ADSORPSI METILEN BIRU MENGGUNAKAN KARBON AKTIF DARI CANGKANG KELAPA SAWIT (*Elaeis guineensis*) DENGAN AKTIVATOR $AlCl_3$



NUR HIKMAH SN
H031221007

PROGRAM STUDI KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2026

ADSORPSI METILEN BIRU MENGGUNAKAN KARBON AKTIF DARI CANGKANG KELAPA SAWIT (*Elaeis guineensis*) DENGAN AKTIVATOR $AlCl_3$

NUR HIKMAH SN

H031 22 1007

PROGRAM STUDI KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2026

ADSORPSI METILEN BIRU MENGGUNAKAN KARBON AKTIF DARI CANGKANG KELAPA SAWIT (*Elaeis guineensis*) DENGAN AKTIVATOR $AlCl_3$

NUR HIKMAH SN
H031 22 1007

Skripsi

Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana

Program Studi Kimia

Pada

PROGRAM STUDI KIMIA
DEPARTEMEN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2026

SKRIPSI

ADSORPSI METILEN BIRU MENGGUNAKAN KARBON AKTIF DARI CANGKANG KELAPA SAWIT (*Elaeis guineensis*) DENGAN AKTIVATOR $AlCl_3$

NUR HIKMAH SN
H031 22 1007

Skripsi,

Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Sarjana Program Studi Kimia pada Tanggal 21 Agustus 2026 dan dinyatakan teleh memenuhi syarat kelulusan.

Program Studi Kimia
Departemen Kimia
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Hasanuddin
Makassar

Mengesahkan:
Pembimbing Tugas Akhir,

Dr.Sci. Muhammad Zakir, S.Si., M.Si.
NIP. 19701103 199903 1 001

Mengetahui:
Plh. Ketua Departemen Kimia,

Dr. Ajuk Gapar, S.Si., M.Si.
NIP. 19711231 200012 1 001

Dipindai dengan CamScanner

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI
DAN KELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi berjudul "Adsorpsi Metilen Biru Menggunakan Karbon Aktif Dari Cangkang Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis*) dengan Aktivator $AlCl_3$" adalah benar karya saya dengan arahan dari bapak pembimbing Dr. Sci. Muhammad Zakir, S.Si., M.Si. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka skripsi ini. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa skripsi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 21 Agustus 2026



NUR HIKMAH SN
H031221007

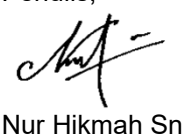
Dipindai dengan CamScanner

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari bahwa selama proses penyusunan skripsi ini terdapat berbagai tantangan dan hambatan. Namun, berkat doa, dukungan, bimbingan, serta bantuan dari berbagai pihak, skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis menyampaikan rasa syukur dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak **Dr. Sci. Muhammad Zakir, M.Si.,** selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin sekaligus dosen pembimbing, yang telah memberikan fasilitas selama masa studi serta dengan penuh kesabaran meluangkan waktu untuk membimbing, memberikan arahan, motivasi, serta masukan, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan skripsi ini.
2. Ibu **Prof. Dr. Indah Raya, M.Si.,** dan Ibu **Prof. Dr. Rugaiyah A. Arfah, M.Si.,** selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik, saran, serta masukan yang sangat membangun demi penyempurnaan skripsi ini.
3. Ibu **Dr. St. Fauziah, M.Si.,** selaku Ketua Departemen Kimia dan Ibu **Dr. Nur Umriani Permatasari, M.Si.,** selaku Sekretaris Departemen Kimia, beserta seluruh dosen Departemen Kimia yang telah memberikan ilmu, pengalaman, dan bimbingan kepada penulis selama masa perkuliahan, serta seluruh staf Departemen Kimia yang telah banyak membantu penulis dalam berbagai urusan akademik.
4. Seluruh analis laboratorium di Departemen Kimia, terkhusus Analis Laboratorium Kimia Fisika, Pak **Iqbal**, yang telah memberikan bantuan, saran, fasilitas, serta kemudahan kepada penulis selama proses penelitian.
5. Kedua orang tua dan keluarga besar. Terima kasih atas doa, kasih sayang, semangat, dan motivasi yang selalu mengiringi setiap langkah penulis. Didikan dan pengorbanan yang telah diberikan menjadi bekal yang sangat berharga hingga penulis mampu menyelesaikan pendidikan ini.
6. Teman-teman alotrop 2022 dan kimia angkatan 2022 terkhusus **Nadira** selaku rekan peneliti, serta **Ancol, Aca,** dan **Alfi** yang telah menjadi teman berbagi cerita, saling menyemangati, serta menemani penulis selama menjalani masa perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini.

Penulis,



Nur Hikmah Sn

ABSTRAK

Nur Hikmah Sn. **Adsorpsi Metilen Biru Menggunakan Karbon Aktif dari Cangkang Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis*) dengan Aktivator $AlCl_3$** (dibimbing oleh Muhammad Zakir).

Latar Belakang. Limbah cair industri tekstil mengandung zat warna sintetis yang sulit terdegradasi, salah satunya metilen biru. Sekitar 1-50% zat warna tidak berikatan dengan serat tekstil sehingga berpotensi mencemari lingkungan perairan. Salah satu metode yang efektif untuk mengatasinya adalah adsorpsi menggunakan karbon aktif berbasis biomassa. Cangkang kelapa sawit berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku karbon aktif karena memiliki kandungan lignoselulosa yang tinggi. Aktivasi menggunakan $AlCl_3$ sebagai asam Lewis diharapkan dapat meningkatkan karakteristik permukaan karbon sehingga kemampuan adsorpsinya terhadap metilen biru menjadi lebih baik. **Tujuan.** Penelitian ini dilakukan untuk menentukan pengaruh aktivasi karbon aktif cangkang kelapa sawit menggunakan $AlCl_3$ terhadap kemampuan adsorpsi metilen biru pada pH optimum, waktu kontak optimum, dan model isoterm adsorpsi. **Metode.** Penelitian meliputi pembuatan karbon aktif, analisis proksimat, karakterisasi gugus fungsi menggunakan FTIR, analisis luas permukaan menggunakan SAA, serta pengujian adsorpsi dan model isoterm. **Hasil.** Hasil analisis proksimat menunjukkan kadar air 2,8524%, kadar abu 3,5648%, kadar zat volatil 9,2595%, dan kadar karbon tetap 87,1757%. Karakterisasi FTIR menunjukkan keberadaan gugus fungsi O-H, C=O, C=C, dan C-O pada permukaan karbon aktif. Adsorpsi metilen biru berlangsung optimum pada pH 7 dengan waktu kontak 45 menit dan kapasitas adsorpsi sebesar 14,5985 mg/g. Analisis isoterm menunjukkan bahwa proses adsorpsi mengikuti model Langmuir. **Kesimpulan.** Karbon aktif cangkang kelapa sawit yang diaktivasi menggunakan $AlCl_3$ berpotensi sebagai adsorben metilen biru.

Kata Kunci: adsorpsi; metilen biru; karbon aktif; $AlCl_3$.

ABSTRACT

Nur Hikmah Sn. **Adsorption of Methylene Blue Using Activated Carbon from Oil Palm (*Elaeis guineensis*) Shells with $AlCl_3$ as an Activator** (superadvised by Muhammad Zakir).

Background. Textile industrial wastewater contains synthetic dyes that are difficult to degrade, one of which is methylene blue. Approximately 1-50% of the dye does not bind to textile fibers, thus potentially polluting the aquatic environment. One effective method to overcome this is adsorption using biomass-based activated carbon. Palm kernel shells have the potential to be used as raw material for activated carbon because they have a high lignocellulose content. Activation using $AlCl_3$ as a Lewis acid is expected to improve the surface characteristics of the carbon so that its adsorption capacity for methylene blue becomes better. **Objective.** This study was conducted to determine the effect of palm kernel shell activated carbon activation using $AlCl_3$ on the adsorption capacity of methylene blue at optimum pH, optimum contact time, and adsorption isotherm model. **Methods.** The study included the manufacture of activated carbon, proximate analysis, functional group characterization using FTIR, surface area analysis using SAA, and adsorption testing and isotherm model. **Results.** The results of proximate analysis showed a water content of 2.8524%, ash content of 3.5648%, volatile matter content of 9.2595%, and fixed carbon content of 87.1757%. FTIR characterization showed the presence of O-H, C=O, C=C, and C-O functional groups on the surface of activated carbon. Methylene blue adsorption took place optimally at pH 7 with a contact time of 45 minutes and an adsorption capacity of 14.5985 mg/g. Isotherm analysis showed that the adsorption process followed the Langmuir model. **Conclusion.** Palm kernel shell activated carbon activated using $AlCl_3$ has the potential as a methylene blue adsorbent.

Keywords: adsorption; methylene blue; activated carbon; $AlCl_3$.

DAFTAR ISI

halaman

UCAPAN TERIMAKASIH vi
ABSTRAK vii
ABSTRACT viii
DAFTAR ISI ix
DAFTAR TABEL xi
DAFTAR GAMBAR xii
DAFTAR LAMPIRAN xiii
DAFTAR SIMBOL/SINGKATAN xiv
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 4
1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian 4
1.3.1 Maksud Penelitian 4
1.3.2 Tujuan Penelitian 4
1.4 Manfaat Penelitian 4
1.5 Landasan Teori 5
BAB II METODE PENELITIAN 7
2.1 Bahan Penelitian 7
2.2 Alat Penelitian 7
2.3 Waktu dan Tempat Penelitian 7
2.4 Prosedur Penelitian 7
2.4.1 Pembuatan Larutan Pereaksi 7
2.4.2 Pembuatan Karbon Aktif Cangkang Kelapa Sawit 9
2.4.3 Karakterisasi Material 10
2.4.4 Aplikasi Karboan Aktif sebagai Adsorben Metilen Biru 11
BAB III HASIL DAN PEMBAHASAN 13
3.1 Preparasi Sampel 13
3.2 Karbonisasi 14
3.3 Aktivasi 14
3.4 Analisis Proksimat 16

3.5 Titrasi Boehm 17
3.6 Analisis FTIR 22
3.7 Analisis SAA 25
3.8 Aplikasi Adsorpsi Metilen Biru 27
3.8.1 Penentuan Ph Optimum 28
3.8.2 Penentuan Waktu Kontak Optimum 30
3.9 Penentuan Model Isoterm 31
BAB IV KESIMPULAN DAN SARAN 35
4.1 Kesimpulan 35
4.2 Saran 35
DAFTAR PUSTAKA 36
LAMPIRAN 41

DAFTAR TABEL

nomor **halaman**

1. Hasil analisis proksimat 16
2. Hasil analisis FTIR..... 22
3. Hasil analisis SAA..... 25
4. Isotermal Langmuir dan Freundlich 31

DAFTAR GAMBAR

nomor **halaman**

1. Struktur metilen biru 2
2. Jenis-jenis kelapa sawit 5
3. Tandan buah sawit 6
4. Serbuk cangkang kelapa sawit 14
5. Karbon cangkang kelapa sawit 14
6. Reaksi aktivasi menggunakan $AlCl_3$ 15
7. Karbon cangkang karbon sawit 15
8. Reaksi penentralan dengan NaOH 18
9. Reaksi penetralan dengan $NaHCO_3$ 19
10. Reaksi penetralan dengan Na_2HCO_3 19
11. Reaksi penetralan dengan HCl 20
12. Titrasi Boehm pada sampel SCKS, KCKS, dan KACKS 20
13. Spektrum FTIR 22
14. Grafik isoterm SCKS, KCKS, dan KACKS 26
15. Kurva kalibrasi larutan metilen biru 27
16. Penentuan pH optimum KCKS dan KACKS 28
17. Penentuan waktu kontak optimum KCKS dan KACKS 30
18. Grafik isoterm Freundlich 32
19. Grafik isoterm Langmuir 32

DAFTAR LAMPIRAN

nomor **halaman**

1. Bagan kerja 41
2. Perhitungan pembuatan larutan..... 51
3. Perhitungan analisis proksimat..... 54
4. Perhitungan titrasi Boehm 56
5. Uji daya adsorpsi metilen biru berdasarkan pH optimum..... 65
6. Uji daya adsorpsi metilen biru berdasarkan waktu kontak optimum 67
7. Penentuan model isoterm..... 69
8. Data hasil FTIR..... 74
9. Data hasil SAA..... 78
10. Dokumentasi 87

DAFTAR ISTILAH, SIMBOL, DAN SINGKATAN

Istilah/Simbol/Singkatan	Arti
>	Lebih besar dari
<	Lebih kecil dari
C_0	Konsentrasi awal
C_e	Konsentrasi akhir
FTIR	Fourtier transform inftra-red
g	gram
KACKS	Karbon aktif cangkang kelapa sawit
KACKS-MB	Karbon Aktif Cangkang Kelapa Sawit yang diaplikasikan ke Metilen Biru
KCKS	Karbon cangkang kelapa sawit
K_F	Konstanta Freundlich
K_L	Konstanta Langmuir
L	Liter
MB	Metilen biru
Methemoglobinemia	Kelainan darah di mana kadar methemoglobin dalam tubuh terlalu tinggi
mg	miligram
mg/g	miligram per gram
mg/L	Miligram per Liter
mL	mililiter
n	Faktor intensitas adsorpsi
pH	potensial Hidrogen atau derajat keasaman
Q_e	Kapasitas adsorpsi
Q_{max}	Kapasitas maksimal adsorpsi
SAA	*Surface area analyzer*
SCKS	Serbuk cangkang kelapa sawit
UV-Vis	Ultraviolet-Visible Spectrophotometer

BAB I

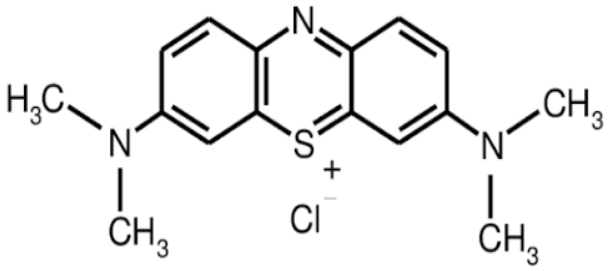
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri tekstil dan garmen di Indonesia mulai berkembang sejak pertengahan tahun 1970-an dan menjadi sektor ekspor penting pada periode 1980 sampai1990-an. Hingga saat ini, industri tekstil masih menjadi salah satu industri prioritas nasional sebagaimana yang tercantum dalam Rencana Pembangunan Industri Nasional 2015-2035. Industri ini mencakup seluruh tahapan produksi, mulai dari pembuatan serat, pemintalan, penenunan, perajutan, hingga proses pewarnaan dan pencetakan tekstil (Sharpe et al., 2022). Di balik kontribusinya terhadap perekonomian nasional dan penyerapan tenaga kerja, industri tekstil juga dikenal sebagai salah satu industri dengan konsumsi air yang tinggi karena setiap tahapan produksinya memerlukan air dalam jumlah besar, terutama pada proses pencucian, pewarnaan, dan penyempurnaan kain. Air limbah yang dihasilkan dari proses tersebut umumnya mengandung berbagai bahan kimia, termasuk zat warna sintetis yang berpotensi mencemari lingkungan apabila dibuang tanpa melalui proses pengolahan yang memadai. Pada proses pewarnaan, tidak seluruh molekul zat warna dapat berikatan dengan serat tekstil sehingga sekitar 1-50% zat warna akan terbuang bersama air limbah, bergantung pada jenis pewarna yang digunakan. Akibatnya, industri tekstil menjadi salah satu penyumbang utama pencemaran zat warna di lingkungan perairan (Musthofa et al., 2023).

Produksi zat warna sintetis secara global diperkirakan mencapai 700.000-800.000 ton per tahun, dengan sekitar 15% di antaranya terlepas ke lingkungan selama proses produksi maupun proses pewarnaan tekstil. Beberapa zat warna yang umum digunakan dalam industri tekstil antara lain *methyl orange*, *rhodamine* B, metilen biru (*methylene blue*), *congo red*, dan *reactive black*-5. Di antara berbagai jenis zat warna tersebut, metilen biru merupakan salah satu pewarna kationik yang paling banyak digunakan karena memiliki stabilitas kimia yang tinggi, warna biru yang intens, mudah larut dalam air, serta mampu menghasilkan pewarnaan yang baik pada berbagai jenis serat tekstil seperti wol, sutra, dan kapas. Metilen biru (MB) merupakan senyawa pewarna sintetis golongan thiazine yang memiliki rumus molekul $C_{16}H_{18}ClN_3S$ dengan massa molekul sekitar 319,85 g/mol. Selain dimanfaatkan dalam industri tekstil, metilen biru juga digunakan pada industri kertas, kulit, percetakan, farmasi, serta sebagai pewarna biologis dalam analisis laboratorium. Struktur aromatik yang stabil menyebabkan senyawa ini bersifat persisten dan sukar mengalami degradasi secara alami, sehingga keberadaannya di lingkungan dapat bertahan dalam waktu yang relatif lama. Ketika terakumulasi di badan perairan, metilen biru mampu menghambat penetrasi cahaya matahari ke dalam air sehingga mengganggu proses fotosintesis organisme akuatik, menurunkan kadar oksigen terlarut, serta mengganggu keseimbangan ekosistem perairan. Selain itu, paparan metilen biru dalam konsentrasi tinggi dilaporkan dapat menyebabkan

iritasi pada kulit dan mata, gangguan saluran pencernaan, methemoglobinemia, bahkan berpotensi bersifat mutagenik dan karsinogenik apabila terpapar dalam jangka panjang (Fito et al., 2023).



Gambar 1. Struktur Metilen Biru

Pengolahan limbah zat warna secara konvensional, yang meliputi tahap pengolahan pendahuluan, primer, sekunder, dan tersier, diketahui kurang efektif dalam menghilangkan zat warna seperti metilen biru. Rendahnya efisiensi metode konvensional disebabkan oleh kompleksitas struktur kimia zat warna yang sulit terdegradasi secara biologis maupun kimia. Oleh karena itu, berbagai teknologi pengolahan lanjutan seperti proses oksidasi lanjutan, nanofiltrasi, osmosis terbalik, elektrokoagulasi, pertukaran ion, fotokatalisis, dan elektrodialisis telah dikembangkan. Meskipun efektif, teknologi tersebut memiliki keterbatasan berupa kebutuhan energi tinggi, biaya operasional dan investasi yang besar, serta ketergantungan pada bahan kimia dan tenaga ahli (Fito et al., 2023).

Di antara berbagai teknologi pengolahan tersebut, adsorpsi merupakan salah satu metode yang paling banyak digunakan karena memiliki efisiensi yang tinggi, biaya operasional yang relatif rendah, desain proses yang sederhana, serta mudah diaplikasikan dan lebih ramah lingkungan. Adsorpsi merupakan fenomena permukaan yang melibatkan penempelan molekul adsorbat pada permukaan adsorben (Haziza et al., 2024). Efektivitas proses adsorpsi dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain luas permukaan adsorben, ukuran dan distribusi pori, jenis gugus fungsi permukaan, pH larutan, waktu kontak, serta konsentrasi awal adsorbat. Pada adsorpsi metilen biru menggunakan karbon aktif, interaksi antara adsorben dan adsorbat dapat berlangsung melalui mekanisme interaksi elektrostatik, ikatan hidrogen, interaksi π-π antara cincin aromatik karbon dengan molekul metilen biru, serta gaya van der Waals. Selain itu, keberadaan gugus fungsi yang mengandung oksigen, seperti hidroksil (-OH), karbonil (C=O), dan karboksil (-COOH), berperan sebagai situs aktif yang meningkatkan interaksi antara adsorben dan adsorbat sehingga kapasitas adsorpsi menjadi lebih tinggi (Syafila et al., 2022).

Berbagai material telah dikembangkan sebagai adsorben, di antaranya zeolit, silika, dan karbon aktif. Di antara berbagai material tersebut, karbon aktif merupakan adsorben yang paling banyak digunakan karena memiliki luas permukaan yang besar (300-3500 m^2/g), struktur pori yang berkembang, stabilitas kimia yang baik, serta dapat diproduksi dari berbagai bahan baku yang melimpah, terutama biomassa

lignoselulosa (Haziza et al., 2024). Salah satu biomassa yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku karbon aktif adalah cangkang kelapa sawit. Cangkang kelapa sawit mengandung sekitar 29,7% selulosa, 47,7% holoselulosa, dan 53,4% lignin, sehingga berpotensi menghasilkan material karbon dengan rendemen yang tinggi (Sirajuddin et al., 2022). Kandungan selulosa dan lignin yang tinggi tersebut merupakan sumber karbon yang baik karena selama proses karbonisasi kedua komponen tersebut akan mengalami dekomposisi membentuk struktur karbon berpori. Indonesia sendiri merupakan produsen minyak kelapa sawit mentah (*Crude Palm Oil*/CPO) terbesar di dunia dengan produksi mencapai 48,16 juta ton pada tahun 2024 (Lua, 2025). Kondisi tersebut menyebabkan limbah cangkang kelapa sawit dihasilkan dalam jumlah yang sangat besar. Namun, hingga saat ini pemanfaatannya masih didominasi sebagai bahan bakar boiler atau dimanfaatkan secara sederhana, sehingga potensi cangkang kelapa sawit sebagai bahan baku karbon aktif bernilai tambah tinggi masih belum dimanfaatkan secara optimal.

Salah satu metode yang menjanjikan dalam konversi biomassa menjadi material karbon adalah karbonisasi hidrotermal (*Hydrothermal Carbonization*, HTC). Proses HTC menghasilkan padatan berkarbon yang dikenal sebagai *hydrochar* melalui perlakuan biomassa dalam medium air pada suhu dan tekanan tertentu. Metode ini memiliki keunggulan berupa konsumsi energi yang lebih rendah, rendemen produk yang tinggi, serta cocok untuk biomassa dengan kadar air tinggi. Meskipun *hydrochar* memiliki porositas dan luas permukaan yang relatif rendah, material ini kaya akan gugus fungsi permukaan yang dapat ditingkatkan melalui proses lanjutan seperti aktivasi (Saragih et al., 2024).

Salah satu pendekatan yang banyak diteliti untuk meningkatkan kinerja adsorpsi karbon aktif adalah modifikasi atau aktivasi menggunakan agen kimia. Proses aktivasi merupakan tahap penting dalam pembuatan karbon aktif karena bertujuan meningkatkan luas permukaan dan volume pori. Aktivasi dapat dilakukan secara fisika maupun kimia. Aktivasi kimia menggunakan agen seperti NaOH, KOH, $ZnCl_2$, dan H_3PO_4 diketahui lebih efektif dalam meningkatkan karakteristik adsorpsi karbon. Selain aktivator konvensional, beberapa penelitian melaporkan bahwa penggunaan garam logam seperti aluminium klorida ($AlCl_3$) sebagai agen modifikasi karbon aktif mampu meningkatkan efisiensi adsorpsi zat warna. Sebagai contoh, penelitian yang dilaporkan oleh Tsoutsa et al., (2023) menunjukkan bahwa karbon aktif yang dimodifikasi menggunakan $AlCl_3$ memiliki kapasitas adsorpsi zat warna yang lebih tinggi dibandingkan karbon aktif tanpa modifikasi. Peningkatan kinerja adsorpsi tersebut dikaitkan dengan perubahan sifat permukaan karbon setelah proses modifikasi menggunakan $AlCl_3$, yang berkontribusi terhadap meningkatnya interaksi antara adsorben dan zat warna. Karbon aktif termodifikasi $AlCl_3$ dilaporkan lebih efektif dalam menghilangkan zat warna sintetis dari larutan dibandingkan karbon aktif konvensional. Peningkatan kinerja adsorpsi pada karbon aktif termodifikasi $AlCl_3$ umumnya dikaitkan dengan perubahan muatan permukaan dan peningkatan jumlah situs aktif yang berperan dalam interaksi adsorpsi. Keberadaan ion aluminium pada

permukaan karbon dapat memperkuat interaksi elektrostatik antara adsorben dan zat warna, sehingga meningkatkan efisiensi penghilangan zat warna dari larutan.

Berdasarkan uraian tersebut, pengembangan adsorben berbasis karbon aktif atau karbon termodifikasi menggunakan $AlCl_3$ menjadi alternatif yang menjanjikan untuk pengolahan limbah zat warna, khususnya metilen biru. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan material adsorben yang efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan untuk aplikasi pengolahan air limbah industri tekstil.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini yaitu:

1. bagaimana pengaruh aktivator $AlCl_3$ terhadap kemampuan karbon aktif dalam mengadsorpsi metilen biru?
2. bagaimana parameter adsorpsi (pH dan waktu kontak) terhadap kemampuan karbon aktif dalam mengadsorpsi metilen biru?
3. bagaimana kapasitas adsorpsi dan model isotherm adsorpsi yang tepat untuk adsorpsi metilen biru?

1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian

1.3.1 Maksud Penelitian

Maksud dari penelitian ini adalah untuk membuat adsorben metilen biru dalam limbah biomassa yaitu cangkang kelapa sawit dengan menggunakan aktivator $AlCl_3$.

1.3.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah

1) menentukan pengaruh aktivasi karbon hidrotermal cangkang kelapa sawit dengan menggunakan $AlCl_3$ terhadap kemampuan adsorpsi metilen biru,
2) menentukan pH dan waktu optimum yang dibutuhkan karbon aktif dalam mengadsorpsi zat warna metilen biru, dan
3) menentukan kapasitas adsopsi dan model adsorpsi isotermal yang sesuai untuk adsorpsi metilen biru oleh karbon aktif cangkang kelapa sawit.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi terhadap kemajuan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang kimia lingkungan dan teknologi. Penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan alternatif pemanfaatan limbah biomassa cangkang kelapa sawit menjadi adsorben yang bernilai tambah dan berpotensi digunakan dalam pengolahan limbah cair yang mengandung zat warna. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan dan referensi bagi peneliti selanjutnya dalam pengembangan karbon aktif berbasis biomassa dengan metode aktivasi kimia.

1.5 Landasan Teori

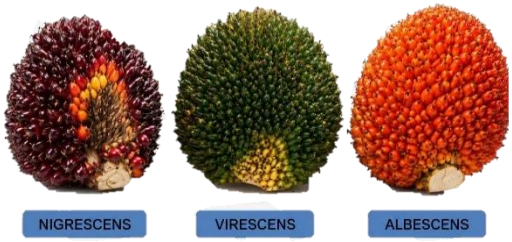
Kelapa sawit termasuk famili Arecaceae, sub famili Cocoideae, genus elaeis yang mempunyai 3 spesis yaitu *E. guineensis* Jacq, *E. oleifera* (HBK) Cortes, dan *E. odora* W. Spesis pertama adalah yang pertama kali dan terluas dibudidayakan. Dua spesis lainnya terutama digunakan untuk menambah keanekaragaman sumber daya genetik dalam rangka program pemuliaan. Klasifikasi tanaman kelapa sawit adalah sebagai berikut:

Divisis : Embryophyta Siphonagama
Kelas : Angiospermae
Ordo : Monocotyledonae
Famili : Arecaceae
Sub-famili : Cocoideae
Genus : *Elaeis*
Spesies : *E. guineensis Jacq.*

Berdasarkan warna buahnya, *E. guieenensis* digolongkan atas 3 tipe :

a) *Nigrescens*, buah muda berwarna ungu gelap sampai hitam lalu berubah jadi jingga sampai merah setelah matang.
b) *Virescens*, buah muda berwarna hijau yang berubah menjadi kuning kemerahan pada saat matang.
c) *Albescens*, buah muda berwarna kuning dan pucat tembus cahaya karena kandungan karotennya dalam mesokarpnya rendah.

Tipe *nigrescens* adalah yang digunakan untuk komersial sedangkan tipe lainnya digunakan dalam program pemuliaan (Allorerung et al., 2010).



Gambar 2. Jenis-jenis kelapa sawit

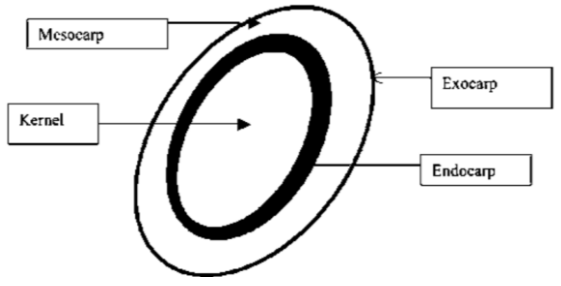
Berdasarkan ketebalan cangkangnya, kelapa sawit dikelompokkan dalam tiga tipe yaitu:

a) Dura, mempunyai cangkang (tempurung) tebal, 6-8 mm, porsi mesokarp terhadap buah berkisar 35-65%, kernel besar, tetapi minyak terekstrak rendah, 17-19%. Cangkang tebal dura diduga dapat memperpendek umur mesin pengolah.
b) Pisifera, tanpa cangkang, kernel kecil dengan lapisan fiber tipis, proporsi mesokarp tinggi dan kadar minyak terekstrak tinggi, tetapi sebagian besar betinanya steril sehingga sangat jarang menghasilkan buah.
c) Tenera, merupakan hasil silangan antara dura dan pisifera sehingga mempunyai karakteristik gabungan antara dura dan pisifera sehingga meminimalisir

kelemahan masing-masing. Kernel berukuran sedang dengan cangkang menjadi lebih tipis (0,5-4 mm), tetapi bunga betina tetap fertile. Proporsi mesokarp tinggi (60-95%) dan kadar minyak 22-25%, bahkan ada yang mencapai 28%.

