

**PENGOLAHAN ZAT WARNA METILEN BIRU DAN METIL JINGGA  
MENGUNAKAN KOMPOSIT HIDROKSI LAPIS GANDA Ni-  
Al/MAGNETIT BIOCHAR DENGAN METODE ADSORPSI**

**TESIS**

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Magister  
Program Studi Pengelolaan Lingkungan**



**ZAQIYA ARTHA ZAHARA**

**20012682226002**

**PROGRAM STUDI PENGELOLAAN LINGKUNGAN  
PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

**2024**

**HALAMAN PENGESAHAN**  
**TESIS**

**PENGOLAHAN ZAT WARNA METILEN BIRU DAN METIL JINGGA  
MENGUNAKAN KOMPOSIT HIDROKSI LAPIS GANDA Ni-  
Al/MAGNETIT BIOCHAR DENGAN METODE ADSORPSI**

**TESIS**

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Magister  
Program Studi Pengelolaan Lingkungan**

**Oleh :**

**ZAQIYA ARTHA ZAHARA**

20012682226002

Palembang, 11 Januari 2024

Mengetahui,

**Pembimbing I**



**Prof. Aldes Lesbani, Ph.D.**

NIP. 197408121998021001

**Pembimbing II**



**Prof. Dr.rer.nat Risfidian Mohadi, M.Si.**

NIP. 197711272005011003

Mengetahui,

**Direktur Pascasarjana**



**Prof. Ir. H. Benyamin Lakitan, M.Sc., Ph.D.**

NIP. 196006151983121001

## HALAMAN PERSETUJUAN

Makalah Tesis dengan judul “Pengolahan Zat Warna Metilen Biru dan Metil Jingga Menggunakan Komposit Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al/magnetit biochar dengan Metode Adsorpsi” telah dipertahankan dihadapan Tim Penguji Sidang Tesis Program Studi Magister Pengelolaan Lingkungan pada tanggal 28 Desember 2023 dan telah diperiksa, diperbaiki, dan disetujui dengan saran dan masukan yang diberikan.

Palembang, 11 Januari 2024

Tim Penguji Karya Ilmiah berupa Tesis

**Ketua :**

**1. Prof. Novia Sumardi, S.T., M.T., Ph.D.**  
NIP. 197311052000032003

(  )

**Anggota :**

**1. Prof. Aldes Lesbani, S.Si., M.Si., Ph.D.**  
NIP. 197408121998021001

(  )

**2. Prof. Dr. rer. nat. Risfidian Mohadi, S.Si., M.Si.**  
NIP. 197711272005011003

(  )

**3. Dr. Idha Royani, S.Si., M.Si.**  
NIP. 1971051519990320013

(  )

**4. Dr. Neza Rahayu Palapa, S.Si., M.Si.**  
NIP. 199505292022032017

(  )

**Mengetahui,**

**Direktur Pascasarjana**

  


**Prof. Ir. H. Benyamin Lakitam, M.Sc., Ph.D.**  
NIP. 196006151983121001

**Koordinator Program Studi  
Magister Pengelolaan Lingkungan**



**Prof. Novia Sumardi, S.T., M.T., Ph.D.**  
NIP. 197311052000032003

## PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama Mahasiswa : Zaqiya Artha Zahara

NIM : 20012682226002

Program Studi / Baku Mutu : Pengelolaan Lingkungan / Pengelolaan Sumber  
Daya Alam

Menyatakan bahwa Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri dan karya ilmiah ini belum pernah diajukan sebagai pemenuhan persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Strata (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, 11 Januari 2024

Penulis



Zaqiya Artha Zahara

20012682226002

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

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

Nama Mahasiswa : Zaqiya Artha Zahara  
NIM : 20012682226002  
Program Studi / Baku Mutu : Pengelolaan Lingkungan / Pengelolaan Sumber  
Daya Alam  
Jenis Karya : Tesis

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, Saya menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Sriwijaya “Hak bebas royalti non-eksklusif (*non-exclusively royalty-free right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul: “Pengolahan Zat Warna Metilen Biru dan Metil Jingga Menggunakan Komposit Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al/magnetit biochar dengan Metode Adsorpsi”. Dengan hak bebas *royalty non-eksklusive* 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, 11 Januari 2024  
Yang Menyatakan



Zaqiya Artha Zahara  
20012682226002

## LEMBAR PERSEMBAHAN

*“Dan janganlah engkau berjalan di bumi ini dengan sombong, karena sesungguhnya engkau tidak akan dapat menembus bumi dan tidak akan mampu menjulang setinggi gunung”.*

**(QS. Al-Isra: 37)**

*“Nikmati kehidupan kampus dengan terus mengasah, jangan menghabiskan waktu dengan terus berkeluh kesah, karena kalian adalah anak-anak muda pilihan yang berkesempatan merengguk dalamnya sumur Ilmu Pengetahuan”.*

**(Najwa Shihab)**

*“Setiap orang memiliki proses yang berbeda dalam mencapai tujuan hidup, sehingga nikmati prosesnya dan lakukan pengembangan untuk diri sendiri”.*

**(Penulis)**

Tesis ini sebagai tanda syukurku kepada:

- ❖ Allah SWT.
- ❖ Nabi Muhammad SAW.

Dan kupersembahkan kepada:

- ❖ Orang tua ibu Lesi Nurjana, bapak Bambang Kusnanto P, dan kakakku Sonya Faradillah, S.Kom tercinta yang selalu mendoakan dan memberikan semangat dukungan dalam menyelesaikan studi magister.
- ❖ Keluarga besar (tante, om, dan sepupu).
- ❖ Pembimbing tugas akhir penelitian dan tesis Bapak Prof. Aldes Lesbani, Ph.D. dan Bapak Prof. Dr. rer. nat. Risfidian Mohadi, S.Si., M.Si. yang telah membiayai kuliah saya dan menyediakan laboratorium untuk melakukan penelitian tugas akhir.
- ❖ Kepala prodi magister pengelolaan lingkungan Prof. Novia Sumardi, S.T., M.T., Ph.D.
- ❖ Seluruh dosen akademik yang telah mengajar pada proses pembelajaran dan teman-teman satu almamater di Pengelolaan Lingkungan Universitas Sriwijaya.

## KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan hidayah, iman, islam, kesehatan, dan pertolongan kepada hambanya dalam setiap kegiatan yang dilakukan. Sholawat beserta salam selalu kita panjatkan dan kirimkan kepada Nabi Muhammad SAW yang telah membuat kita mengenal nikmat islam dan ilmu pengetahuan seperti saat ini. Atas dasar inilah akhirnya penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan Tesis yang berjudul “Pengolahan Zat Warna Metilen Biru dan Metil Jingga Menggunakan Komposit Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al/magnetit biochar dengan Metode Adsorpsi”. Tesis ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains bidang Pengelolaan Lingkungan pada Program Pascasarjana.

Proses penyusunan Tesis ini tidak terlepas dari berbagai rintangan, mulai dari pembelajaran akademik, studi literatur, penelitian, pengumpulan dan pengolahan data serta pada proses penulisan. Namun, dengan kesabaran dan ketekunan yang dilandasi dengan rasa tanggung jawab selaku mahasiswa dan juga bantuan dari berbagai pihak, baik material dan motivasi, akhirnya selesai sudah penulisan Tesis ini. Penulis mengucapkan terimakasih sebesar-besarnya kepada orang tua yang telah memberikan restu untuk melanjutkan studi hingga mendapatkan gelar Magister Sains, dan terutama kepada Bapak Prof. Aldes Lesbani, Ph.D. dan Bapak Prof. Dr. rer. nat. Risfidian Mohadi, S.Si., M.Si. yang telah membiayai perkuliahan untuk program pascasarjana, meluangkan waktu dan energi untuk memberikan masukan, motivasi, pembelajaran hidup, serta tempat penelitian di basecamp kepada penulis dalam menyelesaikan Tesis ini.

Penulis juga menyampaikan ucapan terimakasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan nikmat, rahmat, hidayah, dan kemudahan, serta puji syukur saya panjatkan Kepada-nya, dan Nabi Muhammad SAW yang telah memberikan petunjuk dalam jalan kebenaran.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Benyamin Lakitan, M.Sc. selaku Direktur Pascasarjana Universitas Sriwijaya.
3. Ibu Prof. Novia Sumardi, S.T., M.T., Ph.D. selaku Koordinator Program Studi Magister Pengelolaan Lingkungan.

4. Bapak Prof. Aldes Lesbani, Ph.D. dan Bapak Prof. Dr. rer. nat. Risfidian Mohadi, M.Si. selaku pembimbing tugas akhir, terimakasih telah banyak membantu penulis dalam penelitian, dan biaya dalam menyelesaikan studi magister dan tesis ini.
5. Ibu Idha Royani, S.Si., M.Si. dan Ibu Neza Rahayu Palapa, S.Si., M.Si selaku Dosen Penguji dalam proses seminar dan sidang tesis yang telah memberikan kemudahan untuk ditemui, masukan, kritik, saran untuk tesis saya sehingga menjadi lebih baik lagi.
6. Seluruh Dosen akademik Pengelolaan Lingkungan Universitas Sriwijaya yang telah memberikan ilmu, mendidik, dan membimbing selama perkuliahan, hingga memberikan contoh atau praktik langsung untuk terjun ke lapangan kerja.
7. Admin Mbak Nani yang super baik dan sabar dalam membantu menyelesaikan administrasi dan menyiapkan zoom selama perkuliahan, pemberkasan, dan penjadwalan seminar dan sidang.
8. Ibu (Lesi Nurjana) dan Bapak (Bambang Kusnanto Prayitno) yang selalu memberikan dukungan nasihat, motivasi, finansial dan mendoakan kelancaran dan kemudahan dalam setiap langkah yang diambil dalam melakukan apapun di kehidupan dan saat penelitian tugas akhir, penyusunan tesis, serta seminar dan sidang, hingga diperbolehkan untuk melanjutkan studi magister, saya sebagai anak, mengucapkan terimakasih sebanyak-banyaknya untuk orang tua saya tercinta. Untuk kakak saya (Sonya Faradillah S.Kom) yang smendoakan, dan memberikan semangat dalam penulisan tesis, semoga dilancarkan dan disukseskan segala kegiatan untuk dirimu, dan diberikan kesehatan dan umur yang panjang untuk Ibu, Bapak, dan Kakak. Alm. Fahrurozi yaitu ayah kandung saya terimakasih telah membuat saya ada di dunia ini.
9. Tante Mia, Om Wani, Tante Neng, Om Ameng, Tante Emi, Isat Man, Tante Ika, Angel, Yuk Puput, Muthi, Tanti, Tiwi, Aurel, Mei-mei Veron, Ghazi, dan Iki yang memberikan support baik berupa doa hingga finansial dan harapan yang telah diberikan kepada penulis.



