

**MODIFIKASI MATERIAL HIDROKSI LAPIS GANDA Ni/Al DAN Zn/Al
MENGUNAKAN ALGA LAUT *Eucheuma cottonii*
SEBAGAI ADSORBEN ZAT WARNA ANIONIK**

TESIS

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Magister Sains Bidang Studi Ilmu Material



SAHRUL WIBIYAN

20032682327001

**PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU MATERIAL
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2025**

HALAMAN PENGESAHAN

**MODIFIKASI MATERIAL HIDROKSI LAPIS GANDA Ni/Al DAN Zn/Al
MENGUNAKAN ALGA LAUT *Eucheuma cottonii*
SEBAGAI ADSORBEN ZAT WARNA ANIONIK**

TESIS

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Magister Sains Bidang Studi Ilmu Material

OLEH:

SAHRUL WIBIYAN

20032682327001

Palembang, Januari 2025

PEMBIMBING I



Dr. Idha Royani, S.Si., M.Si.
NIP. 197105151999032001

PEMBIMBING II



Prof. Aldes Lesbani, Ph.D.
NIP. 197408121998021001

Mengetahui,

Direktur Pascasarjana



Prof. Dr. H. Muhammad Said, M.Sc.
NIP. 196406121987031003

HALAMAN PERSETUJUAN

Tesis dengan judul “Modifikasi Material Hidroksi Lapis Ganda Ni/Al dan Zn/Al menggunakan Alga Laut *Eucheuma cottonii* sebagai Adsorben Zat Warna Anionik” telah dipertahankan dihadapan Tim Penguji Sidang Tesis Program Studi Magister Ilmu Material Program Pascasarjana Universitas Sriwijaya pada tanggal 30 Desember 2024 dan telah diperbaiki, diperiksa, serta disetujui sesuai masukan yang telah diberikan.

Palembang, Januari 2025

Tim Penguji Karya Ilmiah berupa Tesis

Ketua :

1. Dr. Neza Rahayu Palapa, S.Si., M.Si.
NIP. 199505292022032017

()

Anggota :

2. Dr. Idha Royani, S.Si., M.Si.
NIP. 197105151999032001

()

3. Prof. Aldes Lesbani, Ph.D.
NIP. 197408121998021001

()

4. Prof. Dr. Ida Sriyanti, M.Si.
NIP. 197811082001122001

()

5. Prof. Dr. rer. nat. Risfidian Mohadi, M.Si.
NIP. 197711272005011003

()

Mengetahui,

Direktur Pascasarjana

**Koordinator Program Studi
Ilmu Material**


Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Said, M.Sc
NIP. 196108121987031003


Prof. Aldes Lesbani, Ph.D.
NIP. 197408121998021001



PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama mahasiswa : Sahrul Wibiyon
NIM : 20032682327001
Fakultas/Jurusan : Pascasarjana/Ilmu Material

Menyatakan bahwa tesis ini adalah hasil karya saya sendiri dan karya ilmiah ini belum pernah diajukan sebagai pemenuhan persyaratan untuk memperoleh gelar magister (S2) dari Universitas Sriwijaya maupun perguruan tinggi lain.

Semua informasi yang dimuat dalam tesis ini yang berasal dari penulis lain baik yang dipublikasikan atau tidak telah diberikan penghargaan dengan mengutip nama sumber penulis secara benar. Semua isi dari tesis ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya sebagai penulis.

Demikianlah surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Palembang, Januari 2025

Penulis



Sahrul Wibiyon

NIM. 20032682327001

**HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai civitas akademis Universitas Sriwijaya, yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama Mahasiswa : Sahrul Wibiyon
NIM : 20032682327001
Fakultas/Jurusan : Pascasarjana/Ilmu Material
Jenis Karya : Tesis

Demi pengembangan ilmu pengeahuan, Saya menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Sriwijaya “Modifikasi Material Hidroksi Lapis Ganda Ni/Al dan Zn/Al menggunakan Alga Laut *Eucheuma cottonii* sebagai Adsorben Zat Warna Anionik”. Dengan hak bebas royalti non-ekslusive ini Universitas Sriwijaya berhak menyimpan, mengalih, edit/memformatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat dan mempublikasikan tugas akhir atau tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik hak cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya.

Palembang, Januari 2025

Yang menyatakan



Sahrul Wibiyon

NIM. 20032682327001

HALAMAN PERSEMBAHAN

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Tesis ini merupakan salah satu sebagai tanda syukurku kepada Allah SWT. dan Nabi Muhammad SAW.

Saya persembahkan tesis ini kepada Bapak (Solihkin dan Alm. Asim), Ibu (Badriyah dan Juwartini) dan Kakak (Arif Nurdiyanto) serta Keluarga tercinta yang selalu memberikan dukungan dan doanya, Dosen Pembimbing, Dosen Pengajar, Sahabat, Teman-teman, Almamater (Universitas Sriwijaya) dan seluruh pihak yang terlibat atas dukungan dan bantuannya sehingga saya dapat menyelesaikan pendidikan program magister (S2) Ilmu Material, program pascasarjana, Universitas Sriwijaya.

وَمَنْ يَسْتَعْفِفْ يُعِفَّهُ اللَّهُ ، وَمَنْ يَسْتَغْنِ يُغْنِهِ اللَّهُ ، وَمَنْ يَتَصَبَّرْ يُصَبِّرْهُ اللَّهُ ، وَمَا أُعْطِيَ أَحَدٌ عَطَاءً خَيْرًا وَأَوْسَعَ مِنَ الصَّبْرِ

"Barangsiapa yang berusaha menjaga diri, maka Allah menjaganya, barangsiapa yang berusaha merasa cukup, maka Allah mencukupinya, barangsiapa yang berusaha bersabar, maka Allah akan menjadikannya bisa bersabar dan tidak ada seorang pun yang dianugerahi sesuatu yang melebihi kesabaran."

(HR. Bukhari no:1496).

فَإِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا ، إِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا

"Maka sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan, Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan."

(QS. Al-Insyirah: 5-6).

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur atas berkat rahmat Allah SWT. yang Mahakuasa sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “Modifikasi Material Hidroksi Lapis Ganda Ni/Al dan Zn/Al menggunakan Alga Laut *Eucheuma cottonii* sebagai Adsorben Zat Warna Anionik”. Sholawat beserta salam selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW semoga kita mendapatkan syafa’at Rosulullah SAW. diyaumul qiyamah. Tesis ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar magister sains bidang ilmu material pada program pascasarjana, Universitas Sriwijaya.

Terima kasih kepada Ibu **Dr. Idha Royani, S.Si., M.Si.** dan Bapak **Prof. Aldes Lesbani, Ph.D.** selaku pembimbing yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan, ilmu, motivasi, saran dan petunjuk kepada penulis dalam menyelesaikan tesis ini serta telah memberikan pengalaman yang berharga kepada penulis. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada :

1. Allah SWT. yang telah memberikan nikmat sehat, iman dan islam serta memberikan kekuatan dan kesabaran sehingga penulis bisa melewati segala ujian yang diberikan. Sholawat beserta salam selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW. semoga mendapatkan syafa’atnya diyaumul qiyamah.
2. Bapak Prof. Dr. Taufiq Marwa, S.E., M.Si. selaku rektor Universitas Sriwijaya.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Said, M.Sc. selaku Direktur Pascasarjana Universitas Sriwijaya dan Bapak Prof. Aldes Lesbani, Ph.D. selaku Koordinator Program Studi Magister Ilmu Material Universitas Sriwijaya.
4. Ibu Prof. Dr. Ida Sriyanti, M.Si., Bapak Prof. Dr. rer. nat. Risfidian Mohadi, M.Si. dan Ibu Dr. Neza Rahayu Palapa, S.Si., M.Si. selaku Tim Dosen Penguji Sidang Tesis yang telah memberikan masukan, kritik, dan saran yang membangun dalam penulisan tesis.
5. Seluruh Dosen Pengajar Program Studi Ilmu Material Pascasarjana Universitas Sriwijaya yang telah memberikan ilmu, mendidik dan membimbing selama perkuliahan.

6. Saya ucapkan terimakasih kepada Bapakku (Solihkin), Mama-ku (Badriyah), Mamak (Juwartini) dan Bapak (alm. Asim) yang selalu memberikan doa, kasih sayang, dukungan yang tiada hentinya yang tak ternilai harganya oleh apapun dan selalu melakukan apapun untuk penulis sampai detik ini demi kelancaran dan kesuksesan penulis. Saya ucapkan terimakasih juga kepada kakak tercinta (Arif Nurdianto) mbak (Wahyusri Ningsih) dan ponakanku (Khaira Putri Shakira) yang selalu memberikan kasih sayang dan menjadi penyemangat penulis, serta nenek (Mbah Suli) dan keluarga besar yang telah memberikan dukungan dan kasih sayang untuk penulis.
7. Teruntuk sahabat sekaligus teman sekamarku Alfan Wijaya dan Amri yang selalu memberi bantuan, motivasi dan nasehat. Kebaikan selama ini akan selalu penulis ingat. Terimakasih juga kepada Nur Ahmad yang telah sabar memberikan dukungan dan bantuannya kepada penulis.
8. Terimakasih kepada Yusuf Mathiinul Hakim serta seluruh member dan alumni BC (Erni Salasia Fitri, Zaqiya Artha Zahara, Normah, Novie Juleanti, Patimah Mega S. B. N. S., Robiatul Adawiyah, dll) yang telah membuat kenangan bersama penulis. Terkhusus kak Erni mohon maaf jikalau saya suka jahil selama di BC lorong kolam.
9. Terimakasih juga kepada 3 musketeers (Bunga Indah Putri, Zulkarnain, Sahrul Wibiyah) atas kebersamaan selama ini, suka duka sebagai mahasiswa angkatan pertama Ilmu Material telah kita lalui bersama. Serta Yuliza Hanifah telah membantu perihal riset dan Muhammad Badaruddin atas kolaborasinya.
10. Mahasiswa Ilmu Material (Jefri, Robiatul Adawiyah, Amanda Syafa Aliyah, Rabellia Juladika Sayeri) terimakasih dan semangat menyelesaikan studi.
11. Siti Azizah terimakasih banyak atas kebaikan dan kepeduliannya kepada penulis. Terimakasih sudah membersamai penulis menjadi partner selama studi S1, S2 hingga saat ini dan seterusnya. Tetap semangat, terus berproses dan wujudkan cita-citamu.

