

**PREPARASI ADSORBEN UNTUK RHODAMIN B DAN METILEN BIRU
DARI KARBON TERMODIFIKASI PARTIKEL MAGNETIT DAN AGEN
SILAN**

(Skripsi)

Oleh

**AMELIA NORMALITA
NPM 2117011037**



**JURUSAN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

PREPARASI ADSORBEN UNTUK RHODAMIN B DAN METILEN BIRU DARI KARBON TERMODIFIKASI PARTIKEL MAGNETIT DAN AGEN SILAN

Oleh

AMELIA NORMALITA

Pada penelitian ini telah dilakukan pembuatan adsorben karbon dari cangkang kelapa sawit yang dimodifikasi oleh partikel magnetit melalui penambahan senyawa $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ untuk menghasilkan karbon aktivasi fisik magnetit (KAF-M) dan dimodifikasi dengan *(3-Aminopropyl)-triethoxysilane* (APTES) untuk menghasilkan karbon aktivasi fisik magnetit silan (KAF-MS) sebagai adsorben rhodamin B (RhB) dan metilen biru (MB). Adsorben dikarakterisasi menggunakan spektrofotometer *Fourier Transform Infra-Red* (FTIR) untuk mengidentifikasi gugus fungsi, *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengidentifikasi fasa kristalin, *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX) untuk mengetahui morfologi permukaan dan mengidentifikasi kadar unsur dalam adsorben, dan *Brunauer-Emmet-Teller* (BET) untuk mengetahui luas permukaan dan ukuran partikel sampel serta untuk mengetahui pola isoterm adsorpsi-desorpsi. Adsorpsi RhB dan MB optimum pada dosis 4 g (RhB) dan 2 g (MB) masing masing adsorben. Adsorpsi RhB dan MB optimum pada pH 10 (KAF-M) dan pH 8 (KAF-MS). Waktu kontak optimum antara adsorben dengan RhB dan MB adalah 60 menit (KAF-M dan KAF-MS) dengan konsentrasi optimum 400 ppm. Kinetika adsorpsi RhB dan MB cenderung mengikuti kinetika pseudo orde dua dan isoterm adsorpsi cenderung mengikuti isoterm Freundlich. Adsorben KAF-M terhadap MB efektif digunakan hingga 5 kali pengulangan dengan persentase adsorpsi di atas 50 % sedangkan adsorben KAF-MS terhadap MB efektif digunakan lebih dari 6 kali pengulangan dengan persentase adsorpsi di atas 85 %.

Kata kunci: Adsorpsi, APTES, cangkang kelapa sawit, karbon, magnetit, metilen biru, dan rhodamin B.

ABSTRACT

ADSORBENT PREPARATION FOR RHODAMINE B AND METHYLENE BLUE FROM MAGNETITE PARTICLE MODIFIED CARBON AND SILANE AGENT

By

AMELIA NORMALITA

In this study, carbon adsorbent was made from palm shells modified by magnetite particles through the addition of $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ compounds to produce magnetite physical activation carbon (KAF-M) and modified with (3-Aminopropyl)-triethoxysilane (APTES) to produce magnetite silane physical activation carbon (KAF-MS) as rhodamine B (RhB) and methylene blue (MB) adsorbents. The adsorbents were characterized using a Fourier Transform Infra-Red (FTIR) spectrophotometer to identify functional groups, X-Ray Diffraction (XRD) to identify crystalline phases, Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX) to determine surface morphology and identify element levels in the adsorbent, and Brunauer-Emmet-Teller (BET) to determine the surface area and particle size of the sample and to determine the adsorption-desorption isotherm pattern. The adsorption of RhB and MB was optimum at a dose of 4 g (RhB) and 2 g (MB) for each adsorbent. The adsorption of RhB and MB was optimum at pH 10 (KAF-M) and pH 8 (KAF-MS). The optimum contact time between the adsorbent and RhB and MB was 60 minutes (KAF-M and KAF-MS) with an optimum concentration of 400 ppm. The adsorption kinetics of RhB and MB tended to follow pseudo second-order kinetics and the adsorption isotherm tended to follow the Freundlich isotherm. The KAF-M adsorbent against MB was effectively used up to 5 repetitions with an adsorption percentage above 50 % while the KAF-MS adsorbent against MB was effectively used more than 6 repetitions with an adsorption percentage above 85 %.

Keywords: Adsorption, APTES, palm shells, carbon, magnetite, methylene blue, and rhodamine B.

**PREPARASI ADSORBEN UNTUK RHODAMIN B DAN METILEN BIRU
DARI KARBON TERMODIFIKASI PARTIKEL MAGNETIT DAN AGEN
SILAN**

Oleh

AMELIA NORMALITA

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

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



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

Judul Penelitian

: **PREPARASI ADSORBEN UNTUK
RHODAMIN B DAN METILEN BIRU DARI
KARBON TERMODIFIKASI PARTIKEL
MAGNETIT DAN AGEN SILAN**

Nama

: **Amelia Normalita**

Nomor Pokok Mahasiswa

: **2117011037**

Jurusan

: **Kimia**

Fakultas

: **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

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

Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si.
NIP. 197005302000032001

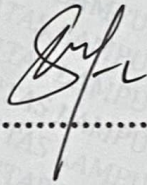
2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA

Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si.
NIP. 197108062000032000

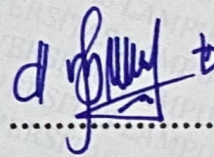
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

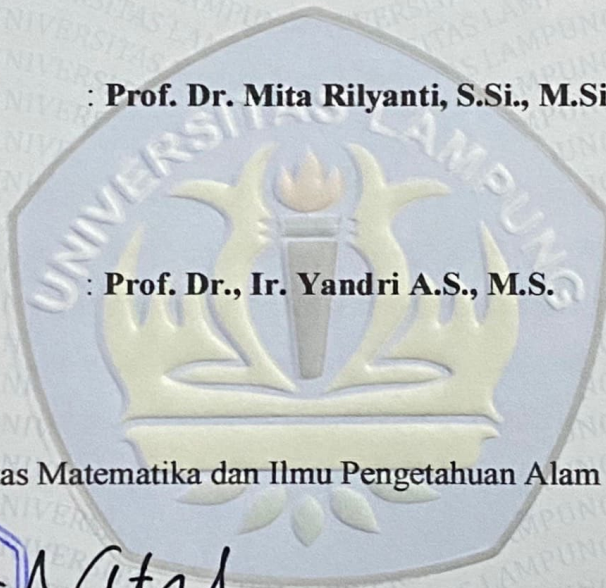
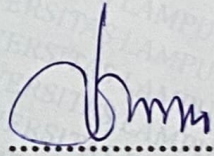
Ketua : **Prof. Dr. Buhani, M.Si.**



Sekretaris : **Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si.**



Anggota : **Prof. Dr., Ir. Yandri A.S., M.S.**



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: **21 Juli 2025**

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Amelia Normalita
NPM : 2117011037
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Dengan ini menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya yang berjudul **“Preparasi Adsorben untuk Rhodamin B dan Metilen Biru dari Karbon Termodifikasi Partikel Magnetit dan Agen Silan”** adalah benar karya saya sendiri dan saya tidak keberatan jika sebagian atau seluruh data dalam skripsi tersebut digunakan oleh dosen atau program studi untuk kepentingan publikasi sesuai dengan kesepakatan.

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

Bandar Lampung, 25 Juli 2025
Yang Menyatakan,



Amelia Normalita
NPM. 2117011037

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Tanggamus pada tanggal 10 Juni 2003 sebagai anak kedua dari Bapak Ahsan Fahmi dan Ibu Legini. Penulis memulai pendidikan formal di Taman Kanak-Kanak TK Bestari Al-Islami diselesaikan pada tahun 2009. Sekolah Dasar di SD Negeri 1 Pardawaras diselesaikan pada tahun 2015, Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 1 Semaka diselesaikan pada tahun 2018, dan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Kotaagung jurusan Ilmu Pengetahuan Alam diselesaikan pada tahun 2021. Pada tahun 2021, penulis terdaftar sebagai mahasiswa jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN.

Penulis pernah menjadi anggota aktif bidang Sains dan Penalaran Ilmu Kimia (SPIK) Himpunan Mahasiswa Kimia (Himaki) periode 2022/2023. Penulis juga pernah menjadi bendahara *Chemistry English Club* (CEC) pada tahun 2023 dan menjadi ketua *Chemistry English Club* (CEC) pada tahun 2024. Penulis pernah menjadi asisten praktikum Kimia Anorganik I dan Kimia Anorganik II pada tahun 2024. Penulis telah melaksanakan praktik kerja lapangan (PKL) di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung pada tahun 2024 dan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Rejomulyo, Lampung Selatan pada tahun 2024. Pada tahun 2025, penulis menyelesaikan penelitiannya di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung dengan judul “Preparasi Adsorben untuk Rhodamin B dan Metilen Biru dari Karbon Termodifikasi Partikel Magnetit dan Agen Silan”.

MOTTO

“ Dalam hidup, tidak ada belajar yang sia-sia ”

“ Tidak mungkin bagi matahari mengejar bulan dan malam pun tidak mampu mendahului siang, masing-masing beredar pada garis edarnya ”
(QS. Yasin: 40)

“ Sesungguhnya apapun yang dijanjikan kepadamu pasti datang dan kamu tidak mampu menolaknya ”
(QS. Al-An'am: 134)

“ Ketahuilah bahwasannya kemenangan itu bersama kesabaran, dan jalan keluar itu bersama kesulitan, dan bahwasannya bersama kesulitan ada kemudahan ”
(Hr. Tarmidzi)

PERSEMBAHAN



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

Dengan penuh rasa syukur, kupersembahkan karya ini dengan segala kerendahan hati, sebagai wujud bakti, cinta dan ucapan terima kasihku kepada:

Orang tuaku, Ayah Ahsan Fahmi dan Ibu Legini yang telah merawat, menyayangi, dan mendidikku. Terima kasih untuk cinta yang tiada batas dan do'a yang senantiasa dilangitkan pada setiap langkahku.

Kedua Saudaraku, Agung Kurniawan dan Aviv Tri Aditya tersayang.

Ibu Prof. Dr. Buhani, M.Si., Ibu Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si., Bapak Prof. Dr., Ir. Yandri A.S., MS., serta seluruh Bapak dan Ibu dosen Jurusan Kimia.

Terima kasih telah membimbing, menasehati, serta memberikan ilmu-ilmunya selama menempuh pendidikan di Jurusan Kimia FMIPA Unila. Semoga Allah Subhanahu Wa Ta'ala membalas segala kebaikan yang telah diberikan.

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

SANWACANA

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

“ Preparasi Adsorben untuk Rhodamin B dan Metilen Biru dari Karbon Termodifikasi Partikel Magnetit dan Agen Silan ”

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

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

1. Ayah Ahsan Fahmi tercinta dan Ibu Legini tersayang atas segala yang penulis dapatkan selama menjalani kehidupan. Kepada Ayah, terima kasih atas segala bentuk cinta dan kasih sayang yang tidak terucap melalui kata-kata namun senantiasa penulis rasakan adanya. Dunia penulis akan runtuh tanpa Ayah didalamnya. Kepada Ibu, terima kasih atas dukungan dan kepercayaan untuk penulis dalam menjalani kehidupan dengan baik.
2. Abang Agung Kurniawan dan Adik Aviv Tri Aditya yang telah menemani, mendoakan, mendukung, dan menjadi penyemangat penulis selama menjalani perkuliahan.
3. Ibu Prof. Dr. Buhani, M.Si., selaku dosen pembimbing satu yang senantiasa membimbing, menasehati, dan meluangkan waktu dalam penyusunan

skripsi sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

4. Ibu Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si., selaku dosen pembimbing dua yang telah membantu memberikan masukan, arahan, dan koreksi dalam penyusunan skripsi ini.
5. Bapak Prof. Dr., Ir. Yandri A.S., M.S., selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik membangun yang sangat berharga dalam penyempurnaan skripsi ini.
6. Ibu Prof. Dr. Buhani, M.Si., selaku dosen pembimbing akademik yang telah membimbing dan mendampingi penulis selama masa studi.
7. Ibu Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si., selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung.
8. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
9. Bapak dan Ibu dosen Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung yang telah memberikan nasihat dan ilmu yang sangat bermanfaat selama masa studi.
10. Mba Liza Apriliya, S.Si. selaku laboran Lab. Kimia Anorganik/Fisik yang telah mendampingi dan mendukung selama masa penelitian.
11. Teman seperjuangan penelitian Adsorpsi 21, Aisyah Tirta Asri, S.Si., Dinda Aprillia Defi, S.Si., Mayang Aprilian Suri, S.Si., dan Tiara Zalfa Nur'alifah, S.Si. yang senantiasa membantu dan menjadi tempat berdiskusi selama penulis melaksanakan penelitian.
12. Sahabat +7 Sefty Yustisia S., S.Si., Sabina Clarissa L.N., S.Si., Azzahra Sandra S., S.Si., Rahmadina Pratiwi, S.Si., Yesha Pramudita, S.Si., dan Alysha Mutiara S., S.Si. yang senantiasa hadir dalam suka maupun duka perkuliahan penulis, hadirnya kalian membuat kehidupan perkuliahan penulis lebih berwarna.
13. Teman pertama penulis di perkuliahan Adelia Feby Tamara, S.Si. dan teman info loker Riska Setya Dharmayanti, S.Si., terima kasih atas segala bantuan dan dukungan kepada penulis.
14. Teman-teman SMA di grup Psikocak yaitu Selvia Marani, Chintia Dwi T, Lulu Zaqia, dan Jaya Rama S, terima kasih untuk tetap memilih bersama meski tidak berada di bidang yang sama lagi.

