

**ADSORPSI ION $Mn(II)$ DAN *MALACHITE GREEN* OLEH KARBON
CANGKANG KELAPA SAWIT (*Elaeis Guineensis Jacq.*)
TERMODIFIKASI PARTIKEL MAGNETIT DAN
(3-AMINOPROPYL)TRIETHOXYSILANE**

(Skripsi)

Oleh

**AISYAH TIRTA ASRI
NPM 2117011038**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

ADSORPSI ION Mn(II) DAN MALACHITE GREEN OLEH KARBON CANGKANG KELAPA SAWIT (*Elaeis Guineensis* Jacq.) TERMODIFIKASI PARTIKEL MAGNETIT DAN (3-AMINOPROPYL)TRIETHOXYLSILANE

Oleh

AISYAH TIRTA ASRI

Pada penelitian ini telah dilakukan preparasi dan karakterisasi karbon dari cangkang kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) yang dimodifikasi menggunakan partikel magnetit (Fe_3O_4) dan senyawa (3-Aminopropyl)triethoxysilane (APTES) untuk menghasilkan adsorben karbon aktivasi fisika-magnetit (KAF-M) dan karbon aktivasi fisika-magnetit silan (KAF-MS) sebagai adsorben yang diuji efektivitasnya dalam mengadsorpsi ion Mn(II) dan zat warna *malachite green*. Karakterisasi adsorben dilakukan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengidentifikasi tingkat kristalinitas, *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX) untuk mengetahui morfologi permukaan dan mengidentifikasi komposisi unsur, *Fourier Transform Infrared* (FTIR) untuk mengidentifikasi gugus fungsi, dan *Brunauer Emmett Teller* (BET) untuk analisis luas permukaan adsorben. Proses adsorpsi ion Mn(II) oleh KAF-M dan KAF-MS menunjukkan hasil minimum pada dosis 0,2 g dengan kondisi optimum pada pH 8, waktu kontak 45 menit, dan konsentrasi 400 ppm. Adsorpsi *malachite green* oleh KAF-M dan KAF-MS optimum pada dosis 0,2 g, pH 10, dan waktu kontak 30 menit dengan konsentrasi 400 ppm. Model kinetika ion Mn(II) dan *malachite green* terhadap adsorben KAF-M dan KAF-MS cenderung mengikuti model kinetika pseudo orde dua dan isoterm adsorpsi cenderung mengikuti model Langmuir untuk Mn(II) dan Freundlich untuk *malachite green*. Persentase desorpsi tertinggi adsorben KAF-M dan KAF-MS terjadi pada eluen pertama yaitu etanol 40% yang didominasi oleh ikatan hidrogen dan eluen kedua yaitu HCl yang didominasi interaksi elektrostatik. Adsorben KAF-M dan KAF-MS dapat efektif hingga 5 kali penggunaan ulang untuk mengadsorpsi *malachite green* dengan persentase di atas 95%.

Kata kunci: adsorpsi, karbon, cangkang kelapa sawit, Ion Mn(II), *malachite green*, magnetit, APTES.

ABSTRACT

ADSORPTION OF Mn(II) IONS AND MALACHITE GREEN BY PALM SHELL-DERIVED CARBON (*Elaeis Guineensis Jacq.*) MODIFIED WITH MAGNETITE PARTICLES AND (3-AMINOPROPYL)TRIETHOXY-SILANE

By

AI SYAH TIRTA ASRI

In this study, carbon adsorbents were prepared and characterized from oil palm shell (*Elaeis guineensis Jacq.*), modified with magnetite particles (Fe_3O_4) and (3-Aminopropyl)triethoxysilane (APTES) to produce physically activated carbon-magnetite (KAF-M) and physically activated carbon-magnetite silane (KAF-MS). These adsorbents were evaluated for their effectiveness in adsorbing Mn(II) ions and the dye malachite green. Adsorbent characterization was conducted using X-Ray Diffraction (XRD) to assess crystallinity, Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX) for surface morphology and elemental composition, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) for functional group identification, and Brunauer Emmett Teller (BET) analysis for surface area determination. The adsorption process of Mn(II) ions by KAF-M and KAF-MS showed minimum results at a dose of 0.2 g with optimum conditions at pH 8, contact time of 45 minutes, and concentration of 400 ppm. The adsorption of malachite green by KAF-M and KAF-MS was optimum at a dose of 0.2 g, pH 10, and contact time of 30 minutes with a concentration of 400 ppm. The adsorption kinetics of Mn(II) and malachite green followed the pseudo-second-order kinetic model, while the adsorption isotherms were best described by the Langmuir model for Mn(II) and the Freundlich model for malachite green. The highest desorption percentages for KAF-M and KAF-MS were achieved with the first eluents 40% ethanol dominated by hydrogen bonding and the second eluent HCl dominated by electrostatic interactions. Both KAF-M and KAF-MS remained effective for up to five reuse cycles in adsorbing malachite green, with adsorption percentages above 95%.

Keywords: adsorption, carbon, palm shell, Mn(II) ions, malachite green, magnetite, APTES.

**ADSORPSI ION $Mn(II)$ DAN *MALACHITE GREEN* OLEH KARBON
CANGKANG KELAPA SAWIT (*Elaeis Guineensis Jacq.*)
TERMODIFIKASI PARTIKEL MAGNETIT DAN
(3-AMINOPROPYL)TRIETHOXYSILANE**

Oleh

AISYAH TIRTA ASRI

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar SARJANA SAINS

Pada

**Jurusan Kimia
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

Judul Penelitian

: **ADSORPSI ION Mn(II) DAN MALACHITE GREEN OLEH KARBON CANGKANG KELAPA SAWIT (*Elaeis Guineensis* Jacq.) TERMODIFIKASI PARTIKEL MAGNETIT DAN (3-AMINOPROPYL)TRIETHOXYSILANE**

Nama

: **Aisyah Tirta Asri**

Nomor Pokok Mahasiswa

: **2117011038**

Jurusan

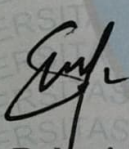
: **Kimia**

Fakultas

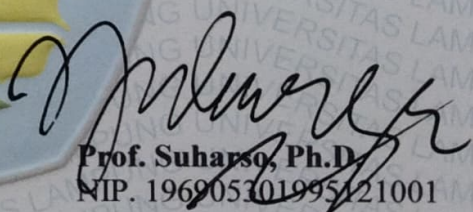
: **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

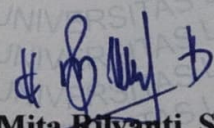

Prof. Dr. Buhani, M.Si.

NIP. 196904161994032003


Prof. Suharto, Ph.D.

NIP. 196905301995121001

2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA

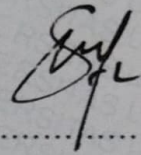

Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si.

NIP. 197205302000032001

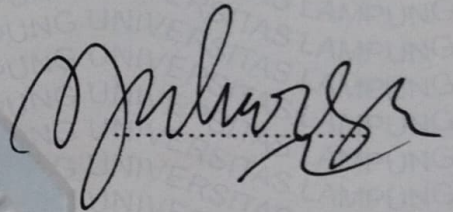
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

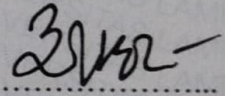
Ketua : **Prof. Dr. Buhani, M.Si.**



Sekretaris : **Prof. Suharso, Ph.D.**



Anggota : **Dian Septiani Pratama, S.Si., M.Si.**



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.
NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 16 Juli 2025

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertandatangan dibawah ini

Nama : Aisyah Tirta Asri
Nomor Pokok Mahasiswa : 2117011038
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya yang berjudul
“Adsorpsi Ion Mn(II) dan *Malachite Green* Oleh Karbon Cangkang Kelapa Sawit (*Elaeis Guineensis Jacq.*) Termodifikasi Partikel Magnetit dan (3-Aminopropyl)Triethoxysilane” adalah benar karya sendiri dan saya tidak keberatan jika sebagian atau seluruh data dalam skripsi tersebut digunakan oleh dosen atau program studi untuk kepentingan publikasi sesuai dengan kesepakatan.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sadar dan sebenar-benarnya untuk digunakan sebagaimana mestinya.

Bandar Lampung, 21 Juli 2025

Yang Menyatakan,



Aisyah Tirta Asri
NPM. 2117011038

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Tanggamus, pada tanggal 27 Maret 2003 sebagai anak terakhir dari dua bersaudara yang merupakan putri dari pasangan Bapak Sumadi dan Ibu Sunarni. Penulis memulai pendidikan formal di TK Dharma Wanita Bumi Dipasena Mulya pada Tahun 2008. Sekolah Dasar di SD Negeri

1 Bumi Dipasena Mulya diselesaikan pada tahun 2015, Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 1 Rawajitu Timur diselesaikan pada tahun 2018, dan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Gadingrejo diselesaikan pada tahun 2021. Pada tahun 2021, penulis terdaftar sebagai mahasiswa jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN.

Penulis pernah menjadi anggota aktif bidang kaderisasi dan pengembangan organisasi Himpunan Mahasiswa Kimia (Himaki) 2022 dan 2023. Pada tahun 2024, penulis juga pernah menjadi asisten praktikum Kimia Anorganik II Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung. Penulis telah melaksanakan praktik kerja lapangan (PKL) di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung pada tahun 2024 dan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Rejomulyo, Lampung Selatan pada tahun 2024. Pada tahun 2025, penulis menyelesaikan penelitiannya di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Jurusan

Kimia FMIPA Unila dengan judul “Adsorpsi Ion Mn(II) dan *Malachite Green*
Oleh Karbon Cangkang Kelapa Sawit (*Elaeis Guineensis Jacq.*) Termodifikasi
Partikel Magnetit dan (3-*Aminopropyl*)*Triethoxysilane*”.

MOTTO

“Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan. Maka apabila kamu telah selesai (dari satu urusan), tetaplah bekerja keras (untuk urusan yang lain)”
(QS Al-Insyirah; 6-7)

“Boleh jadi kamu tidak menyukai sesuatu padahal itu baik bagimu dan boleh jadi kamu menyukai sesuatu padahal itu tidak baik bagimu. Allah mengetahui, sedangkan kamu tidak mengetahui”
(QS. Al-Baqarah: 216)

“Percayalah perjalanan ini akan berarti”
(Baskara Putra-Hindia)

“Tak apa, kita luka dulu, baru bahagia”
(Nadin Amizah)

“Jangan pernah menyerah, karena tidak ada yang tahu apa yang akan terjadi di depan. Lelah itu wajar, berhenti sejenak pun boleh, tetapi ingat ada doa orang tua yang selalu menyertai dan Allah SWT selalu bersama hambanya”
(Aisyah Tirta Asri)

PERSEMBAHAN



Puji syukur atas kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas rahmat dan karunia-Nya, shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad Shallallahu Alaihi Wasallam.

Kupersembahkan karya ini dengan segala kerendahan hati, sebagai wujud bakti, rasa syukur, dan ucapan terima kasih kepada:

Orang tua, Bapak Sumadi dan Ibu Sunarni yang telah merawat, menayangi, mendoakan, memperjuangkan, dan mengorbankan tenaga, pikiran, serta biaya untuk penulis selama ini.

Kakak Tersayang, Ifah Mega Vanidiawati yang telah mendukung dan mendoakan penulis.

Ibu Prof. Dr. Buhani, M.Si., Bapak Prof. Suharso, Ph.D., Ibu Dian Septiani Pratama, S.Si., M.Si., serta seluruh Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Kimia. Terima kasih telah membimbing, menasehati, serta memberikan ilmu-ilmunya selama menempuh pendidikan di Jurusan Kimia FMIPA Unila. Semoga Allah Subhanahu Wa Ta'ala membalas segala kebaikan yang telah diberikan.

Keluarga besar, teman-teman seperjuangan, diriku sendiri, dan Almamater Tercinta Universitas Lampung.

SANWACANA

Puji syukur atas rahmat, pertolongan, kasih sayang, dan segala kemudahan yang senantiasa Allah Subhanahu Wa Ta'ala berikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul:

“Adsorpsi Ion Mn(II) dan *Malachite Green* Oleh Karbon Cangkang Kelapa Sawit (*Elaeis Guineensis* Jacq.) Termodifikasi Partikel Magnetit dan (3-Aminopropyl)Triethoxysilane”

sebagai salah satu syarat yang harus dipenuhi untuk mendapatkan gelar Sarjana Sains pada Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.

Selama penulisan skripsi ini, penulis banyak mendapatkan bantuan, saran, doa, dan semangat dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Orang tuaku, Bapak Sumadi dan Ibu Sunarni atas segala dukungan, kasih sayang dan doanya yang tak pernah terputus untuk kelancaran studi ini.
2. Kakakku Ifah Mega Vanidiawati serta Keluarga besar yang telah menemani, mendoakan, dan mendukung penulis selama berkegiatan dimasa perkuliahan.
3. Ibu Prof. Dr. Buhani, M.Si., selaku dosen pembimbing satu yang senantiasa meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran dalam membimbing penulis dengan sabar sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
4. Bapak Prof. Suharso, Ph.D., selaku dosen pembimbing dua yang telah membantu memberikan pemikiran, arahan, dan koreksi dalam penyusunan skripsi ini.

5. Ibu Dian Septiani Pratama, S.Si., M.Si., selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik membangun yang sangat berharga dalam penyempurnaan skripsi ini.
6. Bapak Mulyono, Ph.D., selaku dosen pembimbing akademik yang telah membimbing dan mendampingi penulis selama masa studi dengan penuh perhatian dan dukungan.
7. Ibu Prof. Dr. Mita Rilyanti, M.Si., selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung.
8. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
9. Bapak dan Ibu dosen Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung yang telah memberikan nasihat dan ilmu yang sangat bermanfaat selama masa studi.
10. Mba Liza Apriliya, S.Si. selaku Laboran Lab. Kimia Anorganik/Fisik yang telah mendampingi dan mendukung selama masa penelitian.
11. Teman seperjuangan penelitian Adsorpsi 2021, Amelia Normalita, S.Si., Tiara Zalfa Nur'alifah, S.Si., Dinda Aprillia Defi, S.Si., dan Mayang Aprilian Suri, S.Si. yang senantiasa membantu dan menjadi tempat berdiskusi selama penulis melaksanakan penelitian.
12. Sahabat njytm yaitu Alya, Linda, Fildza, dan Khairi yang senantiasa hadir memberikan semangat, perhatian, dan kehangatan di tengah proses yang penuh tantangan sejak maba hingga S.Si.
13. *Partner* Feri yang memberikan semangat, mendoakan, dan perhatian kepada penulis.
14. Sahabat sejak SMA yaitu Ajeng, Aulia, Lola, Vini, Dima, Dela, Farra, dan Ulfa yang selalu mendukung dan menyemangati penulis meskipun jarak telah memisahkan dan langkah kita tak selalu menuju ke arah yang sama lagi.
15. Sahabat sejak SMP yaitu Titis dan Jere yang memberikan semangat dan yang mengerti penulis.
16. Teman-teman KKN Rejomulyo 1 yaitu Ririn, Rita, Selvia, Mba Inka, dan Jo yang telah berbagi suka dan duka selama 40 hari, kenangan bersama kalian tidak akan terlupakan.

17. Teman-teman angkatan 2021 yang senantiasa membantu dan mendukung selama masa studi yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, semoga silaturahmi kita dapat terus terjalin.
18. Teman teman pejuang penelitian di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik.
19. Semua pihak yang telah membantu dan mendoakan penulis dengan tulus dalam proses penyelesaian skripsi yang tidak dapat disebutkan satu persatu.
20. Almamater tercinta Universitas Lampung.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis menyadari masih banyak kekurangan, mengingat keterbatasan penulis dalam pengetahuan, kemampuan, pengalaman, dan waktu. Namun inilah yang terbaik yang dapat penulis lakukan. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Bandar Lampung, 21 Juli 2025
Penulis,

Aisyah Tirta Asri

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR.....	x
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	4
1.3. Manfaat Penelitian.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Cangkang Kelapa Sawit	5
2.2. Karbon.....	6
2.3. Magnetit	8
2.4. Silanisasi.....	8
2.4.1. (3-Aminopropyl)triethoxysilane	9
2.5. Analisis Proksimat.....	10
2.5.1. Analisis Kadar Air	11
2.5.2. Analisis Kadar Zat Mudah Menguap (<i>Volatile</i>)	11
2.5.3. Analisis Kadar Abu	12
2.5.4. Analisis Kadar Karbon Terikat	12
2.5.5. Daya Serap Iod.....	13
2.6. Logam.....	14
2.6.1. Mangan(II)	14
2.7. Zat Warna.....	15
2.7.1. <i>Malachite Green</i>	16
2.8. Adsorpsi	17
2.9. Kinetika Adsorpsi.....	21
2.10. Isoterm Adsorpsi	22
2.10.1. Isoterm Adsorpsi Freundlich.....	22
2.10.2. Isoterm Adsorpsi Langmuir	24
2.11. Penentuan Nilai Zeta Potensial	26
2.12. Karakterisasi.....	27
2.12.1. Spektrofotometer UV-Vis	27
2.12.2. Spektrofotometri Serapan Atom (SSA)	28
2.12.3. X-Ray Diffraction (XRD)	29
2.12.4. <i>Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-Ray</i> (SM EDX).....	30

2.12.5.	<i>Spektrofotometer Fourier Transform Infrared (FTIR)</i>	32
2.12.6.	<i>Brunauer-Emmett-Teller (BET)</i>	33
III.	METODE PENELITIAN	35
3.1.	Waktu dan Tempat	35
3.2.	Alat dan Bahan	36
3.3.	Prosedur Penelitian.....	36
3.3.1.	Preparasi Karbon.....	36
3.3.2.	Modifikasi Karbon dengan Magnetit	37
3.3.3.	Modifikasi Karbon Magnetit dengan (3-Aminopropyl)triethoxysilane	38
3.3.4.	Analisis Proksimat Karbon	38
3.3.5.	Karakterisasi.....	41
3.3.6.	Penentuan Nilai Zeta Potensial	41
3.3.7.	Eksperimen Adsorpsi	42
3.3.8.	Eksperimen Desorpsi	44
3.3.9.	Eksperimen Penggunaan Ulang Adsorben.....	45
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	46
4.1.	Preparasi Karbon dari Cangkang Kelapa Sawit	46
4.2.	Hasil Modifikasi Karbon dengan Magnetit dan (3-Aminopropyl)-triethoxysilane (APTES)	47
4.3.	Hasil Analisis Proksimat Karbon dari Cangkang Kelapa Sawit	48
4.4.	Karakterisasi.....	49
4.4.1.	Analisis dengan XRD.....	49
4.4.2.	Analisis dengan SEM EDX.....	50
4.4.3.	Analisis dengan FTIR	52
4.4.4.	Analisis dengan BET	54
4.5.	Hasil Penentuan Nilai Zeta Potensial	56
4.6.	Hasil Eksperimen Adsorpsi Ion Mn(II) dan <i>Malachite Green</i>	57
4.6.1.	Pengaruh Variasi Dosis.....	57
4.6.2.	Pengaruh Variasi pH	59
4.6.3.	Pengaruh Variasi Waktu Kontak.....	60
4.6.4.	Pengaruh Variasi Konsentrasi.....	64
4.7.	Hasil Desorpsi	67
4.8.	Hasil Penggunaan Ulang Adsorben.....	69
V.	KESIMPULAN DAN SARAN	71
5.1.	Kesimpulan.....	71
5.2.	Saran.....	72
	DAFTAR PUSTAKA	73
	LAMPIRAN	81

