ANALISIS STRUKTUR DAN SIFAT KOMPOSIT SILIKA-KARBON DARI LIMBAH PERTANIAN UNTUK APLIKASI ADSORBEN LOGAM BERAT *Pb* (*II*)

SKRIPSI

Oleh:
FATMA NABILLA NUR'AINI
NIM. 210604110036

PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2026

HALAMAN PENGAJUAN

ANALISIS STRUKTUR DAN SIFAT KOMPOSIT SILIKA-KARBON DARI LIMBAH PERTANIAN UNTUK APLIKASI ADSORBEN LOGAM BERAT *Pb* (*II*)

SKRIPSI

Diajukan kepada:

Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan Dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)

Oleh:
FATMA NABILLA NUR'AINI
NIM. 210604110036

PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM MALANG
2026

HALAMAN PERSETUJUAN

ANALISIS STRUKTUR DAN SIFAT KOMPOSIT SILIKA-KARBON DARI LIMBAH PERTANIAN UNTUK APLIKASI ADSORBEN LOGAM BERAT *Pb (II)*

SKRIPSI

Oleh:
Fatma Nabilla Nur'aini
NIM. 210604110036

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji
Pada Tanggal 28, April 2026

Pembimbing I	Pembimbing II
Fikriyatul Arizah Su'ud, M.Si	Arista Romadani, M.Sc
NIP. 19930617 202012 2 003	NIP. 19900905 201903 1 018

Mengetahui,
Ketua Program Studi

Farid Samsu Hananto, S.Si.,M.T
NIP. 19740513 200312 1 001

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISIS STRUKTUR DAN SIFAT KOMPOSIT SILIKA-KARBON DARI LIMBAH PERTANIAN UNTUK APLIKASI ADSORBEN LOGAM BERAT *Pb* (*II*)

SKRIPSI

Oleh:

FATMA NABILLA NUR'AINI
NIM. 210604110036

Telah Dipertahankan Di Depan Dewan Penguji
Dan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)
Pada tanggal, 11 Mei 2026

Penguji Utama	Dr. Erna Hastuti, M.Si NIP. 19811119 200801 2 009	
Ketua Penguji	Erika Rani, M.Si NIP. 19810613 200604 2 002	
Sekretaris Penguji	Fikriyatul Azizah Su'ud, M.Si NIP. 19930617 202012 2 003	
Anggota Penguji	Arista Romadani, M.Sc NIP. 19900905 201903 1 018	

Mengesahkan,
Ketua Program Studi

Farid Samsu Hananto, S.Si.,M.T
NIP. 19740513 200312 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama	:	FATMA NABILLA NUR'AINI
NIM	:	210604110036
Jurusan	:	FISIKA
Fakultas	:	SAINS DAN TEKNOLOGI
Judul Penelitian	:	Analisis Struktur Dan Sifat Komposit Silika Dari Limbah Pertanian Untuk Aplikasi Adsorben Logam Berat Pb (*II*)

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa hasil penelitian saya ini tidak terdapat unsur-unsur penjiplakan karya penelitian atau karya ilmiah yang pernah dilakukan atau dibuat oleh orang lain, kecuali yang tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka. Apabila ternyata hasil penelitian ini terbukti terdapat unsur-unsur jiplakan maka saya bersedia untuk menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Malang, 11 Mei 2026
Yang Membuat Pernyataan

Fatma Nabilla Nur'aini
NIM. 210604110036

MOTTO

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai kesanggupannya”

(QS. Al-Baqarah: 286)

“Selesaikan apa yang sudah kamu mulai, lewati saja badainya jangan ubah tujuannya”

"Life can be heavy, especially if you try to carry it all at once. Part of growing up and moving into new chapters of your life is about catch and release. What I mean by that is, knowing what things to keep, and what things to release. You can't carry all things. Decide what is yours to hold and let the rest go".

-Taylor Swift-

“let your dream be bigger than your fears”

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, pertolongan, dan kemudahan-Nya, sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Karya sederhana ini penulis persembahkan kepada:

1. Ayah dan Mama, atas kasih sayang yang tidak pernah berkurang, doa yang senantiasa menyertai setiap langkah penulis, serta pengorbanan yang tak ternilai dan tidak akan pernah mampu penulis balas dengan apa pun di dunia ini.
2. Kakak, terima kasih atas perhatian, dukungan, dan peran yang selalu diberikan dalam setiap proses yang penulis jalani. Kehadiran kakak, baik melalui nasihat, bantuan, maupun dukungan dengan caranya sendiri, menjadi bagian penting yang turut menguatkan penulis hingga mampu menyelesaikan skripsi ini.
3. *Last but not least*, penulis mempersembahkan karya ini kepada diri sendiri, Fatma Nabilla Nur'aini. Terima kasih karena telah berjuang hingga sampai pada titik ini dan mampu mengendalikan diri di tengah berbagai tekanan serta kendala yang dihadapi selama proses penulisan skripsi. Hal-hal yang sebelumnya diragukan dan terasa mustahil, pada akhirnya dapat terlewati dengan usaha dan keteguhan hati. Penulis memilih untuk tetap rendah hati, menyadari bahwa pencapaian ini bukanlah akhir, melainkan awal dari langkah panjang dalam meraih mimpi-mimpi yang lebih besar di masa mendatang. Semoga keberanian, ketekunan, dan pembelajaran dari proses ini menjadi bekal untuk terus tumbuh dan melangkah dengan keyakinan.

Semoga setiap doa dan kebaikan yang telah diberikan menjadi amal jariyah yang terus mengalir, serta semoga karya sederhana ini dapat menjadi kebanggaan dan membawa manfaat bagi kita semua.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbilalamin, segala puji dan syukur senantiasa penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi dengan judul "Analisis Struktur dan Sifat Komposit Silika-Karbon dari Limbah Pertanian untuk Aplikasi Adsorben Logam Berat *Pb*(*II*)". Sholawat serta salam semoga tetap tercurahkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW yang telah menuntun kita dari zaman jahiliyah menuju zaman ilmiah seperti sekarang.

Dalam kesempatan ini, penulis menyadari bahwa dalam penyusunan Skripsi ini banyak mendapat dukungan, bimbingan bantuan dan kemudian dari berbagai pihak sehingga Skripsi ini dapat diselesaikan. Dengan ketulusan hati, penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada:

1. Prof. Dr. Hj. Ilfi Nur Diana, M.Si selaku Rektor Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Dr. Agus Mulyono, M.Kes selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri (UIN) Malauna Ibrahim Malang.
3. Farid Samsu Hananto, S.Si.,M.T selaku Ketua Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri (UIN) Malauna Ibrahim Malang.
4. Fikriyatul Azizah Su'ud, M.Si selaku Dosen Pembimbing yang senantiasa memberikan ilmu pengetahuan, motivasi dan meluangkan waktu untuk membimbing penulis selama proses penyusunan Skripsi dengan baik.
5. Segenap dosen, Laboran dan Admin Jurusan Fisika UIN Maulana Malik Ibrahim Malang yang senantisa memberikan pengarahan dan ilmu pengetahuan.

6. Serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, yang telah banyak memberi bantuan sehingga terselesainya laporan ini.

Malang, 11 Mei 2026

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL ..... **i**
HALAMAN PENGAJUAN ..... **ii**
HALAMAN PERSETUJUAN ..... **iii**
HALAMAN PENGESAHAN ..... **iv**
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN ..... **v**
MOTTO ..... **vi**
HALAMAN PERSEMBAHAN ..... **iii**
KATA PENGANTAR ..... **iiix**
DAFTAR ISI ..... **xii**
DAFTAR GAMBAR ..... **xiii**
DAFTAR TABEL ..... **xvv**
ABSTRAK ..... **xvii**
ABSTRACT ..... **xviiii**
الملخص ..... **xviii**

BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 7
1.3 Tujuan Penelitian 7
1.4 Batasan Masalah 8
1.5 Manfaat Penelitian 8

BAB II TINJAUAN PUSTAKA **9**
2.1 Silika dari Sekam Padi 9
2.2 Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa 10
2.3 Komposit Silika-Karbon 14
2.4 Logam Timbal $\boldsymbol{Pb}(\mathrm{II})$ 16
2.5 Mekanisme Material Komposit Silika-Karbon sebagai Adsorben 17
2.6 Metode Sol-Gel 21
2.7 Karakterisasi Material Adsorben 22
2.7.1 FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) 24
2.7.2 SAA (*Surface Area Analyzer*) – Metode BET 26
2.7.3 AAS (*Atomic Absorbtion Spectroscopy*) 27
2.8 Penelitian Terdahulu 28

BAB III METODE PENELITIAN **34**
3.1 Jenis Penelitian 34
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian 34
3.3 Alat dan Bahan 34
3.3.1 Alat Penelitian 34
3.3.2 Bahan Penelitian 35
3.3.3 Alat Karakterisasi 35
3.4 Variabel Penelitian 36
3.4.3 Variabel Kontrol (*Control Variable*) 36

3.5 Prosedur Penelitian 37
3.5.1 Sintesis Silika dari Sekam Padi 37
3.5.2 Sintesis Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa 39
3.5.3 Sintesis Silika Karbon 40
3.6 Diagram Alir Penelitian 42
3.6.1 Diagram Alir Sintesis Silika Sekam Padi 42
3.6.2 Diagram Alir Sintesis Karbon Aktif Tempurung Kelapa 43
3.6.3 Diagram Alir Sintesis Komposit Silika-Karbon 44
3.7 Analisis Data 45
3.7.1 Analisis Karakterisasi *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) 45
3.7.2 Analisis Karakterisasi Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) 46
3.7.3 Analisis Karakterisasi Surface Area Analyzer (SAA) – Metode BET 47

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 49
4.1 Data Hasil Penelitian 49
4.1.1 Pembuatan Sampel 49
4.1.2 Analisis Menggunakan FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) 49
4.1.3 Analisis Menggunakan SAA (*Surface Area Analyzer*) – Metode BET 60
4.1.4 Analisis Karakterisasi AAS (*Atomic Absorption Spectroscopy*) 71

BAB V PENUTUP 88
5.1 Kesimpulan 88
5.2 Saran 89

DAFTAR PUSTAKA 90
LAMPIRAN 93

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema Ukuran Pori Karbon Aktif 12
Gambar 2.2 Struktur Karbon Aktif 12
Gambar 2.3 Proses Adsorpsi Pada Karbon Aktif: Transfer Molekul Adsorbat ke Adsorben 20
Gambar 3.1 Diagram Alir Sintesis Silika Sekam Padi 42
Gambar 3.2 Diagram Alir Sintesis Karbon Aktif Tempurung Kelapa 43
Gambar 3.3 Diagram Alir Komposit Silika-Karbon 44
Gambar 4.1 Abu Sekam Padi 49
Gambar 4.2 Karbon Tempurung Kelapa 49
Gambar 4.3 Grafik FTIR Hasil Komposit Silika Karbon (SC) 50
Gambar 4.4 Grafik hubungan *relative pressure* dengan $1/[W((P_0/P)-1)]$ pada sampel komposisi 100:0 berdasarkan hasil analisis *Surface Area Analyzer* (SAA) menggunakan metode *Brunauer–Emmett–Teller* (BET) 61
Gambar 4.5 Grafik hubungan relative pressure dengan $1/[W((P_0/P)-1)]$ pada sampel komposisi 30:70 berdasarkan hasil analisis *Surface Area Analyzer* (SAA) menggunakan metode *Brunauer–Emmett–Teller* (BET) 61
Gambar 4.6 Grafik hubungan *relative pressure* dengan $1/[W((P_0/P)-1)]$ pada sampel komposisi 50:50 berdasarkan hasil analisis *Surface Area Analyzer* (SAA) menggunakan metode *Brunauer–Emmett–Teller* (BET) 62
Gambar 4.7 Grafik hubungan relative pressure dengan $1/[W((P_0/P)-1)]$ pada sampel komposisi 70:30 berdasarkan hasil analisis Surface Area Analyzer (SAA) menggunakan metode Brunauer–Emmett–Teller (BET) 62
Gambar 4.8 Grafik hubungan relative pressure dengan $1/[W((P_0/P)-1)]$ pada sampel komposisi 0:100 berdasarkan hasil analisis Surface Area Analyzer (SAA) menggunakan metode Brunauer–Emmett–Teller (BET) 63
Gambar 4.9 Grafik plot hasil uji isoterm yang menunjukkan hubungan antara relative pressure dan volume adsorbed pada Sampel Koposit 100:0 menggunakan Surface Area Analyzer (SAA) dengan metode BET .. 66
Gambar 4.10 Grafik plot hasil uji isoterm yang menunjukkan hubungan antara relative pressure dan volume adsorbed pada Sampel Koposit 30:70 menggunakan Surface Area Analyzer (SAA) dengan metode BET .. 66
Gambar 4.11 Grafik plot hasil uji isoterm yang menunjukkan hubungan antara relative pressure dan volume adsorbed pada Sampel Koposit 50:50 menggunakan Surface Area Analyzer (SAA) dengan metode BET .. 67
Gambar 4.12 Grafik plot hasil uji isoterm yang menunjukkan hubungan antara relative pressure dan volume adsorbed pada Sampel Koposit 70:30 menggunakan Surface Area Analyzer (SAA) dengan metode BET . 67

Gambar 4.13 Grafik plot hasil uji isoterm yang menunjukkan hubungan antara relative pressure dan volume adsorbed pada Sampel Koposit 0:100 menggunakan Surface Area Analyzer (SAA) dengan metode BET..68

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Rencana Analisis *Fourier Transfrom Infrared Spectroscopy* (FTIR).....46
Tabel 3.2 Rencana Analisis *Atomic Absorption Spectroscopy* AAS.....47
Tabel 3.3 Rencana Analisis *Surface Area Analyzer* (SAA) 48
Tabel 4.1 Gugus Fungsi Komposit SC.....55
Tabel 4.2 Hasil Analisis SAA (*Surface Area Analyzer*) – Metode BET Komposit SC 69
Tabel 4.3 Data Murni Hasil Analisis Pb Menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA).....71
Tabel 4.4 Tabel Data Hasil Adsorpsi Pb II Pada Variasi Silika-Karbon Menggunakan *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) 79

ABSTRAK

Nur'aini, Fatma Nabilla. 2026. **Analisis Struktur dan Sifat Komposit Silika–Karbon dari Limbah Pertanian untuk Aplikasi Adsorben Logam Berat *Pb(II)*.**. Skripsi. Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (I) Fikriyatul Azizah Su'ud, M.Si., (II) Arista Romadani, M.Sc.

Kata kunci: Silika, Karbon Aktif, Komposit Silika–Karbon, Sekam Padi, Tempurung Kelapa, Adsorpsi, *Pb*(*II*), BET.

Pencemaran ion timbal *Pb*(*II*) dalam lingkungan perairan menjadi ancaman serius bagi ekosistem dan kesehatan manusia akibat sifatnya yang toksik, tidak mudah terdegradasi, dan mudah terakumulasi dalam jaringan biologis. Penelitian ini bertujuan mensintesis komposit *silika-karbon* berbasis sekam padi dan tempurung kelapa serta mengevaluasi kemampuannya sebagai adsorben Pb(II). Silika diperoleh melalui ekstraksi *asam-basa* sekam padi, sedangkan karbon aktif dihasilkan dari karbonisasi dan aktivasi kimia tempurung kelapa menggunakan HCl 4 M. Komposit dibuat dengan variasi rasio silika terhadap karbon aktif yaitu 70:30, 50:50, dan 30:70. Karakterisasi *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) mengkonfirmasi terbentuknya gugus Si–C sebagai bukti interaksi kimia antara silika dan karbon dalam struktur komposit. Analisis BET menunjukkan komposit 30:70 memiliki luas permukaan tertinggi sebesar 346,204 m^2/g. Uji *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) menghasilkan efisiensi adsorpsi *Pb*(*II*) sebesar 98,50% untuk komposit 30:70 dan 99,24% untuk silika murni dari konsentrasi awal 20 mg/L. Komposit *silika-karbon* berbasis limbah pertanian terbukti berpotensi tinggi sebagai adsorben ramah lingkungan yang efektif untuk pengolahan limbah logam berat.

ABSTRACT

Nur'aini, Fatma Nabilla. 2026 **Analysis of Structure and Properties of Silica–Carbon Composite Derived from Agricultural Waste for *Pb*(*II*)**. Undergraduate Thesis. Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Supervisors: (I) Fikriyatul Azizah Su'ud, M.Si., (II) Arista Romadani, M.Sc.

Keywords: Silica, Activated Carbon, Silica–Carbon Composite, Rice Husk, Coconut Shell, Adsorption, *Pb*(*II*), BET.

Lead ion *Pb*(*II*) contamination in aquatic environments poses serious threats to ecosystems and human health due to its toxic, non-degradable, and bioaccumulative nature. This study aimed to synthesize *silica-carbon* composites derived from rice husk and coconut shell and evaluate their performance as Pb(II) adsorbents. Silica was extracted through acid-base treatment of rice husk ash, while activated carbon was produced via carbonization and chemical activation of coconut shells using 4 M HCl. Composites were prepared at silica-to-activated carbon ratios of 70:30, 50:50, and 30:70. *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) characterization confirmed Si–C bond formation, indicating chemical interaction between silica and carbon within the composite structure. BET analysis revealed that the 30:70 composite exhibited the highest specific surface area of 346.204 m^2/g. *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) testing demonstrated *Pb*(*II*) adsorption efficiencies of 98.50% for the 30:70 composite and 99.24% for pure silica from an initial concentration of 20 mg/L. Agricultural waste-based *silica-carbon* composites prove highly promising as effective and environmentally friendly adsorbents for heavy metal wastewater remediation.

الملخص

الكربون المستخلص من المخلفات الزراعية لتطبيقه -تحليل البنية وخصائص مركب السيليكا .2026 .نورعيني، فاطمة نابيلا قسم الفيزياء،كلية العلوم والتكنولوجيا، جامعة مولانا مالك .رسالة بكالوريوس .(II)Pb**كمادة مازة لأيونات الرصاص**

أريستا روماداني، (الثاني)فكرياتول عزيزة سعود، ماجستير في العلوم (الأول) :المشرفان .إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج .ماجستير في العلوم

الكلمات المفتاحية: السيليكا، الكربون المنشط، مركب السيليكا، Pb(II)الكربون، قشر الأرز، قشرة جوز الهند، امتزاز – BET.

يعد استغلال المخلفات الزراعية كمادة وظيفية أحد الأساليب الواعدة في تطوير مواد ماصّة صديقة للبيئة لمعالجة مياه الصرف الكربون المشتق من قشور الأرز وقشور –تهدف هذه الدراسة إلى تحضير وتوصيف مركب السيليكا .المحتوية على المعادن الثقيلة

***Pb(II)*.جوز الهند، بالإضافة إلى تقييم قدرته على امتزاز أيونات الرصاص القاعدي لقشور**

الأرز، بينما تم تحضير الكربون المنشط من –تم الحصول على السيليكا من خلال عملية الاستخلاص الحمضي تم تحضير المركب بنسب مختلفة من السيليكا إلى الكربون المنشط .خلال عملية الكربنة والتنشيط الكيميائي لقشور جوز الهند

.30:70و 50:50و 70:30وهي

لتحديد المجموعات الوظيفية، وكذلك (FTIR)تم إجراء توصيف المواد باستخدام مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه لتحديد المساحة السطحية (BET)تيلر –إيميت–بطريقة بروناور (SAA)باستخدام جهاز تحليل المساحة السطحية

.(AAS)باستخدام مطيافية الامتصاص الذري *Pb(II)* كما تم تحليل قدرة الامتزاز لأيونات الرصاص .وخصائص المسام .التي تعمل كمواقع نشطة في عملية الامتزاز Si–OH وSi–O–Si وجود المجموعات الوظيفية FTIRأظهرت نتائج .غ/م² 346.204يمتلك أعلى مساحة سطحية بلغت 30:70كربون –أن المركب بنسبة سيليكا BETكما بين تحليل ، بينما بلغت 98.50%بكفاءة بلغت *Pb(II)* وأظهرت نتائج الاختبار أن هذا المركب قادر على إزالة أيونات الرصاص الكربون المشتق من مخلفات قشور الأرز وقشور –تشير هذه النتائج إلى أن مركب السيليكا 99.24%.كفاءة السيليكا النقية جوز الهند يمتلك إمكانات كبيرة كمادة ماصّة فعالة وصديقة للبيئة لمعالجة تلوث المياه بالمعادن الثقيلة، وخاصة أيونات الرصاص *Pb(II)*.

