



Studi Literatur: Potensi Fikoremediasi Berbasis Strain Alga Sebagai Biosorben Kontaminan Logam Berat Pada Air Asam Tambang

Eprilia Simamora^{*1}, Mohammad Nurcholis², Aldin Ardian³, Rika Ernawati⁴, Eddy Winarno⁵

^{1,2,3,4,5} Program Magister Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta. Sleman, Yogyakarta, Indonesia.

DOI: <https://doi.org/10.29303/geoscienceed.v5i3.549>

Article Info

Received: 29 July 2024

Revised: 15 August 2024

Accepted: 28 August 2024

Correspondence:

Phone: -

Email:

212221007@student.upnyk.ac.id

Abstrak: Industri pertambangan secara tidak langsung dapat menghasilkan Air Asam Tambang (AAT), yang terbentuk akibat aktivitas kegiatan pertambangan. Air ini memiliki karakteristik pH rendah dengan sifat cenderung asam, serta seringkali disertai kandungan logam berat yang tinggi. Air asam tambang dapat mempengaruhi kualitas air dan kehidupan organisme makhluk hidup yang berdampak besar terhadap kerusakan lingkungan. Penelitian ini menyajikan studi literatur tentang pengelolaan air asam tambang menggunakan alternatif pemanfaatan biomassa berbasis strain alga yang dapat digunakan sebagai biosorben penghilangan kontaminan logam berat pada lingkungan perairan yang tercemar. Beberapa hasil penelitian telah membuktikan bahwa sebagian besar strain alga dapat mencapai setidaknya 90% dari kemanjuran penghilangan melalui tahap ekstraseluler dan intraseluler dengan menyisihkan kandungan Fe, Al, Mn, Ag, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn serta SO₄ dari air limbah yang terkontaminasi. Hasil dari penelitian menyebutkan bahwa *Chlorella sp.*, *Chlorella vulgaris*, *Spirulina sp.*, *Spirulina palentis*, *Spirogyra sp.* dan beberapa jenis alga lainnya terbukti efektif dalam menghilangkan logam berat dari air limbah yang terkontaminasi. Sehingga, penggunaan strain alga sebagai salah satu biosorben berbahan biologis dapat dimanfaatkan sebagai upaya pengendalian pencemaran lingkungan yang menjanjikan. Selain itu, studi ini memberikan informasi mengenai pengaruh dari konsentrasi jenis ion logam berat awal, kandungan adsorben, suhu, pH, waktu kontak, sistem logam berat, serta jenis alga dan pembawanya dalam penyerapan logam berat untuk mengidentifikasi strategi pengoptimalan kinerja penggunaan spesies strain alga. Oleh karena itu, tinjauan ini memberikan wawasan baru tentang mekanisme, hasil kinerja dan pengaruh penggunaan strain alga untuk meremediasi kontaminan logam berat khususnya dalam mengatasi pencemaran lingkungan perairan oleh air asam tambang. Diperlukan ruang penelitian lebih lanjut dalam studi ini yang berfokus pada potensi pengolahan air asam tambang menggunakan teknologi dengan bahan biologis berbasis strain alga.

Kata kunci: Strain Alga, Biosorpsi, Logam Berat, Air Asam Tambang, Studi Literatur.

Citation: Simamora, E., Nurcholis, M., Adrian, A., Ernawati, R., & Winarno, E. (2024). Studi Literatur: Potensi Fikoremediasi Berbasis Strain Alga sebagai Biosorben Kontaminan Logam Berat Pada Air Asam Tambang. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 5(3), 627-638. DOI: <https://doi.org/10.29303/geoscienceed.v5i3.549>

Email: 212221007@student.upnyk.ac.id

Pendahuluan

Air Asam Tambang yang dihasilkan dari kegiatan pertambangan cenderung memiliki tingkat pH rendah dengan kandungan logam berat yang sangat tinggi, sehingga dapat menyebabkan kerusakan lingkungan signifikan. Metode pengolahan secara konvensional sering kali tidak memberikan hasil yang memuaskan untuk mengatasi AAT. Oleh karena itu, diperlukan kembali metode efektif untuk memulihkan kontaminan logam berat dari lingkungan perairan agar pencemaran lingkungan dapat diminimalisir. Dalam penelitian ini, sistem remediasi berbasis strain alga dievaluasi untuk mengidentifikasi potensi dan tantangan yang ada bagi penelitian di masa depan. Beberapa jenis penggunaan spesies strain alga tertentu, seperti *Botryococcus braunii*, *Chlorella sp.*, *Chlorella vulgaris*, *Nephroselmis sp.*, *Chlorella pyrenoidosa*, *Eunotia exigua*, *Chlamydomonas sp.*, *Klebsormidium sp.*, *Kappaphycus alvarezii*, *Klebsormidium klebsii*, *Microspora tumidula*, *Oedogonium crissum*, *Mougeotia sp.*, *Nannochloropsis sp.*, *Scenedesmus sp.*, *Nannochloropsis oculata*, *Pseudochlorococum typicum*, *Turbinaria sp.*, *Spirogyra subsalsa*, *Sargassum crassifolium*, *Spirogyra verrucosa*, *Ulothrix*, *Scenedesmus quadricauda*, *Spirogyra sp.*, *Synechococcus sp.*, *Spirulina sp.*, *Spirulina plantensis*, dan *Stichococcus bacillaris* terbukti mampu menghilangkan logam berat dalam jumlah signifikan.

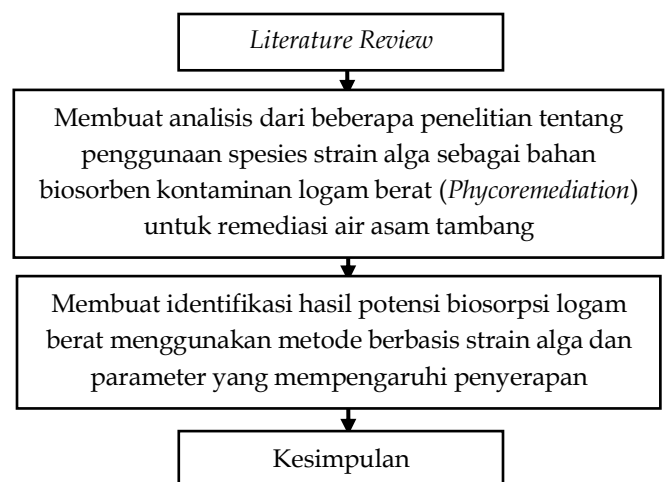
Fikoremediasi (*Phycoremediation*) adalah metode pemulihan lingkungan dengan memanfaatkan proses penggunaan makro- atau mikroalga untuk mengurangi atau mengubah (biotransformasi) polutan, termasuk nutrisi dan bahan kimia berbahaya dari air limbah (Olguin, 2003). Metode ini mengandalkan kemampuan alami mikroalga untuk menyerap, mengadsorpsi, dan memetabolisme berbagai kontaminan seperti logam berat dan bahan kimia berbahaya lainnya, sehingga air yang diolah dapat dilepaskan kembali dengan aman. Penggunaan strain alga sebagai bahan dekontaminasi dalam menghilangkan dan mengurangi kontaminan memiliki keunggulan utama salah satunya adalah pengolahan ini tidak memerlukan biaya terlalu tinggi, penanganan yang lebih mudah, tidak menyebabkan polusi, dan proses pemulihan relatif cukup sederhana untuk dapat didaur ulang (Kalin et al., 2006).