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Komposisi kimia cangkang kelapa sawit	6
2. Karakteristik dari adsorpsi secara fisik dan kimia.	18
3. Serapan infra merah gugus fungsi senyawa organik.....	33
4. Analisis proksimat karbon	48
5. Hasil karakterisasi menggunakan metode BET	56
6. Parameter kinetika adsorpsi ion Mn(II) dan <i>malachite green</i> terhadap adsorben KAF-M dan KAF-MS	64
7. Parameter isoterm adsorpsi ion Mn(II) dan <i>malachite green</i> pada adsorben	67
8. Data pH PZC adsorben KAF, KAF-M, dan KAF-MS.....	85
9. Data absorbansi larutan standar <i>malachite green</i> untuk variasi dosis dan pH.....	87
10. Adsorpsi ion Mn(II) dan <i>malachite green</i> pada adsorben KAF-M dengan variasi dosis	88
11. Adsorpsi ion Mn(II) dan <i>malachite green</i> pada adsorben KAF-MS dengan variasi dosis	88
12. Adsorpsi ion Mn(II) dan <i>malachite green</i> pada adsorben KAF-M.....	89
13. Adsorpsi ion Mn(II) dan <i>malachite green</i> pada adsorben KAF-MS dengan variasi pH.....	89
14. Data absorbansi larutan <i>malachite green</i> untuk variasi waktu	90
15. Adsorpsi ion Mn(II) dan <i>malachite green</i> pada adsorben KAF-M dengan variasi waktu.....	91
16. Adsorpsi ion Mn(II) dan <i>malachite green</i> pada adsorben KAF-MS dengan variasi waktu.....	91
17. Data hasil perhitungan kinetika pseudo orde satu pada adsorben KAF-M terhadap ion Mn(II).....	92

18. Data hasil perhitungan kinetika pseudo orde satu pada adsorben KAF-MS terhadap ion Mn(II).....	92
19. Data hasil perhitungan kinetika pseudo orde satu pada adsorben KAF-M terhadap <i>malachite green</i>	93
20. Data hasil perhitungan kinetika pseudo orde satu pada adsorben KAF-MS terhadap <i>malachite green</i>	94
21. Data hasil perhitungan kinetika pseudo orde dua pada adsorben KAF-M terhadap ion Mn(II)	95
22. Data hasil perhitungan kinetika pseudo orde dua pada adsorben KAF-MS terhadap ion Mn(II)	95
23. Data hasil perhitungan kinetika pseudo orde dua pada adsorben KAF-M terhadap <i>malachite green</i>	96
24. Data hasil perhitungan kinetika pseudo orde dua pada adsorben KAF-MS terhadap <i>malachite green</i>	96
25. Data absorbansi larutan <i>malachite green</i> untuk variasi konsentrasi	98
26. Adsorpsi ion Mn(II) pada adsorben dengan variasi konsentrasi	99
27. Adsorpsi <i>malachite green</i> pada adsorben dengan variasi konsentrasi	99
28. Data perhitungan isoterm adsorpsi ion Mn(II) pada adsorben KAF-M dengan Persamaan Langmuir	100
29. Data perhitungan isoterm adsorpsi <i>malachite green</i> pada adsorben KAF-M dengan Persamaan Langmuir	100
30. Data perhitungan isoterm adsorpsi ion Mn(II) pada adsorben KAF-MS dengan Persamaan Langmuir	101
31. Data perhitungan isoterm adsorpsi <i>malachite green</i> pada adsorben KAF-MS dengan Persamaan Langmuir	102
32. Data perhitungan isoterm adsorpsi ion Mn(II) pada adsorben KAF-M dengan Persamaan Freundlich	103
33. Data perhitungan isoterm adsorpsi <i>malachite green</i> pada adsorben KAF-M dengan Persamaan Freundlich	103
34. Data perhitungan isoterm adsorpsi ion Mn(II) pada adsorben KAF-MS dengan Persamaan Freundlich	104
35. Data perhitungan isoterm adsorpsi <i>malachite green</i> pada adsorben KAF-MS dengan Persamaan Freundlich	105
36. Data absorbansi larutan standar eksperimen desorpsi	106
37. Data perhitungan jumlah <i>malachite green</i> yang terdesorpsi pada adsorben KAF-M	106
38. Data perhitungan jumlah <i>malachite green</i> yang terdesorpsi pada adsorben KAF-MS	108

39. Data absorbansi larutan standar eksperimen penggunaan ulang.....	110
40. Data perhitungan jumlah adsorbat yang teradsorpsi oleh adsorben KAF-M pada eksperimen penggunaan ulang.....	110
41. Data perhitungan jumlah adsorbat yang teradsorpsi oleh adsorben KAF-MS pada eksperimen penggunaan ulang	111

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Cangkang kelapa sawit.	6
2. Ukuran pori karbon aktif mikropori, mesopori, dan makropori	7
3. Struktur umum <i>silane coupling agent</i>	9
4. Struktur (3-Aminopropyl)triethoxysilane (APTES).....	10
5. Struktur <i>malachite green</i>	16
6. Proses adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia.	19
7. Model isoterm adsorpsi Freundlich.....	24
8. Model isoterm adsorpsi Langmuir.	25
9. Pola difraksi XRD Fe ₃ O ₄	30
10. Spektra (a) SEM dan (b) EDX KM).	32
11. Klasifikasi IUPAC isoterm fisisorpsi.....	34
12. Hasil tahap preparasi dan karbonasi (a) cangkang kelapa sawit, (b) karbon cangkang kelapa sawit, (c) karbon tanpa aktivasi (KTA) cangkang kelapa sawit halus, (d) karbon aktivasi fisika (KAF) cangkang kelapa sawit.....	47
13. Hasil modifikasi (a) adsorben KAF-M dan (b) adsorben KAF-MS.	48
14. Difaktogram XRD adsorben (a) KTA, (b) KAF, (c) KAF-M, dan (d) KAF-MS.....	49
15. Hasil SEM dengan perbesaran 2000× pada adsorben (a) KTA, (b) KAF, (c) KAF-M, dan (d) KAF-MS.....	50
16. Hasil EDX pada adsorben (a) KTA, (b) KAF, (c) KAF-M, dan (d) KAF-MS.....	51
17. Spektrum FTIR dari adsorben (a) KTA, (b) KAF, (c) KAF-M, dan (d) KAF-MS.....	53
18. Grafik isoterm adsorpsi-desorpsi N ₂ adsorben (a) KTA, (b) KAF, (c) KAF-M, dan (d) KAF-MS.	55
19. Kurva nilai pH PZC adsorben KTA, KAF, KAF-M, dan KAF-MS.....	56

20. Kurva pengaruh variasi dosis pada adsorpsi (a) ion Mn(II) dan (b) <i>malachite green</i>	58
21. Kurva pengaruh variasi pH pada adsorpsi (a) ion Mn(II) dan (b) <i>malachite green</i>	59
22. Kurva pengaruh variasi waktu kontak pada adsorpsi (a) ion Mn(II) dan (b) <i>malachite green</i>	61
23. Adsorben KAF-M dan KAF-MS terhadap ion Mn(II) dengan kurva kinetika (a) pseudo orde satu dan (b) pseudo orde dua.....	62
24. Adsorben KAF-M dan KAF-MS terhadap <i>malachite green</i> dengan kurva kinetika (a) pseudo orde satu dan (b) pseudo orde dua.....	63
25. Kurva pengaruh variasi konsentrasi adsorpsi ion Mn(II) dan <i>malachite green</i> pada (a) KAF-M dan (b) KAF-MS.	65
26. Pola isoterm Langmuir adsorben KAF-M dan KAF-MS terhadap ion Mn(II) dan <i>malachite green</i>	66
27. Pola isoterm Freundlich adsorben KAF-M dan KAF-MS terhadap ion Mn(II) dan <i>malachite green</i>	66
28. Grafik persentase desorpsi <i>malachite green</i> pada adsorben (a) KAF-M dan (b) KAF-MS.....	68
29. Grafik hasil penggunaan ulang adsorpsi <i>malachite green</i> pada adsorben KAF-M dan KAF-MS.....	69
30. Penentuan panjang gelombang maksimum pada <i>malachite green</i>	86
31. Kurva standar <i>malachite green</i> untuk variasi dosis dan pH.....	87
32. Kurva standar <i>malachite green</i> untuk variasi waktu.....	90
33. Pola kinetika pseudo orde satu pada adsorben KAF-M dan KAF-MS terhadap Ion Mn(II).....	93
34. Pola kinetika pseudo orde satu pada adsorben KAF-M dan KAF-MS terhadap <i>malachite green</i>	94
35. Pola kinetika pseudo orde dua pada adsorben KAF-M dan KAF-MS terhadap ion Mn(II).....	95
36. Pola kinetika pseudo orde dua pada adsorben KAF-M dan KAF-MS terhadap <i>malachite green</i>	97
37. Kurva standar <i>malachite green</i> pada variasi konsentrasi.....	98
38. Pola isoterm Langmuir adsorpsi Ion Mn(II) dan <i>malachite green</i> pada adsorben KAF-M.	101
39. Pola isoterm Langmuir adsorpsi Ion Mn(II) dan <i>malachite green</i> pada adsorben KAF-MS.	102
40. Pola isoterm Freundlich adsorpsi ion Mn(II) dan <i>malachite green</i> pada adsorben KAF-M.	104

41. Pola isoterm Freundlich adsorpsi ion Mn(II) dan <i>malachite green</i> pada adsorben KAF-MS.	105
42. Kurva standar eksperimen desorpsi <i>malachite green</i>	106
43. Kurva standar eksperimen penggunaan ulang <i>malachite green</i>	110
44. Penentuan pH PZC dengan variasi pH 3-10 pada adsorben (a) KTA, (b) KAF, (c) KAF-M, dan (d) KAF-MS.	114
45. Adsorpsi ion Mn(II) dengan variasi dosis pada adsorben (a) KAF-M dan (b) KAF-MS.	114
46. Adsorpsi <i>malachite green</i> dengan variasi dosis pada adsorben (a) KAF-M dan (b) KAF-MS.	115
47. Adsorpsi ion Mn(II) dengan variasi pH pada adsorben (a) KAF-M dan (b) KAF-MS.	115
48. Adsorpsi <i>malachite green</i> dengan variasi pH pada adsorben (a) KAF-M dan (b) KAF-MS.	115
49. Adsorpsi ion Mn(II) dengan variasi waktu pada adsorben (a) KAF-M dan (b) KAF-MS.	116
50. Adsorpsi <i>malachite green</i> dengan variasi waktu pada adsorben (a) KAF-M dan (b) KAF-MS.	116
51. Adsorpsi ion Mn(II) dengan variasi konsentrasi pada adsorben (a) KAF-M dan (b) KAF-MS.	116
52. Adsorpsi <i>malachite green</i> dengan variasi konsentrasi pada adsorben (a) KAF-M dan (b) KAF-MS.	117
53. Desorpsi <i>malachite green</i> dengan variasi eluen pada adsorben (a) KAF-M dan (b) KAF-MS.	117
54. Hasil penggunaan ulang <i>malachite green</i> pada adsorben (a) KAF-M dan (b) KAF-MS hingga 5 kali pengulangan.	117
55. Analisis proksimat (a) kadar air KTA, (b) kadar air KAF, (c) kadar zat menguap KTA, (d) kadar zat menguap KAF, (e) kadar abu KTA, dan (f) kadar abu KAF.	117

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Air adalah sumber kehidupan yang sangat penting bagi keberlangsungan makhluk hidup di Bumi. Setiap hari, manusia membutuhkan air untuk minum, memasak, sanitasi, dan berbagai kegiatan lain yang mendukung kesehatan dan kesejahteraan. Selain itu, air juga merupakan komponen esensial dalam pertanian, industri, dan ekosistem alam. Angka 60 liter per orang per hari sering dijadikan patokan untuk memenuhi kebutuhan air sehari-hari secara keseluruhan. Menurut Suripin (2002), pada tahun 2000 dengan jumlah penduduk dunia sebesar 6,121 milyar diperlukan air bersih sebanyak 367 km^3 per hari maka pada tahun 2025 diperlukan air bersih sebanyak 492 km^3 per hari dan pada tahun 2100 diperlukan air bersih sebanyak 611 km^3 per hari. Meningkatnya aktivitas manusia menyebabkan pencemaran air dari limbah rumah tangga, pertanian, dan industri menjadi masalah mendesak terutama di negara berkembang seperti Indonesia yang jika tidak dikelola dapat berdampak buruk pada lingkungan (Buhani *et al.*, 2021).

Limbah industri tekstil, khususnya yang mengandung pewarna seperti *malachite green*, menjadi salah satu penyebab utama pencemaran air. Pewarna ini bersifat toksik, dapat menyebabkan iritasi, kanker, dan mutasi genetik (Sukmawati dan Utami, 2014). Dalam proses pewarnaan, hanya 10–15% pewarna menempel pada produk akhir, sementara 85–90% sisanya menjadi limbah yang mencemari air dan tanah jika tidak diolah dengan benar. *Malachite green* juga sulit terdegradasi secara alami karena struktur kimianya yang stabil dan kompleks, terutama ikatan rangkap konjugasi yang membuatnya tahan terhadap fotodegradasi dan biodegradasi. Selain zat warna, limbah yang perlu diperhatikan adalah pencemaran ion Mn(II) , yang berasal dari bahan aktif dalam batu baterai bekas

dan pembuangan ke sungai atau pesisir. Sumber lain termasuk pertambangan dan aktivitas mikroba pada mineral ion Mn(II) di lingkungan dengan potensial redoks (pE) rendah (Sari dkk., 2016). Air yang mengandung ion Mn berlebih menimbulkan rasa, perubahan warna (coklat, ungu, atau hitam), dan kekeruhan. Batas kandungan ion Mn yang diizinkan dalam air domestik adalah di bawah 0,05 mg/L. Jika dikonsumsi dalam air minum, ion Mn bersifat neurotoksik dengan gejala seperti insomnia, kelemahan otot, dan gangguan sistem saraf (Febrina dan Ayuna, 2019).

Metode adsorpsi dianggap sangat efektif untuk pengolahan limbah karena sederhana dan tidak menghasilkan limbah beracun, sehingga lebih aman bagi lingkungan dibandingkan metode lain yang memerlukan bahan kimia berbahaya (Buhani *et al.*, 2015; Buhani *et al.*, 2019). Selain itu, proses adsorpsi bersifat *reversibel* di mana adsorbat yang telah terikat pada permukaan adsorben dapat dilepaskan kembali melalui proses desorpsi. Hal ini memungkinkan adsorben digunakan kembali tanpa mengurangi efektivitasnya, menjadikan metode ini lebih ekonomis karena biaya yang dibutuhkan lebih rendah. Keunggulan lainnya adalah metode ini tidak menimbulkan produk samping yang berbahaya, menjadikannya ramah lingkungan dan lebih berkelanjutan dalam pengolahan limbah. Adsorben yang digunakan dalam proses adsorpsi harus memiliki karakteristik ramah lingkungan, kapasitas adsorpsi yang besar, stabilitas kimiawi, serta kecepatan adsorpsi yang tinggi seperti adsorben yang terbuat dari cangkang kelapa sawit yang dianggap sangat efektif dalam aplikasi ini (Buhani *et al.*, 2020).

Berbagai inovasi kini dikembangkan untuk memanfaatkan limbah pertanian dan perkebunan, termasuk cangkang kelapa sawit sebagai bahan baku adsorben (Buhani *et al.*, 2019). Cangkang kelapa sawit yang sebelumnya dianggap kurang bernilai mengandung hemiselulosa (24%), selulosa (40%), dan lignin (21%) yang semuanya memiliki kandungan karbon tinggi menjadikannya material potensial untuk pembuatan karbon aktif atau adsorben (Lestari dkk., 2021). Limbah kelapa sawit, baik padat maupun cair, adalah sisa dari proses pengolahan yang bukan produk utama industri. Saat ini, cangkang kelapa sawit dapat diolah menjadi adsorben efektif untuk menyerap zat warna atau polutan dari limbah cair

memberikan nilai tambah yang signifikan. Beberapa penelitian telah dilakukan oleh Lestari dkk. (2021) dan Buhani *et al.* (2019) yang mengembangkan adsorben berbasis cangkang kelapa sawit untuk mengadsorpsi zat seperti kristal violet dengan aktivator H_3PO_4 serta melalui aktivasi fisika.

Karbon sebagai adsorben sangat efektif mengadsorpsi berbagai zat, namun sering terkendala contohnya dalam filtrasi dan sentrifugasi dikarenakan ukuran partikel kecil dan berat molekul yang ringan (Buhani *et al.*, 2017). Pelapisan karbon dengan magnetit (Fe_3O_4) dapat meningkatkan sifat magnetik dan berat molekulnya, sehingga mempermudah proses filtrasi (Buhani *et al.*, 2013; Buhani *et al.*, 2019). Namun, pelapisan ini juga memiliki kekurangan seperti dapat menyumbat pori-pori karbon, sehingga dapat mengurangi luas permukaan aktif dan kapasitas adsorpsi. Akibatnya, efektivitas karbon sebagai adsorben mengalami penurunan yang signifikan. Penurunan ini berdampak pada kemampuan karbon dalam menyerap zat tertentu. Untuk mengatasi masalah ini, dilakukan modifikasi dengan silanisasi menggunakan organosilan (3-Aminopropyl)triethoxysilane (APTES), yang membantu membentuk ikatan antara material organik dan anorganik (Wong *et al.*, 2016). Proses ini diharapkan meningkatkan kapasitas adsorpsi karbon setelah pelapisan magnetit (Liu *et al.*, 2013).

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini akan dilakukan modifikasi karbon dari cangkang kelapa sawit dengan magnetit dan (3-Aminopropyl)triethoxysilane (APTES) sebagai adsorben ion $Mn(II)$ dan zat warna *malachite green*. Adsorben yang telah termodifikasi akan dikarakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX) untuk mengetahui morfologi permukaan adsorben dan mengidentifikasi kandungan unsur kimia yang terdapat pada permukaan adsorben, *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui 4 tingkat kristalinitas karbon, *Fourier Transform Infrared* (FTIR) untuk mengetahui gugus fungsi dalam adsorben, *Brunauer-Emmett-Teller* (BET) *surface area* untuk mengetahui luas permukaan adsorben, Spektrofotometer Serapan Atom (SSA) untuk mengetahui kapasitas adsorpsi logam, dan Spektrofotometer Ultraviolet dan

Visible (UV-Vis) untuk mengetahui kapasitas adsorpsi zat warna dari karbon cangkang buah kelapa sawit termodifikasi.

1.2. Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah dipaparkan di atas, penelitian ini dilakukan dengan tujuan :

1. Mempelajari cara memodifikasi karbon dari cangkang buah kelapa sawit dengan magnetit dan silanisasi (3-*Aminopropyl*)triethoxysilane (APTES), serta karakterisasi karbon hasil modifikasi.
2. Menentukan dosis, pH, waktu kontak, dan konsentrasi optimum adsorpsi ion Mn(II) dan zat warna *malachite green* oleh adsorben karbon cangkang buah kelapa sawit termodifikasi.
3. Menentukan model kinetika dan isoterm karbon cangkang buah kelapa sawit termodifikasi.
4. Menentukan desorpsi dan kemampuan penggunaan ulang adsorben karbon cangkang buah karet termodifikasi terhadap zat warna *malachite green*.