10. Angkatan 22 Pengelolaan Lingkungan terimakasih telah kebersamainya selama masa perkuliahan, memberikan kebahagiaan, suka, duka, dan cita. Semoga diberikan kesuksesan, dan kesehatan untuk kita semua.
11. Kakak basecamp (Kak Alfian, Kak Amri, Kak Ahmad, Kak Yusuf, Sahrul) yang telah mengajarkan selama penelitian, seminar, sidang hingga bermalam-malam dan berbagi kesusahan dan kebahagiaan dalam basecamp tersebut.
12. Kak Erni yang sudah menjadi tempat cerita dengan *love-hate relationship* sebagai kakak adik, yang berbagi atas kesusahan, dan kebahagiaan dalam penelitian, mengolah data, penulisan tesis, hingga penulisan jurnal, dan berbagi tempat tidur dan kipas angin, doa terbaik menyertaimu kak dan semoga diberikan kesehatan, kebahagiaan, dan dijauhkan dari kebencian orang-orang.
13. Sahabat sejak SMA (Anggik dan Puja) yang selalu hadir saat senang maupun susah, yang selalu support tiada henti, memberikan *vibes* yang positif, dan doa, mendukung segala keputusan yang aku ambil dan memberikan saran yang terbaik untuk langkah selanjutnya, hingga selalu ingat dalam momen penting untuk dirayakan, terimakasih selalu ada, dan disemogakan untuk bersahabat sampai akhir hayat.
14. Teman SMP (Dinik) Teman SMA (Tasek, Dini, Metak) Inggie, Terimakasih telah memberikan dukungan.
15. Prima dan Ariqah *support system* terbaik setelah orang tua, yang selalu mendukung segala keputusan yang aku buat, mau direpotin seperti latihan presentasi, membantu dalam perbaikan kalimat untuk penulisan, menjadi tempat keluh kesah atas cerita aku, yang mendengarkan saat aku bahagia atau sedih, selalu mau diajak main, jajan untuk *healing*, mau berkembang bareng dengan cari pekerjaan, *upgrade diri*, atau melakukan kegiatan yang positif seperti olahraga untuk menghilangkan energi negatif. Terimakasih aku ucapkan untuk Ariqah *one of my bestfriend* semoga pertemanan ini berlanjut hingga tua, dan untuk Prima semoga dipermudah jalan untuk menuju hal-hal baik bersama.

16. Teman-teman yang siap diajak pergi untuk menghilangkan bosan, capek selama penelitian, curhat, bergosip ria, main game (Dwik, Anin, Tiur, Eko, Apip, Ikki, Rafiud).
17. Terimakasih orang-orang baik yang telah hadir di hidup saya selama ini.
18. Terimakasih untuk diri saya sendiri yang telah berjuang dan bertahan hingga akhir walaupun banyak keraguan, rintangan, dan hambatan, hingga mengeluh tetapi tetap harus dijalankan karena banyak energi dan finansial yang dikeluarkan. Semoga diri ini tetap ada semangat belajar dan selalu untuk mencintai dirimu sendiri, dan semoga dipermudah untuk diri ini dalam mencari pekerjaan. **U DID GREAT JOB ZAQIYA A.K.A TATAKE, PROUD OF ME !!!**

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

## SUMMARY

### TREATMENT OF METHYLEN BLUE AND METHYL ORANGE USING LAYERED DOUBLE HYDROXY COMPOSITE OF Ni-Al/MAGNETITE BIOCHAR WITH ADSORPTION METHODS

Zaqiya Artha Zahara: Advised by Prof. Aldes Lesbani, S.Si., M.Si., Ph.D and Prof. Dr. rer. nat. Risfidian Mohadi, S.Si., M.Si.

xix+124 pages, 20 figures, 9 tables, 22 attachments

The research was carried out the preparation of Ni-Al layered double hydroxide (LDH) with magnetite biochar (MBC) material to form a Ni-Al/magnetite biochar composite. XRD (X-Ray Diffraction) characterisation of Ni-Al/magnetite biochar interaction and the formation of bonds resulting in typical peaks of layered double hydroxide diffraction at  $2\theta = 11.38^\circ$  and  $61.20^\circ$  and magnetite biochar at  $2\theta = 22^\circ$  and  $35^\circ$ . FT-IR (Fourier Transform Infra Red) analysis formed LDH Ni-Al wave numbers at  $\text{NO}_3^-$   $\text{cm}^{-1}$  vibrations and C-H and Fe-O groups on MBC at  $1404 \text{ cm}^{-1}$  and  $552 \text{ cm}^{-1}$  vibrational peaks, as well as a shift in the O-H group vibration peak at  $3449 \text{ cm}^{-1}$  wave numbers. BET (Brunauer Emmet Teller) analysis showed an increase in the Ni-Al/magnetite biochar composite of  $127.310 \text{ m}^2/\text{g}$ , Ni-Al  $5.845 \text{ m}^2/\text{g}$ , and magnetite biochar  $61.843 \text{ m}^2/\text{g}$ . SEM-EDX (Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) analysis had large, rough lumps, and layered layers, with the presence of Ni, Al, Fe, C elements, and a particle size of  $83.0 \mu\text{m}$  for 8 composites. VSM (Vibrating Sample Magnetometer) analysis of MBC and composites resulted in magnetisation saturation values of 13.04; 8.35 (emu/g) and magnetic field values of 20.021; 20.216 (kOe). LDH, MBC and composite materials have optimum pH 7, 5, 6 on methylene blue (MB) adsorbate, while methyl orange (MJ) at optimum pH 6 and 4. The process of methylene blue and methyl orange dye selectivity shows that cationic dyes are more easily adsorbed than anionic dyes. The application of Ni-Al adsorbent, magnetite biochar and Ni-Al/magnetite biochar by adsorption method showed the kinetics on MB and MJ dyes tend to follow the Pseudo Second Order (PSO) equation with  $R^2$  values close to 1 and  $k_2$  values with MB adsorbate 0.0020; 0.0006; 0.0097 (g/mg.min), while the results of  $k_2$  values using MJ adsorbate 0.0024; 0.0008; 0.0030 (g/mg.min). The MB and MJ isotherms with all three adsorbents followed the Langmuir equation with  $Q_{\text{max}}$  values for MB dye 33.003; 37.736; 68.493 (mg/g), and MJ dye 32.573; 43.668; 45.455 (mg/g). The Ni-Al/magnetite biochar composite successfully demonstrated efficiency in the regeneration process up to five cycles. In the fifth adsorption cycle, the percentage absorption values of MB and MJ dyes of 58.494; 34.503 % were recorded.

**Keywords** : Layered Double Hydroxides, Magnetite Biochar, Composite, Adsorption, Methylene Blue, Methyl Orange

## RINGKASAN

### PENGOLAHAN ZAT WARNA METILEN BIRU DAN METIL JINGGA MENGUNAKAN KOMPOSIT HIDROKSI LAPIS GANDA Ni- Al/MAGNETIT BIOCHAR DENGAN METODE ADSORPSI

Zaqiya Artha Zahara : Dibimbing oleh Prof. Aldes Lesbani, S.Si., M.Si., Ph.D  
dan Prof. Dr. rer. nat. Risfidian Mohadi, S.Si., M.Si

xix+124 halaman, 20 gambar, 9 tabel, 22 lampiran

Penelitian ini dilakukan preparasi hidroksi lapis ganda Ni-Al (LDH) dengan material magnetit biochar (MBC) membentuk komposit Ni-Al/magnetit biochar. Karakterisasi XRD (*X-Ray Diffraction*) Ni-Al/magnetit biochar adanya interaksi dan terbentuknya ikatan sehingga menghasilkan puncak khas difraksi hidroksi lapis ganda pada  $2\theta = 11,38^\circ$  dan  $61,20^\circ$  dan magnetit biochar pada  $2\theta = 22^\circ$  dan  $35^\circ$ . Analisis FT-IR (*Fourier Transform Infra Red*) terbentuk bilangan gelombang LDH Ni-Al pada vibrasi  $\text{NO}_3^- \text{ cm}^{-1}$  dan gugus C-H dan Fe-O pada MBC berada pada puncak vibrasi  $1404 \text{ cm}^{-1}$  dan  $552 \text{ cm}^{-1}$ , serta terjadinya pergeseran puncak vibrasi gugus O-H pada bilangan gelombang  $3449 \text{ cm}^{-1}$ . Analisis BET (*Brunauer Emmet Teller*) terjadi peningkatan pada komposit Ni-Al/magnetit biochar sebesar  $127,310 \text{ m}^2/\text{g}$ , Ni-Al  $5,845 \text{ m}^2/\text{g}$ , dan magnetit biochar  $61,843 \text{ m}^2/\text{g}$ . Analisis SEM-EDX (*Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*) memiliki gumpalan yang besar, kasar, dan adanya lapisan berlapis, dengan adanya gugus Ni, Al, Fe, C, serta ukuran partikel  $83,0 \mu\text{m}$  untuk komposit sebanyak 8. Analisis VSM (*Vibrating Sample Magnetometer*) MBC dan komposit menghasilkan nilai saturasi magnetisasi sebesar 13,04; 8,35 (emu/g) dan nilai medan magnet sebesar 20,021; 20,216 (kOe). Material LDH, MBC dan komposit memiliki pH optimum 7, 5, 6 pada adsorbat metilen biru (MB), sedangkan metil jingga (MJ) pada pH optimum 6 dan 4. Proses selektivitas zat warna metilen biru dan metil jingga menunjukkan bahwa zat warna kationik lebih mudah mengalami adsorpsi dibandingkan zat warna kationik. Pengaplikasian adsorben Ni-Al, magnetit biochar dan Ni-Al/magnetit biochar dengan metode adsorpsi menunjukkan kinetika pada zat warna MB dan MJ cenderung mengikuti persamaan *Pseudo Second Order* (PSO) dengan nilai  $R^2$  mendekati 1 dan nilai  $k_2$  dengan adsorbat MB 0,0020; 0,0006; 0,0097 (g/mg.min), sedangkan hasil nilai  $k_2$  dengan menggunakan adsorbat MJ 0,0024; 0,0008; 0,0030 (g/mg.min). Isoterm MB dan MJ dengan ketiga adsorben mengikuti persamaan Langmuir dengan nilai  $Q_{\text{max}}$  untuk zat warna MB 33,003; 37,736; 68,493 (mg/g), dan zat warna MJ 32,573; 43,668; 45,455 (mg/g). Komposit Ni-Al/magnetit biochar berhasil menunjukkan efisiensi dalam proses regenerasi hingga mencapai lima siklus. Pada siklus adsorpsi yang kelima, tercatat nilai persentase penyerapan zat warna MB dan MJ sebesar 58,494; 34,503 %.