Teknologi fikoremediasi dalam memperbaiki kualitas air asam tambang merupakan bidang yang sedang berkembang. Peran strain alga adalah bertindak

sebagai super-akumulator dan super-adsorben yang memiliki selektivitas relatif tinggi terhadap berbagai elemen. Perawatan yang efektif dalam memulihkan AAT harus mampu melakukan proses regenerasi dengan sendirinya dan penggunaan strain alga adalah pilihan yang sangat ideal mengingat keberlanjutannya. Studi penelitian ini bertujuan membantu memperjelas peran dan potensi teknologi berbasis strain alga dalam mengatasi kontaminan logam berat sebagai salah satu pemulihan lingkungan perairan yang efektif saat ini. Saat ini, pengolahan yang menggunakan strain alga diterapkan bersamaan dengan proses pengolahan sekunder. Studi ini akan mengulas fokus penggunaan teknologi dengan menerapkan bahan biologis berbasis strain alga yang memiliki kapasitas tinggi dalam menyisihkan kandungan logam berat di perairan.

Metode Penelitian

Tahapan dalam penelitian ini ditunjukkan pada alur Gambar 1 dengan berdasarkan pada *literature review* yang dirangkum dari beberapa karya ilmiah. *Literature review* merupakan proses kritis mendalam dan evaluasi terhadap penelitian sejenis yang dilakukan sebelumnya (Shuttleworth, 2009). Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai acuan untuk mengidentifikasi penggunaan berbagai spesies strain alga dalam metode fikoremediasi untuk biosorpsi kontaminan logam berat khususnya pada limbah Air Asam Tambang (AAT). Tahapan penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:



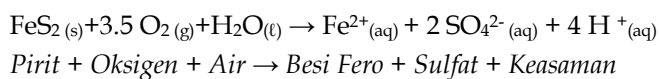
Gambar 1. Tahapan Penelitian

Hasil dan Diskusi

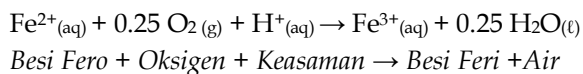
1. Air Asam Tambang

Air Asam Tambang (AAT) terbentuk melalui proses oksidasi mineral sulfida dengan air dan udara akibat kegiatan penambangan yang menghasilkan asam sulfat (Sandrawati, 2012). Mineral sulfida yang dijumpai pada kegiatan pertambangan adalah pirit (FeS_2). AAT biasanya memiliki karakteristik pH rendah yang bersifat asam diikuti kandungan logam berat tinggi. Reaksi pembentukan air asam tambang yang umum terjadi sebagai berikut (Stumm dan Morgan, 1981):

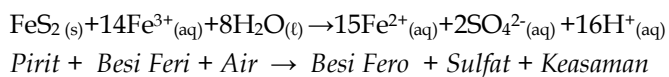
Reaksi pertama adalah reaksi oksidasi mineral (FeS_2) yang mengalami kontak dengan oksigen dan air, menghasilkan besi fero dan sulfat dilepaskan ke air.



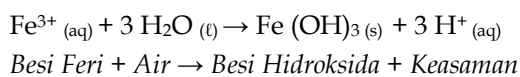
Reaksi kedua besi fero akan teroksidasi menjadi besi feri (Fe^{3+}) melalui kehadiran oksigen dan keasaman.



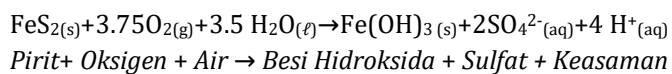
Reaksi ketiga merupakan reaksi propagasi (berantai). Besi feri mengoksidasi pirit, mempercepat laju oksidasi.



Reaksi keempat adalah terbentuknya presipitat ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) atau "yellowboy" berupa endapan berwarna oranye dalam air dengan kondisi pH yang rendah.



Ketika reaksi (1) hingga (4) digabungkan, maka akan terbentuk reaksi oksidasi pirit yang menghasilkan AAT.



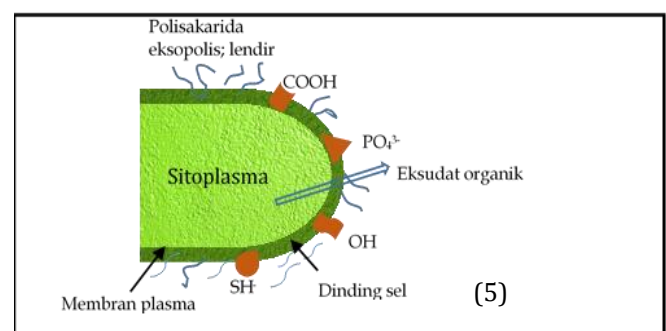
2. Mekanisme Alga Dalam Menghilangkan Logam

Biosorpsi adalah metode penyisihan logam berat dengan memanfaatkan bahan biologis salah satunya menggunakan mikroalga. Algae (tunggal:alga) adalah tumbuhan fotosintetik mikroskopik dengan bentuk yang sangat sederhana, tanpa akar, batang, atau daun. Di dalam air, berukuran sel tunggal kecil dan memiliki warna hijau; cabangnya tembus pandang dan sebagian besar terdiri dari lumut hijau.

Secara konseptual, alga akan tumbuh di perairan terkontaminasi, kemudian biomassa alga dan air yang telah terolah dipisahkan. Selanjutnya biomassa yang mengandung logam berat dikeringkan untuk mendapatkan kandungan logam pekat melalui konversi atau mengubahnya menjadi oksida ke bentuk yang lebih stabil, sehingga dapat diambil kembali. Sebagai alternatif pilihan, biomassa alga kering yang diperoleh dapat disimpan atau diawetkan untuk digunakan di masa mendatang. Selain itu, biomassa alga dapat diproses ke tempat pembuangan untuk mengurangi dampak lingkungan (Edmundson, 2013).

