

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI AEROGEL SELULOSA DARI BATANG
DAN TONGKOL JAGUNG (*Zea mays*) SEBAGAI
ADSORBEN TUMPAHAN MINYAK**

***SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF CELLULOSE AEROGEL FROM
CORN STALKS AND COBs (*Zea mays*)
AS AN OIL SPILL ADSORBENT***



RINA FAJRI

H012241009



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

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI AEROGEL SELULOSA DARI BATANG
DAN TONGKOL JAGUNG (*Zea mays*) SEBAGAI
ADSORBEN TUMPAHAN MINYAK**

RINA FAJRI

H012241009



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

**SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF CELLULOSE AEROGEL FROM
CORN STALKS AND COBs (*Zea mays*)
AS AN OIL SPILL ADSORBENT**

RINA FAJRI

H012241009



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

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI AEROGEL SELULOSA DARI BATANG
DAN TONGKOL JAGUNG (*Zea mays*) SEBAGAI
ADSORBEN TUMPAHAN MINYAK**

Tesis

Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar magister

Program Studi Magister Kimia

Disusun dan diajukan oleh

RINA FAJRI

H012241009

kepada

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

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI AEROGEL SELULOSA DARI BATANG
DAN TONGKOL JAGUNG (*Zea mays*) SEBAGAI
ADSORBEN TUMPAHAN MINYAK**

Thesis

As one of the requirements to achieving a master's degree

Master of Chemistry Study Program

Prepared and submitted by:

RINA FAJRI

H012241009

to

**MASTER OF CHEMISTRY STUDY PROGRAM
FACULTY OF MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCES
HASANUDDIN UNIVERSITY
MAKASSAR
2026**

TESIS

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI AEROGEL SELULOSA DARI BATANG DAN
TONGKOL JAGUNG (*Zea mays*) SEBAGAI
ADSORBEN TUMPAHAN MINYAK**

**RINA FAJRI
H012241009**

telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian magister pada 14 April 2026 dan
dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

pada

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

Mengesahkan

Pembimbing Utama,



Prof. Dr. Indah Raya, M.Si
NIP. 19641125 199002 2 001

Pembimbing Pendamping,



Erna Mayasari, S.Si., M.Si, Ph.D.
NIP. 19861228 202412 4 001

Ketua Program Studi
Magister Kimia,



Prof. Dr. Indah Raya, M.Si
NIP. 19641125 199002 2 001

Dekan Fakultas MIPA
Universitas Hasanuddin,



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

**PERNYATAAN KEASLIAN TESIS
DAN KELIMPAHAN HAK CIPTA**

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis berjudul "Sintesis dan Karakterisasi Aerogel Selulosa dari Batang dan Tongkol Jagung (*Zea mays*) sebagai Adsorben Tumpahan Minyak" adalah benar karya saya dengan arahan dari tim Pembimbing (Prof. Dr. Indah Raya, M.Si sebagai Pembimbing Utama dan Erna Mayasari, S.Si., M.Si., Ph.D sebagai Pembimbing Pendamping). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi manapun. 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 tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah berstatus revision pada jurnal Chemical Review and Letters dengan judul "Synthesis and characterization of corn stalk and cob-derived cellulose aerogels (*Zea Mays*) as adsorbents for oil spill remediation". Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan berlaku.

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

Makassar 19 April 2026



Kina Fajri
NIM. H012241009

UCAPAN TERIMA KASIH

Bismillahirrahmanirrahim

Alhamdulillah segala puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas nikmat Iman dan Islam yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Tak lupa pula penulis menghaturkan salam serta shalawat kepada junjungan Nabi Besar Muhammad SAW suri tauladan bagi ummat manusia. Alhamdulillah, penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul "**Sintesis dan Karakterisasi Aerogel Selulosa dari Batang dan Tongkol Jagung (*Zea mays*) sebagai Adsorben Tumpahan Minyak**". Tesis ini dibuat sebagai salah satu syarat mendapatkan gelar Magister Sains, pada Program Studi Magister Kimia, Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin. Beragam hambatan dan tantangan, namun dapat dilalui berkat dukungan dan doa dari berbagai pihak, sehingga tesis ini dapat diselesaikan.

Penulis mengucapkan banyak terima kasih dan penghargaan sebesar besarnya kepada Ibu **Prof. Dr. Indah raya, M.Si** selaku Pembimbing Utama dan penasehat akademik, serta Ibu **Erna Mayasari, S.Si., M.Si., Ph.D** selaku Pembimbing Pertama, yang telah meluangkan waktu, tenaga dan pikiran dalam membimbing dan memberikan ilmu yang sangat berharga. Tak lupa pula penulis ucapkan terima kasih kepada tim penguji, Bapak **Prof. Dr. Abd. Wahid Wahab, M.Sc**, Bapak **Dr. Yusafir Hala, M.Si**, dan Ibu **Prof. Dr. Rugaiyah A. Arfah, M.Si** terima kasih atas saran, arahan dan masukan yang telah diberikan. Penulis mengucapkan terima kasih kepada pimpinan Universitas Hasanuddin serta pimpinan Fakultas MIPA Universitas Hasanuddin telah memfasilitasi proses belajar dan penelitian. Terima kasih kepada Dosen dan Staf Program Studi Kimia yang telah memberikan ilmu yang berharga kepada penulis selama proses perkuliahan.

Kepada kedua orang tua tercinta saya Ayahanda Suparjo Samad dan Ibunda Juhria Husaini, kakak (Rika Fajri) serta adek (Rifki Fajri) yang telah memberikan doa, dukungan, cinta kasih, dan dorongan moral dan spiritual tanpa henti. Terima kasih juga kepada teman-teman seperjuangan Jumianti, Selvianti, Sunarti, Marlina, Fariyah, Rezky Kaswa, Fairuz Erlangga, Abdul Yasir, Said Sadallah Said, Fajar Said, kakak angkatan telah membantu dalam suka dan duka selama proses perkuliahan hingga penyusunan tesis. Tak lupa penulis ucapkan terima kasih kepada seluruh keluarga, teman-teman serta kerabat yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari kata sempurna, baik dari segi materi maupun teknik penulisan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang konstruktif dari berbagai pihak. Akhirnya, penulis memiliki harapan agar tesis ini dapat memberikan berbagai manfaat kepada peneliti selanjutnya. Aamiin.

Makassar, Januari 2026

Penulis

Rina Fajri

ABSTRAK

RINA FAJRI. Sintesis dan Karakterisasi Aerogel Selulosa dari Batang dan Tongkol Jagung (*Zea mays*) sebagai Adsorben Tumpahan Minyak (dibimbing oleh Indah raya dan Erna Mayasari).

Latar belakang, batang dan tongkol jagung merupakan limbah pertanian yang melimpah namun belum dimanfaatkan secara optimal, meskipun memiliki kandungan selulosa yang tinggi. Selulosa berpotensi dikembangkan menjadi aerogel berpori dengan kemampuan adsorpsi yang baik. Pemanfaatan limbah jagung sebagai bahan baku aerogel selulosa diharapkan dapat menghasilkan material adsorben ramah lingkungan untuk aplikasi penyerap minyak. **Tujuan** penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi aerogel berbasis selulosa yang berasal dari batang dan tongkol jagung untuk diaplikasikan sebagai adsorben penyerap minyak. **Metode** penelitian ini terdiri atas tiga tahap utama, yaitu persiapan sampel, ekstraksi selulosa dari batang dan tongkol jagung, serta sintesis aerogel menggunakan metode *freeze-drying*. Aerogel yang dihasilkan dikarakterisasi menggunakan analisis FTIR, XRD, SEM, dan BET–BJH, serta metode gravimetri untuk menentukan kapasitas adsorpsi minyak. **Hasil** aerogel selulosa yang diperoleh menunjukkan indeks kristalinitas sebesar 93,54% dengan ukuran kristal 8,09 nm. Luas permukaan spesifik aerogel adalah 18,27 m²/g dengan diameter pori rata-rata sebesar 4,6 nm. Adsorpsi minyak mengikuti model isoterm Freundlich dengan koefisien korelasi (R sebesar 0,9907. Pengaruh suhu, konsentrasi, dan parameter termodinamika menunjukkan bahwa proses adsorpsi minyak ke dalam aerogel selulosa didominasi oleh adsorpsi fisik. Nilai parameter termodinamika adsorpsi minyak ΔG , ΔH , ΔS masing-masing sebesar -4,6683 kJ/mol, -4,5120 J/mol, -14,0340 kJ/mol. **Kesimpulan**. Aerogel selulosa berhasil disintesis dari batang dan tongkol jagung dengan struktur berpori dan sifat adsorpsi yang baik. Proses adsorpsi minyak mengikuti model isoterm Freundlich dan didominasi oleh mekanisme adsorpsi fisik, sehingga aerogel berpotensi digunakan sebagai adsorben minyak ramah lingkungan berbasis limbah pertanian.

Kata kunci: batang jagung, tongkol jagung, aerogel, selulosa, minyak

ABSTRACT

RINA FAJRI. *Synthesis and Characterization of Cellulose Aerogels Derived from Corn Stalks and Cobs (Zea mays) as Adsorbents for Oil Spill Remediation* (supervised by Indah Raya and Erna Mayasari).

Background, corn stalks and corn cobs are abundant agricultural wastes that have not been optimally utilized, despite their high cellulose content. Cellulose has strong potential to be developed into porous aerogels with good adsorption capacity. The utilization of corn waste as a raw material for cellulose aerogels is expected to produce environmentally friendly adsorbent materials for oil absorption applications. **Objective** this study aims to synthesize and characterize cellulose-based aerogels derived from corn stalks and corn cobs for application as oil adsorbents. **Methods** the research methodology consisted of three main stages: sample preparation, cellulose extraction from corn stalks and corn cobs, and aerogel synthesis using the freeze-drying method. The resulting aerogels were characterized using FTIR, XRD, SEM, and BET–BJH analyses, while the gravimetric method was used to determine the oil adsorption capacity. **Results** the obtained cellulose aerogel showed a crystallinity index of 93.54% with a crystal size of 8.09 nm. The specific surface area of the aerogel was 18.27 m²/g with an average pore diameter of 4.6 nm. The oil adsorption process followed the Freundlich isotherm model with a correlation coefficient (R^2) of 0.9907. The effects of temperature, concentration, and thermodynamic parameters indicated that the oil adsorption process in the cellulose aerogel was dominated by physical adsorption. The thermodynamic parameters of oil adsorption, ΔG , ΔH , and ΔS , were -4.6683 kJ/mol, -4.5120 J/mol, and -14.0340 kJ/mol, respectively. **Conclusion** cellulose aerogel was successfully synthesized from corn stalks and corn cobs, exhibiting a porous structure and good adsorption properties. The oil adsorption process followed the Freundlich isotherm model and was dominated by a physical adsorption mechanism, indicating that the aerogel has strong potential as an environmentally friendly oil adsorbent derived from agricultural waste.

Keywords: corn stalks, corn cobs, aerogel, cellulose, oil

DAFTAR ISI

	Halaman
UCAPAN TERIMA KASIH	vii
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
DAFTAR ARTI LAMBANG/SINGKATAN	xv
BAB I PENDAHULUAN UMUM	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	6
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Manfaat Penelitian	7
1.5 Kebaruan Penelitian	7
1.6 Ruang Lingkup Penelitian	7
1.7 Landasan Teori	7
1.8 Kerangka Konseptual Penelitian	12
1.9 Hipotesis Penelitian	15
1.10 Daftar Pustaka	15
BAB II SINTESIS DAN KARAKTERISASI AEROGEL SELULOSA DARI LIMBAH JAGUNG	22
2.1 Abstrak	22
2.2 Pendahuluan	22
2.3 Metode.....	23
2.3.1 Bahan dan Alat Penelitian.....	23
2.4 Hasil dan Pembahasan	25
2.4.1 Ekstraksi Selulosa	25
2.4.2 Sintesis Aerogel.....	26
2.4.3 Ekstraksi Selulosa	29
2.5 Kesimpulan	36
2.6 Daftar Pustaka	36

BAB III STUDI KINETIKA, TERMODINAMIKA, DAN REGENERASI ADSORPSI MINYAK OLEH AEROGEL SELULOSA BERBASIS LIMBAH JAGUNG	57
3.1 Abstrak.....	57
3.2 Pendahuluan.....	57
3.3 Metode	58
3.3.1 Bahan dan Alat Penelitian	58
3.4 Hasil	60
3.5 Kesimpulan	72
3.6 Daftar Pustaka	73
BAB IV PEMBAHASAN UMUM	89
4.1 Sintesis dan karakterisasi aerogel selulosa dari batang dan tongkol jagung	73
4.2 Studi kinetika, termodinamika, dan regenerasi adsorpsi minyak oleh aerogel selulosa berbasis limbah jagung	73
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	92
5.1 Kesimpulan	92
5.2 Saran	92
DAFTAR PUSTAKA	93
LAMPIRAN	104

DAFTAR TABEL

Nomor		Halaman
2.1	Ringkasan gugus fungsional dalam komposisi kimia selulosa batang jagung, selulosa tongkol jagung, dan aerogel.....	27
2.2	Ringkasan analisis XRD pada komposisi kimia selulosa batang jagung, selulosa tongkol jagung, dan aerogel	30
2.3	Ringkasan analisis luas permukaan selulosa batang jagung, selulosa tongkol jagung, dan aerogel	31
3.1	Konstanta model kinetika adsorpsi minyak	31
3.2	Parameter isotherm adsorpsi dan koefisien kolerasi.....	32
3.3	Parameter termodinamika pada suhu berbeda untuk adsorpsi minyak pada aerogel	32

DAFTAR GAMBAR

Nomor	Halaman
1.1 Tanaman Jagung.....	7
1.2 Struktur Selulosa.....	8
1.3 Aerogel Selulosa	9
1.4 Perbandingan sintesis aerogel dapat ditinjau dari metode Pengeringnya dapat melalui (a) metode pengering superkritis CO ₂ dan (b) metode pengering beku	10
1.5 Kerangka Pikir Penelitian	13
2.1 (a) proses delignifikasi;(b) proses bleaching (pemutihan)	25
2.2 (a) penambahan prekursor SiO ₂ dan proses koagulasi sebelum <i>freeze dryer</i> ; (b) hasil produk aerogel selulosa setelah <i>freeze dryer</i>	27
2.3 Reaksi tahap I (reaksi antara selulosa serat batang jagung dan SiO ₂)....	27
2.4 Reaksi tahap II (reaksi antara NaOH dan Urea).....	28
2.5 Reaksi tahap III (reaksi antara produk tahap I dan produk tahap II).....	28
2.6 Spektrum FTIR selulosa dan aerogel selulosa	29
2.7 Difraktogram XRD (a) selulosa; dan (b) aerogel selulosa	30
2.8 Hasil SEM (a) Aerogel selulosa pada perbesaran 300x dan (b) perbesaran 100x (c) perbesaran 200x (d) perbesaran 200x (e) sudut kontak aerogel selulosa (f) sudut kontak aerogel selulosa	32
2.9 Grafik hubungan tekanan relatif terhadap volume N ₂ yang terserap pada aerogel selulosa	34
3.1 Grafik variasi waktu kontak dengan jumlah minyak yang teradsorpsi oleh aerogel selulosa	61
3.2 Proses adsorpsi antara minyak dengan Adsorben Aerogel Selulosa	61
3.3 Grafik kinetika orde satu semu adsorpsi minyak.....	62
3.4 Grafik kinetika orde dua semu adsorpsi minyak.....	62
3.5 Grafik variasi pH dengan jumlah minyak yang teradsorpsi oleh aerogel selulosa	64
3.6 Grafik pengaruh variasi suhu terhadap adsorpsi minyak aerogel Selulosa	65
3.7 Grafik pengaruh konsentrasi terhadap adsorpsi minyak oleh aerogel selulosa	66
3.8 Grafik isoterm Langmuir adsorpsi minyak.....	67
3.9 Grafik isoterm Freundlich adsorpsi minyak	67
3.10 Kapasitas desorpsi minyak oleh aerogel	69
3.11Grafik $\ln K$ terhadap $1000/T$ untuk memperkirakan parameter termodinamika adsorpsi minyak ke dalam aerogel.....	70

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	Halaman
1. Skema Penelitian	103
2. Bagan Alir Tahapan Penelitian.....	104
3. Perhitungan	108
4. Data Karakterisasi	113
5. Dokumentasi	121

DAFTAR ARTI LAMBANG/SINGKATAN

Lambang/singkatan	Arti dan Keterangan
BET	<i>Brunauer-Emmet-Teller</i>
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared</i>
k	Kinetika
SEM	<i>Scanning Elctron Microscope</i>
T	Temperatur
qt	kapasitas Adsorbsi pada waktu
XRD	<i>X-Ray Diffraction</i>
ΔG^0	energi bebas gibbs
ΔH^0	perubahan entalpi
ΔS^0	perubahan entropi
BJ	batang jagung
TJ	tongkol jagung

BAB I

PENDAHULUAN UMUM

1.1 Latar Belakang

Polusi dari tumpahan minyak di laut merupakan sumber pencemaran laut yang selalu menjadi fokus perhatian dari Masyarakat luas, karena akibatnya akan sangat cepat dirasakan oleh masyarakat sekitar pantai dan secara signifikan merusak makhluk hidup di sekitar Pantai tersebut (Purohit et al., 2024). Berdasarkan data yang dirilis oleh *International Tanker Owners Pollution Federation* (ITOPF), dalam kurun waktu empat tahun (2020 hingga 2024) tercatat sebanyak 37 insiden tumpahan minyak dengan jumlah sekitar 7 ton yang mengakibatkan hilangnya 38.000 ton minyak pada tahun 2024, 11 tumpahan besar (>700 ton) dan 26 sedang (7–700 ton) dengan rata-rata 5,2 kejadian besar dan 2,2 kejadian sedang dalam 5 tahun terakhir (2020-2024). Tumpahan besar sebagian besar terjadi di Amerika Selatan, Asia, dan Eropa. Keempat tumpahan sedang juga terjadi di Eropa, satu di Asia, dan satu di Amerika Utara (ITOPF, 2024).

Tumpahan minyak di laut menjadi salah satu bentuk pencemaran lingkungan yang serius, terutama karena struktur kimia minyak yang bersifat hidrofobik dan sulit terurai secara alami (Kianfar, 2025; Guo et al., 2022; Fattorini, 2025). Sifat ini menyebabkan minyak membentuk lapisan film di permukaan laut, menghambat pertukaran gas, serta berpotensi mencemari biota laut dalam jangka panjang (Asif et al., 2022). Minyak terdiri dari senyawa hidrokarbon yang hidrofobik dan tidak dapat bercampur dengan air, sehingga membentuk lapisan tipis di permukaan laut yang menghalangi difusi oksigen dari udara ke dalam air sehingga berdampak negatif pada kehidupan dalam laut (Elsheref et al., 2023).

Senyawa toksik dalam minyak, seperti *polycyclic aromatic hydrocarbons* (PAH) dan hidrokarbon aromatik lainnya, dapat meracuni organisme laut melalui mekanisme seperti gangguan struktur membran sel, disfungsi respirasi, hingga terganggunya reproduksi dan pertumbuhan (Pereira et al., 2023). Kehadiran minyak sebagai cemaran juga dapat menyebabkan kerusakan serius pada habitat ekosistem laut, seperti terumbu karang dan mangrove. Kontaminasi minyak mengganggu fungsi fisiologis tumbuhan dan hewan laut, menyebabkan kematian pohon mangrove, defoliasi karang, serta kerusakan substrat dan mikrohabitat. Berbagai studi menunjukkan bahwa ekosistem ini dapat memerlukan puluhan hingga lebih dari 50 tahun untuk pulih sepenuhnya, tergantung tingkat kontaminasi dan kondisi lokal (Nordborg et al., 2020; Kianfar, 2025; Pant et al., 2025). Dengan demikian, sifat fisik dan kimia minyak membuatnya menjadi ancaman besar bagi ekosistem laut saat terjadi tumpahan. Oleh karena itu diperlukan bahan penyerap minyak untuk mengatasi hal tersebut (Li et al., 2024).

Upaya dalam mengurangi kadar tumpahan minyak di perairan perlu dan penting untuk dilakukan. Salah satu cara yang dapat digunakan yaitu dengan metode adsorpsi (Zamparas, 2020). Adsorpsi merupakan proses pemisahan dimana molekul-molekul dalam fase gas atau cairan menempel pada permukaan padatan, dan proses ini umumnya bersifat reversible (Pellenz et al., 2023). Dalam proses adsorpsi terdapat dua komponen, yaitu adsorbat, yaitu zat yang diserap, dan adsorben, yaitu zat padat yang menyerap (Chen et al., 2021).

Adsorben adalah padatan yang memiliki kemampuan menyerap fluida pada permukaannya, sedangkan adsorbat dapat berupa bahan organik, zat warna, atau senyawa polar lainnya (Mozaffari et al., 2022). Keseimbangan adsorpsi terjadi ketika larutan dikontakkan dengan adsorben padat hingga terjadi perpindahan molekul adsorbat dari larutan ke permukaan padatan hingga tercapai keadaan setimbang antara konsentrasi adsorbat dalam larutan dan pada permukaan padat (Ajala & Akinawo, 2023). Untuk mengukur keseimbangan adsorpsi, dapat dilakukan perbandingan antara konsentrasi awal adsorbat dan konsentrasi saat keseimbangan tercapai. Model isoterm adsorpsi yang umum digunakan adalah Freundlich dan Langmuir, yang mampu memodelkan hubungan antara jumlah adsorbat yang diadsorpsi dan konsentrasi pada keseimbangan.

Adsorpsi merupakan suatu fenomena permukaan yang melibatkan interaksi antara molekul-molekul dalam fase cair atau gas dengan permukaan padatan (Alaqrbeh, 2021). Proses ini terjadi karena adanya gaya tarik-menarik antarmolekul, dimana molekul pada permukaan padatan memiliki energi yang tidak setimbang dan cenderung menarik molekul dari fase lain untuk mencapai keadaan yang lebih stabil (Alkhalidi et al., 2024). Ketidakseimbangan gaya tarik pada permukaan ini menyebabkan adsorben baik berupa padatan atau cairan memiliki kecenderungan menarik dan menahan molekul dari zat lain yang bersentuhan langsung dengannya (Alaqrbeh, 2021). Interaksi ini dapat berlangsung melalui gaya fisik seperti van der Waals, atau ikatan kimia yang lebih kuat tergantung pada sifat adsorbat dan adsorben (Al-Ghouti et al., 2023). Beberapa keunggulan dari metode adsorpsi adalah efektivitasnya yang tinggi, efisiensi proses yang relatif baik, serta kemudahan dalam pengolahan dan operasionalnya. Metode ini juga fleksibel, dapat diaplikasikan untuk berbagai jenis polutan, dan memungkinkan penggunaan kembali adsorben setelah regenerasi (Pellenz et al., 2023; Agboola & Benson, 2021). Salah satu jenis adsorben yang dapat digunakan dan diharapkan mampu untuk mengadsorpsi tumpahan minyak adalah aerogel selulosa (Nguyen et al., 2021)

Aerogel selulosa didefinisikan sebagai padatan nanopori yang dibentuk oleh penggantian cairan dengan gas dalam gel. Aerogel merupakan bahan ringan yang memiliki densitas hingga $0,004 \text{ g/cm}^3$ (Long et al., 2018). Selain ringan, aerogel juga memiliki karakteristik yaitu porositas yang besar dan elastisitas yang tinggi. Karena memiliki porositas yang besar, konduktivitas panas yang dimiliki aerogel sangat rendah, hal tersebut dikarenakan sebagian besar volume aerogel berisi udara (Wang et al., 2024) (Ahmadzadeh et al., 2024). Karakteristik aerogel ini membuatnya menarik untuk diaplikasikan dalam beberapa aspek seperti sebagai superabsorben cairan, isolasi panas dan isolasi akustik. Aerogel juga dapat berfungsi sebagai inti densitas rendah pada struktur atau sebagai tempat untuk pengendapan nano partikel anorganik. Aerogel selulosa memiliki volume pori sangat besar dan berat yang ringan. Kondisi tersebut memberikan keuntungan untuk mengaplikasikan aerogel selulosa pada proses pengemasan, isolasi panas, dan sebagai superabsorben (Mai et al., 2024; Venkataraman, et al., 2024).

Aerogel selulosa adalah bahan padat berpori. Aerogel selulosa umumnya dibuat dalam tiga bagian langkah-langkah dengan melarutkan/mendispersikan selulosa atau turunan selulosa, membentuk gel selulosa dengan sol-gel proses, dan mengeringkan gel selulosa dengan tetap mempertahankan struktur berpori 3D-nya. Porositas (84,0–

99,9%), dan kepadatan ($0,0005\text{--}0,35\text{ g/cm}^3$) aerogel selulosa sebanding dengan aerogel silika tradisional dan polimer sintetik aerogel, tetapi aerogel selulosa memiliki kekuatan tekan yang lebih tinggi ($5,2\text{ kPa--}16,67\text{ MPa}$) dan biodegradabilitas yang lebih baik. Oleh karena itu, aerogel selulosa merupakan jenis yang ramah lingkungan dan material baru multifungsi yang memiliki potensi besar dalam penerapan adsorpsi dan pemisahan minyak dan air (Chen et al., 2024), bahan biomedis (Long et al., 2018), isolasi termal (Ke et al., 2024), superkapasitor (Xiao et al., 2024), dan untuk adsorpsi kontaminan untuk meminimalkan masalah lingkungan (Zhang et al., 2024).

Dalam beberapa tahun terakhir karbon aerogel (CA) yang berasal dari biomassa dan limbah pertanian telah mendapat banyak perhatian untuk aplikasi adsorpsi (Nguyen et al., 2022). Hasil penelitian yang dilakukan oleh Lei et al., 2018 yang mensintesis karbon aerogel dari pulp kraft kayu lunak yang diputihkan yang memiliki kepadatan rendah $25,5\text{ mg/cm}^3$, air sudut kontak $139,7^\circ$, dan menyerap sejumlah besar minyak hingga lebih dari 14 kali beratnya sendiri. Karena sifatnya yang unggul, penggunaan bahan berpori, terutama karbon aerogel, akhir-akhir ini semakin populer (Lv et al., 2018). Karbon aerogel adalah bahan karbon padat tiga dimensi, berpori, ringan, dan memiliki ikatan silang tinggi yang dihasilkan dengan mengganti cairan dalam gel dengan udara (Konuk et al., 2023).

Selulosa, sebagai salah satu polimer alami paling melimpah di biosfer, telah menarik perhatian luas sebagai bahan baku dalam sintesis aerogel karena sifatnya yang terbarukan, biodegradable, dan kemampuannya membentuk struktur 3-D berpori yang mendukung berbagai aplikasi multifungsi (adsorpsi, isolasi, transport massa). Banyak sumber biomassa lignoselulosa termasuk kayu, residu pertanian (serbuk gergaji, jerami, bagasse), dan serat alami seperti kapas mengandung fraksi selulosa yang substansial sehingga merupakan kandidat sumber bahan baku yang melimpah dan berkelanjutan untuk produksi aerogel (Shah et al., 2025). Komposisi kimiawi biomassa bervariasi antar jenis dan bagian tanaman banyak residu pertanian dan non-kayu mengandung 30–50% selulosa (berat kering), sedangkan kandungan selulosa pada kayu komersial sering berada di kisaran 40–60%, dan serat kapas memiliki kemurnian selulosa yang sangat tinggi (umumnya $> 90\%$) (Awogbemi & Kallon, 2022; Alvarez-Barreto et al., 2021). Perbedaan ini bergantung pada spesies, kondisi pertumbuhan dan metode analisis yang digunakan.

Selulosa adalah polisakarida linear yang tersusun dari unit β -D-glukopiranosida yang saling dihubungkan melalui ikatan β -1,4-glikosidik (Poulose et al., 2022). Panjang rantai polimer selulosa (*degree of polymerization*) sangat bergantung pada sumber biomassa dari beberapa ratus hingga beberapa ribu unit glukosa (Fang et al., 2020). Secara struktural, selulosa mengandung domain yang lebih tersusun rapi (kristalin) serta domain yang lebih acak (amorf); kombinasi keduanya menghasilkan sifat mekanik dan fisik yang khas. Bagian kristalin memberi kekakuan dan stabilitas, sedangkan bagian amorf memberi fleksibilitas dan memungkinkan interaksi kimia atau fisik lebih mudah. Ikatan hidrogen antar gugus hidroksil pada unit glukosa dan antar rantai selulosa menjadi dasar terbentuknya mikrofibril dan jaringan serat tanaman, memberikan kekuatan mekanik tambahan dan stabilitas struktural (Poulose et al., 2022). Berkat struktur ini, panjang polimer, *hydrogen-bonding*, serta campuran kristalin/amorf. Selulosa memiliki potensi besar sebagai bahan baku untuk material modern: ringan, kuat, dan mampu membentuk jaringan pori jika diproses lebih lanjut (Cao et al., 2025). Oleh karena itu, selulosa dan

turunannya (misalnya nanoselulosa) sangat cocok untuk dikembangkan menjadi aerogel selulosa atau material fungsional berbasis biomassa, yang dapat dimanfaatkan dalam isolasi, adsorpsi, dan aplikasi lain (Tofanica et al., 2025).

Aerogel berbasis selulosa menawarkan berbagai keunggulan antara lain biodegradabilitas dan asal bahan yang terbarukan serta sifat termal dan akustik yang menguntungkan yang membuatnya cocok untuk aplikasi isolasi dan penyerapan (Sozcu, Frajova, et al., 2024). Selain itu, struktur nanopori dan permukaan yang dapat dimodifikasi memudahkan rekayasa fungsi (hidrofobinisasi untuk penyerapan minyak atau fungsionalisasi untuk pemurnian air), sehingga aerogel selulosa dapat dioptimalkan untuk aplikasi penyerapan minyak, isolasi termal, dan pemurnian air (Nguyen et al., 2021; Zhai et al., 2024; Mai et al., 2024). Pemanfaatan selulosa dari limbah pertanian atau biomassa mendukung prinsip keberlanjutan dan ekonomi sirkular mengurangi ketergantungan pada bahan sintetis berbasis fosil dengan mengubah limbah menjadi produk bernilai tambah meskipun perlu diperhatikan tantangan produksi (energi, biaya, dan ketahanan terhadap kelembapan) yang muncul dalam analisis siklus hidup (Kara et al., 2024).

Beberapa hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa aerogel selulosa memiliki karakteristik yang baik dan cocok untuk dijadikan adsorben. Menurut hasil penelitian Susilowati dan Muljani (2020), aerogel selulosa yang disintesis dari serat kapuk memiliki nilai densitas $0,11 \text{ g/cm}^3$ dan porositas 92,46% serta mampu menyerap minyak dengan kapasitas adsorpsi sebesar $11,987 \text{ g/g}$. Hasil penelitian Tuara, 2019, aerogel selulosa disintesis dari serat batang jagung memiliki ukuran kristal 10,48 nm, diameter pori 75,4 Å, porositas 93,4% dan densitas $0,0081 \text{ g/cm}^3$ yang diaplikasikan untuk penyerapan logam Cd(II) mengikuti isotherm adsorbs Langmuir dengan kapasitas adsorpsi 13,82 mg/g, melalui kinetika adsorbs orde-2 semu ($R^2=0,999$), serta kajian termodinamika yaitu $S=-0,3268 \text{ kJ/mol}$, ($G=-17,401 \text{ kJ/mol}$), ($H=081,635 \text{ kJ/mol}$), dan $E_a=-31,30 \text{ kJ/mol}$). Dalam hal penyerapan logam berat dan polutan air, penelitian juga menunjukkan hasil yang menarik. Sebagai contoh, aerogel berbasis selulosa yang dikombinasikan dengan kerangka organik/kimia (misalnya amina) mampu menyerap ion logam mulia dengan kapasitas sangat tinggi dalam studi terbaru, aerogel selulosa-levulinat (CLE) dimodifikasi dengan polietilenimin (PEI) menunjukkan kapasitas adsorpsi maksimum hingga 1752 mg/g untuk Au(III), serta kapasitas besar untuk Pt(IV) dan Pd(II) (Chen et al., 2025).

Jagung (*Zea mays* L.) merupakan salah satu tanaman pangan terpenting di dunia dan termasuk tanaman yang paling luas dibudidayakan. Sebagai tanaman serbaguna, jagung memiliki potensi hasil genetik yang tinggi, kemampuan adaptasi yang luas terhadap berbagai kondisi agroklimat, serta dapat dimanfaatkan dalam berbagai sektor, mulai dari pangan hingga industri (Prasanna et al., 2021). Secara global, jagung dikenal sebagai ratu sereal karena telah dibudidayakan di lebih dari 170 negara dengan produksi gabah 1.219,76 juta ton. Selain buah-buahan, jagung juga mempunyai sekam, batang dan produk sampingan lainnya, yang hasil tahunan batang berikan yaitu mencapai sekitar 350 juta ton di Cina. Sebagian besar petani masih memilih untuk membakar limbah batang jagung setelah panen, suatu praktik yang tidak hanya menyia-nyaiakan potensi sumber daya biomassa, tetapi juga menyebabkan pencemaran udara akibat pelepasan partikel dan gas berbahaya ke atmosfer (Li et al., 2022)

Tongkol jagung mengandung komponen utama penyusun lignoselulosa, yakni selulosa sebesar 30–45%, hemiselulosa 30–40%, dan lignin berkisar antara 5–25% (Bahadur et al., 2024; Gandam et al., 2022). Sementara itu, batang tanaman jagung mengandung selulosa sekitar 42,6%, hemiselulosa 21,3%, dan lignin 8,2%, menjadikannya sumber potensial untuk bahan baku berbasis biomassa seperti bioenergi, pulp, dan material fungsional (Khan et al., 2024; Puişel et al., 2025). Komponen-komponen kimia ini memiliki potensi manfaat yang besar jika dimanfaatkan dengan tepat, terutama selulosa. Oleh karena itu, pemanfaatan batang jagung secara efektif menjadi topik penelitian yang semakin mendapat perhatian dalam bidang material terbarukan dan teknologi biomassa. Salah satu pendekatan yang paling menjanjikan adalah ekstraksi selulosa dari batang jagung, yang terbukti efektif untuk mengembangkan dan memanfaatkan limbah lignoselulosa sebagai bahan dasar material bernilai tambah, seperti aerogel, biokomposit, atau bahan fungsional lainnya (Santos et al., 2025).

Selulosa yang terkandung dalam batang dan tongkol jagung dapat dimanfaatkan sebagai prekursor utama dalam pembentukan jaringan aerogel yang ringan dan berpori, sementara lignin yang juga terdapat dalam biomassa ini dapat memberikan sifat hidrofobik alami pada material akhir (Yi et al., 2024). Aerogel berbasis limbah jagung ini memiliki aplikasi luas, termasuk sebagai material isolasi termal, adsorben minyak, dan pendukung katalis. Selain itu, pemanfaatan selulosa dari limbah pertanian seperti jagung tidak hanya berkontribusi dalam pengurangan limbah industri, tetapi juga mendukung prinsip ekonomi sirkular dan keberlanjutan lingkungan, sehingga menjadikannya solusi inovatif dalam pengembangan material ramah lingkungan (Peng et al., 2023).

Modifikasi aerogel dengan pengikat silang dapat dilakukan menggunakan silika (SiO_2) (Ji et al., 2022). Silika berperan sebagai agen pembentuk jaringan tiga dimensi melalui gugus silanol ($-\text{Si}-\text{OH}$) yang dihasilkan selama proses sol-gel. Gugus silanol ini kemudian mengalami reaksi kondensasi, membentuk ikatan silang $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ yang menjadi kerangka utama struktur aerogel. Ikatan silang tersebut sangat menentukan kekuatan mekanik dan kestabilan termal aerogel (Meti et al., 2023). Semakin banyak ikatan $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ yang terbentuk, semakin kaku dan stabil jaringan aerogel yang dihasilkan, meskipun porositasnya tetap tinggi, bahkan melebihi 90% (Parale et al., 2024). Sifat superporous dari aerogel tetap terjaga terutama melalui penggunaan pengeringan superkritik, yang menghilangkan cairan antarpori tanpa menimbulkan tegangan kapiler yang meruntuhkan kerangka sehingga mempertahankan struktur pori terbuka dan luas permukaan besar (Ji et al., 2022).

Studi sebelumnya mengemukakan bahwa modifikasi adsorben menggunakan silika dapat meningkatkan kualitas aerogel. Penelitian terkait modifikasi adsorben menggunakan silika telah dilakukan oleh (Lv et al., 2018), yang memodifikasi selulosa dengan silika untuk adsorpsi. Hasil yang diperoleh menyatakan bahwa selulosa termodifikasi silika adalah adsorben yang efektif untuk adsorpsi minyak biaya produksi yang rendah, ramah lingkungan, dapat didaur ulang dengan baik, serta mudah diproduksi. Keunggulan-keunggulan ini menunjukkan bahwa kapas termodifikasi berpotensi diterapkan dalam pembersihan tumpahan minyak skala besar pada permukaan air.

Penelitian serupa juga dilakukan oleh (Panda & Gangawane, 2024) terkait sintesis aerogel hibrida silika-selulosa fleksibel (SCHA) menggunakan serat selulosa daur ulang

(RCF) untuk adsorpsi minyak. Pengaruh konsentrasi serat selulosa dan suhu lingkungan kondisi pada karakteristik termal, akustik, dan penyerapan minyak diukur secara komprehensif. Percobaan dilakukan dengan mempertimbangkan kisaran fraksi berat dari 1–4% berat dari kertas tisu bekas dengan *a cross-linker* silika. Kapasitas penyerapan minyak yang sangat baik sebesar 24,8 g/g juga terlihat pada 4% berat konsentrasi selulosa dalam aerogel hibrida dipertahankan hingga 5 siklus dengan kapasitas penyerapan 6,4 g/g. Hasil menunjukkan aerogel selulosa-silika dianggap sebagai bahan yang efektif dan adsorben yang menjanjikan untuk adsorpsi zat warna.

Berdasarkan uraian sebelumnya, akan dilakukan modifikasi aerogel selulosa dari batang dan tongkol jagung menggunakan pengikat silang SiO_2 dan aplikasinya sebagai adsorben tumpahan minyak. Parameter adsorpsi minyak dipelajari di antaranya variasi pH, waktu kontak, suhu dan konsentrasi. Selain itu, model isoterm adsorpsi dipelajari menggunakan model isoterm Langmuir dan isoterm Freundlich.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. bagaimana mensintesis aerogel selulosa dari serat batang dan tongkol tanaman jagung dengan metode *freeze drying*?
2. bagaimana mengkarakterisasi aerogel selulosa dari serat batang dan tongkol tanaman jagung?
3. bagaimana pengaruh variasi waktu kontak, pH, suhu, dan konsentrasi terhadap penyerapan minyak oleh aerogel selulosa?
4. bagaimana kapasitas adsorpsi aerogel selulosa terhadap minyak?
5. bagaimana nilai variabel kinetika dan termodinamika adsorpsi minyak oleh aerogel selulosa serat batang dan tongkol tanaman jagung?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. mensintesis aerogel selulosa dari serat batang dan tongkol tanaman jagung dengan metode *freeze drying*.
2. mengkarakterisasi aerogel selulosa dari serat batang dan tongkol tanaman jagung.
3. menentukan pengaruh variasi waktu kontak, pH, suhu, dan konsentrasi terhadap penyerapan minyak oleh aerogel selulosa.
4. menentukan kapasitas adsorpsi aerogel selulosa terhadap minyak.
5. menentukan nilai variabel kinetika dan termodinamika adsorpsi minyak oleh aerogel selulosa serat batang dan tongkol tanaman jagung.

