



TUGAS AKHIR (WT43250)

**ANALISIS KINERJA KARBON AKTIF TEMPURUNG SIWALAN
SEBAGAI ADSORBEN UNTUK MENURUNKAN ZAT WARNA
*METHYLENE BLUE***

Thalia Putri Nurrohman
NRP. 1022040063

DOSEN PEMBIMBING :
ULVI PRI ASTUTI, S.T., M.T.
PUSPITA KHUMAIROH, S.T., M.Eng.

PROGRAM STUDI TEKNIK PENGOLAHAN LIMBAH
JURUSAN TEKNIK PERMESINAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2026



PPNS POLITEKNIK
PERKAPALAN
NEGERI SURABAYA

TUGAS AKHIR (WT43250)

**ANALISIS KINERJA KARBON AKTIF TEMPURUNG
SIWALAN SEBAGAI ADSORBEN UNTUK MENURUNKAN
ZAT WARNA METHYLENE BLUE**

Thalia Putri Nurrohman
NRP. 1022040063

DOSEN PEMBIMBING:
ULVI PRI ASTUTI, S.T., M.T.
PUSPITA KHUMAIROH, S.T., M.Eng.

**PROGRAM STUDI D4 TEKNIK PENGOLAHAN LIMBAH
JURUSAN TEKNIK PERMESINAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA 2026**

halaman ini sengaja dikosongkan

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**ANALISIS KINERJA KARBON AKTIF TEMPURUNG SIWALAN
SEBAGAI ADSORBEN UNTUK MENURUNKAN ZAT WARNA
METHYLENE BLUE**

Disusun Oleh:
Thalia Putri Nurrohman
1022040063

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Kelulusan
Program Studi D4 Teknik Pengolahan Limbah
Jurusan Teknik Permesinan Kapal
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA

Disetujui oleh Tim penguji Tugas Akhir Tanggal Ujian : 1 Juli 2026
Periode Wisuda : Oktober 2026

Menyetujui,

Dosen Penguji

NIDN/NUPTK

Tanda Tangan

- | | | |
|------------------------------------|--------------------|---------|
| 1. Ulvi Pri Astuti, S.T., M.T. | (8360768669230313) | (.....) |
| 2. Puspita Khumairoh, S.T., M.Eng. | (0660772673230292) | (.....) |
| 3. Novi Eka Mayangsari, S.T., M.T. | (8449768669230313) | (.....) |
| 4. Sekarsari Wibowo, S.T., M.T. | (6351777678230083) | (.....) |

Dosen Pembimbing

NIDN/NUPTK

Tanda Tangan

- | | | |
|------------------------------------|--------------------|---------|
| 1. Ulvi Pri Astuti, S.T., M.T. | (8360768669230313) | (.....) |
| 2. Puspita Khumairoh, S.T., M.Eng. | (0660772673230292) | (.....) |

Menyetujui

Ketua Jurusan,



Dr. Ir. Priyo Agus Setiawan, S.T., M.T.

NIP. 197708192005011001

Mengetahui

Koordinator Program Studi,

Dr. Mirna Apriani, S.T., M.T.

NIP. 197804142005012002

halaman ini sengaja dikosongkan



PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

No. : F.WD I. 021

Date : 3 Nopember 2015

Rev. : 01

Page : 1 dari 1

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Thalia Putri Nurrohman

NRP : 1022040063

Jurusan/Prodi : D4 Teknik Pengolahan Limbah

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa :

Tugas Akhir yang akan saya kerjakan dengan judul :

"Analisis Kinerja Karbon Aktif Tempurung Siwalan sebagai Adsorben untuk Menurunkan Zat Warna *Methylene Blue*"

Adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain.

Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam karya ilmiah tersebut, maka saya bersedia menerima **sanksi** sesuai ketentuan peraturan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Surabaya, 27 Juni 2026

Yang membuat pernyataan



(Thalia Putri Nurrohman)

NRP.1022040063

halaman sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur, penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan kelimpahan rahmat, hidayah, serta kenikmatan yang tidak terhingga nilainya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “**Analisa Kinerja Karbon Aktif Tempurung Siwalan sebagai Adsorben untuk Menurunkan Zat Warna *Methylene Blue***”. Penulisan tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat kelulusan pada Program Studi Diploma IV Teknik Pengolahan Limbah di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Penulis juga menyadari bahwa dalam penulisan Tugas Akhir ini tidak akan berhasil tanpa bantuan dari berbagai pihak, baik berupa bimbingan, pengarahan dan motivasi sehingga telah memberikan semangat dalam proses penyusunan laporan ini. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terimakasih yang dalam kepada:

1. Kedua orang tua tercinta Bapak Kholilur Rahman dan Ibu Anis Sriwahyuningsih yang selalu memberikan doa, rasa sayang, nasihat, dukungan, serta motivasi yang tiada hentinya untuk segala kemudahan selama menjalani proses pengerjaan Tugas Akhir dari awal hingga akhir.
2. Saudara saudara saya tercinta yang selalu memberikan doa, semangat, dukungan, dan motivasi kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik
3. Diri saya sendiri yang telah bertahan hingga sejauh ini. karena tidak menyerah meskipun banyak hari yang terasa berat, penuh keraguan, dan melelahkan. Terima kasih telah memilih untuk terus melangkah, belajar dari setiap kegagalan, dan bangkit setiap kali keadaan tidak berjalan sesuai harapan.
4. Bapak Rachmad Tri Soelistijono, S.T., M.T. selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
5. Bapak Dr. Priyo Agus Setiawan, S.T., M.Sc.Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Permesinan Kapal.
6. Ibu Dr. Mirna Apriani, S.T., M.T selaku Koordinator Program Studi Teknik Pengolahan Limbah.

7. Ibu Ulvi Pri Astuti, S.T., M.T selaku Dosen Pembimbing I yang telah membantu dan mengarahkan penulis selama mengerjakan tugas akhir ini, serta meluangkan waktu selama proses bimbingan tugas akhir.
8. Ibu Puspita Khumairoh, S.T.,M.Eng selaku Dosen Pembimbing II yang telah membantu dan mengarahkan penulis selama mengerjakan tugas akhir ini, serta meluangkan waktu selama proses bimbingan tugas akhir.
9. Ibu Novi Eka Mayangsari, S.T.,M.T dan Ibu Sekarsari Wibowo, S.T., M.T selaku dosen penguji yang telah memberikan banyak saran dan masukan dalam penyempurnaan tugas akhir ini.
10. Ibu Ayu Nindyapuspa, S.T., M.T selaku Koordinator Tugas Akhir Program Studi Teknik Pengolahan Limbah.
11. Bapak dan Ibu Dosen Teknik Pengolahan Limbah yang telah mendoakan kami serta memberikan ilmu yang bermanfaat selama perkuliahan.
12. Beberapa teman kelas PLB sebagai partner sekaligus sahabat penulis dalam mengerjakan tugas akhir ini dari awal hingga akhir.
13. Teman-teman dekat penulis ‘‘Grub Haram’’ Alya, Kheyly dan Rizal yang telah memberikan semangat dan bantuan penulis perhatian, dan motivasi pada penulis dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
14. Ryan Syehan Abi Shawaaba sebagai partner sekaligus tempat berbagi cerita selama masa perkuliahan. Perhatian, kesabaran dan motivasi yang diberikan menjadikan salah satu semangat bagi penulis untuk terus melangkah, bangkit ketika mengalami kesulitan dan dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan sebaik-baiknya.
15. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu yang telah membantu memberikan referensi, memberi pengarahan, saran, nasihat, dan dukungan motivasi pada Tugas Akhir ini.

Surabaya, 26 Juni 2026

Thalia Putri Nurrohman

ANALISA KINERJA KARBON AKTIF TEMPURUNG SIWALAN SEBAGAI ADSORBEN UNTUK MENURUNKAN ZAT WARNA

METHYLENE BLUE

Thalia Putri Nurrohman

ABSTRAK

Limbah tempurung siwalan berpotensi sebagai bahan baku karbon aktif karena kandungan lignoselulosa yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk analisis karakteristik karbon aktif, pengaruh parameter adsorpsi terhadap penurunan *methylene blue*, serta menentukan model isoterm dan kinetika adsorpsi. Tempurung siwalan dikarbonisasi pada suhu 450 °C selama 1 jam, diayak menggunakan ukuran 60 mesh, dan aktivasi dengan 1 M HCl selama 24 jam. Filtrat adsorpsi dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis, sedangkan karbon aktif dikarakterisasi dengan FTIR, SEM, dan BET sebelum proses adsorpsi. Analisis FTIR mengidentifikasi gugus fungsi O-H, C=C aromatik, C-H, dan C-O. Analisis SEM pada perbesaran 10.000× dengan diameter pori antara 4.479–11.672 nm, sedangkan analisis BET menunjukkan luas permukaan spesifik sebesar 0,000 m²/g. Kondisi adsorpsi optimal diperoleh pada konsentrasi metilen biru sebesar 10 ppm (98,60%), pH 8 (98,14%), dosis adsorben 2 g (99,31%), dan waktu kontak 60 menit (99,83%). Model isoterm Temkin (R^2) sebesar 0,9823 dan kinetika pseudoorde dua (R^2) 0,999 merupakan model yang paling sesuai untuk menggambarkan proses adsorpsi *methylene blue* oleh karbon aktif tempurung siwalan.

Kata kunci : Adsorpsi, Karbon aktif, *Methylene Blue*, Tempurung siwalan.

halaman sengaja dikosongkan

PERFORMANCE ANALYSIS OF SIWALAN SHELL ACTIVATED CARBON AS AN ADSORBENT FOR REDUCING METHYLENE BLUE DYE

Thalia Putri Nurrohman

ABSTRACT

Siwalan shell waste has potential as a raw material for activated carbon due to its high lignocellulose content. This study aims to analyze the characteristics of the activated carbon, examine the effect of adsorption parameters on methylene blue reduction, and determine the adsorption isotherm and kinetics models. Siwalan shells were carbonized at 450 °C for 1 hour, sieved using a 60-mesh sieve, and activated with 1 M HCl for 24 hours. The adsorption filtrate was analyzed using a UV–Vis spectrophotometer, while the activated carbon was characterized by FTIR, SEM, and BET prior to the adsorption process. FTIR analysis identified O–H, aromatic C=C, C–H, and C–O functional groups. SEM analysis at 10,000× magnification revealed pore diameters ranging from 4,479 to 11,672 nm, while BET analysis indicated a specific surface area of 0.000 m²/g. Optimal adsorption conditions were obtained at a methylene blue concentration of 10 ppm (98.60%), a pH of 8 (98.14%), an adsorbent dose of 2 g (99.31%), and a contact time of 60 minutes (99.83%). The Temkin isotherm model (R² of 0.9823) and the pseudo-second-order kinetics model (R² of 0.999) were the most suitable models for describing the adsorption of methylene blue by siwalan coconut shell activated carbon.

Keywords: Adsorption, Activated carbon, Methylene blue, Siwalan shell.

halaman sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	v
KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK.....	ix
<i>ABSTRACT</i>	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat Tugas Akhir	3
1.5 Batasan Masalah	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Tempurung Siwalan.....	5
2.2 Zat Warna <i>Methylene Blue</i>	7
2.3 Adsorben	8
2.4 Adsorpsi	10
2.5 Kapasitas Adsorpsi	12
2.5.1 Isoterm Langmuir.....	13
2.5.2 Isoterm Freundlich	13
2.5.3 Isoterm Temkin.....	14
2.6 Analisa Statistik.....	15

2.6.2.	Uji ANOVA (<i>Analysis of Varians</i>)	15
2.7	Analisa Instrumen	16
2.8	Penelitian Terdahulu	17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		19
3.1	Kerangka Penelitian	19
3.2	Jenis Penelitian	21
3.3	Lokasi dan Waktu Penelitian.....	21
3.4	Rancangan Penelitian.....	21
3.5.1	Bahan dan Alat.....	25
3.5.2	Prosedur penelitian.....	25
3.5.3	Metode Analisis Data	29
3.5.4	Analisa Instrumen	31
3.5.5	Analisa Statistik	32
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		35
4.1.	Karakteristik Karbon Aktif.....	35
4.1.1.	Analisa Uji <i>Fourier Transform Infrared</i> (FTIR)	35
4.1.2.	Analisa Uji <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	37
4.1.3.	Analisa Uji <i>Brunauer-Emmett-Teller</i> (BET).....	39
4.2.	Efektivitas Proses Adsorpsi.....	40
4.2.1.	Pengaruh Konsentrasi Terhadap Efisiensi Removal MB	40
4.2.2.	Pengaruh pH Terhadap Efisiensi Removal MB	42
4.2.3.	Pengaruh Massa Adsorben terhadap Efisiensi Removal MB	44
4.2.4.	Pengaruh Waktu Kontak Terhadap Efisiensi Removal MB	46
4.3.	Analisa Isoterm Adsorpsi.....	47
4.3.1.	Model Isoterm Langmuir.....	48
4.3.2.	Model Isoterm Freundlich	49

4.3.3. Model Isoterm Temkin.....	51
4.4. Analisa Kinetika Adsorpsi MB	52
4.5. Uji Statsitik.....	55
4.5.1. Uji Normalitas	56
4.5.2. Uji Homogenitas	58
4.5.3. Uji <i>One Way</i> ANOVA.....	58
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	61
5.1. Kesimpulan.....	61
5.2. Saran	62
DAFTAR PUSTAKA.....	63
LAMPIRAN I PERHITUNGAN LARUTAN.....	77
LAMPIRAN II PERHITUNGAN HASIL ADSORPSI.....	81
LAMPIRAN III Uji KARAKTERISASI	93
LAMPIRAN IV HASIL Uji STATISTIKA	99
LAMPIRAN V DOKUMENTASI PENELITIAN	105
BIODATA PENULIS.....	111

halaman sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.2 Komposisi Kandungan Lignoselulosa Tempurung Siwalan.....	6
Tabel 2.3 Standar Kualitas Karbon Aktif	9
Tabel 2.4 Perbandingan Antara Adsorpsi Fisika dan Adsorpsi Kimia.	12
Tabel 2.5 Penelitian Terdahulu Pemanfaatan Karbon Aktif. Sebagai Adsorben ..	18
Tabel 3. 1 Penentuan Massa Adsorben Terbaik	23
Tabel 3. 2 Penentuan Waktu Kontak Terbaik	23
Tabel 3. 3 Penentuan Konsentrasi Terbaik.....	24
Tabel 3. 4 Penentuan pH Terbaik	24
Tabel 4. 1 Hasil Analisis FTIR Karbon Aktif Tempurung Siwalan	36
Tabel 4. 2 Hasil Pengukuran Diameter Pori Karbon Aktif Tempurung Siwalan ..	37
Tabel 4. 3 Data Penentuan Kurva Isoterm Langmuir	48
Tabel 4. 4 Nilai Parameter Isoterm Langmuir Adsorpsi MB	49
Tabel 4. 5 Data Penentuan Kurva Isoterm Freundlich.....	49
Tabel 4. 6 Nilai Parameter Isoterm Freundlich Adsorpsi MB	50
Tabel 4. 7 Data Penentuan Kurva Isoterm Temkin	51
Tabel 4. 8 Nilai Parameter Isoterm Temkin Adsorpsi MB	52
Tabel 4. 9 Nilai Parameter Kinetika Adsorpsi MB pada Tempurung Siwalan	54
Tabel 4. 10 Hasil Uji Normalitas Variasi Konsentrasi	56
Tabel 4. 11 Hasil Uji Normalitas Variasi pH	56
Tabel 4. 12 Hasil Uji Normalitas Variasi Massa Adsorben	57
Tabel 4. 13 Hasil Uji Normalitas Variasi Waktu Kontak	57
Tabel 4. 14 Hasil Uji Homogenitas	58
Tabel 4. 15 Hasil Uji One Way ANOVA	59

halaman sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pohon Siwalan.....	6
Gambar 2.2 Struktur <i>methylene blue</i>	8
Gambar 4. 1 Hasil Spektrum FTIR.....	35
Gambar 4. 2 Hasil SEM karbon aktif perbesaran 10.000x	37
Gambar 4. 3 (a) Hasil Analisa BET karbon aktif (b) Grafik hasil BET	39
Gambar 4. 4 Grafik Hubungan Konsentrasi MB dengan % Removal.....	41
Gambar 4. 5 Grafik Hubungan Nilai pH dengan % Removal.....	43
Gambar 4. 6 Grafik Hubungan Massa Adsorben dengan % Removal	44
Gambar 4. 7 Grafik Hubungan Waktu Kontak dengan % Removal.....	46
Gambar 4. 8 Grafik Isoterm Langmuir Karbon Aktif.....	48
Gambar 4. 9 Grafik Isoterm Freundlich Karbon Aktif	50
Gambar 4. 10 Grafik Isoterm Temkin Karbon Aktif.....	51
Gambar 4. 11 Grafik kinetika adsorpsi pseudo orde satu	53
Gambar 4. 12 Grafik kinetika adsorpsi pseudo orde dua.....	54

halaman sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu bahan pencemar utama yang ditemukan pada limbah cair industri batik adalah zat warna sintetis seperti *methylene blue* (MB) (Suprihatin *et al.*, 2022). Zat warna MB dalam industri batik berasal dari proses pewarnaan kain. Penelitian (Masnesia, 2017) menyebutkan nilai konsentrasi MB pada limbah batik di daerah Indonesia yaitu sebesar 14,159 mg/L. Pewarna ini dapat menimbulkan efek karsiogenik dan mutagenik bagi manusia, serta memicu gangguan ekosistem perairan yang ditandai dengan menurunnya populasi organisme yang hidup (Asiah *et al.*, 2022). Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 baku mutu air limbah yaitu 5-10 mg/L MB yang boleh dibuang ke badan air.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengolah limbah cair industri batik, antara lain proses koagulasi (Fitriyah *et al.*, 2022), fotokatalis (Sulistyaningsih & Agung, 2020), elektrokatalisis (Ni'Mah *et al.*, 2020) serta adsorpsi. Metode adsorpsi dipilih karena salah satu metode yang paling menguntungkan karena prosesnya yang sederhana, memiliki efektivitas adsorpsi yang tinggi, biaya operasional rendah serta tidak memberikan efek samping berupa zat beracun (Putri & Oktaviana, 2024). Adsorpsi zat warna telah dilakukan dengan memanfaatkan bahan alami yang mengandung unsur karbon. Secara umum, bahan baku pembuatan karbon aktif berasal dari biomassa dengan kandungan lignoselulosa tinggi, seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin, yang banyak diperoleh dari limbah pertanian maupun perkebunan (Ronny, 2024). Salah satu biomassa hasil perkebunan yaitu limbah tempurung siwalan.

Siwalan (*Borassus flabellifer*) merupakan tumbuhan yang banyak tumbuh di wilayah pantai di daerah yang beriklim kering, salah satunya di Kabupaten Tuban. Terdapat sekitar 178.500 buah siwalan per tahun (Amalia *et al.*, 2023). Komposisi lignoselulosa pada tempurung siwalan menunjukkan variasi yang cukup besar tergantung pada sumber dan metode analisis. Kandungan selulosa sebesar 70%, hemiselulosa sebesar 30,96%, dan lignin sebesar 46,05%. Nilai kandungan lignoselulosa menunjukkan bahwa tempurung siwalan memiliki kandungan selulosa dominan, diikuti oleh hemiselulosa dan lignin, menjadikannya bahan potensial untuk produksi biochar maupun karbon aktif (A. Rahman *et al.*, 2025).

Karbon aktif dari tempurung siwalan atau lontar (*Borassus flabellifer* L.) terbukti efektif dalam mengadsorpsi zat warna kationik seperti MB. Kapasitas adsorpsi karbon aktif tempurung siwalan mencapai 438,52 mg/g, dan biosorben dari sabut siwalan mampu menghilangkan MB hingga 99,4%, sehingga menunjukkan potensi besar limbah tempurung siwalan sebagai bahan dasar karbon aktif (Nitsae *et al.*, 2020; Banamtuan *et.al*, 2020). Selain potensi bahan baku, proses aktivasi juga berperan dalam menentukan kualitas karbon aktif. Asam klorida (HCl) sebagai aktivator diketahui meningkatkan daya serap adsorben terhadap zat warna. Aktivasi menggunakan HCl 1 M terbukti menghasilkan karbon aktif dengan daya serap 98,71 % terhadap zat warna kationik (Mading *et al.*, 2024). Hal ini disebabkan oleh kemampuan HCl dalam membuka pori, menghilangkan pengotor, serta meningkatkan luas permukaan dan gugus fungsional yang memperkuat interaksi elektrostatik antara adsorben dan molekul zat warna (Setyaningrum *et al.*, 2024; Nuraini *et al.*, 2023).

Penelitian mengenai pemanfaatan tempurung siwalan sebagai bahan dasar adsorben telah banyak dilakukan, namun kajian yang berfokus pada penentuan kondisi optimum adsorpsi MB masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kemampuan karbon aktif yang berasal dari tempurung siwalan dan diaktivasi menggunakan HCl dalam menurunkan konsentrasi MB pada larutan. Penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan kondisi terbaik adsorpsi yang meliputi variasi massa adsorben, waktu kontak, konsentrasi larutan, dan pH.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik adsorben yang dihasilkan dari tempurung buah siwalan setelah dilakukan aktivasi kimia?
2. Bagaimana pengaruh variasi konsentrasi, pH, massa adsorben, dan waktu kontak terhadap penurunan zat warna *methylene blue*?
3. Bagaimana model isoterm dan kinetika adsorpsi zat warna *methylene blue* dengan adsorben tempurung siwalan?

1.3 Tujuan

1. Mengidentifikasi karakteristik adsorben limbah tempurung siwalan setelah dilakukan aktivasi kimia.
2. Menganalisis variasi konsentrasi, pH, massa adsorben, dan waktu kontak terhadap penurunan kandungan *methylene blue*.
3. Menganalisis model isoterm dan kinetika adsorpsi zat warna *methylene blue* dengan menggunakan adsorben tempurung siwalan.

1.4 Manfaat Tugas Akhir

Manfaat dari tugas akhir ini yaitu diharapkan dapat memberikan informasi kepada masyarakat bahwa limbah tempurung siwalan dapat dimanfaatkan menjadi karbon aktif sebagai adsorben penurunan kadar zat warna MB serta dapat digunakan sebagai acuan atau pembanding bagi penelitian selanjutnya yang berfokus pada pembuatan dan optimasi karbon aktif dari limbah biomassa serupa.

1.5 Batasan Masalah

1. Pengambilan limbah siwalan di Desa Semanding, Tuban,
2. Pembuatan karbon aktif tempurung siwalan menggunakan furnace dengan metode karbonisasi dengan suhu 450°C.
3. Parameter yang diuji pada penelitian ini yaitu limbah cair artifisial *methylene blue*.
4. Dalam penelitian ini menggunakan variasi massa adsorben, waktu kontak, konsentrasi adsorbat dan pH
5. Penelitian ini berskala laboratorium
6. Aktivasi adsorben menggunakan HCl 1M.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tempurung Siwalan

Buah siwalan (*Borassus flabellifer*) atau yang dikenal oleh masyarakat yaitu buah lontar merupakan flora khas Indonesia yang tumbuh di daerah beriklim kering seperti di Jawa Timur, NTT, Sulawesi Selatan dan Maluku Tenggara. Produk siwalan di Kabupaten Tuban merupakan produksi terbesar di Jawa Timur. Penghasil siwalan terbesar di Kabupaten Tuban berada di Kecamatan Semanding,

Pada tahun 2017 mengalami peningkatan sebesar 7.140,76 ton (BPPD, 2021). Menurut laman resmi Pemkab Kabupaten Tuban pada tahun 2023 tercatat 1.821 hektar lahan siwalan. Terdapat sekitar 595 pohon lontar penghasil buah siwalan yang menghasilkan 17.850 bungkus buah siwalan, dengan setiap bungkus berisi 10 buah, sehingga total buah yang dihasilkan mencapai 178.500 buah siwalan per tahun (Amalia *et al.*, 2023)

Tanaman jenis palma ini memiliki ciri fisik dapat dilihat pada Gambar 2.1 yaitu dengan ciri fisik berbatang tunggal, mempunyai ketinggian 15-40 meter, diameter batang sekitar 50 cm dengan batang besar dan agak hitam, bagian bawah terdapat pelepah daun yang tebal. Memiliki daun seperti kipas dan memiliki struktur menjari dengan warna hijau ke abu-abuan. Daun yang tua biasanya melengkung ke bawah tetapi masih menempel di tangkainya. Pelepah daunnya pendek, berwarna jingga, dan di bagian tepinya terdapat duri-duri kecil berwarna hitam. Bunga siwalan tumbuh terpisah antara jantan dan betina, muncul dari sela-sela pelepah dan menggantung.

Cabang bunga jantan lebih banyak dibandingkan dengan bunga betina. Memiliki warna putih susu dan tumbuh bergerombol di tangkai. Buah lontar berbentuk bulat, berwarna ungu tua, dengan ukuran sekitar 7-20 cm (Nasri *et al.*, 2017). Dari berbagai produksi siwalan, masyarakat masih belum memanfaatkan kulit atau tempurung buah siwalan dengan baik sehingga hanya menjadi limbah yang tidak bermanfaat (Hardiyanti *et al.*, 2021).



Gambar 2.1 Pohon Siwalan

Tempurung siwalan sendiri memiliki beberapa kandungan dari jenis polisakarida, seperti selulosa, hemiselulosa, lignin, abu dan kadar air. komposisi kimia tempurung siwalan yang ditunjukkan pada Tabel 2.1. Menurut hasil penelitian (C. Thevamirtha *et al.*, 2021). menunjukkan bahwa tempurung siwalan dan bagian lainnya memiliki kandungan lignoselulosa tinggi seperti selulosa, hemilosa, lignin dan polifenol yang ideal untuk proses karbonisasi. produk karbon dari siwalan ini menunjukkan berbagai macam karbon mulai dari hard carbon untuk baterai ion natrium, carbon nanodots untuk biosensor dan katalis, Arang untuk bahan bakar serta karbon aktif untuk meremoval limbah MB.