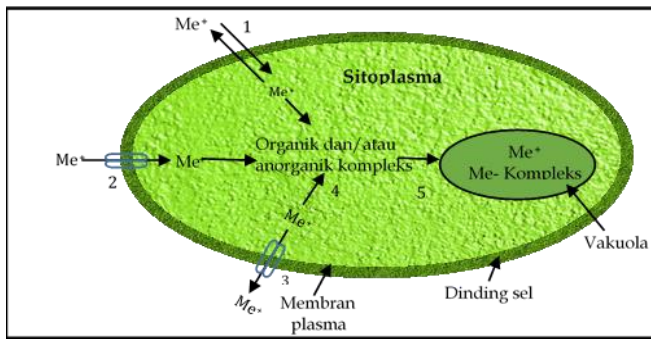
Proses penyerapan logam berat oleh alga bersifat kompleks. Secara umum, ada dua tahap yang terlibat. Tahap pertama adalah penyerapan ekstraseluler, yang berlangsung cepat dan diasumsikan bersifat pasif (*passive uptake*) atau disebut adsorpsi (Ernst, 1998). Pada proses penyerapan ini terjadi di sekitar dinding sel alga baik dalam sel hidup maupun tak hidup, berlangsung dengan cepat dan bolak-balik (Kaplan, 1988).

Penyerapan dimulai saat terjadi interaksi antara ion logam dan dinding sel alga. Kemudian diikuti oleh pertukaran ion logam yang ada di sekeliling sel. Selanjutnya senyawa kompleks dibentuk antara ion logam dengan gugus fungsi seperti karboksil ($-\text{COOH}$), hidroksil ($-\text{HCO}$), karbonil ($-\text{CO}$) sulfhidril ($-\text{SH}$), ion sulfat SO_4^{2-} , dan ion fosfat (PO_4^{3-}) (Adi et al., 2010).



Gambar 2. Penyerapan Ion Logam Berat (Adsorpsi) pada Dinding Sel, dimodifikasi (Kaplan, 1988)

Tahap kedua adalah akumulasi intraseluler. Pada fase kedua ini disebut absorpsi (*active uptake*), yaitu terjadinya penyerapan secara aktif, detoksifikasi konsentrasi logam berat, dan akumulasi di dalam sel alga. Dalam tahap ini terjadi transport aktif membrane sel, dengan pengikatan protein dan komponen intrasel lainnya. Proses ini berlangsung lambat dan hanya terjadi pada sel hidup (Wilde & Benemann, 1993).



Gambar 3. Penyerapan Ion Logam Berat (Absorpsi) Dalam Sel Hidup. 1) Perpindahan Ion Logam Melewati Membran; 2) Transpor Aktif Melalui Pengangkut Ion; 3) Penghabisan Aktif Ion Logam Bebas; 4) Pembentukan Senyawa Kompleks; 5) Logam Berat Ditransportasikan ke Dalam Vakuola, dimodifikasi (Kaplan, 1988).

Terjadi difusi terfasilitasi dengan bantuan protein transport yaitu enzim permease. Enzim permease adalah protein pada membran sel yang akan mengikat ion logam dan membuat ion logam dapat melintasi membran sel. Dalam prosesnya, transport aktif sel menggunakan energi Adenosin Tri Phospat (ATP) yang terikat dengan gugus fungsi. Ion logam berat mengalami perpindahan sepanjang arah gradien konsentrasi dan membran sel juga dapat memompa ion logam berat melawan gradien konsentrasi. Ion logam berat akan memasuki organel sel dalam sitoplasma setelah mampu melewati membran sel (Ernst, 1998).

Protein Metallothioenin (MT) adalah suatu protein yang mampu mengikat ion logam. Protein MT memiliki daya afinitas yang kuat terhadap logam, setelah logam berat berikatan dengan protein MT selanjutnya akan masuk ke dalam vakuola, dimana ion-ion dan senyawa metabolit lainnya disimpan. Selama ion logam berat masih melakukan pengikatan dengan gugus fungsi dari protein dinding sel, MT akan terus terbentuk dalam sel. Sampai sel tersebut jenuh dan mengalami fase kematian (Adi & Dyah, 2010).

3. Parameter Pengaruh Kapasitas Biosorpsi

a) Dosis Adsorbrn

Jumlah sorben yang lebih tinggi memungkinkan terjadinya pembentukan kumpulan sel yang bergabung sehingga dapat mengurangi luas permukaan dalam proses penyerapan. Ketika dosis alga sebagai biosorben ditingkatkan, maka jumlah molekul yang tersedia juga meningkat. Namun, peningkatan ini menyebabkan banyaknya molekul yang tidak terpakai dan tidak

efektif, sehingga memungkinkan kemampuan ion logam untuk diserap menjadi menurun. Dengan demikian meskipun dosis alga lebih banyak, efektivitas penyerapan logam justru akan berkurang karena perbedaan konsentrasi biosorben dan ion logam yang tidak seimbang (Akbari et al., 2015).

b) Nilai pH

Setiap gugus fungsi memiliki rentang pH berbeda untuk mengikat kation logam (Monteiro et al., 2012). Kisaran pH ideal untuk biosorpsi logam berkisar di titik muatan nol, yaitu ketika jumlah muatan positif dan negatif seimbang serta diperlukan pengujian mengetahui nilai yang tepat. Nilai pH berdampak signifikan pada unsur kimia logam dan pengikatan logam dalam larutan di permukaan sel alga. Pada pH rendah, permukaan alga bermuatan positif menjadi kontributor utama biosorpsi karena situs pengikatan dikelilingi oleh H⁺, menarik ion logam ke permukaan alga. Namun, ketika pH meningkat (> 4,0) beberapa logam divalen mudah mengendap sebagai sehingga dapat mengurangi biosorpsi (Bansod et al., 2016).

c) Konsentrasi dan Jenis Logam Awal

Sebagian besar penelitian menunjukkan bahwa penyerapan logam berkorelasi positif dengan konsentrasi ion logam awal (Monteiro et al., 2012). Pada tahap awal, biosorben alga dapat secara efektif menyerap ketersediaan ion logam yang berikatan dengan molekul alga. Namun setelah mencapai konsentrasi tertentu, banyaknya penambahan ion logam tidak akan meningkatkan penyerapan secara signifikan. Ini disebabkan karena jenuhnya molekul pada biosorben yang menghambat interaksi. Sementara sebagian besar konsentrasi ion logam yang tinggi, akan mengurangi pertumbuhan alga (Chen et al., 2023).