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis*) diketahui berasal dari wilayah hutan hujan tropis Afrika Barat. Daerah asalnya membentang di sepanjang wilayah selatan Kamerun, Pantai Gading, Ghana, Liberia, Nigeria, Sierra Leone, dan Togo, hingga mencapai wilayah khatulistiwa Angola dan Kongo. Pengolahan buah kelapa sawit untuk menghasilkan minyak nabati telah dilakukan di Afrika selama ribuan tahun. Minyak yang dihasilkan memiliki warna dan aroma yang khas serta menjadi salah satu bahan penting dalam berbagai masakan tradisional masyarakat Afrika Barat. Meskipun demikian, metode pengolahan secara tradisional masih dilakukan dengan cara yang sederhana, tetapi membutuhkan tenaga dan waktu yang cukup besar serta kurang efisien.

Pada abad ke-14 hingga ke-17, kelapa sawit mulai dibawa ke wilayah Amerika dan kemudian menyebar ke kawasan Timur Jauh. Tanaman ini ternyata dapat tumbuh dengan baik di kawasan tersebut sehingga berkembang menjadi salah satu tanaman perkebunan dengan produksi komersial terbesar di luar wilayah asalnya. Minyak sawit memiliki kandungan karotenoid yang tinggi, yaitu pigmen alami yang terdapat pada tumbuhan dan hewan, sehingga memberikan warna merah hingga jingga pada minyak sawit. Komponen utama gliserida dalam minyak sawit adalah asam lemak jenuh, terutama asam palmitat. Kandungan tersebut menyebabkan minyak sawit memiliki sifat semi-padat pada kondisi lingkungan tropis dan cenderung berbentuk lemak padat pada iklim sedang, karena memiliki nilai ekonomi yang tinggi sebagai sumber minyak nabati dan minyak teknis dengan produktivitas yang besar, kelapa sawit kini dibudidayakan sebagai tanaman perkebunan di berbagai negara beriklim tropis dengan curah hujan tinggi, yaitu minimal sekitar 1.600 mm per tahun, terutama di wilayah yang berada dalam radius 10° dari garis khatulistiwa. Tanaman kelapa sawit menghasilkan buah yang tersusun dalam bentuk tandan dengan bobot sekitar 10-40 kg. Setiap buah memiliki bobot sekitar 6-20 g dan tersusun atas beberapa bagian utama, yaitu kulit luar atau eksokarp (*exocarp*), daging buah atau mesokarp (*mesocarp*) yang mengandung minyak sawit dalam matriks berserat, serta bagian inti yang terdiri atas cangkang atau endokarp (*endocarp*) dan biji (kernel). Biji tersebut juga mengandung minyak yang memiliki karakteristik berbeda dari minyak sawit dan lebih menyerupai minyak kelapa (Poku, 2002).



Gambar 3. Tandan buah sawit

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1 Bahan Penelitian

Adapun bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah cangkang kelapa sawit, akuabides (onemed), zat warna metilen biru (Merck), Na_2CO_3 (Merck), $NaHCO_3$ (Merck), NaOH (Merck), HCl 37% (Merck), HCl 0,1 M (Merck), $Na_2B_4O_7.10H_2O$ (Merck), $H_2C_2O_4.2H_2O$ (Merck), $AlCl_3$ (Merck), n-Heksana (Merck), etanol 96% (Merck), indikator *red methyl*, indikator *phenolphthalein*, kertas saring Whatman No. 42 dan kertas pH universal, dan *tissue*.

2.2 Alat Penelitian

Adapun alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah alat gelas laboratorium, *blender*, ayakan ukuran 100 mesh, neraca analitik, sonikator, pompa vakum, oven, rangkaian alat autoklaf, *furnace* (Nabertherm 30-3000 °C), *shaker*, desikator, instrumen SAA (Altamira Micro-200), instrumen spektrofotometer UV-Vis (PG Instrument T60), dan instrumen FTIR (SHIMADZU).

2.3 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Februari hingga Juni 2026 di Laboratorium Kimia Fisika dan Laboratorium Terpadu, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin, Makassar.

2.4 Prosedur Penelitian

2.4.1 Pembuatan Larutan Pereaksi (Muliani, 2017)

Pembuatan Larutan Na_2CO_3 0,05 N. Padatan Na_2CO_3 ditimbang sebanyak 0,6625 g, kemudian dilarutkan dengan akuabides sebanyak 25 mL, dipindahkan ke dalam labu ukur 250 mL, dihimpitkan dengan akuabides hingga tanda batas dan dihomogenkan.

Pembuatan Larutan $NaHCO_3$ 0,05 N. Padatan $NaHCO_3$ ditimbang sebanyak 1,05 g, dilarutkan dengan akuabides sebanyak 25 mL, dipindahkan ke dalam labu ukur 250 mL, dihimpitkan dengan akuabides hingga tanda batas dan dihomogenkan.

Pembuatan Larutan NaOH 0,05 N. Padatan NaOH ditimbang sebanyak 2 g, kemudian dilarutkan dengan akuabides sebanyak 25 mL, dipindahkan ke dalam labu ukur 1000 mL, dihimpitkan dengan akuabides hingga tanda batas dan dihomogenkan.

Pembuatan Larutan HCl 0,05 N. Larutan HCl 37% dipipet sebanyak 4,1459 mL ke dalam labu ukur 1000 mL, kemudian dihimpitkan dengan akuabides hingga tanda batas dan dihomogenkan.

Pembuatan Larutan $Na_2B_4O_7$ 0,05 N. Padatan $Na_2B_4O_7.10H_2O$ ditimbang sebanyak 0,9536 g, kemudian dilarutkan dengan akuabides sebanyak 25 mL, dipindahkan ke dalam labu ukur 100 mL, dihimpitkan dengan akuabides hingga tanda batas dan dihomogenkan.

Pembuatan Larutan $H_2C_2O_4$ 0,05 N. Padatan $H_2C_2O_4.2H_2O$ ditimbang sebanyak 0,3150 g, kemudian dilarutkan dengan akuabides sebanyak 25 mL, dipindahkan ke dalam labu ukur 100 mL, dihimpitkan dengan akuabides hingga tanda batas dan dihomogenkan.

Standarisasi Larutan HCl dengan larutan $Na_2B_4O_7$ 0,05 N. Larutan $Na_2B_4O_7$ dipipet sebanyak 10 mL dan dimasukan ke dalam erlenmeyer ukuran 250 mL, kemudian ditambahkan indikator *Red Methyl* sebanyak 2-3 tetes lalu dititrasi dengan HCl hingga berubah warna. Dicatat volume HCl yang digunakan, dilakukan titrasi secara triplo dan dihitung konsentrasi larutan HCl.

Standarisasi Larutan NaOH dengan larutan $H_2C_2O_4$ 0,05 N. Larutan $H_2C_2O_4$ 0,05 N dipipet sebanyak 10 mL ke dalam erlenmeyer, ditambahkan 2-3 tetes indikator *Phenolphthalein*, dititrasi dengan larutan NaOH hingga terjadi perubahan warna dari bening menjadi merah muda, dicatat volume NaOH yang digunakan, dilakukan titrasi secara triplo dan dihitung konsentrasi larutan NaOH.

Pembuatan Larutan Induk Metilen biru 1000 ppm (Rahayu et al., 2023). Zat warna metilen biru ditimbang sebanyak 1 g kemudian dilarutkan dengan akuabides secukupnya. Larutan dipindahkan dalam labu ukur ukuran 1000 mL dan dihomogenkan.

Pembuatan Larutan Zat Warna Metilen biru 250 ppm. Larutan induk dipipet sebanyak 250 mL kemudian tambahkan akuabides hingga tanda batas dalam labu ukur ukuran 1000 mL, kemudian dihomogenkan.

Pembuatan Larutan Zat Warna Metilen Biru 50 ppm. Larutan metilen biru konsentrasi 250 ppm dipipet sebanyak 100 mL kemudian tambahkan akuabides hingga tanda batas dalam labu ukur ukuran 500 mL, kemudian dihomogenkan.

Pembuatan Larutan Zat Warna Metilen Biru 25 ppm. Larutan metilen biru konsentrasi 50 ppm dipipet sebanyak 10 mL kemudian tambahkan akuabides hingga tanda batas dalam labu ukur ukuran 25 mL, kemudian dihomogenkan.

Pembuatan Larutan Standar Zat Warna Metilen Biru (1; 2; 4; 8; 16) ppm. Larutan metilen biru 25 ppm dipipet sebanyak 1 mL, 2 mL, 4 mL, 8 mL, 16 mL ke dalam masing-masing 5 buah labu ukur 25 mL kemudian tambahkan akuabides hingga tanda batas dan dihomogenkan.

2.4.2 Pembuatan Karbon Aktif Cangkang kelapa sawit

Persiapan Sampel (Diharyo et al., 2020). Cangkang kelapa sawit dicuci dengan air mengalir untuk menghilangkan partikel-partikel kotor atau serabut yang melekat pada permukaan. Cangkang kelapa sawit kemudian dikeringkan di bawah sinar matahari hingga kadar airnya berkurang kemudian dipecah menjadi bagian bagian kecil lalu dihaluskan menggunakan *blender* dan diayak menggunakan ayakan ukuran 100 mesh.

Preparasi Sampel (Diharyo et al., 2020). Serbuk cangkang kelapa sawit ditimbang sebanyak 10 g dan dimasukkan kedalam botol kaca, kemudian ditambahkan dengan n-Heksana sebanyak 100 mL lalu dilakukan proses sonikasi menggunakan sonilator selama 30 menit, kemudian disaring menggunakan corong *Buchner*. Proses yang sama dilakukan dengan mengganti n-Heksana dengan etanol 95% dan akuabides. Setelah dilakukan proses sonikasi, serbuk cangkang kelapa sawit dikeringkan didalam oven pada suhu 105 °C selama 24 jam hingga diperoleh sampel kering. Hasil diberi label SCKS atau serbuk cangkang kelapa sawit, SCKS kemudian dianalisis menggunakan FTIR dan SAA.

Karbonisasi (Larasati et al., 2021). Serbuk cangkang kelapa sawit yang berukuran 100 mesh ditimbang sebanyak 7 g dan dimasukkan ke dalam reaktor hidrotermal (autoklaf) ditambahkan akuabides sebanyak 70 mL sehingga diperoleh campuran dengan rasio massa cangkang kelapa sawit:volume akuabides 1:10. Proses hidrotermal dilakukan pada temperatur 180 °C. Reaktor kemudian dipanaskan hingga temperatur yang telah ditetapkan. Setelah tercapai, temperatur reaktor dijaga konstan selama 8 jam. Karbon yang diperoleh kemudian disaring untuk dipisahkan cairannya. Setelah itu karbon dikeringkan pada temperatur 105 °C selama 24 jam untuk mendapatkan produk akhir berupa karbon (*hydrochar*) yang diberi label KCKS atau karbon cangkang kelapa sawit, KCKS kemudian dianalisis menggunakan FTIR dan SAA.

Aktivasi (Nguyen et al., 2019; Tantalu et al., 2025; Tsoutsa et al., 2023). KCKS atau *Hydrochar* kering ditimbang 1 g hasil hidrotermal karbonisasi, kemudian dimasukkan ke dalam *beaker*. Sampel tersebut direndam dalam 30 mL larutan aluminium clorida ($AlCl_3$) dengan konsentrasi 5% (b/v). Proses perendaman ini berlangsung selama 24 jam pada suhu ruang, sehingga gugus oksigen seperti -COOH, -OH, dan C=O dapat terbentuk lebih banyak pada permukaan *hydrochar*. Setelah selesai, suspensi difiltrasi dan padatan dicuci dengan akuabides. *Hydrochar* hasil oksidasi kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 105 °C selama satu malam (sekitar 24 jam) hingga benar-benar kering. Sampel kemudian di tanur pada suhu 600 °C selama 1,5 jam, setelah itu sampel dicuci dengan akuabides hingga pH netral. Sampel akhir kemudian dikeringkan kembali didalam oven dengan suhu 105 °C hingga kering. Hasil tersebut diberi label KACKS atau karbon aktif cangkang kelapa sawit, KACKS kemudian dianalisis menggunakan FTIR dan SAA.

2.4.3 Karakterisasi Material

Penentuan Kadar Air (SNI 06-3730-1995). Cawan porselin yang telah bersih dikeringkan dalam oven pada suhu 115 °C selama 2 jam. Cawan didinginkan dalam desikator selama 30 menit, kemudian cawan ditimbang bobot kosongnya. Karbon aktif sebanyak 1 g dikeringkan dalam oven pada suhu 105 °C ± 5 °C selama 3 jam. Kemudian dimasukkan ke dalam desikator, kemudian ditimbang bobot akhirnya. Ulangi sampai bobotnya tetap dan ditentukan kadar airnya dalam persen (%). Kadar karbon tetap dapat dihitung dengan menggunakan rumus pada persamaan (1)

$$\text{Kadar air (\%)} = \frac{\text{berat uap air}}{\text{berat awal sampel}} \times 100\% \quad (1)$$

Penentuan Kadar Abu (SNI 06-3730-1995). Cawan porselin yang telah bersih dikeringkan dalam oven pada suhu 115 °C selama 2 jam. Cawan didinginkan dalam desikator selama 30 menit, kemudian cawan ditimbang bobot kosongnya. Karbon cangkang kelapa sawit dimasukkan kedalam cawan tersebut dan ditimbang sebanyak 2 g. Sampel dipanaskan dalam tanur pada suhu 800 °C selama 2 jam. Selanjutnya sampel didinginkan dalam desikator, kemudian ditimbang bobot akhirnya. Ulangi sampai bobotnya tetap dan ditentukan kadar abunya dalam persen (%). Kadar karbon tetap dapat dihitung dengan menggunakan rumus pada persamaan (2)

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

Penentuan Kadar Senyawa Volatil (SNI 06-3730-1995). Cawan porselin yang telah bersih dikeringkan dalam oven pada suhu 115 °C selama 2 jam. Cawan didinginkan dalam desikator selama 30 menit, kemudian cawan ditimbang bobot kosongnya. Karbon cangkang kelapa sawit dimasukkan kedalam cawan tersebut dan ditimbang sebanyak 1 g dan dipanaskan dalam tanur pada suhu 950 °C selama 7 menit. Kemudian sampel didinginkan dalam desikator, dan timbang bobot akhirnya. Ulangi sampai bobotnya tetap dan ditentukan kadar senyawa volatilnya dalam persen (%). Kadar karbon tetap dalam sampel dihitung dengan menggunakan rumus pada persamaan (3)

$$\text{Kadar volatil (\%)} = \frac{\text{berat senyawa volatil}}{\text{berat awal sampel}} \times 100\% \quad (3)$$

Penentuan Kadar Karbon Tetap (SNI 06-3730-1995). Karbon tetap dihitung dari 100% dikurangi dengan nilai kadar abu dan kadar senyawa volatil dalam sampel. Kadar karbon tetap dalam sampel dihitung dengan menggunakan rumus pada persamaan (4)

$$\text{Karbon tetap (\%)} = 100\% - (\text{kadar abu} + \text{kadar senyawa volatil})\% \quad (4)$$

Karakterisasi Permukaan Karbon Aktif Secara Kimia melalui Metode Titrasi Boehm (Goertzen et al., 2010). Karbon aktif termodifikasi ditimbang 0,1 g dimasukkan ke dalam 4 buah gelas kimia yang berisi larutan Na_2CO_3 0,05 N,

$NaHCO_3$ 0,05 N, NaOH 0,05 N dan HCl 0,05 N masing-masing sebanyak 25 mL (Vp), kemudian campuran didiamkan selama 24 jam. Kemudian larutan disaring. Filtrat yang telah dipisahkan, masing-masing dipipet sebanyak 5 mL (Vs) dari larutan Na_2CO_3, $NaHCO_3$ dan NaOH, kemudian ditambahkan HCl 0,05 N berlebih, lalu ditirasi balik dengan menggunakan larutan NaOH 0,05 N. Sedangkan filtrat HCl dipipet sebanyak 10 mL dan ditambahkan NaOH 0,05 N berlebih, kemudian dititrasi balik dengan menggunakan HCl 0,05 N. Analisis kadar gugus fungsional asam dan basa total dapat menggunakan rumus pada persamaan di bawah ini:

$$n_{carboxylic} = \frac{[V NaHCO_3\, N NaHCO_3 - (NHCl\ VHCl - NNaOH\ VNaOH)]\ \frac{Vp}{Vs}}{w} \quad (5)$$

$$n_{lactonic} = \frac{[V Na_2CO_3\, N Na_2CO_3 - (NHCl\ VHCl - NNaOH\ VNaOH)]\ \frac{Vp}{Vs}}{w} - n_{carboxylic} \quad (6)$$

$$n_{phenolic} = \frac{[V Na_2CO_3\, N\ Na_2CO_3 - (NHCl\ VHCl - NNaOH\ VNaOH)]\ \frac{Vp}{Vs}}{w} - n_{carboxylic} - n_{lactonic} \quad (7)$$

$$n_{total\ base} = \frac{[VHCl\, NHCl - (NHCl\ VHCl - NNaOH\ VNaOH)]\ \frac{Vp}{Vs}}{w} \quad (8)$$

Titrasi Boehm mengasumsikan bahwa $NaHCO_3$ dapat menetralkan gugus karboksil, Na_2CO_3 dapat menetralkan gugus karboksil dan lakton, NaOH dapat menetralkan gugus karboksil, lakton dan fenol dan HCl dapat menetralkan gugus basa total.

2.4.4 Aplikasi Karbon Aktif sebagai Adsorpsi Metilen Biru

Penentuan Panjang Gelombang Maksimum (Khan et al., 2022). Larutan zat warna 2 ppm dibuat dari larutan induk, lalu diukur absorbansinya dengan spektrofotometer UV-Vis. Pada berbagai rentang panjang gelombang 663-665 nm yang akan memberikan absorbansi maksimum.

Penentuan pH Optimum. Karbon aktif cangkang kelapa sawit ditimbang sebanyak 0,2 g dan 25 mL larutan metilen biru 50 mg/L pada pH 5 dimasukan ke dalam labu erlenmeyer 100 mL. Pengaturan pH dilakukan dengan penambahan larutan HCl 0,1 M atau NaOH 0,1 M. Diaduk menggunakan *shaker* 130 rpm selama 30 menit dan disaring. Absorbansi filtratnya diukur dengan menggunakan Spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum. Dilakukan hal yang sama untuk pH 3, 7, 9,dan 11. Karbon aktif ditentukan luas permukaannya dengan metode adsorpsi metilen biru. Banyaknya metilen biru yang diadsorpsi sebanding dengan luas permukaan adsorben. Adsorpsi dapat dihitung menggunakan persamaan (9)

$$Q_e = \frac{(C0 - Ce) \times V}{m} \quad (9)$$

Keterangan:

Q_e = kapasitas adsorpsi (mg/g)

C_0 = konsentrasi awal adsorbat (mg/L)

C_e = konsentrasi akhir adsorbat (mg/L)
V = volume adsorbat (L)
m = massa adsorben (g)

Penentuan Waktu Kontak Optimum (Pasa et al., 2024). Karbon aktif cangkang kelapa sawit ditimbang sebanyak 0,2 g dan 25 mL larutan metilen biru 50 mg/L pada pH optimum dimasukkan ke dalam erlenmeyer 100 mL. Diaduk menggunakan *shaker* 130 rpm selama 15 menit dan disaring. Absorbansi filtratnya diukur dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum (665 nm). Dilakukan hal yang sama untuk waktu kontak 30, 45, 60, dan 75 menit. Adsorpsi dapat dihitung menggunakan persamaan (9).

Penentuan Model Isoterm (Pasa et al., 2024). Karbon aktif cangkang kelapa sawit ditimbang sebanyak 0,2 g dan 25 mL larutan metilen biru 25 mg/L pada pH optimum dimasukkan ke dalam erlenmeyer 100 mL. Diaduk menggunakan *shaker* 130 rpm selama waktu kontak optimum dan disaring. Absorbansi filtratnya diukur dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum (665 nm). Dilakukan hal yang sama untuk waktu kontak 50, 75, 100, dan 125 mg/L.

BAB III

HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Preparasi Sampel

Proses preparasi sampel diawali dengan proses pencucian cangkang kelapa sawit menggunakan air bersih untuk membersihkan kotoran dan serat-serat yang masih menempel. Selanjutnya, cangkang sawit dikeringkan dengan menjemurnya di bawah sinar matahari hingga kandungan airnya berkurang. Setelah proses pengeringan, cangkang dipotong menjadi ukuran yang lebih kecil, kemudian digiling hingga menjadi serbuk dan diayak menggunakan ayakan berukuran 100 mesh untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam. Penghalusan dan pengayakan dilakukan untuk meningkatkan luas permukaan spesifik bahan sehingga proses preparasi dan aktivasi pada tahapan berikutnya dapat berlangsung lebih efektif.

Serbuk cangkang kelapa sawit kemudian dipreparasi melalui pencucian bertahap menggunakan n-Heksana, etanol 96%, dan akuabides dengan bantuan sonikator. Setelah setiap tahap pencucian, campuran disaring menggunakan corong *Buchner* untuk memisahkan pelarut dari sampel. Penggunaan pelarut secara berurutan didasarkan pada perbedaan polaritasnya, sehingga senyawa nonpolar, semipolar, maupun polar yang terdapat pada biomassa dapat dihilangkan secara lebih efektif. Tahapan ini bertujuan menghasilkan permukaan biomassa yang lebih bersih dan meningkatkan efektivitas proses aktivasi pada tahap berikutnya. Pencucian menggunakan n-heksana dilakukan untuk menghilangkan senyawa ekstraktif nonpolar, seperti minyak, lemak, lilin, dan lipid yang masih terdapat pada cangkang kelapa sawit (Yunus et al., 2018). Selanjutnya, pencucian menggunakan etanol 96% bertujuan menghilangkan senyawa ekstraktif yang larut dalam etanol, termasuk beberapa senyawa organik polar dan semipolar yang masih tertinggal pada permukaan biomassa. Penghilangan senyawa-senyawa tersebut membantu menghasilkan permukaan biomassa yang lebih bersih sehingga proses preparasi sampel menjadi lebih optimal (Lehr et al., 2021). Tahap terakhir dilakukan pencucian menggunakan air suling (akuabides) untuk menghilangkan sisa pelarut maupun residu kimia yang masih tertinggal pada sampel.

Ultrasonikasi atau sonikasi merupakan metode preparasi sampel yang memanfaatkan gelombang ultrasonik untuk menghasilkan fenomena kavitasi, yaitu proses terbentuknya, membesarnya, dan pecahnya gelembung-gelembung mikro di dalam medium cair akibat rambatan gelombang ultrasonik. Fenomena ini mampu meningkatkan perpindahan massa, memecah aglomerasi partikel, serta meningkatkan kontak antara pelarut dan permukaan biomassa sehingga proses pencucian berlangsung lebih efektif. Pada biomassa lignoselulosa, penggunaan ultrasonikasi dapat membantu menghilangkan pengotor dan senyawa ekstraktif yang masih melekat pada permukaan biomassa sehingga diperoleh bahan yang lebih bersih sebelum proses karbonisasi dan aktivasi (Gabhane et al., 2014). Hasil preparasi dari serbuk cangkang kelapa sawit (SCKS) setelah proses pencucian, pengeringan, penghalusan, pengayakan, dan sonikasi dapat dilihat pada **Gambar 4.**

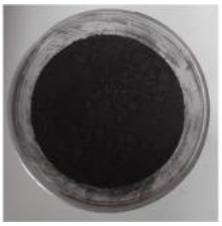


Gambar 4. Serbuk cangkang kelapa sawit

3.2 Karbonisasi

Karbonisasi hidrotermal atau *Hydrothermal Carbonization* (HTC) merupakan salah satu metode perlakuan termokimia yang berpotensi mengonversi biomassa menjadi bahan bakar padat maupun material karbon bernilai tambah secara ekonomis. Proses ini berlangsung dalam media air pada suhu sedang, umumnya berkisar antara 180-260°C, dengan tekanan jenuh atau tekanan autogenik sekitar 2-10 MPa, sehingga air tetap berada dalam fase cair selama reaksi berlangsung. Waktu reaksi bervariasi dari beberapa menit hingga beberapa jam dalam kondisi terbatas oksigen atau tanpa oksigen sama sekali (Pauline dan Joseph, 2020; Shiyu et al., 2023). Kondisi tersebut memungkinkan terjadinya berbagai reaksi, seperti hidrolisis, dehidrasi, dekarboksilasi, polimerisasi, dan aromatisasi yang menghasilkan padatan kaya karbon (*hydrochar*) (Shiyu et al., 2023).

Salah satu keunggulan utama proses HTC adalah kemampuannya mengolah biomassa dengan kadar air yang tinggi tanpa memerlukan tahap pengeringan terlebih dahulu. Kehadiran air tidak hanya berfungsi sebagai media reaksi, tetapi juga sebagai reaktan yang mendukung transformasi biomassa menjadi *hydrochar*, sehingga kebutuhan energi untuk proses pengeringan dapat dihindari. Namun demikian, proses HTC konvensional umumnya menggunakan pemanasan secara konveksi dan konduksi yang memerlukan waktu lebih lama untuk mencapai suhu reaksi akibat hambatan perpindahan panas. Selain itu, kapasitas panas air yang tinggi menyebabkan sebagian besar energi digunakan untuk memanaskan media reaksi, sehingga efisiensi pemanasan dan laju kinetika reaksi menjadi lebih rendah dibandingkan metode pemanasan alternatif (Pauline dan Joseph, 2020). Hasil dari proses HTC dapat dilihat pada **Gambar 5.**

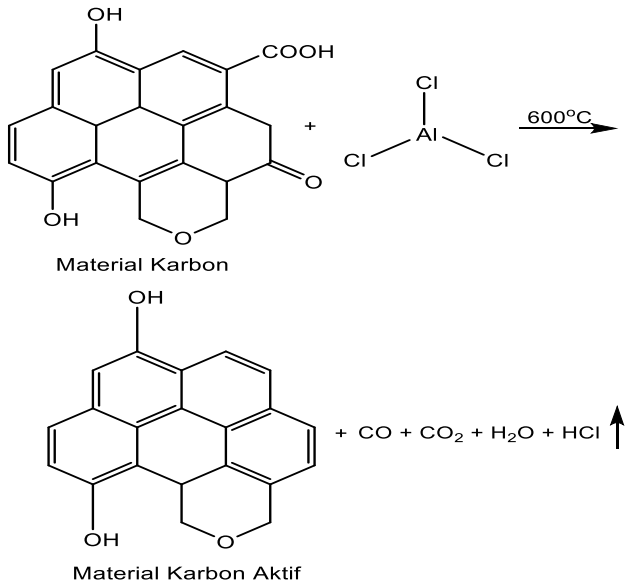


Gambar 5. Karbon cangkang kelapa sawit

3.3 Aktivasi

Karbon cangkang kelapa sawit yang dihasilkan dari proses HTC kemudian diaktivasi untuk menghasilkan karbon aktif cangkang kelapa sawit. Karbon aktif merupakan

material karbon berpori yang memiliki luas permukaan yang tinggi serta struktur pori yang berkembang, sehingga banyak dimanfaatkan sebagai adsorben untuk menghilangkan berbagai polutan, seperti senyawa organik, zat warna, dan ion logam dari air limbah. Kemampuan adsorpsi karbon aktif dipengaruhi oleh luas permukaan, volume pori, distribusi ukuran pori, serta keberadaan gugus fungsi pada permukaannya. Oleh karena itu, proses aktivasi diperlukan untuk meningkatkan karakteristik tersebut sehingga diperoleh karbon aktif dengan kapasitas adsorpsi yang lebih baik (Wang et al., 2024).



Gambar 6. Reaksi aktivasi karbon dengan $AlCl_3$

Salah satu metode yang digunakan untuk meningkatkan kualitas karbon aktif adalah aktivasi kimia menggunakan asam Lewis. Asam Lewis bekerja sebagai akseptor pasangan elektron yang mampu mengkatalisis reaksi dehidrasi, pemutusan ikatan tertentu, serta aromatisasi selama proses aktivasi. Reaksi tersebut mendorong pembentukan dan pengembangan struktur pori, menghilangkan pengotor yang menutupi permukaan karbon, serta meningkatkan luas permukaan spesifik. Dengan demikian, karbon aktif yang dihasilkan memiliki struktur pori yang lebih berkembang dan kapasitas adsorpsi yang lebih baik (Saka dan Balbay, 2021).



Gambar 7. Karbon cangkang kelapa sawit

3.4 Analisis Proksimat

Karbon aktif cangkang kelapa sawit (KACKS) dikarakterisasi melalu analisis proksimat untuk kadar air, kadar abu, kadar zat volatil, dan kadar karbon tetap. Hasil yang diperoleh dapat dilihat pada **Tabel 1.**

Tabel 1. Hasil analisis proksimat

Parameter	Persyaratan SNI 06-3730-1995 (%)	Hasil KACKS (%)
Kadar Air	<15	2,8424
Kadar Abu	<10	3,5648
Kadar Volatil	<25	9,2595
Kadar Karbon Tetap	>65	87,1757

Analisis proksimat merupakan metode yang digunakan untuk mengetahui karakteristik dasar karbon aktif melalui penentuan kadar air, kadar abu, kadar zat mudah menguap (*volatile matter*), dan kadar karbon tetap (*fixed carbon*). Keempat parameter tersebut penting dalam mengevaluasi kualitas karbon aktif karena berkaitan dengan kemurnian, stabilitas termal, struktur karbon, serta potensi material sebagai adsorben. Selain itu, analisis proksimat juga memberikan gambaran mengenai karakteristik termal material karbon yang dihasilkan (Galaraga et al., 2024). Berdasarkan hasil analisis proksimat, karbon aktif cangkang kelapa sawit (KACKS) memiliki kadar air sebesar 2,8494%, kadar abu 3,5648%, kadar zat mudah menguap sebesar 9,2595%, dan kadar karbon tetap sebesar 87,1757%.