Tabel 2.1 Komposisi Kandungan Lignoselulosa Tempurung Siwalan

Selulosa %	Hemiselulosa %	Lignin %	Referensi
51,29	30,96	46,05	(Rohman <i>et al.</i> , 2025)
45-70	14-32	5-30	(M. A. Rahman <i>et al.</i> , 2025)
43,67	26,85	21,67	(Sriana <i>et al.</i> , 2021)
11,90	18,52	0,1	(Nugraha <i>et al.</i> , 2025)
58,56	16,29	12,87	(Sindhu <i>et al.</i> , 2024)

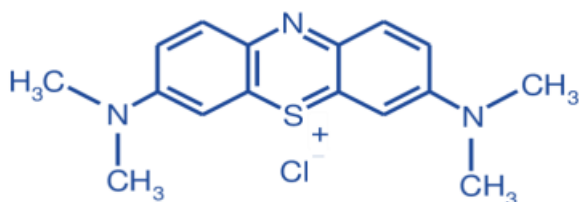
2.2 Zat Warna *Methylene Blue*

Pertumbuhan industri batik rumahan di Tuban sangat pesat, namun proses pengolahan limbah dari industri batik skala rumahan umumnya masih dilakukan secara sederhana, sehingga menimbulkan kekhawatiran terhadap potensi pencemaran lingkungan, baik di area pemukiman maupun pada aliran sungai di sekitarnya (Sholikhah *et al.*, 2020; Khasanah *et al.*, 2023). Apabila limbah cair batik dibuang langsung tanpa melalui proses hal tersebut dapat menimbulkan berbagai dampak lingkungan yaitu munculnya bau tidak sedap, tingginya kandungan COD, amonia, serta zat pewarna yang bersifat toksik (Pangestuti *et al.*, 2021). Oleh karena itu, zat warna yang bersifat toksik harus segera ditangani.

Jenis zat warna yang banyak digunakan dalam industri batik adalah pewarna sintesis, karena bahan ini mudah diperoleh dan mampu menghasilkan warna yang lebih cerah serta tahan lama dibandingkan pewarna alami (Indah, M. Utami, 2024). Jenis pewarna sintesis yang sering digunakan meliputi berbagai senyawa kimia seperti indigosol, naphtol, crystal violet, direct dye, metanil yellow, methyl orange, *coomassie brilliant blue*, malachite green, *methylene blue*, remazol yellow, rhodamine B, serta *methyl violet* (Subagyo & Soelistyowati, 2023). Metilen biru termasuk salah satu pewarna sintesis yang banyak digunakan pada proses pewarnaan kain karena mudah diperoleh, praktis digunakan, serta memiliki ketahanan warna yang baik atau tidak mudah luntur (Hikmah & Wahyuni, 2023).

Methylene Blue (MB) merupakan zat warna sintetik golongan basa (*Basic Dye*) yang dikenal juga dengan nama lain *Swiss Blue* atau *Basic Blue 9* dengan nomor indeks warna 52015. Zat warna ini memiliki panjang gelombang maksimum serapan (λ_{maks}) sebesar 664 nm. Metilen biru bersifat larut dalam air dengan kelarutan sekitar 3,55%, dan memiliki karakteristik ionisasi basa. Dalam bentuk larutannya, metilen biru menunjukkan sifat asam kuat dengan nilai pH berada pada kisaran 2,0 – 3,5. Karena struktur molekulnya yang bermuatan positif, metilen biru banyak digunakan sebagai zat warna kationik dalam industri tekstil dan juga sering digunakan sebagai model kontaminan untuk penelitian adsorpsi (Oladoye *et al.*, 2022). MB merupakan

kelompok tiazina yang memiliki nama IUPAC [7-(dimetil amino) fenotiazin-3-ilidena]-dimethyl azanium klorida dengan berat molekul 319,9 g/mol (Mallick *et al.*, 2024). Berikut Gambar 2.1 yaitu struktur kimia MB



Gambar 2.2 Struktur *methylene blue*

Sumber : (Modi *et al.*, 2022)

Paparan metilen biru dapat menimbulkan berbagai dampak negatif bagi kesehatan seperti dapat menyebabkan kerusakan ginjal, anemia hemolitik, dan gangguan sistem saraf. Pewarna ini juga stabil secara termal dan fotokimia, sehingga sulit didegradasi secara alami dan dapat mengganggu pertumbuhan alga (Modi *et al.*, 2022). Beberapa efek tersebut merupakan alasan yang menyebabkan pentingnya menghilangkan metilen biru dari perairan (Maryudi *et al.*, 2021).

2.3 Adsorben

Dalam proses adsorpsi dikenal dua istilah utama, yaitu adsorben dan adsorbat. Adsorben merupakan bahan yang berperan sebagai penyerap, sedangkan adsorbat adalah zat atau komponen yang akan diserap oleh adsorben (Kusumaningrum *et al.*, 2022). Salah satu jenis adsorben yang banyak dikembangkan adalah biosorben. Biosorben yaitu biomassa yang mampu mengikat atau menyerap polutan secara pasif dan/atau melalui mekanisme kompleksasi, termasuk terhadap ion logam (Fadhil *et al.*, 2019). Seiring meningkatnya kebutuhan teknologi pengolahan yang lebih berkelanjutan, bioadsorben semakin menjadi perhatian dalam pengolahan limbah, pengelolaan lingkungan, dan pemurnian air karena berasal dari bahan alami yang relatif mudah diperoleh dan berpotensi digunakan sebagai alternatif adsorben konvensional (Cahyani *et al.*, 2024).

Keunggulan utamanya adalah bersifat lebih ramah lingkungan, mudah terurai secara hayati (*biodegradable*), serta relatif lebih ekonomis dibandingkan adsorben kimia konvensional. Selain itu, bioadsorben mampu menurunkan berbagai jenis polutan, seperti logam berat, zat warna, dan senyawa organik berbahaya (Rapo & Tonk, 2021), (Singh *et al.*, 2021), (Hernández-origel *et al.*, 2022), (Manuel *et al.*, 2019). Salah satu bioadsorben yang paling sering digunakan pada proses adsorpsi ialah karbon aktif.

Karbon aktif merupakan material padat berpori dengan kandungan karbon sekitar 85–95% (Dewi *et al.*, 2020). Proses modifikasi karbon bertujuan untuk mengubah karbon biasa menjadi karbon aktif dengan sifat adsorpsi yang lebih baik (Ritonga *et al.*, 2025). Karbon aktif dikenal terutama karena kemampuannya menyerap berbagai zat. Kemampuan ini muncul karena karbon aktif memiliki pori-pori yang banyak dan permukaannya sangat luas. Semakin aktif struktur karbonnya, semakin besar pula daya serap yang dimilikinya. Bahan ini dihasilkan melalui proses pemanasan tinggi terhadap material yang kaya karbon tanpa melibatkan reaksi oksidasi. Untuk pembuatan karbon aktif maka diperlukan proses aktivasi fisika dan kimia berfungsi untuk meningkatkan kualitas serta memperbaiki struktur pori pada karbon (Ozdemir, 2023). Selain itu tujuan perlakuan dengan aktivasi yaitu untuk memperbaiki luas permukaan spesifik, memodifikasi gugus fungsional pada permukaannya (Shi *et al.*, 2023).

Menurut SNI 06-3730-1995 yang mengatur spesifikasi teknis karbon aktif, telah ditetapkan standar mutu yang harus dipenuhi dalam proses pembuatan karbon aktif seperti yang tercantum dalam Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Standar Kualitas Karbon Aktif

Karakteristik	Berukuran Serbuk
Kadar air	15%
Kadar Abu	10%
Kadar zat menguap	25%
Daya serap iodin	Min 750 mg/g
Karbon aktif murni	65%
Daya serap metil blue	Min 25 mg/g

Sumber : (Satriawan *et al.*, 2025)

2.4 Adsorpsi

Adsorpsi merupakan proses penyerapan di mana suatu fluida, baik berupa cairan maupun gas, menempel pada permukaan zat penyerap (adsorben) sehingga membentuk lapisan tipis dari zat yang terserap (adsorbat) di permukaan tersebut (Nugraha *et al.*, 2025). Proses adsorpsi di pengaruhi oleh, kecepatan pengadukan, konsentrasi adsorbat awal, ukuran partikel adsorben, nilai pH, temperatur, waktu kontak dan konsentrasi adsorben (Ifa *et al.*, 2021).

Adsorben dengan luas permukaan besar dan struktur berpori, seperti karbon aktif maupun karbon nanotube, umumnya menunjukkan kapasitas adsorpsi lebih tinggi karena memiliki lebih banyak situs aktif yang memungkinkan kontaminan menempel secara efektif pada permukaannya (Amrillah *et al.*, 2025). Untuk menentukan kapasitas adsorpsi pada adsorben dapat Dihitung dengan Rumus 2.1 berikut.

$$q_e = \frac{C_i - C_e}{m} \times V \quad (2.1)$$

dengan :

q_e = Kapasitas adsorpsi/massa adsorbat yang teradsorpsi per satuan massa adsorben (mg/g)

C_i = Nilai Konsentrasi Limbah Awal (mg/L)

C_e = Nilai Konsentrasi Limbah Akhir (mg/L)

m = Massa Adsorben (g)

V = Volume Adsorbat (L)

Perhitungan penentuan % Efisiensi adsorpsi dapat Dihitung dengan menggunakan rumus 2.2.

$$\% \text{ efisiensi} = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times 100 \quad (2.2)$$

dengan :

C_i = Konsentrasi Awal (mg/L)

C_e = Konsentrasi Akhir (mg/L)

Adsorpsi dapat dijalankan dalam dua mode utama, yakni *batch* dan *kontinu* keduanya memiliki karakteristik operasional dan aplikasi yang berbeda.

a. Sistem adsorpsi *batch*

Dalam sistem adsorpsi batch dijalankan dalam kondisi tertutup tanpa aliran masuk atau keluaran selama periode kontak antara adsorben dan adsorbat, pada penelitian (Coelho *et al.*, 2025) menyebutkan bahwa batch adsorption melibatkan pencampuran adsorben dan larutan adsorbat hingga tercapai kesetimbangan sebelum pemisahan.

b. Sistem adsorpsi *kontinu*

Larutan adsorben dialirkan secara terus menerus melalui kolom yang berisi adsorben sehingga proses penyerapan berjalan berkelanjutan, sebagaimana dijelaskan dalam (Patel, 2020) bahwa metode kolom kontinu banyak digunakan pada skala industri karena efisiensi alirannya. Dalam kolom adsorpsi, terdapat 3 konfigurasi aliran yaitu downflow, upflow dan multifold. Aliran downflow berarti larutan atau gas adsorbat dimasukkan dari atas kolom dan mengalir ke bawah melalui lapisan adsorben. pendekatan ini sederhana dan banyak digunakan dalam penelitian skala laboratorium maupun sistem kontinu skala kecil, seperti pada penelitian (Kristianingrum *et al.*, 2020) menggunakan sistem kolom downflow untuk menyerap logam Cu dan Zn dengan karbon aktif.

Menurut (Ismadji, 2021) Proses Adsorpsi dibedakan menjadi dua jenis mekanisme utama yaitu adsorpsi fisika (fisisorpsi) dan adsorpsi kimia (kemisorpsi). Adsorpsi fisika adalah interaksi antara adsorben dan adsorbat terjadi melalui gaya Van der Waals sedangkan Adsorpsi kimia yaitu melibatkan pembentukan ikatan kimia antara adsorben dan adsorbat, Perbedaan antara ke dua jenis mekanisme dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Perbandingan Antara Adsorpsi Fisika dan Adsorpsi Kimia.

Aspek	Adsorpsi Fisika	Adsorpsi Kimia
Jenis Ikatan	Ikatan gaya Van der Waals yang lemah	Terjadi ikatan kimia antara adsorben dan adsorbat
Transfer Elektron	Tidak terjadi transfer atau pembagian elektron.	Terjadi transfer elektron
Sifat Reaksi	Eksotermis (melepas panas)	Endotermis (menyerap panas)
Suhu Terbaik	Umum nya terjadi pada suhu rendah.	Umumnya terjadi pada suhu tinggi.
Reversibilitas	<i>Reversibel</i> —adsorbat dapat dilepaskan kembali dengan perubahan kondisi.	<i>Ireversibel</i> — ikatan kimia kuat, sulit dilepaskan.
Lapisan yang terbentuk	Dapat membentuk multilayer (berlapis-lapis).	Umumnya hanya membentuk monolayer (satu lapisan).
Ketergantungan Proses	Lebih dipengaruhi oleh sifat adsorbat.	Lebih dipengaruhi oleh sifat adsorben dan energi aktivasi.

Sumber : (Ismadji, 2021)

Sebaliknya, aliran upflow mengalir dari bawah ke atas, yang bisa meminimalkan pemadatan adsorben, terutama bila partikel adsorben ringan atau berpori. Kombinasi aliran seperti multi-flow merupakan distribusi bercabang atau beberapa inlet juga diterapkan untuk meningkatkan sebaran larutan adsorbat dan memastikan kontak merata di dalam kolom, terutama pada sistem dengan dimensi kolom besar. Pada penelitian (Subhan *et al.*, 2022) menjelaskan bagaimana variasi laju alir dalam kolom mempengaruhi model adsorpsi dan kapasitas, menunjukkan bahwa desain aliran kolom sangat krusial untuk optimasi efisiensi adsorpsi.

2.5 Kapasitas Adsorpsi

Persamaan isoterm digunakan sebagai dasar dalam menentukan sistem adsorpsi, karena menunjukkan bentuk interaksi yang terjadi antara adsorben dan adsorbat. Pada proses adsorpsi isoterm berfungsi untuk mengetahui mekanisme adsorpsi zat terlarut pada larutan oleh adsorben pada temperatur tetap (Indah *et al.*, 2022). Persamaan isoterm adsorpsi telah dikaji oleh Freundlich dan Langmuir yang dijelaskan pada sub bab berikut.

2.5.1 Isoterm Langmuir

Model Isoterm Langmuir berlandaskan pada konsep penyerapan yang terjadi hanya dalam satu lapisan (monolayer), dengan anggapan bahwa permukaan adsorben memiliki sifat yang seragam serta setiap molekul adsorbat menempel melalui proses yang sama. Persamaan Langmuir non linear Dituliskan dengan persamaan (2.3) (Ismadji, 2021):

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2.3)$$

Dapat dinyatakan dalam bentuk linear dengan persamaan (2.4) (Ismadji, 2021).

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{1}{q_m} C_e \quad (2.4)$$

dengan :

q_e = kapasitas adsorpsi kesetimbangan (mg/g)

C_e = konsentrasi zat warna dalam kondisi kesetimbangan (mg/L)

q_m = kapasitas adsorpsi adsorben terhadap larutan (mg/g)

K_L = konstanta langmuir (L/mg)

2.5.2 Isoterm Freundlich

Model isoterm Freundlich menggambarkan bahwa adsorben memiliki permukaan dengan situs aktif yang bersifat heterogen, dimana setiap bagian permukaan memiliki tingkat energi penyerapan yang berbeda. Oleh karena itu, model ini menunjukkan bahwa hanya area aktif pada permukaan adsorben yang berperan dalam penyerapan zat terlarut dari larutan. Mekanisme adsorpsi pada model ini berlangsung melalui proses kimia dan lebih dari satu jenis interaksi (multilayer) (Cendekia & Afifah, 2023). Berikut merupakan persamaan Freundlich pada persamaan (2.5) (Ismadji, 2021) :

$$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2.5)$$

Dapat dinyatakan dalam bentuk linear pada persamaan (2.6) (Ismadji, 2021).

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (2.6)$$

dengan:

C_e = konsentrasi pewarna di larutan pada saat kesetimbangan (mg/L)

K_f = konstanta Freundlich (mg/g)

n = intensitas adsorpsi

q_e = gram pewarna /gram adsorben pada saat kesetimbangan (mg/g)

2.5.3 Isoterm Temkin

Model isoterm temkin merupakan model isoterm adsorpsi dua parameter yang digunakan untuk menggambarkan hubungan antara kapasitas adsorpsi pada keseimbangan dan konsentrasi adsorbat, dengan memperhitungkan penurunan linier panas (Amrillah *et al.*, 2025). Bentuk linear isoterm Temkin biasanya ditulis sebagai (Ikrima *et al.*, 2020):

$$q_e = B \ln C_e + \ln K_T$$

dengan :

q_e =kapasitas adsorpsi pada keseimbangan (mg/g atau mmol/g)

C_e =konsentrasi adsorbat pada keseimbangan(mg/L atau mmol/L)

B = fungsi terkait panas adsorpsi

K_T = konstanta isoterm Temkin

Persamaan Temkin ini mirip persamaan Freundlich, tidak mempunyai hukum Henry untuk konsentrasi rendah dan kapasitas saturasi untuk konsentrasi tinggi. Nilai konsentrasi adsorbat yang sangat tinggi dan rendah dalam fasa cair diabaikan oleh persamaan Temkin. Model ini mengasumsikan bahwa adsorpsi berlangsung secara multilayer serta mempertimbangkan perubahan energi adsorpsi selama proses berlangsung (Ismadji, 2021).

2.6 Analisa Statistik

2.6.1. Uji Normalitas

Uji normalitas adsorpsi adalah pengujian statistik untuk mengetahui apakah data yang diperoleh dari suatu proses adsorpsi (misalnya, konsentrasi zat terlarut sebelum dan sesudah adsorpsi) berdistribusi normal (Quraisy, 2020). Normalitas data dapat dilihat dengan menggunakan uji normalitas *Kolmogorov–Smirnov*. Hasil uji normalitas dapat diinterpretasikan dengan melihat nilai signifikansi (p-value), di mana jika nilainya $>0,05$ terima H_0 maka data dianggap berdistribusi normal. Sebaliknya, apabila nilai signifikansi (p-value) $<0,05$ tolak H_0 maka data dinyatakan tidak berdistribusi normal (Nisak *et al.*, 2022).

2.6.2. Uji ANOVA (*Analysis of Varians*)

ANOVA merupakan metode statistik yang digunakan untuk membandingkan rata-rata dari tiga atau lebih kelompok data. Uji ini merupakan pengembangan dari uji t dan bertujuan mengetahui apakah perbedaan pada variabel bebas berpengaruh terhadap variabel terikat. Uji ANOVA dibedakan menjadi 2 yaitu *One way Anova* dan *Two way Anova*. Untuk ANOVA *One way* ini digunakan untuk menguji rata rata perlakuan dari percobaan yang menggunakan satu faktor dalam variabel terikat (dependent variable), sedangkan ANOVA *Two way* terdapat dua factor dalam variabel terikatnya (Collins *et al.*, 2021).

Welch ANOVA merupakan pengembangan dari uji ANOVA satu arah yang digunakan ketika asumsi homogenitas variasi tidak terpenuhi. Uji ini dirancang untuk mengatasi perbedaan variasi antar kelompok sehingga menghasilkan pengujian yang lebih robust dibandingkan ANOVA konvensional. Menurut penelitian (Delacre *et al.*, 2020) Welch ANOVA direkomendasikan sebagai alternatif ANOVA satu arah ketika data menunjukkan varians yang tidak homogen karena mampu mengendalikan tingkat kesalahan tipe I dengan lebih baik dibandingkan uji F klasik. Selain itu, Welch ANOVA tidak mensyaratkan kesamaan varians antar kelompok sehingga lebih sesuai digunakan pada data yang heterogen.

Jika nilai signifikansi $< 0,05$ maka hipotesis nol (H_0) yang menyatakan bahwa ditolak artinya terdapat perbedaan yang signifikan antara rata-rata kelompok perlakuan sehingga faktor yang diuji berpengaruh signifikan terhadap adsorpsi. Sedangkan, jika nilai signifikansi $> 0,05$ maka (H_0) diterima yang berarti tidak memberikan pengaruh signifikan yang ditimbulkan oleh variasi perlakuan (Quraisy, 2020).

2.7 Analisa Instrumen

2.7.1 *Fourier Transform Infra Red Spectroscopy (FTIR)*

FTIR adalah metode spektroskopi yang mampu mengenali dan mendeteksi senyawa melalui interaksi antara gelombang inframerah dan molekul (Nugroho *et al.*, 2024). Daerah inframerah pada spektrum gelombang elektromagnetik berada dalam rentang panjang gelombang 14.000 cm^{-1} hingga 10^{-1} . FTIR juga digunakan untuk mendeteksi gugus fungsi. Spektroskopi FTIR memungkinkan analisis kandungan dalam sampel tanpa merusak sampel yang diteliti (Abriyani *et al.*, 2024).

Spektrum FTIR mencatat respons molekul terhadap radiasi inframerah melalui pola getaran dan rotasi atom dalam molekul. Oleh karena itu, FTIR tidak hanya berfungsi sebagai alat analisis, tetapi juga membantu memahami sifat dan karakteristik molekul. Spektrometri IR dapat dilakukan melalui dua metode yaitu transmisi dan reflektansi (Putu *et al.*, 2023). Metode transmisi mengukur penyerapan radiasi IR dalam volume sampel. Sampel dapat berupa padat, cair, atau gas, dengan prosedur yang sesuai. Apabila sampel tipis dan transparan, spektrum dapat diukur langsung.

Tiga metode umum dalam pengukuran spektrum FT-IR meliputi *Photoacoustic Spectroscopy* (PAS), *Attenuated Total Reflectance* (ATR), dan *Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform* (DRIFT). Masing-masing teknik ini digunakan untuk mendeteksi getaran molekul dengan karakteristik tertentu (Beasley *et al.*, 2014).

2.7.2 *Brunauer-Emmett-Teller (BET)*

Metode *Brunauer-Emmett-Teller* (BET) adalah teknik fundamental yang digunakan untuk mengukur luas permukaan spesifik material berpori, seperti padatan dan bubuk (Irwansyah *et al.*, 2024). Metode BET banyak

digunakan dalam penelitian ilmiah, proses industri, dan kontrol kualitas untuk menentukan luas permukaan material dengan akurasi dan reproduksibilitas tinggi (Yang *et al.*, 2023).

Luas permukaan spesifik suatu material merupakan sifat penting yang memengaruhi perilakunya dalam berbagai aplikasi, termasuk katalisis, adsorpsi gas, dan reaksi kimia. Metode BET mengasumsikan bahwa molekul gas membentuk lapisan seragam di permukaan, dan adsorpsi terjadi secara monolayer serta molekul-molekul tersebut tidak berinteraksi satu sama lain setelah teradsorpsi di permukaan (Irwansyah *et al.*, 2024).

2.7.3 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) adalah mikroskop elektron yang mampu menghasilkan citra permukaan sampel dengan resolusi tinggi (Septiano & Setyaningsih, 2021). Alat ini bekerja berdasarkan prinsip pantulan elektron dari permukaan objek, di mana citra terbentuk melalui deteksi elektron yang keluar akibat tumbukan berkas elektron (Setyaningsih & Septiano, 2019).

Perkembangan teknologi SEM memungkinkan pemindaian area luas dan pengumpulan data dalam jumlah besar, seperti menghitung partikel dan memperoleh statistik morfologi objek, termasuk distribusi ukurannya (Kharin, 2020). Selain itu, pengujian menggunakan SEM juga dapat menampilkan informasi morfologi dan memperkirakan komposisi campuran suatu material (Septiano *et al.*, 2019).

2.8 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu berfungsi sebagai pendukung dalam memperkuat teori yang akan digunakan. Berikut tabel 2.4 merupakan beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan dengan pemanfaatan karbon aktif tidak hanya menggunakan tempurung siwalan melainkan dengan berbagai limbah pertanian dan perkebunan lainnya dan pemanfaatannya bervariasi yang dapat menyisihkan dari berbagai jenis limbah industri.

