

**PELAPISAN PARTIKEL MAGNETIT DAN SILANISASI PADA
BIOADSORBEN CANGKANG KELAPA SAWIT (*Elaeis Guinensis* Jacq.)
DAN UJI ADSORPSI TERHADAP RHODAMIN B DAN METILEN BIRU**

(Skripsi)

Oleh

**DINDA APRILLIA DEFI
NPM 2117011029**



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

ABSTRAK

PELAPISAN PARTIKEL MAGNETIT DAN SILANISASI PADA BIOADSORBEN CANGKANG KELAPA SAWIT (*Elaeis Guinensis Jacq.*) DAN UJI ADSORPSI TERHADAP RHODAMIN B DAN METILEN BIRU

Oleh

DINDA APRILLIA DEFI

Pada penelitian ini telah dilakukan modifikasi karbon pirolisis aktif magnetit (KPA-M) dan karbon pirolisis magnetit silan (KPA-MS) dari biokarbon cangkang kelapa sawit yang digunakan sebagai adsorben larutan zat warna Rhodamin B (RhB) dan Metilen Biru (MB). Adsorben hasil sintetis dikarakterisasi menggunakan spektrofotometer inframerah (IR) untuk mengidentifikasi gugus fungsi, *X-ray Diffraction* (XRD) untuk menentukan tingkat kristalin adsorben, BET-Surface area untuk menentukan luas pori permukaan karbon dan *Scanning Electron Microscope With Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (SEM-EDX) untuk menganalisis morfologi adsorben serta komponen dalam karbon. Konsentrasi larutan RhB dan MB dianalisis menggunakan spektrofotometer Ultraviolet-Visible (UV-Vis). Adsorpsi larutan RhB oleh adsorben KPA-M dan KPA-MS optimum pada dosis 0,4 g dengan waktu kontak masing-masing selama 60 dan 30 menit pada pH 9. Adsorpsi larutan MB oleh KPA-M dan KPA-MS masing-masing optimum pada dosis 0,2 dan 0,4 g pada waktu kontak 60 menit dan pH 10. Laju adsorpsi zat warna RhB dan MB cenderung mengikuti model kinetika pseudo orde dua. Isoterm adsorpsi cenderung mengikuti model isoterm Freundlich. Desorpsi metilen biru dari KPA-M menggunakan eluen HCl dan etanol, sedangkan KPA-MS menggunakan akuades dan KNO₃. Adsorben KPA-M dan KPA-MS dapat digunakan secara berulang untuk mengadsorpsi metilen biru sebanyak 5 kali siklus pengulangan dengan persentase adsorpsi >80%.

Kata kunci : Cangkang kelapa sawit, adsorpsi, rhodamin B, metilen biru, KPA-M dan KPA-MS

ABSTRAK

COATING OF MAGNETITE PARTICLES AND SILANIZATION ON OIL PALM SHELL (*Elaeis guineensis* Jacq)-BASED BIOADSORBENT AND ADSORPTION TEST ON RHODAMINE B AND METHYLENE BLUE

By

DINDA APRILLIA DEFI

In this study, modification of activated magnetite pyrolysis carbon (KPA-M) and silane magnetite pyrolysis carbon (KPA-MS) from palm shell biocarbon was carried out which was used as an adsorbent for Rhodamine B (RhB) and Methylene Blue (MB) dye solutions. The synthetic adsorbents were characterized using an infrared (IR) spectrophotometer to identify functional groups, X-ray Diffraction (XRD) to determine the level of adsorbent crystallinity, BET-Surface area to determine the surface pore area of the carbon and Scanning Electron Microscope With Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDX) to analyze the morphology of the adsorbent and the components in the carbon. The concentration of RhB and MB solutions was analyzed using an Ultraviolet-Visible (UV-Vis) spectrophotometer. The adsorption of RhB solution by KPA-M and KPA-MS adsorbents was optimum at a dose of 0.4 g with a contact time of 60 and 30 minutes respectively at pH 9. The adsorption of MB solution by KPA-M and KPA-MS was optimum at a dose of 0.2 and 0.4 g respectively at a contact time of 60 minutes and pH 10. The adsorption rate of RhB and MB dyes tended to follow the pseudo-second-order kinetic model. The adsorption isotherm tended to follow the Freundlich isotherm model. Desorption of methylene blue from KPA-M used HCl and ethanol as eluents, while KPA-MS used aquadest and KNO₃. The KPA-M and KPA-MS adsorbents can be used repeatedly to adsorb methylene blue for 5 repetition cycles with an adsorption percentage of >80%.

Keywords: Oil palm shell, adsorption, Rhodamine B, Methylene Blue, KPA-M, KPA-MS

**PELAPISAN PARTIKEL MAGNETIT DAN SILANISASI PADA
BIOADSORBEN CANGKANG KELAPA SAWIT (*Elaeis Guinensis* Jacq.)
DAN UJI ADSORPSI TERHADAP RHODAMIN B DAN METILEN BIRU**

Oleh

DINDA APRILLIA DEFI

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 : **PELAPISAN PARTIKEL MAGNETIT DAN SILANISASI
PADA BIOADSORBEN CANGKANG KELAPA SAWIT
(*Elaeis Guinensis* Jacq.) DAN UJI ADSORPSI TERHADAP
RHODAMIN B DAN METILEN BIRU**

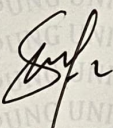
Nama : **Dinda Aprillia Defi**

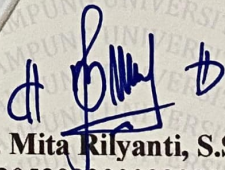
NPM : 2117011029

Jurusan : Kimia

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam




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


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

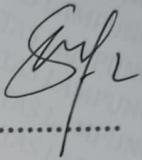
2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA


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

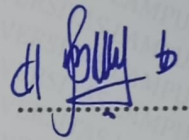
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

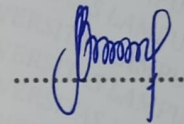
Ketua : **Prof. Dr. Buhani, M.Si.**



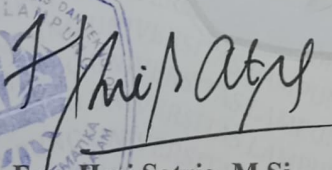
Sekretaris : **Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si**



Anggota : **Prof. Dr. Kamisah D. P. S.Si., M.Si**



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam


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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: **18 Juli 2025**

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

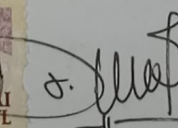
Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dinda Aprillia Defi
NPM : 2117011029
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Dengan ini menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya yang berjudul **“Pelapisan Partikel Magnetit dan Silanisasi pada Bioadsorben Cangkang Kelapa Sawit (*Elaeis Guinensis* Jacq.) dan Uji Adsorpsi Terhadap Zat Warna Rhodamin B dan Metilen Biru”** 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, 26 Juli 2025
Yang Menyatakan,



Aprillia Defi
NPM. 2117011029

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Gunung Sari pada tanggal 31 Maret 2004. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Aan Prihadi dan Ibu Tuginem. Riwayat pendidikan penulis yaitu dimulai dari SDN 2 Gunung Sari, pada tahun 2010 hingga 2015. Penulis melanjutkan pendidikan ke SMPN 9 Pesawaran, pada tahun 2015 hingga tahun 2017, dan dilanjutkan dengan bersekolah di SMAN 1 Ambarawa, dari tahun 2018 hingga tahun 2021.

Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung pada Tahun 2021 melalui Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) jalur undangan. Penulis juga aktif dalam organisasi kemahasiswaan, dan terdaftar sebagai Anggota Bidang Sosial Masyarakat Himpunan Mahasiswa Kimia (HIMAKI), pada periode 2022. Penulis juga pernah menjadi Staf Ahli Dinas Hubungan Internal dan Eksternal Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM) pada periode 2024. Selama menjadi mahasiswa penulis juga pernah diberi kesempatan asisten di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik pada Praktikum Kimia Anorganik II dan Kimia Anorganik I – Kimia Fisik II. Penulis telah melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) periode 1 tahun 2024. Penulis telah melaksanakan Kerja Praktik Lapangan di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung pada tahun 2024. Pada tahun 2025, penulis menyelesaikan penelitiannya di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Jurusan Kimia FMIPA Unila dengan judul “Pelapisan Partikel Magnetit dan Silanisasi pada Bioadsorben Cangkang Kelapa Sawit (*Elaeis Guinensis Jacq.*) dan Uji Adsorpsi Terhadap Zat Warna Rhodamin B dan Metilen Biru”.

MOTTO

“Jangan hanya berdiam diri ketika orang lain telah menyentuh garis”

“Ingatlah Allah saat hidup tak berjalan sesuai keinginanmu. Allah pasti punya jalan yang lebih baik untukmu”

“Allah tidak membebani seseorang, kecuali menurut kesanggupannya,”
(QS. Al-Baqarah [2]: 286)

“Maka, sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan. Sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan,”
(QS. Asy-Syarah [94]: 5-6)

PERSEMBAHAN



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

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

Kedua orang tua tercinta, Bapak Aan Prihadi dan Almh. Ibu Tuginem.

Terima kasih atas cinta, doa, dukungan, dan pengorbanan tiada henti yang selalu menjadi sumber kekuatan dan motivasi saya dalam menyelesaikan studi ini.

Kakak-kakak ku tersayang Fikri Adi Anggara S.T. dan Eni Widayanti S.Hut.

Terima kasih telah menjadi sahabat, mentor, sekaligus penguat hati dalam suka dan duka perjalanan kuliahku.

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

Dr. Kamisah D. P. S.Si., M.Si., serta seluruh Bapak dan Ibu dosen Jurusan

Kimia. Terima kasih telah membimbing, menasehati, serta memberikan ilmu-ilmunya. Semoga Allah Subhanahu Wa Ta'ala membalas segala kebaikan yang telah diberikan.

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

SANWANCANA

Alhamdulillah rabbil'alamin, puji syukur penulis sampaikan kepada Allah SWT, karena atas rahmat dan hidayah – Nya, Penulis dapat menyelesaikan penelitian serta dapat menuliskannya dalam bentuk karya tulis ilmiah.

Skripsi ini disusun sebagai syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains di Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Dengan judul skripsi **“Pelapisan Partikel Magnetit dan Silanisasi pada Bioadsorben Cangkang Kelapa Sawit (*Elaeis Guinensis* Jacq.) dan Uji Adsorpsi Terhadap Zat Warna Rhodamin B dan Metilen Biru”**.

Penyusunan skripsi ini penulis banyak menghadapi kesulitan. Penulis banyak memperoleh dukungan, bantuan, saran, arahan, dan bimbingan, pada penyusunan skripsi ini. Penulis ingin menyampaikan terima kasih pada kesempatan ini kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan sehingga skripsi ini dapat terselesaikan. Penulis mengucapkan terima kasih pada :

1. Allah SWT, yang selalu memberikan karunia yang luar biasa kepada penulis.
2. Kedua orang tua penulis ayahandaku tercinta Bapak Aan Prihadi dan Ibuku tersayang Almh. Ibu Tuginem, yang selalu sabar memberikan kasih sayang, dukungan, motivasi, materi dan yang selalu mendoakan penulis. Gelar ini kupersembahkan untuk kedua orang tua penulis.
3. Kepada kedua kakak ku tercinta Fikri Adi Anggara S.T. dan Eni Widayanti S.Hut. skripsi ini kusampaikan sebagai ungkapan terima kasih atas segala perhatian, nasihat, dan *support* tanpa lelah dari kakak.
4. Ibu Prof. Dr. Buhani, M.Si., selaku dosen pembimbing satu yang senantiasa meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran dalam membimbing penulis dengan sabar sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

5. Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si selaku dosen pembimbing dua yang telah membantu memberikan pemikiran, arahan, dan koreksi dalam penyusunan skripsi ini
6. Ibu Prof. Dr. Kamisah D. Pandiangan S.Si., M.Si., selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik membangun yang sangat berharga dalam penyempurnaan skripsi ini.
7. Prof. Dr. Drs. Hardoko Insan Qudus, SU selaku dosen pembimbing akademik yang telah membimbing dan mendampingi penulis selama masa studi dengan penuh perhatian dan dukungan.
8. Ibu Dr. Dian Herasari, M.Si. selaku Wakil Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung.
9. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
10. Bapak dan Ibu dosen Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung yang telah memberikan nasihat dan ilmu yang sangat bermanfaat selama masa studi.
11. Mba Liza Apriliya, S.Si. selaku laboran lab. kimia anorganik/fisik yang telah mendampingi dan mendukung selama masa penelitian.
12. Keluarga besar sang penulis yang senantiasa memberikan dukungan serta doa, skripsi ini menjadi bukti kecil rasa terima kasih saya atas segala dukungan dan kasih yang diberikan.
13. Untuk sahabat-sahabat terbaikku Vira Nurmalia, Haya Ulfa Atiqah, Ririn Destiana dan Nurmala Rohmah kalian bukan hanya teman, tapi sudah seperti rumah di tengah hiruk-pikuk perkuliahan. Terima kasih sudah selalu ada, saling menguatkan, dan berbagi tawa juga lelah bersama. Semoga kebersamaan ini tetap terjaga, meski nanti kita akan berjalan ke arah yang berbeda.
14. Sahabat-sahabat perjuanganku, adsorp 21 Amelia Normalita, S.Si., Aisyah Tirta Asri, S.Si., Mayang Aprilian Suri, S.Si., dan Tiara Zalfa Nur'alifah, S.Si. yang sudah bersama-sama menghadapi suka duka penelitian ini sampai kita mendapatkan gelar di belakang nama kita.
15. Sahabat SMA ku Gustina Adelia, S.Pd. ucapan terima kasih yang tulus penulis sampaikan kepada sahabat tersayang, yang telah menjadi bagian

penting dalam perjalanan hidup penulis. Terima kasih atas segala dukungan, doa, tawa, dan semangat yang tak pernah putus sejak masa SMA hingga kini.

