

**BIOSORPSI ION LOGAM Cu^{2+} MENGGUNAKAN BIOMASSA
ALGA HIJAU (*Spirogyra setiformis*) YANG DIIMOBILISASI
DENGAN NATRIUM SILIKAT**

SKRIPSI

*Diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana
Sains*



Oleh:

NURUL AULIA

21036099/2021

PROGRAM STUDI KIMIA

DEPARTEMEN KIMIA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS NEGERI PADANG

2025

PERSETUJUAN SKRIPSI**BIOSORPSI ION LOGAM Cu^{2+} MENGGUNAKAN BIOMASSA ALGA HIJAU (*Spirogyra setiformis*) YANG DIIMOBILISASI DENGAN NATRIUM SILIKAT**

Nama : Nurul Aulia
TM/NIM : 2021/21036099
Program Studi : Kimia NK
Departemen : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Padang, November 2025

Mengetahui :
Kepala Departemen Kimia



Budhi Oktavin, S.Si., M.Si., Ph.D
NIP. 19721024 199803 1 001

Disetujui Oleh :
Dosen Pembimbing



Prof. Dr. Mawardi, M.Si
NIP. 196111231989031002

PENGESAHAN LULUS UJIAN SKRIPSI

Nama : Nurul Aulia
 TM/NIM : 2021/21036099
 Program Studi : Kimia NK
 Departemen : Kimia
 Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

BIOSORPSI ION LOGAM Cu^{2+} MENGGUNAKAN BIOMASSA ALGA HIJAU (*Spirogyra setiformis*) YANG DIIMOBILISASI DENGAN NATRIUM SILIKAT

Dinyatakan Lulus Setelah Dipertahankan di Depan Tim Penguji Skripsi
 Departemen Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
 Universitas Negeri Padang

Padang, November 2025

Tim Penguji

No	Jabatan	Nama
1	Ketua	Prof. Dr. Mawardi, M.Si
2	Anggota	Prof. Dr. Indang Dewata, M.Si
3	Anggota	Dr. Fajriah Azra, S.Pd, M.Si

Tanda Tangan

1. 
 2. 
 3. 

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan dibawah ini

Nama : Nurul Aulia
TM/NIM : 2021/21036099
Tempat/Tanggal Lahir : Padang/ 31 Mei 2003
Program Studi : Kimia NK
Departemen : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Judul Skripsi : BIOSORPSI ION LOGAM Cu^{2+} MENGGUNAKAN
BIOMASSA ALGA HIJAU (*Spirogyra*
setiformis) YANG DIIMOBILISASI DENGAN
NATRIUM SILIKAT

Dengan ini menyatakan bahwa :

1. Karya tulis/skripsi ini adalah hasil karya saya dan belum pernah diajukan untuk memperoleh gelar akademik (sarjana) baik di UNP maupun perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri tanpa bantuan pihak lain kecuali tim pembimbing.
3. Pada karya tulis/skripsi ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain kecuali tertulis dengan jelas dicantumkan pada kepustakaan.
4. Karya tulis/skripsi ini sah apabila telah ditandatangani **Asli** oleh tim pembimbing dan tim penguji.

Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh dan apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran di dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima **Sanksi Akademik** berupa pencabutan gelar akademik yang telah diperoleh karena karya tulis/skripsi ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Padang, November 2025
Yang Menyatakan



Nurul Aulia
NIM. 21036099

BIOSORPSI ION LOGAM Cu^{2+} MENGGUNAKAN BIOMASSA ALGA HIJAU (*Spirogyra setiformis*) YANG DIIMOBILISASI DENGAN NATRIUM SILIKAT

Nurul Aulia

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan biomassa alga hijau *Spirogyra setiformis* yang diimobilisasi dengan natrium silikat dalam menyerap ion logam Cu^{2+} melalui proses biosorpsi. Penelitian dilakukan menggunakan sistem kolom dengan variasi pH, konsentrasi awal ion Cu^{2+} , dan laju alir. Analisis karakteristik gugus fungsi dilakukan menggunakan FTIR untuk mengidentifikasi perubahan struktur kimia sebelum dan sesudah imobilisasi serta setelah proses biosorpsi. Kondisi optimum biosorpsi diperoleh pada pH 4, konsentrasi awal 200 ppm, dan laju alir 20 tetes/menit dengan kapasitas serapan maksimum sebesar 4,44 mg/g. Analisis isoterm menunjukkan bahwa proses biosorpsi mengikuti model isoterm Langmuir dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9977, yang menandakan terjadinya penyerapan monolayer pada permukaan biosorben. Biosorben yang telah diimobilisasi menunjukkan kestabilan yang baik pada uji keberulangan (re-cycle) dan tetap efektif saat diaplikasikan pada sampel limbah nyata. Dengan demikian, biomassa *Spirogyra setiformis* yang diimobilisasi menggunakan natrium silikat berpotensi digunakan sebagai biosorben ramah lingkungan untuk pengolahan limbah logam berat.

