

**KAJIAN ADSORPSI ZAT WARNA CONGO RED DAN METIL ORANYE
OLEH BIOMASSA *Nannochloropsis* sp. TERMODIFIKASI SURFAKTAN
KATIONIK**

(Skripsi)

Oleh

**TIARA ZALFA NUR'ALIFAH
NPM 2117011044**



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

ABSTRAK

KAJIAN ADSORPSI ZAT WARNA CONGO RED DAN METIL ORANYE OLEH BIOMASSA *Nannochloropsis* sp. TERMODIFIKASI SURFAKTAN KATIONIK

Oleh

TIARA ZALFA NUR'ALIFAH

Pada penelitian ini telah dilakukan adsorpsi zat warna *congo red* (CR) dan metil oranye (MO) oleh adsorben alga *Nannochloropsis* sp. yang telah dimodifikasi dengan CaCl_2 dan surfaktan kationik HDTMA-Br. Adsorben hasil modifikasi dikarakterisasi menggunakan spektrometer *Fourier Transform Infrared* (FTIR) untuk mengidentifikasi gugus fungsi dan *Scanning Electron Microscopy with Energi Dispersive X-Ray* (SEM-EDX) untuk menganalisis morfologi permukaan dan komposisi unsur dalam adsorben. Kadar zat warna CR dan MO dianalisis dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Adsorpsi zat warna CR dan MO optimum terjadi pada dosis Alga-N, Alga-N-Ca dan Alga-N-HDTMA sebanyak 0,2 g dan konsentrasi 400 ppm. Lebih lanjut pH optimum adsorpsi CR dari adsorben Alga-N, Alga-N-Ca dan Alga-N-HDTMA masing-masing adalah 8, 10 dan 7 sedangkan untuk MO adalah 9, 10 dan 8. Waktu kontak optimum untuk Alga-N dan Alga-N-Ca adalah 30 menit sedangkan untuk Alga-N-HDTMA 45 menit. Isoterm adsorpsi Alga-N dan Alga-N-Ca cenderung mengikuti model isoterm Freundlich, sementara Alga-N-HDTMA mengikuti model isoterm Langmuir. Adsorben Alga-N-HDTMA dapat digunakan secara berulang untuk adsorpsi CR hingga 3 siklus sedangkan untuk adsorpsi MO hingga 6 siklus dengan % teradsorpsi >50%.

Kata kunci: alga, *Nannochloropsis* sp., adsorpsi, desorpsi, surfaktan kationik.

ABSTRACT

ADSORPTION STUDY OF CONGO RED AND METHYL ORANGE DYES BY CATIONIC SURFACTANT-MODIFIED *Nannochloropsis* sp. BIOMASS

By

TIARA ZALFA NUR'ALIFAH

In this study, the adsorption of the dyes Congo Red (CR) and Methyl Orange (MO) was carried out using *Nannochloropsis* sp. algae modified with CaCl_2 and the cationic surfactant HDTMA-Br as adsorbents. The modified adsorbents were characterized using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) to identify functional groups and Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX) to analyze surface morphology and elemental composition. The concentrations of CR and MO dyes were determined using a UV-Vis spectrophotometer. Optimal adsorption of CR and MO occurred with 0.2 g of Alga-N, Alga-N-Ca, and Alga-N-HDTMA adsorbents at a dye concentration of 400 ppm. Furthermore, the optimum pH for CR adsorption using Alga-N, Alga-N-Ca, and Alga-N-HDTMA was 8, 10, and 7, respectively, while for MO it was 9, 10, and 8. The optimum contact time for Alga-N and Alga-N-Ca was 30 minutes, whereas for Alga-N-HDTMA it was 45 minutes. The adsorption isotherms of Alga-N and Alga-N-Ca tended to follow the Freundlich isotherm model, while Alga-N-HDTMA followed the Langmuir isotherm model. The Alga-N-HDTMA adsorbent could be reused for up to three cycles for CR adsorption and up to six cycles for MO adsorption, with an adsorption efficiency $> 50\%$.

Keywords: algae, *Nannochloropsis* sp., adsorption, desorption, cationic surfactant.

**KAJIAN ADSORPSI ZAT WARNA CONGO RED DAN METIL ORANYE
OLEH BIOMASSA *Nannochloropsis* sp. TERMODIFIKASI SURFAKTAN
KATIONIK**

Oleh

TIARA ZALFA NUR'ALIFAH

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 : **KAJIAN ADSORPSI ZAT WARNA CONGO RED DAN
METIL ORANYE OLEH BIOMASSA ALGA
Nannochloropsis sp. TERMODIFIKASI
SURFAKTAN KATIONIK**

Nama : **Tiara Zalfa Nur'alifah**

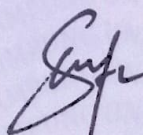
NPM : 2117011044

Jurusan : Kimia

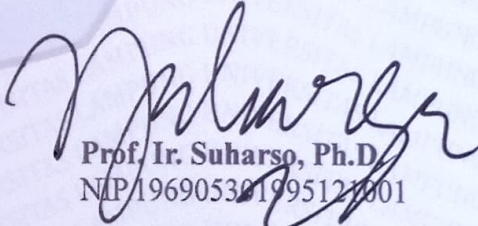
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

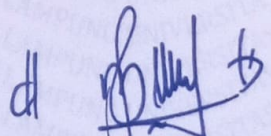


Prof. Dr. Buhani, M.Si.
NIP. 196904161994032003



Prof. Ir. Suharso, Ph.D.
NIP. 196905301995122001

2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA

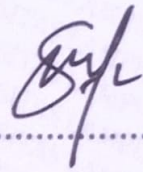


Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si.
NIP. 197205302000032001

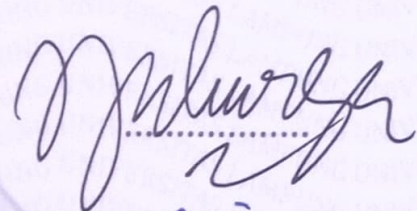
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

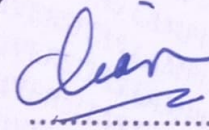
Ketua : Prof. Dr. Buhani, M.Si.



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

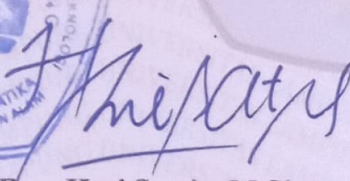


Anggota : Dr. Dian Herasari, M.Si.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam




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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 16 Juli 2025

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Tiara Zalfa Nur'alifah
NPM : 2117011044
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Dengan ini menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya yang berjudul "**Kajian Adsorpsi Zat Warna Congo Red dan Metil Oranye Oleh Biomassa *Nannochloropsis* sp. Termodifikasi Surfaktan Kationik**" 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, 18 Juli 2025

Menyatakan,



Tiara Zalfa Nur'alifah
NPM. 2117011044

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kota Bandar Lampung pada 18 Maret 2003 sebagai anak pertama dari Bapak Sobirin dan Ibu Sri Wahyuningsih. Penulis memulai pendidikan formal di PAUD Sekar Wangi pada tahun 2008. Sekolah Dasar di SD Negeri 1 Surabaya diselesaikan pada tahun 2015, Sekolah Menengah Pertama di MTs Negeri 2 Bandar Lampung diselesaikan pada tahun 2018, dan Sekolah Menengah Kejuruan di Sekolah Menengah Teknologi Industri (SMTI) jurusan Analis Pengujian Laboratorium diselesaikan pada tahun 2021. Pada tahun 2021, penulis terdaftar sebagai mahasiswa jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN.

Penulis pernah menjadi anggota aktif biro penerbitan Himpunan Mahasiswa Kimia (Himaki) 2023, anggota aktif UKM Taekwondo Unila sejak 2021 dan menjadi sekretaris departemen internal 2024. Selain itu penulis pernah mengikuti kejuaraan ATF Universitas Indonesia (UI) Championship 2023 dan KONI Cup Series 4 di Jakarta pada 2024. Penulis juga telah melaksanakan praktik kerja lapangan (PKL) di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung pada tahun 2024 dan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Rejomulyo, Lampung Selatan pada tahun 2024. Pada tahun 2025, penulis menyelesaikan penelitiannya di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Jurusan Kimia FMIPA Unila dengan judul “Kajian Adsorpsi Zat Warna Congo Red dan Metil Oranye Oleh Biomassa *Nannochloropsis* sp. Termodifikasi Surfaktan Kationik”.

MOTTO

“ Biarkan yang terasa mustahil tercipta untuk menemani pertolongan Allah Yang Maha Besar ”

“ Sekali saja dikatakan ‘ Kun Fayakun ’ segala kehendak-Nya akan melawan hukum yang tidak masuk akal ”

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

“ Dan aku menyerahkan urusanku kepada Allah. Sungguh, Allah Maha Melihat akan hamba-hamba-Nya ”
(QS. Ghafir: 44)

PERSEMBAHAN



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

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

Orang tua, Ibu Sri Wahyuningsih dan Mbah Uti yang telah merawat, menyayangi, mendoakan, memperjuangkan, dan mengorbankan tenaga, pikiran, serta biaya untuk penulis selama ini.

Ibu Prof. Dr. Buhani, M.Si., Bapak Prof. Ir. Suharso, Ph.D., Ibu Dr. Dian Herasari, M.Si., serta seluruh Bapak dan Ibu dosen Jurusan Kimia.

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

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

SANWACANA

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

**“ Kajian Adsorpsi Zat Warna Congo Red dan Metil Oranye Oleh Biomassa
Nannochloropsis sp. Termodifikasi Surfaktan Kationik ”**

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

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

1. Orang tuaku, Ibu Sri Wahyuningsih dan Mbah Uti tersayang atas segala dukungan, kasih sayang dan doanya yang tak pernah terputus untuk kelancaran studi ini.
2. Adikku Keysha Novalia dan Azriel Yusuf serta Keluarga besar Mbah Akung Ahmad Muzzaki yang telah menemani, mendoakan, dan mendukung penulis selama berkegiatan dimasa perkuliahan.
3. Ibu Prof. Dr. Buhani, M.Si., selaku dosen pembimbing satu yang senantiasa meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran dalam membimbing penulis dengan sabar sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
4. Bapak Prof. Ir. Suharso, Ph.D., selaku dosen pembimbing dua yang telah membantu memberikan pemikiran, arahan, dan koreksi dalam penyusunan skripsi ini.

5. Ibu Dr. Dian Herasari, M.Si., selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik membangun yang sangat berharga dalam penyempurnaan skripsi ini.
6. Ibu Devi Nur Anisa, M.Si., selaku dosen pembimbing akademik yang telah membimbing dan mendampingi penulis selama masa studi dengan penuh perhatian dan dukungan.
7. Ibu Dr. Mita Rilyanti, M.Si., selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung.
8. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
9. Bapak dan Ibu dosen Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung yang telah memberikan nasihat dan ilmu yang sangat bermanfaat selama masa studi.
10. Mba Liza Apriliya, S.Si. selaku laboran lab. kimia anorganik/fisik yang telah mendampingi dan mendukung selama masa penelitian.
11. Teman seperjuangan penelitian Adsorpsi 2021, Amelia Normalita, S.Si., Aisyah Tirta Asri, S.Si., Dinda Aprillia, S.Si., dan Mayang Aprilian, S.Si. yang senantiasa membantu dan menjadi tempat berdiskusi selama penulis melaksanakan penelitian.
12. Sahabat Ber 6 Ber S.Si. yaitu Amelia Rizky A., S.Si., Anisah Isti R., S.Si., Desvica Romanda, S.Si., Desrita Pratiwi, S.Si., dan Sajiddah Talfah, S.Si., yang senantiasa hadir memberikan semangat, perhatian, dan kehangatan di tengah proses yang penuh tantangan sejak maba hingga S.Si.
13. Teman-teman KKN Rejomulyo 8, Amelia Normalita, Tyas Nurfitriya, Melissaputri, Haya Ulfa, Flora Lumbansiantar, Fadly Bayu, dan Ara Siregar yang telah berbagi suka dan duka selama 40 hari, kenangan bersama kalian tidak akan terlupakan.
14. Teman-teman Taekwondo Unila, Kak Ikhsan, Kak Nada, Nandia, Femas dan lainnya yang selalu mendukung penulis baik di kegiatan akademik maupun non akademik, kebersamaan dengan kalian di kejuaraan UI dan KONI adalah salah satu pengalaman terbaik selama penulis menempuh studi.
15. Sahabat sejak SMTI, Vadila Dinda, Adelia Veni, Nida Roufiqoh dan Nisrina Dwi Susanti yang selalu mendukung dan menyemangati penulis meskipun

jarak telah memisahkan dan langkah kita tak selalu menuju ke arah yang sama lagi.