Kadar air karbon aktif yang diperoleh sebesar 2,8494%, nilai ini berada jauh di bawah batas maksimum SNI 06-3730-1995 yaitu 15%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa karbon aktif memiliki kandungan air yang rendah sehingga sebagian besar pori-porinya tidak tertutupi oleh molekul air. Rendahnya kadar air mengindikasikan bahwa proses pengeringan setelah pencucian berlangsung dengan baik. Selain itu, proses aktivasi menggunakan $AlCl_3$ yang diikuti pencucian dan pengeringan diduga berkontribusi terhadap rendahnya kadar air yang diperoleh. Kondisi ini menguntungkan karena pori-pori karbon aktif menjadi lebih tersedia untuk berinteraksi dengan adsorbat sehingga dapat meningkatkan kapasitas adsorpsinya. Menurut Galaraga et al., (2024), kadar air merupakan jumlah air yang terdapat dalam biomassa. Selain itu, kadar air juga memengaruhi proses penyimpanan biomassa, di mana biomassa dengan kadar air tinggi lebih mudah mengalami degradasi serta membutuhkan energi yang lebih besar pada proses pengolahan (Neme et al., 2022). Oleh karena itu, rendahnya kadar air pada penelitian ini menunjukkan bahwa karbon aktif yang dihasilkan memiliki kualitas yang baik, stabil selama penyimpanan, serta berpotensi memberikan kinerja adsorpsi yang lebih optimal.

Kadar abu karbon aktif yang diperoleh sebesar 3,5648%, kadar ini memenuhi SNI 06-3730-1995 dengan batas maksimum 10%. Menurut Neme et al., (2022) abu merupakan residu anorganik yang tersisa setelah biomassa mengalami pembakaran sempurna. Kandungan abu yang rendah menunjukkan bahwa sebagian besar

komponen organik telah terdekomposisi selama proses karbonisasi, sedangkan sisa mineral anorganik yang tertinggal relatif sedikit. Rendahnya kadar abu juga menguntungkan karena dapat mengurangi penyumbatan pori karbon aktif sehingga luas permukaan adsorben tetap optimal. Hal ini menunjukkan bahwa proses karbonisasi dan aktivasi yang dilakukan mampu menghasilkan karbon aktif dengan kandungan mineral anorganik yang relatif rendah.

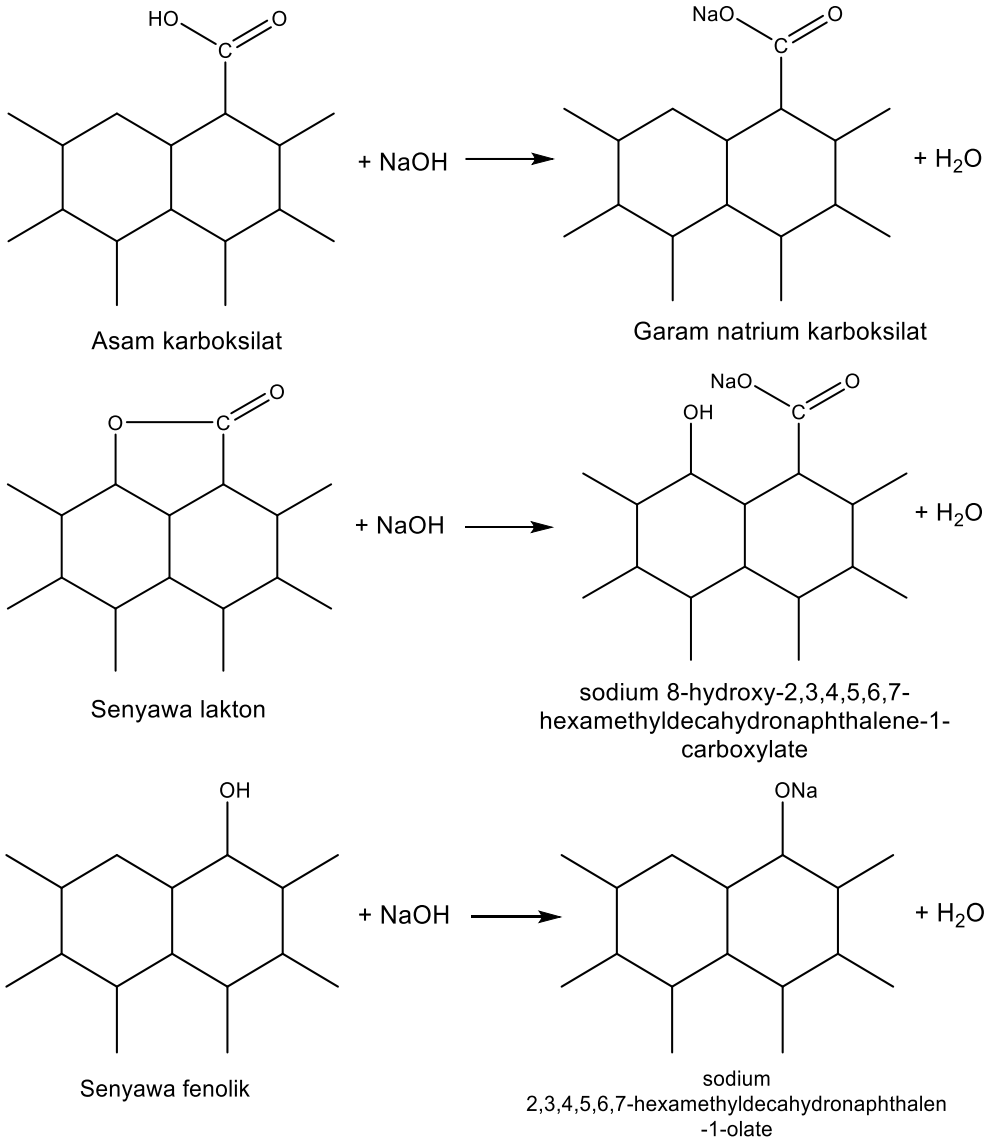
Kadar zat volatil (*volatile matter*) yang diperoleh sebesar 9,2595% menunjukkan bahwa sebagian besar senyawa organik yang mudah menguap telah terdekomposisi selama proses karbonisasi. Nilai tersebut juga berada di bawah batas maksimum SNI 06-3730-1995, yaitu sebesar 25%, sehingga menunjukkan bahwa karbon aktif yang dihasilkan memenuhi persyaratan mutu berdasarkan parameter kadar zat volatil. Zat volatil merupakan senyawa yang terdiri atas gas, uap organik, hidrokarbon ringan, dan senyawa lain yang terlepas ketika material dipanaskan pada suhu tinggi. Berdasarkan penelitian Neme et al., (2022) dijelaskan bahwa kandungan *volatile matter* dipengaruhi oleh jenis biomassa, suhu karbonisasi, suhu aktivasi, serta laju pemanasan. Semakin tinggi suhu karbonisasi, semakin banyak senyawa volatil yang terdekomposisi sehingga kadar *volatile matter* menjadi lebih rendah.

Kadar karbon tetap (*fixed carbon*) yang diperoleh sebesar 87,1757% merupakan fraksi terbesar pada hasil analisis proksimat. Menurut Neme et al., (2022), karbon tetap adalah karbon padat yang tersisa setelah kadar air, kadar abu, dan zat mudah menguap dikurangi. Penjelasan serupa juga disampaikan oleh Aydemir et al., (2023) bahwa karbon tetap merupakan residu padat yang masih dapat terbakar setelah seluruh uap air, gas, dan senyawa volatil dihilangkan dari biomassa. Tingginya kadar karbon tetap menunjukkan bahwa proses karbonisasi dan aktivasi menghasilkan material yang didominasi oleh fraksi karbon sehingga struktur karbon menjadi lebih stabil. Karbon tetap yang tinggi juga menunjukkan bahwa karbon aktif memiliki potensi adsorpsi yang baik karena didominasi oleh struktur karbon. Secara keseluruhan, hasil analisis proksimat menunjukkan bahwa karbon aktif hasil aktivasi menggunakan $AlCl_3$ memiliki karakteristik yang baik, ditandai dengan kadar air, kadar abu, dan kadar zat volatil yang rendah serta kadar karbon tetap yang tinggi. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa proses karbonisasi dan aktivasi telah berlangsung secara efektif sehingga menghasilkan karbon aktif dengan kualitas yang baik dan berpotensi memiliki kemampuan adsorpsi yang tinggi.

3.5 Titrasi Boehm

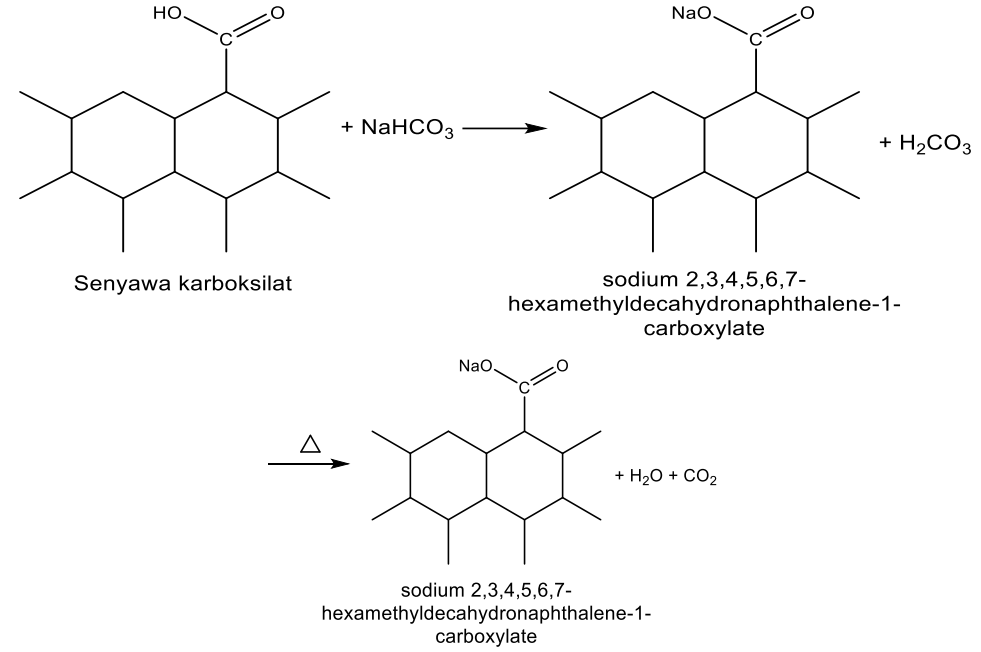
Karakteristik kimia permukaan karbon aktif berbasis cangkang kelapa sawit dianalisis menggunakan metode titrasi Boehm untuk mengetahui perubahan gugus fungsi permukaan akibat proses karbonisasi dan aktivasi menggunakan $AlCl_3$. Analisis difokuskan pada penentuan gugus fungsi oksigen yang meliputi gugus karboksil, lakton, fenol, serta gugus basa. Pengujian dilakukan terhadap tiga jenis sampel, yaitu serbuk cangkang kelapa sawit (SCKS), karbon cangkang kelapa sawit (KCKS), dan karbon aktif cangkang kelapa sawit hasil aktivasi $AlCl_3$ (KACKS).

Reaksi penetralan dengan NaOH



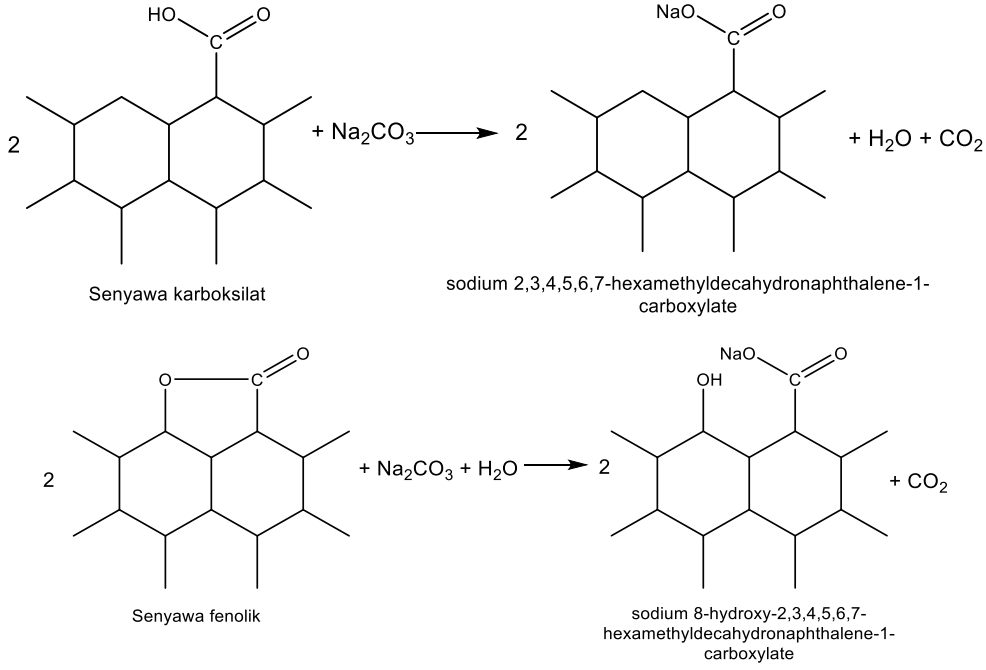
Gambar 8. Reaksi penetralan dengan NaOH

Reaksi penetralan dengan $NaHCO_3$



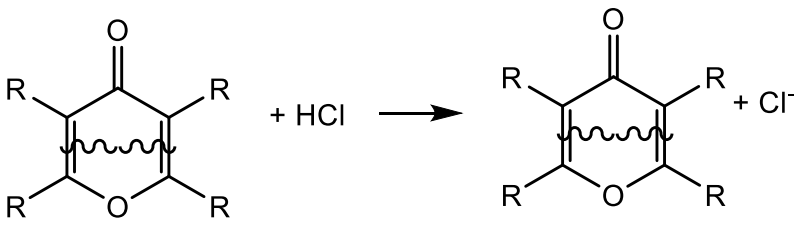
Gambar 9. Reaksi penetralan dengan $NaHCO_3$

Reaksi penetralan dengan Na_2CO_3



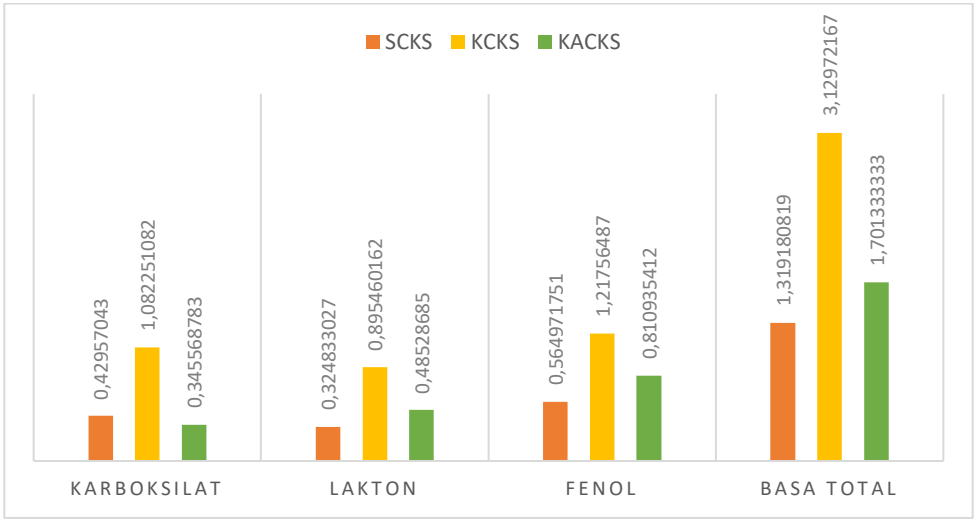
Gambar 10. Reaksi penetralan dengan Na_2CO_3

Reaksi penetralan dengan HCl



Senyawa basa

Gambar 11. Reaksi penetralan dengan HCl



Gambar 12. Titrasi Boehm pada sampel SCKS, KCKS, dan KACKS

Berdasarkan hasil pengujian pada **Gambar 12**, diketahui bahwa kandungan gugus fungsi mengalami perubahan pada setiap tahapan proses, mulai dari serbuk cangkang kelapa sawit (SCKS), karbon hasil karbonisasi (KCKS), hingga karbon aktif hasil aktivasi menggunakan $AlCl_3$ (KACKS). Nilai gugus karboksilat meningkat dari 0,4296 meq/g pada SCKS menjadi 1,0823 meq/g pada KCKS, kemudian menurun menjadi 0,3456 meq/g setelah aktivasi menggunakan $AlCl_3$. Peningkatan pada KCKS menunjukkan bahwa proses karbonisasi menghasilkan permukaan karbon yang masih mengandung gugus oksigen akibat dekomposisi hemiselulosa, selulosa, dan lignin. Namun, setelah proses aktivasi, kandungan gugus karboksilat menurun karena sebagian gugus tersebut mengalami dehidrasi dan dekarboksilasi sehingga membentuk struktur karbon yang lebih terkondensasi. Sebagai asam Lewis, $AlCl_3$ dapat menerima pasangan elektron dari atom oksigen sehingga mempermudah pelepasan gugus yang mengandung oksigen selama proses aktivasi. Hasil ini sejalan dengan penelitian Giraldo et al. (2020) yang menjelaskan bahwa perlakuan kimia pada karbon aktif dapat menyebabkan perubahan jumlah gugus oksigen di

permukaan akibat reaksi kimia yang terjadi selama proses modifikasi, sehingga sifat asam permukaan karbon turut berubah.

Kandungan gugus lakton meningkat dari 0,3248 meq/g pada SCKS menjadi 0,5845 meq/g pada KCKS, kemudian sedikit menurun menjadi 0,4583 meq/g pada KACKS. Penurunan tersebut mengindikasikan bahwa sebagian gugus lakton mengalami transformasi selama aktivasi menggunakan $AlCl_3$. Aktivasi kimia tidak hanya membentuk pori-pori baru, tetapi juga mengubah komposisi gugus fungsi permukaan melalui reaksi dehidrasi dan restrukturisasi karbon. Walaupun demikian, keberadaan gugus lakton yang masih cukup tinggi menunjukkan bahwa permukaan karbon aktif tetap memiliki sifat polar yang dapat mendukung interaksi dengan molekul adsorbat. Menurut Pam et al., (2022), aktivasi kimia mampu mengembangkan struktur pori sekaligus memodifikasi kimia permukaan karbon melalui perubahan distribusi gugus fungsi yang mengandung oksigen.

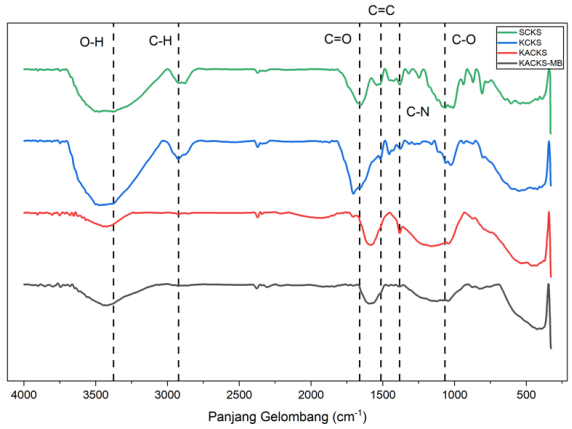
Jumlah gugus fenol mengalami peningkatan dari 0,5649 meq/g pada SCKS menjadi 1,2176 meq/g pada KCKS, kemudian menurun menjadi 0,8194 meq/g setelah proses aktivasi. Penurunan ini menunjukkan bahwa sebagian gugus hidroksil fenolik mengalami kondensasi menjadi struktur aromatik yang lebih stabil selama proses aktivasi. Reaksi tersebut menyebabkan permukaan karbon menjadi lebih terkarbonisasi sehingga jumlah gugus oksigen berkurang, tetapi kestabilan struktur karbon semakin meningkat. Hasil ini sesuai dengan penelitian dari Xu et al., (2022) yang melaporkan bahwa perlakuan kimia pada karbon aktif dapat mengubah distribusi gugus oksigen permukaan sehingga memengaruhi sifat adsorpsi material terhadap berbagai molekul.

Nilai basa total menunjukkan kecenderungan yang sama, yaitu meningkat dari 1,3192 meq/g pada SCKS menjadi 3,1297 meq/gpada KCKS, kemudian menurun menjadi 1,7013 meq/g pada KACKS. Penurunan basa total setelah aktivasi mengindikasikan bahwa proses aktivasi menggunakan $AlCl_3$ menyebabkan restrukturisasi permukaan karbon melalui pembentukan struktur aromatik yang lebih stabil. Meskipun demikian, nilai basa total pada KACKS masih lebih tinggi dibandingkan SCKS, menunjukkan bahwa karbon aktif hasil aktivasi masih memiliki situs aktif yang dapat berinteraksi dengan adsorbat. Menurut Thue et al., (2021), perubahan gugus fungsi permukaan akibat aktivasi kimia sangat memengaruhi sifat adsorpsi karbon aktif karena menentukan jumlah situs aktif yang tersedia pada permukaan adsorben.

Secara keseluruhan, hasil titrasi Boehm menunjukkan bahwa proses karbonisasi meningkatkan jumlah gugus fungsi oksigen pada permukaan karbon, sedangkan aktivasi menggunakan $AlCl_3$ menyebabkan sebagian gugus fungsi tersebut berkurang akibat terjadinya dehidrasi, dekarboksilasi, dan kondensasi struktur karbon. Penurunan gugus oksigen setelah aktivasi mengindikasikan terbentuknya struktur karbon yang lebih stabil dan lebih aromatik, yang merupakan salah satu karakteristik karbon aktif hasil aktivasi kimia. Meskipun beberapa gugus fungsi mengalami penurunan, keberadaan gugus lakton, fenol, dan basa total pada KACKS menunjukkan bahwa karbon aktif masih memiliki situs aktif yang berpotensi mendukung proses adsorpsi.

3.6 Analisis FTIR

Karakterisasi menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat pada serbuk cangkang kelapa sawit (SCKS), karbon cangkang kelapa sawit (KCKS), karbon aktif cangkang kelapa sawit (KACKS), serta karbon aktif setelah proses adsorpsi metilen biru (KACKS-MB). Perubahan bilangan gelombang yang diperoleh menunjukkan bahwa proses karbonisasi, aktivasi menggunakan $AlCl_3$, dan adsorpsi metilen biru memengaruhi komposisi gugus fungsi pada permukaan adsorben.



Gambar 13. Spektrum FTIR dari sampel SCKS, KCKS, KACKS, dan KACKS + MB

Tabel 2. Hasil FTIR

Gugus Fungsi	Bilangan Gelombang (cm^{-1})				
	SCKS	KCKS	KACKS	KACKS-MB	Metilen Biru (Ovchinnikov et al., 2016)
O-H	3377,36	3473,80	3423,65	3419,79	**3376**
C=O	1653,00	1707,07	1707,00	1705,07	-
C=C	1543,05	1516,05	1585,49	1591,27	1594
C-O	1089,78	1060,85	1041,56	1043,49	-
C-N	-	-	-	1384,89	1336
C-H	2918,30	2924,09	2924,09	2924,09	2956

Berdasarkan **Tabel 2**, pita serapan pada daerah 3377,86-3473,80 cm^{-1} diidentifikasi sebagai vibrasi ulur gugus hidroksil (O-H). Gugus ini masih terdeteksi pada seluruh sampel, yaitu SCKS (3377,36 cm^{-1}), KCKS (3473,80 cm^{-1}), KACKS (3423,65 cm^{-1}), dan KACKS-MB (3419,79 cm^{-1}). Pergeseran bilangan gelombang dari KCKS menjadi KACKS menunjukkan bahwa proses aktivasi menggunakan $AlCl_3$ mengubah lingkungan kimia gugus hidroksil pada permukaan karbon. Sebagai asam Lewis, $AlCl_3$ berinteraksi dengan atom oksigen dari gugus yang mengandung oksigen

sehingga mendorong reorganisasi struktur permukaan karbon tanpa menghilangkan seluruh gugus oksigen. Setelah proses adsorpsi, pita O-H kembali bergeser menjadi 3419,79 cm^{-1} yang menunjukkan bahwa gugus hidroksil berpartisipasi dalam interaksi dengan molekul metilen biru melalui pembentukan ikatan hidrogen. Hasil ini sejalan dengan penelitian Hashem et al. (2024) yang melaporkan pita O-H karbon aktif pada kisaran 3414-3446 cm^{-1} dan menyatakan bahwa gugus hidroksil merupakan salah satu situs aktif yang berkontribusi terhadap proses adsorpsi zat warna. Hal ini juga dilaporkan oleh McCaffrey et al., (2024) bahwa gugus O-H tetap dipertahankan setelah proses aktivasi karbon aktif berbahan biomassa dan berkontribusi terhadap peningkatan sifat hidrofilik serta interaksi adsorben dengan zat warna. Oleh karena itu, keberadaan gugus hidroksil pada karbon aktif hasil aktivasi $AlCl_3$ menunjukkan bahwa aktivasi tidak hanya mengembangkan pori tetapi juga mempertahankan gugus oksigen yang berperan dalam meningkatkan kemampuan adsorpsi.

Pita serapan pada daerah 1653,00-1707,07 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus karbonil (C=O). Pergeseran dari 1653,00 cm^{-1} pada SCKS menjadi 1707,07 cm^{-1} pada KCKS menunjukkan bahwa proses karbonisasi meningkatkan pembentukan struktur karbon yang lebih stabil melalui reaksi dehidrasi dan aromatisasi. Setelah aktivasi menggunakan $AlCl_3$, pita karbonil tetap berada pada 1707,00 cm^{-1}, sedangkan setelah adsorpsi sedikit bergeser menjadi 1705,07 cm^{-1}. Pergeseran tersebut menunjukkan bahwa gugus karbonil masih tersedia sebagai situs aktif dan berinteraksi dengan molekul metilen biru selama proses adsorpsi. Gugus karbonil diketahui mampu membentuk ikatan hidrogen maupun gaya tarik elektrostatik dengan molekul zat warna sehingga meningkatkan afinitas adsorben. Temuan ini sesuai dengan Hashem et al., (2024) yang menyatakan bahwa gugus karbonil dan gugus oksigen lainnya merupakan pusat adsorpsi penting pada karbon aktif. Selain itu, pada aktivasi menggunakan $AlCl_3$, ion Al^{3+} sebagai asam Lewis dapat berinteraksi dengan gugus yang mengandung oksigen selama proses aktivasi sehingga memfasilitasi pembentukan struktur karbon yang lebih aromatik dan kaya situs aktif. Hal ini menjelaskan mengapa pita karbonil masih terdeteksi setelah proses aktivasi dan tetap berkontribusi terhadap mekanisme adsorpsi.

Pita serapan pada daerah 1516,05-1591,27 cm^{-1} menunjukkan vibrasi ulur ikatan rangkap karbon (C=C) pada struktur aromatik. Nilai bilangan gelombang mengalami perubahan dari 1543,05 cm^{-1} pada SCKS menjadi 1516,05 cm^{-1} pada KCKS, kemudian meningkat menjadi 1585,49 cm^{-1} setelah aktivasi dan 1591,27 cm^{-1} setelah adsorpsi metilen biru. Pergeseran tersebut menunjukkan bahwa karbonisasi dan aktivasi meningkatkan pembentukan struktur aromatik yang lebih teratur. Setelah adsorpsi, peningkatan bilangan gelombang mengindikasikan adanya interaksi antara cincin aromatik karbon aktif dan cincin aromatik metilen biru melalui mekanisme π-π interaction. Mekanisme ini merupakan salah satu gaya tarik utama pada adsorpsi zat warna aromatik. Hasil penelitian Hashem et al. (2024) menunjukkan bahwa adsorpsi metilen biru pada karbon aktif berlangsung melalui kombinasi interaksi π-π, ikatan hidrogen, dan gaya elektrostatik. Penjelasan tersebut diperkuat oleh penelitian

Ovchinnikov et al. (2016) yang menjelaskan bahwa molekul metilen biru memiliki sistem cincin aromatik terkonjugasi sehingga mudah berinteraksi dengan permukaan karbon yang kaya elektron π. Dengan demikian, perubahan pita C=C setelah adsorpsi menunjukkan adanya interaksi langsung antara permukaan karbon aktif dan molekul metilen biru.

Pita serapan pada daerah 1041,56-1089,78 cm^{-1} diidentifikasi sebagai vibrasi ulur gugus C-O dari alkohol, eter, maupun fenol. Bilangan gelombang mengalami pergeseran dari 1089,78 cm^{-1} pada SCKS menjadi 1060,85 cm^{-1} pada KCKS, kemudian 1041,56 cm^{-1} pada KACKS dan 1043,49 cm^{-1} setelah adsorpsi metilen biru. Pergeseran ini menunjukkan bahwa proses karbonisasi dan aktivasi menyebabkan perubahan struktur gugus oksigen pada permukaan karbon. Menurut Hashem et al., (2024), pita C-O pada karbon aktif umumnya berada pada kisaran 1034-1116 cm^{-1} dan berhubungan dengan gugus alkohol yang berfungsi sebagai situs adsorpsi. Sementara itu, McCaffrey et al., (2024) juga melaporkan bahwa gugus C-O tetap teridentifikasi setelah proses aktivasi karbon aktif dari biomassa, yang menunjukkan bahwa gugus oksigen tidak sepenuhnya hilang selama aktivasi dan tetap berperan dalam meningkatkan interaksi antara adsorben dengan metilen biru. Oleh karena itu, perubahan pita C-O pada penelitian ini menunjukkan bahwa aktivasi menggunakan $AlCl_3$ berhasil mempertahankan gugus fungsi polar yang mendukung proses adsorpsi.