.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Padi merupakan salah satu dari hasil utama pertanian di Indonesia. Penggilingan padi menghasilkan 72% beras, 5-8% dedak dan 20-22% sekam. Tetapi pemanfaatan limbah sekam padi belum dimanfaatkan secara optimal. Sekam padi di masyarakat hanya digunakan sebagai pupuk organik dan sisanya dibakar. Padahal sekam padi memiliki kandungan silika yang tinggi sebanyak 97%. Pembakaran abu sekam padi pada suhu 400-700°C akan menghasilkan silika amorf dan pada suhu lebih dari 1.000°C akan menjadi silika kristalin. Pemanfaatan silika dari abu sekam padi dapat diperluas dengan cara disintesis menjadi silika gel dalam ukuran nano. Mesopori silika merupakan salah satu material yang memiliki pori dengan diameter antara 2-50 nm. Sintesis mesopori silika dapat dilakukan dengan berbagai metode diantaranya yaitu metode sol-gel, metode stöber, metode Liquid Crystal Template Approach (LCTA), teknik microwave, dan teknik chemical etching. Bagaimanapun metode sol-gel yang paling umum digunakan pada sintesis mesopori silika (Bromide et al., 2023).

Selain sekam padi, limbah biomassa lain yang melimpah di Indonesia adalah tempurung kelapa. Tempurung kelapa umumnya belum dimanfaatkan secara optimal dan sering kali hanya digunakan sebagai bahan bakar atau bahkan dibuang sebagai limbah (Pratiwi et al., 2021). Padahal tempurung kelapa memiliki kandungan karbon yang tinggi sehingga berpotensi diolah menjadi karbon aktif dengan struktur pori yang berkembang dan luas permukaan yang besar.

Karakteristik tersebut menjadikan karbon aktif dari tempurung kelapa berpotensi digunakan sebagai material adsorben dalam berbagai aplikasi lingkungan, khususnya dalam proses penjerapan kontaminan dari air limbah (Verayana et al., 2018).

Pemanfaatan limbah pertanian sebagai bahan baku material fungsional juga sejalan dengan konsep green technology atau teknologi ramah lingkungan. Pendekatan ini menekankan pemanfaatan sumber daya yang berkelanjutan, pengurangan limbah, serta pengembangan material yang tidak menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Pengolahan limbah biomassa seperti sekam padi dan tempurung kelapa menjadi material adsorben bernilai guna tinggi merupakan salah satu strategi yang mendukung prinsip teknologi hijau karena mampu mengurangi akumulasi limbah sekaligus menghasilkan produk yang bermanfaat bagi pengolahan lingkungan (D. I. Safitri et al., 2022)

Pengembangan adsorben komposit yang menggabungkan silika dan karbon menjadi salah satu pendeka.tan yang banyak diteliti untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi terhadap logam berat. Material karbon umumnya memiliki luas permukaan dan struktur pori yang tinggi sehingga mampu menyediakan banyak situs aktif untuk proses penjerapan ion logam. Di sisi lain, silika memiliki stabilitas struktur yang baik serta mengandung gugus silanol (Si–OH) dan jaringan siloksan (Si–O–Si) yang dapat berperan dalam interaksi dengan ion logam. Kombinasi kedua material tersebut dapat menghasilkan adsorben komposit dengan sifat yang saling melengkapi sehingga meningkatkan jumlah situs aktif dan memperbaiki efisiensi adsorpsi terhadap ion logam berat seperti Pb(II) dalam larutan (Basin, 2022).

Salah satu permasalahan lingkungan yang saat ini banyak mendapat perhatian adalah pencemaran logam berat di perairan. Logam berat seperti timbal (Pb) sering ditemukan dalam limbah industri yang berasal dari kegiatan pelapisan logam, industri baterai, cat, maupun pertambangan. Keberadaan ion Pb(II) di lingkungan perairan sangat berbahaya karena bersifat toksik, tidak mudah terdegradasi, dan dapat terakumulasi dalam jaringan organisme hidup. Paparan logam timbal dalam jangka panjang dapat menimbulkan berbagai gangguan kesehatan seperti kerusakan sistem saraf, gangguan ginjal, serta penurunan fungsi kognitif. Oleh karena itu, diperlukan metode pengolahan yang efektif untuk menurunkan konsentrasi logam berat Pb dalam limbah cair sebelum dilepaskan ke lingkungan (Basin, 2022).

Limbah biomassa seperti sekam padi dan tempurung kelapa memiliki potensi besar sebagai bahan baku material adsorben karena kandungan komponen kimia yang dimilikinya. Sekam padi diketahui mengandung silika dalam jumlah tinggi yang dapat diolah menjadi material silika berpori, sedangkan tempurung kelapa dapat dikonversi menjadi karbon aktif dengan luas permukaan yang besar dan struktur pori yang berkembang. Kombinasi kedua material tersebut berpotensi menghasilkan komposit silika–karbon dengan sifat adsorpsi yang lebih baik karena adanya sinergi antara stabilitas struktur silika dan kapasitas adsorpsi karbon aktif (Haryono et al., 2023).

Meskipun penelitian mengenai pemanfaatan silika dari sekam padi maupun karbon aktif dari tempurung kelapa telah banyak dilakukan, sebagian besar penelitian masih memanfaatkan kedua material tersebut secara terpisah. Kajian mengenai penggabungan kedua biomassa tersebut menjadi komposit adsorben

masih relatif terbatas, khususnya yang menggunakan sumber limbah pertanian lokal sebagai bahan baku utama. Selain itu, penelitian yang mengkaji karakteristik struktur, luas permukaan, serta kemampuan adsorpsi komposit silika–karbon terhadap ion logam berat Pb(II) secara komprehensif masih belum banyak dilaporkan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengeksplorasi potensi komposit silika dari sekam padi dan karbon aktif dari tempurung kelapa sebagai adsorben logam berat.

Dalam penelitian ini, nilai-nilai keislaman menjadi dasar dalam memandang pentingnya pengelolaan limbah secara bijak dan ramah lingkungan. Islam mengajarkan keseimbangan dalam memanfaatkan sumber daya alam tanpa berlebih-lebihan. Hal ini sejalan dengan firman Allah SWT dalam Surah Al-A‘rāf ayat 31 yang berbunyi:

يٰبَنِيْٓ اٰدَمَ خُذُوْا زِيْنَتَكُمْ عِنْدَ كُلِّ مَسْجِدٍ وَّكُلُوْا وَاشْرَبُوْا وَلَا تُسْرِفُوْا ۚاِنَّهٗ لَا يُحِبُّ الْمُسْرِفِيْنَ ۝٣١

Artinya *: Wahai anak cucu Adam, pakailah pakaianmu yang indah pada setiap (memasuki) masjid dan makan serta minumlah, tetapi janganlah berlebihan. Sesungguhnya Dia tidak menyukai orang-orang yang berlebihan.*

Ayat tersebut menekankan pentingnya sikap moderat dan larangan untuk berlebih-lebihan (*isrāf*) dalam memanfaatkan nikmat Allah, termasuk dalam penggunaan sumber daya alam. Sikap boros dan tidak bijak dalam mengelola hasil bumi dapat menimbulkan kerusakan lingkungan yang berkelanjutan.

Dalam perspektif Islam, manusia memiliki tanggung jawab sebagai khalifah di bumi untuk menjaga kelestarian lingkungan dan memanfaatkan sumber daya alam secara bijaksana. Prinsip ini tercermin dalam ajaran Al-Qur'an yang melarang perilaku berlebih-lebihan dalam memanfaatkan nikmat Allah SWT. Pemanfaatan limbah pertanian menjadi material yang bernilai guna tinggi merupakan salah satu

bentuk implementasi nilai tersebut, karena tidak hanya mengurangi pencemaran lingkungan tetapi juga mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya yang tersedia. Dengan demikian, penelitian mengenai pemanfaatan limbah sekam padi dan tempurung kelapa sebagai material adsorben dapat dipandang sebagai upaya ilmiah yang selaras dengan nilai-nilai keberlanjutan dan tanggung jawab terhadap lingkungan.

Dalam konteks penelitian ini, pesan ayat tersebut relevan dengan upaya pemanfaatan limbah pertanian seperti sekam padi dan tempurung kelapa menjadi komposit silika–karbon sebagai bahan adsorben logam berat Pb(II). Penggunaan limbah sebagai bahan utama menunjukkan penerapan prinsip Islam untuk tidak membuang-buang sumber daya dan memanfaatkannya dengan sebaik-baiknya. Dengan demikian, penelitian ini merupakan bentuk nyata penerapan nilai *tidak berlebih-lebihan* dalam konteks sains dan teknologi, sekaligus wujud tanggung jawab manusia dalam menjaga kelestarian lingkungan.

Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya bertujuan untuk menghasilkan inovasi ilmiah, tetapi juga menjadi wujud implementasi ajaran Islam dalam menjaga keseimbangan ekosistem dan mencegah kerusakan lingkungan akibat perilaku manusia yang berlebihan.

Selain bernilai religius, pemanfaatan limbah pertanian menjadi material fungsional juga sejalan dengan prinsip green technology serta pembangunan berkelanjutan (sustainable development). Upaya pengolahan sekam padi dan tempurung kelapa untuk menghasilkan komposit tidak hanya berkontribusi pada pengurangan limbah, tetapi juga mendukung pengembangan material adsorben ramah lingkungan yang memiliki nilai tambah. Silika yang berasal dari sekam padi

diketahui memiliki struktur mikro yang stabil dengan luas permukaan yang besar sehingga berpotensi tinggi digunakan dalam aplikasi adsorpsi (D. I. Safitri et al., 2022). Sementara itu, karbon aktif hasil pengolahan tempurung kelapa terbukti mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi melalui struktur porinya yang luas serta sifat permukaan yang reaktif (Verayana et al., 2018).

Penelitian ini sejalan dengan makna ayat tersebut, yaitu bahwa sekam padi dan tempurung kelapa yang sering dipandang sebagai limbah ternyata memiliki potensi besar. Sekam padi memiliki kandungan silika yang tinggi, sedangkan tempurung kelapa dapat diolah menjadi karbon aktif. Kedua bahan tersebut, apabila dipadukan menghasilkan komposit silika-karbon yang bermanfaat sebagai adsorben logam berat. Dengan demikian, pemanfaatan limbah pertanian dalam penelitian ini merupakan salah satu bentuk pengoptimalan nikmat Allah SWT. Agar tidak terbuang percuma serta dapat mendukung upaya pelestarian lingkungan

Oleh karena itu, dalam penelitian ini bertujuan untuk membuat dan menganalisis komposit silika dari sekam padi yang dikombinasikan dengan karbon aktif dari tempurung kelapa agar limbah pertanian dapat dimanfaatkan secara lebih efektif. Silika dari sekam padi memiliki luas permukaan yang besar, sementara karbon aktif dari tempurung kelapa memiliki daya serap yang baik. Dengan menggabungkan kedua material tersebut, diharapkan dapat diperoleh komposit dengan kualitas unggul. Komposit ini berpotensi dimanfaatkan dalam berbagai bidang, seperti sebagai penyerap zat pencemar dalam pengolahan limbah atau sebagai material pendukung katalis.

Meskipun silika dari sekam padi dan karbon aktif dari tempurung kelapa telah banyak dilakukan secara terpisah, penelitian komposit silika-karbon aktif

dengan kombinasi kedua material limbah pertanian Indonesia ini masih terbatas. Pembaruan penelitian ini terletak pada optimasi rasio komposisi silika. Sekam padi dan karbon aktif tempurung kelapa, disertai karakterisasi menyeluruh melalui kombinasi metode AAS, FTIR, dan SAA untuk mengevaluasi potensi aplikasinya sebagai adsorben logam berat. Penelitian sebelumnya umumnya berfokus pada material Tunggal atau menggunakan sumber silika dan karbon yang berbeda, sehingga data mengenai sinergi kedua material limbah pertanian lokal ini dalam bentuk komposit belum tersedia secara memadai.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana karakteristik gugus fungsi dan interaksi kimia pada material komposit silika-karbon yang dihasilkan berdasarkan analisis FTIR?
2. Bagaimana pengaruh penggabungan silika dari sekam padi dan karbon aktif dari tempurung kelapa terhadap luas permukaan spesifik dan distribusi pori adsorben berdasarkan analisis SAA/BET?
3. Sejauh mana efektivitas dan kemampuan adsorpsi komposit silika-karbon dalam menurunkan konsentrasi ion logam berat Pb(II) di dalam larutan berdasarkan analisis AAS?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Untuk menganalisis karakterisasi gugus fungsi adsorben berbasis silika-karbon menggunkan FTIR.

2 Untuk mengetahui pengaruh penggabungan silika dan karbon aktif terhadap karakteristik luas permukaan dan struktur pori adsorben menggunkan analisis SAA/BET.

3 Untuk mengetahui efektivitas serta kemampuan adsorben dalam menurunkan konsentrasi logam Pb(II) di dalam larutan.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah:

1 Adsorben yang digunakan adalah material berbasis silika dan karbon

2 Karakterisasi adsorben dilakukan menggunakan FTIR dan SAA/BET

3 Konsentrasi logam Pb(II) dianalisis menggunakan AAS.

4 Penelitian ini difokuskan pada aplikasi adsorpsi terhadap ion logam berat Pb(II), tidak mencakup jenis logam berat lainnya.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1 Untuk memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan material komposit berbasis limbah pertanian dengan potensi sebagai adsorben logam berat.

2 Untuk mendukung pemanfaatan limbah pertanian sekam padi dan tempurung kelapa sebagai bahan baku alternatif dalam pengolahan limbah lingkungan.

3 Menyediakan data karakteristik komposit silika-karbon sebagai bahan penyerap ion logam berat Pb(II) yang dapat digunakan dalam penelitian lanjutan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Silika dari Sekam Padi

Silika merupakan material kimia berbentuk padatan yang sering dimanfaatkan sebagai adsorben. Bahan ini memiliki beberapa keunggulan, antara lain bersifat inert, hidrofilik, serta memiliki stabilitas termal dan mekanik yang baik. Kualitas silika dalam penggunaannya sebagai adsorben dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti struktur internal, ukuran partikel, tingkat porositas, luas permukaan, kekuatan material, serta sifat polaritasnya. Kemampuan silika sebagai penyerap atau adsorben berkaitan dengan keberadaan situs aktif pada permukaannya. Meskipun memiliki berbagai kelebihan, silika gel juga memiliki beberapa keterbatasan. Hal ini disebabkan oleh jenis situs aktif yang dimilikinya, yang umumnya hanya berupa gugus silanol (-SiOH) dan siloksan (Si-O-Si). Gugus silanol tersebut memiliki tingkat keasaman yang relatif rendah serta mengandung atom oksigen sebagai donor yang bersifat lemah. Oleh karena itu, untuk meningkatkan sifat dan memperluas pemanfaatan silika gel, diperlukan proses modifikasi terhadap material tersebut (O. Safitri & Alrasyid, 2020)

Silika merupakan material anorganik berpori yang banyak dimanfaatkan sebagai adsorben karena memiliki gugus aktif silanol (Si–OH) pada permukaannya yang mampu berinteraksi dengan ion logam melalui mekanisme kompleksasi maupun interaksi elektrostatik. Gugus silanol tersebut berperan penting dalam proses pengikatan ion logam berat seperti timbal *Pb*(*II*).

Meskipun demikian, silika memiliki beberapa keterbatasan ketika digunakan sebagai adsorben tunggal. Salah satu keterbatasannya adalah kapasitas adsorpsi yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan karbon aktif, yang disebabkan oleh jumlah situs aktif yang terbatas serta luas permukaan spesifik yang umumnya lebih kecil. Selain itu, sifat permukaan silika yang hidrofilik menyebabkan material ini kurang efektif dalam mengadsorpsi beberapa senyawa non-polar. Oleh karena itu, dalam beberapa penelitian silika sering dimodifikasi atau dikombinasikan dengan material lain untuk meningkatkan kemampuan adsorpsinya.

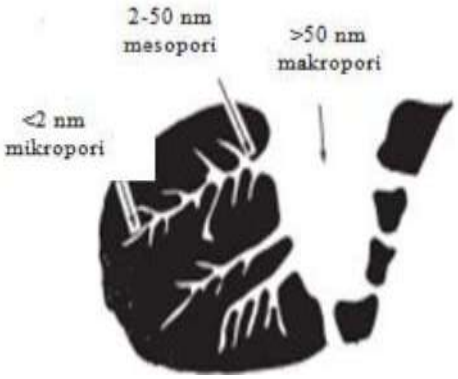
2.2 Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa

Tempurung kelapa merupakan biomassa yang banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku karbon aktif karena memiliki kandungan karbon yang tinggi serta struktur pori yang berkembang dengan baik setelah proses aktivasi. Karbon aktif memiliki struktur berpori yang terdiri dari mikropori, mesopori, dan makropori yang berfungsi sebagai tempat terjadinya proses adsorpsi berbagai senyawa kimia (Pratiwi et al., 2021). Proses pembuatan karbon aktif umumnya dilakukan melalui dua tahap utama yaitu karbonisasi dan aktivasi. Karbonisasi merupakan proses pemanasan bahan baku pada suhu tinggi dalam kondisi minim oksigen sehingga menghasilkan arang dengan kandungan karbon yang tinggi. Selanjutnya dilakukan proses aktivasi menggunakan aktivator kimia seperti KOH, H_3PO_4, atau $ZnCl_2$ untuk meningkatkan luas permukaan dan jumlah pori pada material karbon aktif.

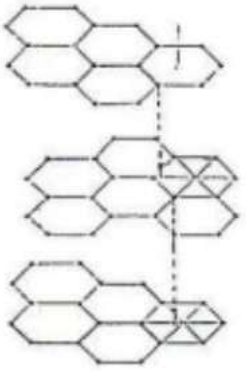
Karbon, terutama dalam bentuk karbon aktif memiliki kemampuan adsorpsi yang sangat tinggi karena kombinasi luas permukaan spesifik yang besar, struktur pori yang berkembang, dan kimia permukaan yang dapat dimodifikasi. Material ini

umumnya memiliki luas permukaan hingga ratusan bahkan >800 m^2/g, dengan dominasi mikropori dan mesopori yang menyediakan banyak situs aktif untuk interaksi dengan zat terlarut. Struktur tersebut memungkinkan molekul atau ion, termasuk logam berat, masuk ke dalam pori dan terjerap secara efektif. Oleh karena itu, karbon aktif banyak digunakan dalam pengolahan air karena efisiensinya yang tinggi dalam menghilangkan kontaminan. (Pet et al., 2024; Thakur & Kumar, 2024) Material ini banyak digunakan sebagai adsorben karena mampu menyerap berbagai jenis kontaminan dari air maupun gas. Karbon aktif dapat dibuat dari berbagai bahan baku biomassa seperti tempurung kelapa, kayu, dan limbah pertanian lainnya (Johnson et al., 2021)

Karbon aktif merupakan senyawa yang memiliki luas permukaan berkisar antara 300-3500 m^2/gram. Hal ini berhubungan dengan struktur pori internal dan menyebabkan karbon aktif memiliki sifat sebagai penyerap (Handika et al., 2017). Ukuran karbon aktif dibedakan menjadi tiga kategori, yaitu mikropori (<2nm), mesopori (2nm-50nm), dan supermikropori (0,7 nm-2 nm), seperti yang digambarkan pada gambar 2.1 (Handika et al., 2017) Karbon aktif juga memiliki struktur mikrokristalin yang sangat kecil dan berbentuk amorf dengan susunan lapisan bidang datar, di mana atom-atom tersusun dalam ikatan kovalen dan memiliki tatanan atom heksagona (Sindim et al., 2023).



Gambar 2.1 Skema Ukuran Pori Karbon Aktif (Handika et al., 2017)



Gambar 2. 2 Struktur Karbon Aktif(Sindim et al., 2023)

Pembuatan karbon aktif dilakukan dengan dua proses yaittu karbonisasi dan aktivasi. Karbonisasi disebut juga peristiwa pirolisis, dimana terjadi proses dekomposisi komponen atau pemecahan bahan-bahan organik menjadi karbon (Hartini, 2014). Karbonisasi dilakukan dengan pembakaran dari material yang mengandung karbon dan dilakukan tanpa adanya kontak langsung dengan udara. Proses karbonisasi terbagi menjadi 3 tahap yaitu, tahap penguapan air pada suhu 100 ºC, tahap penguraian selusosa dan hemiselulosa pada suhu 200-240 ºC dan tahap penguraian lignin, depolimerisasi dan pemutusan ikatan C-O dan C-C terjadi pada suhu 240 – 400 ºC (Wirani, 2017). Aktivasi adalah proses pengubahan karbon dari daya serap rendah menjadi katbon yang mempunyai daya serap rendah. Pada

proses aktivasi terjadi pelepasan hidrikarbon, tar dan senyawa organik yang terdapat pada karbon. Aktivasi karbon dilakukan dengan dua cara yaitu aktivasi kimia dan fisika (Saputro, 2020)

1. Aktivasi kimia adalah prses pemutusan rantai karbon pada senyawa organik menggunakan bahan kimia (Saputro, 2020). Thomas et al. (2019) menjelaskan beberapa keunggulan menggunakan proses aktivasi kimia yaitu membutuhkan suhu pirolisis yang lebih rendah, yield karbon yang lebih baik, karbon yang dihasilkan dengan luas permukaan tinggi (3600 m2/g), dan mendistribusikan dan mengembangkan struktur pori kecil (mikro) dengan baik.
2. Aktivasi fisika merupakan proses pemutusan rantai karbon dari senyawa organik dengan bantuan uap, panas dan CO2. Proses aktivasi fisika dapat dilakukan menggunakan gas nitrogen, gas oksigen, gas karbon dioksida dan air. Gas-gas tersebut dapat memperbesar struktur pori yang terdapat pada karbonsehingga dapat meningkatkan luas permukaan karbon. Sedangkan pemberian suhu tunggi berfungsi untuk menghilangkan zat-zat pengotor yang mudah menguap dan membuang hidrokarbon pengotor pada karbon (Saputro, 2020).