Tabel 2.4 Penelitian Terdahulu Pemanfaatan Karbon Aktif Sebagai Adsorben

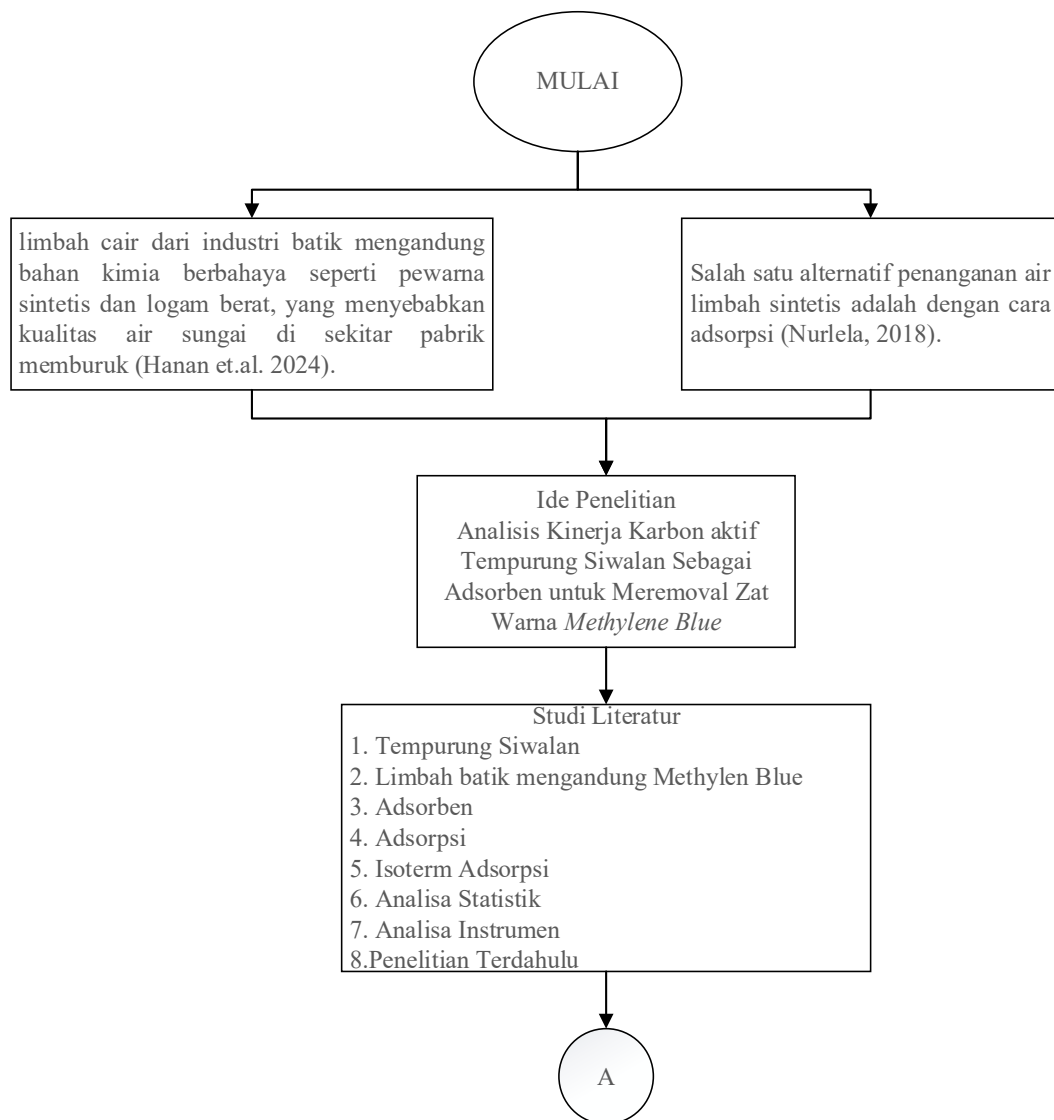
No	Nama dan Tahun Penelitian	Judul	Hasil Penelitian
1	(Abid <i>et al.</i> , 2024)	Adsorpsi Timbal (Pb) dalam Limbah Cair Batik Menggunakan Arang Aktif dari Tempurung Siwalan	Kondisi terbaik diperoleh pada massa adsorben 2 gram dan waktu kontak 150 menit dengan penurunan kadar Pb sebesar 98,478% (menjadi 0,028 mg/L), memenuhi baku mutu limbah <0,1 mg/L
2.	(Banamtuan <i>et.al</i> , 2020)	Studi Adsorpsi Metilen Biru Memanfaatkan Sabut Buah Lontar (<i>Borassus flabellifer</i> L.)	Hasil penelitian menunjukkan adsorpsi maksimum pada pH 7 dengan kapasitas 1,3 mg/g dan waktu kontak terbaik 50 menit, menghasilkan efisiensi adsorpsi 99,4% menggunakan aktivator KOH.
3.	(Govindaraj <i>et al.</i> , 2024)	<i>Application of nitric acid modified palmyra palm male inflorescence activated carbon for effective removal of methylene blue dye from the aquatic environment.</i>	Hasil penelitian menunjukkan kapasitas adsorpsi maksimum sebesar 38,82 mg/g dengan efisiensi 98,5% pada kondisi terbaik (pH 8, dosis 5 g/L, waktu kontak 50 menit, konsentrasi 100 mg/L). Adsorpsi mengikuti isoterm Freundlich ($R^2 = 0,9925$) dan kinetika Pseudo Orde Dua, menandakan proses multilayer, heterogen, dan dikendalikan secara kimia. Proses bersifat eksotermik, dan adsorben masih dapat digunakan hingga 4 siklus dengan efisiensi menurun dari 92,5% menjadi 60,45%.
3.	(Thevamirtha <i>et al.</i> , 2021)	Carbon-Based Materials from <i>Borassus flabellifer</i> and their Applications	<i>Borassus flabellifer</i> (Siwalan) memiliki kandungan karbon yang tinggi dan struktur lignoselulosa kompleks, sehingga berpotensi menghasilkan karbon aktif dengan luas permukaan besar.
4.	(Mading <i>et al.</i> , 2024)	Pembuatan karbon aktif dari tempurung buah lontar (<i>Borassus flabellifer</i> L.) sebagai adsorben rhodamine B.	Penelitian ini menggunakan karbon aktif dari tempurung lontar yang diaktivasi dengan HCl 1M selama 24 jam, dengan variasi massa adsorben (0,5–2,5 g) dan waktu kontak (30–150 menit). Hasil menunjukkan kadar air 2,18% dan kadar abu 9,17%. Kondisi terbaik adsorpsi Rhodamin B diperoleh pada massa 1 g, waktu kontak 30 menit, dan konsentrasi 30 ppm, dengan efisiensi adsorpsi hingga 99,94%.

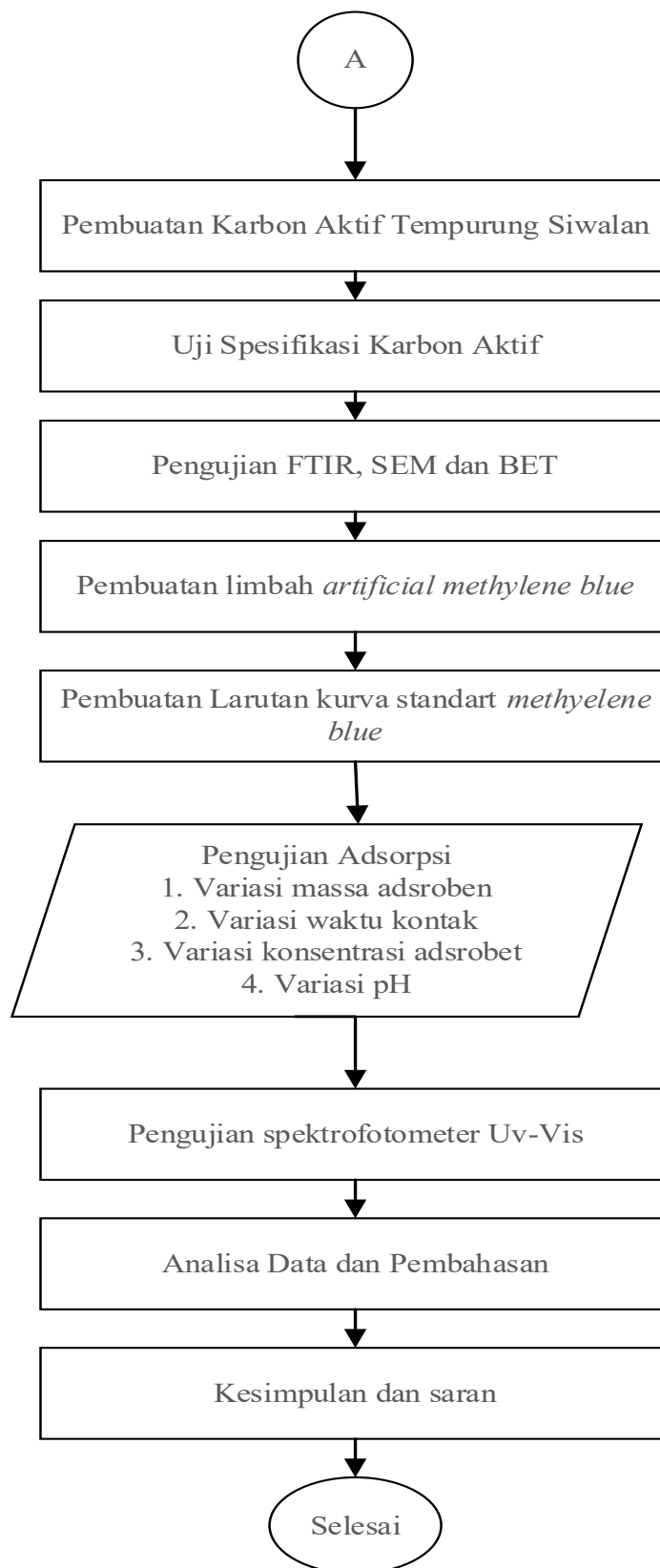
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian adalah suatu diagram yang dipakai sebagai acuan dalam menjelaskan garis besar alur sebuah penelitian. Pembuatan kerangka penelitian pada Gambar 3.1 mengacu pada permasalahan yang ada pada penelitian guna tercapainya tujuan dengan data data yang sudah terkumpul sebelum dilaksanakan penelitian.





Gambar 3. 1 Diagram Kerangka Penelitian

3.2 Jenis Penelitian

Penelitian ini bersifat eksperimental dengan pendekatan kuantitatif, menggunakan metode laboratorium untuk menguji nilai adsorpsi karbon aktif tempurung siwalan terhadap MB. Desain eksperimen melibatkan variasi independen (konsentrasi, pH, massa adsorben dan waktu kontak) dan pengukuran variabel dependen (efisiensi removal).

3.3 Lokasi dan Waktu Penelitian

3.3.1 Penentuan Tempat

1. Laboratorium Limbah Cair Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (uji konsentrasi larutan limbah *methylene blue* dengan Spektro UV-Vis);
2. Laboratorium Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh November (Uji karakteristik SEM);
3. Laboratorium Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh November (Uji karakteristik FTIR).
4. Labortorium Terpadu Universitas Islam Indonesia Yogyakarta (Uji karakteristik BET)

3.3.2 Penentuan Waktu

Waktu Penelitian akan dilaksanakan pada bulan Januari sampai dengan bulan Juli 2026.

3.4 Rancangan Penelitian

Pada penelitian ini menggunakan uji laboratorium untuk pengujian kapasitas adsorpsi karbon aktif dari limbah tempurung siwalan terhadap zat warna *methylene blue*. Terdapat tiga variabel pada penelitian ini yaitu variabel bebas, variabel kontrol, dan variasi terikat.

3.4.1 Variabel Terikat

Variabel terikat adalah faktor-faktor dalam penelitian yang dijaga tetap konstan atau tidak berubah agar tidak memengaruhi hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat. Pada penelitian ini yaitu Efisiensi removal (%).

3.4.2 Variabel Kontrol

Variabel kontrol adalah variabel utama yang diukur atau diamati dalam penelitian, yang nilainya dipengaruhi atau menjadi akibat dari perubahan pada variabel lain. Berikut ini merupakan variabel kontrol pada penelitian ini :

1. Temperature Furnace 450°C
2. Aktivasi HCl 1M 24 Jam
3. Ukuran Adsorben 60 mesh
4. Volume larutan 100 ml
5. Kecepatan pengadukan 100 rpm

3.4.3 Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang bersifat bebas, artinya variabel independent yang berperan dalam mempengaruhi perubahan pada variabel lain. Variabel bebas pada penelitian ini yaitu :

1. Variasi massa adsorben : 0,5 g/L ; 1 g/L ; 1,5 g/L ; 2 g/L dan 2,5 g/L. (Mading *et al.*, 2024)
2. Variasi waktu kontak : 10 menit, 20 menit, 30 menit, 40 menit, 60 menit, 120 menit dan 150 menit (Immanuel J. Emola *et al.*, 2021).
3. Variasi konsentrasi adsorbat : 1 ppm, 5 ppm, 10 ppm, 15 ppm, 20 ppm dan 25 ppm.
4. Variasi pH : 7,8,9,10,11 dan 12 (Labiebah *et al.*, 2019)

Penentuan Konsentrasi terbaik dilakukan untuk mengetahui jumlah adsorben yang paling efektif menyerap zat warna. Rincian variasi konsentrasi ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Penentuan Konsentrasi Terbaik

Jenis Adsorben	Konsentrasi (mg/L)	pH	Massa Adsorben (g)	Waktu Kontak (Menit)	Kode Sampel
Karbon Aktif Tempurung Siwalan	1	10	1	60	A1
	5				A2
	10				A3
	15				A4
	20				A5
	25				A6
Jumlah Sampel					6 Sampel

Keterangan :

A1 = Konsentrasi 1 ppm, massa 1 gram, waktu kontak 60 menit dan pH 10

A2 = Konsentrasi 5 ppm, massa 1 gram, waktu kontak 60 menit dan pH 10

A3 = Konsentrasi 10 ppm, massa 1 gram, waktu kontak 60 menit dan pH 10

A4 = Konsentrasi 15 ppm, massa 1 gram, waktu kontak 60 menit dan pH 10

A5 = Konsentrasi 20 ppm, massa 1 gram, waktu kontak 60 menit dan pH 10

A6 = Konsentrasi 25 ppm, massa 1 gram, waktu kontak 60 menit dan pH 10

Penentuan pH terbaik dilakukan untuk mengetahui pH yang paling efektif menyerap zat warna. Rincian variasi pH ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Penentuan pH Terbaik

Jenis Adsorben	Konsentrasi (mg/L)	pH	Massa Adsorben (g)	Waktu Kontak (menit)	Kode Sampel
Karbon Aktif Tempurung Siwalan	Terbaik	7	1	60	B1
		8			B2
		9			B3
		10			B4
		11			B5
		12			B6
Jumlah Sampel					6 Sampel

Keterangan :

B1 = Konsentrasi terbaik, massa 1 gram, waktu kontak 60 menit dan pH 7

B2 = Konsentrasi terbaik, massa 1 gram, waktu kontak 60 menit dan pH 8

B3 = Konsentrasi terbaik, massa 1 gram, waktu kontak 60 menit dan pH 9

B4 = Konsentrasi terbaik, massa 1 gram, waktu kontak 60 menit dan pH 10

B5 = Konsentrasi terbaik, massa 1 gram, waktu kontak 60 menit dan pH 11

B6 = Konsentrasi terbaik, massa 1 gram, waktu kontak 60 menit dan pH 12

Penentuan massa adsorben dilakukan untuk mengetahui massa adsorben yang paling efektif menyerap zat warna. Rincian konsentrasi ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3. 3 Penentuan massa adsroben Terbaik

Jenis Adsorben	Konsentrasi (mg/L)	pH	Massa Adsorben	Waktu Kontak (menit)	Kode Sampel
Karbon Aktif Tempurung Siwalan	Terbaik	Terbaik	0.5	60	C1
			1	60	C2
			1.5	60	C3
			2	60	C4
			2.5	60	C5
Jumlah Sampel					5 Sampel

Keterangan :

C1 = Konsentrasi terbaik, pH terbaik, massa 0.5 gram dan waktu kontak 60 menit

C2 = Konsentrasi terbaik, pH terbaik massa 1 gram dan waktu kontak 60 menit

C3 = Konsentrasi terbaik, pH terbaik massa 1.5 gram dan waktu kontak 60 menit

C4 = Konsentrasi terbaik, pH terbaik massa 2 gram dan waktu kontak 60 menit

C5 = Konsentrasi terbaik, pH terbaik massa 2.5 gram dan waktu kontak 60 menit

Penentuan waktu kontak terbaik dilakukan untuk mengetahui penentuan waktu kontak yang paling efektif menyerap zat warna. Rincian variasi waktu kontak ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3. 4 Penentuan waktu kontak Terbaik

Jenis Adsorben	Konsentrasi (mg/L)	pH	Massa Adsorben (g)	Waktu Kontak (menit)	Kode Sampel
Karbon Aktif Tempurung Siwalan	Terbaik	Terbaik	Terbaik	10	D1
				20	D2
				30	D3
				40	D4
				60	D5
				120	D6
				150	D7
Jumlah Sampel					7 Sampel

Keterangan :

D1 = Konsentrasi, pH, massa terbaik dan waktu kontak 10 menit

D2 = Konsentrasi, pH, massa terbaik dan waktu kontak 20 menit

D3 = Konsentrasi, pH, massa terbaik dan waktu kontak 30 menit

D4 = Konsentrasi, pH, massa terbaik dan waktu kontak 40 menit

D5 = Konsentrasi, pH, massa terbaik dan waktu kontak 60 menit

D6 = Konsentrasi, pH, massa terbaik dan waktu kontak 120 menit

D7 = Konsentrasi, pH, massa terbaik dan waktu kontak 150 menit

3.5 Metodologi Penelitian

3.5.1 Bahan dan Alat

1. Alat

- a. Oven
- b. Furnace
- c. Ayakan 60 mesh
- d. Glassware
- e. Kertas Saring whatman 42
- f. Alumunium foil
- g. Timbangan Analitik
- h. Kertas Indikator Universal
- i. Magnetic stirrer
- j. Spektrofotometer UV-Vis

2. Bahan

- a. Tempurung siwalan
- b. Aquadest
- c. HCl (merck)
- d. NaOH (merck)
- e. Metilen Biru

3.5.2 Prosedur penelitian

3.5.2.1 Preparasi Tempurung Siwalan

Proses preparasi tempurung siwalan dilakukan dengan mengacu pada penelitian (Abid *et al.*, 2024). Berikut merupakan tahapan preparasi tempurung siwalan :

- a. Tempuruang buah siwalan/lontar diambil dari Desa Prunggahan Kulon, Kecamatan Semanding, Kabupaten Tuban.

- b. Tempurung siwalan dicuci menggunakan air bersih untuk membersihkan kotoran yang menempel.
- c. Tempurung siwalan yang telah dicuci dikeringkan dibawah sinar matahari selama 1-2 hari.
- d. Tempurung kering dipotong menjadi ukuran kecil sekitar ± 2 cm.
- e. Tempurung dipanaskan menggunakan furnace pada suhu 450°C selama 1 jam hingga terbentuk karbon (Abid *et al.*, 2024).
- f. Karbon hasil karbonisasi didinginkan hingga suhu ruang menggunakan desikator.
- g. Karbon dihaluskan menggunakan mortar dan alu.
- h. Tempurung siwalan yang telah berbentuk serbuk arang tersebut, kemudian diayak menggunakan ayakan 60 mesh (Abid *et al.*, 2024) untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam.

3.5.2.2 Aktivasi Karbon

Aktivasi karbon tempurung siwalan dilakukan dengan mengacu pada penelitian (Mading *et al.*, 2024). Berikut merupakan tahapan aktivasi karbon :

- a. Karbon ukuran 60 mesh ditimbang sebanyak 60 gram.
- b. Setelah ditimbang dilakukan perendaman menggunakan larutan 500 ml HCl 1 M selama 24 Jam.
- c. Setelah perendaman, karbon dicuci menggunakan aquadest hingga pH netral dalam rentang pH 6-7.
- d. Karbon dikeringkan dalam oven dengan suhu 105°C selama 3 jam.

3.5.2.3 Pembuatan Limbah Artificial Zat Warna *Methylene Blue*

Pembuatan larutan limbah MB dilakukan dengan mengacu pada penelitian (Nurzihan *et al.*, 2019) Berikut merupakan tahapan pembuatan limbah artifisial MB :

1. Larutan stok MB dengan konsentrasi 1000 ppm dibuat dengan melarutkan 1 gram zat warna MB dengan menambahkan aquadest menggunakan labu ukur 1000 mL hingga mencapai tanda batas.

2. Pembuatan larutan MB 5 ppm; 10 ppm; 15 ppm; 20 ppm dan 25 ppm menggunakan pengenceran larutan induk MB 1000 ppm sebesar 0,5 mL; 1 mL; 1,5 mL; 2 mL dan 2,5 mL dengan menambahkan aquadest hingga 100 mL sehingga diperoleh konsentrasi larutan artifisial sesuai dengan variasi.

3.5.2.4 Pembuatan Kurva Kalibrasi Limbah Artificial Zat Warna *Methylene Blue*

1. Larutan standart MB dibuat dengan mengambil masing masing larutan menggunakan pipet sebanyak 0,1 mL; 0,2 mL; 0,3 mL; 0,4 mL dan 0,5 mL larutan stok MB.
2. Melakukan pengenceran dengan menggunakan aquadest pada labu ukur 100 mL hingga tanda batas sehingga diperoleh konsentrasi MB 1 – 25 ppm.
3. Mengukur nilai adsorbansi dari setiap larutan standart menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 665 nm (Cwalinski *et al.*, 2020).
4. Catat nilai absorbansi untuk setiap konsentrasi larutan standar.
5. Data hasil pengukuran kemudian di plot dalam bentuk kurva linear dengan absorbansi sebagai sumbu y dan konsentrasi MB sebagai sumbu x untuk memperoleh persamaan regresi linear $y = mx + y$

3.5.2.5 Proses Adsorpsi

1. Penentuan Konsentrasi Terbaik
 - a. Menyiapkan air limbah artifisial MB dengan variasi konsentrasi 1,5, 10, 15, 20 dan 25 ppm sebanyak 100 mL, lalu di masukkan ke dalam masing masing 6 gelas beaker dengan nilai pH 10.
 - b. Menambahkan adsorben pada masing masing glass beaker dengan dosis adsorben 1 gram MB.
 - c. Kemudian dilakukan pengadukan dengan waktu kontak 60 menit, menggunakan shaker pada kecepatan 100 rpm.
 - d. Campuran disaring menggunakan kertas saring Whatman untuk memisahkan filtrat dari residunya.

- e. Filtrat diukur nilai absorbansinya menggunakan spektrofotometer Uv-Vis pada panjang gelombang maksimum.
2. Penentuan pH Adsorpsi Terbaik
 - a. Menyiapkan air limbah *artificial* MB dengan konsentrasi 10 ppm yang diperoleh dari pengujian konsentrasi terbaik, lalu di masukkan ke dalam masing masing 5 gelas beaker.
 - b. Mengatur nilai pH dengan penambahan HCl atau NaOH 1M untuk mengatur pH dengan variasi sebesar 7,8,9,10,11 dan 12.
 - c. Menambahkan massa adsorben pada masing masing gelas beaker sebanyak 1 gram.
 - d. Kemudian dilakukan pengadukan dengan waktu kontak 60 menit menggunakan shaker pada kecepatan 100 rpm.
 - e. Campuran disaring menggunakan kertas saring Whatman untuk memisahkan filtrat dari residunya.
 - f. Filtrat diukur nilai absorbansinnnya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.
 3. Penentuan Massa Adsorben Terbaik
 - a. Air limbah artifisial MB disiapkan sebanyak 10 ppm yang diperoleh dari pengujian variasi konsentrasi terbaik sebagai larutan uji, lalu dimasukkan ke dalam masing masing 5 gelas beaker.
 - b. Mengatur suasana larutan pada kondisi pH optimum = 8 yang dieproleh dari pengujian variasi pH terbaik.
 - c. Masing masing gelas beaker di tambahkan adsorben dengan variasi massa sebesar 0,5 ; 1 ; 1,2 ; 2 dan 2,5 gram.
 - d. Kemudian dilakukan pengadukan menggunakan shaker dengan kecepatan 100 rpm selama 60 menit.
 - e. Campuran disaring menggunakan kertas saring Whatman untuk memisahkan filtrat dari residunya.
 - f. Filtrat diukur nilai absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

4. Penentuan Waktu Kontak Terbaik
 - a. Menyiapkan air limbah artifisial MB dengan konsentrasi 10 ppm ke dalam masing masing 5 gelas beaker dengan nilai pH 8.
 - b. Menambahkan adsorben pada masing masing gelas beaker sebanyak dosis adsorben yang terbaik untuk adsorpsi MB pada pengujian pengaruh variasi massa adsorben.
 - c. Dilakukan pengadukan dengan variasi waktu kontak 10, 20, 30, 40, 60, 120 dan 150 menit dengan menggunakan shaker pada kecepatan 100 rpm.
 - d. Campuran disaring menggunakan kertas saring untuk memisahkan filtrat dari residunya.
 - e. Filtrat diukur nilai absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

3.5.3 Metode Analisis Data

Data hasil penelitian dianalisis untuk mengetahui kemampuan adsorben dalam menyerap zat warna MB melalui perhitungan efisiensi adsorpsi, kapasitas adsorpsi, serta analisis model isoterm dan kinetika adsorpsi.

a. Efisiensi Adsorpsi

Efisiensi adsorpsi dihitung untuk mengetahui persentase zat warna yang berhasil teradsorpsi oleh adsorben, menggunakan Persamaan (3.6).

$$\text{Efisiensi Removal (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (3.6)$$

dengan:

C_0 = Konsentrasi awal metilen biru (mg/L)

C_t = konsentrasi akhir setelah adsorpsi (mg/L).

b. Kapasitas Adsorpsi (q_e)

Kapasitas adsorpsi pada keadaan setimbang dihitung menggunakan Persamaan (3.7).

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (3.7)$$

dengan:

q_e = Kapasitas adsorpsi pada keadaan setimbang (mg/g)

C_0 = Konsentrasi awal metilen biru (mg/L)

C_e = Konsentrasi setimbang (mg/L)

V = Volume larutan (L)

m = Massa adsorben (g)

c. Analisa Isoterm Adsorpsi

Data hasil percobaan dianalisis menggunakan model isoterm Langmuir, Freundlich dan Temkin untuk mengetahui pola penyerapan yang terjadi antara adsorben dan adsorbat.

- Model Isoterm Langmuir:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad (3.8)$$

dengan q_m adalah kapasitas maksimum adsorpsi (mg/g) dan K_L adalah konstanta Langmuir (L/mg).

- Model Isoterm Freundlich:

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (3.9)$$

dengan K_F dan n merupakan konstanta empiris yang menunjukkan kapasitas dan intensitas adsorpsi.

- Model Isoterm Temkin

$$q_e = B \ln C_e + \ln K_T \quad (3.10)$$

dengan q_e kapasitas adsorpsi pada keseimbangan (mg/g atau mmol/g), C_e konsentrasi adsorbat pada keseimbangan (mg/L atau mmol/L), B parameter terkait panas adsorpsi dan suhu, dan K_T konstanta isoterm Temkin (sering berhubungan dengan kuat lemahnya ikatan adsorbat–adsorben).

d. Analisa Kinetika Adsorpsi

Analisis kinetika dilakukan untuk menentukan mekanisme laju penyerapan metilen biru oleh adsorben. Model yang umum digunakan adalah pseudo-orde satu dan pseudo-orde dua, dengan persamaan berikut:

- Model Pseudo-Orde Satu:

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (3.10)$$

- Model Pseudo-Orde Dua:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (3.11)$$

dengan q_t adalah jumlah zat yang teradsorpsi pada waktu t , q_e kapasitas setimbang, k_1 dan k_2 masing-masing konstanta laju untuk model pseudo-orde satu dan dua.

3.5.4 Analisa Instrumen

3.5.4.1 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Aplikasi SEM secara umum digunakan untuk mengevaluasi fitur mikrostruktur serta sebaran dan kerapatannya, mengamati morfologi objek secara tiga dimensi (3D), dan menganalisis partikel meliputi ukuran, jumlah, serta bentuknya. Selain itu, SEM dapat dimanfaatkan untuk menilai porositas, mengidentifikasi retakan, serta mengevaluasi Lokasi kegagalan material seperti permukaan patahan dan permukaan aus akibat proses tribology (Inkson, 2016).

3.5.4.2 Brunauer-Emmett-Teller (BET)

Pengujian BET dilakukan untuk menentukan luas permukaan serta single point surface area pada adsorben (Efendi *et al.*, 2024). Luas permukaan menggambarkan total area permukaan yang berkaitan dengan keberadaan pori-pori pada material, sedangkan luas permukaan spesifik adalah luas permukaan adsorben yang dinyatakan per satuan massa (m^2/g).

3.5.4.3 Fourier Transform Infrared (FTIR)

Prinsip spektroskopi inframerah yaitu didasarkan pada fenomena teradsorpsinya radiasi inframerah oleh vibrasi molekul. Spektroskopi vibrasi ini adalah metode yang cukup baik dalam menganalisis struktur molekul. Radiasi elektromagnetik merupakan suatu bentuk dari energi yang diteruskan melalui ruang dengan kecepatan yang luar biasa (Sulistiyani, 2017).