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

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

Bandar Lampung, 25 Juli 2025

Penulis,

Amelia Normalita

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR.....	viii
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	4
1.3. Manfaat Penelitian	4
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Cangkang Kelapa Sawit.....	5
2.2. Karbon Aktif	7
2.3. Karbonisasi	9
2.4. Magnetit	10
2.5. Silanisasi	11
2.6. Adsorpsi	13
2.7. Kinetika Adsorpsi	15
2.8. Isoterm Adsorpsi.....	16
2.8.1. Isoterm Langmuir.....	16
2.8.2. Isoterm Freundlich	17
2.9. Desorpsi	19
2.10. Zat warna	20
2.10.1. Rhodamin B (RhB)	21
2.10.2. Metilen Biru	22
2.11. Analisis Proksimat	22
2.11.1. Penentuan Kadar Air	22
2.11.2. Penentuan Kadar Zat Menguap.....	23
2.11.3. Penentuan Kadar Abu	23
2.11.4. Penentuan Karbon Terikat.....	24
2.11.5. Penentuan Angka Iodin.....	24
2.12. Penentuan pH <i>Point Zero Charge</i> (pH PZC).....	25
2.13. Karakterisasi	25
2.13.1. Spektrofotometer UV-Vis	25
2.13.2. FTIR	26
2.13.3. XRD	28
2.13.4. SEM-EDX	29

2.13.5. BET	30
III. METODE PENELITIAN.....	31
3.1. Waktu dan Tempat	31
3.2. Alat dan Bahan.....	31
3.3. Prosedur Penelitian	32
3.3.1. Preparasi dan Pembuatan Karbon	32
3.3.2. Pembuatan Karbon Aktivasi Fisik-Magnetit (KAF-M)	32
3.3.3. Pembuatan Karbon Aktivasi Fisik Magnetit-Silan (KAF-MS)...	33
3.3.4. Analisis Proksimat	33
3.3.5. Penentuan pH <i>Point Zero Charge</i> (pHpzc).....	34
3.3.6. Karakterisasi.....	35
3.3.7. Preparasi Adsorbat	35
3.3.8. Uji Adsorpsi	35
3.3.9. Desorpsi	37
3.3.10. Uji Penggunaan Ulang Adsorben.....	37
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	39
4.1. Preparasi dan Aktivasi Karbon dari Cangkang Kelapa Sawit	39
4.2. Hasil Modifikasi Karbon dengan Magnetit dan (3-Aminopropyl) Triethoxysilane (APTES).....	40
4.3. Analisis Proksimat	41
4.4. Karakterisasi	42
4.4.1. Analisis FTIR	42
4.4.2. Analisis XRD	44
4.4.3. Analisis SEM-EDX.....	45
4.4.4. Analisis BET	47
4.5. pHpzc Adsorben Karbon.....	49
4.6. Dosis Optimum Karbon Termodifikasi	50
4.7. Pengaruh pH.....	51
4.8. Waktu Kontak Adsorpsi.....	53
4.9. Penentuan Konsentrasi Optimum	55
4.10. Desorpsi	58
4.11. Penggunaan Ulang Adsorben.....	59
V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	61
5.1. Kesimpulan	61
5.2. Saran	62
DAFTAR PUSTAKA	63
LAMPIRAN.....	70

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Karakteristik Cangkang Kelapa Sawit Mentah dan Arang yang Dihasilkan	6
2. Standar Kualitas Karbon Aktif Sesuai dengan SNI 06-3730-1995.....	9
3. Gugus Fungsi dengan Bilangan Gelombangnya	27
4. Analisis Proksimat Karbon	41
5. Parameter Fisik Permukaan Adsorben	48
6. Parameter kinetika adsorpsi KAF-M dan KAF-MS terhadap RhB dan MB	55
7. Parameter isoterm adsorpsi KAF-M dan KAF-MS terhadap RhB dan MB	58
8. Data pH _{pzc} Adsorben KTA, KAF, KAF-M, dan KAF-MS	71
9. Data absorbansi RhB dan MB untuk Variasi Dosis dan pH Optimum.....	75
10. Adsorpsi RhB dan MB pada adsorben KAF-M variasi dosis optimum.....	76
11. Adsorpsi RhB dan MB pada adsorben KAF-MS variasi dosis optimum	76
12. Adsorpsi RhB dan MB pada adsorben KAF-M variasi pH optimum	77
13. Adsorpsi RhB dan MB pada adsorben KAF-MS variasi pH optimum.....	77
14. Data absorbansi larutan zat warna RhB dan MB untuk Variasi Waktu	78
15. Adsorpsi RhB dan MB pada adsorben KAF-M variasi waktu.....	79
16. Adsorpsi RhB dan MB pada adsorben KAF-MS variasi waktu	79
17. Data perhitungan kinetika pseudo orde satu pada KAF-M terhadap RhB.....	80
18. Data perhitungan kinetika pseudo orde satu pada KAF-M terhadap MB.....	80
19. Data perhitungan kinetika pseudo orde satu pada KAF-MS terhadap RhB....	82
20. Data perhitungan kinetika pseudo orde satu pada KAF-MS terhadap MB.....	82
21. Data perhitungan kinetika pseudo orde dua pada KAF-M terhadap RhB	83
22. Data perhitungan kinetika pseudo orde dua pada KAF-M terhadap MB.....	83
23. Data perhitungan kinetika pseudo orde dua pada KAF-MS terhadap RhB	85
24. Data perhitungan kinetika pseudo orde dua pada KAF-MS terhadap MB	85

25. Data absorbansi larutan zat warna RhB dan MB untuk Variasi Konsentrasi .	87
26. Adsorpsi zat warna RhB pada adsorben dengan variasi konsentrasi	88
27. Adsorpsi zat warna MB pada adsorben dengan variasi konsentrasi	88
28. Perhitungan persamaan Langmuir adsorpsi RhB terhadap KAF-M	89
29. Perhitungan persamaan Langmuir adsorpsi MB terhadap KAF-M	89
30. Perhitungan persamaan Langmuir adsorpsi RhB terhadap KAF-MS	90
31. Perhitungan persamaan Langmuir adsorpsi MB terhadap KAF-MS	91
32. Perhitungan persamaan Freundlich pada adsorpsi RhB terhadap KAF-M	92
33. Perhitungan persamaan Freundlich pada adsorpsi MB terhadap KAF-M	92
34. Perhitungan persamaan Freundlich pada adsorpsi RhB terhadap KAF-MS	93
35. Perhitungan persamaan Freundlich pada adsorpsi MB terhadap KAF-MS	93
36. Data absorbansi larutan standar desorpsi	95
37. Data perhitungan jumlah MB yang terdesorpsi pada adsorben KAF-M	95
38. Data perhitungan jumlah MB yang terdesorpsi pada adsorben KAF-MS	96
39. Data absorbansi larutan standar untuk uji penggunaan ulang	98
40. Jumlah MB yang teradsorpsi oleh KAF-M pada uji penggunaan ulang	98
41. Jumlah MB yang teradsorpsi oleh KAF-MS pada uji penggunaan ulang	100

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Cangkang kelapa sawit.....	6
2. Pori-pori dan struktur partikel karbon aktif	7
3. Struktur senyawa silan	12
4. Ilustrasi skematik modifikasi permukaan karbon aktif oleh senyawa APTES ..	12
5. Struktur kimia RhB	21
6. Struktur kimia MB	22
7. Diagram alir penelitian.....	38
8. Hasil preparasi karbon (a) hasil karbonisasi, (b) KTA, dan (c) KAF	39
9. (a) KAF-M dan (b) KAF-MS	40
10. Spektrum FTIR dari adsorben (a)KTA (b)KAF (c)KAF-M dan (d)KAF-MS.	43
11. Difraktogram XRD adsorben (a)KTA (b)KAF (c)KAF-M dan (d)KAF-MS..	44
12. SEM perbesaran 3000x (a) KTA, (b) KAF, (c) KAF-M, dan (d) KAF-MS	45
13. Hasil EDX adsorben (a) KTA, (b) KAF, (c) KAF-M, dan (d) KAF-MS	46
14. Isoterm Adsorpsi/Desorpsi N ₂	48
15. Kurva pH PZC adsorben KTA, KAF, KAF-M, dan KAF-MS	49
16. Kurva pengaruh dosis adsorben pada adsorpsi (a) RhB dan (b) MB	50
17. Kurva pengaruh pH pada adsorpsi (a) RhB dan (b) MB.....	52
18. Kurva pengaruh waktu kontak pada adsorpsi (a) RhB dan (b) MB	53
19. Kinetika pseudo orde satu oleh KAF-M dan KAF-MS terhadap RhB dan MB	54
20. Kinetika pseudo orde dua oleh KAF-M dan KAF-MS terhadap RhB dan MB	54
21. Kurva pengaruh konsentrasi pada adsorpsi (a) RhB dan (b) MB	56
22. Pola isoterm Langmuir KAF-M dan KAF-MS terhadap RhB dan MB	57
23. Pola isoterm Freundlich KAF-M dan KAF-MS terhadap RhB dan MB	57
24. Grafik hasil desorpsi zat warna MB terhadap KAF-M dan KAF-MS	59

25. Grafik hasil penggunaan ulang adsorpsi MB oleh KAF-M dan KAF-MS	60
26. Penentuan panjang gelombang maksimum pada (a) RhB dan (b) MB	74
27. Kurva standar (a) RhB dan (b) MB variasi dosis dan pH optimum	75
28. Kurva standar zat warna (a) RhB dan (b) MB untuk variasi waktu	78
29. Pola kinetika pseudo orde satu pada KAF-M terhadap RhB dan MB	81
30. Pola kinetika pseudo orde satu pada KAF-MS terhadap RhB dan MB	82
31. Pola kinetika pseudo orde dua pada KAF-M terhadap RhB dan MB	84
32. Pola kinetika pseudo orde dua pada KAF-MS terhadap RhB dan MB	85
33. Kurva standar zat warna (a) RhB dan (b) MB untuk variasi konsentrasi	87
34. Pola isoterm adsorpsi Langmuir pada KAF-M terhadap RhB dan MB	90
35. Pola isoterm adsorpsi Langmuir pada KAF-MS terhadap RhB dan MB	91
36. Pola isoterm adsorpsi Freundlich pada KAF-M terhadap RhB dan MB	92
37. Pola isoterm adsorpsi Freundlich pada KAF-MS terhadap RhB dan MB	94
38. Kurva larutan standar MB untuk desorpsi	95
39. Kurva larutan standar MB untuk uji penggunaan ulang	98
40. Penentuan pH _{pzc} (a) KTA (b) KAF (c) KAF-M dan (d) KAF-MS.	103
41. Analisis kadar air (a) KTA dan (b) KAF	104
42. Analisis kadar zat menguap (a) KTA dan (b) KAF	104
43. Analisis kadar abu (a) KTA dan (b) KAF	104
44. Analisis daya serap iodine (a) KTA dan (b) KAF	104
45. Adsorpsi RhB variasi dosis terhadap (a) KAF-M dan (b) KAF-MS	105
46. Adsorpsi MB variasi dosis terhadap (a) KAF-M dan (b) KAF-MS	105
47. Adsorpsi RhB variasi pH terhadap (a) KAF-M dan (b) KAF-MS	105
48. Adsorpsi MB variasi pH terhadap (a) KAF-M dan (b) KAF-MS	105
49. Adsorpsi RhB variasi waktu terhadap (a) KAF-M dan (b) KAF-MS	105
50. Adsorpsi MB variasi waktu terhadap (a) KAF-M dan (b) KAF-MS	106
51. Adsorpsi RhB variasi konsentrasi terhadap (a) KAF-M dan (b) KAF-MS ...	106
52. Adsorpsi MB variasi konsentrasi terhadap (a) KAF-M dan (b) KAF-MS	106
53. Desorpsi MB terhadap adsorben (a) KAF-M dan (b) KAF-MS	106
54. Uji penggunaan ulang MB terhadap (a) KAF-M dan (b) KAF-MS	106

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Saat ini salah satu permasalahan lingkungan adalah pencemaran perairan oleh limbah industri (Zulaicha *et al.*, 2021) salah satunya industri tekstil yang menghasilkan limbah berupa zat pewarna tekstil. Zat pewarna dalam industri tekstil dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori, yaitu pewarna kationik, anionik, dan non-ionik. Pewarna yang cukup banyak digunakan dalam industri tekstil adalah pewarna kationik seperti rhodamin B (RhB) dan metilen biru (MB). Selain itu, pewarna kationik termasuk yang paling berbahaya dibandingkan pewarna lain (Fajriyah *et al.*, 2023). Bahkan pada konsentrasi yang sangat rendah, keberadaan pewarna dalam air dapat menghambat penetrasi cahaya ke permukaan air sehingga dapat mengganggu fotosintesis tanaman air. Selain itu, banyak dari pewarna tekstil memiliki sifat karsinogenik, mutagenik, teratogenik, dan toksik sehingga menimbulkan resiko bagi manusia, ikan, dan mikroorganisme (Abdel-Ghani *et al.*, 2017). Banyaknya zat pencemar yang berasal dari berbagai bidang kehidupan dapat menjadi salah satu penyebab terbesar terjadinya pencemaran (Buhani *et al.*, 2015). Meskipun industri sendiri merupakan salah satu bidang yang berperan penting dalam mendukung perekonomian di Indonesia, namun perkembangan industri dapat memberikan dampak negatif berupa pencemaran sumber daya air melalui penggunaan senyawa anorganik dan organik sintetik untuk berbagai keperluan (Buhani *et al.*, 2018).

Oleh karena itu, diperlukan suatu metode yang tepat dan efektif untuk mengatasi permasalahan tersebut. Beberapa metode yang dapat digunakan untuk memurnikan air dari kontaminasi diantaranya metode elektrokoagulasi, adsorpsi, presipitasi, filtrasi membran, penukar ion, dan osmosis balik (Saef dkk., 2022).

Adsorpsi menjadi salah satu teknik pengolahan air yang banyak digunakan dalam beberapa tahun belakangan karena berbagai keunggulannya dibandingkan dengan metode lain seperti prosesnya yang lebih sederhana, biaya relatif murah, ramah lingkungan, tidak menimbulkan efek samping zat beracun, serta adsorbennya yang dapat digunakan kembali (Buhani *et al.*, 2015). Adsorben pada metode adsorpsi dapat berupa alga, asam humat, karbon aktif, selulosa, dan sebagainya. Karbon aktif menjadi adsorben yang paling banyak digunakan di antara berbagai jenis adsorben dalam aplikasi lingkungan, karena tingginya kapasitas adsorpsi dari karbon aktif berhubungan dengan sifat-sifat seperti luas permukaan, volume pori, dan distribusi ukuran pori. Karbon aktif memiliki sifat unik seperti struktur mikropori yang baik, luas permukaan yang besar, tingkat reaktivitas permukaan dan kapasitas adsorpsi yang tinggi, sehingga menjadikannya efektif sebagai adsorben. Selain itu, pemanfaatan karbon aktif sebagai adsorben dilakukan dengan mempertimbangkan kebijakan penerapan konsep zero waste yaitu memanfaatkan limbah agro industri untuk mengurangi limbah industri lainnya seperti bahan kimia beracun (Buhani *et al.*, 2018). Produksi karbon aktif dari produk sampingan pertanian mempunyai potensi dampak ekonomi dan lingkungan seperti mengubah limbah pertanian yang tidak diinginkan dan bernilai rendah menjadi adsorben bernilai tinggi yang bermanfaat, serta memiliki kapasitas adsorpsinya yang tinggi dan biayanya yang rendah jika dibandingkan dengan karbon aktif komersial.

Cangkang kelapa sawit merupakan bahan yang baik untuk pembuatan karbon aktif berkualitas tinggi karena kandungannya yang tinggi kepadatan, mengandung karbon yang relatif tinggi, kadar abu rendah, luas permukaan tinggi, lebih berkelanjutan, porositas sangat berkembang dan harganya. Cangkang kelapa sawit mengandung karbon yang cukup tinggi, yaitu sekitar 50,01 % sehingga dapat digunakan sebagai bahan untuk menghasilkan karbon aktif (Ulfah *et al.*, 2016). Di sisi lain, cangkang kelapa sawit merupakan salah satu limbah industri pabrik kelapa sawit yang apabila tidak dimanfaatkan dengan baik dapat berpotensi menjadi limbah sehingga cocok untuk dijadikan adsorben.