Kata kunci: Biosorpsi, Logam berat, *Spirogyra setiformis*, imobilisasi, Natrium Silikat

BIOSORPTION of Cu^{2+} METAL IONS USING IMMOBILIZED GREEN ALGAE (*Spirogyra setiformis*) BIOMASS with SODIUM SILICATE

Nurul Aulia

ABSTRACT

This study aims to determine the ability of green algae biomass *Spirogyra setiformis* immobilized with sodium silicate to adsorb Cu^{2+} metal ions through the biosorption process. The research was carried out using a column system with variations in pH, initial Cu^{2+} ion concentration, and flow rate. Functional group characterization was analyzed using FTIR to identify chemical structure changes before and after immobilization as well as after the biosorption process. The optimum biosorption condition was obtained at pH 4, an initial concentration of 200 ppm, and a flow rate of 20 drops/min, with a maximum adsorption capacity of 4.44 mg/g. Isotherm analysis showed that the biosorption process followed the Langmuir isotherm model with a determination coefficient (R^2) of 0.9977, indicating monolayer adsorption on the biosorbent surface. The immobilized biosorbent exhibited good stability during the reusability (re-cycle) test and remained effective when applied to real wastewater samples. Therefore, *Spirogyra setiformis* biomass immobilized with sodium silicate has the potential to be used as an environmentally friendly biosorbent for heavy metal wastewater treatment.

Keywords: Biosorption, Heavy metals, *Spirogyra setiformis*, Immobilization, Sodium silicate

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan hidayah-Nya, seminar proposal yang berjudul **“Biosorpsi Ion Logam Cu^{2+} Menggunakan Biomassa Alga Hijau *Spirogyra setiformis* yang Diimobilisasi dengan Natrium Silikat”** dapat tersusun dan diselesaikan dengan baik oleh penulis. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat dalam memperoleh gelas Sarjana Sains yang dilakukan guna memenuhi ketentuan akademik yang berlaku.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala hormat dan rasa terima kasih yang tulus, penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Mawardi M. Si., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, saran, dan motivasi dalam penyusunan skripsi ini.
2. Prof. Dr. Indang Dewata, M.Si dan Ibuk Dr. Fajriah Azra, S.Pd., M.Si sebagai Dosen pembahas pada sidang skripsi ini.
3. Bapak Budhi Oktavia, S.Si, M.Si, Ph.D, selaku ketua Program Studi Kimia yang telah memberikan kesempatan dan dukungan dalam proses penyusunan skripsi ini.

Penulis berharap bahwa proposal ini dapat memberikan manfaat, baik bagi penulis sendiri maupun bagi perkembangan ilmu pengetahuan. Penulis juga

terbuka terhadap kritik dan saran yang membangun demi kesempurnaan penelitian ini.

Akhir kata, semoga seminar hasil ini dapat berjalan dengan lancar dan memberikan hasil yang diharapkan. Terima kasih.