3.5.5 Analisa Statistik

Analisis statistik dilakukan untuk mengetahui hubungan, perbedaan, serta tingkat signifikansi pengaruh variabel penelitian terhadap hasil proses adsorpsi. Data yang diperoleh dari hasil pengujian, seperti variasi massa adsorben, waktu kontak, dan konsentrasi larutan, dianalisis secara statistik untuk memastikan bahwa perbedaan hasil yang terjadi bersifat signifikan.

3.5.5.1 Uji Normalitas

Uji Normalitas dilakukan untuk memastikan bahwa data hasil penelitian berdistribusi normal. Distribusi data yang normal merupakan syarat penting sebelum dilakukan uji parametrik. Uji ini dapat dilakukan menggunakan metode Shapiro–Wilk karena jumlah sampel kurang dari 50 data. Apabila nilai signifikansi (p-value) $> 0,05$, maka data dianggap berdistribusi normal.

3.5.5.2 Uji ANOVA (Analysis of Variance)

Uji ANOVA digunakan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara beberapa perlakuan yang diberikan, misalnya variasi massa adsorben atau waktu kontak terhadap efisiensi penyerapan MB. Menggunakan *one way* ANOVA dipilih karena terdapat beberapa tingkat perlakuan pada variasi konsentrasi, pH, atau massa adsorben yang dibandingkan pengaruhnya terhadap efisiensi penyisihan atau kapasitas adsorpsi. Jika nilai Signifikan (p-value) $> 0,05$ maka tidak terdapat perbedaan yang signifikan antar perlakuan dengan hipotesa Terima H_0 . Sedangkan Jika nilai Signifikan (p-value) $< 0,05$ maka terdapat perbedaan yang signifikan antar perlakuan dengan hipotesa Tolak H_0 .

3.5.6 Kesimpulan

Metode eksperimen adsorpsi secara batch menggunakan karbon aktif tempurung siwalan untuk menurunkan konsentrasi MB pada larutan uji. Penelitian dilakukan empat tahap, yaitu konsentrasi awal (5, 10, 15, 20, 25 mg/L), variasi pH (7,8,9,10,11 dan 12), kemudian dilanjutkan pengujian pengaruh variasi massa adsorben (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 gram) serta pengujian pengaruh variasi waktu kontak (10, 20, 30, 40, 60, 120 dan 150 menit).

Konsentrasi awal dan akhir dianalisis dengan UV-Vis melalui kurva standar, lalu dihitung %removal dan kapasitas adsorpsi (q_e). Kemudian dilanjutkan perhitungan menentukan kinetika dan isoterm adsorpsi yang sesuai dengan hasil penelitian yang telah dilakukan. Data hasil percobaan dianalisis secara statistik menggunakan statistik deskriptif, uji normalitas, kemudian uji *one way* ANOVA satu arah sesuai kebutuhan.

halaman sengaja dikosongkan

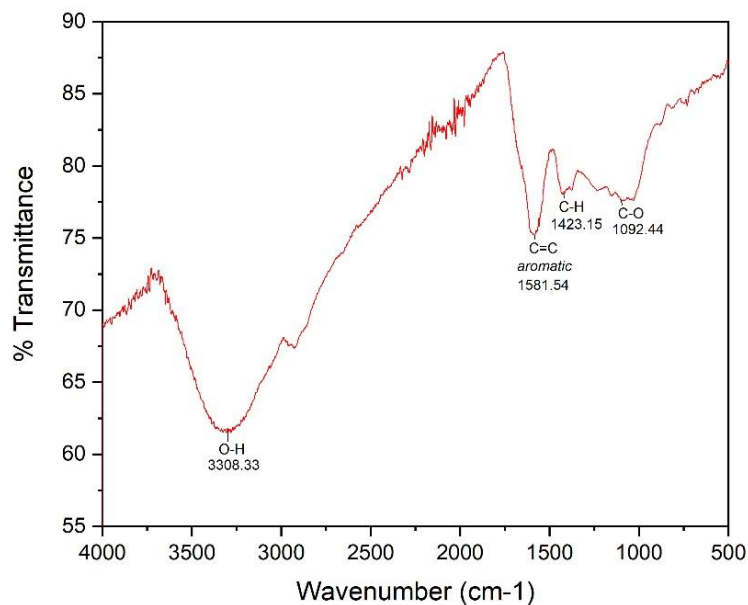
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Karakteristik Karbon Aktif

4.1.1. Analisa Uji *Fourier Transform Infrared* (FTIR)

Pengujian karakteristik *Fourier Transform Infrared* (FTIR) digunakan untuk mengidentifikasi adanya gugus fungsi yang terdapat dalam sampel. Rentang gelombang spektrum IR yang digunakan dalam pengujian sebesar 4000 cm^{-1} - 400 cm^{-1} (Lestriyani *et al.*, 2025). Hasil dari pengujian FTIR diperoleh beberapa puncak serapan yang menunjukkan gugus fungsi tertentu pada permukaan adsorben. Berikut merupakan hasil analisis FTIR berupa grafik adsorbansi versus angka gelombang, seperti pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Hasil Spektrum FTIR

Hasil spektrum FTIR dari karbon aktif tempurung siwalan dapat dilihat pada Tabel 4.1. Puncak pada bilangan gelombang 3308 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus hidroksil (O-H stretching) yang umumnya menandakan sampel berpotensi berinteraksi dengan adsorbat (Anugrahwati

et al., 2021). Keberadaan gugus ini mengindikasikan bahwa pada proses karbonisasi belum sepenuhnya menghilangkan gugus fungsional organik yang berasal dari molekul air dan gugus hidroksil yang terbentuk pada permukaan karbon aktif, (Joni *et al.*, 2021).

Puncak pada panjang gelombang serapan 1581.54 cm^{-1} menandakan getaran stretching dan menunjukkan keberadaan gugus C=C *aromatic* yang merupakan komponen penyusun dari struktur karbon aktif yang terbentuk setelah proses karbonisasi dan aktivasi (Joni *et al.*, 2021; Riyanto *et al.*, 2023). Vibrasi gugus C-H bending tipe senyawa alkana terdeteksi pada puncak 1423.15 cm^{-1} menandakan getaran deformasi sintetris atau regangan asimetris COO^- (karboksilat) yang berasal dari hemiselulosa yang tidak terurai sempurna selama karbonisasi serta oksidasi permukaan akibat aktivasi kimia (Handika *et al.*, 2017). Akibatnya gugus ini meningkatkan fleksibilitas pori mikro/meso (Bakti *et al.*, 2023)

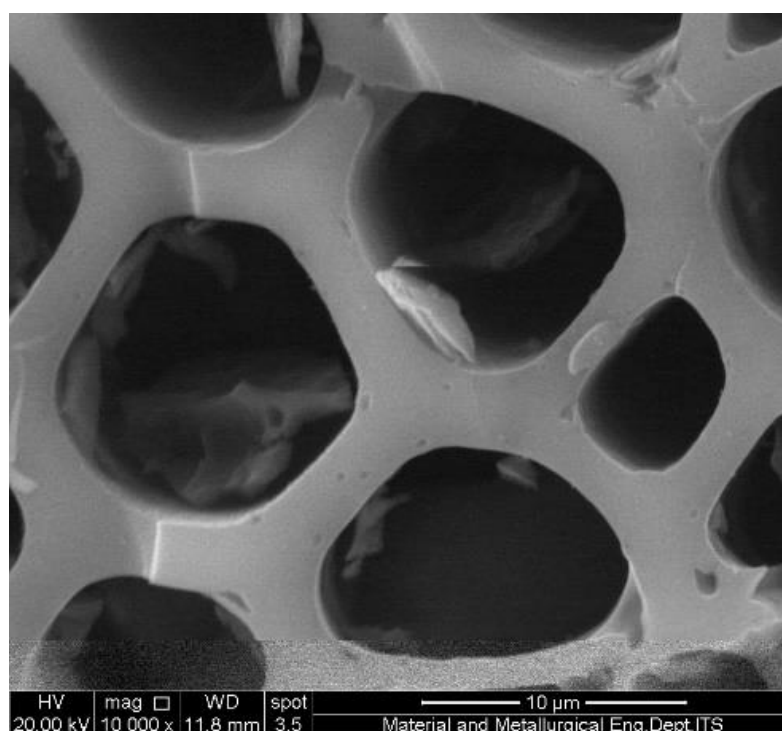
Puncak serapan di 1092 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus C-O yang disebabkan oleh getaran regangan C-O dari gugus fungsional lainnya pada permukaan karbon aktif (Elina *et al.*, 2023). Gugus fungsi C-O muncul ini disebabkan oleh lignin. Gugus ini merupakan gugus yang biasanya terdapat pada karbon aktif yang dihasilkan dari biomassa berasal dari alkohol, eter atau seter. Gugus C-O berkontribusi dalam meningkatkan kemampuan adsorpsi melalui interaksi kimia antara permukaan adsorben dan adsorbat, terutama pada adsorpsi zat warna (Lafi *et al.*, 2019).

Tabel 4. 1 Hasil Analisis FTIR Karbon Aktif Tempurung Siwalan

Nilai Gelombang (cm^{-1})	Rentang gugus fungsi (cm^{-1})	Gugus Fungsi	Referensi
3308.33	3200–3600	O-H	(Anugrahwati <i>et al.</i> , 2021), (Joni <i>et al.</i> , 2021)
1581.54	1650-1500	C=C <i>aromatic</i>	(Joni <i>et al.</i> , 2021), (Riyanto <i>et al.</i> , 2023).
1423.25	1450–1400	C-H	(Handika <i>et al.</i> , 2017), (Bakti <i>et al.</i> , 2023)
1092.44	1040-1250	C-O	(Elina <i>et al.</i> , 2023), (Lafi <i>et al.</i> , 2019)

4.1.2. Analisa Uji *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) berfungsi untuk mengamati morfologi permukaan dan struktur pori karbon aktif tempurung siwalan. Tujuan dari karakterisasi ini yaitu untuk mengevaluasi keberhasilan karbon aktif pada saat proses aktivasi HCL serta menjelaskan struktur permukaan terhadap efisiensi adsorpsi MB. Hasil karakterisasi SEM setelah dilakukan aktivasi dapat dilihat pada Gambar 4.2



Gambar 4. 2 Hasil SEM karbon aktif perbesaran 10.000x

Gambar 4.2 menunjukkan hasil SEM karbon setelah aktivasi kimia dan proses karbonisasi dengan perbesaran 10.000x. Semakin berkembang struktur pori pada permukaan adsorben, semakin besar peluang molekul MB berdifusi dan menempati situs aktif yang tersedia, sehingga dapat meningkatkan kinerja adsorpsi. Diameter pori dianalisis menggunakan perangkat lunak ImageJ, dan hasil pengukurannya disajikan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Hasil Pengukuran Diameter Pori Karbon Aktif Tempurung Siwalan

Rentang Ukuran Diameter pori (nm)	Rata-Rata Diameter Pori (nm)	Standart Deviasi (nm)
4479-11672	9322	2349

Rentang ukuran diameter pori karbon aktif yang dihasilkan menunjukkan bahwa Sebagian besar pori termasuk dalam kategori makropori. Terdapat variasi dalam ukuran pori berdasarkan IUPAC terdapat 3 ukuran yaitu mikropori (<2 nm), mesopori (pori dengan diameter antara 2-50 nm) dan makropori (pori dengan diameter >50 nm) (Onaola *et al.*, 2020). Secara umum, mekanisme adsorpsi pada material berpori berlangsung melalui beberapa tahapan. Makropori berfungsi sebagai jalur masuk yang memudahkan molekul adsorbat berdifusi dari permukaan menuju bagian dalam adsorben. Selanjutnya, molekul adsorbat bergerak melalui mesopori yang berperan sebagai jalur penghubung menuju pori yang lebih kecil. Proses adsorpsi kemudian terjadi terutama pada mikropori karena memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi sehingga menyediakan lebih banyak situs aktif untuk mengikat molekul adsorbat (Allen, 2020; Thommes *et al.*, 2015).

Hasil analisis pada perbesaran 10.000x menunjukkan bahwa diameter pori karbon aktif berada pada rentang 4479-11672 nm dengan nilai rata-rata sebesar 9322 nm. Ukuran pori yang relatif besar menunjukkan adanya rongga-rongga pada permukaan karbon aktif yang dapat memfasilitasi perpindahan molekul adsorbat dari permukaan menuju bagian dalam adsorben. Selain itu, morfologi permukaan yang tidak rata mengindikasikan bahwa proses karbonisasi dan aktivasi kimia telah menghasilkan struktur permukaan yang lebih terbuka akibat berkurangnya zat volatil dan pengotor yang sebelumnya menutupi pori..

Nilai standar deviasi sebesar 2349 nm menunjukkan bahwa ukuran pori yang teramati memiliki variasi yang cukup besar sehingga distribusi pori pada permukaan karbon aktif bersifat heterogen. Keberadaan rongga-rongga tersebut menunjukkan bahwa karbon aktif memiliki jalur difusi yang dapat meningkatkan kontak antara adsorben dan molekul MB, sehingga berpotensi mendukung proses adsorpsi (Boichuk *et al.*, 2024).

4.1.3. Analisa Uji *Brunauer-Emmett-Teller* (BET)

Analisis BET merupakan metode yang umum digunakan untuk menentukan luas permukaan dan karakteristik pori adsorben. Parameter luas permukaan dan porositas yang diperoleh dari analisis BET merupakan faktor penting yang memengaruhi kemampuan adsorben dalam menyerap zat pencemar (Fitriansyah *et al.*, 2021). Berikut merupakan hasil karakterisasi BET hasil luas permukaan karbon aktif yang ditunjukkan pada Gambar 4.3.

BET Multi-point BET results		
Isotherm Branch		Adsorption
Slope		-94.2934
Intercept		-24.6575
Correlation coeff., r		0.965996
C constant		4.82413
Surface area		0.000 m ² /g

Table - BET Multi-point BET		
Relative Pressure	Volume Adsorbed @ STP cc/g	1 / [W((P/Po) - 1)]
0.0513082	-1.67664	-25.8090
0.0917333	-2.37140	-34.0768
0.133347	-3.03538	-40.5580
0.175538	-3.98087	-42.7930
0.217091	-4.87294	-45.5292
0.260694	-5.81941	-48.4818
0.300936	-6.70153	-51.3965

Gambar 4. 3 Hasil Analisa BET karbon aktif

Analisis isoterm BET (7 titik) dilakukan proses degassing pada suhu 300°C selama 5 jam dengan ukuran karbon 60 mesh. Nilai luas permukaan spesifik sebesar 0,000 m²/g. Secara teoritis, nilai slope dan intercept pada persamaan BET harus bernilai positif agar perhitungan luas permukaan spesifik dapat dilakukan secara valid (Sağlam *et al.*, 2024). Oleh karena itu pada penelitian ini slope dan intercept bernilai negatif, maka nilai *monolayer capacity* (v_m) dan konstanta BET (C) yang dihitung dari persamaan BET menjadi tidak memenuhi asumsi BET sehingga perhitungan luas permukaan BET tidak valid.

Degassing merupakan salah satu metode yang mempengaruhi hasil uji BET yang dilakukan sebelum analisa dengan tujuan untuk menghilangkan kontaminasi gas pada mikropori karbon aktif agar menghasilkan hasil analisis yang lebih akurat (Erawati & Fernando, 2021). Suhu lebih tinggi dapat meningkatkan keterbukaan pori, tetapi jika terlalu tinggi dapat menyebabkan kerusakan struktur pori atau perubahan sifat permukaan adsorben (Li *et al.*,

2023). Selain itu, pada struktur makropori karena pori terlalu besar, maka jumlah permukaan internal yang efektif untuk adsorpsi fisik N₂ menjadi kecil, sehingga gas yang teradsorpsi tidak cukup untuk menghasilkan sinyal BET yang kuat dan dapat menyebabkan nilai BET sangat rendah (L *et al.*, 2023).

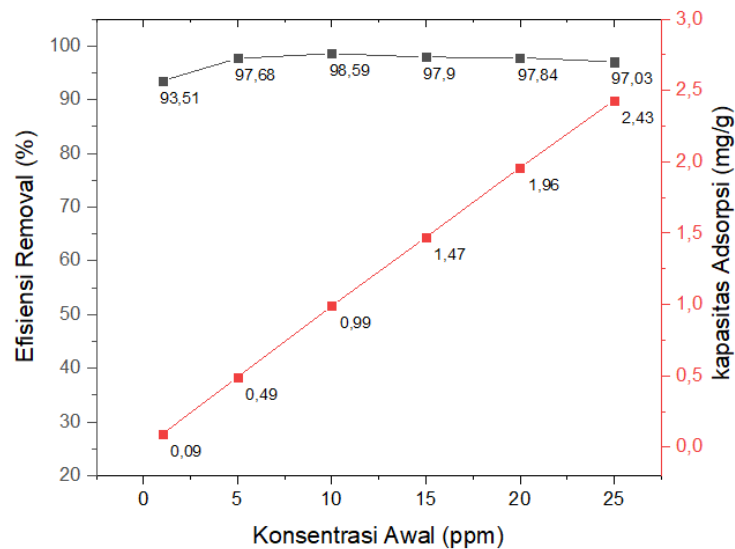
Meskipun nilai luas permukaan BET tidak terdeteksi, efisiensi removal yang dihasilkan tetap tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi tidak hanya dipengaruhi oleh luas permukaan, tetapi juga oleh gugus fungsi aktif, ukuran partikel, serta kondisi operasi seperti konsentrasi, waktu kontak, dan massa adsorben. (Wasilewska *et al.*, 2024). Oleh karena itu, meskipun hasil BET tidak valid, karbon aktif yang dihasilkan masih memiliki kemampuan adsorpsi yang cukup baik (Edith *et al.*, 2024).

4.2. Efektivitas Proses Adsorpsi

Pada penelitian proses adsorpsi ini menggunakan adsorben karbon aktif dari tempurung siwalan untuk meremoval limbah *methylene blue*. Proses adsorpsi menggunakan variasi konsentrasi 1 ppm, 5 ppm, 10 ppm, 15 ppm, 20 ppm dan 25 ppm. Variasi dosis adsorben sebesar 0,5 g, 1 g, 1,5 g, 2 g dan 2,5 g. Variasi pH sebesar 7, 8, 9, 10, 11 dan 12. Variasi waktu kontak selama 10 menit, 20 menit, 30 menit, 40 menit, 60 menit, 120 menit dan 150 menit.

4.2.1. Pengaruh Konsentrasi Terhadap Efisiensi Removal MB

Pengujian dengan variasi konsentrasi bertujuan untuk mengetahui efisiensi maksimum pada penyerapan MB dengan adsorben karbon aktif. Pengaruh konsentrasi MB terhadap efisiensi removal merupakan salah satu parameter penting dalam proses adsorpsi. Data hasil pengujian variasi konsentrasi kemudian diolah dan disajikan dalam bentuk grafik untuk menunjukkan hubungan antara konsentrasi awal MB terhadap persentase (%) efisiensi removal. Grafik tersebut ditampilkan pada Gambar 4.4. Berdasarkan grafik, terlihat bahwa efisiensi removal mengalami peningkatan dari konsentrasi rendah hingga mencapai nilai optimum.



Gambar 4. 4 Grafik hubungan konsentrasi awal MB dengan % Removal.

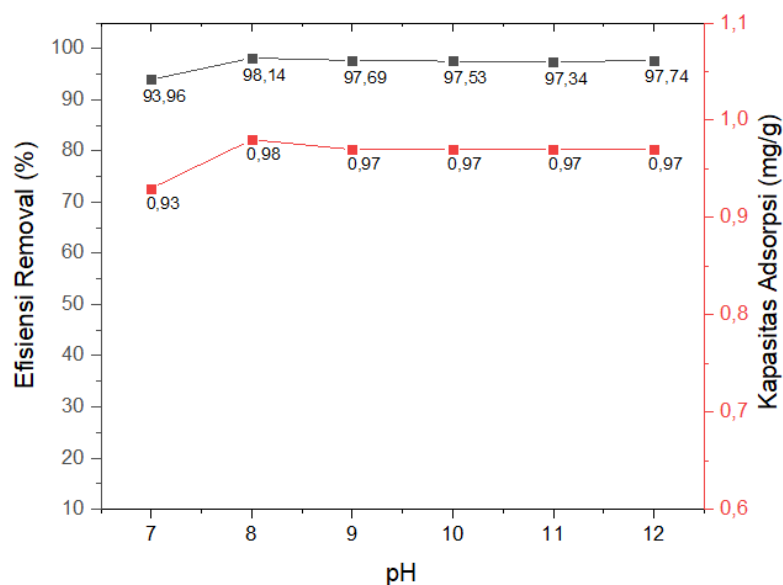
Hasil variasi konsentrasi Gambar 4.4 terlihat bahwa efisiensi removal MB mengalami perubahan seiring dengan peningkatan konsentrasi awal adsorbat. Pada konsentrasi 1 mg/L, efisiensi removal mencapai 93,5%. Meskipun nilai efisiensi relatif tinggi, namun nilai ini masih lebih rendah dibandingkan variasi konsentrasi lainnya. Hal ini disebabkan oleh jumlah molekul MB dalam larutan yang masih sedikit, sehingga frekuensi tumbukan antara molekul adsorbat dengan permukaan adsorben juga rendah. Akibatnya, interaksi adsorben dan adsorbat belum mencapai kondisi optimum.

Ketika konsentrasi meningkat menjadi 5 mg/L, efisiensi removal mengalami kenaikan signifikan menjadi 97,7%, dan mencapai nilai maksimum pada konsentrasi 10 mg/L sebesar 98,6%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa jumlah adsorbat yang tersedia mulai cukup untuk berinteraksi dengan situs aktif pada permukaan adsorben secara lebih efektif. Semakin banyak adsorbat yang tersedia dalam larutan, semakin besar peluangnya untuk berinteraksi dengan situs aktif adsorben (Tummino *et al.*, 2024). Kondisi ini menyebabkan jumlah adsorbat yang terserap meningkat sehingga efisiensi penyisihan menjadi lebih tinggi.

Namun, setelah mencapai konsentrasi optimum, yaitu pada 10 mg/L, efisiensi removal mulai mengalami penurunan. Pada konsentrasi 15 mg/L, efisiensi turun menjadi 97,9%, kemudian sedikit menurun lagi pada 20 mg/L sebesar 97,8%, dan semakin menurun pada 25 mg/L menjadi 97%. Penurunan ini terjadi karena jumlah situs aktif pada adsorben mulai terbatas dibandingkan dengan jumlah molekul adsorbat yang semakin banyak, sehingga terjadi persaingan antar molekul untuk menempati situs aktif yang tersedia (Shi *et al.*, 2023). Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa konsentrasi optimum untuk proses adsorpsi MB terjadi pada 10 mg/L dengan efisiensi removal tertinggi sebesar 98,6%, dan peningkatan konsentrasi lebih lanjut menyebabkan penurunan efisiensi akibat keterbatasan situs aktif pada adsorben.

4.2.2. Pengaruh pH Terhadap Efisiensi Removal MB

Nilai pH merupakan salah satu parameter paling krusial pada proses adsorpsi zat warna kationik MB. Pada kondisi asam terjadi gaya tolak-menolak dengan MB yang juga bermuatan positif (Fitriansyah *et al.*, 2021). Sebaliknya pada pH basa permukaan adsorben menjadi lebih negatif sehingga adsorpsi MB meningkat akibat gaya Tarik menarik yang lebih kuat (Khodaie *et al.*, 2020). Variasi pH dilakukan pengkondisian pH dengan penambahan larutan asam dan basa berupa HCL 1 M dan NaOH 1 M. Uji variasi pH, adsorben yang digunakan sebesar 1 gram dengan konsentrasi sebanyak 10 ppm sesuai dengan hasil optimum uji variasi konsentrasi MB. Hasil pengujian variasi pH diolah dalam bentuk grafik untuk mengetahui presentase efisiensi removal (%) dengan variasi pH untuk setiap adsorben pada grafik yang disajikan pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Grafik Hubungan Nilai pH dengan % Removal.

Hasil penelitian yang ditunjukkan pada grafik, efisiensi removal MB mengalami perubahan yang tidak jauh berbeda pada variasi pH 7 hingga pH 12 dan menunjukkan nilai yang cukup tinggi. Nilai efisiensi removal pada pH 7 sebesar 93,96%, kemudian mengalami peningkatan pada pH 8 menjadi 98,14%. Selanjutnya, pada pH 9 hingga pH 11 terjadi sedikit penurunan efisiensi masing-masing sebesar 97,70%, 97,54%, dan 97,34%, sebelum kembali mengalami peningkatan pada pH 12 menjadi 97,75%.

Peningkatan efisiensi yang sangat signifikan dari pH 7 ke pH 8 menunjukkan bahwa kondisi pH sangat mempengaruhi proses adsorpsi MB. Pada pH 7 efisiensi masih relatif rendah karena jumlah muatan negatif pada permukaan adsorben belum optimal untuk menarik molekul MB yang bersifat kationik. Selain itu, masih terdapat kompetisi antara ion H^+ dan molekul metilen biru dalam menempati situs aktif adsorben.

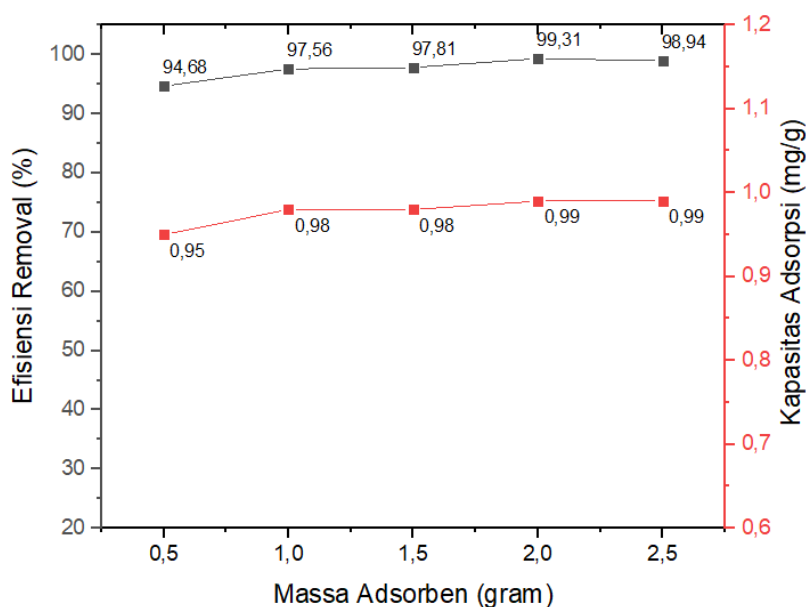
Pada pH 8, efisiensi removal mencapai nilai optimum atau kondisi jenuh sebesar 98,14%, yang menunjukkan kondisi optimum adsorpsi. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya jumlah ion OH^- dalam larutan yang menyebabkan permukaan karbon aktif menjadi bermuatan negatif. Muatan negatif ini meningkatkan gaya tarik elektrostatik terhadap molekul MB yang bermuatan positif, sehingga proses adsorpsi berlangsung lebih efektif (Kuang *et al.*, 2020). Pada pH 9 hingga 11 terjadi penurunan efisiensi removal. Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh adanya

kompetisi antara ion OH dengan molekul MB dalam proses adsorpsi atau perubahan ionisasi MB yang mengurangi kekuatan interaksi (Banamtuan *et.al*, 2020).