Namun demikian, karbon aktif mempunyai keterbatasan dalam pemisahan produk samping yang tersisa dan regenerasi untuk digunakan kembali (Buhani *et al.*, 2019). Oleh karena itu, peningkatan kualitas karbon aktif dapat dilakukan dengan memberikan karakteristik magnetik melalui teknik pelapisan dengan partikel Fe_3O_4 . Teknik pelapisan dengan Fe_3O_4 akan menghasilkan karbon aktif yang stabil pada kondisi asam (Li *et al.*, 2015). Selain itu pada suhu ruangan terdapat sifat magnetik pada karbon aktif yang dapat memisahkan adsorbat dengan cepat (Wong *et al.*, 2016). Penggunaan partikel magnetit untuk bahan pelapis merupakan teknik yang ramah lingkungan karena tidak menghasilkan produk kontaminasi berupa padatan tersuspensi, selain itu mempercepat proses isolasi polutan dalam larutan karena adsorben bersifat magnetis. Adsorben yang dimodifikasi dengan lapisan magnetik dapat diisolasi dari sistem larutan dengan menggunakan magnet eksternal (Duman *et al.*, 2019).

Namun, pelapisan karbon aktif oleh partikel magnetit juga memiliki keterbatasan seperti kemungkinan pori yang terblokir 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 , sehingga dilakukan modifikasi lebih lanjut dengan menggunakan senyawa organosilan (*3-Aminopropyl triethoxysilane* (APTES) untuk mengatasi hal tersebut. Senyawa organosilan memiliki dua gugus aktif yang berbeda sehingga dapat menjadi penggandeng untuk membentuk ikatan kimia antara material organik dan anorganik (Huang and Hu, 2008). Dengan demikian, dilakukanlah modifikasi karbon aktif dari cangkang kelapa sawit melalui proses karbonisasi dengan magnetit dan APTES sebagai adsorben zat warna RhB dan MB. Selanjutnya dilakukan karakterisasi pada karbon aktif termodifikasi.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menghasilkan adsorben karbon dari cangkang kelapa sawit melalui proses karbonisasi yang dimodifikasi magnetit dan APTES, dan karakterisasi karbon hasil modifikasi.
2. Menentukan dosis, pH, waktu kontak, dan konsentrasi optimum zat warna RhB dan MB terhadap adsorben karbon dari cangkang kelapa sawit termodifikasi.
3. Menentukan model kinetika dan isoterm adsorpsi zat warna RhB dan MB oleh adsorben karbon dari cangkang kelapa sawit termodifikasi.
4. Mempelajari kemampuan desorpsi dan penggunaan ulang adsorben karbon dari cangkang kelapa sawit termodifikasi terhadap adsorpsi zat warna RhB dan MB.

1.3. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian ini adalah untuk memberikan informasi mengenai karbon aktif dari cangkang kelapa sawit melalui proses karbonisasi yang dilapisi dengan magnetit dan APTES, karakterisasinya, kemampuan adsorpsi, desorpsi, dan penggunaan ulang terhadap zat warna RhB dan MB.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Cangkang Kelapa Sawit

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis*) merupakan sumber utama minyak nabati yang minyaknya diekstraksi dari buahnya (Sethupathi *et al.*, 2015). Malaysia, Indonesia, Thailand, dan negara-negara di Afrika seperti Nigeria, Kamerun dan beberapa provinsi di Tiongkok Selatan merupakan produsen minyak sawit terbesar di dunia. Berdasarkan data dari (Badan Pusat Statistik, 2024), tanaman kelapa sawit di Indonesia pada tahun 2021 yaitu seluas 8.574,9 ha dan mengalami peningkatan pada tahun 2023 menjadi 9.144,7 ha. Pabrik kelapa sawit menghasilkan 75 % limbah padat dan cair pada pengolahannya, limbah padat tersebut berupa tandan kosong, cangkang, dan serat, sementara limbah cair yang dihasilkan berupa lumpur dan *sludge*. Hal ini menjadikan adanya peluang limbah industri kelapa sawit untuk dimanfaatkan menjadi produk yang bernilai ekonomis dibandingkan dengan menjadikannya sebagai limbah. Menurut (Nicholas *et al.*, 2018), cangkang kelapa sawit merupakan sumber bahan berkelanjutan yang termasuk dalam sektor ekonomi dan mempunyai pengaruh terhadap emisi gas rumah kaca dan perubahan iklim. Biomassa cangkang kelapa sawit merupakan limbah padat pertanian yang memiliki komposisi karbon 49,75 %, oksigen 44,86 %, hidrogen 5,32 %, nitrogen 0,08 %, dan belerang 0,16 %.

Cangkang kelapa sawit merupakan salah satu limbah yang dihasilkan langsung dari proses produksi minyak dengan limbah yang dihasilkan mencapai 60 %. Kandungan dari cangkang kelapa sawit dapat diolah menjadi produk dengan nilai ekonomi tinggi yaitu sebagai karbon aktif (Zulaicha *et al.*, 2021), gugus fungsi dari permukaan cangkang kelapa sawit adalah gugus karbonil (seperti keton dan

kuinon), eter dan fenol, yang setelah dilakukan proses karbonisasi akan memiliki gugus fungsi permukaan keton, kuinon, dan cincin aromatik (Onoja *et al.*, 2018). Cangkang kelapa sawit dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Cangkang kelapa sawit (Harmiansyah dkk., 2023).

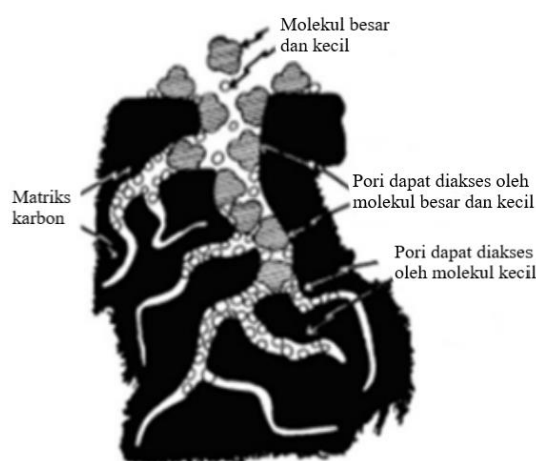
Berbagai keunggulan dari cangkang kelapa sawit membuat limbah pertanian ini menjadi pilihan yang tepat untuk dijaikan sebagai bahan pembuatan adsorben karbon aktif. Cangkang sawit memiliki kandungan karbon yang tinggi, kepadatan tinggi dan kadar abu rendah sehingga baik untuk dimanfaatkan sebagai adsorben. Cangkang kelapa sawit mentah dapat dijadikan karbon aktif melalui proses karbonisasi. Seperti yang diilustrasikan pada Tabel 1, cangkang sawit memiliki kandungan yang baik untuk dijadikan sebagai adsorben.

Tabel 1. Karakteristik Cangkang Kelapa Sawit Mentah dan Arang yang Dihasilkan (Sethupathi *et al.*, 2015)

Karakteristik	Cangkang Sawit Mentah	Arang Cangkang Sawit
Komposisi kimia (%)		
Selulosa	29,7	
Lignin	53,4	-
Hemiselulosa/haloselulosa	47,7	
Densitas (g cm^{-3})		
Densitas padat	1,53	1,63
Densitas semu	1,47	1,35
Analisis proksimat (%)		
Zat terbang	77,6	30,6
Karbon terikat	19,8	63,4
Abu	2,6	6,0
Luas permukaan (m^2g^{-1})		
BET	1,6	176
Mikropori	0,2	108

2.2. Karbon Aktif

Karbon aktif merupakan karbon yang diolah secara khusus untuk menghasilkan luas permukaan yang besar, yaitu antara 9300-2000 m²/g (Tejawati dkk., 2017). Karbon aktif merupakan istilah yang digunakan untuk menyatakan bahan kaya karbon yang memiliki struktur pori yang baik, luas permukaan yang tinggi, pori-pori makro, meso, dan mikro yang terorganisir dengan baik, dengan beragam gugus fungsi kimia yang ada pada permukaan karbon aktif sehingga menjadikannya bahan serbaguna yang memiliki banyak kegunaan. Karbon aktif telah diakui secara global sebagai adsorben yang paling banyak digunakan dalam industri pengolahan air. Selain itu, karbon aktif telah digunakan sebagai adsorben serbaguna terhadap berbagai macam polutan yang larut dalam air dan berbentuk gas. Penggunaannya yang luas sebagai adsorben meliputi penghilangan rasa, bau, warna, dan lain-lain yang tidak diinginkan. Polutan anorganik dan organik lainnya dari industri seperti air limbah, pemulihan pelarut, dan pengendalian polusi udara dari pemukiman. Karbon aktif juga banyak digunakan di bidang industri farmasi seperti penghilangan warna dari sirup, untuk menghilangkan racun yang tertelan dari tubuh manusia, untuk infeksi bakteri pada penyakit tertentu, untuk pemulihan emas, perak, dan logam lainnya di industri hidrometalurgi, dan sebagai katalis serta pendukung katalis. Pori-pori karbon aktif dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Pori-pori dan struktur partikel karbon aktif (Ghani *et al.*, 2015).

Terdapat dua metode yang digunakan untuk menghasilkan karbon aktif, yaitu metode satu langkah dan dua langkah. Metode satu langkah yaitu bahan baku dapat langsung diubah menjadi karbon aktif melalui reaksi karbonisasi dan aktivasi secara bersamaan. Metode dua langkah yaitu bahan baku perlu mengalami karbonisasi untuk menghasilkan arang sebagai langkah pertama, lalu dilanjutkan dengan aktivasi sebagai langkah kedua untuk membentuk karbon aktif, dan metode yang banyak dilakukan adalah metode dua langkah (Liew *et al.*, 2018). Aktivasi karbon aktif dapat dibagi menjadi dua, yaitu aktivasi fisik dan aktivasi kimia. Untuk aktivasi fisik, uap atau CO_2 digunakan sebagai agen pengaktif dalam proses aktivasi. Aktivasi kimia banyak digunakan pada awal era produksi karbon aktif, namun belakangan ini metode fisik dan fisikokimia lebih disukai untuk produksi karbon aktif, khususnya dari limbah padat kelapa sawit. Selain itu, terkadang kedua proses aktivasi tersebut terlibat dalam pembuatan karbon aktif (Abdel-Ghani *et al.*, 2017).

Proses aktivasi selanjutnya akan mengembangkan porositas bahan berkarbonisasi dengan menciptakan beberapa tatanan struktur pori. Pori-pori ini dapat diklasifikasikan menurut Persatuan Internasional Kimia Murni dan Terapan (IUPAC) diantaranya mikropori (lebar, $d < 2 \text{ nm}$) dan mesopori ($2 \text{ nm} < d < 50 \text{ nm}$), dan makropori ($d > 50 \text{ nm}$). Besar kecilnya pori-pori akan berpengaruh pada porositas dan luas permukaan karbon aktif dalam proses adsorpsi (Wafti *et al.*, 2017). Permukaan karbon aktif dapat digunakan untuk mengakumulasi kontaminan karena mengandung kelompok senyawa terprotonasi ($\text{C}-\text{OH}_2^+$), netral (COH), atau terionisasi (CO^-) (Nicholas *et al.*, 2018). Dengan luas permukaan yang lebih besar, karbon aktif bubuk memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih baik dibandingkan karbon aktif granular sehingga umumnya karbon aktif dimodifikasi untuk meningkatkan kinerjanya dalam berbagai aplikasi. Kapasitas adsorpsi karbon aktif dapat ditingkatkan dengan memodifikasi permukaannya menggunakan oksida logam (Fatma *et al.*, 2018).

Dengan pori-pori karbon aktif yang baik dan luas permukaan spesifik yang tinggi, menjadikan karbon aktif sebagai adsorben memiliki daya adsorpsi yang baik, dikarenakan derajat adsorpsi mikropolutan bergantung pada jenis karbon aktif

(porositas, permukaan, fungsi permukaan kelompok, dan lain lain), karakteristik mikropolutan (molekuler struktur, ukuran, hidrofobisitas, dan lain lain), serta waktu kontak. Berdasarkan SNI 06-3730-1995 tentang Standar Kualitas Karbon Aktif, karbon aktif dikatakan baik apabila memenuhi persyaratan seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Standar Kualitas Karbon Aktif Sesuai dengan SNI 06-3730-1995 (Sirajudin dkk., 2020)

Karakteristik	SNI 06-3730-1995
Kadar Air	Maks 15 %
Kadar zat menguap	Maks 25 %
Kadar abu	Maks 10 %
Kadar Karbon Terikat	Min 65 %
Daya serap terhadap Iodin	Min 750 mg/g

2.3. Karbonisasi

Proses karbonisasi telah banyak digunakan untuk mengolah berbagai bahan padat maupun cair, antara lain seperti cangkang kelapa sawit, tempurung kelapa, limbah kulit hewan, dan tempurung kemiri. Karbonisasi merupakan proses pemecahan selulosa menjadi karbon pada suhu sekitar 275 °C, dengan karbon yang tidak mengalami oksidasi (Kurniati, 2008). Pemilihan parameter karbonisasi khususnya temperatur sangat penting karena mempengaruhi struktur dan kualitas karbon aktif yang akan dihasilkan. Temperatur karbonisasi yang tinggi akan menghasilkan lebih banyak zat volatil (zat yang mudah menguap) yang dilepaskan dari bahan mentah dan mempengaruhi hasil dan porositas produk (Wafti *et al.*, 2017).

Menurut (Kurniati, 2008), faktor-faktor yang mempengaruhi proses karbonisasi antara lain:

1. Waktu karbonisasi

Waktu karbonisasi berbeda- beda tergantung pada jenis dan jumlah bahan yang diolah. Waktu karbonisasi yang lebih panjang akan membuat reaksi semakin sempurna sehingga hasil arang semakin turun namun cairan dan gas makin meningkat.

2. Suhu karbonisasi

Suhu karbonisasi akan berpengaruh terhadap hasil arang karena semakin tinggi suhu, arang yang diperoleh makin berkurang tapi hasil cairan dan gas semakin meningkat. Hal ini disebabkan karena semakin banyak zat yang terurai dan yang menguap.

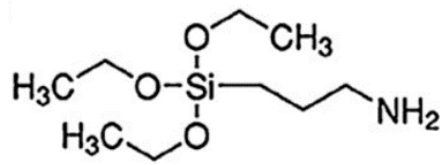
2.4. Magnetit

Magnetit (Fe_3O_4) merupakan salah satu turunan besi oksida yang banyak dipelajari karena kemampuannya dalam merespon medan magnet melalui sifat superparamagnetiknya. Magnetit umum digunakan dalam menghilangkan polutan di lingkungan sebagai bentuk teknologi yang cepat dan ekonomis melalui proses adsorpsi. Adsorben magnetik memiliki keunggulan dalam mengatasi polutan pada air, terutama karena sifat magnetisnya sehingga proses adsorpsi menjadi lebih sederhana (Altintig *et al.*, 2017). Adsorben magnetik dapat disintesis dengan menggabungkan adsorben dengan oksida besi, yang memiliki keunggulan luas permukaan yang besar dengan situs aktif yang baik sehingga meningkatkan karakteristik adsorpsi diikuti dengan pemisahan yang tepat dari adsorben dalam larutan air. Magnetit Fe_3O_4 merupakan fasa besi oksida yang mempunyai sifat kemagnetan yang besar diantara fasa lainnya. Komposit karbon aktif magnetit Fe_3O_4 mempunyai dua sifat, yaitu kemampuan penyerapan karbon aktif dan kemampuan merespon medan magnet, sehingga memudahkan proses pemisahan adsorben dengan adsorbat (Lestari *et al.*, 2020). Adsorpsi menggunakan adsorben magnetik memiliki keunggulan seperti karakteristiknya yang spesifik, sifat dasar seperti ukurannya yang sangat kecil, rasio luas permukaan terhadap volume yang tinggi, dan tidak adanya ketahanan difusi internal sehingga memiliki kinetika yang baik untuk adsorpsi polutan dari larutan berair. Karbon magnetit mempunyai sifat kemagnetan dan berat molekul yang lebih signifikan sehingga proses pemurnian berjalan lebih efektif. Selain itu, adsorben ini dapat dengan mudah diperoleh kembali dengan medan magnet eksternal dengan waktu yang relatif cepat sehingga dapat digunakan kembali tanpa kehilangan situs aktif dari adsorben tersebut (Fajriyah *et al.*, 2023).