1.4 Manfaat Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah dan tujuan dari penelitian, maka manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. memberikan informasi tentang potensi selulosa dari limbah batang dan tongkol jagung
2. memberikan informasi tentang potensi adsorben yang mudah diperoleh dari limbah batang dan tongkol jagung untuk mengadsorpsi tumpahan minyak
3. memberikan informasi tentang potensi adsorben yang murah dari limbah batang dan tongkol jagung untuk mengadsorpsi tumpahan minyak
4. sebagai bahan rujukan bagi peneliti yang akan meneliti selanjutnya.

1.5 Kebaruan Penelitian

Kebaruan penelitian ini yaitu limbah dari pertanian jagung berupa batang dan tongkol tanaman jagung dimanfaatkan kandungan selulosanya sebagai bahan pembuatan adsorben ramah lingkungan untuk mengatasi pencemaran tumpahan minyak.

1.6 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini merupakan studi eksperimen yang bertujuan mengekstrak selulosa dari batang dan tongkol jagung serta mengkaji pemanfaatannya sebagai bahan pembuatan aerogel selulosa untuk adsorpsi minyak. Tesis ini disusun ke dalam lima bab yang saling berkaitan, sengan setiap bab menguraikan tahapan penelitian secara sistematis mulai dari proses ekstraksi dan karakterisasi hingga aplikasi aerogel pada penyerapan minyak. Ruang lingkup masing-masing Bab dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Bab I: Membahas tentang latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, ruang lingkup penelitian, kebaruan, kerangka konsep, dan landasan teori
2. Bab II: Membahas tentang sintesis dan karakterisasi aerogel selulosa dari batang dan tongkol tanaman jagung
3. Bab III: Membahas tentang studi kinetika, termodinamika, dan regenerasi adsorpsi minyak oleh aerogel selulosa berbasis limbah jagung
4. Bab IV: Menyajikan analisis menyeluruh yang mengintegrasikan hasil penelitian dari Bab II dan III
5. Bab V: Menyimpulkan hasil utama penelitian secara ringkas dan sistematis serta memberikan saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

1.7 Landasan Teori

1.7.1 Biomassa tanaman jagung sebagai sumber bahan baku untuk sintesis aerogel selulosa

Limbah pertanian dihasilkan dalam bentuk buangan yang tidak terpakai dan sisa makanan. Proses dekomposisi limbah secara alami berlangsung lambat, sehingga akumulasi limbah dapat mengganggu lingkungan dan berdampak pada kesehatan manusia. Limbah pertanian dapat diolah lebih lanjut untuk menghasilkan produk bernilai tambah. Salah satu limbah pertanian yang potensial adalah limbah tanaman jagung,

yang masih dapat dimanfaatkan sebagai pakan ternak, bahan bakar, kompos, adsorben, dan produk lainnya. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (2025), produksi jagung di Indonesia mencapai 15.138.912,00 ton dengan luas lahan 2.548.654,00 ha. Produksi jagung yang cukup besar ini menimbulkan dampak pada jumlah limbah pertanian, dalam hal ini limbah tongkol dan batang jagung yang dihasilkan. Menurut Harly dan Mulyani (2024), pemanfaatan limbah tanaman jagung masih sangat terbatas, biasanya hanya digunakan sebagai bahan pakan ternak merupakan hasil samping pertanian jagung. Oleh karena itu, diperlukan upaya pemanfaatan limbah tanaman jagung secara lebih inovatif dan bernilai tambah melalui pendekatan kreatif dalam mengeksplorasi potensi yang dimilikinya (Harly & Mulyani, 2024).

Tanaman jagung merupakan tanaman biji-bijian dari keluarga rumput-rumputan yang telah dikenal luas di seluruh dunia, termasuk di Indonesia. Jagung juga merupakan salah satu makanan pokok yang banyak diproduksi di Indonesia. Budidaya jagung dilakukan secara intensif karena kondisi tanah dan iklim di Indonesia sangat mendukung pertumbuhan tanaman ini (Bagu, 2025). Menurut Bagu (2025), tanaman jagung (*Zea mays* L.) secara taksonomi diklasifikasikan sebagai berikut

Kingdom : Plantae (tumbuh-tumbuhan)
 Divisio : Spermatophyta (tumbuhan berbiji)
 Sub Divisio : Angiospermae (berbiji tertutup)
 Classis : Monocotyledone (berkeping satu)
 Ordo : Graminae (rumput-rumputan)
 Familia : Graminaceae
 Genus : *Zea*
 Spesies : *Zea mays* L.

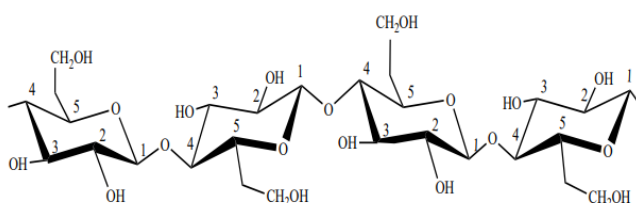
Bagian tanaman jagung yang banyak dimanfaatkan oleh petani dalam pengelolaan limbah pertanian adalah batang jagung. Batang jagung memiliki kandungan selulosa yang cukup tinggi sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai pakan ternak berserat, bahan baku pulp dan kertas, serta sumber biomassa untuk energi (Zhao et al., 2018; Kim et al., 2020). Selain batang jagung, limbah pertanian lain yang kaya akan selulosa meliputi jerami padi, tongkol jagung, dan bagas tebu, yang hingga kini belum dimanfaatkan secara optimal (Sindhu et al., 2016)



Gambar 1.1 Tanaman Jagung (Sulardi & Amelia, 2023)

Selulosa merupakan senyawa yang secara alami terdapat di dalam sel tanaman dalam bentuk struktur kristalin. Dinding sel pada umumnya terdiri dari selulosa, hemiselulosa dan lignin dengan perbandingan 4:3:3. Namun, perbandingan dari senyawa ini berbeda tergantung dari sumber lignoselulosa seperti kayu lunak, kayu keras dan rumput. Disamping ketiga senyawa tersebut, lignoselulosa terdiri dari sebagian kecil pektin, senyawa nitrogen dan abu. Sebagai contoh, kayu terdiri dari 50% karbon, 6% hidrogen, 44% oksigen dan 0.05-0.4% nitrogen. Sumber selulosa yang melimpah berasal dari limbah pertanian, seperti jerami padi, jerami jagung, batang jagung, dan bagas. Berbagai upaya pemanfaatan bahan berserat telah dilakukan, antara lain dengan bantuan mikroorganisme untuk menghasilkan produk bernilai tambah seperti protein pakan dan bioetanol (Gea dan Harahap, 2018).

Selulosa merupakan komponen utama penyusun kayu dan serat tumbuhan, sedangkan kapas menghasilkan selulosa dengan tingkat kemurnian yang sangat tinggi karena hampir seluruh kandungannya adalah selulosa. Selulosa tidak larut dalam air dan bukan termasuk karbohidrat pereduksi. Dalam kondisi asam, selulosa dapat mengalami hidrolisis yang memutus ikatan β -(1 $\rightarrow$ 4)-glikosidik sehingga menghasilkan molekul D-glukosa. Secara struktural, selulosa adalah polimer alam linier, tersusun atas unit-unit β -D-glukopiranososa yang dihubungkan melalui ikatan β -(1 $\rightarrow$ 4)-glikosidik, membentuk rantai panjang dengan kecenderungan kristalin yang tinggi, karena ikatan hidrogen intra- dan inter-rantai yang kuat membentuk mikrofibril sebagai struktur pembentuk dinding sel tumbuhan (Marinho, 2025). Struktur kimia selulosa ditunjukkan pada Gambar 1.2



Gambar 1.2 Struktur Selulosa (Heinze, 2015)

Selulosa adalah polisakarida linier tersusun dari ratusan hingga ribuan unit glukosa β -D yang saling terikat melalui ikatan β -(1 $\rightarrow$ 4)-glikosidik, sehingga membentuk rantai polimer panjang dengan rumus umum $(C_6H_{10}O_5)_n$ yang memberikan kekakuan struktural pada materialnya. Struktur molekul ini menyebabkan selulosa memiliki stabilitas yang tinggi karena ikatan hidrogen intra- dan intermolekuler antar rantai polimer memperkuat agregasi molekulnya (Garg et al., 2025). Dalam dinding sel tumbuhan, selulosa berinteraksi dengan hemiselulosa dan lignin untuk membentuk struktur lignoselulosa yang kompak dan kuat, sehingga menjadi komponen utama yang menopang kekuatan mekanik jaringan tanaman. Polisakarida lain seperti hemiselulosa yang lebih amorf berfungsi sebagai perekat antara mikrofibril selulosa dan lignin, meningkatkan kekakuan dan stabilitas dinding sel tumbuhan (Pekala et al., 2023). Selulosa dapat dihidrolisis secara kimia melalui perlakuan asam kuat untuk memutus ikatan glikosidik dan menghasilkan unit D-glukosa, yang merupakan dasar biodegradasi dalam proses industri seperti produksi bioetanol atau fermentasi gula. Proses ini juga umum digunakan dalam

penelitian hidrolisis lignoselulosa dari limbah pertanian untuk konversi menjadi bahan bernilai tambah (Sutini et al., 2019).

1.7.2 Aerogel selulosa

Aerogel merupakan material padat tiga dimensi yang tersusun atas lebih dari 90% udara, sehingga memiliki struktur yang sangat berpori dan densitas yang sangat rendah. Material berpori ini diperoleh melalui proses penggantian fase cair dalam senyawa sol-gel dengan udara melalui tahap pengeringan tertentu. Karakteristik unggulan aerogel, seperti luas permukaan yang tinggi, mesoporositas yang besar, konduktivitas termal yang rendah, serta kimia permukaan yang dapat dimodifikasi, menjadikan material ini sangat serbaguna untuk berbagai aplikasi teknis (Stark et al., 2025). Aerogel telah banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang, antara lain aplikasi biomedis, akustik, insulasi termal, superkapasitor, serta sebagai adsorben untuk menghilangkan kontaminan guna mengurangi permasalahan lingkungan. Berdasarkan bahan bakunya, aerogel dapat disintesis dari material mineral, polimer sintesis, maupun material alami (Stark et al., 2025).

Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian aerogel semakin difokuskan pada pengembangan aerogel berbasis biopolimer. Biopolimer memiliki keunggulan berupa biodegradabilitas, biokompatibilitas, sifat tidak toksik, serta ketersediaan bahan baku yang melimpah. Penggunaan biopolimer sebagai pengganti polimer berbasis minyak bumi, yang umumnya terdegradasi secara lambat dan berpotensi mencemari lingkungan, menghasilkan produk aerogel yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Selain itu, pemanfaatan biomassa sebagai bahan baku biopolimer juga menjadi pendekatan yang efektif dalam pengelolaan limbah serta pelestarian lingkungan (Stark et al., 2025). Struktur aerogel selulosa ditunjukkan pada Gambar 1.3



Gambar 1.3 Aerogel selulosa

Proses pembuatan aerogel umumnya melibatkan tiga tahapan utama, yaitu: (1) transisi sol-gel (gelasi), (2) penyempurnaan jaringan (aging), dan (3) transisi gel-aerogel melalui proses pengeringan. Setelah material yang diinginkan dipilih untuk fabrikasi aerogel, bahan prekursor didispersikan ke dalam medium cair sehingga membentuk dispersi koloid, kemudian dibiarkan mengalami gelasi hingga terbentuk jaringan padat kontinu yang terdistribusi di seluruh fase cair. Pada beberapa jenis material, transisi dari dispersi koloid menjadi gel dapat terjadi tanpa penambahan bahan pengikat silang (*crosslinker*). Namun, pada material lainnya, penambahan agen pengikat silang

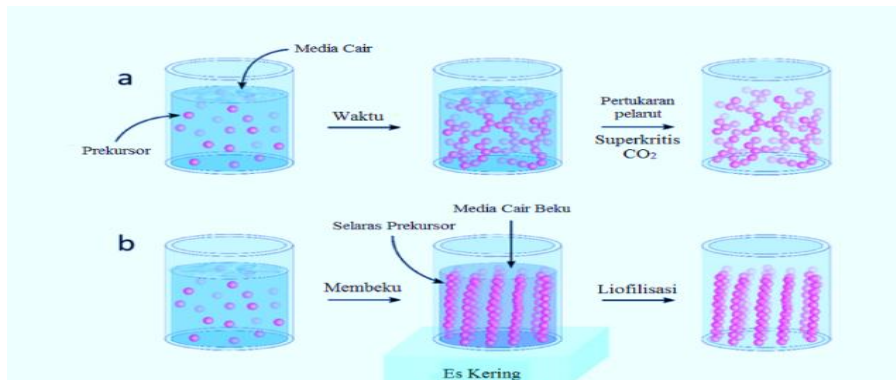
diperlukan untuk meningkatkan interaksi antar partikel padat sehingga struktur gel yang kuat dapat terbentuk. Waktu gelasi sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain komposisi kimia larutan prekursor, konsentrasi bahan prekursor dan aditif, suhu proses, serta pH system (Ganesamoorthy et al., 2021).

Setelah proses gelasi selesai, beberapa material memerlukan tahap *curing* tambahan atau aging untuk memperkuat jaringan aerogel yang terbentuk. Selanjutnya, gel yang telah terbentuk dikeringkan dengan metode tertentu yang bertujuan meminimalkan tegangan permukaan di dalam pori-pori jaringan padat, sehingga struktur pori tidak mengalami kerusakan. Metode pengeringan merupakan tahapan yang paling krusial dalam proses sintesis aerogel karena sangat menentukan morfologi dan struktur pori aerogel selulosa yang dihasilkan. Pengeringan konvensional umumnya melibatkan tekanan kapiler antara fase cair dan gas, yang dapat menyebabkan kerusakan struktur pori gel. Oleh karena itu, metode pengeringan modern yang banyak digunakan adalah pengeringan superkritis dan pengeringan beku (*freeze drying*) untuk mempertahankan integritas struktur pori aerogel (Ganesamoorthy et al., 2021).

Proses pengeringan aerogel umumnya dilakukan melalui dua metode utama, yaitu metode pengeringan superkritis CO₂ dan metode *freeze drying*. Pada metode superkritis CO₂, proses pengeringan dilakukan pada kondisi titik kritis CO₂, yaitu suhu sekitar 304 K dan tekanan 7,4 MPa. Penggunaan CO₂ dinilai lebih aman dan lebih umum dibandingkan pelarut superkritis lainnya. Proses ini melibatkan transfer massa dua arah antara pelarut dalam gel dan CO₂ pada pori-pori gel yang masih basah. Pada tahap awal, CO₂ terlarut dalam pelarut gel menyebabkan ekspansi volume gel sehingga kelebihan pelarut dapat dikeluarkan. Selanjutnya, peningkatan tekanan dan suhu hingga mencapai kondisi superkritis menghilangkan tegangan permukaan, sehingga struktur pori gel dapat dipertahankan tanpa mengalami kerusakan (Barrios et al., 2019).

Beberapa parameter penting yang perlu diperhatikan dalam optimasi proses pengeringan superkritis CO₂ meliputi suhu, tekanan, ukuran partikel, laju alir CO₂, dan waktu ekstraksi. Peningkatan suhu dan tekanan selama proses pengeringan memengaruhi laju penghilangan pelarut, sedangkan ukuran partikel berpengaruh terhadap kecepatan difusi. Partikel dengan ukuran yang lebih besar cenderung menghambat proses pengeringan. Selain itu, pengaturan suplai CO₂ dan waktu pengeringan yang tepat diperlukan untuk memperoleh hasil aerogel dengan kemurnian dan struktur pori yang optimal (Barrios et al., 2019).

Pengeringan beku (*freeze drying*) merupakan metode pengeringan yang memiliki keunggulan dalam mempertahankan kualitas struktur material, terutama untuk bahan yang sensitif terhadap panas. Metode ini dikenal juga dengan istilah liofilisasi atau *cryodesiccation*. Dibandingkan metode lainnya, *freeze drying* dianggap sebagai metode pengeringan yang paling efektif karena mampu menjaga struktur pori aerogel dengan baik tanpa menyebabkan penyusutan yang signifikan (Barrios et al., 2019). Perbandingan proses sintesis aerogel berdasarkan metode pengeringan ditunjukkan pada Gambar 1.4



Gambar 1.4 Perbandingan sintesis aerogel dapat ditinjau dari metode Pengeringnya dapat melalui (a) metode pengering superkrits CO₂ dan (b) metode pengering beku (Barrios et al., 2019)

Prinsip dasar *freeze drying* adalah penghilangan air dari bahan yang telah dibekukan melalui proses sublimasi, tanpa melewati fase cair. Metode ini banyak digunakan dalam industri farmasi untuk menghasilkan produk bubuk yang stabil dan telah menjadi standar dalam produksi sediaan injeksi komersial. Aerogel selulosa merupakan material ramah lingkungan dan bersifat multifungsi, dengan potensi aplikasi yang luas, antara lain sebagai adsorben untuk pemisahan minyak dan air, material insulasi termal, bahan biomedis, serta sebagai matriks untuk nanopartikel logam atau oksida logam (Ganesamoorthy et al., 2021)

Selain itu, aerogel telah banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang, seperti katalisis, pemisahan kimia, analisis kimia, material penyerap, serta teknologi dan penyimpanan energi. Aerogel berbasis material anorganik, hibrida anorganik–organik, maupun organik terus dikembangkan karena memiliki densitas rendah, porositas tinggi, dan luas permukaan besar yang mendukung kemampuan adsorpsi dan retensi zat secara efektif (Niu et al., 2024). Aerogel selulosa dapat disintesis dengan mengombinasikan prekursor aerogel anorganik, seperti silika (SiO₂), dengan sumber selulosa yang diperoleh dari biomassa batang jagung. Aerogel ini serta bersifat biodegradable sehingga dapat terurai secara hayati. Oleh karena itu, aerogel selulosa menjadi fokus perhatian dalam penelitian material berkelanjutan dalam beberapa tahun terakhir (Payanda et al., 2023).

1.8 Kerangka Konseptual Penelitian

Tumpahan minyak di laut merupakan salah satu bentuk pencemaran lingkungan yang paling serius dan berpotensi menimbulkan kerusakan jangka panjang. Tumpahan minyak tidak hanya berasal dari minyak bumi dan produk turunannya, tetapi juga dapat disebabkan oleh minyak nabati, seperti minyak kelapa sawit, minyak kedelai, dan minyak nabati lainnya, yang banyak digunakan dalam aktivitas industri pangan, transportasi laut, serta kegiatan pelabuhan. Tumpahan minyak, baik yang bersifat fosil maupun nabati, dapat terjadi akibat kecelakaan industri, kebocoran kargo kapal, maupun kelalaian dalam proses operasional. Meskipun minyak nabati sering dianggap lebih ramah lingkungan,

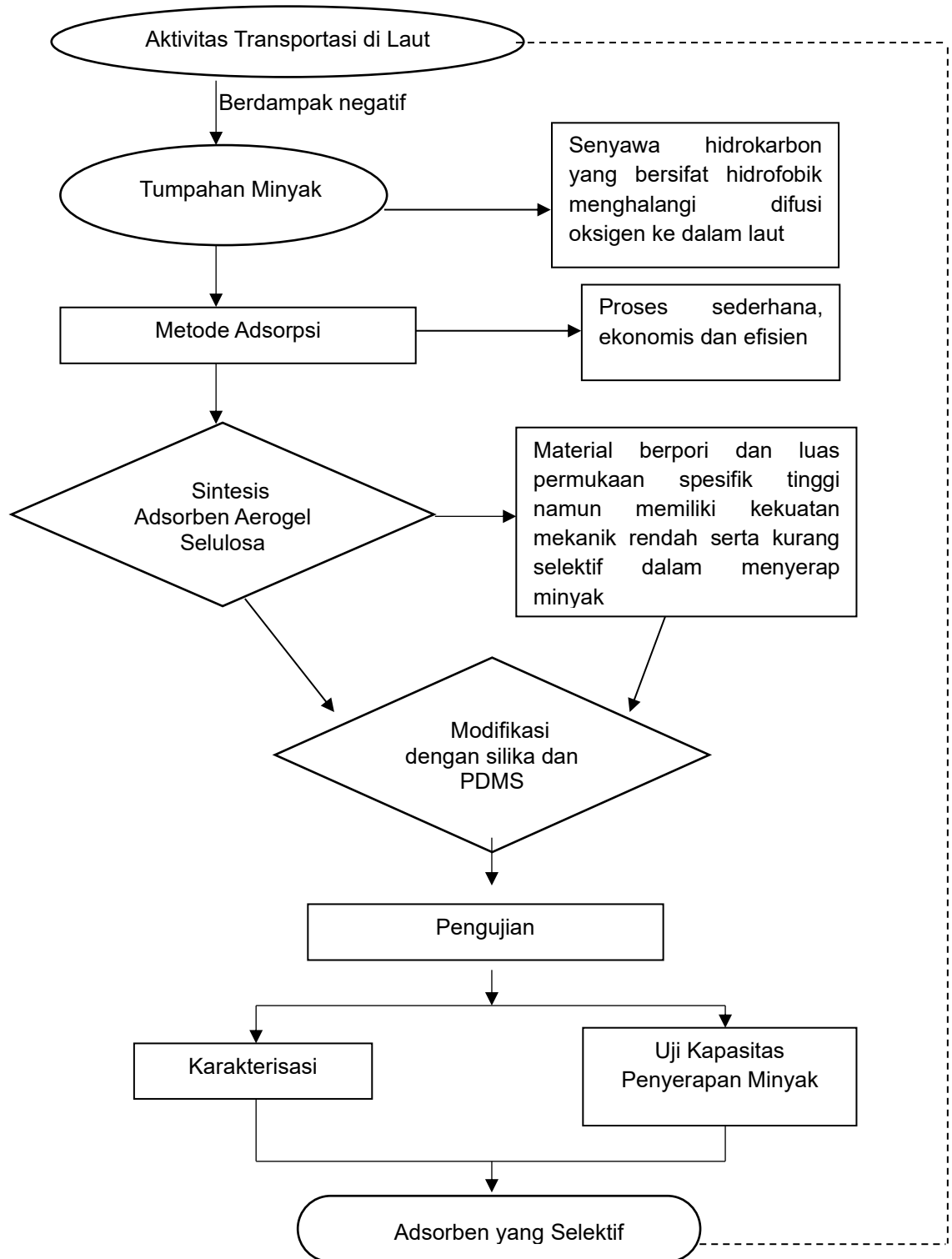
keberadaannya dalam jumlah besar di perairan laut tetap dapat menimbulkan pencemaran serius, seperti penurunan kadar oksigen terlarut, gangguan fotosintesis organisme laut, serta kerusakan habitat biota perairan.

Dampak dari tumpahan minyak sangat luas, mencakup kerusakan ekosistem laut, terganggunya kehidupan biota perairan, hingga dampak sosial dan ekonomi bagi masyarakat pesisir yang bergantung pada sumber daya laut. Lapisan minyak yang terbentuk di permukaan air dapat menghambat difusi oksigen dan cahaya matahari ke dalam perairan, sehingga mengganggu rantai makanan dan keseimbangan ekosistem. Oleh karena itu, penanganan tumpahan minyak, baik minyak bumi maupun minyak nabati, menjadi isu lingkungan yang sangat penting dan mendesak.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk menangani tumpahan minyak, antara lain metode mekanik, kimia, dan biologis. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah metode adsorpsi dengan memanfaatkan bahan penjerap, karena dinilai efektif, mudah diaplikasikan, dan mampu menyerap minyak secara selektif. Namun, penggunaan adsorben sintetis sering kali menimbulkan permasalahan lingkungan baru karena sulit terurai dan berpotensi menyebabkan pencemaran sekunder. Oleh sebab itu, pengembangan adsorben berbasis bahan alami yang ramah lingkungan menjadi alternatif yang sangat diperlukan. Salah satu solusi yang menjanjikan adalah pemanfaatan aerogel selulosa berbasis limbah pertanian, khususnya batang dan tongkol jagung, sebagai material adsorben untuk penanganan tumpahan minyak bumi maupun minyak nabati. Aerogel selulosa memiliki struktur berpori tiga dimensi, luas permukaan yang tinggi, densitas rendah, serta afinitas yang baik terhadap senyawa nonpolar, sehingga efektif dalam menyerap berbagai jenis minyak. Jagung sebagai bahan baku utama menawarkan keunggulan berupa ketersediaan yang melimpah, sifat terbarukan, biodegradable, serta bernilai ekonomi rendah, sehingga berpotensi menjadi solusi yang berkelanjutan dibandingkan adsorben sintetis.

Sintesis selulosa dalam penelitian ini diawali dengan proses ekstraksi selulosa dari batang dan tongkol jagung yang meliputi dua tahap utama, yaitu delignifikasi dan bleaching. Tahap delignifikasi bertujuan untuk menghilangkan lignin dan hemiselulosa, sedangkan bleaching dilakukan untuk meningkatkan kemurnian selulosa. Selulosa hasil ekstraksi selanjutnya dihitung nilai rendemennya untuk mengetahui persentase kandungan selulosa yang diperoleh dari masing-masing bahan baku. Aerogel selulosa dipreparasi menggunakan metode sol–gel yang diikuti dengan proses pengeringan beku (freeze-drying) untuk mempertahankan struktur berpori dan mencegah keruntuhan jaringan gel. Aerogel yang dihasilkan kemudian dikarakterisasi menggunakan X-ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), analisis Brunauer–Emmett–Teller (BET), dan Scanning Electron Microscopy (SEM).

Aerogel selulosa yang telah dikarakterisasi selanjutnya dimanfaatkan sebagai material adsorben untuk penanganan tumpahan minyak. Uji kapasitas adsorpsi aerogel selulosa terhadap minyak bumi dan minyak nabati dilakukan dengan mempelajari pengaruh waktu kontak, pH, suhu, dan konsentrasi minyak, serta dianalisis menggunakan metode gravimetri. Bagan kerangka pikir penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1.5.



Gambar 1.5 Kerangka Pikir Penelitian

1.9 Hipotesis Penelitian

Berdasarkan kerangka pikir di atas, hipotesis pada penelitian ini ialah sebagai berikut.

1. aerogel selulosa dari batang dan tongkol jagung memiliki karakteristik material dengan luas permukaan dan porositas yang baik,
2. variasi waktu kontak, pH, suhu, dan konsentrasi berpengaruh terhadap penyerapan minyak oleh aerogel,
3. kapasitas adsorpsi tumpahan minyak dapat menggambarkan model isoterm Freundlich atau model isoterm Langmuir,
4. variabel kinetika mengikuti model kinetika orde satu semu atau model orde dua semu, sedangkan termodinamika memberikan informasi tentang energi yang terlibat dalam proses adsorpsi.

1.10 Daftar Pustaka

- Agboola, O.D., & Benson, N.U., 2021. Physisorption and Chemisorption Mechanisms Influencing Micro (Nano) Plastics-Organic Chemical Contaminants Interactions: A Review. *Frontiers in Environmental Science*. **9**(678574): 1–27. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.678574>
- Ahmadzadeh, S., Sagardui, A., Huitink, D., Chen, J., & Ubeyitogullari, A., 2024. Cellulose-Starch Composite Aerogels as Thermal Superinsulating Materials. *ACS Omega*. **9**(50): 49205–49213. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c05840>
- Ajala, O. A., & Akinawo, O., 2023. *Adsorptive removal of antibiotic pollutants from wastewater using biomass/biochar-based adsorbents*. **13**(4678): 4678–4712. <https://doi.org/10.1039/d2ra06436g>
- Al-Ghouti, M. A., Ashfaq, M. Y., Khan, M., Al Disi, Z., Da'na, D. A., & Shoshaa, R., 2023. State-of-the-art adsorption and adsorptive filtration based technologies for the removal of trace elements: A critical review. *Science of the Total Environment*. **895**(164854): 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164854>
- Alaqarbeh, M., 2021. Adsorption Phenomena: Definition, Mechanisms, and Adsorption. *RHAZES: Green and Applied Chemistry*. **13**: 43–51. <https://doi.org/10.48419/IMIST.PRSM/rhazes-v13.28283>
- Alkhaldi, H., Alharthi, S., AlGhamdi, H.A., AlZahrani, Y.M., Mahmoud, S.A., Amin, L.G., et al., 2024. Sustainable polymeric adsorbents for adsorption-based water remediation and pathogen deactivation: a review. *RSC Advances*. **14**(45): 33143–33190. <https://doi.org/10.1039/D4RA05269B>
- Alvarez-Barreto, J.F., Larrea, F., Pinos, M.C., Benalcázar, J., Oña, D., Andino, et al., 2021. Chemical pretreatments on residual cocoa pod shell biomass for bioethanol production. *Bionatura*. **6**(1): 1490–1500. <https://doi.org/10.21931/RB/2020.06.01.9>
- Alvarez-Barreto, J.F., Larrea, F., Pinos, M.C., Benalcázar, J., Oña, D., Andino, et al., 2021. Chemical pretreatments on residual cocoa pod shell biomass for bioethanol production. *Bionatura*. **6**(1): 1490–1500. <https://doi.org/10.21931/RB/2020.06.01.9>
- Asif, Z., Chen, Z., & An, C., 2022. *Environmental Impacts and Challenges Associated with Oil Spills on Shorelines*. *Journal of Marine Science and Engineering*. **10**(762): 1-20. <https://doi.org/10.3390/jmse10060762>

- Awogbemi, O., & Kallon, D.V.Von., 2022. Valorization of agricultural wastes for biofuel applications. *Heliyon*. **8**(10): 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11117>
- Bagu, F. S., 2025. The Spatial Land Suitability Evaluation for Corn (*Zea mays* L) Crops in Patilanggio District , Pohuwato Regency , Gorontalo Province. *Jurnal Agronomi Tanaman Tropika*. **7**(1): 265-268. <https://doi.org/10.36378/juatika.v7i1.4118>
- Barrios, E., Fox, D., Yee, Y., Sip, L., Catarata, R., Calderon, et al., 2019. Nanomaterials in Advanced, High-Performance Aerogel Composites: A Review. *Polymers*. **11**(726): 1–41. <https://doi.org/10.3390/polym11040726>
- Cao, C., Huang, H., Li, H., Liu, S., & Wu, Z.S., 2025. The Chemistry and Design Principles of Cellulose-based Materials Toward Eco-friendly Flexible Supercapacitors. *Advanced Powder Materials*, **5**(1): 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.apmate.2025.100358>
- Chen, L., Zhang, G., Xu, B., & Guo, J., 2024. Highly efficient oil-water separation using superhydrophobic cellulose aerogels derived from corn straw. *Green Processing and Synthesis*. **13**(1): 1-24. <https://doi.org/10.1515/gps-2024-0063>
- Chen, X., Bi, H., Yue, R., Chen, Z., & An, C., 2022. Effects of oil characteristics on the performance of shoreline response operations: A review. *Frontiers in Environmental Science*. **10**(2): 1–12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1033909>
- Chen, Y., Xie, C., You, Y., Xu, T., Li, Y., Yuan, J., Xie, H., & Guo, Y., 2025. Molecularly engineering cellulose into a functional cellulose-based aerogel adsorbent for the recovery of precious metals from e-waste. *Green Chem*. **27**(29): 8818–8831. <https://doi.org/10.1039/D5GC00100E>
- Chen, Z., An, C., & Lee, K., 2021. Recent advances in developing cellulosic sorbent materials for oil spill cleanup: A state-of-the-art review. *Journal of Cleaner Production*. **311**(127630): 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127630>
- dos Santos, D.F., Ferreira, R.R., Souza, A.G., Lenhani, G. C., Deon, V.G., Rosa, D.S., et al., 2025. Upcycling corn cropping waste by nanocellulose production. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. **67**(103624): 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2025.103624>
- Elsheref, M., Messina, L., & Tarr, M. A., 2023. Photochemistry of oil in marine systems: developments since the Deepwater Horizon spill. *Environ. Sci. Processes Impacts*. **25**(12): 1878–1908. <https://doi.org/10.1039/D3EM00248A>
- Fang, Z., Li, B., Liu, Y., Zhu, J., Li, G., Hou, G., et al., 2020. Critical Role of Degree of Polymerization of Cellulose in Super-Strong Nanocellulose Films. *Matter*. **2**(4): 1000–1014. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2020.01.016>
- Fattorini, D., 2025. Hydrocarbons in seawater: Sources, fate, impacts, and remediation strategies. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. **22**(6): 21-46. <https://doi.org/10.36922/ajwep025290224>
- Gandam, P. K., Chinta, M. L., Gandham, A. P., Pabbathi, N. P. P., Konakanchi, S., Bhavanam, A., et al., 2022. A New Insight into the Composition and Physical Characteristics of Corncob—Substantiating Its Potential for Tailored Biorefinery Objectives. *Fermentation*. **8**(12): 1-3. <https://doi.org/10.3390/fermentation8120704>
- Ganesamoorthy, R., Vadivel, V. K., Kumar, R., Kushwaha, O. S., & Mamane, H., 2021. Aerogels for water treatment: A review. In *Journal of Cleaner Production*. **329**(129713): 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129713>

- Garg, T., Arora, S., & Pahwa, R., 2025. Cellulose and its derivatives : Structure, modification, and application in controlled drug delivery. *Future Journal of Pharmaceutical Sciences*. **11**(76): 1-28. <https://doi.org/10.1186/s43094-025-00834-2>
- Gea, S., & Harahap, M., 2018. *Cellulose*. Medan: USU Press.
- Guo, W., Wang, X., Liu, S., Kong, X., Wang, P., & Xu, T., 2022. Long-Term Petroleum Hydrocarbons Pollution after a Coastal Oil Spill. **10**(1380): 1-13. <https://doi.org/10.3390/jmse10101380>
- Harly, R., & Mulyani, S., 2024. Pemanfaatan Limbah Pertanian (Padi dan Jagung) Sebagai Pakan Ternak Sapi di Kecamatan Harau Kabupaten Lima Puluh Kota The Utilization of Agricultural Waste (Rice and Corn) As Feed for Cattle in Harau District, Lima Puluh Kota. **7**(1), 7–12.
- International Tanker Owners Pollution Federation Ltd. 2024. *ITOPF Handbook 2024/25*. London, UK: ITOPF Ltd.
- J Ji, C., Zhu, S., Zhang, E., Li, W., Liu, Y., Zhang, et al., 2022. Research progress and applications of silica-based aerogels-abibliometric analysis. *RSC Advances*. **12**(22): 14137–14153. <https://doi.org/10.1039/d2ra01511k>
- Ke, W., Ge, F., Shi, X., Zhang, Y., Wu, T., Zhu, et al., 2024. Superelastic and superflexible cellulose aerogels for thermal insulation and oil/water separation. *International Journal of Biological Macromolecules*. **260**(129245): 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129245>
- Khan, A., Mishra, A., Patidar, R., & Pappu, A., 2024. Effect of lignocellulosic corn stalk on mechanical, physical, and thermal properties of injection moulded low density polyethylene composites: An approach towards a circular economy. *Heliyon*. **10**(4): 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25287>
- Kianfar, E., 2025. Environmental Technology & Innovation Current situation and future outlook petroleum hydrocarbons in marine systems : A review. *Environmental Technology & Innovation*. **40**(104572): 1-58. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104572>
- Kim, J. H., Kim, M. J., Lee, B., Chun, J. M., Patil, V., & Kim, Y. S., 2020. Durable ice-lubricating surfaces based on polydimethylsiloxane embedded silicone oil infused silica aerogel. *Applied Surface Science*, 512(145728): 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145728>
- Lei, E., Li, W., Ma, C., & Liu, S., 2018. An ultra-lightweight recyclable carbon aerogel from bleached softwood kraft pulp for efficient oil and organic absorption. *Materials Chemistry and Physics*, 214(1): 291–296. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.04.075>
- Li, A., Huber, T., Barker, D., Nazmi, A. R., & Najaf Zadeh, H., 2024. An overview of cellulose aerogels and foams for oil sorption: Preparation, modification, and potential of 3D printing. In *Carbohydrate Polymers*. **343**(122432): 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122432>
- Li, R., He, X., Wang, H., Wang, Y., Zhang, M., Mei, X., et al., 2022. Estimating Emissions from Crop Residue Open Burning in Central China from 2012 to 2020 Using Statistical Models Combined with Satellite Observations. *Remote Sensing*. **14**(15): 1–17. <https://doi.org/10.3390/rs14153682>

- Long, L. Y., Weng, Y. X., & Wang, Y. Z., 2018. Cellulose aerogels: Synthesis, applications, and prospects. In *Polymers*. **8**(6): 1-28.
<https://doi.org/10.3390/polym10060623>
- Lv, N., Wang, X., Peng, S., Zhang, H., & Luo, L., 2018. Study of the kinetics and equilibrium of the adsorption of oils onto hydrophobic jute fiber modified via the sol-gel method. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. **15**(5): 1-18. <https://doi.org/10.3390/ijerph15050969>
- Mai, T., Wang, P. L., & Ma, M. G., 2024. Promising cellulose-based aerogel composites: Preparation methods and advanced applications. *Composites Part B: Engineering*. **2810**(111559): 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111559>
- Marinho, E., 2025. Cellulose: A comprehensive review of its properties and applications. In *Sustainable Chemistry for the Environment*. **11**(10028): 1-8.
<https://doi.org/10.1016/j.scienv.2025.100283>
- Meti, P., Wang, Q., Mahadik, D. B., Lee, K. Y., Gong, Y. D., & Park, H. H., 2023. Evolutionary Progress of Silica Aerogels and Their Classification Based on Composition: An Overview. *Nanomaterials*. **13**(9): 1-31.
<https://doi.org/10.3390/nano13091498>
- Mozaffari, M., Kordzadeh-kermani, V., Ghalandari, V., Askari, A., & Sillanpää, M., 2022. *Science of the Total Environment Adsorption isotherm models : A comprehensive and systematic*. *Science of the Total Environment*. **812**(151334): 1-28.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151334>
- Niu, Z., Qu, F., Chen, F., Ma, X., Chen, B., Wang, L., 2024. Multifunctional Integrated Organic – Inorganic - Metal Hybrid Aerogel for Excellent Thermal Insulation and Electromagnetic Shielding Performance. *Nano-Micro Letters*. **16**(1): 1–13. <https://doi.org/10.1007/s40820-024-01409-1>
- Nguyen, H. S. H., Huynh, H. K. P., Nguyen, S. T., Nguyen, V. T. T., Nguyen, T. A., & Phan, A. N., 2022. Insights into sustainable aerogels from lignocellulosic materials. In *Journal of Materials Chemistry A Royal Society of Chemistry*. **10**(23467): 1-16.
<https://doi.org/10.1039/d2ta04994e>
- Nguyen, T. T. V., Tri, N., Tran, B. A., Dao Duy, T., Nguyen, S. T., Nguyen, et al., 2021. Synthesis, Characteristics, Oil Adsorption, and Thermal Insulation Performance of Cellulosic Aerogel Derived from Water Hyacinth. *ACS Omega*. **6**(40): 26130–26139. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03137>
- Niu, Z., Qu, F., Chen, F., Ma, X., Chen, B., & Wang, L., 2024. Multifunctional Integrated Organic – Inorganic - Metal Hybrid Aerogel for Excellent Thermal Insulation and Electromagnetic Shielding Performance. *Nano-Micro Letters*. **16**(1): 1–13. <https://doi.org/10.1007/s40820-024-01409-1>
- Nordborg, F. M., Jones, R. J., Oelgemöller, M., & Negri, A. P., 2020. Science of the Total Environment The effects of ultraviolet radiation and climate on oil toxicity to coral reef organisms – A review. *Science of the Total Environment*. **720**(137486): 1-15.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137486>
- Panda, D., & Gangawane, K. M., 2024. *Recycled cellulose-silica hybrid aerogel for effective oil adsorption: optimization and kinetics study*. *Sadhana*. **48**(110):1-21
<https://doi.org/10.1007/s12046-023-02161-9S>
- Pant, M., Fleeger, J. W., Samuel, D., Rita, J., Aixin, R., Donald, H., et al., 2025. Recovery

