

**MODIFIKASI BIOKARBON CANGKANG KELAPA SAWIT DENGAN
PELAPISAN MAGNETIT DAN SILANISASI SEBAGAI ADSORBEN ZAT
WARNA *MALACHITE GREEN***

(Skripsi)

Oleh

MAYANG APRILIAN SURI

2117011052



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

ABSTRAK

MODIFIKASI BIOKARBON CANGKANG KELAPA SAWIT DENGAN PELAPISAN MAGNETIT DAN SILANISASI SEBAGAI ADSORBEN ZAT WARNA *MALACHITE GREEN*

Oleh

Mayang Aprilian Suri

Pada penelitian ini telah dilakukan pembuatan dan karakterisasi biokarbon dari cangkang kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) yang dimodifikasi dengan pelapisan magnetit untuk menghasilkan KAF-M dan modifikasi KAF-M dengan (3-*Aminopropyl*)-triethoxysilane (APTES) untuk menghasilkan KAF-MS sebagai adsorben zat warna MG. Karakterisasi pada adsorben dilakukan dengan menggunakan spektrofotometer *Fourier Transform InfraRed* (FTIR) untuk mengidentifikasi gugus fungsi, *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengidentifikasi tingkat kristalinitas, *Brunauer Emmet Teller* (BET) untuk mengetahui besarnya luas permukaan karbon aktif dan *Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX) untuk mengetahui morfologi permukaan adsorben dan mengidentifikasi komposisi unsur. Adsorpsi zat warna *malachite green* oleh adsorben KAF-M dan KAF-MS optimum pada dosis 0,2 g, pH optimum yaitu 8 dan 10, waktu kontak optimum yaitu 60 menit, dan konsentrasi optimum yaitu 400 ppm. Data kinetika zat warna MG terhadap adsorben cenderung mengikuti model kinetika pseudo orde dua dan isoterm adsorpsi cenderung mengikuti model isoterm adsorpsi Freundlich. Persentase desorpsi tertinggi terjadi pada eluen etanol 40%. Adsorben efektif digunakan kembali sebanyak 4 dan 5 kali penggunaan ulang yang ditunjukkan dengan hasil persentase adsorpsi >90%.

Kata kunci: Adsorpsi, biokarbon, cangkang kelapa sawit, *malachite green*, magnetit dan APTES

ABSTRACT

MODIFICATION OF PALM SHELL BIOCARBON WITH MAGNETITE COATING AND SILANIZATION AS ADSORBENT FOR MALACHITE GREEN DYES

By

Mayang Aprilian Suri

In this study, the preparation and characterization of biocarbon derived from oil palm shells (*Elaeis guineensis* Jacq.) The biocarbon was modified by coating it with magnetite to produce PAC-M and further modified with (3-Aminopropyl) triethoxysilane (APTES) to produce PAC-MS. These materials were used as adsorbents for MG dye. Characterization of the adsorbents was performed using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) to identify functional groups, X-Ray Diffraction (XRD) to determine crystallinity levels, Brunauer-Emmett-Teller (BET) analysis to measure the surface area of the activated carbon, and Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX) to observe surface morphology and element composition. The optimum conditions for MG dye adsorption using PAC-M and PAC-MS were found at a dose of 0.2 g, pH values of 8 and 10, a contact time of 60 minutes, and a dye concentration of 400 ppm. The adsorption kinetics followed a pseudo-second-order model, while the adsorption isotherm tended to follow the Freundlich model. The highest desorption percentage was achieved using 40% ethanol as the eluent. The adsorbents could be reused effectively for up to 4 and 5 cycles, maintaining an adsorption efficiency >90%.

Keywords: Adsorption, biocarbon, palm shell, malachite green, magnetite and APTES

Judul penelitian : **MODIFIKASI BIOKARBON CANGKANG
KELAPA SAWIT DENGAN PELAPISAN
MAGNETIT DAN SILANISASI SEBAGAI
ADSORBEN ZAT WARNA MALACHITE
GREEN**

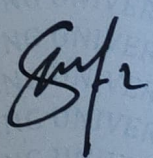
Nama : **Mayang Aprilian Suri**

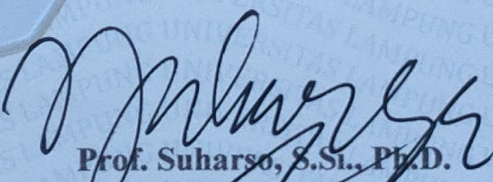
Nomor Pokok Mahasiswa : 2117011052

Jurusan : Kimia

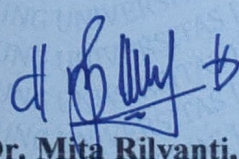
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam




Prof. Dr. Buhani, S.Pd., M.Si.
NIP. 196904161994032003


Prof. Suharso, S.Si., Ph.D.
NIP. 196905301995121001

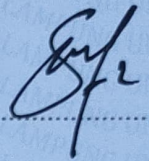
2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung


Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si.
NIP. 197205302000032001

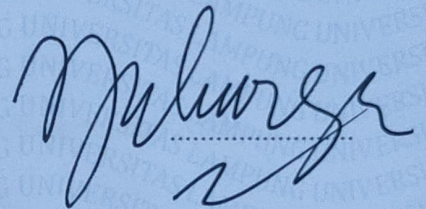
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

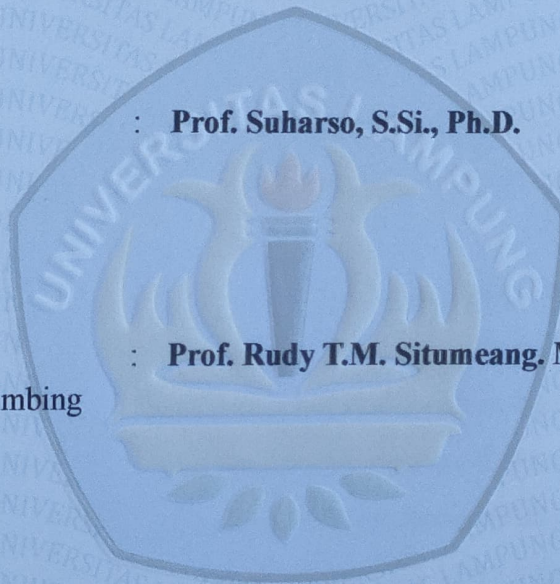
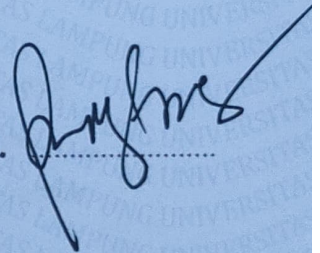
Ketua : **Prof. Dr. Buhani, S.Pd., M.Si.**



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



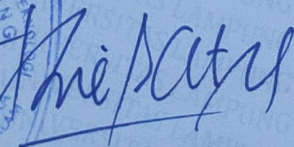
Penguji
Bukan Pembimbing : **Prof. Rudy T.M. Situmeang, M.Sc., Ph.D.**



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**

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama	: Mayang Aprilian Suri
Nomor Pokok Mahasiswa	: 2117011052
Jurusan	: Kimia
Fakultas	: Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi	: Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya dan sesungguhnya, bahwa skripsi saya yang berjudul **“Modifikasi Biokarbon Cangkang Kelapa Sawit Dengan Pelapisan Magnetit dan Silanisasi Sebagai Adsorben Zat Warna *Malachite Green*”** adalah benar karya sendiri, baik gagasan, hasil dan analisisnya. Selanjutnya saya tidak keberatan jika sebagian atau seluruh data dalam skripsi tersebut digunakan oleh dosen atau program studi untuk kepentingan publikasi sesuai dengan kesepakatan sebelum dilakukan publikasi.

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

Bandar Lampung, 21 Juli 2025



Mayang Aprilian Suri

NPM. 2117011052

**MODIFIKASI BIOKARBON CANGKANG KELAPA SAWIT DENGAN
PELAPISAN MAGNETIT DAN SILANISASI SEBAGAI ADSORBEN ZAT
WARNA *MALACHITE GREEN***

Oleh

Mayang Aprilian Suri

Skripsi

**Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
SARJANA SAINS**

Pada

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



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

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Mayang Aprilian Suri. Dilahirkan di Bandar Lampung, 15 April 2003, sebagai anak kedua dari tiga bersaudara yang merupakan putri dari Bapak Madsuri dan Ibu Rosita.

Penulis mengawali jenjang pendidikan dari pendidikan TK tahun 2009, Sekolah Dasar (SD) di SD N 1 Ketapang, Teluk Betung Selatan, Bandar Lampung hingga tahun 2015. Pendidikan Sekolah Menengah Pertama (SMP) diselesaikan pada tahun 2018 di SMP N 23 Bandar Lampung, Tanjung Karang Timur, Lampung. Pendidikan Sekolah Menengah Kejuruan (SMK) diselesaikan di SMK SMTI Bandar Lampung pada tahun 2021 dan pada tahun yang sama penulis diterima sebagai Mahasiswi Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN (Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri).

Selama perkuliahan, selain aktif dalam bidang akademik, penulis juga terlibat dalam berbagai kegiatan organisasi. Penulis pernah bergabung dalam Himpunan Mahasiswa Kimia (Himaki) FMIPA Unila, dimulai sebagai kader muda pada tahun 2021, kemudian menjadi anggota pengurus bidang Sosial Masyarakat (Sosmas) pada tahun 2022. Selama berorganisasi di Himaki, penulis berpartisipasi dalam berbagai kegiatan, baik sebagai peserta maupun panitia, salah satunya sebagai sekertaris acara dan penanggung jawab kegiatan *Chemistry Care* (Checare) yang diselenggarakan oleh Himaki FMIPA Unila pada tahun 2022. Pada tahun yang sama, penulis juga berkesempatan menjadi panitia dalam acara Karya Wisata Ilmiah (KWI) XXXIII sebagai anggota bidang Hubungan

Masyarakat (Humas) yang diselenggarakan oleh Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM) FMIPA Unila. Pengalaman ini membentuk penulis menjadi pribadi yang memiliki kemampuan dalam manajemen waktu, kerja tim, dan komunikasi, yang sangat mendukung perjalanan akademik serta pengembangan diri penulis.

Pengalaman berharga lainnya yang penulis peroleh selama masa perkuliahan adalah kesempatan untuk melakukan *project* Praktik Kerja Lapangan (PKL) di laboratorium kimia anorganik-kimia fisik jurusan Kimia FMIPA Unila pada tahun 2024 bulan Januari-Juni, kemudian pada Oktober 2024 - Februari 2025 di tempat yang sama, penulis juga menyelesaikan penelitian yang berjudul “Modifikasi Biokarbon Cangkang Kelapa Sawit dengan Pelapisan Magnetit dan Silanisasi Sebagai Adsorben Zat Warna *Malachite Green*”. Pengalaman ini tidak hanya memperluas wawasan penulis tentang dunia ilmu kimia, namun juga melatih kemampuan penulis untuk beradaptasi, cepat tanggap dalam mengatasi permasalahan penelitian, dan tanggung jawab dalam lingkungan kerja.

Bulan April-Juni 2024, penulis diberi amanah untuk menjadi asisten praktikum Kimia Anorganik-Fisik I untuk mahasiswa/i Kimia angkatan 2022 dan pada bulan September-November 2024, penulis juga masih diberi amanah untuk menjadi asisten praktikum Kimia Anorganik-Fisik II dan koordinator asisten praktikum Kimia Anorganik II untuk mahasiswa/i Kimia angkatan 2022. Melalui kesempatan ini, penulis tidak hanya mengulas dan memperkuat kembali pemahaman materi yang dipelajari, namun juga mengembangkan *soft skill*, terutama dalam hal komunikasi dan *public speaking* agar materi dapat disampaikan dengan baik, jelas serta tepat sasaran kepada praktikan.

MOTTO

“Sesungguhnya bersama kesulitan pasti ada kemudahan. Maka apabila engkau telah selesai (dari suatu urusan), tetaplah bekerja keras (untuk urusan yang lain), dan hanya kepada Tuhan mu lah engkau berharap”

(Q.S. Al-Insyirah: 6-8)

Dan satu lagi,

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya.”

(Q.S. Al-Baqarah: 286)

“Pada akhirnya, ini semua hanyalah permulaan...”

(Nadin Amizah)

“Rasakan setiap proses yang kamu tempuh dalam hidupmu, sehingga kamu tau betapa hebatnya dirimu sudah berjuang sampai detik ini”

“Aku membahayakan nyawa mama untuk lahir ke dunia dan aku membuat papaku bekerja keras untuk pendidikan serta masa depanku. Jadi tidak mungkin aku menyerah dan tidak ada artinya”

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Atas izin serta keridhoan Allah SWT sebagai tanda cinta dan bakti, penulis
mempersembahkan karya sederhana ini kepada:

My beloved

Mama dan Papa

serta

Jurusan kimia dan Almamater tercinta

SANWACANA

Alhamdulillah puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat, nikmat, dan karunia-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul:

“Modifikasi Biokarbon Cangkang Kelapa Sawit Dengan Pelapisan Magnetit dan Silanisasi Sebagai Adsorben Zat Warna *Malachite Green*”

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.

Dalam penulisan skripsi ini tidak lepas dari kesulitan dan rintangan, namun itu semua dapat penulis lalui berkat rahmat dan ridho Allah SWT serta bantuan dan dukungan dari orang-orang terdekat penulis. Terima kasih orang-orang baik yang telah kebersamai dan memberi banyak dukungan bagi penulis. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangannya sehingga penulis mengharapkan adanya kritik dan saran. Selain itu, penulis berharap agar skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembacanya. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT
2. Kedua orang tuaku tercinta, kakak dan adikku yang selalu memberikan dukungan baik materi maupun moral, cinta, kasih sayang, dan ketulusan selama ini, yang tak henti-hentinya memberikan doa disetiap langkah penulis.

3. Ibu Prof. Dr. Buhani, S.Pd., M.Si., selaku dosen pembimbing I. Terima kasih atas segala bimbingan, ilmu, nasihat, semangat, motivasi, dan kesabaran kepada penulis dalam penyelesaian skripsi ini.
4. Bapak Prof. Suharso, S.Si., Ph.D., selaku dosen pembimbing II. Terima kasih selalu meluangkan waktunya, memberikan arahan, bimbingan, motivasi semangat dalam penyelesaian skripsi.
5. Bapak Prof. Rudy Tahan Mangapul Situmeang, M.Sc., Ph.D., selaku dosen pembahas. Terima kasih telah memberikan saran, motivasi, nasihat, serta kritik yang membangun kepada penulis sehingga skripsi ini terselesaikan dengan baik.
6. Ibu Dr. Nurhasanah, S.Si., M.Si., selaku dosen pembimbing akademik atas segala bimbingan dan nasihat selama proses perkuliahan penulis.
7. Ibu Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si., selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung.
8. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si., selaku Dekan FMIPA Universitas Lampung.
9. Bapak dan Ibu Dosen Kimia FMIPA Universitas Lampung yang telah mendidik dan memberikan ilmu pengetahuan yang sangat bermanfaat kepada penulis selama menempuh perkuliahan. Semoga Allah SWT yang membalas semua kebaikan bapak dan ibu dosen dan menjadikan pahala jariyah dari ilmu yang semoga bermanfaat bagi lingkungan.
10. Mba Liza Apriliya, S.Si., selaku PLP Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik atas segala bantuan yang telah diberikan selama Penulis melaksanakan penelitian.
11. Seluruh laboran, staff dan karyawan FMIPA Universitas Lampung atas semua bantuannya selama ini.
12. Sahabat sekaligus keluarga bagi penulis yaitu Dina Saripa Roza, bolby (Fera, Ainun, Zuanita, Rachel, Nurul dan Nanda) dan cekro (Ajil, Bilqis, Bunga, Salma, Gladis, Neyha, dan Rain) yang selalu mendukung, memberi semangat, dan keceriaan selama menyelesaikan skripsi ini. InsyaAllah, selalu diberi perlindungan dimanapun kalian nantinya.