d) Suhu

Suhu yang lebih tinggi dapat mempengaruhi aktivitas metabolisme alga. Peningkatan suhu dapat meningkatkan mobilitas ion logam dan memperbesar area permukaan biosorben. Hal ini memungkinkan lebih banyak interaksi antara ion logam dan situs aktif pada biosorben. Namun, suhu yang terlalu tinggi juga dapat merusak struktur fisik dari biosorben, sehingga akhirnya dapat menurunkan efisiensi penyerapan. Beberapa jenis strain alga mungkin lebih tahan terhadap suhu tinggi, sementara yang lain mungkin tidak. Oleh karena itu, adsorpsi alga yang baik adalah pada suhu sedang (Al-Hasawi et al., 2022).

e) *Konsentrasi Biomassa*

Menurut literatur dalam sebagian besar kondisi, konsentrasi biomassa dan kapasitas adsorpsi logam berkorelasi negatif per satuan massa. Artinya peningkatan biomassa dapat menyebabkan sel-sel alga saling bergabung, sehingga mengurangi luas permukaan yang tersedia untuk proses adsorpsi dan dapat mengurangi jarak antara lokasi adsorpsi yang tersedia (Monteiro et al., 2012). Ini menunjukkan bahwa dalam praktiknya, ada perlu keseimbangan antara konsentrasi biomassa dan efisiensi adsorpsi untuk mencapai hasil penghilangan logam yang optimal.

f) *Waktu Kontak*

Laju kinetik biosorpsi bergantung pada penentuan waktu kontak. Biosorben tidak akan lagi mengikat biomassa setelah proses biosorpsi mencapai kondisi kesetimbangan. Karena meningkatnya interaksi tolak-menolak antara adsorben dan ion-ion yang mengadsorpsi, laju adsorpsi berkurang seiring waktu karena jumlah situs kosong berkurang untuk mencapai kesetimbangan (Ahmad et al., 2019).

g) *Sistem Logam*

Kapasitas serapan sistem polimetalik secara umum dianggap lebih baik dibandingkan sistem monometalik. Namun ketika jumlah logam tambahan (*co-metal*) dalam larutan semakin meningkat, kapasitas biosorpsi maksimum logam target cenderung menurun sehingga sistem polimetalik lebih kompleks dibandingkan monometalik yang melibatkan satu jenis logam. Hal karena adanya penghambatan dalam proses adsorpsi, dimana ion logam bersaing untuk situs aktif biosorben.

Ion logam berat dengan afinitas yang lebih tinggi akan mendominasi tempat pengikatan, sehingga membatasi penghilangan ion logam target (Petrovic, 2016).

h) *Jenis Alga*

Tingkat penyerapan logam berat bervariasi antar jenis alga yang digunakan, ini menunjukkan perbedaan efektifitas dalam penyerapan logam berat oleh berbagai spesies alga. Kecenderungan makro- dan mikroalga untuk mengumpulkan logam di dalam jaringan telah dimanfaatkan penggunaannya secara luas sebagai bioindikator ketersediaan logam (Suresh et al., 2015). Potensi penyerapan logam berat menggunakan strain alga dapat dilihat pada Tabel 1. berikut ini.

4. Hasil Penelitian

Sebanyak 30 studi literatur, ditinjau dari tahun 1995 hingga 2022 yang berfokus pada penggunaan strain alga untuk penanganan air limbah. Sebagian besar studi melaporkan efisiensi penghilangan kontaminan logam berat yang relatif tinggi. Banyak penelitian telah dilakukan dalam mengidentifikasi dan memanfaatkan spesies mikroalga sebagai biosorben dalam metode fikoremediasi. Hal ini membuktikan keefektifan penggunaan jenis biomassa dari strain alga berkenaan dengan penyerapan logam berat hingga ke tingkat yang dapat diterima dalam memulihkan limbah. Rincian penyisihan logam berat menggunakan strain alga yang dilaporkan oleh berbagai penulis dirangkum dalam Tabel 1 sebagai berikut ini.

Tabel 1. Hasil Penelitian Potensi Penyerapan Logam Berat Menggunakan Strain Alga

Spesies alga	Metode	Sumber	Remediasi Logam	Hasil yang Dicapai	Referensi
Blue-green algae dan microbial mat	Kolam Oksidasi	Air hasil limbah pertambangan batubara	• Mn	Mampu menghilangkan 2,59 g Mn/hari /m ² .	Phillips et al. (1995)
Botryococcus braunii	5 Fotobioreaktor (PBR) kapasitas 2 L dengan sistem aerasi	Air hasil limbah pertambangan emas	• Fe • Mn	Menghilangkan Fe dan Mn sebesar 2.15 mg.L ⁻¹ dan 0.62 mg.L ⁻¹ dengan nilai 84,28% dan 98%.	Wastuwidya F.B et al. (2020)
Chlorella sp.	Sistem Kolam Stabilisasi	Air limbah domestik	• Zn • Pb	Kapasitas dari adsorpsi Zn 34.4 mg.g ⁻¹ dan Pb 41.8 mg.g ⁻¹ , dengan nilai efektivitas sebesar 60-70% dan 66,3%.	Kumar dan Goyal (2010)

Spesies alga	Metode	Sumber	Remediasi Logam	Hasil yang Dicapai	Referensi
	Eksperimental skala laboratorium dengan rancangan percobaan	Larutan campuran logam berat	<ul style="list-style-type: none"> • Cu • Cd • Cr • Zn 	Efektivitas dari penyerapan logam berat Cu sebesar 29%, Cd sebesar 15%, Cr 33% dan Zn sebesar 8%.	Wetipo et al. (2018)
	Eksperimental menggunakan larutan campuran kombinasi logam	Larutan campuran logam berat	<ul style="list-style-type: none"> • Zn²⁺ • Pb²⁺ 	Efisiensi dari penyerapan logam Pb sebesar 60,5%, Zn sebesar 34,8% dan logam campuran 47,4%.	Kurniawan et al. (2014)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Pertumbuhan skala laboratorium.	<i>Acid Mine Drainage</i> (AMD)	<ul style="list-style-type: none"> • Fe • Al • Mn 	Efisiensi penghilangan unsur logam mencapai hingga 99%.	Brar et al. (2022)
	Pertumbuhan skala laboratorium	Media kultur yang dicampur larutan logam berat	<ul style="list-style-type: none"> • Pb • Cd 	Persentase penurunan konsentrasi ion Pb dalam media kontrol, 1 ppm, 3 ppm, dan 5 ppm logam berturut-turut sebesar 70%, 80%, 62%, dan 52% sedangkan ion Cd di media konsentrasi serupa berturut-turut yaitu sebesar 67%, 79%, 56%, dan 51%.	Purnawati, F. et al. (2015)
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Rancangan percobaan sistem <i>batch</i>	Limbah cair hasil pelapisan logam (Cu)	<ul style="list-style-type: none"> • Cu 	Efektivitas penurunan kadar Cu sebesar 0,29 mg/L pada volume alga 800 mg/L mencapai 90,97 %.	Syahputra, B. (2012)
<i>Eunotia exigua</i> <i>Chlamydomonas sp.</i>	Percobaan mikrokosmos	Air sumber void pertambangan lignit	<ul style="list-style-type: none"> • Fe • SO₄ 	Penurunan logam Fe dari 14 mg/L menjadi 0,2 mg/L dan SO ₄ dari 344 mg/L menjadi 124 mg/L.	Fyson et al. (2006)
<i>Klebsormidium sp.</i>	Alga dikumpulkan dari lokasi tambang dan ditumbuhkan di laboratorium, <i>Photo-rotating Biological Contactor</i> (PRBC)	Air hasil limbah pertambangan tembaga	<ul style="list-style-type: none"> • Cu • Ni • Mn • Zn • Sb • Se • Co • Al 	Efektivitas penyisihan logam adalah sebesar 20%-50% berdasarkan Cu > Ni > Mn > Zn > Sb > Se > Co > Al.	Orandi dan Lewis (2013)
1. <i>Klebsormidium klebsii</i>	Pertumbuhan lapangan dan eksperimen laboratorium	<i>Acid Mine Drainage</i> (AMD)	<ul style="list-style-type: none"> • Al • Fe • Mn • Zn 	Al > Fe > Mn > Zn	Oberholster et al. (2014)