Adsorben magnetik dapat mengikat suatu molekul target non-magnetik melalui beberapa zat antara, seperti melalui pembentukan kompleks yang dapat dengan mudah dipisahkan dan diperoleh kembali. Sifat magnetik dari karbon aktif dapat memisahkan adsorbat dengan cepat dan proses adsorpsi yang berlangsung pada suhu kamar. Pelapisan magnetit pada adsorben juga termasuk metode yang ramah lingkungan karena tidak mengandung kontaminan seperti padatan tersuspensi (Buhani *et al.*, 2019). Karbon aktif yang dimodifikasi dengan magnetit akan memiliki sifat superparamagnetik sehingga akan tertarik pada medan magnet, tetapi tidak mempunyai sisa magnet setelah bidang tersebut dihapus. Oleh karena itu, partikel superparamagnetik tersuspensi yang menempel pada target dapat dihilangkan dengan sangat baik dan cepat dari matriks menggunakan medan magnet serta tidak menggumpal setelah dihilangkan (Huang *and* Hu, 2008).

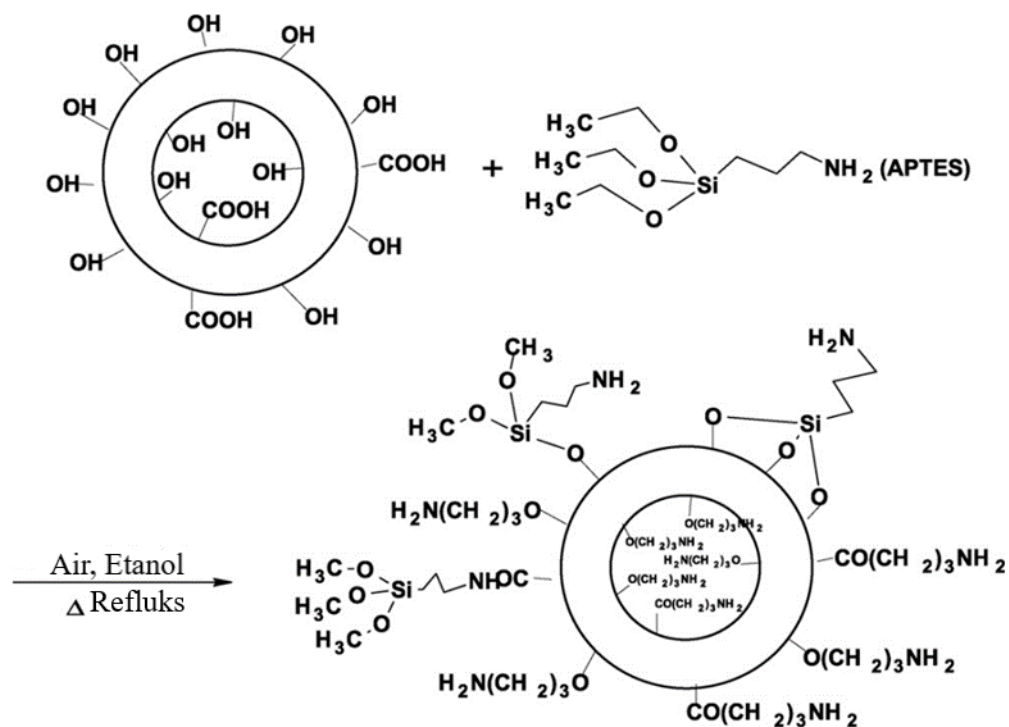
2.5. Silanisasi

Silanisasi merupakan proses peningkatan jumlah situs aktif pada karbon aktif dengan memanfaatkan senyawa organosilan seperti (3-*Aminopropyl triethoxysilane*) (APTES). Peningkatan jumlah situs aktif pada karbon aktif dilakukan melalui penambahan gugus fungsi pada adsorben (Buhani *et al.*, 2023). Senyawa organosilan berperan sebagai bahan penggandeng karena memiliki dua kelompok aktif yang berbeda yaitu terikat pada atom silika di dalam molekul, sehingga membangun ikatan kimia antara bahan organik dan anorganik (Huang *and* Hu, 2008). Senyawa APTES dapat menghasilkan gugus silanol dan siloksan, yang diharapkan dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi karbon aktif. Gugus fungsi -NH₂ pada senyawa APTES memiliki peluang besar untuk berikatan dengan molekul target lainnya. Selain itu, senyawa APTES memperlihatkan dua jenis kelompok aktif yang memungkinkan bereaksi dengan senyawa yang bersifat anionik, kationik, atau sifat netral (Munguía-Cortés *et al.*, 2017). Struktur senyawa silan dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Struktur senyawa silan (Gui *et al.*, 2013).

APTES memiliki dua gugus fungsi reaktif (gugus aminopropil dan gugus etoksi) yang dapat berinteraksi dengan suatu permukaan atau dengan molekul disekitarnya (Saaroni *et al.*, 2019). Senyawa (3-aminopropyl) triethoxysilane (APTES) menjadi agen penghubung silan yang penting dalam mendukung kemampuan permukaan adsorben yang dimodifikasi dengan magnetik oksida besi. Mekanisme permukaan fungsionalisasi adalah pembentukan ikatan Fe–O–Si antara nanopartikel dan ligan silan. Mekanisme proses silanisasi diilustrasikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Ilustrasi skematik modifikasi permukaan karbon aktif oleh senyawa APTES (Zhu *et al.*, 2009).

2.6. Adsorpsi

Adsorpsi merupakan istilah penting yang digunakan pada proses pemisahan dan pemurnian, serta pemulihan senyawa kimia dan proses pengolahan limbah.

Adsorpsi adalah pengolahan air limbah secara fisika-kimia melalui proses pengikatan molekul-molekul terlarut oleh permukaan adsorben dengan adanya gaya fisika-kimia. Adsorpsi bersifat *reversible*, sehingga dalam prosesnya tidak membutuhkan biaya yang mahal dan banyak digunakan karena efisiensinya dalam menghilangkan polutan dibandingkan dengan metode konvensional. Proses adsorpsi bergantung pada beberapa faktor, termasuk sifat adsorben dan adsorbat, serta kondisi adsorpsi seperti interaksi adsorben, luas permukaan adsorben, ukuran partikel, suhu, pH dan waktu kontak. Proses adsorpsi juga tergantung pada karakteristik fisikokimia larutan berair, seperti pH, potensial redoks, suhu, konsentrasi dan spesiasi ion logam dan adanya ion lain (kation atau anion) di dalamnya sistem perairan. Kemampuan adsorben untuk mengikat polutan sangat dipengaruhi oleh ketersediaan situs aktif pada penyerap. Beberapa penelitian dilakukan untuk meningkatkan sejumlah situs aktif melalui proses modifikasi adsorben dengan penambahan fungsi spesifik kelompok (Buhani *et al.*, 2019).

Menurut (Syauqiah dkk., 2011), faktor-faktor yang mempengaruhi proses adsorpsi adalah sebagai berikut:

1. Luas Permukaan

Semakin luas permukaan adsorben, maka semakin banyak zat yang teradsorpsi. Luas permukaan adsorben ditentukan oleh ukuran partikel dan jumlah dari adsorben.

2. Jenis Adsorbat

Peningkatan polarisabilitas adsorbat akan meningkatkan kemampuan adsorpsi molekul yang mempunyai polarisabilitas yang tinggi (polar) memiliki kemampuan tarik menarik terhadap molekul lain dibandingkan molekul yang tidak dapat membentuk dipol (non polar). Peningkatan berat molekul adsorbat dapat meningkatkan kemampuan adsorpsi. Adsorbat dengan rantai yang bercabang biasanya lebih mudah diadsorpsi dibandingkan rantai yang lurus.

3. Struktur Molekul Adsorbat

Hidroksil dan amino mengakibatkan mengurangi kemampuan penyisihan sedangkan nitrogen meningkatkan kemampuan penyisihan.

4. Konsentrasi Adsorbat

Semakin besar konsentrasi adsorbat dalam larutan maka semakin banyak jumlah substansi yang terkumpul pada permukaan adsorben.

5. Temperatur

Pemanasan atau pengaktifan adsorben akan meningkatkan daya serap adsorben terhadap adsorbat menyebabkan pori-pori adsorben lebih terbuka pemanasan yang terlalu tinggi menyebabkan rusaknya adsorben sehingga kemampuan penyerapannya menurun.

6. pH

pH larutan mempengaruhi kelarutan ion logam, aktivitas gugus fungsi pada biosorben dan kompetisi ion logam dalam proses adsorpsi.

7. Kecepatan Pengadukan

Menentukan kecepatan waktu kontak adsorben dan adsorbat. Bila pengadukan terlalu lambat maka proses adsorpsi berlangsung lambat pula, tetapi bila pengadukan terlalu cepat kemungkinan struktur adsorben cepat rusak, sehingga proses adsorpsi kurang optimal.

8. Waktu Kontak

Penentuan waktu kontak yang menghasilkan kapasitas adsorpsi maksimum terjadi pada waktu kesetimbangan.

Adapun adsorpsi dapat dibedakan menjadi adsorpsi fisika dan kimia:

a. Adsorpsi Fisika

Adsorpsi fisika merupakan suatu proses penyerapan adsorbat oleh adsorben yang disebabkan oleh gaya *van der waals* (penyebab terjadinya kondensasi gas untuk membentuk cairan) yang ada pada permukaan adsorben. Pada prosesnya, adsorpsi fisika melibatkan gaya-gaya antar molekul berupa gaya *van der waals*. Adsorpsi

fisika bersifat *reversible* sehingga reaksi ditulis dengan dua anak panah yang berlawanan, berlangsung dari dua arah yaitu dari kiri ke kanan dan dari kanan ke kiri, zat hasil reaksi dapat dikembalikan seperti zat mula-mula, berlangsung secara cepat dengan penyerapan kalor kecil, interaksi dianggap hanya menghasilkan gaya van der Waals dan terjadi pada semua proses adsorpsi serta berlangsung pada temperatur rendah. Reaksi kesetimbangan dinamis dapat terjadi bila reaksi yang terjadi merupakan reaksi bolak-balik (Karim dkk., 2018).

b. Adsorpsi Kimia

Adsorpsi kimia terjadi jika interaksi adsorben dan adsorbat melibatkan pembentukan ikatan kimia sehingga terjadi reaksi antara zat yang diserap dengan adsorben dan banyaknya zat yang teradsorpsi tergantung pada sifat khas zat padatnya yang merupakan fungsi tekanan dan suhu. Nilai panas adsorpsi setara dengan reaksi kimia karena adanya ikatan kimia yang terbentuk maupun yang terputus selama proses adsorpsi. Untuk membedakan kedua fenomena proses adsorpsi tersebut maka digunakan variabel suhu. Adsorpsi fisis ditandai dengan penurunan jumlah yang teradsorpsi dengan peningkatan suhu (Widayatno dkk., 2017).

2.7. Kinetika Adsorpsi

Kinetika adsorpsi menyatakan adanya proses penyerapan suatu zat oleh suatu adsorben dalam fungsi waktu tertentu, dimana kemampuan penyerapan adsorben terhadap adsorbat dapat dilihat dari laju adsorpsinya. Laju adsorpsi dapat diketahui dari konstanta laju adsorpsi (k) dan orde reaksi yang dihasilkan dari suatu model kinetika adsorpsi (Anggriani dkk., 2021). Konstanta laju adsorpsi ditentukan dari pseudo orde pertama atau mekanisme pseudo pertama bertingkat, dimana pseudo orde pertama dituliskan pada Persamaan 1.

$$\frac{dQ}{dt} = k_1(Q_e - Q_t) \quad (1)$$

Dengan Q_e dan Q_t = Jumlah ion teradsorpsi (mg g^{-1}) pada kesetimbangan dan waktu t (s), masing-masing. k_1 adalah konstanta laju adsorpsi (s^{-1}). Nilai k_1

dihitung dari plot $\ln(Q_e - Q_t)$ versus t untuk konsentrasi ion yang berbeda.

Persamaan dapat diintegrasikan dengan memakai kondisi-kondisi batas $Q_t = 0$ pada $t = 0$ dan $Q_t = Q_e$ pada $t = t$, sehingga Persamaan 2 menjadi:

$$\ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - k_1 t \quad (2)$$

Sedangkan pseudo orde kedua berdasarkan kesetimbangan adsorpsi dituliskan pada Persamaan 3.

$$\frac{dQ_t}{dt} = k_1(Q_e - Q_t) \quad (3)$$

Persamaan dapat diintegrasikan dengan memakai kondisi-kondisi batas $Q_t = 0$ pada $t = 0$ dan $Q_t = Q_e$ pada $t = t$, sehingga Persamaan menjadi:

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{t}{Q_e} + \frac{1}{k_2 Q_e^2} \quad (4)$$

Dengan k_2 ($\text{g mg}^{-1} \text{s}^{-1}$) adalah konstanta laju adsorpsi orde kedua. Jika kinetika orde kedua digunakan, plot t/q versus t harus menunjukkan hubungan yang linier. Parameter yang perlu diperhatikan adalah plot dan intersep. Model kinetika reaksi orde 1 dan orde 2 masing-masing parameter dihitung dengan menggunakan grafik $\ln C_e$ terhadap t dan $(1/C_e)$ terhadap t , Model yang sesuai dengan hasil penelitian adalah model kinetika dengan harga R^2 paling tinggi (Anggriani dkk., 2021).

Laju penyerapan awal, h (mg menit^{-1}) pada $t = 0$ dapat didefinisikan pada Persamaan 5.

$$h = k_2 Q_e^2 \quad (5)$$

2.8. Isoterm Adsorpsi

2.8.1. Isoterm Langmuir

Model isoterm adsorpsi Langmuir diterapkan pada adsorpsi monolayer dimana terdapat sejumlah situs aktif pada permukaan adsorben yang sebanding dengan luas permukaan (Buhani *et al.*, 2019), dan adsorpsi hanya dapat terjadi pada

jumlah yang terbatas situs lokal yang identik dan setara. Persamaan Langmuir ditulis pada Persamaan 6.

$$\frac{1}{Q_e} = \frac{1}{Q_m} + \frac{1}{K_L Q_m C_e} \quad (6)$$

Keterangan:

Q_e = Jumlah adsorbat pada adsorben dalam kesetimbangan (mg g^{-1})

C_e = Konsentrasi kesetimbangan dari adsorbat (mg L^{-1})

Q_m = Kapasitas adsorpsi maksimum (mg g^{-1})

K_L = Konstanta kesetimbangan adsorpsi Langmuir (L mg^{-1})

Nilai-nilai K_L dan q_m dihitung dari slop dan intersep pada plot $1/q_e$ dengan $1/C_e$.