Variasi pH 12 efisiensi kembali meningkat sebesar 97,75%. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi basa kuat, terjadi pembukaan pori tambahan pada kondisi basa yang meningkatkan aksesibilitas adsorbat terhadap permukaan adsorben. Hasil data dan grafik yang diperoleh dari penelitian adsorpsi dengan variasi pH, kondisi pH optimum untuk meremoval MB adalah pada pH 8. Kondisi pH 8 dipilih karena adsorpsi mencapai efisiensi yang lebih tinggi sebesar 98,14%.

4.2.3. Pengaruh Massa Adsorben terhadap Efisiensi Removal MB

Peningkatan dosis adsorben memberikan pengaruh signifikan terhadap keberhasilan adsorpsi MB karena menentukan jumlah situs aktif dan luas permukaan yang tersedia untuk mengikat MB. Semakin besar massa adsorben, semakin banyak situs adsorpsi yang tersedia sehingga efisiensi removal meningkat hingga mencapai kondisi optimum (Amode *et al.*, 2023). Pada penelitian ini, dosis adsorben divariasikan untuk mengetahui kapasitas adsorpsi dalam mengadsorpsi MB. Data dari hasil variasi pH selanjutnya diolah dalam bentuk grafik untuk mengetahui presentase (%) dengan variasi pH untuk setiap adsorben. Grafik disajikan pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Grafik Hubungan Massa Adsorben dengan % Removal

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan massa karbon aktif tempurung siwalan berbanding lurus dengan efisiensi removal MB hingga mencapai suatu titik optimum, selanjutnya efisiensi cenderung stabil atau menurun sedikit. Hal ini sesuai dengan prinsip dasar adsorpsi, dimana semakin banyak massa adsorben yang digunakan, semakin banyak pula jumlah situs aktif dan luas permukaan yang tersedia untuk menyerap molekul MB dari larutan (Ristianingsih & Lestari, 2025). Pada massa adsorben 0,5 gram, efisiensi removal mencapai 94,68%, yang merupakan nilai terendah pada variasi massa yang diuji. Namun, nilai tersebut tetap menunjukkan kemampuan adsorpsi yang baik, karena sebagian besar molekul MB telah berhasil teradsorpsi meskipun jumlah situs aktif yang tersedia lebih sedikit dibandingkan pada massa adsorben yang lebih tinggi.

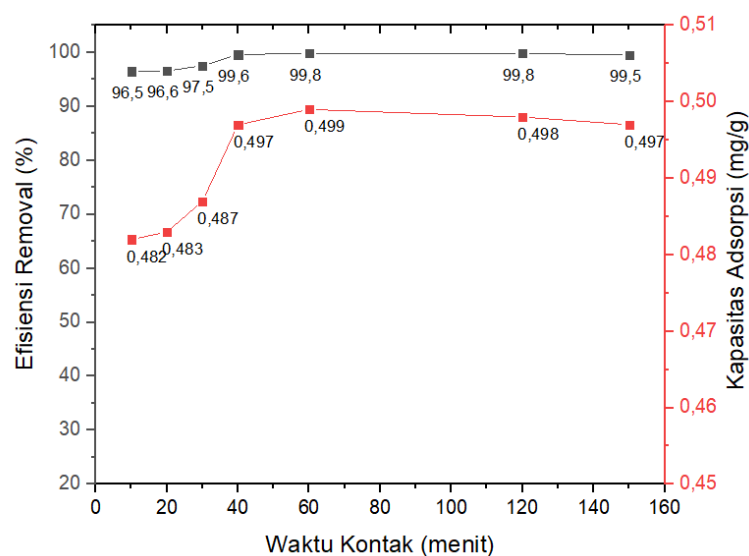
Ketika massa karbon aktif dinaikkan menjadi 1,0 gram, efisiensi removal meningkat menjadi 97,56%, dan pada massa 1,5 gram efisiensi mengalami kenaikan menjadi 97,81%. Peningkatan yang progresif namun semakin melambat ini mengindikasikan bahwa jumlah situs aktif mulai mendekati kapasitas yang mampu mengikat MB dalam kondisi konsentrasi dan waktu kontak tertentu, sehingga tambahan massa memang menyerap zat warna, tetapi efektivitas per tambahan gram adsorben mulai berkurang.

Pada massa 2 gram, efisiensi removal mencapai maksimum dan hampir sempurna yaitu sebesar 99,31%, yang menggambarkan bahwa kondisi tersebut mendekati optimum di mana hampir seluruh molekul MB telah terjerap oleh permukaan karbon aktif. Namun pada saat massa ditingkatkan lagi menjadi 2,5 gram, efisiensi removal menurun menjadi 98,95%.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa efisiensi removal MB pada larutan cenderung naik seiring meningkatnya variasi masa adsorben. Namun terdapat titik Dimana penurunan efisiensi removal pada saat 2,5 gram. Sehingga dari data grafik diatas, massa optimum pada penelitian ini sebanyak 2 gram dengan efisiensi penghilang sebesar 99,31%. Oleh karena itu, variasi massa adsorben 2 gram merupakan massa adsorben yang optimum karena mampu memberikan efisiensi paling maksimal dengan kadar efisiensi yang baik.

4.2.4. Pengaruh Waktu Kontak Terhadap Efisiensi Removal MB

Pengujian waktu kontak bertujuan untuk menentukan waktu optimum adsorben dalam mengadsorpsi MB hingga mencapai titik kesetimbangan. Konsentrasi, massa dan nilai pH diambil dari pengujian sebelumnya yang menunjukkan nilai optimum. Semakin lama waktu kontak, semakin besar jumlah MB yang teradsorpsi karena adsorbat memiliki lebih banyak waktu untuk berinteraksi dengan situs aktif adsorben hingga mencapai kondisi kesetimbangan (Ikhsany *et al.*, 2024). Data yang diperoleh dari pengujian variasi waktu kontak kemudian disajikan dalam bentuk grafik untuk menganalisis hubungan antara persentase (%) removal dan waktu kontak adsorben. Grafik dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4. 7 Grafik Hubungan Waktu Kontak dengan % Removal

Data hasil pengujian variasi waktu kontak disajikan dalam bentuk grafik untuk menunjukkan hubungan antara waktu kontak dengan persentase (%) removal MB oleh adsorben. Gambar 4.7 yang diperoleh, terlihat bahwa efisiensi removal mengalami perubahan seiring dengan bertambahnya waktu kontak. Nilai efisiensi cenderung meningkat yaitu dari 96,45% pada waktu 10 menit menjadi 96,56% pada waktu 20 menit. Efisiensi masih rendah karena proses adsorpsi baru dimulai molekul MB berinteraksi dengan situs aktif karbon aktif tempurung siwalan.

Lonjakan pertama pada waktu ke 30 menit 99,57% terjadi karena semakin banyak situs aktif yang terisi proses difusi molekul ke pori internal mulai berlangsung. Pada waktu 60 menit mengalami peningkatan tajam sebesar 99,83% karena mayoritas situs aktif sudah terisi dan laju adsorpsi mencapai puncak. Namun, pada waktu ke 120-150 menit efisiensi relatif stabil dan menurun yang mengindikasikan bahwa kesetimbangan adsorpsi tercapai (*equilibrium*), atau penurunan sedikit bisa disebabkan desorpsi atau saturasi situs aktif (Haqqu *et al.*, 2025)

Peningkatan efisiensi removal seiring bertambahnya waktu kontak menunjukkan bahwa semakin lama interaksi antara adsorben dan adsorbat, maka semakin banyak molekul MB yang teradsorpsi pada permukaan karbon aktif (Hatimah *et al.*, 2022). Penambahan waktu kontak antara adsorben dan adsorbat tidak lagi memberikan peningkatan yang berarti terhadap proses penyerapan zat warna setelah adsorpsi mencapai kondisi kesetimbangan (Dwijayanti *et al.*, 2020). Hal ini mengakibatkan jumlah zat warna tertukar semakin besar, yang mengindikasikan daya serapnya juga menurun.

Namun, setelah mencapai waktu tertentu, peningkatan efisiensi removal cenderung melambat. Kondisi ini menunjukkan bahwa adsorben mulai mencapai keadaan jenuh, di mana sebagian besar situs aktif telah terisi oleh molekul metilen biru. Dengan demikian, waktu kontak optimum pada penelitian ini terjadi pada waktu 60 menit dengan efisiensi removal sebesar 99,83%, yang menunjukkan kondisi paling efektif dalam proses adsorpsi.

4.3. Analisa Isoterm Adsorpsi

Model isoterm adsorpsi merupakan interaksi antara adsorben dan adsorbat yang dapat digunakan untuk membantu dalam mendesain sistem adsorpsi. Isoterm Langmuir digunakan untuk menggambarkan adsorpsi secara kimia sedangkan isotherm Freundlich digunakan untuk model adsorpsi fisika (Immanuel J. Emola *et al.*, 2021). Penentuan model isoterm pada penelitian ini menggunakan data variasi konsentrasi adsorbat. Dalam penelitian ini menggunakan tiga model isoterm, yaitu isoterm Langmuir, isoterm Freundlich dan isoterm Temkin.

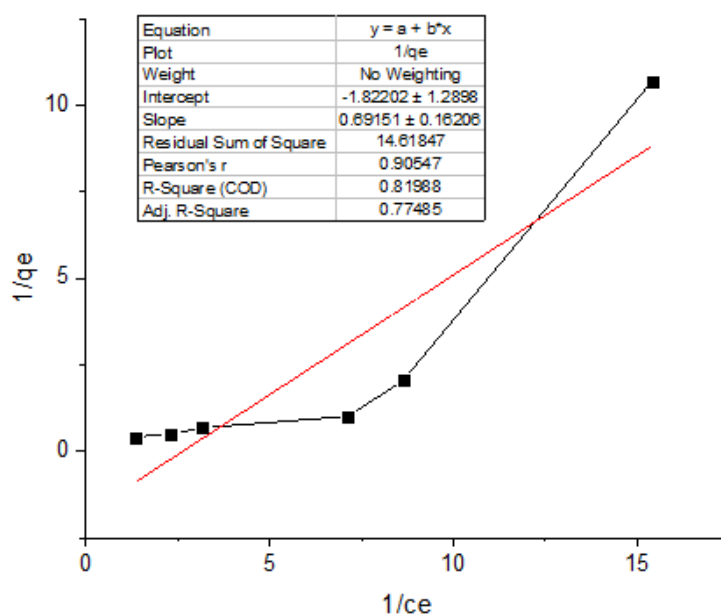
4.3.1. Model Isoterm Langmuir

Pada isoterm Langmuir, hubungan antara C_e/q_e terhadap C_e menunjukkan pola linear yang cukup baik. Model Langmuir mengasumsikan bahwa proses adsorpsi terjadi pada permukaan homogen dengan pembentukan lapisan tunggal (monolayer), di mana setiap situs aktif memiliki energi yang sama dan tidak terjadi interaksi antar molekul adsorbat. Hal ini menunjukkan bahwa adsorpsi metilen biru cenderung terjadi pada permukaan adsorben secara teratur hingga mencapai kapasitas maksimum. Dari hasil nilai $1/C_e$ dan $1/q_e$ dapat digunakan untuk membuat grafik hubungan persamaan isoterm Langmuir pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Data Penentuan Kurva Isoterm Langmuir

C_o	C_e	Q_e (mg/g)	$1/c_e$	$1/q_e$
1	0.064914	0.093509	15.40496	10.69421
5	0.11588	0.488412	8.62963	2.047452
10	0.140021	0.985998	7.141762	1.014201
15	0.314378	1.468562	3.180887	0.680938
20	0.43133	1.956867	2.318408	0.511021
25	0.743026	2.425697	1.345848	0.412253

Grafik persamaan regresi linear isoterm Langmuir karbon aktif tempurung siwalan dapat dilihat pada Gambar 4.8. dari persamaan regresi linear dapat diketahui nilai slope, intercept dan R^2 .



Gambar 4. 8 Grafik Isoterm Langmuir Karbon Aktif

Gambar 4.8 menunjukkan persamaan linear yaitu $y = 0.6915x - 1.822$ dengan nilai R^2 0.8199. Berdasarkan persamaan tersebut, diperoleh perhitungan nilai $Q_{\max}$ (Q maksimum) dan KL (Konstanta Langmuir). Hasil perhitungan parameter isoterm Langmuir dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Nilai Parameter Isoterm Langmuir Adsorpsi MB

Slope	Intercept	$Q_{\max}$ (mg/g)	KL (/mg)	R^2
0.6915	-1.822	1,446	-0.379	0.8199

Model isoterm Langmuir menunjukkan tingkat kesesuaian yang lebih baik dibandingkan model Freundlich, namun masih lebih rendah dibandingkan model Temkin, sehingga mengindikasikan adsorpsi monolayer pada permukaan homogen belum sepenuhnya mampu merepresentasikan sistem adsorpsi yang terjadi. Kemungkinan permukaan adsorben tidak homogen sehingga tidak semua situs aktif memiliki energi yang sama menggambarkan kondisi kesetimbangan antara permukaan adsorben dan larutan.

4.3.2. Model Isoterm Freundlich

Model isoterm Freundlich menggambarkan hubungan adsorpsi *reversible* yang memungkinkan terbentuknya multilayer atau lebih dari satu lapisan. Model isoterm Freundlich dinyatakan oleh Persamaan (2.5).

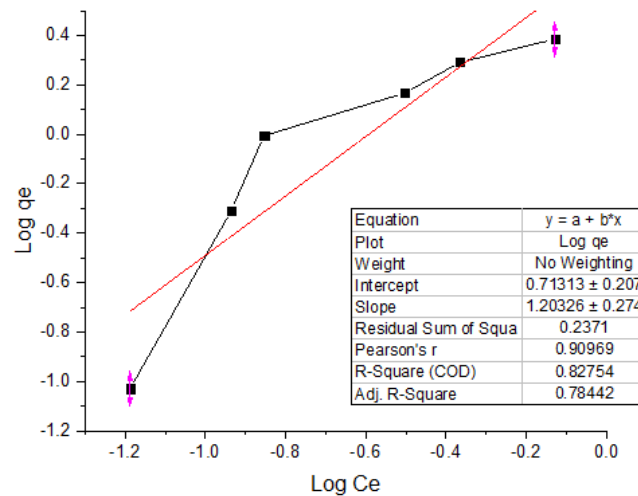
$$q_e = k_f \cdot C_e^{\frac{1}{n}}$$

Dari data hasil penelitian dapat diketahui bahwa pada model isoterm Freundlich terdapat hubungan antara konsentrasi dan kapasitas adsorpsi dari hasil nilai $\ln q_e$ dan $\ln C_e$ dapat dilihat Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Data Penentuan Kurva Isoterm Freundlich

C_o	C_e	Q_e (mg/g)	$\log C_e$	$\log q_e$
1	0.064914	0.093509	-1.18766	-1.02915
5	0.11588	0.488412	-0.93599	-0.31121
10	0.140021	0.985998	-0.85381	-0.00612
15	0.314378	1.468562	-0.50255	0.166892
20	0.43133	1.956867	-0.36519	0.291561
25	0.743026	2.425697	-0.129	0.384837

Grafik persamaan regresi linear isoterm freundlich karbon aktif tempurung siwalan dapat dilihat pada Gambar 4.9. dari persamaan regresi linear dapat diketahui nilai slope,intercept dan R^2 .



Gambar 4. 9 Grafik Isoterm Freundlich Karbon Aktif

Hasil dari grafik pada Gambar 4.9 dieproleh persamaan linear yaitu $y = 1.2033x + 0.7131$ dengan nilai R^2 sebesar 0.8275. Berdasarkan persamaan tersebut, diperoleh perhitungan nilai Kf (Konstanta Freundlich) serta parameter n adsorben. Hasil perhitungan parameter isoterm Freundlich dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Nilai Parameter Isoterm Freundlich Adsorpsi MB

Slope	Intercept	n	Kf	R ²
1.2033	0.7131	0.718	5.164	0.8275

Nilai n yang kurang dari 1 menunjukkan bahwa proses adsorpsi yang terjadi bersifat kurang favorable, yang mengindikasikan bahwa interaksi antara adsorben dan adsorbat relatif lemah. Nilai KF yang relatif kecil menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi karbon aktif terhadap metilen biru tidak terlalu tinggi dalam model Freundlich.

Selain itu, nilai R^2 yang tidak terlalu mendekati 1 mengindikasikan bahwa asumsi isoterm Freundlich, yaitu adsorpsi terjadi pada permukaan heterogen dengan pembentukan multilayer, belum sepenuhnya sesuai dengan sistem adsorpsi pada penelitian ini. Hal ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi kemungkinan tidak didominasi oleh mekanisme multilayer atau permukaan heterogen secara murni.

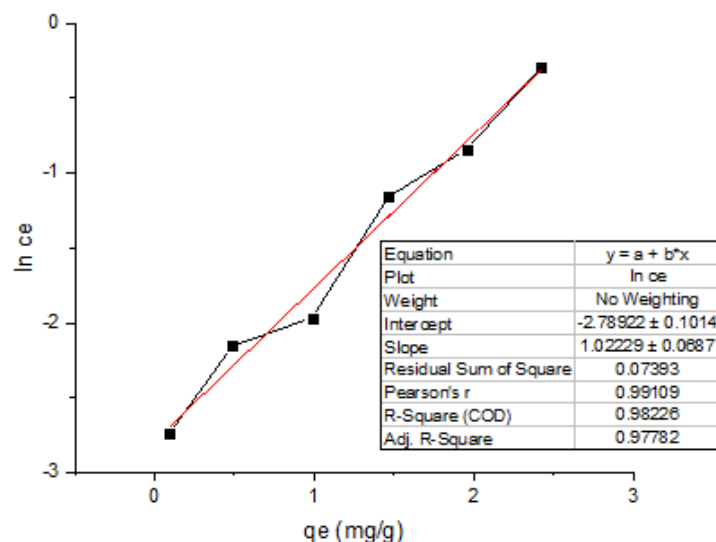
4.3.3. Model Isoterm Temkin

Isoterm Temkin merupakan salah satu model isotermal yang menjelaskan tentang banyaknya adsorbat tersebar merata ke permukaan adsorben melalui interaksi adsorbat adsorben (Banamtuan *et.al*, 2020). Dari data hasil penelitian dapat diketahui bahwa pada model isoterm Temkin terdapat hubungan antara konsentrasi dan kapasitas adsorpsi dari hasil nilai $\ln ce$ dan q_e . Data penelitian dapat dilihat Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Data Penentuan Kurva Isoterm Temkin

Co	Ce	Qe (mg/g)	ln ce
1	0.064914	0.093509	-2.73469
5	0.11588	0.488412	-2.1552
10	0.140021	0.985998	-1.96596
15	0.314378	1.468562	-1.15716
20	0.43133	1.956867	-0.84088
25	0.743026	2.425697	-0.29702

Grafik persamaan regresi linear isoterm temkin karbon aktif tempurung siwalan dapat dilihat pada Gambar 4.10. dari persamaan regresi linear dapat diketahui nilai slope,intercept dan R^2 .



Gambar 4. 10 Grafik Isoterm Temkin Karbon Aktif

Hasil dari grafik pada gambar 4.10 diperoleh persamaan linear yaitu $y = 1.0223x - 2.7892$ dengan nilai R^2 sebesar 0.9823. Berdasarkan persamaan

tersebut, diperoleh perhitungan nilai b (konstanta terkait energi adsorpsi). Dapat dilihat hasil perhitungan parameter isoterm temkin pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Nilai Parameter Isoterm Temkin Adsorpsi MB

Slope	Intercept	B (J/mol)	R ²
1.0223	-2.7892	2423.527	0.9823

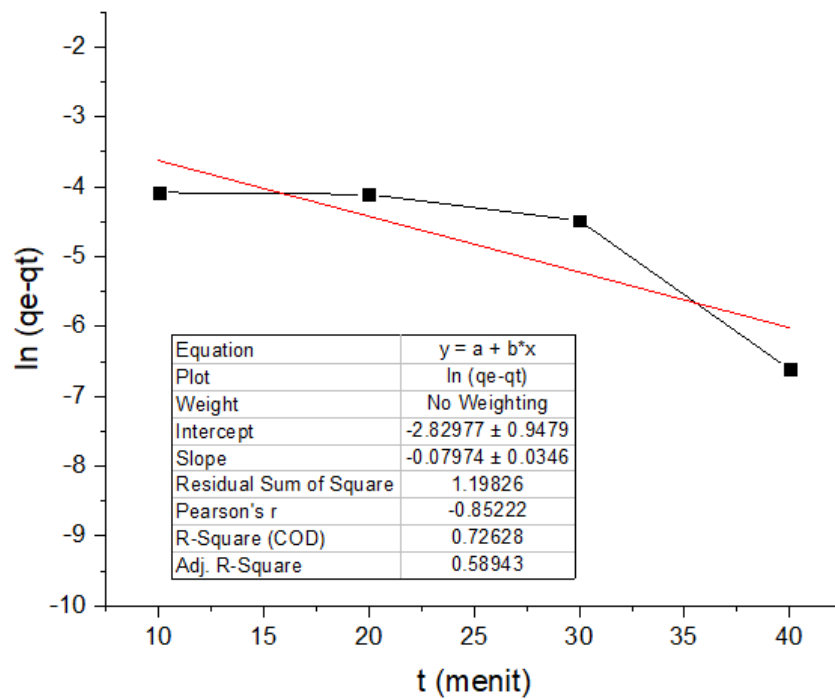
Perhitungan isoterm Temkin, diperoleh nilai energi adsorpsi (B) sebesar 2423.527 J/mol. Nilai ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi yang berlangsung dengan energi yang relatif rendah. Hal ini mengindikasikan bahwa interaksi adsorben-adsorbat cenderung didominasi oleh fisisorpsi yaitu pada proses adsorpsi, molekul MB yang berada di dalam larutan akan bergerak secara acak (difusi) menuju permukaan karbon aktif. Ketika molekul MB mencapai permukaan adsorben, molekul tersebut tidak langsung membentuk ikatan kimia, tetapi terlebih dahulu ditahan oleh gaya Van der Waals, interaksi elektrostatik, interaksi π - π antara cincin aromatik MB dengan struktur karbon aromatik, serta ikatan hydrogen (Busayo *et al.*, 2025). Seiring meningkatnya konsentrasi, jumlah molekul yang menempati permukaan adsorben juga bertambah sehingga terjadi penurunan energi adsorpsi akibat berkurangnya situs aktif yang tersedia (Nayeri & Mousavi, 2020).

Nilai R^2 0.9823 ini juga mengindikasikan bahwa terdapat interaksi adsorbat-adsorben yang signifikan dan permukaan karbon aktif memiliki karakteristik heterogen dengan variasi energi adsorpsi pada berbagai situs adsorpsi (Amrillah *et al.*, 2025) Model isoterm Temkin menunjukkan nilai koefisien determinasi (R^2) yang tinggi, sehingga model ini paling sesuai untuk menggambarkan proses adsorpsi pada penelitian ini. Nilai R^2 yang mendekati 1 menandakan bahwa hubungan antara konsentrasi kesetimbangan dan jumlah adsorbat teradsorpsi dapat dijelaskan dengan baik oleh model Temkin

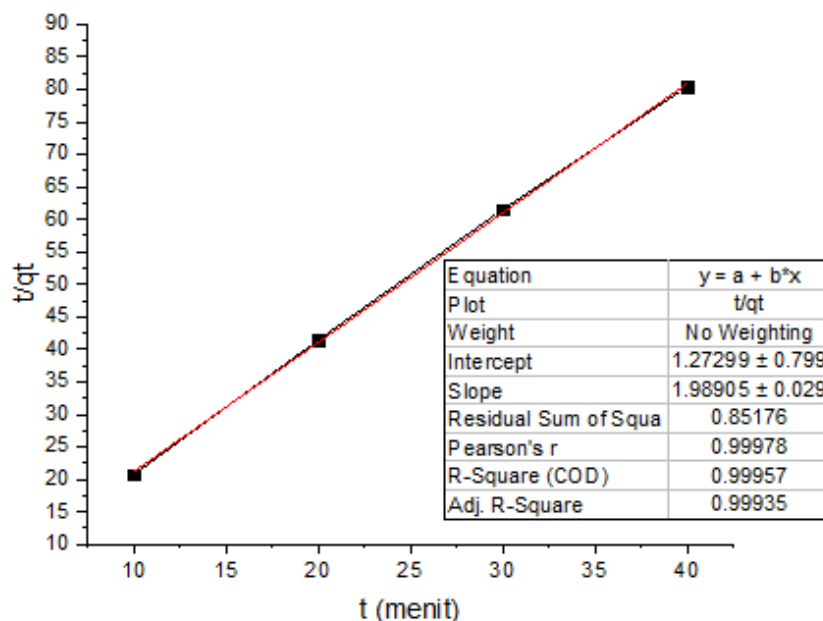
4.4. Analisa Kinetika Adsorpsi MB

Analisa kinetika adsorpsi dilakukan untuk mengetahui laju adsorpsi serta mekanisme yang mengontrol proses penyerapan MB. Model yang digunakan dalam penelitian adalah pseudo orde satu dan pseudo orde dua. Nilai R^2 yang paling mendekati angka 1 merupakan model kinetika adsorpsi yang paling sesuai dengan *error* yang paling kecil. Hasil Analisa model kinetika

dapat dilihat pada Gambar 4.11. Kesesuaian model pseudo orde dua menunjukkan bahwa laju adsorpsi dipengaruhi oleh kapasitas adsorpsi dan jumlah situs aktif pada permukaan adsorben.