1.3. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini yaitu untuk memberikan informasi mengenai proses, hasil modifikasi, dan karakteristik dari adsorben dari cangkang kelapa sawit dengan magnetit dan silanisasi (3-*Aminopropyl*)triethoxysilane (APTES) terhadap adsorpsi ion Mn(II) dan zat warna *malachite green* untuk mengatasi permasalahan lingkungan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Cangkang Kelapa Sawit

Salah satu komoditas perkebunan yang mempunyai peranan penting dalam perekonomian Indonesia adalah kelapa sawit. Kelapa sawit merupakan tanaman perkebunan penting penghasil minyak makanan, minyak industri maupun bahan bakar nabati (biodiesel) (Rosmegawati, 2021). Tanaman kelapa sawit (*Elaeis Guineensis* Jacq.) dikenal berasal dari Nigeria, Afrika Barat. Namun, ada juga yang berpendapat bahwa tanaman ini berasal dari Amerika Selatan khususnya Brazil karena lebih banyak spesies kelapa sawit yang ditemukan di hutan-hutan Brazil dibandingkan dengan Afrika. Di Indonesia, kelapa sawit pertama kali dikenalkan oleh Pemerintah Kolonial Belanda pada tahun 1848. Klasifikasi tanaman kelapa sawit menurut Pahan (2008) sebagai berikut:

Divisi : Embryophita Siphonagama
Kelas : Angiospermae
Ordo : Monocotyledonae
Famili : Arecaceae
Subfamily : Cocoideae
Genus : *Elaeis*
Species : *E. guineensis* Jacq., *E. Oleife*, dan *E. odora*

Kelapa sawit mulai populer setelah Revolusi Industri akhir abad ke-19 karena meningkatnya permintaan minyak nabati untuk pangan dan industri. Minyak sawit menjadi pilihan utama berkat produktivitasnya yang tinggi dan serba guna, digunakan dalam makanan, sabun, serta pelumas. Ketersediaannya yang melimpah menjadikannya sumber daya penting bagi industri modern. Proses produksi 1 ton kelapa sawit dapat menghasilkan limbah padatan tankos/tandan

kosong kelapa sawit sebesar 23% atau 230 kg, limbah serat (*fiber*) sebesar 13% atau 130 kg, dan juga limbah cangkang inti sebesar 6,5% atau 65 kg (Arifandy *et al.*, 2021). Limbah cangkang diperoleh dari adanya pemecahan inti kelapa sawit (*kernel*) pada bagian pengolahan cangkang di pabrik kelapa sawit. Kandungan dari cangkang kelapa sawit terdiri dari lignin 50,7%, selulosa 20,8%, dan hemiselulosa 22,7%. Kandungan pada limbah cangkang adalah C 46,75%, O 37,97%, H 5,92%, K 0,15%, N 0,3 - 0,6% dan P 0,01% (Meesters *and* Bakker, 2013). Berdasarkan komponen dari limbah cangkang tersebut, maka limbah cangkang juga dapat dipergunakan sebagai arang, karbon aktif (Bantacut dan Pasaribu, 2015). Cangkang kelapa sawit ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Cangkang kelapa sawit.

Komponen penyusun cangkang buah karet menurut Candini dkk (2024) disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia cangkang kelapa sawit

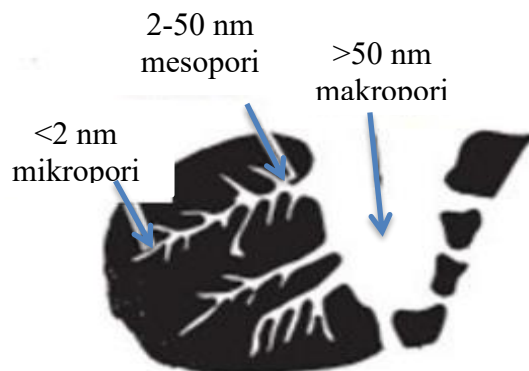
Komponen Penyusun	Presentase
Selulosa	26,27%
Lignin	42,96%
Hemiselulosa	12,61%

2.2. Karbon

Karbon merupakan salah satu material yang memiliki beragam morfologi, diantaranya: karbon koloidal, *nanotube*, *fullerenese*, grafit, grafen, *colloidal sphere*, *nanofiber*, *porous carbon*, *nanowire*, dan karbon aktif. Perbedaan

morfologi ini akan berakibat pada luasnya aplikasi dari karbon tersebut, seperti: pendukung katalis, adsorben, penyimpan gas, teknologi pemisahan, elektroda baterai, *template* material berpori, sel bahan bakar, dan sel biologis. Selain dari morfologi dan aplikasinya yang luas, partikel karbon juga banyak diteliti karena memiliki beberapa keunggulan, seperti: tidak berbahaya, murah, kapasitas volumetrik tinggi, kapasitas reforsibel tinggi, mudah dikompositkan, berlimpah, murah, dan stabil (Rahman dkk., 2015). Karbon aktif atau sering juga disebut sebagai arang aktif, merupakan suatu jenis karbon yang memiliki luas permukaan sangat besar. Arang merupakan suatu padatan berpori yang mengandung 85-95% karbon, dihasilkan dari bahan-bahan yang mengandung karbon dengan pemanasan pada suhu tinggi. Arang selain digunakan sebagai bahan bakar, juga dapat digunakan sebagai adsorben (penyerap) dan *support* katalis.

Salah satu bentuk karbon yang paling banyak digunakan adalah karbon aktif, atau arang aktif, yang merupakan karbon amorf dengan luas permukaan antara 300 hingga 3.500 m²/g. Karbon aktif memiliki struktur internal berpori yang memungkinkan kemampuan adsorpsi tinggi, antara 25–100% dari beratnya. Karbon aktif diproduksi melalui dua tahap utama, yaitu karbonisasi dan aktivasi. Aktivasi dapat dilakukan secara fisik, menggunakan gas seperti N₂, CO₂, atau uap air, maupun secara kimia dengan menggunakan agen aktivasi seperti KOH, NaOH, ZnCl₂, atau H₃PO₄ (Handika dkk., 2017). Struktur permukaan karbon aktif adalah berpori-pori. Berdasarkan IUPAC, ukuran pori diklasifikasikan menjadi daerah mikropori, daerah mesopori, dan daerah makropori. Skema struktur pori karbon aktif dapat dilihat pada Gambar 2.

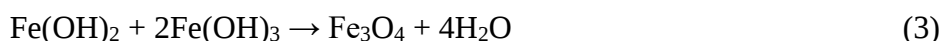


Gambar 2. Ukuran pori karbon aktif mikropori, mesopori, dan makropori (Handika dkk., 2017).

2.3. Magnetit

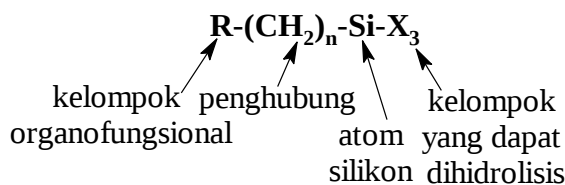
Di antara semua jenis oksida besi, magnetit (Fe_3O_4) memiliki struktur kristal yang unik dengan adanya kation besi dengan dua keadaan valensi yaitu Fe^{2+} dan Fe^{3+} di situs tetrahedral dan oktahedral dan memiliki struktur spinel gugus terbalik.

Magnetit bersifat paramagnetik sehingga banyak digunakan dalam ekstraksi fasa padat. Magnetit telah banyak dikembangkan sebagai adsorben logam, namun beberapa tahun terakhir, magnetit banyak dimodifikasi dengan bahan anorganik maupun organik untuk menghasilkan material yang bersifat magnet. Tujuan modifikasi menggunakan magnetit adalah untuk menghasilkan material yang memiliki sifat kemagnetan yang tinggi, sehingga dapat digunakan untuk metode ekstraksi fasa padat menggunakan medan magnet eksternal dalam proses aplikasinya (Putri dan Rahmayanti, 2020). Selain itu modifikasi menggunakan senyawa magnetit juga bertujuan untuk menghasilkan material dengan ukuran partikel yang lebih kecil. Magnetit Fe_3O_4 dapat dihasilkan dari campuran $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dalam suasana basa (Lee *et al.*, 2004). Menurut Petcharoen *and* Sirivat (2012), proses pembentukan magnetit dapat dijelaskan berdasarkan Persamaan 1, 2, dan 3 reaksi berikut:



2.4. Silanisasi

Silane coupling agent memiliki kemampuan untuk membentuk ikatan yang tahan lama antara bahan organik dan anorganik. Pertemuan antara bahan-bahan yang berbeda sering melibatkan setidaknya satu komponen yang mengandung silica atau seperti aluminat, borat, dan lain-lain yang merupakan komponen kerak bumi. *Interface* yang melibatkan bahan-bahan tersebut, menjadi bagian kimia yang dinamis dimana telah dimodifikasi untuk menggabungkan sifat-sifat suatu fasa yang banyak dan berbeda ke dalam struktur komposit yang beragam. Struktur umum *silane coupling agent* dapat dilihat dari Gambar 3.



Gambar 3. Struktur umum *silane coupling agent* (Arkles, 2006).

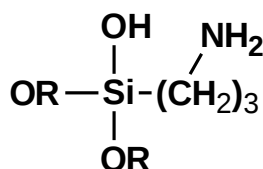
Rumus umum untuk silane coupling agent menunjukkan kelas dua dari *functionality*. X adalah gugus yang dapat terhidrolisis seperti alkoksi, asiloksi, halogen, atau amina. Setelah hidrolisis, gugus silanol akan reaktif terbentuk yang dapat berkondensasi dengan gugus silanol lain contohnya pada *surface* yang mengandung silika untuk membentuk ikatan siloksan. Produk Kondensasi yang stabil juga terbentuk dengan oksida lain seperti alumunium, zirkonium, timah, titanium, dan nikel. Ikatan yang kurang stabil terbentuk dengan oksida boron, besi, dan karbon. Oksida logam alkali dan karbonat tidak membentuk ikatan yang stabil dengan Si-O-. Gugus R adalah radikal organik yang tidak dapat dihidrolisis yang mungkin memiliki fungsi yang memberikan karakteristik yang diinginkan (Arkles, 2006). Peningkatan kemampuan adsorpsi dari adsorben didapatkan setelah dilakukan modifikasi menggunakan organosilan (Buhani dkk., 2009). Beberapa faktor yang mempengaruhi proses silanisasi diantaranya adalah konsentrasi silan, waktu silanisasi, suhu larutan, dan kelembaban (Gunda *et al.*, 2014).

2.4.1. (3-Aminopropyl)triethoxysilane

(3-Aminopropyl)triethoxysilane (APTES) adalah molekul organosilane yang sering digunakan dalam proses fungsionalisasi berbasis silan yang menempelkan biomolekul ke permukaan. Organosilane adalah molekul berbasis silikon yang memiliki rumus umum $\text{R}'(\text{CH}_2)_n\text{Si}(\text{OR})_3$, di mana R' adalah gugus organofungsional dan R adalah gugus alkoksi yang dapat dihidrolisis. Di antara semua organosilane, APTES adalah molekul silan yang paling banyak digunakan untuk memfungsikan permukaan oksida. Permukaan oksida adalah permukaan yang memiliki gugus hidroksil (-OH) yang mengandung energi permukaan tinggi yang dapat berinteraksi dengan cepat dan membentuk ikatan kovalen dengan

molekul silan. Karena ikatan kovalen yang kuat ini, bioreseptor dapat melekat secara kimiawi ke lapisan silan melalui interaksi muatan-ke-muatan atau pengikat silang bifungsional tanpa mengganggu struktur silan. Permukaan oksida yang paling banyak dipelajari mengandung gugus Si-OH dan Me-OH (Me: logam). Karena keserbagunaan morfologis, stabilitas kimia, dan sifat antarmuka fisikokimianya, bahan oksida telah digunakan secara luas dalam pengembangan biosensor (Sypabekova *et al.*, 2023).

Dalam penelitian (Anbealagan *et al.*, 2021), APTES telah dipilih untuk digunakan sebagai *silane coupling agen* karena telah banyak digunakan untuk berbagai aplikasi dan juga dapat dianggap sebagai salah satu *silane coupling agen* yang lebih murah dibandingkan dengan yang lain. APTES terdiri dari gugus amina (NH₂) dan tiga gugus etoksi yang dapat melekat pada permukaan zeolit. Senyawa tersebut dapat berikatan dengan logam oksida melalui adsorpsi atau ikatan kovalen sehingga dapat digunakan untuk memodifikasi karbon magnetit (Yamaura *et al.*, 2004). Berikut struktur APTES dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Struktur (3-Aminopropyl)triethoxysilane (APTES) (Anbealagan *et al.*, 2021).

2.5. Analisis Proksimat

Analisis proksimat karbon aktif adalah metode yang digunakan untuk menentukan komposisi dasar karbon aktif dengan mengukur kandungan kadar air, abu, zat mudah menguap, dan karbon tetap (*fixed carbon*). Analisis ini penting untuk mengetahui kualitas dan sifat adsorptif karbon aktif.

2.5.1. Analisis Kadar Air

Analisis kadar air bertujuan untuk menentukan jumlah air yang terkandung dalam material, yang akan menguap selama proses pemanasan. Ketika molekul-molekul air hilang dari arang aktif, struktur pori-porinya mengalami ekspansi, meningkatkan ruang kosong di dalamnya. Hal ini dapat berdampak pada peningkatan kapasitas adsorpsi arang aktif, karena lebih banyak pori terbuka untuk menyerap zat lain. Selain itu, penghilangan air yang efisien dapat meningkatkan stabilitas arang aktif selama digunakan, karena kadar air yang rendah juga mengurangi risiko degradasi material selama proses adsorpsi. Pori-pori semakin besar maka semakin besar luas permukaan arang aktif tersebut. Peningkatan luas permukaan ini meningkatkan kapasitas adsorpsi karbon aktif. Semakin tinggi kapasitas adsorpsi karbon aktif, baik mutu arang aktif. Air yang tinggi akan mempengaruhi sifat higroskopis arang (Rahma dan Kurniawati, 2022). Kadar air dapat dihitung dengan Persamaan 4 (Sulaiman dkk., 2017) berikut:

$$\text{Kadar air (\%)} = \frac{(a - b)}{a} \times 100\% \quad (4)$$

Keterangan:

a = massa awal karbon aktif (g)

b = massa akhir karbon aktif (g)

2.5.2. Analisis Kadar Zat Mudah Menguap (*Volatile*)

Penentuan kadar zat mudah menguap dilakukan untuk mengetahui jumlah zat yang masih tersisa pada karbon aktif. Penggunaan bahan kimia sebagai aktivator menyebabkan kontaminasi pada arang yang diperoleh. Secara umum, aktivator menyisakan residu, seperti oksida yang tidak larut dalam air, ketika dicuci. Kandungan zat volatil memenuhi standar yang ditetapkan. Memang, suhu aktivasi yang tinggi menyebabkan dekomposisi lengkap seperti CO₂, CO, CH dan H₂ (Rahma dan Kurniawati, 2022). Analisis kadar zat mudah menguap dapat dihitung menggunakan Persamaan 5 (Muhajir dkk., 2021).

$$\text{Kadar volatile} = \frac{\text{bobot contoh yang hilang}}{\text{bobot contoh awal}} \times 100\% \quad (5)$$

2.5.3. Analisis Kadar Abu

Analisis abu dilakukan untuk mengetahui kandungan oksida logam dalam karbon aktif. Karbon aktif terdiri dari lapisan tumpang tindih yang membentuk pori-pori. Situs di pori-pori sering mengandung kotoran berupa mineral anorganik dan oksida logam yang menutupi pori-pori. Selama proses aktivasi, kotoran juga menguap, menyebabkan pori-pori terbuka. Hal ini menghasilkan luas permukaan karbon aktif yang lebih besar. Kadar abu diasumsikan sebagai residu mineral yang tersisa dari karbonisasi, karena bahan alami dari mana karbon dibuat tidak hanya senyawa karbon tetapi juga mineral, beberapa di antaranya hilang selama karbonisasi, beberapa di antaranya diharapkan untuk tinggal dalam karbon. Kadar abu sangat mempengaruhi kualitas karbon yang dihasilkan. Adanya abu yang terlalu banyak dapat menyebabkan tersumbatnya pori-pori karbon sehingga luas permukaan karbon berkurang (Rahma dan Kurniawati, 2022). Analisis kadar abu dapat dihitung menggunakan Persamaan 6 (Muhajir dkk., 2021).

$$\text{Kadar abu (\%)} = \frac{\text{bobot contoh sisa abu}}{\text{bobot contoh awal}} \times 100\% \quad (6)$$

2.5.4. Analisis Kadar Karbon Terikat

Analisis karbon terikat untuk mengetahui kadar karbon murni setelah karbonisasi dan aktivasi. Besar kecilnya kandungan karbon terikat dipengaruhi oleh *volatile matter* dan kandungan abu. Selain itu, kandungan karbon terikat juga dipengaruhi oleh kandungan selulosa dan lignin bahan baku. Kandungan karbon terikat yang rendah dapat dipengaruhi oleh banyaknya karbon yang bereaksi dengan uap air untuk menghasilkan CO dan CO₂. Kadar karbon merupakan selisih dari persentase total dengan jumlah persentase kadar abu ditambah kadar zat mudah menguap (*volatile*). Secara matematis dihitung dengan Persamaan 7 (Rahma dan Kurniawati, 2022).

$$\text{Karbon terikat} = 100\% - (\% \text{ kadar air} + \% \text{ abu} + \% \text{ zat mudah menguap}) \quad (7)$$

2.5.5. Daya Serap Iod

Penentuan kapasitas adsorpsi iodium merupakan syarat umum untuk menentukan kualitas karbon aktif, guna melihat kemampuan karbon aktif menyerap molekul yang lebih kecil. Semakin tinggi nilai bilangan iodium yang dihasilkan, semakin banyak kapasitas karbon aktif dalam menyerap zat adsorbat. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah pori yang terbentuk pada karbon aktif juga semakin besar. Metode yang digunakan dalam menganalisis kapasitas adsorpsi dalam larutan iodium adalah metode titrasi iodium. Efisiensi arang dapat diketahui melalui kapasitas adsorpsi terhadap suatu substrat. Kapasitas adsorpsi ini dinyatakan dengan bilangan iodium, yang menunjukkan kemampuan arang dalam mengadsorpsi iodium. Semakin tinggi bilangan iodium, semakin besar kapasitas adsorpsi arang. Ketika larutan iodium ditambahkan sebagai adsorbat, arang aktif akan mengadsorpsinya, yang mencerminkan efektivitas arang sebagai adsorben. Penambahan larutan iodium diserap oleh arang aktif. Penyerapan larutan iodium dinyatakan sebagai penurunan konsentrasi larutan iodium. Penyerapan larutan iodium diwakili oleh penurunan konsentrasi larutan iodium. Pengukuran sisa iodium dapat dilakukan dengan titrasi iodin dengan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0,1 N dan kanji sebagai indikator yang digunakan. Rendahnya persentase kadar abu, air dan mudah menguap yang diperoleh merupakan salah satu faktor yang membuat iodium sangat terserap dalam karbon aktif (Rahma dan Kurniawati, 2022). Daya serap iodium dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 8 (Muhajir dkk., 2021).

$$\text{BI} = \frac{25}{5} \times \frac{\text{Vol. titrasi blanko} - \text{Vol. titrasi bahan}) \times \text{Be iod} \times \text{N}}{\text{Berat Karbon Aktif (W)}} \quad (8)$$

Keterangan :

BI = daya serap iodin (mg/g)

Be iod = 126,93 (berat molekul iodium dalam satuan mg/mmol)

N = Normalitas $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (N)

W = berat karbon aktif (g)

$\frac{25}{5}$ = 25 adalah volume larutan iodin standar (25 mL) dan 5 adalah faktor pembagi untuk menyesuaikan satuan menjadi mg/g.

