R. K. (2009). *STUDI BIOSORPSI ION LOGAM Cd(II) OLEH BIOMASSA ALGA HIJAU KULTUR LABORATORIUM (Scenedesmus sp.) YANG DI MODIFIKASI EDTA*.
- Dewi, R. S., Ilyas, M., & Sari, A. A. (2019). Ligninolytic Enzyme Immobilization from *Pleurotus ostreatus* for Dye and Batik Wastewater Decolorization. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 8(2). <https://doi.org/10.15294/jpii.v8i2.19372>
- Dianursanti, & Religian, P. (2013). Peningkatan Perolehan Hasil Lipid dari *Nannochloropsis* sp Menggunakan Metode Ekstraksi Kombinasi Bligh-dryer dan Osmotic Stress. *Prosiding STNK Topi 2013*.

- Dwivedi, S. (2012). Bioremediation of Heavy Metal by Algae: Current and Future Perspective. *Journal of Advanced Laboratory Research in Biology*. www.sospublication.co.in
- Eckenfelder, W. W. (2000). *Industrial Water Pollution Control*. McGraw-Hill.
- Endrawati, H., & Riniatsih, I. (2013). Kadar Total Lipid Mikroalga *Nannochloropsis oculata* yang dikultur dengan suhu yang berbeda. In *Buletin Oseanografi Marina Januari* (Vol. 1). <http://ejournal.undip.ac.id/index.php/bulomaDiterima/Received:00-00-2012>
- Fauziah. (2011). *Efektivitas Penyerapan Logam Kromium (Cr IV) dan Kadmium (Cd) oleh Scendesmus dimorphus*.
- Febriani, R., Hasibuan, S., & Syafriadiman, D. (2020). The Effect of Different Light Intensity on Density and Carotenoid Content *Dunaliella Salina*. *Jurnal Perikanan Dan Kelautan*, 25(1), 36–43.
- Fitriyani, W., Harpeni, E., Moh Muhaemin Jurusan Perikanan dan Kelautan, dan, & Pertanian, F. (2017). *PENGARUH INTENSITAS CAHAYA TERHADAP PIGMEN CAROTENOID, FUcoxANTHIN, DAN PHAEOPHYTIN ZOOXANTHELLAE DARI ISOLAT KARANG LUNAK *Zoanthus sp.* EFFECT OF LIGHT INTENSITY ON CAROTENOID, FUcoxANTHIN, AND PHAEOPHYTIN PIGMENTS OF ZOOXANTHELLAE FROM SOFT CORAL *Zoanthus sp.* ISOLATE* (Vol. 9, Issue 2).
- Fomina, M., & Gadd, G. M. (2014). Biosorption: current perspectives on concept, definition and application. *Bioresource Technology*, 160, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.102>
- Fuziah, S. M., & Laily, A. N. (2015). Identifikasi Mikroalga dari Divisi Chlorophyta di Waduk Sumber Air Jaya Dusun Kreet Kecamatan Bululawang Kabupaten Malang. *Bioedukasi: Jurnal Pendidikan Biologi*, 8(1), 20. <https://doi.org/10.20961/bioedukasi-uns.v8i1.3150>
- Ghirardi, M. (2000). Microalgae: a green source of renewable H₂. *Trends in Biotechnology*, 18(12), 506–511. [https://doi.org/10.1016/S0167-7799\(00\)01511-0](https://doi.org/10.1016/S0167-7799(00)01511-0)
- Goksan, T., & Ak, I. (2006). Vegetative Growth of the Green Alga *Haematococcus pluvialis* Cultivated in Different Light-Path Lengths. *Asian Journal of Plant Sciences*, 5(3), 455–460. <https://doi.org/10.3923/ajps.2006.455.460>
- Grace Merry Nainggolan, J., Tanjung, A., & Effendi, I. (2018). GROWTH OF *Spirulina platensis* IN INDOOR AND SEMI OUTDOOR CULTURING SYSTEMS. *Asian Journal of Aquatic Sciences*, 1(1), 22–28. <https://doi.org/10.31258/ajoas.1.1.22-28>