**Kata Kunci** : Hidroksi Lapis Ganda, Magnetit Biochar, Komposit, Adsorpsi, Metilen Biru, Metil Jingga

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	<b>i</b>
<b>HALAMAN PERSETUJUAN</b> .....	<b>ii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH</b> .....	<b>iii</b>
<b>HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH ...</b>	<b>iv</b>
<b>LEMBAR PERSEMBAHAN</b> .....	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>vi</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>x</b>
<b>RINGKASAN</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xvi</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xviii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	<b>xix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.3. Hipotesis .....	4
1.4. Tujuan Penelitian .....	6
1.5. Manfaat Penelitian .....	7
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>8</b>
2.1. Hidroksi Lapis Ganda .....	8
2.2. Magnetit Biochar .....	9
2.3. Komposit .....	10
2.4. Zat Warna .....	10
2.4.1. Metilen Biru.....	10
2.4.2. Metil Jingga.....	11
2.5. Adsorpsi dan Desorpsi.....	12
2.5.1. Kinetika Adsorpsi.....	14
2.5.2. Isoterm Adsorpsi .....	15

2.6. pH PZC ( <i>Point Zero Charge</i> ) .....	16
2.7. Regenerasi .....	17
2.8. Karakterisasi .....	18
2.8.1. Spektroskopi UV-Vis .....	18
2.8.2. Analisis <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) .....	19
2.8.3. Analisis <i>Fourier Transform Infrared</i> (FT-IR).....	20
2.8.4. Analisis <i>Brunauer Emmet Teller</i> (BET).....	21
2.8.5. Analisis <i>Scanning Electron Microscopy-Electron Dispersive X-Ray</i> (SEM-EDX) .....	22
2.8.6. Analisis <i>Vibrating Sample Magnetometer</i> (VSM) ...	23
<b>BAB III METODELOGI PENELITIAN.....</b>	<b>25</b>
3.1. Waktu dan Tempat .....	25
3.2. Alat dan Bahan .....	25
3.2.1. Alat .....	25
3.2.2. Bahan .....	25
3.3. Prosedur Penelitian.....	26
3.3.1. Sintesis Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al.....	26
3.3.2. Magnetit Biochar.....	26
3.3.3. Preparasi Komposit Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al/ magnetit biochar .....	26
3.3.4. Pembuatan Larutan Stok Metilen Biru dan Metil Jingga Konsentrasi 1000 mg/L .....	27
3.3.5. Penentuan Panjang Gelombang pada Absorbansi Maksimum Zat Warna .....	27
3.3.6. Pembuatan Larutan Standar dan Penentuan Kurva Standar Zat Warna Metilen Biru dan Metil Jingga.....	27
3.3.7. Selektivitas Adsorpsi Zat Warna Kationik Metilen Biru Terhadap Zat Warna Anionik Metil Jingga.....	28
3.3.8. Adsorpsi Zat Warna Metilen Biru dan Metil Jingga oleh Komposit Hidroksi Lapis Ganda Ni- Al, Magnetit Biochar, dan Ni-Al/magnetit biochar .....	28
3.3.8.1. Penentuan pH PZC .....	28

3.3.8.2. Pengaruh pH Adsorpsi.....	28
3.3.8.3. Pengaruh Waktu Kontak Adsorpsi .....	29
3.3.8.4. Pengaruh Temperatur dan Konsentrasi Adsorpsi.....	29
3.3.8.5. Proses Desorpsi dan Regenerasi Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al, Magnetit Biochar, dan Komposit Hidroksi Lapis Ganda Ni- Al/magnetit biochar .....	29
3.4. Analisis Data .....	30
3.4.1. Analisis Data Karakterisasi .....	30
3.4.2. Analisis Data Adsorpsi .....	31
<b>BAB IV PEMBAHASAN.....</b>	<b>35</b>
4.1. Analisis Karakterisasi XRD ( <i>X-Ray Diffraction</i> ) Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al, Magnetit Biochar, dan Komposit Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al/magnetit biochar .....	35
4.2. Analisis Karakterisasi FT-IR ( <i>Fourier Transform Infra- Red</i> ) Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al, Magnetit Biochar, dan Komposit Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al/magnetit biochar .....	37
4.3. Analisis Karakterisasi BET ( <i>Brunauer Emmet Teller</i> ) Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al, Magnetit Biochar, dan Komposit Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al/magnetit biochar .....	39
4.4. Analisis Karakterisasi SEM-EDX ( <i>Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i> ) Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al, Magnetit Biochar, dan Komposit Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al/magnetit biochar .....	41
4.5. Analisis Karakterisasi VSM ( <i>Vibrating Sample Magnetometer</i> ) Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al, Magnetit Biochar, dan Komposit Hidroksi Lapis Ganda Ni- Al/magnetit biochar .....	43
4.6. Panjang Gelombang pada Absorbansi Maksimum Zat Warna Metilen Biru dan Metil Jingga .....	45
4.7. Pengukuran pH <i>Point Zero Charge</i> (pH pzc) Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al, Magnetit Biochar, dan Komposit Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al/magnetit biochar .....	46
4.8. Pengukuran pH Optimum Adsorpsi Metilen Biru dan Metil Jingga pada Adsorben Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al,	

Magnetit Biochar, dan Komposit Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al/magnetit biochar.....	47
4.9 Selektivitas Zat Warna Metilen Biru dan Metil Jingga Menggunakan Adsorben Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al, Magnetit Biochar, dan Komposit Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al/magnetit biochar.....	49
4.10. Pengaruh Waktu Adsorpsi Metilen Biru dan Metil jingga pada Adsorben Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al, Magnetit Biochar, dan Komposit Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al/magnetit biochar.....	51
4.11. Pengaruh Konsentrasi dan Temperatur Adsorpsi Zat Warna Metilen Biru dan Metil Jingga pada Adsorben Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al, Magnetit Biochar, dan Komposit Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al/magnetit biochar .....	54
4.12. Hasil Regenerasi Adsorben Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al, Magnetit Biochar, dan Komposit Hidroksi Lapis Ganda Ni-Al/magnetit biochar .....	62
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>65</b>
5.1. Kesimpulan .....	65
5.2. Saran .....	66
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>67</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>81</b>
<b>DAFTAR RIWAYAT HIDUP .....</b>	<b>124</b>



## DAFTAR GAMBAR

	<b>Halaman</b>
Gambar 2.1. Struktur Hidroksi Lapis Ganda .....	8
Gambar 2.2. Struktur Metilen Biru .....	11
Gambar 2.3. Struktur Metil Jingga.....	12
Gambar 2.4. Difraktogram XRD Hidroksi Lapis Ganda Ni-Fe dan Ni-Fe/magnetit nanomaterial (Taher <i>et al.</i> , 2021) .....	20
Gambar 2.5. Spektrum FT-IR Magnetit Biochar (Din <i>et al.</i> , 2020).....	21
Gambar 2.6. Tipe-tipe Adsorpsi-Desorpsi Brunauer (Mohammed <i>et al.</i> , 2020) .....	22
Gambar 2.7. Grafik pengujian VSM magnetisasi pada sampel (Mariyanto <i>et al.</i> , 2020) .....	24
Gambar 4.1. Difraktogram hidroksi lapis ganda Ni-Al (a) magnetit biochar (b) dan Ni-Al/magnetit biochar (c) .....	36
Gambar 4.2. Spektrum FT-IR hidroksi lapis ganda Ni-Al (a) magnetit biochar (b) dan Ni-Al/magnetit biochar (c) .....	38
Gambar 4.3. Grafik adsorpsi-desorpsi nitrogen hidroksi lapis ganda Ni-Al (a) magnetit biochar (b) dan Ni-Al/magnetit biochar (c) .....	39
Gambar 4.4. Hasil analisis SEM dan distribusi partikel hidroksi lapis ganda Ni-Al (a), magnetit biochar (b), dan komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar (c) .....	41
Gambar 4.5 Kurva histersis analisis VSM pada material magnetit biochar (a) dan komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar (b).....	44
Gambar 4.6. Panjang gelombang maksimum pada absorbansi maksimum zat warna metilen biru (a) dan metil jingga (b).....	45
Gambar 4.7. pH pzc (a) hidroksi lapis ganda Ni-Al, (b) magnetit biochar, dan (c) komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar .....	46
Gambar 4.8. Variasi pH optimum adsorpsi (a) metilen biru dan (b) metil jingga pada adsorben hidroksi lapis ganda Ni-Al, magnetit biochar, dan komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar .....	49
Gambar 4.9. Hasil selektivitas zat warna metilen biru dan metil jingga menggunakan adsorben hidroksi lapis ganda Ni-Al (a),	

magnetit biochar (b), komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar (c) .....	50
Gambar 4.10. Variasi waktu adsorpsi (a) metilen biru dan (b) metil jingga pada adsorben hidroksi lapis ganda Ni-Al, magnetit biochar, dan komposit hidroksi lapsi ganda Ni-Al/magnetit biochar .....	51
Gambar 4.11. Variasi konsentrasi dan temperatur adsorpsi metilen biru pada (a) hidroksi lapis ganda Ni-Al, (b) magnetit biochar, dan (c) komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar .....	55
Gambar 4.12. Variasi konsentrasi dan temperatur adsorpsi metil jingga pada (a) hidroksi lapis ganda Ni-Al, (b) magnetit biochar, dan (c) komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar .....	58
Gambar 4.13 Siklus regenerasi adsorben hidroksi lapis ganda Ni-Al, magnetit biochar, komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar terhadap zat warna metilen biru (a) dan metil jingga (b) .....	63

## DAFTAR TABEL

	<b>Halaman</b>
Tabel 4.1. Data hasil pengukuran isoterm adsorpsi-desorpsi nitrogen hidroksi lapis ganda Ni-Al, magnetit biochar, dan komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar .....	40
Tabel 4.2. Data EDX hidroksi lapis ganda Ni-Al, magnetit biochar, dan komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar .....	43
Tabel 4.3. Model kinetika adsorpsi metilen biru dan metil jingga menggunakan hidroksi lapis ganda Ni-Al, magnetit biochar, dan komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar	52
Tabel 4.4. Model isoterm adsorpsi metilen biru pada adsorben hidroksi lapis ganda Ni-Al, magnetit biochar, dan komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar .....	56
Tabel 4.5. Data termodinamika adsorpsi zat warna metilen biru pada adsorben hidroksi lapis ganda Ni-Al, magnetit biochar, dan komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar .....	57
Tabel 4.6. Model isoterm adsorpsi metil jingga pada adsorben hidroksi lapis ganda Ni-Al, magnetit biochar, dan komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit .....	59
Tabel 4.7. Data termodinamika adsorpsi zat warna metil jingga pada adsorben hidroksi lapis ganda Ni-Al, magnetit biochar, dan komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar .....	60
Tabel 4.8. Perbandingan penelitian kapasitas adsorpsi maksimum zat warna metilen biru.....	61
Tabel 4.9. Perbandingan penelitian kapasitas adsorpsi maksimum zat warna metil jingga.....	62