2.6. Logam

Logam berat umumnya memiliki sifat salah satunya beracun dan berbahaya bagi makhluk hidup, meskipun beberapa di antaranya dibutuhkan dalam jumlah kecil. Beberapa logam berat banyak juga dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari. Tidak seperti logam biasa, logam berat akan cenderung memberikan dampak khusus pada makhluk hidup dan dapat dikatakan bahwa semua logam berat berpotensi menjadi racun bagi tubuh makhluk hidup. Namun, logam berat tidak akan mencemari lingkungan atau bersifat toksik jika penggunaannya yang sudah sesuai dengan kebutuhan yang diperlukan tubuh sehari-hari. Logam berat diartikan sebagai elemen kimia dengan densitas lebih dari 5 g/cm^3 , biasanya memiliki nomor atom antara 22 hingga 92, dan berada pada periode 4 hingga 7 dalam tabel periodik unsur (Suhendrayatna, 2001).

Menurut Sasongko (2002), sifat logam berat yaitu diantaranya:

1. Sulit didegradasi, sehingga mudah terakumulasi dalam lingkungan perairan dan keberadaannya secara alami sulit terurai atau berubah.
2. Dapat terakumulasi dalam organisme termasuk kerang dan ikan, yang nantinya dapat membahayakan kesehatan manusia yang mengkonsumsinya.
3. Mudah terakumulasi di sedimen, sehingga konsentrasinya selalu lebih tinggi dari konsentrasi logam dalam air.

2.6.1. Mangan(II)

Mangan (Mn) merupakan unsur logam yang termasuk golongan VII, dengan berat atom 54,93, titik lebur 1247°C , dan titik didihnya 2032°C . Mangan sebagai metal berwarna kelabu-kemerahan, di alam umumnya ditemui dalam bentuk senyawa dengan berbagai macam valensi. Air yang mengandung ion Mn berlebih menimbulkan rasa, warna (coklat/ungu/hitam), dan kekeruhan. Toksisitas ion Mn relatif sudah tampak pada konsentrasi rendah. Kandungan ion Mn yang diizinkan dalam air yang digunakan untuk keperluan domestik yaitu dibawah $0,05 \text{ mg/L}$. Air yang berasal dari sumber tambang asam dapat mengandung ion Mn terlarut dengan konsentrasi $\pm 1 \text{ mg/L}$. Pada pH yang agak tinggi dan kondisi aerob

terbentuk ion Mn yang tidak larut seperti MnO_2 , Mn_3O_4 , atau MnCO_3 meskipun oksidasi dari Mn(II) itu berjalan relatif lambat (Achmad, 2004).

Dalam jumlah yang kecil, ion Mn dalam air tidak menimbulkan gangguan kesehatan, melainkan bermanfaat dalam menjaga kesehatan otak dan tulang, berperan dalam pertumbuhan rambut dan kuku, serta membantu menghasilkan metabolisme tubuh enzim untuk mengubah karbohidrat dan protein membentuk energi yang akan digunakan. Tetapi dalam jumlah yang besar, ion Mn dalam air minum bersifat neurotoksik. Gejala yang timbul berupa gejala susunan syaraf, insomnia, kemudian lemah pada kaki dan otot (Febrina dan Ayuna, 2019). Pencemaran ion Mn berasal dari bahan zat aktif di dalam batu baterai yang telah habis digunakan dan dibuang ke sungai maupun pesisir. Selain itu sumber pencemaran logam mangan juga berasal dari pertambangan, saluran tambang atom, kerja mikroba terhadap mineral mangan pada potensial redoks (pE) (Sari dkk., 2016). Spektrofotometer Serapan Atom (SSA) dapat digunakan untuk menentukan konsentrasi logam Mn(II) dalam suatu larutan dengan penyerapan maksimum puncak pada panjang gelombang 283,3 nm (Indra dkk., 2020).

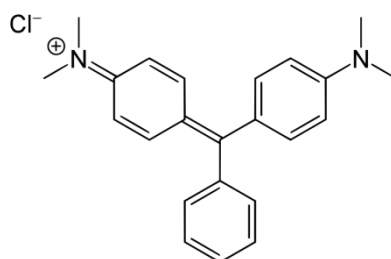
2.7. Zat Warna

Zat warna merupakan salah satu limbah cair yang dihasilkan oleh industri tekstil yang tidak dapat terserap sempurna, hal ini akan mengakibatkan pencemaran lingkungan apabila tidak diolah dengan baik. Zat warna digunakan dalam jumlah yang banyak untuk mewarnai produk sehingga menjadi sumber utama adanya limbah zat warna tersebut (Hayu dkk., 2021). Secara umum, zat warna yang diproduksi mengandung gugus azo, yang terdiri dari dua atom nitrogen dengan ikatan azo ($\text{N}=\text{N}-$) dan dilengkapi dengan gugus penstabil. Zat pewarna sintetis digunakan secara luas di berbagai sektor industri, termasuk industri kertas, tekstil, dan percetakan. Pewarna ini umumnya berasal dari bahan sintetis dan memiliki struktur molekul aromatik yang kompleks, membuatnya lebih stabil dan sulit terurai. Zat pewarna dibagi menjadi tiga kategori: kationik, anionik, dan non-ionik. Pewarna kationik biasanya digunakan sebagai pewarna dasar, sedangkan pewarna non-ionik dimanfaatkan dalam pewarnaan pada serat sintetis dengan cara

menyebarkannya secara merata selama proses pewarnaan (Fu and Viraraghavan, 2001). Zat warna anionik biasanya digunakan dalam pewarnaan langsung, asam, dan reaktif. Komponen utama dalam zat warna anionik dan non-ionik sebagian besar terdiri dari senyawa azo atau antrakuinon. Senyawa azo dapat menghasilkan amina beracun dalam limbah, sementara senyawa antrakuinon lebih sulit terurai karena strukturnya yang aromatik, sehingga zat ini tetap berwarna dalam air limbah untuk jangka waktu yang lebih lama (Aksu, 2005).

2.7.1. *Malachite Green*

Pencemaran lingkungan perairan akibat limbah industri tekstil disebabkan oleh penggunaan zat warna dalam jumlah besar yang tidak diolah dengan benar dan tepat. Salah satu zat pewarna yang banyak digunakan adalah *malachite green*. Zat ini bersifat toksik, dapat menyebabkan iritasi pada kulit dan mata, memicu kanker, serta dalam kasus yang lebih serius dapat mengakibatkan mutasi (Sukmawati dan Utami, 2014). *Malachite green* ($C_{23}H_{26}N_2O$) adalah zat kimia yang memiliki sifat toxic. Struktur kimia *malachite green* yang termasuk zat warna kationik ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Struktur *malachite green* (Sukmawati dan Utami, 2014).

Malachite green merupakan zat warna dasar untuk celup. Bahan dasar celup merupakan garam dari warna dasar organik yang mengandung amino dan imino kelompok dan juga dikombinasikan dengan warna asam, seperti asam klorida. *Malachite green* mempunyai warna yang paling cemerlang dibandingkan bahan celup sintetis lainnya. Bahan celup dasar adalah kationik yang mempunyai muatan positif dan digunakan untuk kain anionik yang bermuatan negatif seperti wol, sutra, dan nilon. Pewarna kimia ini terutama digunakan untuk pewarna sutra, kulit dan kertas. *Malachite green* mempunyai kegunaan yang luas dalam bidang medis

sebagai antiseptik lokal. Ini efektif untuk membunuh parasit dan bakteri gram positif. Akumulasi zat warna Malachite green dalam tubuh makhluk hidup dapat mempengaruhi sistem kekebalan tubuh, sistem reproduksi dan bersifat karsinogenik serta gemotoksik. Meskipun penggunaan pewarna ini telah dilarang di beberapa Negara dan dilarang oleh US Food and Drug Administration, namun masih digunakan di banyak belahan dunia. Hal ini karena harganya murah, mudah ditemukan, dan efek yang dihasilkan menarik. Kadar Malachite green yang diperbolehkan diperairan adalah 0,01 ppm (Sukmawati dan Utami, 2014).

2.8. Adsorpsi

Adsorpsi merupakan proses penyerapan zat terlarut dalam fluida oleh permukaan padatan (adsorben), membentuk lapisan tipis (adsorbat) melalui ikatan fisikokimia. Metode ini banyak digunakan karena relatif sederhana dan dapat memanfaatkan bahan alam seperti biomassa sebagai adsorben (Purwitaari dkk., 2022). Penggunaan adsorpsi menjadi penting karena sumber air alam rentan terhadap kontaminasi oleh limbah industri, rumah tangga, aktivitas pertanian, serta mikroorganisme dan partikel berbahaya yang dapat menurunkan kualitas air dan membahayakan kesehatan serta lingkungan.

Adsorpsi memiliki 2 tipe, yaitu adsorpsi fisik (Van der Waals) dan adsorpsi kimia. Proses adsorpsi pada umumnya dapat dibagi menjadi 2 yaitu:

a. Adsorpsi fisika

Adsorpsi fisika adalah proses interaksi antara adsorben dengan adsorbat yang melibatkan gaya-gaya antar molekul seperti gaya Van Der Waals (Zulfania dkk., 2022). Adsorpsi fisika terjadi karena adanya gaya – gaya fisika. Pada adsorpsi fisika, terjadi beberapa lapisan gas. Besarnya energi adsorpsi fisika ± 10 kJ/mol. Molekul – molekul yang di adsorpsi secara fisika tidak terikat kuat pada permukaan, dan biasanya terjadi proses balik yang cepat (*reversibel*), sehingga mudah untuk diganti dengan molekul lain. Adsorpsi fisika didasarkan pada gaya Van Der Waals serta dapat terjadi pada permukaan yang polar dan non polar. Adsorpsi juga mungkin terjadi dengan mekanisme pertukaran ion. Permukaan padatan dapat mengadsorpsi ion – ion dari larutan dengan mekanisme pertukaran

ion. Oleh karena itu, ion pada gugus senyawa permukaan padatan adsorbennya dapat bertukar tempat dengan ion – ion adsorbat. Mekanisme pertukaran ini merupakan penggabungan dari mekanisme kemisorpsi dan fisorpsi, karena adsorpsi jenis ini akan mengikat ion – ion yang di adsorpsi dengan ikatannya secara kimia, tetapi ikatan ini mudah dilepaskan kembali untuk dapat terjadinya pertukaran ion (Atkins, 1990).

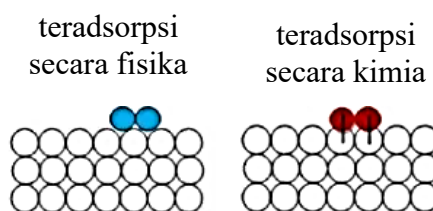
b. Adsorpsi Kimia

Adsorpsi kimia terjadi jika terdapat pembentukan ikatan kimia antara adsorben dan adsorbat (Zulfania *et al.*, 2022). Proses ini melibatkan gaya-gaya kimia dan disertai reaksi kimia sehingga terbentuk senyawa baru. Energi adsorpsi kimia cukup besar, yaitu sekitar ± 100 kJ/mol, dan ikatannya bersifat kuat sehingga sulit terlepas kembali (*irreversibel*). Dengan demikian, proses kemisorpsi terjadi satu lapisan dan pelepasan molekulnya juga lebih sulit (Alberty, 1997). Karakteristik adsorpsi fisika dan kimia dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik dari adsorpsi secara fisik dan kimia (Botahala, 2022).

No	Adsorpsi Secara Fisika (<i>Physisorptions</i>)	Adsorpsi Secara Kimia (<i>Chemisorptions</i>)
1.	Molekul terikat pada adsorben oleh gaya Van Der Waals	Molekul terikat pada adsorben oleh ikatan kimia
2.	Hanya melibatkan interaksi molekul yang lemah, perubahan entalpi yang terkait kecil (dalam kisaran 4-40 kJ/mol)	Perubahan entalpi cukup besar dan dapat berkisar dari 80-400 kJ/mol
3.	Membentuk lapisan <i>multilayer</i>	Membentuk lapisan <i>monolayer</i>
4.	Adsorpsi hanya terjadi pada suhu di bawah titik didih adsorbat	Adsorpsi dapat terjadi pada suhu tinggi
5.	Jumlah adsorpsi pada permukaan merupakan fungsi adsorbat	Jumlah adsorpsi pada permukaan merupakan fungsi adsorbat
6.	Tidak melibatkan energi	Melibatkan energi aktivasi

Representasi proses adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia dapat dilihat pada ilustrasi Gambar 6.



Gambar 6. Proses adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia (Botahala, 2022).

Beberapa faktor yang mempengaruhi adsorpsi, yakni:

1. Pengadukan (*agitation*)

Peningkatan kecepatan agitasi pada adsorpsi meningkatkan kapasitas adsorpsi dan persentase efisiensi penyisihan adsorbat karena interaksi yang lebih baik dengan permukaan selama pencampuran. Pencampuran yang ditingkatkan memberikan fluiditas tinggi dalam lingkungan fase curah untuk meningkatkan interaksi antar molekul adsorben dan adsorbat (Ifa dkk., 2021).

2. Konsentrasi adsorbat awal

Peningkatan konsentrasi adsorbat awal meningkatkan kapasitas adsorpsi tetapi menurunkan % penyisihan adsorbat karena ketersediaan situs aktif pada permukaan adsorben (Ifa dkk., 2021).

3. Ukuran partikel adsorben

Pengaruh ukuran partikel pada adsorpsi adsorbat ke adsorben bahwa peningkatan ukuran partikel menyebabkan peningkatan yang sesuai dalam kapasitas adsorpsi dan persentase penyisihan adsorbat. Penyerapan secara langsung berhubungan dengan luas permukaan yang tersedia; maka adsorben dengan luas permukaan tertinggi telah menggambarkan persentase penghapusan maksimum. Luas permukaan adsorben merupakan parameter penting untuk adsorpsi. Paparan situs adsorben untuk interaksi ion logam padat tinggi jika luas permukaan adsorben tinggi. Semakin kecil ukuran partikel semakin tinggi luas permukaan per satuan berat adsorben dan karenanya diharapkan persentase penyisihan logam yang lebih tinggi adsorben (Ifa dkk., 2021).

4. pH (derajat keasaman)

pH berhubungan dengan muatan permukaan karbon dan derajat ionisasi. Pengaruh pH dapat dijelaskan dalam hal interaksi elektrostatik yang diprakarsai oleh adsorben (Ifa dkk., 2021).

5. Temperatur

Suhu meningkat dengan peningkatan yang sesuai dalam kapasitas adsorpsi dan persentase penyisihan adsorbat (Abel *et al.*, 2020).

6. Waktu kontak

Adsorpsi adsorbat ke adsorben meningkat pada tahap awal waktu kontak dan setelah itu, dilanjutkan pada tingkat yang lebih lambat sebelum akhirnya mencapai saturasi pada waktu kontak kesetimbangan. Kapasitas adsorpsi awal yang tinggi dan persentase penyisihan minyak mentah dapat dikaitkan dengan keberadaan situs aktif kosong pada permukaan adsorben dan juga karena gaya tarik menarik yang kuat antara molekul adsorbat dan adsorben yang berkurang seiring dengan waktu kontak yang meningkat (Ifa dkk., 2021).

7. Konsentrasi adsorben

Peningkatan dosis adsorben menyebabkan penurunan kapasitas adsorpsi adsorben tetapi meningkatkan persentase penyisihan adsorbat karena ada peningkatan permukaan adsorpsi yang tersedia untuk interaksi (Ifa dkk., 2021).

Menurut Sylvia dkk. (2021), Penentuan % Efisiensi adsorpsi dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 9.

$$\% \text{ efisiensi} = \frac{C_o - C_e}{C_o} \times 100\% \quad (9)$$

Keterangan:

C_o = konsentrasi awal (mg/L)

C_e = konsentrasi akhir (mg/L)

Perhitungan kapasitas adsorpsi (q_e) dapat dihitung menggunakan Persamaan 10.

$$q_e = \frac{C_o - C_e}{m} \times V \quad (10)$$

Keterangan:

q_e = yang teradsorpsi oleh adsorben (mg/g)

C_o = konsentrasi awal Pb (mg/L)

C_e = konsentrasi akhir Pb (mg/L)

m = massa adsorben (g)

V = volume larutan yang diadsorpsi (L)

2.9. Kinetika Adsorpsi

Kinetika adsorpsi merupakan bagian dari adsorpsi yang membahas tentang laju adsorpsi dari suatu adsorben terhadap adsorbat sehingga kinetika adsorpsi memiliki Persamaan untuk menentukan konstanta laju dari adsorpsi (Maihendra dkk., 2016). Kinetika adsorpsi menggambarkan proses penyerapan suatu zat oleh adsorben seiring berjalannya waktu. Kemampuan adsorben dalam menyerap adsorbat dapat diukur melalui kecepatan adsorpsi. Untuk meneliti mekanisme adsorpsi, konstanta kecepatan reaksi adsorpsi kimia untuk ion-ion logam, digunakan Persamaan sistem pseudo orde pertama oleh Lagergren dan mekanisme pseudo order kedua (Buhani dkk., 2009).

Lagergren memperkenalkan Persamaan untuk adsorpsi cair-padat berdasarkan kapasitas padatan untuk pertama kalinya pada tahun 1898. Model kinetika pseudo-orde-satu diturunkan berdasarkan Persamaan laju reaksi Lagergren. Persamaan pseudo orde pertama dapat dilihat pada Persamaan 11 (Maihendra dkk., 2016).

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad (11)$$

Dimana:

q_t = Jumlah ion teradsorpsi pada waktu tertentu (mg/g)

q_e = Jumlah ion yang teradsorpsi pada keadaan setimbang (mg/g)

k_1 = Konstanta laju pseudo orde pertama Lagergren (1/min)

Model kinetika pseudo-orde-kedua mengasumsikan bahwa kapasitas adsorpsi proporsional terhadap jumlah situs aktif pada adsorben yang ditunjukkan pada Persamaan 12 (Maihendra dkk., 2016).

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (12)$$

Dimana k_2 (g/mg min) adalah konstanta laju model pseudo-orde-kedua.