- of Saltmarsh Macroinfauna After the Deepwater Horizon Oil Spill. *Estuaries and Coasts*. **48**(4): 1–13. <https://doi.org/10.1007/s12237-025-01520-5>
- Parale, V. G., Kim, T., Choi, H., Phadtare, V. D., Dhavale, R. P., Kanamori, K., et al., 2024. Mechanically Strengthened Aerogels through Multiscale, Multicompositional, and Multidimensional Approaches: A Review. *Advanced Materials*. **36**(18): 1–47. <https://doi.org/10.1002/adma.202307772>
- Payanda Konuk, O., Alsuhibe, A. A. A. M., Yousefzadeh, H., Ulker, Z., Bozbag, S. E., García-González, C. A., et al., 2023. The effect of synthesis conditions and process parameters on aerogel properties. *Frontiers in Chemistry*. **11**(2), 1–26. <https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1294520>
- Pękala, P., Szymańska, M., & Zdunek, A., 2023. Interactions between non - cellulosic plant cell wall polysaccharides and cellulose emerging from adsorption studies. *Cellulose*. **30**(15): 9221–9239. <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05442-y>
- Pellenz, L., Rafael, C., Oliveira, S. De, Henrique, A., Ulson, A., Souza, D., at al., 2023. A comprehensive guide for characterization of adsorbent materials. **305**(122435): 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122435>
- Peng, D., Zhao, J., Liang, X., Guo, X., & Li, H., 2023. Corn stalk pith-based hydrophobic aerogel for efficient oil sorption. *Journal of Hazardous Materials*. **448**(130954): 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130954>
- Pereira, P. H. F., Fernandes, L., Jesus, H. E., Costa, P. G., Lacerda, C. H. F., Mies, M., et al., 2023. *The Impact of Highly Weathered Oil from the Most Extensive Oil Spill in Tropical Oceans (Brazil) on the Microbiome of the Coral Mussismilia hartii*. *Microorganisms*. **11**(1935): 1-14. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11081935>
- Poulose, A., Parameswaranpillai, J., George, J. J., Gopi, J. A., Krishnasamy, S., Dominic C. D, M., et al., 2022. Nanocellulose: A Fundamental Material for Science and Technology Applications. *Molecules*. **27**(22): 1–27. <https://doi.org/10.3390/molecules27228032>
- Prasanna, B. M., Cairns, J. E., Zaidi, P. H., Beyene, Y., Makumbi, D., Gowda, M., et al., 2021. Beat the stress: breeding for climate resilience in maize for the tropical rainfed environments. *Theoretical and Applied Genetics*. **134**(6): 1729–1752. <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03773-7>
- Puițel, A. C., Balan, C. D., & Nechita, M. T., 2025. Corn Stalks-Derived Hemicellulosic Polysaccharides: Extraction and Purification. *Polysaccharides*. **6**(1); 1-19. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides6010002>
- Purohit, B. K., Tewari, S., Prasad, K. S. N. V, Kumar, V., Pandey, N., Choudhury, P., et al., 2024. Regional Studies in Marine Science Marine oil spill clean-up : A review on technologies with recent trends and challenges. *Regional Studies in Marine Science*. **80**(103876): 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103876>
- Rajendra Bahadur, G. C., Awasthi, G. P., Shin, M., Sharma, K. P., Neupane, B. B., Kalauni, S. K., et al., 2024. Nanocellulose from Mankamana-3 corncob biomass: Synthesis, characterization, surface modification and potential applications. *Bioresource Technology Reports*. **28**(101971): 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101971>
- Review, A., 2020. *Application of Sorbents for Oil Spill Cleanup Focusing on Natural-*

- Based Modified Materials. Molecules.* **25**(4522): 1–22.
<https://doi.org/10.3390/molecules25194522>
- Shah, A. M., Zhang, H., Shahid, M., Ghazal, H., Shah, A. R., Niaz, M., et al., 2025. The Vital Roles of Agricultural Crop Residues and Agro-Industrial By-Products to Support Sustainable Livestock Productivity in Subtropical Regions. In *Animals*, **15**(8): 1-31. <https://doi.org/10.3390/ani15081184>
- Sindhu, R., Binod, P., & Pandey, A., 2016. Biological pretreatment of lignocellulosic biomass. *BITE*, **199**(1): 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.030>
- Stark, F. W., Thue, P. S., Missio, A. L., Machado, F. M., Delucis, R. de A., et al., 2025. Cellulose-Based Aerogels for Environmentally Sustainable Applications: A Review of the Production, Modification, and Sorption of Environmental Contaminants. In *Polymers*. **17**(2): 1-21. <https://doi.org/10.3390/polym17020236>
- Sozcu, S., Frajova, J., Wiener, J., Venkataraman, M., Tomkova, B., & Militky, J., 2024. Effect of Drying Methods on the Thermal and Mechanical Behavior of Bacterial Cellulose Aerogel. In *Gels*. **1**(7); 1-21. <https://doi.org/10.3390/gels10070474>
- Sulardi, I., & Amelia, O., 2023. *Agribisnis budidaya jagung*. Bekasi: PT Dewangga Energi Internasional.
- Sutini, Widiastuty, Y. R., & Ramadhani, A. N., 2019. Review : Hidrolisis Lignoselulosa dari Agricultural Waste Sebagai Optimasi Produksi Fermentable Sugar. *Equilibrium*, **3**(2): 1-8. <https://doi.org/10.20961/equilibrium.v3i2.42788>
- Tofanica, B. M., Mikhailidi, A., Fortună, M. E., Rotaru, R., Ungureanu, O. C., & Ungureanu, E., 2020. Cellulose Nanomaterials: Characterization Methods, Isolation Techniques, and Strategies. *Crystals*. **15**(4): 1–26.
<https://doi.org/10.3390/cryst15040352>
- Turhan Kara, I., Kiyak, B., Colak Gunes, N., & Yucel, S., 2024. Life cycle assessment of aerogels: a critical review. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. **111**(2): 618–649. <https://doi.org/10.1007/s10971-024-06455-0>
- Wang, S., Sun, M., Lv, J., Gu, J., Xu, Q., Li, Y., et al., 2024. Mullite-Fibers-Reinforced Bagasse Cellulose Aerogels with Excellent Mechanical, Flame Retardant, and Thermal Insulation Properties. *Materials*. **17**(15): 1-11.
<https://doi.org/10.3390/ma17153737>
- Xiao, J., Yuan, X., Li, W., Zhang, T. C., He, G., & Yuan, S., 2024. Cellulose-based aerogel derived N, B-co-doped porous biochar for high-performance CO₂ capture and supercapacitor. *International Journal of Biological Macromolecules*. **269**(132078): 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132078>
- Yi, X., Zhang, Z., Niu, J., Wang, H., Li, T., Gong, J., et al., 2024. Green Strong Cornstalk Rind-Based Cellulose-PVA Aerogel for Oil Adsorption and Thermal Insulation. *Polymers*. **16**(9): 1-11. <https://doi.org/10.3390/polym16091260>
- Zamparas, M., Tzivras, D., Dracopoulos, V., Ioannides, T., 2020. application of Sorbents for Oil Spill Cleanup Focusing on Natural-Based Modified Materials: A Review. *molecules*, **25**(4522): 1-22. <https://doi.org/doi:10.3390/molecules25194522>
- Zhai, Y., Yuan, X., Weber, C. C., Varley, R. J., & Henderson, L. C., 2024. Review of plant

cellulose-based aerogel materials for oil/water mixture separation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. **12**(5): 1-17.

<https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113716>

Zhang, C., Chen, G. H., Lang, D. N., Liu, G., Wu, R. L., Wang, W., et al., 2024. Superhydrophobic cellulose-nanofiber aerogels from waste cotton stalks for superior oil–water and emulsion separation. *Cellulose*. **31**(14): 8519–8538.

<https://doi.org/10.1007/s10570-024-06118-x>

BAB II

SINTESIS DAN KARAKTERISASI AEROGEL SELULOSA DARI LIMBAH JAGUNG

2.1 Abstrak

Pemanfaatan limbah pertanian sebagai sumber bahan baku material fungsional merupakan salah satu strategi penting dalam pengembangan material berkelanjutan. Selulosa dari biomassa lignoselulosa berpotensi dikembangkan menjadi aerogel selulosa, yaitu material berpori dengan densitas rendah, luas permukaan besar, dan struktur tiga dimensi yang unik. **Tujuan** penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengarakterisasi aerogel berbasis selulosa yang berasal dari batang dan tongkol. **Metode** penelitian ini terdiri atas tiga tahap utama, yaitu persiapan sampel, ekstraksi selulosa dari batang dan tongkol jagung, serta sintesis aerogel menggunakan metode sol gel dan *freeze-drying*. Aerogel yang dihasilkan dikarakterisasi menggunakan analisis FTIR, XRD, SEM, dan BET–BJH. **Hasil** aerogel selulosa yang diperoleh menunjukkan indeks kristalinitas sebesar 93,54% dengan ukuran kristal 8,09 nm. Luas permukaan spesifik aerogel adalah 18,27 m²/g dengan diameter pori rata-rata sebesar 4,6 Å. **Kesimpulan** kesimpulan dari penelitian ini yaitu hasil sintesis dan karakterisasi aerogel selulosa berhasil dilakukan, dengan demikian bahwa selulosa dari batang dan tongkol jagung dapat digunakan sebagai bahan baku produksi aerogel.

2.2 Pendahuluan

Biomassa limbah pertanian semakin banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku material fungsional seiring meningkatnya kebutuhan akan material yang berkelanjutan dan ramah lingkungan (Maqsood et al., 2025). Bahan baku material fungsional yang berasal dari limbah pertanian yang tersedia dalam jumlah melimpah namun belum dimanfaatkan secara optimal adalah biomassa tanaman jagung, khususnya pada bagian serat batang dan tongkol. Kedua bagian ini umumnya hanya digunakan sebagai pakan ternak atau bahkan dibuang, padahal memiliki kandungan selulosa yang tinggi dan berpotensi untuk dikembangkan menjadi material bernilai tambah (Khan et al., 2024).

Selulosa adalah biopolimer alami yang bersifat terbarukan, *biodegradable*, dan memiliki stabilitas kimia yang baik (Chaka, 2022). Beberapa tahun terakhir, selulosa telah banyak dikembangkan menjadi berbagai material maju, salah satunya aerogel selulosa yang dikenal memiliki densitas rendah, porositas tinggi, luas permukaan besar, serta struktur tiga dimensi yang saling terhubung, sehingga berpotensi digunakan dalam berbagai aplikasi teknologi dan lingkungan. Karakteristik tersebut sangat dipengaruhi oleh sumber bahan baku selulosa dan metode sintesis yang digunakan (Le et al., 2025).

Proses pembuatan aerogel selulosa umumnya melibatkan beberapa tahapan penting, yaitu isolasi selulosa dari biomassa lignoselulosa, pembentukan jaringan gel, serta proses pengeringan untuk mempertahankan struktur berpori (Wang & Zhao, 2021). Setiap tahapan proses tersebut berperan signifikan dalam menentukan sifat fisik dan

kimia aerogel yang dihasilkan. Oleh karena itu, pemilishan dan optimasi metode sintesis menjadi aspek krusial dalam pengembangan aerogel selulosa dengan kualitas struktural yang baik (Panda & Gangawane, 2024).

Selain proses sintesis, karakterisasi material merupakan langkah penting untuk memahami hubungan antara struktur dan sifat aerogel selulosa. Analisis karakteristik seperti gugus fungsi, kristalinitas, morfologi pori, luas permukaan, densitas, dan porositas diperlukan untuk memastikan keberhasilan proses isolasi selulosa serta pembentukan jaringan aerogel (Phong et al., 2023). Perbedaan komposisi kimia dan struktur mikro antara serat batang dan tongkol jagung juga diperkirakan dapat mempengaruhi karakteristik aerogel yang dihasilkan.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian mengenai sintesis dan karakterisasi aerogel selulosa dari serat batang dan tongkol tanaman jagung menjadi penting untuk mengkaji potensi kedua jenis biomassa tersebut sebagai sumber bahan baku alternatif aerogel selulosa. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan material berbasis biomassa yang berkelanjutan, sekaligus membuka peluang pemanfaatan limbah pertanian jagung sebagai material bernilai tinggi.

2.3 Metode

2.3.1 Bahan dan Alat Penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah yaitu batang dan tongkol jagung (*Zea mays* L.) dari Desa Maritengngae, Kecamatan Suppa, Kabupaten Pinrang, Provinsi Sulawesi Selatan; larutan natrium hidroksida (NaOH) 6% (*Merck*); akuades (H_2O); *water one* (*onemed*); urea (*Merck*); etanol (C_2H_5OH) p.a 99% (*Merck*); asam asetat (CH_3COOH) 0,5% (*Merck*); natrium hipoklorit ($NaOCl$) 2,5% (*onemed*); Polydimethylsiloxane (C_2H_6OSi)_n; n-hexane 99%; dan Ludox (SiO_2) 40% (*W.R Grace*).

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu instrumen *Scanning Electron Microscopy* (SEM); X-ray Doffraction (XRD) PANalytical; *Surface Area Analysis* (SAA) *Altamira Instrument*; pH meter; oven *Fisher Scientific*; spektrofotometer IR Shimadzu 8400S; alat-alat gelas; baskom; *magnetic stirrer*; *hot plate Thermo Scientific Cimarec*; ayakan 80 mesh; kertas saring Whatman no. 42; krus porselin; pinset; spatula; *stopwatch*; *freezer*, dan *freeze dryer*.

2.3.2 Preparasi Sampel (Tuara, 2019)

Batang jagung dan tongkol jagung disiapkan sebanyak 2 kg lalu dipotong-potong dengan ukuran kecil, dikeringkan dengan oven pada suhu 100 °C selama 16 jam. Setelah itu, sampel dihaluskan dengan *blencer* lalu diayak dengan ayakan 80 mesh agar ukurannya homogen. Sampel yang digunakan dalam pembuatan aerogel selulosa adalah serbuk yang lolos dari saringan.

2.3.3 Ekstraksi Selulosa (United State Patent 4, 400, 237)

Ekstraksi selulosa berbahan dasar batang dan tongkol jagung yaitu diawali dengan proses delignifikasi. Sampel yang sudah halus ditimbang sebanyak 10 g dan dimasukkan ke dalam gelas kimia 250 mL, ditambahkan asam asetat 0,5% sebanyak 20 mL, dipanaskan menggunakan *hot plate* pada suhu 70 °C sambil diaduk menggunakan

magnetic stirrer selama 1 jam. Selanjutnya campuran ditambahkan NaOH 6% sebanyak 150 mL, suhu dinaikkan menjadi 80 °C selama 1,5 jam sambil diaduk. Setelah itu sampel disaring dan dicuci dengan aquades hingga didapatkan pH netral.

Endapan delignifikasi dimasukkan ke dalam gelas kimia 250 mL, ditambahkan larutan NaOCl 0,4% sebanyak 150 mL, dipanaskan pada suhu 40°C sambil dilakukan pengadukan selama 1 jam. Setelah itu endapan disaring dan dicuci dengan aquades hingga diperoleh nilai pH netral. Kemudian endapan dikeringkan dengan oven pada suhu 60 °C.

2.3.4 Sintesis Aerogel (Tuara, 2019)

Selulosa batang dan tongkol jagung yang dihasilkan kemudian dimasukkan ke dalam gelas kimia 100 mL dengan perbandingan 1:1 masing-masing 8 g dicampur lalu ditambahkan dengan SiO₂ 40% sebanyak 20 mL. Setelah itu ditambahkan NaOH-urea dengan perbandingan 1:5 masing-masing 1 g dan 5 g. Tahap selanjutnya campuran disonikasi selama 30-60 menit. Campuran dimasukkan ke dalam *freezer* pada temperatur -5 °C selama 24 jam hingga terbentuk gel. Gel yang terbentuk kemudian dibiarkan di udara terbuka hingga mencapai temperatur ruang. Langkah selanjutnya adalah perendaman gel dengan etanol 99% sebanyak 20 mL selama 24 jam untuk tahap koagulasi. Kemudian dibilas dengan aquades. Spesimen dicetak dalam gelas kimia ukuran 50 mL. Gel dimasukkan dalam *freezer* pada suhu ±20 °C selama 12 jam hingga membeku. Tahap akhir pada proses sintesis ini yaitu dilakukan pengeringan beku selama 24 jam dengan menggunakan *freeze dryer* hingga diperoleh aerogel selulosa. Hasil yang diperoleh kemudian dikarakterisasi dengan menggunakan FTIR, XRD, BET, dan SEM.

2.3.5. Modifikasi Aerogel (Phat Nam La et al., 2021)

Sebanyak 10 mL larutan PDMS dan 25 mL pelarut heksana diaduk bersama pada suhu 30 °C. Selanjutnya, 3,8 g TEOS dan 0,05 mL CH₃COOH ditambahkan secara bertahap sambil terus diaduk pada 30 °C selama 4 jam. Sampel aerogel dicelupkan ke dalam larutan tersebut dan kemudian dikeringkan pada suhu 90 °C selama 12 jam.

2.3.5 Karakterisasi Aerogel

Fourier Transform Infrared (FTIR). Karakterisasi gugus fungsi dilakukan dengan menggunakan FTIR model Shimadzu 820 IPC dengan preparasi sampel metode pellet KBr. Preparasi sampel dilakukan dengan 1-10 mg sampel dihaluskan dan dicampur dengan 100 mg KBr dan dicetak menjadi cakram tipis atau pelet lalu dianalisis.

Surface Area Analysis (SAA). Analisis luas permukaan spesifik aerogel dilakukan menggunakan metode adsorpsi-desorpsi nitrogen pada suhu 77 K berdasarkan teori **Brunauer–Emmett–Teller (BET)**. Sebelum pengujian, sampel didegasifikasi di bawah kondisi vakum untuk menghilangkan kelembapan dan zat teradsorpsi lainnya. Luas permukaan spesifik dihitung dari isoterm adsorpsi pada rentang tekanan relatif 0,05–0,30. Distribusi ukuran pori dan volume pori selanjutnya dianalisis menggunakan metode **Barrett–Joyner–Halenda (BJH)** untuk mengevaluasi struktur pori aerogel.

Scanning Electron Microscope (SEM). Sebelum dianalisis, sampel diusahakan dalam keadaan kering dan bebas uap air. Sampel ditempelkan pada sel holder dengan

perekat ganda, kemudian dilapisi dengan logam emas dalam keadaan vakum. Setelah itu, sampel dimasukkan pada tempatnya di dalam SEM. Gambar topografi diamati dan dilakukan perbesaran 500 kali.

X-Ray Diffraction (XRD). Sampel berbentuk bubuk dimasukkan ke dalam plat aluminium berukuran 2x2 cm. Kemudian plat tersebut dimasukkan ke dalam XRD-700 SHIMADZU dengan sumber Cu-K α , kemudian diatur besarnya tegangan dan arus yang digunakan. Selanjutnya pengambilan data difraksi dilakukan dalam rentang sudut difraksi 2θ dengan kecepatan baca waktu perdetik.

2.4 Hasil dan Pembahasan

2.4.1 Preparasi Sampel

Batang jagung dan tongkol jagung dipotong menjadi ukuran kecil untuk meningkatkan luas permukaan bahan sehingga proses pengeringan dan perlakuan selanjutnya dapat berlangsung lebih efektif dan merata (Li et al., 2023). Sampel yang telah dipotong dikeringkan menggunakan oven pada suhu 100 °C selama 16 jam dengan tujuan menghilangkan kandungan air bebas di dalam bahan, menekan aktivitas mikroorganisme, serta mencegah degradasi struktur selulosa selama proses penyimpanan dan pengolahan. Pengeringan ini juga berperan penting dalam menjaga konsistensi komposisi kimia bahan baku sebelum proses ekstraksi selulosa (Yi et al., 2024).

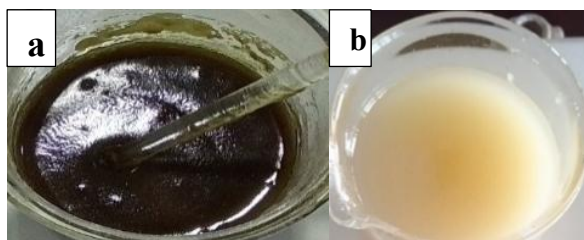
Sampel kering selanjutnya dihaluskan menggunakan blender untuk memperkecil ukuran partikel, sehingga meningkatkan luas kontak antara pelarut dan matriks lignoselulosa pada tahap ekstraksi. Serbuk hasil penghalusan kemudian diayak menggunakan ayakan 80 mesh guna memperoleh ukuran partikel yang seragam. Keseragaman ukuran partikel ini berfungsi untuk meminimalkan variasi laju difusi pelarut dan reaktivitas bahan selama proses sintesis aerogel, sehingga diharapkan menghasilkan struktur aerogel selulosa yang lebih homogen dan reproducible. Serbuk yang lolos dari ayakan 80 mesh selanjutnya digunakan sebagai bahan baku utama dalam pembuatan aerogel selulosa (Abolore et al., 2024).

2.4.2 Ekstraksi Selulosa

Pada penelitian ini dilakukan sintesis aerogel selulosa yang berasal dari serat batang dan tongkol jagung. Tahap awal meliputi preparasi sampel, dimana batang jagung dibersihkan atau dicuci untuk menghilangkan pengotor, kemudian dipotong, dikeringkan di bawah sinar matahari dan dikeringkan dengan oven selama 16 jam untuk mengurangi kadar air. Sampel yang telah kering selanjutnya digiling dan diayak menggunakan ukuran 100 mesh untuk memperoleh ukuran partikel yang homogen. Serat batang jagung kemudian diekstraksi untuk diperoleh selulosa melalui proses delignifikasi menggunakan larutan NaOH 6% b/v.

Perlakuan alkali seperti NaOH diketahui efektif memutus struktur lignin dan menurunkan kandungan lignin dalam biomassa (Yi et al., 2024). Selama proses delignifikasi, lignin yang terlarut membentuk larutan berwarna gelap yang dikenal sebagai *black liquor*, yang muncul akibat terlepasnya struktur aromatik lignin pada kondisi suhu dan waktu tertentu (Peng et al., 2023). Residu delignifikasi umumnya

berwarna semakin cerah, dan untuk menghilangkan sisa lignin serta gugus kromofor yang menyebabkan warna, diperlukan proses pemutihan (*bleaching*) menggunakan oksidator seperti NaOCl (Nguyen et al., 2022). Metode delignifikasi berbasis alkali dianggap sederhana dan relatif ramah lingkungan, meskipun tetap harus dikendalikan agar tidak menyebabkan degradasi selulosa (Abolore et al., 2024)



Gambar 2.1 (a) hasil delignifikasi; (b) hasil *bleaching* (pemutihan)

Proses *bleaching* (pemutihan) pada ekstraksi selulosa menggunakan larutan NaOCl 0,4% b/v dilakukan untuk meningkatkan kecerahan dan kemurnian serat selulosa sekaligus meminimalkan degradasi struktur selulosa. Tahap ini diulang dengan pencucian menggunakan akuades untuk membantu memecah rantai lignin yang panjang menjadi fragmen lebih pendek sehingga pulp berubah menjadi berwarna putih (Abolore et al., 2024). Setelah proses pemutihan, umumnya terjadi penurunan massa sampel dan perubahan sifat fisik, yang menunjukkan terlepasnya lignin dan hemiselulosa sehingga diperoleh selulosa yang lebih murni (Wang & Zhao, 2021).

Ekstraksi selulosa dari serat batang jagung dan tongkol jagung menunjukkan rendemen selulosa yang tinggi, yaitu 60,05% dan 60,49%. Tingginya rendemen selulosa ini dipengaruhi oleh karakteristik tanaman sumber yang memang memiliki kandungan serat tinggi. Batang jagung diketahui memiliki komposisi selulosa berkisar 60% atau lebih (Li et al., 2023). Hasil rendemen ini menandakan bahwa proses delignifikasi dan *bleaching* berlangsung efektif dalam menghilangkan lignin dan hemiselulosa. Selulosa yang diperoleh kemudian digunakan sebagai prekursor dalam sintesis aerogel.

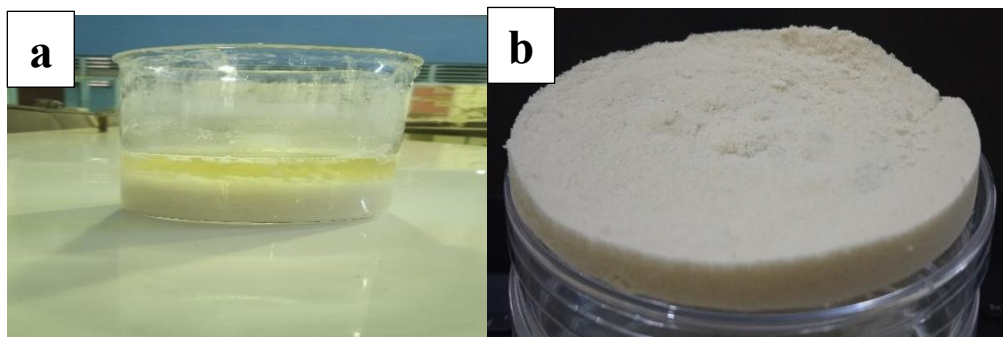
2.4.3 Sintesis Aerogel

Sintesis aerogel selulosa dimulai dengan penambahan prekursor SiO₂ (misalnya ludox silika koloid) untuk meningkatkan luas permukaan akibat terbentuknya lapisan silika pada permukaan selulosa (Zhang et al., 2024). Selain itu, penambahan urea dalam larutan NaOH berfungsi meningkatkan kelarutan selulosa karena urea dapat bertindak sebagai donor sekaligus akseptor ikatan hidrogen, sehingga mencegah terjadinya agregasi antar rantai selulosa. Kombinasi NaOH–urea mampu memutus ikatan hidrogen inter- dan intraselulosa, terutama pada area amorf sehingga struktur selulosa lebih mudah terdispersi dalam larutan (Bolat et al., 2023).

Tahap berikutnya adalah proses sonikasi selama 60 menit yang bertujuan untuk menstabilkan struktur gel serta mencegah terjadinya degradasi yang dapat merusak jaringan gel. Gel yang terbentuk kemudian direndam dalam 20 mL etanol 99% selama 24 jam untuk memicu proses koagulasi dan memperkuat jaringan internal aerogel (Yi et

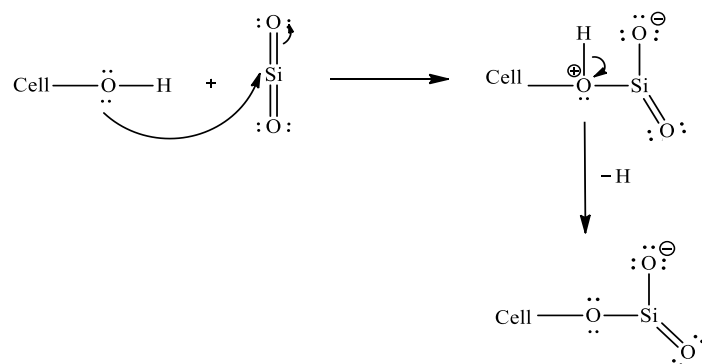
al., 2024). Setelah perendaman, gel dicuci menggunakan akuades hingga mencapai pH netral, kemudian dibekukan kembali pada suhu -5°C selama 12 jam untuk membentuk struktur es yang seragam sebagai tahap awal *freeze-drying*.

Sampel beku tersebut selanjutnya dikeringkan menggunakan *freezer dryer* pada suhu 20°C dalam kondisi vakum untuk menghilangkan pelarut melalui sublimasi. Proses ini menghasilkan aerogel selulosa dengan struktur pori yang stabil dan ringan, yang merupakan ciri khas dari aerogel berbasis selulosa.

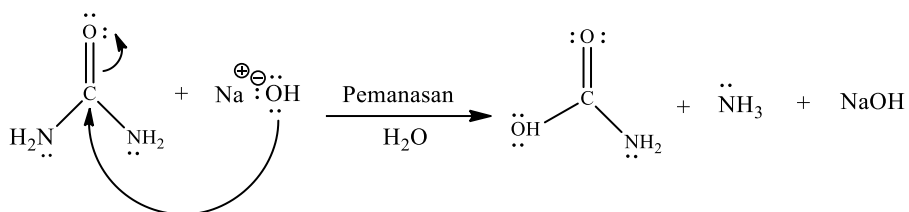


Gambar 2.2 (a) penambahan prekursor SiO_2 dan proses koagulasi sebelum *freeze dryer*; (b) hasil produk aerogel selulosa setelah *freeze dryer*

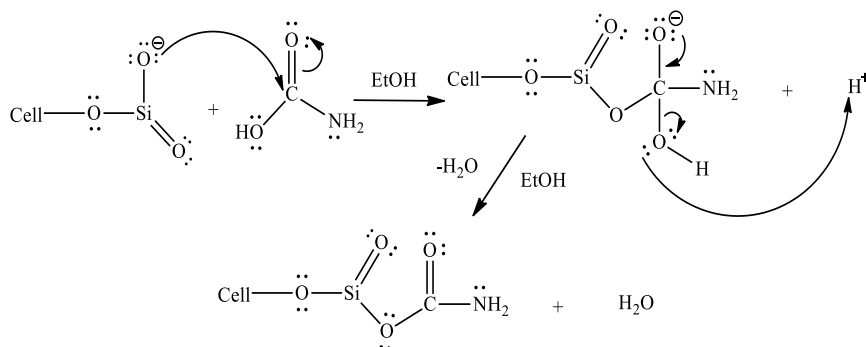
Metode *freeze-drying* dipilih dalam penelitian ini karena memiliki berbagai keunggulan, termasuk kemampuannya mempertahankan stabilitas produk selama proses pengeringan. Teknik ini dapat mencegah perubahan warna, aroma, maupun karakteristik organoleptik lainnya. Selain itu, *freeze-drying* efektif menjaga stabilitas struktur material karena proses sublimasi es tidak menyebabkan penyusutan atau deformasi bentuk (Tarahi et al., 2022). Metode ini juga menghasilkan struktur berpori tinggi yang bersifat mudah menyerap air (*lyophilic*), sehingga materi dapat mengalami rehidrasi dengan sangat baik dan kembali mendekati kondisi fisik awal sebelum dikeringkan (Ganesan et al., 2021). Aerogel selulosa yang dihasilkan kemudian digunakan dalam proses adsorpsi dan dikarakterisasi menggunakan FTIR, XRD, BET-BJH, dan SEM untuk mengidentifikasi gugus fungsi, struktur kristal, luas permukaan, distribusi pori, serta morfologi permukaan.



Gambar 2.3 Reaksi tahap I (reaksi antara selulosa serat batang jagung dan SiO_2)



Gambar 2.4 Reaksi tahap II (reaksi antara NaOH dan urea)



Gambar 2.5 Reaksi tahap III (reaksi antara produk tahap I dan produk tahap II)

Reaksi dalam sintesis aerogel selulosa dari serat batang jagung melalui tiga tahapan dan dapat dilihat sebagai berikut.

- Reaksi tahap I (reaksi antara selulosa serat batang jagung dan SiO_2)
- Reaksi tahap II (reaksi antara NaOH dan Urea)
- Reaksi tahap III (reaksi antara produk tahap I dan produk tahap II)

2.4.4 Modifikasi Aerogel



Gambar 2.6 Aerogel termodifikasi PDMS

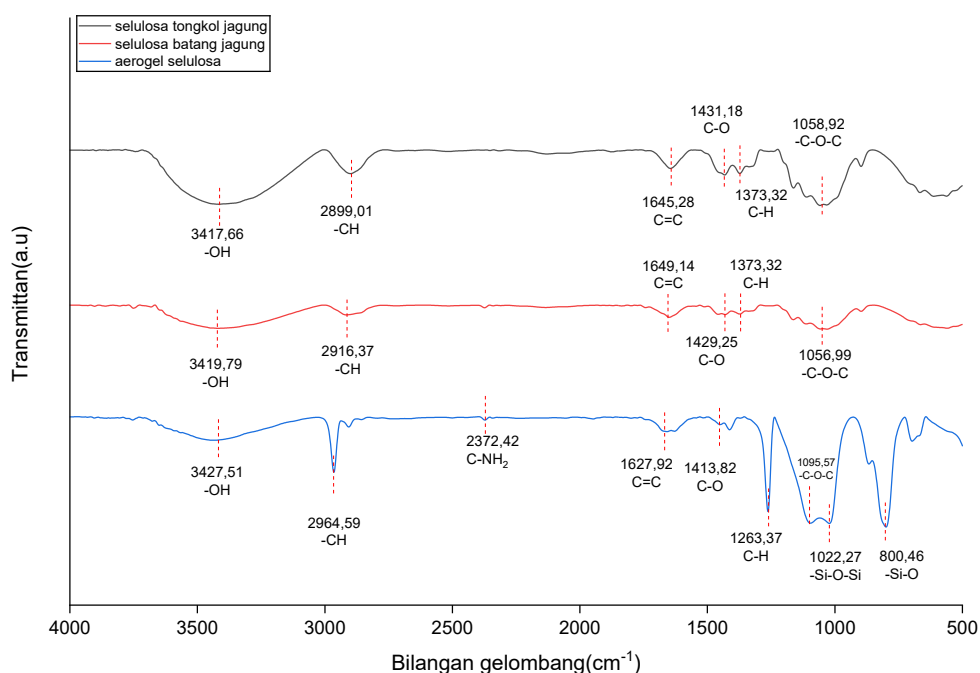
Modifikasi aerogel selulosa–silika menggunakan polidimetilsiloksan (PDMS) bertujuan untuk meningkatkan sifat hidrofobisitas dan afinitas aerogel terhadap senyawa nonpolar seperti minyak (Chun et al., 2023). PDMS merupakan polimer silikon dengan rantai utama —Si—O—Si— dan gugus metil (—CH_3) yang bersifat sangat hidrofobik. Keberadaan gugus metil ini menurunkan energi permukaan aerogel sehingga menghambat interaksi dengan air dan meningkatkan selektivitas terhadap minyak (Ouyang et al., 2023). PDMS berinteraksi dengan jaringan selulosa–silika melalui ikatan kovalen maupun ikatan fisik. Gugus silanol (—Si—OH) pada silika dapat bereaksi dengan gugus siloksan dari PDMS melalui reaksi kondensasi, membentuk ikatan Si—O—Si yang stabil. Interaksi ini menyebabkan PDMS terlapisi secara homogen pada permukaan pori aerogel tanpa merusak struktur tiga dimensi jaringan aerogel (Han et al., 2023). Gambar menunjukkan tetesan air yang tetap berbentuk bulat (*spherical*) dan tidak menyebar maupun meresap ke dalam permukaan aerogel selulosa–silika termodifikasi PDMS. Fenomena ini mengindikasikan bahwa permukaan aerogel telah mengalami perubahan sifat dari hidrofilik menjadi hidrofobik (Liu et al., 2022).

Secara fisik, bentuk tetesan air yang stabil menandakan sudut kontak air yang tinggi. Permukaan dengan sudut kontak air $>90^\circ$ diklasifikasikan sebagai hidrofobik, sedangkan sudut kontak $>150^\circ$ menunjukkan sifat superhidrofobik (Qiao et al., 2022). Nilai sudut kontak tidak diukur secara kuantitatif pada pengujian ini, perilaku tetesan air yang tidak terserap menunjukkan bahwa modifikasi PDMS berhasil menurunkan energi permukaan aerogel secara signifikan (La et al., 2021). Sifat hidrofobik ini berasal dari keberadaan gugus metil (—CH_3) pada PDMS yang melapisi dinding pori aerogel. Gugus —CH_3 bersifat nonpolar sehingga menolak interaksi dengan molekul air yang bersifat polar (Liu et al., 2022).

Keberhasilan modifikasi ini sangat penting untuk aplikasi aerogel sebagai adsorben minyak, khususnya dalam penanganan tumpahan minyak di lingkungan perairan (Setyawan et al., 2022). Aerogel yang bersifat hidrofobik akan menolak air, sementara sifat oleofiliknya memungkinkan minyak terserap secara selektif ke dalam struktur pori (Trong et al., 2025). Dengan demikian, aerogel selulosa–silika termodifikasi PDMS memiliki potensi tinggi sebagai material penyerap minyak yang efisien dan ramah lingkungan (La et al., 2021).

2.4.5 Karakterisasi Aerogel Selulosa dengan *Fourier Transform Infra Red* (FTIR)

Melalui spektrum FTIR dapat digunakan untuk mengetahui gugus fungsi dari selulosa dan aerogel selulosa dilihat pada Gambar 2.6. Gambar 2.6 menunjukkan spektra Fourier Transform Infrared (FTIR) dari selulosa batang dan tongkol jagung serta aerogel selulosanya yang disintesis menggunakan metode alkali-urea dan dilanjutkan dengan pengeringan beku. Selulosa diperoleh melalui proses delignifikasi alkali pada batang dan tongkol jagung. Kehadiran selulosa dalam struktur aerogel dikonfirmasi oleh pita serapan lebar pada $3427,51\text{ cm}^{-1}$, yang berkaitan dengan interaksi ikatan hidrogen (O—H) (Yue et al., 2023) (Gao et al., 2024). Pita pada $3419,79$ dan $3417,66\text{ cm}^{-1}$ juga menunjukkan interaksi ikatan hidrogen (O—H) pada selulosa batang dan tongkol jagung (Zhang et al., 2023). Pita pada $2964,59\text{ cm}^{-1}$, $2916,37\text{ cm}^{-1}$, dan $2899,01\text{ cm}^{-1}$ dikaitkan dengan vibrasi peregangan ikatan H—C—H pada gugus alkil (CH_2) dari selulosa (Belova et al., 2022).