16. Terima kasih untuk diriku sendiri, yang telah bertahan sejauh ini. Untuk semua lelah yang dipendam, air mata yang disembunyikan, dan semangat yang terus dijaga meski sering goyah. Terima kasih sudah tidak menyerah, bahkan saat rasanya ingin berhenti.
17. Terima kasih yang sebesar-besarnya saya sampaikan kepada teman-teman Kelas A atas kebersamaan, tawa, kerja sama, dan semangat yang kita bagi selama masa perkuliahan.
18. Seluruh teman-teman Kimia Angkatan 2021 atas kebersamaan dan perjuangan yang kita lalui bersama selama masa kuliah ini.
19. Teman-teman pejuang penelitian di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik.
20. Terima kasih kepada semua pihak yang telah terlibat dan mendukung proses penyusunan skripsi ini.
21. Almameter 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, 26 Juli 2025

Penulis,

Dinda Aprillia Defi

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	3
1.3. Manfaat Penelitian.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Cangkang Kelapa Sawit	5
2.2. Karbon Aktif.....	7
2.3. Magnetit.....	9
2.4. Silanisasi.....	10
2.4.1. (3- <i>Aminopropyl</i>)triethoxysilane(APTES).....	12
2.5. Zat Warna	13
2.5.1. Rhodamin B (RhB).....	14
2.5.2. Metilen Biru	15
2.6. Adsorpsi.....	16
2.7. Adsorben.....	18
2.8. Kinetika Adsorpsi	19
2.9. Isoterm Adsorpsi.....	20
2.9.1. Isoterm Adsorpsi Langmuir.....	21
2.9.2. Isoterm Adsorpsi Freundlich	23
2.10. Desorpsi.....	24
2.11. Karakterisasi	25
2.11.1. Analisis Proksimat	25
2.11.2. <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	30
2.11.3. Spektroskopi (<i>Fourier Transform Infra Red</i>) FTIR	28
2.11.4. Brunauer–Emmett–Teller (BET) <i>Surface Area</i>	30
2.11.5. <i>Scanning Electron Microscope With Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i> (SEM-EDX).....	32

III. METODE PENELITIAN	34
3.1. Waktu dan Tempat	34
3.2. Alat dan Bahan	34
3.3. Prosedur Penelitian.....	35
3.3.1. Preparasi Karbon	35
3.3.2. Aktivasi Karbon Hasil Pirolisis	35
3.3.3. Analisis Proksimat.....	35
3.3.4. Modifikasi Karbon dengan Magnetit	37
3.3.5. Modifikasi Karbon dengan Silanisasi	37
3.3.6. Karakterisasi Adsorben	38
3.3.7. Preparasi Adsorbat.....	38
3.3.8. Uji Adsorpsi.....	39
3.3.9. Desorpsi.....	40
3.3.10. Penggunaan Ulang Adsorben	40
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	43
4.1. Preparasi dan Aktivasi Karbon dari Cangkang Kelapa Sawit	43
4.2. Analisis Proksimat.....	44
4.3. Modifikasi Adsorben dari Cangkang Kelapa Sawit	45
4.4. Nilai pH pzc.....	46
4.5. Karakterisasi Adsorben Karbon Cangkang Sawit	47
4.5.1. Karakterisasi FTIR	47
4.5.2. Karakterisasi XRD	49
4.5.3. Karakterisasi Brunauer-Emmett-Teller (BET) <i>Surface Area</i>	51
4.5.4. Karakterisasi Adsorben dengan <i>Electron Microscope With Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i> (SEM-EDX).....	52
4.6. Adsorpsi Zat Warna RhB dan MB.....	55
4.6.1. Pengaruh Dosis Adsorben	55
4.6.2. Pengaruh pH	57
4.6.3. Pengaruh Waktu Kontak.....	59
4.6.4. Pengaruh Konsentrasi.....	62
4.7. Desorpsi.....	65
4.8. Penggunaan Ulang.....	66
V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	68
5.1. Kesimpulan.....	68
5.2. Saran	69
DAFTAR PUSTAKA.....	70
LAMPIRAN.....	76

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Sifat fisik dan kimia karbon aktif.....	7
2. Hasil analisis proksimat karbon pirolisis dan karbon pirolisis aktif	45
3. Parameter fisik permukaan adsorben KP, KPA, KPA-M, KPA-MS.....	51
4. Parameter kinetika adsorpsi RhB dan MB terhadap KPA-M dan KPA-MS.	61
5. Parameter isoterm adsorpsi pada RhB dan MB.	64
6. Data PZC pada adsorben KPA-M dan KPA-MS.....	79
7. Penentuan kurva standar RhB dan MB dengan variasi dosis adsorben	80
8. Adsorpsi RhB dan MB pada adsorben dengan variasi dosis adsorben	81
9. Penentuan kurva standar RhB dan MB dengan variasi pH.....	82
10. Adsorpsi RhB dan MB pada adsorben dengan variasi pH adsorbat.....	83
11. Adsorpsi RhB dan MB pada adsorben dengan variasi waktu kontak	85
12. Data perhitungan hasil kinetika pseudo orde satu pada KPA-M	86
13. Data perhitungan hasil kinetika pseudo orde satu pada KPA-MS	87
14. Data perhitungan hasil kinetika pseudo orde dua KPA-M.....	89
15. Data hasil perhitungan kinetika pseudo orde dua KPA-MS.....	90
16. Data absorbansi larutan RhB dan MB variasi konsentrasi.....	92
17. Adsorpsi RhB dan MB pada adsorben dengan variasi konsentrasi.....	93
18. Data perhitungan dengan persamaan Langmuir terhadap KPA-M	94
19. Data perhitungan dengan persamaan Langmuir terhadap KPA-MS	96
20. Data perhitungan dengan persamaan Freundlich pada KPA-M.....	97
21. Data perhitungan dengan model persamaan Freundlich pada KPA-MS.....	99
22. Data absorbansi RhB dan MB untuk mekanisme adsorpsi	101
23. Data perhitungan jumlah MB yang teradsorpsi dan terdesorpsi	102

24. Data absorbansi MB mekanisme adsorpsi untuk uji penggunaan ulang.....	102
25. Data perhitungan jumlah metilen biru yang teradsorpsi	103

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Cangkang kelapa sawit.....	6
2. Karbon aktif berbentuk serbuk.....	8
3. Rute sintesis karbon aktif magnetit.....	10
4. Skema silanisasi APTES pada permukaan molekul.....	11
5. Struktur (3- <i>Aminopropyl</i>)-triethoxysilane.....	12
6. Struktur kimia Rhodamin B	14
7. Struktur metilen biru	15
8. Adsorpsi pada arang aktif.....	16
9. Grafik model isoterm Langmuir.....	22
10. Grafik model isoterm Freundlich	24
11. Spektra XRD karbon aktif.....	30
12. Spektra FTIR karbon aktif dari cangkang buah karet.	29
13. Isoterm adsorpsi-desorpsi dan distribusi ukuran pori adsorben.	32
14. Hasil karakterisasi SEM.....	33
15. Diagram alir penelitian.....	42
16. (a) sebelum, (b) setelah dihaluskan.....	43
17. (a) Karbon tanpa aktivasi, (b) Karbon aktivasi fisik.....	44
18. Hasil modifikasi adsorben a) KPA, b) KPA-M, c) KPA-MS, d) KPA-MS	46
19. Grafik pH pzc adsorben KPA, KPA-M, KPA-MS	47
20. Spektrum IR (a) KP, (b) KPA, (c) KPA-M dan (d) KPA-MS.....	48
21. Difaktogram (a) KP, (b) KPA, (c) KPA-M, dan (d) KPA-MS.....	50
22. Grafik isotherm adsorpsi/desorpsi N ₂	52
23. Gambar mikrograf SEM (a) KP, (b) KPA, (c) KPA-M, dan (d) KPA-MS pada perbesaran 3000x.	53

24. Hasil karakterisasi EDX pada (a) KP, (b) KPA, (c) KPA-M, (d) KPA-MS	54
25. Grafik pengaruh dosis adsorben pada (a) RhB (b) MB.....	56
26. Grafik pengaruh pH (a) RhB dan (b) MB	58
27. Grafik pengaruh waktu kontak (a) RhB dan (b) MB	59
28. Kinetika pseudo orde satu pada KPA-M dan KPA-MS	60
29. Kinetika pseudo orde dua pada KPA-M dan KPA-MS.....	61
30. Grafik pengaruh konsentrasi (a) RhB dan (b) MB	62
31. Pola isoterm Langmuir adsorpsi terhadap RhB dan MB	63
32. Pola isoterm Freundlich adsorpsi RhB dan MB.....	63
33. Grafik hasil desorpsi KPA-M dan KPA-MS pada MB.....	65
34. Grafik hasil penggunaan ulang uji adsorpsi KPA-M dan KPA-MS.....	67
35. Kadar air (a) karbon tanpa aktivasi (b) karbon aktivasi fisik.....	77
36. Kadar zat menguap (a) karbon tanpa aktivasi (b) karbon aktif.....	77
37. Kadar abu (a) karbon tanpa aktivasi (b) karbon aktivasi fisik	78
38. Daya serap iodine (a) karbon tanpa aktivasi (b) karbon aktivasi fisik.....	78
39. Panjang gelombang maksimum (a) RhB dan (b) MB.....	79
40. Kurva standar (a) RhB dan (b) MB dengan variasi dosis adsorben.....	80
41. Kurva standar (a) RhB dan (b) MB dengan variasi pH.....	82
42. Kurva standar (a) RhB dan (b) MB dengan variasi waktu.....	84
43. Pola kinetika pseudo orde satu pada KPA-M terhadap RhB dan MB.....	87
44. Pola kinetika pseudo orde satu pada KPA-MS terhadap RhB dan MB	88
45. Pola kinetika pseudo orde dua pada KPA-M terhadap RhB dan MB	89
46. Pola kinetika pseudo orde dua pada KPA-MS terhadap RhB dan MB	91
47. Kurva standar (a) RhB dan (b) MB dengan variasi.....	92
48. Pola isoterm adsorpsi Langmuir pada KPA-M terhadap RhB dan MB	95
49. Pola isoterm adsorpsi Langmuir pada KPA-MS terhadap RhB dan	96
50. Pola Isoterm adsorpsi Freundlich pada KPA-M terhadap RhB dan MB.....	98
51. Pola isoterm adsorpsi Freundlich pada RhB dan MB terhadap KPA-	100
52. Kurva standar (a) RhB dan (b) MB.....	101
53. Kurva standar metilen biru untuk uji penggunaan ulang	103
54. Hasil uji adsorpsi dosis optimum pada RhB	105
55. Hasil uji adsorpsi dosis optimum pada MB	105

56. Hasil uji adsorpsi pH optimum (a) KPA-M, (b) KPA-MS	105
57. Hasil uji adsorpsi pH optimum (a) KPA-M, (b) KPA-MS	105
58. Hasil uji adsorpsi waktu kontak optimum (a) KPA-M, (b) KPA-MS	106
59. Hasil uji adsorpsi waktu kontak optimum (a) KPA-M, (b) KPA-MS	106
60. Hasil uji adsorpsi konsentrasi optimum (a) KPA-M, (b) KPA-MS.....	106
61. Hasil uji adsorpsi konsentrasi optimum (a) KPA-M, (b) KPA-MS.....	106
62. Hasil uji desorpsi MB dengan 4 eluen	107
63. Hasil uji penggunaan ulang adsorben (a) KPA-M dan (b) KPA-MS	107
64. Hasil data karakterisasi BET Surface area (a) KP, (b) KPA,.....	111

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dewasa ini pencemaran lingkungan akibat perkembangan industri telah menjadi isu global yang signifikan. Hal ini mengakibatkan dilepasnya limbah industri yang berbahaya ke udara, tanah maupun air. Salah satu dampak negatif dari perkembangan industri yang begitu pesat saat ini adalah pencemaran limbah zat warna yang terdapat dalam air limbah industri. Limbah tekstil berupa zat warna merupakan bahan pencemar yang berbahaya karena bersifat toksik jika terdapat dalam jumlah besar dan mempengaruhi berbagai aspek dalam perairan (Fauzan dkk., 2022).

Air limbah dari industri tekstil, kertas dan karet mengandung polutan organik dan pewarna yang sulit dihilangkan karena stabilitasnya terhadap zat pengoksidasi (Buhani *et al.*, 2015). Dari berbagai pewarna kationik, pewarna rhodamin B dan metilen biru paling sering digunakan dalam industri tekstil dan sering ditemukan sebagai polutan dalam air limbah. Paparan akut pewarna kationik dapat menyebabkan penyakit kuning, narkosis, sengatan panas, dan lain-lain pada manusia. Untuk mengurangi konsentrasi limbah zat warna dilingkungan perairan dapat dilakukan beberapa metode baik secara fisika maupun secara kimia pengendapan, pertukaran ion, filtrasi, osmosis balik, dan juga adsorpsi menggunakan adsorben. Diantara metode-metode tersebut teknik adsorpsi menjadi metode yang paling umum digunakan karena mudah dan ekonomis, salah satu adsorben yang dapat digunakan untuk adsorpsi adalah karbon aktif dari cangkang kelapa sawit (Buhani *et al.*, 2019).

Perkebunan kelapa sawit mengalami peningkatan luas areal mengakibatkan banyaknya pabrik pengolahan minyak sawit yang akan menghasilkan produk samping atau limbah yang belum termanfaatkan secara maksimal. Limbah kelapa sawit adalah sisa-sisa hasil tanaman kelapa sawit yang tidak termasuk dalam produk utama atau baik berupa limbah padat maupun limbah cair. Menurut Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS) limbah padat yang dihasilkan adalah *Mesocarp Fibre* (MF) sebanyak 144 kg dan cangkang sebanyak 64 kg serta 210 kg tandan kosong kelapa sawit (kadar air 65%).

Saat ini biomassa kelapa sawit seperti pelepah, batang, cangkang, serat, dan tandan kosong kelapa sawit sudah dimanfaatkan, namun pemanfaatannya belum optimal. Salah satunya ialah cangkang kelapa sawit. Komposisi utama cangkang kelapa sawit adalah hemiselulosa, selulosa, dan lignin. Bahan organik yang mengandung lignin, hemiselulosa, dan selulosa dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan karbon aktif karena sangat efektif mengadsorpsi limbah cair. Proses pirolisis dari cangkang kelapa sawit dapat menghasilkan lebih dari 400 senyawa aktif yang dapat digunakan sebagai bahan industri (Viana dkk., 2019). Cangkang kelapa sawit dapat dimanfaatkan sebagai karbon aktif karena termasuk bahan yang memiliki massa jenis lebih daripada kayu sebesar 1,4 g/mL. Dimana semakin besar massa jenis bahan baku, daya serap arang aktif yang dihasilkan akan semakin besar sehingga baik untuk dijadikan karbon aktif. Namun, dalam beberapa kasus karbon aktif murni mungkin tidak memiliki selektivitas dan efisiensi yang cukup untuk mengatasi berbagai tantangan lingkungan dan industri. Modifikasi pada karbon aktif menjadi salah satu solusi untuk meningkatkan kinerja material ini. Tujuan utama dari modifikasi adalah untuk memberikan sifat-sifat baru sehingga dapat disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi tertentu. Dua jenis modifikasi yang umum dilakukan adalah dengan magnetit dan silanisasi.

Proses pelapisan magnetit pada permukaan karbon aktif dapat meningkatkan luas permukaan efektif, sehingga kapasitas adsorpsi juga meningkat. Pengenalan agen silan, seperti 3-aminopropyltriethoxysilane (APTES), dapat memperkenalkan gugus fungsional tertentu (misalnya, amina) pada permukaan karbon aktif. Gugus fungsional ini dapat berinteraksi secara spesifik dengan polutan tertentu,

meningkatkan selektivitas adsorpsi. Dengan memperluas luas permukaan dan memperkenalkan gugus fungsional yang sesuai, modifikasi dapat meningkatkan jumlah polutan yang dapat diadsorpsi oleh karbon aktif. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan karbon aktif dari cangkang kelapa sawit hasil pirolisis termodifikasi.

Penelitian ini dilakukan untuk memodifikasi karbon dari cangkang kelapa sawit menggunakan magnetit dan agen silan *3-aminopropyltriethoxysilane* (APTES) sebagai adsorben. Modifikasi pada karbon aktif ini bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan pada karbon sehingga daya adsorpsi yang dihasilkan menjadi semakin baik. Karbon aktif termodifikasi magnetit dan silan yang telah diperoleh kemudian dikarakterisasi dengan Spektrofotometri Inframerah (IR), *X-Ray Diffraction* (XRD), Brunauer–Emmett–Teller (BET) *Surface Area* dan *Scanning Electron Microscope With Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (SEM-EDX). Selain itu juga dilakukan uji adsorpsi zat warna RhB dan MB menggunakan analisis Spektrofotometri UV-Vis.

1.2. Tujuan Penelitian

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

1. Memproduksi dan mengkarakterisasi adsorben dari cangkang kelapa sawit yang dimodifikasi dengan magnetit dan silan.
2. Menentukan dosis, pH, waktu kontak, dan konsentrasi optimum dari zat warna kation RhB dan MB terhadap adsorben karbon dari kelapa sawit termodifikasi.
3. Menentukan model kinetika adsorpsi oleh adsorben dari cangkang kelapa sawit pada RhB dan MB.
4. Mempelajari model isoterm adsorpsi oleh adsorben dari cangkang kelapa sawit pada RhB dan MB.
5. Mempelajari kemampuan adsorben yang telah dimodifikasi dalam penggunaan berulang untuk zat warna MB.