Penelitian oleh Sari et al. (2022) menunjukkan bahwa karbon aktif dari tempurung kelapa memiliki luas permukaan BET sebesar 750–1200 m^2/g, yang menunjukkan bahwa material tersebut memiliki potensi yang sangat baik sebagai adsorben. Nilai luas permukaan yang tinggi tersebut berkaitan dengan banyaknya pori yang terbentuk selama proses aktivasi. Karbon aktif memiliki berbagai gugus fungsi pada permukaannya seperti gugus hidroksil (-OH), karbonil (C=O), dan

karboksil (-COOH) yang dapat meningkatkan kemampuan adsorpsi terhadap ion logam melalui interaksi elektrostatik maupun pembentukan kompleks.

2.3 Komposit Silika-Karbon

Karbon dan silika diketahui masing-masing memiliki kemampuan adsorpsi terhadap logam berat. Penggabungan kedua material tersebut dalam bentuk komposit dapat meningkatkan kinerja adsorpsi dibandingkan jika digunakan secara terpisah. Penelitian menunjukkan bahwa adsorben komposit silika–karbon mampu meningkatkan efisiensi pemisahan logam. Sebagai contoh, penggunaan komposit silika dengan karbon aktif komersial dapat meningkatkan persentase pemisahan nikel hingga 92,1%, dibandingkan dengan penggunaan karbon aktif saja sebesar 90,4% dan silika saja sebesar 70,3%. Hasil ini menunjukkan bahwa setiap jenis adsorben mempunyai karakteristik permukaan yang berbeda sehingga mempengaruhi efisiensi proses adsorpsi serta mekanisme interaksi yang terjadi antara adsorben dan adsorbat (Haryono et al., 2023).

Karakteristik permukaan material berpori yang digunakan sebagai adsorben umumnya ditentukan oleh beberapa parameter fisik, terutama luas permukaan spesifik dan volume pori. Kedua parameter tersebut memiliki peranan penting dalam menentukan kinerja adsorben karena berkaitan langsung dengan jumlah situs aktif yang tersedia untuk proses penjerapan. Semakin besar luas permukaan dan volume pori suatu material, maka potensi adsorpsi terhadap zat terlarut juga akan semakin tinggi dalam penelitian (Haryono et al., 2023) Dalam kajian adsorpsi, model isoterm sering digunakan untuk menjelaskan hubungan antara jumlah zat yang teradsorpsi dengan konsentrasi adsorbat pada kondisi kesetimbangan. Dua model isoterm yang umum digunakan adalah *isoterm Freundlich* dan *Langmuir*.

Model *Freundlich* menggambarkan proses adsorpsi pada permukaan yang heterogen dengan kemungkinan terbentuknya lapisan adsorbat secara bertingkat (multilayer), sedangkan model *Langmuir* mengasumsikan bahwa adsorpsi terjadi pada permukaan homogen dengan pembentukan satu lapisan adsorbat (monolayer). Parameter yang digunakan dalam model tersebut meliputi kapasitas adsorpsi pada kondisi kesetimbangan (Qe), konsentrasi adsorbat pada fase larutan (Ce), konstanta Freundlich (KF), intensitas adsorpsi (1/n), kapasitas adsorpsi maksimum (Q0), serta konstanta *Langmuir* (b)

Penentuan luas permukaan dan volume pori adsorben umumnya dilakukan menggunakan metode isoterm BET (*Brunauer–Emmett–Teller*), yaitu dengan mengadsorpsikan gas nitrogen pada permukaan adsorben pada suhu 77 K dengan variasi tekanan tertentu. Selain metode tersebut, pendekatan yang lebih sederhana juga dapat dilakukan melalui pengukuran bilangan metilen biru dan bilangan iodin yang kemudian dianalisis menggunakan model matematis untuk memperkirakan luas permukaan dan volume pori adsorben. Parameter-parameter tersebut penting untuk memahami kapasitas adsorpsi serta mekanisme interaksi antara adsorben dan adsorbat, yang dapat terjadi melalui adsorpsi fisika maupun adsorpsi kimia (Haryono et al., 2023).

Komposit silika-karbon merupakan material yang diperoleh dari penggabungan dua jenis material yaitu silika dan karbon aktif untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi terhadap polutan. Silika memiliki stabilitas kimia yang baik serta gugus aktif yang dapat berinteraksi dengan ion logam, sedangkan karbon aktif memiliki luas permukaan yang besar dan struktur pori yang berkembang.

Kombinasi kedua material tersebut dapat menghasilkan adsorben dengan performa yang lebih baik dibandingkan material tunggal.

Penelitian yang dilakukan oleh Putra et al. (2023) menunjukkan bahwa komposit silika-karbon memiliki luas permukaan BET sebesar 420 m^2/g dengan diameter pori rata-rata sekitar 3.8 nm yang termasuk dalam kategori mesopori. Struktur pori yang berkembang ini memungkinkan terjadinya proses difusi ion logam ke dalam pori adsorben sehingga meningkatkan kapasitas adsorpsi. Spektrum FTIR komposit silika-karbon menunjukkan adanya pita serapan pada 1080 cm^{-1} yang merupakan karakteristik ikatan Si–O–Si serta pita pada sekitar 1630 cm^{-1} yang berkaitan dengan gugus C=C dari struktur karbon aromatik. Hal ini menunjukkan bahwa kedua komponen material berhasil terbentuk dalam struktur komposit.

2.4 Logam Timbal *Pb*(II)

Timbal (Pb) merupakan salah satu jenis logam berat yang sering juga disebut dengan istilah timah hitam. Timbal memiliki titik lebur yang rendah, mudah dibentuk, biasa digunakan untuk melapisi logam agar timbul karatan. Timbal adalah logam lunak yang berwarna abu-abu kebiruan mengkilat dan memiliki bilangan oksidasi +2 (Sunarya, 2007). Timbal (Pb) merupakan logam yang berisfat neurotoksin yang dapat masuk dan terakumulasi dalam tubuh manusia atau hewan. Timbal termasuk dalam kelompok logam berat yang memiliki nomor atom 82 dan berat atom 207.2, berbentuk padat pada suhu kamar, memiliki titik lebur 372,4^oC dan berat jenis 11,34 g/cm3. Pb jarang ditemukan di alam bebas melaikan dalam bentuk senyawa dengan molekul lain, seperti PbBr2 dan PbCl2 (Gusnita, 2012).

Timbal (Pb) merupakan logam yang bersifat neurotoksin yang dapat masuk dan terakumulasi dalam tubuh manusia maupun hewan, sehingga bahayanya terhadap tubuh semakin meningkat (Kusnoputranto, 2006). Menurut Underwood et al (1999), Pb biasanya dianggap sebagai racun yang bersifat akumulatif dan akumulasinya tergantung levelnya. Hal itu menunjukkan bahwa terdapat pengaruh pada ikan jika terdapan jumlah diatas batas ambang. Menurut Badan Standarisasi Nasional (SNI 7387.2009) yaitu 0,3 ppm. Pb yang berada didalam air dalam bentuk Pb(OH)2, jika terserap dalam tubuh manusia dapat menyebabkan kecerdasan anak menurun, pertumbuhan badan terhambat, bahkan dapat menimbulkan kelumpuhan Gejala keracunan logam Pb lainnya yaitu mual, sakit perut dan anemia (Widayatno, dkk, 2017). Adapun sifat-sifat logam Pb yang berbahaya terhadap kesehatan manusia, yaitu (Syauqiyah, 2011):

1. Sulit didegradasi, sehingga mudah terakumulasi dalam lingkungan perairan dan keberadaannya secara alami sulit terurai (dihilangkan).
2. Dapat terakumulasi dalam organisme termasuk kerang dan ikan, dan membahayakan kesehatan manusia yang mengkomsumsi organisme tersebut.
3. Mudah terakumulasi di sedimen, sehingga konsentrasinya selalu lebih tinggi dari konsentrasi logam dalam air. Disamping itu sedimen mudah tersuspensi karena pergerakan masa air yang akan melarutkan kembali logam yang dikandungnya ke dalam air, sehingga sedimen menjadi sumber pencemar potensial.

2.5 Mekanisme Material Komposit Silika-Karbon sebagai Adsorben

Adsorben adalah zat padat yang dapat menyerap partikel fluida dalam suatu proses adsorpsi. Adsorben bersifat spesifik dan terbuat dari bahan-bahan yang

berpori. Ukuran pori adsorben biasanya sangat kecil. Pemilihan jenis adsorben dalam proses adsorpsiharus disesuaikan dengan sifat dan keadaan zat yang akan diadsorpsi dan nilai komersilnya. Prinsip pemisahan pada adsorben berdasarkan perbedaan berat molekulnyaatau perbedaan polaritas yang mengakibatkan sebagian molekul melekat pada permukaan adsorben lebih erat dibandingkan molekul lain. Berdasarkan sifatnya adsorben dibedakan menjadi dua yaitu :

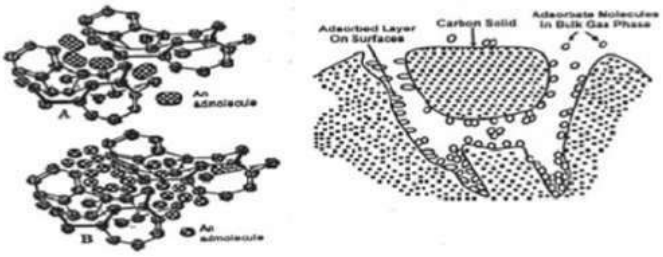
1. Adsorben polar Adsorben polar disebut juga hidrofilik. Jenis adsorben yang termasuk kedalam kelompok ini adalah silika gel, alumina aktif, dan zeolit**.**
2. Adsorben non polar Adsorben non polar disebut juga hidrofobik. Jenis adsorben yang termasuk kedalam kelompok ini adalah polimer adsorben dan karbon aktif (Anggraini, n.d)

Adsorpsi merupakan peristiwa penyerapan suatu substansi pada permukaan zat padat. Pada fenomena adsorpsi, terjadi gaya tarik-menarik antarasubstansi terserap dan penyerapnya. Dalam sistem adsorpsi, fasa teradsorpsi dalam solid disebut adsorbat sedangkan solid tersebut adalah adsorben. Pada proses adsorpsi, molekul adsorbat bergerak melalui bulk fasa gas menuju permukaan padatan dan berdifusi pada permukaan pori padatan adsorben. Proses adsorpsi hanya terjadi pada permukaan, tidak masuk dalam fasa bulk/ruah. Proses adsorpsi terutama terjadi pada mikropori (pori-pori kecil), sedangkan tempat transfer adsorbat dari permukaan luar ke permukaan mikropori ialah makropori

Tabel 2.1 Jenis adsorben komersial yang sering digunakan

Adsorben	**Sifat**	**Diameter pori (A0)**	**Porositas partikel (%)**	**Densitas partikel (g/cm3)**	**Luas permukaan (m2/g)**	**Diameter pori (A0)**
Alumina aktif	Hidofilik, amorphous	10-75	0,5	1.25	320	Alumina aktif
Silika gel	Hidrofilik/ hidrofobik amorphous	22-26	0.47	1.09	750-850	Silika gel
Karbon aktif	Hidrofobik amorphous	10-25	0,4-0,6	0,5-0,9	400-1200	Karbon aktif
Karbon molecular-sieve	Hidrofobik	2-10	0,35-0,5	0,98	400	Karbon molecular-sieve
Zeolite molecular-sieve	Hidrofobik polar, Kristal	3-10	0,2-0,5	1,4	600-700	Zeolite molecular-sieve

Ilustrasi proses adsorpsi pada adsorben karbon aktif dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut ini. Proses adsorpsi hanya terjadi pada permukaan, tidak masuk dalam fasa bulk/ruah. Proses adsorpsi terutama terjadi pada mikropori (pori-pori kecil), sedangkan tempat transfer adsorbat dari permukaan luar ke permukaan mikropori ialah makropori.Ilustrasi proses adsorpsi pada adsorben karbon aktif dapat dilihat pada gambar berikut ini :



Gambar 2. 3 Proses Adsorpsi Pada Karbon Aktif: Transfer Molekul Adsorbat ke Adsorben (Hafidoh, 2021)

Proses adsorpsi ion logam Pb(II) pada material silika-karbon terjadi melalui beberapa mekanisme utama yaitu adsorpsi fisika, interaksi elektrostatik, serta pembentukan kompleks antara ion logam dengan gugus fungsi pada permukaan adsorben. Pada permukaan silika terdapat gugus silanol (Si–OH) yang dapat berinteraksi dengan ion logam melalui mekanisme pertukaran ion atau pembentukan kompleks. Ketika ion Pb^{2+} berada dalam larutan, ion tersebut dapat berinteraksi dengan gugus silanol sehingga terbentuk ikatan koordinasi antara atom oksigen pada gugus silanol dengan ion logam. Mekanisme adsorpsi dapat digambarkan sebagai berikut:

$$Si–OH + Pb^{2+} \rightarrow Si–O–Pb^{+} + H^{+} \quad (2.1)$$

Interaksi ini menyebabkan ion Pb^{2+} terikat pada permukaan adsorben sehingga konsentrasinya dalam larutan menurun. Penelitian oleh Futalan et al.

(2023) menunjukkan bahwa adsorben berbasis karbon aktif dan silika mampu menyerap ion Pb(II) secara efektif dengan kapasitas adsorpsi mencapai 85 mg/g. Hasil analisis FTIR menunjukkan adanya pergeseran pita serapan gugus –OH setelah proses adsorpsi yang menandakan keterlibatan gugus fungsi tersebut dalam mekanisme pengikatan logam. Selain itu, hasil analisis BET menunjukkan bahwa adsorben dengan luas permukaan yang lebih besar memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi karena menyediakan lebih banyak situs aktif untuk proses interaksi dengan ion logam.

2.6 Metode Sol-Gel

Metode sol-gel adalah teknik sintesis material berbasis kimia larutan yang digunakan untuk menghasilkan material padat (biasanya oksida logam) melalui transformasi dari fase cair (sol) menjadi jaringan padat (gel). Pada tahap awal, prekursor (umumnya alkoksida logam atau garam logam) mengalami reaksi hidrolisis dan kondensasi sehingga membentuk partikel koloid (sol) yang kemudian saling terhubung membentuk jaringan tiga dimensi (gel) (Brinker & Scherer, 2019; Rahman et al., 2022).

Proses sol-gel secara umum terdiri dari beberapa tahap utama. Pertama adalah hidrolisis, di mana gugus alkoksi (-OR) bereaksi dengan air membentuk gugus hidroksil (-OH). Tahap ini diikuti oleh kondensasi, yaitu pembentukan ikatan M–O–M (logam–oksigen–logam) yang menghasilkan jaringan padat. Selanjutnya terjadi proses aging (pematangan gel), drying (pengeringan), dan sering kali kalsinasi untuk meningkatkan kristalinitas dan stabilitas material (Rahman et al., 2022; Shkir et al., 2021).

Keunggulan metode sol-gel adalah kemampuannya menghasilkan material dengan kemurnian tinggi, homogenitas yang baik, serta kontrol ukuran partikel hingga skala nano. Selain itu, metode ini dapat dilakukan pada suhu relatif rendah dibanding metode konvensional seperti solid-state reaction. Oleh karena itu, sol-gel широко digunakan dalam sintesis nanopartikel, coating tipis, katalis, serta material untuk aplikasi lingkungan dan biomedis (Shkir et al., 2021; Kumar et al., 2023). Namun, metode ini juga memiliki beberapa kelemahan, seperti proses yang relatif lama, sensitif terhadap kondisi reaksi (pH, suhu, dan kelembapan), serta potensi terbentuknya retakan saat proses pengeringan akibat penyusutan gel. Kontrol parameter proses menjadi sangat penting untuk mendapatkan material dengan sifat yang diinginkan (Kumar et al., 2023).

2.7 Karakterisasi Material Adsorben

Karakterisasi material adsorben merupakan tahapan penting dalam penelitian adsorpsi karena bertujuan untuk mengetahui sifat fisik dan kimia dari material yang digunakan sebagai penyerap. Karakterisasi ini memberikan informasi mengenai struktur permukaan, luas permukaan spesifik, distribusi pori, serta keberadaan gugus fungsi yang berperan dalam proses interaksi antara adsorben dan adsorbat. Informasi tersebut sangat diperlukan untuk memahami bagaimana mekanisme adsorpsi berlangsung serta faktor-faktor yang mempengaruhi kemampuan suatu material dalam menyerap polutan, khususnya logam berat seperti timbal (Pb). Dengan melakukan karakterisasi yang tepat, hubungan antara sifat material dengan performa adsorpsi dapat dianalisis secara lebih komprehensif (Al-mur, 2023)

Karakterisasi adsorben juga digunakan untuk mengevaluasi perubahan struktur material setelah dilakukan proses modifikasi atau sintesis komposit. Dalam penelitian adsorben berbasis biomassa seperti sekam padi atau tempurung kelapa, proses karbonisasi dan aktivasi dapat menghasilkan perubahan signifikan pada struktur material, seperti peningkatan luas permukaan dan pembentukan pori-pori mikro. Oleh karena itu, analisis karakterisasi diperlukan untuk memastikan bahwa proses sintesis yang dilakukan telah menghasilkan material dengan sifat yang sesuai untuk aplikasi adsorpsi. Selain itu, karakterisasi juga membantu mengidentifikasi gugus fungsi aktif yang berperan dalam interaksi kimia antara adsorben dan ion logam (Rashid, 2021)

Dalam penelitian adsorpsi logam berat, karakterisasi material adsorben biasanya dilakukan dengan menggunakan beberapa teknik analisis yang saling melengkapi. Teknik spektroskopi seperti Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi pada permukaan material yang berperan dalam proses adsorpsi. Sementara itu, metode Brunauer–Emmett–Teller (BET) digunakan untuk menentukan luas permukaan spesifik serta karakteristik pori adsorben yang mempengaruhi kapasitas adsorpsi. Selain itu, teknik analisis seperti Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) digunakan untuk mengukur konsentrasi logam dalam larutan sehingga efisiensi dan kapasitas adsorpsi material dapat dihitung secara kuantitatif (Vancouver et al., 2022).

Karakterisasi material adsorben tidak hanya bertujuan untuk mengetahui struktur awal material, tetapi juga untuk memahami perubahan yang terjadi setelah proses adsorpsi berlangsung. Perubahan pada spektrum FTIR, misalnya, dapat menunjukkan adanya interaksi antara gugus fungsi pada permukaan adsorben

dengan ion logam yang teradsorpsi. Selain itu, analisis BET dapat memberikan informasi mengenai perubahan luas permukaan dan volume pori akibat proses adsorpsi. Dengan membandingkan data karakterisasi sebelum dan sesudah adsorpsi, mekanisme interaksi antara adsorben dan adsorbat dapat dijelaskan secara lebih mendalam (Sorrentino et al., 2022).

Penggunaan beberapa metode karakterisasi secara bersamaan sangat penting dalam penelitian adsorpsi karena setiap metode memberikan informasi yang berbeda mengenai sifat material. Analisis FTIR berfokus pada identifikasi gugus fungsi yang berperan dalam interaksi kimia, sedangkan analisis BET memberikan gambaran mengenai karakteristik fisik material seperti luas permukaan dan struktur pori. Sementara itu, analisis AAS digunakan untuk menentukan konsentrasi logam yang tersisa dalam larutan setelah proses adsorpsi berlangsung. Dengan menggabungkan ketiga metode tersebut, peneliti dapat memperoleh pemahaman yang lebih menyeluruh mengenai proses adsorpsi serta faktor-faktor yang mempengaruhi efektivitas adsorben dalam menyerap logam berat (Crivello et al., 2023).

2.7.1 FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*)

Spektroskopi *Fourier Transform Infrared* (FTIR) adalah teknik analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi dan menganalisis struktur kimia dari berbagai senyawa dengan cara mengukur absorbansi radiasi inframerah oleh sampel. Teknik ini memanfaatkan sifat vibrasi molekul dari ikatan kimia dalam senyawa, yang menghasilkan spektrum unik yang dapat digunakan sebagai "sidik jari" untuk mengidentifikasi komponen kimia dalam sampel. FTIR sangat berguna dalam berbagai bidang, termasuk kimia, biokimia, farmasi, dan ilmu material,

karena kemampuannya untuk memberikan informasi yang cepat dan akurat tentang komposisi kimia suatu material (Barrios-Rodriguez dkk., 2022).