Gambar 2.6 Spektrum FTIR selulosa dan aerogel selulosa

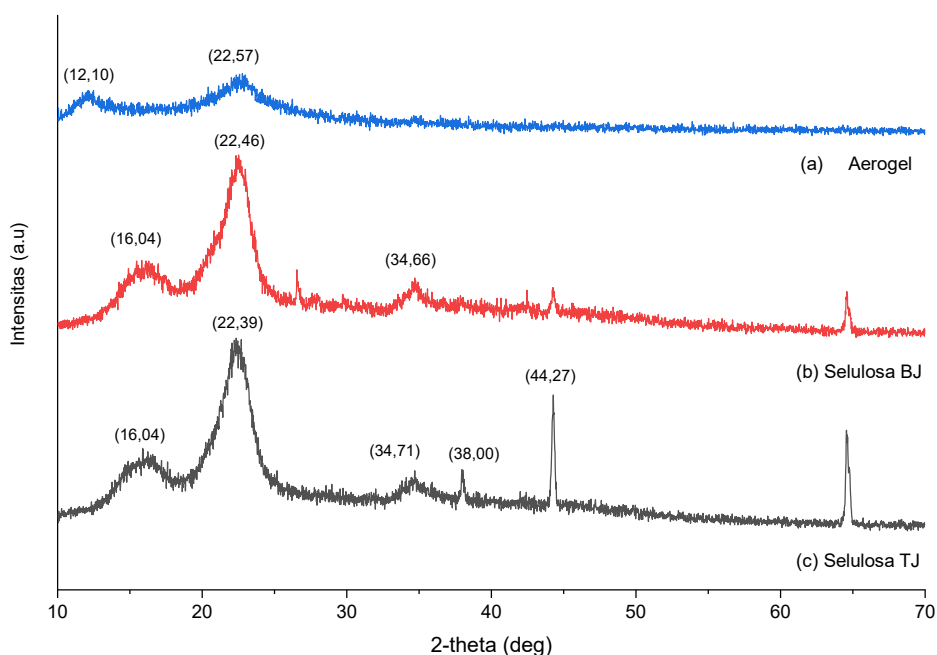
Tabel 2.1 Gugus fungsional dalam komposisi kimia selulosa batang jagung, tongkol jagung dan aerogel selulosa

No	Gugus Fungsional	Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)		
		Selulosa Batang Jagung	Selulosa Tongkol Jagung	Aerogel Selulosa
1	-OH	3419,79	3417,86	3427,51
2	-CH ₂	2916,37	2899,01	2964,59
3	-C≡N	-	-	2372,44
4	-C=C	1640,14	1645,28	1627,92
5	-C-O	1429,25	1431,18	1413,82
6	-C-H	1373,32	1373,32	1263,37
7	-C-O-C	1056,99	1058,92	1095,57
8	-Si-O	-	-	800,46
9	Si-O-Si	-	-	1022,27

Vibrasi peregangan C=C (cincin benzena) teramati pada 1627,92 cm⁻¹, 1649,14 cm⁻¹, dan 1645,18 cm⁻¹ (S. Wang et al., 2020), sedangkan karakteristik vibrasi C-O muncul pada 1413,82 cm⁻¹, 1429,25 cm⁻¹, dan 1373,32 cm⁻¹ (Dutta et al., 2023). Vibrasi peregangan khas C-O-C terdeteksi pada 1095,57 cm⁻¹, 1056,99 cm⁻¹, dan 1058,92

cm^{-1} (Deng et al., 2020). Setelah penambahan PDMS, aerogel selulosa menunjukkan dua puncak tambahan: puncak baru pada $1022,27 \text{ cm}^{-1}$ yang merupakan ciri ikatan Si–O–Si (Xu et al., 2020), dan puncak lain pada $800,46 \text{ cm}^{-1}$ yang berkaitan dengan ikatan Si–C. Perubahan spektra ini mengonfirmasi terbentuknya jaringan Si–O–Si melalui proses deposisi uap kimia PDMS. Proses silanisasi menggantikan gugus hidroksil ($-\text{OH}$) dengan gugus $-\text{O}-\text{Si}-(\text{CH}_3)_3$, sehingga secara signifikan meningkatkan sifat hidrofobisitas aerogel (Belova et al., 2022)(Li & Rabnawaz, 2018).

2.4.6 Karakterisasi Aerogel Selulosa dengan X-Ray Diffraction (XRD)



Gambar 2.7 Difraktogram XRD (a) aerogel; (b) selulosa BJ; dan (c) selulosa TJ

Gambar 2.7 menunjukkan pola difraksi sinar-X (*X-ray Diffraction/XRD*) yang umum digunakan untuk mengidentifikasi dan mengkarakterisasi material. Metode karakterisasi ini memungkinkan penentuan kandungan kristalin dan amorf dari selulosa serta aerogel selulosa. Difraktogram selulosa yang berasal dari serat batang jagung memperlihatkan tiga puncak difraksi yang jelas pada sudut 2θ yaitu $16,04^\circ$, $22,46^\circ$, dan $34,66^\circ$. Puncak-puncak difraksi tersebut masing-masing berkaitan dengan bidang kristalografi (110), (200), dan (004) dari selulosa (Moghaddam et al., 2024). Puncak difraksi khas selulosa umumnya muncul pada rentang 22° – 23° (Hafid et al., 2021). Pada penelitian ini, puncak paling intens teramati pada sudut 2θ sebesar $22,46^\circ$, yang merepresentasikan daerah kristalin khas selulosa, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7. Difraktogram selulosa yang berasal dari serat tongkol jagung menunjukkan tiga puncak difraksi yang jelas pada

sudut 2θ yaitu $12,10^\circ$ dan $22,57^\circ$. Pada penelitian ini, puncak paling intens teramati pada sudut 2θ sebesar $22,57^\circ$, yang merepresentasikan daerah kristalin khas selulosa.

Difraktogram selulosa yang berasal dari aerogel menunjukkan tiga puncak difraksi pada sudut 2θ yaitu $16,04^\circ$, $22,39^\circ$, dan $34,71^\circ$. Puncak difraksi khas selulosa umumnya muncul pada rentang 22° – 23° (Hafid et al., 2021). Pada penelitian ini, puncak paling intens teramati pada sudut 2θ sebesar $22,39^\circ$, yang merepresentasikan daerah kristalin khas selulosa, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7.

Tabel 2.2 Analisis XRD pada komposisi kimia selulosa batang, tongkol jagung, dan aerogel

No	Sampel	Kristalinitas (%)	Ukuran Kristal	Amorf (%)
1	Selulosa Batang jagung	57,44	6,37517	42,56
2	Selulosa Tongkol jagung	58,21	12,7803	41,79
3	Aerogel	50,44	8,091434	49,56

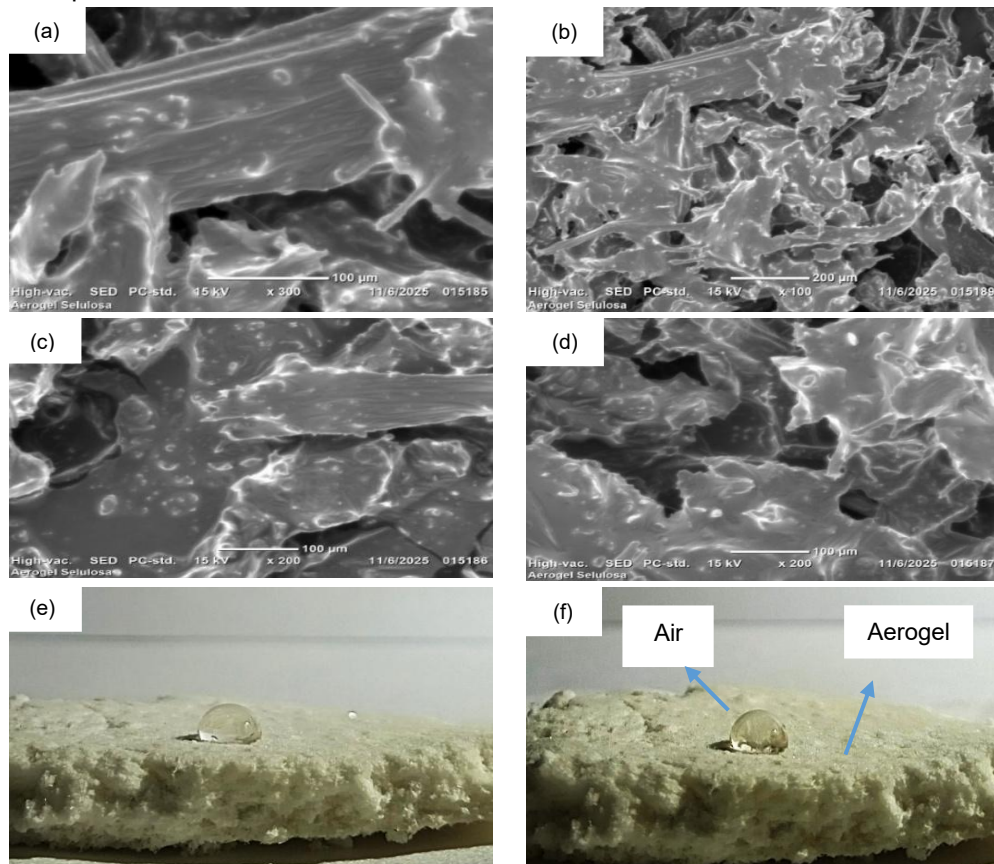
Nilai kristalinitas, ukuran kristalit, dan kandungan amorf dari selulosa batang dan tongkol jagung serta selulosa aerogel dari serat batang jagung disajikan pada Tabel 2.2. Selulosa menunjukkan indeks kristalinitas sebesar 57,44% dan 58,21% dengan ukuran kristalit masing-masing 6,37 dan 12,78 nm. Tingginya kristalinitas yang diperoleh dalam penelitian ini dapat dikaitkan dengan penghilangan molekul lignin dan hemiselulosa dari daerah amorf, yang mendorong susunan rantai selulosa menjadi lebih teratur dan terorganisasi (Vishnoi et al., 2024).

Aerogel selulosa menunjukkan kristalinitas yang lebih rendah, yaitu sebesar 50,44% dengan ukuran kristalit 8,09 nm. Penurunan kristalinitas ini mengindikasikan bahwa sebagian daerah kristalin pada selulosa mengalami transformasi menjadi struktur amorf selama proses pembentukan aerogel, khususnya akibat tahapan pelarutan, gelasi, dan pengeringan beku yang dapat mengganggu keteraturan rantai selulosa (Stanciu et al., 2025). Ukuran kristalit yang diperoleh dalam penelitian ini berada pada rentang nanometer (1–100 nm), yang sesuai dengan ukuran khas nanopartikel (Nanomaterials: Tiny Particles Mediate Manifold Properties, 2024). Selain itu, pelebaran puncak difraksi yang diamati pada difraktogram selulosa dan aerogel selulosa semakin mendukung keberadaan kristalit berskala nano (Hafid et al., 2021).

Penurunan kristalinitas dan meningkatnya fraksi amorf pada aerogel selulosa memiliki implikasi penting terhadap sifat fungsional material. Struktur amorf yang lebih dominan umumnya dikaitkan dengan meningkatnya fleksibilitas rantai polimer serta terbentuknya jaringan berpori yang lebih terbuka. Kondisi ini berpotensi meningkatkan luas permukaan spesifik dan aksesibilitas pori, sehingga mendukung kinerja aerogel selulosa sebagai material adsorben. Dengan demikian, meskipun aerogel selulosa memiliki kristalinitas yang lebih rendah dibandingkan selulosa awal, perubahan struktur ini justru memberikan keuntungan dalam aplikasi adsorpsi, terutama untuk penyerapan minyak yang memerlukan material berpori dengan interaksi permukaan yang tinggi.

2.4.7 Karakterisasi Aerogel Selulosa dengan *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Bentuk morfologi suatu adsorben dapat ditentukan melalui karakterisasi ini untuk melihat kemampuan proses adsorpsi antara aerogel selulosa dengan adsorbat minyak dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Hasil SEM (a) Aerogel selulosa pada perbesaran 300x dan (b) perbesaran 100x (c) perbesaran 200x (d) perbesaran 200x (e) sudut kontak aerogel selulosa (f) sudut kontak aerogel selulosa

Gambar SEM menunjukkan dengan jelas bahwa aerogel selulosa memiliki jaringan berpori tiga dimensi yang terbentuk dari fibril selulosa yang saling terhubung. Morfologi ini memfasilitasi terbentuknya saluran-saluran terbuka yang meningkatkan difusi gas dan cairan melalui struktur aerogel. Tuara, 2019 menjelaskan bahwa pori yang tak beraturan memiliki kaitan erat dengan situs aktif yang saling berinteraksi membentuk ketakaturan pori pada aerogel selulosa. Permukaan yang kasar dan tidak rata yang terlihat pada mikrograf SEM kemungkinan dihasilkan dari ikatan hidrogen serta sebagian keruntuhan fibril selama proses pertukaran pelarut atau pengeringan, sebagaimana juga dilaporkan pada studi-studi terbaru. Ciri morfologi tersebut menegaskan bahwa aerogel yang disintesis tetap mempertahankan struktur dasar selulosa teregenerasi sekaligus

membentuk pori berskala nano yang bermanfaat untuk meningkatkan performa adsorpsi. Pengukuran sudut kontak air menunjukkan bahwa permukaan aerogel memiliki karakter hidrofobik yang jelas, yang ditunjukkan oleh bentuk tetesan air yang hampir menyerupai bola pada permukaan (Setyawan et al., 2022). Tidak adanya penyebaran tetesan mengindikasikan sifat tolak air yang kuat akibat keberadaan gugus fungsional nonpolar dan kekasaran permukaan. Morfologi yang kasar dan berpori ini meningkatkan sifat hidrofobik melalui efek Cassie–Baxter, di mana kantong udara yang terperangkap di dalam pori mengurangi kontak antara padatan dan cairan. Oleh karena itu, aerogel selulosa menunjukkan ketahanan air yang sangat baik, sehingga cocok untuk aplikasi pemisahan minyak-air dan aplikasi berbasis adsorpsi lainnya (Trong et al., 2025).

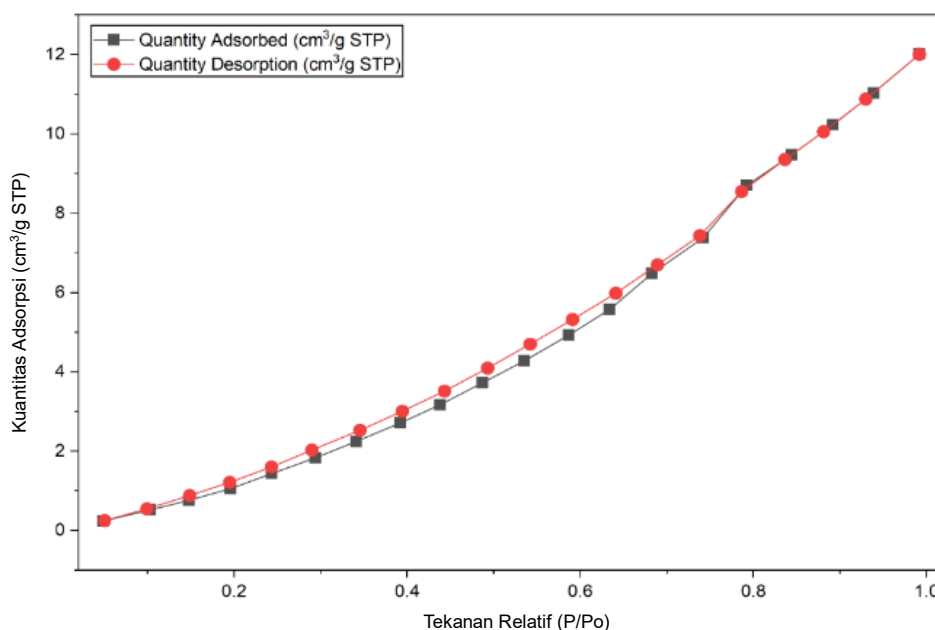
2.4.8 Karakterisasi *Brunauer-Emmet-Teller* (BET) dan *Barret-Joyner-Halenda* (BJH)

Luas permukaan suatu adsorben dapat ditentukan melalui karakterisasi ini untuk melihat kemampuan proses adsorpsi antara aerogel selulosa dengan adsorbat minyak dapat dilihat pada Gambar 2.9.

Tabel 2.3 Analisis Brunauer-Emmet-Teller (BET) dan Barret-Joyner-Halenda (BJH) Aerogel Selulosa

No	Parameter	Ukuran
1	BET surface area	18,2658 m ² /g
2	Volume Pori	0,0185 ml/g
3	Diameter Pori	4,06 nm
4	Densitas	0.1565 g/cm ³
5	Porositas	89.5666 %

Karakterisasi ini dilakukan untuk menentukan luas permukaan, densitas, dan distribusi pori dari sampel. Gas nitrogen (N₂) digunakan sebagai adsorbat untuk mengevaluasi sifat adsorpsi aerogel selulosa. Berdasarkan parameter yang diperoleh dari karakterisasi ini, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.3, aerogel selulosa memiliki luas permukaan spesifik dan volume pori masing-masing sebesar 18,2658 m²/g dan 0,0185 mL/g. Menurut Jiang et al. (2023), aerogel berbasis selulosa umumnya memiliki luas permukaan antara 10 hingga 950 m²/g, tergantung pada jenis prekursor selulosa, proses pertukaran pelarut, dan kondisi pengeringan (Qiu et al., 2023). Wang et al. (2024) Wang et al. (2024) juga melaporkan bahwa aerogel selulosa terregenerasi yang diproduksi melalui pengeringan CO₂ superkritik memiliki volume pori berkisar antara 0,01 hingga 0,45 mL/g, menunjukkan bahwa hasil yang diperoleh dalam penelitian ini berada pada kisaran rendah aerogel pada umumnya. Nilai-nilai ini mengonfirmasi bahwa material yang disintesis dapat diklasifikasikan sebagai aerogel sejati, yang dicirikan oleh porositas tinggi dan fraksi padatan yang rendah.



Gambar 2.9 Grafik hubungan tekanan relatif terhadap volume N₂ yang terserap pada aerogel selulosa

Diameter pori yang diperoleh dari karakterisasi ini dapat diinterpretasikan berdasarkan klasifikasi IUPAC, yang membagi pori menjadi mikropori ($d < 20 \text{ \AA}$), mesopori ($20 < d < 500 \text{ \AA}$), dan makropori ($d > 500 \text{ \AA}$) (Infante et al., 2021). Ukuran pori memainkan peran penting dalam efisiensi adsorpsi, karena pori yang lebih kecil memberikan kondensasi kapiler yang lebih tinggi serta interaksi permukaan yang lebih kuat. Menurut Ahmad et al. (2023), aerogel selulosa dengan struktur mikropori atau mesopori menunjukkan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi karena peningkatan luas permukaan yang dapat diakses dan konektivitas pori (Ahmad et al., 2023). Berdasarkan hasil pada tabel 2.3, diameter pori rata-rata aerogel selulosa adalah 4,06 nm, yang termasuk dalam kategori mikropori menurut standar IUPAC. Hasil ini konsisten dengan temuan Tang et al. (2022), yang melaporkan diameter pori 3–5 Å untuk aerogel selulosa yang berasal dari limbah pertanian, mengonfirmasi bahwa jaringan mikropori tersebut mendukung adsorpsi dan difusi gas (Szymańska et al., 2022).

2.5 Kesimpulan

Dalam penelitian ini, aerogel selulosa berhasil disintesis dari limbah tongkol dan batang jagung, kemudian diuji untuk adsorpsi minyak. Aerogel yang dihasilkan memiliki densitas sangat rendah, porositas tinggi, dan hidrofobisitas yang baik, sehingga berpotensi besar untuk penanganan tumpahan minyak. Karakterisasi menunjukkan kristalinitas 93,54%, ukuran kristalit 8,09 nm, luas permukaan 18,27 m²/g, dan diameter pori 4,6 Å.

2.6 Daftar Pustaka

- Abolore, R.S., Jaiswal, S., & Jaiswal, A.K., 2024. Green and sustainable pretreatment methods for cellulose extraction from lignocellulosic biomass and its applications: A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. **7**(100396):1-28. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100396>
- Ahmad, A., Kamaruddin, M.A., Abdul, A.K., Yahya, E.B., Muhammad, S., Rizal, S., et al., 2023. Recent Advances in Nanocellulose Aerogels for Efficient Heavy Metal and Dye Removal. *Gels*. **9**(5): 1–26. <https://doi.org/10.3390/gels9050416>
- Belova, A. S., Khchoyan, A. G., Il'ina, T. M., Kononevich, Y. N., Ionov, D. S., Sazhnikov, V. A., et al., 2022. Polydimethylsiloxanes with Grafted Dibenzoylmethanoboron Difluoride: Synthesis and Properties. *Polymers*. **14**(23): 1-35. <https://doi.org/10.3390/polym14235075>
- Bolat, F., Ghitman, J., Necolau, M. I., Vasile, E., & Iovu, H., 2023. A Comparative Study of the Impact of the Bleaching Method on the Production and Characterization of Cotton-Origin Nanocrystalline Cellulose by Acid and Enzymatic Hydrolysis. *Polymers*. **15**(16): 1-18. <https://doi.org/10.3390/polym15163446>
- Chaka, K. T., 2022. Extraction of cellulose nanocrystals from agricultural by-products: a review. In *Green Chemistry Letters and Reviews*. **15**(3): 582–597. <https://doi.org/10.1080/17518253.2022.2121183>
- Chun, Y., Kim, E. H., Lee, C. S., Chang, H., & Kang, C. S., 2023. Sustainable and Elastic Carbon Aerogel by Polydimethylsiloxane Coating for Organic Solvent Absorption and Potential Application for Sensors (Infections, Environmental, Wearable Sensors, etc.). *Materials*. **16**(13): 1-11. <https://doi.org/10.3390/ma16134560>
- Deng, C., Yang, Z., Dai, Z., Cheng, C., Tang, Q., Xu, et al., 2020. Adsorption-coupled reduction of hexavalent chromium by Jute-Based Anionic Adsorbent From Aqueous Solutions. *Cellulose chemistry and technology*. **54**(1): 159–168. <https://doi.org/10.35812/CelluloseChemTechnol.2020.54.18>
- Dutta Gupta, A., Kirti, N., Katiyar, P., & Singh, H., 2023. A critical review on three-dimensional cellulose-based aerogels: synthesis, physico-chemical characterizations and applications as adsorbents for heavy metals removal from water. *Cellulose*. **30**: 3397-3427. <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05129-4>
- Ganesan, V., Shanmugam, V., Kaliyamoorthy, B., Sanjeevi, S., Shanmugam, S. K., Alagumalai, et al., 2021. Optimisation of mechanical properties in saw-dust/woven-jute fibre/polyester structural composites under liquid nitrogen environment using response surface methodology. *Polymers*. **13**(15): 1-18. <https://doi.org/10.3390/polym13152471>
- Gao, Y., Yi, Z., Wang, J., Ding, F., Fang, Y., Du, A., et al., 2024. Interpretation of the adsorption process of toxic Cd²⁺ removal by modified sweet potato residue. *RSC Advances*. **14**(1): 433–444. <https://doi.org/10.1039/d3ra06855b>
- Hafid, H. S., Omar, F. N., Zhu, J., & Wakisaka, M., 2021. Enhanced crystallinity and thermal properties of cellulose from rice husk using acid hydrolysis treatment. *Carbohydrate Polymers*. **260**(117789): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117789>
- Han, S., Wu, Q., Zhu, J., Zhang, J., Chen, A., Chen, Y., et al., 2023. Multifunctional,

- superelastic, and environmentally stable sodium alginate/ mxene/ polydimethylsiloxane aerogels for piezoresistive sensor. *Chemical Engineering Journal*. **471**(144551): 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144551>
- Infante, H. G., Warren, J., Chalmers, J., Dent, G., Todoli, J. L., Collingwood, at al., 2021. No Title. *Pure and Applied Chemistry*. **93**(6): 647–776. <https://doi.org/doi:10.1515/pac-2019-0203>
- Jiang, Y., Lin, F., Guo, Z., Liu, X., Huang, Z., Fan, J., et al., 2025. Performance study of an environmentally friendly , flame-retardant , and sustainable energy storage composite phase change material based on sepiolite-gelatin-graphene aerogel. *Journal of Energy Storage*, **117**(116207): 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116207>
- Khan, A., Mishra, A., Patidar, R., & Pappu, A., 2024. Effect of lignocellulosic corn stalk on mechanical, physical, and thermal properties of injection moulded low density polyethylene composites: An approach towards a circular economy. *Heliyon*. **10**(4): 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25287>
- Le, H., Thanh, T., Tran, A., Minh, N., & Huu, H. T., 2025. *Development of reed-based cellulose aerogel : a sustainable solution for crude oil spill clean-up*. Royal Society of Science. **12**(241207): 1-14. <https://doi.org/10.6084/ m9.figshare.c.7592405>.
- Li, Y., Li, X., Liu, A., Chen, X., Xu, W., Duan, X., et al., 2023. Preparation and properties of oriented and hydrophobic aerogels from corn stover. *Industrial Crops and Products*. **205**(117414): 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117414>
- Li, Z., & Rabnawaz, M., 2018. Oil- and Water-Resistant Coatings for Porous Cellulosic Substrates. *ACS Applied Polymer Materials*. **1**(1): 103-111. <https://doi.org/10.1021/acsapm.8b00106>
- Liu, H., Xu, Y., Han, D., Cao, J. P., Zhao, F., & Yang, Q., 2022. Leaf-structured Carbon Nanotubes/Graphene Aerogel and the Composites with Polydimethylsiloxane for Electromagnetic Interference Shielding. *Materials Letters*. **313**(2): 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.131751>
- Maqsood, S., Navaf, M., Kumar, P., Yüce-tepe, A., Thuy, N. N. T., Ozkan, et al., 2025. Sustainable utilization of corn waste and their role toward the circular economy. In *Journal of Agriculture and Food Research*. **23**(102165) 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102165>
- Moghaddam, M. K., Gheshlagh, F. G., & Moezzi, M., 2024. Extraction and characterization of cellulose microfibrils from cornhusk for application as reinforcing agent in biocomposite. *International Journal of Biological Macromolecules*. **264**(130669): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130669>
- Nguyen, H. S. H., Phan, H. H., Huynh, H. K. P., Nguyen, S. T., Nguyen, V. T. T., & Phan, A. N., 2022. Understanding the effects of cellulose fibers from various pre-treated barley straw on properties of aerogels. *Fuel Processing Technology*. **236**(107425): 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107425>
- Ouyang, D., Lei, X., & Zheng, H., 2023. *Recent Advances in Biomass-Based Materials for Oil Spill Cleanup*. **13**(620): 1–37. <https://doi.org/10.3390/nano13030620>
- Panda, D., & Gangawane, K. M., 2024. *Recycled cellulose-silica hybrid aerogel for effective oil adsorption: optimization and kinetics study*. Sadhana. **48**(110): 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12046-023-02161-9S>

- Peng, D., Zhao, J., Liang, X., Guo, X., & Li, H., 2023. Corn stalk pith-based hydrophobic aerogel for efficient oil sorption. *Journal of Hazardous Materials*. **448**(130954): 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130954>
- Phong, D. T., Son, T. T., Tu, P. M., Dat, N. M., Huong, L. M., Nam, N. T. H., et al., 2023. Facile synthesis of corn stalks-derived carbon aerogels: Characterization, adsorption of ciprofloxacin and energy storage applications. *Surfaces and Interfaces*. **39**(102991): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.102991>
- Qiu, J., Guo, X., Lei, W., Ding, R., Zhang, Y., & Yang, H., 2020. Facile Preparation of Cellulose Aerogels with Controllable Pore Structure. *Nanomaterials*. **13**(3): 1-10. <https://doi.org/10.3390/nano13030613>
- Setyawan, H., Fauziyah, M., Tomo, H. S. S., Widiyastuti, W., & Nurtono, T., 2022. Fabrication of Hydrophobic Cellulose Aerogels from Renewable Biomass Coir Fibers for Oil Spillage Clean-Up. *Journal of Polymers and the Environment*. **30**(12): 5228–5238. <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02591-2>
- Shao, X., Wang, J., Liu, Z., Hu, N., Liu, M., & Xu, Y., 2020. Preparation and Characterization of Porous Microcrystalline Cellulose from Corn cob. *Industrial Crops and Products*. **151**(112457): 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112457>
- Silviana, S., Sa'adah, A. N., Deastuti, R. P., Ramadhani, N. C., Simarmata, N., Arianto, L. E., et al., 2022. Synthesis of silica-cellulose aerogel derived from bagasse through impregnation and ambient pressure drying methods as thermal insulator. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. **963**(1): 1-19. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/963/1/012027>
- Stanciu, M. C., Tanasă, F., & Teacă, C. A., 2025. Crystallinity Changes in Modified Cellulose Substrates Evidenced by Spectral and X-Ray Diffraction Data. *Polysaccharides*. **6**(2): 1-32. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides6020030>
- Szymańska, M., Hoppe, J., Dutkiewicz, M., Sobolewski, P., Palacz, M., Janus, E., Zielińska, B., et al., 2022. Silicone polyether surfactant enhances bacterial cellulose synthesis and water holding capacity. *International Journal of Biological Macromolecules*. **208**: 642–653. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.03.124>
- Tarahi, M., Shahidi, F., & Hedayati, S., 2022. Physicochemical, Pasting, and Thermal Properties of Native Corn Starch–Mung Bean Protein Isolate Composites. *Gels*. **8**(11): 1-11. <https://doi.org/10.3390/gels8110693>
- The German Federal Institute for Risk Assessment (BfR)., 2024. Nanomaterials: Tiny particles mediate manifold properties.
- Trong, N. T., Huy, B. Le, & Van, N. T., 2025. Kinetic, isotherm, and thermodynamic studies on diesel oil adsorption by biodegradable cellulose aerogel from rambutan peel waste. *AIMS Environmental Science*. **12**(3): 373–399. <https://doi.org/10.3934/environsci.2025017>
- Tuara, Z., 2019. Sintesis Aerogel Selulosa dari Serat Batang Jagung dan Aplikasinya dalam Adsorpsi Ion Cd(III). Tesis. Makassar: Universitas Hasanuddin.
- Vishnoi, Y., Trivedi, A. K., Gupta, M. K., Singh, H., Rangappa, S. M., & Siengchin, S., 2024. Extraction of nano-crystalline cellulose for development of aerogel: Structural, morphological and antibacterial analysis. *Heliyon*. **10**(1): 1-14.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23846>

- Wang, S., Zhang, Q., Wang, Z., & Pu, J., 2020. Facile fabrication of an effective nanocellulose-based aerogel and removal of methylene blue from aqueous system. *Journal of Water Process Engineering*. **37**(101511) 1-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101511>
- Wang, T., & Zhao, Y., 2021. Optimization of bleaching process for cellulose extraction from apple and kale pomace and evaluation of their potentials as film forming materials. *Carbohydrate Polymers*. **253**(117225): 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117225>
- Xu, C., Ouyang, L., Ren, Y., Cai, Z., Lu, S., Zhang, J., et al., 2020. Synthesis and Properties of Linear Polyether-Blocked Amino Silicone-Modified Cationic Waterborne Polyurethane. *International Journal of Polymer Science*. **202**(1): 1-9. <https://doi.org/10.1155/2020/4162368>
- Yi, X., Zhang, Z., Niu, J., Wang, H., Li, T., Gong, J., & Zheng, R., 2024. Green Strong Cornstalk Rind-Based Cellulose-PVA Aerogel for Oil Adsorption and Thermal Insulation. *Polymers*. **16**(9): 1-11. <https://doi.org/10.3390/polym16091260>
- Yue, X., Zhang, S., He, J., & Wang, Z., 2023. Fabrication of Flame Retarded Cellulose Aerogel with Hydrophobicity via MF/MTMS Double Cross-Linking. *Journal of Natural Fibers*. **20**(1): 1-15. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2133053>
- Zhang, H., Liu, W., Wang, L., Zhang, X., Wang, B., Zeng, X., et al., 2024. Functionalized corn stalk carboxymethyl cellulose and mesoporous silica SBA-15 composite hydrogel-immobilized lipase for the resolution of racemic ibuprofen ethyl ester. *Green Chemistry Letters and Reviews*. **17**(1): 1–14. <https://doi.org/10.1080/17518253.2024.2338241>
- Zhang, Q., Ma, Y., Qi, Z., Song, W., Li, L., & Chen, Z., 2023. Effect of alkali modification on the powder flowability of rapeseed straw cellulose fibers. *Journal of Natural Fibers*. **20**(1): 1-12. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2151546>
- Zhang, Q., Qi, Z., Yao, Y., Ma, Y., Zhang, D., Chen, M., et al., 2023. Potential reinforcing properties of silane-modified rapeseed straw fibers in friction composites: Fractal dimension and circularity characterise powder flowability. *Industrial Crops and Products*. **206**(117644): 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117644>

BAB III

STUDI KINETIKA, TERMODINAMIKA, DAN REGENERASI ADSORPSI MINYAK OLEH AEROGEL SELULOSA BERBASIS LIMBAH JAGUNG

3.1 Abstrak

Pencemaran minyak merupakan permasalahan lingkungan yang serius dan memerlukan material adsorben yang efektif, ramah lingkungan, serta dapat digunakan kembali. Aerogel selulosa berbasis biomassa lignoselulosa telah menarik perhatian sebagai adsorben potensial karena memiliki struktur berpori tiga dimensi, densitas rendah, dan luas permukaan yang besar. **Metode** metode penelitian yang digunakan yaitu metode gravimetri untuk menentukan kapasitas adsorpsi minyak. **Hasil** hasil penelitian menunjukkan bahwa adsorpsi minyak mengikuti model isoterm Freundlich dengan koefisien korelasi (R^2) sebesar 0,9907. Kajian kinetika menunjukkan prose adsorpsi mengikuti orde dua semu. Pengaruh suhu, konsentrasi, dan parameter termodinamika menunjukkan bahwa proses adsorpsi minyak ke dalam aerogel selulosa didominasi oleh adsorpsi fisik. Parameter termodinamika adsorpsi minyak diperoleh sebesar $\Delta G = -4,1075$ – $(-4,6683)$ kJ/mol, $\Delta H = -4,5120$ J/mol, dan $\Delta S = -14,03$ kJ/mol. **Kesimpulan** kesimpulan dari penelitian ini yaitu hasil uji adsorpsi efektif dalam adsorpsi minyak sehingga berpotensi untuk digunakan sebagai adsorben minyak.

3.2 Pendahuluan

Pencemaran minyak di lingkungan perairan dan daratan merupakan salah satu masalah lingkungan global yang terus meningkat seiring dengan berkembangnya aktivitas industri, transportasi, dan penggunaan produk berbasis minyak (Peng et al., 2023). Minyak yang terlepas ke lingkungan dapat membentuk lapisan pada permukaan air, mengganggu pertukaran oksigen, serta menimbulkan dampak negatif terhadap organisme hidup dan kualitas ekosistem. Oleh karena itu, pengembangan metode penanganan pencemaran minyak yang efektif dan berkelanjutan menjadi sangat penting (Ke et al., 2024).

Adsorpsi merupakan salah satu metode yang banyak digunakan dalam penanganan pencemaran minyak karena memiliki keunggulan berupa proses yang sederhana, efisiensi tinggi, dan fleksibilitas dalam berbagai kondisi operasional (Zhao et al., 2025). Dalam beberapa tahun terakhir, perhatian penelitian beralih pada pengembangan adsorben berbasis biomassa yang ramah lingkungan sebagai alternatif terhadap adsorben sintesis (Yang et al., 2025). Salah satu material yang menjanjikan adalah aerogel selulosa, yang memiliki struktur jaringan tiga dimensi dengan porositas tinggi dan luas permukaan besar, sehingga berpotensi memberikan kinerja adsorpsi yang baik (Wang et al., 2025).

Kinerja adsorpsi aerogel selulosa sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional seperti waktu kontak, suhu, dan konsentrasi adsorbat (Raji et al., 2023). Oleh karena itu, penentuan kondisi optimum adsorpsi menjadi langkah penting untuk memaksimalkan

kapasitas penyerapan minyak (Wang et al., 2025). Selain evaluasi kinerja, pemahaman mengenai mekanisme adsorpsi juga diperlukan untuk menjelaskan interaksi yang terjadi antara minyak dan permukaan aerogel selulosa (Trang et al., 2023).

Kajian kinetika adsorpsi memberikan informasi mengenai laju dan mekanisme pengendalian proses adsorpsi, apakah didominasi oleh difusi fisik atau oleh interaksi kimia antara adsorben dan adsorbat (Obi et al., 2023). Sementara itu, analisis termodinamika adsorpsi memungkinkan penentuan sifat energi dari proses adsorpsi, sehingga dapat dibedakan apakah proses tersebut bersifat fisis (*physisorption*) atau kimia (*chemisorption*), serta apakah berlangsung secara spontan dan endotermik atau eksotermik (Trong et al., 2025).

Selain efisiensi adsorpsi, kemampuan penggunaan ulang (*reusability*) merupakan aspek penting dalam menilai kelayakan aerogel selulosa sebagai adsorben minyak (Peng et al., 2023). Adsorben yang dapat mempertahankan kinerja setelah beberapa siklus adsorpsi-desorpsi menunjukkan stabilitas struktur dan potensi penerapan jangka panjang, khususnya dalam aplikasi lingkungan berskala besar. Oleh karena itu, evaluasi desorpsi dan regenerasi aerogel selulosa menjadi bagian integral dalam kajian adsorpsi minyak (Martins et al., 2021). Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini difokuskan pada evaluasi kinerja adsorpsi minyak oleh aerogel selulosa, pemahaman mekanisme adsorpsi melalui kajian kinetika dan termodinamika, penentuan sifat fisis atau kimia dari proses adsorpsi, serta analisis potensi penggunaan ulang aerogel selulosa sebagai adsorben yang berkelanjutan.

3.3 Metode

3.3.1 Bahan dan Alat Penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah yaitu akuades (H_2O), minyak, larutan natrium hidroksida (NaOH) (*Merck*), asam asetat (CH_3COOH) (*Merck*), dan tisu.

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu neraca analitik, oven, *hotplate*, *freezer*, termometer, alat-alat gelas, stopwatch, dan pinset.