12. Admin Program Studi Ilmu Material Kak Dedi Iskandar yang selalu membantu dalam menyelesaikan administrasi selama perkuliahan.
13. Yang terakhir saya ucapkan terima kasih kepada Sahrul Wibiyani. Terimakasih karena telah sabar, bersyukur dan berusaha sekuat tenaga dalam menjalani kehidupan selama perkuliahan. Saya harap kamu akan tetap berusaha, bersabar dan selalu bersyukur untuk menjalani kehidupan kedepannya nantinya. Terimakasih.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih banyak kekurangan dan kesalahan, sehingga penulis sangat mengharapkan kritik dan saran dari pembaca. Akhir kata penulis mengucapkan terima kasih.

Palembang, Januari 2025

Penulis

SUMMARY

Modification of Ni/Al and Zn/Al Layered Double Hydroxide Materials using Marine Alga *Eucheuma cottonii* as Anionic Dyes Adsorbent

Sahrul Wibiyani : Supervised by Dr. Idha Royani, S.Si., M.Si. and Prof. Aldes Lesbani, Ph.D.

xvii+98 pages, 14 figures, 6 tables, 10 attachments

The LDH material has advantages in ion exchange capacity and a large surface area, but its thermal stability and structure often pose challenges for repeated use. *Eucheuma cottonii*, an abundant red algae in Indonesia, exhibits excellent adsorption properties and contains carrageenan, which is rich in active functional groups and serves as a stabilizer, making it an economical and environmentally friendly choice for material modification. The combination of LDH and *Eucheuma cottonii* results in a material with higher adsorption capacity, good thermal stability, and regeneration capability for repeated use. The successful preparation of the LDH-*Eucheuma cottonii* composite is evidenced by characterization results using XRD, IR, BET, and TGA. The material was employed as an adsorbent for anionic dyes and tested for selectivity against direct yellow, methyl orange, congo red, and direct green dyes. Adsorption parameters included variations in pH, contact time, concentration, and adsorption temperature. Material characterization confirmed the successful synthesis of the LDH-*Eucheuma cottonii* composite. XRD analysis revealed characteristic diffraction patterns of LDH, such as the (003) and (006) planes, indicating that the layered structure remained intact after modification, along with new peaks suggesting interactions between LDH and *Eucheuma cottonii*. FTIR results identified key functional groups, such as -OH and -SO₃ from *Eucheuma cottonii*, as well as inorganic groups from LDH, indicating chemical integration between the two materials. BET analysis showed an increase in specific surface area in the composite compared to the starting materials, supporting enhanced adsorption capacity. Additionally, thermal characterization via TGA demonstrated that the composite had better thermal stability than LDH. The LDH-*Eucheuma cottonii* composite exhibited superior performance in removing anionic dyes from solutions. The pH effect revealed that optimal adsorption occurred at pH 5 for the composite. Contact time influenced adsorption efficiency, with equilibrium achieved within a specific time analyzed using pseudo first-order (PFO) and pseudo second-order (PSO) kinetic models, where the PSO model provided the best fit for the data. Concentration and temperature analyses were conducted using Langmuir and Freundlich isotherm models. Furthermore, the material showed excellent regeneration ability, maintaining high adsorption efficiency up to the 4th and 5th reuse cycles, indicating its significant potential as an economical and sustainable adsorbent for wastewater treatment.

Keywords: Algae, *Eucheuma cottonii*, Layered Double Hydroxide, Hydrothermal, Selective Adsorption, Anionic Dyes

RINGKASAN

Modifikasi Material Hidroksi Lapis Ganda Ni/Al dan Zn/Al menggunakan Alga Laut *Eucheuma cottonii* sebagai Adsorben Zat Warna Anionik

Sahrul Wibiyani : Dibimbing oleh Dr. Idha Royani, S.Si., M.Si. dan Prof. Aldes Lesbani, Ph.D.

xvii+98 halaman, 14 gambar, 6 tabel, 10 lampiran

Material HLG memiliki keunggulan dalam kapasitas pertukaran ion dan luas permukaan yang besar, namun stabilitas termal dan strukturnya sering menjadi kendala dalam penggunaan secara berulang. *Eucheuma cottonii*, alga merah yang melimpah di Indonesia, memiliki sifat adsorpsi yang baik dan mengandung karagenan yang kaya akan gugus fungsional aktif dan memiliki sifat sebagai stabilisator, menjadikannya pilihan yang ekonomis dan ramah lingkungan untuk modifikasi material. Kombinasi HLG dan *Eucheuma cottonii* menghasilkan material dengan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi, stabilitas termal yang baik, serta kemampuan regenerasi untuk penggunaan berulang. Keberhasilan preparasi komposit HLG-*Eucheuma cottonii* dilihat dari hasil karakterisasi menggunakan XRD, IR, BET dan TGA. Material dilakukan sebagai adsorben zat warna anionik dan di uji selektivitasnya terhadap zat warna *direct yellow*, *methyl orange*, *congo red* dan *direct green*. Parameter adsorpsi meliputi variasi pH, waktu kontak, konsentrasi dan temperatur adsorpsi. Karakterisasi material menunjukkan keberhasilan sintesis komposit HLG-*Eucheuma cottonii*. Analisis XRD mengungkapkan pola difraksi khas HLG, seperti pada bidang (003) dan (006), yang menunjukkan struktur berlapis tetap terjaga setelah modifikasi, serta adanya puncak baru yang menunjukkan interaksi antara HLG dan *Eucheuma cottonii*. Hasil FTIR mengidentifikasi gugus fungsional utama seperti -OH, -SO₃ dari *Eucheuma cottonii*, serta gugus anorganik dari HLG, yang mengindikasikan integrasi kimia antara kedua material. Analisis BET menunjukkan peningkatan luas permukaan spesifik pada komposit dibandingkan material awal, yang mendukung peningkatan kapasitas adsorpsi. Selain itu, karakterisasi termal melalui TGA menunjukkan komposit memiliki stabilitas termal yang lebih baik dari HLG. Komposit HLG-*Eucheuma cottonii* memiliki kinerja unggul dalam menghilangkan zat warna anionik dari larutan. Pengaruh pH menunjukkan bahwa adsorpsi optimal terjadi pada pH 5 pada komposit. Waktu kontak memengaruhi efisiensi adsorpsi, dengan kesetimbangan tercapai dalam waktu tertentu yang dianalisis menggunakan model kinetika pseudo first-order (PFO) dan pseudo second-order (PSO), di mana model PSO memberikan kesesuaian terbaik untuk data. Analisis konsentrasi dan temperatur melalui model isotherm Langmuir dan Freundlich. Selain itu, material ini menunjukkan kemampuan regenerasi yang baik, dengan efisiensi adsorpsi tetap tinggi hingga siklus ke 4 dan ke 5 penggunaan ulang, yang mengindikasikan potensi besar sebagai adsorben yang ekonomis dan berkelanjutan untuk pengolahan air limbah.

Kata Kunci: Alga, *Eucheuma cottonii*, Hidroksi Lapis Ganda, Hidrotermal, Selektivitas Adsorpsi, Zat Warna Anionik

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Hipotesis.....	5
1.4. Tujuan Penelitian	8
1.5. Manfaat Penelitian	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1. Hidroksida Lapis Ganda.....	9
2.2. Modifikasi Material Komposit Hidroksi Lapis Ganda.....	10
2.2.1. Modifikasi Material Komposit Hidroksi Lapis Ganda menggunakan Bahan Anorganik	11
2.2.1.1. Modifikasi menggunakan Seng Oksida	11
2.2.1.2. Modifikasi menggunakan Polioksometalat	12
2.2.2. Modifikasi Material Komposit Hidroksi Lapis Ganda menggunakan Bahan Organik	13
2.2.2.1. Modifikasi menggunakan Grafena Oksida.....	13
2.2.2.2. Modifikasi menggunakan Hidrochar.....	15
2.2.2.3. Potensi Modifikasi menggunakan <i>Eucheuma cottonii</i>	17
2.3. Karakterisasi Material	18

2.3.1.	<i>X-Ray Diffraction (XRD)</i> pada Identifikasi Hidroksi Lapis Ganda dan Kompositnya	18
2.3.2.	Spektrofotometer FT-IR (<i>Fourier Transform Infrared</i>) pada Identifikasi Hidroksi Lapis Ganda dan Kompositnya	20
2.3.3.	Analisis BET (<i>Brunauer, Emmet, Teller</i>) pada Analisis Hidroksi Lapis Ganda dan Kompositnya	21
2.3.4.	Analisis TGA (<i>Thermal Gravimetric Analysis</i>) pada Analisis Hidroksi Lapis Ganda dan Kompositnya	22
2.4.	Adsorpsi dan Parameter Adsorpsi	23
2.5.	Regenerasi Material	25
2.6.	Spektrofotometri UV-Vis pada Analisis Konsentrasi Zat Warna	26
BAB III METODELOGI PENELITIAN.....		27
3.1.	Waktu dan Tempat	27
3.2.	Alat dan Bahan.....	27
3.2.1.	Alat.....	27
3.2.2.	Bahan.....	27
3.3.	Prosedur Penelitian.....	28
3.3.1.	Preparasi Makro Alga <i>Eucheuma cottonii</i>	28
3.3.2.	Sintesis Hidroksi Lapis Ganda Ni/Al-HLG dan Zn/Al-HLG	28
3.3.3.	Preparasi Komposit Hidroksi Lapis Ganda Ni/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> dan Zn/Al- <i>Eucheuma cottonii</i>	28
3.3.4.	Penentuan pH _{pzc}	29
3.3.5.	Pembuatan Larutan Stok Zat Warna Anionik	29
3.3.6.	Penentuan Panjang Gelombang pada Absorbansi Maksimum.....	29
3.3.7.	Pembuatan Kurva Kalibrasi	29
3.3.8.	Selektivitas Zat Warna Anionik	30
3.3.9.	Penentuan Kondisi Optimum Adsorpsi Zat Warna <i>Methyl Orange</i>	30

3.3.9.1. Variasi pH Adsorpsi	30
3.3.9.2. Pengaruh Waktu Kontak Adsorpsi	30
3.3.9.3. Pengaruh Konsentrasi dan Temperatur Adsorpsi	30
3.3.9.4. Regenerasi Material	31
3.4. Analisa Data	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	34
4.1. Analisa Hasil Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	34
4.2. Analisa Hasil Karakterisasi <i>Fourier Transform Infra Red</i> (FT-IR).....	35
4.3. Analisa Hasil Karakterisasi <i>Brunauer Emmet Teller</i> (BET).....	36
4.4. Hasil <i>Thermal Gravimetric Analysis</i> (TGA).....	38
4.5. Selektivitas Material Terhadap Zat Warna Anionik	42
4.6. pH <i>Point Zero Charge</i> (pHpzc) Material	44
4.7. Kondisi Optimum Adsorpsi Oleh Material Terhadap Pengaruh pH....	45
4.8. Kondisi Optimum Adsorpsi Oleh Material Terhadap Pengaruh Waktu Kontak.....	46
4.9. Pengaruh Adsorpsi Oleh Material Terhadap Variasi Konsentrasi dan Temperatur	48
4.10. Regenerasi Material	51
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	53
5.1. Kesimpulan	53
5.2. Saran.....	53
DAFTAR PUSTAKA	54
LAMPIRAN.....	67
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	98