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

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

Bandar Lampung, 18 Juli 2025
Penulis,

Tiara Zalfa Nur'alifah

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	vi
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	3
1.3. Manfaat Penelitian	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	2
2.1. Biomassa Alga	2
2.2. Kalsium Klorida	7
2.3. Surfaktan HDTMA-Br	8
2.4. <i>Congo Red</i>	9
2.5. Metil Oranye	10
2.6. Adsorpsi	11
2.7. Faktor-Faktor yang dapat Mempengaruhi Adsorpsi	13
2.8. Isoterm Adsorpsi	14
2.8.1. Isoterm Adsorpsi Freundlich	15
2.8.2. Isoterm Adsorpsi Langmuir	15
2.9. Kinetika Adsorpsi	16
2.10. Adsorben	18
2.11. Desorpsi	20
2.12. Eluen	21

2.13. pH PZC	22
2.14. Spektrofotometri UV VIS	23
2.15. Spektroskopi Inframerah (IR)	24
2.16. SEM-EDX.....	26
III. METODE PENELITIAN	27
3.1. Waktu dan Tempat.....	27
3.2. Alat dan Bahan	27
3.3. Prosedur Penelitian	28
3.3.1. Preparasi Biomassa Alga <i>Nannochloropsis</i> sp.....	28
3.3.2. Modifikasi Adsorben Alga dengan Ca	28
3.3.3. Modifikasi Adsorben Alga-Ca dengan HDTMA	28
3.3.4. Karakterisasi Adsorben	29
3.3.5. Penentuan Nilai <i>Point Zero Charge</i> (pH PZC)	29
3.3.6. Uji Adsorpsi	29
3.3.7. Uji Desorpsi	32
3.3.8. Uji Penggunaan Ulang Adsorben.....	33
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4.1. Sintesis dan Karakterisasi Adsorben	35
4.1.1. Sintesis Alga-N-Ca dan Alga-N-HDTMA	35
4.1.2. Karakterisasi dengan FTIR	36
4.1.3. Karakterisasi dengan SEM-EDX	38
4.2. Nilai <i>Point of Zero Charge</i> (PZC) dari Adsorben	41
4.3. Adsorpsi Alga-N, Alga-N-Ca dan Alga-N-HDTMA	42
4.3.1. Pengaruh Dosis Adsorben	42
4.3.2. Pengaruh pH Adsorbat	44
4.3.3. Pengaruh Waktu Adsorpsi	45

4.3.4. Pengaruh Konsentrasi Adsorbat	49
4.4. Mekanisme Desorpsi.....	52
4.5. Penggunaan Ulang Adsorben	54
V. KESIMPULAN DAN SARAN	56
5.1. Kesimpulan	56
5.2. Saran	57
DAFTAR PUSTAKA.....	58
LAMPIRAN.....	64

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Karakteristik Metil Oranye	11
2. Perbedaan adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia.....	12
3. Warna radiasi elektromagnetik yang diserap dan yang diteruskan (komplemen) pada daerah tampak	23
4. Hasil analisis gugus fungsi pada adsorben.....	38
5. Parameter kinetika adsorpsi zat warna CR dan MO	49
6. Parameter isoterm adsorpsi zat warna CR dan MO	52
7. Data pH pzc adsorben Alga-N, Alga-N-Ca, dan Alga-N-HDTMA	65
8. Data absorbansi larutan standar CR dan MO untuk variasi dosis adsorben ..	67
9. Adsorpsi larutan zat warna CR dan MO pada adsorben dengan variasi	69
10. Adsorpsi larutan zat warna CR dan MO pada adsorben dengan variasi pH adsorbat	71
11. Data absorbansi larutan standar CR dan MO untuk variasi waktu	74
12. Adsorpsi larutan zat warna CR dan MO pada adsorben dengan variasi waktu	75
13. Data perhitungan hasil kinetika pseudo orde satu pada adsorben Alga-N terhadap zat warna CR dan MO	78
14. Data perhitungan hasil kinetika pseudo orde satu pada adsorben Alga-N-Ca terhadap zat warna CR dan MO	79

15. Data perhitungan hasil kinetika pseudo orde satu pada adsorben Alga-N-HDTMA terhadap zat warna CR dan MO	81
16. Data perhitungan hasil kinetika pseudo orde dua pada adsorben Alga-N terhadap zat warna CR dan MO.....	82
17. Data perhitungan hasil kinetika pseudo orde dua pada adsorben Alga-N-Ca terhadap zat warna CR dan MO	83
18. Data perhitungan hasil kinetika pseudo orde dua pada adsorben Alga-N HDTMA terhadap zat warna CR dan MO	85
19. Data absorbansi larutan standar CR dan MO untuk variasi konsentrasi.....	87
20. Adsorpsi zat warna CR dan MO pada adsorben dengan variasi konsentrasi.	89
21. Data perhitungan dengan Persamaan Langmuir zat warna CR dan MO terhadap Alga-N	91
22. Data perhitungan dengan Persamaan Langmuir zat warna CR dan MO terhadap Alga-N-Ca	92
23. Data perhitungan dengan Persamaan Langmuir zat warna CR dan MO terhadap Alga-N-HDTMA	94
24. Data perhitungan dengan Persamaan Freundlich zat warna CR dan MO terhadap Alga-N	95
25. Data perhitungan dengan Persamaan Freundlich zat warna CR dan MO terhadap Alga-N-Ca	96
26. Data perhitungan dengan Persamaan Freundlich zat warna CR dan MO terhadap Alga-N-HDTMA	98
27. Data kurva standar larutan CR dan MO untuk uji desorpsi	100
28. Data perhitungan jumlah CR yang terdesorpsi pada Alga-N, Alga-N-Ca dan Alga-N-HDTMA.....	102
29. Data perhitungan jumlah MO yang terdesorpsi pada Alga-N, Alga-N-Ca dan Alga-N-HDTMA.....	102
30. Data perhitungan jumlah CR yang teradsorpsi pada adsorben Alga-N, Alga-N-Ca, dan Alga-N-HDTMA	103
31. Data perhitungan jumlah MO yang teradsorpsi pada adsorben Alga-N, Alga-N-Ca, dan Alga-N-HDTMA	104

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Alga <i>Nannochloropsis</i> sp.	2
2. Morfologi sel <i>Nannochloropsis</i> sp.	6
3. Struktur kimia CaCl_2	7
4. Struktur molekul <i>Hexadecyltrimethylammonium bromide</i>	8
5. Struktur <i>congo red</i>	9
6. Struktur kimia metil oranye	10
7. Grafik kinetika orde satu semu	17
8. Grafik kinetika orde dua semu	17
9. Daerah serapan inframerah	25
10. Diagram alir penelitian.....	34
11. Hasil preparasi adsorben	35
12. Spektra FTIR adsorben	37
13. Mikrograf SEM.....	38
14. Spektrum EDX	38
15. Kurva pH PZC pada adsorben Alga-N, Alga-N-Ca dan Alga-N-HDTMA ...	41
16. Kurva pengaruh dosis adsorben adsorpsi zat warna	43
17. Kurva pengaruh pH pada adsorpsi zat warna	44

18. Kurva pengaruh waktu kontak pada adsorpsi zat warna.....	46
19. Kinetika adsorpsi pseudo orde satu adsorben terhadap zat warna CR dan MO	47
20. Kinetika adsorpsi pseudo orde dua adsorben terhadap zat warna CR dan MO	48
21. Kurva pengaruh konsentrasi pada adsorpsi zat warna	49
22. Pola isoterm Langmuir Alga-N, Alga-N-Ca, dan Alga-N-HDTMA terhadap zat warna CR dan MO.....	51
23. Pola isoterm Freundlich Alga-N, Alga-N-Ca, dan Alga-N-HDTMA terhadap zat warna CR dan MO.....	51
24. Grafik hasil mekanisme adsorpsi desorpsi Alga-N, Alga-N-Ca dan Alga-N- HDTMA terhadap	53
25. Grafik hasil penggunaan ulang Alga-N, Alga-N-Ca dan Alga-N-HDTMA terhadap.....	54
26. Kurva hasil pengukuran panjang gelombang maksimum.....	66
27. Kurva standar untuk variasi dosis adsorben terhadap.....	68
28. Adsorpsi zat warna CR dengan variasi dosis adsorben	70
29. Adsorpsi zat warna MO dengan variasi dosis adsorben	70
30. Adsorpsi zat warna CR dengan variasi pH terhadap adsorben	72
31. Adsorpsi zat warna MO dengan variasi pH terhadap adsorben	73
32. Kurva standar untuk variasi waktu.....	74
33. Adsorpsi zat warna CR dengan variasi waktu terhadap adsorben	76
34. Adsorpsi zat warna MO dengan variasi waktu terhadap adsorben	77
35. Pola kinetika pseudo orde satu pada Alga-N terhadap zat warna CR.....	79
36. Pola kinetika pseudo orde satu pada Alga-N-Ca terhadap zat warna CR.....	80
37. Pola kinetika pseudo orde satu pada Alga-N-HDTMA terhadap zat warna CR dan MO	81

38. Pola kinetika pseudo orde dua pada Alga-N terhadap zat warna CR dan MO	83
39. Pola kinetika pseudo orde dua pada Alga-N-Ca terhadap zat warna CR dan MO	84
40. Pola kinetika pseudo orde dua pada Alga-N-HDTMA terhadap zat warna CR dan MO	85
41. Kurva standar untuk variasi konsentrasi zat warna	88
42. Adsorpsi zat warna CR dengan variasi konsentrasi terhadap adsorben.....	90
43. Adsorpsi zat warna MO dengan variasi konsentrasi terhadap adsorben.....	90
44. Pola isoterm adsorpsi Langmuir pada Alga-N terhadap zat warna CR dan MO	92
45. Pola isoterm adsorpsi Langmuir pada Alga-N-Ca terhadap zat warna CR dan MO	93
46. Pola isoterm adsorpsi Langmuir pada Alga-N-HDTMA terhadap zat warna CR dan MO	94
47. Pola isoterm adsorpsi Freundlich pada Alga-N terhadap zat warna CR dan MO	96
48. Pola isoterm adsorpsi Freundlich pada Alga-N-Ca terhadap zat warna CR dan MO	97
49. Pola isoterm adsorpsi Freundlich pada Alga-N-HDTMA terhadap zat warna CR dan MO	98
50. Kurva standar untuk uji desorpsi terhadap zat warna	101
51. Adsorpsi zat warna CR pada penggunaan ulang.....	103
52. Adsorpsi zat warna MO pada penggunaan ulang.....	105

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pertumbuhan populasi dunia yang pesat, perubahan iklim dan kemajuan industri telah memberikan dampak besar terhadap kualitas air. Salah satu kontributor utama pencemaran air adalah penggunaan zat warna sintetis yang terus meningkat, seperti metilen biru (MB), rhodamin B (RhB), metil oranye (MO), *congo red* (CR), *disperse violet* 26, metil merah, dan kristal violet. Zat warna ini berasal dari berbagai sektor industri seperti tekstil, kosmetik, kulit, makanan, farmasi, cat dan pelapis, serta industri pulp dan kertas (Chen *et al.*, 2020). Pesatnya perkembangan industri tekstil di Indonesia berkontribusi signifikan terhadap perekonomian negara. Namun di sisi lain, hal ini juga dapat menimbulkan masalah lingkungan yang serius, terutama terkait dengan pencemaran yang diakibatkan oleh limbah cair dari industri tekstil. Terlebih berdasarkan estimasi terkini, produksi zat warna global mencapai sekitar 7 juta ton per tahun (Dutta *et al.*, 2021).