1.3. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah untuk memberikan informasi tentang proses adsorpsi karbon aktif dari cangkang kelapa sawit dengan pelapisan magnetit dan silan terhadap zat warna kation RhB dan MB pada lingkungan untuk mengurangi pencemaran limbah.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Cangkang Kelapa Sawit

Cangkang sawit merupakan bagian paling keras pada komponen yang terdapat pada kelapa sawit. Kelapa sawit adalah jenis tumbuhan yang termasuk dalam genus *Elaeis* dan ordo *Arecaceae*. Tumbuhan ini digunakan dalam usaha pertanian komersial untuk memproduksi minyak sawit. Genus ini memiliki dua spesies anggota. Kelapa sawit *Elaeis guineensis* adalah spesies kelapa sawit yang paling umum dibudidayakan di dunia, terutama di Indonesia, dan sumber utama minyak kelapa sawit dunia. Kelapa sawit merupakan tumbuhan industri sebagai bahan baku penghasil minyak masak, minyak industri, maupun bahan bakar. Indonesia adalah penghasil minyak kelapa sawit terbesar di dunia. Terdapat beberapa spesies kelapa sawit yaitu *E. guineensis* Jacq., *E. oleifera*, dan *E. odora*. Secara garis besar kelapa sawit (*Elleis Guinensis*) mengandung sekitar 67 % daging buah kelapa sawit (brondolan), 23% janjangan kosong (tandan), dan 10 % air (Hartanto dan Ratnawati, 2010).

Cangkang kelapa sawit merupakan salah satu limbah yang jumlahnya mencapai 60% dari produksi minyak inti (Aziz *et al.*, 2019). Limbah cangkang kelapa sawit berwarna hitam keabuan, bentuk tidak beraturan, dan memiliki kekerasan cukup tinggi. Cangkang sawit mengandung selulosa sebesar 45% dan hemiselulosa sebesar 26% yang baik untuk dimanfaatkan sebagai arang aktif. Kemudian mempunyai berat jenis yang lebih tinggi dari kayu, yaitu $1,4 \text{ g/cm}^3$. Dimana semakin besar massa jenis bahan baku, daya serap arang aktif yang dihasilkan akan semakin besar sehingga baik untuk dijadikan arang aktif. Salah satu upaya

yang dilakukan adalah pemrosesan tempurung kelapa sawit menjadi karbon aktif (Hartanto dan Ratnawati, 2010). Cangkang sawit dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Cangkang Kelapa Sawit (Harmiansyah dkk., 2023).

Secara garis besar, cangkang sawit yang sering dibicarakan orang, memiliki kegunaan antara lain: sebagai bahan baku arang (sawit) atau *charcoal*, sebagai bahan bakar untuk boiler, bahan campuran untuk makanan ternak, cangkang sawit dipakai sebagai pengeras jalan/pengganti aspal, khususnya di perkebunan sawit, dan kegunaan lainnya (Viena dkk., 2019). Ditinjau dari karakteristik bahan baku, jika dibandingkan dengan tempurung kelapa biasa, tempurung kelapa sawit memiliki banyak kemiripan. Perbedaan yang mencolok yaitu pada kadar abu (*ash content*) yang biasanya mempengaruhi kualitas produk yang dihasilkan oleh tempurung kelapa dan cangkang kelapa sawit (Meisrilestari dkk., 2013).

Beberapa penelitian telah banyak berhasil membuat karbon aktif melalui cangkang kelapa sawit seperti penelitan (Taufik dkk., 2021) yang berhasil mensintesis karbon aktif dari cangkang kelapa sawit menggunakan aktivator *microwave* yang dihasilkan telah memenuhi Standar Nasional Indonesia (SNI 06-3730-1995). Adapun penelitian (Meisrilestari dkk., 2013) hasil penelitian arang aktif yang dibuat dari cangkang kelapa sawit dengan proses aktivasi secara fisika kimia mempunyai daya jerap yang paling baik di antara arang aktif lain yang diaktivasi dengan proses fisika dan kimia. Pada waktu penjerapan 4 jam, arang aktif berdiameter 355 μm dengan aktivasi fisika-kimia mampu menjerap sebanyak 34,4% bagian dari larutan asam asetat 0,5 N.

2.2. Karbon Aktif

Karbon aktif adalah material berpori dengan kandungan karbon 87%-97% dan sisanya berupa hidrogen, oksigen, sulfur, dan material lain. Istilah karbon aktif dalam pengertian umum adalah suatu karbon yang mampu mengadsorpsi baik dalam fase cair maupun dalam fase gas. Bahan baku yang berasal dari hewan, tumbuh-tumbuhan, limbah ataupun mineral yang mengandung karbon dapat diubah menjadi karbon aktif antara lain tulang, kayu lunak, sekam, kulit buah kakao, tongkol jagung, tempurung kelapa, sabut kelapa, ampas penggilingan tebu, ampas pembuatan kertas, serbuk gergaji, kayu keras, dan batu bara (Rizki dkk., 2022). Adapun sifat-sifat dari karbon aktif ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat fisik dan kimia karbon aktif (Saleh dkk., 2023)

Variabel	Ketentuan
Kerapatan	0,45 g/cm ³
Kerapatan total	1,38-1,46 g/cm
Porositas	70%
Permukaan dalam	50 m
Kekuatan pemampatan	26 N/mm ²
Berat bagian terbesar	80-220 kgm ³
Kandungan air	5-8%
Kandungan karbon	80-90%
Kandungan abu	1-2%
Nilai kalor	29-33 MJ/kg
Zat-zat yang menguap	10-18%

Karbon merupakan suatu material yang memiliki berbagai keunggulan dari segi sifat fisika dan kimia, sehingga banyak dikembangkan oleh para peneliti saat ini. Keunggulan yang dimiliki oleh karbon ini menjadikannya sebagai material dengan aplikasi yang luas. Selain dari morfologi dan aplikasinya yang luas, partikel karbon juga banyak diteliti karena memiliki beberapa keunggulan, seperti: tidak berbahaya, murah, kapasitas volumetrik tinggi, kapasitas, reversibel tinggi, mudah dikompositkan, berlimpah, murah, dan stabil (Amelia dan Mufrodi, 2019).

Karbon banyak digunakan sebagai adsorben karena memiliki kemampuan adsorpsi yang baik (Buhani *et al.*, 2018). Ini karena karbon aktif memiliki luas

permukaan yang besar dan daya adsorpsi yang tinggi sehingga pemanfaatannya dapat optimal. Karbon aktif telah di padatkan melalui proses aktivasi, sehingga memiliki sifat daya serap yang lebih baik. Proses pembuatan karbon aktif melalui proses pirolisis dan dilanjutkan dengan proses aktivasi mampu memperbesar pori-pori pada arang tersebut sehingga meningkatkan daya serap.

Karbon aktif adalah mikrokristalin amorf dan non-grafik dengan struktur turbostratik. Luas permukaan arang aktif berkisar antara 300-3500 m²/g dan ini berhubungan dengan struktur pori internal yang menyebabkan karbon aktif mempunyai sifat sebagai adsorben. Karbon aktif dapat mengadsorpsi gas dan senyawa-senyawa kimia tertentu atau sifat adsorpsinya selektif, tergantung pada besar atau volume pori-pori dan luas permukaan (Saleh dkk., 2023) . Karbon aktif adalah suatu bahan padat yang berpori dan merupakan hasil pembakaran dari bahan yang mengandung karbon melalui proses pirolisis. Sebagian dari pori-porinya masih tertutup hidrokarbon, tar, dan senyawa organik lain. Komponennya terdiri dari karbon terikat (*fixed carbon*), abu, air, nitrogen, dan sulfur. Karbon aktif berwarna hitam, tidak berbau, tidak berasa dan mempunyai daya serap besar.

Karbon aktif mengalami perlakuan khusus berupa proses aktivasi baik secara fisika maupun secara kimia. Aktivasi tersebut menyebabkan pori-pori yang terdapat pada struktur molekulnya terbuka lebar sehingga daya serapnya akan menjadi semakin besar untuk menyerap bahan yang berfase cair maupun berfase gas. Aktivasi ini terjadi karena terbentuknya gugus aktif akibat adanya interaksi radikal bebas pada permukaan karbon dengan atom-atom seperti oksigen dan nitrogen (Junary dkk., 2015). Bentuk fisik karbon aktif berbentuk serbuk dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Karbon aktif berbentuk serbuk (Nasrudin dan Martin., 2014).

2.3. Magnetit

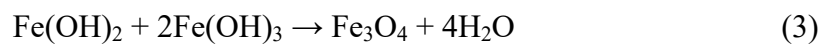
Magnetit (Fe_3O_4) merupakan oksida besi campuran yang terbentuk dari reaksi antara oksida besi (II) dan besi (III) dimana hasil pencampuran ini memberikan sifat yang unggul dibandingkan oksida besi (II) dan oksida besi (III) masing-masing. Keunggulan yang dimiliki magnetit dibandingkan oksida besi adalah sifat magnetiknya yang lebih kuat, hal ini yang menyebabkan magnetit populer dikalangan material sains maupun material terapan (Sari, 2017).

Fe_3O_4 menjadi material dalam kelompok besi oksida dan memiliki fasa magnetit. Material tersebut mempunyai struktur kimia $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3$ berbentuk kubik tersusun oleh ion oksigen Fe^{2+} dan Fe^{3+} . Secara khusus, nanopartikel magnetit (Fe_3O_4) banyak diaplikasikan karena biokompatibilitasnya, kerentanan magnetik yang tinggi, stabilitas kimia, tidak berbahaya, magnetisasi saturasi tinggi, dan murah (Ganapathe *et al.*, 2020). Karbon aktif dapat dikompositkan dengan magnetit Fe_3O_4 dengan cara kopresipitasi untuk meningkatkan kemampuan adsorben. Karbon aktif yang telah dikompositkan dengan magnetit dapat merespon medan magnet luar dan akan memudahkan proses pemisahan antara adsorben dan adsorbat.

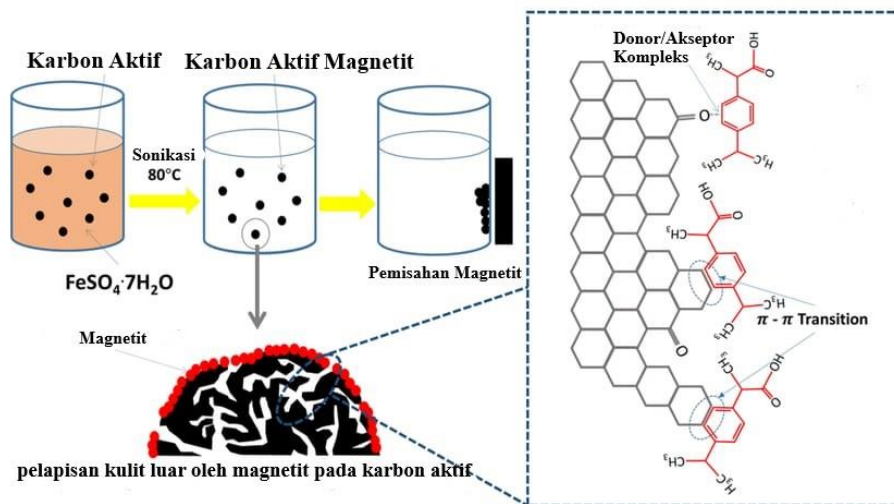
Keunggulan bahan adsorben komposit magnetit adalah dalam aplikasinya setelah proses adsorpsi, komposit magnetit dapat dipisahkan dari medium larutan tanpa menggunakan proses penyaringan, melainkan menggunakan sistem magnet permanen. Hal ini dapat menghemat biaya operasional maupun biaya perawatan komponen saringan yang cepat jenuh dan rusak akibat pemakaian. Modifikasi karbon aktif dengan Fe_3O_4 menghasilkan luas permukaan spesifik dan porositas yang tinggi dan properti superparamagnetik yang memungkinkan magnet dapat dipisahkan dengan magnet luar (Lestari dkk., 2021).

Teknik pelapisan material dengan partikel magnetit merupakan teknik yang ramah lingkungan, karena tidak membentuk produk yang mengandung kontaminasi seperti padatan tersuspensi, selain itu mempercepat proses pemisahan senyawa dari larutan karena adsorben bersifat magnet (Buhani, *et al.*, 2019). Selain itu

pelapisan karbon menggunakan Fe_3O_4 dapat menghasilkan adsorben yang memiliki kapasitas besar, selektivitas terhadap senyawa target, dan proses pemisahan yang cepat karena sifat kemagnetan adsorben (Buhani *et al.*, 2020). Magnetit Fe_3O_4 dapat dihasilkan dari campuran $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dalam suasana basa. Proses pembentukan magnetit dapat dijelaskan berdasarkan persamaan reaksi berikut:



Mekanisme pelapisan magnetit pada karbon aktif dapat dilihat pada Gambar 3.



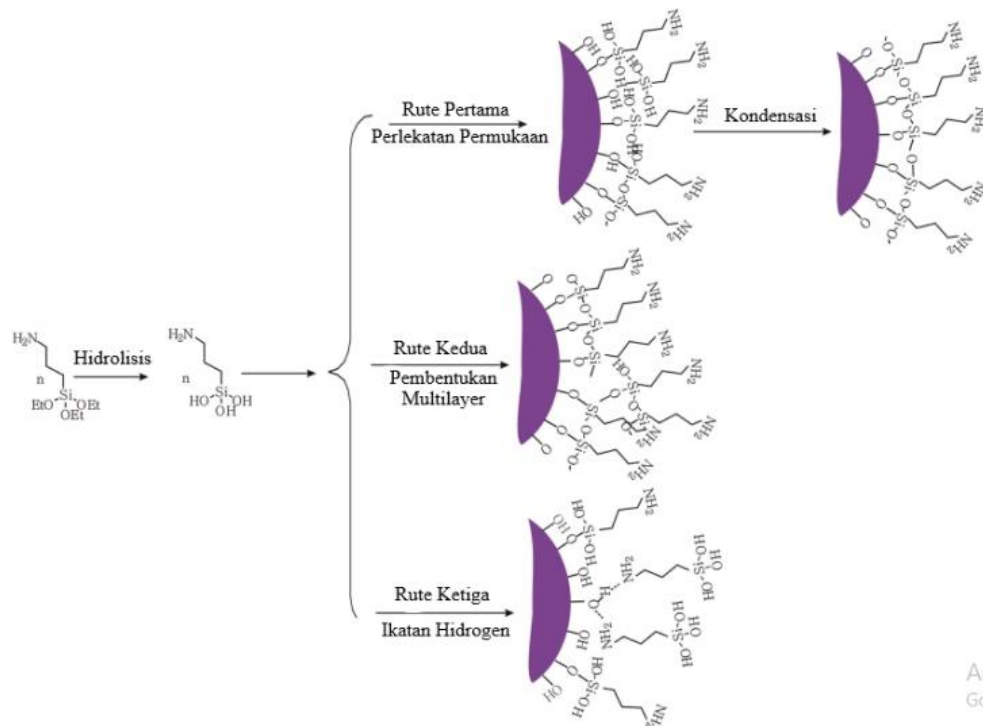
Gambar 3. Rute sintesis karbon aktif magnetit (Wong *et al.*, 2015).

2.4. Silanisasi

Silanisasi merupakan proses pelapisan permukaan suatu materi melalui proses *self-assembly* dengan molekul alkoksilan organofungsional. Proses silanisasi bertujuan untuk meningkatkan sifat hidrofob (hidrofobisitas) dari suatu materi. Proses ini sering digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk dalam pengolahan material, pelapisan, dan pengikatan biomolekul. Pada komposit, agen pengkopling silan berinteraksi dengan baik dengan substrat anorganik maupun polimer organik. Pada interaksi dengan substrat anorganik, reaksi yang terjadi melalui 4 tahap yaitu

hidrolisis, kondensasi, hidrogen *bonding*, dan *bond formation*. Silanisasi umumnya diikuti dengan hidrolisis gugus trietoksil menjadi gugus trihidroksil dan kemudian polikondensasi gugus hidroksil dengan permukaan gugus hidroksil dari permukaan nano magnetit partikel (Liu *et al.*, 2013). Dengan gambaran skema silanisasi pada Gambar 4.

Struktur kimia umum dari silan adalah $(\text{RO})_3\text{SiCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{-X}_1$, dimana RO adalah gugus alkoksi seperti metoksi, etoksi, atau asetoksi, X adalah *organofunctional group* seperti amino, epoksi, dan metakriloksi, sedangkan $-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2-$ merupakan jembatan alkil yang menghubungkan Si dengan X (Arkles end Goff, 2004).