2.10. Isoterm Adsorpsi

Adsorpsi sering kali dikaitkan dengan isoterm adsorpsi, yang secara umum didefinisikan sebagai hubungan antara konsentrasi zat terlarut yang diserap oleh permukaan padatan dengan konsentrasi zat dalam larutan. Berbagai tipe isoterm adsorpsi dapat digunakan untuk mempelajari mekanisme adsorpsi yang terjadi. Isoterm adsorpsi juga menjadi langkah penting dalam mengevaluasi parameter termodinamika secara teoritis, seperti energi adsorpsi. Satu model isoterm mungkin memberikan hasil yang sesuai dengan data eksperimen dalam kondisi tertentu, tetapi bisa tidak akurat dalam kondisi lain. Tidak ada satu model yang bisa diterapkan secara universal, karena setiap model didasarkan pada asumsi tertentu yang membatasi penerapannya. Tipe isoterm adsorpsi yang biasa digunakan yaitu Langmuir, Freundlich, dan isoterm *Brunnaeur-Emmet Teller* (BET). Pada umumnya, adsorpsi fase cair-padat mengikuti jenis isoterm adsorpsi Freundlich dan Langmuir (Buhani *et al.*, 2012; Buhani *et al.*, 2013; Buhani *et al.*, 2017; Buhani *et al.*, 2018).

2.10.1. Isoterm Adsorpsi Freundlich

Isoterm Freundlich merupakan model empiris yang digunakan untuk menggambarkan adsorpsi pada permukaan heterogen. Model ini tidak mengasumsikan bahwa adsorpsi terjadi dalam satu lapisan (*monolayer*), sehingga bisa menggambarkan adsorpsi pada berbagai tingkat interaksi antara adsorbat dan adsorben. Hal tersebut berkaitan dengan ciri-ciri dari adsorpsi secara fisika dimana adsorpsi dapat terjadi pada banyak lapisan (*multilayer*) (Husin dan

Rosnelly, 2005). Pendekatan isoterm adsorpsi yang umum digunakan dijelaskan oleh Freundlich, jika y adalah berat zat terlarut per gram adsorben dan c adalah konsentrasi zat terlarut dalam larutan, maka konsep tersebut dapat diturunkan pada Persamaan 13 dan 14.

$$\frac{X_m}{m} = k.C^{1/n} \quad (13)$$

$$\text{Log } \frac{X_m}{m} = \log k + \frac{1}{n} \log C \quad (14)$$

Keterangan:

X_m = Berat zat yang diadsorpsi

m = Berat adsorben

C = Konsentrasi zat

k dan n adalah konstanta adsorpsi yang nilainya bergantung pada jenis adsorben dan suhu adsorpsi. Bila dibuat kurva $\log x/m$ terhadap $\log C$ akan diperoleh Persamaan linear dengan intersep $\log k$ dan kemiringan $1/n$, sehingga nilai k dan n dapat dihitung (Handayani dan Sulistiyono, 2009).

Isoterm ini memberikan ekspresi matematis yang menjelaskan heterogenitas permukaan adsorben, di mana terdapat variasi dalam kekuatan ikatan antara adsorbat dan adsorben. Selain itu, isoterm ini juga menggambarkan distribusi eksponensial dari situs aktif serta energi adsorpsi, menunjukkan bahwa tidak semua situs memiliki energi yang sama untuk proses adsorpsi. Bentuk linier dari isoterm Freundlich ditunjukkan pada Persamaan 15.

$$\text{Log } q_e = \log q_e + \frac{1}{n} \log C_e \quad (15)$$

Dimana:

q_e = Jumlah zat yang teradsorpsi per gram adsorben (mg/g)

k_F = Faktor kapasitas Freundlich (mg/g)(L/mg)^{1/n}

C_e = Konsentrasi setimbang adsorbat dalam fase larutan (mg/L)

n = Faktor intensitas Freundlich (mol/g)

(Buhani *et al.*, 2012; Firmanto *et al.*, 2021).

Selain itu, untuk menentukan jumlah adsorbat yang teradsorpsi, rasio distribusi, dan koefisien selektivitas pada proses adsorpsi terhadap adsorben karbon maka dapat digunakan Persamaan 16 dan 17.

$$Q = (C_o - C_e) V/W \quad (16)$$

$$D = Q/C_a \quad (17)$$

Dimana:

Q = Jumlah adsorbat teradsorpsi (mg/g)

C_o = Konsentrasi awal adsorbat sebelum teradsorpsi (mg/L)

C_e = Konsentrasi adsorbat setelah teradsorpsi (mg/L)

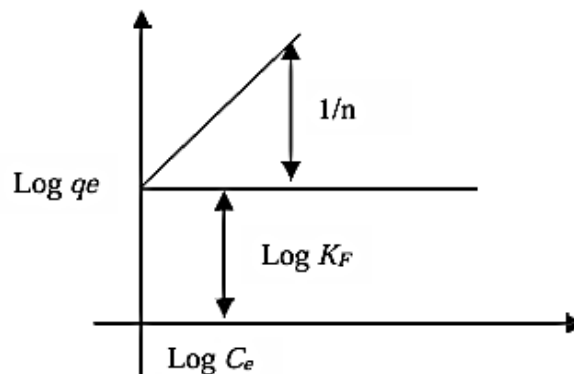
W = Massa adsorben (g)

V = Volume larutan adsorbat (L)

D = Rasio Distribusi (L/g)

(Buhani *et al.*, 2019; Buhani dan Suharso, 2016).

Model isoterm adsorpsi Freundlich dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Model isoterm adsorpsi Freundlich (Husin dan Rosnelly, 2005).

2.10.2. Isoterm Adsorpsi Langmuir

Teori Langmuir menyatakan bahwa permukaan adsorben memiliki sejumlah situs aktif yang proporsional dengan luas permukaan. Setiap situs aktif hanya mampu menyerap satu molekul. Interaksi antara zat yang terjerap dan adsorben dapat berupa ikatan fisik atau kimiawi. Isoterm Langmuir juga menyatakan bahwa laju adsorpsi bergantung pada faktor ukuran dan struktur molekul adsorbat, sifat

pelarut dan porositas adsorben, situs pada permukaan yang homogen, dan adsorpsi yang terjadi yaitu monolayer (Buhani *et al.*, 2017).

Secara teoritis Persamaan isoterm adsorpsi Langmuir dapat diturunkan dengan menganggap terjadinya kesetimbangan antara molekul-molekul zat yang diadsorpsi pada permukaan adsorben dengan molekul-molekul zat yang tidak teradsorpsi yang ditunjukkan pada Persamaan 18 dan 19.

$$Q = \frac{b \cdot K \cdot C_e}{1 + K \cdot C_e} \quad (18)$$

Sehingga menjadi

$$\frac{C_e}{Q} = \frac{1}{Kb} + \frac{1}{b} C_e \quad (19)$$

Keterangan:

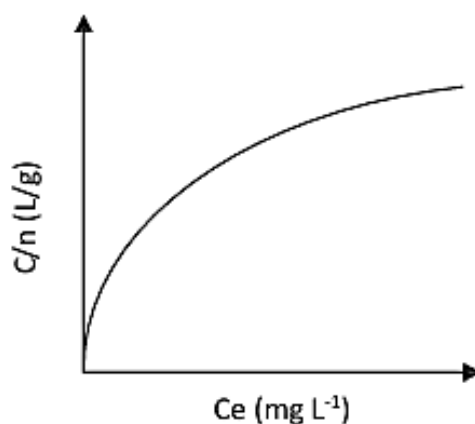
C_e = Konsentrasi kesetimbangan adsorbat dalam larutan setelah adsorpsi (mg/L)

Q = Jumlah adsorbat teradsorpsi per bobot adsorben (mg/g)

K = Konstanta kesetimbangan adsorpsi (L/mg)

B = Kapasitas adsorpsi maksimum dari adsorben (mg/g)

(Wijayanti dan Kurniawati, 2019).



Gambar 8. Model isoterm adsorpsi Langmuir (Husin dan Rosnelly, 2005).

Teori isoterm Langmuir juga menyatakan bahwa laju adsorpsi akan bergantung pada faktor ukuran dan struktur molekul adsorbat, sifat pelarut dan porositas adsorben, situs pada permukaan yang homogen, dan adsorpsi yang terjadi yaitu

monolayer (Buhani *et al.*, 2017). Grafik isoterm adsorpsi Langmuir dapat dilihat pada Gambar 8.

2.11. Penentuan Nilai Zeta Potensial

Zeta potential merupakan parameter muatan listrik antara partikel koloid. Koloid dengan nilai zeta potensial yang tinggi (negatif atau positif) yang elektrik stabil sementara koloid dengan nilai zeta potensial rendah cenderung mengental atau terflokulasi. Idealnya, muatan potensial zeta partikel harus lebih tinggi daripada medium pendispersi untuk mencegah agregasi. Nanopartikel dengan nilai potensial zeta lebih kecil dari -30 mV dan lebih besar dari +30 mV memiliki stabilitas lebih tinggi. *pH point zero charge* (PZC) adalah nilai pH di mana komponen muatan permukaan sama dengan nol untuk kondisi suhu, tekanan, dan komponen larutan berair yang ditentukan. Ini tidak berarti bahwa tidak ada muatan di permukaan untuk pH PZC, tetapi ada jumlah yang sama dari muatan negatif dan positif. Beberapa metode telah dikembangkan untuk menentukan PZC dalam tanah dan bahan lainnya. Tiga jenis titik muatan nol yang berbeda telah terdeteksi. Yang pertama adalah titik nol muatan, yang kedua adalah titik nol muatan proton bersih, dan yang ketiga adalah titik nol muatan bersih. Muatan titik nol disebut titik isoelektrik karena partikel tidak bergerak saat terkena medan listrik. Metode yang digunakan untuk mengukur PZC (Point of Zero Charge) dikenal sebagai metode penambahan garam atau titrasi garam, yang merupakan salah satu cara sederhana untuk menentukan titik di mana permukaan suatu material tidak bermuatan listrik. *pH point zero charge* (PZC) adalah salah satu fitur penting dari adsorben yang sangat mempengaruhi persentase adsorpsi dan berbeda dari satu bahan ke bahan lainnya (Al-Maliky *et al.*, 2021). Saat $pH < pH_{pzc}$ maka muatan permukaannya adalah positif, dan bila $pH > pH_{pzc}$ maka muatan permukaannya adalah negatif. Nilai zeta potensial dapat ditentukan melalui Persamaan 6 (Ai *et al.*, 2011).

$$\Delta pH = pH_{awal} - pH_{akhir} \quad (20)$$

2.12. Karakterisasi

Proses karakterisasi dilakukan untuk memperoleh informasi penting dari sampel yang dianalisis untuk mendukung jalannya penelitian.

2.12.1. Spektrofotometer UV-Vis

Spektrofotometri ini merupakan kombinasi dari spektrofotometri UV dan tampak (*visible*). Ini menggunakan dua sumber cahaya yang berbeda, sumber cahaya UV dan sumber cahaya tampak (*visible*). UV-Vis adalah yang paling banyak tersedia dan paling populer digunakan untuk sistem spektrofotometri. Kenyamanan metode ini adalah dapat digunakan baik untuk sampel berwarna maupun tidak berwarna. Spektrofotometri UV-Vis melibatkan spektroskopi foton di dalam wilayah UV-Vis. Ini berarti menggunakan cahaya dalam panjang gelombang UV dan *visible* yang terlihat dan dekat. Penyerapan dalam kisaran yang terlihat secara langsung mempengaruhi warna bahan kimia yang terlibat. Di wilayah spektrum elektromagnetik ini, molekul mengalami transisi elektronik. Pada prinsipnya, spektroskopi UV-Vis menggunakan cahaya sebagai energi yang mempengaruhi zat senyawa kimia untuk menyebabkan cahaya.

Cahaya yang digunakan adalah foton yang bergetar dan bergerak lurus dan merupakan gaya listrik dan magnet yang keduanya berpose tegak lurus satu sama lain. Ketika mempengaruhi senyawa kimia, energi foton akan menimbulkan respons. Namun, dalam hal menguraikan senyawa kimia, senyawa ini dapat dipecah menjadi molekul atau radikal yang lebih kecil yang disebut *chemical events*. Cara kerja spektrofotometer UV-Vis adalah bahwa cahaya dari sumber radiasi diteruskan ke monokromator, cahaya dari monokromator diarahkan secara terpisah melalui sampel dengan cermin berputar, detektor menerima cahaya dari sampel secara bergantian berulang kali, Sinyal listrik dari detektor diproses, diubah menjadi digital dan hasilnya dilihat (Zurweni *and* Sanova, 2023).

Absorbansi sampel tergantung pada suatu konsentrasi larutan (c dalam mg L^{-1}), panjang sel pada sampel (b dalam cm), dan karakteristik konstanta fisika dari

sampel yang menyerap. Ketergantungan ini diekspresikan dalam hukum Lambert-Beer yang ditunjukkan pada Persamaan 12 dan 13 (Harvey, 2000).

$$\text{Log } \frac{P_0}{P} = e.b.C \quad (21)$$

$$A = e.b.C \quad (22)$$

Keterangan:

P_0 = Intensitas cahaya yang datang pada larutan

P = Intensitas cahaya yang diteruskan oleh larutan

A = Absorbansi = $-\log \%T$

e = Absorptivitas molar larutan ($1/\text{cm.M}$)

b = Tebal kuvet (cm)

C = Konsentrasi larutan (mol/L)

2.12.2. Spektrofotometri Serapan Atom (SSA)

Keberhasilan suatu adsorben dalam mengikat ion dapat dianalisis menggunakan Spektrofotometri Serapan Atom (SSA). SSA berfungsi untuk mengukur konsentrasi ion logam yang teradsorpsi pada permukaan adsorben maupun yang masih tersisa dalam larutan. Ion logam yang berhasil teradsorpsi dapat dihitung secara kuantitatif dengan membandingkan konsentrasi ion logam sebelum dan sesudah proses adsorpsi. Dengan menggunakan teknik ini, kita bisa mendapatkan data yang akurat tentang efisiensi adsorpsi dan kapasitas adsorben dalam menangkap ion logam, yang sangat penting dalam berbagai aplikasi industri dan penelitian.

Metode analisis dengan Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) didasarkan pada prinsip penyerapan energi cahaya oleh atom-atom netral yang berada dalam fase gas. Setiap atom menyerap cahaya pada panjang gelombang tertentu yang khas, sesuai dengan energi yang diperlukan untuk menggerakkan elektron dari tingkat energi rendah ke tingkat energi yang lebih tinggi. Karena energi transisi ini spesifik untuk setiap unsur, metode SSA sangat sensitif dalam mendeteksi unsur pada konsentrasi rendah. Selain itu, metode ini menawarkan keunggulan dibandingkan dengan teknik spektroskopi emisi konvensional karena

keakuratannya yang tinggi, terutama dalam analisis kuantitatif unsur-unsur dalam sampel yang kompleks. Pada metode konvensional emisi ini tergantung pada sumber eksitasi, bila eksitasi dilakukan secara termal maka akan tergantung pada temperatur sumber (Khopkar, 1990).

2.12.3. X-Ray Diffraction (XRD)

X-Ray Diffraction (XRD) adalah teknik analisis untuk menentukan struktur kristal suatu bahan melalui hamburan sinar-X. Ketika sinar-X ditembakkan ke material kristal, interaksinya dengan atom menghasilkan pola difraksi unik yang mencerminkan jarak antar bidang atom, orientasi, dan susunan atom. XRD digunakan untuk mengidentifikasi fase kristal, mengukur ukuran kristalit, serta mempelajari sifat seperti tegangan sisa dan cacat struktur. Fenomena difraksi sinar-X pertama kali ditemukan oleh Max von Laue (1912), dan aplikasinya untuk menentukan struktur kristal dikembangkan oleh W. H. Bragg dan W. L. Bragg (1913). Teknik ini kini digunakan secara luas pada logam, mineral, senyawa anorganik, polimer, dan bahan kristalin lainnya. Persamaan Scherrer dapat digunakan untuk menentukan ukuran suatu kristal. Bentuk Persamaan Scherrer ditunjukkan pada Persamaan 23 (Sihite dan Budiarto, 2009).

$$D = \frac{0,9 \lambda}{B \cos \theta} \quad (23)$$

Keterangan:

D = Diameter kristal,

λ = Panjang gelombang sinar X (nm)

B = Lebar puncak pada setengah intensitas maksimum.

θ = Sudut difraksi

Hukum Bragg untuk difraksi kristal menyatakan bahwa apabila material kristal dikenai oleh sinar-X monokromatis, maka setiap bidang kristal akan memantulkan sinar-X ke seluruh arah. Interferensi dapat terjadi jika hanya antara sinar-sinar pantul sefase sehingga hanya terdapat sinar-X pantulan tertentu saja. Apabila sinar-X yang sefase memiliki selisih lintasan kelipatan bulat panjang gelombang

maka akan menyebabkan interferensi yang tinggi. Secara matematis dituliskan pada Persamaan 24 (Sihite dan Budiarto, 2009).

$$2 d \sin \theta = n \lambda \quad (24)$$

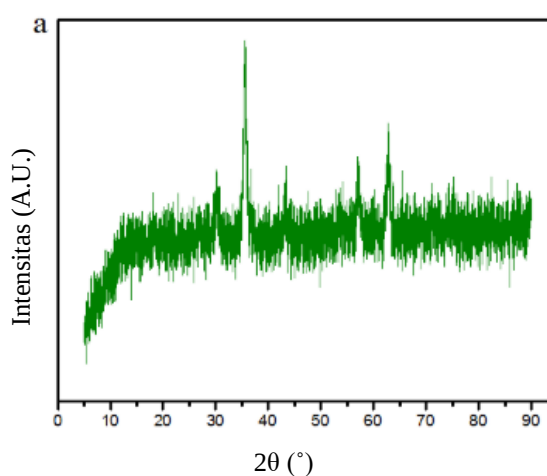
Keterangan:

d = Jarak antar bidang atom yang berhubungan ($\text{\AA}$)

θ = Sudut hamburan ($^{\circ}$)

n = Orde difraksi

λ = Panjang gelombang ($\text{\AA}$)



Gambar 9. Pola difraksi XRD Fe_3O_4 (Buhani *et al.*, 2020).

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Buhani *et al* (2020) bahwa pola difraktogram menunjukkan bentuk amorf dan memiliki puncak asimetris yang luas. Pola difraktogram adsorben yang telah dilapisi oleh magnetit menghasilkan puncak pada rentang 35° dan 62° yang berasal dari nanokristal Fe_3O_4 . Pola difraksi XRD Fe_3O_4 dapat dilihat pada Gambar 9.