13. Tim *Adsorption Research* 2021 yaitu Aisyah Tirta Asri, Amelia Normalita, Dinda Aprilia Defi, dan Tiara Zalfa Nur'alifah yang selalu memberikan semangat, motivasi, dukungan, dan bantuan dalam menyelesaikan penelitian.
14. Seluruh teman-teman Kimia 2021 yang luar biasa dan semua pihak yang telah membantu penulis baik secara langsung ataupun tidak langsung sehingga penulis dapat melaksanakan penelitian dan menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
15. Kucing peliharaan penulis (Jeko, Jeni, Jesi, Jojo dan Joy) terima kasih sudah menemani dan menghibur penulis di saat pusing dan lelah dalam menulis skripsi.
16. Jodoh penulis kelak, kamu adalah salah satu sumber motivasi penulis dalam menyelesaikan skripsi ini dan skripsi ini menjadi salah satu bagian dari usaha penulis dalam memantaskan diri, meskipun saat ini penulis tidak mengetahui keberadaanmu, karena penulis yakin bahwa sesuatu yang ditakdirkan menjadi milik kita akan menuju kepada kita bagaimanapun caranya.
17. *Last but not least*, kepada diri saya sendiri Mayang Aprilian Suri. Terima kasih sudah bertahan sejauh ini. Terima kasih karena telah bertanggung jawab untuk menyelesaikan apa yang telah dimulai, terima kasih karena terus berusaha dan tidak menyerah sampai saat ini. Sesulit apapun prosesnya, kamu telah menyelesaikan sebaik dan semaksimal mungkin. Berbahagialah selalu, apapun kurang dan lebihmu mari merayakan diri sendiri

Akhir kata, penulis memohon maaf apabila skripsi ini masih kurang dari kesempurnaan. Penulis berharap semoga skripsi ini bermanfaat sebagaimana mestinya

Bandar Lampung, 21 Juli 2024
Penulis.

Mayang Aprilian Suri

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
 I. PENDAHULUAN	 1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Tujuan	3
1.3. Manfaat	4
 II. TINJAUAN PUSTAKA	 5
2.1. Cangkang Kelapa Sawit.....	5
2.2. Karbon Aktif	6
2.2.1. Kualitas karbon aktif.....	7
2.3. Magnetit	9
2.4. Silanasi	10
2.4.1. (3- <i>Aminopropyl</i>)-triethoxysilane (APTES).....	11
2.5. Zat Warna	12
2.5.1. <i>Malachite Green</i>	12
2.6. Adsorpsi	13
2.7. Kinetika Adsorpsi.....	16
2.7.1. Model Pseudo Orde Satu.....	17
2.7.2. Model Pseudo Orde Dua	18
2.8. Isoterm Adsorpsi	18
2.8.1. Isoterm Adsorpsi Freundlich.....	19
2.8.2. Isoterm Adsorpsi Langmuir	20
2.9. Penentuan Nilai pH <i>Point Zero Charge</i> (pH PZC)	22
2.10. Desorpsi.....	23
2.11. Karakterisasi.....	24
2.11.1. Spektrofotometri UV-Vis	24
2.11.2. <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	25
2.11.3. Spektrofotometer <i>Fourier Transform Infrared</i> (FTIR)	27
2.11.4. <i>Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-Ray</i> (SEM-EDX).....	29
2.11.5. <i>Brunauer Emmet Teller</i> (BET).....	32
 III. METODE PENELITIAN.....	 35
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian.....	35

3.2. Alat dan Bahan.....	35
3.3. Prosedur Penelitian	36
3.3.1. Pembuatan Karbon dari Cangkang Kelapa Sawit.....	36
3.3.2. Aktivasi Karbon dari Cangkang Kelapa Sawit	36
3.3.3. Analisis Proksimat	37
3.3.4. Modifikasi Karbon dengan Nanopartikel Magnetit	38
3.3.5. Modifikasi Karbon Magnetit dengan (3- <i>Aminopropyl</i>)- <i>triethoxysilane</i> (APTES)	38
3.3.6. Karakterisasi.....	39
3.3.7. Penentuan Nilai pH <i>Point of Zero Charge</i> (pH PZC)	39
3.3.8. Preparasi Adsorbat	40
3.3.9. Uji Adsorpsi	40
3.3.10. Desorpsi	41
3.3.11. Penggunaan Ulang Adsorben	42
3.3.12. Diagram Alir Penelitian	42
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	44
4.1. Pembuatan Karbon dari Cangkang Kelapa Sawit.....	44
4.2. Aktivasi Karbon dari Cangkang Kelapa Sawit	44
4.3. Analisis Proksimat	45
4.4. Modifikasi Karbon dengan Nanopartikel Magnetit	46
4.5. Modifikasi Karbon Magnetit dengan (3- <i>Aminopropyl</i>)- <i>triethoxysilane</i> (APTES).....	47
4.6. Karakterisasi	49
4.6.1. Karakterisasi Adsorben dengan Spektrofotometer <i>Fourier</i> <i>Transform Infrared</i> (FTIR)	49
4.6.2. Karakterisasi Adsorben dengan <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	51
4.6.3. Karakterisasi Adsorben dengan <i>Brunauer Emmet Teller</i> (BET)...	54
4.6.4. Karakterisasi Adsorben dengan <i>Scanning Electron Microscopy with</i> <i>Energy Dispersive X-Ray</i> (SEM-EDX)	56
4.7. Penentuan Nilai pH <i>Point of Zero Charge</i> (pH PZC)	59
4.8. Uji Adsorpsi	60
4.8.1. Pengaruh Variasi Dosis Adsorben	61
4.8.2. Pengaruh Variasi pH.....	62
4.8.3. Pengaruh Variasi Waktu Kontak.....	63
4.8.4. Pengaruh Variasi Konsentrasi	67
4.9. Desorpsi	69
4.10. Penggunaan Ulang Adsorben	69
V. KESIMPULAN DAN SARAN	73
5.1. Kesimpulan.....	73
5.2. Saran	73
DAFTAR PUSTAKA.....	75
LAMPIRAN.....	82

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Komposisi penyusun cangkang kelapa sawit.....	6
2. Persyaratan karbon aktif menurut SNI 06-3730-1995	9
3. Karakteristik zat warna <i>malachite green</i>	13
4. Perbedaan adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia.....	15
5. Serapan infra merah gugus fungsi senyawa organik.....	28
6. Hasil analisis proksimat karbon dan KAF	46
7. Hasil karakterisasi menggunakan metode BET	55
8. Parameter kinetika adsorpsi zat warna MG terhadap adsorben KAF-M dan KAF-MS.....	66
9. Parameter isoterm adsorpsi zat warna MG terhadap adsorben KAF-M dan KAF-MS	69
10. pH PZC adsorben Karbon, KAF, KAF-M dan KAF-MS.....	92
11. Data absorbansi larutan malachite green variasi dosis.....	93
12. Adsorpsi <i>malachite green</i> dengan adsorben KAF-M dan KAF-MS variasi dosis	93
13. Data absorbansi larutan malachite green variasi pH.....	94
14. Adsorpsi <i>malachite green</i> dengan adsorben KAF-M dan KAF-MS variasi pH	94
15. Data absorbansi larutan <i>malachite green</i> variasi waktu kontak.....	95
16. Adsorpsi <i>malachite green</i> dengan adsorben KAF-M dan KAF-MS variasi waktu kontak.....	95
17. Data hasil perhitungan pseudo orde satu pada adsorben KAF-M terhadap <i>malachite green</i>	96
18. Data hasil perhitungan pseudo orde satu pada adsorben KAF-MS terhadap <i>malachite green</i>	98

19. Data hasil perhitungan pseudo orde dua pada adsorben KAF-M terhadap <i>malachite green</i>	99
20. Data hasil perhitungan pseudo orde dua pada adsorben KAF-MS terhadap <i>malachite green</i>	100
21. Data absorbansi larutan <i>malachite green</i> variasi konsentrasi	101
22. Adsorpsi zat warna <i>malachite green</i> dengan adsorben KAF-M dan KAF-MS variasi konsentrasi.....	101
23. Data hasil perhitungan isoterm adsorpsi Freundlich pada adsorben KAF-M terhadap <i>malachite green</i>	102
24. Data hasil perhitungan isoterm adsorpsi Freundlich pada adsorben KAF-MS terhadap <i>malachite green</i>	104
25. Data hasil perhitungan isoterm adsorpsi Langmuir pada adsorben KAF-M terhadap <i>malachite green</i>	105
26. Data hasil perhitungan isoterm adsorpsi Langmuir pada adsorben KAF-MS terhadap <i>malachite green</i>	106
27. Data absorbansi larutan <i>malachite green</i> untuk desorpsi.....	108
28. Data perhitungan jumlah MG yang terdesorpsi pada adsorben KAF-M	109
29. Data perhitungan jumlah MG yang terdesorpsi pada adsorben KAF-MS	110
30. Data absorbansi larutan <i>malachite green</i> penggunaan ulang adsorben.....	112
31. Data perhitungan jumlah MG yang teradsorpsi pada adsorben KAF-M	113
32. Data perhitungan jumlah MG yang teradsorpsi pada adsorben KAF-MS	114

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. (a) Buah kelapa sawit, (b) Cangkang kelapa sawit	5
2. Skema silanisasi APTES pada permukaan molekul.....	10
3. (3- <i>Aminopropyl</i>)-triethoxysilane	11
4. Struktur kimia <i>malachite green</i>	13
5. Perbedaan adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia.....	14
6. Model isoterm adsorpsi Freundlich.....	20
7. Ilustrasi adsorpsi dengan persamaan Langmuir	20
8. Model isoterm adsorpsi Langmuir	22
9. Pola hasil XRD dari (a) Adsorben cangkang buah karet, (b) Karbon Aktif-Fe ₃ O ₄ dan (b) Karbon Aktif-Fe ₃ O ₄ Silan.....	26
10. Spektrum FTIR karbon aktif dan karbon aktif-magnetit silan	29
11. Hasil SEM dan spektra EDX (a,d) karbon, (b,e) karbon aktivasi, dan (c,f) karbon aktivasi Fe ₃ O ₄	30
12. Hasil SEM dan spektra EDX (a,c) karbon magnetit silan sebelum adsorpsi dan (b,d) karbon aktif magnetit silan setelah adsorpsi.....	31
13. Enam tipe kurva isoterm adsorpsi sesuai IUPAC.....	33
14. (a) Isoterm adsorpsi-desorpsi nitrogen dan (b) distribusi ukuran pori karbon aktivasi dan karbon aktivasi-Fe ₃ O ₄	34
15. Isoterm adsorpsi-desorpsi karbon aktif dan karbon aktif magnetit silan.....	34
16. Diagram alir penelitian.....	43
17. Hasil preparasi sampel (a) cangkang kelapa sawit, (b) karbon cangkang kelapa sawit kasar, (c) karbon cangkang kelapa sawit tanpa aktivasi	44
18. Hasil aktivasi biokarbon.....	45
19. Hasil modifikasi karbon aktif dengan nanopartikel magnetit (KAF-M).....	47
20. Hasil modifikasi karbon aktif dengan organosilan (3- <i>Aminopropyl</i>)-triethoxysilane (APTES) (KAF-MS)	48

21. Spektrum FTIR dari adsorben (a) karbon, (b) KAF, (c) KAF-M dan (d) KAF-MS.....	50
22. Difraktogram XRD adsorben (a) Karbon dan (b) KAF	52
23. Difraktogram XRD adsorben (a) KAF-M dan (b) KAF-MS	53
24. Pola isoterm adsorpsi-desorpsi (a) karbon, (b) KAF, (c) KAF-M, (d) KAF-MS	54
25. Hasil SEM dengan perbesaran 3000x pada permukaan adsorben (a) karbon, (b) KAF, (C) KAF-M dan (d) KAF-MS	56
26. Hasil EDX pada adsorben (a) karbon, (b) KAF, (c) KAF-M, dan (d) KAF-MS	58
27. Kurva nilai pH PZC adsorben.....	60
28. Kurva pengaruh variasi dosis pada adsorpsi zat warna MG	61
29. Kurva pengaruh variasi pH pada adsorpsi zat warna MG.....	62
30. Kurva pengaruh variasi waktu kontak pada adsorpsi zat warna MG.....	64
31. Kinetika pseudo orde satu pada adsorben KAF-M dan KAF-MS terhadap zat warna MG	65
32. Kinetika pseudo orde dua pada adsorben KAF-M dan KAF-MS terhadap zat warna MG	66
33. Kurva pengaruh variasi konsentrasi pada adsorpsi zat wana MG.....	67
34. Pola isoterm Freundlich adsorben KAF-M dan KAF-MS terhadap MG.....	68
35. Pola isoterm Langmuir adsorben KAF-M dan KAF-MS terhadap MG	68
36. Grafik persentase desorpsi MG dengan beberapa jenis eluen.....	70
37. Grafik hasil penggunaan ulang adsorben terhadap adsorpsi zat warna MG ...	71
38. Panjang gelombang maksimum larutan <i>malachite green</i>	92
39. Kurva standar larutan MG variasi dosis.....	93
40. Kurva standar larutan MG variasi pH	94
41. Kurva standar larutan MG variasi waktu kontak	95
42. Pola kinetika pseudo orde satu pada adsorben KAF-M terhadap zat warna <i>malachite green</i>	96
43. Pola kinetika pseudo orde satu pada adsorben KAF-MS terhadap zat warna <i>malachite green</i>	98
44. Pola kinetika pseudo orde dua pada adsorben KAF-M terhadap zat warna <i>malachite green</i>	99
45. Pola kinetika pseudo orde dua pada adsorben KAF-MS terhadap zat warna <i>malachite green</i>	100
46. Kurva standar larutan MG variasi konsentrasi.....	101

47. Pola isoterm adsorpsi Freundlich pada adsorben KAF-M terhadap zat warna <i>malachite green</i>	102
48. Pola isoterm adsorpsi Freundlich pada adsorben KAF-MS terhadap zat warna <i>malachite green</i>	104
49. Pola isoterm adsorpsi Langmuir pada adsorben KAF-M terhadap zat warna <i>malachite green</i>	105
50. Pola isoterm adsorpsi Langmuir pada adsorben KAF-MS terhadap zat warna <i>malachite green</i>	106
51. Kurva standar larutan MG untuk desorpsi	108
52. Kurva standar larutan MG penggunaan ulang adsorben	112
53. Penentuan pH PZC dengan variasi pH 3-12 terhadap adsorben (a) karbon, (b) KAF, (d) KAF-M dan (d) KAF-MS	117
54. Adsorpsi <i>malachite green</i> dengan variasi dosis terhadap adsorben (a) KAF-M dan (b) KAF-MS	117
55. Adsorpsi <i>malachite green</i> dengan variasi pH terhadap adsorben (a) KAF-M dan (b) KAF-MS	117
56. Adsorpsi <i>malachite green</i> dengan variasi waktu kontak terhadap adsorben (a) KAF-M dan (b) KAF-MS	118
57. Adsorpsi <i>malachite green</i> dengan variasi konsentrasi terhadap adsorben (a) KAF-M dan (b) KAF-MS	118
58. Desorpsi <i>malachite green</i> terhadap adsorben (a) KAF-M dan (b) KAF-MS	118
59. Penggunaan ulang adsorben (a) KAF-M dan (b) KAF-MS terhadap adsorpsi <i>malachite green</i>	118
60. Parameter data karakterisasi BET adsorben (a) karbon dan (b) KAF	119
61. Parameter data karakterisasi BET adsorben (c) KAF-M dan (d) KAF-MS ..	120

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pencemaran lingkungan menjadi masalah penting yang dapat merusak keseimbangan ekosistem, contohnya permasalahan lingkungan perairan, seperti air tidak layak konsumsi menjadi masalah umum di Indonesia. Sumber utama pencemaran ini berasal dari berbagai aktivitas, termasuk sektor industri. Meskipun industri berperan dalam perekonomian Indonesia (Hermawan, 2011), industri juga menjadi salah satu penyumbang terbesar polutan lingkungan. Limbah yang dihasilkan baik cair, padat, maupun gas, berasal dari berbagai jenis industri, seperti makanan, kesehatan, dan tekstil. Limbah ini mengandung logam berat seperti Fe, Pb, Cd, Cu, dan Zn, serta senyawa organik seperti fenol, pestisida, dan zat warna tekstil. Zat warna tekstil seperti kristal violet, rhodamin B, metilen biru, dan *malachite green* banyak digunakan di industri tekstil, sekitar 60% pewarna digunakan dalam proses produksi dan 10-15% sisanya keluar menjadi limbah (Çelekli and Bozkurt, 2013).