Spesies alga	Metode	Sumber	Remediasi Logam	Hasil yang Dicapai	Referensi
2. <i>Microspora tumidula</i>				Fe > Al > Mn > Zn	
3. <i>Oedogonium crissum</i>				Al > Fe > Mn > Zn Pada semua kondisi pH penelitian, <i>Oedogonium crissum</i> dianggap memiliki tingkat bioakumulasi logam tertinggi.	
<i>Mougeotia sp.</i>	Eksperimen skala laboratorium menggunakan Spektrofotometer <i>Fourier Transform Infrared</i> (FTIR)	Larutan campuran ion logam Cr	• Cr ⁺⁶	Penyerapan optimum logam Cr ⁺⁶ diperoleh sebesar 4,261 mg/g pada waktu retensi 60 menit, kapasitas 98,1%	Saputri, D. F., & Mawardi (2020)
<i>Nannochloropsis sp.</i>	Eksperimen skala laboratorium, dimodifikasi silika dan diikuti dengan pelapisan partikel magnetit	Air limbah industri tekstil yang megandung logam berat	• Cu (II)	Efektifitas penyisihan logam Cu sebesar 56 mg.g ⁻¹ yaitu berkisar 87,5%.	Buhani et al. (2021)
<i>Nannochloropsis oculata</i>	Pertumbuhan dan eksperimen skala laboratorium	<i>Acid Mine Drainage</i> (AMD)	• Cu	Mampu mengurangi 0,04% kandungan Cu dalam media kultur, penyisihan melalui metabolisme sebanyak 1,92%, dan penyisihan melalui adsorpsi sebanyak 1,92%	Martinez et al. (2019)
<i>Nephroselmis sp.</i>	Sistem hybrid dengan <i>Pipe Insert Microalgae Reactor</i> (PIMR) dengan remediasi sistem perlakuan aktif	<i>Acid Mine Drainage</i> (AMD) tambang batubara	• Fe	Kapasitas maksimum pemuatan Fe sebesar 24,21 mg.g ⁻¹ untuk air limbah dengan waktu retensi 60 menit.	Park et al. (2013)
<i>Pseudochlorococcum typicum</i>	Eksperimen skala laboratorium yang terkontrol	Larutan stok logam berat CdCl ₂ , Pb(NO ₃) ₂ dan HgCl ₂	• Cd (II) • Pb (II) • Hg (II)	Kapasitas adsorpsi Cd 6,26 mg.g ⁻¹ (86,24%), Pb 5,11 mg.g ⁻¹ (70,1 %), Hg 15,1 mg.g ⁻¹ (97,7 %)	Shanab et al. (2012)
<i>Sargassum crassifolium</i>	Eksperimen skala laboratorium	Larutan yang terkontaminasi logam timbal (Pb)	• Pb	Kapasitas maksimal alga coklat menyerap logam Pb sebesar 79,770% dalam bentuk serbuk kasar.	Latifa, S. (2018)

Spesies alga	Metode	Sumber	Remediasi Logam	Hasil yang Dicapai	Referensi
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	Eksperimen <i>batch</i> biosorpsi skala laboratorium dengan biomassa kering	Larutan limbah cair dengan kandungan logam berat	<ul style="list-style-type: none"> • Cr 	Kapasitas maksimum biosorpsi Cr (III) sebesar 58,47 mg.g ⁻¹ dan Cr (VI) sebesar 46,51 mg.g ⁻¹ dengan efektivitas 96,4% dan 64,12%	Khoubestani et al. (2015)
<i>Scememdesmus sp.</i>	Percobaan skala laboratorium menggunakan aerator dengan pengukuran FT-IR dan SEM EDX	Larutan Cd (II) dengan dan tanpa larutan pereaksi kimia EDTA sebagai zat pemodifikasi	<ul style="list-style-type: none"> • Cd (III) 	Mampu menghasilkan recovery maksimal yang termodifikasi EDTA sebesar 57,89% dan hasil recovery dengan tanpa modifikasi yaitu 35,37%	Dewi, R.T. (2009)
<i>Spirogyra sp.</i>	Penelitian skala laboratorium dengan instrumen <i>Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometry</i> (ICP-OES)	Air sungai pada kegiatan pengolahan emas dan tailing	<ul style="list-style-type: none"> • Ag • Cd • Cr • Cu • Fe • Mn • Ni • Pb • Zn 	Akumulasi logam yang masuk kategori tinggi hingga sangat tinggi dengan urutan yaitu Mn > Fe > Zn > Cr > Pb > Cu > Cd > Ag.	Alhafizoh, F. (2021)
<i>Spirogyra verrucosa</i>	Percobaan skala laboratorium dengan biomassa kering	Air hasil limbah pertambangan mangan	<ul style="list-style-type: none"> • Mn 	Kapasitas penyisihan maksimum ion Mn(II) 40,66 mg/g dengan efektivitas 80,20%, berpotensi sebagai teknologi pengolahan air tambang.	Bansod dan Nandkar (2016)
<i>Spirogyra subsalsa</i>	Percobaan skala laboratorium dengan FTIR	Larutan induk kation Pb ²⁺	<ul style="list-style-type: none"> • Pb²⁺ 	Esterifikasi gugus dalam biomassa mampu menyerap sekitar 19,33% dan 37,45% Pb(II) pada pH optimum masing-masing 3 dan 4.	Mawardi et al (2014)
<i>Spirulina sp.</i>	HRAP (<i>High Rate Algal Pond</i>)	Larutan limbah air asam dan logam.	<ul style="list-style-type: none"> • Fe • Zn • Cu • Pb 	Removal ion logam Fe (hingga 100%), Zn (86-98%), Cu (38 - 76%), dan Pb (40-78%) pada waktu retensi 10 hari.	Rose et al. (1998)
	Reaktor skala bench anaerobic digester, pengolahan primer dan sekunder	<i>Acid Mine Drainage</i> (AMD) kontaminasi logam berat	<ul style="list-style-type: none"> • SO₄ • Fe • Pb • Zn • Cu 	Reduksi sulphates (SO ₄) 89%, Fe 99%, Pb 95%, Zn 93%, Cu 94%.	Van Hille et al. (1999)
<i>Spirulina plantensis</i>	Eksperimen skala laboratorium dan dikeringkan dengan 100° C	Air limbah industri yang terkontaminasi	<ul style="list-style-type: none"> • Al • Ni • Cu 	Efisiensi penghilangan logam Ni 95%, Al 87%, dan Cu 62%.	Almomani and Bhosale (2021)