Secara fisik, air limbah dari industri tekstil memiliki ciri-ciri seperti keruh, berwarna, berbau, panas, dan berbusa. Pada industri tekstil, proses pewarnaan dan pencelupan sering menggunakan berbagai jenis zat warna, dan limbah cair yang dihasilkan dari proses-proses ini merupakan salah satu sumber utama pencemaran air. Pewarna yang digunakan dalam industri tekstil umumnya berasal dari bahan sintetis. Nilai *Chemical Oxygen Demand* (COD) dari limbah tekstil sering kali melebihi ambang batas standar kualitas limbah cair industri

tekstil yang ditetapkan. Limbah tekstil yang masuk ke dalam perairan dapat mengganggu penetrasi sinar matahari dan difusi oksigen yang berdampak negatif pada kehidupan organisme air dan dapat mengancam kelestarian ekosistem akuatik (Haryono *et al.*, 2018).

Beberapa metode penelitian terkait upaya menyisihkan zat warna di perairan telah banyak dilakukan. Dalam beberapa tahun terakhir, banyak penelitian telah berfokus pada proses adsorpsi karena dinilai lebih efektif, preparasi mudah dan pembiayaan yang relatif murah dibandingkan metode lain serta terbukti memiliki efisiensi tinggi. Telah banyak dilakukan penelitian adsorpsi menggunakan adsorben dari biomaterial berupa limbah atau bahan yang berasal dari sumber biologis lainnya untuk menjerap bahan *toxic*.

Penggunaan biomaterial sebagai adsorben mendapat perhatian khusus karena mudah didapatkan, mudah diregenerasi dan tersedia dalam jumlah melimpah. Salah satu biomaterial yang dapat digunakan sebagai adsorben yaitu biomassa alga *Nannochloropsis* sp. (Buhani *et al.*, 2012). Pada prosesnya pengikatan adsorbat ini melibatkan gugus karboksilat ($-\text{COOH}$) dan gugus amina ($-\text{NH}_2$) pada dinding sel alga. Dalam penggunaan biomassa alga sebagai adsorben secara luas dikembangkan karena mengandung senyawa protein, lipid, polisakarida yang terdapat gugus hidroksil, fosfat, sulfat, amina dan karboksil yang berperan sebagai zat pengikat adsorbat (Buhani *and* Suharso, 2009).

Gugus aktif yang dimiliki adsorben biomassa alga *Nannochloropsis* sp. mampu bertukar kation alkali atau alkali tanah melalui proses modifikasi contohnya dengan CaCl_2 . Gugus aktif ini berfungsi sebagai penyeimbang muatan yang dapat bertukar dengan kation lain seperti surfaktan kationik. Pemanfaatan surfaktan kationik seperti *Hexadecyltrimethylammonium bromide* (HDTMA-Br) pada preparasi alga juga memberikan keuntungan yang dapat membuat adsorben kaya akan muatan positif. Modifikasi ini mengubah sifat permukaan alga menjadi bermuatan positif yang lebih efektif dalam menarik zat warna bermuatan negatif seperti CR dan MO. Dengan interaksi ionik yang lebih kuat, adsorpsi menjadi

lebih efisien dibandingkan metode konvensional lainnya. Kombinasi ini membuka peluang baru dalam pengembangan material adsorben berbasis hayati yang lebih ramah lingkungan (Buhani *et al.*, 2021).

Adsorpsi oleh *Nannochloropsis* sp. tidak hanya dipengaruhi oleh jenis surfaktan yang digunakan, tetapi juga oleh kondisi eksperimental lainnya seperti pH, waktu kontak, dan konsentrasi awal zat warna. Misalnya, pada kondisi pH tertentu, interaksi ionik antara permukaan biomassa alga yang telah dimodifikasi dan molekul zat warna dapat dioptimalkan, yang meningkatkan kapasitas adsorpsi secara signifikan (Monica *et al.*, 2022). Selain efektivitas dalam menghilangkan zat warna, penggunaan *Nannochloropsis* sp. yang dimodifikasi dengan surfaktan kationik juga berkontribusi pada aspek keberlanjutan karena adsorben ini dapat digunakan berulang kali setelah proses desorpsi yang dapat meningkatkan efisiensi dan mengurangi dampak lingkungan dari proses pengolahan limbah (Monica *et al.*, 2022).

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mempelajari cara memodifikasi adsorben dari biomassa alga *Nannochloropsis* sp. dengan CaCl_2 dan surfaktan HDTMA-Br.
2. Melakukan uji kemampuan adsorpsi dengan pengaruh dosis, pH, waktu, dan konsentrasi pada adsorben sebelum dan setelah modifikasi terhadap larutan zat warna *congo red* dan metil oranye.
3. Mempelajari kinetika adsorpsi dan isoterm adsorpsi dari adsorben biomassa alga *Nannochloropsis* sp. termodifikasi HDTMA-Br.
4. Mempelajari kemampuan desorpsi dan penggunaan ulang adsorben terhadap zat warna *congo red* dan metil oranye.

1.3. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah untuk memberikan informasi mengenai kemampuan adsorben alga *Nannochloropsis* sp. yang telah dimodifikasi dengan CaCl_2 dan surfaktan kationik HDTMA-Br serta potensinya untuk mengadsorpsi larutan zat warna yang bersifat *toxic*.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Biomassa Alga

Nannochloropsis sp. merupakan mikroalga berwarna hijau kekuningan, berbentuk bola, dan berukuran kecil dengan diameter 2-4 μm . *Nannochloropsis* sp. memiliki dinding sel, mitokondria, kloroplas dan nukleus yang dilapisi membran. Kloroplas berbentuk seperti lonceng yang terletak di tepi sel dan memiliki stigma (bintik mata) yang bersifat sensitif terhadap cahaya. *Nannochloropsis* sp. dapat berfotosintesis karena memiliki klorofil a dan c. Ciri khas dari mikroalga ini adalah memiliki dinding sel yang terbuat dari komponen selulosa. Bentuk alga *Nannochloropsis* sp. dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Alga *Nannochloropsis* sp. (Malakootian *et al.*, 2016)

Klasifikasi *Nannochloropsis* sp. adalah sebagai berikut:

Divisi : *Chromophyta*

Kelas : *Eustigmatophyceae*

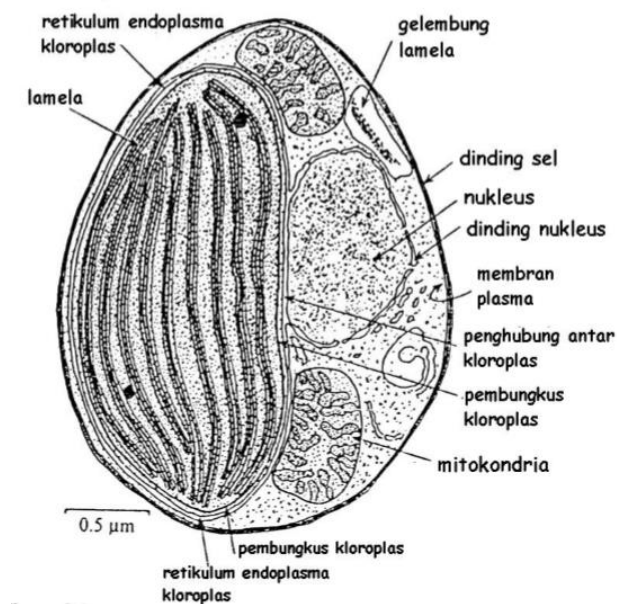
Ordo : *Eustigmatales*

Famili : *Eustigmataceae*

Genus : *Nannochloropsis*

Spesies : *Nannochloropsis* sp.

Morfologi sel *Nannochloropsis* sp. dapat dilihat pada Gambar 2.



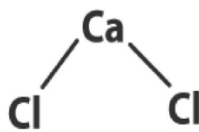
Gambar 2. Morfologi sel *Nannochloropsis* sp. (Hoek *et al.*, 1995)

Nannochloropsis sp. diketahui memiliki kandungan mineral yang cukup beragam, terutama kation logam seperti natrium (Na), kalium (K) dan kalsium (Ca) yang terdeteksi sebagai unsur-unsur paling melimpah. Selain itu, mikroalga ini juga mengandung unsur mineral lainnya seperti magnesium (Mg), fosfor (P), sulfur (S), serta sejumlah elemen jejak seperti besi (Fe), tembaga (Cu), mangan (Mn), dan seng (Zn) (Paterson *et al*, 2023). *Nannochloropsis* sp. memiliki dinding sel tebal dan kaku yang terdiri dari polisakarida kompleks, seperti selulosa, yang tahan terhadap degradasi enzimatik, memberikan perlindungan terhadap kondisi lingkungan ekstrem dan meningkatkan ketahanannya terhadap predator mikroba. Sifat ini menjadikan *Nannochloropsis* sp. relevan sebagai biosorben untuk mengikat polutan dan logam berat dalam pengolahan limbah dan bioremediasi.

Dari segi fisiologis, mikroalga ini memiliki kloroplas berbentuk lonceng di tepi sel untuk fotosintesis dan dapat beradaptasi dengan berbagai intensitas cahaya, sehingga dapat tumbuh secara efisien di berbagai lingkungan. Kemampuan fleksibel ini menjadikannya populer dalam penelitian bioteknologi dan lingkungan.

2.2. Kalsium Klorida

Kalsium klorida adalah senyawa kimia dengan rumus CaCl_2 dikenal luas karena berbagai aplikasinya di berbagai industri. Ini merupakan senyawa ionik yang terdiri dari ion kalsium (Ca^{2+}) dan ion klorida (Cl^-). Penampilan fisik kalsium klorida bervariasi tergantung pada tingkat hidrasi. Ia dapat berbentuk serbuk putih dalam bentuk anhidratnya atau kristal putih hingga tak berwarna saat terhidrasi. Struktur kimia CaCl_2 dapat dilihat pada Gambar 4.

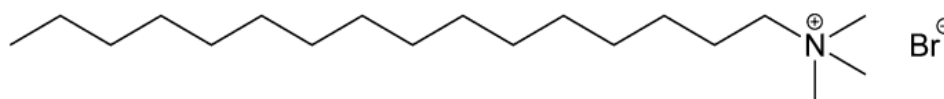


Gambar 3. Struktur kimia CaCl_2 (Punitha *et al.*, 2019)

Secara kimia, kalsium klorida sangat mudah larut dalam air dan menghasilkan panas yang cukup besar saat larut. Selain itu, senyawa ini bersifat *deliquescent* yang berarti dapat larut dalam air yang diserapnya dari udara. Kalsium klorida memiliki rumus kimia CaCl_2 , dengan berat molekul 110,98 g/mol untuk bentuk anhidrat dan 147,01 g/mol untuk bentuk dihidrat. Titik didihnya mencapai 1935 °C, sementara titik lelehnya berkisar antara 772–775 °C (anhidrat) dan 30–45 °C (dihidrat), serta memiliki kelarutan yang sangat tinggi dalam air (Gorbachef *et al.*, 2022).