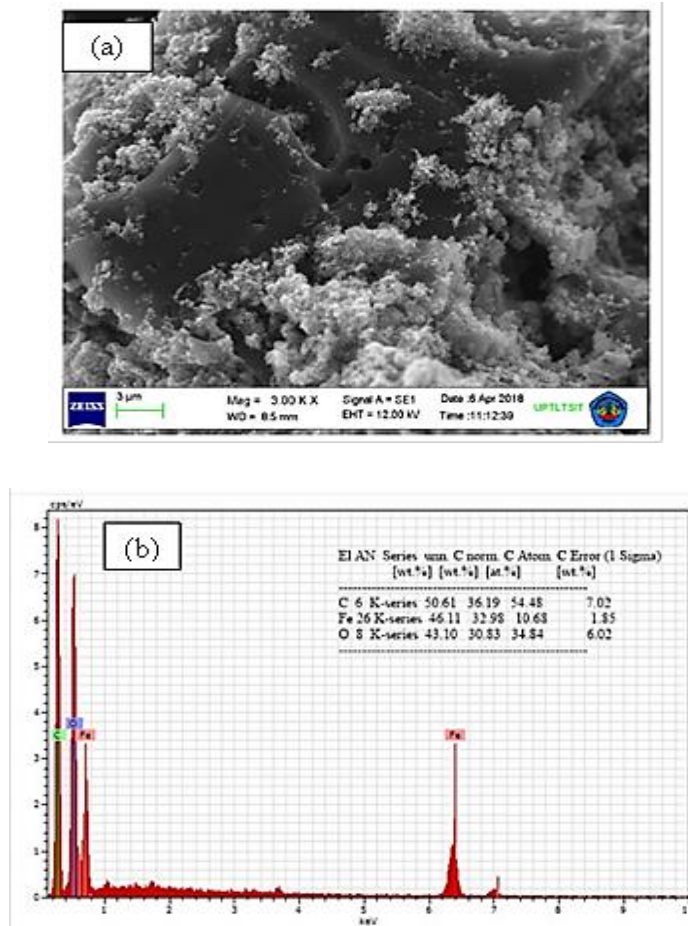
2.12.4. Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-Ray (SEM EDX)

SEM-EDX adalah suatu alat yang berasal dari gabungan antara alat *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Energy Dispersive X-Ray* (EDX). SEM adalah mikroskop elektron yang digunakan untuk menampilkan permukaan material dengan tingkat perbesaran tinggi, sementara EDX adalah teknik yang digunakan untuk menganalisis komposisi serta unsur-unsur atom pembentuk material.

Elektron ini berinteraksi dengan atom dalam sampel dan menghasilkan sinyal yang membawa informasi tentang topografi permukaan dan karakteristik lainnya, seperti daya konduksi. Prinsip SEM mirip dengan mikroskop optik, tetapi menggunakan difraksi elektron. Elektron yang ditembakkan akan dibelokkan oleh lensa elektromagnetik di dalam SEM. SEM menggunakan pemacu elektron (*electron gun*) sebagai sumber elektron, bukan sumber cahaya. Elektron-elektron ini dipancarkan secara termionik dari sumbernya untuk menghasilkan citra (Sihite dan Budiarto, 2009).

Energy Dispersive X-ray (EDX) adalah teknik analisis yang digunakan untuk mengkarakterisasi unsur atau komposisi kimia suatu sampel. Teknik ini bergantung pada interaksi eksitasi sinar-X dengan material yang dianalisis. EDX dapat digunakan untuk mengidentifikasi jenis atom atau atom oksida yang ada di permukaan material. Elektron berenergi tinggi yang ditembakkan ke atom dalam senyawa mampu menumbuk elektron pada kulit terdalam atom, menyebabkan elektron berenergi lebih rendah terlepas dan menciptakan kekosongan di kulit tersebut. Kekosongan ini kemudian diisi oleh elektron dari lapisan yang lebih tinggi, dan dalam proses tersebut, energi dilepaskan dalam bentuk radiasi sinar-X yang khas dari unsur yang dianalisis.

Hasil analisis EDX berupa gambar dan persentase komposisi unsur dalam sampel. Analisis ini bersifat semi-kuantitatif, artinya hanya memberikan estimasi komposisi unsur yang terkandung dalam material (Buhani *et al.*, 2018). Pada penelitian yang telah dilakukan Buhani dkk (2020) yang memodifikasi karbon cangkang kelapa sawit menggunakan magnetit menunjukkan bahwa adsorben KM setelah adanya pelapisan partikel Fe_3O_4 terjadi penurunan jumlah pori-pori. Penurunan pori pada KM dikarenakan terjadi pemblokiran pori-pori yang signifikan oleh pelapisan partikel Fe_3O_4 (Wong *et al.*, 2016). Hal ini didukung oleh data yang terdapat pada hasil analisis dengan EDX yang menunjukkan bahwa pada material KM, selain adanya unsur C dan O yang merupakan unsur penyusun material karbon juga terdapat unsur Fe yang berasal dari partikel Fe_3O_4 dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Spektra (a) SEM dan (b) EDX KM (Buhani dkk., 2020).

2.12.5. Spektrofotometer Fourier Transform Infrared (FTIR)

Spektrofotometer Fourier Transform Infrared (FTIR) digunakan untuk mengetahui gugus-gugus fungsi penyusun suatu material, baik organik maupun anorganik. Ketika suatu molekul menyerap sinar infra merah, molekul tersebut mengalami perubahan dalam tingkat energi vibrasi dan energi rotasi, yang memungkinkan transisi antara berbagai keadaan energi dan menghasilkan informasi yang berharga tentang ikatan dan interaksi dalam molekul tersebut. Secara umum, vibrasi antar atom dibagi menjadi dua jenis, yaitu vibrasi ulur (*stretching*) dan vibrasi tekuk (*bending*). Vibrasi ulur terjadi ketika atom bergerak sepanjang ikatan, sehingga jarak antar atom dalam molekul tersebut bertambah atau berkurang. Vibrasi tekuk merupakan pergerakan atom yang mengakibatkan perubahan sudut ikatan, yang sangat penting dalam analisis spektrum. Gugus

fungsi yang terdeteksi dari suatu molekul memiliki panjang gelombang yang identik untuk masing-masing gugus fungsi, sehingga memudahkan identifikasi dan karakterisasi struktur molekul tersebut yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Serapan infra merah gugus fungsi senyawa organik (Lestari, 2018).

Bilangan gelombang (1/cm)	Gugus fungsi	Nama gugus fungsi
3603	O-H	Hidroksil
3437	N-H	Amina
3051	O-H	Asam karboksilat
2881	C-H	Alkana
2322	O=C=O	Karbon dioksida
1789	C=O	Asam karboksilat
1593	N-O	Komponen nitro
1249	C-O	Alkil, Aril, dan Eter
1048	Si-O-Si	Siloksan
975	C=C	Alkena
584	Fe-O-Si	Silika magnetit
570	Fe-O	Oksida besi

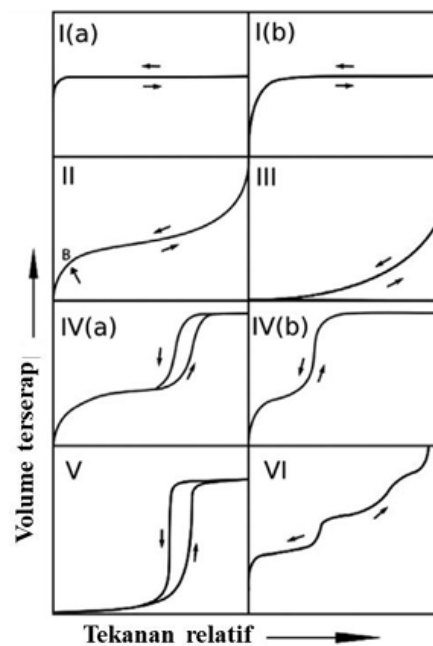
2.12.6. Brunauer-Emmett-Teller (BET)

Luas permukaan, volume total pori, dan ukuran rata-rata jari-jari pori merupakan faktor penting yang mempengaruhi kinerja adsorben. Material padat seperti adsorben memiliki dua jenis luas permukaan, yaitu luas permukaan eksternal (makroskopik) yang mencakup bagian luar material, dan luas permukaan internal (mikroskopik) yang mencakup pori-pori kecil, celah, dan rongga di dalamnya (Thommes *et al.*, 2015). Luas permukaan internal umumnya memberikan kontribusi terbesar terhadap kapasitas adsorpsi suatu material. Isoterm BET merupakan metode penentuan luas permukaan zat padat yang bekerja berdasarkan prinsip adsorpsi molekul gas secara fisisorpsi (*physisorption*).

Fisorpsi terjadi ketika gas yang diserap (adsorptif) berinteraksi dengan permukaan padatan (adsorben). Pada saat itu, kepadatan molekul gas meningkat di dekat permukaan padatan karena adanya gaya van der Waals. Gas yang terserap di area dengan kepadatan yang lebih tinggi disebut sebagai adsorbat. Proses penyerapan ini menghasilkan data adsorpsi yang umumnya ditampilkan dalam bentuk

isotherm adsorpsi, di mana jumlah gas yang terserap dicatat sebagai fungsi tekanan adsorptif pada suhu tetap, dengan grafik jumlah gas yang terserap terhadap tekanan relatif (P/P_0). Namun, istilah isotherm adsorpsi seringkali tidak hanya menggambarkan proses adsorpsi gas, tetapi juga proses desorpsi, yang mencerminkan berkurangnya jumlah gas yang terserap. Terdapat istilah adsorpsi histeresis yang muncul ketika kurva adsorpsi dan desorpsi tidak bertepatan (Schlumberger *and* Thommes, 2021).

Bentuk isotherm adsorpsi cairan murni pada permukaan datar dan pori material ditentukan oleh interaksi antara kekuatan gabungan antara fluida dan dinding, serta interaksi antar fluida, yang dipengaruhi oleh struktur pori dari adsorben tersebut. Pengaruh tersebut yang membuat bentuk isotherm diklasifikasikan menjadi beberapa karakteristik menurut IUPAC seperti terlihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Klasifikasi IUPAC isotherm fisisorpsi (Schlumberger and Thommes, 2021).

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat

Penelitian ini telah dilaksanakan pada bulan Oktober sampai Maret 2025, bertempat di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Pengambilan cangkang kelapa sawit dilakukan di PT. Anak Tuha Sawit Mandiri Kabupaten Lampung Tengah. Analisis gugus fungsi pada adsorben dengan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dilakukan di Laboratorium Kimia Organik Departemen Kimia FMIPA Universitas Gadjah Mada, analisis permukaan adsorben dengan *Scanning Electron Microscope* yang dirangkai dengan *Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX) dilakukan di Laboratorium Terpadu FMIPA Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, analisis permukaan adsorben dan komposisi yang terkandung dengan *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan di Laboratorium Terpadu FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta, analisis luas permukaan adsorben dengan menggunakan *Brunauer-Emmett-Teller* (BET) *surface area* dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Pembangunan Nasional (UPN) Veteran Yogyakarta, analisis hasil adsorpsi logam menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA) dilakukan di Laboratorium Kimia Analitik Departemen Kimia FMIPA Universitas Gadjah Mada, dan analisis hasil adsorpsi zat warna menggunakan spektrofotometer UV-Vis dilakukan di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung.

3.2. Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini antara lain peralatan gelas, spatula, neraca analitik, pengayak (*siever*) ukuran 100 *mesh*, pengaduk magnet (*spinbar*), *hotplate*, oven, sentrifus, *shaker*, pH meter, cawan krus, *furnace*, sonikator, desikator, thermometer, dan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) tipe Thermo Scientific Nicolet, *Scanning Electron Microscope* yang dirangkai dengan *Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX) tipe Jeol JSM-IT210, *X-Ray Diffraction* (XRD) tipe Rigaku Miniplex 600, *Brunauer-Emmett-Teller* (BET) *surface area* tipe Quantachrome NOVA 1200e, Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) tipe Agilent Technologies 240AA, dan Spektrofotometer UV-Vis tipe Agilent Technologies Cary 100.

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu arang cangkang kelapa sawit, *malachite green*, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, KNO_3 , HCl , NaOH , NaNO_3 , (3-*Aminopropyl*)triethoxysilane (APTES), etanol, larutan *buffer*, kalium iodida, iodium, akuades, natrium tiosulfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), kalium iodat (KIO_3), larutan kanji, kertas saring, pH indikator universal, *aluminium foil*, dan akuades.

3.3. Prosedur Penelitian

3.3.1. Preparasi Karbon

Cangkang kelapa sawit yang diperoleh dari PT. Anak Tuha Sawit Mandiri Kabupaten Lampung Tengah, melalui serangkaian proses sebelum dapat digunakan untuk keperluan lebih lanjut. Langkah pertama yang dilakukan adalah membersihkan cangkang kelapa sawit dengan cara dicuci menggunakan air bersih untuk menghilangkan kotoran, debu, dan residu yang menempel. Setelah proses pencucian selesai, cangkang kelapa sawit kemudian dikeringkan di bawah sinar matahari selama kurang lebih 6 jam, dengan tujuan untuk mengurangi kadar air yang terkandung dalam cangkang tersebut. Pengeringan alami ini tidak hanya memastikan pengurangan kelembapan, tetapi juga mempertahankan kualitas bahan baku sebelum tahap pembakaran.

Setelah cangkang benar-benar kering, tahap berikutnya adalah proses pembakaran yang dilakukan di dalam drum yang terbuat dari reaktor besi. Proses pembakaran ini berlangsung selama sekitar 24 jam dengan pengaturan suhu tertentu untuk menghasilkan karbon dari cangkang kelapa sawit. Proses ini dikenal sebagai karbonisasi, di mana bahan organik diubah menjadi karbon dengan memisahkan unsur-unsur volatil melalui pembakaran terkontrol. Setelah karbonisasi selesai, karbon cangkang kelapa sawit yang dihasilkan kemudian dihaluskan menggunakan mesin penggiling khusus hingga diperoleh butiran halus yang seragam. Karbon yang telah dihaluskan selanjutnya melalui proses pengayakan dengan menggunakan ayakan berukuran 100 *mesh*, sehingga hanya partikel karbon dengan ukuran yang diinginkan yang akan digunakan.

Karbon halus ini selanjutnya akan diaktivasi secara fisika melalui proses pembakaran lanjutan di dalam *furnace* pada suhu 700°C selama 1 jam. Aktivasi fisika ini bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan dan porositas karbon, sehingga menghasilkan karbon aktif yang lebih efektif dalam aplikasi tertentu seperti adsorpsi. Setelah proses pembakaran di dalam *furnace* selesai, karbon didinginkan secara perlahan di dalam desikator hingga mencapai suhu ruang. Proses pendinginan ini dilakukan untuk mencegah terjadinya oksidasi yang berlebihan pada karbon. Setelah karbon mencapai suhu ruang, dilakukan pemisahan antara abu yang terbentuk selama proses pembakaran dengan karbon aktif yang dihasilkan. Hasil dari proses ini adalah karbon aktivasi fisika (KAF), yang memiliki sifat-sifat adsorpsi yang lebih baik dibandingkan karbon tanpa aktivasi (KTA). Langkah terakhir adalah modifikasi lebih lanjut terhadap KAF dengan menambahkan senyawa magnetit dan silan.

3.3.2. Modifikasi Karbon dengan Magnetit

Pembuatan karbon aktivasi fisika-magnetit (KAF-M) dilakukan dengan cara melarutkan 27 g $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ke dalam 200 mL akuades dan ditambahkan 50 g KAF. Selanjutnya suspensi dipanaskan dengan suhu 80°C selama 2 jam. Kemudian, ditambahkan 50 mL larutan basa yang terbuat dari campuran 2,25 g KNO_3 dan 15 g NaOH tetes demi tetes sambil diaduk secara konstan dengan alat

pengaduk magnet. Selanjutnya suspensi yang dihasilkan disonikasi pada suhu 80°C selama 1 jam dan disimpan semalam. Hasil suspensi disaring dan dicuci dengan akuades hingga pH netral dan dikeringkan dalam oven pada suhu 60°C selama 6 jam (Buhani, *et al.*, 2019).

3.3.3. Modifikasi Karbon Magnetit dengan (3-Aminopropyl)triethoxysilane

Proses silanisasi dari karbon aktivasi-magnetit (KAF-M) dilakukan dengan mencampurkan 25 g KAF-M dalam 1.250 mL etanol 96% dilakukan dengan hati-hati menggunakan *fume hood* (lemari asam). Kemudian, dalam campuran tersebut tersebut ditambahkan 2,5 mL (3-Aminopropyl)triethoxysilane (APTES) dan diaduk menggunakan magnetik *stirrer* selama 7 jam dengan suhu 70°C. Selanjutnya suspensi yang dihasilkan disonikasi pada suhu 80°C selama 1 jam dan disimpan semalam. Endapan yang dihasilkan kemudian disaring dan dicuci dengan menggunakan etanol 70% lalu dikeringkan dalam oven pada suhu 60°C selama 6 jam sehingga dihasilkan material karbon aktivasi fisika-magnetit silan (KAF-MS) (Buhani *et al.*, 2023).

3.3.4. Analisis Proksimat Karbon

Analisis proksimat karbon berdasarkan SNI 06-3730-1995 meliputi pengukuran kadar air (maks. 15%), kadar zat mudah menguap (maks. 25%), kadar abu (maks. 10%), kadar karbon terikat (min. 65%), dan daya serap iodine (min. 750 mg/g).

a. Analisis Kadar Air

Pertama-tama ditimbang 5 g karbon yang belum dan sudah diaktivasi fisika, kemudian dikeringkan pada oven dengan suhu 105°C sampai beratnya konstan (± 1 jam). Selanjutnya karbon aktif ini dimasukkan ke dalam desikator sampai beratnya konstan, kemudian ditentukan kadar air dalam persen (%) serta pengulangan sebanyak 2 kali (Tejawati dkk., 2017). Kadar air dapat dihitung dengan Persamaan 4 (Sulaiman dkk., 2017) berikut:

$$\text{Kadar air (\%)} = \frac{(a-b)}{a} \times 100\% \quad (4)$$

Keterangan:

a = massa awal karbon aktif (g)

b = massa akhir karbon aktif (g)

b. Analisis Kadar Zat Mudah Menguap (*Volatile*)

Cawan krus berisi karbon yang belum dan sudah diaktivasi fisika dimana kadar airnya sudah ditetapkan dimasukkan dalam *furnace* pada suhu 900°C selama 15 menit. Selanjutnya cawan krus dimasukkan dalam desikator sampai beratnya konstan dan ditimbang serta pengulangan sebanyak 2 kali (Tejawati dkk., 2017). Analisis kadar zat mudah menguap dapat dihitung menggunakan Persamaan 5 (Muhajir dkk., 2021).

$$\text{Kadar } volatile = \frac{\text{bobot contoh yang hilang}}{\text{bobot contoh awal}} \times 100\% \quad (5)$$

c. Analisis Kadar Abu

Cawan krus atau porselen yang sudah berisi karbon yang belum dan sudah diaktivasi fisika dimana, kadar air dan kadar zat menguapnya sudah ditetapkan. Kemudian, diletakkan dalam *furnace* perlahan-lahan dipanaskan mulai dari suhu kamar sampai 800 °C selama 1 jam. Selanjutnya didinginkan dalam desikator sampai beratnya konstan kemudian ditimbang bobotnya serta pengulangan sebanyak 2 kali (Tejawati dkk., 2017). Analisis kadar abu dapat dihitung menggunakan Persamaan 6 (Muhajir dkk., 2021).

$$\text{Kadar abu (\%)} = \frac{\text{bobot contoh sisa abu}}{\text{bobot contoh awal}} \times 100\% \quad (6)$$

d. Analisis Kadar Karbon Terikat

Kadar karbon terikat adalah fraksi karbon yang terikat dalam ruangan selain fraksi air, zat menguap dan abu. Kadar karbon terikat diperoleh dari selisih persentase total dengan jumlah persentase kadar air, kadar zat menguap, dan kadar abu total dari karbon yang belum dan sudah diaktivasi fisika (Tejawati dkk., 2017).

e. Daya Serap Iod

Sebanyak 0,5 g karbon yang belum dan sudah diaktivasi fisika dimasukkan ke dalam erlenmeyer yang tertutup. Kemudian dimasukkan 25 mL larutan iodin 0,125 N dan diaduk selama 15 menit dan disimpan selama 2 jam. Larutan ini disaring dan kemudian dipipet 10 mL lalu dimasukkan ke dalam erlenmeyer 250 mL. Larutan ini dititrasi dengan natrium tiosulfat sampai warna kuning pada larutan mulai samar. Setelah itu ditambahkan larutan kanji 1% sebanyak 1 mL sebagai indikator dan larutan kemudian dititrasi kembali hingga warna biru tua menjadi warna bening sebagai titik akhirnya. Penentuan daya serap karbon aktif terhadap iodin dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali dan dicatat serta dihitung volume natrium tiosulfat yang digunakan (Tejawati dkk., 2017). Sebelumnya, natrium tiosulfat distandarisasi terlebih dahulu dengan larutan baku KIO_3 , sekitar 0,2 g KIO_3 ditimbang dengan akurat dan dilarutkan dalam air. Kemudian, ditambahkan 10 g KI sebagai reaktan berlebih dan sekitar 50 mL asam sulfat encer (H_2SO_4). Larutan ini kemudian digunakan dalam titrasi dengan natrium tiosulfat untuk menghitung konsentrasi tiosulfat berdasarkan volume titran yang digunakan. Daya serap Iodin dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 8 (Muhajir dkk., 2021).

$$\text{BI} = \frac{25}{5} \times \frac{\text{Vol. titrasi blanko} - \text{Vol. titrasi bahan}) \times \text{Be iod} \times \text{N}}{\text{Berat Karbon Aktif (W)}} \quad (8)$$

Keterangan :

BI = daya serap iodine (mg/g)

Be iod = 126,93 (berat molekul iodium dalam satuan mg/mmol)

N = Normalitas $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (N)

W = berat karbon aktif (g)

$\frac{25}{5}$ = 25 adalah volume larutan iodine standar (25 mL) dan 5 adalah faktor pembagi untuk menyesuaikan satuan menjadi mg/g.