Limbah zat warna mampu mencemari lingkungan, zat warna *malachite green* tergolong zat warna kationik yang digunakan dalam pewarnaan katun, wol dan kertas (Ghasemi and Kaykhaii, 2016). Limbah zat warna *malachite green* bersifat persisten (tahan terhadap degradasi biologis alami) sehingga dapat mengganggu ekosistem di perairan dan memiliki sifat *recalcitrance* yang kuat yang menunjukkan sifat karsinogenik, mutagenik dan teratogenik dan dapat menyebabkan iritasi sistem pencernaan pada manusia apabila dikonsumsi (Ruslinda dan Yustisia, 2013).

Metode yang digunakan untuk mengurangi limbah zat warna diantaranya metode presipitasi, filtrasi, pemisahan membran, pertukaran ion, penghilangan warna (*decoloring*), dan adsorpsi (Saleh *and* Gupta, 2012). Metode adsorpsi merupakan proses pengolahan limbah air secara fisikokimia, dimana molekul-molekul terlarut menempel pada permukaan adsorben melalui interaksi fisik atau kimia metode ini paling banyak digunakan karena dapat menghasilkan limbah dengan kuantitas zat warna pencemar yang hampir tidak ada. Selain itu, adsorpsi juga memiliki keunggulan lainnya seperti biaya yang relatif murah, *reversible*, serta tidak menimbulkan produk samping yang berbahaya bagi lingkungan (Buhani *et al.*, 2019b).

Adsorben yang baik memiliki luas permukaan yang besar, dapat digunakan berulang kali, selektif terhadap adsorbat, kapasitas adsorpsi yang tinggi, kecepatan dan stabilitas kimiawi seperti adsorben karbon dari cangkang kelapa sawit. Cangkang kelapa sawit dapat dimanfaatkan sebagai adsorben karena mengandung selulosa (6,92%), hemiselulosa (26,16%), serta memiliki kandungan karbon yang tinggi sebesar (49,79%) dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan karbon aktif karena sangat efektif untuk mengadsorpsi limbah cair (Nasution dkk., 2017).

Karbon aktif memiliki keunggulan struktur porinya yang besar dan luas permukaannya yang tinggi memungkinkan penyerapan zat kimia dan partikel dari larutan secara efektif. Karbon aktif juga memiliki kelemahan dimana ukuran partikel yang kecil dan berat molekul yang ringan menyebabkan kesulitan pemisahan adsorben dengan filtrat, menyebabkan jumlah adsorben berkurang untuk proses filtrasi sehingga diperlukan modifikasi karbon lebih lanjut. Untuk mengatasi hal ini, dilakukan modifikasi karbon aktif dengan pelapisan menggunakan magnetit. Karbon aktif yang telah dilapisi magnetit memiliki sifat magnetik dan berat molekul yang lebih besar, sehingga mempermudah pemisahan adsorben dengan filtrat (Buhani *et al.*, 2013).

Namun, pelapisan karbon aktif oleh partikel magnetit juga memiliki keterbatasan seperti kemungkinan pori yang tertutup oleh partikel sehingga jumlah pori pada

karbon aktif berkurang. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Zulaicha *et al.*, 2022), karbon aktif yang dimodifikasi oleh magnetit mengalami pengurangan jumlah pori setelah dimodifikasi, baik luas permukaan maupun volume porinya oleh Fe_3O_4 . Oleh karena itu, karbon magnetit perlu dimodifikasi lebih lanjut dengan silanisasi menggunakan agen (3-*Aminopropyl*)-triethoxysilane (APTES) (Wong *et al.*, 2015). Silan berperan sebagai agen penghubung karena memiliki dua gugus aktif berbeda yang memungkinkan terbentuknya ikatan kimia antara material organik dan anorganik, serta membentuk gugus silanol dan siloksan yang diharapkan dapat meningkatkan kemampuan adsorpsi.

Berdasarkan uraian latar belakang tersebut, maka pada penelitian ini dilakukan modifikasi karbon cangkang kelapa sawit dengan magnetit dan APTES sebagai adsorben zat warna *malachite green*. Dalam penelitian ini dilakukan analisis proksimat untuk mengetahui kualitas karbon. Setelah itu, karbon hasil modifikasi dikarakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX) untuk mengetahui morfologi permukaan adsorben dan komposisi yang terkandung, *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui tingkat kristalinitas karbon, *Fourier Transform Infrared* (FTIR) untuk mengetahui gugus fungsi dalam karbon, *Brunauer Emmet Teller* (BET) untuk mengetahui besarnya luas permukaan karbon aktif, spektrofotometer Ultraviolet dan *Visible* (UV-Vis) untuk mengetahui kapasitas adsorpsi zat warna dari cangkang kelapa sawit termodifikasi.

1.2. Tujuan

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah diuraikan, tujuan dilakukan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mempelajari cara memodifikasi karbon dari cangkang kelapa sawit dengan magnetit dan APTES, serta mengarakterisasi karbon hasil modifikasi.
2. Menentukan dosis, pH, waktu kontak, dan konsentrasi optimum dari adsorben karbon cangkang kelapa sawit termodifikasi untuk mengadsorpsi zat warna *malachite green*.

3. Menentukan model kinetika adsorpsi dan isoterm adsorpsi zat warna *malachite green* oleh adsorben karbon cangkang kelapa sawit termodifikasi.
4. Mengetahui kemampuan desorpsi dan penggunaan ulang adsorben karbon cangkang kelapa sawit termodifikasi terhadap zat warna *malachite green*.

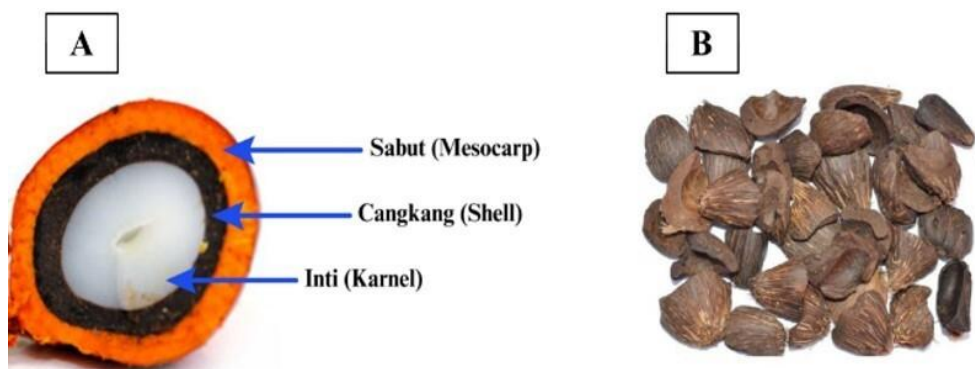
1.3. Manfaat

Adapun manfaat dari penelitian ini yaitu memberikan informasi mengenai proses, hasil modifikasi, dan karakteristik dari modifikasi adsorben cangkang kelapa sawit dengan magnetit dan silan APTES terhadap adsorpsi larutan zat warna *malachite green* untuk mengatasi permasalahan lingkungan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Cangkang Kelapa Sawit

Kelapa sawit merupakan komoditas utama Indonesia dalam industri minyak, menghasilkan limbah padat berupa cangkang kelapa sawit hingga 60% dari total produksi. Cangkang ini, yang berwarna hitam keabuan, keras, dan berbentuk tidak beraturan, dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku karbon aktif, dengan mempertimbangkan bentuk, kualitas, dan ukurannya (Purwanto, 2011). Cangkang kelapa sawit merupakan bagian yang paling keras pada komponen kelapa sawit. Cangkang kelapa sawit yang digunakan sebagai karbon aktif harus melalui proses karbonisasi dan aktivasi. Cangkang sawit termasuk bahan berlignin dan selulosa berkadar karbon tinggi, buah dan cangkang kelapa sawit menurut disajikan dalam Gambar 1.



Gambar 1. (a) Buah kelapa sawit, (b) Cangkang kelapa sawit

Cangkang kelapa sawit dapat diklasifikasikan dalam kelas *Dicotyledonae* yang dirincikan sebagai berikut:

Divisi : Spermatophyta
 Sub divisi : Angiospermae
 Kelas : Dicotyledonae
 Keluarga : Palmaceae
 Sub keluarga : Cocoideae
 Genus : Elaeis
 Spesies : *Elaeis guineensis* Jacq.

Cangkang kelapa sawit mengandung selulosa (6,92%) dan hemiselulosa (26,16%) (Nasution dkk., 2017) sehingga berpotensi sebagai bahan baku pembuatan arang aktif dengan metode dehidrasi, karbonisasi, dan aktivasi. Berbagai komposisi zat kimia yang terkandung dalam cangkang kelapa sawit disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi penyusun cangkang kelapa sawit

No	Komposisi Penyusun	Persentase (%)
1.	Hemiselulosa	26,16
2.	Selulosa	6,92
3.	Karbon	49,79
4.	Hidrogen	5,58
5.	Oksigen	34,06
6.	Nitrogen	0,72

(Nasution dkk., 2017)

2.2. Karbon Aktif

Karbon merupakan material berpori yang mengandung sekitar 85-95% karbon, menghasilkan struktur dengan daya serap tinggi. Karbon memiliki karakteristik luas permukaan berkisar $3000-3500 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$, volume pori sebesar $10,28 \times 10^{-4} \text{ m}^3\text{mg}^{-1}$ dan diameter pori rata-rata sebesar 21,6 Å. Luas permukaan karbon aktif yang besar memiliki hubungan dengan struktur pori karbon aktif sehingga karbon aktif mempunyai sifat sebagai adsorben (Handika dkk., 2017). Proses pembuatan karbon aktif terdiri dari karbonisasi dan aktivasi. Aktivasi dalam pembuatan karbon aktif terdiri dari aktivasi fisika dan aktivasi kimia.

Aktivasi secara fisika dilakukan dengan cara memanaskan karbon pada suhu tinggi. Agen pengaktivasi yang digunakan yaitu gas CO₂ atau uap yang terbentuk pada suhu tinggi yaitu sekitar 500-800°C. Pada proses aktivasi fisika terjadi pengurangan massa karbon aktif yang cukup besar karena terjadi pembentukan struktur karbon. Sedangkan, ciri khas aktivasi kimia adalah digunakannya suatu *activating agent* yang pada umumnya adalah golongan dari hidroksida (KOH atau NaOH), ZnCl₂, dan H₃PO₄ (Handika dkk., 2017).

2.2.1. Kualitas karbon aktif

Parameter dari kualitas karbon aktif dapat diukur dengan analisis proksimat yaitu kadar air, kadar abu, kadar zat menguap, kadar karbon terikat, dan daya serap terhadap iodin. Berikut penjelasan mengenai parameter kualitas dari karbon aktif:

a. Kadar air

Kadar air yang ada di dalam karbon aktif berhubungan dengan sifat higroskopis, yang artinya karbon aktif memiliki afinitas tinggi dengan air. Maka dari sifat itu, karbon aktif dapat digunakan sebagai adsorben. Dalam pengujian ini, diartikan bahwa di dalam karbon aktif hanya mengandung air yang mudah menguap. Persentase kadar zat mudah menguap dihitung menggunakan Persamaan 1.

$$\text{Kadar air (\%)} = \frac{\text{Berat sampel awal} - \text{Berat sampel akhir}}{\text{Berat sampel awal}} \times 100\% \quad (1)$$

b. Kadar abu

Persentase hasil kadar abu mengidentikasi adanya kandungan oksida logam yang mungkin masih ada di dalam karbon aktif. Oksida logam tersebut berupa silikon, sulfur, kalsium maupun logam lain dengan kadar kecil. Kadar abu yang tinggi mempengaruhi kualitas karbon aktif saat diaplikasikan sebagai zat penyerap (Jamilatun dan Setyawan, 2014). Persentase kadar abu dihitung menggunakan Persamaan 2.

$$\text{Kadar abu (\%)} = \frac{\text{Berat sampel akhir}}{\text{Berat sampel awal}} \times 100\% \quad (2)$$

c. Kadar zat menguap

Persentase kadar zat menguap menunjukkan bahwa jumlah senyawa yang masih tertinggal dalam material setelah proses karbonasi dan aktivasi. Senyawa-

senyawa yang belum menguap pada suhu karbonasi dan aktivasi biasa, baru dapat menguap pada suhu tinggi yaitu 900°C. Kemampuan daya serap karbon aktif dipengaruhi oleh tingginya kadar zat menguap, jika nilai tersebut terlalu tinggi, maka akan mengurangi daya serapnya (Jamilatun dan Setyawan, 2014). Persentase kadar abu dihitung menggunakan Persamaan 3.

$$\text{Kadar zat menguap (\%)} = \frac{\text{Berat sampel akhir}}{\text{Berat sampel awal}} \times 100\% \quad (3)$$

d. Kadar karbon terikat

Penentuan kadar karbon terikat dilakukan untuk mengukur sisa kandungan karbon dalam material setelah melalui proses karbonisasi dan aktivasi.

Tingginya kadar karbon menjadi indikator kualitas karbon aktif yang baik.

Persentase kadar karbon terikat dihitung menggunakan Persamaan 4.

$$\text{Karbon terikat (\%)} = 100\% - (\% \text{ Air} + \% \text{ Zat menguap} + \% \text{ Abu}) \times 100\% \quad (4)$$

e. Daya serap karbon aktif terhadap iodine

Daya serap iodine merupakan indikator kemampuan karbon aktif dalam mengadsorpsi senyawa-senyawa dengan berat molekul rendah. Jumlah iodine dalam milligram (mg) yang diadsorpsi oleh 1 g karbon aktif dikenal sebagai bilangan iodine. Karbon aktif dengan bilangan iodine tinggi menandakan luas permukaan dan struktur mikro yang lebih besar, sehingga memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih baik (SNI 06-3730-1995). Persentase kadar abu dihitung menggunakan Persamaan 5.

$$\text{Daya serap iod (mg/g)} = \frac{A - \frac{B \times N (\text{thiosulfat})}{N (\text{iodin})}}{a} \times \text{Be iod} \times \text{FP} \quad (5)$$

Dimana:

A	: Volume larutan iodine (mL)
B	: Volume Na ₂ S ₂ O ₃ yang terpakai (mL)
FP	: Faktor Pengenceran
a	: Berat karbon aktif (g)
N (Thiosulfat)	: Konsentrasi thiosulfat Na ₂ S ₂ O ₃ (0,1 N)
N (Iodin)	: Konsentrasi iodine (0,125 N)
Be iodine	: 126,93 g/mol

Adapun syarat kualitas karbon aktif (kadar air, kadar abu, kadar zat menguap, kadar karbon terikat, daya serap terhadap I₂ dan karbon aktif murni) menurut SNI No. 06-3730-1995 dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Persyaratan karbon aktif menurut SNI 06-3730-1995

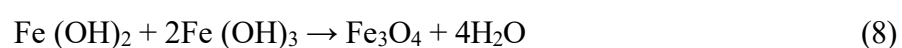
Jenis Uji	Satuan	Persyaratan	
		Butiran	Serbuk
Kadar air (%)	-	Maks. 4,4	Maks. 15
Kadar abu (%)	-	Maks. 2,5	Maks. 10
Kadar zat menguap (%)	-	Maks. 15	Maks. 25
Kadar karbon terikat (%)	-	Maks. 80	Maks. 65
Daya serap terhadap I ₂	mg/g	Min. 750 mg/g	Min. 750 mg/g

Sumber: Badan Standarisasi Nasional (1995)

2.3. Magnetit

Magnetit (Fe₃O₄) adalah partikel superparamagnetik yang digunakan untuk memodifikasi karbon guna meningkatkan kemampuannya sebagai adsorben (Zulaicha *et al.*, 2021). Magnetit Fe₃O₄ dapat disintesis dari campuran FeCl₃·6H₂O dan FeSO₄·7H₂O dalam kondisi basa, menghasilkan endapan. Modifikasi ini bertujuan untuk memberikan sifat kemagnetan yang tinggi, sehingga dapat digunakan dalam metode ekstraksi fase padat dengan bantuan medan magnet eksternal dalam pengaplikasiannya (Putri *and* Rahmayanti, 2020).