2.3. Surfaktan HDTMA-Br

Surfaktan adalah suatu zat yang mempunyai sifat adsorpsi pada antarmuka atau permukaan dan dapat mengubah sifat antarmuka, misalnya tegangan permukaan, sifat pembasahan, daya bersih, dan daya dispersi. Permukaan negatif pada adsorben dapat dimodifikasi dengan menggunakan surfaktan kationik. Surfaktan kationik adalah surfaktan yang bagian permukaannya membawa muatan positif. Salah satu contoh surfaktan kationik yang biasa digunakan adalah HDTMA-Br. Muatan kation dalam adsorben (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} dan Mg^{2+}) dapat digantikan dengan HDTMA sehingga memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi. Struktur kimia HDTMA-Br dapat dilihat pada Gambar 4.



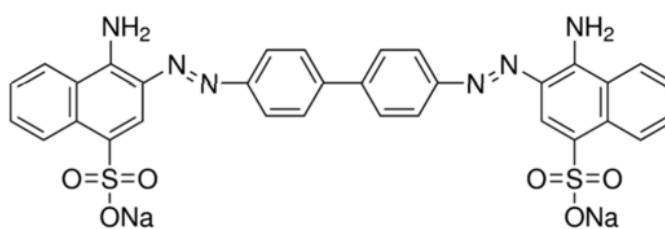
Gambar 4. Struktur molekul *Hexadecyltrimethylammonium bromide* (Tsagkaropoulou *et al.*, 2019)

Zat aktif permukaan disebut juga surfaktan merupakan senyawa aktif, bersifat menurunkan tegangan permukaan (*surface active agent*) dan mempunyai struktur bipolar. Bagian kepala bersifat hidrofilik dan bagian ekor bersifat hidrofobik, sehingga surfaktan cenderung berada pada antarmuka antara dua fase yang berbeda polaritas dan ikatan hidrogen seperti minyak dan air. Kegunaan surfaktan antara lain untuk menurunkan tegangan permukaan, tegangan antarmuka, meningkatkan kestabilan partikel yang terdispersi dan mengontrol jenis formasi emulsi. Salah satu contoh surfaktan adalah HDTMA-Br. HDTMA-Br dalam larutan akan terionisasi menjadi HDTMA^+ dan Br^- . Ujung yang bersifat hidrofilik atau sering disebut sebagai kepala adalah gugus amonium dan ujung yang bersifat hidrofobik atau disebut sebagai ekor adalah rantai hidrokarbonnya yang tersusun atas gugus setil.

Surfaktan kationik seperti *cetyl trimethyl ammonium bromide* (CTABr), *hexadecyltrimethylammonium bromide* (HDTMA-Br) dan *dodecyl benzyl dimethyl ammonium chloride* mampu meningkatkan kandungan muatan positif pada permukaan biomassa alga untuk meningkatkan potensinya sebagai adsorben zat kimia bermuatan anion. Modifikasi permukaan adsorben merupakan strategi efektif untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi biomaterial dalam menghilangkan polutan organik dan anorganik secara efisien. Biomassa alga umumnya bermuatan negatif dengan kelompok aktif yang dapat bertukar kation alkali atau alkali tanah, sehingga modifikasi ini memungkinkan peningkatan jumlah situs aktif melalui pertukaran muatan dengan kation dari surfaktan kationik (Buhani *et al.*, 2024)

2.4. Congo Red

Congo red (CR) adalah pewarna azo sintetis dengan rumus kimia $C_{32}H_{22}N_6Na_2O_6S_2$ dan berat molekul 696,67 g/mol. CR merupakan zat pewarna anionik yang banyak digunakan dalam industri tekstil, kertas dan biologi terutama sebagai indikator pH dan agen penstabil protein. Pewarna ini larut dalam air dan memberikan warna merah terang pada larutan. Molekulnya memiliki dua gugus azo ($-N=N-$) yang menghubungkan cincin benzena dengan gugus sulfonat, yang berperan dalam stabilitas kimianya. Struktur kimia CR dapat dilihat pada Gambar 5.



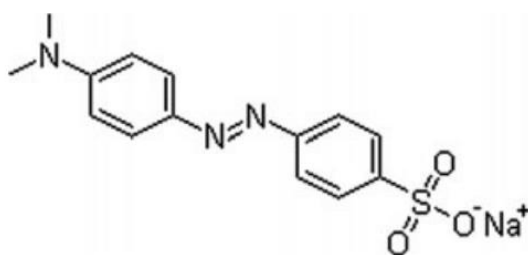
Gambar 5. Struktur *congo red* (Siddiqui *et al.*, 2023)

CR merupakan zat warna azo yang dapat terikat kuat pada kain, sehingga tidak mudah luntur, memberikan warna yang baik dan tidak mudah rusak oleh

perlakuan kimia (Blackburn *and* Burkinshaw, 2002). Namun keberadaan zat warna CR dalam lingkungan perairan dapat merusak berbagai spesies makhluk hidup karena sifat zat warna CR yang mempunyai toksisitas cukup tinggi. CR yang terakumulasi dalam tubuh dapat menyebabkan gangguan fungsi hati, ginjal, dan saraf. CR memiliki sifat *toxic* dan sulit terurai secara biologis, menyebabkan dampak buruk pada lingkungan dan organisme hidup karena CR dapat mencemari air dan tanah sehingga pengelolaan limbah yang mengandung zat ini menjadi penting. Metode yang sering digunakan untuk pengolahan limbah CR mencakup adsorpsi, fotokatalisis dan biodegradasi. Penanganan yang tepat diperlukan karena akumulasi CR di lingkungan dapat berdampak negatif terhadap keseimbangan ekosistem dan kesehatan makhluk hidup (Siddiqui *et al.*, 2023).

2.5. Metil Oranye

Metil oranye (MO) adalah zat pewarna azo yang memiliki rumus kimia $C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$. Sebagai zat pencem ar, MO memiliki dampak negatif yang signifikan terhadap lingkungan. Pewarna ini termasuk dalam kategori polutan organik beracun yang sulit terurai secara alami. Kehadirannya di air limbah industri dapat menyebabkan berbagai masalah lingkungan dan kesehatan, termasuk efek *toxic* pada kehidupan akuatik (Shah, 2023).



Gambar 6. Struktur kimia metil oranye (Deniz, 2013)

MO sering digunakan sebagai indikator pH dalam laboratorium serta sebagai pewarna dalam industri tekstil dan kulit. MO dikenal dengan warna oranye cerahnya dan kelarutannya yang tinggi dalam air. Dalam penggunaannya sebagai indikator asam basa, MO menunjukkan perubahan warna yang jelas antara merah pada pH rendah dan kuning pada pH tinggi, yang membuatnya sangat berguna

dalam berbagai aplikasi kimia. Namun, penggunaan luas MO menimbulkan kekhawatiran terkait dampaknya terhadap lingkungan dan kesehatan manusia.

Tabel 1. Karakteristik MO (Deniz, 2013)

Nama lain	<i>Gold orange, Helianthine, Orange III</i>
Rumus molekul	$C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$
Massa molar	327,34 g/mol
Nomor C.I.	13,025
Nomor CAS	547-580
Tipe	Anionik
LD 50	60 mg kg ⁻¹

Pada Tabel 1 dapat dilihat karakteristik dari zat warna MO. Pewarna ini dianggap berbahaya karena bersifat *toxic* terhadap organisme akuatik dan dapat menyebabkan iritasi pada kulit dan mata manusia. Di lingkungan, MO sulit diuraikan secara alami menjadikannya sebagai salah satu polutan organik yang berpotensi merusak kualitas air. Penanganan limbah yang mengandung MO memerlukan metode khusus seperti fotokatalisis atau adsorpsi menggunakan material biosorben yang efisien untuk menguraikan senyawa ini menjadi produk yang lebih aman dan ramah lingkungan (Abewaa *et al.*, 2023).

2.6. Adsorpsi

Metode-metode yang digunakan untuk pengolahan limbah zat warna antara lain elektrokoagulasi, filtrasi kimia dan adsorpsi. Secara umum adsorpsi adalah proses pemisahan komponen tertentu dari satu fasa fluida (larutan) ke permukaan zat padat yang menyerap (adsorben). Pemisahan terjadi karena perbedaan bobot molekul atau porositas, menyebabkan sebagian molekul terikat lebih kuat pada permukaan dari pada molekul lainnya. Adapun syarat-syarat untuk berjalannya suatu proses adsorpsi di antaranya sebagai berikut

1. Zat yang mengadsorpsi (adsorben)
2. Zat yang teradsorpsi (adsorbat)

3. Waktu pencampuran sampai adsorpsi berjalan seimbang.

Adsorpsi dapat digolongkan dalam dua jenis yaitu adsorpsi secara kimia dan secara fisika. Adsorpsi secara kimia (kemisorpsi) adalah adsorpsi yang terjadi karena adanya gaya-gaya kimia dan diikuti oleh reaksi kimia. Adsorpsi jenis ini mengakibatkan terbentuknya ikatan secara kimia, sehingga diikuti dengan reaksi berupa senyawa baru. Pada kemisorpsi permukaan padatan sangat kuat mengikat molekul gas atau cairan sehingga sukar untuk dilepas kembali, sehingga proses kemisorpsi sangat sedikit. Adsorpsi fisika (fisiorpsi) adalah adsorpsi yang terjadi karena adanya gaya-gaya fisika (Alamsyah *et al.*, 2017). Perbedaan adsorpsi fisika dan kimia secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbedaan adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia (Bahl *et al.*, 1997)

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

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 (Wijayanti dan Kurniawati, 2019). Beberapa faktor yang berpengaruh terhadap adsorpsi adalah konsentrasi, luas permukaan, suhu, ukuran partikel, pH dan waktu kontak. Adsorpsi bersifat selektif karena yang diadsorpsi hanya zat terlarut atau pelarut. Jumlah zat yang diserap tergantung pada konsentrasi zat terlarut dan ketergantungan jumlah zat yang diserap pada konsentrasi kesetimbangan disebut isotherm adsorpsi.

Konsentrasi adsorbat yang diadsorpsi oleh adsorben ditentukan dengan menghitung jumlah adsorbat yang teradsorpsi per satuan massa adsorben dengan persamaan sebagai berikut.

$$qe = \frac{(Co - Ce)}{m} \times V \quad (1)$$

Keterangan:

Co = konsentrasi awal

Ce = konsentrasi pada keadaan kesetimbangan

m = massa adsorben

v = volume larutan

qe = jumlah adsorbat yang teradsorpsi per satuan massa (mmol/g)

(Buhani *et al.*, 2023).

Persentase adsorpsi zat warna dan kapasitas adsorpsinya dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\% \text{ Adsorpsi} = \frac{Co - Ce}{Co} \times 100\% \quad (2)$$

Co dan Ce masing-masing adalah konsentrasi awal adsorbat dan konsentrasi adsorbat setelah proses adsorpsi (Fajriyah *et al.*, 2023).