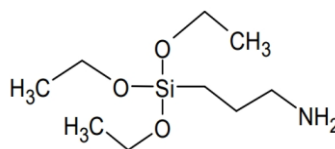
Gambar 4. Skema silanisasi APTES pada permukaan molekul (Liu *et al.*, 2013).

Organosilan merupakan molekul berbahan dasar silikon yang mempunyai rumus umum $\text{R}(\text{CH}_2)_n\text{Si}(\text{OR})_3$, dimana R merupakan gugus organofungsional dan R merupakan gugus alkoksi yang dapat terhidrolisis. Berbagai organosilan telah digunakan untuk modifikasi permukaan dan fungsionalisasi, seperti 3-aminopropyltriethoxysilane (APTES), 3-aminopropyltrimethoxysilane (APTMS), N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltriethoxysilane (AEAPTES), N-(2-aminoethyl)-

3-aminopropyltriethoxysilane (AEAPTMS), *N*-(6-aminohexyl) *aminomethyltriethoxysilane* (AHAMTES), *3-aminopropyldimethylethoxysilane* (APDMES) dan lain-lain. Di antara semua organosilan, APTES adalah molekul silan yang paling banyak digunakan untuk memfungsikan permukaan oksida (Sypabekova *et al.*, 2023).

2.4.1. (3-Aminopropyl)triethoxysilane(APTES)

(3-Aminopropyl)-triethoxysilane atau disingkat sebagai APTES merupakan suatu senyawa organosilan dengan rumus kimia $\text{NH}_2(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$. Senyawa ini mempunyai berat molekul 221,37 g/mol dan termasuk senyawa yang mudah larut dalam larutan air untuk mengurangi agregasi partikel, ikatan non-spesifik, dan membuat partikel menjadi lebih stabil dalam suspensi. Senyawa ini dapat berikatan dengan logam oksida melalui adsorpsi atau ikatan kovalen sehingga dapat digunakan untuk memodifikasi karbon magnetit (Yamaura *et al.*, 2004). APTES mempunyai struktur pada Gambar 5.



Gambar 5. Struktur (3-Aminopropyl)-triethoxysilane (Mousavi dan Fini, 2020).

(3-Aminopropyl)-triethoxysilane (APTES) adalah molekul organosilan yang sering digunakan dalam proses fungsionalisasi berbasis silana yang menempelkan biomolekul ke permukaan struktur kimia dari molekul APTES yaitu, dengan empat kelompok reaktif membuat setiap interaksi dengan permukaan antarmuka menjadi multiarah dan dapat dipertukarkan (dengan mode penggandengan intra dan antar lapisan), menggabungkan pengikatan kovalen dan nonkovalen (ikatan hidrogen) (Sypabekova *et al.*, 2023). APTES memiliki tiga gugus etoksi reaktif fungsional dan satu gugus amina per satu molekul silana. Polimerisasi molekul APTES pada permukaan oksida adalah reaksi yang sangat kompleks yang melibatkan tiga langkah utama: (1) hidrolisis (gugus hidroksil (-OH)

menggantikan gugus etoksi dalam media asam, basa, atau netral); (2) kondensasi (pembentukan ikatan siloksana (Si-O-Si)) dan (3) pemisahan fase. Karena empat gugus reaktif dalam molekul APTES dan kinetika kompleks pada ketiganya langkah-langkah reaksi, penting untuk mengontrol dan mengoptimalkan kondisi reaksi seperti kelembaban lingkungan, jenis pelarut, jumlah air, pH, suhu dan waktu reaksi, serta konsentrasi silan, untuk mendapatkan silan yang halus, stabil, dan berdensitas tinggi.

2.5. Zat Warna

Prediksi warna telah dimulai pada abad ke-21 oleh banyak produsen pigmen dan pewarna utama. Pewarna adalah senyawa organik sintetis yang larut dalam air atau minyak sedangkan pigmen tidak larut, mereka tetap dalam bentuk partikulat. Selain itu, zat warna adalah zat yang memiliki sifat menyerap sebagian spektrum cahaya tampak (kromofor). Warna diberikan oleh fraksi cahaya yang tidak diserap oleh zat warna tetapi diserap kembali. Ikatan rangkap terkonjugasi membentuk struktur kimia yang mendukung penyerapan cahaya. Dengan demikian, zat warna sering mengandung amina aromatik (Benkhaya *et al.*, 2020).

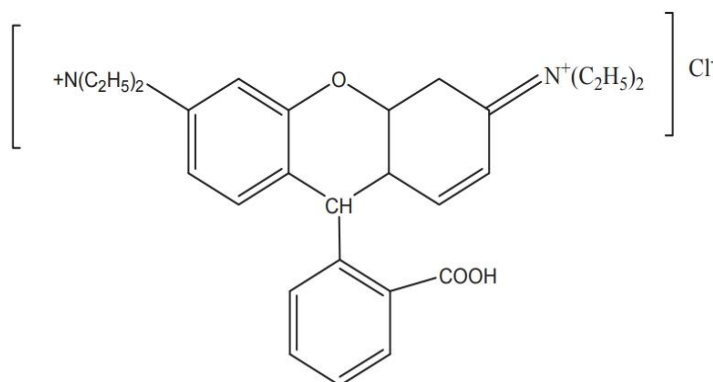
Pewarna digunakan secara praktis di semua bidang kehidupan sehari-hari kita untuk melukis dan mewarnai kertas, kulit dan pakaian. Hingga 50% pewarna yang digunakan tidak melekat pada serat tekstil, namun bertahan sebagai polutan dalam fase cair (Yuan *et al.*, 2020). Secara umum, zat warna terdiri dari kumpulan gugus kromoforik, aukromik, dan struktur aromatik terkonjugasi (cincin benzena, antrasena, perilena dan lain sebagainya). Ketika jumlah inti aromatik bertambah, maka konjugasi ikatan rangkap bertambah. molekul menyerap pada panjang gelombang yang besar dan memberikan warna yang lebih gelap.

Pewarna dapat diklasifikasikan menjadi pewarna kationik, anionik, dan nonionik. Pewarna kationik adalah pewarna basa sedangkan pewarna anionik meliputi pewarna langsung, asam, dan reaktif (Al-Toham *et al.*, 2022). Baru-baru ini, banyak penelitian telah dilaporkan untuk penyerapan pewarna kationik dan anionik. Pewarna kationik digunakan secara intensif sebagai model dalam studi

penyerapan zat warna seperti *crystal violet*, *methylene blue*, *basic blue 41* dan *basic red 46*. Pewarna anionik juga mencakup pewarna langsung, dan dari sudut pandang kimia, kelompok pewarna azo anionik mencakup sebagian besar pewarna reaktif.

2.5.1. Rhodamin B (RhB)

Rhodamin B (RhB) (CI 45170) adalah pewarna kationik *xanthenic*; pewarna ini sering digunakan sebagai pewarna dalam industri pewarnaan, industri makanan, dan laboratorium biomedis sebagai strain biologis. Dilaporkan bahwa dalam industri pewarnaan tekstil hampir 10–25% pewarna hilang saat penanganan dalam proses pewarnaan dan 2–20% larutan pewarna dibuang langsung sebagai limbah. Baru-baru ini, penggunaan RhB dilarang dalam makanan dan barang kosmetik karena adanya gugus N-etil di kedua sisi cincin *xanthen* seperti pada (Gambar 6) yang membuat senyawa tersebut bersifat toksik dan karsinogenik bagi manusia dan hewan (Danish *et al.*, 2017). Pembuangan RhB ke badan air menyebabkan masalah pencemaran air yang serius karena toksisitas dan akumulasinya yang tinggi. Efek berbahaya dari RhB meliputi teratogenisitas, karsinogenisitas, dan mutagenisitas (Liang *et al.*, 2020).



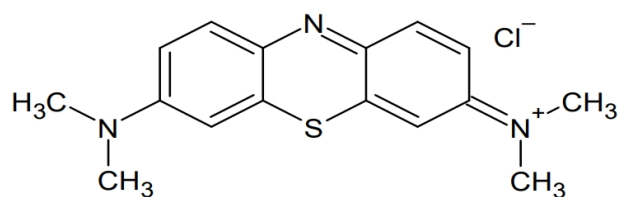
Gambar 6. Struktur kimia RhB.

Rhodamin B termasuk zat yang apabila diamati dari segi fisiknya cukup mudah untuk dikenali. Bentuknya seperti kristal, biasanya berwarna hijau atau ungu kemerahan. Di samping itu rhodamin B juga tidak berbau serta mudah larut dalam larutan berwarna merah terang berfluorescen. Rhodamin B biasa digunakan dalam

industri tekstil. Pada awalnya zat ini digunakan sebagai pewarna bahan kain atau pakaian. Rhodamin B sangat diperlukan oleh pabrik kertas maupun industri tekstil dikarenakan dapat menghasilkan warna-warna yang menarik.

2.5.2. Metilen Biru (MB)

Metilen biru ($C_{16}H_{18}N_3SCl$) adalah senyawa hidrokarbon aromatik dan merupakan zat warna kationik dengan daya adsorpsi yang sangat kuat. Zat pewarna tersebut merupakan dua jenis pewarna kationik yang stabil terhadap cahaya dan panas dan sulit terurai karena struktur kompleks (Buhani *et al.*, 2020). Pewarna biru metilen (MB) adalah molekul organik yang terdapat dalam bentuk teroksidasi biru dan tereduksi tak berwarna. Pewarna biru metilen digunakan dalam industri tekstil, percetakan, plastik, kertas, farmasi, dan medis dan dianggap berbahaya karena sifatnya yang beracun dan tidak dapat terurai secara hayati (Chouchane *et al.*, 2024). Biasanya, metilen biru dengan konsentrasi 10–200 mg /L dibuang ke lingkungan. Metilen biru merupakan zat warna kationik dengan struktur pada (Gambar 7) yang tahan panas dan sulit terdegradasi karena strukturnya yang kompleks. Paparan metilen biru dapat menyebabkan kerusakan mata yang parah dan kesulitan bernapas. Selain itu, paparan metilen biru secara oral dapat menimbulkan rasa terbakar di mulut dan tenggorokan serta menyebabkan mual, muntah, dan transpirasi tinggi (Misran *et al.*, 2024).



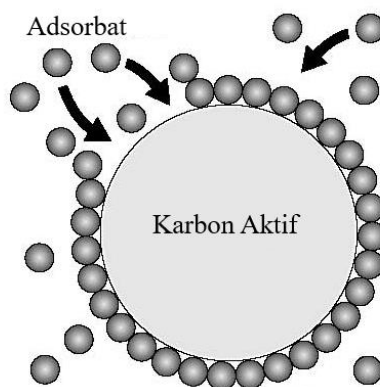
Gambar 7. Struktur kimia MB (Chouchane *et al.*, 2024).

Penghapusan zat warna, khususnya metilen biru, dari air limbah sangat penting karena efeknya yang merugikan pada lingkungan dan kesehatan manusia. Adsorpsi, yang dikenal sebagai teknik yang sederhana dan efisien, sering digunakan untuk menghilangkan berbagai zat warna dari air. Seperti penelitian yang telah dilakukan oleh (Zhi *end* Zaini, 2020) yang telah mengadsorpsi MB

menggunakan karbon aktif dengan kapasitas MB maksimum 84,7 mg/g, dan pemulihan magnetik 96,3%.

2.6. Adsorpsi

Adsorpsi adalah proses pemisahan molekul pengotor dari lingkungan ke sebagian besar atau permukaan fase padat atau cair. Adsorpsi adalah salah satu teknik yang paling banyak diterapkan untuk remediasi lingkungan. Kinetikanya sangat penting untuk mengevaluasi kinerja suatu adsorben tertentu dan mendapatkan wawasan tentang mekanisme yang mendasarinya. Adsorpsi merupakan salah satu teknik yang efektif untuk memisahkan senyawa organik dari limbah. Metode adsorpsi mempunyai keunggulan dibandingkan metode lain karena prosesnya lebih sederhana, biaya relatif murah, ramah lingkungan, dan tidak adanya efek samping zat beracun (Buhani *et al.*, 2018). Proses adsorpsi pada arang aktif dapat dilihat ada Gambar 8.



Gambar 8. Adsorpsi pada arang aktif.

Mekanisme adsorpsi digambarkan sebagai proses dimana molekul yang semula ada pada larutan, menempel pada permukaan zat adsorben secara fisika. Suatu molekul dapat teradsorpsi jika gaya adhesi antara molekul adsorbat dengan molekul adsorben lebih besar dibanding dengan gaya kohesi pada masing-masing molekul ini. Proses adsorpsi biasanya dilakukan untuk mengurangi senyawa organik yang terdapat dalam limbah cair, sehingga limbah cair dapat dimurnikan. Proses adsorpsi terjadi karena adanya luas permukaan, makin luas permukaan

adsorben yang disediakan maka makin banyak molekul yang diserap. Adsorpsi dibagi menjadi adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia (Yustinah dkk., 2019).

a. Adsorpsi Fisik

Adsorpsi fisik merupakan adsorpsi dimana gas terlarut dalam cairan penyerap tidak disertai dengan reaksi kimia. Penyerapan terjadi karena adanya interaksi fisik yaitu proses perpindahan massa yang terjadi antara gas yang diadsorpsi dan larutan pengadsorpsi, proses tersebut karena adanya gaya *van der waals*. Proses adsorpsi fisik terjadi tanpa memerlukan energi aktivasi, sehingga membentuk lapisan jamak lapisan jamak (*multilayers*) pada permukaan adsorben.

b. Adsorpsi Kimia

Adsorpsi kimia merupakan interaksi adsorbat dengan adsorben melalui pembentukan ikatan kimia. Dalam adsorpsi kimia partikel melekat pada permukaan dengan membentuk ikatan kimia (biasanya ikatan kovalen) dan cenderung mencari tempat yang memaksimalkan bilangan koordinasi dengan substrat. Adsorpsi kimia menghasilkan pembentukan lapisan monomolekular adsorbat pada permukaan melalui gaya-gaya dari valensi sisa dari molekul-molekul pada permukaan.

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

1. Luas permukaan

Semakin luas permukaan adsorben, maka makin 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).

3. Struktur molekul adsorbat

Hidroksil dan amino menyebabkan kurangnya 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. Waktu kontak

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

8. Kecepatan pengadukan

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.

2.7. Adsorben

Adsorben merupakan zat padat yang dapat menyerap komponen tertentu dari suatu fase fluida. Kebanyakan adsorben adalah bahan-bahan yang sangat berpori dan adsorpsi berlangsung terutama pada dinding-dinding pori atau pada letak-

letak tertentu didalam partikel itu. Oleh karena pori-pori biasanya sangat kecil maka luas permukaan dalam menjadi beberapa orde besaran lebih besar daripada permukaan luar dan bisa mencapai 2000 m/g. Adsorben yang biasa digunakan secara komersial dapat dikelompokkan menjadi 2 jenis yaitu polar yang disebut juga hidrofilik dan non polar yang disebut juga hidrofobik. Jenis adsorben yang termasuk kedalam kelompok adsorben polar adalah silika gel, alumina aktif, dan zeolit. Jenis adsorben yang termasuk kedalam kelompok adsorben non polar adalah polimer adsorben dan karbon aktif (Rahmi dan Sajidah, 2017).

Adapun syarat adsorben yang baik mempunyai daya serap yang besar, berupa zat padat yang mempunyai luas permukaan yang besar, tidak boleh larut dalam zat yang akan diadsorpsi, tidak boleh mengadakan reaksi kimia dengan campuran yang akan dimurnikan, dapat diregenerasi kembali dengan mudah, tidak beracun. Adsorben yang umum digunakan dalam pengolahan air ialah karbon aktif (Azzahra dan Taufik, 2020).