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Struktur Layered Double Hydroxide.....	9
Gambar 2.2. XRD dari CuCr (a) dan CuCr-[α -SiW ₁₂ O ₄₀] (b)	12
Gambar 2.3. FTIR Spektra dari NiAl LDH dan NiAl-GO.....	14
Gambar 2.4. Isotherm Adsorpsi-Desorpsi N ₂ dari NiAl LDH, Hydrochar dan Hydrochar@NiAl LDH	16
Gambar 2.5. Kurva TGA ZnAl-LDH.....	23
Gambar 4.1. Difraktogram XRD dari Material Komposit Ni/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> (a) dan Zn/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> (b) yang disandingkan dengan Material Dasar HLG dan <i>Eucheuma cottonii</i>	34
Gambar 4.2. Spektrum FT-IR dari Material Komposit Ni/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> (a) dan Zn/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> (b) yang disandingkan dengan Material Dasar HLG dan <i>Eucheuma cottonii</i>	36
Gambar 4.3. Kurva Adsorpsi Gas N ₂ Karakterisasi BET dari Material Komposit Ni/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> (a) dan Zn/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> (b) yang disandingkan dengan Material Dasar HLG dan <i>Eucheuma cottonii</i>	37
Gambar 4.4. Kurva TG, DTA, dan DTG dari Material <i>Eucheuma cottonii</i> (a), Ni/Al-HLG (b), Ni/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> (c), Zn/Al-HLG (d) dan Zn/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> (e).....	39
Gambar 4.5. Spektra Dekonvolusi Absorbansi Konsentrasi Awal (a), Selektivitas Material <i>Eucheuma cottonii</i> (b), Ni/Al-HLG (c), Zn/Al-HLG (d), Ni/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> (e), dan Zn/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> (f) Terhadap Zat Warna Anionik	43
Gambar 4.6. Grafik pH _{pzc} dari Material Komposit Ni/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> (a) dan Zn/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> (b) yang disandingkan dengan Material Dasar HLG dan <i>Eucheuma cottonii</i>	45
Gambar 4.7. Pengaruh pH terhadap Adsorpsi Zat Warna <i>Methyl Orange</i> oleh Material Komposit Ni/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> (a) dan Zn/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> (b) yang disandingkan dengan Material Dasar HLG dan <i>Eucheuma cottonii</i>	46
Gambar 4.8. Pengaruh Waktu Kontak terhadap Adsorpsi Zat Warna <i>Methyl Orange</i> oleh Material Komposit Ni/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> (a) dan	

<i>Zn/Al-Eucheuma cottonii</i> (b) yang disandingkan dengan Material Dasar HLG dan <i>Eucheuma cottonii</i>	47
Gambar 4. 9. Siklus Regenerasi dari Material Komposit Ni/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> (a) dan <i>Zn/Al-Eucheuma cottonii</i> (b) yang disandingkan dengan Material Dasar HLG dan <i>Eucheuma cottonii</i>	52

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1. Luas Permukaan, Ukuran Pori, dan Volume Pori dari Material <i>Eucheuma cottonii</i> , Ni/Al-HLG, Ni/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> , Zn/Al-HLG dan Zn/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> Hasil Analisa BET	38
Tabel 4.2. Fase Dekomposisi Termal dari Material <i>Eucheuma cottonii</i> , Ni/Al-HLG, Ni/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> , Zn/Al-HLG dan Zn/Al- <i>Eucheuma cottonii</i>	41
Tabel 4.3. Persentase Terserap Selektivitas Material <i>Eucheuma cottonii</i> , Ni/Al-HLG, Ni/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> , Zn/Al-HLG dan Zn/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> Terhadap Zat Warna Anionik.....	44
Tabel 4.4. Parameter Model Kinetika Adsorpsi PFO dan PSO Material <i>Eucheuma cottonii</i> , Ni/Al-HLG, Ni/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> , Zn/Al-HLG dan Zn/Al- <i>Eucheuma cottonii</i>	48
Tabel 4.5. Model Isoterm Langmuir dan Freundlich dari Material <i>Eucheuma cottonii</i> , Ni/Al-HLG, Ni/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> , Zn/Al-HLG dan Zn/Al- <i>Eucheuma cottonii</i>	50
Tabel 4.6. Parameter termodinamika adsorpsi dari material <i>Eucheuma cottonii</i> , Ni/Al-HLG, Ni/Al- <i>Eucheuma cottonii</i> , Zn/Al-HLG, dan Zn/Al- <i>Eucheuma cottonii</i>	51

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Modifikasi material adalah proses yang dilakukan untuk mengubah sifat-sifat material dasar agar sesuai dengan kebutuhan aplikasi tertentu. Proses ini bisa melibatkan perubahan pada tingkat molekuler, struktur kristal, morfologi, atau komposisi kimia material tersebut. Tujuannya adalah untuk memperbaiki atau menambahkan sifat-sifat seperti kekuatan mekanik, ketahanan terhadap korosi, konduktivitas termal atau listrik, atau interaksi dengan zat lain seperti air atau polutan. Konteks pembuatan komposit, modifikasi material melibatkan penggabungan material dasar dengan satu atau lebih bahan lain untuk membentuk suatu material baru dengan sifat yang lebih unggul dibandingkan dengan material dasar atau bahan tambahan tersebut secara terpisah. Material dasar, yang sering disebut matriks, biasanya merupakan polimer, logam, atau keramik, sedangkan bahan tambahan bisa berupa serat, partikel, atau pengisi lainnya yang disebut penguat atau filler. Proses pembuatan komposit melibatkan pencampuran matriks dengan penguat, diikuti dengan proses pengerasan atau penyembuhan jika matriksnya adalah polimer. Penguat tersebut dapat berupa serat kaca, serat karbon, nanotube, atau partikel nano yang memiliki sifat mekanik yang tinggi. Penguat ini memberikan kekuatan tambahan pada matriks, sedangkan matriks melindungi penguat dari kerusakan lingkungan dan menyalurkan beban mekanik ke penguat tersebut. Hasil akhirnya adalah material komposit yang memiliki sifat yang lebih baik, seperti kekuatan yang lebih tinggi, kekakuan yang lebih baik, atau ketahanan yang lebih baik terhadap suhu tinggi atau bahan kimia (Bagherzadeh et al., 2024).

Modifikasi material sangat penting karena dapat meningkatkan sifat-sifat material yang ada, seperti peningkatan kapasitas adsorpsi, stabilitas, dan reproduktibilitas. Modifikasi juga dapat memperluas aplikasi material, meningkatkan efisiensi proses, dan mengurangi dampak lingkungan. Konteks penelitian yang dilakukan (Chengqian et al., 2023), modifikasi material telah memungkinkan pengembangan komposit Sep@Fe₃O₄/ZnAl-HLG dengan struktur hierarkis yang efektif dalam menghilangkan zat warna anionik dari air limbah. Dengan demikian, modifikasi material memainkan peran penting dalam

pengembangan solusi untuk masalah lingkungan dan teknologi air. Salah satu contoh modifikasi material bisa dari hidroksi lapis ganda (HLG).

Hidroksi lapis ganda memiliki rumus kimia $[M^{2+}_{1-x}M^{3+}_x(OH)_2]^{x+} [A^{n-}]_{x/n} \cdot m H_2O$, di mana 2 dan 3 pada M^{2+} dan M^{3+} , masing-masing, mewakili valensi dari kation logam dan A^{n-} menunjukkan suatu anion yang dapat dipertukarkan. Rumus di atas, x mewakili rasio molar $M^{3+}/(M^{2+} + M^{3+})$, yang bervariasi tergantung pada rasio muatan M^{2+}/M^{3+} (Kim et al., 2023a). Material hidroksi lapis ganda ini memiliki keunggulan dalam kemampuan pertukaran anion yang sangat baik, tingkat toksisitas yang rendah, dan memiliki luas permukaan yang besar (Zubair et al., 2022). Luas permukaan yang besar dan distribusi homogen dari banyak komponen dasar membuat hidroksi lapis ganda menjadi sangat menarik (Vishal et al., 2023). Salah satu karakteristik mencolok dari hidroksi lapis ganda adalah kemampuannya untuk mengalami rekonstruksi struktural setelah terpapar air dan sumber anion, yang umumnya disebut sebagai efek ingatan (*memory effect*) (Xiao fang Li et al., 2023). Hidroksi lapis ganda, berkat karakteristiknya yang khas, banyak digunakan sebagai adsorben yang sangat menjanjikan dalam bidang remediasi air (Ahmed et al., 2023).

Material yang dapat dimodifikasi dengan hidroksi lapis ganda (HLG) mencakup berbagai macam bahan organik dan anorganik. Material organik yang sering dimodifikasi dengan HLG adalah material berbasis karbon diantaranya modifikasi dengan menggunakan lignin yang dilakukan oleh (Palapa, Ahmad, Wijaya, et al., 2023), sebelum modifikasi, material Zn/Al memiliki luas permukaan sebesar 1,868 m²/g, setelah modifikasi dengan lignin, luas permukaan pada material komposit lignin-Zn/Al menjadi 7,125 m²/g yang menunjukkan potensi yang baik untuk aplikasi adsorpsi. Penelitian yang dilakukan (Badaruddin et al., 2022) HLG dimodifikasi dengan asam humat dengan hasil modifikasi material menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam kapasitas adsorpsi. ZnAl-Hidrochar, setelah modifikasi, memiliki kapasitas adsorpsi sebesar 90,090 mg/g, sementara ZnAl-Humic Acid menunjukkan peningkatan yang lebih besar lagi dengan kapasitas adsorpsi mencapai 94,340 mg/g. Penelitian yang dilakukan (Amri et al., 2023a) mengenai oksida grafena, sebelum modifikasi, material Ni/Al-HLG memiliki area permukaan sebesar 40,912 m²/g. Karakteristik ini menunjukkan bahwa material

tersebut memiliki potensi sebagai adsorben karena area permukaan yang cukup luas untuk menyerap molekul dari solusi. Setelah proses modifikasi dengan penambahan graphene oxide, terjadi peningkatan signifikan pada area permukaan material, yang mana area permukaan komposit Ni/Al-graphene oxide mencapai 78,348 m²/g. Modifikasi ada juga yang dimodifikasi menggunakan material yang dijadikan karbon terlebih dahulu seperti magnetik biochar (Zahara et al., 2023), hidrochar dari kulit rambutan (Normah et al., 2021a) dan karbon aktif (N. Ahmad, Suryani, Royani, & Lesbani, 2023). Selain itu, HLG juga dapat dimodifikasi dengan senyawa anorganik seperti seng oksida (Mohadi, Ahmad, et al., 2023), titanium oksida (N. Ahmad et al., 2022), metal oksida (Cu) (N. Ahmad et al., 2022), Grafit (Mega et al., 2021) dan polioxometalat (Hanifah et al., 2023), dimana penelitian-penelitian tersebut menghasilkan luas permukaan material yang sudah dimodifikasi lebih besar dibandingkan material sebelum dimodifikasi. Modifikasi tersebut untuk meningkatkan kinerja adsorpsi dan aktivitas katalitik material komposit.