- Gultom, S. O. (2018). MIKROALGA: SUMBER ENERGI TERBARUKAN MASA DEPAN. *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, 11(1), 95. <https://doi.org/10.21107/jk.v11i1.3802>
- Hadi, A., & Asiah, A. (2015). PENENTUAN BATAS LINEARITAS METODE PENGUJIAN AIR RAKSA DALAM AIR SECARA SPEKTROFOTOMETRI SERAPAN ATOM UAP DINGIN SESUAI SNI 6989.78 : 2011. *Jurnal Ecolab*, 9(1), 36–45. <https://doi.org/10.20886/jklh.2015.9.1.36-45>
- Hadiyanto, & Azim, M. (2012). *Mikroalga: Sumber Pangan dan Energi Masa Depan* (First). Undip PRESS.
- Hardian, A., Ramadhiany, A. A., Syarif, D. G., & Budiman, S. (2017). SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF Fe₂O₃ NANOPARTICLES USING AVERROA BILIMBI AS BIOMATERIAL CHELATING AGENT FOR NANOFLUIDS APPLICATION. *Alchemy: Jurnal Penelitian Kimia*, 13, 133–146.
- Hardiyanto, & Azim, M. (2012). *Mikroalga: Sumber Pangan dan Energi Masa Depan* (1st ed.). Undip Press.
- Hariyati, R. (2008). *Pertumbuhan dan Biomassa Spirulina sp dalam Skala Laboratoris*. 10(1), 19–22.
- Harmoko, Lokaria, E., & Misra, S. (2018). EKSPLORASI MIKROALGA DI AIR TERJUN WATERVANG KOTA LUBUKLINGGAU. *Bioedukasi*, 8(1).
- Harun, R., Singh, M., Forde, G. M., & Danquah, M. K. (2010). Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 1037–1047. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.004>
- Henrikson, R. (2021). *Spirulina World Food*.
- Hentiana, Setiawan, D., Mohadi, R., Hermansyah, & Zulkifli, H. (2020). The Reduction of Cadmium Concentration by Oscillatoria Microalgae in a Culture Media. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 833(1), 012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/833/1/012015>
- Horner, R. A. (2006). Algal Culturing Techniques. *Harmful Algae*, 5(5), 620–621. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2005.06.003>
- Hutagalung, H. P. (1984). *Logam Berat dalam Lingkungan Laut* (1st ed., Vol. 9). Pewartana Oceana.
- Ifhazrin Nurjana. (2021). *Pengaruh Geomorfologi Terhadap Proses Laterisasi Nikel (Ni) di Sulawesi*. UNG Press.
- Imani, S., Rezaei-Zarchi, S., Hashemi, M., Borna, H., Javid, A., Zand, A. M., & Abarghouei, H. B. (2011). Hg, Cd and Pb heavy metal bioremediation by