Hasil FTIR menunjukkan munculnya pita baru pada 1384,89 cm^{-1} yang diidentifikasi sebagai gugus C-N pada sampel KACKS-MB, sedangkan pita tersebut tidak ditemukan pada SCKS, KCKS maupun KACKS. Kemunculan pita ini menunjukkan bahwa molekul metilen biru telah berhasil teradsorpsi pada permukaan karbon aktif. Menurut Ovchinnikov et al. (2016), molekul metilen biru memiliki pita karakteristik yang berasal dari gugus dimetilamina (C-N) serta struktur aromatiknya sehingga keberadaan pita tersebut dapat digunakan sebagai indikator keberhasilan adsorpsi metilen biru. Selain itu, Hashem et al., (2024) juga melaporkan bahwa setelah adsorpsi terjadi perubahan spektrum FTIR akibat keterlibatan gugus fungsi permukaan karbon aktif dengan molekul metilen biru. Oleh karena itu, munculnya pita 1384,89 cm^{-1} pada penelitian ini menjadi bukti bahwa molekul metilen biru telah berinteraksi dengan permukaan karbon aktif hasil aktivasi $AlCl_3$.

Pita serapan pada daerah 2918,30-2924,09 cm^{-1} diidentifikasi sebagai vibrasi dari gugus C-H alifatik yang berasal dari gugus metil ($-CH_3$) dan metilen ($-CH_2$). Pada penelitian ini, pita C-H teramati pada seluruh sampel, yaitu 2918,30 cm^{-1} pada SCKS serta 2924,09 cm^{-1} pada KCKS, KACKS, dan KACKS-MB. Pergeseran bilangan gelombang dari SCKS menuju KCKS menunjukkan bahwa proses karbonisasi menyebabkan perubahan lingkungan kimia senyawa organik penyusun biomassa, seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin, akibat terjadinya dekomposisi termal dan pembentukan struktur karbon yang lebih stabil. Tidak adanya perubahan bilangan gelombang yang signifikan antara KCKS, KACKS, dan KACKS-MB menunjukkan bahwa gugus C-H relatif tidak terlibat secara langsung dalam proses aktivasi menggunakan $AlCl_3$ maupun selama adsorpsi metilen biru. Hal ini mengindikasikan

bahwa mekanisme adsorpsi lebih didominasi oleh gugus fungsi yang mengandung oksigen, seperti O-H, C=O, dan C-O, serta interaksi pada struktur aromatik karbon dibandingkan oleh gugus C-H. Hasil ini sejalan dengan penelitianyang dilakukan oleh McCaffrey et al., (2024) bahwa pita CH pada karbon aktif berbasis biomassa tetap terdeteksi setelah proses karbonisasi dan aktivasi, namun tidak mengalami perubahan yang berarti dibandingkan gugus fungsi oksigen yang lebih aktif dalam proses adsorpsi. Selain itu, Hashem et al., (2024) juga menunjukkan bahwa mekanisme adsorpsi metilen biru lebih dipengaruhi oleh keberadaan gugus oksigen permukaan dan interaksi π-π daripada gugus C-H alifatik.

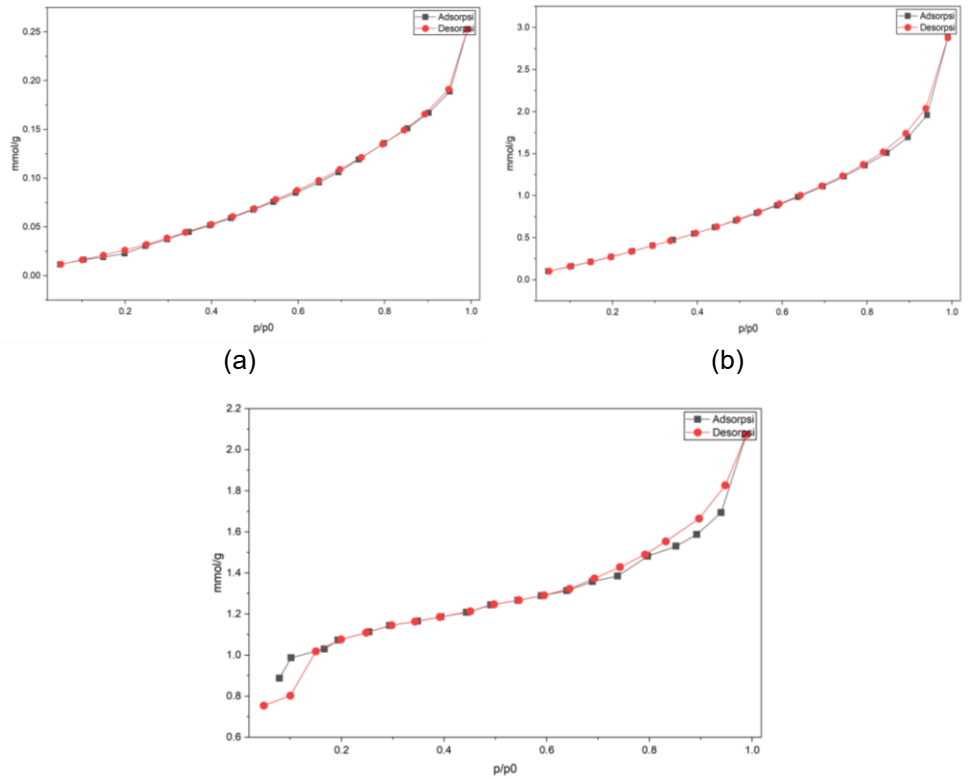
Secara keseluruhan, hasil FTIR menunjukkan bahwa proses karbonisasi dan aktivasi menggunakan $AlCl_3$ berhasil menghasilkan karbon aktif yang masih mempertahankan gugus fungsi O-H, C=O, C=C, dan C-O sebagai situs aktif adsorpsi. Pergeseran beberapa pita serapan setelah adsorpsi serta munculnya gugus C-N menunjukkan bahwa molekul metilen biru berhasil berinteraksi dengan permukaan karbon aktif. Berdasarkan perubahan spektrum FTIR dan didukung oleh penelitian Hashem et al., (2024), McCaffrey et al. (2024), serta Azzouni et al. (2023), mekanisme adsorpsi metilen biru pada karbon aktif diperkirakan berlangsung melalui kombinasi interaksi π-π antara struktur aromatik karbon dan metilen biru, ikatan hidrogen yang melibatkan gugus O-H dan C=O, serta gaya elektrostatik antara gugus fungsi permukaan karbon dengan zat warna kationik. Mekanisme tersebut menjelaskan tingginya afinitas karbon aktif hasil aktivasi $AlCl_3$ terhadap metilen biru serta mengonfirmasi bahwa gugus fungsi oksigen pada permukaan karbon memiliki peranan penting dalam proses adsorpsi.

3.7 Analisis SAA

Karakterisasi luas permukaan dan porositas material dilakukan menggunakan metode BET dengan instrumen *surface area analyzer* (SAA). Hasil analisis terhadap tiga sampel yaitu serbuk cangkang kelapa sawit (SCKS), karbon cangkang kelapa sawit (KCKS), dan karbon aktif cangkang kelapa sawit (KACKS), menunjukkan perbedaan pada parameter tekstural sebagaimana dapat dilihat pada **Tabel 3.**

Tabel 3. Hasil karakterisasi dengan SAA

Parameter	SCKS	KCKS	KACKS
Surface area (m^2/g)	3.7064	45.1864	78.7563
Total pore volume (cm^3/g)	0.00868	0.09959	0.07190
Average pore diameter (nm)	9.3660	8.81468	3.65202



Gambar 14. Grafik isoterm (a) SCKS; (b) KCKS; (c) KACKS $AlCl_3$ 5%

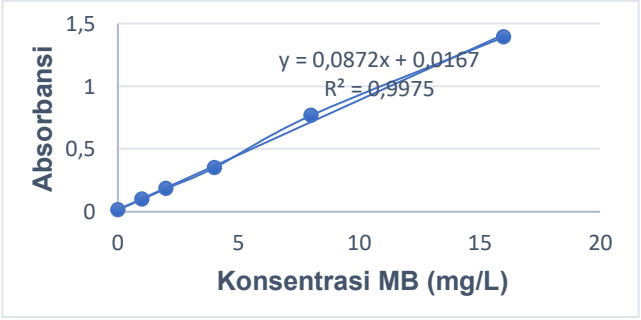
Karakterisasi menggunakan SAA dilakukan untuk mengetahui perubahan sifat tekstur karbon meliputi luas permukaan spesifik, volume total pori, serta diameter rata-rata pori setelah proses karbonisasi dan aktivasi menggunakan $AlCl_3$ 5%. Berdasarkan hasil karakterisasi pada **Tabel 3**, luas permukaan spesifik meningkat dari 3,7064 m²/g pada sampel SCKS menjadi 45,1864 m²/g pada sampel KCKS, kemudian kembali meningkat menjadi 78,7563 m²/g pada sampel KACKS. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa proses karbonisasi dan aktivasi kimia mampu mengembangkan struktur pori karbon sehingga menghasilkan luas permukaan yang lebih besar. Peningkatan luas permukaan menunjukkan bahwa proses karbonisasi dan aktivasi berkontribusi terhadap perkembangan struktur pori karbon. Perkembangan struktur pori tersebut menyebabkan area permukaan yang dapat diakses oleh molekul adsorbat menjadi lebih besar sehingga luas permukaan spesifik meningkat. Hasil ini sejalan dengan Karume et al., (2023) yang menyatakan bahwa proses karbonisasi dan aktivasi berperan penting dalam mengembangkan struktur pori serta meningkatkan luas permukaan karbon aktif, sehingga memperbaiki karakteristik adsorben.

Selain luas permukaan, volume pori total meningkat dari 0,00868 cm³/g pada SCKS menjadi 0,09959 cm³/g pada KCKS, kemudian sedikit menurun menjadi

0,07190 cm^3/g pada KACKS. Penurunan volume pori setelah aktivasi dapat disebabkan oleh terbentuknya pori-pori yang lebih kecil atau sebagian pori besar mengalami penyempitan akibat restrukturisasi dinding karbon selama proses aktivasi. Meskipun demikian, luas permukaan tetap meningkat karena jumlah pori halus yang terbentuk semakin banyak. Fenomena ini menunjukkan bahwa peningkatan luas permukaan tidak selalu diikuti oleh peningkatan volume pori, melainkan juga dipengaruhi oleh distribusi ukuran pori. Diameter pori rata-rata mengalami penurunan dari 9,3660 nm pada SCKS menjadi 8,81468 nm pada KCKS dan selanjutnya menjadi 3,65202 nm pada KACKS. Berdasarkan klasifikasi IUPAC, ukuran pori tersebut termasuk dalam kategori mesopori (2-50 nm). Penurunan diameter pori menunjukkan bahwa aktivasi $AlCl_3$ tidak hanya membentuk pori baru, tetapi juga memperbanyak pori berukuran lebih kecil sehingga luas permukaan meningkat. Semakin kecil ukuran pori dengan jumlah pori yang lebih banyak akan menghasilkan area kontak adsorben yang semakin besar. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Allwar et al., (2021) dimana peningkatan luas permukaan karbon aktif memberikan lebih banyak situs aktif yang berperan dalam proses adsorpsi karena jumlah pori yang tersedia semakin besar. Selain itu penelitian, Zaini et al., (2022) menyatakan bahwa karbon aktif dengan luas permukaan yang tinggi memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih baik karena menyediakan lebih banyak lokasi adsorpsi pada permukaannya.

3.8 Aplikasi Adsorpsi Metilen Biru

Kurva kalibrasi metilen biru merupakan tahapan penting dalam analisis adsorpsi menggunakan spektrofotometri UV-Vis karena digunakan sebagai acuan untuk menentukan konsentrasi larutan sampel berdasarkan nilai absorbansinya. Kurva ini dibuat dari serangkaian larutan standar metilen biru dengan konsentrasi tertentu, kemudian masing-masing diukur absorbansinya pada panjang gelombang maksimum sehingga diperoleh hubungan antara konsentrasi dan absorbansi.



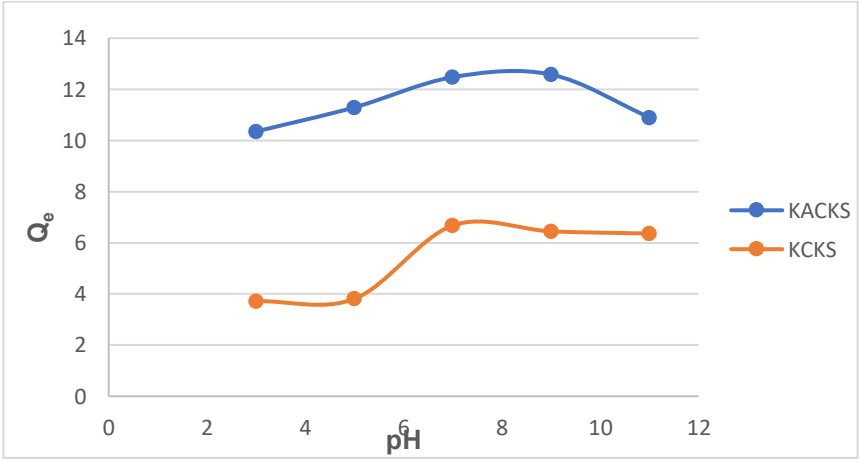
Gambar 15. Kurva kalibrasi larutan metilen biru

Berdasarkan hasil pengukuran yang ditunjukkan pada **Gambar 15**, diperoleh persamaan regresi linier y = 0,0872x + 0,0167 dengan nilai koefisien determinasi (R^2)

sebesar 0,9975. Nilai R^2 yang mendekati satu menunjukkan bahwa hubungan antara konsentrasi metilen biru dan absorbansi bersifat sangat linier, sehingga persamaan regresi yang diperoleh memiliki tingkat ketelitian yang tinggi untuk digunakan dalam menghitung konsentrasi larutan setelah proses adsorpsi. Nilai intersep sebesar 0,0167 menunjukkan adanya absorbansi dasar yang relatif kecil, sedangkan nilai kemiringan (slope) sebesar 0,0872 menggambarkan bahwa setiap kenaikan konsentrasi metilen biru akan diikuti oleh peningkatan nilai absorbansi secara proporsional. Hubungan linier tersebut sesuai dengan Hukum Lambert-Beer, yang menyatakan bahwa absorbansi suatu larutan berbanding lurus dengan konsentrasi zat penyerap apabila panjang lintasan cahaya, panjang gelombang pengukuran, dan kondisi larutan tetap konstan (Morentera et al., 2022). Oleh karena itu, persamaan regresi yang diperoleh pada penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan konsentrasi metilen biru sisa setelah proses adsorpsi, sehingga kapasitas adsorpsi dan efisiensi penjerapan karbon aktif dapat dihitung secara akurat.

3.8.1 Penentuan pH Optimum

Pengaruh pH larutan terhadap kapasitas adsorpsi metilen biru dipelajari pada variasi pH 3, 5, 7, 9, dan 11 menggunakan karbon hasil karbonisasi (KCKS) dan karbon aktif hasil aktivasi $AlCl_3$ 5% (KACKS). Nilai kapasitas adsorpsi (Q_e) pada masing-masing variasi pH ditunjukkan pada **Gambar 16**. Berdasarkan hasil pengujian, kedua adsorben menunjukkan kecenderungan yang sama, yaitu kapasitas adsorpsi meningkat seiring kenaikan pH hingga mencapai kondisi optimum pada pH 7, kemudian mengalami sedikit penurunan pada pH yang lebih tinggi.



Gambar 16. Penentuan pH optimum KCKS dan KACKS dengan metilen biru

Berdasarkan **Gambar 16**, kapasitas adsorpsi metilen biru pada karbon tanpa aktivasi (KCKS) meningkat dari sekitar 3,8 mg/g pada pH 3 menjadi sekitar 6,7 mg/g pada pH 7, kemudian mengalami sedikit penurunan pada pH 9 dan 11. Pola yang sama juga ditunjukkan oleh karbon aktif hasil aktivasi $AlCl_3$ (KACKS), namun dengan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi pada seluruh variasi pH. Kapasitas adsorpsi

KACKS meningkat dari sekitar 10,5 mg/g pada pH 3 hingga mencapai sekitar 12,7 mg/g pada pH 7, kemudian menurun kembali pada pH yang lebih basa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses aktivasi menggunakan $AlCl_3$ mampu meningkatkan kemampuan adsorpsi karbon terhadap metilen biru. Peningkatan kapasitas adsorpsi pada KACKS diduga disebabkan oleh terbentuknya struktur pori yang lebih berkembang serta meningkatnya jumlah gugus fungsi oksigen di permukaan karbon sebagai akibat proses aktivasi. Bertambahnya luas permukaan dan jumlah situs aktif tersebut menyebabkan lebih banyak molekul metilen biru dapat berinteraksi dan terikat pada permukaan adsorben dibandingkan karbon tanpa aktivasi.Pengaruh pH terhadap proses adsorpsi berkaitan erat dengan perubahan muatan permukaan adsorben dan sifat ionisasi gugus fungsi permukaan. Pada kondisi asam (pH 3), konsentrasi ion H^+ yang tinggi menyebabkan gugus fungsi oksigen pada permukaan karbon mengalami protonasi sehingga permukaan adsorben cenderung bermuatan positif. Karena metilen biru merupakan zat warna kationik, kondisi tersebut menimbulkan gaya tolak elektrostatik antara adsorben dan adsorbat sehingga jumlah molekul metilen biru yang dapat teradsorpsi menjadi lebih sedikit.

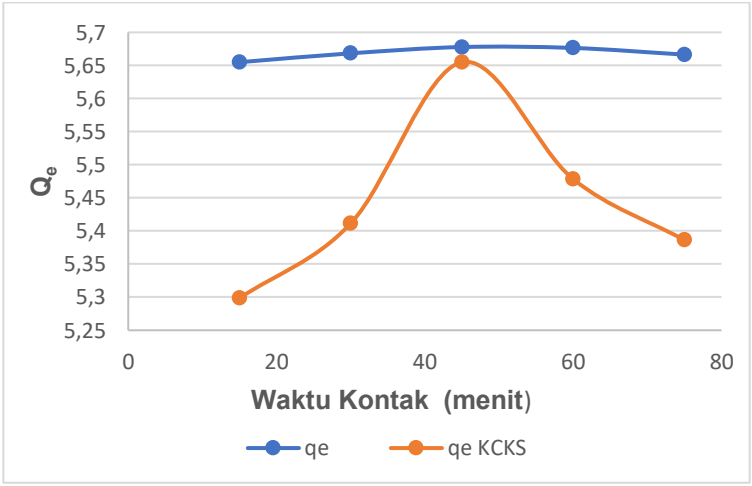
Seiring meningkatnya pH menuju kondisi netral, konsentrasi ion H^+ menurun sehingga gugus fungsi pada permukaan karbon mengalami deprotonasi dan menghasilkan permukaan yang lebih bermuatan negatif. Kondisi ini meningkatkan gaya tarik elektrostatik antara permukaan adsorben dengan molekul metilen biru bermuatan positif sehingga kapasitas adsorpsi meningkat dan mencapai nilai maksimum pada pH 7. Pada kondisi basa (pH 9-11), kapasitas adsorpsi kembali mengalami sedikit penurunan. Hal ini diduga disebabkan oleh meningkatnya konsentrasi ion OH^- yang dapat memengaruhi distribusi muatan pada permukaan adsorben serta mengganggu interaksi elektrostatik antara gugus aktif karbon dengan molekul metilen biru. Akibatnya, efisiensi penjerapan sedikit berkurang dibandingkan pada kondisi optimum. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Pastierová et al., (2021) yang melaporkan bahwa pH merupakan salah satu faktor terpenting yang memengaruhi adsorpsi metilen biru karena menentukan muatan permukaan adsorben, derajat ionisasi gugus fungsi, serta struktur molekul zat warna. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi meningkat seiring kenaikan pH dan mencapai kondisi optimum pada pH 7. Hasil yang serupa juga dilaporkan oleh Al-Mashaikhi et al. (2023) yang menyatakan bahwa metilen biru sebagai zat warna kationik menunjukkan adsorpsi optimum pada pH 7. Pada pH rendah, permukaan karbon masih terprotonasi sehingga interaksi elektrostatik dengan metilen biru relatif lemah. Sebaliknya, pada pH netral hingga sedikit basa, permukaan karbon menjadi lebih bermuatan negatif sehingga interaksi elektrostatik meningkat dan adsorpsi berlangsung lebih efektif. Oleh karena itu, pH 7 dipilih sebagai kondisi optimum untuk pengujian kinetika, isoterm, dan studi adsorpsi selanjutnya.

Secara keseluruhan, karbon aktif hasil aktivasi menggunakan $AlCl_3$ menunjukkan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi dibandingkan karbon tanpa aktivasi pada seluruh

variasi pH. Hal tersebut menunjukkan bahwa aktivasi $AlCl_3$ berhasil meningkatkan karakteristik permukaan karbon melalui pembentukan pori yang lebih berkembang dan peningkatan jumlah situs aktif sehingga kemampuan adsorpsi terhadap metilen biru menjadi lebih baik. Berdasarkan hasil tersebut, pH 7 ditetapkan sebagai kondisi optimum untuk pengujian adsorpsi pada tahap berikutnya karena menghasilkan kapasitas adsorpsi tertinggi pada kedua adsorben.

3.8.2 Penentuan Waktu Kontak Optimum

Waktu kontak merupakan salah satu parameter penting dalam proses adsorpsi karena menentukan lamanya interaksi antara molekul adsorbat dengan permukaan adsorben hingga tercapai keadaan kesetimbangan. Pada penelitian ini, pengaruh waktu kontak dipelajari pada variasi waktu 15, 30, 45, 60, dan 75 menit menggunakan karbon hasil karbonisasi (KCKS) dan karbon aktif hasil aktivasi $AlCl_3$ 5% (KACKS).



Gambar 17. Penentuan waktu optimum KCKS dan KACKS dengan metilen biru

Berdasarkan **Gambar 17**, kapasitas adsorpsi kedua adsorben meningkat seiring bertambahnya waktu kontak hingga mencapai kondisi optimum pada 45 menit. Pada sampel KCKS, kapasitas adsorpsi meningkat dari sekitar 5,30 mg/g pada waktu kontak 15 menit menjadi sekitar 5,65 mg/g pada 45 menit. Setelah melewati waktu tersebut, kapasitas adsorpsi mengalami sedikit penurunan pada 60 menit dan 75 menit. Sementara itu, pada sampel KACKS, kapasitas adsorpsi relatif konstan, yaitu meningkat tipis dari sekitar 5,66 mg/g pada 15 menit menjadi sekitar 5,68 mg/g pada 45 menit, kemudian sedikit menurun pada 50 dan 75 menit. Hasil tersebut menunjukkan bahwa karbon aktif hasil aktivasi $AlCl_3$ mampu mencapai keadaan setimbang lebih cepat dibandingkan karbon tanpa aktivasi. Peningkatan kapasitas adsorpsi pada awal proses terjadi karena masih banyaknya situs aktif yang tersedia pada permukaan adsorben sehingga molekul metilen biru dapat berinteraksi dan terikat dengan mudah. Seiring bertambahnya waktu kontak, semakin banyak molekul metilen biru yang berdifusi ke dalam pori-pori adsorben sehingga jumlah adsorbat

yang terikat semakin meningkat. Proses ini berlangsung hingga sebagian besar situs aktif mulai terisi dan sistem mendekati keadaan kesetimbangan adsorpsi. Setelah mencapai waktu kontak optimum 45 menit, kapasitas adsorpsi tidak mengalami peningkatan yang berarti, bahkan cenderung sedikit menurun. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar situs aktif pada permukaan adsorben telah terisi sehingga laju adsorpsi semakin kecil. Penurunan kapasitas adsorpsi setelah keadaan setimbang diduga berkaitan dengan tercapainya kesetimbangan antara proses adsorpsi dan desorpsi, sehingga sebagian molekul metilen biru yang telah terikat dapat kembali terlepas ke dalam larutan. Selain itu, interaksi antar molekul adsorbat yang telah menutupi permukaan adsorben juga dapat menyebabkan berkurangnya jumlah molekul yang teradsorpsi secara efektif.

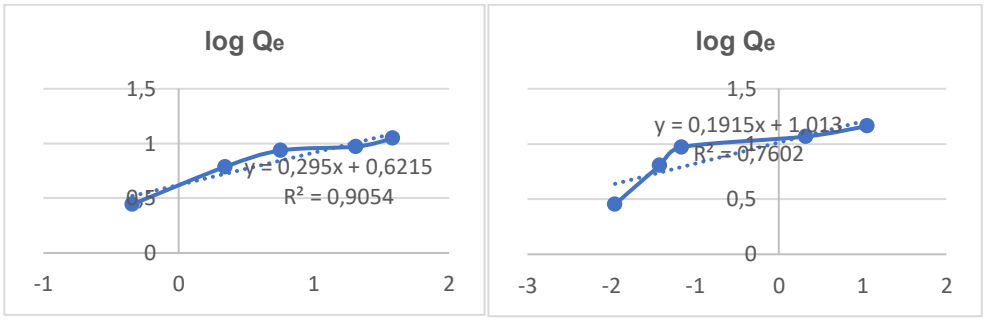
Karbon aktif hasil aktivasi $AlCl_3$ menunjukkan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi dan lebih stabil dibandingkan karbon tanpa aktivasi pada seluruh variasi waktu kontak. Hal ini menunjukkan bahwa proses aktivasi mampu meningkatkan jumlah situs aktif dan memperbaiki karakteristik permukaan karbon sehingga molekul metilen biru lebih mudah berdifusi menuju permukaan adsorben dan mencapai kesetimbangan dalam waktu yang relatif lebih singkat. Stabilnya kapasitas adsorpsi setelah mencapai keadaan setimbang juga mengindikasikan bahwa karbon aktif hasil aktivasi memiliki afinitas yang lebih baik terhadap molekul metilen biru. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Thang et al., (2021) yang menyatakan bahwa peningkatan waktu kontak menyebabkan jumlah molekul adsorbat yang berdifusi menuju permukaan adsorben semakin besar hingga tercapai keadaan kesetimbangan. Setelah kesetimbangan tercapai, penambahan waktu kontak tidak lagi meningkatkan kapasitas adsorpsi secara signifikan karena sebagian besar situs aktif telah terisi. Temuan tersebut juga didukung oleh El Jery et al., (2024) yang menjelaskan bahwa proses adsorpsi metilen biru dipengaruhi oleh kondisi operasi hingga mencapai kesetimbangan adsorpsi, yang selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam analisis isoterm dan kinetika adsorpsi.

3.9 Penentuan Model Isoterm

Analisis isoterm adsorpsi dilakukan untuk mengetahui mekanisme interaksi antara molekul metilen biru dengan permukaan karbon hasil karbonisasi (KCKS) dan karbon aktif hasil aktivasi menggunakan $AlCl_3$ (KACKS). Model isoterm yang digunakan pada penelitian ini adalah isoterm Langmuir dan Freundlich. Parameter kedua model isotherm disajikan pada **Tabel 4.**

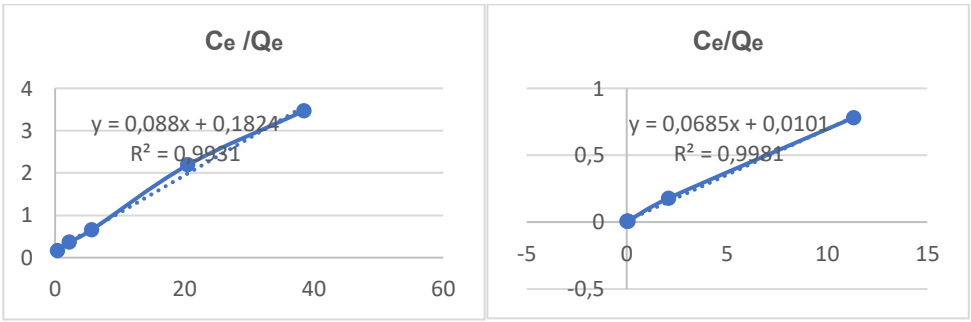
Tabel 4. Isotermal Langmuir dan Freundlich

Adsorben	Langmuir			Freundlich		
	Q_{max} (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2	K_F (mg/g)	n	R^2
KCKS	11,3636	0,4824	0,9931	4,1831	3,3898	0,9054
KACKS	14,5985	6,7821	0,9981	10,3039	5,2192	0,7602



(a) (b)

Gambar 18. Grafik isoterm Freundlich (a) KCKS; (b)KACKS



(a) (b)

Gambar 19. Grafik isoterm Langmuir (a) KCKS; (b) KACKS

Model isoterm adsorbsi menerangkan distribusi fasa teradsorpsi dalam larutan dengan partikel adsorben pada suhu tertentu dan tetap (Morentera et al., 2022). Isoterm adsorpsi menunjukkan bagaimana molekul adsorbat terdistribusi antara fase cair dan fase padat ketika proses adsorpsi mencapai keadaan kesetimbangan. Analisis data isoterm dengan mencocokkannya ke berbagai model isoterm merupakan langkah penting untuk menemukan model yang sesuai dan dapat digunakan untuk tujuan perancangan. Isoterm adsorpsi penting untuk menggambarkan bagaimana zat terlarut berinteraksi dengan adsorben dan sangat berperan dalam mengoptimalkan penggunaan adsorben. Isoterm Langmuir isotherm dam Freundlich isotherm dikenal luas dan telah berhasil diterapkan untuk menjelaskan berbagai kesetimbangan adsorpsi serta mengevaluasi kesetimbangan adsorpsi zat warna dari larutan berair (Ghalehkhondabi et al., 2021). Persamaan Langmuir dan Freundlich terdapat pada persamaan 10 dan 11 (Atkins et al., 2018).