Energi yang dihasilkan pada saat satu mol zat teradsorpsi oleh adsorben disebut dengan energi adsorpsi dan memiliki jumlah yang ekuivalen dengan nilai negative dari energi bebas Gibbs standar (ΔG°) yang dapat dihitung dengan Persamaan 7.

$$E_{ads} = \Delta G^\circ_{ads} = R T \ln K \quad (7)$$

Keterangan:

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

T = Temperatur (K)

K = Konstanta kesetimbangan adsorpsi yang diperoleh dari persamaan Langmuir

2.8.2. Isoterm Freundlich

Isoterm Freundlich merupakan hubungan yang menggambarkan adsorpsi non-ideal dan reversibel. Model isoterm ini dapat diterapkan pada adsorpsi multilayer, dengan distribusi panas dan afinitas adsorpsi yang tidak seragam pada permukaan heterogen. Jika y merupakan berat zat terlarut per gram adsorben, dan c adalah konsentrasi zat terlarut dalam larutan, maka dapat diturunkan dengan Persamaan 8 dan 9:

$$\frac{Xm}{m} = K \cdot C^{1/n} \quad (8)$$

$$\log \frac{Xm}{m} = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad (9)$$

Keterangan:

X_m = Berat zat yang diadsorpsi

m = Berat adsorben

C = Konsentrasi zats

Isoterm Freundlich ditulis dengan Persamaan 10.

$$\log Q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (10)$$

Keterangan:

Q_e = Jumlah zat yang teradsorpsi per gram adsorben (mg g^{-1})

K_F = Kapasitas adsorpsi ($\text{mg g}^{-1}(\text{L mg}^{-1})^{1/n}$)

C_e = Konsentrasi setimbang adsorbat dalam fase larutan (mg L^{-1})

n = Faktor heterogenitas Freundlich (mol g^{-1})

Dalam model isoterm Freundlich, K_F menunjukkan kapasitas adsorpsi dan n menunjukkan faktor heterogenitas yang baik lebih besar dari satu ($n > 1$) (Buhani *et al.*, 2017) dengan nilai n berkisar antara 1 sampai 10 (Zulaicha *et al.*, 2022).

Nilai-nilai dari K_F dan n dapat diperoleh dari memplot $\log Q_e$ vs. $\log C_e$.

Selain itu, untuk menentukan jumlah adsorbat yang teradsorpsi pada proses adsorpsi terhadap adsorben karbon aktif maka dapat digunakan Persamaan 11 dan 12 (Fajriyah *et al.*, 2023).

$$\% \text{ Adsorpsi} = \frac{C_o - C_e}{C_o} \times 100 \% \quad (11)$$

$$Q = \frac{(C_o - C_e)v}{w} \quad (12)$$

Keterangan:

w = Jumlah adsorben (g)

v = Volume larutan (L)

Q = Jumlah zat warna teradsorpsi per satuan massa (mg g^{-1})

C_o = Konsentrasi zat warna awal (mg L^{-1})

C_e = Konsentrasi zat warna setelah adsorpsi (mg L^{-1})

2.9. Desorpsi

Studi desorpsi dilakukan dengan tujuan untuk mengkaji proses adsorpsi dan menunjukkan stabilitas adsorpsi. Adsorbat dapat dilepaskan dari adsorben yang telah jenuh oleh adsorbat sehingga dapat digunakan kembali untuk mengadsorpsi. Secara umum, regenerasi adsorben dilakukan dengan menggunakan berbagai eluen atau pelarut. Proses desorpsi dapat dilakukan dengan menggunakan eluen organik dan anorganik. Agen desorpsi yang umum digunakan adalah metanol, etanol, isopropanol, larutan asam dan basa, NaCl, HNO₃, Fenton, dan H₂O₂ yang tergantung pada jenis adsorbat dan adsorben (Fatma *et al.*, 2018). Data desorpsi dapat memperkuat dan mengkonfirmasi adsorben yang telah terserap dan juga digunakan sebagai bahan pertimbangan untuk penggunaan adsorben secara berulang (Zulaicha *et al.*, 2021).

Adsorben yang telah dilepaskan kembali dari adsorbat dapat digunakan kembali dalam beberapa siklus adsorpsi untuk memaksimalkan efektivitasnya. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Buhani *et al.*, 2021), desorpsi ion Cd(II) yang teradsorpsi pada adsorben dielusi dengan menggunakan larutan asam klorida 0,1 M. Regenerasi adsorben dibersihkan dengan akuades hingga mencapai pH netral, dikeringkan pada suhu 60 °C selama 24 jam, dan diaplikasikan kembali secara berulang. Agar menguntungkan dalam proses adsorpsi maka adsorben yang digunakan harus dapat digunakan berulang kali sehingga mengurangi besarnya biaya bahan dan ion logam yang teradsorpsi harus mudah teradsorpsi dalam kondisi yang sesuai. Penggunaan HCl sebagai bahan eluen disebabkan karena pada medium asam, gugus aktif pada adsorben yang mengandung hidrogen akan terprotonasi dan tidak menarik kation sehingga mengakibatkan keluarnya kation ke dalam larutan eluen atau bahan desorpsi.

Selain itu, air juga umum digunakan sebagai eluen dengan berdasarkan pada penelitian (Buhani *et al.*, 2019) proses desorpsi zat warna CV dan MB dengan air dilakukan untuk melepaskan zat warna CV dan MB yang diadsorpsi melalui interaksi fisika yang menggambarkan adanya kontribusi mekanisme perangkap pada pori-pori adsorben. Serta desorpsi dengan larutan HCl efektif sebagai eluen

untuk melepaskan molekul CV dan MB dari adsorben dengan mensubstitusi proton terhadap molekul CV atau MB sebagai senyawa kationik.

Eluen etanol 40 % juga efektif memisahkan adsorbat dari adsorben dengan memanfaatkan interaksi fisik dan kimia (seperti interaksi elektrostatik atau pertukaran kation) karena sifat polar dari bahan tersebut. Proses penggunaan ulang dapat dilakukan hingga adsorbat yang teradsorpsi memiliki persentase sebesar kurang dari 70 % hingga sekitar 5 kali pengulangan. Penurunan persentase adsorbat yang teradsorpsi ini dapat dikaitkan dengan proses desorpsi dan netralisasi adsorben, yang dapat merusak situs aktif dari adsorben (Buhani *et al.*, 2023). Adapun % desorpsi dapat ditentukan menggunakan Persamaan 13.

$$\% \text{ Desorpsi} = \frac{Q_{e(\text{desorpsi})}}{Q_{e(\text{adsorpsi})}} \times 100 \% \quad (13)$$

dengan $Q_{e(\text{desorpsi})}$ dan $Q_{e(\text{adsorpsi})}$ adalah jumlah adsorbat yang terdesorpsi dari adsorben dan jumlah adsorbat yang teradsorpsi kedalam adsorben. Jumlah q_e (desorpsi) diperoleh dengan Persamaan 14.

$$Q_{e(\text{desorpsi})} = \frac{C_{ed}V}{m} \times 100 \% \quad (14)$$

dengan C_{ed} adalah konsentrasi adsorbat pada akhir proses desorpsi (Duman *et al.*, 2019).

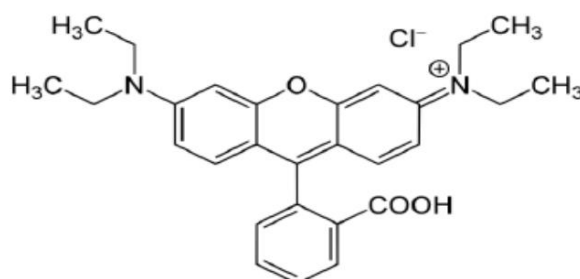
2.10. Zat warna

Zat warna yang lebih banyak digunakan di era modern ini adalah zat warna sintetik dibandingkan dengan zat warna organik. Penggunaan zat warna sintetik ini kemudian dapat menimbulkan adanya polutan dalam perairan. Pewarna adalah salah satu unsur utama dalam limbah yang dihasilkan dari beberapa industri seperti indsutri tekstil, cat, pernis, tinta, plastik, pulp dan kertas, kosmetik, dan penyamakan kulit serta beberapa indsutri pewarna lainnya. Limbah zat pewarna dapat memberikan ancaman utama bagi ekosistem yang ada disekitarnya. Zat pewarna pada umumnya bersifat sangat beracun. Limbah zat warna tekstil menjadi perhatian karena penggunaan bahan tekstil akan selalu meningkat seiring

dengan peningkatan populasi penduduk dan permasalahannya, sebagian besar zat warna yang dibuat mempunyai sifat resistensi terhadap lingkungan. Zat warna dibagi menjadi dua, yaitu zat warna anionik dan kationik. Pada proses pencelupan tekstil dihasilkan sekitar 24 % zat warna dan 6 % garam yang digunakan pada proses pewarnaan yang kemudian masuk ke lingkungan perairan sebagai limbah. Warna pada limbah muncul karena adanya gugus kromofor dalam zat warna tekstil yang digunakan pada proses pencelupan. Selain sulit diuraikan, bahan aktif zat warna seperti azo (monoazo, diazo, triazo) dilaporkan bersifat karsinogenik (Huda dan Yulitaningtyas, 2018).

2.10.1. Rhodamin B

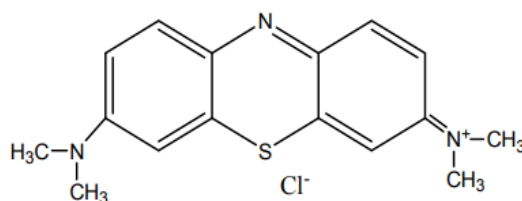
Rhodamin B (RhB) adalah warna dasar merah yang sangat larut dalam air dan merupakan pewarna dari kelas xanthene. RhB adalah pewarna kationik yang khas dan telah banyak digunakan sebagai pewarna pada tekstil dan makanan. RhB merupakan pewarna dalam bentuk bubuk kristal, berwarna merah keunguan dan tidak berbau. Sifat kimia RhB adalah mudah larut dalam air, menghasilkan warna larutan merah kebiruan dan berfluoresensi kuat jika diencerkan. Sangat mudah larut dalam etanol, sukar larut dalam asam encer dan dalam larutan alkali, larut dalam asam kuat akan membentuk senyawa kompleks berwarna merah muda yang larut dalam isopropil eter (Lolo dkk., 2020). Bahaya RhB bagi kesehatan diantaranya dapat mengiritasi saluran pernapasan, kulit, pencernaan, dan bersifat karsinogenik. RhB juga dapat menyebabkan kerusakan hati jika terlalu banyak dikonsumsi. Struktur kimia RhB dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Struktur kimia RhB (Hadriyati dkk., 2021).

2.10.2. Metilen Biru

Metilen Biru (MB) merupakan senyawa kimia aromatik heterosiklik yang termasuk senyawa kationik (Baunsele *and* Missa, 2020) dengan rumus molekul $C_{16}H_{18}N_3SCl$ dan berat molekul 319,65 g/mol. MB adalah pewarna dasar yang banyak digunakan di bidang industri. Pada suhu kamar, MB memiliki wujud bubuk hijau tua dan tidak berbau serta menghasilkan larutan biru saat dilarutkan dalam air. Larutan zat ini berwarna biru saat dalam lingkungan pengoksidasi, tetapi akan berubah tidak berwarna jika terkena zat pereduksi. MB dapat menyebabkan beberapa efek berbahaya seperti peningkatan denyut jantung, muntah, syok, penyakit kuning, kuadriplegia, dan nekrosis jaringan pada manusia. MB merupakan senyawa yang sangat tahan biodegradasi, stabil terhadap cahaya dan panas serta tidak mudah terurai karena memiliki struktur yang kompleks (Buhani *et al.*, 2023). Struktur kimia MB dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Struktur kimia MB (Fajarwati dkk., 2016).

2.11. Analisis Proksimat

Pengujian karakteristik karbon aktif dari limbah cangkang kelapa sawit dapat dilakukan dengan analisis proksimat (*proximate analysis*) yang bertujuan untuk mengetahui kualitas karbon aktif yang dihasilkan. Analisis proksimat yang dilakukan antara lain penentuan kadar air, kadar zat menguap, kadar abu, kadar karbon terikat, dan penentuan angka iodin pada karbon aktif.

2.11.1. Penentuan Kadar Air

Penentuan kadar air (*moisture content*) bertujuan untuk mengetahui sifat higroskopis dan kandungan air yang ada pada rongga maupun yang menutupi

pori-pori karbon aktif, yang ditunjukkan dengan tinggi rendahnya kadar air pada karbon. Kadar air yang rendah menunjukkan banyaknya rongga atau celah yang dapat ditempati oleh adsorbat sehingga proses adsorpsi berlangsung dengan baik. Persentase kadar air dihitung menggunakan Persamaan 15.

$$\% \text{ Kadar Air} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \% \quad (15)$$

Keterangan:

W_1 : Berat awal sampel (g)

W_2 : Berat akhir sampel (g)

2.11.2. Penentuan Kadar Zat Menguap

Kadar zat menguap (*volatile matter*) pada karbon aktif dapat diperoleh pada proses penguapan zat selain air dan pada saat tersebut, bahan akan kehilangan beratnya. Waktu dan temperatur pembakaran menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi zat menguap. Selain itu, komponen atau senyawa kimia dalam bahan akan mempengaruhi tinggi rendahnya penguapan (Harmiansyah dkk., 2023). Zat menguap dapat dihitung dengan Persamaan 16.

$$\% \text{ Kadar Zat Menguap} = \frac{W_1}{W_0} \times 100 \% \quad (16)$$

Keterangan:

W_1 = Berat akhir (g)

W_0 = Berat awal (g)

2.11.3. Penentuan Kadar Abu

Kadar abu (*ash content*) adalah bahan yang tersisa setelah biomassa dipanaskan hingga berat konstan dan berpengaruh kurang baik terhadap nilai kalor yang diberikan. % kadar abu (basis kering) dihitung dari Persamaan 17.

$$\% \text{ Kadar Abu} = \frac{W_1}{W_0} \times 100 \% \quad (17)$$

Keterangan:

W_1 = Berat akhir (g)

W_0 = Berat awal (g)

2.11.4. Penentuan Karbon Terikat

Karbon tetap (*fixed carbon*) ialah hasil kadar karbon tersisa setelah proses pengukuran zat menguap (Harmiansyah dkk., 2023), yang dapat dihitung dengan Persamaan 18.

$$FC(\%) = 100\% - (MC + V + Ash) \quad (18)$$

Keterangan:

MC = *Moisture content*/kadar air (%)

VM = *Volatile matter*/zat menguap (%)

Ash = *Ash content*/kadar abu (%)

2.11.5. Penentuan Angka Iodin

Angka Iodin didefinisikan sebagai jumlah miligram iodin yang diserap oleh satu gram bubuk karbon aktif. Penyerapan iodin oleh karbon aktif berhubungan dengan karakteristik porositas karbon aktif yang menentukan tingkat aksesibilitas karbon aktif (Nyamful *et al.*, 2021) sehingga semakin tinggi nilainya maka semakin besar afinitas adsorpsi bahan terhadap molekul kecil (Langama *et al.*, 2023). Penentuan angka iodin dapat diperoleh melalui Persamaan 17.

$$Daya\ Serap\ Iod = \frac{A \frac{B \times N \times (Na_2S_2O_3)}{N(iodin)} 126,93 fp}{\alpha} \quad (17)$$

Keterangan:

A = Volume larutan iodin (mL)

B = Volume $Na_2S_2O_3$ yang terpakai (mL)

fp = Faktor pengenceran

α = Bobot karbon aktif (g)

$N(Na_2S_2O_3)$ = Konsentrasi $Na_2S_2O_3$ (N)

$N(\text{iodin}) = \text{Konsentrasi iodin (N)}$

$126,93 = \text{Jumlah iodin sesuai 1 mL larutan Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

2.12. Penentuan pH *Point Zero Charge* (pH PZC)

pH *Point Zero Charge* (pH PZC) merupakan pH pada keadaan muatan permukaan keseluruhan bahan padat adalah nol, sehingga apabila pH di bawah nilai pH PZC, permukaan adsorben akan bermuatan positif dan apabila pH di atas nilai pH PZC, permukaannya akan bermuatan negatif (Buhani *et al.*, 2019). Nilai pH PZC ditentukan dengan memplot $\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{akhir}} - \text{pH}_{\text{awal}} = f(\text{pH}_{\text{awal}})$ (Langama *et al.*, 2023).