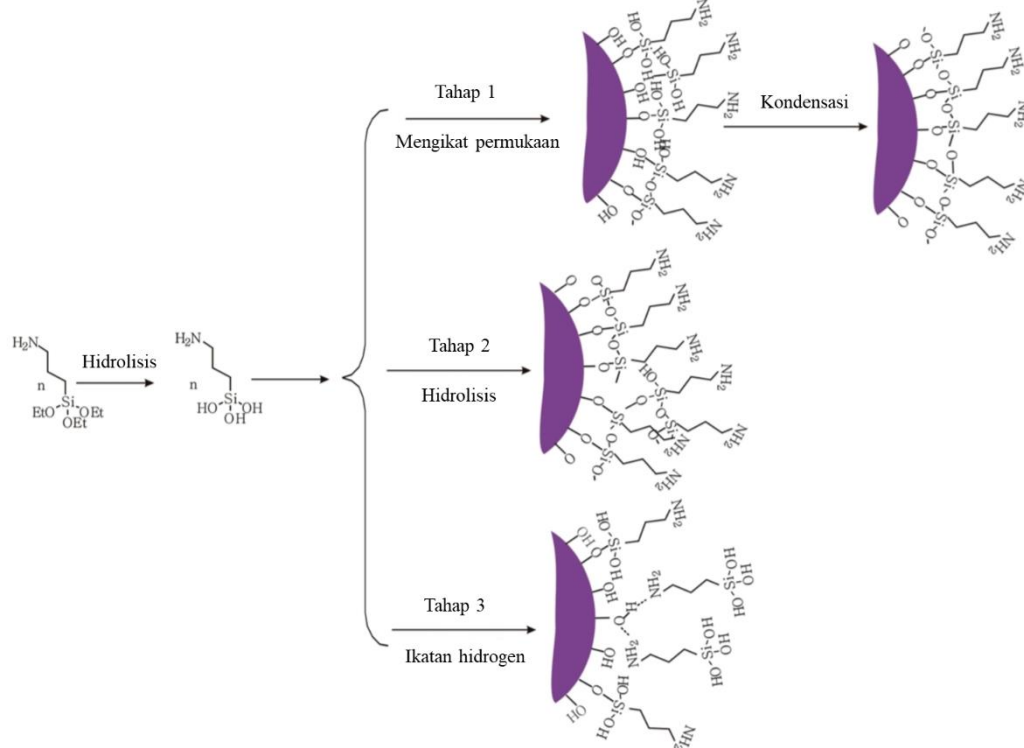
Teknik pelapisan material dengan partikel magnetit merupakan teknik yang ramah lingkungan, karena tidak menghasilkan produk yang mengandung kontaminasi seperti padatan tersuspensi dan dapat mempercepat proses pemisahan senyawa dari larutan karena adsorben bersifat magnetik (Buhani *et al.*, 2017). Reaksi pembentukan magnetit tersebut disajikan pada Persamaan 6, 7, dan 8 (Petchareon *and* Sirivat, 2012).



Adsorben magnetit yang disintesis melalui penggabungan agen magnetit Fe_3O_4 dengan adsorben untuk mempermudah pemisahan adsorben dari larutan berair (Kalantary *et al.*, 2015).

2.4. Silanasi

Silanasi merupakan proses untuk meningkatkan kekuatan pelekatan dengan membentuk ikatan kimia menggunakan silan sebagai agen penghubung (*coupling agent*). Silan memiliki struktur kimia $(\text{RO})_3\text{SiCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{-X}$, dimana RO adalah gugus alkoksi seperti metoksi, etoksi, atau asetoksi, dan X merupakan gugus organofungsional seperti amino, epoksi, atau metakriloksi. Jembatan alkil $-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2-$ menghubungkan Si dengan X. Dalam komposit, silan menghubungkan substrat anorganik dengan polimer organik melalui interaksi gugus alkoksi. Gugus alkoksi ini mengikat gugus hidroksil logam di permukaan anorganik, kemudian terhidrolisis menjadi silanol, yang selanjutnya bereaksi membentuk ikatan *oxane* dan melepaskan air (Permana, 2015).

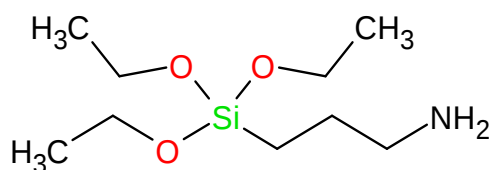


Gambar 2. Skema silanisasi APTES pada permukaan molekul

Menurut Liu *et al.* (2013) skema silanisasi APTES pada permukaan molekul ditunjukkan pada Gambar 2. Proses silanisasi melibatkan penggunaan senyawa silan pada permukaan material anorganik yang mengandung silika dan terdiri dari empat tahap yaitu tahap hidrolisis, kondensasi, pembentukan ikatan hidrogen, dan *curing*. Tahap pertama melibatkan reaksi hidrolisis antara silan dan air, menghasilkan gugus silanol (Si-OH) sebagai situs aktif. Pada tahap kedua, silanol mengalami kondensasi, membentuk ikatan oksan (Si-O-Si) dan jaringan polisilan sambil melepaskan air (Permana, 2015). Pada tahap ketiga, ikatan hidrogen terbentuk dengan gugus -OH pada substrat dan tahap terakhir, ikatan kovalen (Si-O-Si) terbentuk antara silikon dalam organosilan dan silikon pada substrat selama tahap curing. Oleh karena itu, curing dilakukan untuk menghentikan proses polimerisasi lapisan siloksan. Jika yang diinginkan spesies yang mengandung gugus amino, maka silan yang digunakan juga harus mengandung gugus amino (-NH₂), seperti 3-(*Aminopropyl*)-triethoxysilane (APTES).

2.4.1. (3-*Aminopropyl*)-triethoxysilane (APTES)

Senyawa (3-*Aminopropyl*)-triethoxysilane (APTES) adalah senyawa kimia dengan rumus NH₂(CH₂)₃Si(OC₂H₅)₃ dan berat molekul 221,37 g/mol. APTES termasuk dalam jenis organosilan yang berfungsi sebagai agen penghubung (*coupling agent*), memiliki dua gugus aktif yang berbeda pada atom silika, sehingga dapat membentuk ikatan kimia antara material organik dan anorganik. Dengan adanya gugus -NH₂, APTES mampu menghubungkan biomolekul target lainnya. Senyawa ini juga digunakan untuk imobilisasi biomolekul dalam pengembangan biosensor (Gunda *et al.*, 2015) dan dapat membentuk lapisan silan yang stabil dalam pelarut organik. Struktur APTES dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 3. (3-*Aminopropyl*)-triethoxysilane

APTES memiliki kemampuan larut dalam air yang membantu mengurangi penggumpalan partikel, mengurangi ikatan non-spesifik, dan meningkatkan

stabilitas partikel dalam suspensi (Ngouangna *et al.*, 2020). APTES memiliki dua jenis gugus aktif yang dapat bereaksi dengan senyawa yang bersifat kation, anion, atau netral (Mungía-Cortés *et al.*, 2017).

2.5. Zat Warna

Zat warna sering digunakan dalam industri tekstil, tetapi banyak di antaranya berakhir sebagai limbah. Zat pewarna yang diproduksi setiap tahun dibuang sebagai limbah dari proses manufaktur (Hayu dkk., 2021). Limbah zat pewarna ini dapat menimbulkan masalah berupa efek akut atau kronis pada organisme yang terkena dengan konsentrasi di atas batas aman, serta menghambat fotosintesis pada tanaman air karena zat pewarna menyerap dan memantulkan cahaya matahari yang masuk ke dalam air, sehingga dapat mengganggu pertumbuhan tanaman tersebut.

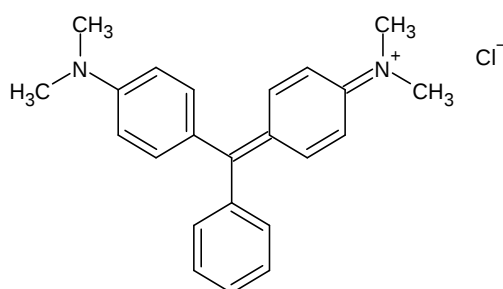
Zat pewarna umumnya berasal dari bahan sintetis dengan struktur molekul aromatik yang kompleks, sehingga lebih stabil dan sulit terurai. Zat warna terbagi menjadi anionik, kationik, dan non-ionik. Zat warna anionik sering digunakan dalam pewarna langsung, asam, dan reaktif, sementara kationik digunakan sebagai pewarna dasar, dan non-ionik sebagai pewarna dispersi. Pewarna anionik dan non-ionik umumnya mengandung senyawa azo atau antrakuinon. Senyawa azo dapat menghasilkan amina beracun, sementara antrakuinon sulit terdegradasi karena struktur aromatik yang membuatnya bertahan lama dalam air limbah (Aksu, 2005).

2.5.1. *Malachite Green*

Malachite green adalah salah satu jenis pewarna tekstil yang diklasifikasikan sebagai pewarna dasar (*basic dye*) dan pewarna trifenilmetan. Pewarna ini diberi nama sebagai pewarna dasar disebabkan *basic dyes* terionisasi di dalam pelarut tertentu dan komponen pewarnanya berupa kation, maka dari itu pewarna *basic* disebut juga sebagai pewarna kation. Secara struktur kimia *malachite green*

merupakan kelompok pewarna triarilmetan atau triaril karbonium. Kadar *malachite green* yang diperbolehkan di perairan sebesar 0,01 mg/L sehingga perlu upaya penanggulangan apabila melebihi ambang batas (Yonel dkk., 2021).

Zat warna *malachite green* adalah salah satu senyawa organik yang larut dalam air (Eltaweil *et al.*, 2020). Zat warna *malachite green* banyak digunakan dalam berbagai bidang seperti untuk pencelupan kertas, wol, kulit, tekstil, kapas, serat akrilik dalam industri tekstil, sutra, industri goni (Ghasemi *and* Kaykhahi, 2016). Adapun struktur kimia zat warna *malachite green* dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Struktur kimia *malachite green*

Adapun sifat fisika dan kimia dari zat warna *malachite green* ditunjukkan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Karakteristik zat warna *malachite green*

Parameter	Nilai
Rumus molekul	$C_{23}H_{25}ClN_2$
Nama dagang	<i>Malachite green</i>
Berat molekul	364,9 g/mol
Nature	Zat warna kationik
Kelas kimia	Triarilkarbonium (triarilmetan)

2.6. Adsorpsi

Adsorpsi merupakan proses dimana adsorbat menempel pada permukaan bahan penyerap. Mekanisme ini terjadi karena adanya interaksi gaya tarik antara molekul adsorbat dan permukaan adsorben, sehingga adsorbat tampak menyatu dengan adsorben. Proses ini sederhana, murah, ramah lingkungan, dan tidak

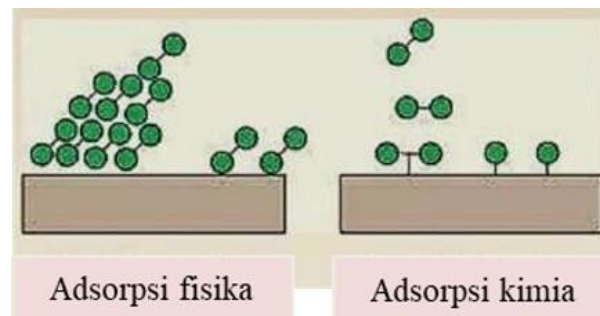
menghasilkan zat beracun, menjadikannya lebih unggul dibanding metode lain yang kompleks dan berisiko (Zulaicha *et al.*, 2021). Terdapat dua jenis adsorpsi, yaitu fisika (*physiosorption*) dan kimia (*chemisorption*).

a. Adsorpsi fisika

Adsorpsi fisika terjadi tanpa reaksi antara molekul adsorbat dan permukaan adsorben. Molekul adsorbat terikat lemah oleh gaya Van der Waals, sehingga proses ini berlangsung cepat dan bersifat *reversible* (Zulfania dkk., 2022).

b. Adsorpsi kimia

Adsorpsi kimia terjadi karena pembentukan ikatan kovalen dan ion antara molekul adsorbat dan adsorben. Ikatan ini sangat kuat, sehingga lapisan yang terbentuk adalah lapisan *monolayer* yang sangat sulit untuk dilepaskan kembali (*irreversible*) (Prabowo, 2009). Perbedaan adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia dapat dilihat pada ilustrasi Gambar 5.



Gambar 5. Perbedaan adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia

Berikut adalah perbedaan adsorpsi fisika dan adsorpsi yang dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbedaan adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia

No	Adsorpsi Fisika (<i>physiosorption</i>)	Adsorpsi Kimia (<i>chemisorption</i>)
1.	Molekul terikat pada adsorben oleh gaya Van der Waals	Molekul terikat pada adsorben oleh ikatan kimia
2.	Mempunyai entalpi reaksi -4 sampai -40 kJ/mol	Mempunyai entalpi reaksi -40 sampai 800 kJ/mol
3.	Dapat membentuk lapisan <i>multilayer</i>	Membentuk lapisan <i>monolayer</i>
4.	Adsorpsi hanya terjadi pada suhu di bawah titik didih adsorbat	Adsorpsi terjadi pada suhu tinggi
5.	Jumlah adsorpsi pada permukaan merupakan fungsi adsorbat	Jumlah adsorpsi pada permukaan merupakan karakteristik adsorben dan adsorbat
6.	Tidak melibatkan energi aktivasi tertentu	Melibatkan energi aktivasi tertentu

Proses adsorpsi merupakan teknik pengolahan limbah yang diharapkan mampu menurunkan konsentrasi senyawa organik yang berlebihan (Buhani *et al.*, 2018). Keberhasilan adsorpsi tergantung pada jenis adsorben yang digunakan, yang menentukan parameter selektivitas dan kapasitas adsorpsi. Mekanisme adsorpsi melibatkan molekul yang meninggalkan larutan dan menempel pada permukaan adsorben melalui interaksi kimia atau fisika. Proses ini melibatkan fluida, baik cair maupun gas, yang menempel pada permukaan padatan dan membentuk lapisan di permukaan tersebut. Widayatno *et al.*, (2017) menguraikan berbagai faktor yang mempengaruhi proses adsorpsi, yaitu:

1. Sifat Adsorben

Karbon merupakan adsorben berpori yang terdiri dari unsur karbon bebas dengan ikatan kovalen dan permukaan non-polar memiliki daya serap yang dipengaruhi oleh jenis, luas permukaan, dan kemurniannya. Adsorben bekerja lebih efektif bila kepolaran serupa dengan adsorbat, dan proses aktivasi dapat meningkatkan kemampuannya.

2. Sifat Adsorbat

Molekul adsorbat yang lebih kecil dari diameter pori adsorben lebih mudah teradsorpsi karena dapat masuk dan terperangkap di dalam pori.

3. Konsentrasi Adsorbat

Konsentrasi adsorbat yang semakin besar maka partikel adsorbat yang terserap oleh adsorben juga semakin banyak. Konsentrasi ini juga menentukan jenis isotherm adsorpsi, seperti Freundlich dan Langmuir.

4. Luas Permukaan

Luas permukaan yang lebih besar pada adsorben memungkinkan lebih banyak adsorbat menempel, meningkatkan kapasitas adsorpsi.

5. Tekanan

Tekanan tinggi mendorong molekul adsorbat lebih cepat menempel pada permukaan adsorben.

6. Daya Larut Adsorbat

Adsorbat yang sangat larut dalam pelarut cenderung lebih sulit diadsorpsi karena lebih stabil dalam larutan.

7. pH Larutan

Adsorpsi optimal terjadi pada pH tertentu; kondisi asam cenderung meningkatkan adsorpsi, sementara kondisi basa menurunkannya.

8. Waktu Kontak

Adsorpsi memerlukan waktu untuk mencapai kesetimbangan. Semakin banyak adsorben dan semakin baik pengadukan, semakin cepat proses tercapai.

2.7. Kinetika Adsorpsi

Kinetika adsorpsi menyatakan adanya proses penyerapan suatu zat oleh adsorben dalam fungsi waktu. Karakteristik kemampuan penyerapan adsorben terhadap adsorbat dapat dilihat dari laju adsorpsinya. Laju reaksi bergantung pada konsentrasi reaktan, tekanan, dan pengaruh katalis (Oxtoby, 2003). Laju adsorpsi dapat diketahui dari konstanta laju adsorpsi (k) dan orde reaksi yang dihasilkan dari suatu model kinetika adsorpsi (Anggriani dkk., 2021). Mekanisme adsorpsi dan konstanta kecepatan reaksi adsorpsi kimia pada zat warna *malachite green* dapat diketahui menggunakan persamaan sistem pseudo orde pertama oleh Lagergren dan sistem pseudo orde dua (Buhani *et al.*, 2013; Buhani *et al.*, 2015; Buhani *et al.*, 2017).