Spesies alga	Metode	Sumber	Remediasi Logam	Hasil yang Dicapai	Referensi
	Mengkultivasi alga dalam media air salinitas yang diberi larutan Pb	Air laut salinitas dengan larutan Pb(NO ₃) ₂	• Pb	Penyisihan ion logam pada dosis Pb 1 mg dari 0,949 menjadi 0,603 mg/L; dosis 3 mg dari 2,894 menjadi 2,46 mg/L; dan dosis Pb 5 mg dari 4,88 menjadi 4,31 mg/L, dengan persentase penurunan sebesar 36%, 15%, dan 12%.	Prambodo et al. (2016)
<i>Stichococcus bacillaris</i>	Sistem teknologi biosorpsi <i>Porous Substrate Bioreactor</i> (PSBR)	<i>Synthetic Secondary Wastewater</i> (SSWW) dan air pembuangan tambang	• Zn	Kesetimbangan tercapai pada SSWW dari Zn sebanyak 3 mg/L menjadi 2,3 mg/L dan dari Zn sebanyak 2 mg/L menjadi 1,4 mg/L. Efektifitas penurunan Zn pada air limbah tambang tercapai sekitar 84% dari 3,3 mg.L ⁻¹ menjadi 0,6 mg.L ⁻¹ dalam 4 jam pertama.	Li et al. (2015)
<i>Synechococcus sp.</i>	Mikroalga diisolasi dari kolm bekas tambang batubara lalu diuji skala laboratorium	Media kultur dengan larutan induk konsentrasi logam berat Fe	• Fe	Rata-rata penurunan Fe akhir di media kultur paling besar pada perlakuan konsentrasi 5,9 mg/L sebesar 1,146 mg/L.	Gunawan et al. (2016)
<i>Turbinaria sp.</i>	Pertumbuhan skala laboratorium dan dikeringkan dengan oven 110° C	Larutan standar air limbah	• Cr (VI)	Kapasitas optimum adsorpsi pada ion Cr (VI) sebesar 13.898 mg/g dalam waktu kontak 120 menit.	Abidin et al. (2021)
<i>Ulothrix</i>	Percobaan skala laboratorium	Air hasil limbah pertambangan tembaga	• Cu • As	Penyerapan ion logam Cu 3500 mg/L dan ion logam As 500 mg/L.	Orandi et al. (2007)

5. Tantangan dan Prospek Masa Depan

Penggunaan strain alga telah terbukti efisien untuk menghilangkan kontaminan logam berat meskipun masih ada ruang untuk penelitian lebih lanjut dalam mengeksplorasi potensi dan pengembangan teknologi inovatif sepenuhnya. Studi dari penelitian sebelumnya menunjukkan masa depan yang menjanjikan untuk

bioremediasi berbasis strain alga untuk AAT dan air limbah. Pemantauan harian terhadap pertumbuhan strain alga, perlindungan media tumbuh, dan sterilisasi media kultur dalam kolam terbuka merupakan hal penting yang perlu diperhatikan. Dalam beberapa kasus, kolam dianggap sebagai pilihan terbaik untuk pengolahan air limbah karena membutuhkan cukup ruang terbuka dan memerlukan biaya lebih terjangkau.

Untuk perawatan fikoremediasi yang efektif, harus ada pemanenan teratur dan pembuangan biomassa secara aman untuk menghindari pelepasan logam yang diserap atau diadsorpsi kembali ke sumbernya ketika tanaman mati dan membusuk. (Newete et al., 2016).

Pengembangan modifikasi baru dalam mengatasi keterbatasan dan meningkatkan kapasitas penyisihan logam masih perlu dipertimbangkan dalam penelitian mendatang. Selain itu, pemilihan spesies sangat penting karena tidak semua spesies dapat menangani AAT secara efisien. Banyaknya penelitian yang menunjukkan kapasitas strain alga untuk menghilangkan logam berat masih dalam skala laboratorium, sehingga masih diperlukan peningkatan teknologi yang membantu menyelesaikan masalah terkait pengelolaan AAT secara efisien hingga saat ini.

Kesimpulan

Studi literatur dari berbagai sumber penelitian menunjukkan bahwa penggunaan strain alga dalam fikoremediasi efektif dan berpotensi untuk remediasi air limbah sebagaimana ditunjukkan dalam tinjauan terkini. Kontaminasi logam berat dalam air yang tercemar menimbulkan ancaman yang signifikan bagi organisme makhluk hidup dan biota air. Karena kompleksitas, biaya, dan keterbatasan metode pengolahan air limbah konvensional, remediasi menggunakan bioalga dianggap sebagai alternatif ramah lingkungan untuk masa mendatang. Mikroalga memiliki waktu generasi yang sangat cepat sehingga dalam waktu relatif singkat, perbanyak sel akan terjadi secara lebih cepat, terutama apabila didukung dengan tersedianya cahaya dan sumber energi yang cukup.

Strain alga menghadirkan mekanisme penanganan yang berbeda dalam menghadapi ion logam berat. Mikroalga menunjukkan respons dan toleransi yang bervariasi dalam teknik penyerapan, akumulasi, dan imobilisasi diri sehingga secara efektif meningkatkan stabilitas penyerapan logam berat. Selain itu, studi ini memberikan informasi mengenai pengaruh dari konsentrasi jenis ion logam berat awal, kandungan adsorben, suhu, pH, waktu kontak, sistem logam berat, serta jenis alga dan pembawanya dalam penyerapan logam berat untuk mengidentifikasi strategi pengoptimalan kinerja penggunaan spesies strain alga.