Persamaan isoterm Langmuir:

$$\frac{Ce}{Qe} = \frac{1}{Qmax \,.\, KL} + \frac{Ce}{Qmax} \qquad (10)$$

Persamaan isoterm Freundlich:

$$\log Q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \qquad (11)$$

Berdasarkan **Tabel 4**, hasil analisis menunjukkan bahwa model isoterm Langmuir memiliki nilai koefisien determinasi (R^2) yang lebih tinggi dibandingkan model Freundlich pada kedua adsorben. Pada karbon tanpa aktivasi (KCKS), model Langmuir menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,9931, sedangkan model Freundlich sebesar 0,9054. Demikian pula pada karbon aktif hasil aktivasi $AlCl_3$ (KACKS), model Langmuir memberikan nilai R^2 sebesar 0,9981, jauh lebih tinggi dibandingkan model Freundlich yang hanya sebesar 0,7602. Nilai R^2 yang mendekati satu menunjukkan bahwa model Langmuir lebih mampu menggambarkan hubungan antara konsentrasi kesetimbangan dengan jumlah metilen biru yang teradsorpsi dibandingkan model Freundlich. Dengan demikian, proses adsorpsi metilen biru pada penelitian ini lebih sesuai mengikuti model isoterm Langmuir. Model isoterm Langmuir mengasumsikan bahwa adsorpsi berlangsung pada permukaan adsorben yang relatif homogen, di mana setiap situs aktif memiliki energi adsorpsi yang sama dan hanya mampu mengikat satu molekul adsorbat sehingga membentuk lapisan tunggal (*monolayer adsorption*). Sebaliknya, model Freundlich mengasumsikan bahwa adsorpsi terjadi pada permukaan yang heterogen dengan energi adsorpsi yang berbeda-beda sehingga memungkinkan terbentuknya adsorpsi multilapis. Kesesuaian data penelitian terhadap model Langmuir menunjukkan bahwa proses adsorpsi metilen biru pada karbon aktif hasil aktivasi $AlCl_3$ didominasi oleh pembentukan lapisan tunggal pada permukaan adsorben. Penjelasan tersebut sejalan dengan penelitian Allwar et al., (2021), yang menyatakan bahwa model Langmuir digunakan untuk menggambarkan adsorpsi monolapis pada permukaan homogen, sedangkan model Freundlich lebih sesuai untuk permukaan heterogen dengan kemungkinan terbentuknya lapisan jamak.

Nilai kapasitas adsorpsi maksimum (Q_{max}) meningkat dari 11,3636 mg/g pada KCKS menjadi 14,5985 mg/g pada KACKS. Peningkatan ini menunjukkan bahwa aktivasi menggunakan $AlCl_3$ mampu meningkatkan jumlah situs aktif yang tersedia sehingga lebih banyak molekul metilen biru dapat teradsorpsi. Hasil tersebut juga didukung oleh karakterisasi *Surface Area Analyzer* (SAA) yang menunjukkan adanya peningkatan luas permukaan setelah proses aktivasi. Semakin besar luas permukaan adsorben, semakin banyak pula situs aktif yang dapat dimanfaatkan dalam proses adsorpsi sehingga kapasitas adsorpsi maksimum meningkat. Selain itu, nilai konstanta Langmuir (K_L) meningkat dari 0,4824 L/mg menjadi 0,6782 L/mg setelah proses aktivasi. Nilai K_L menunjukkan besarnya afinitas antara adsorben dan adsorbat. Semakin tinggi nilai K_L, semakin kuat interaksi antara permukaan karbon aktif dengan molekul metilen biru. Oleh karena itu, peningkatan nilai K_L mengindikasikan bahwa aktivasi menggunakan $AlCl_3$ tidak hanya meningkatkan jumlah situs aktif, tetapi juga meningkatkan kekuatan ikatan antara adsorben dan adsorbat.

Pada model Freundlich diperoleh nilai konstanta K_F sebesar 4,1831 mg/g untuk KCKS dan meningkat menjadi 10,3039 mg/g pada KACKS. Nilai K_F menggambarkan kapasitas adsorpsi adsorben sehingga peningkatan nilai tersebut menunjukkan bahwa karbon aktif hasil aktivasi memiliki kemampuan adsorpsi yang lebih baik

dibandingkan karbon tanpa aktivasi. Sementara itu, nilai intensitas adsorpsi (n) masing-masing sebesar 3,3898 dan 5,2192. Nilai n > 1 menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung secara menguntungkan (*favorable adsorption*), sehingga adsorben memiliki afinitas yang baik terhadap molekul metilen biru. Namun demikian, karena nilai R^2 model Freundlich lebih rendah dibandingkan model Langmuir, model Freundlich kurang mampu menggambarkan mekanisme adsorpsi pada penelitian ini. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Patawat et al., (2020), yang melaporkan bahwa adsorpsi metilen biru lebih sesuai mengikuti model Langmuir karena memiliki nilai koefisien determinasi yang lebih tinggi dibandingkan model Freundlich. Kesesuaian tersebut menunjukkan bahwa adsorpsi berlangsung dalam bentuk lapisan tunggal pada permukaan karbon aktif. Hasil yang sama juga didukung oleh Allwar et al., (2021), yang menjelaskan bahwa model Langmuir menggambarkan adsorpsi monolapis pada permukaan homogen, sedangkan model Freundlich lebih sesuai untuk adsorpsi multilapis pada permukaan heterogen. Kekuatan dan kecenderungan proses adsorpsi tersebut selanjutnya dapat ditinjau melalui perubahan energi bebas Gibbs ($\Delta G°$), yang digunakan untuk mengetahui spontanitas proses adsorpsi. Nilai $\Delta G°$ yang negatif menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung secara spontan, karena proses tersebut dapat berlangsung tanpa memerlukan tambahan energi dari luar. Dalam penelitian ini, nilai $\Delta G°$ pada KCKS dan KACKS masing-masing sebesar -27,1155 kJ/mol dan -33,1150 kJ/mol. Nilai $\Delta G°$ yang semakin negatif pada KACKS menunjukkan bahwa proses adsorpsi setelah aktivasi berlangsung lebih spontan dibandingkan KCKS. Berdasarkan kriteria yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu nilai $\Delta G° > -40$ kJ/mol menunjukkan fisisorpsi, sedangkan nilai $\Delta G° < -40$ kJ/mol menunjukkan kemisorpsi, maka proses adsorpsi metilen biru pada kedua adsorben tergolong fisisorpsi.

BAB IV

KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Karbon aktif berbahan dasar cangkang kelapa sawit berhasil diproduksi melalui aktivasi menggunakan $AlCl_3$ dan pirolisis pada suhu 600 °C. Hasil analisis proksimat menunjukkan bahwa karbon aktif yang dihasilkan memenuhi SNI 06-3730-1995, ditandai dengan kadar air, kadar abu, dan kadar zat volatil yang rendah serta kadar karbon tetap yang tinggi, sehingga menunjukkan terbentuknya struktur karbon yang stabil. Karakterisasi menggunakan titrasi Boehm dan FTIR menunjukkan keberadaan gugus fungsi oksigen, seperti hidroksil (-OH), karbonil (C=O), dan karboksil (-COOH), yang berpotensi menjadi situs aktif dalam proses adsorpsi. Hasil karakterisasi SAA menunjukkan bahwa aktivasi menggunakan $AlCl_3$ meningkatkan luas permukaan spesifik karbon dari 45,1864 m^2/g menjadi 78,7563 m^2/g, yang menunjukkan perkembangan struktur pori setelah proses aktivasi. Peningkatan karakteristik permukaan tersebut diikuti dengan meningkatnya kemampuan adsorpsi terhadap metilen biru. Kondisi optimum adsorpsi diperoleh pada pH 7 dengan waktu kontak 45 menit. Data isoterm adsorpsi mengikuti model Langmuir dengan kapasitas adsorpsi maksimum (Q_{max}) sebesar 14,5985 mg/g dan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9981, yang menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung secara monolapis (*monolayer*) pada permukaan adsorben yang relatif homogen.

4.2 Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi penggunaan aktivator lain sebagai pembanding. Selain itu, perlu dilakukan uji adsorpsi terhadap zat warna lain atau polutan lain untuk memperluas aplikasi karbon aktif dari cangkang kelapa sawit. Pengujian dengan system aliran kontinu juga direkomendasikan agar hasil penelitian dapat lebih relevan untuk skala aplikasi yang lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

Al-Mashaikhi, S.M., El Shafey, E.I., Al-Busafi, S.,and O. Suliman, F., 2023. Adsorption of Methylene Blue onto Hydrophobic Activated Carbon. SQU Journal for Science. 28(1), 42-52. DOI:10.53539/squjs.vol28iss1pp42-52

Allorerung, D., Syakir, M., Poeloengan, Z., Syafaruddin., and Rumini, W., 1010. Budidaya Kelapa Sawit. ASKA MEDIA.

Allwar, A., Setyani, A., Sugesti, U., and Fauzani, K.A., 2021. Physical-chemical Characterization of Nano-Zinc Oxide/Activated Carbon Composite for Phenol Removal from Aqueous Solution. Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis. 16(1), 136-147.

Atkins, P.W., De Paula, J. and Keeler, J., 2018. Kimia fisik Atkins (ed. ilustrasi). Oxford University Press.

Aydemir, D., Ergun, E.M., Gulsoy, S.K., Ozan, Z.E., and Gunduz, G., 2023. Lignin Activated Carbon Obtained By A Environmentally Friendly Green Production Process Using Deep Eutectic Solvents. Biofpr. 18(1), 251-264. DOI: 10.1002/bbb.2576

Azzouni, D., Baragh F., M. Mahmoud, A., M. Alanazi, M., Rais, Z., and Taleb, M., 2023. Optimization of methylene blue removal from aqueous solutions using Activated Carbon Derived From Coffee Ground Pyrolysis: A Response Surface Methodology (RSM) Approach For Natural And Cost-Effective Adsorption. Journal of Saudi Chemical Society. 27(101695), 1-11.

Badan Standar Nasional. 1995. Arang Teknis. SNI 06-3730-1995.

Diharyo., Salampak., Damanik, Z., dan Gumiri, S., 2020. Pengaruh Lama Aktifasi Dengan H_3PO_4 dan Ukuran Butir Arang Cangkang Kelapa Sawit Terhadap Ukuran Pori dan Luas Permukaan Butir Arang Aktif. Prosiding Seminar Nasional Lingkungan Lahan Basah. 5(1), 48-54.

El Jery, A., Alawamleh, H.S.K., Sami, M.H., Abbas. H.A., Sammen, S., Ahsan, A., et al., Isotherms, Kinetics and Thermodynamic Mechanism Of Methylene Blue Dye Adsorption On Synthesized Activated Carbon. Scientific Reports. 14(970), 1-12. https://doi.org/10.1038/s41598-023-50937-0

Fito, J., Abewaa, M., Mengistu, A., Angassa, K., Ambaye, A.D., Moyo, W., et al., 2023. Adsorption Of Methylene Blue From Textile Industrial Wastewater Using Activated Carbon Developed From Rumex Abyssinicus Plant. Scientific Reports. 13, 5427. https://doi.org/10.1038/s41598-023-32341-w

Gabhane, J., William, S.P., Vaidya, A.N., Anand, D., and Wate, S., 2014. Pretreatment of Garden Biomass by Alkali-assisted Ultrasonication: Effects on Enzymatic Hydrolysis and Ultrastructural Changes. Journal of Environmental Health Science & Engineering. 12(76), (1-6). doi: 10.1186/2052-336X-12-76

Galaraga, D.R., Rhenals-Julio, J.D., Sofan-German, S., Mendoza, J,M., and Bula-Silvera, A., 2024. Proximate Analysis In Biomass: Standards, Applications And Key Characteristics. ELSEVIER. 12 (101886), 1-11. https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101886

Ghalehkhondabi, V., Fazlali, A., and Ketabi, K., 2021. Synthesis And Characterization Of Modified Activated Carbon (MgO/AC) For Methylene Blue Adsorption: Optimization, Equilibrium Isotherm and Kinetic Studies. Water Science and Technology. 83(7), 1548-1565.

Giraldo, L., Vargas, D.P., and Moreno-Piraján, J.C., 2020. Study of CO_2 Adsorption on Chemically Modified Activated Carbon With Nitric Acid and Ammonium Aqueous. Frontiers in Chemistry. 8(543452), 1-11. https://doi.org/10.3389/fchem.2020.543452

Goertzen, S.L., Theriault, K.D., Oickle, A.M., Tarasuk, A.C., and Andreas, H.A., 2010. Standardization Of The Boehm Titration. Part I. CO_2 Expulsion And Endpoint Determination. *Carbon*. 48(2010), 1252-1261. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.11.050

Hashem, H.M., El-Maghrabey, M., and El-Shaheny, R., 2024. Inclusive Study Of Peanut Shells Derived Activated Carbon As An Adsorbent For Removal Of Lead And Methylene Blue From Water. Scientific Reports. 14(13515), 1-24. https://doi.org/10.1038/s41598-024-63585-9

Haziza, H., Rahman, D.Y., dan Atina., 2024. Karakterisasi Karbon Aktif Kulit Jengkol Dengan Aktivator H_3PO_4 Sebagai Adsorben Logam Tembaga (Cu). JoP. 10(1), 14-20.

Karume, I., Bbumba, S., Tewolde, S., Mukasa, I, Z.T., and Ntale, M., 2023. Impact Of Carbonization Conditions and Adsorbate Nature On The Performance Of Activated Carbon In Water Treatment. BMC Chemistry. 17(162), 1-12. https://doi.org/10.1186/s13065-023-01091-1

Khan, I., Saeed, K., Zekker, I., Zhang, B., Hendi, A. H., Ahmad, A., et al., 2022. Review on methylene blue: Its properties, uses, toxicity and photodegradation. Water. 14(2), 1-30. https://doi.org/10.3390/w14020242.

Larasati, T.D., Prakoso, T., dan Rizkiana, J., 2021. Karbonisasi Limbah Kelapa Sawit Dengan Proses Hidrotermal Sebagai Bahan Baku Elektroda Superkapasitor. Jurnal Chemurgy. 5(1), 22-29. http://dx.doi.org/10.30872/cmg.v5i1.5916

Lehr, M., Miltner, M., and Friedl., A., 2021. Removal Of Wood Extractives As Pulp (Pre-)Treatment: A Technological Review. SN Applied Sciences. 3(886), 1-22. https://doi.org/10.1007/s42452-021-04873-1

Lua, A.C., 2025. Conversion of Oil Palm Kernel Shell Wastes into Active Biocarbons by N_2 Pyrolysis and CO_2 Activation. Clean Technologies. 7(3), 66. https://doi.org/10.3390/cleantechnol7030066

McCaffrey, Z., F.Torres,L., Chiou, B., Hart-Cooper, W., McMahan, C., and J. Orts, W., 2024. Almond and Walnut Shell Activated Carbon for Methylene Blue Adsorption. ACS Publications. 1, 1421-1431. https://doi.org/10.1021/acssusresmgt.4c00080

Morentera, B.G., Wahyuningsih, S., dan Sudarni, D.H.A., 2022. Pengaruh Variasi Waktu Kontak Dan Dosis Adsorben Fly Ash Teraktivasi Naoh Terhadap Adsorpsi Metilen Biru. Eksergi, 19(3), 104-109.

Muliani, S., 2017. Modifikasi Permukaan Karbon Aktif dari Tempurung Kemiri (Aleurites Moluccana) Dengan HNO3 dan Aplikasinya Sebagai Adsorben Zat Warna Metil Jingga. Skripsi Tidak Diterbitkan. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin, Makassar.

Musthofa, A.M.H., Syafila, M., and Helmy,Q., 2023. Effect of Activated Carbon Particle Size on Methylene Blue Adsorption Process in Textile Wastewater. Indones. J. Chem. 23 (2), 461-474.

Neme, I., Gonfaa, G., and Masi, C., 2022. Activated carbon from biomass precursors using phosphoric acid: A review. 8(1), 1-12. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11940

Nguyen, D.H., Tran, H.N., Chao, H.-P., and Lin, C.-C., 2019. Effect Of Nitric Acid Oxidation on the Surface of Hydrochars to Sorb Methylene Blue: An Adsorption Mechanism Comparison. Adsorption Science & Technology. 37(7-8), 607-622. doi: 10.1177/0263617419867519

Ovchinnikov, O.V., Evtukhova, A.V., Kondratenko, T.S., Smirnov, M.S., Khokhlov, V.Y., and Erina, O.V., 2016. Manifestation Of Intermolecular Interactions In FTIR Spectra Of Methylene Blue Molecules. Vibrational Spectroscopy. 86, 181-189. http://dx.doi.org/10.1016/j.vibspec.2016.06.016

Pam, A.A., Abdullah, A.H., Tan, Y.P., and Zainal, Z., 2022. Physicochemical properties of porous activated carbon prepared from palm kernel shell through a low-cost activation protocol. 118(9-10), 1-7.

Pasa, J.I., Aldiansyag, Septiani, R., Prastika, N.D., Markus, R.M., Lestari, S. et al., 2024. Adsorpsi metilen biru dengan menggunakan arang aktif dari daun tanaman doyo (*Curculigo latifolia*). J. Atomik 9(2), 69-77. https://doi.org/10.30872/ja.v9i2.1393

Pastierová, A., and Sirotiak, M., 2021. Study Into Dynamic Behaviour Of The Methylene Blue Adsorption On Activated Carbon. Sciendo. 29(48), 105-113.

Patawat, C., Silakate, K., Chuan-Udom, C., Supanchaiyamat, N., Hunt, A.J., and Ngernyen, Y., 2020. Preparation of Activated Carbon From Dipterocarpus Alatus Fruit And Its Application For Methylene Blue Adsorption. RSC Adv. 10, 21082-21091.

Pauline, A.L., and Joseph, K., 2020. Hydrothermal carbonization of organic wastes to carbonaceous solid fuel A review of mechanisms and process parameters. Elsevier. 279(1), 1-16. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118472

Poku, K., 2002. *Small-Scale Palm Oil Processing in Africa*. FAO Agricultural Services Bulletin No. 148. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Rahayu., Nurlette, S., and Baunsele, A.B., 2023. The Effect of Contact Time and Optimum pH On the Adsorption of Methylene Blue Dye by Alginate-Chitosan Polyelectrolyte Complex Films. Stannum: Jurnal Sains dan Terapan Kimia, 5(2), 87-92. doi: 10.33019/jstk.v5i2.4371

Saka, C., and Balbay, A., 2021. Oxygen and nitrogen-functionalized porous carbon particles derived from hazelnut shells for the efficient catalytic hydrogen production reaction. Biomass and Bioenergy. 149, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106072

Saragih, T.H., Ginting, Z., Ibrahim, I., Kamar, I., Faisal., and Nurmalita., 2024. Kajian Karakteristik *Hydrochar* Berbahan Baku Limbah Kulit Luar Biji Kopi (*Eksocarp*) Melalui Proses Karbonisasi Hidrotermal. Chemical Engineering Journal Srorage. 4(6), 793-803.

Sharpe, S., Retamal, M., and Fernandez, M.C.M., 2022. Assessing the impact: Environmental impact assessment in the textile and garment sector in Bangladesh, Cambodia, Indonesia and Viet Nam. ILO Working Paper. 51, 1-42. https://doi.org/10.54394/YCEP9777%0A [Accessed on 12 January 2026].

Shiyu, L., Bin, J., and Wencai, Z., 2023. A Review On The Thermochemical Treatments Of Biomass: Implications For Hydrochar Production And Rare Earth Element Recovery From Hyperaccumulators. Chemosphere. 342(140140), 1-22. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140140

Sirajuddin., Harjanto., and Adriana, V., 2022. Karakteristik Karbon Aktif Dari Cangkang Kelapa Sawit (Elaeis Guineensis) Dengan Variasi Jenis Aktivator Pada Proses Aktivasi Kimia Menggunakan Gelombang Ultrasonik. Prosiding 6th Seminar Nasional Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat 2022. 115-120. [Accessed on 19 January 2026].

Syafila, M., Helmy, Q., and Musthofa, A.M.H., 2022. Methylene Blue Adsorption by Activated Carbon and Nano Activated Carbon from Biomass Waste: A Review. Jzurnal Presipitasi. 19(3), 553-565.

Tantalu, L., Hidayat, N., Suharto, B., Nurika, I., Agustina, P. W., and Subekti, I. F., 2025. Impact of Different Pyrolysis Temperatures on the Quality of Activated Carbon from Sunan Candlenut Shells. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 56(5), 1-15. https://doi.org/10.62321/issn.10001298.2025.5.1

Thang, N. H., Khang, D.S., Hai, T.D., Ngac, D.T., and Tuan, P.D., 2021. Methylene Blue Adsorption Mechanism Of Activated Carbon Synthesised From Cashew Nut Shells. RSC Adv. 11, 26563-26570.

Tsoutsa, E.K., Tolkou, A.K., Katsoyiannis, I.A., and Kyzas, G.Z., 2023. Composite Activated Carbon Modified with $AlCl_3$ for the Effective Removal of Reactive

Black 5 Dye from Wastewaters. Journal of Composites Science. 7(6), 224. https://doi.org/10.3390/jcs7060224

Tue, P.S., Diana, R., Maushad, M., Eder, C., Albuquerque Y.R.T., Dias, S.L.P., et al., 2021. High removal of emerging contaminants from wastewater by activated carbons derived from the shell of cashew of Para. 31(1), 13-28.

Wang, N., Li, C., Li, B., Jiang, Y., Zhang, S., Wang, D., et al. 2024. Activation of cotton with transition metal-based chlorides: Correlation of generation of pore structures with evolution of oxygen-containing species. Journal of Environmental Chemical Engineering. 12(5), 1-14. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113378

Xu, J., Zhang, H., Ji, X., Lan, Q., and Fan Q,. 2022. Activated Carbon Modified by Ester Hydrolysis of Ethyl Acetate for Water Vapor Adsorption Enhancement. MDPI. 10(1527), 1-15. https://doi.org/10.3390/pr10081527

Yunus, N.A., Zakia, N.M., and Alwi, S.R.W., 2018. Design of Solvents for Palm Oil Recovery using Computer-Aided Approach. Chemical Engineering Transactions. 63, 283-288. doi:10.3303/CET1863098

Zaini, M.S.M., Arshad, M., and Syed-Hassan, S.S.A., 2023. Adsorption Isotherm and Kinetic Study of Methane on Palm Kernel Shell-Derived Activated Carbon. Journal of Bioresources and Bioproducts. 8, 66-77.

Lampiran 1. Bagan Kerja

1. Pembuatan Larutan

$AlCl_3$ 5%

Padatan $AlCl_3$

- ditimbang sebanyak 5 g kedalam labu ukur 100 mL
- ditambahkan akuabides hingga tanda batas
- dihomogenkan

$AlCl_3$ 5%

Na_2CO_3 0,05 N

Padatan Na_2CO_3

- ditimbang 0,6625 g kedalam gelas kimia
- dilarutkan dengan akuabides
- dimasukkan kedalam labu ukur 250 mL
- dihimpitkan dengan akuabides hingga tanda batas, dihomogenkan

Larutan Na_2CO_3 0,05 N

$NaHCO_3$ 0,05 N

Padatan $NaHCO_3$

- ditimbang 1,05 g kedalam gelas kimia
- dilarutkan dengan akuabides
- dimasukkan kedalam labu ukur 250 mL
- dihimpitkan dengan akuabides hingga tanda batas
- dihomogenkan

Larutan $NaHCO_3$ 0,05 N

NaOH 0,05 N

Padatan NaOH

- ditimbang 2 g kedalam gelas kimia
- dilarutkan dengan akuabides
- dimasukkan kedalam labu ukur 1000 mL
- dihimpitkan dengan akuabides hingga tanda batas dan dihomogenkan

Larutan NaOH 0,05 N

HCl 0,05 N

HCl 37%

- dipipet sebanyak 4,144 mL kedalam labu ukur 1000 mL
- ditambahkan akuabides hingga tanda batas
- dihomogenkan

Larutan HCl 0,05 N

$Na_2B_4O_7$ 0,05 N

Padatan $Na_2B_4O_7 . 10H_2O$

- ditimbang 1,9068 g kedalam gelas kimia
- dilarutkan dengan akuabides
- dimasukkan kedalam labu ukur 100 mL
- dihimpitkan dengan akuabides hingga tanda batas
- dihomogenkan

Larutan $Na_2B_4O_7$ 0,05 N

$H_2C_2O_4$ 0,05 N

Padatan $H_2C_2O_4 . 2H_2O$

- ditimbang 0,63 g kedalam gelas kimia
- dilarutkan dengan akuabides
- dimasukkan kedalam labu ukur 100 mL
- dihimpitkan dengan akuabides hingga tanda batas
- dihomogenkan

Larutan $H_2C_2O_4$ 0,05 N

Standarisasi Larutan HCl dengan $Na_2B_4O_7$ 0,05 N

$Na_2B_4O_7$ 0,05 N

- dipipet sebanyak 10 mL kedalam Erlenmeyer 250 mL
- ditambahkan indikator *red methyl* sebanyak 2-3 tetes
- dititrasi dengan HCl hingga berubah warna
- dicatat volume HCl yang digunakan
- dilakukan titrasi secara triplo
- dihitung konsentrasi larutan HCl

Hasil

Standarisasi Larutan NaOH dengan $H_2C_2O_4$ 0,05 N

$H_2C_2O_4$ 0,05 N

- dipipet sebanyak 10 mL kedalam Erlenmeyer 250 mL
- ditambahkan indikator *Phenolphthalein* sebanyak 2-3 tetes
- dititrasi dengan NaOH hingga berubah warna
- dicatat volume NaOH yang digunakan
- dilakukan titrasi secara triplo
- dihitung konsentrasi larutan NaOH

Hasil

Metilen Biru 1000 mg/L

Padatan Metilen Biru 1000 mg/L

- ditimbang 1 g kedalam gelas kimia
- dilarutkan dengan akuabides
- dimasukkan kedalam labu ukur 1000 mL
- dihimpitkan dengan akuabides hingga tanda batas
- dihomogenkan

Larutan Metilen biru 1000 mg/L

Metilen Biru 250 mg/L

Larutan Metilen biru 1000 mg/L

- dipipet sebanyak 250 mL ke dalam labu ukur 1000 mL
- ditambahkan akuabides hingga tanda batas
- dihomogenkan

Larutan Metilen biru 250 mg/L

Metilen Biru 50 mg/L

Larutan Metilen biru 250 mg/L

- dipipet sebanyak 50 mL ke dalam labu ukur 250 mL
- ditambahkan akuabides hingga tanda batas
- dihomogenkan

Larutan Metilen biru 50 mg/L

Metilen Biru 25 mg/L

Larutan Metilen biru 50 mg/L

- dipipet sebanyak 12,5 mL ke dalam labu ukur 25 mL
- ditambahkan akuabides hingga tanda batas
- dihomogenkan

Larutan Metilen biru 25 mg/L

Metilen Biru 1 mg/L

Larutan Metilen biru 25 mg/L

- dipipet sebanyak 1 mL ke dalam labu ukur 25 mL
- ditambahkan akuabides hingga tanda batas
- dihomogenkan

Larutan Metilen biru 1 mg/L

Metilen Biru 2 mg/L

Larutan Metilen biru 25 mg/L

- dipipet sebanyak 2 mL ke dalam labu ukur 25 mL
- ditambahkan akuabides hingga tanda batas
- dihomogenkan

Larutan Metilen biru 2 mg/L

Metilen Biru 4 mg/L

Larutan Metilen biru 25 mg/L

- dipipet sebanyak 4 mL ke dalam labu ukur 25 mL
- ditambahkan akuabides hingga tanda batas
- dihomogenkan

Larutan Metilen biru 4 mg/L

Metilen Biru 8 mg/L

Larutan Metilen biru 25 mg/L

- dipipet sebanyak 8 mL ke dalam labu ukur 25 mL
- ditambahkan akuabides hingga tanda batas
- dihomogenkan