Eucheuma cottonii merupakan salah satu jenis rumput laut yang banyak dibudidayakan di Indonesia. *Eucheuma cottonii* termasuk dalam jenis rumput laut merah Indonesia adalah produsen terbesar di dunia untuk jenis ini. Selain memiliki sifat sebagai stabilisator (Bagus et al., 2017), *Eucheuma cottonii* memiliki kemampuan mengabsorpsi yang baik, selain itu harganya yang ekonomis karena ketersediaannya di alam yang melimpah menjadikannya pilihan utama sebagai adsorben. Sehingga pentingnya penelitian efektifitas alga merah (*Eucheuma cottonii*) sebagai adsorben dalam mengurangi dampak limbah zat warna (Sunarti & Ferdinandus, 2020). Oleh karena itu, dalam penelitian ini, kombinasi hidroksi lapis ganda dan *Eucheuma cottonii* akan dimodifikasi menjadi komposit dilihat dari keunggulan dari kedua material untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi zat warna anionik dalam medium air.

Pada penelitian ini akan dilakukan modifikasi hidroksi lapis ganda Ni/Al, dan Zn/Al dengan *Eucheuma cottonii* yang digunakan sebagai adsorben untuk adsorpsi zat warna anionik. Material hasil sintesis dan preparasi dikarakterisasi dengan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD), *Fourier Transform Infra Red* (FTIR), *Brunauer Emmet Teller* (BET) dan *Thermal Gravimetric Analysis* (TGA). Selanjutnya, material diaplikasikan sebagai adsorben untuk mengadsorpsi zat

warna anionik. Studi ini mengevaluasi banyak faktor yang memengaruhi proses adsorpsi, termasuk selektivitas zat warna anionik, variasi pH, variasi waktu, variasi konsentrasi dan temperatur, dan regenerasi material.

1.2. Rumusan Masalah

Hidroksi lapis ganda (HLG) adalah material dengan struktur berlapis yang unik yang membuatnya cocok untuk berbagai aplikasi seperti sebagai adsorben, terutama dalam pengolahan air limbah. Namun, kegunaannya sebagai adsorben sering kali dibatasi karena kurangnya stabilitas termal dan stabilitas strukturnya ketika digunakan untuk adsorpsi. Alasan utama untuk memodifikasi HLG adalah untuk meningkatkan stabilitas termalnya. HLG cenderung kehilangan struktur berlapis mereka, yang dapat menyebabkan runtuhnya lapisan dan hilangnya luas permukaan dan kapasitas adsorpsi. Dengan memodifikasi HLG, kita dapat meningkatkan ketahanannya terhadap dekomposisi termal, sehingga memungkinkan HLG untuk mempertahankan struktur dan fungsinya dalam berbagai kondisi. Efek memori struktural HLG, meskipun bermanfaat dalam beberapa hal, juga bisa menjadi kelemahan. Efek ini memungkinkan HLG untuk merekonstruksi struktur aslinya setelah diubah, tetapi struktur yang direkonstruksi mungkin tidak selalu optimal untuk aplikasi sebagai adsorben. Melalui modifikasi, kita dapat mengontrol efek memori ini untuk memastikan bahwa HLG dapat disesuaikan untuk mendapatkan kembali struktur yang diinginkan setelah mengalami perubahan sehingga adsorben dapat digunakan berulang melalui proses regenerasi (P. Wang et al., 2023).

Eucheuma cottonii memiliki kelebihan yang cocok menjadikannya bahan yang ideal untuk modifikasi material. Salah satu kelebihan utamanya adalah kandungan κ -carrageenan yang tinggi, yang merupakan polisakarida sulfat yang larut dalam air dan memiliki sifat stabilisator (Bagus et al., 2017; Lun et al., 2024). Selain itu, karagenan memiliki kapasitas sifat *swelling* yang tinggi memungkinkan interaksi yang signifikan dengan adsorbat, meningkatkan efektivitasnya dalam adsorpsi polutan. Kehadiran gugus fungsi dalam karagenan memfasilitasi pengikatan yang kuat dengan molekul zat warna melalui berbagai interaksi, termasuk ikatan hidrogen dan gaya elektrostatik. Selain itu, komposit karagenan tidak beracun dan biokompatibel, sehingga menjadikannya pilihan yang ramah

lingkungan untuk pemurnian air. Secara keseluruhan, adsorben komposit berbasis karagenan menawarkan pendekatan yang berkelanjutan dan efisien untuk menghilangkan pewarna dan kontaminan lainnya dari air limbah, dengan potensi regenerasi dan penggunaan kembali, yang secara ekonomi bermanfaat untuk aplikasi industri skala besar (Sharma et al., 2022). Karagenan yang digunakan sebagai adsorben dapat dimodifikasi menjadi hidrogel (Hao et al., 2023), biochar (Saeed et al., 2020), dan nanokomposit (Kulal & Badalamoole, 2020).

Karakteristik dari *Eucheuma cottonii* inilah yang memberikan peluang besar untuk menjadikannya sebagai bahan untuk memodifikasi material hidroksi lapis ganda. Dengan kelebihan-kelebihan dari material HLG dan *Eucheuma cottonii*, diharapkan dapat meningkatkan efektifitasnya sebagai adsorben. Melalui modifikasi ini, diharapkan meningkatkan stabilitas termal, kapasitas adsorpsi dan efek memori struktural sehingga dapat menjadi bahan yang lebih kuat dan efisien untuk pengolahan air limbah zat warna anionik yang dapat digunakan secara berulang.

1.3. Hipotesis

Hidroksi lapis ganda yang dimodifikasi dengan material pendukung memiliki pola hasil XRD dan FT-IR gabungan antara material dasar dan material pendukung, yang menandakan keberhasilan dari modifikasi material yang dilakukan. *Database* seperti JCPDS dan ICDD merupakan database yang umum digunakan untuk melihat dan membandingkan pola difraksi XRD dari material dasar dan kompositnya. Hasil karakterisasi XRD dilihat dari puncak intensitas dari 2 theta dan hasil karakterisasi FT-IR dilihat dari gugus fungsional yang terdapat pada material. Penelitian yang dilakukan oleh (N. Ahmad, Suryani Arsyad, Royani, Mega Syah Bahar Nur Siregar, et al., 2023a), (N. Ahmad et al., 2022), (Amri et al., 2023a), (Wijaya et al., 2023) dan (Chengqian et al., 2023) memperlihatkan keberhasilan modifikasi material dilihat dari hasil karakterisasi XRD dan FT-IR antara material dasar dan kompositnya.

Hipotesis 1. Diasumsikan material komposit hidroksi lapis ganda Ni/Al-*Eucheuma cottonii* dan Zn/Al-*Eucheuma cottonii* memiliki karakteristik gabungan dari hidroksi lapis ganda dan *Eucheuma cottonii* dilihat dari pola hasil karakterisasi XRD dan FT-IR.

HLG yang dimodifikasi dengan material pendukung berbasis karbon menunjukkan peningkatan hasil yang sangat signifikan terhadap karakteristik luas permukaan spesifik (BET). Berdasarkan penelitian (Amri et al., 2023b), terjadi peningkatan luas permukaan pada modifikasi material hidroksi lapis ganda Ni/Al dengan graphen oksida dari 40,912 m²/g menjadi 78,348 m²/g. Menurut penelitian yang dilakukan (Liao et al., 2022), material hidroksi lapis ganda Mg/Al mengalami peningkatan luas permukaan pada modifikasi HLG menjadi komposit dengan biochar dari 103,737 m²/g menjadi 384,198 m²/g pada Mg/Al/biochar, material hidroksi lapis ganda Mg/Cr-HLG memiliki luas permukaan sebesar 21,5 m²/g mengalami peningkatan luas permukaan sebesar 38,9 m²/g setelah di modifikasi menjadi Mg/Cr-Cu (Wijaya et al., 2023), penelitian yang dilakukan juga oleh (Wijaya et al., 2023) Mg/Al-HLG memiliki luas permukaan 23,1 m²/g setelah dilakukan modifikasi menjadi Mg/Al-Cu luas permukaan berubah menjadi 30,5 m²/g. Luas permukaan hidroksida ganda berlapis Zn/Al meningkat setelah modifikasi dengan lignin. Sebelum modifikasi, Zn/Al memiliki luas permukaan 1,968 m² /g, dan setelah modifikasi dengan lignin untuk membentuk lignin-Zn/Al, luas permukaan menjadi 7,125 m² /g (Palapa, Ahmad, Wijaya, et al., 2023).

Hipotesis 2. *Diasumsikan material komposit hidroksi lapis ganda Ni/Al-Eucheuma cottonii dan Zn/Al-Eucheuma cottonii memiliki luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan HLG berdasarkan data BET.*

Berdasarkan penelitian (Mohadi et al., 2021), adsorpsi zat warna malasit hijau menggunakan HLG Ca/Al memiliki kapasitas adsorpsi maksimum mencapai 43,860 mg/g sedangkan Ca/Al yang telah dikompositkan dengan biochar memiliki peningkatan kapasitas adsorpsi maksimum menjadi 71,429 mg/g. Penelitian yang dilakukan oleh (Lins et al., 2020), melakukan modifikasi material hidroksi lapis ganda Mg/Al dengan karbon aktif pada proses adsorpsi obat antiinflamasi non-steroid yang menghasilkan peningkatan kapasitas adsorpsi dari 2,35 mg/g menjadi 5,96 mg/g. Penelitian yang dilakukan oleh (Palapa, Ahmad, Wijaya, et al., 2023) kapasitas adsorpsi maksimum untuk Zn/Al adalah 36,364 mg/g, mengalami peningkatan untuk Zn/Al-lignin, kapasitas adsorpsi maksimumnya adalah 83,034

mg/g. Untuk penelitian yang dilakukan (Badaruddin et al., 2022) ZnAl-HLG adalah 51,180 mg/g mengalami peningkatan untuk ZnAl-Humic Acid adalah 94,340 mg/g.