2.8. Kinetika Adsorpsi

Kinetika adsorpsi merupakan salah satu aspek yang sering diteliti untuk mengevaluasi karakteristik dari adsorben yang dipakai terutama dalam rehabilitasi lingkungan. Kinetika adsorpsi menyatakan adanya proses penyerapan suatu zat oleh adsorben dalam fungsi waktu tertentu. Karakteristik 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. Persamaan model pseudo orde pertama dan pseudo orde kedua disesuaikan untuk memodelkan kinetika penyerapan zat warna ke karbon aktif. Linearitas setiap model ketika diplot menunjukkan apakah model tersebut menggambarkan proses penyerapan dengan tepat atau tidak (Bernard *et al.*, 2013). Persamaan umum untuk model persamaan pseudo-orde pertama ditunjukkan dalam persamaan (1) dan (2):

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

Dimana:

- Q_t = Jumlah ion yang teradsorpsi pada waktu tertentu (mg/g)
 Q_e = Jumlah ion yang teradsorpsi pada keadaan setimbang (mg/g)
 t = Waktu (menit)
 k_1 = Konstanta laju pseudo orde pertama (menit⁻¹)

Dengan menerapkan kondisi batas setelah integrasi, dari $t = 0$ hingga $t = t$ dan $Q_t = 0$ hingga $Q_t = Q_t$, bentuk persamaan terintegrasi menjadi persamaan (2):

$$\log(Q_e - Q_t) = \log Q_e - \frac{k}{2,303} t \quad (2)$$

Persamaan laju kinetik kemisorpsi pseudo-orde kedua dinyatakan seperti pada persamaan (3):

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{t}{Q_e} \quad (3)$$

Kapasitas serapan pada kesetimbangan dan pada waktu t , masing-masing direpresentasikan oleh Q_e dan Q_t (mg/g) dan k_2 adalah konstanta laju serapan pseudo-orde 2 (mg/g.menit⁻¹). Pada kondisi $t = 0$, untuk menghitung laju penyerapan awal, h (mg/g.menit) dapat ditentukan menggunakan Persamaan (4)

$$h = k_2 Q_e^2 \quad (4)$$

Dimana h adalah laju adsorpsi awal (mg/g.menit).

2.9. Isoterm Adsorpsi

Menurut (Anggriani dkk., 2021) isoterm adsorpsi merupakan hubungan kesetimbangan antara konsentrasi pada fase cair dan konsentrasi pada partikel adsorben pada suhu tertentu. Adsorben yang baik memiliki kapasitas adsorpsi dan efisiensi adsorpsi yang tinggi, kapasitas adsorpsi dan efisiensi adsorpsi dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (5) dan (6):

$$Q = \left(\frac{C_o - C_e}{m} \right) \times V \quad (\text{kapasitas adsorpsi}) \quad (5)$$

$$\% E = \left(\frac{C_{awal} - C_{akhir}}{C_{awal}} \right) \times 100\% \quad (\text{efisiensi adsorpsi}) \quad (6)$$

Dimana:

Q = Kapasitas adsorpsi

C_o = konsentrasi awal larutan (mg/L)

C_e = konsentrasi akhir larutan (mg/L)

V = volume larutan (mL)

m = massa adsorben yang digunakan (g)

% E = Efisiensi adsorpsi

Isoterm adsorpsi adalah proses adsorpsi yang berlangsung pada temperatur tetap. Model isoterm adsorpsi yang paling umum dan banyak digunakan dalam adsorpsi adalah model isoterm Langmuir dan model isoterm Freundlich.

2.9.1. Isoterm Adsorpsi Langmuir

Model isoterm Langmuir mengasumsikan bahwa distribusi gugus reaktif di atas permukaan partikel bersifat homogen dan tidak ada interaksi lateral antara partikel. Isoterm penyerapan Langmuir berlaku ketika penyerapan zat terlarut dari larutan bersifat *monolayer*, penyerapan pada permukaan mengandung sejumlah situs identik dengan strategi penyerapan yang seragam, dan tidak ada perpindahan adsorbat pada bidang permukaan (Ehiomogue *et al.*, 2022). Bentuk non-linier dari model isoterm Langmuir (1918) ditunjukkan pada Persamaan (7):

$$\theta = \frac{K \cdot P_a}{1 + K \cdot P_a} \quad (7)$$

Dimana $\theta = \frac{x}{x_m}$, menjadi Persamaan (8):

$$X = \frac{x_m \cdot k \cdot P_a}{1 + K \cdot P_a} \quad (8)$$

Dalam bentuk umum dapat ditulis seperti Persamaan (9):

$$Q = \frac{Q_m \cdot b \cdot C_e}{1 + b \cdot C_e} \quad (9)$$

Dari Persamaan (9) dapat diubah ke linier menjadi Persamaan (10):

$$\frac{C_e}{Q} = \frac{1}{b \cdot Q_m} + \frac{C_e}{Q_m} \quad (10)$$

Dimana:

Q = Kapasitas adsorpsi (mg/g)

Q_m = kapasitas adsorpsi maksimum (mg/g)

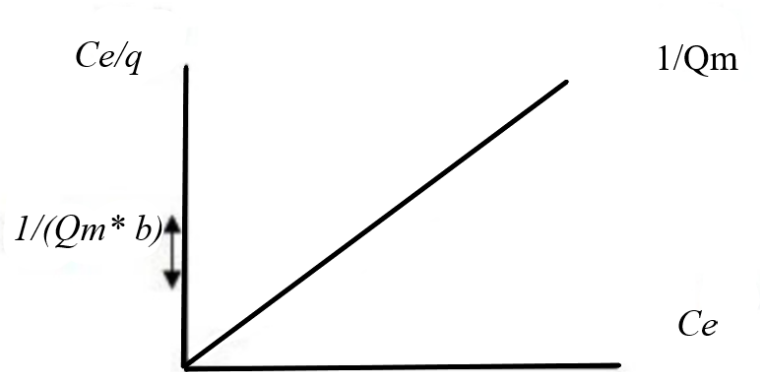
b = konstanta (l/mg) s

C_e = konsentrasi adsorbat pada kesetimbangan (mg/L)

Dengan eksperimen laboratorium menurut (Miri dan Narimo, 2022) kapasitas adsorpsi maksimum (Q_m) dan konstanta (b) dapat diperoleh. Persamaan (10) dapat dilinierkan menjadi Persamaan (11):

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_m \cdot b} + \frac{1}{Q_m} \quad (11)$$

Data percobaan laboratorium yang diperoleh diplot dengan $1/Q$ sebagai sumbu y dan $1/C_e$ sebagai sumbu x. Grafik yang diperoleh (Gambar 9) adalah garis linier, dengan intercept = $1/(Q_m \cdot b)$ dan slope = $1/Q_m$.



Gambar 9. Grafik model isoterm Langmuir (Miri dan Narimo, 2022).

2.9.2. Isoterm Adsorpsi Freundlich

Isoterm Freundlich mempelajari hubungan yang menggambarkan adsorpsi reversibel terbatas pada non ideal dan pembentukan multilayer (Nurkhasanah, 2024). Isoterm ini biasanya berhubungan dengan sistem heterogen seperti senyawa organik, saringan molekuler dan spesies interaktif yang terdapat pada karbon aktif. Isoterm ini biasanya berhubungan dengan sistem heterogen seperti senyawa organik, saringan molekuler dan spesies interaktif yang terdapat pada karbon aktif. Namun terdapat keterbatasan dalam pemilihan isoterm Freundlich karena kurangnya basis data termodinamika fundamental pada konsentrasi tertentu. Persamaan isoterm Freundlich dapat dinyatakan sebagai berikut (Miri dan Narimo, 2022) :

$$\frac{x}{m} = K \cdot C_e^{1/n} \quad (12)$$

Dimana:

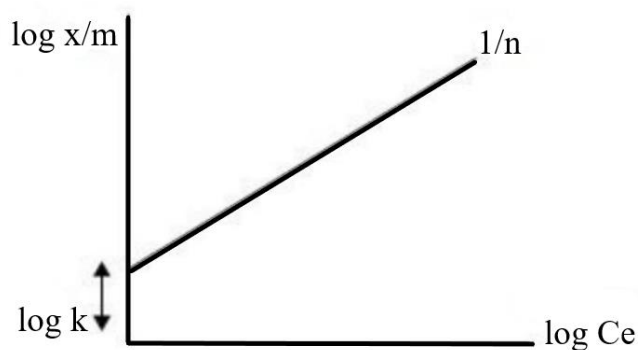
- x/m = besarnya adsorbat yang teradsorpsi oleh adsorben (mg/g)
- K = konstanta kesetimbang
- n = konstanta empiris
- C_e = konsentrasi adsorbat pada kesetimbangan (mg/L)

Konstanta diperoleh dengan cara eksperimen. Untuk mendapatkan konstanta k dan $1/n$ dilakukan linierisasi menjadi Persamaan (13):

$$\text{Log } x/m = \log k \frac{1}{n} + \log C_e \quad (13)$$

Data yang diperoleh dari percobaan (Miri dan Narimo, 2022) kemudian diplotkan dengan $\log x/m$ sebagai sumbu y, $\log C_e$ sebagai sumbu x. Grafik yang dihasilkan seperti pada Gambar 10 merupakan garis linier dimana $1/n$ adalah slope, $\log k$ adalah intercept.

Isoterm Freundlich berlangsung pada multilayer, dan korelasi yang dihasilkan pada isoterm Freundlich cukup memuaskan, dengan menggunakan persamaan adsorpsi Langmuir dan Freundlich dapat menentukan efektifitas daya adsorpsi.



Gambar 10. Grafik model isoterm Freundlich (Miri dan Narimo, 2022).

2.10. Desorpsi

Desorpsi merupakan proses penyimpanan adsorpsi. Mekanisme desorpsi disebutkan dalam abstrak grafis, di mana adsorben yang habis diolah dengan larutan, pelarut, atau campuran keduanya. Mekanisme ini memutus ikatan antara adsorben yang menyerap dan melepaskan adsorbat dari larutan. Setelah itu, adsorben yang telah diolah ini menjalani proses adsorpsi lebih lanjut. Dalam proses desorpsi, larutan atau pelarut tertentu disebut agen elusi.

Seluruh percobaan adsorpsi (menghasilkan adsorben bekas) dan desorpsi (adsorpsi baru dari adsorben bekas) disebut satu siklus. Beberapa siklus dilakukan selama percobaan dan menggunakan kembali adsorben bekas untuk menganalisis efisiensi proses desorpsi. Setelah setiap siklus adsorpsi-desorpsi, jumlah (kuantitas) adsorbat (polutan) yang diadsorpsi dan didesorpsi dihitung; dan efisiensi desorpsi (atau persentase desorpsi) dan jumlah yang didesorpsi (mg/g) dihitung menggunakan Persamaan (14) berikut:

$$\text{Efisiensi desorpsi (\%)} = \frac{C_{\text{des}}}{C_{\text{ads}}} \times 100\% \quad (14)$$

di mana, C_{des} adalah konsentrasi adsorbat yang didesorpsi dalam mg/g, C_{ads} adalah konsentrasi adsorbat yang diadsorpsi dalam mg/g, m adalah jumlah adsorben dalam gram dan V adalah volume larutan desorpsi dalam liter (Patel, 2021).

2.11. Karakterisasi

Karakterisasi merupakan proses yang penting dalam ilmu material dan teknik yang digunakan untuk memahami sifat dan perilaku suatu bahan. Ini mencakup berbagai teknik dan metode yang dirancang untuk mengungkap informasi rinci tentang struktur, komposisi, sifat fisik, kimia, dan mekanik material. Tujuan dari karakterisasi adalah menentukan struktur dan komposisi, mengidentifikasi sifat fisik dan kimia, menilai sifat mekanik, melihat sifat optik, mempelajari perubahan fasa dan termal, dan mengetahui mikrostruktur dan kristalin.

2.11.1. Analisis Proksimat

Analisis proksimat pada karbon aktif bertujuan untuk menentukan komposisi kimia dasar dari sampel karbon aktif. Analisis ini biasanya meliputi pengukuran beberapa parameter penting seperti kadar air, kadar abu, kadar zat mudah menguap, dan kadar karbon tetap.

a. Penentuan Kadar Air

Salah satu sifat kimia dari arang aktif yang mempengaruhi kualitas arang aktif yaitu kadar air. Kadar air menunjukkan jumlah air yang ada dalam karbon aktif. Kadar air yang tinggi dapat mengurangi efisiensi karbon aktif karena ruang pori yang terisi oleh air akan mengurangi kapasitas penyerapan. Kadar air ditentukan berdasarkan prosedur (Aziz dkk., 2019) dengan menimbang 5 g karbon aktif komersial, kemudian dikeringkan pada oven dengan suhu 105°C sampai beratnya konstan (± 1 jam). Selanjutnya karbon aktif ini dimasukkan ke dalam desikator sampai beratnya konstan, kemudian ditentukan kadar air (KA) dalam persen (%). Kadar air dapat dihitung menggunakan Persamaan (15) sebagai berikut (Inegbedion *end* Ikpoza, 2023) :

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

Dimana:

W1 = Berat awal sampel

W2 = Berat akhir sampel

b. Penentuan Kadar Zat Menguap

Penentuan zat menguap dilakukan untuk mengetahui zat-zat yang akan terurai atau menguap pada pemanasan awal sebelum karbonisasi sempurna (Aziz dkk., 2019). Komponen yang terdapat dalam arang aktif adalah air, abu, karbon terikat, nitrogen, dan sulfur. Besarnya kadar zat mudah menguap mengarah kepada kemampuan daya serap arang aktif. Sehingga semakin kecil zat mudah menguap arang aktif, maka semakin baik arang aktif dalam adsorban logam berat. Untuk menentukan kadar menguap di siapkan 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 (Aziz dkk., 2019). Kadar zat menguap dapat dihitung menggunakan (Persamaan 16) (Inegbedion *end* Ikpoza, 2023) :

$$\text{Kadar zat menguap \%} = \frac{W2-W3}{W3} \times 100\% \quad (16)$$

Dimana:

W2 = Berat sampel yang dikeringkan dalam oven

W3 = Berat sampel setelah 15 menit dalam tanur

c. Penentuan Kadar Abu

Selain kadar air dan kadar zat menguap, parameter lain yang juga mempengaruhi kualitas arang aktif adalah kadar abu (Aziz dkk., 2019). Kadar abu tersebut akan menunjukkan kandungan mineral yang terkandung dalam arang aktif. Kadar abu merupakan persentase berat oksida-oksida mineral dalam karbon seperti silikon, sulfur, kalsium, dan komponen lain yang tertinggal pada saat pemanasan dalam jumlah kecil. Penentuan kadar abu bertujuan untuk menentukan kandungan oksida logam yang masih terdapat

dalam karbon aktif tempurung kelapa setelah melalui proses aktivasi (Susmanto dkk., 2020). Setelah dihitung kadar zat menguapnya, karbon aktif dimasukan kembali ke dalam tanur dari suhu kamar sampai 800°C selama 1 jam. Lalu dapat ditentukan dengan Persamaan (17) sebagai berikut (Inegbedion *end* Ikpoza, 2023) :

$$\text{Kadar abu } 100\% = \frac{W_4}{W_2} \times 100\% \quad (17)$$

Dimana:

W_4 = Berat sampel setelah dimasukan dalam tanur 800°C

W_2 = Berat sampel yang dikeringkan dalam oven

d. Penetapan Kadar Karbon Terikat

Karbon dalam arang adalah zat yang terdapat pada fraksi hasil pirolisis selain abu (zat organik) dan zat-zat atsiri yang masih terdapat pada pori-pori arang. Penentuan kadar karbon terikat bertujuan untuk mengetahui kandungan karbon setelah proses karbonisasi dan aktivasi. Sehingga semakin tinggi kadar karbon terikat, maka arang aktif tersebut akan lebih baik dalam adsorban logam berat. Kadar karbon terikat dihitung dari nilai kadar zat mudah menguap dan kadar abu (Aziz dkk., 2019). Menurut (Muhajir dkk., 2022) kadar katbon terikat dapat ditentukan dengan Persamaan (18):

$$\text{Karbon terikat } \% = 100\% - (\% \text{ kadar menguap} + \% \text{ kadar abu}) \quad (18)$$

e. Daya Serap Karbon Terhadap Iodin

Penetapan daya serap iodium arang aktif bertujuan untuk mengetahui kemampuan arang aktif untuk menyerap larutan berwarna dengan ukuran molekul tidak lebih dari $10 \text{ \AA}$ atau 1 nm. Sehingga semakin besar daya serap iodium atau lebih besar dari 750. Nilai daya serap iodium yang tinggi menggambarkan banyaknya struktur mikropori yang terbentuk. Besarnya nilai daya serap iodium arang aktif diakibatkan oleh ikatan C dan H yang terlepas dengan sempurna sehingga terjadi pergeseran plat karbon kristalit

membentuk pori yang baru dan mengembangkan pori yang sudah terbentuk (Aziz dkk., 2019). Daya serap iodine dapat dihitung dengan Persamaan (19):

$$\text{Bil iod} = \frac{25}{10} \times \frac{(V_{\text{blanko}} - V_{\text{sampel}}) \times N \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \times \text{BE I}_2}{m_{\text{sampel}}} \quad (19)$$

Dimana :

V_{blanko} = Volume blanko (mL)

V_{sampel} = Volume sampel (mL)

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

BE I_2 = Berat ekivalen I_2 (mg/meq)

m_{sampel} = massa karbon aktif (g)

f. Penentuan pH *Point Zero Charge*

pH *Point Zero Charge* (pH PZC) adalah suatu keadaan pada saat permukaan bermuatan netral. PZC adalah titik perpotongan antara kurva pH awal dan kurva pH akhir. Pada pH ini, gugus fungsional pada permukaan karbon aktif tidak lagi berkontribusi terhadap pH suspensi. Proses ini melibatkan pengukuran pH suspensi karbon aktif dalam berbagai pH yang berbeda, kemudian plot kurva pH awal terhadap pH akhir untuk menemukan titik temu yang merupakan PZC (*Point Zero Charge*). Seperti penelitian yang dilakukan oleh (Ximenes *et al.*, 2017) dari penelitian diperoleh hasil PZC untuk karbon aktif terletak pada pH 5,6 dan daun kopi kering terletak pada pH 6,5.