3.3.5. Karakterisasi

Karbon Tanpa Aktivasi (KTA), Karbon Aktivasi Fisika (KAF), Karbon Aktivasi Fisika-Magnetit (KAF-M), dan Karbon Aktivasi Fisika-Magnetit Silan (KAF-MS) dikarakterisasi menggunakan beberapa teknik sebagai, yaitu XRD untuk mengidentifikasi fase kristalin, FTIR untuk menganalisis gugus fungsi yang ada pada adsorben dengan pemindaian biasanya dilakukan dalam rentang bilangan gelombang 4000 cm^{-1} hingga 400 cm^{-1} , BET *surface area* untuk mengetahui luas permukaan adsorben, serta SEM-EDX untuk mempelajari morfologi permukaan dan menentukan komposisi unsur-unsur yang terkandung di dalam adsorben. Metode SEM-EDX yaitu *Secondary Electron* (SE) lebih banyak digunakan untuk mengamati morfologi dan tekstur permukaan dengan pemindaian biasanya dilakukan pada rentang energi 0-30 keV. Untuk persiapan sampel SEM-EDX pada Karbon Tanpa Aktivasi (KTA), Karbon Aktivasi Fisika (KAF), Karbon Aktivasi Fisika-Magnetit (KAF-M), dan Karbon Aktivasi Fisika-Magnetit Silan (KAF-MS), sampel dibersihkan, dipotong, dan dipasang pada stub menggunakan *double-sided tape*. Sampel kemudian dilapisi dengan lapisan konduktif tipis (seperti emas) untuk mencegah muatan. Setelah itu, sampel siap dipindai dengan SEM-EDX pada energi 0-30 keV untuk analisis morfologi dan komposisi permukaan.

3.3.6. Penentuan Nilai Zeta Potensial

Sebanyak 0,1 g adsorben Karbon Tanpa Aktivasi (KTA), Karbon Aktivasi Fisika (KAF), Karbon Aktivasi Fisika-Magnetit (KAF-M), dan Karbon Aktivasi Fisika-

Magnetit Silan (KAF-MS) masing-masing dimasukkan ke dalam 20 mL NaNO_3 0,1 M. Kemudian, pH awal divariasikan dengan rentang 3-10 yang diatur menggunakan larutan HCl 0,1 M untuk suasana asam dan NaOH 0,1 M untuk suasana basa. Lalu, larutan di-*shaker* selama 24 jam. Setelah itu, pH akhir diamati dan diukur dengan menggunakan pH meter. Lalu, pH PZC ditentukan berdasarkan Persamaan 20.

3.3.7. Eksperimen Adsorpsi

a. Pembuatan Larutan Induk Adsorbat Ion Mn(II) dan *Malachite Green*

Serbuk $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ sebanyak 3,075 g dan serbuk *malachite green* sebanyak 1 g dimasukkan ke dalam labu ukur 1000 mL yang berbeda. Kemudian, ditambahkan akuades hingga tanda batas lalu dihomogenkan dan terbentuk larutan induk logam dan zat warna masing-masing dengan konsentrasi 1000 ppm.

b. Penentuan Panjang Gelombang Maksimum Adsorbat Ion Mn(II) dan *Malachite Green*

Nilai absorbansi larutan ion Mn(II) diukur dengan konsentrasi 100 ppm pada rentang panjang gelombang 279-280 nm dan absorbansi larutan zat warna *malachite green* diukur juga dengan konsentrasi 10 ppm pada rentang panjang gelombang 600-650 nm.

c. Penentuan Dosis Adsorben

Sebanyak 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; dan 1 g adsorben KAF-M dan KAF-MS masing-masing dimasukkan ke dalam dua set erlenmeyer (masing-masing 5 erlenmeyer per set). Pada set pertama, setiap erlenmeyer diisi sebanyak 25 mL larutan ion Mn(II) dengan konsentrasi 100 ppm. Sedangkan pada set kedua, setiap erlenmeyer diisi sebanyak 25 mL larutan zat warna *malachite green* dengan konsentrasi 10 ppm. Campuran tersebut diaduk menggunakan alat pengaduk selama 1 jam,

kemudian dipisahkan dengan sentrifugasi selama 30 menit pada kecepatan 5000 rpm. Filtrat yang diperoleh dianalisis menggunakan spektrofotometri serapan atom (SSA) untuk ion Mn(II) dan spektrofotometer UV-Vis untuk *malachite green* (Buhani *et al.*, 2017).

d. Penentuan pH Optimum

Sebanyak 25 mL larutan ion Mn(II) 100 ppm dan 25 mL larutan *malachite green* 10 ppm disiapkan dalam dua set erlenmeyer, masing-masing terdiri dari 8 erlenmeyer. Set pertama diisi larutan ion Mn(II), sedangkan set kedua diisi larutan zat warna *malachite green*, dengan variasi pH 3-10. Penyesuaian pH dilakukan dengan menambahkan HCl 0,1 M untuk menurunkan pH atau NaOH 0,1 M untuk meningkatkan pH, diikuti dengan penambahan larutan *buffer* (*buffer* asetat untuk pH 3-5, dan *buffer* fosfat untuk pH 6-10). Adsorben KAF-M dan KAF-MS pada dosis optimum kemudian ditambahkan ke masing-masing erlenmeyer. Campuran diaduk selama 1 jam pada kecepatan 100 rpm, lalu dipisahkan dengan sentrifugasi selama 30 menit pada 5000 rpm. Filtrat yang dihasilkan dianalisis menggunakan spektrofotometri serapan atom (SSA) untuk ion Mn(II) dan spektrofotometer UV-Vis untuk *malachite green* (Buhani *et al.*, 2017).

e. Penentuan Waktu Kontak Optimum

Sebanyak 25 mL larutan ion Mn(II) 100 ppm dan 25 mL larutan *malachite green* 10 ppm disiapkan dalam dua set erlenmeyer, masing-masing terdiri dari 8 erlenmeyer. Pada set pertama, setiap erlenmeyer diisi larutan ion Mn(II), sedangkan pada set kedua diisi larutan zat warna *malachite green*, keduanya pada pH optimum. Adsorben KAF-M dan KAF-MS pada dosis optimum ditambahkan ke masing-masing erlenmeyer, lalu campuran diaduk dengan alat pengaduk pada variasi waktu 0, 15, 30, 45, 60, 90, 120, dan 150 menit. Setelah itu, larutan dipisahkan menggunakan teknik sentrifugasi selama 30 menit pada kecepatan 5000 rpm. Filtrat yang diperoleh dianalisis menggunakan spektrofotometri

serapan atom (SSA) untuk ion Mn(II) dan spektrofotometer UV-Vis untuk *malachite green* (Buhani *et al.*, 2017).

f. Penentuan Konsentrasi Optimum

Sebanyak 25 mL larutan adsorbat ion Mn(II) dan *malachite green* pada pH optimum disiapkan dalam dua set erlenmeyer, masing-masing terdiri dari 8 buah. Variasi konsentrasi untuk larutan ion Mn(II) adalah 0, 50, 100, 200, 250, 300, dan 400 ppm, sedangkan untuk larutan *malachite green* adalah 0, 25, 50, 100, 200, 250, 300, dan 400 ppm. Pada set pertama, setiap erlenmeyer diisi larutan ion Mn(II), sedangkan pada set kedua diisi larutan zat warna *malachite green*. Adsorben pada dosis optimum kemudian ditambahkan ke masing-masing erlenmeyer. Campuran diaduk pada waktu kontak optimum, lalu dipisahkan menggunakan teknik sentrifugasi selama 30 menit pada kecepatan 5000 rpm. Filtrat yang diperoleh dianalisis menggunakan spektrofotometri serapan atom (SSA) untuk ion Mn(II) dan spektrofotometer UV-Vis untuk *malachite green* (Buhani *et al.*, 2017).

3.3.8. Eksperimen Desorpsi

Dosis optimum adsorben KAF-M dan KAF-MS dimasukkan ke dalam satu set erlenmeyer (masing-masing terdiri dari 4 erlenmeyer per set). Setiap Erlenmeyer diisi dengan 25 mL larutan zat warna *malachite green* pada konsentrasi dan pH optimum. Campuran di-*shaker* pada waktu optimum dengan kecepatan 100 rpm, kemudian dipisahkan dengan teknik sentrifugasi selama 30 menit pada kecepatan 5000 rpm dan dilakukan dekantasi. Filtrat dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum *malachite green*. Endapan digunakan kembali untuk proses desorpsi secara tidak sekuensial menggunakan eluen: 25 mL etanol 40% (untuk memutus ikatan hidrogen), 25 mL larutan KNO₃ 0,1 M (untuk pertukaran ion), 25 mL larutan HCl 0,1 M (untuk interaksi elektrostatis), dan akuades. Proses desorpsi dilakukan secara *batch* (Buhani dkk., 2009).

3.3.9. Eksperimen Penggunaan Ulang Adsorben

Adsorben KAF-M dan KAF-MS masing-masing sebanyak 1 g dimasukkan ke dalam erlenmeyer yang berbeda, kemudian masing-masing ditambahkan 50 mL larutan *malachite green* pada konsentrasi dan pH optimum. Larutan tersebut diaduk menggunakan pengaduk dengan kecepatan 100 rpm selama waktu optimum. Setelah itu, campuran dipisahkan menggunakan teknik sentrifugasi selama 30 menit pada kecepatan 5000 rpm, lalu dilakukan dekantasi. Filtrat yang diperoleh dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum *malachite green*. Endapan yang mengandung adsorben digunakan kembali untuk melepaskan zat warna yang teradsorpsi menggunakan eluen etanol, kemudian diaduk pada waktu kontak optimum dan didekantasi. Endapan selanjutnya dicuci dengan akuades hingga pH netral, lalu dikeringkan di oven pada suhu 40°C selama 3 jam. Adsorben yang telah diregenerasi ini digunakan kembali untuk proses adsorpsi hingga lima kali siklus penggunaan ulang (Buhani *et al.*, 2011).

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Modifikasi adsorben karbon dari cangkang kelapa sawit berhasil dimodifikasi dengan magnetit dan APTES (KAF-M dan KAF-MS) dibuktikan dengan hasil karakterisasi menggunakan XRD, FTIR, SEM-EDX, dan BET.
2. Adsorpsi optimum ion Mn(II) terjadi pada dosis 1 g tetapi dosis yang digunakan yaitu 0,2 g, pH 8, waktu kontak 45 menit, dan konsentrasi maksimum 400 ppm serta untuk *malachite green* pada dosis 0,2 g, pH 10, waktu kontak 30 menit, dan konsentrasi maksimum 400 ppm.
3. Kinetika adsorpsi ion Mn(II) dan *malachite green* pada adsorben KAF-M dan KAF-MS cenderung mengikuti model pseudo orde dua.
4. Adsorpsi Mn(II) cenderung mengikuti model isoterm Langmuir, sedangkan *malachite green* cenderung mengikuti model Freundlich.
5. Desorpsi *malachite green* paling efektif yang pertama dengan eluen etanol 40% dan yang kedua dengan eluen HCl, mengindikasikan interaksi dominan berupa ikatan hidrogen dan elektrostatik.
6. Adsorben KAF-M dan KAF-MS masih efektif hingga 5 kali penggunaan ulang, meskipun daya adsorpsi sedikit menurun karena berkurangnya situs aktif.

5.2. Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Melakukan peningkatan kualitas karbon melalui optimasi proses aktivasi atau agar diperoleh karakteristik karbon yang lebih sesuai untuk keperluan adsorpsi.
2. Melakukan modifikasi dengan metode lain yang lebih efektif untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abel, U. A., Habor, G. R., and Oseribho, O. I. 2020. Adsorption Studies of Oil Spill Clean-up Using Coconut Coir Activated Carbon Adsorption Studies of Oil Spill Clean-up Using Coconut Coir Activated Carbon (CCAC). *American Journal of Chemical Engineering*. 8(2): 36–47.
- Achmad, R. 2004. *Kimia Lingkungan Edisi 1*. Andi Offset. Yogyakarta.
- Ai, L., Zhang, C., Liao, F., Wang, Y., Li, M., Meng, L., and Jiang, J. 2011. Removal of Methylene Blue from Aqueous Solution with Magnetite Loaded Multi-wall Carbon Nanotube : Kinetic , Isotherm and Mechanism Analysis. *Journal of Hazardous Materials*. 198(1): 282–290.
- Aksu, Z. 2005. Application of Biosorption for the Removal of Organic Pollutants: A Review. *Process Biochemistry*. 40(3): 997–1026.
- Al-Maliky, E. A., Gzar, H. A., and Al-Azawy, M. G. 2021. Determination of Point of Zero Charge (PZC) of Concrete Particles Adsorbents. *ICAREST*. 1184(1): 1–8.
- Alberty, R. A. 1997. *Physical Chemistry*. John Willey and Sons Inc. New York.
- Anbealagan, L. D., Chew, T. L., Jawad, Z. A., and Ho, C. D. 2021. Synthesis and Characterization of (3-aminopropyl)triethoxysilane (APTES) Functionalized Zeolite AlPO-18. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering PAPER*. 1195(1): 1–11.
- Arifandy, M. I., Cynthia, E. P., Sarbaini, Muttakin, F., dan Nazarudin. 2021. Potensi Limbah Padat Kelapa Sawit Sebagai Sumber Energi Terbarukan Dalam Implementasi Indonesian Sustainability Palm Oil PKS Sungai Galuh. *Jurnal Sains, Teknologi, Dan Industri*. 19(1): 116–122.
- Arkles, B. 2006. *Silane Coupling Agents Connecting Across Boundaries v2.0*. Gelest, Inc. India.
- Atkins, P. W. 1990. *Kimia Fisika Eedisi ke IV*. Erlangga. Jakarta.
- Bantacut, T., dan Pasaribu, H. 2015. Aliran Tertutup Massa dan Potensi Mandiri Energi Produksi CPO. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*. 25(3): 215–226.

- Batzias, F., Sidiras, D., Schroeder, E., and Weber, C. 2009. Simulation of Dye Adsorption on Hydrolyzed Wheat Straw in Batch and Fixed-bed Systems. *Chemical Engineering Journal*. 148(1):459-472.
- Botahal, L. 2022. Adsorpsi Arang Aktif. Deepublish. Yogyakarta.
- Buhani, B., Herasari, D., Suharso, and Yuwono, S. D. 2017. Correlation of Ionic Imprinting Cavity Sites on the Amino-Silica Hybrid Adsorbent with Adsorption Rate and Capacity of Cd^{2+} Ion in Solution. *Oriental Journal Of Chemistry*. 33(1): 418–429.
- Buhani, Hariyanti, F., Suharso, Rinawati, and Sumadi. 2019. Magnetized Algae-Silica Hybrid from Porphyridium sp. Biomass with Fe_3O_4 Particle and its Application as Adsorbent for the Removal of Methylene Blue from Aqueous Solution. *Desalination and Water Treatment*. 142: 331–340.
- Buhani, Luziana, F., Rilyanti, M., Sumadi, dan Permatasari, D. 2020. Kajian Pola Isoterm Adsorpsi Zat Pewarna Kristal Violet pada Adsorben dari Karbon Cangkang Kelapa Sawit dengan Pelapisan Partikel Fe_3O_4 . *Seminar Nasional Ilmu Teknik Dan Aplikasi Industri (SINTA)*. 3(1): 1–6.
- Buhani, Luziana, F., Suharso., Rilyanti, M., dan Permatasari, D. 2020. Kajian Pola Isoterm Adsorpsi Zat Pewarna Kristal Violet Pada Adsorben dari Karbon Cangkang Kelapa Sawit dengan Pelapisan Partikel Fe_3O_4 . *Prosiding SINTA*. 3: 1–5.
- Buhani, Narsito, Nuryono, and Kunarti, E. S. 2009. Amino and Mercapto-Silica Hybrid for $\text{Cd}(\text{II})$ Adsorption in Aqueous Solution. *Indonesian Journal of Chemistry*. 9(2): 170–176.
- Buhani, Narsito, Nuryono, Kunarti, E. S., and Suharso. 2015. Adsorption Competition of $\text{Cu}(\text{II})$ Ion in Ionic Pair and Multi-Metal Solution by Ionic Imprinted Amino-Silica Hybrid Adsorbent. *Desalination and Water Treatment*. 55(5): 1240–1252.
- Buhani, Narsito, Nuryono, dan Kurniati, E. S. 2009. Hibrida Amino-silika dan Merkapto-silika sebagai Adsorben untuk Adsorpsi Ion $\text{Cd}(\text{II})$ dalam Larutan. *Indonesian Journal of Chemistry*. 9(2): 170–176.
- Buhani, Puspitarini, M., Rahmawaty, Suharso, Rilyanti, M., and Sumadi. 2018. Adsorption of Phenol and Methylene Blue in Solution by Oil Palm Shell Activated Carbon Prepared by Chemical Activation. *Oriental Journal of Chemistry*. 34(4): 2043–2050.
- Buhani dan Suharso. 2016. *Modifikasi Silika sebagai Penyerap Logam Berat*. Innosain. Yogyakarta.
- Buhani, Suharso, Luziana, F., Rilyanti, M., and Sumadi. 2019. Production of Adsorbent from Activated Carbon of Palm Oil Shells Coated by Fe_3O_4 Particle to Remove Crystal Violet in Water. *Desalination and Water Treatment*. 171(1): 281–293.