Hipotesis 3. *Diasumsikan bahwa material komposit hidroksi lapis ganda Ni/Al-Eucheuma cottonii dan Zn/Al-Eucheuma cottonii memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih besar dibandingkan dengan base material dan prekursornya yaitu Ni/Al-HLG, Zn/Al-HLG dan Eucheuma cottonii.*

Hasil analisis termal *Eucheuma cottonii*, material ini memiliki tiga fase dekomposisi. Fase 1 pada temperatur 30 °C sampai 192,8 °C mengalami penghilangan berat sebesar 13,86 % yang diidentifikasi sebagai penguapan air dan dekomposisi material organik yang memiliki sifat volatile. Fase 2 dari temperatur 192,8 °C sampai 300 °C mengalami penghilangan berat sebesar 21,51 % diidentifikasi dekomposisi material organik seperti polimer dalam hal ini karagenan yang terkandung pada *Eucheuma cottonii*. Fase 3 dari temperatur 300 °C sampai 800 °C dengan penghilangan berat sebesar 27,86 % diidentifikasi sebagai dekomposisi material organik yang lebih stabil bisa berupa protein. *Eucheuma cottonii* meninggalkan residu %berat sebesar 36,77% dengan temperatur 800 °C mengidentifikasikan material ini memiliki stabilitas struktur dan stabilitas termal yang baik (Jumaidin et al., 2017b; Khan et al., 2022; Parsa et al., 2019).

Penelitian oleh (Normah et al., 2021b), komposit HLG Cu-Al/hidrochar rambutan memiliki kemampuan regenerasi sampai 82,2%. Hal ini dapat sebagai acuan keberhasilan komposit hidroksi lapis ganda Zn-Al/magnetik biochar memiliki persentase regenerasi lebih baik. Siklus pemakaian adsorben Zn/Al-biochar mencapai 5 siklus dan terjadi penurunan kemampuan adsorpsi yang signifikan pada siklus ke 6 dan 7. Selain itu, penelitian yang dilakukan (Badri et al., 2022), menggunakan material modifikasi material Mg/Al-biochar pada adsorpsi zat warna anionik menghasilkan peningkatan kemampuan material pada proses regenerasi yang mencapai 5 siklus dibandingkan dengan material awal hanya 4 siklus regenerasi. Penelitian yang dilakukan (Amri et al., 2023a), setelah modifikasi dengan graphene oxide, material komposit Ni/Al-graphene oxide menunjukkan penurunan yang tidak signifikan hingga siklus kelima, dengan penurunan dari 97,561% menjadi 77,046%. Sebaliknya, material Ni/Al-HLG menunjukkan penurunan yang lebih cepat dari 85,00% menjadi 5,667%. Penelitian yang

dilakukan (N. Ahmad et al., 2022), Setelah 3 kali reaksi katalitik, mempertahankan lebih dari 80% pada penggunaan katalis Ni/Al-HLG, TiO₂, dan ZnO. Namun, untuk komposit yang dimodifikasi, yaitu Ni/Al-TiO₂ dan Ni/Al-ZnO, setelah penggunaan berulang masih sangat tinggi, yaitu 97,79% dan 98,99% masing-masing.

Hipotesis 4. *Diasumsikan material Ni/Al-HLG dan Zn/Al-HLG setelah dimodifikasi dengan *Eucheuma cottonii* memiliki stabilitas termal yang baik dilihat dari analisis TGA sehingga dapat dipergunakan berulang pada proses regenerasi adsorben.*

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yang ingin dicapai ini yaitu:

1. Melakukan modifikasi material komposit hidroksi lapis ganda Ni/Al-*Eucheuma cottonii* dan Zn/Al-*Eucheuma cottonii* dengan keberhasilan sintesis dilihat dari karakterisasi material menggunakan XRD, FTIR, BET dan TGA, serta penentuan pHPzc material dan penentuan selektivitas material terhadap zat warna anionik.
2. Mempelajari pengaruh pH serta parameter kinetika, isotherm dan termodinamika adsorpsi melalui pengaruh waktu, temperatur dan konsentrasi zat warna, terhadap kemampuan adsorpsi material terhadap zat warna anionik.
3. Mempelajari proses regenerasi material yang digunakan dengan tujuan penggunaan berulang untuk adsorpsi zat warna anionik.

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan berbagai manfaat berupa:

1. Memberikan informasi mengenai karakteristik material komposit hidroksi lapis ganda Ni/Al-*Eucheuma cottonii* dan Zn/Al-*Eucheuma cottonii*.
2. Memberikan informasi mengenai material komposit hidroksi lapis ganda Ni/Al-*Eucheuma cottonii* dan Zn/Al-*Eucheuma cottonii* sebagai material yang dapat digunakan sebagai adsorben pada proses adsorpsi zat warna dalam penanggulangan pencemaran limbah zat warna anionik di lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul Khalil, H. P. S., Tye, Y. Y., Saurabh, C. K., Leh, C. P., Lai, T. K., Chong, E. W. N., Nurul Fazita, M. R., Hafiidz, J. M., Banerjee, A., & Syakir, M. I. (2017). Biodegradable polymer films from seaweed polysaccharides: A review on cellulose as a reinforcement material. *Express Polymer Letters*, *11*(4), 244–265. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2017.26>
- Ahmad, N., Rohmatullaili, R., Hanifah, Y., Wibiyani, S., Amri, A., Wijaya, A., Mardiyanto, M., Mohadi, R., Royani, I., & Lesbani, A. (2023). Recycle Performance of Heterogeneous Catalyst Metal Oxides-Based Layered Double Hydroxide for Oxidative Desulfurization Process of 4-methylthiophene. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, *18*(4), 548–558. <https://doi.org/10.9767/bcrec.20034>
- Ahmad, N., Rohmatullaili, Wijaya, A., & Lesbani, A. (2023). Magnetite Humic Acid-decorated MgAl Layered Double Hydroxide and Its Application in Procion Red Adsorption. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *684*(February 2023), 133042. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.133042>
- Ahmad, N., Suryani Arsyad, F., Royani, I., Mega Syah Bahar Nur Siregar, P., Taher, T., & Lesbani, A. (2023a). High regeneration of ZnAl/NiAl-Magnetite humic acid for adsorption of Congo red from aqueous solution. *Inorganic Chemistry Communications*, *150*, 110517. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110517>
- Ahmad, N., Suryani Arsyad, F., Royani, I., Mega Syah Bahar Nur Siregar, P., Taher, T., & Lesbani, A. (2023b). High regeneration of ZnAl/NiAl-Magnetite humic acid for adsorption of Congo red from aqueous solution. *Inorganic Chemistry Communications*, *150*, 110517. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110517>
- Ahmad, N., Suryani, F., Royani, I., & Lesbani, A. (2023). Results in Chemistry Charcoal activated as template Mg / Al layered double hydroxide for selective adsorption of direct yellow on anionic dyes. *Results in Chemistry*, *5*(December 2022), 100766. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.100766>
- Ahmad, N., Wijaya, A., Amri, A., Fitri, E. S., Arsyad, F. S., Mohadi, R., & Lesbani, A. (2022). *Catalytic Oxidative Desulfurization of Dibenzothiophene by Composites Based*. *7*(3).
- Ahmad, S., Wazir, M. B., Daud, M., Kui, C., Ul, M., Shah, H., & Al-harhi, M. A. (2023). Recent advancement in ionic liquid modified layered double hydroxide (IL-LDH): Progress , challenges , and future prospects. *Inorganic Chemistry Communications*, *158*(P2), 111591. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111591>

- Ahmed, I. M., Abd-Elhamid, A. I., Aly, A. A., Bräse, S., & Nayl, A. E. A. A. (2023). Synthesis of Ni-Fe-CO₃ layered double hydroxide as Effective Adsorbent to remove Cr(VI) and ARS-dye from aqueous media. *Environmental Technology & Innovation*, *31*, 103214. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2023.103214>
- AlQasas, N., & Johnson, D. (2023). Determination of Hansen solubility parameters of water-soluble proteins using UV–vis spectrophotometry. *Heliyon*, *9*(11), e21403. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21403>
- Amri, A., Lesbani, A., & Mohadi, R. (2023a). Malachite Green Dye Adsorption from Aqueous Solution using a Ni/Al Layered Double Hydroxide-Graphene Oxide Composite Material. *Science and Technology Indonesia*, *8*(2), 280–287. <https://doi.org/10.26554/sti.2023.8.2.280-287>
- Amri, A., Lesbani, A., & Mohadi, R. (2023b). Malachite Green Dye Adsorption from Aqueous Solution using a Ni/Al Layered Double Hydroxide-Graphene Oxide Composite Material. *Science and Technology Indonesia*, *8*(2), 280–287. <https://doi.org/10.26554/sti.2023.8.2.280-287>
- Andoh, C. N., Attiogbe, F., Bonsu Ackerson, N. O., Antwi, M., & Adu-Boahen, K. (2024). Fourier Transform Infrared Spectroscopy: An analytical technique for microplastic identification and quantification. *Infrared Physics & Technology*, *136*(December 2023), 105070. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2023.105070>
- Antoniak-Jurak, K., Kowalik, P., Próchniak, W., Bicki, R., & Słowik, G. (2021). materials Heterostructural Mixed Oxides Prepared via ZnAlLa LDH or ex-ZnAl LDH Precursors-Effect of La Content and Its Incorporation Route. *Materials*, *14*(8), 2082. <https://doi.org/10.3390/ma14082082>
- Badaruddin, M., Ahmad, N., Fitri, E. S., Lesbani, A., & Mohadi, R. (2022). Hydrochar and Humic Acid as Template of ZnAl Layered Double Hydroxide for Adsorption of Phenol. *Science and Technology Indonesia*, *7*(4), 492–499. <https://doi.org/10.26554/sti.2022.7.4.492-499>
- Badri, A. F., Juleanti, N., Mohadi, R., Mardiyanto, & Lesbani, A. (2022). The Efficiency of Mg-Al/Biochar for Methyl Orange and Methyl Red Removal. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, *23*(1), 202–211. <https://doi.org/10.12912/27197050/142971>
- Bagherzadeh, M., Salehi, G., & Rabiee, N. (2024). Chemosphere Rapid and efficient removal of methylene blue dye from aqueous solutions using extract-modified Zn – Al LDH. *Chemosphere*, *350*(December 2023), 141011. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.141011>
- Bagus, N., Suardika, A., Atmaja, B. T., & Deseliane, S. (2017). *Pemanfaatan Kappa -Karaginan dari Rumput Laut Merah (Eucheuma cottonii) sebagai Bahan Solidifikasi dan Stabilisasi Logam Berat Chromium pada Limbah Tekstil*. 9–16. <https://doi.org/10.21063/PIMIMD4.2017.9-16>