2.7. Faktor-Faktor yang Dapat Memengaruhi Adsorpsi

a. Sifat Adsorben

Permukaan internal yang ukurannya meso atau makro semakin banyak maka bisa menjadikan pori-pori nya semakin besar dan semakin banyak molekul adsorbat

yang diserap adsorben. Hal ini menjadikan luas permukaan adsorben yang besar dapat menjadikan penyerapan semakin meningkat.

b. Sifat Adsorbat

Adsorpsi lebih besar ketika molekul adsorbat lebih kecil dari pori-pori adsorben. Adsorben dapat menyerap molekul lainnya yang berukuran sama atau lebih kecil daripada diameter pori-pori adsorben. Adsorpsi bisa terjadi dikarenakan molekul adsorbat terperangkap di rongga adsorben.

c. Ukuran Partikel

Ukuran partikel yang semakin kecil maka proses adsorpsinya semakin cepat sehingga adsorben perlu untuk meningkatkan laju adsorpsi.

d. Waktu Kontak

Saat adsorben ditambahkan ke cairan memerlukan waktu agar dapat mencapai keseimbangan. Jumlah waktu yang diperlukan berbanding terbalik dengan banyaknya jumlah adsorben yang dipakai. Apabila viskositas pada larutan tinggi maka memerlukan waktu kontak yang semakin lama.

e. Derajat Keasaman (pH)

Tinggi rendahnya pH dapat berpengaruh pada proses adsorpsi logam di permukaan adsorben. Hal ini dapat terjadi dengan penambahan basa Arrhenius karena ion OH^- bisa menjadikan permukaan adsorben memiliki muatan negatif dan pada akhirnya adsorbat yang muatannya positif terikat di adsorben.

f. Konsentrasi Adsorbat

Konsentrasi adsorbat yang semakin besar maka partikel adsorbat yang terserap oleh adsorben juga semakin banyak. Konsentrasi adsorbat dapat digunakan untuk mengetahui isoterm adsorpsi. Jenis isoterm adsorpsi yang umum dipakai adalah isoterm Freundlich dan isoterm Langmuir.

2.8. Isoterm Adsorpsi

Kapasitas dan afinitas adsorpsi dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan isoterm adsorpsi. Isoterm adsorpsi merupakan suatu keadaan kesetimbangan yaitu tidak ada lagi perubahan konsentrasi adsorbat baik di fase terserap maupun pada fasa gas atau cair. Hal ini dapat dilihat dari nilai koefisien

(R^2) diantara isoterm adsorpsi Freundlich dan Langmuir yang lebih mendekati 1 (Buhani *et al.*, 2023).

2.8.1. Isoterm Adsorpsi Freundlich

Isoterm adsorpsi Freundlich mengasumsikan bahwa permukaan pori adsorben bersifat heterogen dengan distribusi panas adsorpsi yang tidak seragam sepanjang permukaan adsorben.

Persamaan isoterm adsorpsi Freundlich :

$$Q = k.C_e^{1/n} \quad (3)$$

Persamaan diatas dapat diubah kedalam bentuk linier dengan mengambil bentuk logaritmanya :

$$\text{Log } Q = \text{Log } k + 1/n \text{ Log } C_e \quad (4)$$

Keterangan:

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

k = konstanta adsorpsi Freundlich

n = konstanta empiris

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

Menurut persamaan Freundlich, jumlah zat yang teradsorpsi meningkat secara infinit bila konsentrasi atau tekanan meningkat. Berdasarkan persamaan tersebut jika diplot grafik hubungan antara $\log C_e$ dan $\log xm$ maka akan diperoleh grafik pola isoterm Freundlich (Wijayanti *and* Kurniawati, 2019).

2.8.2. Isoterm Adsorpsi Langmuir

Isoterm adsorpsi Langmuir sangat mengacu pada adsorpsi monolayer yang diasumsikan bahwa tempat adsorpsi bersifat homogen. Pendekatan dengan model terhadap kurva isoterm dapat membantu menganalisis karakteristik isoterm berupa kapasitas, afinitas, selektifitas serta mekanisme interaksi adsorpsinya. Adapun persamaan untuk isoterm Langmuir adalah sebagai berikut

$$C_e x/m = 1/K + C_e(xm) \quad (5)$$

Keterangan:

C_e = konsentrasi adsorbat dalam larutan pada saat setimbang (mg/L).

xm = jumlah adsorbat yang teradsorpsi atau kapasitas adsorpsi maksimal (mg/g).

K = konstanta kesetimbangan.

Berdasarkan persamaan tersebut jika diplot grafik hubungan antara C_e dan $C_e x/m$ maka akan diperoleh grafik pola isoterm Langmuir.

Persamaan isoterm adsorpsi langmuir:

$$Q = \frac{b \cdot K \cdot C_e}{1 + K \cdot C_e} \quad (6)$$

Persamaan di atas dapat diturunkan secara linier menjadi:

$$\frac{C_e}{Q} = \frac{1}{Kb} + \frac{1}{b} C_e \quad (7)$$

Keterangan:

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

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

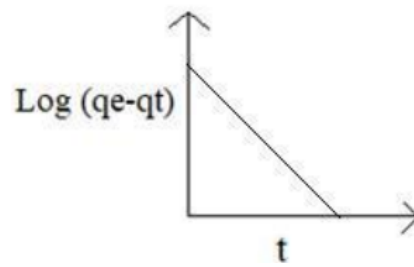
K = konstanta kesetimbangan adsorpsi (L/mg).

B = kapasitas adsorpsi maksimum dari adsorben (mg/g).

(Wijayanti and Kurniawati, 2019).

2.9. Kinetika Adsorpsi

Kinetika adsorpsi menggambarkan kecepatan laju reaksi proses adsorpsi suatu adsorben terhadap adsorbat. Data kinetika adsorpsi ini digunakan untuk mengetahui dinamika yang terjadi pada proses adsorpsi berdasarkan kinetika orde pertama semu (*Pseudo First Order*) dan orde kedua semu (*Pseudo Second Order*). Kinetika orde pertama semu dihasilkan dari grafik antara t dengan $\log(q_e - qt)$, sedangkan kinetika orde dua semu dihasilkan dari grafik antara t dengan t/qt . Adapun grafik dari kinetika orde satu semu dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik kinetika orde satu semu

Pada Gambar 7 dapat dilihat bahwa konsentrasi adsorbat berlebih dibandingkan dengan sisi aktif yang tersedia pada permukaan adsorben. Persamaan differensial untuk orde satu semu sebagai berikut :

$$\frac{dq_t}{dt} = k (q_e - q_t) \quad (8)$$

Keterangan:

q_t = jumlah logam Cu yang teradsorpsi pada waktu optimum (mg/g)

q_e = jumlah logam Cu yang teradsorpsi pada saat kesetimbangan (mg/g)

t = waktu (menit)

k = konstanta laju orde semu (menit^{-1})

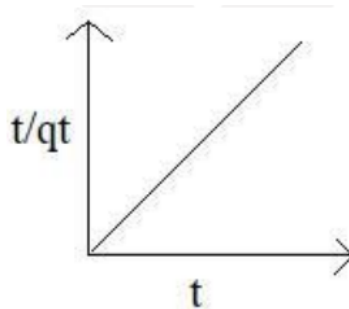
Berdasarkan hasil integrasi maka akan didapat sebuah persamaan sebagai berikut

$$\log \frac{q_e}{q_e - q_t} = \frac{k_1}{2,303} t \quad (9)$$

Sehingga dari persamaan diatas, untuk orde pertama semu persamaannya dapat dituliskan seperti rumus dibawah ini :

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2,303} t \quad (10)$$

Adapun grafik dari kinetika orde kedua semu dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik kinetika orde dua semu

Pada Gambar 8 dapat dilihat bahwa kapasitas mengadsorpsi proporsional terhadap jumlah situs aktif dari adsorben.

Persamaan differensialnya yaitu sebagai berikut :

$$\frac{dq_t}{dt} = k (q_e - q_t)^2 \quad (11)$$

Keterangan:

q_t = jumlah logam Cu yang teradsorpsi pada saat waktu optimum (mg/g)

q_e = jumlah logam Cu yang teradsorpsi pada saat kesetimbangan (mg/g)

t = waktu (menit)

k = konstanta laju orde semu (menit^{-1})

Kemudian dari hasil integrasi maka akan didapat sebuah rumus sebagai berikut:

$$\frac{1}{q_e - q_t} = \frac{1}{q_e} + kt \quad (12)$$

Sehingga diperoleh persamaan untuk kinetika orde dua semu yaitu sebagai berikut:

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2(q_e)^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (13)$$

(Buhani *et al.*, 2022).

2.10. 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 pori-pori atau pada letak tertentu di dalam partikel itu. Adsorben yang digunakan secara komersial dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu kelompok polar dan non polar. 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. Adsorben alami atau biosorben adalah adsorben yang menggunakan bahan-bahan biologi yang tidak mencemari lingkungan, sehingga lebih aman dan ramah lingkungan (Rahmi *and* Sajidah, 2017). Untuk keperluan industri, adsorben harus memenuhi syarat seperti efisien,

ekonomis, tidak berbahaya, dan mudah dimodifikasi (Adawiah dkk., 2020; Rahayu dkk., 2020)

Struktur adsorben merupakan faktor kunci yang memengaruhi sifat-sifatnya. Secara umum, adsorben memiliki struktur berpori atau berbagai gugus fungsi aktif seperti gugus hidroksil, karboksil, amino, dan sulfhidril. Molekul zat warna dapat berdifusi dan masuk ke dalam adsorben melalui berbagai gaya interaksi antara adsorben dan zat warna, seperti gaya Van der Waals, ikatan hidrogen, ikatan koordinasi, ikatan kovalen, dan gaya antarionik (Lei *et al.*, 2021).

Terdapat 2 jenis adsorben diantaranya adalah :

a. Adsorben berpori (*porous sorbents*)

Adsorben ini dapat berbentuk granular dengan luas permukaan spesifik adsorben berpori diantara 100 s.d. 1000 m²/g. Umumnya adsorben ini digunakan untuk dehidrator, penyangga katalis, serta penyeleksi komponen.

b. Adsorben tidak berpori (*non-porous sorbents*)

Adsorben tidak berpori bisa didapatkan melalui cara presipitasi deposit kristalin, contohnya penghalusan padatan kristal dan BaSO₄. Luas permukaan spesifiknya kurang dari 10 m²/g dan pada umumnya berkisar antara 0,1 s.d. 1 m²/g.

Proses adsorpsi pada material berpori umumnya berlangsung melalui beberapa tahapan berturut-turut. Tahap pertama melibatkan perpindahan molekul adsorbat dari larutan menuju lapisan film tipis yang menyelimuti permukaan luar adsorben, yang dikenal sebagai difusi eksternal. Selanjutnya, adsorbat akan bergerak melintasi lapisan batas cair tersebut hingga mencapai permukaan aktif adsorben. Setelah itu, molekul adsorbat berdifusi lebih dalam ke dalam struktur pori adsorben melalui mekanisme difusi intrapartikel. Tahap akhir adalah penjerapan adsorbat pada situs aktif yang terletak di permukaan luar maupun dalam adsorben, sehingga proses adsorpsi secara keseluruhan dapat berlangsung secara efektif (Dardouri *and* Sghaier, 2017).

2.11. Desorpsi

Desorpsi adalah proses kebalikan dari adsorpsi, namun laju adsorpsi sama dengan laju desorpsi pada kesetimbangan. Partikel yang terserap secara fisik akan bergetar dan dapat mengguncangkan dirinya sendiri sehingga akan terlepas dari permukaan adsorben (Adawiah *et al.*, 2021). Mekanisme desorpsi pada adsorben yang telah jenuh diperlakukan dengan larutan, pelarut atau campuran keduanya. Proses ini memutus ikatan antara adsorben dan adsorbat, sehingga adsorbat terlepas dari larutan. Setelah itu, adsorben yang telah diproses akan menjalani proses adsorpsi kembali.

Dalam proses desorpsi, larutan atau pelarut tertentu disebut sebagai agen elusi. Proses desorpsi dapat dilakukan melalui perlakuan secara batch atau kolom. Adsorben yang telah digunakan dicuci terlebih dahulu dengan air. Pada perlakuan *batch*, adsorben yang telah digunakan diaduk dengan agen elusi pada kecepatan tertentu untuk waktu dan suhu yang spesifik sedangkan dalam perlakuan kolom, agen elusi dialirkan melalui adsorben pada laju alir yang telah ditentukan. Laju alir sedikit lebih lambat dibandingkan dengan eksperimen adsorpsi sebelumnya karena volume regenerasi yang lebih sedikit, yang mempermudah operasi desorpsi. Setelah itu, adsorben yang telah diproses dicuci dengan air untuk menghilangkan agen elusi dari adsorben. Adsorben ini kemudian siap digunakan kembali untuk proses adsorpsi.