## DAFTAR LAMPIRAN

	<b>Halaman</b>
Lampiran 1. Diagram Alir Prosedur Percobaan .....	82
Lampiran 2. Data Digital XRD .....	84
Lampiran 3. Data Digital FT-IR .....	84
Lampiran 4. Data Digital BET .....	85
Lampiran 5. Data Berat Unsur dan Atom EDX .....	88
Lampiran 6. Kurva Kalibrasi Metilen Biru .....	89
Lampiran 7. Kurva Kalibrasi Metil Jinga .....	89
Lampiran 8. Data pH pzc .....	89
Lampiran 9. Data pH Optimum Metilen Biru .....	89
Lampiran 10. Data pH Optimum Metil Jinga .....	90
Lampiran 11. Data Pengaruh Waktu Adsorpsi Metilen Biru .....	91
Lampiran 12. Data Pengaruh Waktu Adsorpsi Metil Jinga .....	94
Lampiran 13. Data Pengaruh Konsentrasi dan Temperatur Adsorpsi Metilen Biru .....	96
Lampiran 14. Data Pengaruh Konsentrasi dan Temperatur Adsorpsi Metil Jingga .....	99
Lampiran 15. Data Perhitungan Parameter Isoterm Adsorpsi Metilen Biru .....	101
Lampiran 16. Data Perhitungan Parameter Isoterm Adsorpsi Metil Jinga .....	105
Lampiran 17. Data Pengaruh Termodinamika Adsorpsi Metilen Biru ...	109
Lampiran 18. Data Pengaruh Termodinamika Adsorpsi Metil Jinga .....	113
Lampiran 19. Data Desorpsi Adsorben dengan Zat Warna Metilen Biru .....	116
Lampiran 20. Data Desorpsi Adsorben dengan Zat Warna Metil Jinga .	118
Lampiran 21. Data Regenerasi Adsorben dengan Zat Warna Metilen Biru .....	120
Lampiran 22. Data Regenerasi Adsorben dengan Zat Warna Metil Jinga .....	124

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Emisi limbah zat warna dari industri tekstil menjadi perhatian utama dalam dunia perindustrian, karena polusi yang dihasilkan dibuang pada sumber daya air, sehingga menyebabkan pencemaran bagi lingkungan (Camargo & Morales, 2013). Salah satu contoh limbah industri tekstil ialah limbah hasil pencelupan, pencucian, pencetakan, dan penyempurnaan kain jumputan, yang mengandung zat warna sintetik (Suryani et al., 2018). Limbah yang dihasilkan dapat meningkatkan nilai *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan *Biological Oxygen Demand* (BOD) (Kurniawati & Indriyanti, 2021). Pewarna yang digunakan dalam industri tekstil diklasifikasikan menjadi tiga jenis antara lain pewarna kationik salah satu contohnya ialah metilen biru, pewarna anionik berupa metil jingga, dan pewarna non anionik (Sharma & Kaur, 2018). Metilen biru dan metil jingga tersebut merupakan pewarna yang reaktif, sulit dihilangkan, karena tahan terhadap oksidasi atau reduksi biologis, terdapat gugus azo, stabil terhadap zat pengoksidasi, serta tidak terionisasi dalam media berair (V. K. Gupta et al., 2014). Zat warna yang tercampur di air jika digunakan dapat menyebabkan toksisitas seperti karsinogenik, teratogenik, dan mutagenik pada makhluk hidup sekitar (Liu, 2020). Sehingga, perlu dilakukan pengelolaan limbah zat warna dengan berbagai macam metode antara lain biodegradasi, oksidasi katalitik, filtrasi membran, koagulasi, pertukaran ion, dan adsorpsi (Al-Tohamy et al., 2022).

Harga yang murah, efektif, dan mudah diaplikasikan menjadi suatu keuntungan dalam memilih metode adsorpsi (Thabede et al., 2021). Mekanisme proses adsorpsi terjadi karena adanya gaya adhesi pada suatu material yang berbentuk padat, cair, atau gas yang menempel atau menyerap pada suatu permukaan substrat berupa adsorben padat atau cair (Alaqrbeh, 2021). Adsorpsi terbagi menjadi dua jenis antara lain adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia, yang dijadikan penentu dalam kinetika dan termodinamika adsorpsi (Alaqrbeh, 2021). Pemilihan adsorben untuk proses adsorpsi perlu diperhatikan seperti memiliki kapasitas adsorpsi yang cukup, adsorpsi kinetik yang cukup, ukuran pori kecil, luas permukaan besar, porositas yang baik, volume mikropori yang tinggi, dan jaringan

pori yang luas (Priyanto et al., 2021). Beberapa material yang dapat digunakan sebagai adsorben zat warna antara lain kitosan (Arunachalam et al., 2021), grafit, biochar (Yunusa et al., 2021), kulit rambutan (Khrisnan and Shahuddin., 2012), hidroksi lapis ganda (Palapa et al., 2022).

Hidroksi lapis ganda termasuk kedalam material lempung anionik dengan lapisan oksida atau hidroksida yang terdiri atas logam bermuatan positif, anion, dan molekul air (Rahman & Pullabhotla, 2022). Hidroksi lapis ganda dapat diaplikasikan dalam menghilangkan kontaminan atau pencemaran lingkungan berupa zat warna hasil limbah industri tekstil, karena memiliki kemampuan pertukaran anionik yang besar (Ishak & Nizam Nik Malek, 2021). Anion yang dapat dipertukarkan berupa ion  $\text{CO}_3$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{RCO}_2$  sehingga dapat meningkatkan jarak interlayer (Normah et al., 2021)(Palapa et al., 2022). Selain untuk adsorpsi, penggunaan hidroksi lapis ganda dapat diaplikasikan dalam bidang lain seperti elektrolisis air (Cai et al., 2019), fotokimia, dan pengiriman obat (Zhang et al., 2021). Metode yang paling umum digunakan dalam sintesis hidroksi lapis ganda adalah kopresipitasi, tetapi terdapat beberapa metode sintesis lainnya berupa metode rehidrasi, interkalasi, dan hidrotermal (N. et al., 2015). Penggunaan berulang-ulang dapat membuka lapisan pada hidroksi lapis ganda, sehingga efisiensi penggunaan hidroksi lapis ganda dapat menurun (Palapa et al., 2020). Peningkatan kapasitas adsorpsi dan pemakaian berulang hidroksi lapis ganda dapat dimodifikasi menggunakan material karbon yang dibuat dari biomassa tertentu dalam mengadsorpsi pewarna tekstil (Firdaus et al., 2017).

Hidroksi lapis ganda Ni-Al menghasilkan kapasitas adsorpsi sebesar 138 mg/g yang mengikuti model isoterm Langmuir, saat dimodifikasi menjadi Ni-Al/Cl terjadi peningkatan kapasitas adsorpsi menjadi 976,63 mg/g dalam penghilangan zat warna metil jingga pada temperatur tinggi Jing *et al* (2019). Adsorpsi fenol oleh Fitri et al., (2023) menggunakan adsorben komposit hidroksi lapis ganda Mg-Al/biochar menghasilkan kapasitas adsorpsi hingga 31.847 mg/g pada temperature 50 °C. Badri et al., (2021) melakukan penghilangan metil jingga dengan komposit Mg/Cr-oksalat menghasilkan kapasitas adsorpsi maksimum mencapai 53,191 mg/g. Mg-Al/biochar diaplikasikan untuk penghilangan kafein oleh Santos *et al* (2019) dan dapat mengadsorpsi sampai 26,219 mg/g. Hidroksi lapis ganda Ni-Al

menghasilkan kapasitas adsorpsi 22,989 mg/g yang dilakukan penelitian oleh Lesbani *et al* (2021) dan terjadi peningkatan kapasitas adsorpsi menjadi 61,728 menggunakan komposit Ni-Al/biochar dalam mengadsorpsi zat warna metilen biru.

Proses regenerasi menjadi suatu metode yang murah dalam mendukung penghilangan polutan, salah satu yang paling sering digunakan ialah regenerasi termal (Márquez *et al.*, 2022) dikarenakan adsorben dapat digunakan secara berulang yang dimodifikasi dengan material karbon (Jasper *et al.*, 2022). Penelitian yang dilakukan oleh Siregar *et al* (2022) menggunakan komposit hidroksi lapis ganda Mg-Al/hidrochar terjadi peningkatan pada luas permukaan dari 2,155 menjadi 74,207 m<sup>2</sup>/g dan kapasitas adsorpsi dalam mengadsorpsi logam Cr (VI) mencapai 208,333 mg/g serta kemampuan akhir adsorpsi pada regenerasi kelima sebesar 75,029%. Merujuk hasil penelitian Guel-Nájar *et al.*, (2023) magnetit biochar yang berasal dari tongkol jagung memiliki kapasitas adsorpsi maksimum mencapai 23,17 mg/g dalam mengadsorpsi metilen biru. Penelitian Krishna Murthy *et al* (2020) magnetit hidrochar yang berasal dari ampas kopi dapat mengadsorpsi zat warna 30,967 mg/g.

Penelitian ini mensintesis hidroksi lapis ganda Ni-Al dan memodifikasinya dengan magnetit dan biochar untuk membentuk komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar. Ketiga jenis adsorben tersebut akan digunakan untuk mengolah zat warna kationik (metilen biru) dan zat warna anionik (metil jingga) melalui metode adsorpsi. Proses adsorpsi menyelidiki aspek-aspek seperti pH, kinetika, isoterm, dan termodinamika. Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD), *Fourier Transform-Infra Red* (FT-IR), *Branauer Emmet Teller* (BET), *Scanning Electron Microscopy-Electron Dispersive X-Ray* (SEM-EDX), dan *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM) digunakan untuk mengkarakterisasi hidroksi berlapis ganda Ni-Al, magnetit biochar, dan komposit hidroksi berlapis ganda Ni-Al/magnetit biochar. Rangkaian percobaan juga dapat mengevaluasi kinerja adsorben komposit hidroksi lapis ganda biochar Ni-Al/magnetit biochar dalam penggunaan berulang.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Hidroksi lapis ganda memiliki berbagai macam kelebihan diantaranya dapat terjadi pertukaran ion dan memiliki kapasitas adsorpsi yang tinggi, tetapi penggunaan hidroksi lapis ganda yang berulang dalam melakukan adsorpsi masih

memiliki keterbatasan. Hidroksi lapis ganda yang dipakai berulang akan mengalami eksflokulasi atau lapisan pada hidroksi lapis ganda akan terbuka. Hal ini menyebabkan efisiensi dalam mengadsorpsi berkurang, sehingga perlu dilakukan modifikasi pada hidroksi lapis ganda menggunakan material karbon berupa magnetit biochar.

1. Bagaimana langkah-langkah yang terlibat dalam sintesis hidroksida lapis ganda Ni-Al dan pembuatan komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar ?
2. Bagaimana mekanisme adsorpsi zat warna metilen biru dan metil jingga dipengaruhi oleh pH, waktu, konsentrasi, dan suhu dengan menggunakan adsorben berupa hidroksi lapis ganda Ni-Al, magnetit biochar, dan komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar ?
3. Bagaimana kemampuan regenerasi komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar ?
4. Bagaimana selektivitas zat warna kationik metilen biru dan zat warna anionik metil jingga menggunakan adsorben hidroksi lapis ganda Ni-Al, magnetit biochar, dan komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar ?