Padang, September 2025

penulis

DAFTAR ISI

BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Identifikasi Masalah	4
C. Batasan Masalah.....	5
D. Rumusan Masalah	5
E. Tujuan Penelitian.....	6
F. Manfaat Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
A. Alga Hijau	7
B. Biosorpsi	9
C. Logam Berat.....	13
D. Imobilisasi.....	17
E. Teori HSAB (<i>Hard & Soft Acid Base</i>)	19
F. Instrumentasi	21
BAB III METODE PENELITIAN.....	25
A. Waktu dan Tempat.....	25
B. Objek Penelitian	25
C. Variable Penelitian	25
D. Alat dan Bahan.....	25
E. Prosedur Penelitian.....	26
DAFTAR PUSTAKA	52
LAMPIRAN.....	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Alga Hijau <i>Spirogyra Sp</i>	7
Gambar 2. Biosorpsi	10
Gambar 3. Hasil Identifikasi dari Laboratorium Biologi UNAND, 2024	32
Gambar 4. Spektrum FTIR Alga Hijau Sebelum, Setelah Imobilisasi, dan setelah Pengontakan	33
Gambar 5. Grafik Pengaruh pH awal ion Cu^{2+} terhadap Biosorpsi pada Biosorben alga hijau <i>Spirogyra setiformis</i>	36
Gambar 6. Grafik Pengaruh Konsentrasi awal ion Cu^{2+} terhadap Biosorpsi pada Biosorben alga hijau <i>Spirogyra setiformis</i>	38
Gambar 7. Kurva Isoterm Langmuir Penyerapan ion logam Cu^{2+}	39
Gambar 8. Kurva Isoterm Freundlich Penyerapan ion logam Cu^{2+}	40
Gambar 9. Grafik Pengaruh Laju Alir ion Cu^{2+} terhadap Biosorpsi pada Biosorben alga hijau <i>Spirogyra setiformis</i>	41
Gambar 10. Grafik Kapasitas Penyerapan Keberadaan Ion Logam Pb(II) Terhadap Penyerapan Ion Logam Cu(II)	42
Gambar 11. Kapasitas Serapan ion Cu^{2+} pada serapan biomassa alga hijau <i>Spirogyra setiformis</i> tanpa diimobilisasi Natrium Silika	46

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Gugus fungsi alga hijau.....	8
Tabel 2. keuntungan dan kerugian biosorpsi.....	11
Tabel 3. identifikasi asam & basa kuat dan lemah	19
Tabel 4. Hasil Keberulangan Alga Hijau Terimobilisasi Natrium Silika dan tanpa imobilisasi pada Proses Biosorpsi Ion Logam Cu^{2+}	44
Tabel 5. Pengaruh Sampel real Terhadap Serapan Alga Hijau Terimobilisasi	47

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Desain Penelitian	57
Lampiran 2. Pembuatan Larutan Induk Cu(II) 1000 ppm.....	58
Lampiran 3. Preparasi Sampel	59
Lampiran 4. Proses Imobilisasi Alga Hijau dengan Natrium Silikat	60
Lampiran 5. Proses Perlakuan Penelitian dengan Metode Kolom.....	61
Lampiran 6. Pengaruh ion Pb(II) terhadap penyerapan ion Cu(II)	63
Lampiran 7. Aplikasi Pada Sampel Limbah.....	64
Lampiran 8. Perhitungan Pembuatan Reagen	65
Lampiran 9. Spektrum FTIR Alga Hijau <i>Spirogyra setiformis</i> Sebelum Imobilisasi, Setelah Imobilisasi, dan Setelah Pengontakan	68
Lampiran 10. Data Hasil Pengukuran Penyerapan Ion Logam Cu ²⁺	70
Lampiran 11. Dokumentasi Penelitian	76
Lampiran 12. Jadwal Penelitian	79
Lampiran 13. Anggaran Biaya	80

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Pesatnya perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi memberikan dampak yang besar dalam perkembangan di dunia industri saat ini. Perkembangan dari industri tidak hanya memberi dampak positif bagi masyarakat dalam memenuhi kebutuhan yang semakin meningkat, namun juga memberikan dampak negatif bagi lingkungan. Dampak negatif yang dihasilkan adalah terjadinya pencemaran lingkungan khususnya daerah perairan.

Pencemaran perairan disebabkan oleh limbah organik dan anorganik dibuang keperairan tanpa ada pengolahan yang baik dari industri atau diolah tetapi kadar polutan dibuang keperairan masih diatas mutu. Penyebab lainnya pencemaran perairan yaitu adanya kebocoran dari pengolahan pabrik industri yang berada didekat perairan, limbah rumah tangga yang dibuang keperairan dan proses alam (sedimentasi). Hal inilah yang dapat memicu terjadi pencemaran perairan sehingga mengakibatkan terganggunya ekosistem perairan[1].

Salah satu contoh pencemaran yang sering ditemukan di perairan yaitu logam berat yang banyak berasal dari limbah industri. Logam berat merupakan salah satu masalah isu global yang sangat serius, karena sifat dari logam itu sendiri bersifat *non-biodegradable* atau tidak dapat terurai secara alami dan memiliki kemampuan untuk terakumulasi dalam tubuh organisme

yang bersifat toksik. Ion logam berat seperti timbal (Pb^{2+}) dan tembaga (Cu^{2+}) dapat menyebabkan dampak negatif yang signifikan terhadap ekosistem perairan dan kesehatan manusia. [2].