Larutan Metilen biru 8 mg/L

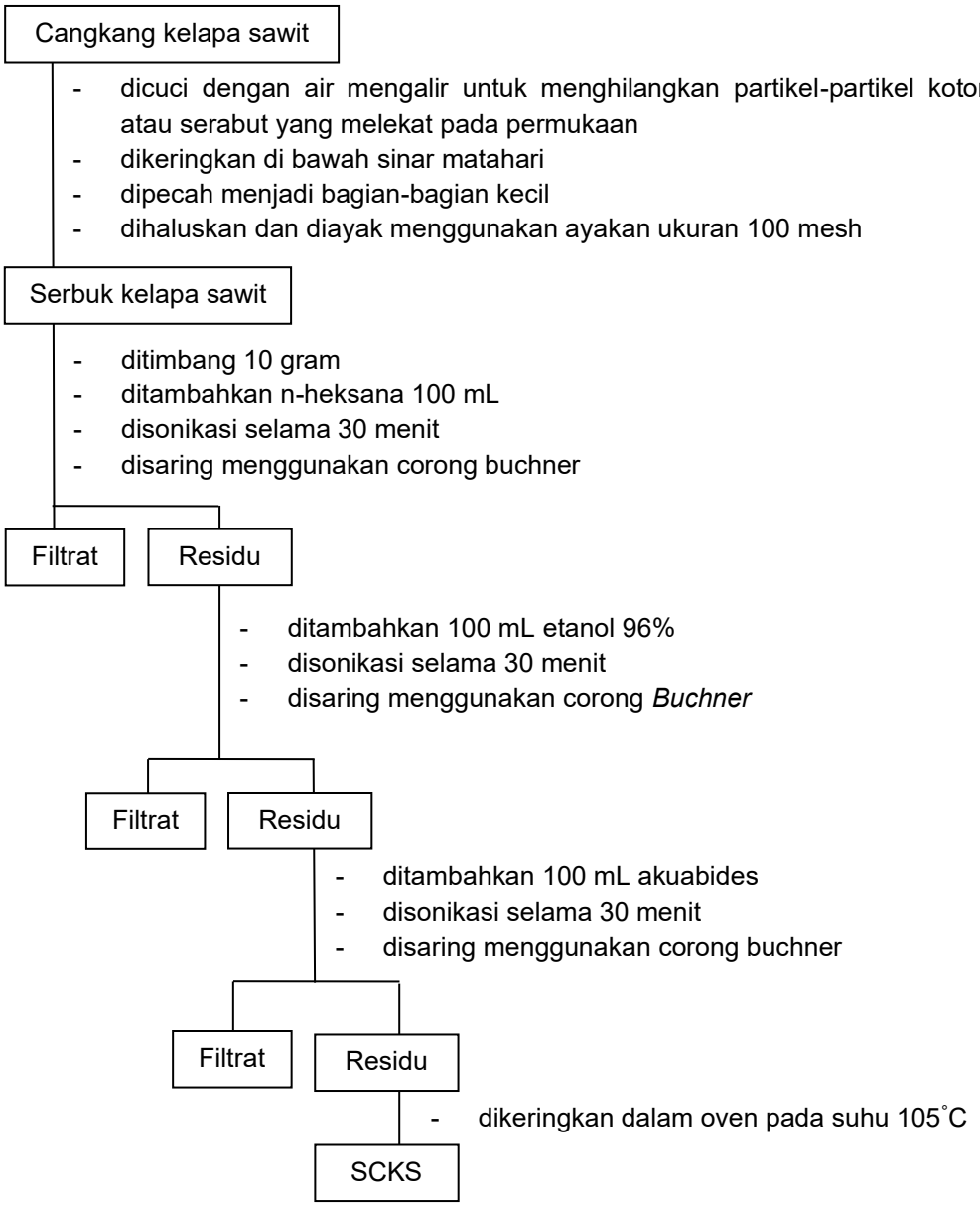
Metilen Biru 16 mg/L

Larutan Metilen biru 25 mg/L

- dipipet sebanyak 16 mL ke dalam labu ukur 25 mL
- ditambahkan akuabides hingga tanda batas
- dihomogenkan

Larutan Metilen biru 16 mg/L

2. Preparasi Sampel



3. Karbonisasi

SCKS

- ditimbang sebanyak 7 g dan dimasukkan ke dalam reaktor hidrotermal (autoklaf)
- ditambahkan akuabides sebanyak 70 mL sehingga diperoleh campuran dengan rasio massa cangkang kelapa sawit : volume akuabides 1:10.
- dimasukkan dalam tanur pada suhu 180 °C selama 8 jam
- disaring dan di keringkan dalam oven pada suhu 105°C

KCKS

4. Aktivasi

KCKS

- ditimbang 1 g
- ditambahkan 30 mL larutan $AlCl_3$ 5% dengan perbandingan 1:30

Filtrat

Residu

- dikeringkan dalam oven pada suhu 105^{o}C hingga benar benar kering
- dimasukkan dalam tanur pada suhu 600^{o}C selama 1,5 jam
- difiltrasi dan dicuci berulang kali dengan air akuabides hingga filtrat mencapai pH netral
- dikeringkan dalam oven pada suhu 105^{o}C hingga benar benar kering
- dianalisis menggunakan FTIR dan SAA

KACKS

5. Analisis Proksimat

Kadar Air

KACKS

- ditimbang 1 g dimasukkan dalam oven pada suhu 115^{o}C selama 3 jam
- dimasukkan ke dalam desikator
- ditimbang bobot akhirnya
- diulangi sampai bobotnya tetap
- ditentukan kadar airnya dalam persen (%).
- diulangi prosedur yang sama untuk SCKS dan KCKS

Hasil

Kadar Abu

KACKS

- ditimbang 2 g dimasukkan dalam tanur pada suhu 800ºC selama 2 jam
- dimasukkan ke dalam desikator
- ditimbang bobot akhirnya
- diulangi sampai bobotnya tetap
- ditentukan kadar airnya dalam persen (%).
- diulangi prosedur yang sama untuk SCKS dan KCKS

Hasil

Kadar Volatil

KACKS

- ditimbang 2 g dimasukkan dalam tanur pada suhu 950ºC selama 5 menit
- dimasukkan ke dalam desikator
- ditimbang bobot akhirnya
- diulangi sampai bobotnya tetap
- ditentukan kadar airnya dalam persen (%).
- diulangi prosedur yang sama untuk SCKS dan KCKS

Hasil

Kadar Karbon Tetap

KACKS

- dihitung karbon dengan 100% dikurangi dengan nilai kadar abu dan nilai volatil dalam sampel

Hasil

6. Titrasi Boehm

KACKS

- ditimbang sebanyak 0,1 g dimasukkan ke dalam 4 buah gelas kimia yang berisi larutan Na_2CO_3 0,05 N, $NaHCO_3$ 0,05 N, NaOH 0,05 N, dan HCl 0,05 N masing-masing sebanyak 25 mL

Residu

Filtrat

Filtrat dari larutan Na_2CO_3 0,05 N, $NaHCO_3$ 0,05 N, NaOH 0,05 N

- ditambahkan HCl 0,05 N
- dititrasi balik dengan menggunakan larutan NaOH 0,05 N

Hasil

Filtrat dari larutan HCl 0,05 N

- ditambahkan NaOH 0,05 N
- dititrasi balik dengan menggunakan larutan HCl 0,05 N

Hasil

7. Penentuan pH Optimum

KACKS

- ditimbang 0,1 gram karbon aktif cangkang kelapa sawit
- ditambahkan 25 mL larutan metilen biru 50 mg/L pada pH 3 dimasukan ke dalam labu erlenmeyer 100 mL.
- dilakukan pengaturan pH dengan penambahan larutan HCl 0,1 M atau NaOH 0,1 M.
- diaduk menggunakan shaker selama 30 menit dan disaring.
- diukur dengan menggunakan Spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum
- dilakukan hal yang sama untuk pH 5, 7, 9 dan 11
- ditentukan kapasitas adsorpsi dengan metode adsorpsi metilen biru

Hasil

8. Penentuan Waktu Kontak Optimum

KACKS

- ditimbang 0,1 gram karbon aktif cangkang kelapa sawit
- ditambahkan 25 mL larutan metilen biru 50 mg/L pada pH optimum ke dalam labu erlenmeyer 100 mL.
- diaduk menggunakan shaker selama 15 menit dan disaring.
- diukur dengan menggunakan Spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum
- dilakukan hal yang sama untuk waktu kontak 30, 45,60, dan 75 menit
- ditentukan kapasitas adsorpsi dengan metode adsorpsi metilen biru.

Hasil

9. Penentuan Model Isoterm

KACKS

- ditimbang 0,1 gram karbon aktif cangkang kelapa sawit
- ditambahkan 25 mL larutan metilen biru 25 mg/L pada pH optimum ke dalam labu erlenmeyer 100 mL.
- diaduk menggunakan shaker selama waktu kontak optimum dan disaring.
- diukur dengan menggunakan Spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum
- dilakukan hal yang sama dengan menggunakan metilen biru 50, 75, 100, dan 125 mg/L
- ditentukan kapasitas adsorpsi dengan metode adsorpsi metilen biru.

Hasil

Lampiran 2. Perhitungan Pembuatan Larutan

1. Pembuatan Larutan $AlCl_3$ 5%

$$\% \times b/v = \frac{5}{100} \times \frac{b}{100}$$

$$b = \frac{500}{100}$$

$$b = 5 \text{ g}$$

2. Pembuatan Larutan Titrasi Boehm

2.1 Pembuatan Larutan Na_2CO_3 0,05 N

Massa Na_2CO_3 = V × N × BE
= 0,25 L × 0,05 N ×53 g/eq
= 0,6625 g

2.2 Pembuatan Larutan $NaHCO_3$ 0,05 N

Massa Na_2HCO_3 = V × N × BE
= 0,25 L × 0,05 N × 84 g/eq
= 1,0500 g

2.3 Pembuatan Larutan NaOH 0,05 N

Massa NaOH = V × N × BE
= 1 L × 0,05 N × 40 g/eq
= 2 g

2.4 Pembuatan Larutan HCl 0,05 N

$$\text{N HCl} = \frac{\% \times bj \times 10}{BE}$$

$$= \frac{37 \times 1{,}19 \text{ g/mL} \times 10}{36{,}5 \text{ g/eq}}$$

= 12,06 N

$V_1 \times C_1 = V_2 \times C_2$

$V_1 \times 12{,}06$ N = 1000 mL × 0,05 N

V_1 = 4,1459 mL

2.5 Pembuatan Larutan $Na_2B_4O_7$. $10H_2O$ 0,05 N

Massa $Na_2B_4O_7$ = V × N × BE
= 0,1 L × 0,05 N × 381,37 g/eq
= 1,9068 g

2.6 Pembuatan Larutan $H_2C_2O_4.2H_2O$ 0,05 N

Massa $H_2C_2O_4$ = V × N × BE
= 0,1 L × 0,05 N × 63 g/eq
= 0,6300 g

2.7 Standarisasi Larutan HCl dengan Larutan $Na_2B_4O_7$ 0,05 N

$V_{HCl} \times N_{HCl}$ = V $Na_2B_4O_7$ × N $Na_2B_4O_7$

$10{,}9333 \times N_{HCl}$ = 10 mL × 0,05 N

N_{HCl} = 0,0457 N

2.8 Standarisasi Larutan NaOH dengan Larutan $H_2C_2O_4$ 0,05 N

$V_{NaOH} \times N_{NaOH} = V\ H_2C_2O_4 \times N\ H_2C_2O_4$

$10{,}2 \times N_{HCl} = 10\ mL \times 0{,}05\ N$

$N_{HCl} = 0{,}0490\ N$

3. Pembuatan Larutan Metilen Biru

3.1 Pembuatan Larutan Metilen Biru 1000 mg/L

Massa metilen biru = 1000 mg/L × 1 L
= 1000 mg
= 1 g

3.2 Pembuatan Larutan Metilen Biru 250 mg/L

$V_1 \times C_1 = V_2 \times C_2$

$V_1 \times 1000\ mg/L = 1000\ mL \times 250\ mg/L$

$V_1 = 250\ mL$

3.3 Pembuatan Larutan Metilen Biru 50 mg/L

$V_1 \times C_1 = V_2 \times C_2$

$V_1 \times 250\ mg/L = 250\ mL \times 50\ mg/L$

$V_1 = 50\ mL$

3.4 Pembuatan Larutan Metilen Biru 50 mg/L

$V_1 \times C_1 = V_2 \times C_2$

$V_1 \times 250\ mg/L = 500\ mL \times 50\ mg/L$

$V_1 = 100\ mL$

3.5 Pembuatan Larutan Metilen Biru 25 mg/L

$V_1 \times C_1 = V_2 \times C_2$

$V_1 \times 50\ mg/L = 25\ mL \times 25\ mg/L$

$V_1 = 10\ mL$

3.6 Pembuatan Larutan Standar Metilen Biru (1, 2, 4, 8, dan 16 mg/L)

$V_1 \times C_1 = V_2 \times C_2$

$V_1 \times 25\ mg/L = 25\ mL \times 1\ mg/L$

$V_1 = 1\ mL$

$V_1 \times C_1 = V_2 \times C_2$

$V_1 \times 25\ mg/L = 25\ mL \times 2\ mg/L$

$V_1 = 2\ mL$

$V_1 \times C_1 = V_2 \times C_2$

$V_1 \times 25\ mg/L = 25\ mL \times 4\ mg/L$

$V_1 = 4\ mL$

$V_1 \times C_1 = V_2 \times C_2$

$V_1 \times 25\ mg/L = 25\ mL \times 8\ mg/L$

$V_1 = 8\ mL$

$V_1 \times C_1 = V_2 \times C_2$
$V_1 \times 25\ mg/L = 25\ mL \times 16\ mg/L$
$V_1 = 16\ mL$

4. Perhitungan Energi Bebas Gibbs

Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\Delta G° = -RT\ln K° \quad (12)$$

$$K° = 1000 \times K_L \times M \quad (13)$$

Keterangan:
$\Delta G°$ = energi bebas Gibbs standar (kJ/mol)
R = konstanta gas (J/mol.K)
T = suhu absolut (K)
K° = konstanta kesetimbangan standar (tanpa satuan)
K_L = konstanta Langmuir (L/mg)
M = massa molar metilen biru (g/mol)
1000 = faktor konversi satuan

4.1 Karbon Cangkang Kelapa Sawit (SCKS)

$K° = 1000 \times K_L \times M$
$= 1000 \times 0{,}4824\ L/mg \times 319{,}85\ g/mol$
$= 154.295{,}64$
$\Delta G° = -RT\ln K°$
$= -(8{,}314\ J/mol.K)(273K)\ln(154.295{,}64)$
$= -27{,}1155\ kJ/mol$

4.2 Karbon Aktif Cangkang Kelapa Sawit (KACKS)

$K° = 1000 \times K_L \times M$
$= 1000 \times 6{,}7821\ L/mg \times 319{,}85\ g/mol$
$= 2.169.254{,}685$
$\Delta G° = -RT\ln K°$
$= -(8{,}314\ J/mol.K)(273K)\ln(2.169.254{,}685)$
$= -33{,}1150\ kJ/mol$

Lampiran 3. Perhitungan Analisis Proksimat

Kadar Air KACKS

Berat Kosong Cawan (A)	Berat Cawan + sampel (B)	Berat Akhir (I)	Berat Akhir (II)	Berat Akhir (III)	Rata-rata Berat Akhir (C)	Berat Uap Air (B-C)	Berat Awal Sampel (B-A)	Kadar Air (%)
31,4809	32,4811	32,4526	32,4526	32,4525	32,45257	0,0285	1,0002	2,8494

Kadar Abu KACKS

Berat Kosong Cawan (A)	Berat Cawan + sampel (B)	Berat Akhir (C)	Berat Abu (C-A)	(B-A)	Kadar Abu (%)
45,7159	47,7160	45,7872	0,0713	2,0001	3,5648

Kadar Volatil

Berat Kosong Cawan (A)	Berat Cawan + sampel (B)	Berat Akhir (C)	Berat Volatil (B-C)	(B-A)	Kadar Volatil (%)
26,6895	28,6896	28,5044	0,1852	2,0001	9,2595

Kadar Karbon Tetap KACKS

Kadar Air	Kadar Abu	Kadar Volatil	Kadar Karbon Tetap (%)
2,8494	3,5648	9,2595	87,1757

Kadar Air KACKS

$$\text{Kadar Air (\%)} = \frac{\text{berat uap air}}{\text{berat awal sampel}} \times 100\%$$
$$= \frac{0{,}0285\ \text{g}}{1{,}0002\ \text{g}} \times 100\%$$
$$= 2{,}8494\%$$

Kadar Abu KACKS

$$\text{Kadar Abu (\%)} = \frac{\text{berat abu}}{\text{berat awal sampel}} \times 100\%$$
$$= \frac{0{,}0713\ \text{g}}{2{,}0001\ \text{g}} \times 100\%$$
$$= 3{,}5648\%$$

Kadar Volatil KACKS

$$\text{Kadar Volatil (\%)} = \frac{\text{berat volatil}}{\text{berat awal sampel}} \times 100\%$$
$$= \frac{0{,}1852\ \text{g}}{2{,}0001\ \text{g}} \times 100\%$$
$$= 9{,}2595\%$$

Kadar Karbon Tetap

$$\text{Karbon Tetap (\%)} = 100\% - (\text{kadar abu} + \text{kadar volatil})\%$$
$$= 100\% - (3{,}5648 + 9{,}2595)\%$$
$$= 87{,}1757\%$$

Lampiran 4. Perhitungan Titrasi Boehm

Serbuk Cangkang Kelapa Sawit
Tabel Penentuan Kadar Karboksil

V Titran (mL)	V Sampel $NaHCO_3$ (mL)	N $NaHCO_3$	N HCl	V HCl (mL)	N NaOH	V NaOH (mL)	Massa Karbon (g)	N Karboksil (meq/g)
25	5	0,05	0,0457	10	0,0490	4,3	0,1001	0,1848
25	5	0,05	0,0457	10	0,0490	4,5	0,1001	0,6743
25	5	0,05	0,0457	10	0,0490	4,4	0,1001	0,4296
Rata-Rata								0,4296

Contoh Perhitungan Kadar Karboksil SCKS

$$n_{karboksil} = \frac{[V_{NaHCO_3} N_{NaHCO_3} - (V_{HCl} N_{HCl} - V_{NaOH} N_{NaOH})] \frac{Vp}{Vs}}{w}$$

$$n_{karboksil} = \frac{[5\ mL \times 0,05\ N - (10\ mL \times 0,0457\ N - 4,3\ mL \times 0,0490\ N)] \frac{25}{5}}{0,1001\ g}$$

$n_{karboksil}$ = 0,1848 meq/gram

$$\text{N Karboksil} = \frac{\text{simplo + duplo + triplo}}{3} = \frac{0,1848 + 0,6743 + 0,4296}{3} = 0,4296\ \text{meq/g}$$

Tabel Penentuan Kadar Lakton

V Titran (mL)	V Sampel Na_2CO_3 (mL)	N Na_2CO_3	N HCl	V HCl (mL)	N NaOH	V NaOH (mL)	Massa Karbon (g)	N Lakton (meq/g)
25	5	0,05	0,0457	10	0,0490	4,5	0,1003	0,4881
25	5	0,05	0,0457	10	0,0490	4,6	0,1003	0,2429
25	5	0,05	0,0457	10	0,0490	4,5	0,1003	0,2434
Rata-Rata								0,3248

Contoh Perhitungan Kadar lakton SCKS

$$n_{lakton} = \frac{[V_{Na_2CO_3}\, N_{Na_2CO_3} - (V_{HCl}\, N_{HCl} - V_{NaOH}\, N_{NaOH})]\,\frac{Vp}{Vs}}{w} - n_{karboksil}$$

$$n_{lakton} = \frac{[5\text{ mL} \times 0{,}05\text{ N} - (10\text{ mL} \times 0{,}0457\text{ N} - 4{,}5\text{ mL} \times 0{,}0490\text{ N})]\,\frac{25}{5}}{0{,}1003\text{ g}} - 0{,}1848\text{ meq/g}$$

$$n_{lakton} = 0{,}4881\text{ meq/gram}$$

$$\text{N Lakton} = \frac{\text{simplo} + \text{duplo} + \text{triplo}}{3} = \frac{0{,}4881 + 0{,}2429 + 0{,}2434}{3} = 0{,}3248\text{ meq/g}$$

Tabel Penentuan Kadar Fenol

V Titran (mL)	V Sampel NaOH (mL)	N NaOH	N HCl	V HCl (mL)	N NaOH	V NaOH (mL)	Massa Karbon (g)	N Fenol (meq/g)
25	5	0,0490	0,0457	10	0,049	5	0,1003	0,9720
25	5	0,0490	0,0457	10	0,049	4,8	0,1003	0,2392
25	5	0,0490	0,0457	10	0,049	4,8	0,1003	0,4835
Rata-Rata								0,5649

Contoh Perhitungan Kadar Fenol SCKS

$$n_{fenol} = \frac{[V_{NaOH}\, N_{NaOH} - (V_{HCl}\, N_{HCl} - V_{NaOH}\, N_{NaOH})]\frac{V_p}{V_s}}{w} - n_{karboksil} - n_{lakton}$$

$$n_{fenol} = \frac{[5\text{ mL} \times 0{,}0490\text{ N} - (10\text{ mL} \times 0{,}0457\text{ N} - 5\text{ mL} \times 0{,}0490\text{ N})]\frac{25}{5}}{0{,}1003\text{ g}} - 0{,}1848 - 0{,}4881$$

$$n_{fenol} = 0{,}9720 \text{ meq/gram}$$

$$\text{N Fenol} = \frac{\text{simplo + duplo + triplo}}{3} = \frac{0{,}9720 + 0{,}2392 + 0{,}4835}{3} = 0{,}5649 \text{ meq/g}$$

Tabel Penentuan Kadar Basa Total

V Titran (mL)	V Sampel HCl (mL)	N HCl	N NaOH	V NaOH (mL)	N HCl	V HCl (mL)	Massa Karbon (g)	N Basa Total (meq/g)
25	5	0,0457	0,0490	10	0,0457	6,4	0,1001	1,5475
25	5	0,0457	0,0490	10	0,0457	6,2	0,1001	1,0909
25	5	0,0457	0,0490	10	0,0457	6,3	0,1001	1,3192
Rata-Rata								1,3192

Contoh Perhitungan Kadar Basa Total SCKS

$$n_{basa\ total} = \frac{[V_{HCl}\, N_{HCl} - (V_{NaOH}\, N_{NaOH} - V_{HCl}\, N_{HCl})]\frac{V_p}{V_s}}{w}$$

$$n_{basa\ total} = \frac{[5\text{ mL} \times 0{,}0457\text{ N} - (10\text{ mL} \times 0{,}0490\text{ N} - 6{,}4\text{ mL} \times 0{,}0457\text{ N})]\frac{25}{5}}{0{,}1001\text{ g}} = 1{,}5475 \text{ meq/gram}$$

$$\text{N Basa Total} = \frac{\text{simplo + duplo + triplo}}{3} = \frac{1{,}5475 + 1{,}0909 + 1{,}3192}{3} = 1{,}3192 \text{ meq/g}$$

Karbon Cangkang Kelapa Sawit

Tabel Penentuan Kadar Karboksil

V Titran (mL)	V Sampel $NaHCO_3$ (mL)	N $NaHCO_3$	N HCl	V HCl (mL)	N NaOH	V NaOH (mL)	Massa Karbon (g)	N Karboksil (meq/g)
25	5	0,05	0,0457	10	0,0490	4,9	0,1001	1,6533
25	5	0,05	0,0457	10	0,0490	4,6	0,1001	0,9190
25	5	0,05	0,0457	10	0,0490	4,5	0,1001	0,6743
Rata-Rata								1,0822

Contoh Perhitungan Kadar Karboksil KCKS

$$n_{karboksil} = \frac{[V_{NaHCO_3}\, N_{NaHCO_3} - (V_{HCl}\, N_{HCl} - V_{NaOH}\, N_{NaOH})]\,\frac{V_p}{V_s}}{w}$$

$$n_{karboksil} = \frac{[5\text{ mL} \times 0{,}05\text{ N} - (10\text{ mL} \times 0{,}0457\text{ N} - 4{,}9\text{ mL} \times 0{,}0490\text{ N})]\,\frac{25}{5}}{0{,}1001\text{ g}}$$

$n_{karboksil}$ = 1,6533 meq/gram

$$\text{N Karboksilat} = \frac{\text{simplo + duplo + triplo}}{3} = \frac{1{,}6533 + 0{,}9190 + 0{,}6743}{3} = 1{,}0822\text{ meq/g}$$

Tabel Penentuan Kadar Lakton

V Titran (mL)	V Sampel Na_2CO_3 (mL)	N Na_2CO_3	N HCl	V HCl (mL)	N NaOH	V NaOH (mL)	Massa Karbon (g)	N Lakton (meq/g)
25	5	0,05	0,0457	10	0,0490	5	0,1002	0,2428
25	5	0,05	0,0457	10	0,0490	4,9	0,1002	0,7326
25	5	0,05	0,0457	10	0,0490	5,2	0,1002	1,7109
Rata-Rata								0,8954

Contoh Perhitungan Kadar lakton KCKS

$$n_{lakton} = \frac{[V_{Na_2CO_3}\, N_{Na_2CO_3} - (V_{HCl}\, N_{HCl} - V_{NaOH}\, N_{NaOH})]\frac{V_p}{V_s}}{w} - n_{karboksil}$$

$$n_{lakton} = \frac{[5\text{ mL} \times 0{,}05\text{ N} - (10\text{ mL} \times 0{,}0457\text{ N} - 5\text{ mL} \times 0{,}0490\text{ N})]\frac{25}{5}}{0{,}1002\text{ g}} - 1{,}6533\text{ meq/g}$$

$$n_{lakton} = 0{,}2428\text{ meq/gram}$$

$$\text{N Lakton} = \frac{\text{simplo + duplo + triplo}}{3} = \frac{0{,}2428 + 0{,}7326 + 1{,}7109}{3} = 0{,}8954\text{ meq/g}$$

Tabel Penentuan Kadar Fenol

V sampel (mL)	V Titran NaOH (mL)	N NaOH	N HCl	V HCl (mL)	N NaOH	V NaOH (mL)	Massa Karbon (g)	N Fenol (meq/g)
25	5	0,0490	0,0457	10	0,0490	5,7	0,1002	1,4620
25	5	0,0490	0,0457	10	0,0490	5,5	0,1002	1,2175
25	5	0,0490	0,0457	10	0,0490	5,7	0,1002	0,9730
Rata-Rata								1,2175

Contoh Perhitungan Kadar Fenol KCKS

$$n_{fenol} = \frac{[V_{NaOH}\, N_{NaOH} - (V_{HCl}\, N_{HCl} - V_{NaOH}\, N_{NaOH})]\frac{V_p}{V_s}}{w} - n_{karboksil} - n_{lakton}$$

$$n_{fenol} = \frac{[5\text{ mL} \times 0{,}0490\text{ N} - (10\text{ mL} \times 0{,}0457\text{ N} - 5{,}7\text{ mL} \times 0{,}0490\text{ N})]\frac{25}{5}}{0{,}1002\text{ g}} - 1{,}6533 - 0{,}2428$$

$$n_{fenol} = 1{,}4620\text{ meq/gram}$$

$$\text{N Fenol} = \frac{\text{simplo + duplo + triplo}}{3} = \frac{1{,}4620 + 1{,}2175 + 0{,}9730}{3} = 1{,}2175\text{ meq/g}$$

Tabel Penentuan Kadar Basa Total

V Titran (mL)	V Sampel HCl (mL)	N HCl	N NaOH	V NaOH (mL)	N HCl	V HCl (mL)	Massa Karbon (g)	N Basa Total (meq/g)
25	5	0,0457	0,0490	10	0,0457	7	0,1006	2,9025
25	5	0,0457	0,0490	10	0,0457	7,2	0,1006	3,3568
25	5	0,0457	0,0490	10	0,0457	7,1	0,1006	3,1297
Rata-Rata								3,1297

Contoh Perhitungan Kadar Basa Total KCKS

$$n_{basa\ total} = \frac{[V_{HCl}\ N_{HCl} - (V_{NaOH}\ N_{NaOH} - V_{HCl}\ N_{HCl})]\ \frac{V_p}{V_s}}{w}$$

$$n_{basa\ total} = \frac{[5\ mL \times 0{,}0457\ N - (10\ mL \times 0{,}0490\ N - 7\ mL \times 0{,}0457\ N)]\ \frac{25}{5}}{0{,}1006\ g}$$

$n_{basa\ total}$ = 2,9025 meq/gram

$$\text{N Basa Total} = \frac{\text{simplo + duplo + triplo}}{3} = \frac{2{,}9025 + 3{,}3568 + 3{,}1297}{3} = 3{,}1297\ \text{meq/g}$$

Karbon Aktif Cangkang Kelapa Sawit

Tabel Penentuan Kadar Karboksil

V Titran (mL)	V Sampel $NaHCO_3$ (mL)	N $NaHCO_3$	N HCl	V HCl (mL)	N NaOH	V NaOH (mL)	Massa Karbon (g)	N Karboksil (meq/g)
25	5	0,05	0,0457	10	0,0490	4,4	0,1008	0,4265
25	5	0,05	0,0457	10	0,0490	4,4	0,1008	0,4265
25	5	0,05	0,0457	10	0,0490	4,3	0,1008	0,1835
Rata-rata								0,3455

Contoh Perhitungan Kadar Karboksil KACKS

$$n_{karboksil} = \frac{[V_{NaHCO_3}\, N_{NaHCO_3} - (V_{HCl}\, N_{HCl} - V_{NaOH}\, N_{NaOH})]\, \frac{V_p}{V_s}}{w}$$

$$n_{karboksil} = \frac{[5\ mL \times 0{,}05\ N - (10\ mL \times 0{,}0457\ N - 4{,}4\ mL \times 0{,}0490\ N)]\, \frac{25}{5}}{0{,}1008\ g}$$

$$n_{karboksil} = 0{,}4265\ meq/gram$$

$$N\ Karboksil = \frac{simplo + duplo + triplo}{3} = \frac{0{,}4265 + 0{,}4265 + 0{,}1835}{3} = 0{,}3455\ meq/g$$

Tabel Penentuan Kadar Lakton

V Titran (mL)	V Sampel Na_2CO_3 (mL)	N Na_2CO_3	N HCl	V HCl (mL)	N NaOH	V NaOH (mL)	Massa Karbon (g)	N Lakton (meq/g)
25	5	0,05	0,0457	10	0,0490	4,7	0,1009	0,7280
25	5	0,05	0,0457	10	0,0490	4,6	0,1009	0,4852
25	5	0,05	0,0457	10	0,0490	4,4	0,1009	0,2426
Rata-rata								0,4852