### 1.3. Hipotesis

Material karbon memiliki beberapa keunggulan seperti struktur pori yang baik, memiliki situs aktif, dan permukaan yang stabil (Huang *et al.*, 2022). Penambahan material magnetik berupa magnetit mampu membuat hidroksi lapis ganda memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi (Goncavales *et al.*, 2019). MgAl/magnetit karbon aktif berupa cabang pohon apel dilakukan oleh Wang *et al* (2021) untuk mengadsorpsi iodida mencapai efisiensi adsorpsi hingga 86% dengan kapasitas adsorpsi 156,84 mg/g, dan memiliki diameter pori sebesar 6,25 nm. Penelitian Goncalves *et al* (2019) Hidroksi lapis ganda Co-Cr menghasilkan kapasitas adsorpsi sebesar 90,680 mg/g dengan luas permukaan 166 m<sup>2</sup>/g, ketika dikompositkan dengan magnetit Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> menghasilkan kapasitas adsorpsi sebesar 150,239 mg/g, serta terjadi peningkatan luas permukaan sebesar 174 m<sup>2</sup>/g. Ni-Al hidrochar kulit rambutan mampu mengadsorpsi metilen biru mencapai 144,928 mg/g dari hasil penelitian Mohadi *et al* (2022). Material karbon aktif tempurung



kelapa hasil penelitian Susmanto dkk (2020) meningkat dengan meningkatnya waktu kontak dengan kapasitas adsorpsi mencapai 4,6648 mg/g.

**Hipotesis 1.** Diasumsikan bahwa material hidroksi lapis ganda yang dimodifikasi dengan magnetit dan material karbon biochar memiliki luas permukaan dan kapasitas adsorpsi yang besar.

Pengaplikasian hidroksi lapis ganda sebagai adsorben masih terbatas, karena pemakaian yang berulang dari hidroksi lapis ganda dapat menyebabkan lapisan terkelupas, sehingga diperlukan modifikasi hidroksi lapis ganda menggunakan material magnetik dan karbon (Palapa et al., 2020). Ni-Al/biochar digunakan secara berulang untuk mengadsorpsi zat warna congo merah mengalami penurunan yang tidak terlalu signifikan setelah diadsorpsi sebanyak 5 kali dengan persen teradsorpsi pertama sebesar 78% dan persen teradsorpsi terakhir sebesar 58% (Siregar *et al.*, 2021). Penelitian Mohadi *et al* (2022) melakukan modifikasi material hidroksi lapis ganda Ca-Al dengan material hidrochar hidrochar yang dapat diregenerasi regenerasi sebanyak 5 siklus dengan persen teradsorpsi pertama sebesar 97,22 % dan persen teradsorpsi terakhir sebesar 73,26 %. Hal ini membuktikan bahwa komposit Ca-Al/hidrochar dapat digunakan sebagai adsorben berulang yang dilihat dari persen teradsorpsi masih diatas 50%. Regenerasi komposit hidroksi lapis ganda Mg-Al/magnetit dalam mengadsorpsi Cr (VI) oleh Gwak *et al* (2016) menyatakan bahwa jumlah yang teradsorpsi tetap tinggi berkisaran pada range 80 % setelah tiga siklus. Adsorpsi malasit hijau menggunakan komposit hidroksi lapis ganda Mg/Al-biochar oleh Badri *et al* (2021) stabil menggunakan pelarut HCl dan pelarut organik yang dapat mengadsorpsi hingga tiga kali dan tidak mengalami penurunan persentase adsorpsi yang signifikan, karena proses modifikasi hidroksi lapis ganda menggunakan material karbon dapat meningkatkan stabilitas struktur.

**Hipotesis 2.** Komposit hidroksi lapis ganda yang dimodifikasi dengan material magnetit biochar tidak mengurangi efisiensi hingga 5 siklus dalam mengadsorpsi sehingga dapat digunakan secara berulang.

Selektivitas zat warna berupa pewarna kationik metilen biru dan anionik metil jingga pada setiap adsorben, untuk mengukur panjang gelombang dan absorbansi maksimum selama proses adsorpsi dengan variasi waktu, yang dilakukan untuk menghilangkan pencemaran pada lingkungan. Penelitian N. Normah *et al* (2021)

mengenai selektivitas zat warna malasit hijau, metilen biru, Rhodamin-B, metil merah, congo merah dan metil jingga menggunakan adsorben Cu-Al/hidrochar, menampilkan hasil dengan meningkatnya waktu kontak untuk selektivitas adsorpsi, zat warna metilen biru teradsorpsi mencapai 9,465 mg/g pada waktu 120 menit, dibandingkan dengan zat warna malasit hijau dan zat warna anionik. Kemampuan adsorpsi komposit magnetik  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  hidrochar untuk zat warna metilen biru efisien di kondisi basa dan memiliki kapasitas adsorpsi yang tinggi, sedangkan metil jingga di kondisi asam, tetapi adsorben magnetik  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  hidrochar selektif yang baik untuk menyerap pewarna kationik atau anionik ketika pH limbah pewarna campuran biner disesuaikan Liu *et al* (2021). Selektivitas zat warna anionik metil merah, metil jingga, procion merah, dan kongo merah oleh Wijaya et al (2021) menunjukkan bahwa konsentrasi adsorpsi procion merah lebih besar dibandingkan dengan pewarna lainnya dengan nilai 36,203 mg/L, yang menunjukkan bahwa procion merah lebih mudah untuk dilakukan adsorpsi menggunakan adsorben komposit Cu-Al/biochar.

**Hipotesis 3.** Diasumsikan zat warna kationik metilen biru merupakan zat warna paling selektif terhadap adsorben komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar dibandingkan dengan zat warna anionik metil jingga.

#### 1.4. Tujuan Penelitian

Penelitian yang dilakukan dirancang untuk mencapai pemahaman yang lebih mendalam mengenai karakterisasi dan aplikasi komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al, magnetit biochar, serta komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar dalam pengolahan zat warna, dengan tujuan yang melibatkan analisis dan eksperimen yang sangat relevan.

1. Menganalisis sintesis hidroksi lapis ganda Ni-Al, magnetit biochar, dan komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar dengan menggunakan karakterisasi XRD, FT-IR, BET, SEM-EDX, dan VSM.
2. Penelitian menganalisis mekanisme adsorpsi zat warna metilen biru dan metil jingga selama pengolahan zat warna dengan mempertimbangan pengaruh variabel pH, waktu, konsentrasi, dan suhu dengan menggunakan adsorben hidroksi lapis ganda Ni-Al, magnetit biochar, dan komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar.

3. Penelitian mempelajari proses regenerasi komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar.
4. Selektivitas adsorpsi hidroksi lapis ganda Ni-Al, magnetit biochar, dan komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar dianalisis pada zat warna kationik metilen biru dan zat warna anionik metil jingga.

### **1.5. Manfaat Penelitian**

Penelitian ini memiliki manfaat dalam mengetahui efektivitas komposit hidroksi lapis ganda Ni-Al/magnetit biochar dalam mengatasi pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh zat warna, seperti metilen biru dan metil jingga. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan tentang pengembangan adsorben untuk penelitian lebih lanjut dalam mengatasi pencemaran zat warna.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abd Mutalib, M., Rahman, M. A., Othman, M. H. D., Ismail, A. F., & Jaafar, J. (2017). Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy-Dispersive X-Ray (EDX) Spectroscopy. In *Membrane Characterization*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63776-5.00009-7>
- Abebe, B., Murthy, H. C. A., & Amare, E. (2018). Summary on Adsorption and Photocatalysis for Pollutant Remediation: Mini Review. *Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences*, 08(04), 225–255. <https://doi.org/10.4236/jeas.2018.84012>
- Agarwala, R., & Mulky, L. (2023). Adsorption of Dyes from Wastewater: A Comprehensive Review. *ChemBioEng Reviews*, 10(3), 326–335. <https://doi.org/10.1002/cben.202200011>
- Agboola, O. D., & Benson, N. U. (2021). Physisorption and Chemisorption Mechanisms Influencing Micro (Nano) Plastics-Organic Chemical Contaminants Interactions: A Review. *Frontiers in Environmental Science*, 9(May), 1–27. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.678574>
- Ahmad, N., Suryani Arsyad, F., Royani, I., & Lesbani, A. (2022). Adsorption of methylene blue on magnetite humic acid: Kinetic, isotherm, thermodynamic, and regeneration studies. *Results in Chemistry*, 4(November), 100629. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100629>
- Al-Ghouthi, M. A., & Da'ana, D. A. (2020). Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 393(February), 122383. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122383>
- Al-Saeedi, S. I., Areej, A., Qamar, M. T., Alhujaily, A., Iqbal, S., Alotaibi, M. T., Aslam, M., Qayyum, M. A., Bahadur, A., Awwad, N. S., Jazaa, Y., & Elkaeed, E. B. (2023). Isotherm and kinetic studies for the adsorption of methylene blue onto a novel Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite and their antifungal performance. *Frontiers in Environmental Science*, 11(May), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1156475>
- Al-Tohamy, R., Ali, S. S., Li, F., Okasha, K. M., Mahmoud, Y. A. G., Elsamahy, T., Jiao, H., Fu, Y., & Sun, J. (2022). A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 231, 113160. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160>
- Alam, M. S., Bishop, B., Chen, N., Safari, S., Warter, V., Byrne, J. M., Warchola, T., Kappler, A., Konhauser, K. O., & Alessi, D. S. (2020). Reusable magnetite nanoparticles–biochar composites for the efficient removal of chromate from water. *Scientific Reports*, 10(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75924-7>

- Alaqrabeh, M. (2021). *RHAZES: Green and Applied Chemistry Adsorption Types: Short Review*. 13, 43–51.
- Ali, A., Chiang, Y. W., & Santos, R. M. (2022). X-Ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization: A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions. *Minerals*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/min12020205>
- Alsawy, T., Rashad, E., El-Qelish, M., & Mohammed, R. H. (2022). A comprehensive review on the chemical regeneration of biochar adsorbent for sustainable wastewater treatment. *Npj Clean Water*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/s41545-022-00172-3>
- Amelia, S., & Maryudi, M. (2019). Application of Natural Zeolite in Methylene Blue Wastewater Treatment Process by Adsorption Method. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 8(2), 144–147. <https://doi.org/10.15294/jbat.v8i2.22480>
- Aruna Janani, V., Gokul, D., Dhivya, N., Nesarani, A., Mukilan, K., Suresh Kumar, A., & Vignesh Kumar, M. (2023). Optimization Studies on Methyl Orange (MO) Dye Adsorption using Activated Carbon Nanoadsorbent of *Ocimum basilicum* Linn Leaves. *Journal of Nanomaterials*, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/7969512>
- Atole, D. M., & Rajput, H. H. (2018). Ultraviolet spectroscopy and its pharmaceutical applications- A brief review. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 11(2), 59–66. <https://doi.org/10.22159/ajpcr.2018.v11i2.21361>
- Badri, A. F., Juleanti, N., Palapa, N. R., Hanifah, Y., Mohadi, R., Mardiyanto, & Lesbani, A. (2021). Oxalate intercalated mg/cr layered double hydroxide as adsorbent of methyl red and methyl orange from aqueous solution. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 22(3), 71–81. <https://doi.org/10.12912/27197050/135509>
- Barquilha, C. E. R., & Braga, M. C. B. (2021). Adsorption of organic and inorganic pollutants onto biochars: Challenges, operating conditions, and mechanisms. *Bioresource Technology Reports*, 15(March), 100728. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100728>
- Baskar, A. V., Bolan, N., Hoang, S. A., Sooriyakumar, P., Kumar, M., Singh, L., Jasemizad, T., Padhye, L. P., Singh, G., Vinu, A., Sarkar, B., Kirkham, M. B., Rinklebe, J., Wang, S., Wang, H., Balasubramanian, R., & Siddique, K. H. M. (2022). Recovery, regeneration and sustainable management of spent adsorbents from wastewater treatment streams: A review. *Science of the Total Environment*, 822, 153555. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153555>
- Basker, A., Syed Shabudeen, P. S., & Vignesh Kumar, P. (2014). Evaluation of adsorption potential of the agricultural waste areca husk carbon for methylene blue. *International Journal of ChemTech Research*, 6(2), 1309–1324.