- Dunaliella alga. *Journal of Medicinal Plants Research*, 5(13), 2775–2780. <http://www.academicjournals.org/JMPR>
- Indrastuti, C., Sulardiono, B., Rudolf, M., Program, M., Manajemen, S., Perairan, S., Perikanan, J., Perikanan, F., Kelautan, I., Diponegoro, U., & Soedarto, J. (2014). KAJIAN INTENSITAS CAHAYA YANG BERBEDA TERHADAP KONSENTRASI KLOOROFIL-a PADA PERTUMBUHAN MIKROALGA *Spirulina platensis* DALAM SKALA LABORATORIUM. In *DIPONEGORO JOURNAL OF MAQUARES* (Vol. 3, Issue 4). <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/maquares>
- Irianti, T. T., Kuswandi, Nuranto, S., & Purwanto. (2021). *Antioksidan dan Kesehatan* (First edition). UGM Press.
- Isnansetyo, A., & Kurniastuti. (2012). *Teknik Kultur Phytoplankton dan Zooplankton Pakan Alami Untuk Pembenihan Organisme Laut*. Kanisius.
- Jayakumar, V., Govindaradjane, S., & Rajasimman, M. (2019). Isotherm and kinetic modeling of sorption of Cadmium onto a novel red algal sorbent, *Hypnea musciformis*. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(3), 793–803. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0566-2>
- Kabinawa, I. N. K. (2006). *Spirulina: Ganggang Penggempur Aneka Penyakit*. PT. Agromedia Pustaka.
- Kalin, M., Wheeler, W. N., & Meinrath, G. (2005). The removal of uranium from mining waste water using algal/microbial biomass. *Journal of Environmental Radioactivity*, 78(2), 151–177. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.05.002>
- Kawaroe, M., Prariono, T., Sanuddin, A., Wulansari, D., & Augustine, D. (2010). *Mikroalga Potensi dan Pemanfaatannya Untuk Produksi Bio Bahan Bakar*.
- Kesumaningrum, F., Ismayanti, N. A., & Muhaimin, M. (2019). Analisis Kadar Logam Fe, Cr, Cd dan Pb dalam Air Minum Isi Ulang Di Lingkungan Sekitar Kampus Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA). *IJCA (Indonesian Journal of Chemical Analysis)*, 2(01), 41–46. <https://doi.org/10.20885/ijca.vol2.iss1.art6>
- Kristianto, S., Wilujeng, S., & Wahyudiarto, D. (2017). ANALISIS LOGAM BERAT KROMIUM (Cr) PADA KALI PELAYARAN SEBAGAI BENTUK UPAYA PENANGGULANG PENCEMARAN LINGKUNGAN DI WILAYAH SIDOARJO. *Biota*, 3(2), 66. <https://doi.org/10.19109/Biota.v3i2.1196>
- Kuhl, S. N. E. (1973). PHOSPHORUS AN INDICATOR OF PEDOGENETIC WEATHERING PROCESSES. *Soil Science*.

- Kurniawan, J. I., & Aunurohim. (2014). Biosorpsi Logam Zn²⁺ dan Pb²⁺ Oleh Mikroalga *Chlorella* sp. *JURNAL SAINS DAN SENI POMITS*, 3(1), 2337-3520.
- Kurniawatingrum, D. (2019). *Uji Akumulasi Logam Timbal (Pb) Menggunakan Chlorella sp.*
- Liljas, A., Kannan, K. K., Bergstén, P. C., Waara, I., Fridborg, K., Strandberg, B., Carlbom, U., Järup, L., Lövgren, S., & Petef, M. (1972). Crystal structure of human carbonic anhydrase C. *Nature New Biology*, 235(57), 131-137. <https://doi.org/10.1038/newbio235131a0>
- Masithah, E. D., Rahardja, B. S., & Hardianie, T. N. O. K. (2013). Studi Perbandingan Kemampuan *Nannochloropsis* sp. dan *Spirulina* sp. sebagai Agen Bioremediasi terhadap Logam Berat Timbal (Pb)
<i>[Comparative Study Of Ability Nannochloropsis sp. And Spirulina sp. As Agent Bioremediation Of Heavy Metal Plumbum (Pb)]<i>. *Jurnal Ilmiah Perikanan Dan Kelautan*, 5(2), 167-174. <https://doi.org/10.20473/jipk.v5i2.11404>
- Metting, F. B. (1996). Biodiversity and application of microalgae. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 17(5-6), 477-489. <https://doi.org/10.1007/BF01574779>
- Miaratiska, N., & Azizah, R. (2015). HUBUNGAN PAPARAN NIKEL DENGAN GANGGUAN KESEHATAN KULIT PADA PEKERJA INDUSTRI RUMAH TANGGA PELAPISAN LOGAM DI KABUPATEN SIDOARJO. *Perspektif Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 1(1).
- Mohadi, R., Hanafiah, Z., Hermansyah, H., & Zulkifli, H. (2017). Adsorption of procion red and congo red dyes using microalgae *Spirulina* sp. *Science and Technology Indonesia*, 2(4), 102-104. <https://doi.org/10.26554/sti.2017.2.4.102-104>
- Mohadi, R., Hermansyah, H., Hariani, P. L., Hanafiah, Z., & Zulkifli, H. (2017a). Kinetic and Thermodynamic Study Removal of Co(II) Using Biosorbent *Spirulina* sp. in Aqueous Solution. *Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry*, 2(3), 83-86. <https://doi.org/10.24845/ijfac.v2.i3.83>
- Mohadi, R., Hermansyah, H., Hariani, P. L., Hanafiah, Z., & Zulkifli, H. (2017b). Kinetic and Thermodynamic Study Removal of Co(II) Using Biosorbent *Spirulina* sp. in Aqueous Solution. *Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry*, 2(3), 83-86. <https://doi.org/10.24845/ijfac.v2.i3.83>
- Mohadi, R., Hermansyah, Mavala, H., & Zulkifli, H. (2020). The effect of metal ion Cd(II) concentration on the growth of *Spirulina* sp. cultured on BG-11 medium. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 530(1), 012036. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/530/1/012036>