Timbal bersifat bioakumulatif, sehingga menumpuk dalam jaringan organisme akuatik dan memasuki rantai makanan. Selain itu, Timbal juga dapat menyebabkan kerusakan sistem saraf, terutama pada anak-anak, mengganggu perkembangan otak, serta menurunkan IQ dan kemampuan kognitif [3]. Sementara tembaga dapat menyebabkan mual, muntah, dan diare pada manusia dan hewan. Akumulasi Cu berlebih dalam tubuh dapat menyebabkan gangguan fungsi hati dan ginjal, terutama pada individu yang memiliki kelainan metabolisme [4].

Proses penanggulangan logam di perairan telah banyak dikembangkan, salah satu contohnya adalah pengendapan secara kimia dengan menambahkan bahan kimia yang dapat mengendapkan logam berat seperti pertukaran ion, adsorpsi, teknologi membran, osmosis terbalik, dan proses elektrokimia. Salah satu Proses penanggulangan logam yang banyak mendapat perhatian dan banyak dikembangkan adalah biosorpsi. Biosorpsi adalah proses penyerapan menggunakan biomassa sebagai biosorben untuk media penyerap, tidak bergantung pada metabolisme dan terjadi pada permukaan dinding sel dan permukaan eksternal lainnya. Mekanisme yang terjadi antara lain pertukaran ion, pembentukan kompleks, dan adsorpsi. Biosorpsi melibatkan berbagai interaksi seperti interaksi ionik, polar atau kovalen, serta interaksi gabungan dan mineralisasi antara logam dengan gugus fungsi yang terdapat pada permukaan biomassa seperti: hidroksil ($-OH$); karboksil ($-COOH$); dan

karbonil ($-C=O$) yang akan berikatan dengan ion logam. Salah satu biomassa yang dapat digunakan sebagai biosorpsi yaitu alga [5]

Alga hijau (*Chlorophyta*) merupakan spesies yang melimpah di air tawar dan air laut [6]. Selain ketersediaan yang melimpah alga juga dapat dipreparasi dengan mudah, tidak menimbulkan limbah beracun, lebih ekonomis dan memiliki kapasitas serapan yang luar biasa. Kapasitas serapan alga luar biasa ini disebabkan karena makromolekul penyusun dinding terdiri dari selulosa, pektin dan glikoprotein pada permukaan dinding sel [7]. Makromolekul penyusun dinding sel ini mengandung gugus fungsi yang berperan penting dalam pengikatan logam seperti amida, amina, hidroksil, karboksil, karbonil, dan sulfat yang bertindak sebagai situs aktif dalam pengikatan logam [8].

Salah satu jenis alga hijau yang mudah ditemukan di lingkungan perairan tawar, memiliki potensi besar sebagai biosorben adalah *Spirogyra*. Dinding sel *Spirogyra* kaya akan polisakarida, protein, dan gugus fungsional aktif seperti $-COOH$, $-OH$, dan $-NH_2$ yang dapat berinteraksi dengan ion logam berat [9]. Namun, penggunaan biomassa dalam bentuk bebas memiliki keterbatasan, seperti rendahnya stabilitas mekanis dan kesulitan dalam pemisahan setelah proses biosorpsi [10].

Salah satu solusi untuk mengatasi kelemahan tersebut adalah dengan metode imobilisasi. Imobilisasi merupakan metode untuk mengikat sel ke dalam suatu matriks pendukung untuk memperkuat ketahanan dari biomassa sehingga dapat meningkatkan stabilitasnya dan dapat digunakan berulang [11]. Matriks pendukung yang digunakan untuk imobilisasi adalah natrium silikat, karena memiliki sisi aktif pada permukaan seperti gugus silanol ($-Si-OH$) dan

siloksan (Si-O-Si) yang berperan penting dalam metode imobilisasi [12]. Berdasarkan penelitian sebelumnya, dilaporkan bahwa kondisi optimum penyerapan ion Cr^{6+} oleh biomassa alga hijau *Mougeotia Sp* yang diimobilisasi oleh natrium silika adalah 250 mg/L [12].