- Behrami, E., & Avdiu, V. (2023). The Process and Kinetics of Pesticide Desorption from Clay as a Function of Cleaning Polluted Waters. *Processes*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/pr11041180>
- Bini, M., & Monteforte, F. (2018). Layered Double Hydroxides (LDHs): Versatile and Powerful Hosts for Different Applications. *Journal of Analytical & Pharmaceutical Research*, 7(1), 12–14. <https://doi.org/10.15406/japlr.2018.07.00206>
- Brame, J. A., & Griggs, C. (2016). Surface Area Analysis Using the Brunauer-Emmett-Teller (BET) Method: Scientific Operation Procedure Series : SOP-C. *U.S Army Engineer Research and Development Center*, September, 1–23.
- Bunaciu, A. A., Udriștioiu, E. gabriela, & Aboul-Enein, H. Y. (2015). X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 45(4), 289–299. <https://doi.org/10.1080/10408347.2014.949616>
- Cai, Z., Bu, X., Wang, P., Ho, J. C., Yang, J., & Wang, X. (2019). Recent advances in layered double hydroxide electrocatalysts for the oxygen evolution reaction. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(10), 5069–5089. <https://doi.org/10.1039/c8ta11273h>
- Camargo, B. de C. V., & Morales, M. A. M. (2013). Azo Dyes : Characterization and Toxicity – A Review. *Textiles and Light Industrial Science and Technology*, 2(2), 2(2), 85–103.
- Cwalinski, T., Polom, W., Marano, L., Roviello, G., D'angelo, A., Cwalina, N., Matuszewski, M., Roviello, F., Jaskiewicz, J., & Polom, K. (2020). Methylene blue—current knowledge, fluorescent properties, and its future use. *Journal of Clinical Medicine*, 9(11), 1–12. <https://doi.org/10.3390/jcm9113538>
- Dai, Y., Zhang, N., Xing, C., Cui, Q., & Sun, Q. (2019). The adsorption, regeneration and engineering applications of biochar for removal organic pollutants: A review. *Chemosphere*, 223, 12–27. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.161>
- Din, S. U., Azeez, A., Zain-ul-Abdin, Haq, S., Hafeez, M., Imran, M., Hussain, S., & Alarfaji, S. S. (2021). Investigation on Cadmium Ions Removal from Water by a Nanomagnetite Based Biochar Derived from Eleocharis Dulcis. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 31(1), 415–425. <https://doi.org/10.1007/s10904-020-01758-5>
- Din, S. U., Khan, M. S., Hussain, S., Imran, M., Haq, S., Hafeez, M., Zain-ul-Abdin, Rehman, F. U., & Chen, X. (2021). Adsorptive Mechanism of Chromium Adsorption on Siltstone–Nanomagnetite–Biochar Composite. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 31(4), 1608–1620. <https://doi.org/10.1007/s10904-020-01829-7>
- Diniardi, E., Mahmud, K. H., Basri, H., & Ramadhan, A. I. (2019). Analysis of the

Tensile Strength of Composite Material from Fiber Bags. *Journal of Applied Science and Advanced Technology Journal Homepage*.

- Eumann, M., & Schaeberle, C. (2016). Water. In *Brewing Materials and Processes: A Practical Approach to Beer Excellence*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799954-8.00005-8>
- Fahlepy, M. R., Tiwow, V. A., & Subaer. (2018). Characterization of magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) minerals from natural iron sand of Bonto Kanang Village Takalar for ink powder (toner) application. *Journal of Physics: Conference Series*, 997(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/997/1/012036>
- Fajarwati, F. I., Ika Yandini, N., Anugrahwati, M., & Setyawati, A. (2020). Adsorption Study of Methylene Blue and Methyl Orange Using Green Shell (Perna Viridis). *EKSAKTA: Journal of Sciences and Data Analysis*, 1(1), 92–97. <https://doi.org/10.20885/eksakta.vol1.iss1.art14>
- Fang, Q., Ye, S., Yang, H., Yang, K., Zhou, J., Gao, Y., Lin, Q., Tan, X., & Yang, Z. (2021). Application of layered double hydroxide-biochar composites in wastewater treatment: Recent trends, modification strategies, and outlook. *Journal of Hazardous Materials*, 420(April), 126569. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126569>
- Felton, D. E., Ederer, M., Steffens, T., Hartzell, P. L., & Waynant, K. V. (2018). UV-Vis Spectrophotometric Analysis and Quantification of Glyphosate for an Interdisciplinary Undergraduate Laboratory. *Journal of Chemical Education*, 95(1), 136–140. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.7b00440>
- Fewster, P. F. (2023). The Limits of X-ray Diffraction Theory. *Crystals*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/cryst13030521>
- Firdaus, M. L., Krisnanto, N., Alwi, W., Muhammad, R., & Serunting, M. A. (2017). Adsorption of Textile Dye by Activated Carbon Made from Rice Straw and Oil Palm Midrib. *Aceh International Journal of Science and Technology*, 6(1), 1. <https://doi.org/10.13170/aijst.6.1.5502>
- Fito, J., Abewaa, M., & Nkambule, T. (2023). Magnetite-impregnated biochar of parthenium hysterophorus for adsorption of Cr(VI) from tannery industrial wastewater. *Applied Water Science*, 13(3), 1–23. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01880-y>
- Fitri, E. S., Yunita, T. N., Mohadi, R., & Lesbani, A. (2023). Ca / Al and Mg / Al LDH Supported on Biochars As Effective Adsorbent and Highly Regeneration Ability for Phenol Removal from Aqueous Solution. 1(3).
- Fronczak, M. (2020). Adsorption performance of graphitic carbon nitride-based materials: Current state of the art. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104411. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104411>
- Ge, X., Wu, Z., Manzoli, M., Wu, Z., & Cravotto, G. (2020). Feasibility and the

- Mechanism of Desorption of Phenolic Compounds from Activated Carbons. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 59(26), 12223–12231. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c01402>
- George, G., & Saravanakumar, M. P. (2017). Synthesising methods of layered double hydroxides and its use in the fabrication of dye Sensitised solar cell (DSSC): A short review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 263(3). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/3/032020>
- Ghani, U., Jiang, W., Hina, K., Idrees, A., Iqbal, M., Ibrahim, M., Saeed, R., Irshad, M. K., & Aslam, I. (2022). Adsorption of Methyl Orange and Cr (VI) Onto Poultry Manure-Derived Biochar From Aqueous Solution. *Frontiers in Environmental Science*, 10(June), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.887425>
- Gomes, A., Cocke, D., Tran, D., & Baksi, A. (2016). Layered double hydroxides in energy research: Advantages and challenges. *Energy Technology 2015: Carbon Dioxide Management and Other Technologies*, 309–316. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48220-0\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48220-0_34)
- Guel-Nájar, N. A., Rios-Hurtado, J. C., Muzquiz-Ramos, E. M., Dávila-Pulido, G. I., González-Ibarra, A. A., & Pat-Espadas, A. M. (2023). Magnetic Biochar Obtained by Chemical Coprecipitation and Pyrolysis of Corn Cob Residues: Characterization and Methylene Blue Adsorption. *Materials*, 16(8). <https://doi.org/10.3390/ma16083127>
- Gupta, S., Sireesha, S., Sreedhar, I., Patel, C. M., & Anitha, K. L. (2020). Latest trends in heavy metal removal from wastewater by biochar based sorbents. *Journal of Water Process Engineering*, 38(October), 101561. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101561>
- Gupta, V. K., Pathania, D., Singh, P., Kumar, A., & Rathore, B. S. (2014). Adsorptional removal of methylene blue by guar gum-cerium (IV) tungstate hybrid cationic exchanger. *Carbohydrate Polymers*, 101(1), 684–691. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.09.092>
- Hairuddin, M. N., Mubarak, N. M., Khalid, M., Abdullah, E. C., Walvekar, R., & Karri, R. R. (2019). Magnetic palm kernel biochar potential route for phenol removal from wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(34), 35183–35197. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06524-w>
- Hardian, A., Rosidah, R., Budiman, S., & Syarif, D. G. (2021). Preparation of Composite Derived from Banana Peel Activated Carbon and MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> as Magnetic Adsorbent for Methylene Blue Removal. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 23(12), 440–448. <https://doi.org/10.14710/jksa.23.12.440-448>
- Harrington, G. F., & Santiso, J. (2021). Back-to-Basics tutorial: X-ray diffraction of thin films. *Journal of Electroceramics*, 47(4), 141–163. <https://doi.org/10.1007/s10832-021-00263-6>