- Mohadi, R., Setiawan, D., & Zulkifli, H. (2018). Kinetic and Thermodynamic Adsorption of Cr(VI) onto Dried *Oscillatoria Splendida* in Aqueous Solution. *Science and Technology Indonesia*, 3(4), 195. <https://doi.org/10.26554/sti.2018.3.4.195-198>
- Mohadi, R., Setiawan, D., & Zulkifli, H. (2019). Biosorption of Cu(II) onto algae biomass (*Oscillatoria Splendida*) isolated from swamp water ecosystem in Palembang, South Sumatera. *Journal of Physics: Conference Series*, 1282(1), 012066. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1282/1/012066>
- Monteiro, C. M., Castro, P. M. L., & Malcata, F. X. (2012). Metal uptake by microalgae: Underlying mechanisms and practical applications. *Biotechnology Progress*, 28(2), 299–311. <https://doi.org/10.1002/btpr.1504>
- Mubarak, A. S., Meritasari, D., Sulmartiwi, L., & Masithah, E. D. (2012). Pengaruh Pemberian Pupuk Cair Limbah Ikan Lemuru (*Sardinella* sp.) dengan Dosis yang Berbeda Terhadap Pertumbuhan *Chlorella* sp.
<i>[Effect of Liquid Fertilizer Waste *Sardinella* Fish (*Sardinella* sp.) With Different Doses To The *Chlorella* sp. Growth]<i>; *Jurnal Ilmiah Perikanan Dan Kelautan*, 4(1), 27–32. <https://doi.org/10.20473/jipk.v4i1.11579>
- Muliani, M., Ayuzar, E., & Amri, M. C. (2018). PENGARUH PEMBERIAN PUPUK KASCING (Bekas Cacing) YANG DIFERMENTASI DENGAN DOSIS YANG BERBEDA DALAM KULTUR *Spirulina* sp. *Acta Aquatica: Aquatic Sciences Journal*, 5(1). <https://doi.org/10.29103/aa.v5i1.658>
- Munifah, I. (2008). Prospek Pemanfaatan Alga Laut untuk Industri. *Squalen Bulletin of Marine and Fisheries Postharvest and Biotechnology*, 3(2), 58. <https://doi.org/10.15578/squalen.v3i2.159>
- Murraya, Taufiq, N., & Supriyantini, E. (2018). Kandungan Logam Berat Besi (Fe) Dalam Air, Sedimen Dan Kerang Hijau (*Perna viridis*) Di Perairan Trimulyo, Semarang. *Journal of Marine Research*, 7(2), 133–140.
- Nainggolan, P. (2008). *Efektivitas Penurunan Kadar Fe Dan Mn Sumur Gali Dengan Menggunakan Saringan Pasir Sistem Up Flow Berdasarkan Jenis Dan Ketebalan Media Saringan Di Dusun I Kikik Kecamatan Hamparan Perak Tahun 2007*.
- Nalimova, A. A., Popova, V. v., Tsoglin, L. N., & Pronina, N. A. (2005). The effects of copper and zinc on *Spirulina platensis* growth and heavy metal accumulation in its cells. *Russian Journal of Plant Physiology*, 52(2), 229–234. <https://doi.org/10.1007/s11183-005-0035-4>
- Nur, F. (2013). Fitoremediasi Logam Berat Kadmium (Cd). *Jurnal Ilmiah Biologi*.