- Balqis, A. M. I., Khaizura, M. A. R. N., Russly, A. R., & Hanani, Z. A. N. (2017). Effects of Plasticizers on the Physicochemical Properties of Kappa-Carrageenan Films Extracted from *Eucheuma cottonii*. *International Journal of Biological Macromolecules*.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.05.105>
- Bokka, S., Singh, R., & Chowdhury, A. (2024). Efficacy of Mg-Al-layered double hydroxide nano-adsorbents for a multi-anionic mixed dye solution. *Journal of Molecular Liquids*, 396(September 2023), 123984.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.123984>
- Brahma, D., & Saikia, H. (2022). Synthesis of ZrO₂/MgAl-LDH composites and evaluation of its isotherm, kinetics and thermodynamic properties in the adsorption of congo red dye. *Chemical Thermodynamics and Thermal Analysis*, 7(April), 100067. <https://doi.org/10.1016/j.ctta.2022.100067>
- Cha, J. S., Park, S. H., Jung, S. C., Ryu, C., Jeon, J. K., Shin, M. C., & Park, Y. K. (2016). Production and utilization of biochar: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 40, 1–15.
<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.06.002>
- Chengqian, F., Wanbing, L., Yimin, D., Zhiheng, W., Yaqi, L., Ling, C., Bo, L., Siwen, Y., Junlong, W., Xianglong, D., Yue-Fei, Z., Yan, L., & Li, W. (2023). Synthesis of a novel hierarchical pillared Sep@Fe₃O₄/ZnAl-LDH composite for effective anionic dyes removal. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 663(November 2022), 130921.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.130921>
- Daghooghi-Mobarakeh, H., Campbell, N., Bertrand, W. K., Kumar, P. G., Tiwari, S., Wang, L., Wang, R., Miner, M., & Phelan, P. E. (2020). Ultrasound-assisted regeneration of zeolite/water adsorption pair. *Ultrasonics Sonochemistry*, 64(February), 105042.
<https://doi.org/10.1016/j.ultrsonch.2020.105042>
- Daghooghi-Mobarakeh, H., Miner, M., Wang, L., Wang, R., & Phelan, P. E. (2022). Ultrasound-assisted regeneration of activated alumina/water adsorption pair for drying and dehumidification processes. *Ultrasonics*, 124(December 2020), 106769. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2022.106769>
- Fan, K., Xu, P., Li, Z., Shao, M., & Duan, X. (2023). Layered double hydroxides: next promising materials for energy storage and conversion. *Next Materials*, 1(4), 100040. <https://doi.org/10.1016/j.nxmater.2023.100040>
- Farhan, A., Khalid, A., Maqsood, N., Iftekhar, S., Sharif, H. M. A., Qi, F., Sillanpää, M., & Asif, M. B. (2024). Progress in layered double hydroxides (LDHs): Synthesis and application in adsorption, catalysis and photoreduction. *Science of the Total Environment*, 912(December 2023).
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169160>

- Felix, C. B., Chen, W. H., Ubando, A. T., Park, Y. K., Lin, K. Y. A., Pugazhendhi, A., Nguyen, T. B., & Dong, C. Di. (2022). A comprehensive review of thermogravimetric analysis in lignocellulosic and algal biomass gasification. *Chemical Engineering Journal*, 445. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136730>
- García-González, A., Zavala-Arce, R. E., Avila-Pérez, P., Jiménez-Núñez, M. L., García-Gaitán, B., & García-Rivas, J. L. (2020). Development of standardized method for the quantification of azo dyes by UV-Vis in binary mixtures. *Analytical Biochemistry*, 608(April). <https://doi.org/10.1016/j.ab.2020.113897>
- Gibson, N., Kuchenbecker, P., Rasmussen, K., Hodoroaba, V. D., & Rauscher, H. (2019). Volume-specific surface area by gas adsorption analysis with the BET method. In *Characterization of Nanoparticles: Measurement Processes for Nanoparticles* (pp. 265–294). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814182-3.00017-1>
- Golmohammadi, F., & Amiri, M. (2020). Biomass-derived graphene-based nanocomposite: A facile template for decoration of ultrathin nickel–aluminum layered double hydroxide nanosheets as high-performance supercapacitors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(31), 15578–15588. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.044>
- Han, J. S., Kim, S. Y., & Seo, Y. B. (2022). Disk-shaped cellulose fibers from red algae, *Eucheuma cottonii* and its use for high oxygen barrier. *International Journal of Biological Macromolecules*, 210(January), 752–758. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.04.232>
- Han, X. W., Guo, S., Gao, X., Lu, C., & Wang, S. (2024). Three-dimensional Mg–Al layered double hydroxide decorated reduced graphene oxide nanocomposite: An efficient adsorbent for the removal of methylene blue and ciprofloxacin. *Applied Clay Science*, 250(February), 107280. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2024.107280>
- Hanifah, Y., Mohadi, R., Mardiyanto, M., Ahmad, N., Suheryanto, S., & Lesbani, A. (2023). *Polyoxometalate Intercalated M₂₊ / Al (M₂₊ = Ni , Mg) Layered Double Hydroxide for Degradation of Methylene*. 18(2), 210–221. <https://doi.org/10.9767/bcrec.17789>
- Hao, R., Ji, H., Gao, L., Chen, J., Shi, Y., & Yang, J. (2023). Grafted natural melanin κ -carrageenan hydrogel bead adsorbents: New strategy for bioremediation of cationic dye contamination in aqueous solutions. *Chemical Engineering Research and Design*, 199, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.09.016>
- Ili Balqis, A. M., Nor Khaizura, M. A. R., Russly, A. R., & Nur Hanani, Z. A. (2017). Effects of Plasticizers on the Physicochemical Properties of Kappa-

- Carrageenan Films Extracted from *Eucheuma cottonii*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 103, 721–732. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.05.105>
- Jumaidin, R., Sapuan, S. M., Jawaid, M., Ishak, M. R., & Sahari, J. (2017a). Characteristics of *Eucheuma cottonii* waste from East Malaysia: physical, thermal and chemical composition. *European Journal of Phycology*, 52(2), 200–207. <https://doi.org/10.1080/09670262.2016.1248498>
- Jumaidin, R., Sapuan, S. M., Jawaid, M., Ishak, M. R., & Sahari, J. (2017b). Characteristics of *Eucheuma cottonii* waste from East Malaysia: physical, thermal and chemical composition. *European Journal of Phycology*, 52(2), 200–207. <https://doi.org/10.1080/09670262.2016.1248498>
- Khan, N., Sudhakar, K., & Mamat, R. (2022). Thermogravimetric Analysis of Marine Macroalgae Waste Biomass as Bio-Renewable Fuel. *Journal of Chemistry*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/6417326>
- Khooni, M. A. K., Ahmadzadeh, H., & Davardoostmanesh, M. (2024). Magnetic graphene oxide/Mg-Al layered double hydroxide nanocomposite as an efficient adsorbent for removal of methylene blue: A study of equilibrium isotherms, kinetics, thermodynamic and reusability. *Materials Science and Engineering: B*, 300(October 2023), 117123. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.117123>
- Kim, J., Bak, G. H., Yoo, D. Y., Lee, Y. I., Lee, Y. G., & Chon, K. (2023a). Functionalization of pine sawdust biochars with Mg/Al layered double hydroxides to enhance adsorption capacity of synthetic azo dyes: Adsorption mechanisms and reusability. *Heliyon*, 9(3), e14142. <https://doi.org/10.1016/J.Heliyon.2023.E14142>
- Kim, J., Bak, G. H., Yoo, D. Y., Lee, Y. I., Lee, Y. G., & Chon, K. (2023b). Functionalization of pine sawdust biochars with Mg/Al layered double hydroxides to enhance adsorption capacity of synthetic azo dyes: Adsorption mechanisms and reusability. *Heliyon*, 9(3), e14142. <https://doi.org/10.1016/J.Heliyon.2023.E14142>
- Kulal, P., & Badalamoole, V. (2020). International Journal of Biological Macromolecules Hybrid nanocomposite of kappa-carrageenan and magnetite as adsorbent material for water purification. *International Journal of Biological Macromolecules*, 165, 542–553. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.202>
- Lesbani, A., Ahmad, N., Mohadi, R., Royani, I., Wibiyani, S., Amri, & Hanifah, Y. (2024a). Selective adsorption of cationic dyes by layered double hydroxide with assist algae (*Spirulina platensis*) to enrich functional groups. *JCIS Open*, 15, 100118. <https://doi.org/10.1016/j.jciso.2024.100118>

- Lesbani, A., Ahmad, N., Mohadi, R., Royani, I., Wibiyani, S., Amri, & Hanifah, Y. (2024b). Selective adsorption of cationic dyes by layered double hydroxide with assist algae (*Spirulina platensis*) to enrich functional groups. *JCIS Open*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.jciso.2024.100118>
- Li, S., Lv, Y., Yang, Q., Tang, J., Huang, Y., Zhao, H., & Zhao, F. (2023). Quality analysis and geographical origin identification of *Rosa roxburghii* Tratt from three regions based on Fourier transform infrared spectroscopy. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 297(November 2022), 122689. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2023.122689>
- Li, W., Tao, E., Hao, X., Li, N., Li, Y., & Yang, S. (2024). MMT and ZrO₂ jointly regulate the pore size of graphene oxide-based composite aerogel materials to improve the selective removal ability of Cu(II). *Separation and Purification Technology*, 331. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125506>
- Li, Xiao fang, Li, R. xian, Wang, K. xin, & Feng, X. qiang. (2023). Highly synergic adsorption and photocatalytic degradation of walnut shell biochar/NiCr-layered double hydroxides composite for Methyl orange. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 126, 270–282. <https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2023.06.017>
- Li, Xiaobao, Ma, X., & Zhao, X. (2023). Preparation of lignin–MgAl layered double hydroxide composites by hydrothermal method using lignin as carrier and intercalation modifier agent. *Materials Letters*, 336(November 2022), 133922. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.133922>
- Li, Z., Wang, J., Expósito, D. F., Zhang, J., Fu, C., Shi, D., & Wang, D. Y. (2018). High-performance carrageenan film based on carrageenan intercalated layered double hydroxide with enhanced properties: Fire safety, thermal stability and barrier effect. *Composites Communications*, 9, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2018.03.007>
- Liao, W., Zhou, X., Cai, N., Chen, Z., Yang, H., Zhang, S., Zhang, X., & Chen, H. (2022). Simultaneous removal of cadmium, lead, chromate by biochar modified with layered double hydroxide with sulfide intercalation. *Bioresource Technology*, 360, 127630. <https://doi.org/10.1016/J.Biortech.2022.127630>
- Lins, P. V. S., Henrique, D. C., Ide, A. H., Duarte, J. L. da silva, Dotto, G. L., Yazidi, A., Sellaoui, L., Erto, A., Zanta, C. L. de P. e. S., & Meili, L. (2020). Adsorption of a non-steroidal anti-inflammatory drug onto MgAl/LDH-activated carbon composite – Experimental investigation and statistical physics modeling. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 586, 124217. <https://doi.org/10.1016/J.Colsurfa.2019.124217>
- Liu, P., Wu, L., Guo, Y., Huang, X., & Guo, Z. (2024). High crystalline LDHs with strong adsorption properties effectively remove oil and micro-nano plastics.