- Hu, X., Li, P., Zhang, X., Yu, B., Lv, C., Zeng, N., Luo, J., Zhang, Z., Song, J., & Liu, Y. (2019). Ni-based catalyst derived from NiAl layered double hydroxide for vapor phase catalytic exchange between hydrogen and water. *Nanomaterials*, 9(12). <https://doi.org/10.3390/nano9121688>
- Huang, Z., Wang, Q., Chen, X., Yang, Z., Lv, F., & Li, C. (n.d.). *Optimization of adsorption of methyl orange from aqueous solution by magnetic CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZnAl-layered double hydroxide composite using response surface methodology Optimization of adsorption of methyl orange from aqueous solution by magnetic CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>*.
- Hudcová, B., Fein, J. B., Tsang, D. C. W., & Komárek, M. (2022). Mg-Fe LDH-coated biochars for metal(loid) removal: Surface complexation modeling and structural change investigations. *Chemical Engineering Journal*, 432(November 2021). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.134360>
- Iamsaard, K., Weng, C. H., Yen, L. T., Tzeng, J. H., Poonpakdee, C., & Lin, Y. T. (2022). Adsorption of metal on pineapple leaf biochar: Key affecting factors, mechanism identification, and regeneration evaluation. *Bioresource Technology*, 344(PA), 126131. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126131>
- Ishak, S. N., & Nizam Nik Malek, N. A. (2021). Functionalized layered double hydroxide with compound to remove cationic and anionic pollutants: A review. *Environmental and Toxicology Management*, 1(1), 26–29. <https://doi.org/10.33086/etm.v1i1.2062>
- Istratie, R., Stoia, M., Păcurariu, C., & Locovei, C. (2019). Single and simultaneous adsorption of methyl orange and phenol onto magnetic iron oxide/carbon nanocomposites. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(8), 3704–3722. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.12.012>
- Iwuozor, K. O., Ighalo, J. O., Emenike, E. C., Ogunfowora, L. A., & Igwegbe, C. A. (2021a). Adsorption of methyl orange: A review on adsorbent performance. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4(September), 100179. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100179>
- Iwuozor, K. O., Ighalo, J. O., Emenike, E. C., Ogunfowora, L. A., & Igwegbe, C. A. (2021b). Adsorption of methyl orange: A review on adsorbent performance. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4(July), 100179. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100179>
- Jasper, E. E., Onwuka, J. C., & Agbaji, E. B. (2022). Chemical Regeneration of A Dye-Laden Activated Carbon: Optimization via The Box-Behnken Experimental Design. *Journal of Multidisciplinary Applied Natural Science*, 3(1), 43–54. <https://doi.org/10.47352/jmans.2774-3047.144>
- Jing, C., Chen, Y., Zhang, X., Guo, X., Liu, X., Dong, B., Dong, F., Zhang, X., Liu, Y., Li, S., & Zhang, Y. (2019). Low Carbonate Contaminative and Ultrasmall

NiAl LDH Prepared by Acid Salt Treatment with High Adsorption Capacity of Methyl Orange [Research-article]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 58(27), 11985–11998. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b01706>

- John, S. P., & Mathew M, J. (2021). Determination of ferrimagnetic and superparamagnetic components of magnetization and the effect of particle size on structural, magnetic and hyperfine properties of Mg<sub>0.5</sub>Zn<sub>0.5</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds*, 869, 159242. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159242>
- Jun, B. M., Kim, Y., Han, J., Yoon, Y., Kim, J., & Park, C. M. (2019). Preparation of activated biochar-supported magnetite composite for adsorption of polychlorinated phenols from aqueous solutions. *Water (Switzerland)*, 11(9), 1–16. <https://doi.org/10.3390/w11091899>
- Jung, K. W., Lee, S. Y., Choi, J. W., Hwang, M. J., & Shim, W. G. (2021). Synthesis of Mg–Al layered double hydroxides-functionalized hydrochar composite via an in situ one-pot hydrothermal method for arsenate and phosphate removal: Structural characterization and adsorption performance. *Chemical Engineering Journal*, 420(P1), 129775. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129775>
- Kalam, S., Abu-Khamsin, S. A., Kamal, M. S., & Patil, S. (2021). Surfactant Adsorption Isotherms: A Review. *ACS Omega*, 6(48), 32342–32348. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04661>
- Khan, I., Saeed, K., Zekker, I., Zhang, B., Hendi, A. H., Ahmad, A., Ahmad, S., Zada, N., Ahmad, H., Shah, L. A., Shah, T., & Khan, I. (2022). Review on Methylene Blue: Its Properties, Uses, Toxicity and Photodegradation. *Water (Switzerland)*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/w14020242>
- Kheradmand, A., Negarestani, M., Kazemi, S., Shayesteh, H., Javanshir, S., & Ghiasinejad, H. (2022). Adsorption behavior of rhamnolipid modified magnetic Co/Al layered double hydroxide for the removal of cationic and anionic dyes. *Scientific Reports*, 12(1), 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19056-0>
- Kirupakar, B. R., Vishwanath, B. A., Padma, S. M., & Deenadayalan. (2016). Vibrating Sample Magnetometer and Its Application In Characterisation Of Magnetic Property Of The Anti Cancer Drug Magnetic Microspheres. *International Journal of Pharmaceutics & Drug Analysis*, 4(5), 227–233.
- Krika, F., & Benlahbib, O. el F. (2015). Removal of methyl orange from aqueous solution via adsorption on cork as a natural and low-cost adsorbent: equilibrium, kinetic and thermodynamic study of removal process. *Desalination and Water Treatment*, 53(13), 3711–3723. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.995136>
- Krishna Murthy, T. P., Gowrishankar, B. S., Krishna, R. H., Chandrababha, M. N.,

- & Mathew, B. B. (2020). Magnetic modification of coffee husk hydrochar for adsorptive removal of methylene blue: Isotherms, kinetics and thermodynamic studies. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 2, 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.10.002>
- Kurniawati, S., & Indriyanti, N. Y. (2021). Adsorption of Anionic and Cationic Dyes in Batik Wastewater using Biomass Adsorbents: Literature Review. *Jurnal Kimia Dan Pendidikan Kimia*, 6(3), 274–291. <https://jurnal.uns.ac.id/jkpk>
- Lee, S., Lee, J., Song, M. K., Ryu, J. C., An, B., Lee, C. G., Park, C., Lee, S. H., & Choi, J. W. (2015). Effective regeneration of an adsorbent for the removal of organic contaminants developed based on UV radiation and toxicity evaluation. *Reactive and Functional Polymers*, 95, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2015.08.008>
- Lesbani, A., Palapa, N. R., Sayeri, R. J., Taher, T., & Hidayati, N. (2021). High reusability of NiAl LDH/biochar composite in the removal methylene blue from aqueous solution. *Indonesian Journal of Chemistry*, 21(2), 421–434. <https://doi.org/10.22146/ijc.56955>
- Liao, Y., Jiang, L., Cao, X., Zheng, H., Feng, L., Mao, Y., Zhang, Q., Shen, Q., & Ji, F. (2022). Efficient removal mechanism and microbial characteristics of tidal flow constructed wetland based on in-situ biochar regeneration (BR-TFCW) for rural gray water. *Chemical Engineering Journal*, 431(P3), 134185. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.134185>
- Liu, Q. (2020). Pollution and Treatment of Dye Waste-Water. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 514(5). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/514/5/052001>
- Lu, Y., Jiang, B., Fang, L., Ling, F., Gao, J., Wu, F., & Zhang, X. (2016). High performance NiFe layered double hydroxide for methyl orange dye and Cr(VI) adsorption. *Chemosphere*, 152, 415–422. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.03.015>
- Madjid, A., Nitsae, M., Atikah, & Sabarudin, A. (2015). PENGARUH PENAMBAHAN TRIPOLYFOSFAT PADA KITOSAN BEADS UNTUK ADSORPSI METHYL ORANGE ADR Madjid □ M Nitsae, Atikah, A Sabarudin. *Jurnal MIPA*, 38(2), 144–149. <http://journal.unnes.ac.id/nju/index.php/JM>
- Mariyanto, M., Ramadhan, D. V., Purba, T. R., & Nabilah, F. A. (2022). Analysis of Vibrating Sample Magnetometer (VSM) data of Brantas river sediments using HYSITS. *Journal of Physics: Conference Series*, 2309(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2309/1/012025>
- Márquez, P., Benítez, A., Chica, A. F., Martín, M. A., & Caballero, A. (2022). Evaluating the thermal regeneration process of massively generated granular

- activated carbons for their reuse in wastewater treatments plants. *Journal of Cleaner Production*, 366(February).  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132685>
- Mishra, G., Dash, B., & Pandey, S. (2018). Layered double hydroxides: A brief review from fundamentals to application as evolving biomaterials. *Applied Clay Science*, 153(June 2017), 172–186.  
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.12.021>
- Mohammed, I., Afagwu, C. C., Adjei, S., Kadafur, I. B., Jamal, M. S., & Awotunde, A. A. (2020). A review on polymer, gas, surfactant and nanoparticle adsorption modeling in porous media. *Oil and Gas Science and Technology*, 75(October). <https://doi.org/10.2516/ogst/2020063>
- Moosavi, S., Lai, C. W., Gan, S., Zamiri, G., Akbarzadeh Pivezhzani, O., & Johan, M. R. (2020). Application of efficient magnetic particles and activated carbon for dye removal from wastewater. *ACS Omega*, 5(33), 20684–20697.  
<https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01905>
- Munir, M., Nazar, M. F., Zafar, M. N., Zubair, M., Ashfaq, M., Hosseini-Bandegharai, A., Khan, S. U. D., & Ahmad, A. (2020). Effective Adsorptive Removal of Methylene Blue from Water by Didodecyldimethylammonium Bromide-Modified Brown Clay. *ACS Omega*, 5(27), 16711–16721.  
<https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01613>
- N., A., T., E. A., D., W., & D., D. E. (2015). Synthesis and Application of Layered Double Hydroxide for the removal of Copper in Wastewater. *International Journal of Chemistry*, 7(1), 122. <https://doi.org/10.5539/ijc.v7n1p122>
- Ngapa, Y. D., & Gago, J. (2021). Optimizing of Competitive Adsorption Methylene Blue and Methyl Orange using Natural Zeolite from Ende-Flores. *JKPK (Jurnal Kimia Dan Pendidikan Kimia)*, 6(1), 39.  
<https://doi.org/10.20961/jkpk.v6i1.46132>
- Normah, N., Juleanti, N., Siregar, P. M. S. B. N., Wijaya, A., Palapa, N. R., Taher, T., & Lesbani, A. (2021). 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>
- Nurani, L. H., Edityaningrum, C. A., Irnawati, I., Putri, A. R., Windarsih, A., Guntarti, A., & Rohman, A. (2023). Review: Chemometrics-Assisted UV-Vis Spectrophotometry for Quality Control of Pharmaceuticals: A Review. *Indonesian Journal of Chemistry*, 23(2), 542–567.  
<https://doi.org/10.22146/ijc.74329>
- Oladoye, P. O., Ajiboye, T. O., Omotola, E. O., & Oyewola, O. J. (2022). Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater. *Results in Engineering*, 16(September), 100678.