2.13. Karakterisasi

Karakterisasi dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui informasi tentang struktur, luas permukaan, komposisi, dan informasi lainnya yang dapat menunjang penelitian yang dilakukan.

2.13.1. Spektrofotometer UV-Vis

Interaksi antara sinar ultraviolet dan sinar tampak terhadap senyawa organik dapat digunakan untuk menentukan struktur molekul dari senyawa organik. Sinar UV memiliki rentang panjang gelombang 200-400 nm dan sinar *Visible* memiliki rentang panjang gelombang 400-800 nm. Spektrofotometri UV-*Visible* dapat digunakan untuk penentuan terhadap sampel yang berupa larutan, gas, atau uap (Suhartati, 2017). Spektrofotometer UV-*Visible* digunakan untuk mengetahui absorbansi dan transmittan dari senyawa organik sehingga dapat dihitung konsentrasi berdasarkan pada hukum Lambert Beer yang menyatakan hubungan antara cahaya yang diserap dengan konsentrasi komponen yang menyerap dengan Persamaan 20 dan 21.

$$\log \frac{P_0}{P} = e \cdot b \cdot C \quad (20)$$

$$A = e \cdot b \cdot C \quad (21)$$

Keterangan:

P_o = Intensitas cahaya yang datang pada larutan

P = Intensitas cahaya yang diteruskan oleh larutan

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

e = Absorptivitas molar larutan ($\text{cm}^{-1}\text{M}^{-1}$)

b = Tebal kuvet (cm)

C = Konsentrasi larutan (mol.L^{-1})

$$y = ax + b \quad (22)$$

Keterangan:

y = Absorbansi

a = Konstanta

x = Konsentrasi

b = Kemiringan/slope

Panjang gelombang maksimum adalah panjang gelombang yang menunjukkan terjadinya transisi elektronik yang memberikan absorbansi yang optimum pada kurva ditandai dengan absorbansi tertinggi. Pada penelitian ini digunakan RhB (RhB) dan MB (MB) yang diukur dengan spektrofotometer UV-Vis pada kisaran panjang gelombang 400 – 800 nm. Panjang gelombang maksimum RhB diperoleh pada 545 nm (Taupik dkk., 2021) dan MB pada 664 nm (Ngapa dan Ika, 2020).

2.13.2. FTIR

Fourier Transform Infra Red (FTIR) merupakan analisis yang digunakan untuk mengetahui gugus fungsi pada permukaan suatu bahan yang didasarkan pada iradiasi suatu sampel dengan radiasi infra merah (IR) yang panjang gelombang adsorpsinya merupakan karakteristik dari berbagai senyawa kimia atau atom yang ada pada sampel tersebut (Langama *et al.*, 2023). Spektrum inframerah tersebut dihasilkan dari transmisi dari cahaya yang melewati sampel, pengukuran intensitas cahaya dengan detektor dan dibandingkan dengan intensitas tanpa sampel sebagai fungsi panjang gelombang. Spektrum inframerah yang diperoleh kemudian diplot

sebagai intensitas fungsi energi, panjang gelombang (μm) atau bilangan gelombang (cm^{-1}). Beberapa gugus fungsi dengan bilangan gelombangnya ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Gugus Fungsi dengan Bilangan Gelombangnya (Sanjiwani dkk., 2020)

Gugus	Senyawa	Bilangan Gelombang (cm^{-1})
OH	Alkohol	3580-3650
	Asam	2500-2700
NH	Amina Primer dan sekunder	-3500 3310-3500
	Amida	3140-3320
CH	Alkana	3300
	Alkena	3010-3095
	Aromatik	-3030
	Alkana	2853-2962
	Aldehida	2700-2900
SH	Sulfur	2500-2700
$\text{C}\equiv\text{C}$	Alkana	2190-2260
$\text{C}\equiv\text{N}$	Alkilnitril	2240-2260
	Iosianat	2240-2275
	Arilnitril	2220-2240
$-\text{N}=\text{C}=\text{N}$	Diimida	2130-2155
$-\text{N}_3$	Azida	2120-2160
$>\text{CO}$	Aldehid	1720-1740
	Keton	1675-1725
	Asam karboksilat	1700-1725
	Ester	2000-2300
	Asilhalida	1755-1850
	Amida	1670-1700
CN	Oksim	1640-1690
CO	β -diketon	1540-1640
$\text{C}=\text{O}$	Ester	1650
$\text{C}=\text{C}$	Alkena	1620-1680
$\text{N}-\text{H}(\text{b})$	Amina	1575-1650
$-\text{C}-\text{NO}_2$	Nitro	1550-1570
$-\text{C}-\text{NO}_2$	Nitro aromatic	1300-1570
$\text{C}-\text{O}-\text{C}$	Eter	1230-1270
$-(\text{CH}_2)_n$	Senyawaan lain	-722

Menurut penelitian yang dilakukan oleh (Fajriyah *et al.*, 2023), Fe-O ditunjukkan dengan serapan pada bilangan gelombang 586 cm^{-1} yang menunjukkan bahwa

karbon aktif telah dilapisi oleh Fe_3O_4 . Pada penelitian yang dilakukan oleh (Aini dan Amaria, 2022), *3-aminopropyl triethoxysilane* (APTES) terlihat puncak serapan pada bilangan gelombang $1599,26 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya vibrasi tekuk gugus N-H. Vibrasi ulur C-H pada bilangan $2973,81 \text{ cm}^{-1}$, serapan pada bilangan gelombang $1390,05 \text{ cm}^{-1}$ mengidentifikasi adanya gugus amina yang berupa ulur C=N. Vibrasi ulur Si-O- C_2H_5 terdapat puncak serapan pada bilangan gelombang $1072,57 \text{ cm}^{-1}$. Hasil FTIR membuktikan bahwa APTES telah terbentuk dengan adanya gugus N-H.

2.13.3. XRD

Spektroskopi difraksi sinar-X (*X-ray diffraction/XRD*) merupakan metode karakterisasi yang digunakan untuk mengidentifikasi fasa kristalin dalam material dengan cara menentukan parameter struktur kisi serta untuk mendapatkan ukuran partikel dari nanokristal. XRD sangat berguna untuk mempelajari struktur kristal, komposisi kimia, dan sifat sifat fisika dari nanomaterial. Difraksi sinar-X terjadi pada hamburan elastis foton-foton sinar-X oleh atom dalam sebuah kisi periodik. Hamburan monokromatis sinar-X dalam fasa tersebut memberikan interferensi yang konstruktif. Dasar dari penggunaan difraksi sinar-X untuk mempelajari kisi kristal adalah berdasarkan Persamaan Bragg pada Persamaan 23:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta ; n = 1, 2, \dots \quad (23)$$

Keterangan:

λ = Panjang gelombang sinar-X yang digunakan

d = Jarak antara dua bidang kisi

θ = Sudut antara sinar datang dengan bidang normal

n = Bilangan bulat yang disebut sebagai orde pembiasan

Hukum Bragg menjelaskan rumusan matematika tentang persyaratan yang harus dipenuhi agar berkas sinar-X yang dihamburkan tersebut merupakan berkas difraksi. Berkas sinar-X monokromatik yang datang pada permukaan kristal akan dipantulkan, dan pantulan terjadi hanya jika sudut datangnya mempunyai sudut

tertentu. Tiap puncak yang muncul pada pola XRD mewakili satu bidang kristal yang memiliki orientasi tertentu dalam sumbu tiga dimensi. Puncak-puncak yang didapatkan dari data pengukuran ini kemudian dicocokkan dengan standar difraksi sinar-X untuk hampir semua jenis material (Mursal, 2018).

Menurut penelitian yang dilakukan oleh (Fajriyah *et al.*, 2023), pada karbon aktif ditunjukkan puncak asimetris yang luas pada 2θ 20–45°, yang merupakan karakteristik karbon amorf. Puncak karbon yang asimetris berubah menjadi puncak tajam pada pola XRD karbon magnetit, yang menandakan karbon telah dilapisi magnetit sehingga puncak tersebut tampak dengan intensitas yang tajam.

2.13.4. SEM-EDX

SEM-EDX merupakan gabungan dari dua teknik yaitu *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Energy Dispersive X-Ray* (EDX). SEM merupakan teknik karakterisasi material yang banyak digunakan untuk melihat morfologi permukaan partikel hingga pada ukuran 1 nm. SEM adalah suatu metode yang digunakan untuk mengetahui bentuk maupun struktur mikro permukaan dari suatu objek yang tidak bisa dilihat oleh mata atau mikroskop optik dengan menggunakan mikroskop elektron. Rentang pembesarannya yang besar dan gambarnya dalam 3 dimensi membuat hasil karakterisasi sampel dengan menggunakan SEM menjadi lebih mudah untuk diamati dan dianalisa (Mursal, 2018).

Energy Dispersive X-Ray (EDX) adalah salah satu teknik untuk menentukan komposisi atom pada material, dasar dari analisis EDX adalah pelacakan dan pengukuran dari sifat-sifat sinar-X yang dibangkitkan oleh elektron elektron cepat. Mikroanalisis EDX adalah teknik analisis suatu unsur yang terkait dengan mikroskopi elektron berdasarkan karakteristik sinar-X yang mengungkapkan keberadaan unsur-unsur dalam spesimen. Spektrum EDX berisi informasi semi-kualitatif dan semi-kuantitatif, sehingga dapat menunjukkan konstituen dari unsur-unsur yang terdapat pada suatu adsorben (Buhani *et al.*, 2018).

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Buhani *et al.*, 2023), morfologi permukaan karbon aktif menunjukkan pori-pori yang terdistribusi secara merata dan seragam, serta pori-pori dengan ukuran berbeda. Namun, setelah dimodifikasi dengan APTES, karbon silan mengalami penurunan porositas permukaan.

Penurunan ini disebabkan oleh pengikatan APTES ke pori-pori karbon, yang mengisinya dengan gugus fungsi yang berasal dari APTES. Akibatnya, perubahan ini dapat mempengaruhi peningkatan kapasitas adsorpsi melalui adanya gugus fungsi pada permukaan adsorben. Terjadinya modifikasi agen silan pada karbon aktif didukung oleh data EDX yang menunjukkan adanya puncak difraksi untuk unsur nitrogen (N) dan silikon (Si) yang berasal dari APTES, selain unsur karbon (C) dan oksigen (O) yang ditemukan pada karbon aktif.

2.13.5. BET

Brunauer-Emmet-Teller (BET) surface area merupakan pengujian yang dilakukan untuk mengetahui luas permukaan serat spesifik dan volume porositas sampel. Cara kerja BET adalah penyerapan gas nitrogen oleh permukaan sampel pada kondisi *isothermal* dan vakum. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Fajriyah *et al.*, 2023), diameter pori karbon magnetit adalah sekitar 2,05–6,45 μm , lebih kecil dari diameter karbon yang memiliki diameter pori sekitar 3,52–9,38 μm . Temuan ini menunjukkan bahwa Fe_3O_4 telah melekat sempurna pada permukaan karbon. Partikel Fe_3O_4 melapisi seluruh permukaan karbon, termasuk pori-pori karbon, sehingga pori-pori karbon semakin menyempit sehingga menghasilkan diameter pori karbon yang lebih kecil. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Munguía-Cortés *et al.*, 2017), pada saat permukaan dimodifikasi oleh APTES, akan terjadi interaksi antara APTES dengan permukaan sehingga terjadi pengurangan ukuran pori pada permukaan dimana APTES yang terdapat pada permukaan memiliki ukuran lebih kecil dari 0,5 nm.

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat

Penelitian ini telah dilakukan pada bulan Oktober 2024 hingga Maret 2025 di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Pengambilan cangkang kelapa sawit dilakukan di PT. Anak Tuha Sawit Mandiri Lampung Tengah. Analisis gugus fungsi menggunakan *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) dilakukan di Laboratorium Kimia Organik Departemen Kimia FMIPA Universitas Gadjah Mada. Analisis untuk mengetahui fasa kristal pada adsorben menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan di Laboratorium Terpadu FMIPA Universitas Negeri Jakarta. Analisis morfologi permukaan dan komposisi unsur pada karbon menggunakan *Scanning Electron Microscope* yang dirangkai dengan *Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX) dilakukan di Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Analisis *surface area* menggunakan *Brunauer-Emmet-Teller* (BET) dilakukan di Laboratorium Terpadu UPN Veteran Yogyakarta, dan analisis hasil adsorpsi zat warna menggunakan Spektrofotometer UV-Vis dilakukan di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Universitas Lampung.

3.2. Alat dan Bahan

Adapun peralatan yang digunakan pada penelitian ini antara lain alat gelas, spatula, neraca analitik, pengaduk magnet, *hotplate*, *thermometer*, tanur, *oven*, mortar dan alu, batang pengaduk, klem dan statif, pH meter, ayakan 100 *mesh*, desikator, *centrifuge*, Spektrofotometer UV-Vis tipe *Cary Series*, *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) tipe *thermo scientific nicolet iS10*, *X-Ray Diffraction*

(XRD) tipe *Rigaku Miniplex 600*, *Scanning Electron Microscope-Energy* (SEM-EDX) tipe *Jeol JSM-IT210* Jepang, *Brunauer-Emmet-Teller* (BET) tipe *Quantachrome NOVA 1200e*, dan pH meter.

Adapun bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini antara lain karbon aktif, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, NaOH 5M, APTES, toluena, KI, iodium, aquades, natrium tiosulfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), larutan kanji, RhB, MB, NaNO_3 , HCl, larutan *buffer*, kertas saring, pH indikator universal, aluminium foil, dan etanol.