Prinsip kerja FTIR didasarkan pada interaksi antara radiasi inframerah dan molekul dalam sampel. Ketika cahaya inframerah melewati sampel, molekul dalam sampel akan menyerap energi pada panjang gelombang tertentu, yang sesuai dengan frekuensi vibrasi ikatan kimia dalam molekul tersebut. Energi yang diserap menyebabkan perubahan dalam gerakan vibrasi ikatan, yang kemudian menghasilkan spektrum absorbansi. Setiap senyawa memiliki pola absorbansi yang unik, sehingga spektrum yang dihasilkan dapat digunakan untuk mengidentifikasi senyawa tersebut (Irnawati dkk., 2019). Daerah inframerah terbagi menjadi tiga bagian: near IR (14.000-4.000 cm-1), mid IR (4.000-400 cm-1), dan far IR (400-40 cm-1) (S. A.Khan dkk., 2018).

Proses pengukuran dalam FTIR dimulai dengan sumber cahaya inframerah yang memancarkan radiasi ke sampel. Radiasi yang tidak diserap oleh sampel kemudian diteruskan ke detektor, yang mengukur intensitas cahaya pada berbagai panjang gelombang. Data yang diperoleh kemudian diolah menggunakan transformasi Fourier untuk menghasilkan spektrum yang menunjukkan absorbansi sebagai fungsi dari panjang gelombang (Khudzaifi dkk., 2019; Pogula dkk., 2007). Teknik ini dapat dilakukan dalam beberapa mode, termasuk attenuated total reflectance (ATR) dan diffuse reflectance, yang memungkinkan analisis sampel dalam bentuk padat atau cair tanpa memerlukan preparasi yang rumit (Impellizzeri, 2024; Dong dkk., 2020).

2.7.2 SAA (*Surface Area Analyzer*) – Metode BET

SAA *Surface Area Analyzer* (SAA) merupakan instrumen yang digunakan untuk menentukan luas permukaan spesifik, volume pori, dan distribusi ukuran pori suatu material padat melalui analisis adsorpsi gas. Salah satu metode yang paling umum digunakan adalah metode Brunauer–Emmett–Teller (BET), yang didasarkan pada fenomena adsorpsi multilapis gas pada permukaan padatan (Thommes et al., 2020; Lowell et al., 2021).

Metode BET bekerja dengan mengukur jumlah gas (umumnya nitrogen, N_2) yang teradsorpsi pada permukaan sampel pada suhu rendah (biasanya 77 K, suhu nitrogen cair). Data yang diperoleh berupa isoterm adsorpsi, yaitu hubungan antara jumlah gas yang teradsorpsi dengan tekanan relatif (P/P_0). Dari isoterm ini, luas permukaan spesifik dapat dihitung berdasarkan asumsi pembentukan lapisan monolayer pada permukaan material sebelum terbentuk lapisan multilayer (Thommes et al., 2020). Persamaan dasar BET dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{1}{v\left(\frac{P_0}{P}-1\right)} = \frac{C-1}{v_m C} \cdot \frac{P}{P_0} + \frac{1}{v_m C} \tag{2.2}$$

di mana v adalah volume gas yang teradsorpsi, v_m adalah volume monolayer, P/P_0 adalah tekanan relatif, dan C adalah konstanta BET yang berkaitan dengan energi adsorpsi (Lowell et al., 2021).

Dalam praktiknya, analisis BET biasanya dilakukan pada rentang tekanan relatif 0,05–0,30 untuk memperoleh hasil yang akurat. Nilai luas permukaan spesifik kemudian dihitung dari kapasitas monolayer (v_m) dengan mempertimbangkan luas penampang molekul gas adsorbat. Selain itu, metode ini sering dikombinasikan dengan analisis lain seperti BJH (Barrett–Joyner–Halenda) untuk menentukan distribusi ukuran pori (Thommes et al., 2020; Sing et al., 2021).

Keunggulan metode BET adalah kemampuannya memberikan informasi kuantitatif yang akurat mengenai luas permukaan material, terutama untuk material berpori seperti karbon aktif, zeolit, dan nanopartikel. Namun, metode ini memiliki keterbatasan, seperti asumsi homogenitas permukaan dan kesulitan dalam menganalisis material dengan pori sangat kecil (ultramikropori) atau interaksi adsorpsi yang kompleks (Lowell et al., 2021).

2.7.3 AAS (*Atomic Absorbtion Spectroscopy*)

AAS *(Atomic Absorbtion Spectroscopy)* adalah suatu metode analisis yang didasarkan pada proses penyerapan energi radiasi oleh atom yang berada pada keadaan energi dasar (*ground state*). Ketika atom menyerap energi tersebut, elektron pada kulit atom akan mengalami eksitasi menuju tingkat energi yang lebih tinggi. Setelah berada pada keadaan tereksitasi, elektron cenderung kembali ke keadaan energi yang lebih rendah atau ke tingkat energi dasarnya. Pada saat proses kembali tersebut, energi dilepaskan kembali dalam bentuk radiasi. Atom bebas dapat berinteraksi dengan berbagai bentuk energi, seperti energi panas, energi elektromagnetik, energi kimia, maupun energi listrik. Interaksi tersebut menimbulkan berbagai proses dalam atom bebas yang menyebabkan terjadinya fenomena penyerapan (absorpsi) maupun pemancaran (emisi) radiasi serta panas. Radiasi yang dihasilkan bersifat spesifik karena setiap atom memiliki karakteristik panjang gelombang yang berbeda (Hafidoh, 2021)

Prinsip kerja *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) dilakukan dengan cara menguapkan larutan sampel sehingga logam yang terkandung di dalamnya berubah menjadi atom bebas. Atom-atom tersebut kemudian menyerap radiasi yang berasal dari sumber cahaya berupa lampu katoda berongga (*Hollow*

Cathode Lamp) yang mengandung unsur yang akan dianalisis. Besarnya radiasi yang diserap oleh atom logam kemudian diukur pada panjang gelombang tertentu yang khas untuk masing-masing unsur logam (Hafidoh, 2021).

2.8 Penelitian Terdahulu

Penelitian ini mengacu pada beberapa penelitian sebelumnya guna mendapatkan landasan teori dan perbandingan empiris yang kuat. Melalui tinjauan literatur ini, peneliti berupaya menunjukkan orisinalitas serta perbedaan spesifik penelitian ini dibandingkan dengan kajian yang sudah ada, baik dari segi objek penelitian maupun metodologi. Adapun ringkasan perbandingan tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel di bawah ini:

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

NO	Judul	Peneliti	Tujuan Penelitian	Hasil Kajian	Kesimpulan
1	Sintesis SiC (Silikon Karbida) Berbahan Dasar Pasir Putih Dan Arang Tempurung Kelapa	Ruth M. Slarmanata, Meytij Jeanne Rampea, Jhon Zeth Lomboka	untuk mengidentifikasi karakteristik sintesis SiC pada pasir putih dan arang tempurung kelapa sebagai bahan dasarnya melalui pengujian XRF dan FTIR.	Hasil identifikasi melalui pengujian XRF didapatkan komponen CaO sebanyak 71,30%. Hasil analisis FTIR menunjukkan gugus fungsi yang muncul yaitu Si-C pada bilangan gelombang 786.89 – 941.19 cm-1	Arang termpurung kelapa disimpulkan bahwa Hasil analisis XRF untuk sampel pasir putih dan arang tempurung kelapa didpatkan senyawa yang paling banyak terkandung adalah CaO sebanyak 71,30 %. Dan pasir putih dan arang tempurung kelapa memiliki komponen-komponen kimia seperti SO3 sebanyak 14,29 %, K2O sebanyak 6,84 %, Cl sebanyak 6,43 %, SrO sebanyak 1,10 %, dan Rb2O sebanyak 0,0037 %. Hasil analisis FTIR pasir putih dan arang tempurung kelapa setelah dicampur didapatkan gugus Si-C pada panjang gelombang 786.89 – 941.19.

NO	Judul	Peneliti	Tujuan Penelitian	Hasil Kajian	Kesimpulan
2	Sintesis, Karakterisasi, dan Uji Adsorpsi Komposit Silika/Karbon dari Limbah Sekam Padi sebagai Adsorben Tembaga (II)	Haryono, Atiek Rostika Noviyanti, Engela Evy Ernawati	Melakukan sintesis dan karakterisasi komposit silika/karbon, serta uji adsorpsinya sebagai adsorben pada adsorpsi ion tembaga (II) melalui penentuan komposisi optimum dari silika/karbon, kapasitas adsorpsi, dan model adsorpsi isoterm.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio massa silika terhadap karbon sebesar 2:1 merupakan komposisi optimum pada sintesis komposit silika/karbon sebagai adsorben untuk adsorpsi ion tembaga (II). Adsorben komposit silika/karbon pada komposisi tersebut memiliki kapasitas adsorpsi terhadap ion tembaga (II) dan luas permukaan paling tinggi yaitu berturut-turut sebesar 75,88 mg/g dan 233,45 m2/g. Waktu optimum adsorpsi diperoleh selama 40 menit dan dengan	Komposit silika/karbon berhasil disintesis dari limbah sekam padi. Perbedaan komposisi (rasio massa) silika dan karbon dari arang sekam padi pada sintesis komposit silika/karbon berpengaruh terhadap karakteristik permukaan (luas permukaan, volume mikropori, dan volume total pori) dan kapasitas adsorpsi dari komposit tersebut. Komposit silika/karbon dari rasio massa silika terhadap karbon sebesar 2:1 memiliki karakteristik permukaan (bilangan iodine, luas permukaan, volume mokropori, dan volume total pori spesifik) paling baik dan kapasitas adsorpsi terhadap ion tembaga

NO	Judul	Peneliti	Tujuan Penelitian	Hasil Kajian	Kesimpulan
				model adsorpsi isoterm berupa adsorpsi Freundlich dengan nilai R2 = 0,9582.	(II) paling besar.Pengujian model adsorpsi ion tembaga (II) oleh komposit silika/karbon (2:1) menunjukkan kesesuaian dengan model adsorpsi isoterm Freundlich. Oleh karena itu peristiwa adsorpsi berlangsung sebagai adsorpsi fisik *multilayer*.
3	Sintesis Komposit Silika Gel Dimodifikasi APTES dan Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa sebagai Adsorben Cd(II)	Ratih Noviasari	Mengetahui kemampuan adsorpsi komposit silika gel termodifikasi APTES dan karbon aktif tempurung kelapa terhadap logam Cd(II) berdasarkan pH optimum, waktu kontak optimum, dan model isoterm adsorpsi.	Hasil penelitian menunjukkan komposit berhasil disintesis dengan kandungan unsur C 32,92%, N 25,88%, O 26,04%, dan Si 15,16% . Luas permukaan BET komposit sebesar 221,3482 m^2/g . pH optimum adsorpsi Cd(II) adalah 5,0 dan waktu kontak	Komposit silika gel–APTES–karbon aktif berhasil disintesis dan efektif digunakan sebagai adsorben logam Cd(II). Adsorpsi berlangsung pada permukaan heterogen dan membentuk lapisan multilayer sesuai model Freundlich.

NO	Judul	Peneliti	Tujuan Penelitian	Hasil Kajian	Kesimpulan
				optimum 30 menit . Adsorpsi mengikuti isoterm Freundlich dengan nilai R^2 = 0,9707 .	
4	Synthesis of Mesopore Silica Composite from Rice Husk with Activated Carbon from Coconut Shell as Adsorbent Methyl Orange	Yusmaniar, Y., Erdawati, E., Ghifari, Y. F., & Ubit, D. P.	Mengetahui sintesis komposit mesoporous silica dari sekam padi dengan karbon aktif tempurung kelapa serta kemampuannya sebagai adsorben methyl orange.	Hasil penelitian menunjukkan komposit berhasil terbentuk dengan kandungan unsur C 76,99%, Si 5,08%, dan O 17,93%. Luas permukaan BET sebesar 306,7451 m^2/g. Adsorpsi optimum methyl orange terjadi pada pH 2 dengan waktu kontak 30 menit dan kapasitas adsorpsi sebesar 0,470 mg/g. Model isoterm yang sesuai adalah Langmuir.	Komposit mesoporous silica–karbon aktif berhasil disintesis dan efektif sebagai adsorben methyl orange. Adsorpsi berlangsung secara monolayer pada permukaan homogen sesuai model Langmuir.
5	Sintesis dan Karakterisasi Komposit Silika	Muhammad Mufti Wibawa, Muhammad	Mengetahui sintesis komposit silika-karbon dari abu bagasse	Hasil penelitian menunjukkan komposit terbaik	Komposit silika-karbon berhasil disintesis dari abu bagasse dengan

NO	Judul	Peneliti	Tujuan Penelitian	Hasil Kajian	Kesimpulan
	Karbon dari Abu Bagasse (Ampas Tebu)	Athallah Rifqi Shafwan, Sutiyono	menggunakan metode sol-gel serta karakteristik fasa dan kandungan silikanya.	diperoleh pada konsentrasi NaOH 1,5 N dengan kandungan silika 68,3% dan karbon 25,76% serta rasio Si/C sebesar 2,65:1 . Hasil XRD menunjukkan material bersifat amorf dengan puncak tertinggi pada 2θ = 30,1226° .	kemurnian tinggi dan struktur amorf. Material ini berpotensi digunakan sebagai adsorben maupun material anoda baterai lithium-ion.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang dilakukan merupakan eksperimen dengan metode eksperimental yang meliputi beberapa tahapan, yaitu proses sintesis silika dari sekam padi, sintesis karbon aktif dari tempurung kelapa, dan tahap penggabungan sintesis karbon dengan silika.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Riset Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang pada bulan Agustus 2025.

3.3 Alat dan Bahan

3.3.1 Alat Penelitian

Adapun beberapa alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu :

1. Furnace/ Tanur
2. Oven
3. Neraca analitik
4. Gelas ukur 50ml dan 100ml
5. Gelas beaker 500ml
6. Labu Erlenmeyer 250ml
7. Corong kaca
8. Pipet
9. Hot plate

10. Magnetic stirrer
11. pH indikator
12. Cawan petri
13. Plastic wrapping
14. Alumunium foil
15. Spatula
16. Gelas ukur kecil
17. Pipet tetes
18. Thermometer

3.3.2 Bahan Penelitian

Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

1. Sekam padi
2. Tempurung kelapa
3. Serbuk silika hasil ekstraksi sekam padi
4. Serbuk karbon aktif dari tempurung kelapa
5. Aquades
6. Kertas Saring
7. Larutan Pb $(NO_3)_2$(untuk aplikasi dan AAS)
8. Larutan HCl 4M
9. Larutan NaOH 1M

3.3.3 Alat Karakterisasi

Adapun alat-alat karakterisasi dalam penelitian ini meliputi:

(1) FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*)

(2) AAS (*Atomic Absorption Spectroscopy*)

(3) SAA (*Surface Area Analyzer*)

3.4 Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini terdapat beberapa variabel yang digunakan yaitu:

3.4.1 Variabel Bebas (*Independent Variable*)

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah rasio komposisi silika dari sekam padi dan karbon aktif dari tempurung kelapa. Variasi perbandingan yang digunakan meliputi $100:0, 0:100, 70:30, 50:50,$ dan $30:70$. Variasi rasio ini ditentukan untuk mengetahui pengaruh perbedaan komposisi terhadap hasil sintesis komposit silika-karbon.

3.4.2 Variabel Terikat *(Dependent Variable)*

Variabel terikat adalah karakteristik komposit silika-karbon yang dihasilkan, meliputi:

a. Identifikasi gigus fungsi dengan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).
b. Kapasitas adsorpsi ion logam berat *Pb*(*II*) dengan *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS).
c. Luas permukaan, volume pori, dan distribusi ukuran pori dengan *Surface Area Analyzer* (SAA).

3.4.3 Variabel Kontrol (*Control Variable*)

Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah faktor-faktor yang dijaga tetap agar tidak memengaruhi hasil percobaan, antara lain:

a. Suhu dan lama pembakaran sekam padi (700℃ selama 3 jam)
b. Suhu dan lama karbonisasi tempurung kelapa (700℃ selama 5 jam)
c. Konsentrasi larutan aktifator (HCl)

d. Konsentrasi larutan $Pb\ (NO_3)^2$yang digunakan untuk uji adsorpsi.

e. Kondisi pencucian hingga pH netral (pH & 7)

Dengan variabel ini, hasil penelitian yang diharapkan dapat menunjukkan hubungan antara rasio komposisi silika-karbon dengan kemampuan adsorpsi ion logam berat Pb(II) secara lebih terukur dan konsisten.

3.5 Prosedur Penelitian

3.5.1 Sintesis Silika dari Sekam Padi

1. Sekam padi dibersihkan menggunakan air mengalir hingga bebas dari kotoran dan pengotor lainnya. Selanjutnya, sekam dikeringkan dalam oven pada suhu 150 $°C$ selama 2 jam untuk mengurangi kadar air. Setelah proses pengeringan, sekam padi kemudian dipanaskan di dalam furnace sebagai tahap awal sintesis silika.
2. Sekam padi yang telah dikeringkan dibakar di dalam furnace pada suhu 700 $°C$ selama 7 jam hingga berubah menjadi abu berwarna putih keabu-abuan.
3. Abu sekam padi yang telah diperoleh kemudian didinginkan, dihaluskan, dan disaring menggunakan ayakan berukuran 200 $mesh$ untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam. Sebanyak 3 $gram$ abu hasil ayakan ditimbang dan dimasukkan ke dalam gelas beaker berkapasitas 100 mL.
4. Kemudian ditambahkan 18 mL larutan HCl 1 M dan 30 mL aquadest, Campuran diaduk menggunakan magnetic stirrer pada kecepatan 400 rpm hingga homogen, kemudian dipanaskan di atas hotplate pada suhu 80 $°C$ selama 1 jam sambil terus diaduk.

5. Setelah proses pemanasan, campuran didinginkan lalu disaring menggunakan kertas saring Whatman No. 41 (ukuran pori $\pm 20\ \mu m$). Residu hasil penyaringan dicuci menggunakan aquadest hingga pH mendekati netral ($pH\ 6-7$), kemudian dimasukkan ke dalam gelas beaker yang bersih.
6. Residu hasil perendaman asam ditambahkan 18 mL larutan $NaOH$ 1 M dan 40 mL aquadest, kemudian diaduk menggunakan magnetic stirrer pada kecepatan 400 rpm hingga seluruh abu terendam sempurna. Campuran dipanaskan di atas hotplate pada suhu $80-90\ °C$ selama 1 jam hingga larutan berubah menjadi jernih kekuningan, menandakan terbentuknya senyawa natrium silikat (Na_2SiO_3).
7. Larutan hasil reaksi didinginkan dan disaring kembali menggunakan kertas saring Whatman $No.\ 41$. Filtrat yang mengandung larutan natrium silikat dikumpulkan dan disimpan untuk tahap selanjutnya.
8. Filtrat natrium silikat didinginkan hingga mencapai suhu ruang, kemudian ditambahkan larutan HCl 1 M secara tetes demi tetes sambil diaduk menggunakan stirrer pada kecepatan $300\ rpm$ hingga pH mencapai $7-8$. Pada tahap ini, mulai terbentuk gel silika berwarna putih.
9. Gel yang terbentuk didiamkan selama $18\ jam$ pada suhu ruang agar proses pematangan berlangsung sempurna. Setelah itu, gel dicuci berulang kali menggunakan aquadest hingga filtrat bebas dari ion klorida (Cl^-), yang dibuktikan dengan tidak terbentuknya endapan putih saat diuji menggunakan larutan $AgNO_3$ 0,1 M.

10. Gel silika yang telah bersih dikeringkan menggunakan oven pada suhu $100\ °C$ selama $12\ jam$ hingga diperoleh serbuk silika amorf berwarna putih. Serbuk silika yang dihasilkan disimpan dalam wadah tertutup dan digunakan pada tahap pengujian selanjutnya.

3.5.2 Sintesis Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa

1. Tempurung kelapa terlebih dahulu dibersihkan dari sisa sabut, kemudian dipotong menjadi ukuran kecil agar mudah diproses lebih lanjut.
2. Potongan tempurung kelapa dijemur di bawah sinar matahari selama $\pm 24\ jam$ hingga kadar airnya berkurang secara signifikan.
3. Setelah proses penjemuran, tempurung kelapa ditimbang untuk mengetahui massa awal sebelum dilakukan proses pembakaran.
4. Tempurung kelapa selanjutnya dikarbonisasi menggunakan furnace pada suhu $700°C$ selama $5\ jam$ untuk menghasilkan arang.
5. Arang hasil karbonisasi dihaluskan menggunakan mortar dan alu hingga menjadi serbuk halus, kemudian disaring menggunakan ayakan berukuran $200\ mesh$ untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam.
6. Serbuk karbon yang telah dihaluskan ditimbang sebanyak $3\ gram$ untuk setiap sampel yang akan diaktivasi.
7. Proses aktivasi dilakukan dengan menambahkan larutan $HCl\ 4\ M$ sebanyak $75\ mL$ ke dalam sampel karbon. Campuran tersebut diaduk menggunakan magnetic stirrer pada suhu $180°C$ dengan kecepatan $300\ rpm$ selama $1\ jam$, kemudian didiamkan selama $24\ jam$ agar proses aktivasi berlangsung secara optimal.