<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100678>

- Onigbinde, M. O., Fatoye, E. O., & Isola, O. B. (2022). Methylene Blue Dye Adsorption in Aqueous System using Microcrystalline Cellulose obtained from Sugarcane Bagasse. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 26(12), 1943–1950. <https://doi.org/10.4314/jasem.v26i12.8>
- Pakpahan, J. K., Karo, P. K., & Suroto, B. J. (2017). Studi Luas Permukaan Spesifik Zeolit Akibat Pengaruh Mikrostruktur dan Potensinya Sebagai Elektrode Superkapasitor. *Jurnal Teori Dan Aplikasi Fisika*, 5(1), 19–24.
- Palapa, N. R., Juleanti, N., Normah, N., Taher, T., & Lesbani, A. (2020). *Unique Adsorption Properties of Malachite Green on Interlayer Space of Cu-Al and Cu-Al-SiW 12 O 40 Layered Double Hydroxides*. 15(3), 653–661. <https://doi.org/10.9767/bcrec.15.3.8371.653-661>
- Palapa, N. R., Siregar, P. M. S. B. N., Wijaya, A., Taher, T., & Lesbani, A. (2022). High Selectivity and Stability Structure of Layered Double Hydroxide-Biochar for Removal Cd(II). *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 17(3), 520–532. <https://doi.org/10.9767/bcrec.17.3.14288.520-532>
- Patel, H. (2021). Review on solvent desorption study from exhausted adsorbent. *Journal of Saudi Chemical Society*, 25(8), 101302. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2021.101302>
- Patel, H., & Vashi, R. T. (2015). Feasibility of Naturally Prepared Adsorbent. In *Characterization and Treatment of Textile Wastewater*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802326-6.00003-4>
- Podborska, A., & Luty-Błocho, M. (2023). Molecular structure of methyl orange and its role in the process of [Pd(Azo)] compound and MOF formation. *Journal of Molecular Structure*, 1273, 134312. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.134312>
- Prabowo, B., Khairunnisa, T., Bayu, A., & Nandiyanto, D. (2018). Economic Perspective in the Production of Magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) Nanoparticles by Coprecipitation Method. *World Chemical Engineering Journal*, 2(2), 1–4. <https://jurnal.untirta.ac.id/index.php/WCEJ/article/view/4478>
- Pratiwi, R. A., & Nandiyanto, A. B. D. (2022). How to Read and Interpret UV-VIS Spectrophotometric Results in Determining the Structure of Chemical Compounds. *Indonesian Journal of Educational Research and Technology*, 2(1), 1–20. <https://doi.org/10.17509/ijert.v2i1.35171>
- Priyanto, A., F, M., Muhdarina, M., & A, A. (2021). Adsorption and Characterization of Activated Sugarcane Bagasse Using Natrium Hydroxide. *Indo. J Chem. Res.*, 8(3), 202–209. <https://doi.org/10.30598/ijcr.2021.7-ade>
- Putri, L. E. (2017). *Penentuan Konsentrasi Senyawa Berwarna KMnO 4*. 3, 391–398.

- Rahman, A., & Pullabhotla, V. S. R. (2022). Layered Double Hydroxide Catalysts Preparation, Characterization and Applications for Process Development: An Environmentally Green Approach. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 17(1), 163–193. <https://doi.org/10.9767/bcrec.17.1.12195.163-193>
- Reddy, D. N. (2017). Labor and Employment in the Emerging Rural-Urban Continuum in India: Toward a Cohesive Policy. In D. N. Reddy & K. Sarap (Eds.), *Rural Labour Mobility in Times of Structural Transformation: Dynamics and Perspectives from Asian Economies* (pp. 35–64). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-5628-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-10-5628-4_3)
- Ren, S., Wang, Y., Han, Z., Zhang, Q., & Cui, C. (2022). Synthesis of polydopamine modified MgAl-LDH for high efficient Cr(VI) removal from wastewater. *Environmental Research*, 215(P1), 114191. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114191>
- Sahmoune, M. N. (2019). Evaluation of thermodynamic parameters for adsorption of heavy metals by green adsorbents. *Environmental Chemistry Letters*, 17(2), 697–704. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-00819-z>
- Salam, R., Dimiyati, A., Mujamilah, M., & Silalahi, M. (2018). Study of magnetic properties of sintered alloy Fe-Cr ODS using VSM. *Journal of Physics: Conference Series*, 1091(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1091/1/012018>
- Sankhi, B. R., & Turgut, E. (2020). A low-cost vibrating sample magnetometry based on audio components. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 502(November 2019), 166560. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166560>
- Saraswati, T. E., Dewi, O., Prasiwi, I., Masykur, A., & Anwar, M. (2019). *Synthesis Of Magnetic Composite Of Iron Compounds / Carbon Nanotubes In Chemical Vapor Deposition Synthesis Of Magnetic Composite Of Iron Compounds / Carbon Method and Procedure The com-CNT synthesis was carried out via the. July 2018*, 111–119.
- Sasri, R., Nurlina, Destiarti, L., & Syahbanu, I. (2018). Size analysis of silica particles extracted from solid rocks from Ketapang Regency, West Kalimantan., Indonesian. *Journal of Pure and Applied Chemistry*, 1(1), 39–43. <https://doi.org/10.26418/indonesian.v1i1.26042>.
- Septiano, A. F., Susilo, S., & Setyaningsih, N. E. (2021). Analisis Citra Hasil Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-Ray (SEM EDX) Komposit Resin Timbal dengan Metode Contrast to Noise Ratio (CNR). *Indonesian Journal of Mathematics and Natural Sciences*, 44(2), 81–85. <https://doi.org/10.15294/ijmns.v44i2.33143>
- Sharma, S., & Kaur, A. (2018). Various methods for removal of dyes from industrial effluents - a review. *Indian Journal of Science and Technology*,

11(12), 1–21. <https://doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i12/120847>

- Shi, Z., Wang, Y., Sun, S., Zhang, C., & Wang, H. (2020). Removal of methylene blue from aqueous solution using Mg-Fe, Zn-Fe, Mn-Fe layered double hydroxide. *Water Science and Technology*, 81(12), 2522–2532. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.313>
- Simonenko, E., Gomonov, A., Rolle, N., & Molodkina, L. (2015). Modeling of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV oxidation of organic pollutants at wastewater post-treatment. *Procedia Engineering*, 117(1), 337–344. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.170>
- Siregar, P. M. S. B. N., Normah, Juleanti, N., Wijaya, A., Palapa, N. R., Mohadi, R., & Lesbani, A. (2021). Mg/Al-CH, Ni/Al-CH, and Zn/Al-CH as adsorbents for Congo Red removal in aqueous solution. *Communications in Science and Technology*, 6(2), 74–79. <https://doi.org/10.21924/cst.6.2.2021.547>
- Siregar, P., Wijaya, A., Nduru, J. P., Hidayati, N., & Lesbani, A. (2022). Layered Double Hydroxide / C ( C = Humic Acid ; Hydrochar ) As Adsorbents of Cr ( VI ). *Science and Technology Indonesia*, 7(1), 41–48.
- Smalenskaite, A., Kaba, M. M., Grigoraviciute-Puroniene, I., Mikoliunaite, L., Zarkov, A., Ramanauskas, R., Morkan, I. A., & Kareiva, A. (2019). Sol-gel synthesis and characterization of coatings of Mg-Al layered double hydroxides. *Materials*, 12(22), 27–29. <https://doi.org/10.3390/ma12223738>
- Suryani, F., Azhari, & Oktarini, D. (2018). Analisis Pemanfaatan Serat Daun Nanas sebagai Adsorben Zat Warna Metilen Biru pada Limbah Pencelupan Kain Jumputan. *Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Terapan*, 1(1), 153–159.
- Taher, T., Putra, R., Rahayu Palapa, N., & Lesbani, A. (2021). Preparation of magnetite-nanoparticle-decorated NiFe layered double hydroxide and its adsorption performance for congo red dye removal. *Chemical Physics Letters*, 777(April), 138712. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2021.138712>
- 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(May), 124305. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124305>
- Thabede, P. M., Shooto, N. D., Xaba, T., & Naidoo, E. B. (2021). Magnetite Functionalized Nigella Sativa Seeds for the Uptake of Chromium(VI) and Lead(II) Ions from Synthetic Wastewater. *Adsorption Science and Technology*, 2021(Ii). <https://doi.org/10.1155/2021/6655227>
- Tonelli, D., Gualandi, I., Musella, E., & Scavetta, E. (2021). Synthesis and characterization of layered double hydroxides as materials for electrocatalytic

- applications. *Nanomaterials*, *11*(3), 1–20. <https://doi.org/10.3390/nano11030725>
- Trifi, I. M., Trifi, B., Zendah, H., & Hamrouni, B. (2021). Comparative removal of methylene blue from aqueous solution using different adsorbents. *Journal of the Chilean Chemical Society*, *66*(3), 5246–5250. <https://doi.org/10.4067/S0717-97072021000305246>
- Tsai, F. C., Ma, N., Chiang, T. C., Tsai, L. C., Shi, J. J., Xia, Y., Jiang, T., Su, S. K., & Chuang, F. S. (2014). Adsorptive removal of methyl orange from aqueous solution with crosslinking chitosan microspheres. *Journal of Water Process Engineering*, *1*(August 2018), 2–7. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2014.02.001>
- Verma, G., & Mishra, M. (2018). Development and Optimization Of UV-Vis Spectroscopy - A Review. *World Journal of Pharmaceutical Research*, *7*(11), 1170–1180. <https://doi.org/10.20959/wjpr201811-12333>
- Vezentsev, A. I., Thuy, D. M., Goldovskaya-Peristaya, L. F., & Glukhareva, N. A. (2018). Adsorption of methylene blue on the composite sorbent based on bentonite-like clay and hydroxyapatite. *Indonesian Journal of Chemistry*, *18*(4), 733–741. <https://doi.org/10.22146/ijc.37050>
- Wu, L., Liu, X., Lv, G., Zhu, R., Tian, L., Liu, M., Li, Y., Rao, W., Liu, T., & Liao, L. (2021). Study on the adsorption properties of methyl orange by natural one-dimensional nano-mineral materials with different structures. *Scientific Reports*, *11*(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90235-1>
- Yousef, R., Qiblawey, H., & El-Naas, M. H. (2020). Adsorption as a process for produced water treatment: A review. *Processes*, *8*(12), 1–22. <https://doi.org/10.3390/pr8121657>
- 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>
- Yunusa, U., Usman, B., & Bashir Ibrahim, M. (2021). Algerian Journal of Chemical Engineering Cationic dyes removal from wastewater by adsorptive method: A systematic in-depth review. *Algerian Journal of Chemical Engineering*, *02*, 6–40. <http://www.journal.acse.science/index.php/ajce/indexhttp://dx.doi.org/10.5281/zenodo.5101197>
- Zhang, Y., Xu, H., & Lu, S. (2021). Preparation and application of layered double hydroxide nanosheets. *RSC Advances*, *11*(39), 24254–24281. <https://doi.org/10.1039/d1ra03289e>



Zhao, Y., Jia, X., Waterhouse, G. I. N., Wu, L. Z., Tung, C. H., O'Hare, D., & Zhang, T. (2016). Layered Double Hydroxide Nanostructured Photocatalysts for Renewable Energy Production. *Advanced Energy Materials*, 6(6), 1–20. <https://doi.org/10.1002/aenm.201501974>