Seluruh eksperimen yang melibatkan adsorpsi dan desorpsi disebut sebagai satu siklus. Beberapa siklus dilakukan selama eksperimen untuk menganalisis efisiensi proses desorpsi. Setelah setiap siklus adsorpsi-desorpsi, jumlah adsorbat (polutan) yang teradsorpsi dan terdesorpsi dihitung, serta efisiensi desorpsi (atau persentase desorpsi) dan jumlah yang terdesorpsi (mg/g) dihitung menggunakan rumus berikut.

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

$$\text{Jumlah yang diserap (mg/g)} = \frac{C_{des}}{m} \times V \quad (15)$$

Keterangan:

C_{des} = konsentrasi adsorbat yang terdesorpsi (mg/g)

C_{ads} = konsentrasi adsorbat yang teradsorpsi (mg/g)

m = jumlah adsorben dalam gram

V = volume larutan desorpsi dalam liter

2.12. Eluen

Eluen berperan penting dalam proses desorpsi karena seluruh proses pemisahan adsorbat dan adsorben yang sudah jenuh bergantung pada jenis eluen yang digunakan. Eluen membantu memutus ikatan antara adsorbat yang menempel dengan adsorben yang sudah jenuh. Secara umum, istilah eluen (baik dalam bentuk cairan atau gas) mengacu pada bagian pembawa dari fase gerak yang digunakan dalam kromatografi. Eluen ini menggerakkan analit melalui kromatograf. Selain itu, eluen juga digunakan dalam proses ekstraksi di kimia organik. Dalam konteks desorpsi, eluen digunakan untuk menghilangkan adsorbat dari adsorben yang sudah jenuh.

Kriteria umum untuk eluen meliputi kompatibel dengan adsorbat dan adsorben, mampu memutus ikatan antara adsorbat dan adsorben dengan mudah, pH eluen, kemampuan pembentukan kompleks, dan kandungan modifikator organik. Parameter eluen lainnya yang harus dipertimbangkan meliputi jenis eluen, konsentrasi eluen, jenis desorpsi (*batch* atau kolom), volumenya, pH, dan sebagainya. Pemilihan eluen, baik berupa anion, kation, atau pelarut organik, didasarkan pada jenis sistem adsorbat-adsorben yang digunakan.

Eluen asam digunakan untuk desorpsi kation seperti logam berat, di mana ion hidrogen (H^+) dari eluen menggantikan ion logam yang terikat pada adsorben. Asam klorida (HCl) dan asam nitrat (HNO_3) sering digunakan dalam desorpsi logam seperti tembaga, timbal dan kadmium dengan efisiensi tinggi, bahkan hingga 99% untuk tembaga. Proses ini memanfaatkan pertukaran ion untuk memutus ikatan antara adsorben dan adsorbat. Eluen basa seperti natrium

hidroksida (NaOH), lebih efektif untuk desorpsi anion atau senyawa bermuatan negatif, seperti pewarna anionik dan ion arsenik. Ion hidroksida (OH^-) dari NaOH melepaskan adsorbat anionik dari permukaan adsorben melalui reaksi elektrostatis, dengan efisiensi yang juga tinggi, misalnya 91% untuk pewarna *rose bengal*.

Eluen asam dan basa digunakan secara bersamaan dalam beberapa penelitian untuk menguji efektivitas desorpsi pada berbagai jenis adsorbat. Misalnya, arsenik dapat didesorpsi menggunakan HCl dan NaOH dengan hasil yang menunjukkan bahwa NaOH lebih efektif setelah beberapa siklus. Campuran Eluen sering digunakan untuk meningkatkan efisiensi desorpsi, terutama untuk senyawa organik dan logam berat. Campuran seperti HCl dengan CaCl_2 , atau pelarut organik seperti metanol dan etanol, memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan eluen tunggal, memungkinkan regenerasi adsorben yang lebih efisien setelah beberapa siklus penggunaan (Patel, 2021).

2.13. pH PZC

Point of Zero Charge (PZC) adalah pH di mana muatan permukaan suatu material menjadi netral yaitu jumlah muatan positif dan negatif pada permukaan sama. pH memiliki pengaruh yang signifikan terhadap mekanisme adsorpsi karena memengaruhi jenis adsorpsi kontaminan dalam larutan. pH juga memengaruhi proses ionisasi pada situs aktif kimiawi di permukaan adsorben (Khoshnam *et al.*, 2019). PZC sangat penting dalam memahami mekanisme adsorpsi, terutama dalam konteks pengolahan limbah yang terkontaminasi. PZC dapat membantu dalam memilih substrat yang tepat untuk pengobatan limbah berdasarkan sifat permukaannya. Substrat dengan nilai PZC rendah lebih efektif untuk menangkap kation, sedangkan substrat dengan nilai PZC tinggi lebih baik dalam menangkap anion (Bakatula *et al.*, 2018). Nilai pH PZC ditentukan dengan memplot selisih antara pH akhir dan pH awal (ΔpH) terhadap pH awal. Titik di mana $\Delta\text{pH} = 0$ menunjukkan nilai pH PZC. Permukaan adsorben akan bermuatan negatif pada $\text{pH} > \text{pH PZC}$ dan bermuatan positif pada $\text{pH} < \text{pH PZC}$ (Buhani *et al.*, 2023).

2.14. Spektrofotometri UV VIS

Metode analisis spektrometri adalah metode analisis yang didasarkan pada interaksi antara materi dengan suatu radiasi elektromagnetik. Prinsip dasar analisis spektrometri adalah larutan sampel menyerap radiasi elektromagnetik dan jumlah intensitas radiasi yang diserap oleh larutan sampel dihubungkan dengan konsentrasi analit (zat/ unsur yang akan dianalisis) dalam larutan sampel.

Pada daerah-daerah spektra radiasi elektromagnetik dan diagram tingkatan energi yang mengilustrasikan perubahan energi molekul karena menyerap radiasi elektromagnetik berturut-turut. Semakin pendek panjang gelombangnya maka akan semakin besar energi radiasi nya. Panjang gelombang sinar ultraviolet (UV) dekat adalah 200-380 nm, sedangkan sinar tampak (*visible*) adalah 380-780 nm. Warna radiasi elektromagnetik yang diserap dan yang diteruskan (komplemen) pada daerah tampak dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Warna radiasi elektromagnetik yang diserap dan yang diteruskan (*komplemen*) pada daerah tampak

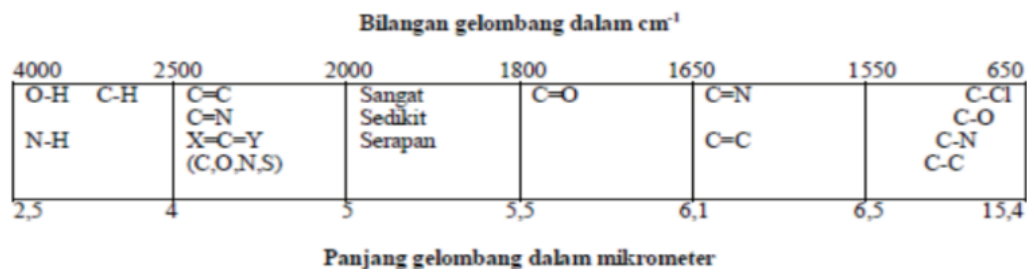
Panjang Gelombang yang Diserap Larutan (nm)	Warna Radiasi Elektromagnetik yang Diserap	Warna Radiasi Elektromagnetik yang Diteruskan
380-450	Ungu	Kuning-hijau
450-495	Biru	Kuning
495-570	Hijau	Ungu
570-590	Kuning	Biru
590-620	Oranye	Hijau-biru
620-750	Merah	Biru-hijau

Radiasi sinar *visible* umumnya menggunakan lampu filamen tungsten yang mempunyai daerah panjang gelombang 320-2500 nm. Sedangkan radiasi sinar ultraviolet umumnya menggunakan lampu hidrogen atau deuterium yang

menghasilkan radiasi kontinu pada panjang gelombang 180-375 nm (Mudasir dan Wahyuni, 2024).

2.15. Spektroskopi Inframerah (IR)

Metode spektroskopi inframerah merupakan suatu metode yang meliputi teknik serapan (*absorption*), teknik emisi (*emission*) dan teknik fluoresens (*fluorescence*). Komponen medan listrik yang banyak berperan dalam spektroskopi umumnya hanya komponen medan listrik seperti dalam fenomena transmisi, pemantulan, pembiasan, dan penyerapan. Penyerapan gelombang elektromagnetik dapat menyebabkan terjadinya eksitasi tingkat-tingkat energi dalam molekul. Dapat berupa eksitasi elektronik, vibrasi atau rotasi. Spektra inframerah suatu senyawa dapat memberikan gambaran dan struktur molekul senyawa tersebut. Spektra IR dapat dihasilkan dengan mengukur absorpsi radiasi, refleksi atau emisi di daerah IR. Daerah inframerah sedang ($4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$) berkaitan dengan transisi energi vibrasi dari molekul yang memberikan informasi mengenai gugus-gugus fungsi dari molekul tersebut. Daerah inframerah jauh ($400\text{-}10\text{ cm}^{-1}$) bermanfaat untuk menganalisis molekul yang mengandung atom-atom berat seperti senyawa anorganik, namun membutuhkan teknik khusus yang lebih baik. Daerah inframerah dekat ($12.500\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$) yang peka terhadap vibrasi *overtone*. Lipid dalam alga mengandung berbagai gugus kimia seperti gugus metilena (CH_2) dan gugus karbonil (C=O) yang menyerap cahaya di wilayah inframerah pertengahan karena karakteristik regangan dan pembengkokannya. Penyerapan energi tempat terjadinya regangan vibrasi untuk gugus CH_2 berada pada sekitar 3000 cm^{-1} , dan untuk gugus C=O berada di antara 1800 cm^{-1} hingga 1600 cm^{-1} . Daerah serapan inframerah dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 9. Daerah serapan inframerah (Ramdani *et al.*, 2023)

Spektroskopi FTIR (*Fourier Transform Infrared*) merupakan salah satu teknik analitik yang sangat baik dalam proses identifikasi struktur molekul suatu senyawa. Komponen utama spektroskopi FTIR adalah interferometer Michelson yang mempunyai fungsi menguraikan (mendispersi) radiasi inframerah menjadi komponen-komponen frekuensi. Penggunaan interferometer Michelson tersebut memberikan keunggulan metode FTIR dibandingkan metode spektroskopi inframerah konvensional maupun metode spektroskopi yang lain. Di antaranya adalah informasi struktur molekul dapat diperoleh secara tepat dan akurat.

Prinsip kerja spektrofotometer inframerah adalah fotometri. Sinar dari sumber sinar inframerah merupakan kombinasi dari panjang gelombang yang berbeda-beda. Sinar yang melalui interferometer akan difokuskan pada tempat sampel. Sinar yang ditransmisikan oleh sampel difokuskan ke detektor. Perubahan intensitas sinar menghasilkan suatu gelombang interferens. Gelombang ini diubah menjadi sinyal oleh detektor, diperkuat oleh penguat, lalu diubah menjadi sinyal digital. Pada sistem optik FTIR, radiasi laser diinterferensikan dengan radiasi inframerah agar sinyal radiasi inframerah diterima oleh detektor secara utuh dan lebih baik. Makin rumit struktur suatu molekul, makin banyak bentuk-bentuk vibrasi yang mungkin terjadi. Akibatnya akan semakin banyak pita-pita absorpsi yang diperoleh pada spektrum inframerah. Bahkan dapat menjadi semakin rumit lagi bergantung pada molekul dan kepekaan instrumen (Ramdani *et al.*, 2023).