3.3.2 Penentuan Kondisi Optimum Adsorpsi Minyak (Trong et al., 2025)

Penentuan Waktu Kontak Optimum. Sampel aerogel selulosa kering ditimbang sebanyak 0,5 g dan dimasukkan ke dalam gelas kimia berisi minyak uji 30 g/L pada suhu ruang pH 7 tanpa pengadukan. Setelah waktu kontak tercapai (10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, dan 45 detik), aerogel diangkat secara perlahan menggunakan pinset, kemudian diletakkan di atas jaring logam/kertas saring selama 1 menit. Setelah itu aerogel ditimbang menggunakan timbangan analitik. Kemudian kapasitas penyerapan minyak dihitung dengan Persamaan 3.1:

$$\text{Kapasitas serapan minyak} = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \quad (3.1)$$

Keterangan:

W_0 : berat adsorben sebelum penyerapan minyak (g)

W_1 : berat adsorben setelah penyerapan minyak (g)

Penentuan pH Optimum. Sampel aerogel selulosa kering ditimbang sebanyak 0,5 g dan dimasukkan ke dalam gelas kimia berisi minyak uji dengan konsentrasi 30 g/L pada

suhu ruang tanpa pengadukan pada pH berbeda (3, 5, 7, 9 dan 11) selama 30 detik . Setelah itu aerogel diangkat secara perlahan menggunakan pinset, kemudian diletakkan di atas jaring logam/kertas saring selama 1 menit. Kemudian kapasitas penyerapan minyak dihitung dengan Persamaan 3.1.

Penentuan Suhu Optimum. Sampel aerogel selulosa kering ditimbang sebanyak 0,5 g dan dimasukkan ke dalam gelas kimia berisi minyak uji 30 g/L pada pH 7 tanpa pengadukan pada suhu berbeda (20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C, dan 60 °C). Setelah itu aerogel diangkat secara perlahan menggunakan pinset, kemudian diletakkan di atas jaring logam/kertas saring selama 1 menit Setelah itu aerogel ditimbang menggunakan timbangan analitik. Kemudian kapasitas penyerapan minyak dihitung dengan Persamaan 3.1.

Penentuan Konsentrasi Optimum. Sampel aerogel selulosa kering ditimbang sebanyak 0,5 g dan dimasukkan ke dalam gelas kimia berisi minyak uji pada suhu ruang tanpa pengadukan pada konsentrasi berbeda (10, 20, 30, 40, dan 50 g/L) pada pH 7. Setelah itu aerogel diangkat secara perlahan menggunakan pinset, kemudian diletakkan di atas jaring logam/kertas saring selama 1 menit. Setelah itu aerogel ditimbang menggunakan timbangan analitik. Kemudian kapasitas penyerapan minyak dihitung dengan Persamaan 3.1.

3.3.3 Uji Reusabilitas Aerogel

Adsorben aerogel selulosa yang sebelumnya digunakan untuk adsorpsi direndam dengan heksana setelah itu dikeringkan dalam oven pada suhu 80 °C. Kemudian dilakukan proses penyerapan kembali. Kapasitas penyerapan minyak dihitung menggunakan Persamaan 3.1.

3.4 Hasil

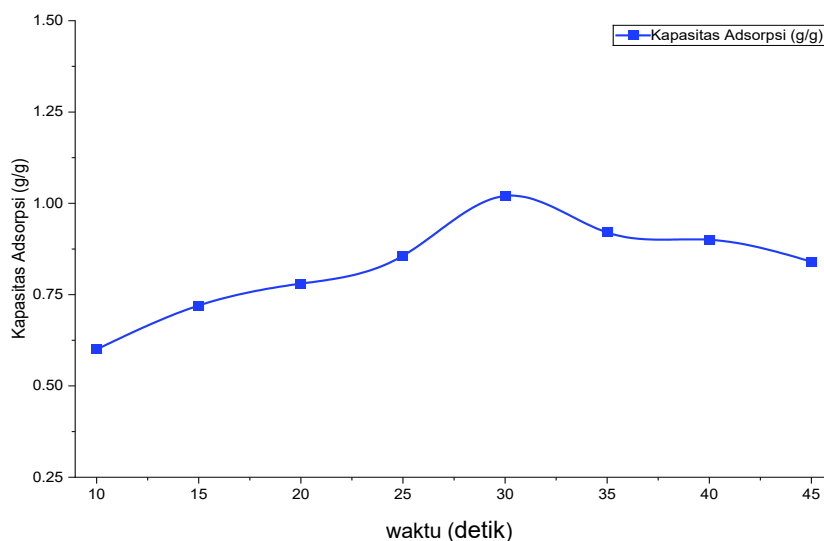
3.4.1 Pengaruh Waktu Kontak

Pengaruh waktu kontak terhadap kapasitas adsorpsi diuji dalam rentang 10–45 detik, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1. Kapasitas adsorpsi awalnya meningkat secara bertahap dari 0,6 g/g pada 10 detik menjadi 1,02 g/g pada 30 detik, diikuti peningkatan tajam yang mencapai nilai maksimum 1,02 g/g pada 30 detik. Setelah titik ini, terjadi penurunan cepat menjadi 0,84 g/g pada 45 detik. Pola ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi sangat dipengaruhi oleh waktu, yang dikendalikan oleh difusi molekul minyak melalui lapisan batas dan masuk ke dalam pori internal adsorben.

Penyerapan cepat pada tahap awal dapat dikaitkan dengan ketersediaan situs aktif yang melimpah serta gradien konsentrasi yang kuat antara adsorbat dan permukaan adsorben. Hal ini serupa dengan mekanisme yang dibahas dalam studi (Trong et al., 2025) di mana aerogel selulosa dari kulit rambutan (*rambutan peel*) menunjukkan kesetimbangan adsorpsi diesel setelah 25 detik dengan kapasitas maksimum 58,8 g/g. Sementara itu, studi WPBP aerogel dari kertas limbah melaporkan bahwa kesetimbangan adsorpsi dicapai dalam sekitar 35 detik sebelum laju adsorpsi melambat, menunjukkan fenomena jenuh situs aktif pada waktu singkat. Perlambatan laju adsorpsi setelah tahap awal selanjutnya dapat dijelaskan oleh berkurangnya jumlah situs aktif yang tersedia serta meningkatnya hambatan difusi internal di dalam struktur aerogel.

Pada fase ini, minyak yang telah terserap di permukaan dan pori-pori bagian luar membentuk lapisan yang dapat menghambat perpindahan adsorbat ke bagian pori yang lebih dalam. Fenomena ini umum dijumpai pada material aerogel berpori tiga dimensi dengan luas permukaan tinggi, di mana mekanisme adsorpsi pada awalnya didominasi oleh difusi eksternal, kemudian beralih ke difusi intrapartikel sebagai tahap pembatas laju. Dengan demikian, perilaku kinetika adsorpsi yang diamati menunjukkan bahwa aerogel selulosa memiliki aksesibilitas pori yang baik pada tahap awal, sekaligus mengonfirmasi efektivitas struktur berporinya dalam menyerap minyak secara cepat sebelum mencapai kondisi kesetimbangan.

Adsorpsi pada waktu 30 detik dalam penelitian ini juga menandakan tercapainya keadaan setimbang, dimana laju adsorpsi dan desorpsi kemungkinan seimbang. Meskipun literatur lain (misalnya, aerogel selulosa nanofiber/komposit) tidak selalu melaporkan penurunan setelah kesetimbangan dalam rentang detik pendek, studi Zhai et al. (2023) (Zhai & Yuan, 2023) pada aerogel selulosa superhidrofobik dari *Phormium tenax* menunjukkan bahwa aerogel mencapai kapasitas maksimum sangat cepat dan kemudian stabil, yang bisa diinterpretasikan sebagai adsorpsi setelah waktu optimum.



Gambar 3.1 Grafik variasi waktu kontak dengan jumlah minyak yang teradsorpsi oleh aerogel selulosa

Kinetika adsorpsi digunakan untuk memahami mekanisme yang mengontrol laju adsorpsi serta keterkaitannya dengan waktu kontak antara adsorben dan adsorbat hingga tercapai kondisi kesetimbangan. Melalui kajian kinetika, dapat diketahui bagaimana perubahan konsentrasi adsorbat dari kondisi awal hingga kondisi akhir, yang selanjutnya digunakan untuk menentukan kapasitas adsorpsi adsorben. Data kinetika yang diperoleh dari hasil eksperimen dianalisis menggunakan persamaan laju reaksi tertentu untuk memberikan informasi mengenai karakteristik proses adsorpsi serta mekanisme interaksi yang terjadi antara adsorben dan adsorbat. Dalam penelitian ini, pemodelan kinetika adsorpsi aerogel selulosa terhadap minyak dilakukan menggunakan dua model kinetika yang umum digunakan, yaitu model kinetika pseudo-first-order (orde

satu semu) yang dikemukakan oleh Lagergren, serta model kinetika pseudo-second-order (orde dua semu) yang dikembangkan oleh Ho dan McKay. Model pseudo-first-order umumnya menggambarkan proses adsorpsi yang didominasi oleh mekanisme fisik (physisorption), sedangkan model pseudo-second-order sering dikaitkan dengan keterlibatan interaksi yang lebih kuat antara adsorben dan adsorbat, seperti gaya tarik antarmolekul atau keterikatan pada situs aktif tertentu.

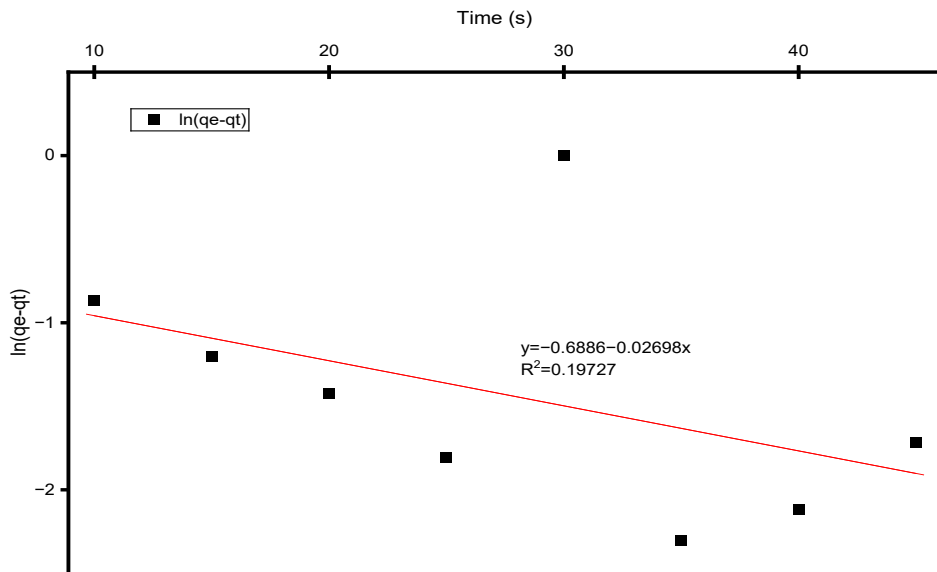


Gambar 3.2. Proses adsorpsi antara minyak dengan adsorben aerogel selulosa

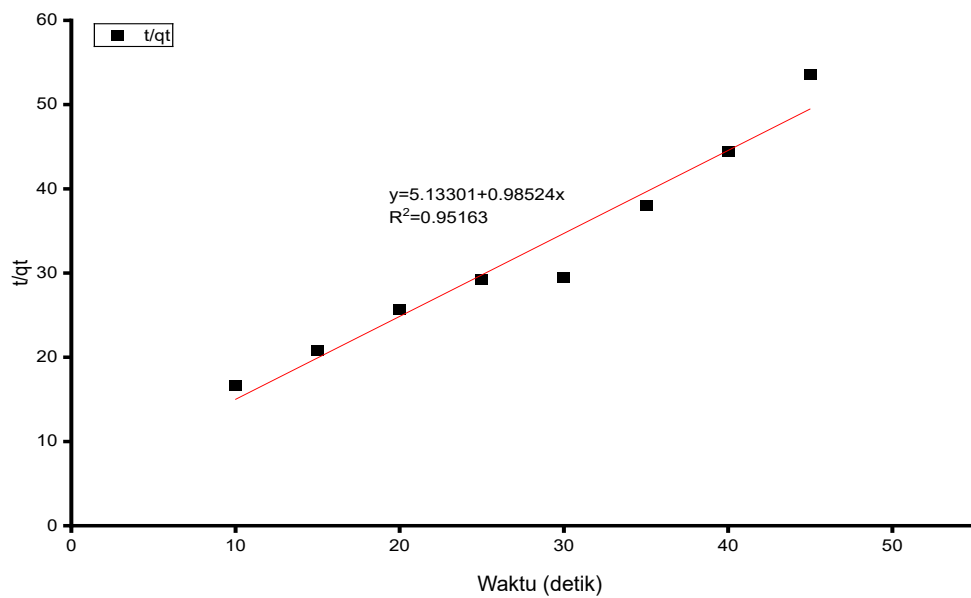
Orde satu semu dan orde dua semu pada model kinetika adsorpsi bukan merupakan orde reaksi yang sebenarnya. Hal ini disebabkan oleh kompleksitas proses adsorpsi minyak yang dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti pH larutan, suhu, konsentrasi awal adsorbat, sifat permukaan adsorben, serta struktur pori material. Oleh karena itu, penggunaan istilah “orde semu” dimaksudkan untuk menggambarkan kesesuaian data eksperimen terhadap model kinetika tertentu, bukan untuk merepresentasikan mekanisme reaksi tunggal yang ideal. Analisis kinetika adsorpsi melalui pendekatan kedua model tersebut memungkinkan evaluasi model yang paling sesuai dalam merepresentasikan perilaku adsorpsi aerogel selulosa terhadap minyak. Kesesuaian model kinetika dapat ditentukan berdasarkan nilai koefisien korelasi serta kecocokan antara kapasitas adsorpsi hasil perhitungan dan data eksperimen. Adapun grafik kinetika pseudo-first-order dan pseudo-second-order untuk proses adsorpsi aerogel selulosa terhadap minyak masing-masing disajikan pada Gambar 3.3 dan Gambar 3.4.

Kinetika adsorpsi dianalisis menggunakan model pseudo-orde pertama (PFO) berdasarkan persamaan $\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t$, di mana q_e dan q_t (g/g) masing-masing merupakan kapasitas adsorpsi pada keadaan setimbang dan pada waktu t , serta k_1 (s^{-1}) adalah konstanta laju. Plot linier $\ln(q_e - q_t)$ terhadap waktu menghasilkan persamaan regresi $y = -0.6886 + 0.02698x$ dengan koefisien korelasi (R^2) sebesar 0,19727. Nilai R^2 yang rendah ini menunjukkan bahwa model PFO tidak mampu menjelaskan mekanisme adsorpsi secara memadai khususnya karena pada sistem aerogel selulosa, adsorpsi

minyak sering kali tidak hanya dipengaruhi oleh interaksi fisik, tetapi juga oleh heterogenitas pori dan difusi intrapartikel.



Gambar 3.3 Grafik kinetika orde satu semu adsorpsi minyak



Gambar 3.4 Grafik kinetika orde dua semu adsorpsi minyak

Tabel 3.1 Konstanta model kinetika adsorpsi minyak

Model Kinetika	Parameter	Nilai
Pseudo-first-order kinetic model	$q_e \text{ exp (g/g)}$	1.0211
	$q_e \text{ calcs (g/g)}$	0.5020
	$k_1 \text{ (1/min)}$	-0.0269
	R^2	0.1972
Pseudo-second-order kinetic model	$q_e \text{ calcs (g/g)}$	1.0204
	$k_2 \text{ (g/g.min)}$	0.1872
	R^2	0.9516

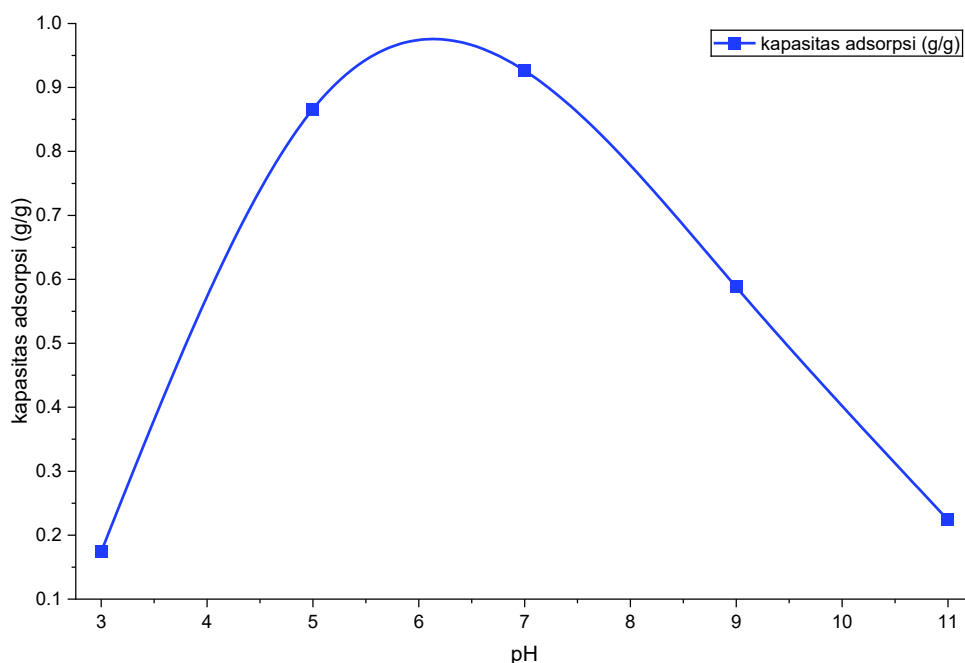
Evaluasi lebih lanjut menggunakan model pseudo-orde kedua (PSO) memberikan kecocokan yang jauh lebih baik. Plot linier t/q_t terhadap t menghasilkan persamaan regresi $y = 5.13301 + 0.98054x$ dan $R^2 = 0,95163$, yang mendekati 1. Dari kemiringan dan intersep plot ini, diperoleh kapasitas adsorpsi teoritis $q_{e,cal} = 1,0211\text{g/g}$ dan konstanta laju $k_2 = 0,1872$. Kesesuaian tinggi antara nilai $q_{e,cal}$ dan data eksperimen menunjukkan bahwa proses adsorpsi lebih sesuai dijelaskan dengan kinetika PSO. Interpretasi ini didukung oleh literatur terkini. Sebagai contoh, Phat et al. (2021) berhasil mensintesis aerogel selulosa dari eceng gondok yang dimodifikasi, dan menemukan bahwa model pseudo-second-order lebih akurat dibanding pseudo-first-order untuk menggambarkan kinetika adsorpsi minyak. Selain itu, studi oleh Zhai et al., (2023) pada aerogel selulosa superhidrofobik dan magnetik menunjukkan bahwa kinetika adsorpsi minyak mengikuti PSO, dengan laju difusi lapisan batas dan intrapartikel yang dominan. (Phat et al., 2021).

Lebih lanjut, tinjauan ulasan oleh Nagendran et al. (2024) pada bahan berbasis nanoselulosa menyebutkan bahwa banyak sorben aerogel menggunakan model pseudo-second-order untuk menjelaskan interaksi kuat antara adsorbat dan adsorben (Nagendran et al., 2025). Studi praktis lain oleh peneliti di AIMS Environmental Science juga melaporkan model pseudo-second-order dengan $R^2 = 0,9998$ dalam adsorpsi minyak diesel, menunjuk ke mekanisme yang melibatkan difusi dan interaksi kimia (Trong et al., 2025).

Dengan demikian, kombinasi hasil eksperimen (nilai R^2 tinggi pada PSO, kapasitas setimbang yang sesuai) serta dukungan dari literatur mutakhir menunjukkan bahwa adsorpsi minyak oleh aerogel selulosa dalam penelitian ini lebih konsisten dengan kinetika pseudo-orde kedua.

3.4.2 Pengaruh pH

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pH lingkungan memegang peranan vital dalam menentukan kapasitas adsorpsi, dengan efisiensi maksimum tercapai secara spesifik pada kondisi pH netral (pH 7). Kapasitas adsorpsi menunjukkan peningkatan signifikan dari yang terendah pada pH 3 (0,174 g/g) hingga mencapai puncaknya pada pH 7 (0,9267 g/g), kemudian menurun secara bertahap menuju pH 11 (0,224 g/g).

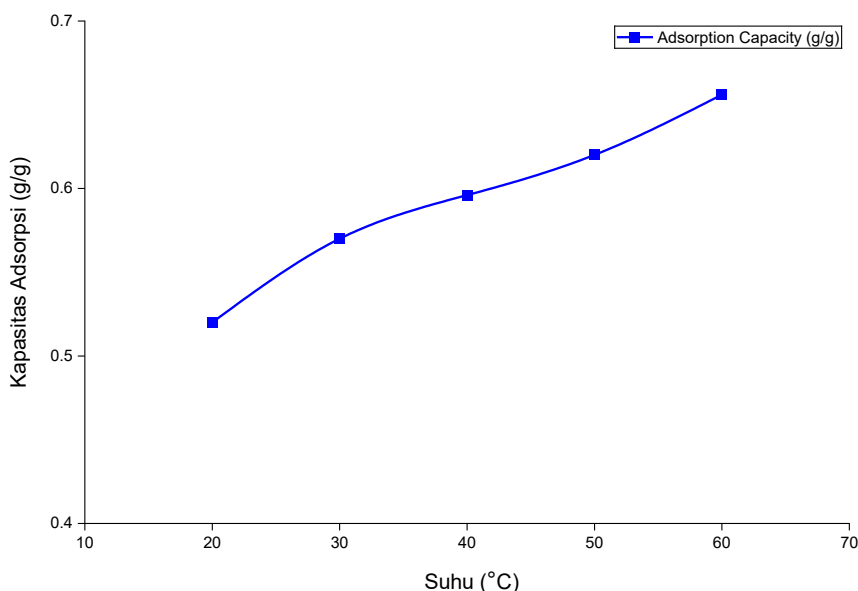


Gambar 3.5 Grafik variasi pH dengan jumlah minyak yang teradsorpsi oleh aerogel selulosa

Pola ini konsisten dengan prinsip bahwa pH sangat memengaruhi muatan permukaan adsorben dan tingkat ionisasi adsorbat faktor penentu utama interaksi elektrostatis dan hidrofobik. Pada kondisi asam (pH 3), protonasi gugus fungsional seperti ($-OH$) dan ($-COOH$) pada permukaan adsorben menghasilkan situs bermuatan positif. Hal ini memicu tolakan elektrostatis yang kuat dengan adsorbat kationik atau menghambat stabilitas struktural material biopolimer/hidrogel yang penting untuk penyerapan minyak, sehingga menurunkan efisiensi. Kondisi optimal dicapai pada pH 7 karena terjadi deprotonasi parsial pada gugus permukaan, menghasilkan muatan negatif yang cukup untuk menarik adsorbat kationik secara elektrostatis atau, dalam konteks penyerapan minyak, kondisi ini memungkinkan stabilitas struktural dan *swelling* maksimum pada material, yang sangat mendukung interaksi hidrofobik antara adsorben dan minyak, sebagaimana didukung oleh penelitian Trong et al. (2025) pada hidrogel biopolimer magnetik untuk penyerapan minyak mentah. Peningkatan pH di atas 7 (menuju pH 11) menyebabkan penurunan kapasitas karena deprotonasi berlebih menghasilkan permukaan yang sangat negatif, yang dapat menyebabkan tolakan elektrostatis dengan adsorbat anionik atau, dalam kasus adsorbat kationik, berpotensi memicu hidrolisis atau presipitasi adsorbat menjadi spesies yang kurang mudah diserap. Dengan demikian, pH 7 teridentifikasi sebagai kondisi optimum karena berhasil menyeimbangkan muatan permukaan untuk daya tarik yang kuat sekaligus menjaga stabilitas adsorbat di dalam larutan.

3.4.3 Pengaruh Suhu

Parameter yang dilakukan untuk mengadsorpsi pengaruh suhu adalah menentukan waktu kontak dan pH optimum. Pada penelitian ini dilakukan proses adsorpsi dengan variasi suhu 20; 30; 40; 50; dan 60 °C dengan konsentrasi minyak 30 g/L dan massa adsorben aerogel selulosa 0,5 g pada kondisi optimum (waktu kontak 35 detik dan pH 7). Adapun pengaruh variasi suhu terhadap kapasitas adsorpsi dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Grafik pengaruh variasi suhu terhadap adsorpsi minyak aerogel Selulosa

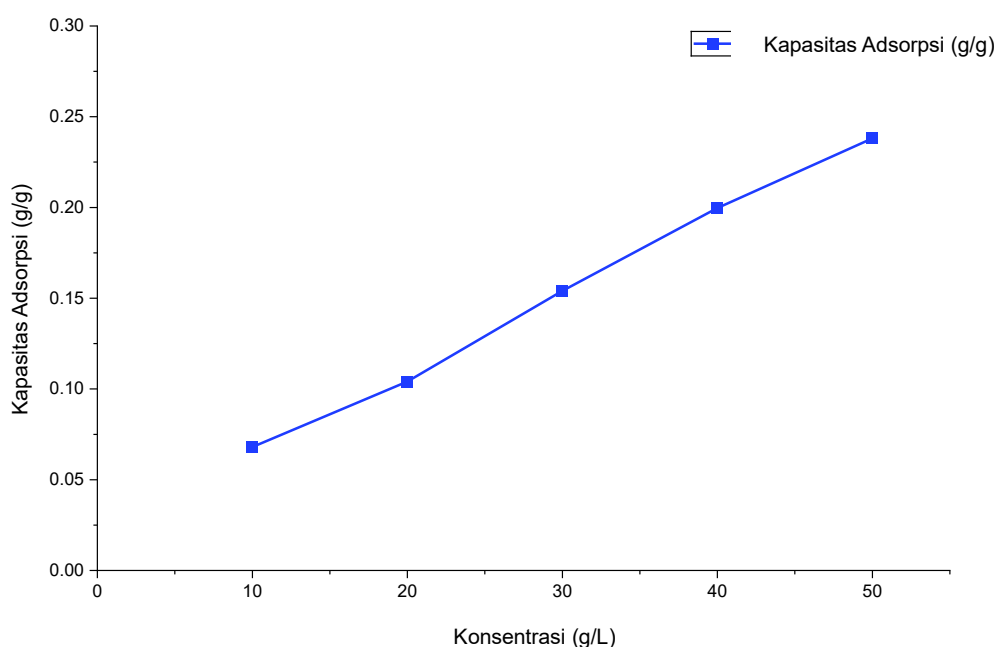
Pengaruh suhu terhadap kinerja adsorpsi diteliti dalam rentang 20–60 °C, dan kapasitas adsorpsi meningkat dari 0.52 g/g pada 20 °C menjadi 0.656 g/g pada 60 °C. Pola peningkatan ini konsisten dengan sifat proses adsorpsi minyak pada material berbasis selulosa yang bersifat endotermik. Tang et al. (2023) melaporkan bahwa kenaikan suhu menurunkan viskositas minyak sehingga mempercepat difusi molekul menuju pori-pori adsorben, yang pada akhirnya meningkatkan jumlah situs aktif yang dapat ditempati (Tang et al., 2023). Selain itu, Ahmed & Janaswamy (2025) menunjukkan bahwa material lignoselulosa mengalami *thermal swelling* pada suhu menengah, yaitu pelebaran struktur pori akibat meningkatnya mobilitas rantai polimer. Efek ini meningkatkan aksesibilitas adsorbat terhadap pori dan memperbesar kapasitas penyerapan minyak (Ahmed & Janaswamy, 2025).

Kecenderungan peningkatan kapasitas adsorpsi dengan bertambahnya suhu juga didukung oleh studi termodinamika pada aerogel selulosa oleh Trong et al., (2025), yang menunjukkan bahwa proses penyerapan minyak memiliki nilai ΔH positif, menandakan bahwa adsorpsi semakin intensif pada suhu yang lebih tinggi. Penentuan suhu optimum sebesar 60 °C pada penelitian ini juga berada dalam rentang yang dilaporkan sebagai kondisi paling stabil bagi aerogel berbasis selulosa (Trong et al., 2025). Li et al. (2024)

menyatakan bahwa suhu (40–60 °C) memberikan kombinasi ideal antara peningkatan difusi minyak dan stabilitas struktural aerogel tanpa menyebabkan kerusakan jaringan berpori. Dengan demikian, hasil penelitian sejalan dengan literatur terbaru yang menegaskan bahwa peningkatan suhu dalam batas tertentu memperkuat mekanisme adsorpsi endotermik, baik melalui peningkatan mobilitas minyak, penurunan viskositas, maupun pelebaran struktur pori adsorben (Li et al., 2024).

3.4.4 Pengaruh Konsentrasi

Besarnya kapasitas adsorpsi suatu adsorben aerogel selulosa yang mengadsorpsi minyak diketahui melalui variasi konsentrasi 10 sampai 50 g/L dengan massa aerogel selulosa 0,5 g selama waktu kontak dan pH optimum. Pengaruh variasi konsentrasi terhadap jumlah minyak yang teradsorpsi dapat dilihat pada Gambar 3.7.

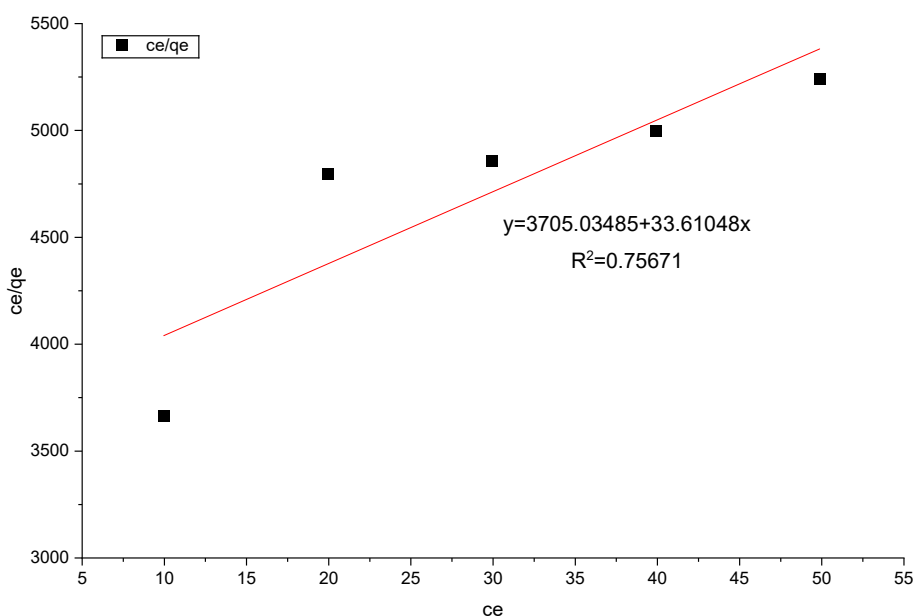


Gambar 3.7 Grafik pengaruh konsentrasi terhadap adsorpsi minyak oleh aerogel selulosa

Konsentrasi awal minyak memiliki pengaruh yang kuat terhadap perilaku adsorpsi aerogel selulosa. Seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7, kapasitas adsorpsi meningkat secara bertahap seiring kenaikan konsentrasi dari 10 hingga 50 g/L. Pada konsentrasi rendah (10–20 g/L), peningkatan kapasitas adsorpsi masih relatif kecil, yang menunjukkan bahwa sebagian besar situs aktif pada permukaan aerogel masih belum terisi. Peningkatan yang lebih tajam pada rentang konsentrasi 30–50 g/L mengindikasikan adanya gaya pendorong yang lebih kuat untuk difusi minyak ke dalam jaringan berpori aerogel, yang dipicu oleh gradien konsentrasi yang lebih tinggi. Tren ini merupakan karakteristik umum dari proses fisisorpsi, di mana kapasitas adsorpsi meningkat seiring kenaikan konsentrasi hingga mencapai kondisi setimbang, yang

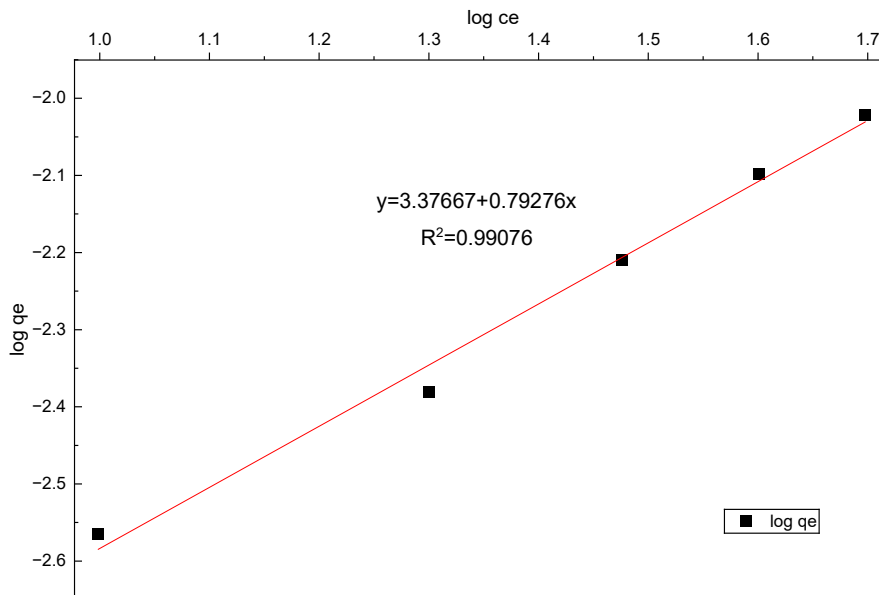
terutama dipengaruhi oleh ketersediaan situs aktif dan batasan perpindahan massa dalam matriks berpori.

Konsentrasi minyak yang lebih tinggi, terjadi peningkatan jumlah molekul minyak di sekitar permukaan aerogel memperbesar probabilitas tumbukan antara adsorbat dan situs aktif, sehingga mempercepat proses adsorpsi pada tahap awal. Namun, seiring dengan semakin terisinya pori-pori dan situs aktif aerogel, laju peningkatan kapasitas adsorpsi cenderung melambat dan mendekati kondisi jenuh. Fenomena ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi tidak hanya dikendalikan oleh konsentrasi awal minyak, tetapi juga oleh karakteristik struktural aerogel, seperti ukuran dan distribusi pori serta aksesibilitas permukaan internal. Dengan demikian, hasil ini menegaskan bahwa aerogel selulosa memiliki kemampuan adaptif terhadap variasi konsentrasi minyak, serta efektif digunakan sebagai adsorben pada rentang konsentrasi yang luas sebelum mencapai kondisi kesetimbangan.



Gambar 3.8 Grafik isoterm Langmuir adsorpsi minyak

Nilai kapasitas adsorpsi maksimum (q_{max}) sebesar 0.00026 g/g dan konstanta KL sebesar 0.009 L/mg menunjukkan bahwa kapasitas penutupan monolapis tidak terlalu tinggi, sehingga indikasinya adsorpsi pada sistem ini tidak sepenuhnya mengikuti mekanisme permukaan homogen. Temuan ini sejalan dengan laporan Syeda et al. (2022), yang menjelaskan bahwa aerogel selulosa memiliki porositas kompleks dan distribusi energi permukaan yang tidak seragam, sehingga model Langmuir sering kurang cocok pada material berbasis selulosa berstruktur 3D.



Gambar 3.9 Grafik isoterm Freundlich adsorpsi minyak

Tabel 3.2 Konstanta model isoterm adsorpsi minyak

Isotherm model	Parameter	Hasil
Langmuir	$q_{\max}$ (g/g)	0.00026
	K_L (L/g)	0.00907
	R_L	$0 < 0.8817 < 1$
	R^2	0.7567
Freundlich	K_f (g/g)	0.0362
	$1/n$	0.7927
	n	1.2615
	R^2	0.9907

Sebaliknya, model Freundlich ($\ln q_e$ vs. $\ln C_e$) memberikan kecocokan yang jauh lebih kuat, ditunjukkan oleh persamaan $y = 3.3766 + 0.7927x$ dan nilai R^2 sebesar 0.9907. Kesesuaian ini mengindikasikan bahwa proses adsorpsi lebih realistis dijelaskan oleh karakter permukaan yang heterogen dan kemungkinan terbentuknya multilapis. Parameter intensitas adsorpsi ($1/n$) sebesar 0.7927 yang berada dalam rentang $0 < 1/n < 1$ menegaskan bahwa adsorpsi berlangsung favorable di seluruh rentang konsentrasi, serta mencerminkan bahwa peningkatan konsentrasi hanya meningkatkan kapasitas adsorpsi secara bertahap seiring bertambahnya keterisian situs energi rendah. Mekanisme heterogen ini konsisten dengan hasil Tajari et al. (2025), yang menunjukkan

bahwa adsorpsi minyak menggunakan aerogel selulosa-magnetik mengikuti isoterm Freundlich dengan R^2 tertinggi, karena permukaan adsorben menunjukkan variasi energi dan kecenderungan pembentukan multilapis (Syeda & Yap, 2022).

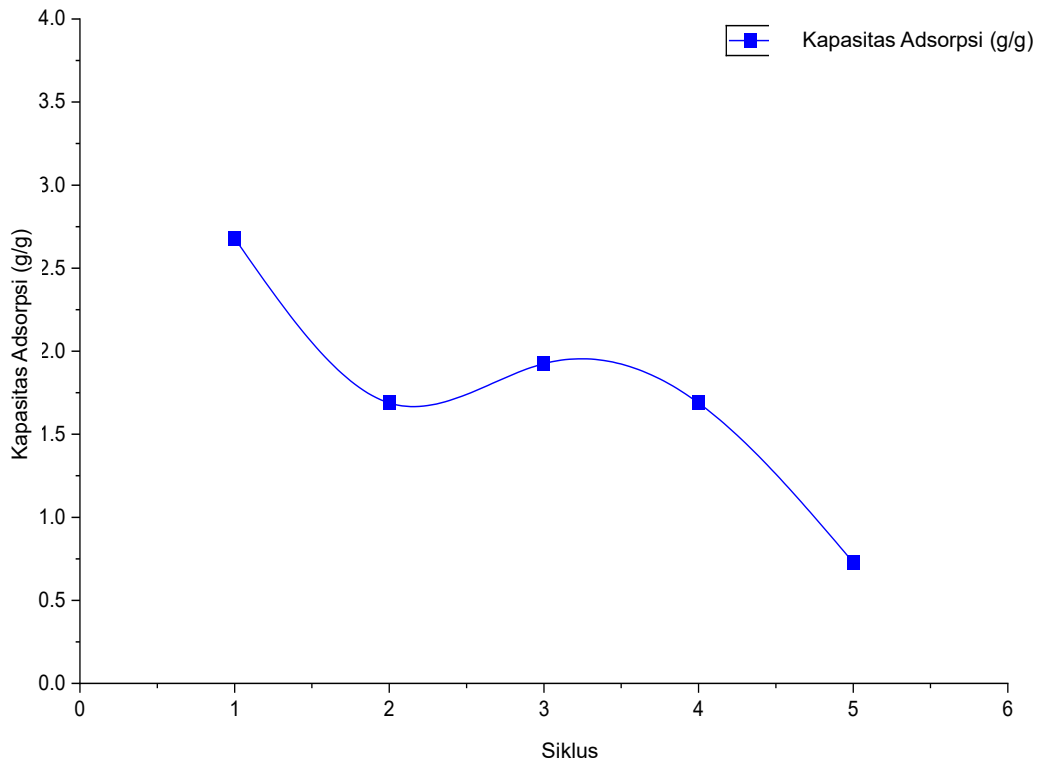
Selain itu, hasil penelitian ini juga diperkuat oleh studi Murphy et al. (2023), yang menyebutkan bahwa isoterm Freundlich lebih tepat untuk menggambarkan sistem berpori dengan distribusi energi situs adsorpsi yang luas, berbeda dengan Langmuir yang hanya sesuai untuk permukaan ideal (Murphy et al., 2023). Kesimpulan serupa juga ditunjukkan oleh Samešová et al. (2025), yang melaporkan bahwa adsorpsi pada permukaan biomaterial umumnya mengikuti model Freundlich ketika energi ikatan antar situs bersifat heterogen (Samešová et al., 2025).