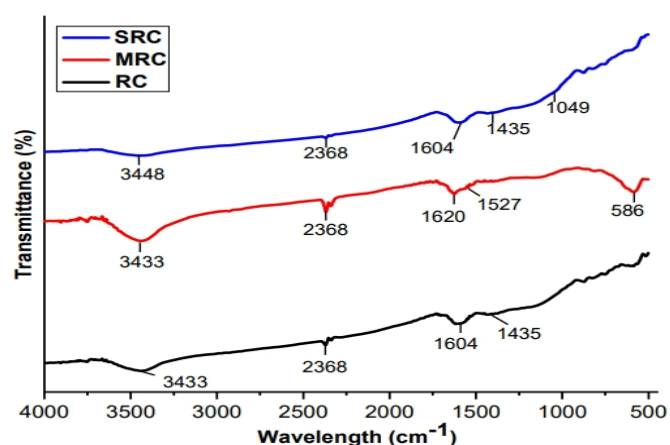
$$\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{akhir}} - \text{pH}_{\text{awal}} \quad (20)$$

2.11.2. Spektroskopi *Fourier Transform Infra Red* (FTIR)

Analisis yang sering digunakan dalam identifikasi karakteristik gugus fungsi adalah dengan spektroskopi *Fourier Transform Infra Red* (FTIR). Spektroskopi FTIR merupakan teknik analisis yang sangat berguna dan banyak dimanfaatkan dalam analisa berbagai produk pangan dikarenakan analisisnya relatif cepat, hasil pengukuran yang akurat, preparasinya yang tidak terlalu rumit dan mudah dikerjakan oleh siapa saja tanpa perlu keahlian khusus.

Spektroskopi FTIR mampu membedakan spektrum dari dua sampel yang berbeda berdasarkan karakteristik struktur intramolekulernya dimana kemampuan menyerap cahaya dari suatu senyawa akan berbeda bergantung pada sifat fisikokimia, ikatan antar atom dalam senyawa dan karakteristik gugus fungsinya (Siregar dkk., 2015). Metode ini didasarkan pada interaksi antara radiasi infra merah dengan materi (interaksi atom atau molekul dengan radiasi elektromagnetik). Interaksi ini berupa absorbansi pada frekuensi atau panjang gelombang tertentu yang berhubungan dengan energi transisi antara berbagai keadaan energi vibrasi, rotasi dan molekul.. Prinsip kerja FTIR adalah mengenali gugus fungsi suatu senyawa dari absorbansi inframerah yang dilakukan terhadap senyawa tersebut (Sjahfirdi dkk., 2015).

Pada penelitian (Fajriyah *et al.*, 2023) telah mengkarakterisasi karbon cangkang karet termodifikasi magnetit dan silan seperti pada (Gambar 12) yang menunjukkan gugus hidroksil (OH) yang terlihat dari puncak pada bilangan gelombang 3433 cm^{-1} , dan Fe-O ditunjukkan dengan serapan pada bilangan gelombang 586 cm^{-1} yang menunjukkan bahwa Fe_3O_4 telah melapisi RC. Puncak pada 2368 , 1620 dan 1604 cm^{-1} berhubungan dengan vibrasi C H dan gugus C=C. Puncak pada 1435 dan 1527 cm^{-1} berhubungan dengan gugus C=C aromatik. Selain itu, keberadaan Si-O-Si ditunjukkan dengan serapan pada bilangan gelombang 1049 cm^{-1} yang menunjukkan bahwa RC telah dilapisi dengan TEPS.

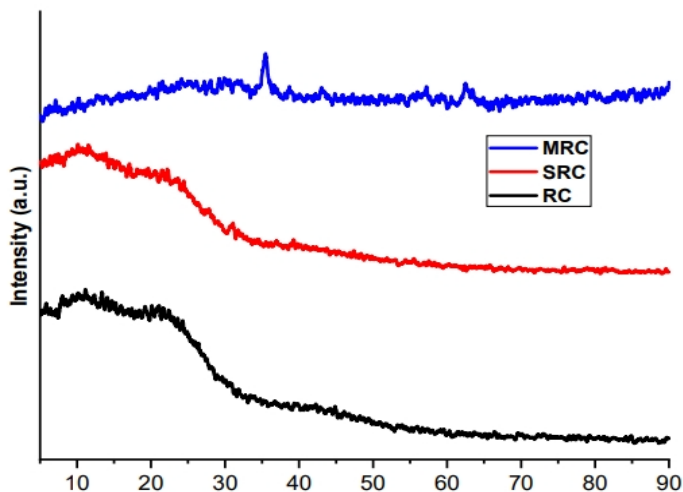


Gambar 11. Spektra FTIR karbon aktif dari cangkang buah karet (Fajriyah *et al.*, 2023).

2.11.3. X-Ray Diffraction (XRD)

Spektroskopi difraksi sinar-X (*X-ray diffraction/XRD*) merupakan salah satu metoda karakterisasi material paling sering digunakan hingga sekarang. Teknik ini 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 (Putama Mursal, 2018).

Berdasarkan penelitian (Fajriyah *et al.*, 2023) Pola XRD pada RC menunjukkan puncak asimetris yang lebar pada 2θ 20–45°, yang merupakan ciri karbon amorf. Berdasarkan (Gambar 11), MRC menunjukkan puncak yang tajam dibandingkan dengan RC pada 2θ 35,46, 43,04, 57,22, dan 62,58°. Puncak RC yang asimetris berubah menjadi puncak yang tajam pada pola MRC XRD, yang menunjukkan bahwa RC telah dilapisi dengan magnetit sehingga puncaknya muncul dengan intensitas yang tajam. Pola difraksi SRC pada 2θ 20–30° menunjukkan puncak yang lebar, yang menunjukkan adanya silika amorf yang terbentuk pada permukaan RC. Silika amorf diperoleh dengan hidrolisis TEPS.

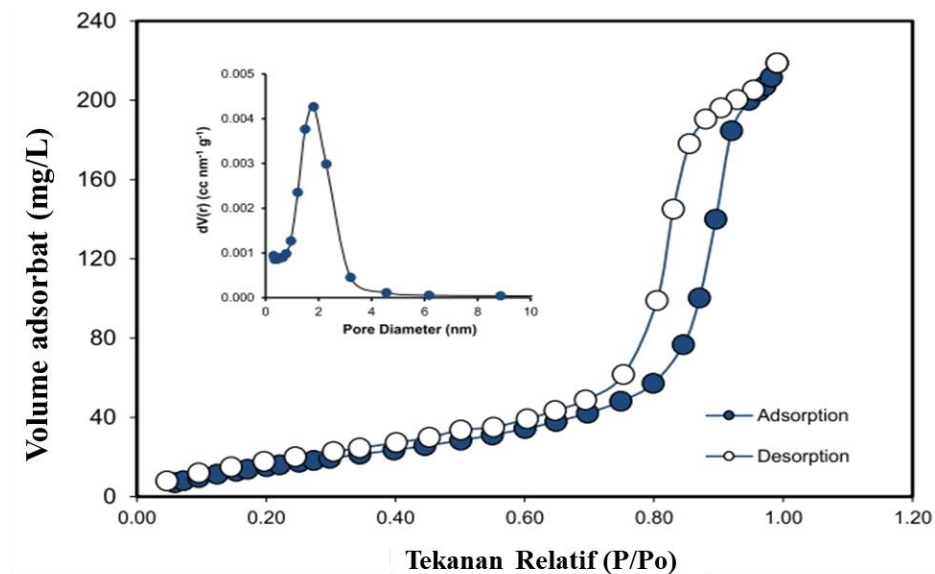


Gambar 12. Spektra XRD karbon aktif (Fajriyah *et al.*, 2023).

2.11.4. Brunauer–Emmett–Teller (BET) *Surface Area*

Luas permukaan karbon aktif sebagai adsorben merupakan salah satu parameter yang penting. Karbon aktif dapat dikatakan sebagai adsorben yang baik jika memiliki luas permukaan yang tinggi. Hal ini karena luas permukaan adsorben merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi proses adsorpsi. Luas permukaan pada umumnya diukur dengan metode BET dengan gas nitrogen (Sudibandriyo dan Lydia, 2018). *Surface area* (BET) dari arang yang dihasilkan juga bergantung pada sifat-sifat bahan baku mentah yang diambil. Luas permukaan karbon aktif yang baik yaitu berkisar antara 300-2000 m²/g, disebabkan oleh struktur pori yang dimilikinya. Pori-pori ini lah yang membuat karbon aktif memiliki kemampuan untuk menyerap.

Penelitian yang dilakukan oleh (Buhani *et al.*, 2019) telah berhasil mengkarakterisasi adsorben Alga *Spirulina* sp. termodifikasi silan menggunakan BET seperti pada (Gambar 13) terlihat bahwa pola isoterm adsorpsi-desorpsi N₂ pada mengikuti pola isoterm adsorpsi-desorpsi gabungan tipe I dan IV. Pola isoterm adsorpsi tipe I terjadi pada daerah P/P₀ rendah, terlihat bentuk isoterm cenderung mendatar. Pola isoterm tipe I hanya membentuk satu lapisan adsorbat dan hanya terjadi pada proses kemisorpsi. Pola adsorpsi isoterm tipe IV terjadi pada daerah P/P₀ tinggi dengan *loop* histeresis H1 yang menunjukkan material mesopori. Volume adsorbat pada semua isoterm meningkat relatif tajam terhadap (P/P₀) sekitar 0,8 yang menunjukkan kondensasi kapiler nitrogen pada struktur mesopori beraturan. Distribusi ukuran pori yang diperoleh dari cabang adsorpsi isoterm menunjukkan ukuran pori yang paling mungkin berpusat pada 3,2 nm. Luas permukaan BET adalah 90 m² g⁻¹ dengan total volume pori 0,26 mL g⁻¹ sedangkan diameter pori rata-rata adalah 4,7 nm yang termasuk dalam skala mesopori (2–50 nm).

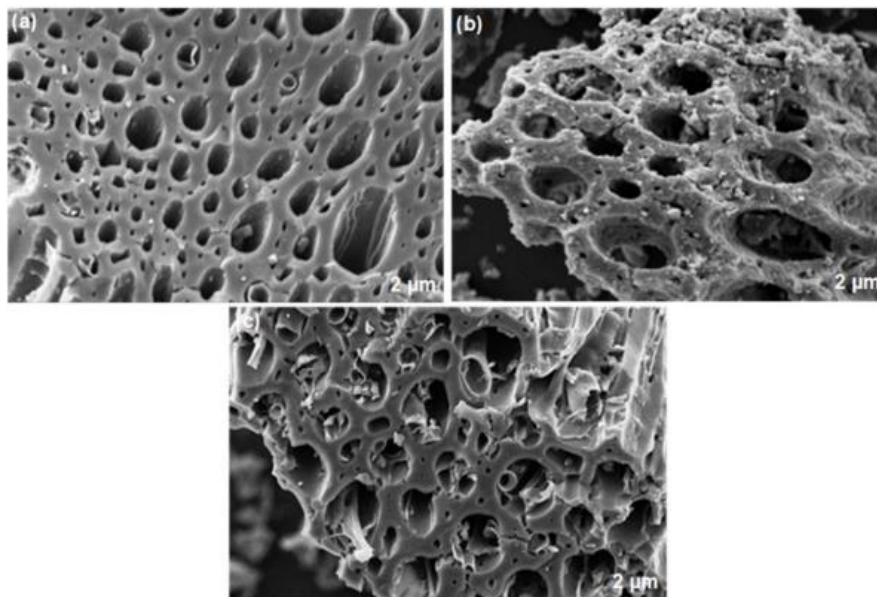


Gambar 13. Isoterm adsorpsi-desorpsi dan distribusi ukuran pori adsorben.

2.11.5. *Scanning Electron Microscope With Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDX)*

SEM (*Scanning Electron Microscope*) – EDX (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*) merupakan metode yang secara luas digunakan untuk pengamatan morfologi permukaan, struktur, dan pemetaan kandungan berbagai jenis sampel mulai dari bahan alam, organik, anorganik, polimer, logam hingga sampel biologi. Metode pengamatan ini menggunakan berkas elektron pancaran energi tinggi untuk memindai objek sehingga menghasilkan citra dan komposisi sampel. Berkas elektron yang digunakan sebagai sumber memiliki panjang gelombang puluhan ribu kali lebih pendek dari panjang gelombang cahaya tampak sehingga citra yang dihasilkan metode ini memiliki resolusi dan detail gambar yang lebih baik daripada mikroskop optik.

SEM-EDX adalah alat yang dapat digunakan untuk analisis kuantitatif dan kualitatif elemen yang didasarkan pada analisis spektral radiasi sinar-X karakteristik yang dipancarkan dari atom sampel pada iradiasi dengan berkas elektron yang difokuskan dari SEM (Julinawati dkk., 2015). Tujuan analisa SEM-EDX pada produk karbon aktif adalah untuk mengetahui permukaan karbon aktif yang dihasilkan dan kandungan didalamnya.



Gambar 14. Hasil karakterisasi SEM (Fajriyah *et al.*, 2023).

Adapun penelitian (Fajriyah *et al.*, 2023) yang telah mengkarakterisasi karbon dari cangkang buah karet termodifikasi magnetit dan agen silan pada (Gambar 14) dengan morfologi MRC (*Magnetit Ruber Carbon*) dapat dilihat pada Gambar 15(b) Permukaan MRC tampak lebih kasar dibandingkan permukaan RC (*Ruber Carbon*). Butiran magnetit telah melapisi seluruh permukaan RC. Data EDX mendukung hal ini. Komposisi unsur C, O, dan Fe masing-masing adalah 65,97, 30,95, dan 3,08%. Selain itu, diameter pori MRC sekitar 2,05–6,45 µm, lebih kecil dibandingkan diameter RC yang memiliki diameter pori sekitar 3,52–9,38 µm. Temuan ini menunjukkan bahwa Fe_3O_4 telah melekat sempurna pada permukaan RC. Partikel Fe_3O_4 melapisi seluruh permukaan karbon, termasuk pori-pori karbon, sehingga pori-pori karbon menjadi lebih sempit, sehingga diameter pori karbon menjadi lebih kecil. Morfologi permukaan SRC (*Silan Ruber Carbon*) pada Gambar 14(c) menunjukkan adanya partikel silika putih kecil hasil modifikasi TEPS dan menempel pada pori-pori RC. Karena kurangnya permukaan teroksigenasi dari RC, TEPS tidak sepenuhnya menutupi pori-pori RC. Hasil analisis EDX menunjukkan komposisi unsur C, O, dan Si masing-masing adalah 90,43, 9,45, dan 0,13%. Dari data EDX, dapat dilihat bahwa TEPS telah melapisi permukaan RC.