2.7.1. Model Pseudo Orde Satu

Lagergren memperkenalkan persamaan untuk adsorpsi cair-padat berdasarkan kapasitas padatan untuk pertama kalinya pada tahun 1898. Kinetika adsorpsi pseudo orde pertama, dikenal sebagai model Lagergren yang menjelaskan proses penyerapan zat terlarut ke permukaan adsorben. Persamaan pseudo orde pertama dapat dilihat pada Persamaan 9.

$$\frac{dQ_t}{dt} = k_1 (Q_e - Q_t) \quad (9)$$

Dimana:

Q_t : Jumlah ion yang teradsorpsi pada waktu tertentu (mg/g)

Q_e : Jumlah ion yang teradsorpsi pada keadaan setimbang (mg/g)

t : Waktu (menit)

k_1 : Konstanta laju pseudo orde pertama (menit^{-1})

Integral dari Persamaan 9 dari $t = 0$ ke $t = t$ dan $Q_t = 0$ ke $Q_t = Q_t$ menghasilkan ekspresi linier pseudo orde satu ke Persamaan 10.

$$\ln (Q_e - Q_t) = \ln Q_e - k_1 t \quad (10)$$

Nilai k_1 ditentukan dengan memplotkan $\ln (Q_e - Q_t)$ vs. t . Meskipun beberapa studi telah menemukan k_1 meningkat dengan konsentrasi zat terlarut awal (C_0) atau tidak tergantung pada C_0 , konstanta laju selalu berbanding terbalik dengan konsentrasi awal zat terlarut. Hal ini karena waktu yang lebih lama diperlukan untuk konsentrasi zat terlarut awal yang besar. Untuk menjelaskan perbedaan eksperimental selama penyerapan pewarna pada karbon aktif pseudo orde satu dimodifikasi yang ditunjukkan pada Persamaan 11 dan 12.

$$\frac{dQ_t}{dt} = k_1 \frac{Q_e}{Q_t} = (Q_e - Q_t) \quad (11)$$

Dalam bentuk linier:

$$\frac{Q_e}{Q_t} + \ln (Q_e - Q_t) = \ln Q_e - k_1 t \quad (12)$$

Plot dari $\frac{Q_e}{Q_t} + \ln (Q_e - Q_t)$ terhadap t memberikan kecocokan adsorpsi pewarna yang lebih baik dibandingkan ke Lagergren pseudo orde satu. Model yang

berbeda untuk adsorpsi berbagai zat terlarut telah dikembangkan, tetapi penerapan dan konsistensi bentuk linier dan non-liniernya perlu diuji.

2.7.2. Model Pseudo Orde Dua

Kinetika adsorpsi pseudo orde dua mengasumsikan bahwa laju adsorpsi zat terlarut sebanding dengan situs yang ada pada adsorben. Dan laju reaksi tergantung pada jumlah zat terlarut pada permukaan adsorben, daya penggerak ($Q_e - Q_t$) proporsional dengan jumlah situs yang tersedia pada adsorben. Bentuk lengkung pseudo orde dua ditunjukkan pada Persamaan 13.

$$\frac{Q_e}{Q_t} = k_2 (Q_e - Q_t)^2 \quad (13)$$

k_2 merupakan konstanta laju pseudo orde dua. Menerapkan limit integral untuk t (0, t) dan Q_t (0, Q_t) bentuk linier kinetika adsorpsi pseudo orde dua ditunjukkan oleh Persamaan 14.

$$Q_t = \frac{t}{\frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{t}{Q_e}} \quad (14)$$

Persamaan 14 diatur ulang untuk mendapatkan bentuk lain yang ditunjukkan Persamaan 15-18.

$$\frac{t}{Q_t} = \left(\frac{1}{k_2 Q_e^2} \right) + \frac{t}{Q_e} \quad (15)$$

$$\frac{1}{Q_t} = \left(\frac{1}{k_2 Q_e^2} \right) + \frac{1}{t} + \frac{1}{Q_e} \quad (16)$$

$$Q_t = Q_e - \left(\frac{1}{k_2 Q_e^2} \right) \frac{Q_t}{t} \quad (17)$$

$$\frac{Q_t}{t} = k_2 Q_e^2 - k_2 Q_e Q_t \quad (18)$$

2.8. Isoterm Adsorpsi

Secara umum isoterm adsorpsi diartikan sebagai fungsi konsentrasi zat terlarut yang terjerap pada padatan terhadap konsentrasi larutan. Tipe isoterm adsorpsi dapat digunakan untuk mempelajari mekanisme adsorpsi. Isoterm adsorpsi

merupakan kurva yang menunjukkan bagaimana zat ditahan atau dilepaskan dari media berpori ke fase padat dalam lingkungan berair pada pH dan suhu tetap. 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.*, 2023; Buhani *et al.*, 2017(b); Buhani *et al.*, 2018).

2.8.1. Isoterm Adsorpsi Freundlich

Isoterm adsorpsi Freundlich menjelaskan bahwa adsorpsi yang terjadi bersifat heterogen atau tidak semua permukaan adsorben mampu mengalami adsorpsi, sehingga lapisan yang dihasilkan dari model adsorpsi ini akan bersifat *multilayer* (Buhani *et al.*, 2023). Pernyataan yang digunakan pada model ini sebagai berikut:

1. Permukaan bersifat heterogen.
2. Tidak terjadi asosiasi dan disosiasi molekul-molekul adsorbat setelah teradsorpsi pada permukaan padat.
3. Hanya berlangsung adsorpsi fisika tanpa terjadi adsorpsi kimia.

Model isoterm Freundlich menjelaskan bahwa proses adsorpsi pada bagian permukaan yaitu heterogen, dimana tidak semua permukaan adsorben mempunyai daya adsorpsi. Model isoterm adsorpsi Freundlich dapat dihitung menggunakan Persamaan 19 dan 20.

$$Q_e = K_f \times C_e^{1/n} \quad (19)$$

$$\text{Log } Q_e = \text{log } K_f + \frac{1}{n} \text{log } C_e \quad (20)$$

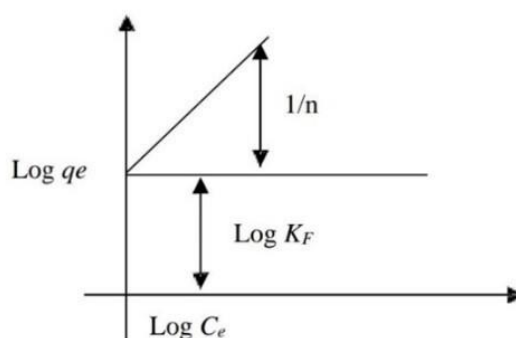
Dimana:

- 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)

(Kausar *et al.*, 2020).

K_f adalah kapasitas adsorpsi (L/mg) dan $1/n$ adalah intensitas adsorpsi, ini juga mengindikasikan distribusi relatif dari energi dan heterogenitas situs adsorbat

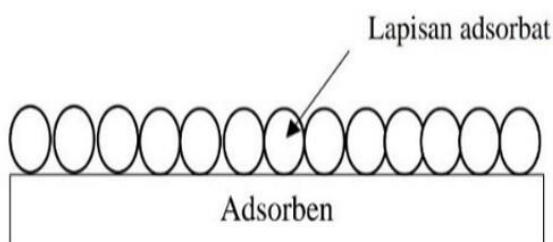
(Ayawei *et al.*, 2017). Konstanta Freundlich (K_f) dapat diperoleh dari kemiringan garis lurus dan $(1/n)$ merupakan harga slope. Apabila nilai n diketahui maka K_f dapat dicari, semakin besar harga K_f maka daya adsorpsi akan semakin baik dan dari harga K_f yang diperoleh maka energi adsorpsi akan dapat dihitung. Model isoterm Freundlich menunjukkan lapisan adsorbat yang terbentuk pada permukaan adsorben adalah *multilayer*. Hal tersebut berkaitan dengan ciri-ciri dari adsorpsi secara fisika dimana adsorpsi dapat terjadi pada banyak lapisan (*multilayer*) (Husin and Rosnelly, 2005). Model isoterm adsorpsi Freundlich dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Model isoterm adsorpsi Freundlich (Husin and Rosnelly, 2005)

2.8.2. Isoterm Adsorpsi Langmuir

Isoterm Langmuir menggambarkan proses adsorpsi yang terjadi melalui adsorpsi secara kimia (*chemisorption*) dalam satu lapisan (*monolayer*) (Buhani *et al.*, 2010). *Chemisorption* adalah adsorpsi dengan ikatan kimia kuat antara permukaan aktif adsorben dan molekul adsorbat. Ilustrasi adsorpsi dengan persamaan Langmuir ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Ilustrasi adsorpsi dengan persamaan Langmuir (Handayani dan Sulistyono, 2009)

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). Model isoterm Langmuir menggunakan pendekatan kinetika dimana kesetimbangan dapat terjadi apabila kecepatan adsorpsi sama dengan kecepatan desorpsi. Pada persamaan ini digunakan asumsi sebagai berikut:

1. Adsorpsi terjadi secara kimia
2. Adsorbat yang terserap membentuk lapisan tunggal (*monolayer*)
3. Adsorben adalah suatu sistem yang memiliki tingkat energi homogen sehingga afinitas molekul yang terjerap sama untuk di setiap tempat atau lokasi
4. Molekul yang sudah terjerap pada permukaan adsorben tidak dapat berpindah tempat
5. Tidak terjadi interaksi antar molekul yang terjerap

(Wijayanti dan Kurniawati, 2019).

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 21.

$$\frac{C}{n} = \frac{1}{nmK} + \frac{C}{nm} \quad (21)$$

Dimana:

C : Konsentrasi kesetimbangan adsorbat dalam larutan setelah adsorpsi (mg/L)

n : Jumlah adsorbat teradsorpsi per bobot adsorben (mg/g)

K : Konstanta kesetimbangan adsorpsi (L/mg)

nm : Kapasitas adsorpsi maksimum dari adsorben (mg/g)

(Wijayanti dan Kurniawati, 2019).

Energi adsorpsi adalah energi yang dihasilkan apabila satu mol zat teradsorpsi dalam adsorben dan jumlahnya ekuivalen dengan nilai negatif dari perubahan energi Gibbs standar (ΔG°) yang dapat dihitung melalui Persamaan 22.

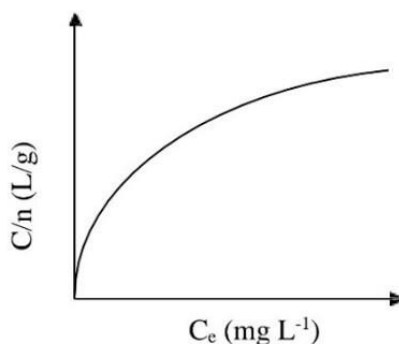
$$E_{\text{ads}} = -\Delta G^\circ_{\text{ads}} = R T \ln K \quad (22)$$

Dimana:

R : Tetapan gas umum ($8,314 \text{ J mol}^{-1}$)

T : Temperatur (K)

K : Konstanta kesetimbangan adsorpsi yang diperoleh dari persamaan Langmuir
Grafik isoterm Langmuir ditunjukkan pada Gambar 8.



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

2.9. Penentuan Nilai pH *Point Zero Charge* (pH PZC)

pH *Point of Zero Charge* (pH PZC) adalah suatu keadaan pada saat permukaan bermuatan netral. PZC adalah titik perpotongan antara kurva pH awal dan kurva pH akhir. pH *Point of Zero Charge* (pH PZC) merupakan salah satu ciri adsorben yang dapat mempengaruhi persentase adsorpsi. *Point of Zero Charge* (PZC) adalah pH ketika permukaan bermuatan netral. Permukaan adsorben bermuatan positif jika $\text{pH} < \text{pH PZC}$ sehingga lebih mudah untuk menyerap larutan anionik. Sebaliknya jika $\text{pH} > \text{pH PZC}$ maka permukaan adsorben akan bermuatan negatif sehingga lebih mudah menyerap kationik (Dewi dan Ridwan, 2012). Pada $\text{pH} < \text{pH PZC}$ permukaan adsorben cenderung bermuatan positif. Hal ini terjadi karena pada pH rendah, gugus fungsi seperti hidroksil ($-\text{OH}$) pada permukaan adsorben mengalami protonasi, menghasilkan muatan positif. Akibatnya, terjadi gaya tolak-menolak elektrostatis antara permukaan adsorben dan molekul zat warna kationik sehingga mampu menyerap zat warna anionik. Pada $\text{pH} > \text{pH PZC}$ permukaan adsorben cenderung bermuatan negatif. Pada pH tinggi, gugus fungsi mengalami deprotonasi, menghasilkan muatan negatif. Hal ini menyebabkan gaya tarik elektrostatis antara permukaan adsorben dan molekul zat warna kationik. Muatan

permukaan dapat dihitung melalui nilai pH *Point of Zero Charge* (pH PZC) berdasarkan Persamaan 23 (Buhani *et al.*, 2023).

$$\text{pH PZC} = \text{pH akhir} - \text{pH awal} \quad (23)$$

2.10. Desorpsi

Desorpsi merupakan proses terlepasnya baik ion ataupun molekul yang menempel atau terserap pada adsorben. Dalam proses desorpsi, larutan atau pelarut tertentu disebut dengan Eluen. Eluen membantu memutus ikatan antara adsorbat yang menempel dengan adsorben yang sudah jenuh. Dalam konteks desorpsi, eluen digunakan untuk menghilangkan adsorbat dari adsorben yang sudah jenuh (Adawiah dkk., 2021).

Sifat eluen harus sesuai dengan adsorbat dan adsorben, sehingga mampu dengan mudah memutus ikatan di antara keduanya. Beberapa parameter penting dalam pemilihan eluen meliputi jenis dan konsentrasi eluen, tipe desorpsi, serta pH. Pemilihan eluen, baik berupa anion, kation, maupun pelarut organik, bergantung pada sistem adsorbat-adsorben yang digunakan. (Adawiah dkk., 2021). Setelah setiap siklus adsorpsi-desorpsi, jumlah adsorbat (polutan) yang teradsorpsi dan terdesorpsi dihitung, serta efisiensi desorpsi (atau persentase desorpsi) dan jumlah yang terdesorpsi (mg/g) dihitung menggunakan rumus berikut:

$$Q \text{ (mg/g)} = \frac{(C_o - C_e)}{m} \times V \quad (24)$$

$$\% \text{ Adsorpsi} = \frac{C_o - C_e}{C_o} \times 100\% \quad (25)$$

$$\% \text{ Desorpsi} = \frac{C_e \text{ eluen}}{C_e \text{ total}} \times 100\% \quad (26)$$

Dimana:

- Q : Jumlah adsorbat yang diadsorpsi per satuan massa adsorben (mg/g)
- C_o : Konsentrasi awal adsorbat dalam larutan (mg/L)
- C_e : Konsentrasi adsorbat dalam larutan pada keadaan kesetimbangan (mg/L)
- V : Volume larutan (L)
- m : Masa adsorben yang digunakan (g)

2.11. Karakterisasi

Karakterisasi pada umumnya digunakan untuk mengetahui komposisi, bidang kristal, ikatan kimia, atau senyawa dari suatu sampel pada proses penelitian. Selain itu juga, karakterisasi dapat digunakan untuk mengetahui kualitas dari sampel tersebut yang dapat mempengaruhi berbagai aspek penelitian. Beberapa contoh alat untuk karakterisasi yang sering digunakan yaitu:

2.11.1. Spektrofotometri UV-Vis

Spektrofotometer UV-Vis bekerja berdasarkan prinsip bahwa cahaya monokromatik yang melewati larutan akan diserap, dipantulkan, dan diteruskan. Alat ini digunakan untuk analisis kuantitatif berdasarkan nilai absorbansi, serta kualitatif melalui spektrum pada panjang gelombang tertentu. Prinsip pengukuran spektrofotometer ini mengikuti hukum Lambert-Beer, yang menyatakan bahwa bila suatu cahaya monokromatis dilewatkan melalui suatu media yang transparan, maka intensitas cahaya yang ditransmisikan sebanding dengan tebal dan kepekaan media larutan yang digunakan seperti ditunjukkan pada Persamaan 26 dan 27 (Yanlinastuti dan Syamsul, 2016).

$$A = \log I/I_0 \text{ atau } A = E.b.c \quad (27)$$

Dimana:

A : absorban (serapan)

E : koefisien serapan molar ($M^{-1} \text{ cm}^{-1}$)

b : tebal kuvet (cm)

c : konsentrasi (M)

I_0 : intensitas sinar mula-mula

I : intensitas sinar yang diteruskan

$$Y = ax + b \quad (28)$$

Dimana:

Y : absorbansi

a : konstanta

x : konsentrasi

b : kemiringan/*slope*

Spektrofotometer UV-Vis digunakan untuk mengukur panjang gelombang dari larutan zat warna *malachite green*. Spektrofotometer UV-Vis dapat digunakan untuk mengukur panjang gelombang dari suatu larutan *malachite green*.