8. Setelah proses aktivasi, karbon dicuci menggunakan kertas saring dan dibilas dengan aquadest hingga pH filtrat mencapai nilai netral ($pH = 7$).
9. Karbon aktif yang telah dicuci kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu $150°C$ selama $1\ jam$ hingga diperoleh karbon aktif yang benar-benar kering dan siap untuk digunakan pada tahap pengujian selanjutnya.

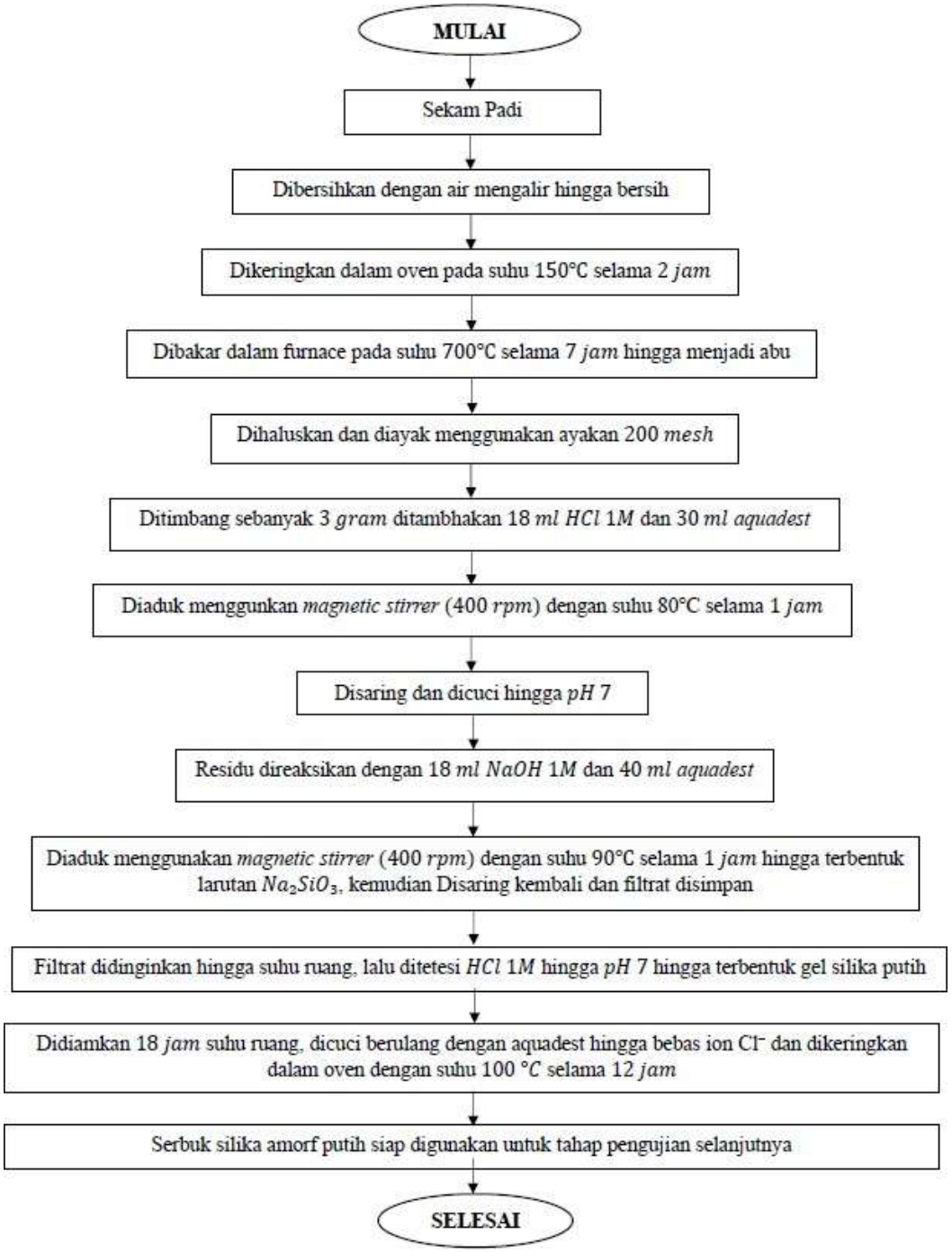
3.5.3 Sintesis Silika Karbon

1. Serbuk silika dan karbon aktif yang telah dikeringkan diayak menggunakan ayakan $200\ mesh$ untuk mendapatkan ukuran partikel yang seragam. Kedua bahan disiapkan dalam kondisi benar-benar kering agar tidak terjadi penggumpalan saat pencampuran.
2. Masing-masing bahan ditimbang sesuai rasio perbandingan silika dan karbon aktif, yaitu $100:0, 0:100, 70:30, 50:50$, dan $30:70$. Penimbangan dilakukan menggunakan neraca analitik untuk menjaga ketelitian massa.
3. Bahan yang telah ditimbang dimasukkan ke dalam gelas beaker $100\ ml$, kemudian ditambahkan aquades sebanyak $3 - 7\ mL$, menyesuaikan jumlah bahan pada tiap rasio. Penambahan aquadest bertujuan untuk memudahkan proses pencampuran menjadi homogen.
4. Campuran silika dan karbon aktif kemudian diaduk menggunakan magnetic stirrer pada suhu $80°C$ selama $2\ jam$ dengan kecepatan konstan $400\ rpm$hingga campuran menjadi homogen.
5. Setelah proses pengadukan selesai, campuran didiamkan pada suhu ruang selama $24\ jam$ hingga terbentuk endapan. Endapan tersebut merupakan komposit silika-karbon yang terbentuk melalui interaksi antara kedua material.

6. Endapan hasil sintesis dicuci dengan aquadest secara berulang hingga pH larutan mencapai netral (pH 7). Proses pencucian ini bertujuan untuk menghilangkan sisa ion-ion basa atau asam yang masih tertinggal dari proses sebelumnya.
7. Endapan yang telah bersih dikeringkan dalam oven pada suhu $110°C$ selama $12\ jam$ hingga diperoleh komposit silika-karbon dalam bentuk serbuk kering.
8. Serbuk komposit yang dihasilkan disimpan dalam wadah tertutup untuk menghindari kontaminasi udara atau kelembapan. Sampel komposit silika-karbon siap digunakan untuk analisis karakterisasi lebih lanjut menggunakan uji FTIR, SAA (BET), dan AAS.

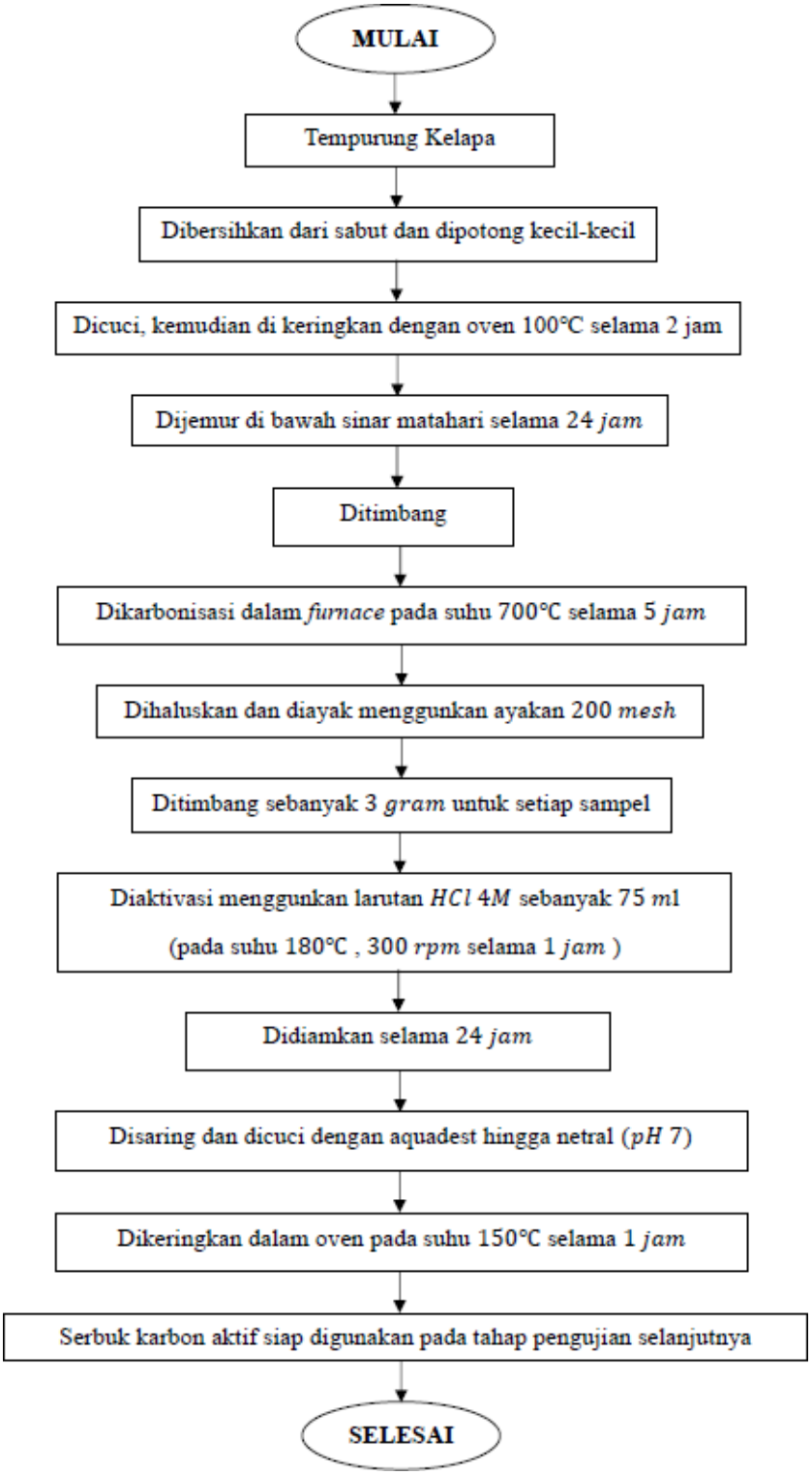
3.6 Diagram Alir Penelitian

3.6.1 Diagram Alir Sintesis Silika Sekam Padi



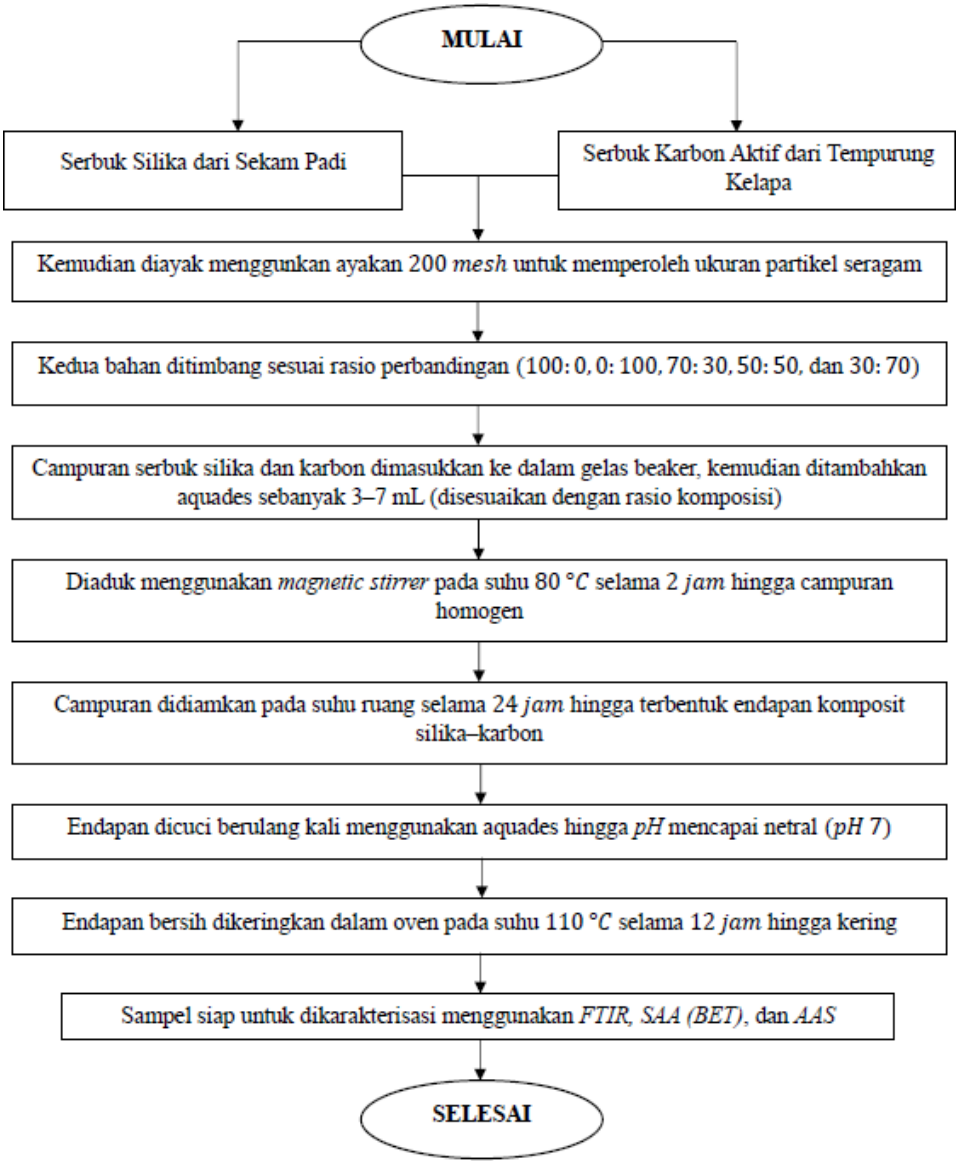
Gambar 3. 1 Diagram Alir Sintesis Silika Sekam Padi

3.6.2 Diagram Alir Sintesis Karbon Aktif Tempurung Kelapa



Gambar 3. 2 Diagram Alir Sintesis Karbon Aktif Tempurung Kelapa

3.6.3 Diagram Alir Sintesis Komposit Silika-Karbon



Gambar 3. 3 Diagram Alir Komposit Silika-Karbon

3.7 Analisis Data

Analisis data dilakukan untuk mengetahui karakteristik,struktur, dan kemampuan adsorpsi dari komposit silika-karbon hasil sintesis. Setiap data yang diperoleh melalui uji karakterisasi diolah melalui uji karakterisasi diolah dan dianalisis untuk menjelaskan hubungan antara struktur pori, luas permukan, serta keberadaan gugus fungsi terhadap kemampuan adsorpsi ion logam berat $Pb(II)$. Metode karakterisasi yang digunakan meliputi *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS), dan *Surface Area Analyzer* (SAA) dengan metode (BET) *Brunauer–Emmett–Teller*.

3.7.1 Analisis Karakterisasi *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)

Analisis menggunakan FTIR diperoleh dalam bentuk spektrum inframerah yang menampilkan hubungan antara transmitansi (%) dan bilangan gelombang (cm^{-1}). Analisis dilakukan dengan mengidentifikasi puncak-puncak serapan utama yang muncul pada daerah karakteristik gugus fungsi tertentu.

Langkah-langkah analisis yang akan dilakukan meliputi:

1. Mengidentifikasi puncak-puncak serapan (peak) pada rentang $4000 - 400$ cm^{-1}.
2. Membandingkan posisi serta intensitas puncak antara bahan awal (silika dari sekam padi dan karbon aktif dari tempurung kelapa) dengan hasil komposit.
3. Menentukan keberadaan gugus fungsi, seperti:

a. Gugus silanol *(Si–OH)* di sekitar 3400 cm^{-1},

b. Gugus siloksan *(Si–O–Si)* di daerah $1080 - 1100$ cm^{-1},

c. Gugus $C = C$ aromatik sekitar 1600 cm^{-1},

d. Gugus $C - O$ dan $C = O$ pada $1700 - 1300\ cm^{-1}$.

4. Menganalisis kemungkinan pergeseran puncak *(peak shift)* sebagai indikator terbentuknya ikatan kimia baru antara silika dan karbon aktif.

Analisis kualitatif FTIR ini digunakan untuk memastikan keberhasilan proses pembentukan komposit serta memahami interaksi kimia antara gugus aktif yang berperan dalam proses adsorpsi ion logam Pb(II).

3. 1 Rencana Analisis Fourier Transfrom Infrared Spectroscopy (FTIR)

Sampel SC	**Rasio SC**	**Puncak Utama (cm^{-1})**	**Gugus Fungsi**
Karbon Aktif Murni	0 : 100		
Komposit 1	30 : 70		
Komposit 2	50 : 50		
Komposit 3	70 : 30		
Silika Murni	100 : 0		

3.7.2 Analisis Karakterisasi Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)

Analisis menggunakan AAS diperoleh dalam bentuk nilai absorbansi untuk setiap larutan sampel dan larutan standar Pb(II). Dari hasil tersebut, dibuat kurva kalibrasi standar yang menggambarkan hubungan linear antara absorbansi (A) dan konsentrasi (C) logam Pb(II). Tahapan analisis data AAS meliputi:

1. Menentukan persamaan linier kurva kalibrasi satandar Pb(II) dengan persamaan :

$$A = mC + b \qquad (3.1)$$

di mana A adalah absorbansi, C adalah konsentrasi $(mg/L), m$ adalah gradien garis, b adalah intersep.

2. Menggunakan persamaan kalibrasi tersebut untuk menghitung konsentrasi ion Pb(II) yang tersisa dalam larutan setelah proses adsorpsi.
3. Menghitung efisiensi adsorpsi menggunakan persamaan :

$$\text{Efisiensi Adsorpsi}\ (\%) = \frac{(C_0 - Ct)}{C_0} \times 100 \qquad (3.2)$$

di mana C_0 adalah konsentrasi awal (mg/L) dan C_e adalah konsentrasi akhir logam setelah adsorpsi (mg/L).

4. Menganalisis hubungan antara variasi rasio silika–karbon terhadap nilai efisiensi adsorpsi untuk menentukan kondisi optimum.

Analisis data AAS bersifat kuantitatif, karena digunakan untuk menilai kemampuan komposit silika–karbon dalam menurunkan kadar ion Pb(II) di dalam larutan. Hasil analisis kemudian dibandingkan dengan penelitian terdahulu sebagai pembanding efektivitas adsorben.

Tabel 3. 1 Rencana Analisis Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)

Sampel SC	**Rasio SC**	**Konsentrasi Awal Pb (II) (mg/L)**	**Konsentrasi Akhir Pb (II)**	**Efisiensi Adsorpsi (%)**
Karbon Aktif Murni	0 : 100			
Komposit 1	30 : 70			
Komposit 2	50 : 50			
Komposit 3	70 : 30			
Silika Murni	100 : 0			

3. 2 Rencana Analisis Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)

3.7.3 Analisis Karakterisasi Surface Area Analyzer (SAA) – Metode BET

Analisis menggunakan SAA-BET diperoleh dalam bentuk kurva isoterm adsorpsi-desorpsi nitrigen (N_2) pada suhu $77\ K$, yang menggambarkan hubungan antara tekanan relatif *(P/P₀)* dan volume gas yang teradsorpsi *(V)*. Analisis dilakukan untuk menentukan parameter luas permukaan spesifik, volume total pori, dan distribusi ukuran pori.

Tahapan analisis data AAS meliputi :

1. Menentukan jenis isoterm berdasarkan bentuk kurva menurut klasifikasi IUPAC (misalnya isoterm tipe II atau IV untuk material mesopori).
2. Menghitung luas permukaan spesifik (m^2/g) menggunakan persamaan BET:

$$\frac{1}{v\left(\frac{P_0}{P}-1\right)} = \frac{1}{v_m C} + \frac{C-1}{v_m C}\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (3.3)$$

   di mana v adalah volume gas teradsorpsi, V_m adalah volume monolayer, C adalah konstanta BET, dan P/P_0 adalah tekanan relatif.
3. Menentukan volume total pori (cm^3/g) serta ukuran pori rata-rata *(nm)* dari cabang desorpsi kurva isoterm.
4. Menginterpretasikan hasil untuk menentukan jenis pori (mikro, meso, atau makro) serta menghubungkannya dengan kemampuan adsorpsi ion Pb(II).

Analisis ini bersifat kuantitatif dan digunakan untuk menilai hubungan antara struktur pori material dengan kapasitas adsorpsi. Material dengan luas permukaan besar dan volume pori tinggi diharapkan memiliki kemampuan penyerapan Pb(II) yang lebih baik.