2.16. SEM-EDX

Scanning Electron Microscopy (SEM) adalah instrumen serbaguna yang banyak digunakan untuk mengamati fenomena permukaan material. Sampel ditembak dengan elektron berenergi tinggi dan elektron/sinar-X yang dihasilkan dianalisis. Elektron/sinar-X ini memberikan informasi tentang topografi, morfologi, komposisi, orientasi butiran, dan informasi kristalografi dari suatu material. Morfologi menunjukkan bentuk dan ukuran, sedangkan topografi mengacu pada fitur permukaan atau bagaimana tampaknya, termasuk tekstur, kehalusan, atau kekasaran. SEM adalah perangkat utama yang mampu menghasilkan gambar visual rinci partikel dengan resolusi spasial tinggi hingga 1 nm. Magnifikasi alat ini bisa mencapai 300.000 kali. Meskipun SEM hanya digunakan untuk memvisualisasikan gambar permukaan material dan tidak memberikan informasi internal, alat ini tetap dianggap sebagai instrumen yang kuat dalam mengkarakterisasi fitur kristalografi, magnetik, dan listrik sampel. SEM juga dapat digunakan untuk menentukan apakah ada perubahan morfologi pada partikel setelah permukaan sampel dimodifikasi dengan molekul lain (Akhtar *et al.*, 2018).

SEM dengan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX) merupakan gabungan dua teknik yang sering digunakan untuk analisis morfologi dan komposisi kimia pada sampel padat dengan resolusi tinggi. SEM berfungsi dengan menggunakan berkas elektron yang ditembakkan ke permukaan sampel yang menghasilkan berbagai jenis sinyal termasuk elektron sekunder dan elektron yang tersebar balik. Sinyal ini menghasilkan citra dengan resolusi yang sangat tinggi dari permukaan sampel. EDX di sisi lain, bekerja berdasarkan analisis sinar-X yang dihasilkan ketika elektron berinteraksi dengan atom dalam sampel. Sinar-X yang dihasilkan ini bersifat karakteristik untuk setiap elemen, sehingga memungkinkan identifikasi komposisi unsur dalam sampel. Teknik ini sangat berguna dalam memetakan distribusi elemen di sampel dan memberikan informasi kualitatif maupun kuantitatif terkait komposisi kimianya.

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat

Penelitian ini telah dilakukan dari bulan Oktober 2024 hingga Maret 2025 di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Pengambilan biomassa alga *Nannochloropsis* sp. dilakukan di Balai Besar Perikanan Budidaya Laut (BBPBL) Lampung. Identifikasi gugus fungsi pada alga dengan Spektrometer FTIR dilakukan di Laboratorium Kimia Organik Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Gadjah Mada. Analisis menggunakan SEM-EDX dilakukan di Laboratorium Terpadu FMIPA Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Analisis zat warna CR dan MO dilakukan dengan Spektrofotometer UV-VIS dilakukan di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

3.2. Alat dan Bahan

Adapun peralatan yang digunakan pada penelitian ini antara lain alat-alat gelas laboratorium, termometer, *hot plate*, spatula logam, *shaker*, neraca analitik, *magnetic stirrer*, mortar dan alu, pH meter, ayakan 100 mesh, klem dan statif, *bulp*, *centrifuge*, spektrometer FTIR tipe *Thermo Scientific Nicolet Is10*, SEM-EDX merek Jeol JSM-IT210, dan spektrofotometer UV-VIS tipe *Cary Series*.

Adapun bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini antara lain biomassa mikroalga *Nannochloropsis* sp., surfaktan kationik HDTMA-Br, CaCl_2 0,1 M, *congo red*, metil oranye, aquades, NaNO_3 , NaOH , HCl , buffer sitrat, buffer fosfat, etanol, KNO_3 , kertas saring, indikator universal, dan aluminium foil.

3.3. Prosedur Penelitian

3.3.1. Preparasi Biomassa Alga *Nannochloropsis* sp.

Biomassa alga *Nannochloropsis* sp. diperoleh dari Balai Besar Perikanan Budidaya Laut Lampung (BBPBL). Biomassa alga yang diperoleh dalam bentuk *flakes* dihaluskan menggunakan mortar dan alu lalu biomassa alga diayak dengan saringan 100 mesh (Buhani *et al.*, 2017; Suharso *et al.*, 2010).

3.3.2. Modifikasi Adsorben Alga dengan CaCl_2

Sebanyak 5 g biomassa alga *Nannochloropsis* sp. (Alga-N) dimasukkan ke dalam erlenmeyer 250 mL yang berisi 100 mL CaCl_2 0,1 M lalu *dishaker* selama 1 jam dan didiamkan selama 24 jam untuk meningkatkan kapasitas pertukaran kation pada biomassa alga. Setelah itu disaring menggunakan kertas saring. Endapan yang diperoleh dicuci dengan aquades hingga pH netral untuk menghilangkan sisa kalsium klorida. Endapan Alga-N-Ca yang dihasilkan kemudian didiamkan pada suhu ruang hingga kering.

3.3.3. Modifikasi Adsorben Alga-N-Ca dengan HDTMA

Sebanyak 2 g Alga-N-Ca dimasukkan ke dalam 200 mL HDTMA-Br 0,014 M. kemudian diaduk dengan kecepatan 100 rpm pada suhu 50 °C selama 4 jam dengan *magnetic stirrer*. Residu yang diperoleh dibilas dengan aquades hingga pH netral dan dikeringkan pada suhu ruang (Guler *et al.*, 2016).

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

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

1. Modifikasi adsorben alga *Nannochloropsis* sp. menjadi Alga-N-Ca dan Alga-N-HDTMA telah berhasil dilakukan yang ditunjukkan dengan karakterisasi menggunakan spektrometer FTIR yaitu muncul serapan pada bilangan gelombang $1435,04\text{ cm}^{-1}$ dan $1465,90\text{ cm}^{-1}$ didukung oleh munculnya unsur Br pada hasil analisis Alga-N-HDTMA dengan SEM-EDX.
2. Adsorpsi zat warna CR oleh adsorben Alga-N, Alga-N-Ca dan Alga-N-HDTMA optimum pada dosis 0,2 g, masing-masing pH 8, 10 dan 7, waktu kontak Alga-N dan Alga-N-Ca 30 menit, waktu kontak Alga-N-HDTMA 45 menit, dan konsentrasi adsorbat 400 ppm.
3. Adsorpsi zat warna MO oleh adsorben Alga-N, Alga-N-Ca dan Alga-N-HDTMA optimum pada dosis 0,2 g, masing-masing pH 9, 10, dan 8, waktu kontak Alga-N dan Alga-N-Ca 30 menit, waktu kontak Alga-N-HDTMA 45 menit, dan konsentrasi adsorbat 400 ppm.
4. Laju adsorpsi zat warna CR dan MO oleh Alga-N, Alga-N-Ca dan Alga-N-HDTMA cenderung mengikuti model kinetika pseudo orde dua dengan nilai R^2 mendekati 1.
5. Isoterm adsorpsi adsorben Alga-N dan Alga-N-Ca terhadap CR dan MO cenderung mengikuti model isoterm Freundlich sedangkan adsorben Alga-N-HDTMA cenderung mengikuti model isoterm Langmuir dengan nilai R^2 mendekati 1.

6. Mekanisme adsorpsi desorpsi Alga-N, Alga-N-Ca dan Alga-N-HDTMA masing-masing lebih didominasi oleh interaksi melalui ikatan hidrogen dan pertukaran ion.
7. Penggunaan ulang adsorben Alga-N dan Alga-N-Ca terhadap CR cukup efektif digunakan kembali sebanyak 2 siklus pengulangan, sedangkan Alga-N HDTMA sebanyak 3 siklus pengulangan. Penggunaan ulang adsorben Alga-N dan Alga-N-Ca terhadap MO cukup efektif digunakan kembali sebanyak 4 siklus pengulangan, sedangkan Alga-N-HDTMA sebanyak 6 siklus pengulangan.

5.2. Saran

Pada penelitian lebih lanjut disarankan:

1. Melakukan modifikasi adsorben menggunakan surfaktan atau garam kationik lain untuk membandingkan efektivitas dan karakteristik adsorpsi.
2. Menguji kemampuan adsorben Alga-N-Ca dan Alga-N-HDTMA dalam mengadsorpsi logam berat atau zat warna kationik untuk memperluas potensi aplikasinya.
3. Melakukan karakterisasi SEM-EDX pada adsorben sebelum dan setelah penggunaan ulang untuk mengamati kemungkinan perubahan morfologi permukaan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abewaa, M., Adino, E., and Mengistu, A. 2023. Preparation of Rumex Abyssinicus Based Biosorbent for The Removal Of Methyl Orange From Aqueous solution. *Heliyon*, 9: 1–18.
- Adawiah, S. R., Sutarno, Nur, A., Gani, R., dan Andriani, T. 2021. Studi Perbandingan Adsorpsi-Desorpsi Anion Nitrat dan Sulfat Pada Bentonit Termodifikasi. *Walisongo Journal of Chemistry*, 4(1): 23–31.
- Adawiah, S. R., Sutarno, dan Suyanta. 2020. Studi Adsorpsi-Desorpsi Anion Fosfat Pada Bentonit Termodifikasi CTAB. *Indonesian Journal of Chemical Research*, 8(2): 125–136.
- Akhtar, K., Khan, S. A., Khan, S. B., and Asiri, A. M. 2018. *Handbook of Materials Characterization*. Springer. 613 p.
- Al-Maliky, E. A., Gzar, H. A., and Al-Azawy, M. G. 2021. Determination of Point of Zero Charge (PZC) of Concrete Particles Adsorbents. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1184(1): 1-8.
- Alamsyah, M., Kalla, R., and La Ifa L. I. 2017. Pemurnian Minyak Jelantah Dengan Proses Adsorpsi. *Journal Of Chemical Process Engineering*, 2(2): 1-22.
- Alcalde-garcia, F., Prasher, S., Kaliaguine, S., Tavares, J. R., and Dumont, M. 2023. Desorption Strategies and Reusability of Biopolymeric Adsorbents and Semisynthetic Derivatives in Hydrogel and Hydrogel Composites Used in Adsorption Processes. *ACS ENGINEERING AU*, 3: 443–460.
- Aysu, T. and Sanna, A. 2015. Nannochloropsis Algae Pyrolysis with Ceria-Based Catalysts for Production Of High-Quality Bio-Oils. *Bioresource Technology*, 194: 108-116.
- Bahl, B. ., Tuli, G. ., and Bahl, A. 1997. *Essential of Physical Chemistry*. S Chand and Company. New Delhi. 1262 p.
- Bakatula, E. N., Richard, D., Neculita, C. M., and Zagury, G. J. 2018. Determination of Point of Zero Charge of Natural Organic Materials. *Environmental Science and Pollution Research*, 25: 7823–7833.
- 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*

Pollution, 234: 578.