Dengan membandingkan nilai koefisien determinasi (R^2), yaitu R^2 Freundlich sebesar 0,9907 yang jauh lebih tinggi dibandingkan R^2 Langmuir sebesar 0,7567, dapat disimpulkan bahwa isoterm Freundlich merupakan model yang paling akurat dalam menggambarkan perilaku adsorpsi pada sistem ini. Kesesuaian model Freundlich menunjukkan bahwa proses adsorpsi tidak berlangsung pada permukaan yang homogen dan tidak terbatas pada pembentukan satu lapisan adsorbat. Oleh karena itu, mekanisme adsorpsi yang terjadi kemungkinan bersifat kompleks, melibatkan distribusi situs aktif dengan energi adsorpsi yang berbeda-beda, struktur pori yang tidak seragam, serta kecenderungan terbentuknya lapisan adsorbat lebih dari satu (multilayer). Dominasi isoterm Freundlich ini sejalan dengan karakteristik struktural aerogel selulosa yang umumnya memiliki jaringan berpori tiga dimensi dengan heterogenitas permukaan yang tinggi. Variasi ukuran pori dan keberadaan gugus fungsi hidroksil pada rantai selulosa memungkinkan terjadinya interaksi adsorpsi pada berbagai tingkat energi, sehingga mendukung terbentuknya adsorpsi multilapis. Selain itu, kecocokan isoterm Freundlich juga konsisten dengan hasil kajian kinetika dan pengaruh konsentrasi awal minyak, yang menunjukkan bahwa proses adsorpsi didominasi oleh fisisorpsi dan dipengaruhi oleh mekanisme difusi dalam matriks berpori. Dengan demikian, model Freundlich tidak hanya merepresentasikan data eksperimen dengan baik, tetapi juga mencerminkan mekanisme adsorpsi yang realistis pada aerogel selulosa.

3.4.5 Reusabilitas Aerogel Selulosa

Kinerja reusabilitas adsorben selama beberapa siklus ditunjukkan pada Gambar 3.10. Kapasitas adsorpsi mengalami penurunan bertahap dari 2.68 g/g pada siklus pertama menjadi 0.728 g/g setelah lima kali regenerasi. Penurunan paling signifikan terlihat setelah siklus keempat, mengindikasikan degradasi progresif situs aktif dan kemungkinan kerusakan sebagian struktur pori adsorben. Fenomena ini sejalan dengan laporan Palanisamy dkk. (2025), yang menyatakan bahwa aerogel berbasis selulosa umumnya mengalami penurunan kapasitas setelah beberapa siklus akibat hilangnya gugus aktif dan perubahan stabilitas permukaan (Palanisamy et al., 2025). Selain itu, fluktuasi kecil pada siklus ketiga dimana kapasitas sempat meningkat menjadi 1.924 g/g yang juga pernah diamati pada aerogel selulosa superhidrofobik oleh Chen dkk. (2024) setelah proses pencucian berulang (Chen et al., 2024a). Namun, setelah beberapa siklus, *fouling* yang tidak dapat dipulihkan, penyumbatan pori, dan melemahnya interaksi permukaan menjadi faktor utama penurunan kapasitas, sebagaimana dijelaskan oleh Stark dkk. (2025) dalam analisisnya mengenai stabilitas siklik aerogel selulosa untuk

aplikasi lingkungan. Meskipun demikian, adsorben masih mempertahankan lebih dari 65% kapasitas awal hingga siklus ketiga, menunjukkan potensi regenerasi yang baik (Stark et al., 2025).

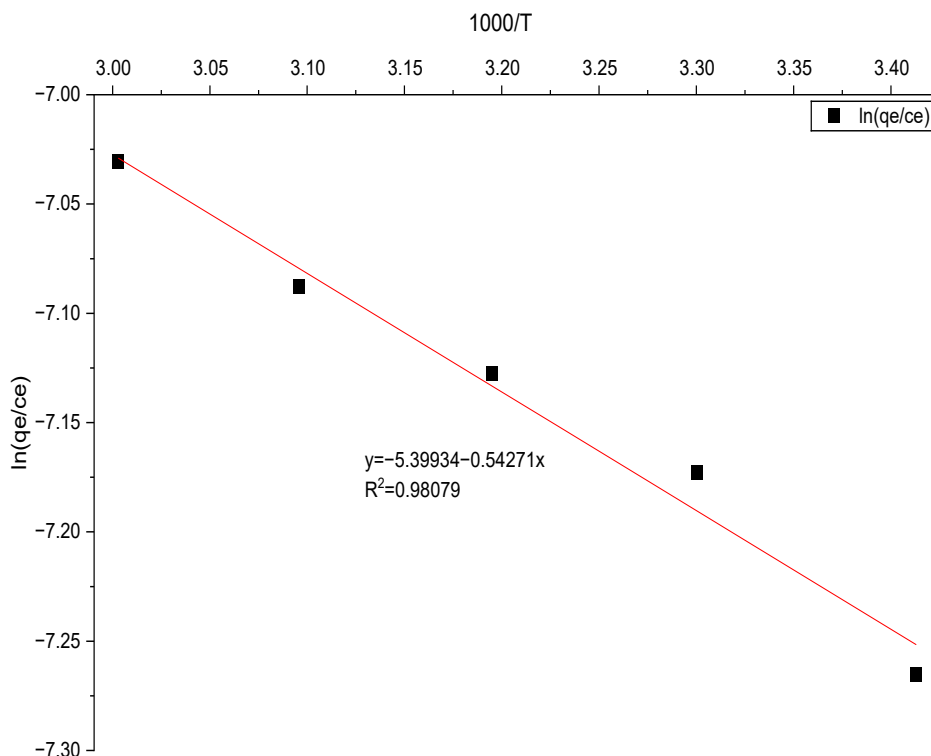


Gambar 3.10 kapasitas desorpsi aerogel

Temuan ini konsisten dengan Zhang dkk. (2024), yang melaporkan bahwa aerogel nanofiber selulosa masih dapat menunjukkan kinerja siklik yang stabil pada beberapa siklus awal sebelum memasuki zona penurunan tajam. Oleh karena itu, optimasi proses regenerasi dapat menjadi strategi penting untuk meningkatkan daya tahan penggunaan ulang adsorben (Zhang et al., 2024).

3.4.6 Perhitungan Termodinamika

Kapasitas adsorpsi sangat dipengaruhi oleh suhu ketika interaksi adsorben dan adsorbat kontak langsung. Adanya pengaruh suhu dapat menyebabkan berkurang jumlah konsentrasi yang teradsorpsi melalui persamaan energi gibs diperoleh. Adapun parameter termodinamika yang diamati pada penelitian ini adalah perubahan energi bebas gibs (ΔG), perubahan entalpi (ΔH), perubahan entropi (ΔS). Data hasil dapat ditunjukkan pada Tabel 3.3.



Gambar 3.11 Grafik $\ln K$ terhadap $1000/T$ untuk memperkirakan parameter termodinamika adsorpsi minyak ke dalam aerogel

Tabel 3.3 Parameter termodinamika pada suhu berbeda untuk adsorpsi minyak pada aerogel

Temperature (C°)	T (K)	1000/T (1/K)	ΔG (kJ/mol)	ΔH (J/mol)	ΔS (J/mol.K)
20	293	3.4129	-4,1075	-4.5120	-14.03446614
30	303	3.3003	-4,2477		-14.03395791
40	313	3.1948	-4,3879		-14.03348216
50	323	3.0959	-4,5281		-14.03303586
60	333	3.0030	-4,6683		-14.03261637

Analisis termodinamika dilakukan untuk memahami mekanisme dan gaya pendorong proses adsorpsi. Nilai energi bebas Gibbs (ΔG), yang dihitung menggunakan persamaan Van 't Hoff ($\Delta G = -RT \ln K_0$), menunjukkan nilai negatif pada seluruh rentang suhu 293–333 K, yaitu –4,10 hingga –4,66 kJ/mol. Nilai ΔG negatif ini mengindikasikan bahwa

proses adsorpsi berlangsung secara spontan, dan kecenderungan spontanitas meningkat pada suhu yang lebih tinggi. Tren serupa juga dilaporkan oleh Chen et al. (2024), yang menemukan bahwa adsorpsi minyak pada aerogel selulosa superhidrofobik menunjukkan nilai ΔG negatif pada kondisi termal menengah, menandakan adanya afinitas alami antara minyak dan matriks aerogel (Chen et al., 2024a).

Nilai entalpi (ΔH) yang diperoleh sebesar -4.5120 J/mol mengonfirmasi bahwa proses adsorpsi bersifat eksotermik. Energi interaksi yang relatif rendah ini menunjukkan bahwa mekanisme yang terjadi didominasi oleh *physisorption*, terutama melalui gaya hidrofobik dan van der Waals. Hal ini sejalan dengan temuan Zhang et al. (2024), yang melaporkan bahwa aerogel nanofiber selulosa untuk adsorpsi minyak menunjukkan karakter eksotermik dengan energi interaksi rendah, khas dari adsorpsi fisik pada permukaan berpori (Zhang et al., 2024).

Sementara itu, perubahan entropi (ΔS) bernilai negatif dalam rentang -14.034 hingga $-14.032 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$. Entropi adalah besaran termodinamika yang menunjukkan ketidakteraturan suatu sistem (Raya, 1998). Penurunan entropi ini mengindikasikan berkurangnya tingkat keacakan sistem akibat pergerakan molekul minyak yang terbatas setelah menempel pada permukaan adsorben. Fenomena serupa dijelaskan oleh Stark et al. (2025), yang melaporkan bahwa molekul minyak yang memasuki struktur pori aerogel cenderung mengalami restrukturisasi sehingga sistem menjadi lebih teratur (Stark et al., 2025).

3.5 Kesimpulan

Perilaku adsorpsi mengikuti model Langmuir dan Freundlich, dengan kecocokan terbaik pada Freundlich ($R^2 = 0,9907$). Model kinetika mengikuti pseudo second order dengan nilai $R^2 = 0,9516$ dengan $q_e \text{ calcs}$ 1.0204 g/g . Analisis termodinamika (ΔG , ΔH , ΔS , E_a) mengonfirmasi bahwa mekanisme adsorpsi didominasi oleh fisisorpsi. Secara keseluruhan, aerogel selulosa berbasis limbah pertanian ini merupakan adsorben minyak yang efisien, ramah lingkungan, dan berpotensi kuat untuk aplikasi pembersihan tumpahan minyak dan pengolahan air limbah. Temuan ini menjadi dasar penting untuk penelitian lanjutan terkait optimasi, produksi skala besar, dan uji keberulangan di kondisi nyata.

3.6 Daftar Pustaka

- Ahmed, S., & Janaswamy, S., 2025. Lignocellulose-enriched aerogels: Towards developing biomass-based sustainable and environmental sorbents for oil spill management. *Industrial Crops and Products*. **229**(120987): 1-8.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120987>
- Chen, L., Zhang, G., Xu, B., & Guo, J., 2024. Highly efficient oil-water separation using superhydrophobic cellulose aerogels derived from corn straw. *Green Processing and Synthesis*. **13**(1): 1-24. <https://doi.org/10.1515/gps-2024-0063>
- Ke, W., Ge, F., Shi, X., Zhang, Y., Wu, T., Zhu, X., et al., 2024. Superelastic and superflexible cellulose aerogels for thermal insulation and oil/water separation. *International Journal of Biological Macromolecules*. **260**(129245): 1-11.

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129245>

- Li, A., Huber, T., Barker, D., Nazmi, A. R., & Najaf Zadeh, H., 2024. An overview of cellulose aerogels and foams for oil sorption: Preparation, modification, and potential of 3D printing. In *Carbohydrate Polymers*. **343**(122432): 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122432>
- Martins, L. S., Zanini, N. C., Maia, L. S., Souza, A. G., Barbosa, R. F. S., Rosa, D. S., et al., 2021. Crude oil and S500 diesel removal from seawater by polyurethane composites reinforced with palm fiber residues. *Chemosphere*. **267**(129288): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129288>
- Murphy, O. P., Vashishtha, M., Palanisamy, P., & Kumar, K. V., 2023. A Review on the Adsorption Isotherms and Design Calculations for the Optimization of Adsorbent Mass and Contact Time. *ACS Omega*. **8**(20): 17407–17430. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c08155>
- Nagendran, V., Goveas, L. C., Vinayagam, R., Varadavenkatesan, T., & Selvaraj, R., 2025. Challenges and advances in nanocellulose-based adsorbents for dye removal: mechanisms and future directions. *Discover Applied Sciences*. **7**(1): 1-23. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06413-z>
- Obi, A. I., Ajiwe, V. I., & Okonkwo, C. P., 2023. Equilibrium and Kinetic Studies of Crude Oil Sorption on Unmodified and Modified Napier Grass. *Makara Journal of Science*. **27**(2): 115–128. <https://doi.org/10.7454/mss.v27i2.1458>
- Palanisamy, K., Palanisamy, G., Im, Y. M., Thangarasu, S., Phutela, U. G., & Oh, T. H., 2025. Recent Progress in Cellulose-Based Aerogels for Sustainable Oil–Water Separation Technologies. *Polymers*. **17**(20): 1-41. <https://doi.org/10.3390/polym17202723>
- Peng, D., Zhao, J., Liang, X., Guo, X., & Li, H., 2023. Corn stalk pith-based hydrophobic aerogel for efficient oil sorption. *Journal of Hazardous Materials*. **448**(130954): 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130954>
- Phat, L. N., Thang, T. Q., Nguyen, H. C., Duyen, D. T. M., Tien, D. X., Khoa, B. D. D., et al., 2021. Fabrication and modification of cellulose aerogels from Vietnamese water hyacinth for oil adsorption application. *Korean Journal of Chemical Engineering*. **38**(11): 2247–2255. <https://doi.org/10.1007/s11814-021-0853-x>
- Raji, Z., Karim, A., Karam, A., & Khalloufi, S., 2023. Adsorption of Heavy Metals: Mechanisms, Kinetics, and Applications of Various Adsorbents in Wastewater Remediation—A Review. *Waste*. **1**(3): 775–805. <https://doi.org/10.3390/waste1030046>
- Raya, I., 1998. *Studi Kinetika Adsorpsi Ion Logam Aluminium (III) dan Kromium (III) Pada Adsorben Chaecoteros calcitrans yang Termobilisasi pada Silika Gel*, Tesis Tidak Dipublikasikan, Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Samešová, D., Pochyba, A., Ďuricová, A., Poništ, J., Prepilková, V. Š., Schwarz, M., et al., 2025. Comparative Adsorption of Cu(II), Zn(II), Cd(II), and Mn(II) from Aquatic Solution and Neutral Mine Drainage Using Paper Sludge. *Water*. **17**(10): 1-23. <https://doi.org/10.3390/w17101471>
- Stark, F. W., Thue, P. S., Missio, A. L., Machado, F. M., Delucis, R. de A., & Andreazza, R., 2025. Cellulose-Based Aerogels for Environmentally Sustainable Applications: A Review of the Production, Modification, and Sorption of Environmental

- Contaminants. In *Polymers*. **17**(2): 1-21. <https://doi.org/10.3390/polym17020236>
- Syeda, H. I., & Yap, P. S., 2022. A review on three-dimensional cellulose-based aerogels for the removal of heavy metals from water. *Science of the Total Environment*. **807**(150606): 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150606>
- Tajari, E., & Bashiri, H., 2025. Synthesis and efficiency of the cellulose@Fe₃O₄@ZIF-8 carbon aerogel magnetic in the removal of Gasoil from aqueous solutions. *Scientific Reports*. **15**(1): 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-23556-0>
- Tang, R., Hu, Y., Yan, J., Xu, S., Wang, Y., Yan, J., et al., 2023. Multifunctional carboxylated cellulose nanofibers/exfoliated bentonite/Ti₃C₂ aerogel for efficient oil adsorption and recovery: The dual effect of exfoliated bentonite and MXene. *Chemical Engineering Journal*. 473(45412): 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145412>
- Trang, T. Y. D., Zenitova, L. A., Quynh, P. H., Huong, T. T., & Dung, L. H., 2023. Adsorption Kinetic and Isotherm of the Oil Spill onto Adsorbents Based on Polyurethane Foam Grafted Chitin and Its Modifications. *Environment and Ecology Research*. **11**(3): 513–526. <https://doi.org/10.13189/eer.2023.110311>
- Trong, N. T., Huy, B. Le, & Van, N. T., 2025. Kinetic, isotherm, and thermodynamic studies on diesel oil adsorption by biodegradable cellulose aerogel from rambutan peel waste. *AIMS Environmental Science*. **12**(3): 373–399. <https://doi.org/10.3934/environsci.2025017>
- Wang, C., Xiao, W., Li, Q., Tian, X., Xu, J., & Ding, K., 2025. Oil removal from wastewater with biomass-derived hydrochars laboratory insights. *Scientific Reports*. **15**(1): 1-32. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-07240-x>
- Yang, X., Miao, W., Sun, X., & Pan, Y. T., 2025. Recent advances in sustainable biomass-based aerogels: a review. *RSC Sustainability*. **3**(10): 4298–4313. <https://doi.org/10.1039/d5su00497g>
- Zhai, Y., & Yuan, X., 2023. Superhydrophobic, Magnetic Aerogels Based on Nanocellulose Fibers Derived from Harakeke for Oily Wastewater Remediation. *Polymers*. **15**(19): 1-16. <https://doi.org/10.3390/polym15193941>
- Zhang, C., Chen, G. H., Lang, D. N., Liu, G., Wu, R. L., Wang, W., et al., 2024. Superhydrophobic cellulose-nanofiber aerogels from waste cotton stalks for superior oil–water and emulsion separation. *Cellulose*. **31**(14): 8519–8538. <https://doi.org/10.1007/s10570-024-06118-x>
- Zhao, S., Li, D., Cai, Y., Song, Z., & Liu, H., 2025. Facile preparation of regenerative environmentally responsive sodium alginate aerogel and its efficient adsorption toward copper ions. *Materials Chemistry and Physics*. **346**(131340): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.131340>

BAB IV

PEMBAHASAN UMUM

4.1 Sintesis dan Karakterisasi Aerogel Selulosa dari Serat Batang dan Tongkol Jagung

Sintesis aerogel selulosa dari serat batang dan tongkol jagung diawali dengan proses isolasi selulosa melalui tahapan delignifikasi dan pemurnian untuk memperoleh selulosa dengan kemurnian tinggi sebagai prekursor utama dalam pembentukan jaringan aerogel. Keberhasilan proses isolasi ditunjukkan oleh perubahan warna material menjadi lebih cerah, yang mengindikasikan berkurangnya kandungan lignin dan senyawa non-selulosa lainnya (Wang & Zhao, 2021).

Tahap selanjutnya adalah pembentukan gel selulosa melalui proses pelarutan dan regenerasi selulosa, yang memungkinkan terbentuknya jaringan tiga dimensi berbasis ikatan hidrogen antar rantai selulosa. Proses gelasi ini merupakan tahap krusial karena menentukan homogenitas struktur dan kestabilan gel sebelum dikeringkan (Baraka et al., 2024). Selulosa dari batang dan tongkol jagung mampu membentuk hidrogel yang stabil, menunjukkan bahwa kedua bahan baku tersebut memiliki potensi sebagai sumber selulosa untuk sintesis aerogel (Sozcu et al., 2024).

Pengeringan gel dilakukan menggunakan metode *freeze-drying* untuk mempertahankan struktur pori dan mencegah terjadinya penyusutan yang signifikan. Metode ini bekerja dengan cara menyublimkan es secara langsung dari fase padat ke fase gas, sehingga kerangka selulosa tidak mengalami kolaps (Phong et al., 2023). Aerogel yang dihasilkan menunjukkan struktur ringan dan berpori tinggi, yang merupakan karakteristik utama material aerogel. Hal ini menunjukkan bahwa metode pengeringan yang digunakan efektif dalam menjaga integritas struktur mikro selulosa (Chen et al., 2024).

Hasil karakterisasi morfologi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menunjukkan bahwa aerogel selulosa dari batang dan tongkol jagung memiliki struktur jaringan berpori tiga dimensi yang saling terhubung (Jonoobi et al., 2022). Pori-pori yang terbentuk bersifat acak dengan ukuran mikro hingga nano, yang berkontribusi terhadap luas permukaan yang tinggi. Struktur ini sangat dipengaruhi oleh asal bahan baku, di mana perbedaan kandungan selulosa dan derajat kristalinitas antara serat batang dan tongkol jagung menyebabkan variasi ukuran pori dan kerapatan jaringan aerogel (Nguyen et al., 2021).

Analisis gugus fungsi menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) menunjukkan adanya pita serapan khas selulosa, seperti gugus hidroksil ($-OH$) pada bilangan gelombang sekitar $3300-3400\text{ cm}^{-1}$ dan gugus $C-O-C$ pada daerah $1050-1150\text{ cm}^{-1}$ mengindikasikan bahwa proses delignifikasi berlangsung efektif (Woźniak et al., 2021)(Devi et al., 2022). Hal ini menunjukkan bahwa struktur kimia selulosa tetap terjaga selama proses sintesis aerogel (Nguyen et al., 2021).

Selain itu, analisis sifat fisik aerogel menunjukkan bahwa aerogel selulosa memiliki densitas rendah dan porositas tinggi, yang merupakan karakteristik penting untuk aplikasi berbasis adsorpsi dan material ringan. Perbedaan densitas antara aerogel dari

batang dan tongkol jagung diduga berkaitan dengan perbedaan struktur mikro dan kemampuan pembentukan jaringan selulosa selama proses gelasi. Aerogel dengan porositas lebih tinggi menunjukkan potensi yang lebih baik dalam aplikasi lanjutan seperti adsorben, insulator termal, maupun material ramah lingkungan berbasis biomassa (Phong et al., 2023)(Wang et al., 2022)(Rajendra Bahadur et al., 2024).

Secara keseluruhan, hasil sintesis dan karakterisasi menunjukkan bahwa serat batang dan tongkol jagung merupakan sumber biomassa yang potensial untuk pembuatan aerogel selulosa. Struktur berpori yang terbentuk, kestabilan kimia, serta sifat fisik yang dihasilkan mendukung pemanfaatan aerogel selulosa sebagai material fungsional berbasis sumber daya terbarukan.

4.2 Studi Kinetika, Termodinamika, dan Regenerasi Adsorpsi Minyak oleh Aerogel Selulosa Berbasis Limbah Jagung

Proses adsorpsi minyak oleh aerogel selulosa berbasis limbah jagung dipengaruhi oleh waktu kontak, suhu, serta karakteristik struktur pori dan gugus fungsi permukaan aerogel. Studi kinetika adsorpsi dilakukan untuk memahami laju penyerapan minyak serta mekanisme interaksi antara molekul minyak dan permukaan aerogel (Lv et al., 2018)(Wirawan et al., 2022). Hasil pengujian menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi meningkat secara signifikan pada tahap awal waktu kontak, kemudian mencapai kondisi kesetimbangan setelah waktu tertentu. Fenomena ini menunjukkan bahwa pada tahap awal tersedia banyak situs aktif pada permukaan aerogel, sehingga minyak dapat teradsorpsi dengan cepat (Trong et al., 2025).

Pemodelan kinetika adsorpsi menunjukkan bahwa data eksperimental lebih sesuai dengan model kinetika pseudo-second-order dibandingkan model pseudo-first-order. Kesesuaian ini ditunjukkan oleh nilai koefisien determinasi (R^2) yang lebih tinggi serta kesesuaian antara nilai kapasitas adsorpsi hasil perhitungan dan hasil eksperimen. Hal ini mengindikasikan bahwa proses adsorpsi minyak oleh aerogel selulosa dikendalikan oleh interaksi yang melibatkan gaya antarmolekul dan difusi minyak ke dalam jaringan pori aerogel, bukan semata-mata oleh difusi eksternal. Struktur pori tiga dimensi yang saling terhubung memungkinkan penetrasi minyak secara efisien ke dalam matriks aerogel (Siregar et al., 2019)(Zhai & Yuan, 2023).

Selain kinetika, studi termodinamika dilakukan untuk mengevaluasi sifat energi dari proses adsorpsi. Parameter termodinamika seperti perubahan energi bebas Gibbs (ΔG°), entalpi (ΔH°), dan entropi (ΔS°) dihitung berdasarkan data adsorpsi pada berbagai suhu. Nilai ΔG° yang negatif pada seluruh rentang suhu menunjukkan bahwa proses adsorpsi minyak berlangsung secara spontan (Trong et al., 2025)(Trong & Thai, 2023). Peningkatan suhu cenderung meningkatkan kapasitas adsorpsi minyak. Hal ini berkaitan dengan meningkatnya mobilitas molekul minyak dan terbukanya akses ke pori-pori aerogel pada suhu yang lebih tinggi (Wirawan et al., 2022).

Nilai ΔS° yang positif menunjukkan adanya peningkatan ketidakteraturan pada antarmuka padat-cair selama proses adsorpsi. Fenomena ini dapat dikaitkan dengan pelepasan molekul air atau udara dari dalam pori aerogel yang digantikan oleh molekul minyak, sehingga sistem menjadi lebih tidak teratur. Hasil ini menegaskan bahwa adsorpsi minyak oleh aerogel selulosa berbasis limbah jagung didominasi oleh

mekanisme fisis (physisorption), yang melibatkan gaya van der Waals dan interaksi hidrofobik, tanpa adanya pembentukan ikatan kimia baru yang kuat (Lim et al., 2020).

Studi regenerasi dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan penggunaan ulang aerogel selulosa setelah proses adsorpsi minyak. Regenerasi dilakukan melalui metode pemerasan mekanik dan/atau pencucian menggunakan pelarut organik, kemudian aerogel dikeringkan kembali sebelum digunakan pada siklus adsorpsi berikutnya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi aerogel mengalami penurunan secara bertahap seiring bertambahnya jumlah siklus regenerasi. Penurunan kapasitas adsorpsi setelah beberapa siklus regenerasi diduga disebabkan oleh deformasi sebagian struktur pori serta tersisanya minyak yang terperangkap di dalam matriks aerogel. Meskipun demikian, kemampuan regenerasi yang relatif tinggi menegaskan bahwa aerogel selulosa berbasis limbah jagung memiliki prospek yang baik sebagai adsorben minyak yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Dengan karakteristik kinetika yang cepat, adsorpsi yang bersifat spontan, serta kemampuan regenerasi yang memadai, aerogel ini berpotensi diaplikasikan dalam penanganan tumpahan minyak dan pengolahan limbah berminyak.

BAB V

KESIMPULAN UMUM

5.1 Kesimpulan

Aerogel selulosa berhasil disintesis dari limbah tongkol dan batang jagung, kemudian diuji untuk adsorpsi minyak. Aerogel yang dihasilkan memiliki densitas sangat rendah, porositas tinggi, dan hidrofobisitas yang baik. Karakterisasi menunjukkan kristalinitas 50,44%, ukuran kristalit 8,09 nm, luas permukaan 18,27 m²/g, dan diameter pori 4,6 nm. Perilaku adsorpsi mengikuti model Freundlich dengan ($R^2 = 0,9907$). Model kinetika mengikuti *pseudo second order* dengan nilai $R^2 = 0,9516$ dengan kapasitas adsorpsi 1.0204 g/g. Analisis termodinamika (ΔG , ΔH , ΔS) masing-masing sebesar -4,6683 kJ/mol, -4,5120 J/mol, -14,03 kJ/mol. Proses adsorpsi minyak oleh aerogel selulosa diperoleh kondisi optimum pada waktu kontak 30 detik, pH 7, suhu 60 °C dan konsentrasi 50 g/L dengan kapasitas reusabilitas mempertahankan lebih dari 65% kapasitas awal hingga siklus ketiga. Secara keseluruhan, aerogel selulosa berbasis limbah pertanian ini merupakan adsorben minyak yang efisien, ramah lingkungan, dan berpotensi kuat untuk aplikasi pembersihan tumpahan minyak dan pengolahan air limbah.

5.2 Saran

Penelitian ini masih dibutuhkan studi lebih lanjut mengenai modifikasi sintesis aerogel selulosa, seperti metode ekstraksi selulosanya juga prekursor yang baik untuk aerogel agar diperoleh luas permukaan, diameter pori dan volume pori serta mendapatkan kapasitas adsorpsi yang lebih maksimal. Selain itu, dapat dilakukan pula pengujian zat adsorbat lain terhadap aerogel selulosa.

DAFTAR PUSTAKA

- Abolore, R.S., Jaiswal, S., & Jaiswal, A.K., 2024. Green and sustainable pretreatment methods for cellulose extraction from lignocellulosic biomass and its applications: A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. **7**(100396): 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100396>
- Agboola, O.D., & Benson, N.U., 2021. Physisorption and Chemisorption Mechanisms Influencing Micro (Nano) Plastics-Organic Chemical Contaminants Interactions: A Review. *Frontiers in Environmental Science*. **9**(678574): 1–27. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.678574>
- Ahmad, A., Kamaruddin, M.A., Abdul, A.K., Yahya, E.B., Muhammad, S., Rizal, S., et al., 2023. Recent Advances in Nanocellulose Aerogels for Efficient Heavy Metal and Dye Removal. *Gels*. **9**(5): 1–26. <https://doi.org/10.3390/gels9050416>
- Ahmadzadeh, S., Sagardui, A., Huitink, D., Chen, J., & Ubeyitogullari, A., 2024. Cellulose-Starch Composite Aerogels as Thermal Superinsulating Materials. *ACS Omega*. **9**(50): 49205–49213. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c05840>
- Ahmed, S., & Janaswamy, S., 2025. Lignocellulose-enriched aerogels: Towards developing biomass-based sustainable and environmental sorbents for oil spill management. *Industrial Crops and Products*. **229**(120987): 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120987>
- Ajala, O. A., & Akinawo, O., 2023. *Adsorptive removal of antibiotic pollutants from wastewater using biomass/biochar-based adsorbents*. **13**(4678): 4678–4712. <https://doi.org/10.1039/d2ra06436g>
- Al-Ghouti, M. A., Ashfaq, M. Y., Khan, M., Al Disi, Z., Da'na, D. A., & Shoshaa, R., 2023. State-of-the-art adsorption and adsorptive filtration based technologies for the removal of trace elements: A critical review. *Science of the Total Environment*. **895**(164854): 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164854>
- Alaqarbeh, M., 2021. Adsorption Phenomena: Definition, Mechanisms, and Adsorption. *RHAZES: Green and Applied Chemistry*. **13**(2): 43–51. <https://doi.org/10.48419/IMIST.PRSM/rhazes-v13.28283>
- Alkhaldi, H., Alharthi, S., AlGhamdi, H.A., AlZahrani, Y.M., Mahmoud, S.A., Amin, L.G., et al., 2024. Sustainable polymeric adsorbents for adsorption-based water remediation and pathogen deactivation: a review. *RSC Advances*. **14**(45): 33143–33190. <https://doi.org/10.1039/D4RA05269B>
- Alvarez-Barreto, J.F., Larrea, F., Pinos, M.C., Benalcázar, J., Oña, D., Andino, C., et al., 2021. Chemical pretreatments on residual cocoa pod shell biomass for bioethanol production. *Bionatura*. **6**(1): 1490–1500. <https://doi.org/10.21931/RB/2020.06.01.9>
- Asif, Z., Chen, Z., & An, C., 2022. *Environmental Impacts and Challenges Associated with Oil Spills on Shorelines*. *Journal of Marine Science and Engineering*. **10**(762): 1-20. <https://doi.org/10.3390/jmse10060762>
- Awogbemi, O., & Kallon, D.V.Von., 2022. Valorization of agricultural wastes for biofuel applications. *Heliyon*. **8**(10): 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11117>
- Bahadur, R. G. C., Awasthi, G. P., Shin, M., Sharma, K. P., Neupane, B. B., Kalauni, S. K., et al., 2024. Nanocellulose from Mankamana-3 corncob biomass: Synthesis,

- characterization, surface modification and potential applications. *Bioresource Technology Reports*. **28**(101971): 1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101971>
- Baraka, F., Ganesan, K., Milow, B., & Labidi, J., 2024. Cellulose nanofiber aerogels: effect of the composition and the drying method. *Cellulose*. **31**(16): 9699–9713.
<https://doi.org/10.1007/s10570-024-06191-2>
- Belova, A. S., Khchoyan, A. G., Il'ina, T. M., Kononevich, Y. N., Ionov, D. S., Sazhnikov, V. A., et al., 2022. Polydimethylsiloxanes with Grafted Dibenzoylmethanoboron Difluoride: Synthesis and Properties. *Polymers*. **14**(23): 1-35.
<https://doi.org/10.3390/polym14235075>
- Bolat, F., Ghitman, J., Necolau, M. I., Vasile, E., & Iovu, H., 2023. A Comparative Study of the Impact of the Bleaching Method on the Production and Characterization of Cotton-Origin Nanocrystalline Cellulose by Acid and Enzymatic Hydrolysis. *Polymers*. **15**(16): 1-18. <https://doi.org/10.3390/polym15163446>
- Cao, C., Huang, H., Li, H., Liu, S., & Wu, Z.S., 2025. The Chemistry and Design Principles of Cellulose-based Materials Toward Eco-friendly Flexible Supercapacitors. *Advanced Powder Materials*. **5**(1): 100358, 1-28.
<https://doi.org/10.1016/j.apmate.2025.100358>
- Chaka, K. T., 2022. Extraction of cellulose nanocrystals from agricultural by-products: a review. In *Green Chemistry Letters and Reviews*. **15**(3): 582–597.
<https://doi.org/10.1080/17518253.2022.2121183>
- Chen, L., Zhang, G., Xu, B., & Guo, J., 2024. Highly efficient oil-water separation using superhydrophobic cellulose aerogels derived from corn straw. *Green Processing and Synthesis*. **13**(1): 1-24. <https://doi.org/10.1515/gps-2024-0063>
- Chen, X., Bi, H., Yue, R., Chen, Z., & An, C., 2022. Effects of oil characteristics on the performance of shoreline response operations: A review. *Frontiers in Environmental Science*. **10**: 1–12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1033909>
- Chen, Y., Xie, C., You, Y., Xu, T., Li, Y., Yuan, J., et al., 2025. Molecularly engineering cellulose into a functional cellulose-based aerogel adsorbent for the recovery of precious metals from e-waste. *Green Chem*. **27**(29): 8818–8831.
<https://doi.org/10.1039/D5GC00100E>
- Chen, Z., An, C., & Lee, K., 2021. Recent advances in developing cellulosic sorbent materials for oil spill cleanup: A state-of-the-art review. *Journal of Cleaner Production*. **311**(127630): 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127630>
- Deng, C., Yang, Z., Dai, Z., Cheng, C., Tang, Q., Xu, Y., et al., 2020. Adsorption-coupled reduction of hexavalent chromium by Jute-Based Anionic Adsorbent From Aqueous Solutions. *Cellulose chemistry and technology*. **54**(1): 159–168.
<https://doi.org/10.35812/CelluloseChemTechnol.2020.54.18>
- Devi, S., Poonia, P. K., Kumar, V., Tiwari, A., Meena, R. K., Kumar, U., et al., 2022. Characterization of Natural Fiber Extracted from Corn (*Zea mays* L.) Stalk Waste for Sustainable Development. *Sustainability*. **14**(24): 1-24.
<https://doi.org/10.3390/su142416605>
- dos Santos, D.F., Ferreira, R.R., Souza, A.G., Lenhani, G. C., Deon, V.G., Rosa, D.S., et al., 2025. Upcycling corn cropping waste by nanocellulose production. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. **67**(103624): 1–12.