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja biosorben berbasis *Spirogyra* yang diimobilisasi dengan natrium silikat dalam proses biosorpsi, penelitian ini dibatasi untuk ion logam Cu^{2+} . Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi pengolahan limbah yang lebih berkelanjutan dan efektif untuk mengatasi masalah pencemaran logam berat di lingkungan perairan.

B. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, didapat identifikasi masalah sebagai berikut:

1. Ion logam Cu^{2+} dan Pb^{2+} termasuk dalam ion logam berat yang berbahaya dan dapat mencemari lingkungan serta mengganggu kesehatan makhluk hidup.
2. Diperlukan metode yang efektif dan aman dalam penanggulangan ion logam Cu^{2+} .

C. Batasan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah diatas, maka masalah pada penelitian ini dibatasi pada:

1. Biosorben yang digunakan adalah alga hijau *Spirogyra setiformis* yang telah diimobilisasi dengan natrium silika.
2. Material yang akan dibiosorpsi adalah ion logam Cu^{2+} .
3. Metode yang digunakan adalah metode kolom.
4. Variasi perlakuan yang akan dilakukan adalah variasi pH, konsentrasi dan laju alir.
5. Pengukuran kapasitas serapan biomassa alga hijau *Spirogyra setiformis* terhadap ion logam Cu^{2+} menggunakan AAS dan karakterisasi menggunakan FTIR.

D. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian diatas, maka dapat ditulis rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik dari biomassa alga *Spirogyra setiformis* yang telah diimobilisasi dengan natrium silika?
2. Bagaimana pengaruh variasi pH, konsentrasi awal dan laju alir pada proses biosorpsi alga hijau *Spirogyra setiformis* terhadap ion logam Cu^{2+} .?
3. Bagaimana pengaruh keberadaan ion Pb^{2+} terhadap penyerapan ion logam Cu^{2+} ?
4. Bagaimana efektivitas biosorben alga hijau terimobilisasi dalam kondisi keberulangan (*re-cycle*) ?

5. Bagaimana efektivitas biosorben alga hijau terimobilisasi diaplikasikan pada sampel limbah nyata?

E. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui karakteristik biomassa alga hijau *Spirogyra setiformis* setelah diimobilisasi dengan natrium silika.
2. Menganalisis pengaruh variasi pH, konsentrasi awal, dan laju alir alga hijau *Spirogyra setiformis* terhadap proses biosorpsi ion logam Cu^{2+} .
3. Mengetahui pengaruh keberadaan ion Pb^{2+} terhadap penyerapan ion logam Cu^{2+} .
4. Mengevaluasi efektivitas biosorben melalui uji keberulangan (*re-cycle*).
5. Menguji efektivitas biosorben alga hijau terimobilisasi saat diaplikasikan pada sampel limbah nyata.

F. Manfaat Penelitian

Dari hasil penelitian ini, diharapkan dapat:

1. Memberikan informasi yang dapat dijadikan sebagai dasar pemilihan biomaterial dari biosorben dalam proses biosorpsi.
2. Memberikan manfaat bagi perkembangan penelitian kimia, khususnya dalam bidang biosorpsi dan penanganan logam berat dari limbah cair.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Karakteristik alga hijau yang terimobilisasi dengan natrium silikat berhasil membentuk ikatan Si–O–Si dan Si–OH pada biomassa, memperlihatkan interaksi kimia antara gugus fungsional alga dan natrium silikat.
2. Kondisi optimum setiap variabel dalam pengontakan alga hijau *Spirogyra setiformis* yang telah diimobilisasi dengan natrium silika terhadap ion logam Cu^{2+} adalah optimum di pH 4, konsentrasi optimum di 200 ppm, dan laju alir optimum di 20 tetes/menit.
3. Keberadaan ion Pb^{2+} terbukti menurunkan kapasitas biosorpsi Cu^{2+} akibat kompetisi pada situs aktif, di mana Pb^{2+} lebih mudah terikat. Dengan demikian, biosorben alga hijau terimobilisasi natrium silika menunjukkan selektivitas lebih tinggi terhadap Pb^{2+} dibanding Cu^{2+} .
4. Alga hijau *Spirogyra setiformis* yang telah diimobilisasi dengan natrium silika terbukti lebih stabil dibanding alga hijau *Spirogyra setiformis* tanpa imobilisasi. Hal ini dibuktikan dengan uji keberulangan (*recycle*) sebanyak 3 siklus. Alga hijau yang diimobilisasi memiliki efisiensi sebesar 86 – 76%, sedangkan alga hijau tanpa imobilisasi mengalami penurunan yang signifikan sebesar 38 – 3%.
5. efektivitas biosorben alga hijau terimobilisasi saat diaplikasikan pada sampel dari limbah laboratorium LLDIKTI wilayah X menunjukkan kapasitas serapan Cu^{2+} yang relatif konsisten ($\pm 1,21$ mg/g) dengan variasi