- Journal of Cleaner Production*, 437(October 2023), 140628. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140628>
- Liu, Z., Zhou, J., Zhou, L., Li, B., Wang, T., & Liu, H. (2024). Evaluation on metal chlorine solution for washing regeneration of mercury adsorbent. *Separation and Purification Technology*, 337(November 2023), 126386. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.126386>
- López-Pérez, L., Zarubina, V., & Melián-Cabrera, I. (2021). The Brunauer–Emmett–Teller model on alumino-silicate mesoporous materials. How far is it from the true surface area? *Microporous and Mesoporous Materials*, 319(March). <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111065>
- Lun, Y., Shi, I., Chee, H., Foo, Y., Kandedo, J., Kee, M., Lim, S., Loke, P., & Kee, M. (2024). Biorefinery-based sustainability assessment of macroalgae waste valorization to polylactic acid: Exergy and exergoeconomic perspectives. *Biochemical Engineering Journal*, 204(December 2023), 109219. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2024.109219>
- Mega, P., Bahar, S., Siregar, N., Palapa, N. R., Wijaya, A., Fitri, E. S., & Lesbani, A. (2021). *Structural Stability of Ni / Al Layered Double Hydroxide Supported on Graphite and Biochar Toward Adsorption of Congo Red*. 6(2).
- Meili, L., Lins, P. V., Zanta, C. L. P. S., Soletti, J. I., Ribeiro, L. M. O., Dornelas, C. B., Silva, T. L., & Vieira, M. G. A. (2019). MgAl-LDH/Biochar composites for methylene blue removal by adsorption. *Applied Clay Science*, 168, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.10.012>
- Mochane, M. J., Magagula, S. I., Sefadi, J. S., Sadiku, E. R., & Mokhena, T. C. (2020). Morphology, thermal stability, and flammability properties of polymer-layered double hydroxide (Ldh) nanocomposites: A review. In *Crystals* (Vol. 10, Issue 7, pp. 1–26). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/cryst10070612>
- Mohadi, R., Ahmad, N., Wibiyani, S., Zahara, Z. A., Fitri, E. S., Mardiyanto, Royani, I., & Lesbani, A. (2023). Synthesis of Zn/Al-ZnO Composite Using Zn/Al-Layered Double Hydroxide for Oxidative Desulfurization of 4-Methyldibenzothiophene. *Science and Technology Indonesia*, 8(4), 701–709. <https://doi.org/10.26554/sti.2023.8.4.701-709>
- Mohadi, R., Juleanti, N., Normah, N., Siregar, P. M. S. B. N., Wijaya, A., Palapa, N. R., & Lesbani, A. (2022). Low-Cost Yet High-Performance Hydrochar Derived from Hydrothermal Carbonization of Duku Peel (*Lansium domesticum*) for Cr(VI) Removal from Aqueous Solution. *Indonesian Journal of Chemistry*, 22(6), 1523–1533. <https://doi.org/10.22146/ijc.73353>
- Mohadi, R., Palapa, N. R., & Lesbani, A. (2021). *Preparation of Ca / Al-Layered Double Hydroxides / Biochar Composite with High Adsorption Capacity and*

- Selectivity toward Cationic Dyes in Aqueous*. 16(2), 244–252.
<https://doi.org/10.9767/bcrec.16.2.10211.244-252>
- Mohadi, R., Palapa, N. R., Wibiyani, S., Mardiyanto, Rohmatullaili, Fitri, E. S., & Lesbani, A. (2023). Catalytic Oxidative Desulfurization of 4-Methyldibenzothiophene by Ni/Al Modified Titanium Dioxide and Zinc Oxide. *Science and Technology Indonesia*, 8(3), 414–421.
<https://doi.org/10.26554/sti.2023.8.3.414-421>
- Mujtaba, G., Ullah, A., Khattak, D., Shah, M. U. H., Daud, M., Ahmad, S., Hai, A., Ahmed, F., Alshahrani, T., & Banat, F. (2023). Simultaneous adsorption of methylene blue and amoxicillin by starch-impregnated MgAl layered double hydroxide: Parametric optimization, isothermal studies and thermo-kinetic analysis. *Environmental Research*, 235(June), 116610.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116610>
- Nissa, R. C., Abdullah, A. H. D., Firdiana, B., Kosasih, W., Endah, E. S., Marliah, S., Rahmat, A., & Hidayat. (2023). Characterization of microcrystalline cellulose from red seaweed *Gracilaria verucosa* and *Eucheuma cottonii*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1201(1).
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1201/1/012101>
- Normah, N., Juleanti, N., Siregar, P. M. S. B. N., Wijaya, A., Palapa, N. R., Taher, T., & Lesbani, A. (2021a). Size selectivity of anionic and cationic dyes using LDH modified adsorbent with low-cost rambutan peel to hydrochar. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 16(4), 869–880.
<https://doi.org/10.9767/BCREC.16.4.12093.869-880>
- Normah, N., Juleanti, N., Siregar, P. M. S. B. N., Wijaya, A., Palapa, N. R., Taher, T., & Lesbani, A. (2021b). Size selectivity of anionic and cationic dyes using LDH modified adsorbent with low-cost rambutan peel to hydrochar. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 16(4), 869–880.
<https://doi.org/10.9767/BCREC.16.4.12093.869-880>
- Palapa, N. R., Ahmad, N., Utami, H. P., Zahara, Z. A., Mohadi, R., & Lesbani, A. (2023). Adsorption of Phenol Using Hydrochar Modified Layered Double Hydroxide – Kinetic, Isotherm, and Regeneration Studies. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 24(5), 275–281.
<https://doi.org/10.12912/27197050/166010>
- Palapa, N. R., Ahmad, N., Wijaya, A., & Zahara, Z. A. (2023). Facile Fabrication of Layered Double Hydroxide-Lignin for Efficient Adsorption of Malachite Green. *Science and Technology Indonesia*, 8(2), 305–311.
<https://doi.org/10.26554/sti.2023.8.2.305-311>
- Palapa, N. R., Taher, T., Wijaya, A., & Lesbani, A. (2021). Modification of cu/cr layered double hydroxide by keggin type polyoxometalate as adsorbent of

- malachite green from aqueous solution. *Science and Technology Indonesia*, 6(3), 209–217. <https://doi.org/10.26554/sti.2021.6.3.209-217>
- Parsa, M., Nourani, M., Baghdadi, M., Hosseinzadeh, M., & Pejman, M. (2019). Biochars derived from marine macroalgae as a mesoporous by-product of hydrothermal liquefaction process: Characterization and application in wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100942>
- Pires Figueiredo, M., Diaz Suarez, E., M. Petrilli, H., Leroux, F., Taviot-Guého, C., & Leopoldo Constantino, V. R. (2022). Limiting content of trivalent iron to form organic-inorganic single-phase layered double hydroxides hybrids by coprecipitation. *Applied Clay Science*, 228(March). <https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106642>
- Poh, J. J., Wu, W. L., Goh, N. W. J., Tan, S. M. X., & Gan, S. K. E. (2021). Spectrophotometer on-the-go: The development of a 2-in-1 UV–Vis portable Arduino-based spectrophotometer. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 325, 112698. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112698>
- Prakoso, T. (2018). *Hydrothermal Carbonization of Seaweed For Advanced Biochar Production*. 05012, 1–5.
- Rahmanian, O., Maleki, M. H., & Dinari, M. (2017). Ultrasonically assisted solvothermal synthesis of novel Ni/Al layered double hydroxide for capturing of Cd(II) from contaminated water. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 110, 195–201. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2017.06.018>
- Ramadhani, F. S., Rostini, I., Anna, Z., & Rochima, E. (2019). Characterization of Edible Film from Seaweed Flour (*Eucheuma cottonii* Weber-van Bosse , 1913) with Different Types of Plasticizer. *Intenasional Scientific Journal*, 133(July), 23–33.
- Ranjbar, E., & Namazi, H. (2023). Ultrasound-assisted synthesis layered double hydroxide@hydroxyapatite-doxorubicin coated magnetic PEG nanocomposite: A biocompatible pH-sensitive nanocarrier for anticancer drug delivery. *FlatChem*, 42(October), 100571. <https://doi.org/10.1016/j.flatc.2023.100571>
- Reinle-Schmitt, M., Šišak Jung, D., Morin, M., Costa, F. N., Casati, N., & Gozzo, F. (2023). Exploring high-throughput synchrotron X-Ray powder diffraction for the structural analysis of pharmaceuticals. *International Journal of Pharmaceutics: X*, 6(July). <https://doi.org/10.1016/j.ijpx.2023.100221>
- Saadatkah, N., Carillo Garcia, A., Ackermann, S., Leclerc, P., Latifi, M., Samih, S., Patience, G. S., & Chaouki, J. (2020). Experimental methods in chemical engineering: Thermogravimetric analysis—TGA. In *Canadian Journal of Chemical Engineering* (Vol. 98, Issue 1, pp. 34–43). Wiley-Liss Inc. <https://doi.org/10.1002/cjce.23673>