3. 3 Rencana Analisis Surface Area Analyzer (SAA)

Sampel SC	**Rasio SC**	**LuasPermukaan BET (m^2/g)**	**Volume Pori BET (cm^3/g)**	**Ukuran Pori Rata-rata BET (nm)**
Karbon Aktif Murni	0 : 100			
Komposit 1	30 : 70			
Komposit 2	50 : 50			
Komposit 3	70 : 30			
Silika Murni	100 : 0			

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

4.1.1 Pembuatan Sampel

Preparasi bahan dilakukan dengan memanfaatkan limbah pertanian lokal, yaitu sekam padi sebagai sumber silika dan tempurung kelapa sebagai sumber karbon aktif. Tahapan pembuatan sampel terdiri atas proses pencucian, pengeringan, kalsinasi, aktivasi, dan pembuatan komposit.

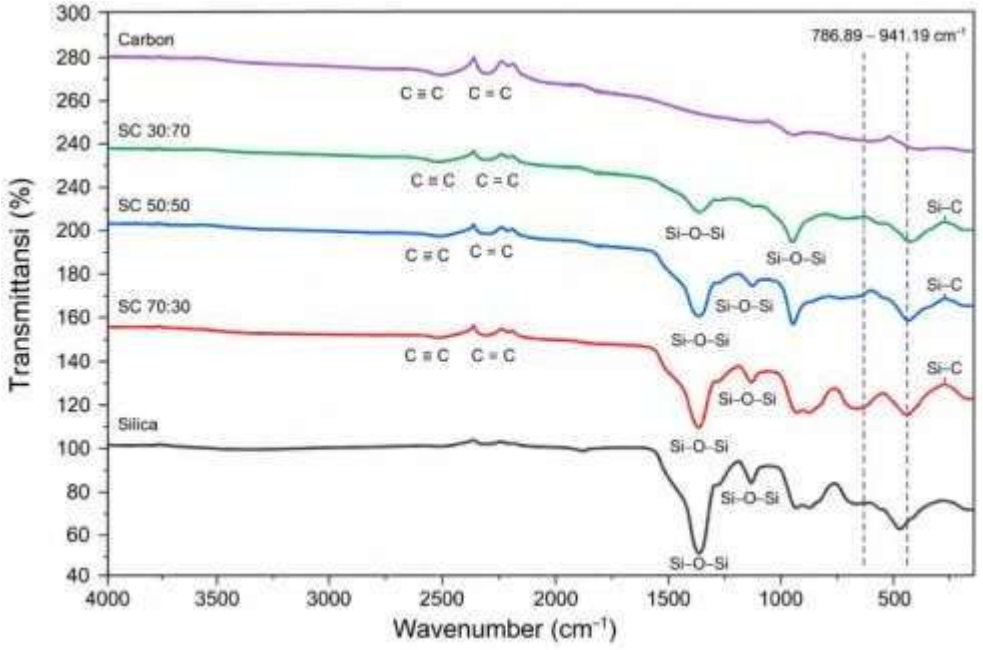
Gambar 4. 1 Abu Sekam Padi

Gambar 4. 2 Karbon Tempurung Kelapa

4.1.2 Analisis Menggunakan FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*)

Karakterisasi menggunakan FTIR dilakukan di Laboratorium Halal Center Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pengujian FTIR bertujuan untukmengididentifikasi adanya gugus fungsi yang terdapat pada

permukaan material hasil sintesis, yaitu komposit silika–karbon. Spektrum FTIR diperoleh pada rentang bilangan gelombang $4000 - 400\ cm^{-1}$. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan terbentuknya komposit serta melihat perubahan hasil penambahan variasi massa komposit SC (Silika-Carbon).



Gambar 4. 3 Grafik FTIR Hasil Komposit Silika Karbon (SC)

Analisis FTIR menunjukkan bahwa material komposit silika–karbon memiliki beberapa gugus fungsi yang berperan dalam proses adsorpsi logam Pb(II). Pada komposit dengan rasio 30:70, terdeteksi puncak spektrum pada bilangan gelombang 2363 cm^{-1}, 2113 cm^{-1}, 1058 cm^{-1}, dan 786 cm^{-1} yang menunjukkan keberadaan gugus karbon dan silika pada material. Puncak pada 2113 cm^{-1} menunjukkan keberadaan gugus C=C yang berasal dari struktur karbon aromatik, sedangkan puncak pada 1058 cm^{-1} menunjukkan keberadaan gugus Si–O–Si dari jaringan silika. Gugus-gugus ini berperan sebagai situs aktif yang dapat berinteraksi dengan ion Pb(II) melalui mekanisme gaya elektrostatik maupun gaya Van der Waals. Interaksi ini memungkinkan ion Pb(II) terikat pada permukaan adsorben

sehingga konsentrasi logam dalam larutan menjadi berkurang secara signifikan setelah proses adsorpsi berlangsung.

Pada spektrum karbon aktif murni, terdeteksi dua puncak utama pada bilangan gelombang sekitar 2322 cm^{-1} dan 2109 cm^{-1}. Puncak pada 2322 cm^{-1} menunjukkan keberadaan gugus C≡C yang merupakan ikatan rangkap tiga karbon. Gugus ini umumnya berkaitan dengan struktur karbon tak jenuh atau struktur karbon aromatik yang terbentuk selama proses karbonisasi bahan baku karbon. Keberadaan ikatan rangkap pada struktur karbon menunjukkan adanya sistem elektron π yang terdelokalisasi, sehingga permukaan karbon memiliki kemampuan untuk berinteraksi dengan ion logam melalui mekanisme interaksi elektrostatik maupun interaksi π–kation.

Selanjutnya, puncak pada 2109 cm^{-1} menunjukkan keberadaan gugus C=C yang berkaitan dengan struktur karbon terkonjugasi. Gugus karbon terkonjugasi menunjukkan bahwa karbon aktif memiliki jaringan struktur grafitik yang sebagian tersusun dari cincin aromatik. Struktur grafitik ini memungkinkan terbentuknya sistem elektron yang stabil dan terdelokalisasi sehingga dapat meningkatkan kemampuan permukaan karbon dalam berinteraksi dengan ion logam Pb(II). Keberadaan gugus C≡C dan C=C pada karbon aktif menunjukkan bahwa material ini memiliki banyak situs aktif yang dapat berperan dalam proses adsorpsi logam berat.

Pada komposit silika–karbon dengan rasio SC 30:70, spektrum FTIR menunjukkan beberapa puncak utama pada bilangan gelombang 2363 cm^{-1}, 2113 cm^{-1}, 1058 cm^{-1}, dan 786 cm^{-1}. Puncak pada 2363 cm^{-1} menunjukkan keberadaan gugus C≡C yang berasal dari struktur karbon aromatik hasil proses karbonisasi. Hal

ini menunjukkan bahwa struktur karbon masih cukup dominan dalam komposisi komposit karena jumlah karbon dalam material masih relatif tinggi dibandingkan dengan silika.

Puncak pada 2113 cm^{-1} menunjukkan keberadaan gugus C=C yang merupakan karakteristik dari karbon terkonjugasi. Gugus ini menunjukkan bahwa jaringan karbon masih memiliki sistem elektron terdelokalisasi yang dapat berinteraksi dengan ion logam Pb(II) melalui mekanisme adsorpsi fisika seperti gaya Van der Waals maupun interaksi elektrostatik.

Selain gugus karbon, pada komposit ini juga terdeteksi gugus yang berasal dari silika. Hal ini terlihat pada puncak 1058 cm^{-1} yang menunjukkan keberadaan gugus Si–O–Si yang merupakan karakteristik dari jaringan siloksan pada silika amorf. Gugus siloksan terbentuk dari ikatan antara atom silikon dan oksigen yang membentuk kerangka struktur tiga dimensi pada material silika.

Pada spektrum FTIR komposit silika–karbon, puncak yang lebih pendek dibandingkan silika murni terutama disebabkan oleh penurunan intensitas serapan akibat efek pengenceran fase silika dalam matriks komposit, di mana jumlah relatif gugus Si–O–Si menjadi lebih kecil sehingga energi inframerah yang diserap juga menurun (Ammar et al., 2024; Petreanu & Niculescu, 2023) . Selain itu, distribusi silika dalam matriks karbon menyebabkan sebagian gugus aktif tidak terekspos secara maksimal terhadap radiasi IR, sehingga intensitas puncak menjadi lebih rendah dibandingkan silika murni yang lebih homogen (Ammar et al., 2024).

Karbon dalam komposit juga berkontribusi terhadap penurunan intensitas karena secara umum material karbon memiliki aktivitas inframerah yang lebih lemah, terutama jika bersifat amorf atau grafitik, sehingga tidak memberikan

kontribusi signifikan terhadap perubahan dipol selama vibrasi (Ślosarczyk, 2021) . Akibatnya, ketika karbon dicampurkan dengan silika, total serapan spektrum menjadi lebih rendah dibandingkan silika murni yang memiliki vibrasi Si–O–Si yang sangat kuat di daerah sekitar 1000–1100 cm^{-1} (Petreanu & Niculescu, 2023) .

Selain itu, terbentuknya komposit menyebabkan adanya interaksi antarmuka antara silika dan karbon yang dapat mengubah lingkungan kimia gugus Si–O–Si, misalnya melalui perubahan struktur jaringan atau interaksi fisik pada batas fase, sehingga intensitas puncak dapat menurun atau menjadi lebih lebar (Wicikowski et al., 2021; Hu & Zhang, 2024) . Interaksi ini juga dapat mengurangi kekuatan vibrasi ikatan tertentu karena perubahan distribusi elektron di sekitar gugus fungsi (Wicikowski et al., 2021) .

Selain itu, pada komposit SC 30:70 juga terdeteksi puncak pada 786 cm^{-1} yang menunjukkan keberadaan gugus Si–C. Gugus ini menunjukkan adanya interaksi antara silika dan karbon dalam material komposit. Keberadaan ikatan Si–C menunjukkan bahwa karbon tidak hanya bercampur secara fisik dengan silika, tetapi juga berinteraksi secara kimia pada permukaan material sehingga membentuk struktur komposit yang lebih stabil.

Pada komposit SC 50:50, spektrum FTIR menunjukkan puncak pada bilangan gelombang 2113 cm^{-1}, 2100 cm^{-1}, 1054 cm^{-1}, dan 786 cm^{-1}. Puncak pada 2113 cm^{-1} dan 2100 cm^{-1} menunjukkan keberadaan gugus C≡C dan C=C yang berasal dari struktur karbon aromatik hasil karbonisasi. Hal ini menunjukkan bahwa karbon masih terdapat dalam komposisi komposit meskipun jumlah silika dalam material telah meningkat.

Puncak pada 1054 cm^{-1} menunjukkan keberadaan gugus Si–O–Si yang merupakan karakteristik utama dari struktur silika amorf. Gugus ini menunjukkan bahwa jaringan siloksan telah terbentuk dalam material komposit. Selain itu, puncak pada 786 cm^{-1} menunjukkan keberadaan gugus Si–C yang menandakan adanya interaksi kimia antara silika dan karbon dalam struktur komposit. Pada komposisi ini terlihat bahwa kontribusi gugus karbon mulai sedikit berkurang dibandingkan dengan komposit sebelumnya. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian permukaan karbon mulai tertutupi oleh partikel silika. Kondisi tersebut dapat menyebabkan sebagian situs aktif karbon berkurang sehingga berpotensi mempengaruhi kemampuan adsorpsi terhadap ion logam Pb(II).

Pada komposit SC 70:30, spektrum FTIR menunjukkan puncak pada bilangan gelombang 2400 cm^{-1}, 2113 cm^{-1}, 1054 cm^{-1}, dan 786 cm^{-1}. Puncak pada 2400 cm^{-1} menunjukkan keberadaan gugus C≡C yang berasal dari struktur karbon aromatik. Namun, intensitas puncak ini terlihat lebih kecil dibandingkan dengan komposit yang memiliki kandungan karbon lebih tinggi.

Puncak pada 2113 cm^{-1} menunjukkan gugus C=C yang merupakan karakteristik karbon terkonjugasi. Kehadiran gugus ini menunjukkan bahwa karbon masih terdapat dalam struktur komposit meskipun jumlahnya relatif lebih kecil dibandingkan dengan silika.

Sebaliknya, puncak pada 1054 cm^{-1} yang menunjukkan keberadaan gugus Si–O–Si terlihat semakin dominan. Gugus ini merupakan jaringan siloksan yang menjadi struktur utama silika amorf. Dominasi gugus silika ini menunjukkan bahwa komposisi material pada rasio ini lebih banyak didominasi oleh silika dibandingkan karbon. Selain itu, pada komposit ini juga masih terdeteksi gugus Si–C pada sekitar

786 cm^{-1} yang menunjukkan adanya interaksi antara silika dan karbon dalam struktur komposit. Meskipun demikian, meningkatnya jumlah silika dalam komposit dapat menyebabkan sebagian pori karbon tertutupi oleh partikel silika sehingga luas permukaan aktif karbon menjadi berkurang.

Pada silika murni, spektrum FTIR menunjukkan puncak utama pada bilangan gelombang 1091 cm^{-1} yang merupakan karakteristik dari gugus Si–O–Si. Gugus ini menunjukkan keberadaan jaringan siloksan yang membentuk struktur utama silika amorf. Ikatan Si–O–Si terbentuk dari kondensasi gugus silanol yang menghasilkan kerangka silika tiga dimensi yang stabil.

Berbeda dengan komposit silika–karbon, pada silika murni tidak ditemukan gugus Si–C maupun gugus karbon seperti C=C dan C≡C, karena material ini tidak mengandung karbon dalam strukturnya. Keberadaan jaringan siloksan ini menunjukkan bahwa silika memiliki struktur yang stabil secara kimia. Namun, dibandingkan dengan karbon aktif, jumlah situs aktif pada silika umumnya lebih sedikit sehingga kemampuan adsorpsinya terhadap ion logam Pb(II) biasanya lebih rendah.

Tabel 4. 1 Gugus Fungsi Komposit SC

Sampel	**Bilangan Gelombang (cm^{-1})**	**Gugus Fungsi**	**Nama Senyawa**	**Keterangan**
Carbon	2322	C ≡ C	Struktur karbon tak jenuh / aromatik	Menujukkan struktur karbon terakumulasi/terkonjugasi
	2109	C = C	Karbon terkonjugasi	Menunjukkan struktur karbon aromatik
SC 30:70	2363	C ≡ C	Karbon aromatik / karbonisasi	Menujukkan struktur karbon terakumulasi/terkonjugasi
	2113	C = C	Karbon terkonjugasi	Menunjukkan struktur karbon aromatik
	1058	Si-O-Si	Siloksan / Silika amorf	Menunjukkan jaringan siloksan (silika amorf)
	786	Si-C	Silika-Karbon	Menunjukkan terbentuknya ikatan silika-karbon
SC 50:50	2113	C ≡ C	Karbon aromatik / karbonisasi	Menujukkan struktur karbon terakumulasi/terkonjugasi

	2100	C = C	Karbon terkonjugasi	Menunjukkan struktur karbon aromatik
	1054	Si-O-Si	Siloksan / Silika amorf	Menunjukkan jaringan siloksan (silika amorf)
	786	Si-C	Silika-Karbon	Menunjukkan terbentuknya ikatan silika-karbon
SC 70:30	2400	C ≡ C	Karbon aromatik / karbonisasi	Menujukkan struktur karbon terakumulasi/terkonjugasi
	2113	C=C	Karbon terkonjugasi	Menunjukkan struktur karbon aromatik
	1054	Si-O-Si	Siloksan / Silika amorf	Menunjukkan jaringan siloksan (silika amorf)
	786	Si-C	Silika-Karbon	Menunjukkan terbentuknya ikatan silika-karbon
Silica	1091	Si-O-Si	Siloksan / Silika amorf	Menunjukkan jaringan siloksan (silika amorf)

Berdasarkan Tabel 4.1, dapat diketahui bahwa setiap sampel adsorben menunjukkan bilangan gelombang yang berbeda yang mengindikasikan keberadaan gugus fungsi tertentu pada permukaan material. Gugus fungsi tersebut berperan penting dalam proses adsorpsi ion logam Pb(II) karena dapat menjadi situs aktif yang berinteraksi dengan ion logam dalam larutan.

Pada karbon aktif, terdeteksi dua bilangan gelombang utama yaitu pada 2322 cm^{-1} dan 2109 cm^{-1}. Bilangan gelombang 2322 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus C≡C yang merupakan ikatan rangkap tiga karbon yang berkaitan dengan struktur karbon tak jenuh atau karbon aromatik hasil proses karbonisasi. Keberadaan gugus ini menunjukkan bahwa karbon aktif memiliki struktur karbon terkonjugasi yang kaya akan elektron π sehingga mampu berinteraksi dengan ion logam melalui mekanisme interaksi elektrostatik maupun pembentukan kompleks pada permukaan adsorben. Selanjutnya, bilangan gelombang 2109 cm^{-1} menunjukkan keberadaan gugus C=C yang merupakan ciri khas struktur karbon aromatik atau grafitik. Struktur ini menunjukkan bahwa karbon aktif memiliki

jaringan karbon yang stabil dan mampu menyediakan situs aktif yang cukup banyak untuk proses adsorpsi logam berat.

Pada komposit SC 30:70, terdeteksi empat bilangan gelombang utama yaitu 2363 cm^{-1}, 2113 cm^{-1}, 1058 cm^{-1}, dan 786 cm^{-1}. Bilangan gelombang 2363 cm^{-1} menunjukkan keberadaan gugus C≡C yang berasal dari struktur karbon aromatik hasil karbonisasi. Hal ini menunjukkan bahwa karbon masih menjadi komponen dominan dalam komposit ini. Puncak pada 2113 cm^{-1} menunjukkan gugus C=C yang berkaitan dengan struktur karbon terkonjugasi. Selain gugus karbon, pada komposit ini juga terdeteksi gugus yang berasal dari silika yaitu Si–O–Si pada 1058 cm^{-1} yang menunjukkan keberadaan jaringan siloksan khas silika amorf. Selain itu, pada bilangan gelombang 786 cm^{-1} teridentifikasi gugus Si–C yang menunjukkan adanya interaksi antara silika dan karbon dalam struktur komposit. Kehadiran gugus Si–C ini menunjukkan bahwa karbon dan silika tidak hanya bercampur secara fisik tetapi juga membentuk interaksi kimia pada permukaan material.

Pada komposit SC 50:50, bilangan gelombang yang terdeteksi yaitu 2113 cm^{-1}, 2100 cm^{-1}, 1054 cm^{-1}, dan 786 cm^{-1}. Bilangan gelombang 2113 cm^{-1} dan 2100 cm^{-1} menunjukkan keberadaan gugus C≡C dan C=C yang berasal dari struktur karbon aromatik. Hal ini menunjukkan bahwa karbon masih terdapat dalam struktur komposit meskipun jumlahnya telah berkurang dibandingkan dengan komposit sebelumnya. Selanjutnya, bilangan gelombang 1054 cm^{-1} menunjukkan gugus Si–O–Si yang merupakan karakteristik utama dari struktur silika amorf. Selain itu, puncak pada 786 cm^{-1} menunjukkan keberadaan gugus Si–C yang mengindikasikan adanya interaksi antara silika dan karbon dalam material komposit. Keberadaan

gugus Si–C menunjukkan bahwa silika telah berhasil terikat pada permukaan karbon sehingga membentuk struktur komposit yang lebih stabil.

Pada komposit SC 70:30, terdeteksi bilangan gelombang 2400 cm^{-1}, 2113 cm^{-1}, 1054 cm^{-1}, dan 786 cm^{-1}. Bilangan gelombang 2400 cm^{-1} menunjukkan keberadaan gugus C≡C yang berasal dari struktur karbon aromatik, namun intensitasnya relatif lebih rendah dibandingkan dengan komposit yang memiliki kandungan karbon lebih tinggi. Puncak pada 2113 cm^{-1} menunjukkan gugus C=C yang masih berasal dari struktur karbon terkonjugasi. Sementara itu, bilangan gelombang 1054 cm^{-1} menunjukkan gugus Si–O–Si yang merupakan jaringan siloksan khas silika amorf. Keberadaan gugus ini menunjukkan bahwa silika mulai mendominasi struktur material komposit. Selain itu, puncak pada 786 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus Si–C yang mengindikasikan adanya interaksi antara silika dan karbon pada permukaan komposit.

Pada silika murni, hanya terdeteksi satu bilangan gelombang utama yaitu pada 1091 cm^{-1} yang menunjukkan keberadaan gugus Si–O–Si. Gugus ini merupakan karakteristik utama dari struktur silika amorf yang tersusun dari jaringan siloksan tiga dimensi yang terbentuk dari ikatan antara atom silikon dan oksigen. Tidak ditemukannya gugus karbon seperti C=C atau C≡C pada silika murni menunjukkan bahwa material ini tidak mengandung karbon dalam strukturnya.