- Nurhayati, C., Hamzah, B., & Pambayun, R. (2014). Pengaruh pH , konsentrasi isolat chlorella vulgaris dan waktu pengamatan terhadap tingkat cemaran limbah cair crumb rubber. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, 25(2).
- Palar, H. (2008). *Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat* (First edition). Raneka Cipta.
- Pangkey, H. (2009). Potensi Spirulina. *Jurnal Perikanan Dan Kelautan*, 5(3).
- Pranajaya, R. H., Djunaedi, A., & Yulianto, B. (2014). Tembaga (Cu) Menurunkan Kandungan Pigmen dan Pertumbuhan Mikroalga Merah, *Porphyridium cruentum* (Effect of Copper on Pigments Content and Growth of Red Microalgae, *Porphyridium cruentum*). *ILMU KELAUTAN: Indonesian Journal of Marine Sciences*, 19(2), 97. <https://doi.org/10.14710/ik.ijms.19.2.97-104>
- Prihantini, N. B., Damayanti, D., & Yuniati, R. (2010). PENGARUH KONSENTRASI MEDIUM EKSTRAK TAUGE (MET) TERHADAP PERTUMBUHAN *Scenedesmus* ISOLAT SUBANG. *MAKARA of Science Series*, 11(1). <https://doi.org/10.7454/mss.v11i1.213>
- Pujiono, A. E. (2013). *PERTUMBUHAN Tetraselmis chuii PADA MEDIUM AIR LAUT DENGAN INTENSITAS CAHAYA, LAMA PENYINARAN DAN JUMLAH INOKULAN YANG BERBEDA PADA SKALA LABORATORIUM*.
- Purnamawati, F. S., Soeprbowati, T. R., & Izzati, M. (2014). Potensi Chlorella vulgaris Beijerinck Dalam Remediasi Logam Berat Cd Dan Pb Skala Laboratorium. *Bioma: Berkala Ilmiah Biologi*, 16(2), 102. <https://doi.org/10.14710/bioma.16.2.102-113>
- Puspasari, R. (2017). LOGAM DALAM EKOSISTEM PERAIRAN. *BAWAL Widya Riset Perikanan Tangkap*, 1(2), 43. <https://doi.org/10.15578/bawal.1.2.2006.43-47>
- Puspitasari, W., Jusadi, D., Setiawati, M., Ekasari, J., Nur, A., & Sumantri, I. (2019). Utilization of green algae *Caulerpa racemosa* as feed ingredient for tiger shrimp *Penaeus monodon*. *Jurnal Akuakultur Indonesia*, 18(2), 162-171. <https://doi.org/10.19027/jai.18.2.162-171>
- Rahmadiani, W. devinta D., & Aunurohim. (2013). Bioakumulasi Logam Berat Kadmium (Cd) oleh *Chaetoceros calcitrans* pada Konsentrasi Sublethal. *Jurnal Sains Dan Seni Pomits*, 2(2), 2337-3520.
- Ratnawati, E., Ermawati, R., & Naimah, S. (2010). Teknologi Biosorpsi oleh Mikroorganisme, Solusi Alternatif untuk Mengurangi Pencemaran Logam Berat. *Jurnal Kimia Dan Kemasan*, 32(1), 34. <https://doi.org/10.24817/jkk.v32i1.2739>