- Buhani, Suharso, Miftahza, N., Permatasari, D., and Sumadi. 2021. Improved Adsorption Capacity of *Nannochloropsis* sp. through Modification with Cetyltrimethylammonium Bromide on the Removal of Methyl Orange in Solution. *Adsorption Science & Technology*. 2021(1): 1–14.
- Buhani, Suharso, dan Partogi, A. F. 2013. Isoterm Adsorpsi Ion Ni(II) dalam Larutan oleh Biomassa Alga *Nannochloropsis* sp yang Dimodifikasi dengan Silika-magnet. *Prosiding Semirata FMIPA Universitas Lampung*. 61–66.
- Buhani, Suharso, Rilyanti, M., Antika, F. A. R., Lestari, P. L., Sumadi, Ansori, M., and Elwakeel, K. Z. 2023. Functionalization of Carbon from Rubber Fruit Shells (*Hevea brasiliensis*) with Silane Agents and its Application to the Adsorption of Bi-component Mixtures of Methylene Blue and Crystal Violet. *Environmental Science and Pollution Research*. 1–14.
- Buhani, Suharso, and Satria, H. 2011. Hybridization of *Nannochloropsis* sp Biomass-Silica through Sol-Gel Process to Adsorb Cd(II) Ion in Aqueous Solutions. *European Journal of Scientific Research*. 51(4): 467–476.
- Buhani, Suharso, and Sembiring, Z. 2012. Immobilization of *Chetoceros* sp Microalgae with Silica Gel through Encapsulation Technique as Adsorbent of Pb Metal from Solution. *Oriental Journal of Chemistry*. 28(1): 271–278.
- Candini, A. R., Ginting, D., Syahputra, R. F., Piza, dan Nurhamiyah, L. 2024. Aplikasi Karbon Aktif Cangkang Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis*) sebagai Pigmen Toner Hitam pada Elektrofotografi dengan Polimer Stirena Akrilik-Vinil Pirrolidine. *POSITRON*. 14(1): 37–47.
- Drbohlavara, J., R. Hrdy, V. Adam, R. Kizek, O. Schneeweiss, and J. Hubalek. 2009. Preparation and Properties of Various Magnetic Nanoparticles. *Journal of Sensors*. 9(1):2352-2362.
- Febrina, L. dan Ayuna, A. 2019. Studi Penurunan Kadar Besi (Fe) dan Mangan (Mn) dalam Air Tanah Menggunakan Saringan Keramik. *Jurnal Teknologi*. 7(1): 36–44.
- Fernandez dan Rio, B. 2011. *Kimia Material Spektroskopi Infra Merah (IR) dan Sinar Tampak (UV-Vis)*. Universitas Andalas Press. Padang.
- Firmanto, R. P., Setyowati, R. D. N., dan Suprayogi, D. 2021. Kemampuan Adsorben dari Limbah Serbuk Gergaji Kayu Jati terhadap Penurunan Kandungan Timbal (Pb) pada Limbah Cair dengan Menggunakan Sistem Batch. *Journal of Research and Technology*. 7(2): 195–206.
- Fitriansyah, A., Amir, H., dan Elvinawati. 2021. Karakterisasi Adsorben Karbon Aktif dari Sabut Pinang (*Areca catechu*) Terhadap Kapasitas Adsorpsi Zat Warna Indigosol Blue 04-B. *Jurnal Pendidikan dan Ilmu Kimia*. 5(1):42-54.
- Fu, Y., and Viraraghavan, T. 2001. Fungal Decolorization of Dye Wastewaters: A Review. *Bioresource Technology*. 79(3): 251–262.

- Ghosh, S., Badruddoza, A.Z.M., Hidajat, K., and Uddin, M. S. 2013. Adsorptive Removal of Emerging Contaminants from Water Using Superparamagnetic Fe₃O₄ Nanoparticles Bearing Aminated β -Cyclodextrin. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 19(3):122-130.
- Gunda, N. S. K., Singh, M., Norman, L., Kaur, K., and Mitra, S. K. 2014. Optimization and Characterization of Biomolecule Immobilization on Silicon Substrates Using (3-aminopropyl)triethoxysilane (APTES) and Glutaraldehyde Linker. *Applied Surface Science*. 305(1): 522–530.
- Handayani, M. dan Sulistiyono, E. 2009. Uji Persamaan Langmuir Dan Freundlich Pada Penyerapan Limbah Chrom (VI) Oleh Zeolit. *Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Nuklir*. 130–136.
- Handika, G., Maulina, S., dan Mentari, V. A. 2017. Tanaman Kelapa Sawit dengan Penambahan Aktivator Natrium Karbonat (Na₂CO₃) dan Natrium Klorida (NaCl). *Jurnal Teknik Kimia USU*. 6(4): 41–44.
- Harvey, D. 2000. *Modern Analytical Chemistry*. United States of America.
- Hayu, L. D. R., Nasra, E., Azhar, M., dan dan Etika, S. B. 2021. Adsorpsi Zat Warna Methylene Blue Menggunakan Karbon Aktif dari Kulit Durian (*Durio zibethinus Murr .*). *Periodic: Chemistry Jaournal of Universitas Negeri Padang*. 10(2): 8–13.
- Husin, H. dan Rosnelly, C. M. 2005. Studi Kinetika Adsorpsi Larutan Logam Timbal (Pb) Menggunakan Karbon Aktif dari Batang Pisang. *Jurnal Fakultas Teknik Universitas Syiah Kuala Darrusalam*. 1–15.
- Ifa, L., Nurdjannah, Syarif, T., dan Darnengsih. 2021. *Bioadsorben dan Aplikasinya*. Yayasan Pendidikan Cendekia Muslim. Sumatera Barat.
- Ikhwanuddin. 2018. Pembuatan Biosorben dari Cangkang Buah Karet (*Hevea Brasilliensis*) Menggunakan Aktivator Kalium Hidroksida (KOH) untuk Menurunkan Asam Lemak Bebas dan Bilangan Peroksida pada CPO (*Crude Palm Oil*). *Skripsi*. Universitas Sumatera Utara.
- Indra, Armid, A., dan Takwir, A. 2020. Distribusi Logam Mangan (Mn) Pada air Laut Permukaan Di Perairan Teluk Staring Sulawesi Tenggara. *Sapa Laut*. 5(1): 89–98.
- Istiana, S., dan Prasetya, T. 2020. Preparasi Arang Aktif Trembesi Magnetit untuk Adsorpsi Senyawa Tannin dalam Limbah Cair. *Indonesian Journal of Chemical Science*. 9(1): 17–23.
- Jalil, A. A., Triwahyono, S., Adam, S. H., Rahim, N. D., Aziz, M. A. A., Hairom, N. H. H., Razali, N. A. M., Abidin, M. A. Z., and Mohamadiah, M. K. A. 2010. Adsorption of Methyl Orange from Aqueous Solution onto Calcined Lapindo Volcanic Mud. *Journal of Hazardous Materials*. 181(1–3) : 755–62.

- Khopkar, S. M. 1990. *Konsep Dasar Kimia Analitik*. Penerjemah A. Saptohardjo. UI Press. Jakarta.
- Lee, S., Jeong, J., Shin, S., Kim, J., and Kim, J. 2004. Synthesis and Characterization of Superparamagnetic Maghemite Nanoparticles Prepared by Coprecipitation Technique. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 282(1): 147–150.
- Lestari, F. I. 2018. Pembuatan Biosorben dari Cangkang Buah Karet (*Hevea Brasiliensis*) Menggunakan Aktivator Kalium Hidroksida (KOH) untuk Menurunkan Asam Lemak Bebas dan Bilangan Peroksida pada CPO (Crude Palm Oil). In *Skripsi*. Universitas Sumatera Utara.
- Lestari, I., Prasetyo, E., dan Gusti, D. R. 2021. Penggunaan Karbon Aktif Magnetit-Fe₃O₄ Sebagai Penyerap Zat Warna Remazol Yellow. *Jurnal BiGME*. 1(1): 29–37.
- Li, Q., Qi, Y., and Gao, C. 2015. Chemical Regeneration of Spent Powdered Activated Carbon Used in Decolorization of Sodium Salicylate for the Pharmaceutical Industry. *Journal of Cleaner Production*. 86(1): 424–431.
- Liu, Y., Li, Y., Li, X., and He, T. 2013. Kinetics of (3-Aminopropyl) triethoxysilane (APTES) Silanization of Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles. *Langmuir*. 29(1): 15275–15282.
- Lu, W., Shen, Y., Xie, A., and Zhang, W. 2010. Green Synthesis and Characterization of Superparamagnetic Fe₃O₄ Nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 322(13): 1828-1833.
- Maihendra, Fadli, A., dan Zultinir. 2016. Kinetika Adsorpsi pada Penyerapan Ion Timbal Pb²⁺ Terlarut dalam Air Menggunakan Partikel Tricalcium Phosphate. *Jom FTEKNIK*. 3(2): 1–5.
- Martinez, M., Miralles, N., Hidalgo, S., Fio, N., Villaescusa, I., and Poch, J. 2006. Removal of Lead(II) and Cadmium(II) from Aqueous Solutions Using Grape Stalk . Waste. *Journal of Hazard Materials*. 133(1):203-211.
- Maulana, F., and Budhi, O. 2022. Optimum Conditions of Nitrite Anion Desorption from Dimethylamine Modified Silica Gel Using HCl and H₂SO₄. *Journal of Chemistry, Education, and Science*. 6(2):104-112.
- Meesters, K. and Bakker, R. R. 2013. Valorization of Palm Oil (mill) Residues. Identifying and Solving the Challenges. *Ministry of Economic Affairs, Agriculture and Innovation*. 1–38.
- Muhajir, A., Machdar, I., dan Mariana. 2021. Produksi Karbon Aktif Arang Tempurung Kelapa Menggunakan Kombinasi Metode Aktivasi Secara Kimia dan Steam Tekanan Rendah. *Jurnal Litbang Industri*. 11(2): 110–116.

- Noor, M. I., Yufita, E., dan Zulfalina. 2016. Identifikasi Kandungan Ekstrak Kulit Buah Naga Merah Menggunakan Fourier Transform Infrared (FTIR) dan Fitokimia. *Journal of Aceh Physics Society (JAcPS)*. 5(1): 14–16.
- Pahan. 2008. *Panduan Lengkap Kelapa Sawit*. Penebar Swadaya. Jakarta.
- Pavia, D. L., Gary, M. L., George, S. K., and James, R. V. 2001. *Introduction to Spectroscopy, Fourth Edition*. Brooks/Cole. Belmont USA.
- Petcharoen, K. and Sirivat, A. 2012. Synthesis and Characterization of Magnetite Nanoparticles Via the Chemical Co-precipitation Method. *Materials Science & Engineering*. 177(5): 421–427.
- Purba, E., dan Muharani, S. 2023. Mercury (Hg) Adsorption in Traditional Gold Mining Liquid Waste with Activated Carbon from Coffee Gound. *Indonesian Journal of Chemical Science*. 12(1): 1-11.
- Purwitaari, D. G., Tussania, R., dan Fathoni, R. 2022. Adsorpsi Logam Kadmium (Cd) pada Kadium Sulfat (CdSO_4) Menggunakan Batang Pohon Pisang Sebagai Adsorben. *Jurnal Chemurgy*. 6(1): 131–136.
- Putra, H. A. 2020. Tinjauan Naratif: Validitas Metode Spektrofotometer UV-Vis Derivatif *Zero Crossing* dalam Analisis Multikomponen Senyawa Obat pada Sediaan Farmasi. *Skripsi*. UIN Yogyakarta.
- Putri, N. F. Y., and Rahmayanti, M. 2020. Desorption of Naphtol Blue-Black from Humic Acid Modified Magnetite Using NaOH as Desorption Agent. *PROC. INTERNAT. CONF. SCI. ENGIN.* 3(1): 157–158.
- Rahma, A. N. dan Kurniawati, D. 2022. Analisis Proksimat Karbon Aktif Kulit Langsat. *Chemistry Journal of Universitas Negeri Padang*. 11(3): 83–87.
- Rahman, T., Fadhlulloh, M. A., Nandiyanto, B. A. D., dan Mudzakir, A. 2015. Review: Sintesis Karbon Nanopartikel. *Jurnal Integrasi Proses*. 5(3): 120–131.
- Rosmegawati. 2021. Peran Aspek Tehnologi Pertanian Kelapa Sawit untuk Meningkatkan Produktivitas Produksi Kelapa Sawit. *Jurnal AGRISIA*. 13(2): 73–90.
- Rudi, N. N., Muhamad, M. S., Chuan, L. T., Alipal, A., Omar, S., Hamidon, N., Hamid, N. H. A., Sunar, N. M., Ali, R., and Haru, H. 2020. Evolution of Adsorption Process for Manganese Removal in Water Via Agricultural Waste Adsorbents. *Heliyon*. 6(1): 1-13.
- Sari, F. G. T., Hidayat, D., dan Septiani P., D. 2016. Kajian Kandungan Logam Berat Mangan (Mn) dan Nikel (Ni) pada Sedimen di Pesisir Teluk Lampung. *Analit: Analytical and Enviromental Chemistry*. 1(1): 17–25.
- Sasongko, A. 2002. Studi Adsorpsi Ion Logam Kadmium (Cd) pada Biomassa Alga *Chlorella* sp. yang Termobilisasi Silika Gel. *Skripsi*. Universitas Lampung.

- Schlumberger, C. and Thommes, M. 2021. Characterization of Hierarchically Ordered Porous Materials by Physisorption and Mercury Porosimetry-A Tutorial Review. *Advanced Materials Interfaces*. 8(4): 1–25.
- Shirendev, N., Bat-Amgalan, M., Aleksandr, A., Gunchin, B., and Yunden, G. 2021. Cu(II), Pb(II) and Cr(VI) Adsorption on the Modified Activated Carbon. *Proceedings of the 5th International Conference on Chemical Investigation and Utilization of Natural Resource*. 2(1): 149–157.
- Sihite, E. B., dan Budiarto. 2009. Analisis Pengaruh Penuaan dan Pendingin Terhadap kekerasan dan Strukturmikro Paduan Cuhfo. *Jurnal Kajian Ilmiah Universitas Bhayangkara Jakarta Raya*. 19(3): 1–12.
- Siringoringo, M., Wahyuningsih, S., Purnamasari, I., dan Arumsari, M. 2022. Peramalan Jumlah Produksi Kelapa Sawit Provinsi Kalimantan Timur Menggunakan Metode Singular Spectrum Analysis. *VARIANSI: Journal of Statistics and Its Application on Teaching and Research*. 4(3): 162–172.
- Suhendrayatna. 2001. Bioremoval Logam Berat dengan Menggunakan Mikroorganisme: Suatu Kajian Kepustakaan. *Seminar On-Air Bioteknologi untuk Indonesia Abad 21*.
- Sukmawati, P. dan Utami, B. 2014. Adsorben Zat Pewarna Tekstil Malachite Green Menggunakan Adsorben Kulit Buah Kakao. *Prosiding Seminar Nasional Fisika Dan Pendidikan Fisika (SNFPF)*. 5(1): 19–25.
- Sulaiman, N. H., Malau, L. A., Lubis, F. H., Br Harahap, N., Manalu, F. R., dan Kembaren, A. 2017. Pengolahan Tempurung Kemiri Sebagai Karbon Aktif dengan Variasi Aktivator Asam Fosfat. *Jurnal Einstein*. 5(2): 37–41.
- Suripin. 2022. *Sumber Tanah dan Air*. ANDI. Yogyakarta.
- Susanto dan Prasdiantika R. 2018. Pengaruh Rute Sintesis terhadap Keefektifan Pengikatan Gugus PDETA pada Sintesis $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{PDETA}$. *Jurnal Teknosains*. 8(1): 39–47.
- Sylvia, N., Wijaya, Y. A., Masrullita, dan Safriwardy, F. 2021. Efektivitas Karbon Terhadap Adsorpsi Ion Logam Fe^{2+} dengan Aktivator NaOH. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*. 10(2): 83–91.
- Sypabekova, M., Hagemann, A., Rho, D., and Kim, S. 2023. Review : 3-Aminopropyltriethoxysilane (APTES) Deposition Methods on Oxide Surfaces in Solution and Vapor Phases for Biosensing Applications. *Biosensors*. 13(36): 1–25.
- Tejawati, N. A. P., Manurung, M., dan Ratyani, O. 2017. Karakterisasi Karbon Aktif Komersial serta Aplikasinya Sebagai Adsorben Ion Timbal(II) dan Kromium(III). *Jurnal Kimia*. 11(2): 181–186.

- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., and Sing, K. S. W. 2015. Physisorption of Gases, with Special Reference to the Evaluation of Surface Area and Pore Size Distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*. 87(9–10): 1051–1069.
- Wijayanti, I. E. dan Kurniawati, E. A. 2019. Studi Kinetika Adsorpsi Isoterm Persamaan Langmuir dan Freundlich pada Abu Gosok sebagai Adsorben. *Jurnal Kimia Dan Pendidikan*. 4(2): 175–184.
- Wong, K. T., Yoon, Y., and Jang, M. 2015. Enhanced Recyclable Magnetized Palm Shell Waste-Based Powdered Activated Carbon for The Removal of Ibuprofen: Insights for Kinetics and Mechanisms. *PLoS ONE*, 10(10): 1–18.
- Wong, K. T., Yoon, Y., Snyder, S. A., and Jang, M. 2016. Chemosphere Phenyl-functionalized Magnetic Palm-based Powdered Activated Carbon for the Effective Removal of Selected Pharmaceutical and Endocrine-disruptive Compounds. *Chemosphere*. 152(1): 71–80.
- Yamaura, M., Camilo, R. L., Sampaio, L. C., Macedo, M. A., Nakamura, M., and Toma, H. E. 2004. Preparation and Characterization of (3-aminopropyl) triethoxysilane-Coated Magnetite Nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 279(1): 210–217.
- Yanti, D. R., and Budhi, O. 2022. Desorption Nitrate (NO_3^-) from Silica Gel Modified by Dimethylamine (DMA) with Acid Eluent. *Journal of Physics: Conference Series*. 6(2): 82-89.
- Zulaicha A S, Buhani, and Suharso. 2021. Modification of Activated Carbon from *Elaeis Guineensis* Jacq. Shell with Magnetite (Fe_3O_4) Particles and Study Adsorption-Desorption on Ni(II) Ions in Solution. *Journal of Physics: Conferences Series*. 1751(1): 1-11.
- Zulfania, F., Aribadin, Fathoni, R., dan Nur, A. M. 2022. Kemampuan Adsorpsi Logam Berat Zn dengan Menggunakan Adsorben Kulit Jagung (*Zea mays*). *Jurnal Chemurgy*. 6(2):, 65–69.
- Zurweni and Sanova, A. 2023. Development of UV-VIS Spectrophotometer Virtual Laboratory Media for Instrumental Analytical Chemistry Digital Practicum. *Formatif: Jurnal Ilmiah Pendidikan MIPA*. 13(1): 89–100.