sangat kecil, sehingga membuktikan bahwa biosorben memiliki performa stabil. Pengujian pada limbah nyata penting dilakukan karena memberikan gambaran lebih realistis terkait efektivitas biosorpsi di lingkungan yang kompleks dibanding larutan standar.

B. Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk menguji penggunaan jenis alga hijau lain dengan variasi metode pengimobilisasi yang berbeda, sehingga dapat dibandingkan efektivitasnya. Selain itu, biosorpsi juga perlu diuji terhadap ion logam lain maupun sampel limbah logam yang berbeda agar hasil penelitian lebih komprehensif dan aplikatif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dewata I, Denhas YH. Pencemaran Lingkungan, PT. RajaGrafindo Persada-Rajawali Pers; 2023.
- [2] Fu F, Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *J Environ Manage* 2011;92:407–18. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>.
- [3] Kwarciak-Kozłowska A, Sławik-Dembiczak L. Biosorption of lead from municipal wastewater by alginate beads, free and alginate-immobilized *chlorella vulgaris*. *Desalin Water Treat* 2021;218:303–8. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.26969>.
- [4] Bijang CM, Latupeirissa J, Ratuhanrasa M. Biosorpsi Ion Logam Tembaga (Cu²⁺) Pada Biosorben Rumput Laut Coklat (*Padina australis*). *Indones J Chem Res* 2018;6:26–37. <https://doi.org/10.30598/ijcr.2018.6-cat>.
- [5] Anwar M, Munaf E, Kosela S, Wibowo W, Zainul R. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research* , 2015 , 7 (11): 715-722 Research Article Study of Pb (II) biosorption from aqueous solution using immobilized *Spirogyra subsalsa* biomass 2015;7:715–22.
- [6] He J, Chen JP. A comprehensive review on biosorption of heavy metals by algal biomass: Materials, performances, chemistry, and modeling simulation tools. *Bioresour Technol* 2014;160:67–78. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.068>.
- [7] Bazzazzadeh R, Soudi MR, Valinassab T, Moradlou O. Kinetics and equilibrium studies on biosorption of hexavalent chromium from leather tanning wastewater by *Sargassum tenerrimum* from Chabahar-Bay Iran. *Algal Res* 2020;48:101896. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101896>.
- [8] Mawardi, Nazulis. Z dan K. Kajian proses biosorpsi timbal(ii) oleh biomass alga. *Bionatura J Ilmu Hayati Dan Fis* 2014;16:114–8.
- [9] Mawardi M. Biosorpsi Kation Tembaga (II) dan Seng (II) oleh Biomassa Alga Hijau *Spirogyra subsalsa*. *Biota J Ilm Ilmu-Hayati* 2011;16:269–77. <https://doi.org/10.24002/biota.v16i2.109>.
- [10] Karlina H, Mawardi. Pengaruh Konsentrasi Awal Larutan Ion Logam Cr⁺⁶ Terhadap Penyerapan Biomassa Alga Hijau *Mougeotia* sp. yang Dimodifikasi Metanol. *Chem J Univ Negeri Padang* 2020;9:19–25.
- [11] Alobaidi DS, Alward AI. Role of immobilised Chlorophyta algae in form of calcium alginate beads for the removal of phenol: isotherm, kinetic and thermodynamic study. *Heliyon* 2023;9:e14851. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14851>.
- [12] Arif MD, Mawardi. Pengaruh Konsentrasi Awal Larutan Terhadap

Penyerapan Ion Logam Cr+6 Menggunakan Biomassa Alga Hijau Mougeotia Sp yang Diimobilisasi Dengan Natrium Silika. Chem J Univ Negeri Padang 2020;9:50–4.