Pengukuran tersebut berkisar pada panjang gelombang 600 - 700 nm untuk *malachite green*. Panjang gelombang maksimum *malachite green* diperoleh panjang gelombang maksimum sebesar 618 nm. Oleh karena itu, dapat ditentukan konsentrasi yang terserap pada saat proses adsorpsi dengan menggunakan kurva kalibrasi.

2.11.2. X-Ray Diffraction (XRD)

XRD adalah instrumen yang digunakan untuk mengidentifikasi senyawa berdasarkan pola pembiasan cahaya yang dihasilkan oleh material dengan susunan atom pada kisi kristalnya. Prinsip kerja XRD adalah bahwa setiap senyawa memiliki susunan atom yang membentuk bidang tertentu, sehingga cahaya yang datang pada sudut tertentu akan menghasilkan pola pantulan atau pembiasan, yang digunakan untuk analisis kualitatif senyawa. Selain itu, teknik ini juga memberikan informasi tentang regangan kisi, ukuran kristal, dan komposisi kimia material (Suryanarayana, 1998). Persamaan Scherrer dapat digunakan untuk menentukan ukuran suatu kristal. Bentuk persamaan Scherrer ditunjukkan pada Persamaan 29 (Suwanboon *et al.*, 2011).

$$D = \frac{0.9\lambda}{B \cos \theta} \quad (29)$$

Keterangan:

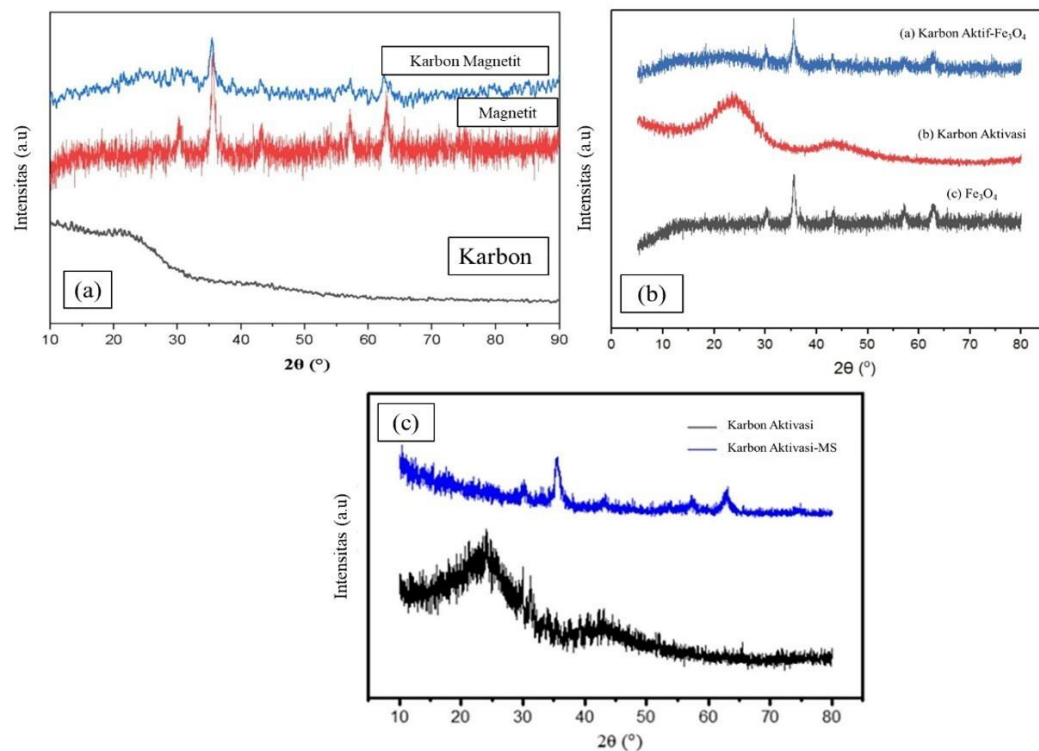
D : Diameter kristal

λ : Panjang gelombang sinar X (nm)

B : Lebar puncak pada setengah intensitas maksimum

θ : Sudut difraksi

Prinsip kerja instrumen XRD adalah penerapan prinsip Bragg yang mengemukakan bahwa perbedaan lintasan berkas difraksi sinar-X harus kelipatan panjang gelombang dengan rumus $n\lambda = d \sin\theta$, dengan n adalah bilangan bulat, sedangkan λ adalah panjang gelombang sinar-X, d adalah jarak antar bidang, dan θ adalah sudut difraksi. Difraktogram yang diperoleh memberikan informasi deretan peaks difraksi dengan intensitas relatif sepanjang nilai 2θ pada rentang yang ditentukan.



Gambar 9. Pola hasil XRD dari (a) Adsorben cangkang buah karet, (b) Karbon Aktif- Fe_3O_4 dan (b) Karbon Aktif- Fe_3O_4 Silan

Hasil analisis XRD pada penelitian Dewi *et al.* (2023) yang ditunjukkan pada Gambar 9(a) karakterisasi adsorben karbon dan karbon termodifikasi magnetit (KM) dari cangkang buah karet menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui tingkat kristalinitas material. Karbon (tanpa modifikasi) menunjukkan pola difraktogram yang khas dari struktur amorf, ditandai dengan puncak lebar dan asimetris di sekitar $2\theta \approx 25^\circ$. Hal ini mencerminkan bahwa karbon hasil karbonisasi dari cangkang buah karet belum memiliki keteraturan struktur kristal yang tinggi. Karbon Magnetit (KM) menunjukkan perubahan signifikan fase

struktur kristalin, yang ditandai oleh kemunculan puncak difraksi tajam pada $2\theta \approx 35^\circ$, 43° , dan 62° . Puncak ini merupakan ciri khas dari kristal magnetit (Fe_3O_4).

Berdasarkan analisis XRD pada Gambar 9 (b dan c) oleh Buhani *et al.* (2019b), adsorben PPAC- Fe_3O_4 (*Palm-based Powdered Activated Carbon-Fe₃O₄*) menunjukkan pola difraksi khas karbon amorf pada sudut 2θ antara 25° - 45° . Setelah Fe_3O_4 dilapiskan pada karbon aktif, muncul puncak difraksi pada $30,05^\circ$, $35,55^\circ$; $43,37^\circ$; $57,43^\circ$ dan $62,91^\circ$, yang menandakan terbentuknya kristal nano Fe_3O_4 , hal ini menunjukkan pelapisan telah berhasil. Dalam penelitian Buhani *et al.* (2023), XRD terhadap Karbon Aktif-Magnetit Silan (KA-MS) menunjukkan puncak lemah di sekitar 30° , 35° , 43° , dan 57° , sesuai dengan pola magnetit. Rendahnya intensitas ini disebabkan oleh pelapisan silan di permukaan karbon aktif magnetit, seperti dijelaskan oleh Wong *et al.* (2016).

2.11.3. Spektrofotometer *Fourier Transform Infrared* (FTIR)

Spektrofotometer *Fourier Transform Infrared* (FTIR) merupakan salah satu teknik yang digunakan untuk mengidentifikasi struktur molekul suatu senyawa dan gugus-gugus fungsi penyusun suatu material (Noor *et al.*, 2016). Prinsip kerja spektrofotometer FTIR didasarkan pada penyerapan sinar inframerah pada jangkauan frekuensi $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$. Identifikasi senyawa yang tidak dikenal dapat dilakukan dengan cara membandingkan spektrum inframerah dengan sederet spektrum standar yang dibuat pada kondisi yang sama (Khopkar, 2001).

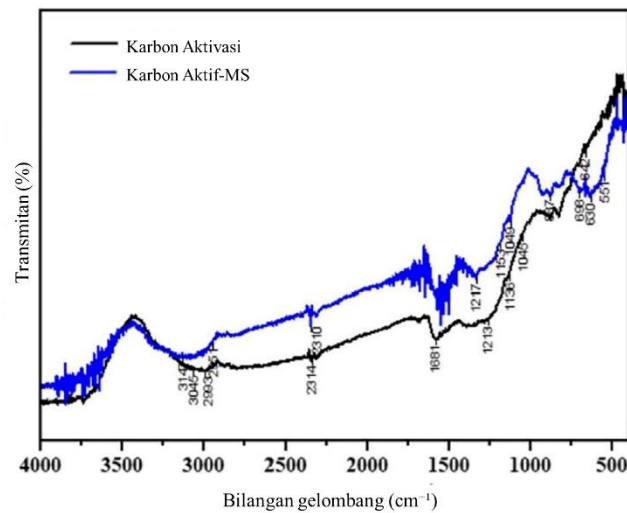
Sinar infra merah dari sumber terdiri dari berbagai panjang gelombang. Ketika sebuah molekul menyerap sinar tersebut, molekul mengalami perubahan tingkat energi vibrasi dan rotasi. Secara umum, vibrasi antar atom terbagi menjadi vibrasi ulur (*stretching*) dan vibrasi tekuk (*bending*). Gugus fungsi dari suatu molekul memiliki panjang gelombang yang berbeda yang ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Serapan infra merah gugus fungsi senyawa organik

Daerah serapan cm^{-1}	Gugus fungsi	Nama gugus fungsi
3606	O-H	Alkohol
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
570	Fe-O	Oksida besi

(Ikhwanuddin, 2018)

Berdasarkan hasil spektrum FTIR yang ditampilkan dalam penelitian (Buhani *et al.*, 2023). Pada spektrum IR karbon aktif magnetit silan, terdapat pita serapan pada rentang $2900\text{-}3300\text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan keberadaan gugus -OH. Namun, pada karbon aktif sebelum modifikasi, pita ini hampir tidak terlihat yang artinya analisis FTIR menunjukkan keberhasilan modifikasi karbon aktif dengan magnetit dan silanasi. Dimana spektrum FTIR karbon aktif magnetit silan menunjukkan adanya pita serapan pada $551,0\text{ cm}^{-1}$, yang menandakan terbentuknya ikatan kovalen Fe-O-Si, pita serapan pada $1049,0\text{ cm}^{-1}$ menandakan adanya ikatan Si-O-Si, dan pita serapan pada panjang gelombang 630 cm^{-1} menunjukkan vibrasi membengkok Fe-O yang berasal dari magnetit. Ini menegaskan bahwa magnetit telah terintegrasi dalam struktur adsorben. Ketiga ikatan ini tidak terdeteksi pada spektrum FTIR karbon aktif sebelum modifikasi. Hasil analisis FTIR pada adsorben ditunjukkan pada Gambar 10.

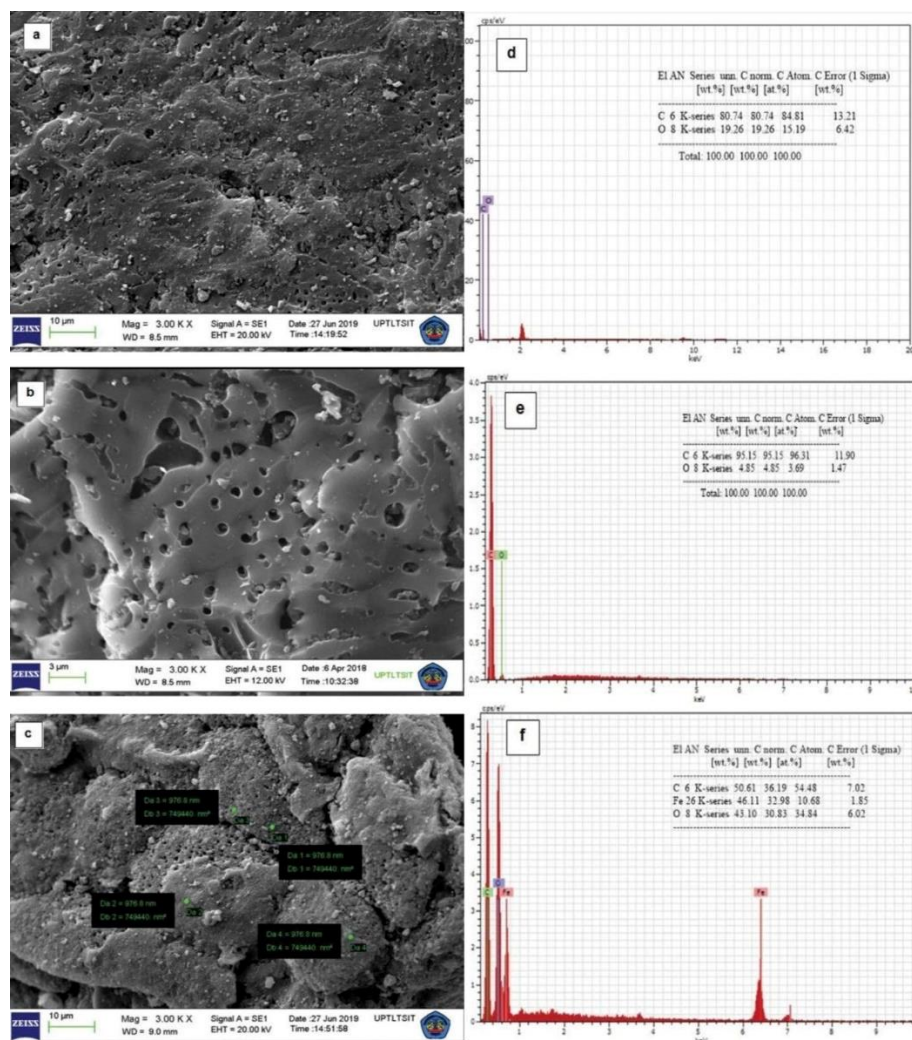


Gambar 10. Spektrum FTIR karbon aktif dan karbon aktif-magnetit silan

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

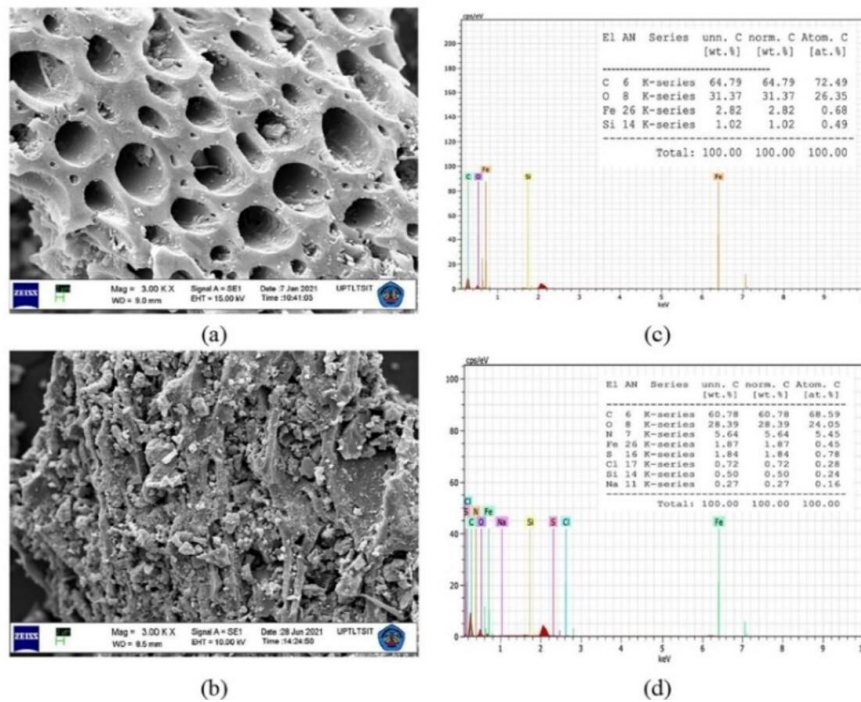
SEM-EDX merupakan kombinasi dua alat yaitu *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Energy Dispersive X-Ray* (EDX). SEM berfungsi untuk mendapatkan informasi tentang permukaan material, sementara EDX berperan dalam menganalisis komposisi dan unsur pembentuk material. SEM bekerja berdasarkan prinsip pemindaian sinar elektron pada permukaan sampel (Setiabudi *et al.*, 2012). Analisis SEM menghasilkan gambar yang memberikan informasi mengenai morfologi permukaan serta ukuran diameter material yang disintesis.