Selain penemuan gugus fungsi, hasil karakterisasi FTIR juga menunjukkan adanya perubahan bilangan gelombang (*peak shift*) pada gugus siloksan (Si–O–Si) setelah proses pembentukan komposit silika–karbon. Pada sampel silika murni (100:0), gugus Si–O–Si terdeteksi pada bilangan gelombang 1091 cm^{-1}. Setelah silika dikompositkan dengan karbon aktif, puncak tersebut mengalami pergeseran

menjadi 1058 cm^{-1} pada sampel SC 30:70, serta 1054 cm^{-1} pada sampel SC 50:50 dan SC 70:30. Pergeseran puncak menuju gelombang yang lebih rendah menunjukkan adanya perubahan lingkungan kimia di sekitar ikatan Si–O–Si akibat interaksi antara silika dan karbon aktif dalam struktur komposit. Penurunan jumlah gelombang tersebut mengindikasikan terjadinya penurunan energi getaran ikatan yang dapat disebabkan oleh terbentuknya interaksi antar material maupun perubahan distribusi elektron pada permukaan komposit. Indikasi tersebut diperkuat dengan munculnya gugus Si–C pada bilangan gelombang 786 cm^{-1} pada seluruh sampel komposit, yaitu SC 30:70, SC 50:50, dan SC 70:30. Dengan demikian, adanya perubahan jumlah gelombang serta munculnya gugus Si–C menunjukkan bahwa proses sintesis tidak hanya menghasilkan pencampuran secara fisik, tetapi juga menghasilkan interaksi kimia antara silika dan karbon aktif sehingga terbentuknya struktur komposit yang lebih stabil.

Secara keseluruhan, hasil analisis FTIR pada Tabel 4.1 menunjukkan bahwa komposit silika–karbon memiliki kombinasi gugus fungsi yang berasal dari karbon dan silika. Keberadaan gugus karbon seperti C=C dan C≡C menunjukkan adanya struktur karbon aromatik yang dapat berperan sebagai situs aktif dalam proses adsorpsi. Sementara itu, keberadaan gugus Si–O–Si menunjukkan terbentuknya jaringan siloksan dari silika yang dapat memberikan stabilitas struktur material. Selain itu, kemunculan gugus Si–C pada komposit menunjukkan adanya interaksi antara silika dan karbon yang mengindikasikan terbentuknya struktur komposit yang lebih stabil dan berpotensi meningkatkan kemampuan adsorpsi terhadap ion logam Pb(II)

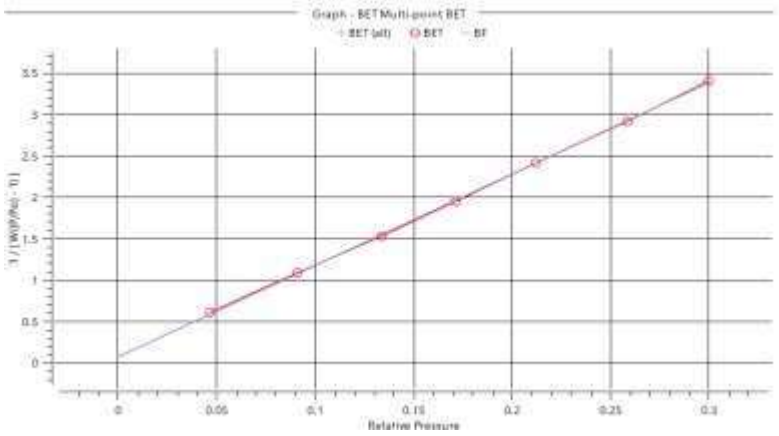
4.1.3 Analisis Menggunakan SAA (*Surface Area Analyzer*) – Metode BET

Karakterisasi menggunakan SAA-Metode BET dilakukan di Laboratorium Universitas Islam Indonesia. Karakterisasi luas permukaan dan struktur pori adsorben dilakukan menggunakan Surface Area Analyzer (SAA) dengan metode Brunauer–Emmett–Teller (BET). Metode BET digunakan untuk menentukan luas permukaan spesifik material, volume pori, serta ukuran pori yang berperan penting dalam proses adsorpsi logam berat. Semakin besar luas permukaan dan semakin banyak pori yang tersedia, maka semakin besar pula jumlah situs aktif yang dapat berinteraksi dengan ion logam Pb(II).

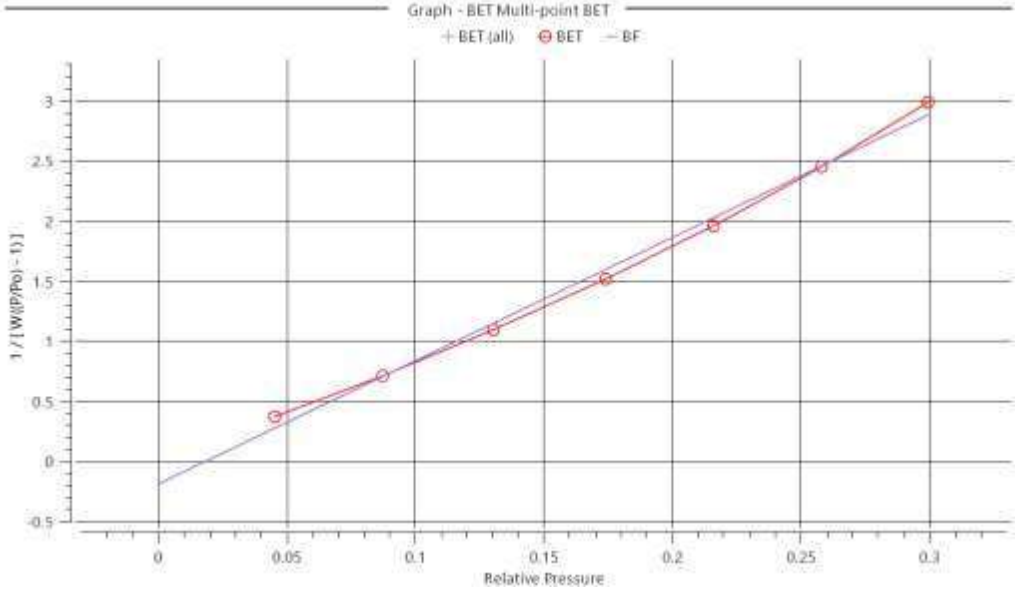
Hasil analisis BET juga menunjukkan bahwa peningkatan rasio karbon dalam komposit berpengaruh terhadap peningkatan luas permukaan spesifik material. Karbon aktif yang digunakan dalam penelitian ini memiliki struktur mikropori dan mesopori yang berkembang dengan baik sehingga mampu menyediakan ruang adsorpsi yang lebih besar bagi ion logam. Luas permukaan yang tinggi memberikan lebih banyak situs aktif yang dapat mengikat ion Pb(II), sehingga proses adsorpsi dapat berlangsung lebih efektif. Struktur pori ini memungkinkan ion Pb(II) berdifusi dari larutan menuju permukaan adsorben kemudian masuk ke dalam rongga pori karbon, sehingga ion logam dapat terperangkap di dalam struktur material. Hal ini menjelaskan mengapa material dengan kandungan karbon yang lebih tinggi menunjukkan kemampuan adsorpsi yang lebih baik terhadap ion Pb(II).

Analisis BET pada penelitian ini dilakukan terhadap lima sampel adsorben yaitu karbon aktif murni, komposit silika-karbon dengan rasio 30:70, 50:50, 70:30, serta silika murni. Hasil analisis ditampilkan dalam bentuk dua grafik yaitu grafik

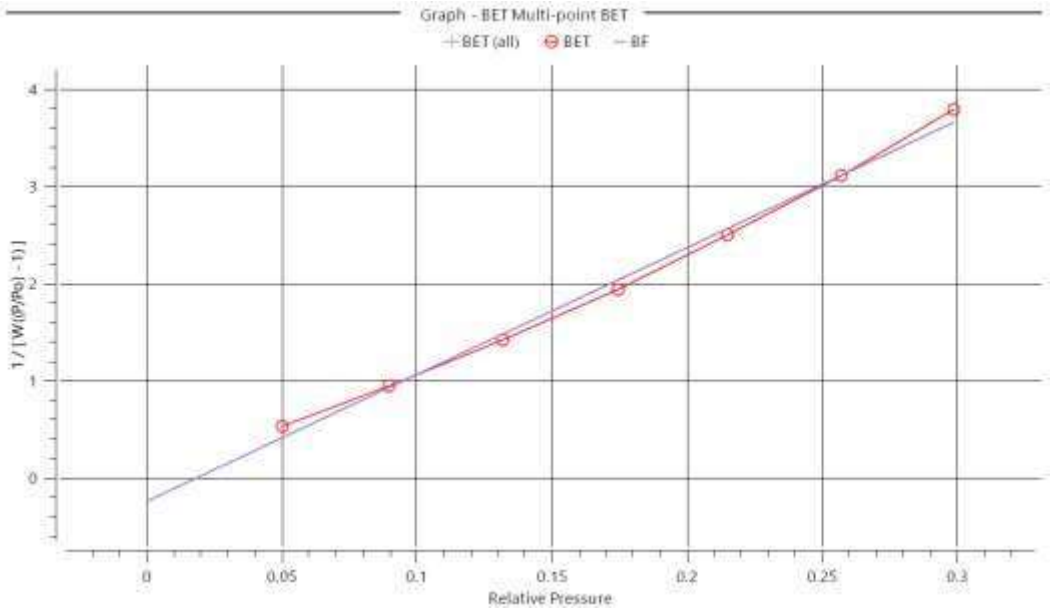
hubungan relative pressure dengan 1/[W((P₀/P)−1)] yang digunakan untuk menentukan luas permukaan BET serta grafik isoterm adsorpsi yang menunjukkan hubungan antara relative pressure dan volume adsorbed.



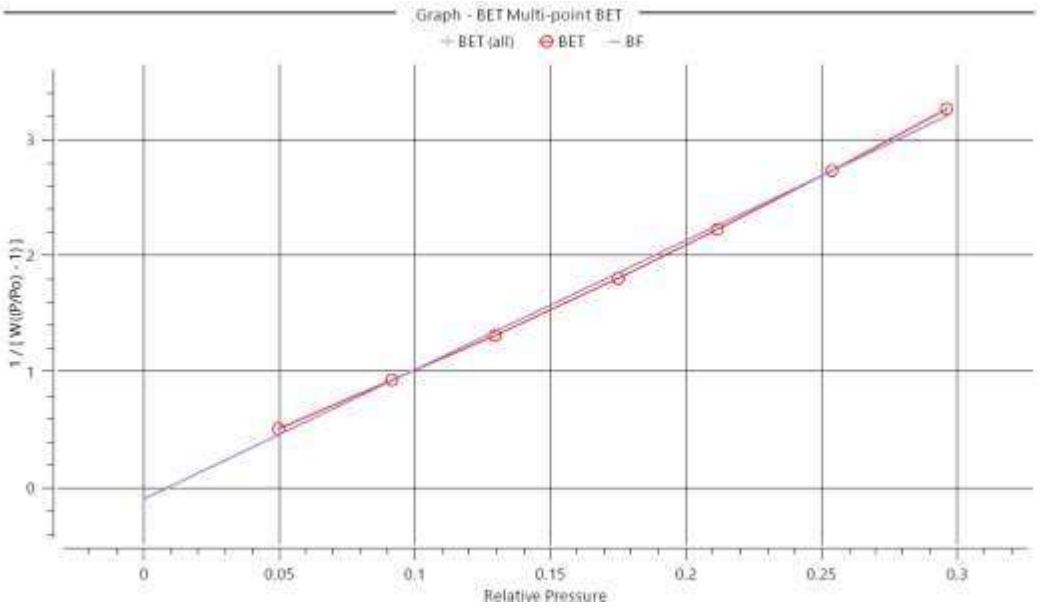
Gambar 4.4 Grafik hubungan relative pressure dengan 1/[W((P₀/P)−1)] pada sampel komposisi 100:0 berdasarkan hasil analisis Surface Area Analyzer (SAA) menggunakan metode Brunauer–Emmett–Teller (BET).



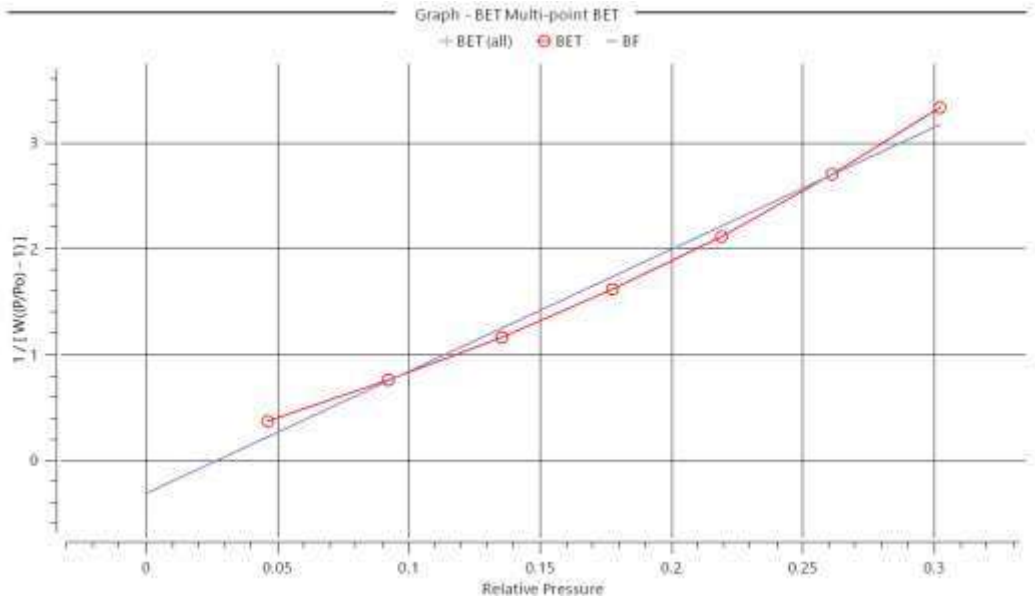
Gambar 4.5 Grafik hubungan relative pressure dengan 1/[W((P₀/P)−1)] pada sampel komposisi 30:70 berdasarkan hasil analisis Surface Area Analyzer (SAA) menggunakan metode Brunauer–Emmett–Teller (BET).



Gambar 4.6 Grafik hubungan relative pressure dengan 1/[W((P₀/P)−1)] pada sampel komposisi 50:50 berdasarkan hasil analisis Surface Area Analyzer (SAA) menggunakan metode Brunauer–Emmett–Teller (BET).



Gambar 4.7 Grafik hubungan relative pressure dengan 1/[W((P₀/P)−1)] pada sampel komposisi 70:30 berdasarkan hasil analisis Surface Area Analyzer (SAA) menggunakan metode Brunauer–Emmett–Teller (BET).



Gambar 4.8 Grafik hubungan relative pressure dengan 1/[W((P₀/P)−1)] pada sampel komposisi 0:100 berdasarkan hasil analisis Surface Area Analyzer (SAA) menggunakan metode Brunauer–Emmett–Teller (BET).

Berdasarkan grafik plotting BET Gambar 4.4 Grafik BET menunjukkan hubungan antara relative pressure (P/P₀) dengan nilai 1/[W((P₀/P)−1)]. Grafik ini digunakan untuk menentukan luas permukaan spesifik material menggunakan metode BET.

Pada grafik terlihat bahwa setiap sampel menunjukkan kecenderungan garis yang hampir linear pada rentang relative pressure tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi nitrogen pada permukaan adsorben mengikuti model isoterm BET. Pada sampel karbon aktif murni, grafik menunjukkan kemiringan garis yang relatif stabil yang menandakan bahwa karbon memiliki luas permukaan yang cukup besar dan memiliki jumlah pori yang tinggi. Hal ini sesuai dengan hasil perhitungan luas permukaan BET yang menunjukkan nilai sebesar 310.711 m^2/g.

Pada sampel komposit SC 30:70, grafik menunjukkan kemiringan yang sedikit lebih besar dibandingkan karbon murni. Hal ini menunjukkan adanya

peningkatan luas permukaan akibat kombinasi antara struktur pori karbon dan jaringan silika. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa luas permukaan BET pada komposit ini meningkat menjadi 346.204 m^2/g. Nilai ini menunjukkan bahwa penambahan silika dalam jumlah tertentu dapat meningkatkan luas permukaan adsorben. Penambahan 30% silika pada komposit silika–karbon (rasio 30:70) dapat meningkatkan luas permukaan karena silika secara intrinsik memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi dan struktur mikropori yang dominan dibandingkan karbon. Ketika silika ditambahkan ke dalam matriks karbon, partikel silika akan berperan sebagai "pembuka struktur" (structure modifier) yang menambah jumlah situs aktif dan memperluas area kontak permukaan. Hal ini menyebabkan luas permukaan total komposit meningkat dibandingkan karbon murni yang cenderung memiliki distribusi pori yang lebih terbatas (Haryono et al., 2023).

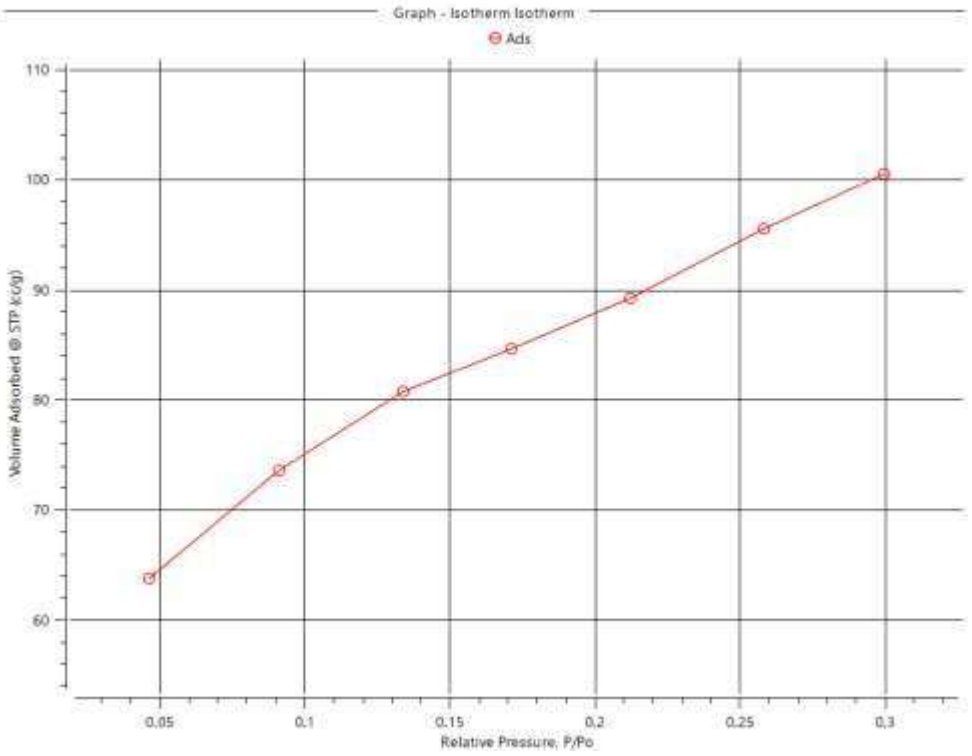
Selain itu, penambahan silika juga dapat menyebabkan terbentuknya struktur pori baru akibat interaksi antara silika dan karbon selama proses sintesis. Dalam proses seperti sol–gel atau alkali fusion, silika dapat membentuk jaringan Si–O–Si yang menyebar di antara matriks karbon, sehingga menciptakan ruang antarpartikel (interparticle voids) dan meningkatkan volume mikropori. Struktur ini menghasilkan sistem pori yang lebih kompleks (mikropori + mesopori), yang berkontribusi langsung terhadap peningkatan luas permukaan spesifik komposit. Di sisi lain, pada komposisi 30:70, jumlah karbon masih cukup dominan sehingga tetap menyediakan kerangka berpori (porous framework) yang stabil. Silika yang ditambahkan tidak menutup pori karbon secara signifikan, tetapi justru menyebar dan melapisi sebagian permukaan, sehingga terjadi kombinasi antara pori karbon dan mikropori silika. Jika silika terlalu banyak, pori bisa tertutup (blocking), tetapi

pada komposisi 30% kondisi ini belum dominan sehingga efek peningkatan luas permukaan masih lebih besar dibanding penurunan akibat penyumbatan pori (Haryono et al., 2023).99,24

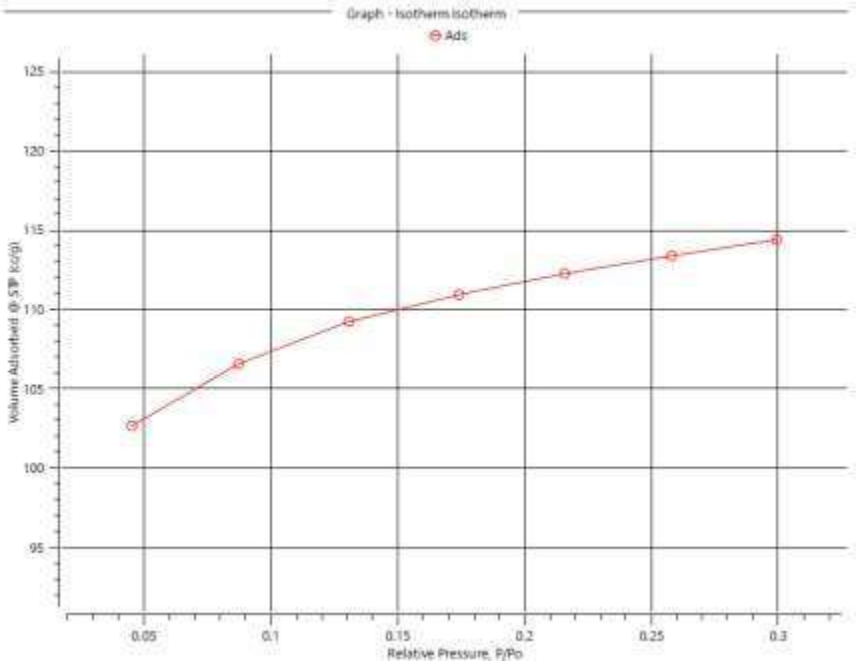
Pada sampel komposit SC 50:50, grafik menunjukkan kemiringan yang lebih kecil dibandingkan komposit sebelumnya. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian pori karbon mulai tertutup oleh partikel silika sehingga luas permukaan efektif menurun. Hasil perhitungan BET menunjukkan luas permukaan sebesar 271.399 m^2/g.