- [13] Sarma U, Hoque ME, Thekkangil A, Venkatarayappa N, Rajagopal S. Microalgae in removing heavy metals from wastewater – An advanced green technology for urban wastewater treatment. J Hazard Mater Adv 2024;15:100444. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100444>.
- [14] Ismail I, Moustafa T. Biosorption of heavy metals. Heavy Met Sources, Toxic Remediat Tech 2016:131–74.
- [15] Gupta VK, Rastogi A. Biosorption of lead from aqueous solutions by green algae Spirogyra species: Kinetics and equilibrium studies. J Hazard Mater 2008;152:407–14. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.028>.
- [16] Gu S, Lan CQ. Biosorption of heavy metal ions by green alga Neochloris oleoabundans: Effects of metal ion properties and cell wall structure. J Hazard Mater 2021;418:126336. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126336>.
- [17] Khamayseh MM, Kidak R. Biosorption of reactive amoxicillin antibiotic on Pithophora macroalgae in aqueous solution: Equilibrium and kinetic studies. Desalin Water Treat 2024;320:100669. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100669>.
- [18] Rangabhashiyam S, Balasubramanian P. Characteristics, performances, equilibrium and kinetic modeling aspects of heavy metal removal using algae. Bioresour Technol Reports 2019;5:261–79. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.07.009>.
- [19] Davis TA, Volesky B, Mucci A. A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae. Water Res 2003;37:4311–30. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00293-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00293-8).
- [20] Areco MM, Hanela S, Duran J, dos Santos Afonso M. Biosorption of Cu(II), Zn(II), Cd(II) and Pb(II) by dead biomasses of green alga Ulva lactuca and the development of a sustainable matrix for adsorption implementation. J Hazard Mater 2012;213–214:123–32. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.01.073>.
- [21] Aisyah N, Jusoha W, Chaia MK, Wongb LS, Ongb GH, Wan B, et al. Jurnal Teknik Kimia Afrika Selatan 2020;34:78–81.
- [22] Mawardi, Sanjaya H, Maliki A. Pengaruh ion logam Cd(II) terhadap adsorpsi ion logam Pb(II) dengan adsorben tanah napa. Chem J State Univ Padang 2013;2:29–33.
- [23] Al-Homaidan AA, Al-Qahtani HS, Al-Ghanayem AA, Ameen F, Ibraheem IBM. Potential use of green algae as a biosorbent for hexavalent chromium removal from aqueous solutions. Saudi J Biol Sci 2018;25:1733–8. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2018.07.011>.

- [24] Li Y, Hao R, Shan B, Li J, Ye Y, Zhang J, et al. Reduction and fixation of Cr(VI) by *Aspergillus niger* along with bentonite-sodium alginate beads. *Desalin Water Treat* 2022;276:185–94. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28944>.
- [25] Buhani B, Suharso S, Sembiring Z. Biosorption of Metal Ions Pb(II), Cu(II), and Cd(II) on *Sargassum duplicatum* Immobilized Silica Gel Matrix. *Indones J Chem* 2010;6:245–50. <https://doi.org/10.22146/ijc.21726>.
- [26] Ali HS, Kandil NFES, Ibraheem IBM. Biosorption of pb²⁺ and cr³⁺ ions from aqueous solution by two brown marine macroalgae: An equilibrium and kinetic study. *Desalin Water Treat* 2020;206:250–62. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26314>.
- [27] Mawardi, Sanjaya H, Frisiananda V. Penyerapan Logam Krom dalam Limbah Cair Laboratorium Kimia Menggunakan Adsorben Tanah Napa. *Chem J State Univ Padang* 2013;2:20–4.
- [28] Bilal M, Rasheed T, Sosa-Hernández JE, Raza A, Nabeel F, Iqbal HMN. Biosorption: An interplay between marine algae and potentially toxic elements—A review. *Mar Drugs* 2018;16:1–16. <https://doi.org/10.3390/md16020065>.
- [29] Shamshad I, Khan S, Muhammad S, Waqas M. Unrevealing the biosorption capacity of freshwater algae biomasses for toxic heavy metals in aqueous solutions. *Desalin Water Treat* 2020;184:189–98. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25353>.
- [30] Abdel -Aty AM, Ammar NS, Abdel Ghafar HH, Ali RK. Biosorption of cadmium and lead from aqueous solution by fresh water alga *Anabaena sphaerica* biomass. *J Adv Res* 2013;4:367–74. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2012.07.004>.
- [31] Mawardi, Rahmi Khairun Nisa. Optimasi Tanah Napa sebagai Adsorben Ion Logam Kromium (IV). *Chem J* 2013;2:80–5.
- [32] Salmariza S, Mawardi M, Hariyani R, Kasman M. Pengembangan Adsorben dari Limbah Lumpur Industri Crumb Rubber Yang Diaktivasi dengan H₃PO₄ Untuk Menyerap Ion Cr(VI). *J Litbang Ind* 2014;4:67. <https://doi.org/10.24960/jli.v4i2.647.67-77>.
- [33] Han M, Zhang C, Ho SH. Immobilized microalgal system: An achievable idea for upgrading current microalgal wastewater treatment. *Environ Sci Ecotechnology* 2023;14:100227. <https://doi.org/10.1016/j.esec.2022.100227>.
- [34] Kaewsarn P. Biosorption of copper(II) from aqueous solutions by pre-treated biomass of marine algae *Padina* sp. *Chemosphere* 2002;47:1081–5. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(01\)00324-1](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(01)00324-1).
- [35] Wood JM, Wang HK. Microbial resistance to heavy metals: Some microorganisms have developed strategies for combating effects of toxic inorganics, and several may prove useful for their removal from