EDX berfungsi untuk mengidentifikasi jenis atom atau oksida yang ada di permukaan material. Elektron berenergi tinggi yang ditembakkan ke atom dalam suatu senyawa dapat menabrak elektron di lapisan terdalam atom tersebut. Tumbukan ini menyebabkan elektron dengan energi lebih rendah terlepas dan meninggalkan kekosongan pada lapisan tersebut. Elektron dari lapisan yang lebih tinggi kemudian mengisi kekosongan tersebut, dan proses ini disertai dengan pelepasan energi berupa radiasi sinar X yang spesifik terhadap unsur yang dianalisis. Hasilnya berupa gambar dan persentase komponen material dalam sampel.



Gambar 11. Hasil SEM dan spektra EDX (a,d) karbon, (b,e) karbon aktivasi, dan (c,f) karbon aktivasi Fe_3O_4

Menurut Buhani *et al.* (2019b), hasil SEM menunjukkan bahwa karbon dari cangkang kelapa sawit yang telah diaktivasi memiliki lebih banyak pori dibandingkan yang belum diaktivasi, menandakan keberhasilan proses aktivasi. Setelah dilapisi partikel Fe_3O_4 , jumlah pori menurun karena pori tertutup partikel Fe_3O_4 berukuran sekitar 976,8 nm. Analisis EDX menunjukkan peningkatan kadar karbon dari 84,81% menjadi 96,31% setelah aktivasi, menandakan peningkatan kemurnian adsorben. Hasil analisis SEM-EDX pada adsorben karbon aktivasi- Fe_3O_4 ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 12. Hasil SEM dan spektra EDX (a,c) karbon magnetit silan sebelum adsorpsi dan (b,d) karbon aktif magnetit silan setelah adsorpsi

Analisis karakterisasi SEM-EDX dari bahan adsorben yang digunakan dalam penelitian (Buhani *et al.*, 2023) memberikan informasi mengenai morfologi permukaan dan komposisi elemen dari karbon aktif yang dihasilkan. Analisis SEM (*Scanning Electron Microscope*) menunjukkan adanya pori-pori atau rongga yang cukup signifikan pada karbon aktif magnetit yang telah dimodifikasi dengan agen silan, yang dapat meningkatkan aksesibilitas kontaminan seperti pewarna metilen biru (MB) dan kristal violet untuk diadsorpsi. Setelah proses adsorpsi, terlihat adanya aglomerasi pada permukaan karbon aktif magnetit silan, yang menunjukkan perubahan morfologi. Analisis EDX menunjukkan bahwa sebelum adsorpsi, karbon aktif magnetit silan mengandung unsur-unsur seperti C, O, Fe, dan Si. Setelah proses adsorpsi, terdapat tambahan unsur seperti N, Cl, Si, dan Na, yang berasal dari pewarna metilen biru dan kristal violet, artinya bahwa proses adsorpsi tidak hanya mengubah morfologi permukaan tetapi juga menambah komponen kimia pada material adsorben. Hasil analisis SEM-EDX pada adsorben Karbon Aktivasi Magnetit Silan (KA-MS) ditunjukkan pada Gambar 12.

2.11.5. Brunauer Emmet Teller (BET)

Teori BET dapat digunakan setelah dilakukan uji menggunakan alat SAA (*Surface Area Analyzer*). Alat ini berfungsi untuk menentukan diameter dan volume pori, serta luas permukaan spesifik material. Berdasarkan prinsip adsorpsi-desorpsi gas adsorbat. Mekanisme adsorpsi gas tersebut berupa penyerapan gas (nitrogen, argon dan helium) pada permukaan suatu bahan padat yang akan dikarakterisasi pada suhu tetap. Jika diketahui volume gas (nitrogen, argon, atau helium) yang dapat diserap oleh suatu permukaan padatan pada suhu dan tekanan tertentu dan diketahui secara teoritis luas permukaan dari satu molekul gas yang diserap, maka luas permukaan total padatan tersebut dapat dihitung. Luas permukaan merupakan jumlah pori pada setiap satuan luas dari sampel. Sementara luas permukaan spesifik adalah luas permukaan per satuan gram (Thommes *et al.*, 2015). Untuk menghitung luas padatan tersebut, teori BET inilah yang digunakan dengan menggunakan Persamaan 29.

$$S = \frac{X_m \times Lav \times Am}{M_v} \quad (29)$$

Dimana:

S : luas permukaan total,

X_m : kapasitas monolayer yang dapat diperoleh melalui Persamaan 23

Lav : bilangan Avogadro ($6,023 \times 10^{23}$ molekul/mol)

A_m : luas penampang adsorbat dengan nilai $0,162 \text{ nm}^2$ menggunakan adsorbat nitrogen

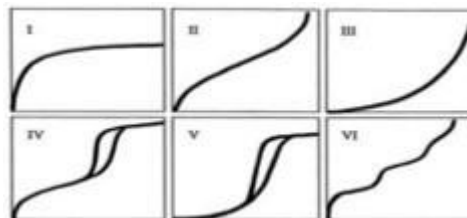
M_v : volume molar gas ideal sebesar $22,4 \text{ L/mol}$

Sementara kapasitas *monolayer* dapat diketahui menggunakan *slope* dan intersep dari Persamaan 30.

$$X_m = \frac{1}{s+i} \quad (30)$$

Pada analisis luas permukaan menggunakan uji SAA, sering digunakan gas nitrogen. Hal ini disebabkan tersedianya gas nitrogen dalam kemurnian yang tinggi dan dapat berinteraksi dengan kuat dengan kebanyakan padatan. Biasanya, interaksi antara fasa gas dan padat lemah, sehingga permukaan didinginkan

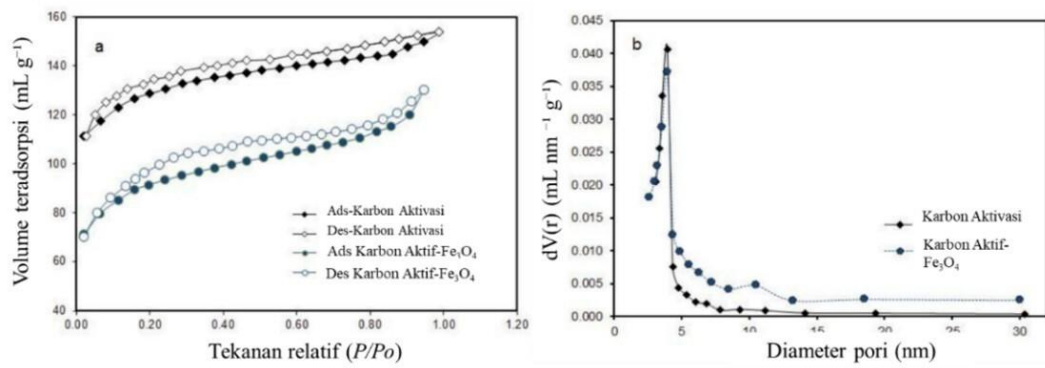
menggunakan nitrogen cair untuk memperoleh jumlah adsorpsi yang terdeteksi. Selanjutnya, tekanan relatif yang lebih rendah dibandingkan dengan tekanan atmosfer didapatkan dalam kondisi setengah vakum. Setelah lapisan adsorpsi terbentuk, gas nitrogen kemudian dihilangkan atau dibebaskan dari sampel dengan cara dipanaskan.



Gambar 13. Enam tipe kurva isoterm adsorpsi sesuai IUPAC

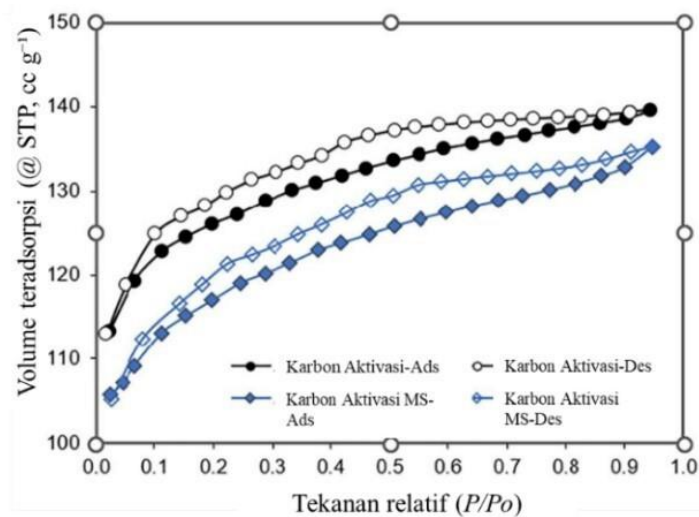
Berdasarkan IUPAC adsorpsi-desorpsi gas N_2 diklasifikasikan menjadi 6 tipe yang ditunjukkan pada Gambar 13. Tipe I menjelaskan adsorpsi oleh adsorben mikropori. Tipe II dan III menjelaskan adsorpsi oleh adsorben makropori diikuti dengan kuat-lemahnya interaksi antara adsorben dan adsorbat. Tipe IV dan V menjelaskan adsorpsi oleh adsorben mesopori. Tipe VI menjelaskan pola adsorpsi yang terdiri lebih dari satu tahapan. Adsorben mesopori cenderung membentuk lapisan *multilayer* saat proses adsorpsi (Jin and Kang, 2011).

Menurut Buhani *et al.* (2023), luas permukaan karbon aktif sebesar $415,12 \text{ m}^2/\text{g}$ menurun menjadi $300,09 \text{ m}^2/\text{g}$ setelah dilapisi Fe_3O_4 , menunjukkan bahwa pelapisan mengurangi luas permukaan. Volume dan diameter pori juga menurun, masing-masing dari $0,23 \text{ cm}^3/\text{g}$ menjadi $0,20 \text{ cm}^3/\text{g}$, dan dari $2,69 \text{ nm}$ menjadi $2,21 \text{ nm}$, akibat penyumbatan pori oleh partikel Fe_3O_4 . Ukuran pori dominan $3,94 \text{ nm}$ menunjukkan sifat mesopori. Pola isoterm adsorpsi bertipe IV dengan histeresis H1 mengonfirmasi bahwa kedua material bersifat mesopori dengan struktur yang teratur dan mengalami kondensasi kapiler nitrogen. Hasil analisis BET karbon aktif- Fe_3O_4 pada adsorben ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 14. (a) Isoterm adsorpsi-desorpsi nitrogen dan (b) distribusi ukuran pori karbon aktivasi dan karbon aktivasi-Fe₃O₄

Berdasarkan penelitian (Buhani *et al.*, 2023). Analisis BET menunjukkan bahwa karbon aktivasi dan karbon aktif magnetit silan memiliki distribusi volume pori yang besar, dengan diameter pori rata-rata masing-masing 3,201 dan 3,215 nm, yang menunjukkan bahwa kedua material tersebut termasuk dalam kategori mesopori. Luas permukaan karbon aktivasi dan karbon aktif magnetit silan masing-masing adalah 181,879 dan 180,95 m² g⁻¹, sedangkan total volume pori masing-masing adalah 0,231 dan 0,242 cm³ g⁻¹. Data ini menunjukkan bahwa proses fungsionalisasi pada karbon aktivasi tidak mengubah luas permukaan dan volume pori total pada karbon aktif magnetit silan. Hasil analisis BET pada adsorben Karbon Aktivasi Magnetit Silan (KA-MS) ditunjukkan pada Gambar 15.



Gambar 15. Isoterm adsorpsi/desorpsi karbon aktif dan karbon aktif magnetit silan

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini telah dilakukan pada bulan November 2024 hingga Maret 2025 di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Universitas Lampung. Analisis *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan di Laboratorium Terpadu FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta (UNY), analisis morfologi permukaan dan komposisi unsur pada karbon aktif menggunakan *Scanning Electron Microscope* yang dirangkai dengan *Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX) dilakukan di Laboratorium Terpadu FMIPA Universitas Muhammadiyah Yogyakarta (UMY), analisis luas permukaan karbon aktif dengan menggunakan metode *Brunauer Emmet Teller* (BET) dilakukan di Laboratorium Terpadu UPN Veteran Yogyakarta, analisis hasil adsorpsi *malachite green* menggunakan spektrofotometer UV-Vis dilakukan di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Universitas Lampung (Unila), analisis permukaan adsorben dan analisis gugus fungsi pada adsorben dengan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dilakukan di Laboratorium Kimia Organik Departemen Kimia FMIPA Universitas Gadjah Mada.

3.2. Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini antara lain peralatan gelas, spatula, neraca analitik, oven, tanur, *magnetic stirrer*, *hotplate*, kertas saring, pH meter, pengayak 100 mesh, cawan porselin, sentrifugasi, spektrofotometer UV Vis tipe *Cary Series*, *Fourier Transform Infrared* (FTIR) tipe *thermo scientific nicole*t iS10, *Scanning Electron Microscope* yang dirangkai dengan *Energy Dispersive X-*

Ray (SEM-EDX) Jeol JSM-IT210, *X-Ray Diffraction* (XRD) Rigaku Miniplex 600, dan *Brunauer Emmet Teller* (BET) tipe *Quantachrome* NOVA 1200e.

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu cangkang kelapa sawit dari PT. Anak Tuha Sawit Mandiri Lampung Tengah, *Malachite Green* (MG), $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, APTES, KNO_3 , NaOH, HCl, etanol, kalium iodida, iodium, akuades, natrium tiosulfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), larutan kanji, larutan *buffer* alumunium foil, kertas saring, dan kertas indikator universal.

3.3. Prosedur Penelitian

3.3.1. Pembuatan Karbon dari Cangkang Kelapa Sawit

Cangkang kelapa sawit yang diperoleh dari PT. Anak Tuha Sawit Mandiri Lampung Tengah, dibersihkan dan dikeringkan di bawah sinar matahari. Cangkang kelapa sawit yang telah bersih selanjutnya dipirolisis selama kurang lebih 6 jam sehingga diperoleh karbon cangkang kelapa sawit yang kemudian dihaluskan menggunakan alat penggiling lalu diayak dengan pengayakan berukuran 100 *mesh*. Karbon cangkang kelapa sawit yang telah halus selanjutnya diaktivasi dengan cara yaitu aktivasi secara fisika, kemudian dimodifikasi lebih lanjut dengan menggunakan magnetit dan APTES.

3.3.2. Aktivasi Karbon dari Cangkang Kelapa Sawit

Proses aktivasi dilakukan secara fisika dengan cara menimbang 240 g karbon yang telah diayak kemudian dibakar dalam tanur pada suhu 700°C selama 1 jam. Kemudian didinginkan dalam desikator hingga suhunya stabil (Buhani *et al.*, 2019) dan diperoleh Karbon Aktivasi Fisik (KAF).

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari hasil penelitian yang dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Modifikasi adsorben karbon dengan magnetit dan silan telah berhasil dilakukan yang dibuktikan dengan hasil karakterisasi menggunakan FTIR, XRD, BET, dan SEM-EDX.
2. Adsorpsi zat warna *malachite green* oleh adsorben KAF-M dan KAF-MS optimum pada dosis 0,2 g, pH optimum yaitu 8 dan 10, waktu kontak optimum yaitu 60 menit, dan konsentrasi maksimum yaitu 400 ppm.
3. Laju adsorpsi zat warna *malachite green* terhadap adsorben KAF-M dan KAF-MS cenderung mengikuti model kinetika pseudo orde dua.
4. Isoterm adsorpsi zat warna *malachite green* terhadap semua adsorben KAF-M dan KAF-MS cenderung mengikuti model isoterm adsorpsi Freundlich.
5. Persentase desorpsi tertinggi adsorben KAF-M dan KAF-MS terhadap *malachite green* terjadi pada eluen etanol 40%.
6. Penggunaan ulang adsorben KAF-M dan KAF-MS terhadap adsorpsi *malachite green* efektif digunakan kembali sebanyak 4 dan 5 kali penggunaan ulang yang ditunjukkan dengan hasil persentase adsorpsi >90%.