3.3. Prosedur Penelitian

3.3.1. Preparasi dan Pembuatan Karbon

Cangkang kelapa sawit diambil dan dibersihkan kemudian dikeringkan di bawah sinar matahari selama 6 jam. Cangkang kelapa sawit yang telah bersih selanjutnya dikarbonisasi dengan cara dibakar dalam drum yang terbuat dari plat besi khusus pada suhu $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama kurang lebih 24 jam sehingga diperoleh karbon tanpa aktivasi (KTA). Karbon yang diperoleh selanjutnya dihaluskan menggunakan alat penggiling lalu diayak dengan ayakan (*siever*) berukuran 100 mikron. Karbon kemudian diaktivasi secara fisika dengan memasukkannya ke dalam tanur pada suhu $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 1 jam, hingga dihasilkan karbon aktivasi fisik (KAF).

3.3.2. Pembuatan Karbon Aktivasi Fisik-Magnetit (KAF-M)

Pembuatan KAF-M dilakukan dengan mencampurkan sebanyak 48,75 g KAF dalam 1350 mL akuades dipanaskan sampai suhu $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kemudian ditambahkan 57 g $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan 29,25 g $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ yang dilarutkan kedalam 1350 mL akuades. Campuran tersebut diaduk selama 30 menit sambil ditambahkan 750 mL NaOH 5 M tetes demi tetes sampai terbentuk endapan hitam. Endapan yang dihasilkan disaring dan dicuci dengan akuades sampai netral lalu dikeringkan dalam oven pada suhu $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 3 jam sehingga diperoleh KAF-M. Material

KAF-M dihaluskan hingga ukuran mikro meter (μm), untuk mendapatkan ukuran nano partikel sebelum dilanjutkan ke tahap berikutnya (Buhani *et al.*, 2021).

3.3.3. Pembuatan Karbon Aktivasi Fisik Magnetit-Silan (KAF-MS)

Pembuatan KAF-MS dilakukan sesuai dengan prosedur yang telah dikembangkan oleh (Buhani *et al.*, 2023) menggunakan karbon dari cangkang buah karet. Pada penelitian ini dilakukan optimasi prosedur pembuatan KAF-MS. Proses silanisasi dari KAF-M dilakukan dengan mencampurkan 50 g KAF-M dan ditambahkan kedalam 500 mL larutan APTS (30 % (vol) dalam toluena) dan diaduk selama 3 jam pada suhu 50 °C. Selanjutnya suspensi yang dihasilkan disonikasi pada suhu 110 °C selama 1 jam dan disimpan semalam. Endapan yang dihasilkan kemudian disaring dan dicuci dengan menggunakan etanol lalu dikeringkan dalam oven pada suhu 60 °C sehingga dihasilkan material KAF-MS.

3.3.4. Analisis Proksimat

Adapun analisis proksimat yang dilakukan pada karbon aktif meliputi penentuan kadar air, penentuan kadar zat menguap, penentuan kadar abu, penetapan kadar karbon terikat, daya serap karbon aktif terhadap iodin (Tejawati dkk., 2017).

1. Penentuan Kadar Air

Pertama-tama ditimbang 5 g karbon aktif, kemudian dikeringkan pada oven dengan suhu 105 °C sampai beratnya konstan (kurang lebih 1 jam). Selanjutnya karbon aktif ini dimasukkan ke dalam desikator sampai beratnya konstan, kemudian ditentukan kadar air dalam persen (%).

2. Penentuan Kadar Zat Menguap

Cawan berisi karbon aktif yang kadar airnya sudah ditetapkan dimasukkan dalam tanur pada suhu 900 °C selama 15 menit. Selanjutnya cawan dimasukkan dalam desikator sampai beratnya konstan dan ditimbang.

3. Penentuan Kadar Abu

Cawan yang sudah berisi karbon aktif yang kadar air dan kadar zat menguapnya sudah ditetapkan, lalu diletakkan dalam tanur, perlahan-lahan dipanaskan mulai dari suhu kamar sampai 800 °C selama 1 jam. Selanjutnya didinginkan dalam desikator sampai beratnya konstan kemudian ditimbang bobotnya.

4. Penetapan Kadar Karbon Terikat

Kadar karbon terikat adalah fraksi karbon yang terikat dalam ruangan selain fraksi air, zat menguap dan abu. Kadar karbon terikat diperoleh dari selisih persentase total dengan jumlah persentase kadar air, kadar zat menguap, dan kadar abu total dari karbon aktif.

5. Daya Serap Karbon Aktif Terhadap Iodin

Sebanyak 0,5 g karbon aktif yang belum dan sudah diaktivasi dimasukkan ke dalam Erlenmeyer, kemudian ditambahkan 25 mL larutan iodin 0,125 N dan diaduk selama 15 menit lalu disimpan selama 2 jam. Larutan ini disaring dan dipipet 10 mL lalu dimasukkan ke dalam Erlenmeyer. Larutan ini dititrasi dengan natrium tiosulfat sampai warna kuning pada larutan mulai samar. Setelah itu ditambahkan amilum 1 % ke dalam Erlenmeyer dan larutan dititrasi kembali hingga warna biru tua menjadi warna bening. Dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali dan dihitung volume natrium tiosulfat yang digunakan.

3.3.5. Penentuan pH *Point Zero Charge* (pH PZC)

Adsorben KTA, KAF, KAF-M, dan KAF-MS masing-masing sebanyak 0,05 g dimasukkan ke dalam 10 mL NaNO_3 0,1 M. pH awal divariasikan dengan rentang 3-12 diatur menggunakan larutan standar HCl 0,1 M untuk suasana asam dan NaOH 0,1 M untuk suasana basa. Larutan buffer yang digunakan untuk mempertahankan pH asam dengan kisaran pH 3-6 adalah larutan buffer sitrat sedangkan untuk mempertahankan pH basa kisaran 7-12 adalah larutan buffer

fosfat. Larutan diaduk menggunakan pengaduk (*shaker*) selama 24 jam. Setelah itu pH akhir diamati dan diukur menggunakan pH meter (Fajriyah *et al.*, 2023).

3.3.6. Karakterisasi

Adsorben KTA, KAF, KAF-M dan KAF-MS dikarakterisasi dengan FTIR untuk mengetahui gugus fungsi, XRD untuk mengidentifikasi fasa kristalin, SEM-EDX untuk mengetahui morfologi permukaannya dan komposisi serta kadar unsur dalam adsorben, BET untuk mengetahui luas permukaan dan ukuran partikel adsorben serta untuk mengetahui pola isoterm adsorpsi-desorpsi, dan Spektrofotometer UV-Vis untuk menganalisis hasil adsorpsi zat warna.

3.3.7. Preparasi Adsorbat

Zat warna RhB dan MB dengan konsentration masing-masing 10 ppm (Buhani *et al.*, 2023) diukur panjang gelombang maksimumnya pada rentang panjang gelombang 400-800 nm.

3.3.8. Uji Adsorpsi

Pada penelitian ini dilakukan uji adsorpsi yang meliputi penentuan dosis optimum, pH optimum, waktu kontak optimum, dan konsentrasi optimum (Buhani *et al.*, 2021).

1. Penentuan Dosis Optimum Adsorben

Sebanyak masing-masing 25 mL zat warna RhB 10 ppm dan MB 10 ppm dimasukkan kedalam 5 Erlenmeyer berbeda lalu ditambahkan adsorben KAF-M dan KAF-MS dengan variasi dosis masing-masing 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 dan 1 g kemudian diaduk menggunakan pengaduk selama 1 jam dengan kecepatan 100 rpm. Setelah itu larutan dipisahkan dengan teknik sentrifugasi selama 30 menit,

dan filtrat yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

2. Penentuan pH Optimum

Sebanyak masing-masing 25 mL zat warna RhB 10 ppm dan MB 10 ppm disiapkan dalam 8 Erlenmeyer berbeda dengan variasi pH 3-10. Dilakukan penambahan HCl 0,1 M untuk menurunkan pH dan peningkatan pH dilakukan dengan penambahan NaOH 0,1 M. Lalu ditambahkan adsorben dengan dosis optimum, kemudian larutan diaduk menggunakan pengaduk selama 1 jam dengan kecepatan 100 rpm. Setelah itu larutan dipisahkan dengan teknik sentrifugasi selama 30 menit, dan filtrat yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

3. Penentuan Waktu Kontak Optimum

Sebanyak masing-masing 25 mL larutan RhB 10 ppm dan MB 10 ppm pada kondisi pH optimum dimasukkan ke dalam 8 Erlenmeyer lalu ditambahkan adsorben dengan dosis optimum kemudian diaduk menggunakan pengaduk dengan variasi waktu yaitu 0, 15, 30, 45, 60, 90, 120, dan 150 menit. Setelah itu larutan dipisahkan dengan teknik sentrifugasi selama 30 menit, dan filtrat yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

4. Penentuan Konsentrasi Optimum

Sebanyak masing-masing 25 mL larutan RhB dan MB pada kondisi pH optimum dengan variasi konsentrasi yaitu 0, 25, 50, 100, 200, 250, 300, dan 400 ppm masing-masing dimasukkan ke dalam 8 Erlenmeyer lalu ditambahkan adsorben dengan dosis optimum. Kemudian diaduk menggunakan pengaduk pada waktu kontak optimum. Setelah itu larutan dipisahkan dengan teknik sentrifugasi selama 30 menit, dan filtrat yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

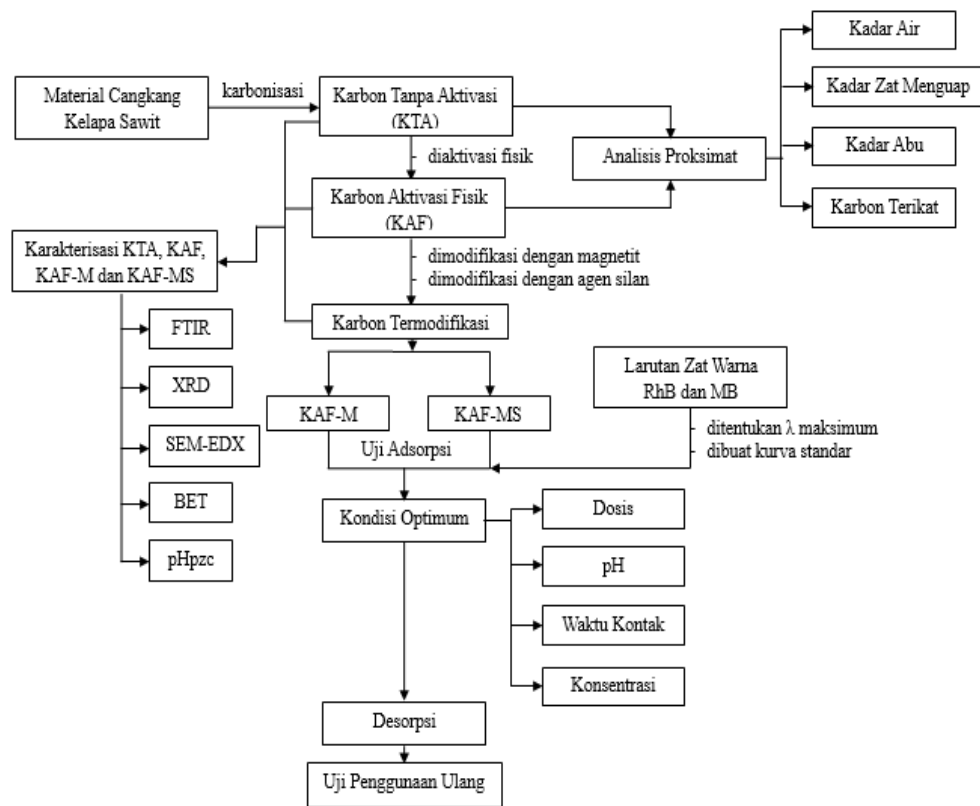
3.3.9. Desorpsi

Sebanyak masing-masing 25 mL larutan RhB dan MB pada kondisi pH dan konsentrasi optimum dimasukkan kedalam Erlenmeyer lalu ditambahkan adsorben dengan dosis optimum. Lalu larutan tersebut diaduk pada waktu optimum dengan kecepatan 100 rpm. Selanjutnya larutan dan adsorben disentrifugasi dan dipisahkan dengan cara dekantasi. Filtrat dan endapan yang dihasilkan dipisahkan. Filtrat yang diperoleh dianalisis dengan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum. Endapan yang diperoleh digunakan kembali untuk melepaskan zat warna yang teradsorpsi pada adsorben dengan menggunakan eluen berupa 25 mL air, 25 mL etanol 40 %, 25 mL larutan KNO_3 0,1 M, dan 25 mL larutan HCl 0,1 M (Buhani *et al.*, 2023).

3.3.10. Uji Penggunaan Ulang Adsorben

Sebanyak masing-masing 25 mL larutan RhB dan MB pada kondisi pH dan konsentrasi optimum dimasukkan ke dalam Erlenmeyer lalu ditambahkan adsorben dengan dosis optimum. Larutan tersebut diaduk pada waktu optimum dengan kecepatan 100 rpm. Filtrat yang diperoleh disentrifugasi selama 30 menit, lalu dipisahkan dengan cara dekantasi, kemudian dianalisis dengan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum. Endapan yang diperoleh digunakan kembali untuk melepaskan adsorbat yang teradsorpsi pada adsorben dengan menggunakan eluen lalu diaduk selama 60 menit dan didekantasi. Endapannya kemudian dicuci dengan akuades sampai netral, kemudian dioven pada suhu 40 °C selama 3 jam. Adsorben yang sudah digunakan kemudian digunakan kembali untuk mengadsorpsi zat warna dan hingga % adsorpsinya <50 % (kurang lebih 5 kali penggunaan ulang) (Buhani *et al.*, 2019).

Rangkaian kegiatan tersebut dirangkum dalam diagram alir penelitian seperti ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Diagram alir penelitian.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Modifikasi karbon teraktivasi secara fisika dengan magnetit dan APTES telah berhasil dilakukan yang dibuktikan dengan hasil karakterisasi menggunakan FTIR, XRD, SEM-EDX, dan BET.
2. Adsorpsi RhB oleh adsorben KAF-M dan KAF-MS optimum pada dosis 0,4 g. Adsorpsi MB oleh adsorben KAF-M dan KAF-MS optimum pada dosis 0,2 g. KAF-M dan KAF-MS optimum pada pH 10 untuk RhB dan pH 8 untuk MB. Waktu kontak optimum untuk RhB dan MB oleh KAF-M dan KAF-MS yaitu 60 menit dengan konsentrasi maksimum 400 ppm.
3. Laju adsorpsi zat warna RhB dan MB cenderung mengikuti model kinetika pseudo orde dua. Isoterm adsorpsi zat warna RhB dan MB terhadap KAF-M dan KAF-MS cenderung mengikuti model isoterm Freundlich.
4. Desorpsi KAF-M dan KAF-MS terhadap dan MB lebih didominasi oleh ikatan hidrogen dan ikatan elektrostatik.
5. Adsorben KAF-M efektif digunakan berdasarkan uji penggunaan ulang >6 kali dengan efisiensi adsorpsi >85% sedangkan pada adsorben KAF-MS menurun seiring dengan proses adsorpsi-desorpsi yang dilakukan pada 5 siklus dengan efisiensi adsorpsi >50%.