Gambar 4. 11 Grafik kinetika adsorpsi pseudo orde satu



Gambar 4. 12 Grafik kinetika adsorpsi pseudo orde dua.

Tabel 4. 9 Nilai Parameter Kinetika Adsorpsi MB pada Tempurung Siwalan

No	Model Kinetika	Parameter
1.	Pseudo Orde satu	$y = -0.0797x - 2.8298$
		$R^2 = 0.7263$
		$K = 0.797 \text{ menit}$
		$q_e \text{ model} = 675.772$
2.	Pseudo Orde dua	$y = 1.989x + 1.273$
		$R^2 = 0.9999$
		$K = 0.8147 \text{ gr mg}^{-1} \text{ menit}^{-1}$
		$q_e \text{ model} = 0.5028$

Kinetika pseudo orde satu diperoleh dari $\ln (q_e - q_t)$ versus t sedangkan kinetika pseudo orde dua diperoleh dari t/q_t versus t . Dari persamaan garis linearitas Gambar 4.12 menunjukkan bahwa nilai gradien dan intersep, untuk menentukan parameter model kinetika adsorpsi pseudo orde dua. Kesesuaian antara data percobaan dan model ditunjukkan oleh persamaan linear $y = 1.989x + 1.273$, dengan nilai korelasi (R^2) 0.9999. Pada Tabel 4.9 Nilai konstanta laju proses (k) $0.8147 \text{ gr mg}^{-1} \text{ menit}^{-1}$ menunjukkan adsorpsi berlangsung cukup cepat, sehingga adsorben memiliki kemampuan yang baik dalam mengadsorpsi adsorbat pada awal proses (Sulistyawati *et al.*, 2020).

Gambar 4.11 menunjukkan bahwa proses adsorpsi MB dengan karbon aktif pada penelitian ini cocok menggunakan model kinetika adsorpsi pseudo orde dua. Nilai pseudo orde dua dengan nilai R^2 sebesar 0.9999 nilai ini lebih

mendekati 1 dibandingkan dengan model kinetika pseudo orde satu. Selain itu, model pseudo orde dua lebih cocok daripada orde satu karena, nilai kapasitas adsorpsi kesetimbangan hasil perhitungan (q_e teoritis) diperoleh sebesar 0,5024 mg/g, sedangkan nilai kapasitas adsorpsi kesetimbangan hasil eksperimen (q_e eksperimen) sebesar 0,499168 mg/g. Perbedaan antara kedua nilai tersebut relatif kecil. Hal ini menunjukkan bahwa laju adsorpsi MB pada karbon aktif tempurung siwalan sangat dipengaruhi oleh interaksi kuat antara konsentrasi adsorbat dan ketersediaan situs aktif di permukaan adsorben.

Model pseudo orde dua menunjukkan bahwa adanya adsorpsi terjadi secara kimia (kemisorpsi) yang kemungkinan terjadi ketika melalui interaksi yang lebih kuat antara gugus fungsi OH, C=C *aromatic* serta C-O pada permukaan karbon aktif dengan MB (Dwi *et al.*, 2021). Seiring bertambahnya waktu kontak, semakin banyak molekul MB yang menempati situs aktif pada permukaan karbon aktif. Dengan demikian, selama proses adsorpsi kemungkinan terjadi kemisorpsi setelah molekul adsorbat berhasil mencapai dan berinteraksi dengan situs aktif tertentu. Kondisi ini menyebabkan laju adsorpsi secara bertahap menurun hingga tercapai keadaan setimbang karena jumlah situs aktif yang masih tersedia semakin sedikit. Oleh karena itu, mekanisme adsorpsi pada penelitian ini diduga melibatkan kombinasi fisorpsi sebagai tahap awal penjerapan dan kemisorpsi pada sebagian situs aktif yang memiliki afinitas lebih tinggi terhadap MB (Nayeri & Mousavi, 2020).

Kesesuaian model kinetika pseudo orde dua menunjukkan bahwa laju adsorpsi tidak hanya dipengaruhi oleh konsentrasi MB, tetapi juga oleh jumlah situs aktif yang tersedia pada permukaan adsorben. Hal ini mengindikasikan terjadinya kemisorpsi, yaitu interaksi kuat antara adsorben dan adsorbat, sehingga adsorbat yang telah terikat cenderung sulit dilepaskan kembali (*irreversible*) (Sofia & Zulmanwardi, 2021).

4.5. Uji Statistik

Data hasil penelitian, analisis statistik dilakukan untuk mengetahui pengaruh antar variable dalam proses adsorpsi terhadap penurunan zat warna MB. Pengolahan data dalam penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak SPSS untuk mendukung pelaksanaan berbagai uji statistik,

meliputi uji korelasi, regresi, dan analisis varians (ANOVA). Hasil analisis tersebut digunakan untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai hubungan dan pengaruh antar variabel dalam proses adsorpsi.

4.5.1. Uji Normalitas

Uji normalitas merupakan metode statistik yang digunakan untuk mengetahui apakah data yang diperoleh dalam penelitian berdistribusi normal atau tidak. Pengujian ini penting dilakukan sebagai syarat dalam penggunaan analisis statistik parametrik, seperti uji regresi dan ANOVA, yang mensyaratkan data berdistribusi normal (Sianturi, 2025). Tujuan uji normalitas ini digunakan untuk memastikan bahwa data yang digunakan memenuhi syarat analisis statistik parametrik, sehingga hasil Analisa menjadi valid dan akurat. Berikut merupakan Tabel 4.10 hasil uji normalitas.

Tabel 4. 10 Hasil Uji Normalitas Variasi Konsentrasi

Konsentrasi (mg/L)	Uji Kolmogrov-Simrov		
	Nilai Sig (<i>p value</i>)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
1	1.000	$\text{Sig} > \alpha$	Data berdistribusi normal
5	0.726	$\text{Sig} > \alpha$	Data berdistribusi normal
10	0.174	$\text{Sig} > \alpha$	Data berdistribusi normal
15	0.363	$\text{Sig} > \alpha$	Data berdistribusi normal
20	0.363	$\text{Sig} > \alpha$	Data berdistribusi normal
25	0.703	$\text{Sig} > \alpha$	Data berdistribusi normal

Tabel 4.10 menunjukkan hasil uji normalitas variasi konsentrasi terhadap efisiensi removal zat warna MB. Nilai signifikan yang diperoleh untuk beberapa data lebih dari 0,05. Data yang berdistribusi tidak normal dapat disebabkan oleh variasi data yang relatif kecil, perbedaan kecil dalam data bisa langsung dianggap tidak normal (Shella *et al.*, 2025).

Tabel 4. 11 Hasil Uji Normalitas Variasi pH

pH	Uji Kolmogrov-Simrov		
	Nilai Sig (<i>p value</i>)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
7	1.000	$\text{Sig} > \alpha$	Data berdistribusi normal
8	0.637	$\text{Sig} > \alpha$	Data berdistribusi normal
9	0.637	$\text{Sig} > \alpha$	Data berdistribusi normal
10	0.298	$\text{Sig} < \alpha$	Data berdistribusi normal
11	0.942	$\text{Sig} > \alpha$	Data berdistribusi normal

12	1.000	Sig > α	Data berdistribusi normal
----	-------	----------------	---------------------------

Tabel 4.11 menunjukkan hasil uji normalitas variasi pH terhadap efisiensi removal zat warna MB. Nilai signifikan yang diperoleh untuk beberapa data lebih dari 0,05. Data yang berdistribusi tidak normal dapat disebabkan oleh variasi data yang relatif kecil, perbedaan kecil dalam data bisa langsung dianggap tidak normal (Shella *et al.*, 2025).

Tabel 4. 12 Hasil Uji Normalitas Variasi Massa Adsorben

Massa adsorben (gram)	Uji Kolmogorov-Smirnov		
	Nilai Sig (<i>p value</i>)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
0.5	0.780	Sig > α	Data berdistribusi normal
1	1.000	Sig > α	Data berdistribusi normal
1.5	1.000	Sig > α	Data berdistribusi normal
2	1.000	Sig > α	Data berdistribusi normal
2.5	1.000	Sig > α	Data berdistribusi normal

Tabel 4.12 menunjukkan hasil uji normalitas variasi massa adsorben terhadap efisiensi removal zat warna MB. Nilai signifikan yang diperoleh untuk keseluruhan data lebih dari 0,05. Hal ini menunjukkan bahwa data tersebut terdistribusi normal.

Tabel 4. 13 Hasil Uji Normalitas Variasi Waktu Kontak

Waktu kontak (menit)	Uji Kolmogorov-Smirnov		
	Nilai Sig (<i>p value</i>)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
10	0.463	Sig > α	Data berdistribusi normal
20	1.000	Sig > α	Data berdistribusi normal
30	0.463	Sig > α	Data berdistribusi normal
40	1.000	Sig > α	Data berdistribusi normal
60	0.637	Sig > α	Data berdistribusi normal
120	0.780	Sig > α	Data berdistribusi normal
150	1.000	Sig > α	Data berdistribusi normal

Tabel 4.13 menunjukkan hasil uji normalitas variasi waktu kontak terhadap efisiensi removal zat warna MB. Nilai signifikan yang diperoleh untuk keseluruhan data lebih dari 0,05. Hal ini menunjukkan bahwa data tersebut terdistribusi normal.

4.5.2. Uji Homogenitas

Uji homogenitas adalah uji untuk melihat apakah varians antar kelompok data sama atau tidak sama, dan ini biasanya dipakai sebagai syarat sebelum analisis parametrik. Uji homogenitas digunakan untuk memastikan keseragaman varians antar kelompok data (Nurhaswinda *et al.*, 2026). Data dapat dinyatakan homogen apabila memiliki nilai signifikan lebih dari 0,05 (Sig. > 0,05). Hasil uji homogenitas dalam Tabel 4.14 menunjukkan hasil dari keempat variasi.

Tabel 4. 14 Hasil Uji Homogenitas

Variasi	Sig.	α	Keterangan	
Konsentrasi	0.088	0.05	Sig. > 0.05	Data homogen
pH	0.113	0.05	Sig. > 0.05	Data homogen
Massa adsorben	0.266	0.05	Sig. > 0.05	Data homogen
Waktu kontak	0.001	0.05	Sig. > 0.05	Data tidak homogen

Tabel 4.14 menunjukkan hasil uji homogenitas variasi waktu kontak menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,001 ($p < 0,05$), sehingga asumsi homogenitas variasi waktu kontak tidak terpenuhi. Oleh karena itu, analisis perbedaan efisiensi removal berdasarkan variasi waktu kontak dilakukan menggunakan uji Anova Welch karena lebih mampu memberikan hasil yang akurat meskipun homogenitas variasi tidak terpenuhi.

4.5.3. Uji *One Way* ANOVA

Uji hipotesis bertujuan untuk melihat adanya pengaruh penelitian terhadap hasil penelitian. Uji hipotesis dilakukan menggunakan analisis statistika *one way* ANOVA. Pemilihan *one way* ANOVA sebagai metode uji statistika digunakan untuk melihat pengaruh dari satu variable bebas

dengan kelompok lebih dari dua terhadap hasil penelitian. Hipotesis dalam penelitian diantaranya :

H_0 = tidak terdapat pengaruh variasi penelitian terhadap penurunan zat warna MB

H_1 = terdapat pengaruh variasi penelitian terhadap penurunan zat warna MB

Tabel 4. 15 Hasil Uji One Way ANOVA

Variasi	Sig.	α	Keterangan	
Konsentrasi	< 0.001	0.05	Sig. < 0.05	H_1 diterima (terdapat pengaruh)
pH	< 0,001	0.05	Sig. < 0.05	H_1 diterima (terdapat pengaruh)
Massa Adsorben	< 0.001	0.05	Sig. < 0.05	H_1 diterima (terdapat pengaruh)
Waktu kontak	< 0.001	0.05	Sig. < 0.05	H_1 diterima (terdapat pengaruh)

Hasil uji *one way* ANOVA pada Tabel 4.15 menunjukkan hasil nilai signifikan kurang dari 0.05 yang menandakan bahwa hipotesis H_0 ditolak dan H_1 diterima. Hasil hipotesis One-Way ANOVA menunjukkan bahwa variasi konsentrasi, pH, massa adsorben dan waktu kontak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi adsorpsi zat warna MB menggunakan karbon aktif tempurung siwalan ($p < 0,05$). Hasil ini menunjukkan bahwa perubahan pada keempat variasi tersebut mampu memberikan pengaruh adsorben dalam penyerapan zat warna MB, sehingga konsentrasi, pH, massa adsorben dan waktu kontak merupakan faktor penting yang menentukan keberhasilan proses adsorpsi.

halaman sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

1. Karakterisasi FTIR menunjukkan adanya gugus fungsi –OH ($3308,33\text{ cm}^{-1}$), C=C aromatik ($1581,54\text{ cm}^{-1}$), C–H ($1423,25\text{ cm}^{-1}$), dan C–O ($1092,44\text{ cm}^{-1}$) yang berperan dalam interaksi adsorpsi MB. Hasil SEM menunjukkan struktur permukaan berpori dengan diameter pori rata-rata 9322 nm yang mengindikasikan makropori dan mendukung tersedianya situs aktif untuk proses adsorpsi. Sementara itu, hasil BET menunjukkan luas permukaan spesifik sebesar $0,000\text{ m}^2/\text{g}$, yang mengindikasikan luas permukaan tidak terdeteksi selama pengujian, diduga akibat kondisi degassing yang memengaruhi struktur pori adsorben.
2. Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi konsentrasi MB, pH larutan, massa adsorben dan waktu kontak secara signifikan mempengaruhi efisiensi adsorpsi MB.
 - a. Variasi konsentrasi MB berpengaruh signifikan terhadap efisiensi adsorpsi, dengan $p\text{-value} < 0.001$. Efisiensi removal tertinggi sebesar 98.60% yang diperoleh pada konsentrasi MB sebesar 10 ppm .
 - b. Variasi pH berpengaruh signifikan terhadap efisiensi adsorpsi, dengan $p\text{-value} < 0.001$. Efisiensi removal tertinggi sebesar 98.14% yang diperoleh pada pH 8.
 - c. Variasi massa adsorben berpengaruh signifikan terhadap efisiensi adsorpsi, dengan $p\text{-value} < 0.001$. Efisiensi removal tertinggi sebesar 99.83% yang diperoleh pada massa adsorben sebesar 2 gram .
 - d. Variasi waktu kontak berpengaruh signifikan terhadap efisiensi adsorpsi, dengan $p\text{-value}$ sebesar < 0.001 . Efisiensi

removal tertinggi sebesar 99.83% yang diperoleh pada waktu kontak sebesar 60 menit.

3. Proses adsorpsi MB terhadap tempurung siwalan mengikuti model isotherm Temkin dengan nilai koefisien determinasi atau R^2 sebesar 0.9823, serta terjadi kinetika model pseudo orde dua dengan nilai R^2 0.999 sebesar yang menunjukkan bahwa proses adsorpsi dipengaruhi oleh interaksi antara adsorben dan adsorbat.

5.2. Saran

1. Melakukan uji karakteristik pada sampel karbon aktif tempurung siwalan sebelum aktivasi untuk mengetahui perubahan sifat fisik dan kimia adsorben akibat proses adsorpsi. Dengan uji ini dapat melihat perubahan struktur permukaan, gugus fungsi, luas permukaan dan porositas adsorben yang mempengaruhi kemampuan penjerapan zat warna.
2. Sebelum pengujian BET disarankan melakukan analisis TGA (*Thermogravimetric Analysis*) untuk menentukan rentang suhu degassing yang sesuai dengan karakteristik termal adsorben.

DAFTAR PUSTAKA

- Abid, A., Sari, I. N., & Pujiastuti, C. (2024). ADSORPSI TIMBAL (Pb) DALAM LIMBAH CAIR BATIK MENGGUNAKAN ARANG AKTIF DARI TEMPURUNG SIWALAN. *Jurnal Teknik Kimia*, 18(2), 83–88. https://doi.org/10.33005/jurnal_tekkim.v18i2.4414
- Abriyani, E., Syalomita, D., Apriani, I. P., Puspawati, I., & Adiputra, S. (2024). *Pengaruh Pengolahan Termal Terhadap Struktur Molekul Material Polimer Studi Dengan Spektroskopi FTIR*. 4, 3424–3432.
- Allen, N. (2020). *Pores , porosity and pore size distribution of some Draupne Formation and Colorado Group shales and kerogens . January*.
- Amode, J., Santos, J., Alam, Z., Mirza, A., & Mei, C. (2023). Adsorption of methylene blue from aqueous solution using untreated and treated (Metroxylon spp .) waste adsorbent: equilibrium and kinetics studies. *International Journal of Industrial Chemistry*, 7(3), 333–345. <https://doi.org/10.1007/s40090-016-0085-9>
- Amrillah, N. A. Z., Rahayu, A., Dhias Cahya Hakika, Vivi Sisca, Veranica, Firda Mahira Alfiata Chusna, Lia Anggresani, & Lee Wah Lim. (2025). Isothermic Adsorption Study of Nitrate Ion Adsorption in Bioethanol Waste Using Quaternary Ammonium Polymer. *Sains Natural: Journal of Biology and Chemistry*, 15(1), 01–09. <https://doi.org/10.31938/jsn.v15i1.770>
- Anugrahwati, M., Awalini, R., & Indah, F. (2021). *Adsorbtion Kinetics and Isotherm Adsorpsi Pb (II) dari Air dengan Karbon Aktif dari Kulit Salak Pondoh : Kinetika dan Isoterm Adsorbsi*. 6(2), 1–11.
- Asiah, N., Sylvia, N., & Bahri, S. (2022). ADSORPSI ZAT WARNA METHYLENE BLUE MENGGUNAKAN ADSORBEN DARI AMPAS TEH PADA KOLOM Nur Asiah, Novi Sylvia*, Syamsul Bahri. 2(Juni), 75–86.
- Bakti, A., megastin, L., & Jumriadi. (2023). *Karakterisasi Karbon Aktif yang Terbuat Dari Tempurung Kelapa Menggunakan Teknik Pirolisis Dengan Aktivasi Fisika dan Kimia L .) a Program*. 12(2), 56–60.
- Banamantuan et.al. (2020). *STUDI ADSORPSI METILEN BIRU MEMANFAATKAN*

- SABUT BUAH LONTAR (Borassus flabellifer L.)*. 108–116.
- Beasley, M. M., Bartelink, E. J., Taylor, L., & Miller, R. M. (2014). Comparison of transmission FTIR , ATR , and DRIFT spectra : implications for assessment of bone bioapatite diagenesis. *Journal of Archaeological Science*, 46, 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.03.008>
- Boichuk, T., Boichuk, A., Vashchynskyi, V., Eledath, M., Abargues, R., Martínez-pastor, J. P., Juan, F. S., & Kre, M. (2024). *Highly porous activated carbon derived from plant raw material as high-performance anode for aqueous sodium-ion supercapacitors*. 622(June), 0–8. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235356>
- BPPD. (2021). *KAJIAN PENINGKATAN NILAI TAMBAH PRODUK UNGGULAN SEKTOR PERTANIAN, PERIKANAN DAN PETERNAKAN DALAM RANGKA PERINTISAN AGROTECHNO PARK DI KABUPATEN TUBAN Badan*. 167–186.
- Busayo, J., Sie, A., Lau, Y., Hua, Y., Yong, Y., Tung, T., Nabisab, C., & Mubarak, M. (2025). *A comprehensive review on adsorption technologies for methylene blue elimination : efficiency , mechanisms , and future perspectives*. Springer International Publishing.
- C. Thevamirtha, Sherin Monichan, & P. Mosae Selvakumar. (2021). Carbon-Based Materials from Borassus flabellifer and their Applications. *Journal of Environmental Nanotechnology*, 10(4), 08–12. <https://doi.org/10.13074/jent.2021.12.214445>
- Cahyani, R. R., Krissilvio, E. J., & Pasaribu, M. H. (2024). *Potensi Arang Aktif Apu-Apu (Salvinia molesta) sebagai Bioadsorben Terhadap Zat Warna Metil Jingga*. 02(02).
- Cendekia, D., & Afifah, D. A. (2023). Model Isoterm Adsorpsi Langmuir Pada Analisis Daya Serap Iodium INFORMASI ARTIKEL ABSTRAK. *Journal Applied of Science and Chemical Engineering*, 1(2), 38–43.
- Coelho, R. S., Soares, L. C., Adarme, O. F. H., Maia, L. C., Costa, C. S. D., Guibal, E., & Gurgel, L. V. A. (2025). A Review on Advances in the Use of Raw and Modified Agricultural Lignocellulosic Residues in Mono- and Multicomponent Continuous Adsorption of Inorganic Pollutants for Upscaling

- Technologies. *Polymers*, 17(7), 1–54.
<https://doi.org/10.3390/polym17070953>
- Collins, S. P., Storrow, A., Liu, D., Jenkins, C. A., Miller, K. F., Kampe, C., & Butler, J. (2021). *PENGANTAR STATISTIKA*.
- Cwalinski, T., Polom, W., Marano, L., Roviello, G., Angelo, A. D., Cwalina, N., Matuszewski, M., Roviello, F., Jaskiewicz, J., & Polom, K. (2020). *Methylene Blue — Current Knowledge , Fluorescent Properties , and Its Future Use*.
- Delacre, M., Leys, C., Mora, Y. L., & Lakens, D. (2020). *Taking Parametric Assumptions Seriously : Arguments for the Use of Welch ' s F-test instead of the Classical F-test in One-Way ANOVA*. 32, 1–12.
- Dewi, R., Dan, A., & Nofriadi, I. (2020). Aktivasi Karbon Dari Kulit Pisang Menggunakan Aktivator Kimia KOH. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 9(2), 12–22. www.ft.unimal.ac.id/jurnal_teknik_kimia
- Dwi, L., Hayu, R., Nasra, E., Azhar, M., & Etika, S. B. (2021). *Adsorpsi Zat Warna Methylene Blue Menggunakan Karbon Aktif dari Kulit Durian (Durio zibethinus Murr .)*. 10(2), 8–13.
- Dwijayanti, U., Widodo, D. S., Haris, A., Suyati, L., Ariadi, R., Kimia, D., & Diponegoro, U. (2020). *ADSORPSI METHYLENE BLUE (MB) MENGGUNAKAN ABU LAYANG*. 5(01), 1–14.
- Edith, M., Montaña, A., Effting, L., Luisa, C., Guedes, B., Guadalupe, G., Arizaga, C., Giona, R. M., Hissae, P., Cordeiro, Y., Ricardo, C., Tarley, T., & Bail, A. (2024). Performance assessment of activated carbon thermally modified with iron in the desulfurization of biogas in a static batch system supported by headspace gas chromatography. *Journal of Analytical Science and Technology*, 6. <https://doi.org/10.1186/s40543-024-00432-6>
- Efendi, E. A., Djatmiko, F. P., & Kurniati, E. (2024). *Indonesian Journal of Chemical Science Synthesis and Characterization of Activated Carbon from Green Banana Peel*. 13(3).
- Elina, R., Rori, D. C., & Khair, M. (2023). *Karakterisasi FTIR pada Karbon Aktif Terimpregnasi ZnO Program Studi Kimia , Universitas Negeri Padang*. 7, 23827–23831.
- Erawati, E., & Fernando, A. (2021). *JURNAL INTEGRASI PROSES Website :*

- <http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/jip> PENGARUH JENIS AKTIVATOR DAN UKURAN KARBON AKTIF TERHADAP PEMBUATAN ADSORBENT DARI SERBIK GERGAJI KAYU SENGON (*PARASERIANTHES FALCATARIA*) 1 , 2 Program Studi Teknik Kimia , Faku. 7(2), 58–66.
- Fadhil, M., Akbar, F., & Ramadhani, A. (2019). Biosorben Daun Ketapang dengan Pengaktifan Asam Sitrat sebagai Pereduksi Merkuri. 6(2), 92–99.
- Fitriansyah, A., Amir, H., & Elvinawati. (2021). KARAKTERISASI ADSORBEN KARBON AKTIF DARI SABUT PINANG (*Areca catechu*) TERHADAP KAPASITAS ADSORPSI ZAT WARNA INDIGOSOL BLUE 04-B. 5(1), 42–54.
- Fitriyah, Akbari, T., & Alfandiana, I. (2022). Pengolahan Limbah Cair Batik Banten secara Koagulasi Menggunakan Tawas dan Adsorpsi dengan Memanfaatkan Zeolit Alam Bayah. VII(1), 2499–2509.
- Govindaraj, B. B., Palsamy, G., Senthil Kumar, P., Mariyappan, R., Govindaraj, M. P., & Rangasamy, G. (2024). Application of nitric acid modified palmyra palm male inflorescence activated carbon for effective removal of methylene blue dye from the aquatic environment. *Adsorption Science and Technology*, 42. <https://doi.org/10.1177/02636174241256850>
- Handika, G., Maulina, S., & Mentari, V. (2017). TANAMAN KELAPA SAWIT DENGAN PENAMBAHAN AKTIVATOR NATRIUM KARBONAT (Na_2CO_3) DAN NATRIUM KLOORIDA ($NaCl$) CHARACTERISTICS OF ACTIVATED CARBON USING PALM OIL WASTE PLANTS WITH ADDITION ACTIVATORS OF SODIUM CARBONATE (Na_2CO_3). 6(4), 41–44.
- Haqu, A., Nasra, E., Kurniawati, D., Kimia, D., & Padang, N. (2025). Kinetika Adsorpsi Zat Warna Metilen Blue Menggunakan Silika Xerogel dari Abu Terbang (*Fly Ash*). 2.
- Hardiyanti, S., Sumarna, A. E., Utama, A. R., & Broto, W. (2021). Pemanfaatan Limbah Kulit Siwalan Sebagai Briket Media. *Jurnal Pengabdian Vokasi*, 02, 102–105.
- Hatimah, H., Indah, D. R., Wardani, I. K., Kimia, P. P., Mandalika, U. P., No, J. P., Pendidikanolahraga, P., Mandalika, U. P., & No, P. (2022). Efisiensi Adsorpsi Metilen Biru Menggunakan Karbon Baggase Teraktivasi menggunakan

elektroda PVC dan karbon (Riyanto , 2013), metode fotokatalitik menggunakan menimbulkan masalah bagi sekitar . Komponen kimia utama ampas tebu adalah serat selulosa ,. 10(2).