- wastewater. Environ Sci Technol 1983;17:582–90. <https://doi.org/10.1021/es00118a002>.
- [36] Setyani R, Hamzah B, Suherman. Pengaruh Ion Logam Cu (II) Terhadap Persen Ekstraksi Ion Pb (II) Menggunakan Teknik Emulsi Membran Cair Effect of Cu (II) Ion Towards Percent Extraction of Pb (II) Using Emulsion Liquid Membrane Technique. J Akad Kim 2016;5:91–7.
- [37] Hayuwardini A, Mulyani B. Pemanfaatan Arang Ampas Tebu (Bagasse) Sebagai Adsorben Larutan Campuran Ion Pb 2 + DAN Cu 2 +. Semin Nas Kim Dan Pendidik Kim Xiii 2022;110–20.
- [38] Petit T, Puskar L. FTIR spectroscopy of nanodiamonds: Methods and interpretation. Diam Relat Mater 2018;89:52–66. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2018.08.005>.
- [39] Wahab MA, Jellali S, Jedidi N. Ammonium biosorption onto sawdust: FTIR analysis, kinetics and adsorption isotherms modeling. Bioresour Technol 2010;101:5070–5. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.121>.
- [40] Zhang Y gang, Shao X mei, Zhang Y nan, Gu Y, Chen X you, Ma Y jie, et al. Correction of FTIR acquired photodetector response spectra from mid-infrared to visible bands using onsite measured instrument function. Infrared Phys Technol 2018;92:78–83. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.05.011>.
- [41] Ferreira SLC, Bezerra MA, Santos AS, dos Santos WNL, Novaes CG, de Oliveira OMC, et al. Atomic absorption spectrometry – A multi element technique. TrAC - Trends Anal Chem 2018;100:1–6. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2017.12.012>.
- [42] Kajian biosorpsi..., Mawardi, FMIPA UI, 2008. 2008.
- [43] Mawardi, Nazulis Z, Kurniawati D. Kajian Proses Biosorpsi Timbal(Ii) Oleh Biomass Alga Spirogyra Subsalsa Melalui Modifikasi Gugus Karboksil Dan Karbonil. J Ilmu-Ilmu Hayati Dan Fis 2014;16:114–8.
- [44] Singha B, Das SK. Adsorptive removal of Cu(II) from aqueous solution and industrial effluent using natural/agricultural wastes. Colloids Surfaces B Biointerfaces 2013;107:97–106. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2013.01.060>.
- [45] Foo KY, Hameed BH. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. Chem Eng J 2010;156:2–10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>.
- [46] Vijayaraghavan K, Yun YS. Bacterial biosorbents and biosorption. Biotechnol Adv 2008;26:266–91. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.02.002>.
- [47] Radovanović D, Dikić J, Štulović M, Kamberović Ž. for Wastewater Treatment Process : A Kinetic Approach 2023.
- [48] Sheng PX, Ting YP, Chen JP, Hong L. Sorption of lead, copper, cadmium,

zinc, and nickel by marine algal biomass: Characterization of biosorptive capacity and investigation of mechanisms. *J Colloid Interface Sci* 2004;275:131–41. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.01.036>.

- [49] Vijayaraghavan K, Jegan J, Palanivelu K, Velan M. Biosorption of copper, cobalt and nickel by marine green alga *Ulva reticulata* in a packed column. *Chemosphere* 2005;60:419–26. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.12.016>.