Jenis spesies strain alga tertentu, seperti *Botryococcus braunii*, *Chlorella sp.*, *Chlorella vulgaris*, *Nephroselmis sp.*, *Chlorella pyrenoidosa*, *Eunotia exigua*, *Chlamydomonas sp.*, *Klebsormidium sp.*, *Kappaphycus alvarezii*, *Klebsormidium klebsii*, *Microspora tumidula*, *Oedogonium crissum*, *Mougeotia sp.*, *Nannochloropsis sp.*, *Scenedesmus sp.*, *Nannochloropsis oculata*, *Pseudochlorococum typicum*, *Turbinaria sp.*, *Spirogyra subsalsa*, *Sargassum crassifolium*, *Spirogyra verrucosa*, *Ulothrix*, *Scenedesmus quadricauda*, *Spirogyra sp.*, *Synechococcus sp.*, *Spirulina sp.*, *Spirulina plantensis*, dan *Stichococcus bacillaris* memiliki kemampuan alami sebagai bahan baku biosorben untuk menghilangkan logam berat dalam perairan dengan jumlah signifikan. Berdasarkan studi penelitian strain alga dapat mengurangi kontaminan logam Fe, Al, Mn, Ag, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, dan Zn dari air limbah hingga sebagian terbukti efektif mencapai setidaknya 90% menyisihkan logam berat melalui tahap ekstraseluler dan intraseluler seperti *Chlorella sp.*, *Chlorella vulgaris*, *Spirulina sp.*, *Spirulina palentis*, *Spirogyra sp.*, dan spesies alga lainnya. Diperlukan ruang penelitian lebih lanjut dalam studi ini yang berfokus pada potensi pengolahan air asam tambang menggunakan teknologi dengan bahan biologis berbasis strain alga di masa mendatang

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada para peneliti dan penulis yang karyanya menjadi landasan dari studi literatur ini. Publikasi tersebut telah memberikan kontribusi berharga dalam menambah wawasan dan pemahaman mengenai topik yang diteliti. Apresiasi mendalam disampaikan kepada dosen pembimbing, lembaga terkait dan reviewer yang telah memberikan dukungan dan bantuan untuk meningkatkan kualitas penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Adi, S. E., & Dyah, N. (2010). Pengurangan Konsentrasi Ion Pb dalam Limbah Air Elektroplating dengan Proses Biosorpsi dan Pengadukan. *Jurnal Teknik Kimia*. 5(1), 373-379.
- Abidin, F., Franita, & Chrisropaul. (2021). Pemanfaatan Biomassa Alga *Turbinaria sp.* sebagai Biosorben Ion Kromium pada Air Limbah. *Prosiding 5th Seminar Nasional Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat*. 151-153.
- Ahmad, A., Bhat, A.H., & Buang, A. (2019). Enhanced Biosorption of Transition Metals by Living

- Chlorella vulgaris* Immobilized in Ca Alginate Beads. *Environ. Technol.* 40, 1793–1809.
- Akbari, M., Hallajisani, A., Keshtkar, A.R., Shahbeig, H., & Ali Ghorbanian, S. (2015). Equilibrium and Kinetic Study and Modeling of Cu(II) and Co(II) Synergistic Biosorption from Cu(II)-Co(II) Single and Binary Mixtures on Brown Algae *C. indica*. *J. Environ. Chem. Eng.* 3, 140–149.
- Al-Hasawi, Z.M., Abdel-Hamid, M.I., Almutairi, A.W., & Touliabah, H.E. (2020). Response of *Pseudokirchneriella subcapitata* in Free and Alginate Immobilized Cells to Heavy Metals Toxicity. *Molecules.* 25, 2847.
- Alhafizoh, F. (2021). Kandungan Logam Berat Pada Alga Hijau *Spirogyra sp.* di Perairan Way Ratai Kabupaten Pesawaran Provinsi Lampung. Universitas Lampung. *Skripsi.* Lampung.
- Almomani, F., & Bhosale, R.R. (2021). Bio-Sorption of Toxic Metals from Industrial Wastewater by Algae Strains *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris*: Application of Isotherm, Kinetic Models and Process Optimization. *Sci Total Environ.* 755.
- Bansod, S.R., Nandkar, & P.B. (2016). Biosorption of Mn (II) by *Spirogyra verrucosa* Collected from Manganese Mine Water. *Plant Sci. Today* 3, 282.
- Brar, K.K., Eteieb, S., Magdoui, S., Calugaru, L., & Brar, S.K. (2022). Novel Approach for The Management of Acid Mine Drainage (AMD) for The Recovery of Heavy Metals Along with Lipid Production by *Chlorella vulgaris*. *Journal of Environmental Management*, 308.
- Buhani, T.A., Wijayanti, Suharso, Sumadi, & Ansori, M. (2021). Application of Modified Green Algae *Nannochloropsis sp.* as Adsorbent in The Simultaneous Adsorption of Methylene Blue and Cu(II) Cations in Solution. *Sustain Environ Res.* 31 (1), 1–12.
- Dewi, R. K. (2009). Studi Biosorpsi Ion Logam Cd (II) oleh Biomassa Alga Hijau Kultur Laboratorium (*Scenedesmus sp.*) yang Dimodifikasi EDTA. Universitas Indonesia. *Skripsi.* Depok.
- Edmundson, S.J., & Wilkie, A.C., 2013. Landfill Leachate A Water and Nutrient Resource for Algae-Based Biofuels. *Environ. Technol.* 34 (13-14), 1849-1857.
- Ernst, W. H. O. (1998). Effects of Heavy Metals in Plants at the Cellular and Organismic Level. John Wiley & Sons. Heidelberg.
- Fyson, A., Nixdorf, B., & Kalin, M. (2006). The Acidic Lignite Pit Lakes of Germany E Microcosm Experiment on Acidity Removal Through Controlled Eutrophication. *Ecol Eng.* 28, 288-295.
- Gunawan & Wianto, T. (2016). Respon Pertumbuhan Mikroalga Indigenous *Synechococcus Sp.* dan Penurunan Konsentrasi Logam Berat Fe pada Media Kultur. *Prosiding Seminar Nasional Lahan Basah.* 1, 244-249.
- Kalin, M., Fyson, A., & Wheeler, W.N. (2006). The Chemistry of Conventional and Alternative Treatment Systems for The Neutralization of Acid Mine Drainage. *Sci. Total Environ.* 366 (2-3), 395-408.
- Kaplan, D. (1988). Algal Polysaccharides as Natural Metal Chelators. *BARD & North Carolina Biotechnology Center.*
- Khoubestani, R.S., Mirghaffari, N., & Farhadian, O. (2015). Removal of Three and Hexavalent Chromium from Aqueous Solutions using a Microalgae Biomass-Derived Biosorbent. *Environmental Progress & Sustainable Energy.* 34, 949–956.
- Kumar, R., & Goyal, D. (2010). Waste Water Treatment and Metal (Pb²⁺, Zn²⁺) Removal by Microalgal Based Stabilization Pond System. *Indian Journal of Microbiology.* 50, 34–40.
- Kurniawan, J.I., & Aunurohim. (2014). Biosorpsi Logam Zn²⁺ dan Pb²⁺ oleh Mikroalga *Chlorella sp.* *Jurnal Sains dan Seni Pomits.* 3(1). 2337-3520.
- Latifa, S. (2018). Kemampuan Alga Coklat (*Sargassum crassifolium*) Sebagai Biosorben Terhadap Logam Berat Timbal (Pb). Pendidikan Biologi IAIN. *Skripsi.* Ambon.
- Li, T., Lin, G., Podola, B., & Melkonian, M. (2015). Continuous Removal of Zinc from Wastewater and Mine Dump Leachate by a Microalgal Biofilm PSBR. *J. Hazard Mater.* 297, 112–118.
- Martinez-Macias, M. del R., Correa-Murrieta, Ma, A., Villegas-Peralta, Y., Devoralsiordia, G.E., Alvarez-Sanchez, J., Saldivar-Cabrales, J., & Sanchez-Duarte, R.G. (2019). Uptake of Copper from Acid Mine Drainage by The Microalgae *Nannochloropsis oculata*. *Environmental Science and Pollution Research.* 26, 6311–6318.
- Mawardi, Nazulis, Z., & Kurniawan, D. (2014). Kajian Proses Biosorpsi Timbal (II) oleh Biomassa Alga *Spirogyra subsalsa* melalui Modifikasi Gugus Karboksil Dan Karbonil. *Bionatura-Jurnal Ilmu Hayati dan Fisik.* 16(2), 114-118.
- Monteiro, C.M., Castro, P.M.L., & Malcata, F.X. (2012). Metal Uptake by Microalgae: Underlying Mechanisms and Practical Applications. *Biotechnology Progress.* 28, 299–311.
- Newete, SW, & Byrne, M.J. (2016). Kapasitas Perairan Makrofita Untuk Fitoremediasi dan Pembuangannya dengan Referensi Khusus pada Eceng Gondok. *Environ Sci. Pollut Res.* 23 (11).
- Oberholster, P.J., Cheng, P.H., Botha, A.M., & Genthe, B. (2014). The Potential of Selected Macroalgal