<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2025.103624>

- Dutta Gupta, A., Kirti, N., Katiyar, P., & Singh, H., 2023. A critical review on three-dimensional cellulose-based aerogels: synthesis, physico-chemical characterizations and applications as adsorbents for heavy metals removal from water. *Cellulose*. **30**: 3397–3427. <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05129-4>
- Elsheref, M., Messina, L., & Tarr, M. A., 2023. Photochemistry of oil in marine systems: developments since the Deepwater Horizon spill. *Environ. Sci.: Processes Impacts*. **25**(12): 1878–1908. <https://doi.org/10.1039/D3EM00248A>
- Fang, Z., Li, B., Liu, Y., Zhu, J., Li, G., Hou, G., et al., 2020. Critical Role of Degree of Polymerization of Cellulose in Super-Strong Nanocellulose Films. *Matter*. **2**(4): 1000–1014. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2020.01.016>
- Fattorini, D., 2025. Hydrocarbons in seawater: Sources, fate, impacts, and remediation strategies. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. **22**(6): 21–46. <https://doi.org/10.36922/ajwep025290224>
- Gandam, P. K., Chinta, M. L., Gandham, A. P., Pabbathi, N. P. P., Konakanchi, S., Bhavanam, A., et al., 2022. A New Insight into the Composition and Physical Characteristics of Corncob—Substantiating Its Potential for Tailored Biorefinery Objectives. *Fermentation*. **8**(12): 1–36. <https://doi.org/10.3390/fermentation8120704>
- Ganesan, V., Shanmugam, V., Kaliyamoorthy, B., Sanjeevi, S., Shanmugam, S. K., Alagumalai, V., et al., 2021. Optimisation of mechanical properties in sawdust/woven-jute fibre/polyester structural composites under liquid nitrogen environment using response surface methodology. *Polymers*. **13**(15): 1–18. <https://doi.org/10.3390/polym13152471>
- Gao, Y., Yi, Z., Wang, J., Ding, F., Fang, Y., Du, A., et al., 2024. Interpretation of the adsorption process of toxic Cd²⁺ removal by modified sweet potato residue. *RSC Advances*. **14**(1): 433–444. <https://doi.org/10.1039/d3ra06855b>
- Guo, W., Wang, X., Liu, S., Kong, X., Wang, P., & Xu, T., 2022. Long-Term Petroleum Hydrocarbons Pollution after a Coastal Oil Spill. **10**(1380): 1–13. <https://doi.org/10.3390/jmse10101380>
- Hafid, H. S., Omar, F. N., Zhu, J., & Wakisaka, M., 2021. Enhanced crystallinity and thermal properties of cellulose from rice husk using acid hydrolysis treatment. *Carbohydrate Polymers*. **260**(117789): 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117789>
- Infante, H. G., Warren, J., Chalmers, J., Dent, G., Todoli, J. L., Collingwood, J., et al., 2021. No Title. *Pure and Applied Chemistry*. **93**(6): 647–776. <https://doi.org/doi:10.1515/pac-2019-0203>
- Ji, C., Zhu, S., Zhang, E., Li, W., Liu, Y., Zhang, W., et al., 2022. Research progress and applications of silica-based aerogels - a bibliometric analysis. *RSC Advances*. **12**(22): 14137–14153. <https://doi.org/10.1039/d2ra01511k>
- Ke, W., Ge, F., Shi, X., Zhang, Y., Wu, T., Zhu, X., et al., 2024. Superelastic and superflexible cellulose aerogels for thermal insulation and oil/water separation. *International Journal of Biological Macromolecules*. **260**(129245): 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129245>
- Khan, A., Mishra, A., Patidar, R., & Pappu, A., 2024. Effect of lignocellulosic corn stalk

- on mechanical, physical, and thermal properties of injection moulded low density polyethylene composites: An approach towards a circular economy. *Heliyon*. **10**(4): 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25287>
- Kianfar, E., 2025. Environmental Technology & Innovation Current situation and future outlook petroleum hydrocarbons in marine systems: A review. *Environmental Technology & Innovation*. **40**(104572): 1-58. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104572>
- Le, H., Thanh, T., Tran, A., Minh, N., & Huu, H. T., 2025. *Development of reed-based cellulose aerogel: a sustainable solution for crude oil spill clean-up*. Royal Society of Science. **12**(241207): 1-14. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.7592405>.
- Li, A., Huber, T., Barker, D., Nazmi, A. R., & Najaf Zadeh, H., 2024. An overview of cellulose aerogels and foams for oil sorption: Preparation, modification, and potential of 3D printing. In *Carbohydrate Polymers*. **343**(122432): 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122432>
- Li, R., He, X., Wang, H., Wang, Y., Zhang, M., Mei, X., et al., 2022. Estimating Emissions from Crop Residue Open Burning in Central China from 2012 to 2020 Using Statistical Models Combined with Satellite Observations. *Remote Sensing*. **14**(15): 1–17. <https://doi.org/10.3390/rs14153682>
- Li, Y., Li, X., Liu, A., Chen, X., Xu, W., Duan, X., et al., 2023. Preparation and properties of oriented and hydrophobic aerogels from corn stover. *Industrial Crops and Products*. **205**(117414): 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117414>
- Li, Z., & Rabnawaz, M., 2018. Oil- and Water-Resistant Coatings for Porous Cellulosic Substrates. *ACS Applied Polymer Materials*. **1**(1): 103-111. <https://doi.org/10.1021/acsapm.8b00106>
- Lim, A., Chew, J. J., Ngu, L. H., Ismadji, S., Khaerudini, D. S., & Sunarso, J., 2020. Synthesis, Characterization, Adsorption Isotherm, and Kinetic Study of Oil Palm Trunk-Derived Activated Carbon for Tannin Removal from Aqueous Solution. *ACS Omega*. **5**(44): 28673–28683. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03811>
- Long, L. Y., Weng, Y. X., & Wang, Y. Z., 2018. Cellulose aerogels: Synthesis, applications, and prospects. In *Polymers*. **8**(6): 1-28. <https://doi.org/10.3390/polym10060623>
- Lv, N., Wang, X., Peng, S., Zhang, H., & Luo, L., 2018. Study of the kinetics and equilibrium of the adsorption of oils onto hydrophobic jute fiber modified via the sol-gel method. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. **15**(5): 1-18. <https://doi.org/10.3390/ijerph15050969>
- Mai, T., Wang, P. L., & Ma, M. G., 2024. Promising cellulose-based aerogel composites: Preparation methods and advanced applications. *Composites Part B: Engineering*. **2810**(111559): 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111559>
- Maqsood, S., Navaf, M., Kumar, P., Yüce-tepe, A., Thuy, N. N. T., Ozkan, G., et al., 2025. Sustainable utilization of corn waste and their role toward the circular economy. In *Journal of Agriculture and Food Research*. **23**(102165) 1-18 <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102165>
- Martins, L. S., Zanini, N. C., Maia, L. S., Souza, A. G., Barbosa, R. F. S., Rosa, D. S., et al., 2021. Crude oil and S500 diesel removal from seawater by polyurethane composites reinforced with palm fiber residues. *Chemosphere*. **267**(129288): 1-12.

- <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129288>
- Meti, P., Wang, Q., Mahadik, D. B., Lee, K. Y., Gong, Y. D., & Park, H. H., 2023. Evolutionary Progress of Silica Aerogels and Their Classification Based on Composition: An Overview. *Nanomaterials*. **13**(9): 1-31. <https://doi.org/10.3390/nano13091498>
- Moghaddam, M. K., Gheshlagh, F. G., & Moezzi, M., 2024. Extraction and characterization of cellulose microfibrils from cornhusk for application as reinforcing agent in biocomposite. *International Journal of Biological Macromolecules*. **264**(130669): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130669>
- Mozaffari, M., Kordzadeh-kermani, V., Ghalandari, V., Askari, A., & Sillanpää, M., 2022. *Science of the Total Environment Adsorption isotherm models : A comprehensive and systematic*. Science of the Total Environment. **812**(151334): 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151334>
- Murphy, O. P., Vashishtha, M., Palanisamy, P., & Kumar, K. V., 2023. A Review on the Adsorption Isotherms and Design Calculations for the Optimization of Adsorbent Mass and Contact Time. *ACS Omega*. **8**(20): 17407–17430. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c08155>
- Nagendran, V., Goveas, L. C., Vinayagam, R., Varadavenkatesan, T., & Selvaraj, R., 2025. Challenges and advances in nanocellulose-based adsorbents for dye removal: mechanisms and future directions. *Discover Applied Sciences*. **7**(1): 1-23. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06413-z>
- Nanocrystals, I. C., 2022. *Adsorption of Oil by 3-(Triethoxysilyl) Propyl Isocyanate-Modified Cellulose Nanocrystals*. Processes. **10**(2154): 1-12. <https://doi.org/10.3390/pr10102154>
- The German Federal Institute for Risk Assessment (BfR)., 2024. *Nanomaterials: Tiny particles mediate manifold properties*.
- Nguyen, H. S. H., Huynh, H. K. P., Nguyen, S. T., Nguyen, V. T. T., Nguyen, T. A., & Phan, A. N., 2022. Insights into sustainable aerogels from lignocellulosic materials. In *Journal of Materials Chemistry A* Royal Society of Chemistry. **10**(23467): 1-16. <https://doi.org/10.1039/d2ta04994e>
- Nguyen, H. S. H., Phan, H. H., Huynh, H. K. P., Nguyen, S. T., Nguyen, V. T. T., & Phan, A. N., 2022. Understanding the effects of cellulose fibers from various pre-treated barley straw on properties of aerogels. *Fuel Processing Technology*. **236**(107425): 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107425>
- Nguyen, T. T. V., Tri, N., Tran, B. A., Dao Duy, T., Nguyen, S. T., Nguyen, T. A., et al., 2021. Synthesis, Characteristics, Oil Adsorption, and Thermal Insulation Performance of Cellulosic Aerogel Derived from Water Hyacinth. *ACS Omega*. **6**(40): 26130–26139. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03137>
- Nguyen, T. T. Van, Tri, N., Tran, B. A., Dao Duy, T., Nguyen, S. T., et al., 2021. Synthesis, Characteristics, Oil Adsorption, and Thermal Insulation Performance of Cellulosic Aerogel Derived from Water Hyacinth. *ACS Omega*. **6**(40): 26130–26139. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03137>
- Nordborg, F. M., Jones, R. J., Oelgemöller, M., & Negri, A. P., 2020. Science of the Total Environment The effects of ultraviolet radiation and climate on oil toxicity to coral

- reef organisms – A review. *Science of the Total Environment*. **720**(137486): 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137486>
- Obi, A. I., Ajiwe, V. I., & Okonkwo, C. P., 2023. Equilibrium and Kinetic Studies of Crude Oil Sorption on Unmodified and Modified Napier Grass. *Makara Journal of Science*. **27**(2): 115–128. <https://doi.org/10.7454/mss.v27i2.1458>
- Palanisamy, K., Palanisamy, G., Im, Y. M., Thangarasu, S., Phutela, U. G., & Oh, T. H. 2025. Recent Progress in Cellulose-Based Aerogels for Sustainable Oil–Water Separation Technologies. In *Polymers*. **17**(20): 1-41. <https://doi.org/10.3390/polym17202723>
- Panda, D., & Gangawane, K. M., 2024. *Recycled cellulose-silica hybrid aerogel for effective oil adsorption: optimization and kinetics study*. *Sadhana*. **48**(110): 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12046-023-02161-9S>
- Pant, M., Fleeger, J. W., Samuel, D., Rita, J., Aixin, R., Donald, H., et al., 2025. Recovery of Saltmarsh Macroinfauna After the Deepwater Horizon Oil Spill. *Estuaries and Coasts*. **48**(4): 1–13. <https://doi.org/10.1007/s12237-025-01520-5>
- Parale, V. G., Kim, T., Choi, H., Phadtare, V. D., Dhavale, R. P., Kanamori, K., et al., 2024. Mechanically Strengthened Aerogels through Multiscale, Multicompositional, and Multidimensional Approaches: A Review. *Advanced Materials*. **36**(18): 1–47. <https://doi.org/10.1002/adma.202307772>
- Payanda Konuk, O., Alsuhibe, A. A. A. M., Yousefzadeh, H., Ulker, Z., Bozbag, S. E., García-González, C. A., et al., 2023. The effect of synthesis conditions and process parameters on aerogel properties. *Frontiers in Chemistry*. **11**(2), 1–26. <https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1294520>
- Pellenz, L., Rafael, C., Oliveira, S. De, Henrique, A., Ulson, A., Souza, D., et al., 2023. A comprehensive guide for characterization of adsorbent materials. **305**(122435): 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122435>
- Peng, D., Zhao, J., Liang, X., Guo, X., & Li, H., 2023. Corn stalk pith-based hydrophobic aerogel for efficient oil sorption. *Journal of Hazardous Materials*. **448**(130954): 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130954>
- Pereira, P. H. F., Fernandes, L., Jesus, H. E., Costa, P. G., Lacerda, C. H. F., Mies, M., Bianchini, A., et al., 2023. The Impact of Highly Weathered Oil from the Most Extensive Oil Spill in Tropical Oceans (Brazil) on the Microbiome of the Coral *Mussismilia harttii*. *Microorganisms*. **11**(1935): 1-14. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11081935>
- Phat, L. N., Thang, T. Q., Nguyen, H. C., Duyen, D. T. M., Tien, D. X., Khoa, B. D. D., et al., 2021. Fabrication and modification of cellulose aerogels from Vietnamese water hyacinth for oil adsorption application. *Korean Journal of Chemical Engineering*. **38**(11): 2247–2255. <https://doi.org/10.1007/s11814-021-0853-x>
- Phong, D. T., Son, T. T., Tu, P. M., Dat, N. M., Huong, L. M., Nam, N. T. H., et al., 2023. Facile synthesis of corn stalks-derived carbon aerogels: Characterization, adsorption of ciprofloxacin and energy storage applications. *Surfaces and Interfaces*. **39**(102991): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.102991>
- Poulose, A., Parameswaranpillai, J., George, J. J., Gopi, J. A., Krishnasamy, S., Dominic C. D, M., et al., 2022. Nanocellulose: A Fundamental Material for Science and Technology Applications. *Molecules*. **27**(22): 1–27.

<https://doi.org/10.3390/molecules27228032>

- Prasanna, B. M., Cairns, J. E., Zaidi, P. H., Beyene, Y., Makumbi, D., Gowda, M., et al., 2021. Beat the stress: breeding for climate resilience in maize for the tropical rainfed environments. *Theoretical and Applied Genetics*. **134**(6): 1729–1752. <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03773-7>
- Puițel, A. C., Balan, C. D., & Nechita, M. T., 2025. Corn Stalks-Derived Hemicellulosic Polysaccharides: Extraction and Purification. *Polysaccharides*. **6**(1): 1-19. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides6010002>
- Purohit, B. K., Tewari, S., Prasad, K. S. N. V., Kumar, V., Pandey, N., Choudhury, P., et al., 2024. Regional Studies in Marine Science Marine oil spill clean-up : A review on technologies with recent trends and challenges. *Regional Studies in Marine Science*. **80**(103876): 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103876>
- Qiu, J., Guo, X., Lei, W., Ding, R., Zhang, Y., & Yang, H., 2020. Facile Preparation of Cellulose Aerogels with Controllable Pore Structure. *Nanomaterials*. **13**(3): 1-10. <https://doi.org/10.3390/nano13030613>
- Raji, Z., Karim, A., Karam, A., & Khalloufi, S., 2023. Adsorption of Heavy Metals: Mechanisms, Kinetics, and Applications of Various Adsorbents in Wastewater Remediation—A Review. *Waste*. **1**(3): 775–805. <https://doi.org/10.3390/waste1030046>
- Review, A., 2020. *Application of Sorbents for Oil Spill Cleanup Focusing on Natural-Based Modified Materials*. *Molecules*. **25**(4522): 1–22. <https://doi.org/10.3390/molecules25194522>
- Samešová, D., Pochyba, A., Ďuricová, A., Poništ, J., Prepilková, V. Š., Schwarz, M., et al., 2025. Comparative Adsorption of Cu(II), Zn(II), Cd(II), and Mn(II) from Aquatic Solution and Neutral Mine Drainage Using Paper Sludge. *Water*. **17**(10): 1-23. <https://doi.org/10.3390/w17101471>
- Setyawan, H., Fauziyah, M., Tomo, H. S. S., Widiyastuti, W., & Nurtono, T., 2022. Fabrication of Hydrophobic Cellulose Aerogels from Renewable Biomass Coir Fibers for Oil Spillage Clean-Up. *Journal of Polymers and the Environment*. **30**(12): 5228–5238. <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02591-2>
- Shah, A. M., Zhang, H., Shahid, M., Ghazal, H., Shah, A. R., Niaz, M., et al., 2025. The Vital Roles of Agricultural Crop Residues and Agro-Industrial By-Products to Support Sustainable Livestock Productivity in Subtropical Regions. In *Animals*. **15**(8): 1-31. <https://doi.org/10.3390/ani15081184>
- Shao, X., Wang, J., Liu, Z., Hu, N., Liu, M., & Xu, Y., 2020. Preparation and Characterization of Porous Microcrystalline Cellulose from Corn cob. *Industrial Crops and Products*. **151**(112457): 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112457>
- Silviana, S., Sa'adah, A. N., Deastuti, R. P., Ramadhani, N. C., Simarmata, N., Arianto, L. E., et al., 2022. Synthesis of silica-cellulose aerogel derived from bagasse through impregnation and ambient pressure drying methods as thermal insulator. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. **963**(1): 1-19. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/963/1/012027>
- Siregar, S. H., Wijaya, K., Kunarti, E. S., Syoufian, A., & Suyanta., 2019. Kinetics adsorption of heavy oil spills in rivers on magnetite-(CTAB-montmorillonite)

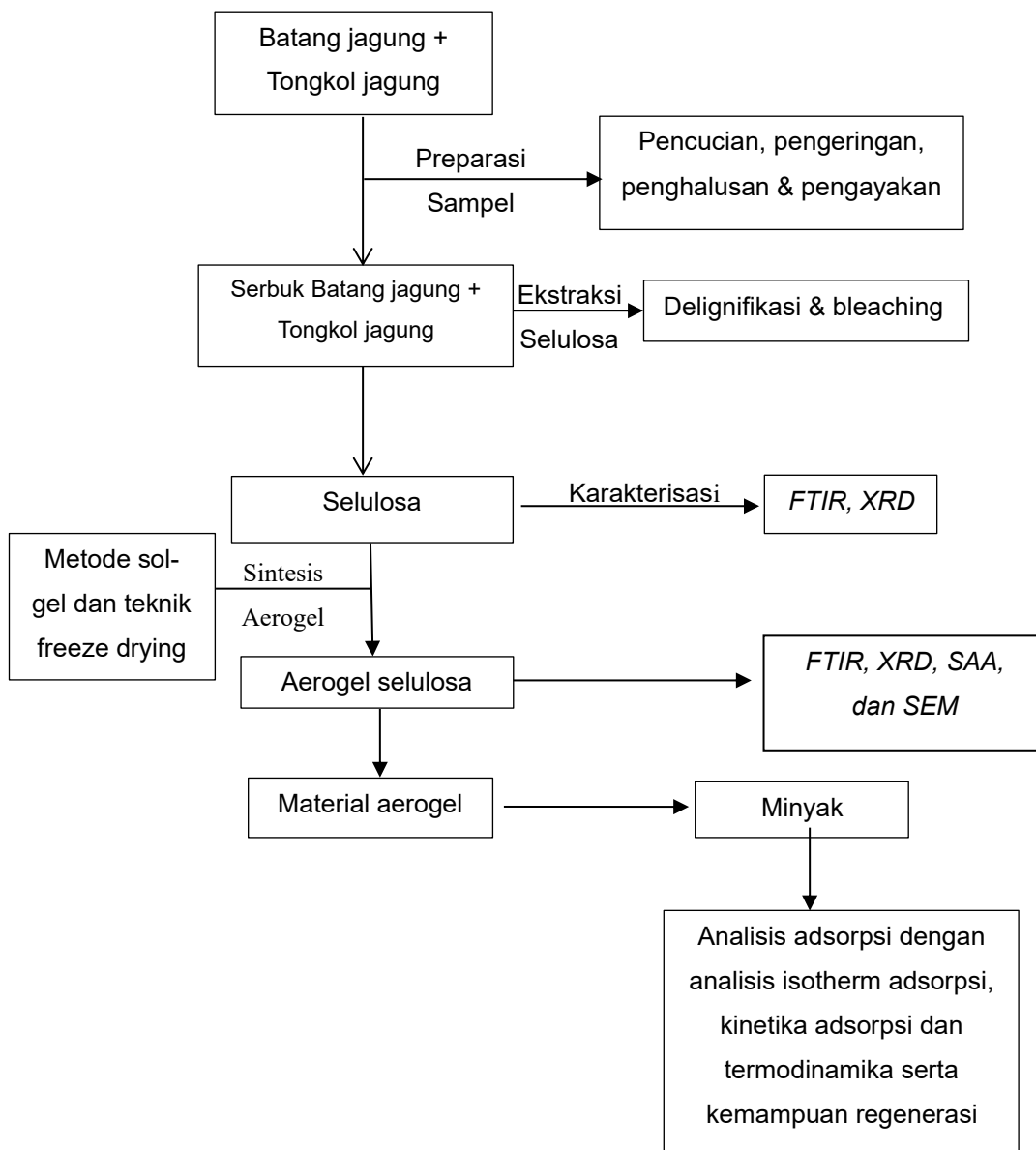
- adsorbent. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. **509**(1): 1-14. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/509/1/012136>
- Sozcu, S., Frajova, J., Wiener, J., Venkataraman, M., Tomkova, B., & Militky, J., 2024. Effect of Drying Methods on the Thermal and Mechanical Behavior of Bacterial Cellulose Aerogel. In *Gels*. **1**(7): 1-21. <https://doi.org/10.3390/gels10070474>
- Stanciu, M. C., Tanasă, F., & Teacă, C. A., 2025. Crystallinity Changes in Modified Cellulose Substrates Evidenced by Spectral and X-Ray Diffraction Data. *Polysaccharides*. **6**(2): 1-32. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides6020030>
- Stark, F. W., Thue, P. S., Missio, A. L., Machado, F. M., Delucis, R. de A., & Andreatza, R., 2025. Cellulose-Based Aerogels for Environmentally Sustainable Applications: A Review of the Production, Modification, and Sorption of Environmental Contaminants. In *Polymers*. **17**(2): 1-21. <https://doi.org/10.3390/polym17020236>
- Syeda, H. I., & Yap, P. S., 2022. A review on three-dimensional cellulose-based aerogels for the removal of heavy metals from water. *Science of the Total Environment*. **807**(150606): 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150606>
- Szymańska, M., Hoppe, J., Dutkiewicz, M., Sobolewski, P., Palacz, M., Janus, E., et al., 2022. Silicone polyether surfactant enhances bacterial cellulose synthesis and water holding capacity. *International Journal of Biological Macromolecules*. **208**: 642–653. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.03.124>
- Tang, R., Hu, Y., Yan, J., Xu, S., Wang, Y., Yan, J., et al., 2023. Multifunctional carboxylated cellulose nanofibers/exfoliated bentonite/Ti3C2 aerogel for efficient oil adsorption and recovery: The dual effect of exfoliated bentonite and MXene. *Chemical Engineering Journal*. **473**(145412): 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145412>
- Tarahi, M., Shahidi, F., & Hedayati, S., 2022. Physicochemical, Pasting, and Thermal Properties of Native Corn Starch–Mung Bean Protein Isolate Composites. *Gels*. **8**(11): 1-11. <https://doi.org/10.3390/gels8110693>
- Tofanica, B. M., Mikhailidi, A., Fortună, M. E., Rotaru, R., Ungureanu, O. C., & Ungureanu, E. 2020. Cellulose Nanomaterials: Characterization Methods, Isolation Techniques, and Strategies. *Crystals*. **15**(4): 1–26. <https://doi.org/10.3390/cryst15040352>
- Trang, T. Y. D., Zenitova, L. A., Quynh, P. H., Huong, T. T., & Dung, L. H., 2023. Adsorption Kinetic and Isotherm of the Oil Spill onto Adsorbents Based on Polyurethane Foam Grafted Chitin and Its Modifications. *Environment and Ecology Research*. **11**(3): 513–526. <https://doi.org/10.13189/eer.2023.110311>
- Trong, N. T., Huy, B. Le, & Van, N. T., 2025. Kinetic, isotherm, and thermodynamic studies on diesel oil adsorption by biodegradable cellulose aerogel from rambutan peel waste. *AIMS Environmental Science*. **12**(3): 373–399. <https://doi.org/10.3934/environsci.2025017>
- Trong, N. T., & Thai, V. N., 2023. *Modified methods of oil cleanup with cellulose – based adsorbents : a review*. *VN J. Hydrometeorol*. **14**: 96-120. [https://doi.org/10.36335/VNJHM.2023\(14\).96-120](https://doi.org/10.36335/VNJHM.2023(14).96-120)
- Turhan Kara, I., Kiyak, B., Colak Gunes, N., & Yucel, S., 2024. Life cycle assessment of aerogels: a critical review. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. **111**(2): 618–649. <https://doi.org/10.1007/s10971-024-06455-0>

- Vishnoi, Y., Trivedi, A. K., Gupta, M. K., Singh, H., Rangappa, S. M., & Siengchin, S., 2024. Extraction of nano-crystalline cellulose for development of aerogel: Structural, morphological and antibacterial analysis. *Heliyon*. **10**(1): 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23846>
- Wang, C., Xiao, W., Li, Q., Tian, X., Xu, J., & Ding, K., 2025. Oil removal from wastewater with biomass-derived hydrochars laboratory insights. *Scientific Reports*. **15**(1): 1-32. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-07240-x>
- Wang, S., Sun, M., Lv, J., Gu, J., Xu, Q., Li, Y., et al., 2024. Mullite-Fibers-Reinforced Bagasse Cellulose Aerogels with Excellent Mechanical, Flame Retardant, and Thermal Insulation Properties. *Materials*. **17**(15): 1-11. <https://doi.org/10.3390/ma17153737>
- Wang, S., Zhang, Q., Wang, Z., & Pu, J., 2020. Facile fabrication of an effective nanocellulose-based aerogel and removal of methylene blue from aqueous system. *Journal of Water Process Engineering*. **37**(101511): 1-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101511>
- Wang, T., & Zhao, Y., 2021. Optimization of bleaching process for cellulose extraction from apple and kale pomace and evaluation of their potentials as film forming materials. *Carbohydrate Polymers*. **253**(117225): 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117225>
- Wang, W., Yang, D., Mou, L., Wu, M., Wang, Y., Tan, F., et al., 2022. Remodeling of waste corn stalks into renewable, compressible and hydrophobic biomass-based aerogel for efficient and selective oil/organic solvent absorption. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. **645**(128940): 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.128940>
- Wirawan, S. K., Timotius, D., Nugraha, I. M., Restana, A., Anggara, A. L., & Hidayatullah, S., 2022. Kinetics and Adsorption Equilibrium Study of Free Fatty Acid (FFA) from Crude Palm Oil (CPO) on Anionic Resin. *ASEAN Journal of Chemical Engineering*. **22**(1): 33–41. <https://doi.org/10.22146/ajche.70319>
- Woźniak, M., Ratajczak, I., Wojcieszak, D., Waśkiewicz, A., Szentner, K., Przybył, J., Borysiak, S., et al., 2021. Chemical and structural characterization of maize stover fractions in aspect of its possible applications. *Materials*. **14**(6): 1-13. <https://doi.org/10.3390/ma14061527>
- Xiao, J., Yuan, X., Li, W., Zhang, T. C., He, G., & Yuan, S., 2024. Cellulose-based aerogel derived N, B-co-doped porous biochar for high-performance CO₂ capture and supercapacitor. *International Journal of Biological Macromolecules*. **269**(132078): 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132078>
- Xu, C., Ouyang, L., Ren, Y., Cai, Z., Lu, S., Zhang, J., et al., 2020. Synthesis and Properties of Linear Polyether-Blocked Amino Silicone-Modified Cationic Waterborne Polyurethane. *International Journal of Polymer Science*. **2020**(1): 1-9. <https://doi.org/10.1155/2020/4162368>
- Yang, X., Miao, W., Sun, X., & Pan, Y. T., 2025. Recent advances in sustainable biomass-based aerogels: a review. *RSC Sustainability*. **3**(10): 4298–4313. <https://doi.org/10.1039/d5su00497g>
- Yi, X., Zhang, Z., Niu, J., Wang, H., Li, T., Gong, J., et al., 2024. Green Strong Cornstalk Rind-Based Cellulose-PVA Aerogel for Oil Adsorption and Thermal Insulation.

- Polymers*. **16**(9): 1-11. <https://doi.org/10.3390/polym16091260>
- Yue, X., Zhang, S., He, J., & Wang, Z., 2023. Fabrication of Flame Retarded Cellulose Aerogel with Hydrophobicity via MF/MTMS Double Cross-Linking. *Journal of Natural Fibers*. **20**(1): 1-15. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2133053>
- Zhai, Y., & Yuan, X., 2023. Superhydrophobic, Magnetic Aerogels Based on Nanocellulose Fibers Derived from Harakeke for Oily Wastewater Remediation. *Polymers*. **15**(19): 1-16. <https://doi.org/10.3390/polym15193941>
- Zhai, Y., Yuan, X., Weber, C. C., Varley, R. J., & Henderson, L. C., 2024. Review of plant cellulose-based aerogel materials for oil/water mixture separation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. **12**(5): 113716, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113716>
- Zhang, C., Chen, G. H., Lang, D. N., Liu, G., Wu, R. L., Wang, W., et al., 2024. Superhydrophobic cellulose-nanofiber aerogels from waste cotton stalks for superior oil–water and emulsion separation. *Cellulose*. **31**(14): 8519–8538. <https://doi.org/10.1007/s10570-024-06118-x>
- Zhang, H., Liu, W., Wang, L., Zhang, X., Wang, B., Zeng, X., et al., 2024. Functionalized corn stalk carboxymethyl cellulose and mesoporous silica SBA-15 composite hydrogel-immobilized lipase for the resolution of racemic ibuprofen ethyl ester. *Green Chemistry Letters and Reviews*. **17**(1): 1–14. <https://doi.org/10.1080/17518253.2024.2338241>
- Zhang, Q., Ma, Y., Qi, Z., Song, W., Li, L., & Chen, Z., 2023. Effect of alkali modification on the powder flowability of rapeseed straw cellulose fibers. *Journal of Natural Fibers*. **20**(1): 1-12. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2151546>
- Zhang, Q., Qi, Z., Yao, Y., Ma, Y., Zhang, D., Chen, M., et al., 2023. Potential reinforcing properties of silane-modified rapeseed straw fibers in friction composites: Fractal dimension and circularity characterise powder flowability. *Industrial Crops and Products*. **206**(117644) 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117644>
- Zhao, S., Li, D., Cai, Y., Song, Z., & Liu, H., 2025. Facile preparation of regenerative environmentally responsive sodium alginate aerogel and its efficient adsorption toward copper ions. *Materials Chemistry and Physics*. **346**(131340): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.131340>

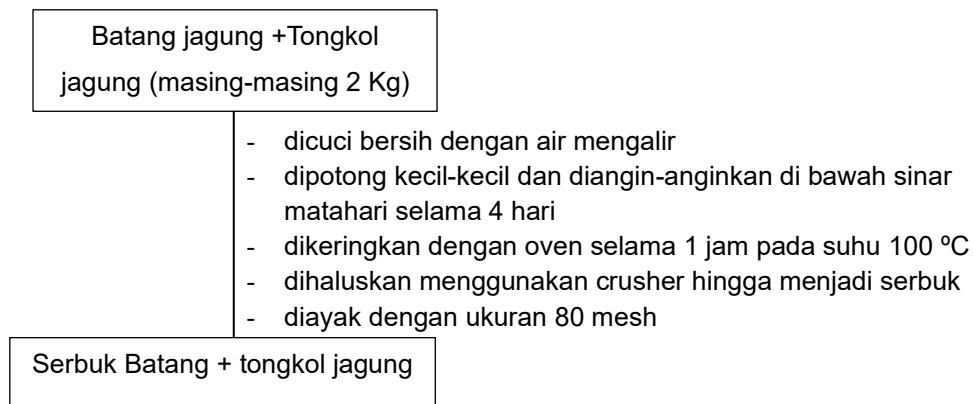
LAMPIRAN

Lampiran 1 Skema Penelitian



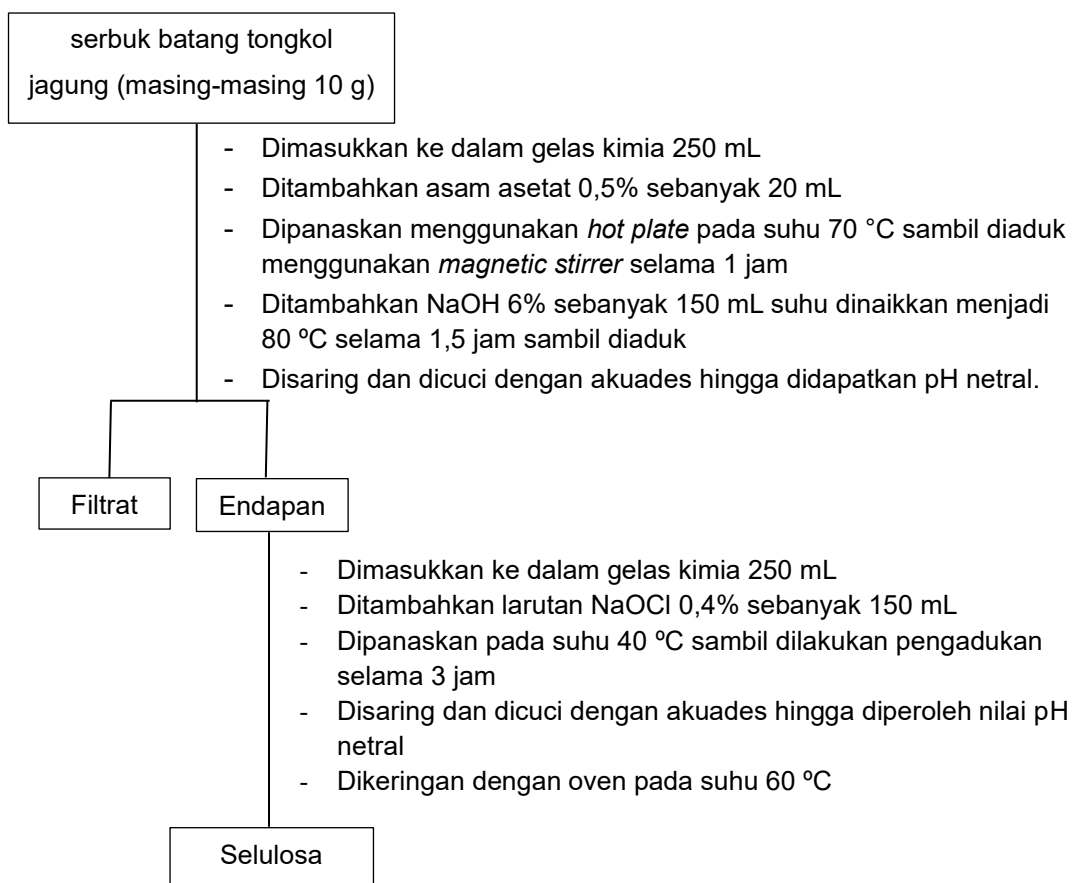
Lampiran 2 Bagan Alir Tahapan Penelitian

1. Tahapan Preparasi Sampel

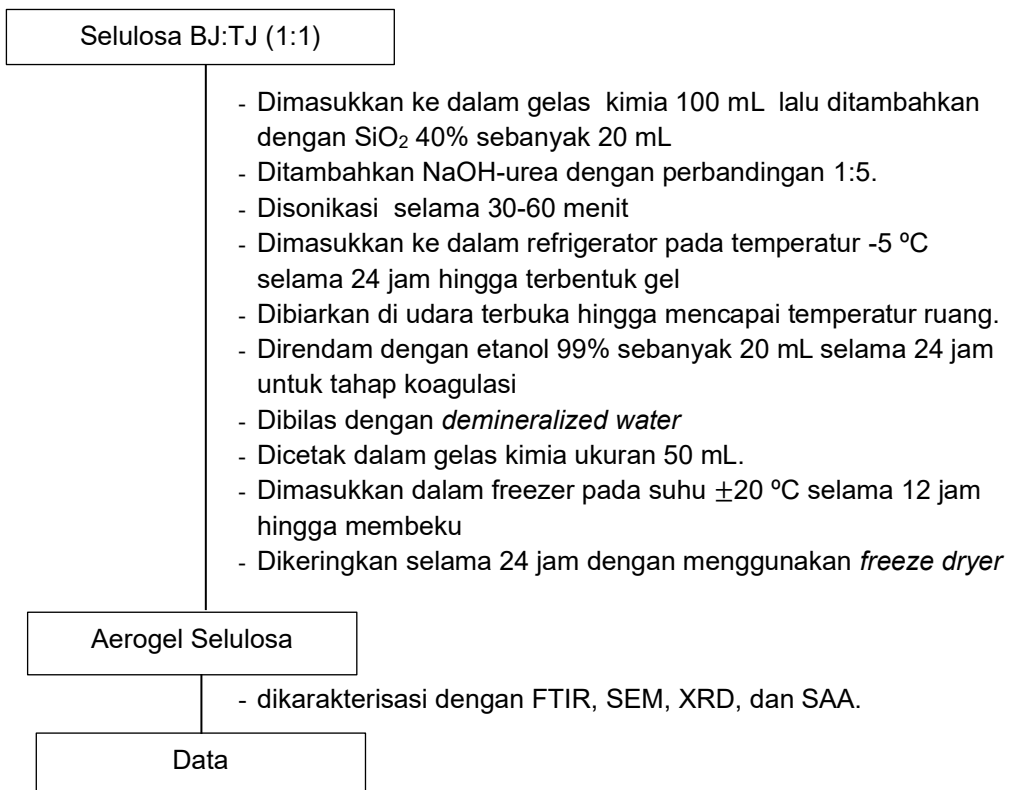


2. Ekstraksi Selulosa

- Delignifikasi dan *bleaching*

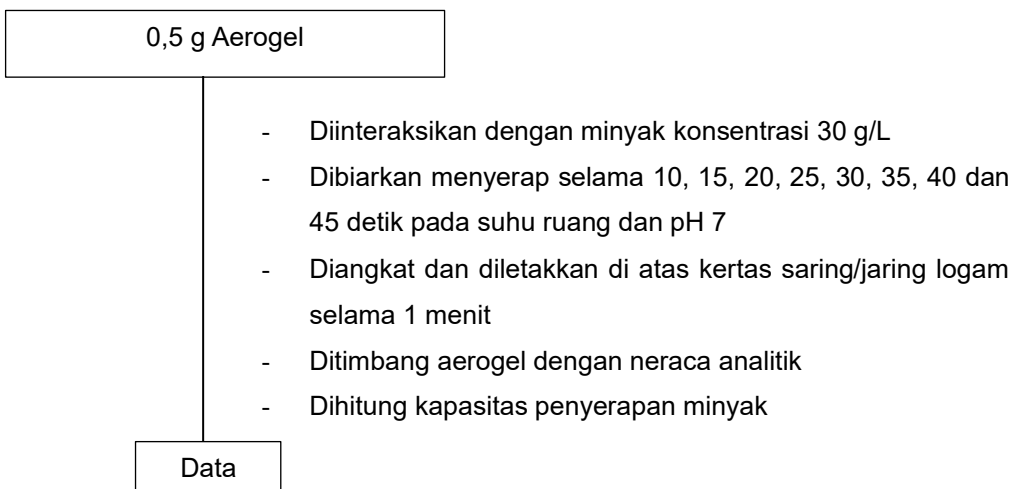


3. Sintesis Aerogel Selulosa

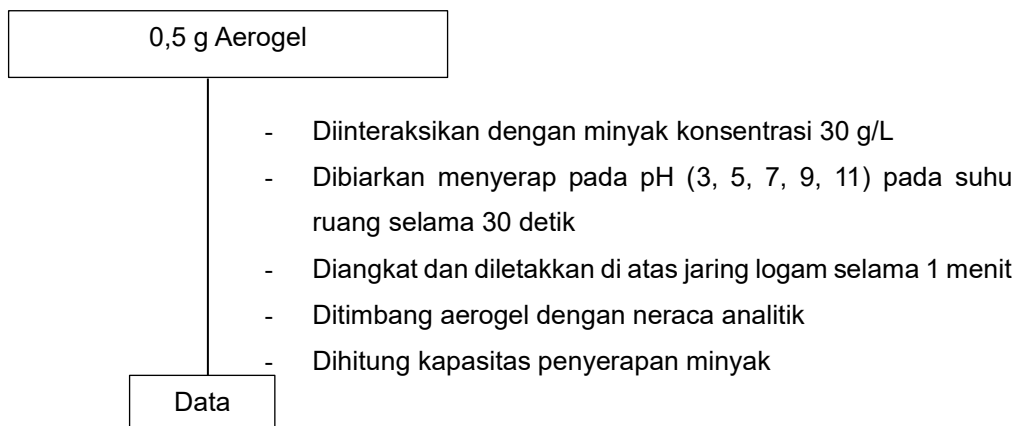


4. Penentuan Kondisi Optimum Penyerapan Minyak

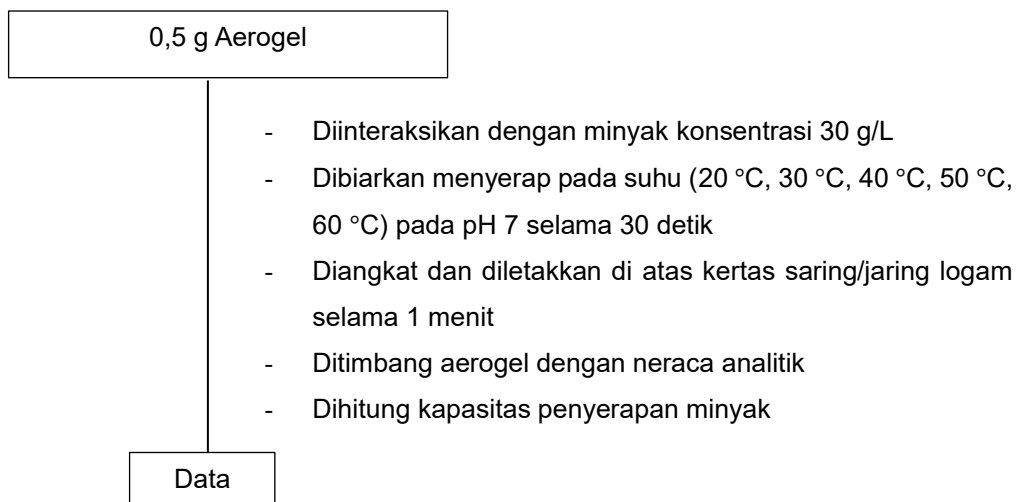
a. Penentuan waktu optimum



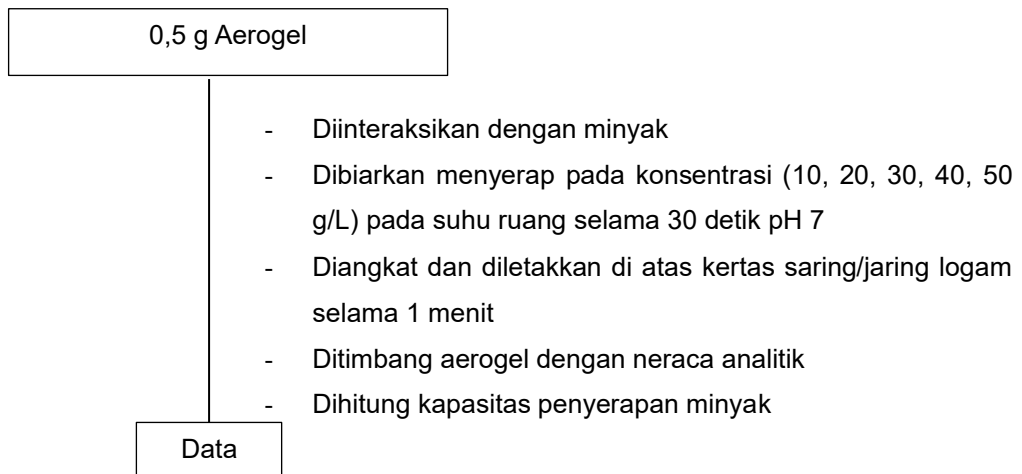
b. Penentuan pH optimum



c. Penentuan suhu optimum



d. Penentuan konsentrasi optimum



Lampiran 3. Perhitungan

3.1 Pembuatan Larutan NaOH 6% dalam 500 mL

$$\%b/v = \frac{\text{gram zat terlarut}}{\text{volume larutan}} \times 100\%$$

$$6\% = \frac{x}{500 \text{ mL}} \times 100\%$$

$$x = 30 \text{ g}$$

3.2 Rendemen selulosa terhadap biomassa

- Rendemen Selulosa Batang Jagung

$$\begin{aligned} \text{Rendemen} &= \frac{\text{berat selulosa}}{\text{berat biomassa}} \times 100\% \\ &= \frac{12,0116}{20} \times 100\% \\ &= 60,05\% \end{aligned}$$