Contoh Perhitungan Kadar lakton KACKS

$$n_{lakton} = \frac{[V_{Na_2CO_3}\, N_{Na_2CO_3} - (V_{HCl}\, N_{HCl} - V_{NaOH}\, N_{NaOH})]\, \frac{V_p}{V_s}}{w} - n_{karboksil}$$

$$n_{lakton} = \frac{[5\ mL \times 0{,}05\ N - (10\ mL \times 0{,}0457\ N - 4{,}7\ mL \times 0{,}0490\ N)]\, \frac{25}{5}}{0{,}1009\ g} - 0{,}4265$$

$$n_{lakton} = 0{,}7280\ meq/gram$$

$$N\ Lakton = \frac{simplo + duplo + triplo}{3} = \frac{0{,}7280 + 0{,}4852 + 0{,}2426}{3} = 0{,}4852\ meq/g$$

Tabel Penentuan Kadar Fenol

V Titran (mL)	V Sampel NaOH (mL)	N NaOH	N HCl	V HCl (mL)	N NaOH	V NaOH (mL)	Massa Karbon (g)	N Fenol (meq/g)
25	5	0,0490	0,0457	10	0,0490	5	0,1005	0,4871
25	5	0,0490	0,0457	10	0,0490	4,9	0,1005	0,4862
25	5	0,0490	0,0457	10	0,0490	5,1	0,1005	1,4594
Rata-Rata								0,8109

Contoh Perhitungan Kadar Fenol KACKS

$$n_{fenol} = \frac{[V_{NaOH} N_{NaOH} - (V_{HCl} N_{HCl} - V_{NaOH} N_{NaOH})] \frac{Vp}{Vs}}{w} - n_{karboksil} - n_{lakton}$$

$$n_{fenol} = \frac{[5\ mL \times 0{,}0490\ N - (10\ mL \times 0{,}0457\ N - 5\ mL \times 0{,}0490\ N)] \frac{25}{5}}{0{,}1005\ g} - 0{,}4265 - 0{,}7280$$

$$n_{fenol} = 0{,}4871\ meq/gram$$

$$N\ fenol = \frac{simplo + duplo + triplo}{3} = \frac{0{,}4871 + 0{,}4862 + 1{,}4594}{3} = 0{,}8109\ meq/g$$

Tabel Penentuan Kadar Basa Total

V sampel (mL)	V Titran HCl (mL)	N HCl	N NaOH	V NaOH (mL)	N HCl	V HCl (mL)	Massa Karbon (g)	N Basa Total (meq/g)
25	5	0,0457	0,0490	10	0,0457	6,8	0,1	2,4630
25	5	0,0457	0,0490	10	0,0457	6,5	0,1	1,7775
25	5	0,0457	0,0490	10	0,0457	6,1	0,1	0,8635
Rata-Rata								1,7013

Contoh Perhitungan Kadar Basa Total KACKS

$$n_{\text{basa total}} = \frac{[V_{HCl}\, N_{HCl} - (V_{NaOH}\, N_{NaOH} - V_{HCl}\, N_{HCl})]\,\frac{V_p}{V_s}}{w}$$

$$n_{\text{basa total}} = \frac{[5\text{ mL} \times 0{,}0457\text{ N} - (10\text{ mL} \times 0{,}0490\text{ N} - 6{,}8\text{ mL} \times 0{,}0457\text{ N})]\,\frac{25}{5}}{0{,}1000\text{ g}}$$

$$n_{\text{basa total}} = 2{,}4630 \text{ meq/gram}$$

$$\text{N Basa Total} = \frac{\text{simplo + duplo + triplo}}{3} = \frac{2{,}4630 + 1{,}7775 + 0{,}8635}{3} = 1{,}7013 \text{ meq/g}$$

Lampiran 5. Uji Daya Adsorpsi Metilen Biru Berdasarkan pH Optimum

Karbon Aktif Cangkang Kelapa Sawit

Simplo

pH	C_0	C_e	Abs	Massa	V	Q_e
3	44,6044	0,7488	0,082	0,2003	0,025	5,4737
5	45,5619	0,2557	0,039	0,2001	0,025	5,6604
7	**54,5814**	**0,1983**	**0,034**	**0,2002**	**0,025**	**6,7910**
9	52,3624	0,0034	0,017	0,2002	0,025	6,5383
11	52,0011	0,0378	0,020	0,2001	0,025	6,4921

Duplo

pH	C_0	C_e	Abs	Massa	V	Q_e
3	44,6044	0,6685	0,075	0,2003	0,025	5,4837
5	45,5619	0,3245	0,045	0,2002	0,025	5,6490
7	**54,5814**	**0,0493**	**0,021**	**0,2003**	**0,025**	**6,8063**
9	52,3624	-0,0080	0,016	0,2003	0,025	6,5365
11	52,0011	-0,0080	0,016	0,2002	0,025	6,4942

Triplo

pH	C0	C_e	Abs	Massa	V	Q_e
3	44,6044	0,6915	0,077	0,2002	0,025	5,4836
5	45,5619	0,3016	0,043	0,2002	0,025	5,6518
7	**54,5814**	**0,0378**	**0,020**	**0,2001**	**0,025**	**6,8145**
9	52,3624	-0,0080	0,016	0,2002	0,025	6,4946
11	52,0011	-0,0080	0,016	0,2003	0,025	6,4914

Contoh Perhitungan Metilen Biru yang teradsorpsi pada massa 0,2 g dengan waktu kontak selama 30 menit pada pH 7

1. simplo

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)\,V}{m} = \frac{(54{,}5814\ \text{mg/L} - 0{,}1983\ \text{mg/L})\ 0{,}025\ \text{L}}{0{,}2002\ \text{g}} = 6{,}7910\ \text{mg/g}$$

2. duplo

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)\,V}{m} = \frac{(54{,}5814\ \text{mg/L} - 0{,}0493\ \text{mg/L})\ 0{,}025\ \text{L}}{0{,}2003\ \text{g}} = 6{,}8063\ \text{mg/g}$$

3. triplo

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)\,V}{m} = \frac{(54{,}5814\ \text{mg/L} - 0{,}0378\ \text{mg/L})0{,}025\ \text{L}}{0{,}2001\ \text{g}} = 6{,}8145\ \text{mg/g}$$

Rata-Rata Q_e

$$Q_e \text{ rata-rata} = \frac{\text{simplo} + \text{duplo} + \text{triplo}}{3} = \frac{6{,}7910 + 6{,}8063 + 6{,}8145}{3} = 6{,}8039\ \text{mg/g}$$

Karbon Cangkang Kelapa Sawit

Simplo

pH	C_0	C_e	Abs	Massa	V	Q_e
3	44,6044	29,1433	2,558	0,2001	0,025	1,9316
5	45,5619	29,7856	2,614	0,2002	0,025	1,9700
7	**54,5814**	**2,5493**	**0,239**	**0,2003**	**0,025**	**6,4942**
9	52,3624	1,5057	0,148	0,2	0,025	6,3570
11	52,0011	2,1135	0,201	0,2001	0,025	6,2328

Duplo

pH	C_0	C_e	Abs	Massa	V	Q_e
3	44,6044	29,1318	2,557	0,2	0,025	1,9340
5	45,5619	29,7052	2,607	0,2	0,025	1,9820
7	**54,5814**	**2,4919**	**0,234**	**0,2**	**0,025**	**6,5111**
9	52,3624	1,4713	0,145	0,2001	0,025	6,3582
11	52,0011	2,0905	0,199	0,2002	0,025	6,2325

Triplo

pH	C_0	C_e	Abs	Massa	V	Q_e
3	44,6044	28,8910	2,536	0,2001	0,025	1,9631
5	45,5619	29,5447	2,593	0,2001	0,025	2,0011
7	**54,5814**	**2,4919**	**0,234**	**0,2003**	**0,025**	**6,5014**
9	52,3624	1,4827	0,146	0,2	0,025	6,3599
11	52,0011	2,1135	0,201	0,2	0,025	6,2359

Contoh Perhitungan Metilen Biru yang teradsorpsi pada massa 0,2 g dengan waktu kontak selama 30 menit pada pH 7

1. simplo

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)\,V}{m} = \frac{(54{,}5814\ \text{mg/L} - 2{,}5493\ \text{mg/L})\ 0{,}025\ \text{L}}{0{,}2003\ \text{g}} = 6{,}4942\ \text{mg/g}$$

2. duplo

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)\,V}{m} = \frac{(54{,}5814\ \text{mg/L} - 2{,}4919\ \text{mg/L})\ 0{,}025\ \text{L}}{0{,}2000\ \text{g}} = 6{,}5111\ \text{mg/g}$$

3. triplo

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)\,V}{m} = \frac{(54{,}5814\ \text{mg/L} - 2{,}4919\ \text{mg/L})\ 0{,}025\ \text{L}}{0{,}2003\ \text{g}} = 6{,}5014\ \text{mg/g}$$

Rata-Rata Q_e

$$Q_e \text{ rata-rata} = \frac{\text{simplo} + \text{duplo} + \text{triplo}}{3} = \frac{6{,}4942 + 6{,}5111 + 6{,}5014}{3} = 6{,}5022\ \text{mg/g}$$

Lampiran 6. Uji Daya Adsorpsi Metilen Biru Berdasarkan Waktu Kontak Optimum

Karbon Aktif Cangkang Kelapa Sawit

Simplo

Waktu Kontak	C_0	C_e	Abs	Massa	V	Q_e
15	45,4644	0,2442	0,038	0,2001	0,025	5,6496
30	45,4644	0,0837	0,024	0,2001	0,025	5,6697
45	**45,4644**	**0,0263**	**0,019**	**0,2001**	**0,025**	**5,6769**
60	45,4644	0,0149	0,018	0,2002	0,025	5,6755
75	45,4644	0,1066	0,026	0,2001	0,025	5,6668

Duplo

Waktu Kontak	C_0	C_e	Abs	Massa	V	Q_e
15	45,4644	0,1983	0,034	0,2002	0,025	5,6526
30	45,4644	0,0607	0,022	0,2003	0,025	5,6669
45	**45,4644**	**0,0034**	**0,017**	**0,2001**	**0,025**	**5,6797**
60	45,4644	0,0034	0,020	0,2001	0,025	5,6797
75	45,4644	0,0378	0,101	0,2002	0,025	5,6726

Triplo

Waktu Kontak	C_0	C_e	Abs	Massa	V	Q_e
15	45,4644	0,1639	0,031	0,2000	0,025	5,6625
30	45,4644	0,0722	0,023	0,2002	0,025	5,6683
45	**45,4644**	**0,0034**	**0,017**	**0,2002**	**0,025**	**5,6769**
60	45,4644	0,0034	0,017	0,2003	0,025	5,6741
75	45,4644	0,1639	0,031	0,2001	0,025	5,6597

Contoh Perhitungan Metilen Biru yang teradsorpsi pada massa 0,2 g dengan waktu kontak selama 45 menit pada pH 7

1. simplo

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)\,V}{m} = \frac{(45{,}4644 \text{ mg/L} - 0{,}0263 \text{ mg/L})\ 0{,}025 \text{ L}}{0{,}2001 \text{ g}} = 5{,}6769 \text{ mg/g}$$

2. duplo

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)\,V}{m} = \frac{(45{,}4644 \text{ mg/L} - 0{,}0034 \text{ mg/L})\ 0{,}025 \text{ L}}{0{,}2001 \text{ g}} = 5{,}6797 \text{ mg/g}$$

3. triplo

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)\,V}{m} = \frac{(45{,}4644 \text{ mg/L} - 0{,}0034 \text{ mg/L})\ 0{,}025 \text{ L}}{0{,}2002 \text{ g}} = 5{,}6769 \text{ mg/g}$$

Rata-Rata Q_e

$$Q_e \text{ rata-rata} = \frac{\text{simplo} + \text{duplo} + \text{triplo}}{3} = \frac{5{,}6769 + 5{,}6797 + 5{,}6769}{3} = 5{,}6778 \text{ mg/g}$$

Karbon Cangkang Kelapa Sawit

Simplo

Waktu Kontak	C_0	C_e	Abs	Massa	V	Q_e
15	45,4645	3,1456	0,291	0,2003	0,025	5,2819
30	45,4645	2,1479	0,204	0,2001	0,025	5,4118
45	**45,4645**	**0,2098**	**0,035**	**0,2002**	**0,025**	**5,6511**
60	45,4645	1,5860	0,155	0,2002	0,025	5,4793
75	45,4645	2,4002	0,226	0,2001	0,025	5,3803

Duplo

Waktu Kontak	C_0	C_e	Abs	Massa	V	Q_e
15	45,4645	2,9621	0,275	0,2002	0,025	5,3074
30	45,4645	2,1823	0,207	0,2	0,025	5,4102
45	**45,4645**	**0,1869**	**0,033**	**0,2001**	**0,025**	**5,6568**
60	45,4645	1,6089	0,157	0,2001	0,025	5,4792
75	45,4645	2,3084	0,218	0,2003	0,025	5,3864

Triplo

Waktu Kontak	C_0	C_e	Abs	Massa	V	Q_e
15	45,4645	2,9736	0,276	0,2002	0,025	5,3060
30	45,4645	2,125	0,202	0,2002	0,025	5,4120
45	45,4645	**0,1869**	**0,033**	**0,2001**	**0,025**	**5,6568**
60	45,4645	1,6089	0,157	0,2002	0,025	5,4764
75	45,4645	2,2626	0,214	0,2003	0,025	5,3921

Contoh Perhitungan Metilen Biru yang teradsorpsi pada massa 0,2 g dengan waktu kontak selama 45 menit pada pH 7

1. simplo

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)\,V}{m} = \frac{(45{,}4645\ \text{mg/L} - 0{,}2098\ \text{mg/L})\ 0{,}025\ \text{L}}{0{,}2002\ \text{g}} = 5{,}6511\ \text{mg/g}$$

2. duplo

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)\,V}{m} = \frac{(45{,}4645\ \text{mg/L} - 0{,}1869\ \text{mg/L})\ 0{,}025\ \text{L}}{0{,}2001\ \text{g}} = 5{,}6568\ \text{mg/g}$$

3. triplo

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)\,V}{m} = \frac{(45{,}4645\ \text{mg/L} - 0{,}1869\ \text{mg/L})\ 0{,}025\ \text{L}}{0{,}2001\ \text{g}} = 5{,}6568\ \text{mg/g}$$

Rata-Rata Q_e

$$Q_e \text{ rata-rata} = \frac{\text{simplo} + \text{duplo} + \text{triplo}}{3} = \frac{5{,}6511 + 5{,}6568 + 5{,}6568}{3} = 5{,}6549\ \text{mg/g}$$

Lampiran 7. Penentuan Model Isoterm

Tabel Konsentrasi KACKS

Kons	C_0	C_e	V	Massa	Abs	Q_e	Q_e rata rata
25	22,7580	0,0034	0,025	0,2003	0,017	2,8400	2,8400
	22,7580	0,0149	0,025	0,2002	0,018	2,8400	
	22,7580	0,0149	0,025	0,2002	0,018	2,8400	
50	51,2156	0,0263	0,025	0,2000	0,019	6,3986	6,3950
	51,2156	0,0493	0,025	0,2000	0,021	6,3957	
	51,2156	0,0378	0,025	0,2002	0,020	6,3908	
75	74,9140	0,1066	0,025	0,2001	0,026	9,3462	9,3478
	74,9140	0,0493	0,025	0,2001	0,021	9,3534	
	74,9140	0,0493	0,025	0,2003	0,021	9,3440	
100	95,5562	2,0791	0,025	0,2002	0,198	11,6729	11,6681
	95,5562	2,0791	0,025	0,2003	0,198	11,6671	
	95,5562	2,1020	0,025	0,2003	0,200	11,6642	
125	127,3567	11,3681	0,025	0,2002	1,008	14,4840	14,4974
	127,3567	11,2993	0,025	0,2000	1,002	14,5071	
	127,3567	11,2878	0,025	0,2001	1,001	14,5013	

Contoh Perhitungan Metilen Biru yang teradsorpsi pada massa 0,2 g dengan waktu kontak selama 45 menit pada pH 7 dengan konsentrasi 75 mg/L

1. simplo

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)\,V}{m} = \frac{(74{,}9140\ \text{mg/L} - 0{,}1066\ \text{mg/L})\ 0{,}025\ \text{L}}{0{,}2001\ \text{g}} = 9{,}3462\ \text{mg/g}$$

2. duplo

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)\,V}{m} = \frac{(74{,}9140\ \text{mg/L} - 0{,}0493\ \text{mg/L})\ 0{,}025\ \text{L}}{0{,}2001\ \text{g}} = 9{,}3534\ \text{mg/g}$$

3. triplo

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)\,V}{m} = \frac{(74{,}9140\ \text{mg/L} - 0{,}0493\ \text{mg/L})\ 0{,}025\ \text{L}}{0{,}2003\ \text{g}} = 9{,}3440\ \text{mg/g}$$

Rata-Rata Q_e

$$Q_e \text{ rata-rata} = \frac{\text{simplo} + \text{duplo} + \text{triplo}}{3} = \frac{9{,}3462 + 9{,}3534 + 9{,}3440}{3} = 9{,}3478\ \text{mg/g}$$

Tabel Kapasitas Adsorpsi

C_e	Q_e	C_e/Q_e	log C_e	log Q_e
0,0110	2,8400	0,0039	-1,9552	0,4533
0,0378	6,3950	0,0059	-1,4220	0,8058
0,0684	9,3479	0,0073	-1,1647	0,9707
2,0867	11,6681	0,1788	0,3194	1,0670
11,3184	14,4975	0,7807	1,0537	1,1612

Langmuir				
No.	**x**	**y**	**xy**	**x^2**
1	0,0110	0,0039	0,0000429	0,00012
2	0,0378	0,0059	0,000223	0,00143
3	0,0684	0,0073	0,000499	0,00468
4	2,0867	0,1788	0,373102	4,35432
5	11,3184	0,7807	8,836274	128,467
Σ	**13,5223**	**0,9766**	**9,210142**	**132,467**

A = $n\Sigma xy-\Sigma x\Sigma y/n\Sigma x^2-(\Sigma x)^2$ = 0,0685

B = $\Sigma x2\Sigma y-\Sigma x\Sigma xy/n\Sigma x^2-(\Sigma x)^2$ = 0,0101

y = 0,0685x + 0,0101 dengan nilai R^2 = 0,9981

Freundlich				
No.	**x**	**y**	**xy**	**x^2**
1	-1,9552	0,4533	-0,8862	3,8228
2	-1,4220	0,8058	-1,1458	2,0220
3	-1,1647	0,9707	-1,1305	1,3565
4	0,3194	1,0670	0,3408	0,1020
5	1,0537	1,1612	1,2235	1,1102
Σ	**-3,1688**	**4,4580**	**-1,5983**	**8,4137**

A = $n\Sigma xy-\Sigma x\Sigma y/n\Sigma x^2-(\Sigma x)^2$ = 0,1915

B = $\Sigma x2\Sigma y-\Sigma x\Sigma xy/n\Sigma x^2-(\Sigma x)^2$ = 1,013

y = 0,1915x + 1,013 dengan nilai R^2 = 0,7602

Kapasitas Adsorpsi KACKS

Kapasitas Adsorpsi Maksimum KACKS $AlCl_3$ Langmuir

Kapasitas Adsorpsi Maksimum, Q_{max} = 1/a = 1/0,0685 = 14,5985 mg/L

Konstanta Langmuir, K_L = 1/(Q_{max} x b) = 1/(14,5985 x 0,0101) = 6,7821 L/mg

Kapasitas Adsorpsi Frendluich

Intensitas Adsorpsi, n = 1/a = 1/0,1915 = 5,2192

Kapasitas Adsorpsi, K_F = 10^b = $10^{1,013}$ = 10,3039 mg/g

Tabel Konsentrasi KCKS

Kons	C_0	C_e	v	massa	abs	Q_e	Q_e rata rata
25	22,7580	0,4736	0,025	0,2003	0,058	2,7813	2,7846
	22,7580	0,4506	0,025	0,2002	0,056	2,7856	
	22,7580	0,4392	0,025	0,2002	0,055	2,7870	
50	51,2156	2,2511	0,025	0,2	0,213	6,1205	6,1242
	51,2156	2,1938	0,025	0,2	0,208	6,1277	
	51,2156	2,1708	0,025	0,2002	0,206	6,1244	
75	74,9139	5,7717	0,025	0,2001	0,52	8,6384	8,6417
	74,9139	5,7259	0,025	0,2002	0,516	8,6398	
	74,9139	5,6341	0,025	0,2003	0,508	8,6470	
100	95,55619	20,4506	0,025	0,2002	1,8	9,3788	9,3722
	95,5561	20,5309	0,025	0,2	1,807	9,3781	
	95,5561	20,5653	0,025	0,2003	1,81	9,3598	
125	127,3567	38,5011	0,025	0,2002	3,374	11,0958	11,1037
	127,3567	38,4094	0,025	0,2	3,366	11,1184	
	127,3567	38,5814	0,025	0,2	3,381	11,0969	

Contoh Perhitungan Metilen Biru yang teradsorpsi pada massa 0,2 g dengan waktu kontak selama 45 menit pada pH 7 dengan konsentrasi 75 mg/L

1. simplo

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)\,V}{m} = \frac{(74{,}9139\ \text{mg/L} - 5{,}7717\ \text{mg/L})\ 0{,}025\ \text{L}}{0{,}2001\ \text{g}} = 8{,}6384\ \text{mg/g}$$

2. duplo

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)\,V}{m} = \frac{(74{,}9139\ \text{mg/L} - 5{,}7259\ \text{mg/L})\ 0{,}025\ \text{L}}{0{,}2002\ \text{g}} = 8{,}6398\ \text{mg/g}$$

3. triplo

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)\,V}{m} = \frac{(74{,}9139\ \text{mg/L} - 5{,}6341\ \text{mg/L})\ 0{,}025\ \text{L}}{0{,}2003\ \text{g}} = 8{,}647\ \text{mg/g}$$

Rata-Rata Q_e

$$Q_e \text{ rata-rata} = \frac{\text{simplo} + \text{duplo} + \text{triplo}}{3} = \frac{8{,}6384 + 8{,}6398 + 8{,}647}{3} = 8{,}6417\ \text{mg/g}$$

Tabel Kapasitas Adsorpsi

C_e	Q_e	C_e/Q_e	log C_e	log Q_e
0,4545	2,7846	0,1632	-0,3424	0,4447
2,2052	6,1242	0,3600	0,3434	0,7870
5,7106	8,6417	0,6608	0,7566	0,9366
20,5157	9,3722	2,1889	1,3120	0,9718
38,4973	11,1037	3,4670	1,5854	1,0454

Langmuir				
No.	**x**	**y**	**xy**	**x^2**
1	0,4545	0,1632	0,0741	0,2065
2	2,2052	0,3600	0,7938	4,8629
3	5,7106	0,6608	3,7735	32,6109
4	20,5157	2,1889	44,9068	420,8939
5	38,4973	3,4670	133,4701	1482,042
Σ	**67,3833**	**6,8399**	**183,0186**	**1940,616**

A = $n\Sigma xy-\Sigma x\Sigma y/n\Sigma x^2-(\Sigma x)^2$ = 0,088

B = $\Sigma x2\Sigma y-\Sigma x\Sigma xy/n\Sigma x^2-(\Sigma x)^2$ = 0,1824

y = 0,088x + 0,1824 dengan nilai R^2 = 0,9931

Freundlich				
No.	**x**	**y**	**xy**	**x^2**
1	-0,3425	0,4447	-0,1523	0,1173
2	0,3434	0,7870	0,2702	0,1179
3	0,7566	0,9366	0,7086	0,5724
4	1,3120	0,9718	1,2750	1,7213
5	1,5854	1,0454	1,6573	2,5134
Σ	**3,6549**	**4,1855**	**3,7589**	**5,0425**

A = $n\Sigma xy-\Sigma x\Sigma y/n\Sigma x^2-(\Sigma x)^2$ = 0,295

B = $\Sigma x2\Sigma y-\Sigma x\Sigma xy/n\Sigma x^2-(\Sigma x)^2$ = 0,6215

y = 0,295x + 0,6215 dengan nilai R^2 = 0,9054

Kapasitas Adsorpsi KCKS

Kapasitas Adsorpsi Maksimum KCKS Langmuir

Kapasitas Adsorpsi Maksimum, Q_{max} = 1/a = 1/0,088 = 11,3636 mg/L

Konstanta Langmuir, K_L = 1/(Q_{max} x b) = 1/(11,3636 x 0,1824) = 0,4824 L/mg

Kapasitas Adsorpsi Frendluich

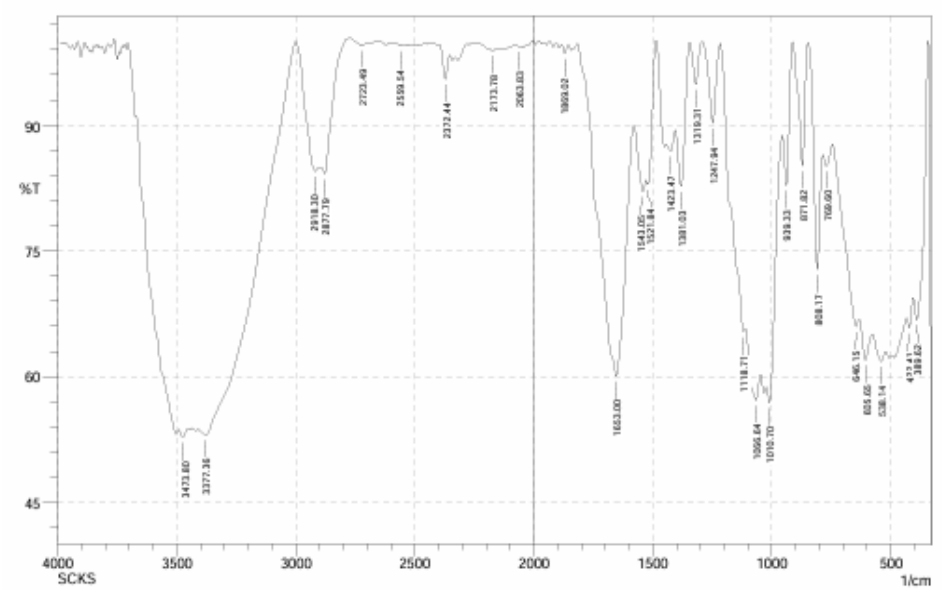
Intensitas Adsorpsi, n = 1/a = 1/0,295 = 3,3898

Kapasitas Adsorpsi, K_F = 10^b = $10^{0,6215}$ = 4,1831 mg/g

Lampiran 8. Data Hasil FTIR

Serbuk Cangkang Kelapa Sawit

SHIMADZU



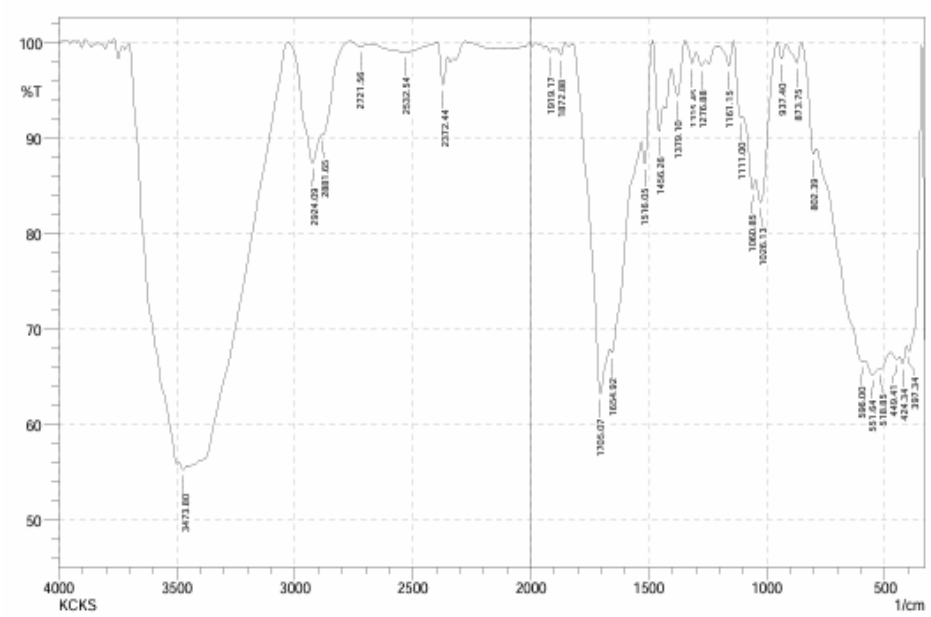
No.	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area
1	389.62	66.792	10.215	405.05	343.33	7.617	2.856
2	422.41	65.783	2.038	432.05	406.98	4.353	0.182
3	538.14	61.839	1.734	576.72	522.71	10.877	0.4
4	605.65	62.015	3.919	632.65	578.64	10.491	0.709
5	646.15	65.975	3.019	744.52	634.58	13.738	0.911
6	769.6	85.126	1.804	785.03	744.52	2.641	0.208
7	808.17	72.773	18.332	846.75	786.96	4.342	2.357
8	871.82	85.132	14.69	912.33	848.68	1.933	1.887
9	939.33	82.848	9.926	954.76	912.33	2.013	0.955
10	1010.7	56.917	7.088	1022.27	956.69	10.072	1.26
11	1066.64	57.227	4.538	1109.07	1049.28	13.445	1.35
12	1118.71	65.342	2.885	1215.15	1111	11.225	1.526
13	1247.94	90.233	9.595	1292.31	1217.08	1.438	1.387
14	1319.31	94.847	5.048	1344.38	1292.31	0.544	0.521
15	1381.03	82.715	10.821	1404.18	1346.31	2.929	1.541
16	1423.47	86.922	1.621	1442.75	1406.11	2.105	0.159
17	1521.84	82.936	2.832	1527.62	1487.12	1.905	0.416
18	1543.05	82.076	3.081	1579.7	1529.55	3.565	0.407
19	1653	60.034	32.809	1815.02	1581.63	26.684	21.042
20	1869.02	98.571	0.973	1882.52	1855.52	0.107	0.054
21	2063.83	99.391	0.031	2079.26	2059.98	0.047	0.001
22	2173.78	98.954	0.424	2241.28	2129.41	0.377	0.103
23	2372.44	95.487	3.398	2399.45	2353.16	0.496	0.292
24	2559.54	99.471	0.142	2582.68	2546.04	0.067	0.011
25	2723.49	99.514	0.525	2773.64	2686.84	0.067	0.097
26	2877.79	84.173	3.592	2900.94	2773.64	3.964	0.422
27	2918.3	84.5	2.869	2999.31	2902.87	4.235	0.811
28	3377.36	53.092	4.061	3408.22	3001.24	64.109	9.336
29	3473.8	52.785	0.899	3491.16	3454.51	10.031	0.132