5.2. Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat disarankan sebagai berikut:

1. Melakukan uji adsorpsi pada karbon modifikasi magnetit dan silan terhadap adsorbat lain seperti logam berat.
2. Melakukan uji adsorpsi dengan konsentrasi adsorbat logam berat yang lebih tinggi dari 100 ppm.

DAFTAR PUSTAKA

- Adawiah, S. R., Nur, A., Gani, R., dan Andriani, T. 2021. Studi perbandingan adsorpsi-desorpsi anion nitrat dan sulfat pada bentonit termodifikasi. 4(1): 23–31.
- Alfiyani, H., Nurlina, dan Wahyuni, N. 2022. Adsorpsi Anilin oleh Karbon Aktif Magnetik Cangkang Kelapa Sawit. *ALCHEMY: Jurnal Penelitian Kimia*. 18(2): 130–139.
- Anggriani, U. M., Hasan, A., dan Purnamasari, I. 2021. Kinetika adsorpsi karbon aktif dalam penurunan konsentrasi logam tembaga (Cu) dan timbal (Pb). *Jurnal Kinetika*. 12(02): 29–37.
- Angriana, F. 2021. Modifikasi Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis Jacq.*) dengan Teknik Pelapisan Magnetit sebagai Adsorben Zat Warna Metilen Biru. *Skripsi*. Universitas Lampung
- Aksu, Z. 2005. Application of biosorption for the removal of organic pollutants: a review. *Process Biochemistry*. 40(3–4): 997–1026.
- Auliya, R., Juliasih, N.G.R, dan Rinawati. 2018. Pembuatan dan karakterisasi karbon aktif dari kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca L.*) sebagai adsorben senyawa polisiklik aromatik hidrokarbon fenantrena. In *Analit: Analytical and Environmental Chemistry*. 3(2).
- Ayawei, N., Ebelegi, A. N., and Wankasi, D. 2017. Modelling and interpretation of adsorption isotherms. *Journal of Chemistry*. 3039817: 1-11.
- Bakhsh, E. M., Bilal, M., Ali, M., Ali, J., Wahab, A., Akhtar, K., Fagieh, T. M., Danish, E. Y., Asiri, A. M., and Khan, S. B. 2022. Synthesis of activated carbon from *Trachycarpus fortunei* seeds for the removal of cationic and anionic dyes. *Materials*. 15(6): 1986.
- Bakti, A. I., Lumembang, M. M., dan Jumriadi. 2023. Karakterisasi karbon aktif yang terbuat dari tempurung kelapa menggunakan teknik pirolisis dengan aktivasi fisika dan kimia. *Jurnal MIPA*. 12(2).
- Buhani, Herasari, D., Suharso, and Suropto, D.Y. 2017a. Correlation of ionic imprinting cavity sites on the amino-silica hybrid adsorbent with adsorption rate and capacity of Cd²⁺ ion in solution. *Oriental Journal of Chemistry*. 33(1) : 418-429.

- Buhani, Musrifatun, Pratama, D.S., Suharso, and Rinawati. 2017b. Modification of chaetoceros sp. biomass with silica-magnetite coating and adsorption studies towards Cu (II) ions in single and binary system. *Asian Journal of Chemistry*. 29 (12): 2734-2739.
- Buhani, Narsito, Nuryono, Sri, K.E., and Suharso. 2015. Adsorption competition of Cu (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, 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 and Suharso. 2010. The influence of pH towards multiple metal ion adsorption of Cu (II), Zn (II), Mn (II), and Fe (II) on humic acid. *Indonesian Journal of Chemistry*. 6 (1): 4.
- Buhani, Suharso, Aditiya, I., Kausar, R.A., Sumadi, and Rinawati. 2019a. Production of a Spirulina sp. algae hybrid with a silica matrix as an effective adsorbent to absorb crystal violet and methylene blue in a solution. *Sustainable Environment Research*. 1(1): 1–11.
- Buhani, Suharso, Luziana, F., Rilyanti, M., and Sumadi. 2019b. Production of adsorbent from activated carbon of palm oil shells coated by Fe₃O₄ particle to remove crystal violet in water. *Desalination and Water Treatment*. 171: 281–293.
- Buhani, Suharso, Rilyanti, M., Devi, F., Antika, R., Puji, L., and Sumadi, L. 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. *Environ Sci Pollut Res*. 1-14.
- Buhani, Suharso, and Partogi, F.A. 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, 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 Sumadi. 2010. Immobilization of *S. duplicatum* supported silica gel matrix and its application on adsorption-desorption of Cu (II), Cd (II), and Pb (II) ions. *Desalination*. 263 (1-3): 64-69.
- Çelekli, A., and Bozkurt, H. 2013. Predictive modeling of an azo metal complex dye sorption by pumpkin husk. *Environmental Science and Pollution Research*. 20(10): 7355–7366.
- Dewi, J.S., Buhani., Rilyanti, M., and Suharso. 2024. Study adsorptionof methylene blue dye by carbon from rubber fruit shell (*Hevea brasiliensis*)

modified by magnetite (Fe_3O_4) coating. *AIP Conference Proceedings*. 2970(1): 060017.

- Dewi, S. H., dan Ridwan, R. 2012. Sintetis dan karakterisasi nanopartikel Fe_3O_4 magnetik untuk adsorpsi kromium heksavalen. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 13(2): 136–140.
- Eltaweil, A. S., Mohamed, H. A., Abd El-Monaem, E. M., and El-Subruiti, G. M. 2020. Mesoporous magnetic biochar composite for enhanced adsorption of malachite green dye: characterization, adsorption kinetics, thermodynamics and isotherms. *Advanced Powder Technology*. 31(3): 1253-1263.
- Fatma, Hariani, P.L., Riyanti, F. and Sepriani, W. 2018. Desorption and re-adsorption of procion red MX-5B dye on alumina activated carbon composite. *Indones. J. Chem.* 18(2): 222-228.
- 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.
- Ghasemi, E., and Kaykhaili M. 2016. Application of micro-cloud point extraction for spectrophotometric determination of malachite green, crystal violet and rhodamine b in aqueous samples. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc.* 16(4): 93-7.
- Ghosh, S., Badruddoza, A. Z. M., Hidajat, K., and Uddin, M. S. 2013. adsorptive removal of emerging contaminants from water using superparamagnetic Fe_3O_4 nanoparticles bearing aminated β -Cyclodextrin. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(3): 122–130.
- Gotić, M., Vujanović, M., Ivanda, M., and Musić, S. 2016. Surface modification of magnetic nanoparticles by silanization. *Materials*. 9(10): 826.
- 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: 522–530.
- Handayani, M., dan Sulistyono, 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 (Na_2CO_3) dan natrium klorida (NaCl). *Jurnal Teknik Kimia USU*. 6(4): 41–44.
- Hayu, L.D.R., Nasra, E., Azhar, M., dan Etika, S. B. 2021. Adsorpsi zat warna methylene blue menggunakan karbon aktif dari kulit durian (*Durio zibethinus* Murr.). *Periodic: Chemistry Journal of Universitas Negeri Padang*. 10(2): 8–13.

- Hermawan, T. 2011. *Industri dan Pencemaran Lingkungan*. Penerbit Ilmu Lingkungan. Jakarta.
- Husin, H. dan C. M. Rosnelly. 2005. Studi kinetika adsorpsi larutan logam timbal (Pb) menggunakan karbon aktif dari batang pisang. *Jurnal Hasil Penelitian Industri*. ISSN: 0215-4609. 1-10.
- Ikhwanuddin. 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). *Skripsi Universitas Sumatera Utara*. 44-48.
- Jamilatun, S., dan Setyawan, M. 2014. Pembuatan arang aktif dari tempurung kelapa dan aplikasinya untuk penjernihan asap cair. *Spektrum Industri*. 12(1): 73-76.
- Jin, P.S., and Kang, S.K. 2011. *Interface Science and Composites*. Academic Press. Amsterdam.
- Kalantary, R. R., Emad, D., Anoushiravan, M. B., Leila, R., Ali, E., Babak, K., and Ali, A. 2015. Nitrate adsorption by synthetic activated carbon magnetic nanoparticles: kinetics, isotherms and thermodynamic studies. *Desalination and Water Treatment*. 57: 1-11.
- Kausar, R. A., Buhani, and Suharso. 2020. Methylene blue adsorption isotherm on *Spirulina* sp. microalgae biomass coated by silica-magnetite. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 857(1): 1–7.
- Khayyam, H., Louise Fox, B., Zabihi, O., Fox, B. L., and Naebe, M. 2015. Enhanced thermal stability and lifetime of epoxy nanocomposites using covalently functionalized clay: Experimental and modelling. *New Journal of Chemistry*. 39(3): 2269.
- Khopkar, S.M. 2001. *Konsep Dasar Kimia Analitik*. UI-Press. Jakarta.
- Lestari, R. 2019. Fungsionalisasi karbon termodifikasi magnetit (Fe_3O_4) menggunakan TEPS. *Tesis*. Universitas Lampung.
- Li, X., Huang, L., Zhang, J., and Chen, J. 2022. Preparation and characterization of APTES-assisted $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CNTs}$ composites with high decontamination and high magnetic recovery capacity. *Surfaces and Interfaces*. 31: 102017.
- Li, Y., Xing, B., Ding, Y., Han, X., dan Wang, S. 2020. A critical review of the production and advanced utilization of biochar via selective pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*. 312: 123614.
- Maulana, F., and Budhi, O. 2022. Optimum conditions of nitrite anion desorption from dimethylamine modified silica gel using HCl and H_2SO_4 . *Journal of Chemistry, Education, and Science*. 6(2):104-112.
- Miri, N. S. S., dan Narimo. 2022. Kajian persamaan isotherm Langmuir dan Freundlich pada adsorpsi logam berat Fe(II) dengan zeolit dan karbon aktif dari biomassa. *Jurnal Kimia dan Rekayasa*. 2(2): 58–71.

- Muhajir, A., Izarul M., dan Mariana. 2021. Produksi karbon aktif arang tempurung kelapa menggunakan kombinasi metode aktivasi secara kimia dan steam tekanan rendah. *Jurnal Riset Industri*. 11(2):110-116.
- Munguía-Cortés, L., Pérez-Hermosillo, I., Ojeda-López, R., Esparza-Schulz, J.M., Felipe-Mendoza, C., Cervantes-Urbe, A., and Domínguez-Ortiz, A. 2017. APTES-functionalization of SBA-15 using ethanol or toluene: textural characterization and sorption performance of carbon dioxide. *Journal of the Mexican Chemical Society*. 61(4): 273–281.
- Nahak, B. M., Pasangka, B., dan Ngara, Z. S. 2023. Sintesis dan karakterisasi karbon nanodots berbasis kulit singkong. *Jurnal Fisika Sains dan Aplikasinya*. 8(2).
- Nasution, Zainal, A., dan Harry, L. 2017. Pembuatan arang cangkang kelapa sawit dengan proses torefaksi. *Jurnal Industri Hasil Perkebunan*. 12(1): 14–20.
- Ngouangna, E.N., Manan, M.A., Oseh, J. O., Norddin, M.N.A. M., Agi, A., and Gbadamosi, A.O. 2020. Influence of (3–Aminopropyl)-triethoxysilane on silica nanoparticle for enhanced oil recovery. *Journal of Molecular Liquids*. 315: 1–47.
- 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.
- Oladoye, P.O., Ajiboye, T.O., Wanyonyi, W.C., Omotola, E.O., and Oladipo, M.E. 2023. Insights into remediation technology for malachite green wastewater treatment. *Water Science and Engineering*. 16(3): 261-270.
- Oxtoby, W. D. 2003. *Kimia Modern Edisi Keempat Jilid 11*. Erlangga. Jakarta.
- Permana, D. 2015. Sintesis dan karakterisasi membran kompleks komposit kitosan-asam fosfotungstat/monmorilonit termodifikasi silan untuk aplikasi DMFC. *Tesis*. Jurusan Kimia. Institut Teknologi Sepuluh November. Surabaya.
- Petcharoen, K. and Sirivat, A. 2012. Synthesis and characterization of magnetite nanoparticles via the chemical co-precipitation method. *Materials Science & Engineering B*. 177(5): 421–427.
- Pi, Z., Li, X., Wang, D., Xu, Q., Tao, Z., Huang, X., Yao, F., Wu, Y., He, L., and Yang, Q. 2019. Persulfate activation by oxidation biochar supported magnetite particles for tetracycline removal: Performance and degradation pathway. *Journal of Cleaner Production*. 235: 1103–1115.
- Prabowo, A.L. 2009. Pembuatan karbon aktif dari tongkol serta aplikasinya untuk adsorpsi Cu, Pb, dan amonia. *Skripsi Universitas Indonesia*. Depok.
- Purbacaraka, F.H, Ratnani, R., dan Hartati, I. 2017. Uji Karakteristik Karbon Aktif Dari Limbah Arang Boiler Dengan Variabel Jenis Kayu Dan Suhu Karbonisasi. *Skripsi Universitas Wahid Hasyim*. Semarang.

- Purwanto, D. 2011. Arang dari limbah kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq). badan penelitian dan pengembangan kehutanan bogor. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 29 (1): 57-66.
- 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: 157–58.
- Rampengan, A. M., dan Mawuntu, V. J. 2022. Fabrikasi arang aktif tempurung kelapa, arang aktif Aleurites moluccana dan karakterisasinya. *Fullerene Journ.Of Chem.* 7(2): 133–136.
- Rudi, N. N., Muhamad, M. S., te Chuan, L., Alipal, J., Omar, S., Hamidon, N., Abdul Hamid, N. H., Mohamed Sunar, N., Ali, R., and Harun, H. 2020. Evolution of adsorption process for manganese removal in water via agricultural waste adsorbents. In *Heliyon*. 6(9).
- Rudolph, M., Erler, J., and Peuker, U. A. 2012. A TGA-FTIR perspective of fatty acid adsorbed on magnetite nanoparticles-Decomposition steps and magnetite reduction. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 397: 16–23.
- Ruslinda, Y., dan Yustisia, D. 2013. analisis timbunan dan komposisi sampah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) rumah tangga di kota padang berdasarkan tingkat pendapatan. *Lingkungan Tropis*. 7(1): 21-30.
- Saleh, T. A., and Gupta, V. K. 2012. Photo-catalyzed degradation of hazardous dye methyl orange by use of a composite catalyst consisting of multi walled carbon nanotubes and titanium dioxide. *Journal of Colloid and Interface Science*. 371(1): 101–106.
- 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. *Atlantis Highlights in Chemistry and Pharmaceutical Sciences*. 2(II): 149–157.
- SNI. 1995. *SNI 06-3730-1995: Arang Aktif Teknis*. Dewan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- 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.
- Widayatno, T., Yuliatwati, T., Susilo, A. A., Studi, P., Kimia, T., Teknik, F., dan Muhammadiyah, U. 2017. Adsorpsi logam berat (Pb) dari limbah cair dengan adsorben arang bambu aktif. *Jurnal Teknologi Bahan Alam*. 1(1), 17–23.
- Wijayanti, I. E. dan Kurniawati, E. A. 2019. Studi kinetika adsorpsi isoterm persamaan langmuir dan freundlich pada abu gosok sebagai adsorben. *Edu Chemia (Jurnal Kimia dan Pendidikan)*. 4(2): 175.

- Wong, K.T., Eu, N.C, Ibrahim S, Kim H, Yoon Y, and Jang M. 2016. Recyclable magnetite loaded palm shell waste based activated carbon for the effective removal of methylene blue from aqueous solution. *J Clean Prod.* 115:337–342.
- 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.
- Yanlinastuti dan Syamsul. 2016. Pengaruh konsentrasi pelarut untuk menentukan kadar zirkonium dalam paduan U-Zr dengan menggunakan metode spektrofotometri Uv-Vis. *Jurnal BATAN.* 9(17): 22.
- Yonel, S. H., Nasra, E., Oktavia, B., dan Etika, S. B. 2021. Optimasi penyerapan zat warna *malachite green* menggunakan karbon aktif dari kulit pisang kepok (*Musa balbisiana Colla*). *Jurnal Kimia Universitas Negeri Padang.* 10(2): 28-32.
- 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: Conference Series.* 1751(1).
- Zulaicha, A.S., Saputra, I.S., Buhani, and Suharso. 2022. Magnetite particle coating to activated carbon of oil palm shells as adsorbent of Cu (II) and Ni (II) cation. *Journal of the Iranian Chemical Society.* 19(12): 4777–47811.
- 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): 65–6.