- Species for Treatment of AMD at Different pH Ranges in Temperate Regions. *Water Research*. 60, 82-92.
- Olguin, E.J. (2003). Phycoremediation: Key Issues for Cost-Effective Nutrient Removal Processes. *Biotechnol. Adv.* 22, 81-91.
- Orandi, S., Yaghubpur, A., & Sahraei, H. (2007). Influence of AMD on Aquatic Life at Sar Cheshmeh Copper Mine. Abstract. In: *Goldschmidt Conference*, Cologne, Germany.
- Orandi, S., Lewis, & D.M. (2013). Biosorption of Heavy Metals in a Photo-Rotating Biological Contacto a Batch Process Study. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 97, 5113-5123.
- Park, Y.T., Lee, H., Yun, H.S., Song, K.G., Yeom, S.H., & Choi, J. (2013). Removal of Metal from Acid Mine Drainage Using a Hybrid System Including a Pipes Inserted Microalgae Reactor. *Bioresour Technol.* 150, 242-248.
- Petrovic, A., & Simoni, C. (2016). Removal of Heavy Metal Ions from Drinking Water by Alginate-Immobilised *Chlorella sorokiniana*. *International J. Environ. Sci. Technol.* 13, 1761-1780.
- Phillips, P., Bender, J., Simms, R., Rodriguez-Eaton, S., & Britt, C. (1995). Manganese Removal from Acid Coal-Mine Drainage by a Pond Containing Green Algae and Microbial Mat. *Water Sci. Technol.* 31 (12), 161-170.
- Prambodo, M., Hariyati, R., & Soeprbowati, T. (2016). *Spirulina platensis* Geitler sebagai Fikoremediator Logam Berat Pb Skala Laboratorium. *BIOMA*. 18(1), 64-69.
- Purnawati, F., Soeprbowati, T., & Izzati, M. (2015). Potensi *Chlorella vulgaris* Beijerinck dalam Remediasi Logam Berat Cd dan Pb Skala Laboratorium. *BIOMA*. 16(2), 102-113.
- Rose, P.D., Boshoff, G.A., Van Hille, R.P., Wallace, L.C.M., Dunn, K.M., & Duncan, J.R. (1998). An Integrated Algal Sulphate Reducing High Rate Ponding Process for The Treatment of Acid Mine Drainage Wastewaters. *Biodegradation*. 9(3-4), 247-257.
- Saputri, D. F., & Mawardi. (2020). Pengaruh Waktu Kontak Terhadap Penyerapan Ion Logam Cr+6 Menggunakan Biomassa Alga Hijau (*Mougeotia sp.*). *Chemistry Journal of State Universitas Negeri Padang*. 9(2), 37-41.
- Shanab, S., Essa, A., & Shalaby, E. (2012). Bioremoval Capacity of Three Heavy Metals By Some Microalgae Species (Egyptian Isolates). *Plant Signaling & Behavior*. 7, 392-399
- Shuttleworth. (2009). *What is a Literature Review Retrieved from <http://explorable.com/what-is-a-literature-review>*.
- Suresh, K., Dahms, H.U., Won, E. J., Lee, J. S., & Shin, K.H. (2015). Microalgae a Promising Tool for Heavy Metal Remediation. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 13, 329-352.
- Syahputra, B. (2012). Pemanfaatan Algae *Chlorella pyrenoidosa* untuk Menurunkan Tembaga (Cu) pada Industri Pelapisan Logam. *Jurnal Lingkungan Sultan Agung*. 2(2).
- Van Hille, R.P., Boshoff, G.A., Rose, P.D., & Duncan, J.R. (1999). A Continuous Process for The Biological Treatment of Heavy Metal Contaminated Acid Mine Water. *Resour Conserv Recycl.* 27 (1), 157-167.
- Wastuwidya, F.B., & Moersidik S. (2020). Adaptation and Growth of *Botryococcus braunii* on Acid Mine Drainage. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. 9(3), 238-341.
- Wetipo, Y.S., Mangimbulude, J.C, & Rondonuwu, F.S. (2018). Potensi *Chlorella sp.* sebagai Agen Bioremediasi Logam Berat di Air. Universitas Kristen Satya Wacana, Salatiga.
- Wilde, E. W., & Benemann, J. R. (1993). Bioremoval of Heavy Metals by The Use of Microalgae. *Biotechnology Advances*, 11, 781-812.