- Buhani, Halimah, S. N., Suharso, and Sumadi. 2022. Utilization of Activated Carbon from Candlenut Shells (*Aleurites Moluccana*) as Methylene Blue Adsorbent. *Rasayan Journal of Chemistry*, 15(1): 124–131.
- Buhani, Hariyanti, F., Suharso, Rinawati, and Sumadi. 2019. Magnetized algae-silica hybrid from *Porphyridium* sp. biomass with Fe₃O₄ particle and its application as adsorbent for the removal of methylene blue from aqueous solution. *Desalination and Water Treatment*, 145: 336–344.
- Buhani B, Herasari D, Suharso S, and Yuwono S. D. 2017. Correlation of Ionic Imprinting Cavity Sites on the Amino-Silica Hybrid Adsorbent with Adsorption Rate and Capacity of Cd²⁺ Ion in Solution. *Orient J Chem*, 33(1): 418-429.
- Buhani, Istikomah, Suharso, Sumadi, Sutarto, Alghamdi, H. M., and Elwakeel, K. Z. 2023. Cationic Surfactant-Modified Tetraselmis sp. for the Removal of Organic Dyes from Aqueous Solution. *Molecules*, 28(23).1-16.
- Buhani, Miftahza, N., Suharso, Permatasari, D., and Sumadi. 2021. Dye Anionic Removal From Water by Green Synthesized *Nannochloropsis* sp.– Cetyltrimethylammonium Bromide Surfactant: Kinetics, Adsorption Isotherm and Adsorbent Regeneration. *Research Square*. 1-34.
- Buhani, Musrifatun, Pratama, D. ., Suharso, and Rinawati. 2017. Modification of *Chaetoceros* sp. Biomass with Silica-Magnetite Coating and Adsorption Studies towards Cu(II) Ions in Single and Binary System. *Asian Journal of Chemistry*, 29(8): 1757–1760.
- Buhani, Nadia, P. O., Sutarto, Suharso, Sumadi, Saputra, I. S., and Zulaicha, A. S. 2023. Modification of *Spirulina* sp . Algae by Exchanging Na⁺ Cations and Hexadecyltrimethylammonium⁺ (HDMTA)⁺ for Removal of Methyl Orange and Crystal Violet Dyes From Solution. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 20(9): 2363–2372.
- Buhani, Prayogo, A., Suharso, Sumadi, S., and Sutarto, S. 2024. Application of Modified *Sargassum Dupilcatum* Biomass as an Eco-Friendly Adsorbent for Removing Coomassie Brilliant Blue and Phosphate Ions From Solution. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(14): 1-20.
- Buhani, and Suharso. 2009. Immobilization of *Nannochloropsis* sp. Biomassa by Sol-Gel Technique as Adsorbent of Metal Ion Cu(II) from Aqueous Solution. *Asian Journal of Chemistry*, 21(5): 3799–3808.
- 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. *Sustain Environ Res*, 29, 27.
- Buhani, Suharso, and Aprilia, L. 2012. Chemical stability and Adsorption Selectivity on Cd^{2+} Ionic Imprinted *Nannochloropsis* Sp Material With Silica Matrix From Tetraethyl Orthosilicate. *Indonesian Journal of Chemistry*, 12(1): 94–99.
- Buhani, Suharso, Miftahza, N., Permatasari, D., and Sumadi. 2021. Improved Adsorption Capacity of *Nannochloropsis* sp. through Modification with Cetyltrimethylammonium Bromide on the Removal of Methyl Orange in Solution. *Adsorption Science & Technology*, 9: 1–14.
- Buhani, Suharso, Rilyanti, M., Sumadi, Rinawati, and Permatasari, D. 2024. Functionalization of Carbon From Rubber Fruit Shells (*Hevea brasiliensis*) with Silane Agents and Its Application to The Adsorption Of Bi-Component Mixtures Of Methylene Blue and Crystal Violet. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(12): 39994–40007.
- Blackburn, R.R. and S.M. Burkinshaw. 2002. A Greener to Cotton Deing With Excellent Wash Fastness. *Green Chem.*, (4): 47-52.
- Chen, J., Xiong, Y., Duan, M., Li, X., Li, J., Fang, S., Qin, S., and Zhang, R. 2020. Insight Into The Synergistic Effect of Adsorption–Photocatalysis For The Removal of Organic Dye Pollutants by Cr-doped ZnO. *Langmuir*, 36(2): 520–533.
- Dardouri, S. and Sghaier, J. 2017. A comparative study of adsorption and regeneration with different agricultural wastes as adsorbents for the removal of methylene blue from aqueous solution. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 25(9): 1282-1287.
- Deniz, F. 2013. Optimization of Methyl Orange Bioremoval by *Prunus Amygdalus* L. (Almond) Shell Waste: Taguchi Methodology Approach and Biosorption System Design. *Desalination and Water Treatment*, 51: 7067–7073.
- Dim, P. E., Mustapha, L. S., Termatanun, M., and Okafor, J. O. 2021. Adsorption of Chromium(VI) and Iron(III) Ions Onto Acid-Modified Kaolinite: Isotherm, Kinetics and Thermodynamics Studies. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(4): 103064.
- Ellerbrock, R. H. and Gerke, H. H. 2021. Pergeseran Pita Spektrum FTIR Dijelaskan Melalui Interaksi OM–kation. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 184(3): 388-397.
- 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.
- Ge, X., Wu, Z., Manzoli, M., Wu, Z., and Cravotto, G. 2020. Feasibility and The Mechanism of Desorption of Phenolic Compounds from Activated Carbons. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 59(26): 12223–12231.
- Gorbachef, Moiseev, and Upenskaya. 2022. Thermodynamic Properties of Solutions in a Calcium Chloride–Calcium Nitrate–Water System. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 96: 315–320.
- Haryono, Faizal, M., Liamita, C., and Rostika, A. 2018. Pengolahan Limbah Zat Warna Tekstil Terdispersi dengan Metode Elektroflotasi. *EduChemia: Jurnal Kimia Dan Pendidikan*, 3(1): 94–105.
- Hashem, M. A., Tabassum, J. N., Shahadat, M. S., Maoya, M., Mizan, A., Miem, M. M., and Zahin, M. E. H. 2025. Trivalent Chromium Adsorption Efficiency On Thermic Waste Mosquito Coil Adsorbent From Tannery Wastewater. *Green Analytical Chemistry*, 13: 100263.
- Hoek, C. V. D., Mann, D. G., and Jahns, H. . 1995. *Algae : An Introduction to Phycology*. Cambridge University Press. Cambridge. 637 p.
- Khoshnam, F., Zargar, B., and Moghadam, M. R. 2019. Adsorption and Removal of Ametryn Using Graphene Oxide Nano-Sheets From Farm Waste Water and Optimization Using Response Surface Methodology. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 16(7): 1383–1390.
- Khan, A., Naeem, A., and Mahmood, T. 2020. Thermodynamic Study of Adsorption of Methyl Orange and Congo Red from Aqueous Solutions by PVP-Functionalized ZnO. *Russian Journal of Physical Chemistry*, 94(8): 1581-1586.
- Lei, M., Yang, L., Shen, Y., Yang, L., and Sun, J. 2021. Efficient Adsorption of Anionic Dyes by Ammoniated Waste Polyacrylonitrile Fiber: Mechanism and Practicability. *ACS Omega*, 6(30): 19506–19516.
- Malakootian, M., Hatami, B., Dowlatshahi, S., and Rajabizadeh, A. 2016. Growth and Lipid Accumulation In Response To Different Cultivation Temperatures in *Nannochloropsis oculata* for Biodiesel Production. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 3(1): 29–34.
- Monica, D., Buhani, Rilyanti, M., Suharso, and Miftahza, N. 2022. Conversion of The Surface Charge Of *Nannochloropsis* sp. with Cations and The Adsorption Test for Methylene Blue And Methyl Orange In Dyes Solution. *AIP Conference Proceedings*, 2563(1).
- Mudasir dan Wahyuni, E. T. 2024. *Metode Spektrometri*. Gadjah Mada University

Press. Yogyakarta. 640 hlm.

- Nurhidayati, I., Mellisani, B., Puspita, F., and Putri, F. A. 2022. Penentuan Isoterm dan Kinetika Adsorpsi Ion Besi oleh Sedimen Sebagai Adsorben. *Warta Akab*, 46(1). 75-83.
- O'connell, D. W., Birkinshaw, C., and O'dwyer, T. F. 2008. Heavy Metal Adsorbents Prepared From The Modification of Cellulose : A Review. *Bioresource Technology*, 99, 6709–6724.
- Paterson, S., Gómez-Cortés, P., De la Fuente, M. A., and Hernández-Ledesma, B. 2023. Bioactivity and Digestibility of Microalgae *Tetraselmis* sp. and *Nannochloropsis* sp. as Basis of Their Potential as Novel Functional Foods. *Nutrients*, 15(2): 477.
- Patel, H. 2021. Review on Solvent Desorption Study From Exhausted Adsorbent. *Journal of Saudi Chemical Society*, 25: 1–11.
- Punitha, S., Uvarani, R., Panneerselvam, A., and Nithiyanantham, S. 2019. Physico-chemical Studies on Binary Aqueous Solutions of Anti-Viral Influenza Drugs. *Heliyon*, 5: 1–6.
- Rahayu, R., Tanasale, M. F. J. D. P., dan Bandjar, A. 2020. Isoterm Adsorpsi Ion Cr(III) oleh Kitosan Hasil Isolasi Limbah Kepiting Rajungan dan Kitosan Komersil. *Indonesian Journal of Chemical Research*, 8(1): 28-34.
- Rahmi, R. and Sajidah. 2017. Pemanfaatan Adsorben Alami (Biosorben) Untuk Mengurangi Kadar Timbal(Pb) dalam Limbah Cair. *Prosiding Seminar Nasional Biotik*, 271–279.
- Ramdani, N., Mustam, M., and Azis, H. A. 2023. *Bahan Ajar Kimia Instrumentasi*. Omera Pustaka. Yogyakarta. 843 p.
- Serban, G. V., Iancu, V. I., Dinu, C., Tenea, A., Vasilache, N., Cristea, I., Niculescu, M., Ionescu, I., and Chiriac, F. L. 2023. Removal Efficiency and Adsorption Kinetics of Methyl Orange from Wastewater by Commercial Activated Carbon. *Sustainability*, 15(17): 12939.
- Shah, R. K. 2023. Efficient Photocatalytic Degradation Of Methyl Orange Dye Using Facilely Synthesized A-Fe₂O₃ Nanoparticles. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(2): 1-10.
- Siddiqui, S. I., Allehyani, E. S., Al-Harbi, S. A., Hasan, Z., Abomuti, M. A., Rajor, H. K., and Seungdae, O. 2023. Investigation of Congo Red Toxicity towards Different Living Organisms: A Review. *Processes*, 11(3): 1-12.
- Taweekarn, T., Wongniramaikul, W., Sriprom, W., Limsakul, W., Phawachalotorn, C., and Choodum, A. 2024. Innovative Eco-Friendly

Methyl Orange Removal: Mechanism, Kinetic, and Thermodynamic Study Using Starch Cryogel-Integrated Mesoporous Silica Nanoparticles. *Heliyon*, 10: 1-15.

Tsagkaropoulou, G., Allen, F. J., Clarke, S. M., and Camp, P. J. 2019. Self-Assembly and Adsorption of Cetyltrimethylammonium Bromide and Didodecyldimethylammonium Bromide Surfactants at The Mica–Water Interface. *Soft Matter*, 8402–8411.

Wijayanti, I. E. and Kurniawati, E. A. 2019. Studi Kinetika Adsorpsi Isoterm Persamaan Langmuir dan Freundlich Pada Abu Gosok Sebagai Adsorben. *EduChemia : Jurnal Kimia dan Pendidikan*, 4(2): 175–184.

Yustinah, Hudzaifah, Aprilia, M., and Syamsudin, AB. 2019. Keseimbangan Adsorpsi Logam Berat (Pb) dengan Adsorben Tanah Diatomit Secara Batch. *KONVERSI*, 9(1): 17–28.

Zhang, H., Zhou, J., Muhammad, Y., Tang, R., Liu, K., Zhu, Y., and Tong, Z. 2019. Citric Acid Modified Bentonite for Congo Red Adsorption. *Frontiers in Material*, 6: 1-11.