Hernández-origel, C. D., Patiño-saldivar, L., Salazar-hernández, M., Ardila, A. N., Talavera-lópez, A., Hernández-soto, R., & Hernández, J. A. (2022). *Use of Eichhornia Crassipes as a Bioadsorbent for the Removal of Methyl Orange and Methylene Blue Present in Residual Solutions*. 23(9), 193–211.

Hikmah, M., & Wahyuni, N. (2023). Sintesis Fotokatalis TiO₂ untuk Degradasi Zat Warna Sintetis Metilen Biru dengan Bantuan Sinar Tampak. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 11(3), 878–887.
<https://doi.org/10.26418/jtlb.v11i3.70903>

Ifa, L., Nurdjannah, syarif, T., & Darnengsih. (2021). *No Title*.

Ikhsany, D., Kurniawati, D., Nasra, E., & Khair, M. (2024). *Pengaruh Waktu Kontak dan Kecepatan Pengadukan terhadap Penyerapan Zat Warna Methylene Blue Pada Biji Kelengkeng (Dimocarpus longan Lour) dengan Metode Batch Program Studi Kimia , Universitas Negeri Padang*. 8, 15497–15504.

Ikrima, H., Yelmida, & Herman, S. (2020). *ISOTERM, TERMODINAMIKA DAN KINETIKA ADSORPSI LOGAM CU MENGGUNAKAN ADSORBEN SERBUK KULIT UDANG*. 7, 1–11.

Imanuel J. Emola, Serliani M. Martinus, Hartini R. L. Solle, & Merpiseldin Nitsae. (2021). *(dimensi kuantitas adsorpsi) berada pada kategori berlangsung secara baik (0,214- 0,259). Dengan demikian, perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk optimalisasi kondisi adsorpsi yang terjadi berdasarkan pH, massa adsorben, dan konsentrasi adsorbat. Kata*. 6(1), 46–57.

Indah, M. Utami, W. (2024). Pengolahan Limbah Zat Warna Batik di Perairan : Systematic Literatur Review Processing of Batik Dyestuff Waste in Waterways : Systematic Literatur. *Jurnal Sains Dan Sains Terapan*, II(2), 26–33.

Indah, S., Herald, D., & Lathifatuazzahrah, S. (2022). *Removal of phosphate from laundry wastewater using maize husk as adsorbent. Jurnal Litbang Industri*, 12(1), 33–40.

- Inkson, B. J. (2016). 2 - Scanning electron microscopy &SEM) and transmission electron microscopy &TEM) for materials characterization. In *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100040-3.00002-X>
- Irwansyah, F. S., Amal, A. I., Diyanthi, E. W., & Hadisantoso, E. P. (2024). *ASEAN Journal of Science and Engineering How to Read and Determine the Specific Surface Area of Inorganic Materials using the Brunauer-Emmett-Teller (BET) Method*. 4(1), 61–70.
- Ismadji, S. dkk. (2021). *Seri Buku Teknik Kimia UNIVERSITAS KATOLIK WIDYA MANDALA SURABAYA ADSORPSI PADA FASE CAIR*. <http://www.ukwms.ac.id/>
- Joni, R., Aziz, H., Kimia, J., Matematika, F., Alam, P., & Andalas, U. (2021). *Studi karakteristik karbon aktif dari cangkang buah ketaping (Terminalia Catappa) sebagai elektroda superkapasitor Study of activated carbon characteristic from ketaping fruit shell (Terminalia Catappa) as supercapacitors electrode*. 10(1), 1–6. <https://doi.org/10.24815/jacps.v10i1.17755>
- Kharin, A. Y. (2020). Deep learning for scanning electron microscopy : synthetic data for the nanoparticles detection. *Ultramicroscopy*, 113125. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2020.113125>
- Khasanah, N. U., Andriani, R., & Fitriani, T. D. (2023). Uji Toksisitas Limbah Industri Batik Terhadap Perubahan Morfologi Insang Ikan Lele (*Clarias sp.*). *Biology Natural Resources Journal*, 2(1), 28–32. <https://doi.org/10.55719/binar.2023.2.1.28-32>
- Khodaie, M., Ghasemi, N., Moradi, B., & Rahimi, M. (2020). *Removal of Methylene Blue from Wastewater by Adsorption onto ZnCl₂ Activated Corn Husk Carbon Equilibrium Studies*. 2020. <https://doi.org/10.1155/2013/383985>
- Kristianingrum, S., Sulistyani, S., Fillaeli, A., Dwi Siswani, E., & Hasna Nafiisah, N. (2020). Aplikasi Sistem Kontinyu Menggunakan Karbon Aktif untuk Penurunan Kadar Logam Cu dan Zn dalam Air Limbah. *Jurnal Sains Dasar*, 9(2), 54–59. <https://doi.org/10.21831/jsd.v9i2.38965>
- Kuang, Y., Zhang, X., & Zhou, S. (2020). *Adsorption of Methylene Blue in Water*

- onto Activated Carbon by Surfactant Modification. 1–19.
- Kusumaningrum, D., Sudarni, D., & Wahyuningsih, S. (2022). *Jurnal Teknik Kimia USU*. 11(2), 72–79.
- L, I. D., Sriyanti, & Suhartana. (2023). *Greensphere* : 3(1), 2–3.
- Labiebah, G., Djunaidi, M. C., Haris, A., & Widodo, D. (2019). *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi Removal of Methylene Blue Using Used Paper Powder*. 22, 23–28.
- Lafi, R., Imed, M., & Amor, H. (2019). *Adsorption of congo red dye from aqueous solutions by prepared activated carbon with oxygen-containing functional groups and its regeneration*. <https://doi.org/10.1177/0263617418819227>
- Lestriyani, N., Putri, M. A., Khotimah, N., & Susanto, R. P. (2025). *Literatur Review Artikel : Metode Spektrofotometri Inframerah Sebagai Penetapan Kadar Obat Pada Sediaan Farmasi*. 5.
- Li, G., Iakunkov, A., Boulanger, N., Lazar, A., Enachescu, M., & Talyzin, A. V. (2023). *RSC Advances produced from cones , bark and wood using the same procedure †*. 14543–14553. <https://doi.org/10.1039/d3ra00820g>
- Mading, R., Batu, M. S., Kolo, M. M., Saka, R., Kimia, P. S., Pertanian, F., Kesehatan, S., & Timor, U. (2024). *PEMBUATAN KARBON AKTIF DARI TEMPURUNG BUAH LONTAR (Borassus*. 14(1), 10–21.
- Mallick, S., Barik, D., & Pradhan, N. (2024). Commelina erecta, L. biomass-silver nanoparticle composite as a heterogeneous catalyst for methylene blue degradation. *Applied Catalysis O: Open*, 192, 206939. <https://doi.org/10.1016/j.apcato.2024.206939>
- Manuel, J., Morales, P., Sánchez-galván, G., Sánche, G., & Olgu, E. J. (2019). *Continuo Continuous us dye adsorpti adsorption on and desorp desorption tion on an invas invasive ive macroph macrophyte yte (Salvinia mi minima nima) Salvinia mi nima Continuo us dye adsorpti on and desorp tion on an invas ive macroph yte*. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-04097-8>
- Maryudi, M., Aktawan, A., & Amelia, S. (2021). Pengolahan Limbah Pewarna Metilen Biru Menggunakan Arang Aktif dan Zeolit Aktif dengan Katalis Fe dan Oksidator Hidrogen Peroksida. *Jurnal Riset Kimia*, 12(2). <https://doi.org/10.25077/jrk.v12i2.414>

- Masnesia, A. (2017). *Pengolahan limbah cair batik menggunakan metode presipitasi dan fitoremediasi*.
- Modi, S., Yadav, V. K., Gacem, A., Ali, I. H., Dave, D., Khan, S. H., Yadav, K. K., Rather, S. U., Ahn, Y., Son, C. T., & Jeon, B. H. (2022). Recent and Emerging Trends in Remediation of Methylene Blue Dye from Wastewater by Using Zinc Oxide Nanoparticles. *Water (Switzerland)*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/w14111749>
- Nasri, Suryaningsih, R., & Kurniawan, E. (2017). Ekologi, Pemanfaatan, dan Sosial Budaya Lontar (*Borassus flabellifer* Linn.) Sebagai Flora Identitas Sulawesi Selatan. *Info Teknis EBONI*, 14(1), 35–46. https://www.researchgate.net/publication/333058603_Ekologi_Pemanfaatan_dan_Sosial_Budaya_Lontar_Borassus_flabellifer_Linn_sebagai_Flora_Identitas_Sulawesi_Selatan
- Nayeri, D., & Mousavi, S. A. (2020). *Dye removal from water and wastewater by nanosized metal oxides - modified activated carbon : a review on recent researches*. 1671–1689.
- Ni'Mah, Y. L., Rohmawati, I., Ulfen, I., Harmami, H., Juwono, H., Sugiarso, D., Kurniawan, F., & Suprpto, S. (2020). The adsorption of remasol, indigosol and naphtol yellow mixed dyes using activated carbon. *AIP Conference Proceedings*, 2229(April). <https://doi.org/10.1063/5.0002666>
- Nisak, K., Setyowati, R. D. N., & Suprayogi, D. (2022). Perbedaan Laju Alir Dan Volume Adsorben Kulit Pisang Kepok Terhadap Penurunan Logam Timbal Dalam Reaktor Kontinyu. *Jurnal Reka Lingkungan*, 10(3), 232–241. <https://doi.org/10.26760/rekalingkungan.v10i3.232-241>
- Nitsae, M., Lano, L. A., & Ledo, M. E. (2020). Pembuatan Arang Aktif dari Tempurung Siwalan (*Borassus flabellifer* L.) yang Diaktivasi dengan Kalium Hidroksida (KOH). *Biota : Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Hayati*, 5(1), 8–15. <https://doi.org/10.24002/biota.v5i1.2948>
- Nugraha, I., Anshori, H. Z., Arier, T. N., Aliya, I. N., Ningrum, D. M., & Gufron, A. (2025). Utilization of Siwalan Waste (*Borassus flabellifer* L.) as a Prototype of Active Carbon-Based Batteries Using Brunauer Emmett Teller (BET) and Analysis of Variance (ANOVA) Method. *IJIEM - Indonesian Journal of*

- Industrial Engineering and Management*, 5(3), 663.
<https://doi.org/10.22441/ijiem.v5i3.23892>
- Nugroho, I., Putri, N., Praditya, Jessica, Nur, S., & Sekrningrum, N. (2024). *No Title*. 10(15), 332–344.
- Nurhaswinda, Muslimah, N., Yulian, C., Putri, R., Mayura, V., & Rahmadhansyah, A. (2026). *UJI NORMALITAS DAN HOMOGENITAS DALAM ANALISIS STATISTIK*. 12.
- Nurzihan, A., Ulfah, R., Hrp, N., Siregar, S. H., & Nasution, H. (2019). *BENTONIT TERMODIFIKASI ETHYLENE DIAMINE TETRA ACETICACID (EDTA)*. 1–13.
- Oladoye, P. O., Ajiboye, T. O., Omotola, E. O., & Oyewola, O. J. (2022). Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater. *Results in Engineering*, 16(August), 100678.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100678>
- Onaola, B. M., Utubira, Y., & Manuhuttu, J. B. (2020). *PILARISASI LEMPUNG ALAM DESA OUW DENGAN Al 2 O 3 SEBAGAI ADSORBEN ZAT WARNA METIL ORANGE*. 10(1), 63–71.
- Ozdemir, D. (2023). *Production of activated carbon from the waste paper by chemical activation method*. 07, 52–61.
<https://doi.org/10.35860/iarej.1222591>
- Pangestuti, M. B., Utami, R. N., Suhartini, S., & Hidayat, N. (2021). Potensi Limbah Cair Batik sebagai Sumber Bioenergi (Studi Kasus di UKM Batik Blimbing Malang). *AgriTECH*, 41(4), 305.
<https://doi.org/10.22146/agritech.54099>
- Patel, H. (2020). Batch and continuous fixed bed adsorption of heavy metals removal using activated charcoal from neem (*Azadirachta indica*) leaf powder. *Scientific Reports*, 10(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72583-6>
- Putri, Y., & Oktaviana, A. H. (2024). *Adsorpsi Zat Warna Remazol Brilliant Blue R Pada Limbah Industri Batik Menggunakan Adsorben dari Mahkota Buah Nanas Adsorption of Remazol Brilliant Blue R Dye on Batik Industry Waste Using Pineapple Crown Adsorbent*. 21(1).
- Putu, I. D., Nyoman, N., Ayu, I. G., Sri, N., Lilik, P., & Kristiyanti, P. (2023).

- Optimasi Kinerja Alat Fourier Transform Infrared (FTIR) Melalui Studi Perbandingan Komposisi dan Ketebalan Sampel-KBr. 5(2), 58–69.*
- Quraissy, A. (2020). Normalitas Data Menggunakan Uji Kolmogorov-Smirnov dan Saphiro-Wilk (Studi kasus penghasilan orang tua mahasiswa Prodi Pendidikan Matematika Unismuh Makassar). *J-HEST: Journal of Health, Education, Economics, Science, and Technology*, 3(1), 7–11. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>
- Rahman, A., Ndiaye, M., & Weclawski, B. (2025). *Palmyra Palm Shell (Borassus flabellifer) Properties Part 1 : Insights Into Its Physical and Chemical Properties*. 1–11. <https://doi.org/10.1002/eng2.70066>
- Rahman, M. A., Ndiaye, M., Weclawski, B., & Farrell, P. (2025). Palmyra Palm Shell (Borassus flabellifer) Properties Part 2: Insights Into Its Thermal and Mechanical Properties. *Engineering Reports*, 7(4). <https://doi.org/10.1002/eng2.70018>
- Rapo, E., & Tonk, S. (2021). *Factors Affecting Synthetic Dye Adsorption ; Desorption Studies : A Review of Results from the Last Five Years*.
- Ristianingsih, Y., & Lestari, I. (2025). Pengaruh Massa Adsorben Terhadap Adsorpsi Zat Warna Metilen Blue Menggunakan Adsorben Karbon Aktif Alga Coklat. *Teknologi Agro-Industri*, 12(1), 81–90.
- Ritonga, F. S., Amalia, M., Br, A., & Marbun, A. A. S. (2025). *Nexus : Jurnal Sains dan Teknologi Potensi Limbah Ikan sebagai Adsorben untuk Pengolahan Air Limbah : Tinjauan Literatur. 01(01), 1–10.*
- Riyanto, C., Ayu, N., & Martono, Y. (2023). *Penurunan Kadar Chemical Oxygen Demand dan Kekeruhan Pada Limbah Laundry Menggunakan Karbon Aktif Daun Eceng Gondok. 06(02), 164–175.* <https://doi.org/10.20885/ijca.vol6.iss2.art8>
- Rohman, I. Z., Salsabila, N., Djunaidy, P., & Kurniati, E. (2025). *Sintesis Selulosa Asetat Dari Limbah Sabut Siwalan (Borassus Flabellifer L) dengan Metode Emil Heuser. X(4), 15714–15720.*
- Sağlam, S., Türk, F. N., & Arslanoğlu, H. (2024). Tetracycline (TC) removal from wastewater with activated carbon (AC) obtained from waste grape marc : activated carbon characterization and adsorption mechanism. *Environmental*

- Science and Pollution Research*, 33904–33923.
<https://doi.org/10.1007/s11356-024-33493-6>
- Satriawan, D., Anggraeni, M., & sukono, bintang. (2025). *Jurnal Teknik Kimia USU Karakteristik Bioadsorben Limbah Ikan dengan Aktivator Kalsium Hidroksida (Ca (OH) 2) Characteristics of Bioadsorbents from Fish Waste with Calsium Hidroxide*. 14(1), 62–68.
- Septiano, A. F., & Setyaningsih, N. E. (2021). *Analisis Citra Hasil Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-Ray (SEM EDX) Komposit Resin Timbal dengan Metode Contrast to Noise Ratio (CNR)*. 44(2), 81–85.
- Septiano, A. F., Sutanto, & Susilo. (2019). *Fabrication and analysis of radiation dose for elastic lead polyester composites as a glass coating Fabrication and analysis of radiation dose for elastic lead polyester composites as a glass coating*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1567/4/042089>
- Setyaningrum, dyah, Fajarwati, N., & Ma, A. (2024). *SPIN THE EFFECT OF HCl ACTIVATOR CONCENTRATION ON THE*. 6(2), 181–193.
<https://doi.org/10.20414/spin.v6i2.11516>
- Shella, S., Wara, M., Adziima, A. F., Nasrudin, M., & Rizaldy, A. (2025). *Evaluasi Kinerja Uji Normalitas pada Ragam Distribusi dan Ukuran Sampel*. 7(2), 172–183.
- Shi, C., Shi, H., Li, H., Liu, H., Mostafa, E., Zhao, W., & Zhang, Y. (2023). *Efficient Heating of Activated Carbon in Microwave Field*.
- Sholikhah, I., Purnomo, R. A., Abas, S., Winanto, A. R., & Hamidah, C. (2020). *Industri Kreatif pada Batik Tulis Tenun Gedog: Kondisi Sosial-Ekonomi Pasca Covid-19. ISOQUANT: Jurnal Ekonomi, Manajemen Dan Akuntansi*, 4(2), 198–211. <https://doi.org/10.24269/iso.v4i2.469>
- Sianturi, R. (2025). *TEST NORMALITY AS A CONDITION OF HYPOTHESIS TESTING*. 11(1), 1–14.
- Sindhu, G., Kulloli, S. D., & KJ, S. (2024). *Extraction and characterization of palmyra palm (Borassus flabellifer) fruit fiber. International Journal of Advanced Biochemistry Research*, 8(8), 196–198.
<https://doi.org/10.33545/26174693.2024.v8.i8c.1737>
- Singh, A., Kumar, S., & Panghal, V. (2021). *Adsorption of chromium - (Cr 6 +)*

- on dead biomass of *Salvinia molesta* (Kariba weed) and *Typha latifolia* (broadleaf cattail): isotherm , kinetic , and thermodynamic study. *Applied Water Science*, 11(9), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01481-7>
- Sofia, I., & Zulmanwardi. (2021). *jurnal*. 105–110.
- Sriana, T., Dianpalupidewi, T., Ukhrawi, S. M. P., & Nata, I. F. (2021). The effect of sodium hydroxide (NaOH) concentration on the delignification process of lignocellulose content of siwalan fiber (*Borassus flabellifer*) as a basic material for making bioethanol. *Buletin Profesi Insinyur*, 4(2), 49–52.
- Subagyo, P. K., & Soelistyowati, S. (2023). Pengaruh Zat Pewarna Sintetis Terhadap Pewarnaan Kain Batik. *Folio*, 2(2). <https://doi.org/10.37715/folio.v2i2.3476>
- Subhan, R., Shidiqi, M. F., H, A. S. D. S. N., & Ismuyanto, B. (2022). *Studi Model Adsorpsi Cr (VI) Menggunakan Karbon Aktif Dari Tempurung Kelapa Pada Sistem Kolom Dengan Variasi Laju Alir*. 6(2), 1–6.
- Sulistyani, M. (2017). *Indonesian Journal of Chemical Science Optimasi Pengukuran Spektrum Vibrasi Sampel Protein Menggunakan Spektrofotometer Fourier Transform Infrared (FT-IR)*. 6(2).
- Sulistyaningsih, A., & Agung, T. (2020). *FOTOKATALIS PADA PROSES DEGRADASI LIMBAH BATIK*. 1(1), 9–15.
- Sulistyawati, E., Nandari, W., & Nurchasanah, A. (2020). *Kinetika Adsorpsi Mikrokapsul Kitosan Taut Silang Kalium*. 14(1), 47–59. <https://doi.org/10.22146/jrekpros.50634>
- Suprihatin, I. E., Suat, R. M., & Negara, I. M. S. (2022). *nanopartikel pada penelitian ini diteliti dengan PSA dilakukan di Laboratorium AIA Central Jakarta Selatan*. 16(2), 168–173.
- Thevamirtha, C., Monichan, S., & Selvakumar, P. M. (2021). *Carbon-Based Materials from Borassus flabellifer and their Applications*. 10(4), 8–12.
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V, Olivier, J. P., Rodriguez-reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2015). *Physisorption of gases , with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report)*. 87, 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
- Tummino, M. L., Strebel, A., Behringer, M., Hilbig, H., Machner, A., & Helmreich,

- B. (2024). *Anionic azo dyes and their removal from textile wastewater through adsorption by various adsorbents: a critical review*. January, 1–17. <https://doi.org/10.3389/fenv.2024.1347981>
- Wasilewska, M., Derylo-marczewska, A., & Marczewski, A. W. (2024). *Comprehensive Studies of Adsorption Equilibrium and Kinetics for Selected Aromatic Organic Compounds on Activated Carbon*.
- Yang, S., Cheng, Q., Hu, L., Gu, Y., Wang, Y., & Liu, Z. (2023). *Study on the Adsorption Properties of Oxalic Acid-Modified Cordierite Honeycomb Ceramics for Neutral Red Dyes*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00305>

halaman sengaja dikosongkan

LAMPIRAN I

PERHITUNGAN LARUTAN

halaman sengaja dikosongkan

1. Pembuatan Larutan Induk

Pembuatan larutan induk methylene blue 1000 ppm dilakukan dengan cara melarutkan bubuk methylene blue sebanyak 1 gram diencerkan dalam aquadest 1000 mL menggunakan labu ukur 1000 mL. Berdasarkan perhitungan sebagai berikut:

$$1\text{ppm} = 1\text{mg/L}$$

1000 ppm = 1000 mg/L ,artinya 1000 mg (atau 1gram) *methylene blue* dalam 1 L (atau 1000 mL) aquadest.

2. Larutan Standart

Larutan induk 1000 ppm diencerkan menjadi 100 ppm sebanyak 10 mL kemudian diencerkan menjadi 1;2;3;4;5;10;15;20 dan 25 ppm sebanyak 100 mL sebagai larutan standart, menggunakan rumus sebagai berikut:

$$V_1 \cdot M_1 = V_2 \cdot M_2$$

Dengan :

V_1 = Volume larutan sebelum pengenceran

M_1 = Konsentrasi larutan sebelum pengenceran

V_2 = Volume larutan setelah pengenceran

M_2 = Konsentrasi larutan setelah pengenceran

a. Larutan 1 ppm

$$V_1 \cdot M_1 = V_2 \cdot M_2$$

$$V_1 = \frac{V_2 \cdot M_2}{M_1}$$

$$V_1 = \frac{1 \cdot 100}{1000}$$

$$= 0.1 \text{ mL}$$

Perhitungan ini untuk larutan standar 1;2;3;4;5;10;15;20 dan 25 ppm, sehingga volume larutan 100 ppm yang dibutuhkan untuk membuat masing-masing larutan standar tersebut adalah 0,1;0,2;0,3;0,4;0,5;1;1,5;2; dan 2,5 mL.

3. Preparasi HCL 1M dalam 500 mL

Larutan stok = HCL 37% = 12,06 M

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2$$

$$12,06 \times V_1 = 1 \text{ M} \times 500 \text{ mL}$$

$$V_1 = \frac{1.500}{12,06}$$

$$= 41,5 \text{ mL}$$

Jadi 41,5 mL larutan stok HCL 37% dilarutkan dalam 500 mL aquadest akan menjadi larutan HCL 1M

4. Preparasi larutan NaOH 1 M dalam 100 mL

Larutan stok NaOH 99%

Mr NaOH = 40 g/mol

$$\begin{aligned} \text{Massa NaOH} &= n \times \text{Mr} \\ &= 0.1 \text{ mol} \times 40 \text{ g/mol} \\ &= 4 \text{ gram} \end{aligned}$$

Jadi, 4 gram NaOH dilarutkan ke dalam 100 mL aquadest akan menjadi larutan NaOH 1 M

LAMPIRAN II

PERHITUNGAN HASIL ADSORPSI

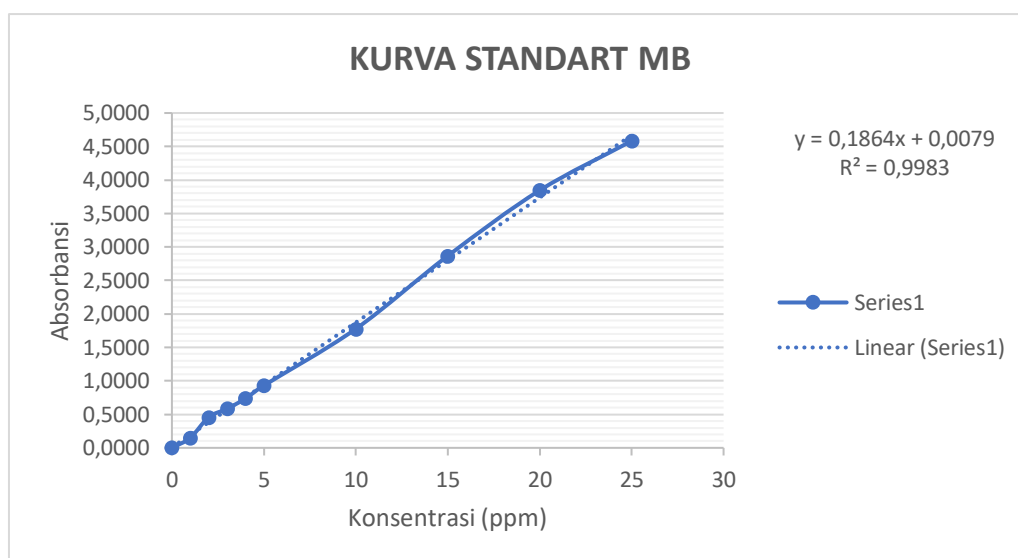
halaman sengaja dikosongkan

1. Pembuatan Kurva Larutan Standart *Methylene Blue*

Data absorbansi larutan standart *methylene blue* terdapat pada Tabel 1.1 dan kurva larutan standart terdapat pada Gambar 1.