- Regista, R., Ambeng, A., Litaay, M., & Umar, M. R. (2017). PENGARUH PEMBERIAN VERMIKOMPOS CAIR *Lumbricus rubellus* Hoffmeister PADA PERTUMBUHAN *Chlorella* sp. *BIOMA: JURNAL BIOLOGI MAKASSAR*, 2(1). <https://doi.org/10.20956/bioma.v2i1.1346>
- Rosihan, A., & Husaini. (2017). *Logam Berat Sekitar Manusia* (First). Pustaka Buana.
- Said, N. I. (2018). METODA PENGHILANGAN LOGAM MERKURI DI DALAM AIR LIMBAH INDUSTRI. *Jurnal Air Indonesia*, 6(1). <https://doi.org/10.29122/jai.v6i1.2447>
- Santosa, P. B., Andriani, S., & Adi, R. N. (2014). Kajian Dampak Penanaman Jenis Penghasil Kayu Terhadap Tata Air. *Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan DAS Terpadu Untuk Kesejahteraan Masyarakat*.
- Santosa, V., & Limantara, L. (2010). PHOTODYNAMIC THERAPY: NEW LIGHT IN MEDICINE WORLD. *Indonesian Journal of Chemistry*, 8(2), 279–291. <https://doi.org/10.22146/ijc.21638>
- Sanusi, H. S. (2006). *Kimia Laut: Proses Fisika-Kimia dan Interaksinya dengan Lingkungan*. Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor.
- Setiarto, R. H. B. (2020a). *Budidaya, Potensi, dan Pemanfaatan Mikroalga*. Spasi Media.
- Setiarto, R. H. B. (2020b). *Teknologi Pengemasan Pangan Antimikroba Yang Ramah Lingkungan*. CV. Penerbit Bukupedia Indonesia.
- Setiawan, A., Basyiruddin, F., Dermawan, D., Program,), Teknik, S., Limbah, P., Teknik, J., Kapal, P., Perkapalan, P., Surabaya, N., & Kimia, J. T. (2019). BIOSORPSI LOGAM BERAT Cu(II) MENGGUNAKAN LIMBAH SACCHAROMYCES CEREVISIAE. *Jurnal Presipitasi*, 16(1), 29–35.
- Setiyo, H., Hartanto, B., Hariyati, R., & Soeprbowati, T. R. (2013). PERTUMBUHAN POPULASI CHLORELLA VULGARIS BEIJERINCK DENGAN PERLAKUAN PENAMBAHAN LOGAM BERAT TEMBAGA (CU) PADA SKALA LABORATORIUM. In *Jurnal Biologi* (Vol. 2, Issue 1).
- Soeprbowati, T. R. (2014). Phycoremediation of Pb⁺², Cd⁺², Cu⁺², and Cr⁺³ by *Spirulina platensis* (Gomont) Geitler. *American Journal of BioScience*, 2(4), 165. <https://doi.org/10.11648/j.ajbio.20140204.18>
- Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E., & Isambert, A. (2006). Commercial applications of microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 101(2), 87–96. <https://doi.org/10.1263/jbb.101.87>

- Stein, J. R. (1973). *Handbook of Phycological Methods: Culture methods and growth measurements*. Cambridge University Press.
- Suprijanto, I., & Lubis, A. (1988). KANDUNGAN LOGAM BERAT DALAM SUMBER AIR MINUM DI DKI JAKARTA. *Environmental Science*.
- Supriyantini, E., & Soenardjo, N. (2016). Kandungan Logam Berat Timbal (Pb) Dan Tembaga (Cu) Pada Akar Dan Buah Mangrove *Avicennia marina* Di Perairan Tanjung Emas Semarang. *Jurnal Kelautan Tropis*, 18(2). <https://doi.org/10.14710/jkt.v18i2.520>
- Susilaningih, D. (2007). Accelerating of Pink Pigment Excretion from Cyanobacterium *Oscillatoria* by Co-Cultivation with *Anabaena*. *HAYATI Journal of Biosciences*, 14(1), 18–22. <https://doi.org/10.4308/hjb.14.1.18>
- Triatmojo Suharjono, Sihombing, D. T. H., Djojowidagdo, S., & Wiradarya, T. R. (2001). BIOSORPSI DAN REDUKSI KROM LIMBAH PENYAMAKAN KULIT DENGAN BIOMASSA *Fusarium* sp DAN *Aspergillus niger*. *Jurnal Manusia Dan Lingkungan*, 8(2), 70–81.
- Vonshak, A. (1997). *Spirulina: Growth, Physiology and Biochemistry*. In *Spirulina Platensis Arthrospira* (pp. 61–84). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482272970-11>
- Wahyuni, T. (2014). Sabun Natural Rumput Laut Sebagai Peluang Usaha Perempuan Pesisir Di Desa Sangrawayang - Sukabumi. *Prosiding Seminar Nasional Perikanan Indonesia*.
- Wang, S., Sirbu, D., Thomsen, L., Kuhnert, N., Ullrich, M. S., & Thomsen, C. (2019). Comparative lipidomic studies of *Scenedesmus* sp. (Chlorophyceae) and *Cylindrotheca closterium* (Bacillariophyceae) reveal their differences in lipid production under nitrogen starvation. *Journal of Phycology*, 55(6), 1246–1257. <https://doi.org/10.1111/jpy.12887>
- Wasti, A., & Ali Awan, M. (2016). Adsorption of textile dye onto modified immobilized activated alumina. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, 20(1), 26–31. <https://doi.org/10.1016/j.jaubas.2014.10.001>
- Wetipo, Y. S., Ch Mangimbulude, J., Rondonuwu, F. S., Magister Biologi, Pp., & Kristen Satya Wacana, U. (2013). *POTENSI Chlorella Sp SEBAGAI AGEN BIOREMEDIASI LOGAM BERAT DI AIR*.
- Winahyu, D. A., Anggraini, Y., Rustiati, E. L., Master, J., & Setiawan, A. (2013). Studi Pendahuluan Mengenai Keanekaragaman Mikroalga di Pusat Konservasi Gajah, Taman Nasional Way Kambas. *Prosiding Semirata FMIPA Universitas Lampung*.

- Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze, S., & Ang, H. M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 209, 172–184. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.002>
- Yasir, A. S., Wiranti, M. W., & Wulantika, N. W. (2019). ULASAN PUSTAKA: POTENSI *Spirulina platensis* TERHADAP AKTIVITAS ANTIOKSIDAN, ANTIDIABETES DAN ANTIHIPERTENS. *Jurnal Farmasi Malahayati*, 2(2), 164–174.
- Zakir, A., Hamid, A., & Emiyarti, D. (2019). Tingkat Akumulasi Nikel pada Kerang Bulu (*Anadara antiquata*) di Perairan Pesisir Dawi-Dawi Kecamatan Pomalaa Kabupaten Kolaka [Accumulation Level of Nickel in *Anadara antiquate* in Dawi Dawi Coastal, Pomalaa District, Kolaka Regency]. In *Jurnal Manajemen Sumber Daya Perairan* (Vol. 4, Issue 1).



Ekosistem habitat rawa banyak ditemukan di Sumatera Selatan dengan topografi tanah yang rendah. Fenomena ini memberikan bukti bahwa ekosistem habitat rawa banyak dipenuhi oleh berbagai jenis alga yang merupakan sumber bahan makanan bagi berbagai jenis ikan air tawar. Kandungan biomassa yang tinggi alga dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan melalui konversi menjadi biodiesel dan bioetanol.


Disamping itu alga juga memiliki potensi sebagai adsorben dalam penanganan cemaran logam-logam berat maupun radioaktif karena adanya gugus-gugus aktif yang dimilikinya. Beberapa alga hijau yang terdapat


di perairan air tawar maupun di lautan telah digunakan sebagai adsorben logam-logam dalam mengatasi cemaran lingkungan.

Berdasarkan hal tersebut, penulisan buku ini menyajikan keunggulan beberapa jenis alga (mikroalga) yang berasal dari habitat ekosistem air rawa sebagai adsorben berbagai jenis logam berat yakni Cu(II), Cr(III), Cd(II), Mn(II), dan Pb(II) yang merupakan logam-logam berat yang sering dijumpai baik disekitar wilayah industri maupun perairan alam di Sumatera Selatan.

Materi dalam buku referensi bersumber dari berbagai hasil penelitian yang dilakukan bersama dengan dosen maupun mahasiswa baik dari Program Studi Sarjana, Magister, maupun Doktor dari Fakultas MIPA Universitas Sriwijaya. Buku ini diharapkan dapat memberikan sumbangsih keilmuan bagi semua kalangan ilmuwan.

 **Bening**
media PUBLISHING

 www.bening-mediapublishing.com

 **0823 7200 8910**