- Saeed, A. A. H., Harun, N. Y., Sufian, S., Siyal, A. A., Zulfiqar, M., Bilad, M. R., Vaganathan, A., Al-Fakih, A., Ghaleb, A. A. S., & Almahbashi, N. (2020). *Eucheuma cottonii* seaweed-based biochar for adsorption of methylene blue dye. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(24), 1–15. <https://doi.org/10.3390/su122410318>
- Salih, E. Y., Sabri, M. F. M., Sulaiman, K., Hussein, M. Z., Said, S. M., Usop, R., Salleh, M. F. M., & Ali Bashir, M. B. (2018). Thermal, structural, textural and optical properties of ZnO/ZnAl₂O₄ mixed metal oxide-based Zn/Al layered double hydroxide. *Materials Research Express*, *5*(11). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aadbca>
- Sharma, G., Khosla, A., Kumar, A., Kaushal, N., & Sharma, S. (2022). Chemosphere A comprehensive review on the removal of noxious pollutants using carrageenan based advanced adsorbents. *Chemosphere*, *289*(November 2021), 133100. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133100>
- Sizmur, T., Fresno, T., Akgül, G., Frost, H., & Moreno-Jiménez, E. (2017). Biochar modification to enhance sorption of inorganics from water. *Bioresource Technology*, *246*, 34–47. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.082>
- Song, W., Zhang, X., Zhang, L., Yu, Z., Li, X., Li, Y., Cui, Y., Zhao, Y., & Yan, L. (2023). Removal of various aqueous heavy metals by polyethylene glycol modified MgAl-LDH: Adsorption mechanisms and vital role of precipitation. *Journal of Molecular Liquids*, *375*, 121386. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121386>
- Starukh, G., Rozovik, O., & Oranska, O. (2016). Organo/Zn-Al LDH Nanocomposites for Cationic Dye Removal from Aqueous Media. *Nanoscale Research Letters*, *11*(1). <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1402-0>
- Sunarti, & Ferdinandus, M. (2020). Efektifitas Algal Merah (*Eucheuma cottonii*) Sebagai Bioadsorben Dalam Mengurangi Dampak Limbah Cair Laboratorium. *Jurnal Teknologi Dan Manajemen Pengelolaan Laboratorium (Temapela)*, *3*(2), 34–44.
- Surya, I., Chong, E. W. N., Abdul Khalil, H. P. S., Funmilayo, O. G., Abdullah, C. K., Sri Aprilia, N. A., Olaiya, N. G., Lai, T. K., & Oyekanmi, A. A. (2021). Augmentation of physico-mechanical, thermal and biodegradability performances of bio-precipitated material reinforced in *Eucheuma cottonii* biopolymer films. *Journal of Materials Research and Technology*, *12*, 1673–1688. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.055>
- Taher, T., Aseri, S. V., Palapa, N. R., Mohadi, R., & Lesbani, A. (2020). Adsorptive removal of Cd (II) ion from aqueous solution by polyoxometalate intercalated MgAl LDH. *AIP Conference Proceedings*, *2242*(Ii). <https://doi.org/10.1063/5.0007983>

- Tang, Y., Zhang, X., Li, X., Bai, J., Yang, C., Zhang, Y., Xu, Z., Jin, X., & Jiang, Y. (2023). Facile synthesis of magnetic ZnAl layered double hydroxides and efficient adsorption of malachite green and Congo red. *Separation and Purification Technology*, 322. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124305>
- Tones, A. R. M., Eyng, E., Zeferino, C. L., Ferreira, S. de O., Alves, A. A. de A., Fagundes-Klen, M. R., & Sehn, E. (2020). Spectral deconvolution associated to the Gaussian fit as a tool for the optimization of photovoltaic electrocoagulation applied in the treatment of textile dyes. *Science of the Total Environment*, 713. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136301>
- Tye, Y. Y., Khalil Hps, A., Kok, C. Y., & Saurabh, C. K. (2018). Preparation and characterization of modified and unmodified carrageenan based films. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 368(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/368/1/012020>
- Valeikiene, L., Paitian, R., Grigoraviciute-Puroniene, I., Ishikawa, K., & Kareiva, A. (2019). Transition metal substitution effects in sol-gel derived Mg₃-xMx/Al₁ (M = Mn, Co, Ni, Cu, Zn) layered double hydroxides. *Materials Chemistry and Physics*, 237(April), 121863. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.121863>
- Venkata Ramana, P., Rama Krishna, Y., & Chandra Mouli, K. (2022). Experimental (FT-IR, UV-Vis) spectroscopic analysis and molecular docking investigations of anti-cancer drugs Alkeran and Bicalutamide. *Journal of Molecular Structure*, 1270, 133984. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.133984>
- Vishal, K., Aruchamy, K., Sriram, G., Ching, Y. C., Oh, T. H., Hegde, G., Ajeya, K. V., Joshi, S., Sowrirraajan, A. V., Jung, H. Y., & Kurkuri, M. (2023). Engineering a low-cost diatomite with Zn-Mg-Al Layered triple hydroxide (LTH) adsorbents for the effectual removal of Congo red: Studies on batch adsorption, mechanism, high selectivity, and desorption. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 661, 130922. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2023.130922>
- Wang, P., Zhang, X., Zhou, B., Meng, F., Wang, Y., & Wen, G. (2023). Recent advance of layered double hydroxides materials: Structure, properties, synthesis, modification and applications of wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(6), 111191. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111191>
- Wang, Y., Wang, T., Wu, X., Wang, J., Chang, E., Huang, Z., Fang, M., Min, X., & Su, S. (2024). High performance Zn–Al LDH modified forward osmosis membrane with antibacterial, anti-membrane fouling, and photocatalytic degradation ability. *Journal of Membrane Science*, 705. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.122899>

- Wibiyan, S., Royani, I., & Lesbani, A. (2024). Selective Adsorption of Cationic and Anionic Dyes using Ni/Al Layered Double Hydroxide Modified with *Eucheuma cottonii*. *Indonesian Journal of Material Research*, 2(1), 1–6. <https://doi.org/10.26554/ijmr.20242118>
- Wijaya, A., Siregar, P. M. S. B. N., Badri, A. F., Palapa, N. R., Amri, A., Ahmad, N., & Lesbani, A. (2023). Modified layered double hydroxide mg/m^{3+} ($\text{M}^{3+} = \text{al}$ and cr) using metal oxide (cu) as adsorbent for methyl orange and methyl red dyes. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 67(2), 173–184. <https://doi.org/10.3311/PPch.21608>
- Wulandari, D., Kilawati, Y., & Fadjar, M. (2018). Activity of Compounds on Seaweed *Eucheuma cottonii* Extract as Antioxidant Candidate to Prevent Effects of Free Radical in Water Pollution. *Research Journal of Life Science*, 5(3), 173–182. <https://doi.org/10.21776/ub.rjls.2018.005.03.5>
- Xu, M., Dong, F., Zhang, Z., Shao, M., & Wan, Y. (2024). A Novel Z-type 0D/2D BiOCl/NiAl-LDH heterojunction for photodegradation of multiple antibiotics in industrial wastewater: Degradation pathways and toxicity analysis. *Journal of Alloys and Compounds*, 991. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.174543>
- Yassin, M. M., Anderson, J. A., Dimitrakakis, G. A., & Martín, C. F. (2021). Effects of the heating source on the regeneration performance of different adsorbents under post-combustion carbon capture cyclic operations. A comparative analysis. *Separation and Purification Technology*, 276(July), 119326. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119326>
- Yuliasari, N., Amri, Mohadi, R., Elfita, & Lesbani, A. (2022). Improvement of Congo Red Photodegradation Performance Through Zn/Al-TiO₂ and Zn/Al-ZnO Preparation. *Science and Technology Indonesia*, 7(4), 449–454. <https://doi.org/10.26554/sti.2022.7.4.449-454>
- Yuliasari, N., Badri, A. F., Wijaya, A., Siregar, P. M. S. B. N., Amri, Mardiyanto, Mohadi, R., & Lesbani, A. (2022). Modification of Mg/Al-LDH Intercalated Metal Oxide (Mg/Al-Ni) to Improve the Performance of Methyl Orange and Methyl Red Dyes Adsorption Process. *Science and Technology Indonesia*, 7(3), 275–283. <https://doi.org/10.26554/sti.2022.7.3.275-283>
- Zahara, Z. A., Royani, I., Palapa, N. R., & Mohadi, R. (2023). *Treatment of Methylene Blue Using Ni-Al / Magnetite Biochar Layered Double Hydroxides Composite by Adsorption*. 18(4), 659–674. <https://doi.org/10.9767/bcrec.20049>
- Zhang, J. J., Bao, W. W., Feng, X. H., Yang, C. M., Wang, N. L., Qiu, Y. J., Li, J. T., Zhang, P. F., & Luo, Z. H. (2023). Layered double hydroxides as a robust catalyst for water oxidation through strong substrate-catalytic layer interaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(90), 35038–35049. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.342>

- Zhang, J., Zhang, G., Xu, Z., Zhang, L., Chen, L., & Wang, J. (2022). Analysis of crystal purity of Octogen by Fourier transform infrared spectroscopy. *Vibrational Spectroscopy*, 123(November), 103461. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2022.103461>
- Zhang, X., Song, Z., Dou, Y., Xue, Y., Ji, Y., Tang, Y., & Hu, M. (2021). Removal difference of Cr(VI) by modified zeolites coated with MgAl and ZnAl-layered double hydroxides: Efficiency, factors and mechanism. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 621. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126583>
- Zheng, Y., Cheng, B., You, W., Yu, J., & Ho, W. (2019). 3D hierarchical graphene oxide-NiFe LDH composite with enhanced adsorption affinity to Congo red, methyl orange and Cr(VI) ions. *Journal of Hazardous Materials*, 369(September 2018), 214–225. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.02.013>
- Zhou, D., Xie, G., Hu, X., Cai, X., Zhao, Y., Hu, X., Jin, Q., Fu, X., Tan, X., Liang, C., Lai, K., Wang, H., & Tang, C. (2020). Coupling of Kenaf biochar and magnetic BiFeO₃ onto cross-linked chitosan for enhancing separation performance and Cr(Vi) ions removal efficiency. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3). <https://doi.org/10.3390/ijerph17030788>
- Zhou, G., Jin, P., Wang, Y., Pei, G., Wu, J., & Wang, Z. (2020). X-ray diffraction analysis of the yttria stabilized zirconia powder by mechanical alloying and sintering. *Ceramics International*, 46(7), 9691–9697. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.12.236>
- Zhu, S., Khan, M. A., Kameda, T., Xu, H., Wang, F., Xia, M., & Yoshioka, T. (2022). New insights into the capture performance and mechanism of hazardous metals Cr³⁺ and Cd²⁺ onto an effective layered double hydroxide based material. *Journal of Hazardous Materials*, 426. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.128062>
- Zubair, M., Aziz, H. A., Ihsanullah, I., Ahmad, M. A., & Al-Harhi, M. A. (2022). Enhanced removal of Eriochrome Black T from water using biochar/layered double hydroxide/chitosan hybrid composite: Performance evaluation and optimization using BBD-RSM approach. *Environmental Research*, 209, 112861. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2022.112861>