5.2. Saran

Pada penelitian selanjutnya disarankan:

1. Mengoptimasi cara mengaktivasi karbon agar sesuai dengan SNI 06-3730-1995.
2. Melakukan modifikasi adsorben dengan teknik lain atau menggunakan senyawa lain yang lebih efektif dalam mengadsorpsi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-Ghani, N. T., El-Chaghab, G. A., Rawash, el-S. A., and Lima, E. C. 2017. Adsorption of coomassie brilliant blue R-250 dye onto novel activated carbon prepared from *Nigella sativa L.* waste: equilibrium, kinetics and thermodynamics running title: adsorption of brilliant blue dye onto *Nigella sativa L.* waste activated carbon. In *J. Chil. Chem Soc.* **62**(2), 3505-3510.
- Aini, N., dan Amaria, A. 2022. Sintesis nanopartikel Au-SiO₂ menggunakan natrium silikat dari abu ampas tebu (AAT). *UNESA J. Chem*, **11**(3), 143–152.
- Altintig, E., Altundag, H., Tuzen, M., and Sari, A. 2017. Effective removal of methylene blue from aqueous solutions using magnetic loaded activated carbon as novel adsorbent. *Chem. Eng. Res. Des.*, **122**, 151–163.
- Anggriani, U. M., Hasan, A., dan Purnamasari, I. 2021. Kinetika adsorpsi karbon aktif dalam penurunan konsentrasi logam tembaga (Cu) dan timbal (Pb). *J. Kinet*, **12**(02), 29–37.
- Badan Pusat Statistik. 2024, June 2. *Luas Tanaman Perkebunan Besar Menurut Jenis Tanaman (Ribuan Hektar), 2021-2023*.
- Baunsele, A. B., dan Missa, H. 2020. Kajian kinetika adsorpsi metilen biru menggunakan adsorben sabut kelapa. *ICA*, **5**(2), 76–85.
- Buhani, Dewi, J. S., Fajriyah, N. S., Rilyanti, M., Suharso, Sumadi, and Elwakeel, K. Z. 2023. Modification of non-activated carbon from rubber fruit shells with 3-(aminopropyl)-triethoxysilane and its adsorption study on coomassie brilliant blue and methylene blue in solution. *Water Air Soil Poll*, **234**(9), 1-13.
- Buhani, Hariyanti, F., Suharso, Rinawati, and Sumadi. 2019. magnetized algae-silica hybrid from *Porphyridium sp.* biomass with Fe₃O₄ particle and its application as adsorbent for the removal of methylene blue from aqueous solution. *Desalin. Water Treat*, **142**, 331–340.

- Buhani, Herasari, D., Suharso, and Yuwono, S. D. 2017. Correlation of ionic imprinting cavity sites on the amino-silica hybrid adsorbent with adsorption rate and capacity of Cd^{2+} ion in solution. *Orient. J. Chem*, **33**(1), 418–429.
- Buhani, Narsito, Nuryono, Sri Kunarti, E., and Suharso. 2015. Adsorption competition of Cu(II) ion in ionic pair and multi-metal solution by ionic imprinted amino-silica hybrid adsorbent. *Desalin. Water Treat*, **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. *Orient. J. Chem*, **34**(4), 2043–2050.
- Buhani, Suharso, Luziana, F., Rilyanti, M., and Sumadi. 2019. Production of adsorbent from activated carbon of palm oil shells coated by Fe_3O_4 particle to remove crystal violet in water. *Desalin. Water Treat*, **171**, 281–293.
- Buhani, Suharso, Rilyanti, M., Sari, M., and Sumadi. 2021. Removal of Cd(II) ions in solution by activated carbon from palm oil shells modified with magnetite. *Desalin. Water Treat*, **218**, 352–362.
- Duman, O., Özcan, C., Gürkan Polat, T., and Tunç, S. 2019. Carbon nanotube-based magnetic and non-magnetic adsorbents for the high-efficiency removal of diquat dibromide herbicide from water: OMWCNT, OMWCNT- Fe_3O_4 and OMWCNT-K-carrageenan- Fe_3O_4 nanocomposites. *Environ. Pollut*, **244**, 723–732.
- Fajarwati, F. I., Sugiharto, E., and Siswanta, D. (2016). Film of chitosan-carboxymethyl cellulosepolyelectrolyte complex as methylene blue adsorbent. *J. Ilmu-Ilmu MIPA*, **16**(1), 36–45.
- Fajriyah, N. S., Buhani, B., and Suharso, S. 2023. Adsorption kinetics and isotherm of crystal violet by carbon modified with magnetite (Fe_3O_4) and triethoxyphenylsilane (TEPS) from rubber fruit shell. *Indones. J. Chem*, **23**(1), 170–183.
- 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.

- Ghani, S. A., Muhamad, N. A., and Zainuddin, H. 2015. Performance of palm shell activated carbon as an alternative adsorbent for reclamation of used transformer oil. *ARPN J Eng. Appl. Sci*, **10**(22), 10752–10758.
- Gui, M. M., Yap, Y. X., Chai, S. P., and Mohamed, A. R. 2013. Multi-walled carbon nanotubes modified with (3-aminopropyl) triethoxysilane for effective carbon dioxide adsorption. *Int. J Greenh. Gas Control*, **14**, 65–73.
- Hadriyati, A., Lestari, L., dan Anggresani, L. 2021. Analisis rhodamin B dalam bolu kukus yang beredar di kota jambi dengan metode spektrofotometri uv-vis. *JFIKI*, **8**(1), 16–21.
- Harmiansyah, Dari, P. W., Wahyuni, S., Rahmawati, S. D., Wati, N. M. T., dan Putri, A. K. 2023. Karakteristik arang dari cangkang kelapa sawit sebagai bahan dasar utama pembuatan biobriket. *SJME*, **1**(2), 29–36.
- Huang, C., and Hu, B. 2008. Silica-coated magnetic nanoparticles modified with γ -mercaptopropyltrimethoxysilane for fast and selective solid phase extraction of trace amounts of Cd, Cu, Hg, and Pb in environmental and biological samples prior to their determination by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Spectrochim. Acta B: At. Spectrosc*, **63**(3), 437–444.
- Huda, T., dan Yulitaningtyas, T. K. 2018. Kajian adsorpsi methylene blue menggunakan selulosa dari alang-alang. *IJCA*, **1**(01), 9–19.
- Imani, A., Sukwika, T., dan Febrina, L. 2021. Karbon aktif ampas tebu sebagai adsorben penurun kadar besi dan mangan limbah air asam tambang. *J. Teknol*, **13**(1), 33–42.
- Karim, M. A., Juniar, H., dan Ambarsari, M. F. P. 2018. Adsorpsi ion logam fe dalam limbah tekstil sintesis dengan menggunakan metode batch. *J. Distilasi*, **2**(2), 68-81.
- Kurniati, E. 2008. Pemanfaatan cangkang kelapa sawit sebagai arang aktif. *J. Pen. Ilmu Tek*, **8**(2), 96–103.
- Langama, P. L. M., Anguile, J. J., Bissielou, C., Bouraïma, A., Ndong, A. N. M. M., Kouotou, D., and Mbadcam, J. K. 2023. Preparation and characterization of activated carbons from asparagus palm (*Laccosperma robustum*) bark by chemical activation with H_3PO_4 and KOH. *Am. J. Anal. Chem*, **14**(02), 55–71.

- Lestari, I., Kurniawan, E., Gusti, D. R., and Yusnelti. 2020. Magnetite Fe_3O_4 -activated carbon composite as adsorbent of rhodamine B dye. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, **483**(1), 1-8.
- Li, Q., Qi, Y., and Gao, C. 2015. Chemical regeneration of spent powdered activated carbon used in decolorization of sodium salicylate for the pharmaceutical industry. *J. Clean. Prod.*, **86**, 424–431.
- Liew, R. K., Chong, M. Y., Osazuwa, O. U., Nam, W. L., Phang, X. Y., Su, M. H., Cheng, C. K., Chong, C. T., and Lam, S. S. 2018. Production of activated carbon as catalyst support by microwave pyrolysis of palm kernel shell: a comparative study of chemical versus physical activation. *Res. Chem. Intermed.*, **44**(6), 3849–3865.
- Lolo, A., Patandean, C. F., dan Ruslan, E. 2020. Karakterisasi air daerah panas bumi pencong dengan metode AAS (atomic absorption spectrophotometer) di Kecamatan Biringbulu, Kabupaten Gowa Propinsi Sulawesi Selatan. *J. Geoelebes*, **4**(2), 102–110.
- Mujiyanti, D. R., Nisa, H., Rosyidah, K., Ariyani, D., dan Abdullah. Pengaruh waktu reaksi terhadap viskositas dan densitas tetraetil ortosilikat dari silika abu sekam padi. *IJCR*. **8**(1), 72-78.
- Munguía-Cortés, L., Pérez-Hermosillo, I., Ojeda-López, R., Esparza-Schulz, J. M., Felipe-Mendoza, C., Cervantes-Urbe, A., dan Domínguez-Ortiz, A. 2017. APTES-functionalization of SBA-15 using ethanol or toluene: textural characterization and sorption performance of carbon dioxide. *J. Mex. Chem. Soc.*, **61**(4), 273–281.
- Murray, Taufiq-Spj, N., dan Supriyantini, E. 2018. Kandungan logam berat besi (Fe) dalam air, sedimen dan kerang hijau (*Perna viridis*) di perairan Trimulyo, Semarang. *J. Mar. Res.*, **7**(2), 133–140.
- Mursal, I. L. P. 2018. Karakterisasi XRD dan SEM pada material nanopartikel serta peran material nanopartikel dalam drug delivery system. *Pharma Xplore Jurnal Sains Dan Ilmu Farmasi*, **3**(2), 214–221.
- Najmia, H., Mahreda, E. S., Mahyudin, R. P., dan Kissinger. 2021. Pemanfaatan arang aktif cangkang kelapa sawit teraktivasi H_3PO_4 untuk penurunan kadar besi (Fe), mangan (Mn) dan kondisi pH pada air asam tambang. *EnviroScienteeae*, **17**(1).

- Nicholas, A. F., Hussein, M. Z., Zainal, Z., and Khadiran, T. 2018. Palm kernel shell activated carbon as an inorganic framework for shape-stabilized phase change material. *Nanomaterials*, **8**(9), 1-14.
- Ngapa, Y. D., dan Ika, Y. E. (2020). Potensi zeolit alam ende sebagai media adsorben kompetitif pewarna biru metilena dan metil oranye. *JHS*, **8**(2), 105–113.
- Nyamful, A., Nyogbe, E. K., Mohammed, L., Zainudeen, M. N., Darkwa, S. A., Phiri, I., Mohammed, M., and Ko, J. M. 2021. Processing and characterization of activated carbon from coconut shell and palm kernel shell waste by H₃PO₄ activation. *Ghana J. Sci*, **61**(2), 91–104.
- Onoja, E., Chandren, S., Abdul Razak, F. I., Mahat, N. A., and Wahab, R. A. 2018. Oil palm (*Elaeis guineensis*) biomass in Malaysia: the present and future prospects. *Waste Biomass Valorization*. **10**(8), 2099–2117.
- Putri, F. A. R., dan Asnadi, C. 2021. Pemisahan ion besi dalam larutan dengan teknik adsorpsi menggunakan karbon aktif. *WARTA AKAB*, **45**(2), 51–55.
- Saaroni, M. Z. A. W., Abdullah, H., Masiren, E. E., and Khan, M. M. R. 2019. CO₂ adsorption using 3-triethoxysilylpropylamine (APTES)-modified commercial rice husk activated carbon. *AIP Conf. Proc*, 2124.
- Saef, K. S., Amalia, V., dan Supriatna, A. M. 2022. Prosiding seminar nasional kimia 2022 seminar nasional kimia 2019 UIN Sunan Gunung Djati Bandung. *Gunung Djati Conference Series*, **15**.
- Sanjiwani, N. M. S., Paramitha, D. A. I., Wibawa, A. A. C., Ariawan, I. M. D., Megawati, F., Dewi, N. W. T., Mariati, N. P. A. M., dan Sudiarsa, I. W. 2020. Pembuatan hair tonic berbahan dasar lidah buaya dan analisis dengan fourier transform infrared. *Widyadari*, **21**(1), 249–262.
- Sari, M. I., Galli Markasiwi, M., dan Putri, R. W. 2021. Uji karakteristik fisik pembuatan karbon aktif dari limbah daun nanas (*Ananas comosus*) menggunakan aktivator H₃PO₄. *JTPA*, **12**(2), 4–11.
- Sethupathi, S., Bashir, M. J., Akbar, Z. A., and Mohamed, A. R. 2015. Biomass-based palm shell activated carbon and palm shell carbon molecular sieve as gas separation adsorbents. *Waste Manag. Res*, **33**(4), 303–312.

- Suhartati, T. 2017. *Dasar-Dasar Spektrofotometri Uv-Vis dan Spektrometri Massa Untuk Penentuan Struktur Senyawa Organik*. AURA. Bandar Lampung.
- Syauqiah, I., Amalia, M., dan Kartini, H. A. 2011. Analisis variasi waktu dan kecepatan pengaduk pada proses adsorpsi limbah logam berat dengan arang aktif. *JIT*, **12**(1), 11–20.
- Taupik, M., Adam Mustapa, M., & Sitti Gonibala, S. 2021. Analisis kadar rhodamin B pada blush-on menggunakan metode spektrofotometri uv-vis. *IJPE*, **1**(2), 119–126.
- Tejawati, N. A. P., Manurung, M., dan Ratnayani, O. 2017. Karakterisasi karbon aktif komersial serta aplikasinya sebagai adsorben ion timbal(II) dan krom(III). *J. Chem*, **2**, 181–186.
- Ulfah, M., Raharjo, S., Hastuti, P., and Darmadji, P. 2016. The potential of palm kernel shell activated carbon as an adsorbent for β -carotene recovery from crude palm oil. *AIP Conf. Proc*, **1755**.
- Verayana, Paputungan, M., dan Iyabu, H. 2018. Pengaruh aktivator HCl dan H_3PO_4 terhadap karakteristik (morfologi pori) arang aktif tempurung kelapa serta uji adsorpsi pada logam timbal (Pb). *J. Entropi*, **13**(1), 67–75.
- Wafti, N. S. A., Lau, H. L. N., Loh, S. K., Aziz, A. A., Rahman, Z. A., and May, C. Y. 2017. Activated carbon from oil palm biomass as potential adsorbent for palm oil mill effluent treatment. *J. Oil Palm Res*, **29**(2), 278–290.
- Widayatno, T., Yuliawati, T., dan Susilo, A. A. 2017. Adsorpsi logam berat (Pb) dari limbah cair dengan adsorben arang bambu aktif. *JTBA*, **1**(1).
- 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.
- Yang, X., Zhou, T., Ren, B., Hursthouse, A., and Zhang, Y. 2018. Removal of Mn (II) by sodium alginate/graphene oxide composite double-network hydrogel beads from aqueous solutions. *Sci. Rep*, **8**(1), 1-16.
- Zhu, J., Yang, J., and Deng, B. 2009. Enhanced mercury ion adsorption by amine-modified activated carbon. *J. Hazard. Mater*, **166**(2–3), 866–872.

- 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. *J. Phys. Conf. Ser.*, **1751**(1). 1-11.
- Zulaicha, A. S., Saputra, I. S., Buhani, B., and Suharso, S. 2022. Magnetite particle coating to activated carbon of oil palm shells as adsorbent of Cu(II) and Ni(II) cation. *J. Iran. Chem. Soc.*, **19**(12), 4777–4787.