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat

Penelitian ini telah dilakukan dari bulan Oktober 2024 hingga Februari 2025 di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Universitas Lampung. Pengambilan cangkang kelapa sawit dilakukan di PT. Anak Tuha Sawit Mandiri Lampung Tengah. Analisis gugus fungsi pada adsorben dengan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dilakukan di Laboratorium Kimia Organik Departemen Kimia FMIPA Universitas Gadjah Mada. Analisis permukaan adsorben dan komposisi yang terkandung dengan *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan di Laboratorium Kimia Analitik Departemen Kimia, FMIPA, Universitas Negeri Yogyakarta. Analisis luas permukaan BET dilakukan di Laboratorium terpadu UPN Vetean Yogyakarta. Analisis permukaan adsorben dengan *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX) dilakukan di Universitas Muhamadiyah Yogyakarta. Penentuan kadar zat warna RhB dan MB menggunakan Spektrofotometer UV-Vis dilakukan Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Universitas Lampung.

3.2. Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini antara lain alat-alat gelas, pipet tetes, spatula, shaker, neraca analitik, pengaduk magnet, oven, mortar alu, batang pegaduk, desikator, sentrifuse, pH meter, ayakan 100 mesh, tanur, hot plate, awan porselen, Spektrofotometer UV Vis tipe *Cary Series*, Spektrofotometer IR tipe

thermo scientific nicolet iS10, Microscopy With Energi Dispersive X-Ray (XRD), BET tipe Quantachrome NOVA 1200e dan SEM-EDX tipe Rigaku Miniplex 600.

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu cangkang kelapa sawit hasil pirolisis, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, akuades, NaOH, etanol, APTES, KNO_3 , toluena, H_3PO_4 , kertas saring, pH indikator universal, dan aluminium foil.

3.3. Prosedur Penelitian

3.3.1. Preparasi Karbon

Tempurung kelapa sawit yang diperoleh dari PT. Anak Tuha Sawit Mandiri Lampung Tengah dibersihkan dan dikeringkan di bawah sinar matahari. Tempurung kelapa sawit yang telah bersih selanjutnya dipirolisis selama kurang lebih 6 jam sehingga diperoleh karbon tempurung kelapa sawit. Karbon yang diperoleh selanjutnya dihaluskan menggunakan alat penggiling lalu diayak dengan ayakan (*siever*) berukuran 100 mikron.

3.3.2. Aktivasi Karbon Hasil Pirolisis

Karbon yang telah diayak selanjutnya diaktivasi secara fisika dengan cara memasukan karbon kedalam tanur dengan suhu 700°C kurang lebih 1 jam untuk menghasilkan Karbon Pirolisis Aktif (KPA). KPA dihaluskan hingga ukuran mikrometer (μm), selanjutnya dilakukan penghalusan kembali, untuk mendapatkan ukuran karbon aktif berukuran nanopartikel sebelum dilanjutkan ke tahap berikutnya.

3.3.3. Analisis Proksimat

Analisis proksimat dilakukan dengan menentukan % kadar air, % kadar zat menguap, % kadar abu, % kadar karbon terikat dan daya serap terhadap iodin.

a. Penentuan Kadar Air

Langkah awal adalah menimbang 5 g karbon aktif, kemudian dikeringkan pada oven dengan suhu 105°C sampai beratnya konstan (± 1 jam).

Selanjutnya karbon aktif ini dimasukkan kedalam desikator sampai beratnya konstan, kemudian tentukan kadar air dalam %.

b. Penentuan Kadar Zat Menguap

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

c. 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.

d. 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.

e. Daya Serap Karbon Terhadap Iodin

Sebanyak 0,5 g karbon aktif yang belum dan sesudah diaktivasi dimasukkan kedalam Erlenmeyer yang tertutup. Kemudian dimasukkan 25 mL larutan iodin 0,125N dan diaduk selama 15 menit dan disimpan selama 2 jam. Larutan ini disaring dan kemudian dipipet 10 mL lalu dimasukkan kedalam Erlenmeyer. Larutan ini dititrasi dengan natrium tiosulfat sampai warna kuning pada larutan mulai samar. Setelah itu ditambahkan amilum 1% sebagai indikator

dan larutan kemduain dititrasi Kembali hingga warna biru tua menjadi warna bening. Penentuan daya serap karbon terhada idoin dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali dan dihitung volume natrium tiosulfat.

f. Penentuan Nilai Zeta Potensial

Adsorben KP, KPA, KPA-M, KPA-MS masing-masing sebanyak 0,1 g dimasukan kedalam 20 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 diaduk menggunakan pengaduk (*shaker*) selama 24 jam. Setelah itu diukur dengan pH meter dan dicatat pH akhir.

3.3.4. Modifikasi Karbon dengan Magnetit

Pembuatan karbon aktif magnetit dilakukan sesuai dengan prosedur (Buhani *et al.*, 2021) dengan mereaksikan sebanyak 32,5 g KPA dicampurkan dalam 900 mL akuades dipanaskan sampai suhu 70°C . Kemudian ditambahkan 38 g $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan 19,5 g $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ yang dilarutkan ke dalam 900 mL akuades. Campuran tersebut diaduk selama 30 menit sambil ditambahkan 500 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°C selama 3 jam, sehingga diperoleh karbon aktif magnetit (KPA-M). Material KPA-M dihaluskan hingga ukuran mikro meter (μm), selanjutnya dilakukan penghalusan kembali, untuk mendapatkan KPA-M ukuran berukuran nano partikel sebelum dilanjutkan ke tahap berikutnya.

3.3.5. Modifikasi Karbon dengan Silanisasi

Pembuatan karbon termodifikasi silan (KPA-MS) dilakukan sesuai dengan prosedur yang telah dikembangkan oleh (Buhani *et al.*, 2023) menggunakan karbon dari cangkang kelapa sawit. Pada eksperimen ini dilakukan optimasi prosedur pembuatan KPA-MS. Proses silanisasi dari KPA-M dilakukan dengan

mencampurkan 50 g KPA-M ditambahkan ke dalam 500 mL larutan APTES (30% (vol) dalam toluene) 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 KPA-MS.

3.3.6. Karakterisasi Adsorben

Adsorben KP, KPA, KPA-M, dan KPA-MS masing-masing di karakterisasi dengan FTIR untuk mengetahui gugus fungsi karbon, XRD untuk mengetahui tingkat kristalin karbon dan pelapisan magnetit pada karbon. Karakterisasi dengan *surface area* BET untuk mengetahui luas permukaan karbon aktif. SEM-EDX untuk mengetahui ukuran adsorben dan komposisi unsur yang terkandung.

3.3.7. Preparasi Adsorbat

a. Pembuatan Larutan Induk RhB dalam ppm

Sebanyak 1 g serbuk RhB dimasukan ke dalam labu ukur yang berbeda dengan ukuran 1000 mL, kemudian ditambahkan akuades hingga batas tera lalu dihomogenkan.

b. Pembuatan Larutan Induk MB dalam ppm

Sebanyak 1 g serbuk MB dimasukan kedalam labu ukur dengan ukuran 1000 mL, kemudian ditambahkan akuades hingga tanda batas lalu dihomogenkan sehingga diperoleh adsorbat MB 1000 ppm.

c. Penentuan Panjang Gelombang Maksimum Adsorbat

Zat warna RhB dan MB dengan konsentrasi 10 ppm diukur panjang gelombang maksimumnya pada rentang 400-800 nm menggunakan spektrofotometri UV-Vis.

3.3.8. Uji Adsorpsi

a. Penentuan Dosis Adsorben

Sebanyak 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; dan 1 g adsorben KPA-M dan KPA-MS dimasukkan masing-masing ke dalam 5 Erlenmeyer berisi 25 mL larutan RhB dan MB 10 ppm. Campuran tersebut diaduk menggunakan alat pengaduk selama 1 jam. Setelah itu larutan dipisahkan dengan teknik sentrifugasi selama 30 menit. Filtrat yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis.

b. Penentuan Variasi pH

Sebanyak 25 mL larutan RhB dan MB 10 ppm disiapkan dalam 8 Erlenmeyer berbeda dengan variasi pH 3-10. Penambahan HCl 0,1 M dilakukan untuk menurunkan pH dan peningkatan pH dilakukan dengan penambahan NaOH 0,1 M. Lalu ditambahkan larutan buffer (buffer asetat untuk pH 3,4, dan 5, buffer fosfat untuk pH 6-12) kemudian ditambah adsorben pada dosis optimum. Setelah itu, larutan diaduk menggunakan alat pengaduk selama 1 jam dengan kecepatan 100 rpm. Lalu larutan dipisahkan dengan teknik sentrifugasi selama 30 menit. Filtrat yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis (Buhani *et al.*, 2017).

c. Penentuan Variasi Waktu Kontak

Sebanyak 25 mL larutan RhB dan MB 10 ppm pada kondisi pH optimum dimasukkan ke dalam 7 erlenmeyer lalu ditambahkan masing-masing adsorben pada dosis optimum kemudian diaduk menggunakan alat pengaduk dengan variasi waktu yaitu 0, 15, 30, 45, 60 dan 120 menit. Setelah itu larutan dipisahkan dengan teknik sentrifugasi selama 30 menit. Filtrat yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis (Buhani *et al.*, 2017).

d. Penentuan Variasi Konsentrasi

Sebanyak 25 mL larutan RhB dan MB 10 ppm pada kondisi pH optimum dengan variasi konsentrasi, yaitu 0, 25, 50, 100, 200, 300 dan 400 ppm masing-masing dimasukkan ke dalam 8 Erlenmeyer lalu ditambahkan adsorben pada dosis optimum, kemudian diaduk menggunakan alat pengaduk pada waktu kontak optimum. Setelah itu larutan dipisahkan dengan teknik sentrifugasi selama 30 menit. Filtrat yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis (Buhani *et al.*, 2017).

3.3.9. Desorpsi

Sebanyak masing-masing 25 mL larutan RhB dan MB 10 ppm pada kondisi pH dan konsentrasi optimum dimasukkan ke dalam Erlenmeyer lalu ditambahkan adsorben dengan dosis optimum. Lalu larutan tersebut di-*shaker* pada waktu optimum dengan kecepatan 100 rpm. Selanjutnya larutan dan adsorben disentrifugasi dan dipisahkan dengan cara dekantasi. 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 akuades, 25 mL etanol 40% untuk ikatan hidrogen, 25 mL larutan KNO_3 0,1 M untuk pertukaran ion, dan 25 mL larutan HCl 0,1 M untuk interaksi elektrostatik.

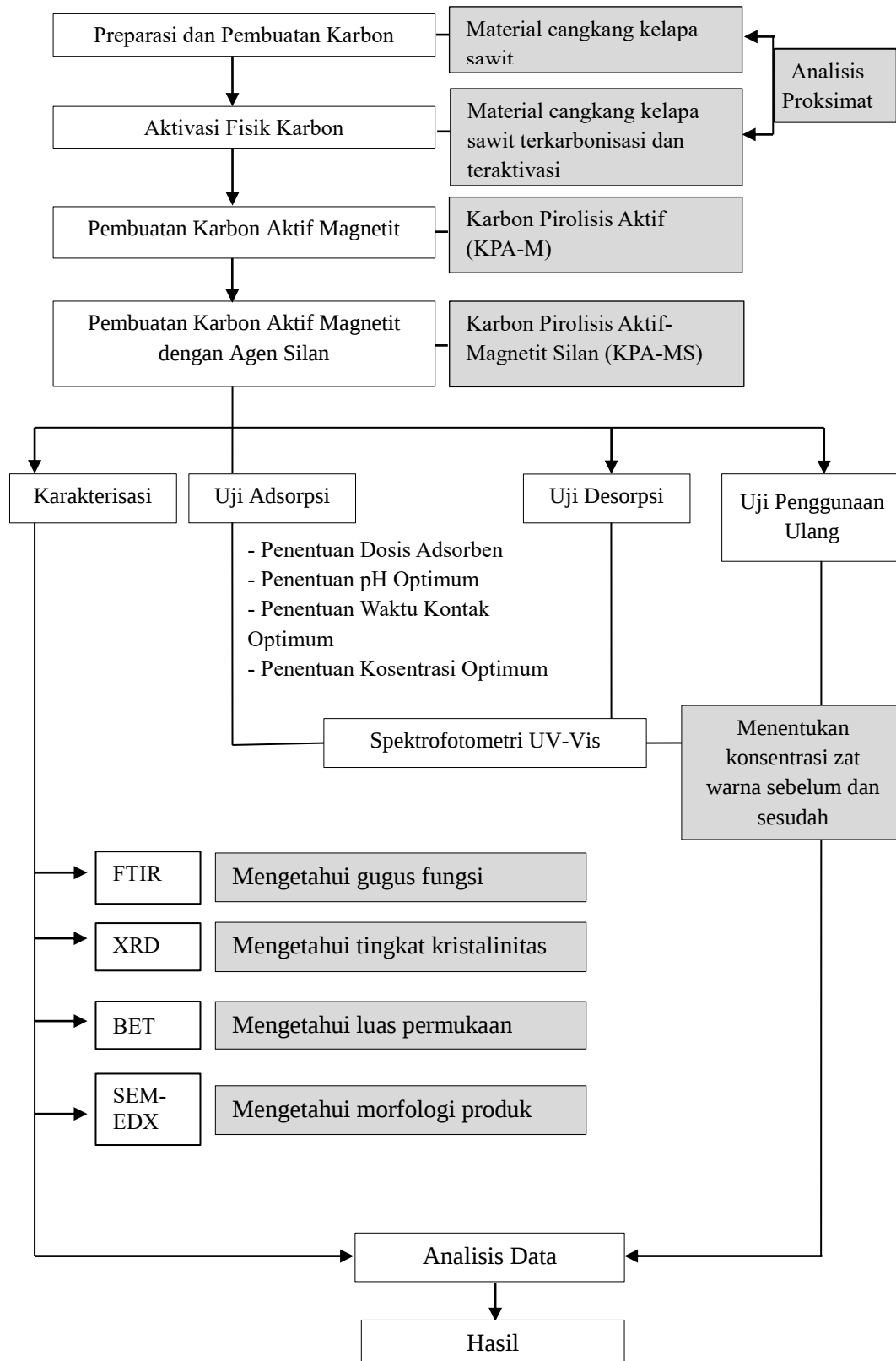
3.3.10. Penggunaan Ulang Adsorben

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. Lalu larutan tersebut di-*shaker* 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 digunakan lagi untuk mengadsorpsi MB hingga 5 kali penggunaan ulang.

3.4. Diagram Alir

Secara menyeluruh alur penelitian ini dapat digambarkan pada diagram penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 15.



Gambar 15. Diagram Alir Penelitian.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

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

1. Modifikasi adsorben karbon dari cangkang kelapa sawit menggunakan magnetit dan agen silan (3-*Aminopropyl*)-*triethoxysilane* telah berhasil dilakukan yang ditunjukkan dengan karakterisasi FTIR, XRD dan SEM-EDX.
2. Adsorpsi zat warna RhB oleh KPA-M dan KPA-MS optimum pada dosis adsorben 0,4 g, pH 9, waktu kontak 60 menit untuk KPA-M dan 30 menit untuk KPA-MS dengan konsentrasi 400 ppm, sedangkan untuk MB optimum pada dosis 0,4 g untuk KPA-M dan 0,2 untuk KPA-MS, pH 10, waktu kontak 60 menit dan konsentrasi 400 ppm.
3. Laju adsorpsi RhB dan MB oleh KPA-M dan KPA-MS cenderung mengikuti model kinetika pseudo orde dua.
4. Isoterm adsorpsi RhB dan MB oleh KPA-M dan KPA-MS cenderung mengikuti model isoterm Freundlich dengan harga koefisien korelasi (R^2) mendekati satu.
5. Penggunaan ulang adsorben KPA-M dan KPA-MS cukup efektif digunakan kembali sebanyak 5 kali siklus pengulangan dengan efektivitas adsorpsi sebesar >80%.