- Rendemen Selulosa Tongkol Jagung

$$\begin{aligned} \text{Rendemen} &= \frac{\text{berat selulosa}}{\text{berat biomassa}} \times 100\% \\ &= \frac{12,0981}{20} \times 100\% \\ &= 60,49\% \end{aligned}$$

3.3 Penentuan kondisi optimum

3.3.1 Data Pengaruh Variasi Waktu Kontak Interaksi Minyak dengan Aerogel Selulosa

Diketahui:

$$y = 0.62233 + 0.00753x$$

Rumus Perhitungan Kapasitas Adsorpsi

$$Q = \frac{W_1 - W_0}{W_0}$$

Waktu (menit)	Q (g/g)
10	0.6
15	0.72
20	0.78
25	0.856
30	1.02
35	0.92
40	0.9
45	0.84

3.3.2 Data Pengaruh Variasi pH Interaksi Minyak dengan Aerogel Selulosa

Diketahui:

$$y = 0.61798 - 0.0089x$$

Rumus Perhitungan Kapasitas Adsorpsi

$$Q = \frac{W_1 - W_0}{W_0}$$

pH	Q (g/g)
3	0.174
5	0.866
7	0.9264
9	0.588
11	0.224

3.3.3 Data Pengaruh Variasi Suhu Interaksi Minyak dengan Aerogel Selulosa

Diketahui:

$$y = 0.4636 + 0.00322x$$

Rumus Perhitungan Kapasitas Adsorpsi

$$Q = \frac{W_1 - W_0}{W_0}$$

Suhu (C)	Q (g/g)
20	0.52
30	0.57
40	0.596
50	0.62
60	0.656

3.3.4 Data Pengaruh Variasi Konsentrasi Interaksi Minyak dengan Aerogel Selulosa

Diketahui:

$$y = 0.02204 + 0.00436x$$

Rumus Perhitungan Kapasitas Adsorpsi

$$Q = \frac{W_1 - W_0}{W_0}$$

Konsentrasi (g/L)	Q (g/g)
10	0.068
20	0.104
30	0.154
40	0.1996
50	0.238

3.4 Data Kinetika Orde Satu Semu dan Orde Dua Semu Interaksi minyak dengan Aerogel Selulosa

Rumus kinetika orde satu semu

$$\ln (q_e - q_t) = -k_1 t + \ln q_e$$

Waktu (t)	Qe	q	qe-q	ln (qe-q)	t/q
10	0.6	1.02	0.42	-0.867500568	16.66666667
15	0.72	1.02	0.3	-1.203972804	20.83333333
20	0.78	1.02	0.24	-1.427116356	25.64102564
25	0.856	1.02	0.164	-1.807888851	29.20560748
30	1.02	1.02	0	0	29.41176471
35	0.92	1.02	0.1	-2.302585093	38.04347826
40	0.9	1.02	0.12	-2.120263536	44.44444444
45	0.84	1.02	0.18	-1.714798428	53.57142857

Dari grafik kinetika orde satu semu diperoleh persamaan garis $y = -0.6886 - 0.02698x$ dimana nilai slope (a) sebesar 0.02698 dan intercept (b) sebesar -0.6886.

Nilai k_1 dapat dihitung sebagai berikut:

$$k = -0.02698$$

$$\ln q_e = \text{intercept}$$

$$\ln q_e = -0.6886 = 0.502$$

$$R^2 = 0.1972$$

Rumus kinetika orde dua semu

$$\frac{t}{qt} = \frac{1}{kq_e^2} + \frac{1}{q_e} t$$

Dari grafik kinetika orde dua semu diperoleh persamaan garis $y = 5.13301 + 0.98524x$, dimana nilai slope (a) sebesar 0.98524 dan intercept (b) sebesar 5.13301.

Nilai k_2 dapat dihitung sebagai berikut:

$$\text{slope} = \frac{1}{q_e}$$

$$q_e = 1.0149$$

$$\text{intercept} = \frac{1}{k_2 q_e^2}$$

$$k_2 = 0.1872$$

$$R^2 = 0,9516$$

3.5 Data Isoterm Langmuir Adsorpsi Minyak dengan Aerogel Selulosa

Konsentrasi (g/L)	Ce (g/L)	Q (g/L)	Ce/Q
10	9.966	0.00272	3663.970588
20	19.948	0.00416	4795.192308
30	29.923	0.00616	4857.62987
40	39.9002	0.007984	4997.52004
50	49.881	0.00952	5239.60084

Persamaan adsorpsi isotermal Langmuir

$$\frac{C_e}{Q} = \frac{1}{Q_{o,b}} + \frac{1}{Q_o}$$

Berdasarkan model isotermal Langmuir diperoleh persamaan garis $y=3705.03485+33.61048x$, dimana nilai slope (a) sebesar 33.61048 dan intercept (b) sebesar 3705.03485.

$$\frac{1}{Q_o} = \text{kemiringan (slope)}$$

$$Q_o = 0.00026 \text{ g/g}$$

$$\frac{1}{Q_{o,b}} = \text{intercept}$$

$$R^2 = 0,757$$

3.6 Data Isoterm Freundlich Adsorpsi Minyak dengan Aerogel Selulosa

Konsentrasi (g/L)	Ce (g/L)	Q (mg/g)	Log Ce	Log Q
10	9.966	0.00272	0.998520883	-2.565431096
20	19.948	0.00416	1.29989936	-2.380906669
30	29.923	0.00616	1.476005133	-2.210419288
40	39.9002	0.007984	1.600975073	-2.097779472
50	49.881	0.00952	1.697935152	-2.021363052

Persamaan adsorpsi isotermal Freundlich

$$\log \frac{x_m}{m} = \log k + \frac{1}{n} \log C$$

Berdasarkan model isotermal Freundlich diperoleh persamaan garis $y=-3.37667+0.79276x$, dimana nilai slope (a) sebesar -3.37667 dan intercept (b) sebesar 0.79276.

$$\frac{1}{n} = \text{kemiringan (slope)}$$

$$n = 1.2615 \text{ g/L}$$

$\log k = \text{intercept}$

$k = 0,0362 \text{ mg/g}$

$R^2 = 0,991$

3.7 Data dan Grafik Termodinamika Adsorpsi Minyak dengan Aerogel Selulosa

T/K	$\ln (Q_e/C_e)$	$\Delta G/\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	$\Delta H/\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	$\Delta S/\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	R^2
293	-7.265295233	-4.1075	-0.00451	-0.01403402349	0.98079
303	-7.172646712	-4.2477		-0.01403352987	
313	-7.12760482	-4.3879		-0.01403306779	
323	-7.087721915	-4.5281		-0.01403263432	
333	-7.030674155	-4.6683		-0.01403222689	

Berdasarkan plot diperoleh persamaan garis ,dari persamaan garis $y=-5.39934-0.54271094x$ diperoleh nilai slope (a) = -0.54271094 dan intercept (b) = -5.39934

Nilai $k_1 = \text{slope} = 0.5427109$

Nilai $K = -\text{intercept} = 5.39934$

Nilai Perubahan Entalpi (ΔH)

$$\Delta G = -RT \ln K$$

Nilai Perubahan Entalpi (ΔH)

$$\ln K = -\frac{\Delta H}{R} \frac{1}{T} + C$$

Dari membuat grafik $\ln K$ terhadap $1/T$ diperoleh persamaan garis $y=-5.39934-542.71094x$

$$\frac{\Delta H}{R} = -\text{slope}$$

$$\Delta H = -004512 \text{ J/mol}$$

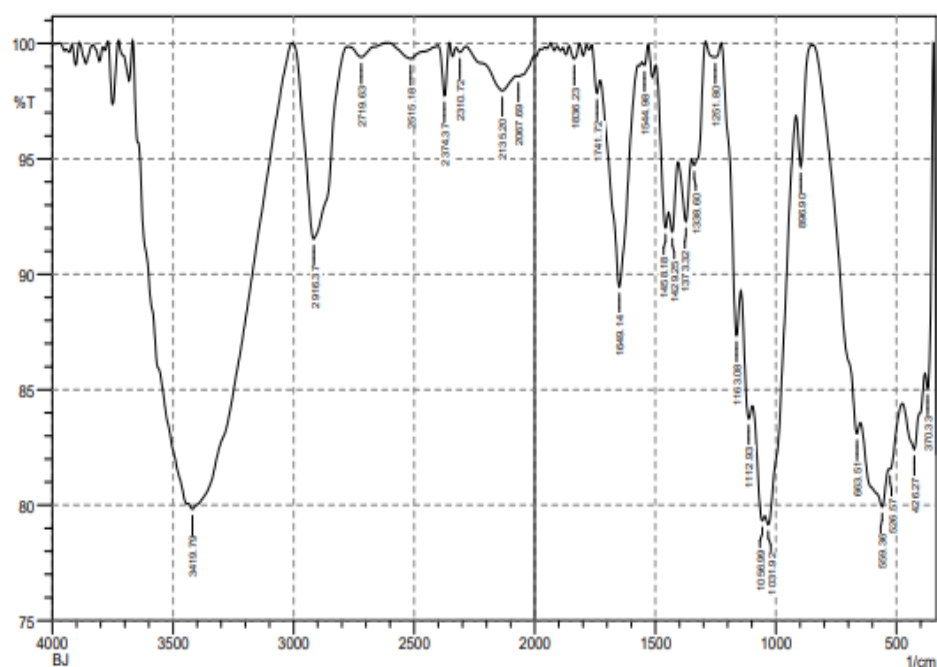
Nilai Perubahan Entropi (ΔS)

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Lampiran 4 Data Karakterisasi

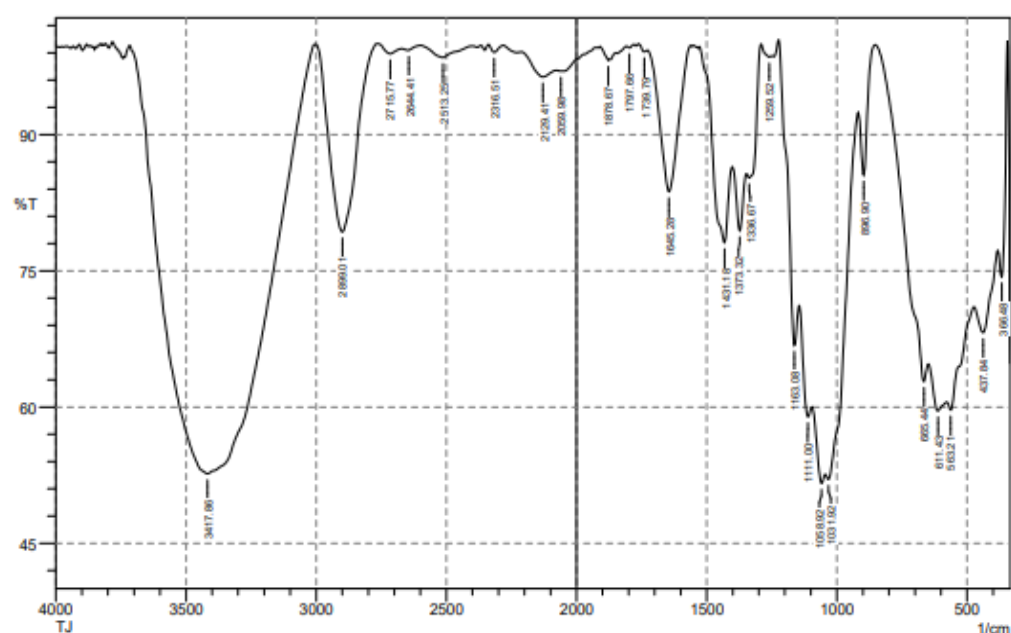
Karakterisasi FT-IR

1) Hasil FT-IR selulosa batang jagung



	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area
1	370.33	85.064	4.82	379.98	347.19	1.646	0.61
2	426.27	82.417	2.657	474.49	381.91	7.187	0.68
3	526.57	81.558	0.213	530.42	476.42	4.368	0.035
4	559.36	79.932	2.096	648.08	532.35	10.549	0.903
5	663.51	83.102	1.598	844.82	650.01	7.715	0.475
6	896.9	94.668	3.102	916.19	850.61	0.737	0.275
7	1031.92	79.155	2.203	1045.42	918.12	8.384	1.277
8	1056.99	79.327	1.138	1095.57	1047.35	4.372	0.166
9	1112.93	83.744	2.193	1143.79	1097.5	3.189	0.303
10	1163.08	87.37	4.203	1226.73	1145.72	2.556	0.535
11	1251.8	99.412	0.629	1290.38	1226.73	0.112	0.125
12	1338.6	94.732	1.231	1350.17	1290.38	0.966	0.307
13	1373.32	92.283	2.634	1404.18	1350.17	1.551	0.325
14	1429.25	91.843	1.698	1444.68	1406.11	1.218	0.148
15	1458.18	92.023	2.088	1496.76	1446.61	1.204	0.247
16	1544.98	99.059	0.417	1554.63	1529.55	0.073	0.025
17	1649.14	89.457	9.269	1728.22	1571.99	4.015	3.144
18	1741.72	97.846	1.15	1762.94	1728.22	0.22	0.094
19	1836.23	99.336	0.616	1857.45	1815.02	0.076	0.067
20	2067.69	98.576	0.129	2077.33	2004.04	0.371	0.057
21	2135.2	97.96	0.991	2283.72	2077.33	1.115	0.417
22	2310.72	99.626	0.215	2326.15	2285.65	0.047	0.02
23	2374.37	97.743	2.234	2403.3	2353.16	0.212	0.204
24	2515.18	99.339	0.634	2611.62	2403.3	0.297	0.268
25	2719.63	99.412	0.51	2775.57	2611.62	0.175	0.138
26	2916.37	91.54	8.416	3003.17	2777.5	4.339	4.279
27	3419.79	79.833	1.034	3437.15	3005.1	24.519	3.872

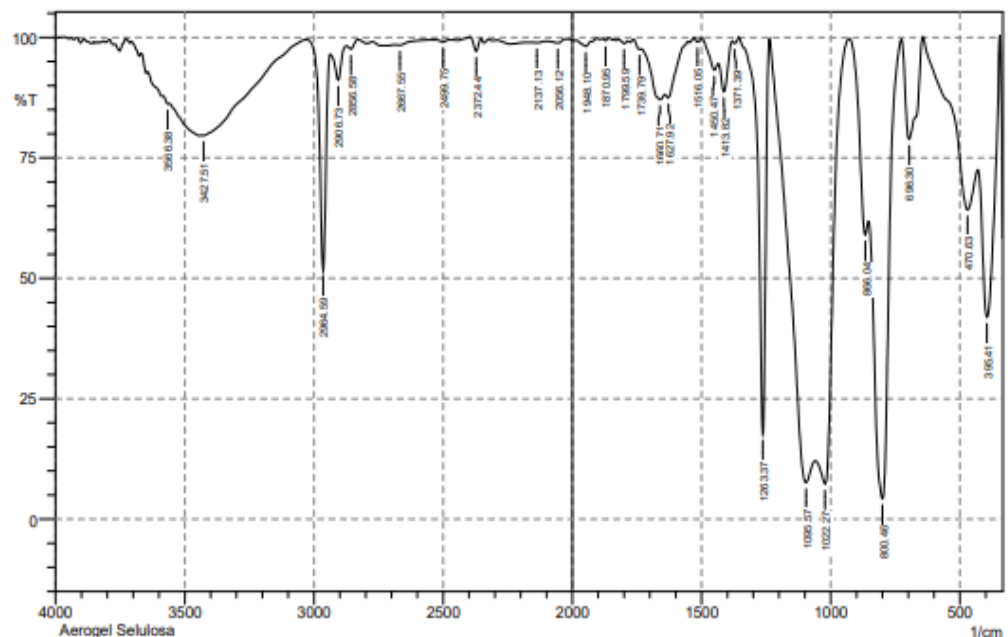
2) Hasil FT-IR selulosa tongkol jagung



	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area
1	366.48	74.334	12.614	381.91	345.26	3.47	1.548
2	437.84	68.198	5.217	472.56	383.83	13.12	1.563
3	563.21	59.681	2.228	576.72	474.49	19.055	0.465
4	611.43	59.567	2.947	648.08	578.64	14.898	0.744
5	665.44	62.823	4.58	850.61	650.01	18.733	1.244
6	896.9	85.53	9.307	918.12	852.54	2.076	1.017
7	1031.92	52.028	4.276	1043.49	920.05	21.929	3.052
8	1058.92	51.61	2.967	1095.57	1045.42	13.186	0.588
9	1111	58.925	4.311	1143.79	1097.5	9.475	0.846
10	1163.08	66.805	10.942	1222.87	1145.72	7.416	1.658
11	1259.52	98.537	0.422	1290.38	1249.87	0.193	0.068
12	1336.67	85.228	2.988	1346.31	1292.31	2.582	0.838
13	1373.32	79.404	6.622	1400.32	1348.24	4.274	0.869
14	1431.18	78.112	11.378	1527.62	1402.25	7.58	3.463
15	1645.28	83.722	15.795	1726.29	1564.27	5.962	5.623
16	1739.79	99.11	0.408	1762.94	1728.22	0.085	0.03
17	1797.66	99.548	0.233	1807.3	1780.3	0.037	0.014
18	1878.67	98.173	0.315	1909.53	1872.88	0.182	0.018
19	2059.98	96.973	0.385	2077.33	1926.89	1.233	0.14
20	2129.41	96.343	1.512	2208.49	2079.26	1.567	0.468
21	2316.51	99.064	0.805	2337.72	2281.79	0.132	0.098
22	2513.25	98.485	1.295	2598.12	2399.45	0.722	0.528
23	2644.41	99.272	0.309	2671.41	2598.12	0.153	0.035
24	2715.77	98.898	0.811	2763.99	2671.41	0.271	0.158
25	2899.01	79.289	20.679	3003.17	2765.92	11.121	11.092
26	3417.86	52.651	47.193	3714.9	3005.1	112.944	112.505

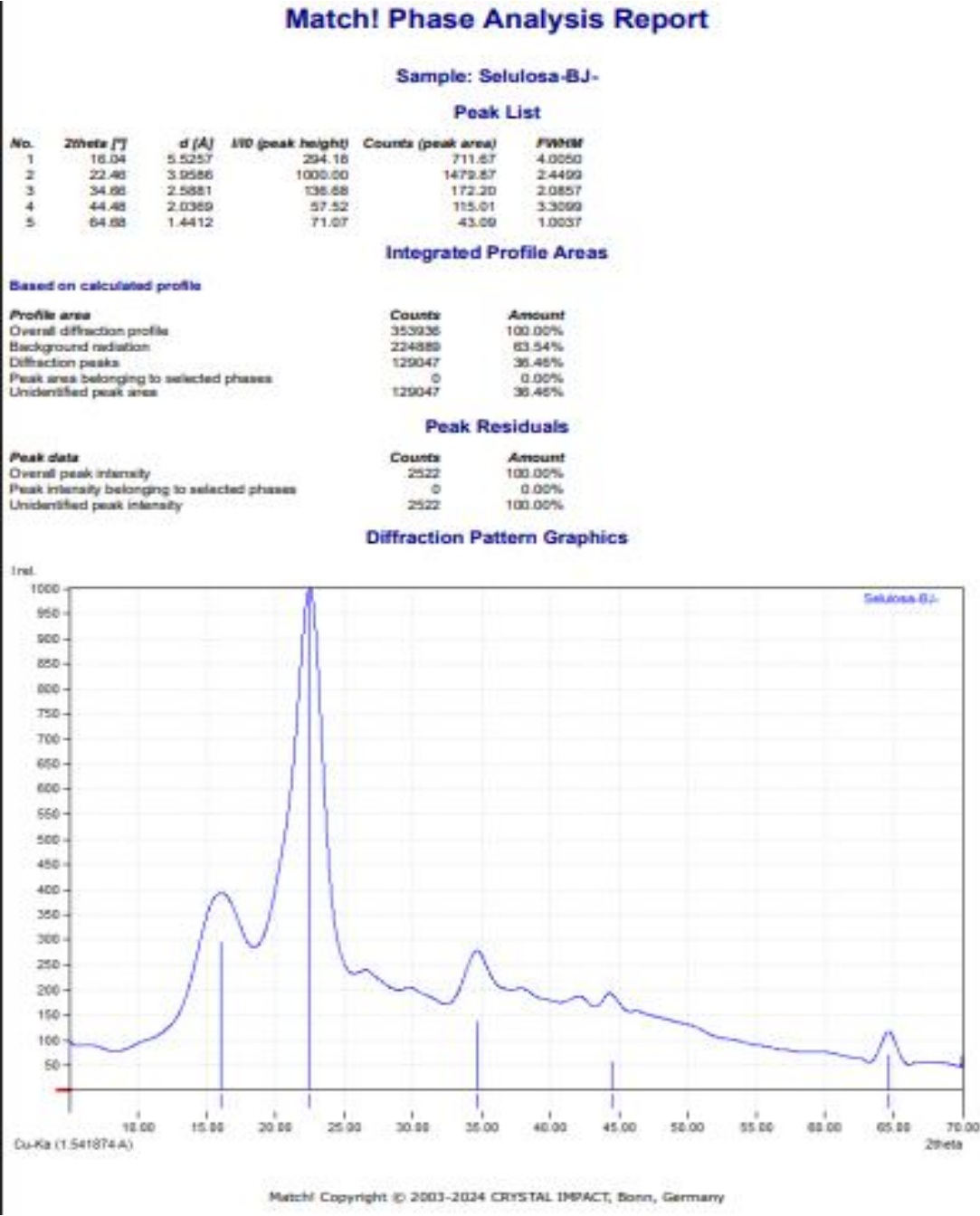
3) Hasil FT-IR aerogel selulosa

SHIMADZU

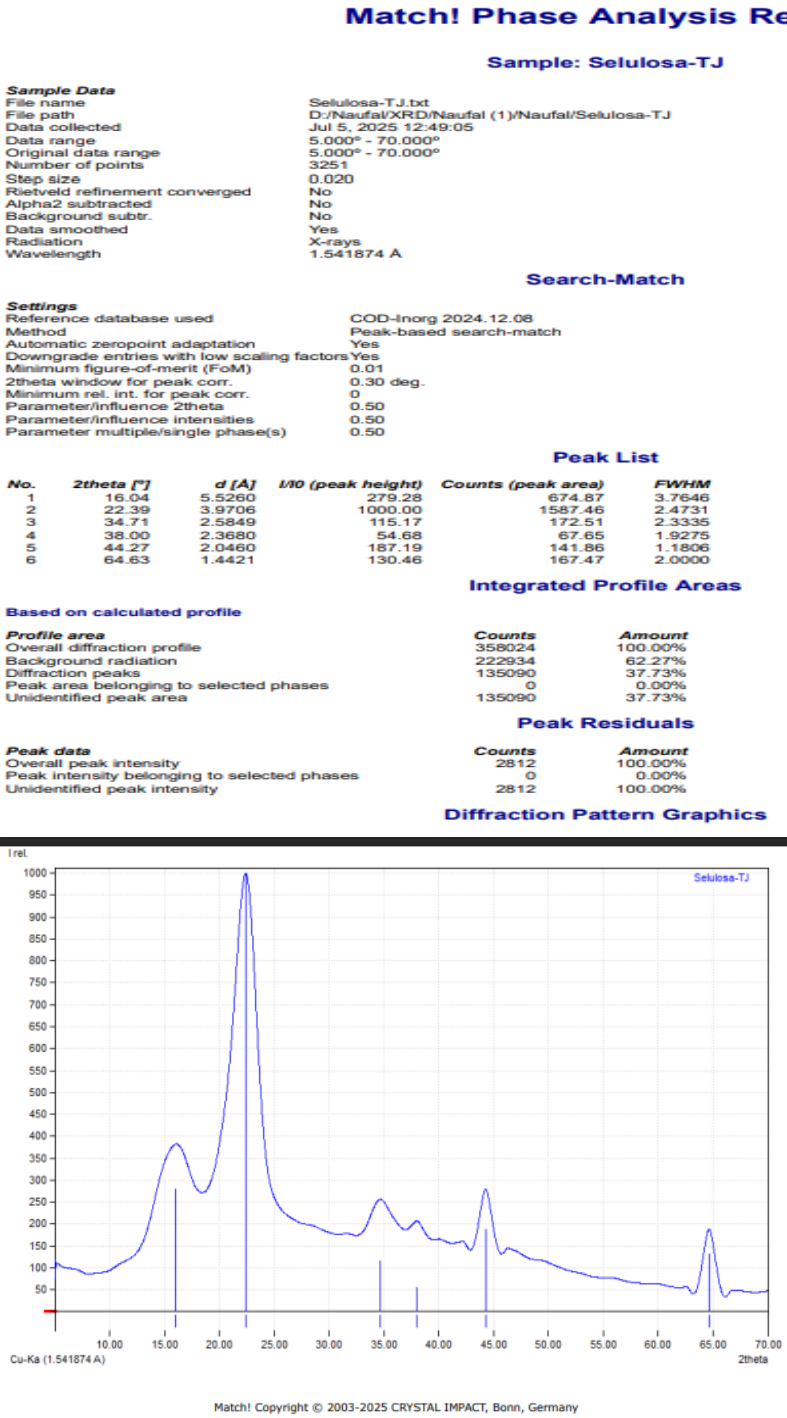


No.	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area
1	395.41	41.92	42.016	430.13	347.19	19.259	13.568
2	470.63	64.217	13.302	642.3	432.05	18.792	4.098
3	696.3	78.876	20.869	725.23	644.22	4.999	4.938
4	800.46	4.277	73.218	852.54	727.16	60.626	47.685
5	866.04	58.996	8.828	927.76	854.47	7.888	1.085
6	1022.27	7.303	29.63	1058.92	929.69	62.985	14.629
7	1095.57	7.61	21.795	1236.37	1060.85	87.529	14.612
8	1263.37	17.691	81.914	1354.03	1238.3	16.871	16.736
9	1371.39	98.8	0.769	1381.03	1355.96	0.088	0.052
10	1413.82	88.742	7.558	1433.11	1382.96	1.592	0.907
11	1450.47	93.239	2.661	1496.76	1435.04	1.141	0.351
12	1516.05	99.087	0.821	1529.55	1502.55	0.068	0.057
13	1627.92	87.491	2.32	1641.42	1552.7	2.633	0.259
14	1660.71	87.155	2.858	1730.15	1643.35	3.499	0.637
15	1739.79	97.559	0.148	1764.87	1737.86	0.181	0.012
16	1799.59	98.748	0.579	1822.73	1786.08	0.14	0.039
17	1870.95	99.371	0.437	1886.38	1859.38	0.046	0.022
18	1948.1	98.158	1.432	1984.75	1903.74	0.372	0.235
19	2056.12	98.866	0.632	2102.41	2025.26	0.283	0.099
20	2137.13	98.909	0.158	2156.42	2102.41	0.231	0.019
21	2372.44	97.155	2.736	2395.59	2353.16	0.25	0.234
22	2499.75	99.023	0.484	2532.54	2472.74	0.176	0.047
23	2667.55	98.403	0.223	2688.84	2546.04	0.57	-0.05
24	2856.58	97.597	1.133	2873.94	2829.57	0.314	0.095
25	2906.73	91.151	6.162	2935.66	2875.86	1.381	0.687
26	2964.59	51.702	45.696	3028.24	2937.59	7.281	6.481
27	3427.51	79.675	0.291	3433.29	3030.17	19.196	0.427
28	3566.38	86.214	0.461	3583.74	3560.59	1.424	0.027

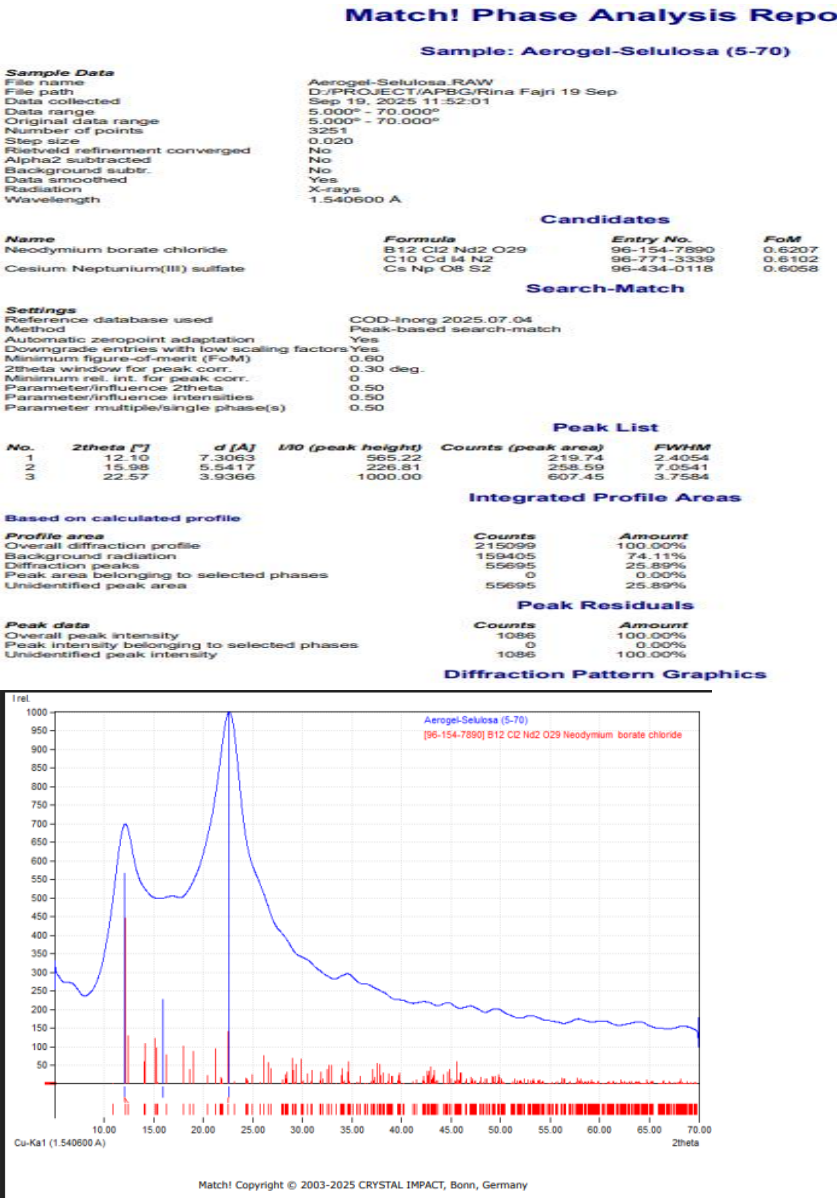
- Karakterisasi XRD
- 1) Hasil XRD selulosa batang jagung



2) Hasil XRD selulosa tongkol jagung



3) Hasil XRD aerogel selulosa



- Karakterisasi SAA aerogel selulosa



Summary Report

Page 1

Workstation: Micro200B-02-Analysis Station1	Method: static volumetric method
Project: SAMPEL SAA UNHAS	Sample: Aerogel
Adsorbate: N2	Charge Number: #1
Bath Temperature: 77.35 K	Sample Weight: 0.1742(g)
Operator:	Degas Conditions:
Started: 2025-10-14 11:24:15	Completed: 2025-10-14 15:07:26

Surface Area

Single Point BET Surface Area at $p/p_0 = 0.20000$:	3.7597	(m ² /g)
BET Surface Area:	18.2658	(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:	18.26578	(m ² /g)
BJH Adsorption Cumulative Surface Area:	16.72149	(m ² /g)
BJH Desorption Cumulative Surface Area:	16.90102	(m ² /g)

Pore Volume

Total Pore Volume (adsorption) at $p/p_0 = 0.99000$:	0.01853	(cm ³ /g)
Total Pore Volume (desorption) at $p/p_0 = 0.99000$:	0.01853	(cm ³ /g)
t-Plot Micropore Volume:	0.00000	(cm ³ /g)
BJH Adsorption Cumulative Volume:	0.02291	(cm ³ /g)
BJH Desorption Cumulative Volume:	0.02262	(cm ³ /g)

Pore Size

Average Pore Diameter (4V/A):	4.05764	(nm)
BJH Adsorption Median Pore Diameter:	5.75382	(nm)
BJH Adsorption Most Frequent Pore Diameter (dV/dD):	3.25673	(nm)
BJH Desorption Median Pore Diameter:	5.51393	(nm)
BJH Desorption Most Frequent Pore Diameter (dV/dD):	3.28255	(nm)

Pore Volume Percentage Report

ID	Pore Range	Pore Volume (cm ³ /g)	Percentage (%)
1	2.00-10.00	0.01755	76.58
2	10.00-20.00	0.00290	12.67
3	20.00-50.00	0.00123	5.39
4	> 50.00	0.00123	5.36

Lampiran 5 Dokumentasi Kegiatan Penelitian



Sampel limbah batang dan tongkol jagung yang telah dicuci dan dipotong-potong



Sampel yang telah dikeringkan dalam oven selama 16 jam



Sampel diayak dengan pengayak 100 mesh hingga didapatkan serat batang dan tongkol jagung



Proses delignifikasi



Proses *bleaching*



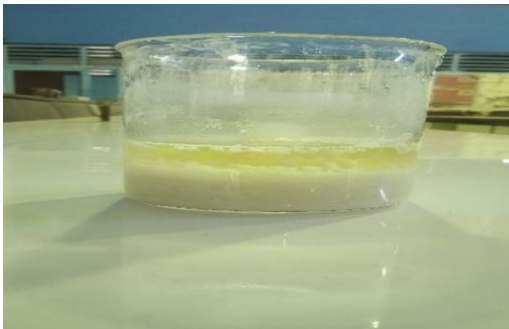
Selulosa yang diperoleh dari tahap ekstraksi



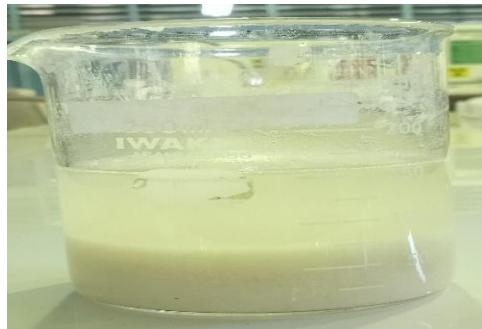
Penambahan bahan prekursor aerogel



Proses sinikasi dengan sonikator



Penambahan etanol dan proses koagulasi



Perendaman dengan aquabides dan proses *ion exchange*



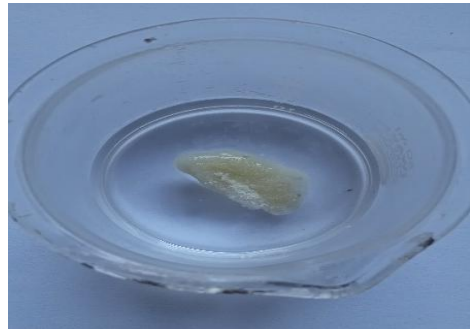
Hasil produk aerogel selulosa setelah *freeze drying*



Hasil produk aerogel selulosa setelah *freeze drying*



Hasil produk aerogel selulosa setelah *freeze drying*



Proses adsorpsi minyak oleh adsorben aerogel selulosa