Tabel 1.1 Data Absorbansi Larutan Standart *Methylene Blue*

No	Konsentrasi	Absorbansi
1.	1 ppm	0.1502
2.	2 ppm	0.4572
3.	3 ppm	0.5838
4.	4 ppm	0.7356
5.	5 ppm	0.9301
6.	10 ppm	1.7765
7.	15 ppm	2.8663
8.	20 ppm	3.8449
9.	25 ppm	4.5826



Gambar 1.1 Kurva Standart *Methylene Blue*

2. Data Hasil Adsorpsi

- Contoh perhitungan variasi massa adsorben 0.5 gram dengan konsentrasi 10 ppm dalam waktu 60 menit dengan kode sampel C1

Absorbansi 1 = 0.1068

Absorbansi 2 = 0.1073

Absorbansi 3 = 0.1071

$$\begin{aligned}\text{Rata rata absorbansi} &= \frac{\text{Abs 1} + \text{Abs 2} + \text{Abs 3}}{3} \\ &= \frac{0.1068 + 0.1071 + 0.1073}{3} \\ &= 0.1071\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Nilai Konsentrasi (x)} &= \frac{0.1071 - 0.0079}{0.1864} \\
&= 0.532 \text{ ppm} \\
\text{Efisiensi Removal (\%)} &= \frac{C_o - C_e}{C_o} \times 100\% \\
&= \frac{10 - 0.532}{10} \times 100\% \\
&= 94.68\% \\
\text{Kapasitas Adsorpsi (qe)} &= \frac{C_o - C_e}{W} \times V \\
&= \frac{10 - 0.532}{1} \times 0.1 \\
&= 0.9468 \text{ mg/g}
\end{aligned}$$

Tabel 1.2 Hasil Pengujian Adsorpsi Variasi Konsentrasi

Konsentrasi (mg/g)	Nama Sampel	Efisiensi Removal (%)			
1	A1	93.5			
5	A2	97.7			
10	A3	98.6			
15	A4	97.9			
20	A5	97.8			
25	A6	97.0			

Tabel 1.3 Hasil Pengujian Adsorpsi Variasi pH

pH	Nama Sampel	Efisiensi Removal (%)
7	B1	93.96
8	B2	98.14
9	B3	97.70
10	B4	97.54
11	B5	97.34
12	B6	97.75

Tabel 1.4 Hasil Pengujian Adsorpsi Variasi Massa

Massa (g)	Nama Sampel	Efisiensi Removal (%)
0.5	C1	94.68
1	C2	97.56
1.5	C3	97.81
2	C4	99.31
2.5	C5	98.95

Tabel 1.5 Hasil Pengujian Adsorpsi Variasi Waktu Kontak

Waktu Kontak (menit)	Nama Sampel	Efisiensi Removal (%)
10	D1	96.45
20	D2	96.56
30	D3	97.58
40	D4	99.57
60	D5	99.83
120	D6	99.78
150	D7	99.49

halaman sengaja dikosongkan

Tabel 1.6 Perhitungan Efisiensi Removal MB Variasi Konsentrasi

Konsentrasi Awal (Co)	pH	Massa Adsorben (g)	Waktu kontak (menit)	Adsorbansi	Rata-rata adsorbansi	Kosentrasi Akhir (Ce)	Efisiensi Removal (%)
1	10	1	60	0.0201	0.0200	0.065	95.3
				0.0199			
				0.0200			
5				0.0298	0.0294	0.116	97.7
				0.0295			
				0.0290			
10				0.0351	0.0345	1.400	98.6
				0.034			
				0.0344			
15				0.0668	0.066	0.314	97.9
				0.0665			
				0.0667			
20				0.0881	0.0882	0.431	97.8
				0.0883			
				0.0882			
25	0.1469	0.1466	0.743	97			
	0.1464						
	0.1465						

Tabel 1.7 Perhitungan Efisiensi Removal MB Variasi pH

Konsentrasi Awal (Co)	pH	Massa Adsorben (g)	Waktu kontak (menit)	Adsorbansi	Rata-rata adsorbansi	Kosentrasi Akhir (Ce)	Efisiensi Removal (%)
10	7	1	60	0.1204	0.1203	0.604	93.96
				0.1203			
				0.1202			
	8			0.0425	0.0425	0.186	98.14
				0.0427			
				0.0424			
	9			0.0508	0.0507	0.230	97.70
				0.0507			
				0.0505			
	10			0.0538	0.0536	0.246	97.54
				0.0537			
				0.0532			
	11			0.0574	0.0565	0.266	97.34
				0.0555			
				0.0565			
	12			0.0499	0.0495	0.225	97.75
				0.0491			
				0.0495			

Tabel 1.7 Perhitungan Efisiensi Removal MB Variasi Massa

Konsentrasi Awal (Co)	pH	Massa adsorben (g)	Waktu kontak (menit)	Adsorbansi	Rata-rata adsorbansi	Kosentrasi Akhir (Ce)	Efisiensi Removal (%)
10	8	0.5	60	0.1068	0.1071	0.532	94.68
				0.1073			
				0.1071			
		1		0.0536	0.0533	0.244	97.56
				0.0530			
				0.0533			
		1.5		0.0489	0.0487	0.219	97.81
				0.0485			
				0.0487			
		2		0.0206	0.0207	0.069	99.31
				0.0208			
				0.0207			
		2.5		0.0275	0.0275	0.105	98.95
				0.0276			
				0.0275			

Tabel 1.8 Perhitungan Efisiensi Removal MB Variasi Waktu Kontak

Konsentrasi Awal (Co)	pH	Massa Adsorben (g)	Waktu kontak (menit)	Adsorbansi	Rata-rata adsorbansi	Konsentrasi Akhir (Ce)	Efisiensi Removal (%)
10	8	1	10	0.074	0.0750	0.355	96.45
				0.075			
				0.076			
			20	0.072	0.0707	0.344	96.56
				0.066			
				0.074			
			30	0.053	0.052	0.242	97.58
				0.052			
				0.051			
			40	0.016	0.01577	0.043	99.57
				0.0158			
				0.0155			
			60	0.0110	0.0112	0.017	99.83
				0.0111			
				0.0114			
			120	0.0120	0.0121	0.022	99.78
				0.0121			
				0.0122			
			150	0.0172	0.0173	0.051	99.49
				0.0174			
				0.0175			

Tabel 1.9 Perhitungan Isoterm Langmuir

10	(Ce) Konsentrasi akhir (ppm)	(Co-Ce) Konsentrasi terserap (ppm)	Volume (L)	Massa adsorben (g)	(Q) Kapasitas terserap	Ce/qe
1	0.064914	0.935086	0.1	1	0.093509	0.694205
5	0.11588	4.88412			0.488412	0.237258
10	0.140021	9.859979			0.985998	0.14201
15	0.314378	14.68562			1.468562	0.214072
20	0.43133	19.56867			1.956867	0.220419
25	0.743026	24.25697			2.425697	0.306314

Tabel 1.8 Perhitungan Isoterm Freundlich

(Co) Konsentrasi awal (ppm)	(Ce) Konsentrasi akhir (ppm)	(Co-Ce) Konsentrasi terserap (ppm)	Volume (L)	Massa adsorben (g)	(Q) Kapasitas terserap	ln Ce	ln qe
1	0.064914	0.935086	0.1	1	0.093509	-2.73469	-2.3697
5	0.11588	4.88412			0.488412	-2.1552	-0.7166
10	0.140021	9.859979			0.985998	-1.96596	-0.0141
15	0.314378	14.68562			1.468562	-1.15716	0.384284
20	0.43133	19.56867			1.956867	-0.84088	0.671345
25	0.743026	24.25697			2.425697	-0.29702	0.886119

Tabel 1.8 Perhitungan Isoterm Temkin

(Co) Konsentrasi awal (ppm)	(Ce) Konsentrasi akhir (ppm)	(Co-Ce) Konsentrasi terserap (ppm)	Volume (L)	Massa adsorben (g)	(Qe) Kapasitas terserap	ln Ce
1	0.064914	0.935086	0.1	1	0.093509	-2.73469
5	0.11588	4.88412			0.488412	-2.1552
10	0.140021	9.859979			0.985998	-1.96596
15	0.314378	14.68562			1.468562	-1.15716
20	0.43133	19.56867			1.956867	-0.84088
25	0.743026	24.25697			2.425697	-0.29702

Tabel 1.10 Perhitungan Kinetika Adsorpsi

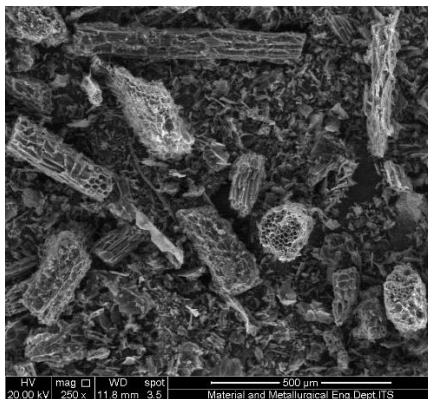
Waktu (menit)	Konsentrasi Awal (ppm)	Volume larutan (L)	Massa Adsorben (g)	(Ct) Konsentrasi akhir (ppm)	qt (mg/g)	qe	ln(qe-qt)	t/qt (menit.g/mg)
10	10	0.1	1	0.355	0.482269	0.499168	-4.08049	20.7353
20	10			0.344	0.482806	0.499168	-4.11275	41.42452
30	10			0.242	0.487902	0.499168	-4.48596	61.48771
40	10			0.043	0.497827	0.499168	-6.61419	80.34916
60	10			0.017	0.499168	0.499168	0	120.1999
120	10			0.022	0.4989	0.499168	-8.22363	240.5291
150	10			0.051	0.497452	0.499168	-6.36733	301.5368

LAMPIRAN III

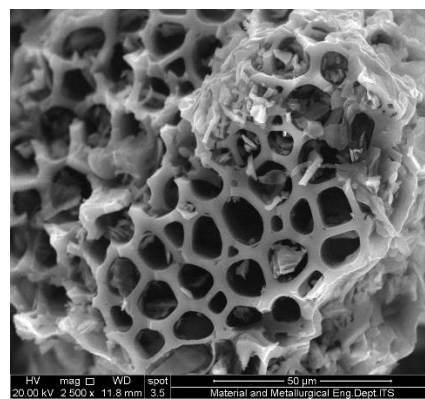
UJI KARAKTERISASI

halaman sengaja dikosongkan

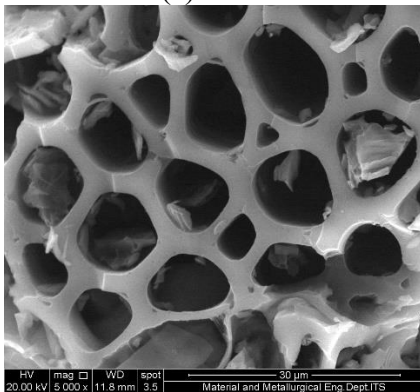
a. Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*)



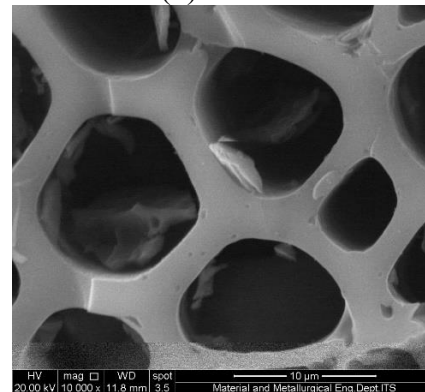
(a) 250x



(b) 2500x



(c) 5000x



(d) 10000x

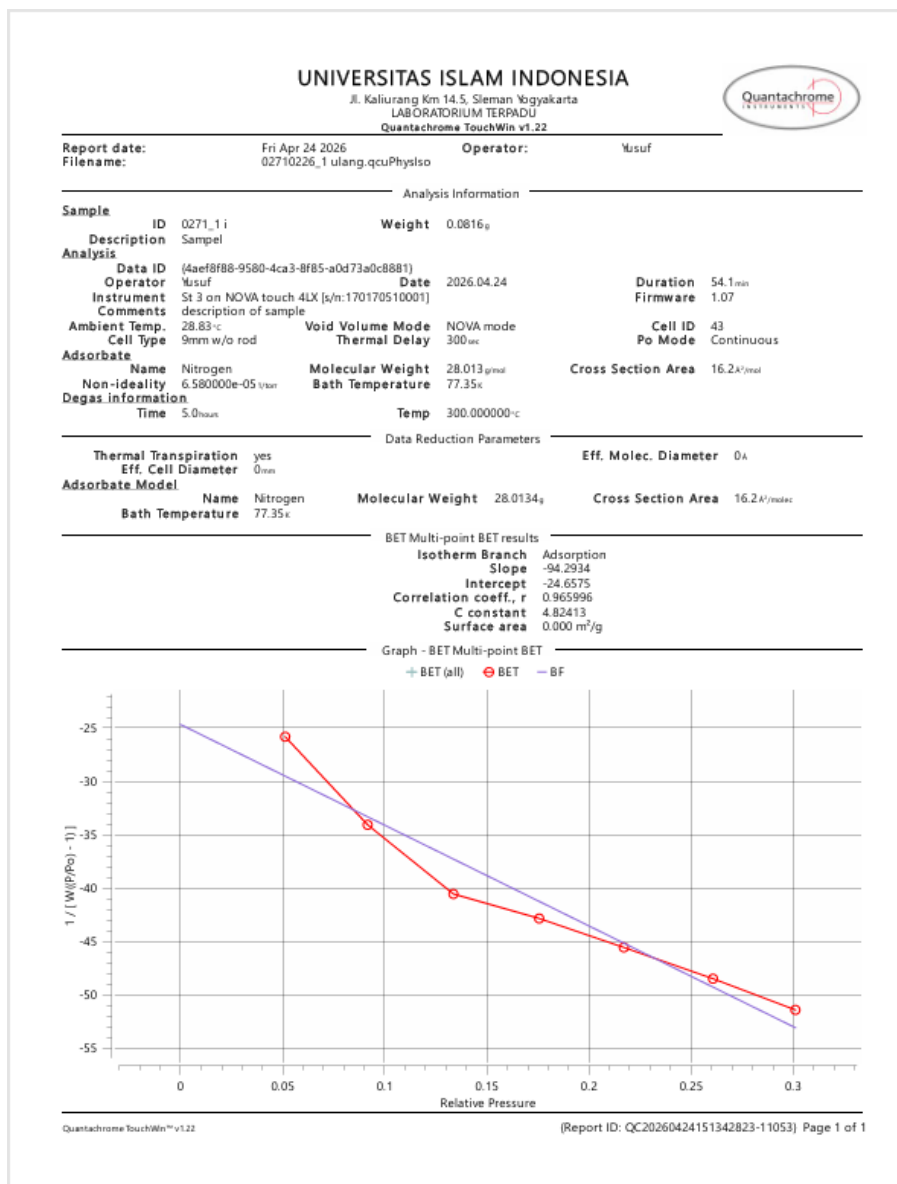
Gambar C.1 (a) perbesaran 250x (b) perbesaran 2500x
(c) perbesaran 5000x (d) perbesaran 10000x

Tabel 1.9 Luas Area Pori menggunakan Software ImageJ

No	Label	Area (μm)	Mean	Min	Max	Angel	Length(μm)
1		0.325	31.321	14.515	139.263	-70.316	11.057
2		0.31	32.494	12.544	123	-8.94	10.568
3		0.297	26.969	15.451	61.078	-41.468	10.097
4		0.261	45.839	14.139	216.696	49.028	8.856
5		0.337	42.318	16.524	177.412	-66.32	11.464
6		0.34	32.388	14.891	118	-121.188	11.552
7		0.329	35.102	15.647	78	-5.113	11.188
8		0.341	42.057	15.678	194.804	-95.221	11.602
9		0.233	34.804	11.741	89	-90.849	7.919
10		0.343	36.936	22.643	93	0.576	11.672
11		0.286	37.353	15.554	200.342	-41.936	9.698
12		0.296	41.512	24.249	165.416	-136.535	10.061
13		0.197	27.087	13.842	136	-99.586	6.692
14		0.173	31.399	15.827	137	12.095	5.878
14		0.132	25.41	16.969	141.457	-45	4.479
16		0.187	32.197	14.535	134.607	-126.764	6.37
17	Mean	0.274	34.699	15.922	137.817	-55.471	9.322
18	SD	0.069	5.987	3.244	44.877	54.715	2.349

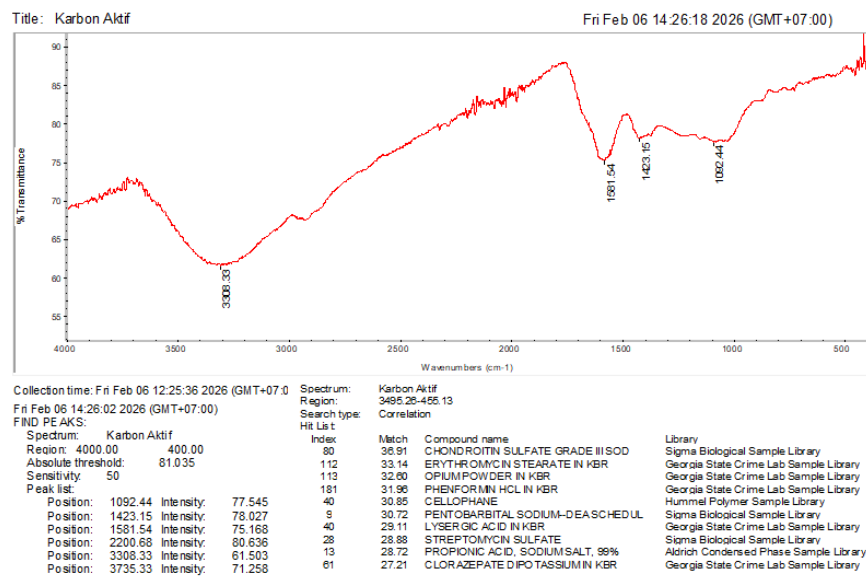
No	Label	Area (μm)	Mean	Min	Max	Angel	Length(μm)
19	Min	0.132	25.41	11.741	61.078	-136.535	4.479
20	Max	0.343	45.839	24.249	216.696	49.028	11.672

b. Pengujian BET (*Brunauer-Emmett-Teller*)



Gambar C.2 Hasil Uji FTIR

c. Pengujian FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*)



Gambar C.3 Hasil Pengujian FTIR Karbon Aktif

halaman sengaja dikosongkan

LAMPIRAN IV
HASIL UJI STATISTIKA

halaman sengaja dikosongkan

UJI NORMALITAS

Tests of Normality

		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Efisiensi Removal	Konsentrasi (ppm)						
	1 ppm	.175	3	.	1.000	3	1.000
	5 ppm	.232	3	.	.980	3	.726
	15 ppm	.353	3	.	.824	3	.174
	20 ppm	.314	3	.	.893	3	.363
	25 ppm	.314	3	.	.893	3	.363
	10 ppm	.238	3	.	.976	3	.702

a. Lilliefors Significance Correction

Tests of Normality

		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Efisiensi Removal	Nilai pH						
	7	.175	3	.	1.000	3	1.000
	8	.253	3	.	.964	3	.637
	9	.253	3	.	.964	3	.637
	10	.328	3	.	.871	3	.298
	11	.181	3	.	.999	3	.942
	12	.175	3	.	1.000	3	1.000

a. Lilliefors Significance Correction

Tests of Normality

		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Efisiensi Removal	Massa Adsorben						
	0.5 gram	.219	3	.	.987	3	.780
	1 gram	.175	3	.	1.000	3	1.000
	1.5 gram	.175	3	.	1.000	3	1.000
	2 gram	.175	3	.	1.000	3	1.000
	2.5 gram	.175	3	.	1.000	3	1.000

a. Lilliefors Significance Correction

Tests of Normality

		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Efisiensi Removal	Waktu Kontak						
	10 menit	.292	3	.	.923	3	.463
	20 menit	.175	3	.	1.000	3	1.000
	30 mneit	.292	3	.	.923	3	.463
	40 menit	.175	3	.	1.000	3	1.000
	60 menit	.253	3	.	.964	3	.637
	120 menit	.219	3	.	.987	3	.780
	150 menit	.175	3	.	1.000	3	1.000

a. Lilliefors Significance Correction

UJI HOMOGENITAS

Test of Homogeneity of Variances

Efisiensi Removal

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
2.464	5	12	.093

Test of Homogeneity of Variances

Efisiensi Removal

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
2.273	5	12	.113

Test of Homogeneity of Variances

Efisiensi Removal

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.530	4	10	.266

Test of Homogeneity of Variances

Efisiensi Removal

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
7.107	6	14	.001

UJI ANOVA

ANOVA

Efisiensi Removal

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	4984.303	5	996.861	10456.621	.000
Within Groups	1.144	12	.095		
Total	4985.447	17			

ANOVA

Efisiensi Revomal

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	3595.425	5	719.085	12254.017	.000
Within Groups	.704	12	.059		
Total	3596.129	17			

ANOVA

Efisiensi Removal

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	6020.278	4	1505.069	128534.247	.000
Within Groups	.117	10	.012		
Total	6020.395	14			

ANOVA

Efisiensi Removal

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	3423.979	6	570.663	1263.652	.000
Within Groups	6.322	14	.452		
Total	3430.301	20			

Robust Tests of Equality of Means

Efisiensi Removal

	Statistic ^a	df1	df2	Sig.
Welch	2056.035	6	5.955	.000
Brown-Forsythe	1263.652	6	3.008	.000

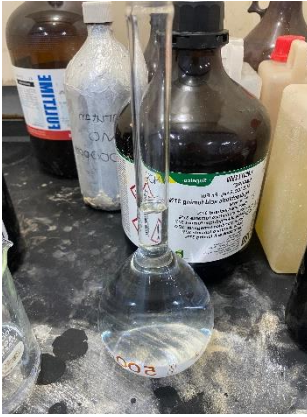
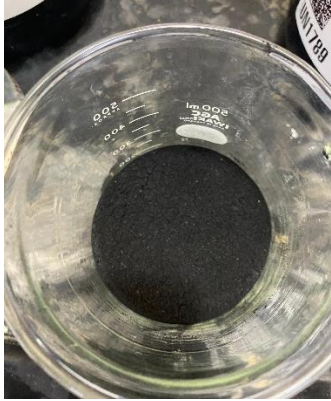
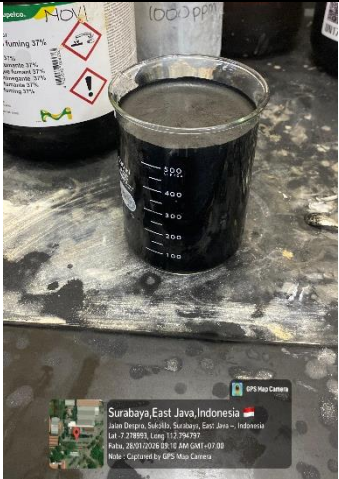
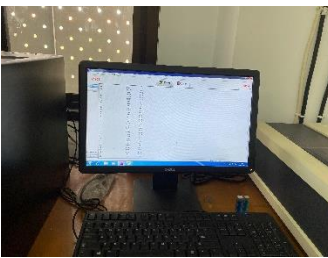
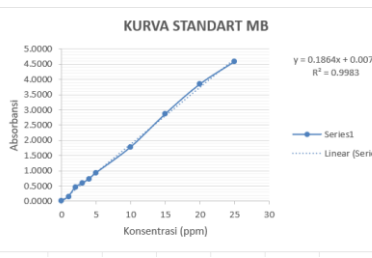
a. Asymptotically F distributed.

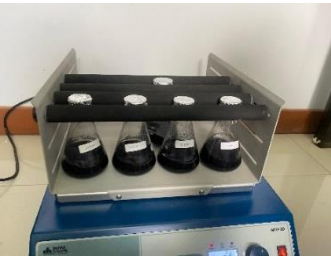
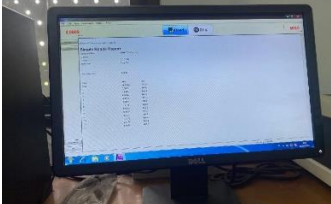
halaman sengaja dikosongkan

LAMPIRAN V
DOKUMENTASI PENELITIAN

halaman sengaja dikosongkan

		
Pengambilan limbah tempurung siwalan	Pencucian limbah tempurung siwalan	Pengeringan menggunakan sinar matahari selama 4 hari
		
Hasil setelah pengeringan sinar matahari sebanyak 200 gram	Menghilangkan kadar air menggunakan oven dengan suhu 105 selama 2 jam	Melakukan proses karbonisasi menggunakan furnace dengan suhu 450 selama 1 jam
		
Melakukan penumbukan pada siwalan yang telah difurnace	Melakukan pengayakan 60 mesh	Hasil ayakan dengan jumlah karbon sebanyak 60 gram

		
Pembuatan larutan HCL 41,5 mL dengan penambahan aquadest hingga 500 mL untuk proses aktivasi	Menimbang 50 gram karbon untuk dilakukan proses aktivasi	Menambahkan larutan HCL pada karbon, proses aktivasi dilakukan selama 24 jam
		
Melakukan penetralan menggunakan NaOH 1M hingga pH 7 atau netral	Pengeringan setelah aktivasi menggunakan oven selama 1 jam	Setelah di oven karbon aktif siap di gunakan
		
Pembuatan larutan standart 1000 ppm <i>methylene blue</i>	Pembuatan kurva standart <i>methylene blue</i>	Hasil grafik kurva standart

		
Pembuatan variasi konsentrasi larutan <i>methylene blue</i>	Penimbangan karbon aktif sebagai adsorben sebanyak 1 gram/beaker	Pengadukan menggunakan shaker selama 1 jam dengan kecepatan 100 rpm
		
Melakukan penyaringan memisahkan karbon aktif dari filtratnya	Hasil setelah dilakukan penyaringan	Pengukuran nilai Absorbansi menggunakan Uv-Vis

halaman sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Thalia Putri Nurrohman lahir di Tuban pada tanggal 29 November 2003. Riwayat Pendidikan formal penulis dimulai dari SDN Kebonsari 1 Tuban, dilanjutkan ke SMPN 5 Tuban, dan kemudian di SMAN 5 Tuban. Pendidikan tinggi penulis ditempuh di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya pada Program Studi D4 Teknik Pengolahan Limbah. Selama masa perkuliahan, penulis aktif berpartisipasi dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Pengolahan Limbah. Pengalaman On The Job Training diperoleh penulis di Mitra Prima Enviro Konsultan Lingkungan dan PT Heinz ABC Indonesia. Pengalaman tersebut mendukung pengembangan kompetensi penulis di bidang pengolahan limbah. Pembaca yang ingin menyampaikan kritik, saran maupun pertanyaan terkait Tugas Akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email thaliaputri2911@gmail.com