5.2. Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka untuk penelitian selanjutnya dapat disarankan hal sebagai berikut :

1. Melakukan uji adsorpsi terhadap adsorbat lain yang bermuatan kationik untuk mengetahui keefektivan proses adsorpsinya dan mempelajari lebih lanjut mengenai mekanisme adsorpsi.
2. Menggunakan agent *coupling* silan lain selain yang digunakan pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Toham, R., Ali, S. S., Li, F., Okasha, K. M., Mahmoud, Y. A.-G., Elsamahy, T., Jiao, H., Fu, Y., and Sun, J. 2022. A critical review on the treatment of dye containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 231, 113160.
- Amelia, S., dan Mufrodi, Z. 2019. Uji aktivitas adsorben karbon aktif tempurung kelapa termodifikasi dengan active site Fe_2O_3 . *CHEMICA: Jurnal Teknik Kimia*, 5(2), 51.
- Anggriani, U. M., Hasan, A., dan Purnamasari, I. 2021. Kinetika adsorpsi karbon aktif dalam penurunan konsentrasi logam tembaga (Cu) dan timbal (Pb) *Jurnal Kinetika*, 12(02), 29–37.
- Arkles, B., and Goff, J. 2004. Silanes and Silicones for Epoxy Resins. *Gelest*, March.
- Aziz, M. R., Siregar, A. L., Rantawi, A. B., dan Rahardja, I. B. 2019. Pengaruh jenis perekat pada briket cangkang kelapa sawit terhadap waktu bakar. *Prosiding SEMNASTEK Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Jakarta*, 141–152.
- Azzahra, R. F., dan Taufik, M. 2020. Bio-adsorben berbahan dasar limbah ampas teh (*Camellia Sinensis*) sebagai agent penyerap logam berat Fe dan Pb pada air sungai. *Jurnal Kinetika*, 11(01), 65–70.
- Benkhaya, S., M'rabet, S., and El Harfi, A. 2020. A review on classifications, recent synthesis and applications of textile dyes. *Inorganic Chemistry Communications*, 115(March), 107891.
- Bernard, E., Jimoh and Odigire, J. O. 2013. Heavy metals removal from industrial wastewater by activated carbon prepared from coconut shell. *Research Journal of Chemical Sciences*, 3(8), 3–9.
- 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 Pollut*, 234(9).

- Buhani, Hariyanti, F., Suharso, Rinawati, and Sumadi. 2019. Magnetized algae-silica hybrid from porphyridium sp. Biomass with Fe_3O_4 particle and its application as adsorbent for the removal of methylene blue from aqueous solution. *Desalination and Water Treatment*, 142, 331–340.
- Buhani, 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. *Desalination and Water Treatment*, 55(5), 1240–1252.
- Buhani, Permatasari, D., Suharso, and Aditya, I. 2020. Investigasi kinetika adsorpsi kristal violet dan metilen biru pada hibrida alga spirulina sp.-silika. *Seminar Nasional Ilmu Teknik Dan Aplikasi Industri (SINTA) 3*, 3, 1–5.
- Buhani, Puspitarini, M., Rahmawaty, Suharso, Rilyanti, M., and Sumadi. 2018. Adsorption of phenol and methylene blue in solution by oil palm shell activated carbon prepared by chemical activation. *Oriental Journal of Chemistry*, 34(4), 2043–2050.
- Buhani, Suharso, Aditiya, I., Al Kausar, R., Sumadi, and Rinawati. 2019. Production of a Spirulina sp. algae hybrid with a silica matrix as an effective adsorbent to absorb crystal violet and methylene blue in a solution. *Sustainable Environment Research*, 1(1), 1–11.
- Buhani, Suharso, Khuluk, R. H., and Rahmat, A. 2019. Removal of Methylene blue by adsorption onto activated carbon from coconut shell (*Cocos Nucifera* L.). *Indonesian Journal of Science and Technology*, 4(2), 229–240.
- 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. *Desalination and Water Treatment*, 218, 352–362.
- Buhani, Suharso, and Sembiring, Z. 2012. Immobilization of chetoceros sp microalgae with silica gel through encapsulation technique as adsorbent of Pb metal from solution. *Oriental Journal of Chemistry*, 28(1), 271–278.
- Chouchane, T., Abedghars, M. T., Chouchane, S., and Boukari, A. 2024. Improvement of the sorption capacity of methylene blue dye using slag, a steel by product. *Kuwait Journal of Science*, 51(2), 100210.
- Danish, M., Khanday, W. A., Hashim, R., Sulaiman, N. S. B., Akhtar, M. N., and Nizami, M. 2017. Application of optimized large surface area date stone (*Phoenix dactylifera*) activated carbon for rhodamin B removal from aqueous solution: Box-Behnken design approach. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 139(February), 280–290.
- Edward J. Dompeipen. 2017. Isolasi dan identifikasi kitin dan kitosan dari kulit udang windu (*Penaeus Monodon*) dengan spektroskopi inframerah. *Indonesian Journal of Industrial Research*, 13(1), 31–41.

- Ehiomogue, P., Ahuchaogu, I. I., dan Ahaneku, I. E. 2022. Review of adsorption isotherms models. *Acta Technica Corviniensis*, 14(4), 87–96.
- 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. *Indonesian Journal of Chemistry*, 23(1), 170–183.
- Fauzan, R., Suryani, S., Yuhanis, Y., Juanda, J., dan Diana, S. 2022. Penyisihan logam berat timbal pada air limbah industri menggunakan nano-karbon aktif terimpregnasi NaOH dan H_3PO_4 berbasis tempurung kelapa sawit. In *Prosiding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe* (Vol. 6, No. 1, pp. 191-195).
- Ganapathe, L. S., Mohamed, M. A., Yunus, R. M., and Berhanuddin, D. D. 2020. Magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles in biomedical application: From synthesis to surface functionalisation. *Magnetochemistry*, 6(4), 1–35.
- Habib, A., & Gusti, D. R. 2019. Sintesis dan karakterisasi magnetit terlapis dimerkaptosilika. *Chempublish Journal*, 4(2), 81-88.
- Harmiansyah, H., Dari, P. W., Wahyuni, S., Rahmawati, S. D., Wati, N. M. T., & Putri, A. K. 2023. Karakteristik arang dari cangkang kelapa sawit sebagai bahan dasar utama pembuatan biobriket. *Sultra Journal Of Mechanical Engineering*, 2(1), 29-36.
- Hartanto, S., dan Ratnawati. 2010. Pembuatan karbon aktif dari tempurung kelapa sawit dengan metode aktivasi kimia. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 12(1), 12–16.
- Inegbedion, F., and Ikpoza, E. 2023. Estimation of the moisture content, volatile matter, ash content, fixed carbon and calorific values of rice husk Briquettes. *June*, 1–9.
- Julinawati, Marlina, Rosnani Nasution, and Sheilatina. 2015. Applying Sem-Edx techniques to identify types of mineral of jades (Giok) takengofying theon, Aceh. *Jurnal Natural*, 15(2), 45–48.
- Junary, E., Pane, J. P., & Herlina, N. 2015. Pengaruh suhu dan waktu karbonisasi terhadap nilai kalor dan karakteristik pada pembuatan bioarang berbahan baku pelepah aren (*Arenga pinnata*). *Jurnal Teknik Kimia USU*, 4(2), 46-52.
- Khezami, L., dan Capart, R. 2005. Removal of chromium (VI) from aqueous solution by activated carbons: kinetic and equilibrium studies. *Journal of hazardous materials*, 123(1-3), 223-231.
- Lestari, I., Mahraja, M., Farid, F., Gusti, D. R., dan Permana, E. 2020. Penyerapan ion Pb (II) menggunakan adsorben dari limbah padat lumpur aktif pengolahan air minum. *Chemistry Progress*, 13(2).
- Liang, S., Chen, Y., Zhang, S., Cao, Y., Duan, J., Wang, Y., dan Sun, Z. 2020.

- RhB-encapsulating silica nanoparticles modified with PEG impact the vascular endothelial function in endothelial cells and zebrafish model. *Science of the Total Environment*, 711, 134493.
- Liu, Y., Li, Y., Li, X. M., and He, T. 2013. Kinetics of (3-aminopropyl)triethoxysilane (aPTES) silanization of superparamagnetic iron oxide nanoparticles. *Langmuir*, 29(49), 15275–15282.
- Martin, A., dan Nasruddin, N. 2015. Pembuatan dan karakterisasi karbon aktif berbahan dasar cangkang sawit dengan metode aktivasi fisika menggunakan rotary autoclave (Doctoral dissertation, Riau University).
- Meisrilestari, Y., Khomaini, R., dan Wijayanti, H. 2013. Pembuatan arang aktif dari cangkang kelapa sawit dengan aktivasi secara fisika, kimia dan fisika-kimia. *Konversi*, 2(1), 45.
- Miri, N. S. S., dan Narimo. 2022. Review : kajian persamaan isoterm Langmuir dan Freundlich pada adsorpsi logam berat Fe (II) dengan zeolit dan karbon aktif dari biomassa. *Jurnal Kimia Dan Rekayasa*, 2(2), 58–71.
- Misran, E., Supardan, M. D., Iryani, D. A., Pramananda, V., Sihombing, A. F., and Sitorus, D. V. 2024. Ultrasonic assisted adsorption of methylene blue using blood clam shell as a low-cost adsorbent. *Results in Engineering*, 23.
- Mousavi, M., and Fini, E. 2020. Silanization Mechanism of Silica Nanoparticles in Bitumen Using 3-Aminopropyl Triethoxysilane (APTES) and 3-Glycidyloxypropyl Trimethoxysilane (GPTMS). *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8(8), 3231–3240.
- Muhajir, A., Machdar, I., dan Mariana. 2022. Produksi karbon aktif arang tempurung kelapa menggunakan kombinasi metode aktivasi secara kimia dan steam tekanan rendah. *Jurnal Litbang Industri*, 2014(2), 73–81.
- Nasruddin, I., and Martin, A. 2014. Pembuatan dan karakterisasi karbon aktif berbahan dasar cangkang sawit dengan metode aktivasi fisika menggunakan rotary autoclave. *Jom Fteknik*, 1(2), 11.
- Nurkhasanah, S. 2024.. Penentuan Kinetika Adsorpsi Karbon Aktif Cangkang Sawit Dan Kulit Kopi Terhadap Zat Warna Metil Orange (Doctoral dissertation, UIN Ar-Raniry Fakultas Tarbiyah dan Keguruan).
- Patel, H. 2021. Review on solvent desorption study from exhausted adsorbent. *Journal of Saudi Chemical Society*, 25(8), 101302.
- Putama Mursal, I. L. 2018. Karakterisasi xrd dan sem pada material nanopartikel serta peran material nanopartikel dalam drug delivery system. *Pharma Xplore : Jurnal Ilmiah Farmasi*, 3(2), 214–221.
- Rahmi, R., dan Sajidah. 2017. Pemanfaatan adsorben alami (biosorben) untuk mengurangi kadar timbal(Pb) dalam limbah cair. *Prosiding Seminar Nasional Biotik*, 271–279.

- Rizki, R. G., Bahri, S., dan Ginting, Z. 2022. Pembuatan karbon aktif dari kulit dalam biji kopi (Endocarp) menggunakan aktivator KOH dan H_3PO_4 . *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 11(2), 183.
- Saleh, M. 2023. Pembuatan arang aktif dari cangkang kelapa sawit, tempurung kelapa, dan cangkang kakao dengan proses torefaksi. *Chem Engineering Journal*. 1, 1–15.
- Sari, F. I. P. 2017. Sintesis, karakterisasi nanopartikel magnetit, $\text{Mg}/\text{AlNO}_3^-$ hidrotalsit dan komposit magnetit-hidrotalsi. *Jurnal Kimia VALENSI: Jurnal Penelitian Dan Pengembangan Ilmu Kimia*, 3(1), 44–49.
- Siregar, Y. D. I., Heryanto, R., Lela, N., dan Lestari, T. H. 2015. Karakterisasi karbon aktif asal tumbuhan dan tulang hewan menggunakan FTIR dan analisis kemometrika. *Jurnal Kimia VALENSI*, 1(November), 103–116.
- Sjahfirdi, L., Aldi, N., Maheshwari, H., dan Astuti, P. 2015. Aplikasi fourier transform infrared (FTIR) dan pengamatan pembengkakan genital pada speises primata, lutung jawa (*Trachypithecus auratus*) untuk mendeteksi massa subur. *Jurnal Kedokteran Hewan - Indonesian Journal of Veterinary Sciences*, 9(2).
- Sudibandriyo, M., dan Lydia, L. 2018. Karakteristik luas permukaan karbon aktif dari ampas tebu dengan aktivasi kimia. *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*, 10(3), 149.
- Susmanto, P., Yandriani, Y., Dila, A. P., dan Pratiwi, D. R. 2020. Pengolahan zat warna direk limbah cair industri jumputan menggunakan karbon aktif limbah tempurung kelapa pada kolom adsorpsi. *JRST (Jurnal Riset Sains Dan Teknologi)*, 4(2), 77.
- Sypabekova, M., Hagemann, A., Rho, D., and Kim, S. 2023. Review: 3-Aminopropyltriethoxysilane (APTES) deposition methods on oxide surfaces in solution and vapor phases for biosensing applications. *Biosensors*, 13(1).
- Taufik, M., Suci, T., Kasih, D., dan Khair, M. 2021. Pembuatan karbon aktif cangkang kelapa sawit (*Elaeis guineensis*) dengan aktivator gelombang microwave. *10(1)*, 40–44.
- Viena, V., Bahagia, B., dan Afrizal, Z. 2019. Produksi karbon aktif dari cangkang sawit dan aplikasinya pada penyerapan zat besi, mangan dan ph air sumur. *Jurnal Serambi Engineering*, 5(1), 875–882.
- Wong, K. T., Yoon, Y., & Jang, M. (2015). Enhanced recyclable magnetized palm shell waste-based powdered activated carbon for the removal of ibuprofen: Insights for kinetics and mechanisms. *PloS one*, 10(10).
- X Ximenes, C., Sudiono, S., and S, T. 2017. Determination of point zero charge (PZC) active carbon and dried coffee leaves and its aplication for adsorption of Au(III) and Cu(II) .

- Yamaura, M., Camilo, R. L., Sampaio, L. C., Macêdo, M. A., Nakamura, M., and Toma, H. E. 2004. Preparation and characterization of (3-aminopropyl)triethoxysilane-coated magnetite nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 279(2–3), 210–217.
- Yuan, H., Chen, L., Cao, Z., and Hong, F. F. 2020. Enhanced decolourization efficiency of textile dye Reactive Blue 19 in a horizontal rotating reactor using strips of BNC-immobilized laccase: Optimization of conditions and comparison of decolourization efficiency. *Biochemical Engineering Journal*, 156(January), 107501.
- Yustinah, Hudzaifah, Aprilia, M., dan AB, S. 2019. Kesetimbangan Adsorpsi Logam Berat (Pb) Dengan Adorben Tanah Diomit. 8(2), 37–43.
- Zulaicha, A. S., Nusantara, C. S., & Setiajaya, A. (2024). Funcionalization magnetite activated carbon coating with silane agents as adsorbent for crystal violet and methyl orange dyes. *Analit: Analytical and Environmental Chemistry*, 9(02), 56-67.
- Zhi, L. L., and Zaini, M. A. A. 2020. One-step synthesis of magnetic activated carbons for methylene blue dye removal: Activation conditions and adsorption studies. *Desalination and Water Treatment*. 198 : 434–444.