Comment;
SCKS

Date/Time; 3/4/2026 11:40:36 AM
No. of Scans;
Resolution;
Apodization;

Karbon Cangkang Kelapa Sawit

SHIMADZU



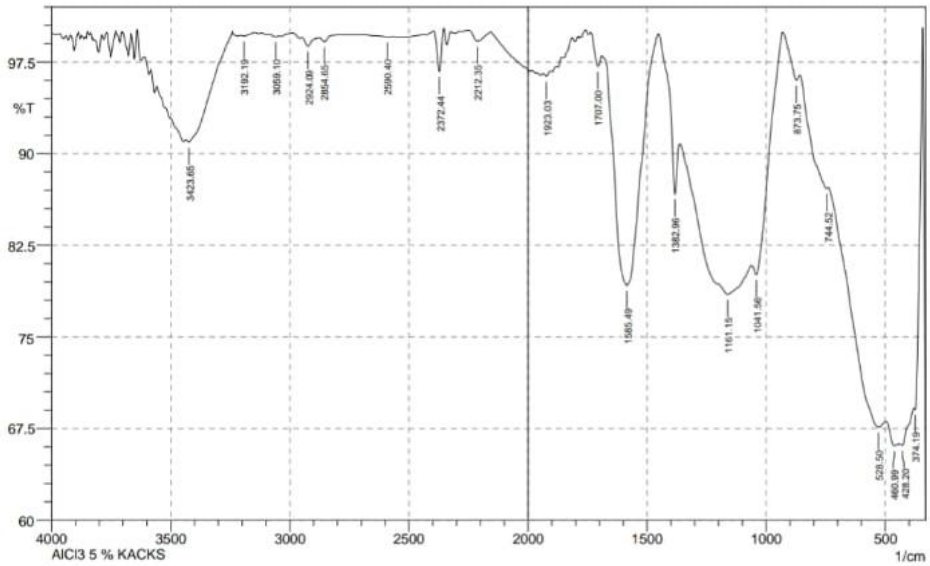
No.	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area
1	397.34	67.674	5.272	406.98	343.33	8.3	3.123
2	424.34	66.364	1.152	435.91	408.91	4.699	0.112
3	449.41	66.791	0.415	474.49	437.84	6.352	0.043
4	518.85	65.8	0.077	520.78	476.42	7.819	0.029
5	551.64	65.199	0.998	584.43	522.71	11.246	0.193
6	596	66.591	1.105	788.89	586.36	23.675	0.866
7	802.39	88.267	2.941	852.54	788.89	1.856	0.213
8	873.75	97.798	2.073	918.12	852.54	0.328	0.283
9	937.4	98.259	1.644	954.76	918.12	0.144	0.127
10	1026.13	83.226	5.735	1047.35	956.69	4.13	1.189
11	1060.85	84.623	2.361	1103.28	1049.28	2.948	0.207
12	1111	92.123	1.672	1141.86	1103.28	0.85	0.181
13	1161.15	97.489	2.433	1201.65	1141.86	0.33	0.282
14	1276.88	97.579	0.856	1300.02	1259.52	0.349	0.083
15	1315.45	97.734	1.598	1348.24	1300.02	0.242	0.145
16	1379.1	94.41	4.086	1404.18	1348.24	0.891	0.557
17	1456.26	90.666	5.36	1485.19	1436.97	1.256	0.543
18	1516.05	87.287	5.784	1531.48	1485.19	1.671	0.573
19	1654.92	67.5	1.977	1664.57	1533.41	13.796	0.444
20	1705.07	63.216	12.666	1820.8	1666.5	16.407	3.395
21	1872.88	98.631	0.961	1886.38	1855.52	0.115	0.066
22	1919.17	98.989	0.522	1934.6	1905.67	0.095	0.034
23	2372.44	95.536	3.598	2397.52	2353.16	0.472	0.324
24	2532.54	98.99	0.419	2582.68	2397.52	0.556	0.237
25	2721.56	99.549	0.387	2765.92	2681.05	0.091	0.07
26	2881.65	90.316	0.32	2885.51	2765.92	2.042	-0.582
27	2924.09	87.369	5.516	3030.17	2885.51	4.617	1.4
28	3473.8	55.255	0.584	3489.23	3458.37	7.887	0.075

Comment;
KCKS

Date/Time; 3/4/2026 11:45:48 AM
No. of Scans;
Resolution;
Apodization;

Karbon Aktif Cangkang Kelapa Sawit

SHIMADZU



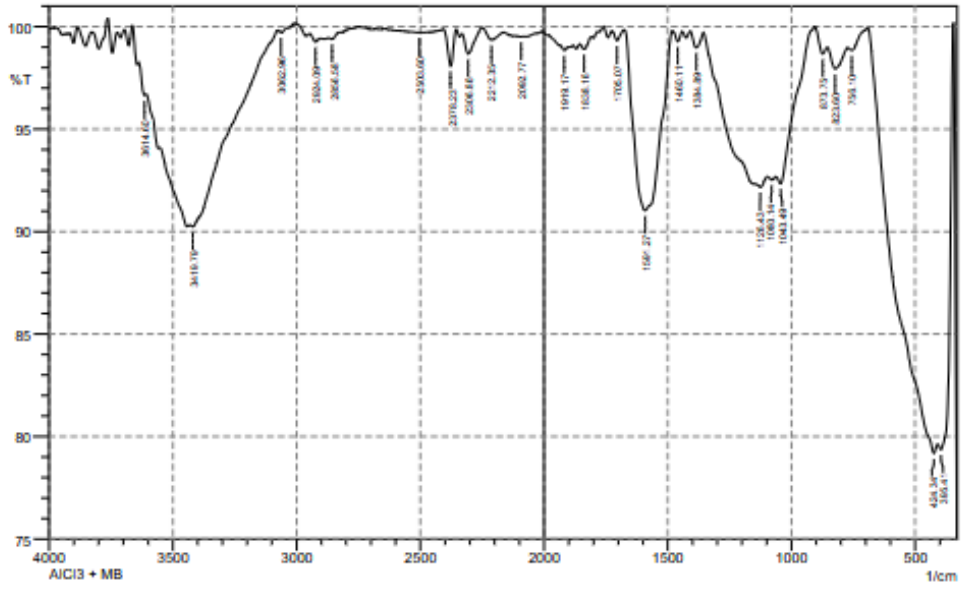
No.	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area
1	374.19	69.055	3.555	378.05	343.33	3.353	0.753
2	428.2	66.115	0.686	439.77	379.98	10.244	0.124
3	460.99	66.083	0.81	495.71	441.7	9.502	0.152
4	528.5	67.611	2.936	736.81	497.63	30.07	2.934
5	744.52	87.153	0.497	858.32	738.74	5.233	0.696
6	873.75	96.012	1.149	929.69	858.32	0.74	0.154
7	1041.56	80.101	3.378	1058.92	933.55	6.738	1.029
8	1161.15	78.486	5.682	1361.74	1060.85	26.217	5.978
9	1382.96	86.719	6.048	1452.4	1363.67	2.449	0.58
10	1585.49	79.199	19.587	1689.64	1454.33	12.108	10.97
11	1707	97.158	0.189	1737.86	1705.07	0.214	0.005
12	1923.03	96.328	0.311	1936.53	1905.67	0.476	0.02
13	2212.35	99.195	0.835	2252.86	2154.49	0.164	0.171
14	2372.44	96.723	3.428	2395.59	2353.16	0.27	0.296
15	2590.4	99.55	0.052	2638.62	2567.25	0.127	0.007
16	2854.65	99.145	0.389	2875.86	2792.93	0.177	0.032
17	2924.09	98.782	0.703	2949.16	2875.86	0.249	0.083
18	3059.1	99.562	0.114	3088.03	3045.6	0.065	0.011
19	3192.19	99.627	0.106	3205.69	3147.83	0.066	0.014
20	3423.65	90.93	0.792	3437.15	3242.34	4.455	0.522

Comment;
AlCl3 5 % KACKS

Date/Time; 4/30/2026 9:58:31 AM
No. of Scans;
Resolution;
Apodization;

Karbon Aktif Cangkang Kelapa Sawit setelah Dikontakkan dengan Metilen Biru

SHIMADZU



No.	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area
1	395.41	79.378	4.727	408.91	347.19	4.882	1.938
2	424.34	79.197	1.399	690.52	410.84	17.685	3.717
3	756.1	98.857	0.337	773.46	692.44	0.231	0.043
4	823.6	97.959	1.028	854.47	773.46	0.563	0.205
5	873.75	98.681	0.681	906.54	854.47	0.192	0.077
6	1043.49	92.345	1.297	1062.78	920.05	2.635	0.273
7	1080.14	92.537	0.141	1095.57	1064.71	1.031	0.011
8	1126.43	92.178	1.295	1355.96	1097.5	6.265	1.816
9	1384.89	98.986	0.766	1409.96	1355.96	0.161	0.102
10	1460.11	99.29	0.488	1481.33	1442.75	0.077	0.04
11	1591.27	91.04	8.779	1674.21	1481.33	4.785	4.63
12	1705.07	99.34	0.448	1722.43	1676.14	0.084	0.043
13	1838.16	98.909	0.372	1855.52	1809.23	0.176	0.04
14	1919.17	98.859	0.277	1982.82	1901.81	0.291	0.043
15	2092.77	99.512	0.043	2164.13	2079.26	0.158	0.018
16	2212.35	99.357	0.497	2250.93	2164.13	0.156	0.096
17	2306.86	98.684	1.06	2331.94	2250.93	0.253	0.184
18	2378.23	98.089	1.784	2409.09	2355.08	0.217	0.187
19	2503.6	99.718	0.168	2646.34	2409.09	0.224	0.108
20	2856.58	99.398	0.145	2872.01	2827.64	0.092	0.012
21	2924.09	99.27	0.263	2947.23	2902.87	0.114	0.025
22	3062.96	99.726	0.172	3078.39	3008.95	0.03	0.028
23	3419.79	90.252	0.375	3431.36	3078.39	7.659	0.171
24	3614.6	96.665	0.348	3637.75	3608.81	0.353	0.031

Lampiran 9. Data Hasil SAA

Serbuk Cangkang Kelapa Sawit

ALTAMIRA INSTRUMENTS

Summary Report

Workstation: Micro200B-02-Analysis Station1	Method: static volumetric method
Project: SAMPEL SAA UNHAS	Sample: CKS
Adsorbate: N2	Charge Number: #1
Bath Temperature: 77.35 K	Sample Weight: 0.4250(g)
Operator:	Degas Conditions:
Started: 2026-05-11 10:47:03	Completed: 2026-05-11 14:09:31

Surface Area

Single Point BET Surface Area at p/p0 =0.20000:	1.7774	(m^2/g)
BET Surface Area:	3.7064	(m^2/g)
Langmuir Surface Area:	4.35261	(m^2/g)
t-Plot Micropore Area:	0.00000	(m^2/g)
t-Plot External Surface Area:	3.70641	(m^2/g)
BJH Adsorption Cumulative Surface Area:	6.04755	(m^2/g)
BJH Desorption Cumulative Surface Area:	5.61092	(m^2/g)

Pore Volume

Total Pore Volume (adsorption) at p/p0 = 0.99000:	0.00868	(cm^3/g)
Total Pore Volume (desorption) at p/p0 = 0.99000:	0.00869	(cm^3/g)
t-Plot Micropore Volume:	0.00000	(cm^3/g)
BJH Adsorption Cumulative Volume:	0.01016	(cm^3/g)
BJH Desorption Cumulative Volume:	0.00979	(cm^3/g)

Pore Size

Average Pore Diameter (4V/A):	9.36601	(nm)
BJH Adsorption Median Pore Diameter:	7.73852	(nm)
BJH Adsorption Most Frequent Pore Diameter (dV/dD):	2.12006	(nm)
BJH Desorption Median Pore Diameter:	7.83754	(nm)
BJH Desorption Most Frequent Pore Diameter (dV/dD):	3.32054	(nm)

Pore Volume Percentage Report

ID	Pore Range	Pore Volume (cm^3/g)	Percentage (%)
1	2.00-10.00	0.00587	57.73
2	10.00-20.00	0.00127	12.51
3	20.00-50.00	0.00111	10.95
4	>50.00	0.00191	18.81

ALTAMIRA INSTRUMENTS

Isotherm Report

Workstation: Micro200B-02-Analysis Station1	Method: static volumetric method
Project: SAMPEL SAA UNHAS	Sample: CKS
Adsorbate: N2	Charge Number: #1
Bath Temperature: 77.35 K	Sample Weight: 0.4250(g)
Operator:	Degas Conditions:
Started: 2026-05-11 10:47:03	Completed: 2026-05-11 14:09:31

ID	p (kPa)	p/p0	V (mmol/g)	p0 (kPa)	Time
1	5.00287462	0.04966737	0.01152	100.728	11:54:58
2	10.48589499	0.10412893	0.01630	100.701	11:56:15
3	15.07576287	0.14973821	0.01893	100.681	11:59:03
4	20.04608524	0.19910534	0.02267	100.681	12:00:50
5	24.86788794	0.24714015	0.03049	100.623	12:11:24
6	29.94807416	0.29766298	0.03720	100.611	12:18:19
7	34.96519039	0.34763436	0.04475	100.580	12:23:40
8	39.90702953	0.39678392	0.05167	100.576	12:27:59
9	44.73086674	0.44481131	0.05902	100.561	12:31:36
10	49.92702037	0.49652527	0.06764	100.553	12:34:42
11	54.60233793	0.54306352	0.07566	100.545	12:37:36
12	59.76797382	0.59443345	0.08493	100.546	12:40:09
13	65.22454548	0.64876493	0.09564	100.536	12:42:31
14	69.72692918	0.69360325	0.10613	100.529	12:44:55
15	74.37986706	0.73998983	0.11914	100.515	12:49:50
16	80.29827384	0.79897540	0.13598	100.502	12:54:23
17	85.73653486	0.85312921	0.15102	100.497	12:56:23
18	90.66209787	0.90214148	0.16706	100.497	12:58:27
19	95.54086702	0.95069838	0.18889	100.495	13:00:30
20	99.64041657	0.99162158	0.25282	100.482	13:05:11
---	---	---	---	---	---
1	99.64041657	0.99162158	0.25282	100.482	13:05:11
2	95.24179318	0.94798339	0.19121	100.468	13:08:30
3	89.68349572	0.89267489	0.16569	100.466	13:10:39
4	84.91662495	0.84521417	0.14940	100.468	13:12:52
5	79.91375033	0.79546283	0.13498	100.462	13:15:11
6	74.96580764	0.74626029	0.12128	100.455	13:17:35
7	69.96089851	0.69650576	0.10905	100.446	13:20:06
8	65.03330098	0.64743611	0.09761	100.447	13:22:46
9	60.01211572	0.59747213	0.08744	100.443	13:25:37
10	55.06824207	0.54830864	0.07817	100.433	13:28:40
11	50.07147100	0.49859066	0.06875	100.426	13:31:58
12	45.06045832	0.44871037	0.06069	100.422	13:35:39
13	40.09827402	0.39940556	0.05266	100.395	13:39:55

ALTAMIRA INSTRUMENTS

Isotherm Report

Workstation: Micro200B-02-Analysis Station1	Method: static volumetric method
Project: SAMPEL SAA UNHAS	Sample: CKS
Adsorbate: N2	Charge Number: #1
Bath Temperature: 77.35 K	Sample Weight: 0.4250(g)
Operator:	Degas Conditions:
Started: 2026-05-11 10:47:03	Completed: 2026-05-11 14:09:31

ID	p (kPa)	p/p0	V (mmol/g)	p0 (kPa)	Time
14	34.06389984	0.33929412	0.04447	100.396	13:44:49
15	29.78124385	0.29667653	0.03862	100.383	13:48:53
16	25.01844211	0.24927564	0.03197	100.365	13:52:25
17	19.98504976	0.19914097	0.02625	100.356	13:55:20
18	15.03303804	0.14979686	0.02099	100.356	13:57:52
19	10.10137148	0.10066162	0.01630	100.350	14:01:20
20	5.14325621	0.05126513	0.01166	100.327	14:09:26

Karbon Cangkang Kelapa Sawit

ALTAMIRA INSTRUMENTS

Summary Report

Workstation: Micro200B-02-Analysis Station1	Method: static volumetric method
Project: SAMPEL SAA UNHAS	Sample: KCKS
Adsorbate: N2	Charge Number: #1
Bath Temperature: 77.35 K	Sample Weight: 0.0750(g)
Operator:	Degas Conditions:
Started: 2026-02-10 08:35:29	Completed: 2026-02-10 10:57:51

Surface Area

Single Point BET Surface Area at p/p0 =0.20000:	21.4461	(m^2/g)
BET Surface Area:	45.1864	(m^2/g)
Langmuir Surface Area:	4.35261	(m^2/g)
t-Plot Micropore Area:	0.00000	(m^2/g)
t-Plot External Surface Area:	45.18643	(m^2/g)
BJH Adsorption Cumulative Surface Area:	62.89400	(m^2/g)
BJH Desorption Cumulative Surface Area:	59.20138	(m^2/g)

Pore Volume

Total Pore Volume (adsorption) at p/p0 = 0.99000:	0.09958	(cm^3/g)
Total Pore Volume (desorption) at p/p0 = 0.99000:	0.09961	(cm^3/g)
t-Plot Micropore Volume:	0.00000	(cm^3/g)
BJH Adsorption Cumulative Volume:	0.11374	(cm^3/g)
BJH Desorption Cumulative Volume:	0.11048	(cm^3/g)

Pore Size

Average Pore Diameter (4V/A):	8.81468	(nm)
BJH Adsorption Median Pore Diameter:	9.58618	(nm)
BJH Adsorption Most Frequent Pore Diameter (dV/dD):	2.93825	(nm)
BJH Desorption Median Pore Diameter:	9.29007	(nm)
BJH Desorption Most Frequent Pore Diameter (dV/dD):	3.29728	(nm)

Pore Volume Percentage Report

ID	Pore Range	Pore Volume (cm^3/g)	Percentage (%)
1	2.00-10.00	0.05788	50.89
2	10.00-20.00	0.01518	13.35
3	20.00-50.00	0.01546	13.59
4	>50.00	0.02522	22.17

ALTAMIRA INSTRUMENTS

Isotherm Report

Workstation: Micro200B-02-Analysis Station1	Method: static volumetric method
Project: SAMPEL SAA UNHAS	Sample: KCKS
Adsorbate: N2	Charge Number: #1
Bath Temperature: 77.35 K	Sample Weight: 0.0750(g)
Operator:	Degas Conditions:
Started: 2026-02-10 08:35:29	Completed: 2026-02-10 10:57:51

ID	p (kPa)	p/p0	V (mmol/g)	p0 (kPa)	Time
1	4.88690721	0.04832525	0.09858	101.125	08:57:49
2	10.39027274	0.10278294	0.15984	101.089	08:59:18
3	14.98420966	0.14822761	0.21109	101.089	09:01:09
4	19.93215235	0.19717391	0.27108	101.089	09:02:36
5	24.93909599	0.24674194	0.33995	101.074	09:07:43
6	29.76903676	0.29453405	0.40546	101.072	09:11:25
7	34.65797848	0.34294054	0.47253	101.061	09:14:19
8	39.61812827	0.39209698	0.54772	101.042	09:16:50
9	44.53962225	0.44079065	0.62251	101.045	09:19:05
10	49.58725621	0.49075427	0.70404	101.043	09:21:09
11	54.56978567	0.54006528	0.79215	101.043	09:23:10
12	59.36107063	0.58756285	0.88296	101.029	09:27:18
13	64.33342751	0.63673708	0.98356	101.036	09:33:15
14	70.31083525	0.69596686	1.10916	101.026	09:35:02
15	75.29539922	0.74539478	1.22670	101.014	09:38:45
16	80.29420481	0.79489593	1.35953	101.012	09:49:39
17	85.48628940	0.84634535	1.50739	101.006	09:51:27
18	90.51357821	0.89619737	1.69399	100.997	09:53:33
19	95.07699739	0.94144160	1.95793	100.991	09:56:21
20	100.02087105	0.99039661	2.87921	100.991	10:06:47
---	---	---	---	---	---
1	100.02087105	0.99039661	2.87921	100.991	10:06:47
2	94.74333678	0.93827887	2.03795	100.976	10:13:52
3	89.96629343	0.89108073	1.74153	100.963	10:16:31
4	84.57279176	0.83760002	1.51951	100.970	10:18:48
5	79.81202454	0.79044988	1.37094	100.970	10:20:52
6	74.91494475	0.74200554	1.23581	100.963	10:22:54
7	69.93241529	0.69274286	1.11551	100.950	10:24:57
8	64.90512648	0.64292926	1.00422	100.952	10:26:59
9	59.88801025	0.59322097	0.90296	100.954	10:29:06
10	54.95837821	0.54443729	0.80661	100.945	10:31:17
11	49.95346908	0.49485687	0.71719	100.945	10:33:35
12	44.97297414	0.44556741	0.63030	100.934	10:36:01
13	39.98027210	0.39612083	0.55390	100.929	10:38:42
14	33.90927663	0.33599458	0.46291	100.922	10:41:34
15	29.71410483	0.29443843	0.40533	100.918	10:44:07

ALTAMIRA INSTRUMENTS

Isotherm Report

Workstation: Micro200B-02-Analysis Station1	Method: static volumetric method
Project: SAMPEL SAA UNHAS	Sample: KCKS
Adsorbate: N2	Charge Number: #1
Bath Temperature: 77.35 K	Sample Weight: 0.0750(g)
Operator:	Degas Conditions:
Started: 2026-02-10 08:35:29	Completed: 2026-02-10 10:57:51

ID	p (kPa)	p/p0	V (mmol/g)	p0 (kPa)	Time
16	24.63595312	0.24411715	0.33630	100.919	10:46:27
17	19.75718398	0.19577353	0.27219	100.919	10:48:30
18	14.98014063	0.14844000	0.21276	100.917	10:50:25
19	10.05661213	0.09967400	0.15863	100.895	10:52:43
20	5.11273848	0.05067700	0.10122	100.889	10:57:46

Karbon Aktif Cangkang Kelapa Sawit

ALTAMIRA INSTRUMENTS

Summary Report

Workstation: Micro200B-02-Analysis Station2	Method: static volumetric method
Project: SAMPEL SAA UNHAS	Sample: KAKS ALCL3
Adsorbate: N2	Charge Number: #1
Bath Temperature: 77.35 K	Sample Weight: 0.4961(g)
Operator:	Degas Conditions:
Started: 2026-06-25 13:11:07	Completed: 2026-06-25 20:35:37

Surface Area		
Single Point BET Surface Area at p/p0 =0.20000:	84.3849	(m^2/g)
BET Surface Area:	78.7563	(m^2/g)
Langmuir Surface Area:	4.35261	(m^2/g)
t-Plot Micropore Area:	53.51231	(m^2/g)
t-Plot External Surface Area:	25.24402	(m^2/g)
BJH Adsorption Cumulative Surface Area:	32.48598	(m^2/g)
BJH Desorption Cumulative Surface Area:	23.06395	(m^2/g)
Pore Volume		
Total Pore Volume (adsorption) at p/p0 = 0.99000:	0.07190	(cm^3/g)
Total Pore Volume (desorption) at p/p0 = 0.99000:	0.07190	(cm^3/g)
t-Plot Micropore Volume:	0.02693	(cm^3/g)
BJH Adsorption Cumulative Volume:	0.04737	(cm^3/g)
BJH Desorption Cumulative Volume:	0.04233	(cm^3/g)
Pore Size		
Average Pore Diameter (4V/A):	3.65202	(nm)
BJH Adsorption Median Pore Diameter:	8.56967	(nm)
BJH Adsorption Most Frequent Pore Diameter (dV/dD):	2.38828	(nm)
BJH Desorption Median Pore Diameter:	4.72361	(nm)
BJH Desorption Most Frequent Pore Diameter (dV/dD):	1.87166	(nm)

Pore Volume Percentage Report

ID	Pore Range	Pore Volume (cm^3/g)	Percentage (%)
1	2.00-10.00	0.02551	53.85
2	10.00-20.00	0.00523	11.04
3	20.00-50.00	0.00688	14.53
4	>50.00	0.00975	20.58

ALTAMIRA INSTRUMENTS

Isotherm Report

Workstation: Micro200B-02-Analysis Station2	Method: static volumetric method
Project: SAMPEL SAA UNHAS	Sample: KAKS ALCL3
Adsorbate: N2	Charge Number: #1
Bath Temperature: 77.35 K	Sample Weight: 0.4961(g)
Operator:	Degas Conditions:
Started: 2026-06-25 13:11:07	Completed: 2026-06-25 20:35:37

ID	p (kPa)	p/p0	V (mmol/g)	p0 (kPa)	Time
1	7.97123333	0.07902842	0.88738	100.865	14:41:35
2	10.27837436	0.10195899	0.98705	100.809	15:42:50
3	16.80713591	0.16672576	1.02969	100.807	15:56:13
4	19.48252433	0.19331083	1.07281	100.783	16:27:51
5	25.57183044	0.25375378	1.11288	100.774	16:47:05
6	29.62662065	0.29400977	1.14397	100.767	17:00:46
7	35.09133037	0.34822543	1.16535	100.772	17:04:57
8	39.70154342	0.39396303	1.18655	100.775	17:09:22
9	44.71052158	0.44367278	1.20769	100.774	17:13:11
10	49.45297816	0.49074416	1.24452	100.771	17:21:41
11	54.79358242	0.54372674	1.26691	100.774	17:25:23
12	59.41600256	0.58957841	1.28866	100.777	17:29:15
13	64.42091170	0.63924802	1.31357	100.776	17:33:33
14	69.43802792	0.68902632	1.35762	100.777	17:41:30
15	74.39003964	0.73816263	1.38497	100.777	17:44:36
16	80.30641190	0.79683355	1.48161	100.782	18:04:44
17	85.86267485	0.85198402	1.53035	100.780	18:08:06
18	89.95205182	0.89255601	1.58767	100.780	18:13:03
19	94.70875001	0.93972562	1.69377	100.783	18:18:25
20	99.67703786	0.98891716	2.07372	100.794	18:42:56
---	---	---	---	---	---
1	99.67703786	0.98891716	2.07372	100.794	18:42:56
2	95.53476347	0.94781950	1.82684	100.794	18:52:41
3	90.39761080	0.89676107	1.66484	100.805	18:59:48
4	83.84850410	0.83182909	1.55366	100.800	19:03:44
5	79.77947228	0.79139362	1.48964	100.809	19:06:53
6	74.86408185	0.74265709	1.42848	100.806	19:10:10
7	69.84696562	0.69284125	1.37329	100.812	19:13:09
8	64.93971325	0.64422354	1.32280	100.803	19:16:15
9	59.95311476	0.59470961	1.29123	100.811	19:19:19
10	55.00720659	0.54564572	1.26782	100.811	19:22:23
11	50.10605777	0.49704066	1.24718	100.809	19:27:11
12	45.47143053	0.45106409	1.21348	100.809	19:33:09
13	39.47367764	0.39158937	1.18545	100.804	19:37:48
14	34.60508107	0.34328698	1.16341	100.805	19:42:00
15	29.96841932	0.29728788	1.14526	100.806	19:47:26

ALTAMIRA INSTRUMENTS

Isotherm Report

Workstation: Micro200B-02-Analysis Station2	Method: static volumetric method
Project: SAMPEL SAA UNHAS	Sample: KAKS ALCL3
Adsorbate: N2	Charge Number: #1
Bath Temperature: 77.35 K	Sample Weight: 0.4961(g)
Operator:	Degas Conditions:
Started: 2026-06-25 13:11:07	Completed: 2026-06-25 20:35:37

ID	p (kPa)	p/p0	V (mmol/g)	p0 (kPa)	Time
16	25.01233857	0.24811502	1.10915	100.809	19:51:20
17	20.06846491	0.19905558	1.07662	100.818	19:55:09
18	15.11441868	0.14990960	1.01862	100.824	20:01:25
19	10.09730245	0.10013875	0.80260	100.833	20:09:17
20	4.87876915	0.04837909	0.75417	100.845	20:35:32

Lampiran 10. Dokumentasi



Preparasi Sampel



Karbonisasi Hidrotermal



Aktivasi



Titrasi Boehm



Analisis Proksimat



Aplikasi Metilen Biru