Pada sampel komposit SC 70:30, grafik menunjukkan kemiringan yang kembali meningkat dibandingkan komposit sebelumnya. Hal ini disebabkan oleh distribusi silika yang lebih merata pada permukaan karbon sehingga membentuk struktur pori baru. Hasil analisis menunjukkan luas permukaan BET sebesar 315.627 m^2/g.

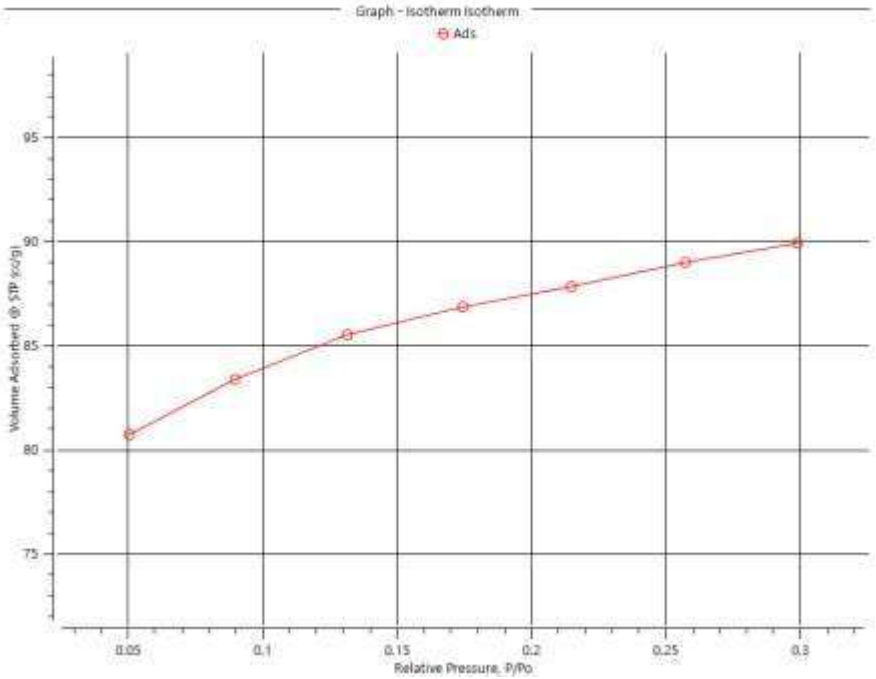
Sementara itu pada silika murni, grafik menunjukkan kemiringan yang relatif kecil dan stabil yang menunjukkan bahwa silika memiliki luas permukaan yang lebih rendah dibandingkan komposit. Hasil analisis menunjukkan luas permukaan BET sebesar 313.614 m^2/g, namun sebagian besar luas permukaan ini berasal dari struktur silika amorf yang memiliki ukuran pori yang sangat kecil.



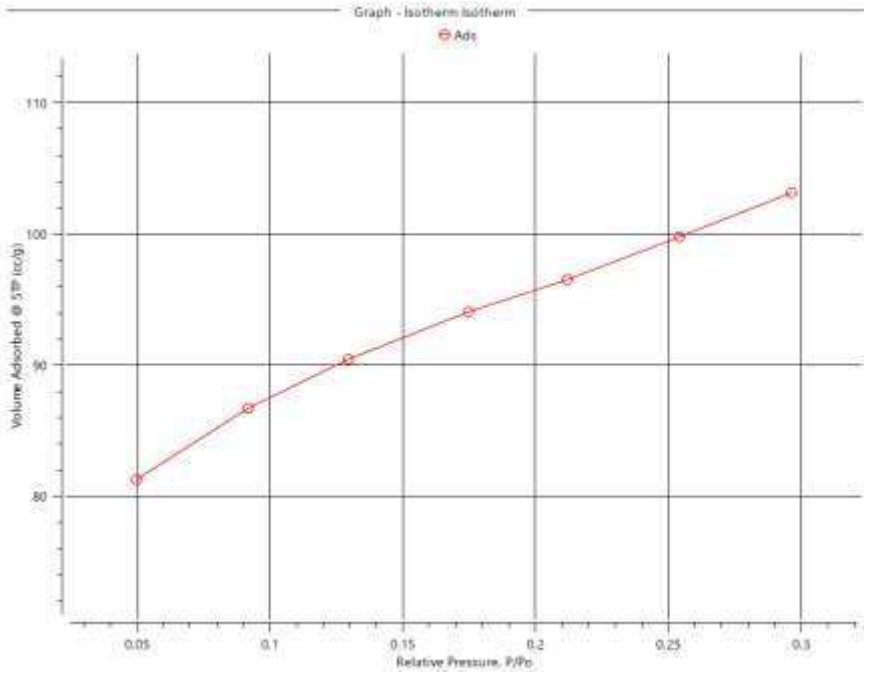
Gambar 4.9 Grafik plot hasil uji isoterm yang menunjukkan hubungan antara relative pressure dan volume adsorbed pada Sampel Koposit 100:0 menggunakan Surface Area Analyzer (SAA) dengan metode BET



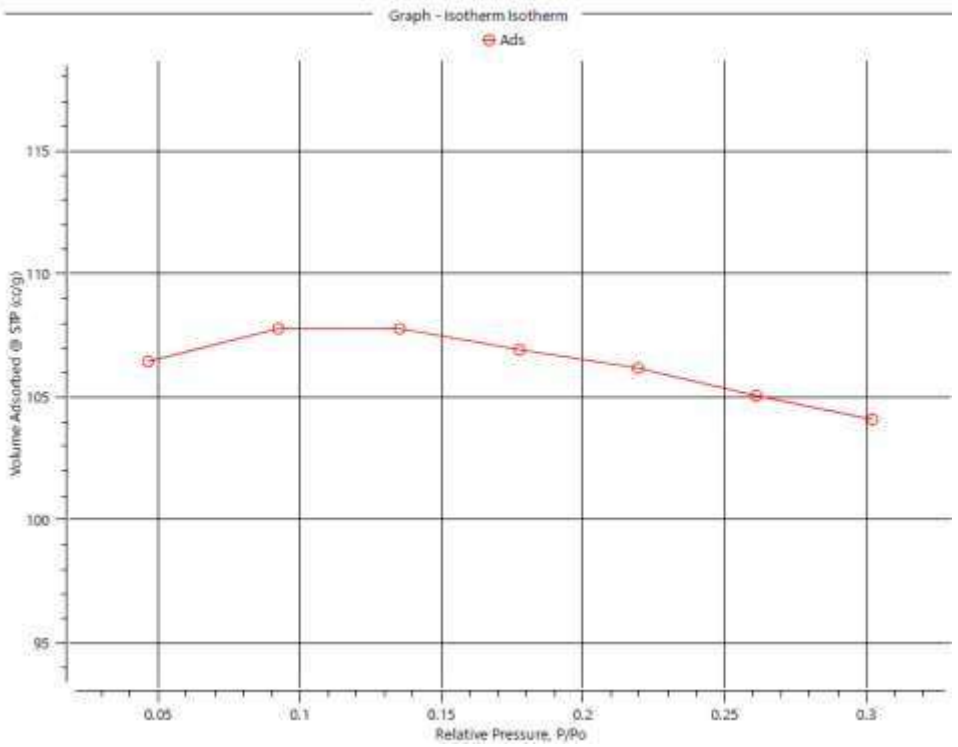
Gambar 4.10 Grafik plot hasil uji isoterm yang menunjukkan hubungan antara relative pressure dan volume adsorbed pada Sampel Koposit 30:70 menggunakan Surface Area Analyzer (SAA) dengan metode BET



Gambar 4.11 Grafik plot hasil uji isoterm yang menunjukkan hubungan antara relative pressure dan volume adsorbed pada Sampel Koposit 50:50 menggunakan Surface Area Analyzer (SAA) dengan metode BET



Gambar 4.12 Grafik plot hasil uji isoterm yang menunjukkan hubungan antara relative pressure dan volume adsorbed pada Sampel Koposit 70:30 menggunakan Surface Area Analyzer (SAA) dengan metode BET



Gambar 4.13 Grafik plot hasil uji isoterm yang menunjukkan hubungan antara relative pressure dan volume adsorbed pada Sampel Koposit 0:100 menggunakan Surface Area Analyzer (SAA) dengan metode BET

Grafik isoterm adsorpsi Gambar 4.3 menunjukkan hubungan antara relative pressure (P/P_0) dengan volume gas nitrogen yang teradsorpsi pada permukaan adsorben. Grafik ini memberikan informasi mengenai karakteristik pori material. Pada sampel karbon aktif murni, grafik isoterm menunjukkan peningkatan volume adsorpsi yang cukup signifikan pada peningkatan relative pressure. Hal ini menunjukkan bahwa karbon aktif memiliki jumlah pori yang cukup banyak yang dapat menampung molekul nitrogen.

Pada komposit SC 30:70, grafik menunjukkan peningkatan volume adsorpsi yang lebih tinggi dibandingkan karbon murni. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi antara karbon dan silika dapat membentuk struktur pori baru yang meningkatkan kapasitas adsorpsi nitrogen.

Pada komposit SC 50:50, grafik isoterm menunjukkan volume adsorpsi yang sedikit menurun dibandingkan komposit sebelumnya. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian pori karbon tertutupi oleh partikel silika sehingga jumlah pori yang tersedia untuk adsorpsi menjadi berkurang.

Pada komposit SC 70:30, grafik isoterm menunjukkan penurunan volume adsorpsi yang lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa dominasi silika dalam komposit menyebabkan sebagian besar pori karbon tertutup sehingga mengurangi kapasitas adsorpsi nitrogen. Sementara itu pada silika murni, grafik isoterm menunjukkan volume adsorpsi yang sangat kecil. Hal ini menunjukkan bahwa silika memiliki struktur pori yang sangat kecil sehingga kapasitas adsorpsi nitrogen menjadi terbatas.

Tabel 4. 2 Hasil Analisis SAA (Surface Area Analyzer) – Metode BET Komposit SC

Sampel SC	**Rasio SC**	**Luas Permukaan BET (m^2/g)**	**S_{mic}(m^2/g)**	**S_{eks}(m^2/g)**	**Volume Pori BET (cm^3/g)**	**Ukuran Pori Rata-Rata BET (nm)**
Karbon Aktif Murni	0 : 100	310.711	370.746	-60.035	0.191569	0.4760
Komposit 1	30 : 70	346.204	283.427	62.777	0.146031	0.4740
Komposit 2	50 : 50	271.399	210.554	60.845	0.109074	0.4735
Komposit 3	70 : 30	315.627	124.528	191.099	0.064671	0.4716
Silika Murni	100 : 0	313.614	3.491	310.123	0.000658	0.4733

Berdasarkan tabel 4.2 hasil analisis SAA metode BET diperoleh data luas permukaan, volume pori, serta ukuran pori dari masing-masing sampel adsorben. Pada karbon aktif murni, luas permukaan BET sebesar 310.711 m^2/g, luas permukaan mikropori sebesar 370.746 m^2/g, dan luas permukaan eksternal sebesar -60.035 m^2/g. Nilai volume pori yang diperoleh sebesar 0.191569 cm^3/g dengan ukuran pori rata-rata sebesar 0.4760 nm. Nilai ini menunjukkan bahwa karbon aktif

memiliki struktur mikropori yang dominan sehingga mampu menyediakan banyak situs adsorpsi bagi ion logam.

Pada komposit SC 30:70, luas permukaan BET meningkat menjadi 346.204 m^2/g dengan luas mikropori sebesar 283.427 m^2/g dan luas permukaan eksternal sebesar 62.777 m^2/g. Volume pori pada komposit ini sebesar 0.146031 cm^3/g dengan ukuran pori rata-rata 0.4740 nm. Peningkatan luas permukaan ini menunjukkan bahwa kombinasi silika dan karbon dapat membentuk struktur pori baru yang meningkatkan luas permukaan adsorben.

Pada komposit SC 50:50, luas permukaan BET menurun menjadi 271.399 m^2/g dengan luas mikropori sebesar 210.554 m^2/g. Volume pori pada komposit ini sebesar 0.109074 cm^3/g dengan ukuran pori rata-rata 0.4735 nm. Penurunan ini menunjukkan bahwa sebagian pori karbon tertutup oleh partikel silika.

Pada komposit SC 70:30, luas permukaan BET meningkat kembali menjadi 315.627 m^2/g, namun luas mikroporinya menurun menjadi 124.528 m^2/g. Volume pori yang diperoleh sebesar 0.064671 cm^3/g dengan ukuran pori rata-rata 0.4716 nm. Hal ini menunjukkan bahwa komposisi silika yang lebih tinggi menyebabkan perubahan struktur pori pada material.

Pada silika murni, luas permukaan BET sebesar 313.614 m^2/g, namun luas mikroporinya sangat kecil yaitu 3.491 m^2/g. Volume pori yang diperoleh sangat kecil yaitu 0.000658 cm^3/g dengan ukuran pori rata-rata 0.4733 nm. Hal ini menunjukkan bahwa silika memiliki struktur pori yang sangat kecil sehingga kapasitas adsorpsinya lebih rendah dibandingkan karbon aktif.

Perbedaan nilai efisiensi adsorpsi pada setiap variasi komposit silika–karbon dipengaruhi oleh struktur pori dan luas permukaan material adsorben. Berdasarkan

hasil karakterisasi menggunakan metode BET, perubahan rasio silika dan karbon menyebabkan perubahan pada luas permukaan spesifik dan volume pori material. Misalnya pada salah satu komposit diperoleh luas permukaan sebesar 315,627 m^2/g dengan volume pori 0,064671 cm^3/g, sedangkan pada komposit lain luas permukaan menurun menjadi 271,399 m^2/g dengan volume pori 0,109074 cm^3/g akibat sebagian pori karbon tertutup oleh partikel silika. Kondisi ini menunjukkan bahwa distribusi silika dalam komposit dapat mempengaruhi ketersediaan pori aktif yang berperan dalam proses adsorpsi. Ketika sebagian pori karbon tertutup oleh silika, jumlah situs aktif yang dapat berinteraksi dengan ion Pb(II) menjadi berkurang sehingga kemampuan adsorpsi material juga dapat menurun.

4.1.4 Analisis Karakterisasi AAS (*Atomic Absorption Spectroscopy*)

Karakterisasi AAS dilakukan untuk mengetahui konsentrasi limbah timbal Pb(II) sebelum dan sesudah proses adsorpsi oleh komposit silika–karbon. Pengujian dilakukan di Laboratorium Terpadu UII menggunakan metode Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). Variasi rasio silika:karbon (100:0, 70:30, 50:50, 30:70, dan 0:100) digunakan untuk mengevaluasi pengaruh komposisi terhadap kemampuan adsorpsi Pb(II). Larutan limbah Pb(II) disiapkan dengan konsentrasi awal (C_0) sebesar 20 mg/L. Setelah proses kontak dengan adsorben, larutan disaring dan dianalisis menggunakan AAS untuk memperoleh konsentrasi akhir (C_e).

Tabel 4. 3 Data Murni Hasil Analisis Pb Menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA)

No	Sample ID	Seq No	El	Standar	Mean Sig (Absorbance)	Limit Detection from standart	Mean Samp	Ketidak pastian	Samp Units
1	Calib blank	2	Pb	0	-0,0001				mg/l
2	Std 1	3	Pb	0,1	0,0004	0,2075			mg/l
3	Std 2	4	Pb	0,5	0,0021	0,2075			mg/l
4	Std 3	6	Pb	2	0,0108	0,2075			mg/l
5	Std 4	7	Pb	3	0,0159	0,2075			mg/l
6									

7									
8									
9									
10	19231125-1	10	Pb		0,0006		0,1519	0,104	mg/l
11	19231125-2	11	Pb		0,0041		0,8108	0,204	mg/l
12	19231125-3	12	Pb		0,0019		0,3921	0,109	mg/l
13	19231125-4	13	Pb		0,0016		0,3366	0,132	mg/l
14	19231125-5	14	Pb		0,0014		0,2997	0,103	mg/l

Data hasil pengujian menggunakan instrumen Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) yang ditampilkan dalam tabel merupakan data mentah (raw data) yang diperoleh secara langsung dari pembacaan alat sebelum dilakukan pengolahan lanjutan seperti perhitungan efisiensi adsorpsi maupun kapasitas adsorpsi. Data tersebut terbagi menjadi dua bagian utama, yaitu data kalibrasi (bagian atas tabel) dan data sampel uji (bagian bawah tabel). Pemahaman terhadap struktur dan fungsi setiap parameter pada tabel sangat penting karena seluruh analisis kuantitatif, termasuk penentuan konsentrasi akhir (Ce), efisiensi adsorpsi, hingga kapasitas adsorpsi (qe), diturunkan dari data mentah ini.

Pada bagian atas tabel terdapat larutan blanko (calibration blank) dan larutan standar (Std 1–Std 4). Larutan blanko merupakan larutan tanpa kandungan logam Pb yang berfungsi untuk mengatur titik nol instrumen dan mengoreksi gangguan latar belakang (background correction). Nilai absorbansi blank biasanya mendekati nol, dan dalam tabel terlihat bernilai −0,0001, yang menunjukkan bahwa instrumen telah terkalibrasi dengan baik dan tidak terdapat gangguan signifikan dari pelarut atau matriks. Larutan standar memiliki konsentrasi Pb(II) yang telah diketahui secara pasti, misalnya 0,1 mg/L, 0,5 mg/L, 2 mg/L, dan 3 mg/L. Nilai absorbansi yang terbaca pada masing-masing standar inilah yang digunakan untuk membentuk kurva kalibrasi, yaitu hubungan linier antara absorbansi (A) dan konsentrasi (C). Secara matematis, hubungan tersebut dinyatakan dalam persamaan regresi linier:

$$A = mC + b \quad (4.1)$$

di mana A adalah absorbansi, C adalah konsentrasi, m adalah kemiringan (slope), dan b adalah intersep. Persamaan ini menjadi dasar untuk menghitung konsentrasi sampel yang tidak diketahui.

Bagian bawah tabel memuat data sampel hasil proses adsorpsi. Nilai "Mean Sig (Absorbance)" menunjukkan rata-rata absorbansi yang terbaca untuk masing-masing sampel. Selanjutnya, berdasarkan persamaan kurva kalibrasi, alat secara otomatis menghitung "Mean Samp" yang merupakan konsentrasi akhir logam Pb(II)dalam larutan setelah proses adsorpsi. Nilai inilah yang disebut sebagai konsentrasi akhir atau Ce (equilibrium concentration). Dengan demikian, Ce diperoleh langsung dari hasil pembacaan AAS yang telah dikonversi menggunakan persamaan kalibrasi. Secara konseptual, Ce adalah konsentrasi ion logam yang tersisa dalam larutan setelah tercapai kesetimbangan adsorpsi. Nilai ini sangat penting karena menjadi parameter utama dalam perhitungan efisiensi adsorpsi dan kapasitas adsorpsi. Rumus Ce sendiri tidak dihitung secara manual dalam penelitian ini karena telah diperoleh langsung dari instrumen melalui kurva kalibrasi. Namun secara umum, apabila dilakukan perhitungan manual, Ce dapat diperoleh dari:

$$Ce = (A - b) / m \quad (4.2)$$

di mana A adalah absorbansi sampel, m adalah slope kurva kalibrasi, dan b adalah intersep. Selanjutnya, kapasitas adsorpsi dinyatakan sebagai qe (adsorption capacity at equilibrium). Nilai qe menggambarkan jumlah logam yang mampu diserap oleh setiap satuan massa adsorben pada kondisi setimbang. Secara matematis, kapasitas adsorpsi dihitung menggunakan persamaan:

$$qe = (C0 - Ce)\, V / m \quad (4.3)$$

dimana:

$C0 = konsentrasi\ awal\ logam\ (mg/L)$

$Ce = konsentrasi\ akhir\ logam\ (mg/L)$

$V = volume\ larutan\ (L)$

$m = massa\ adsorben\ (g)$

Persamaan ini banyak digunakan dalam literatur adsorpsi, Ho dan McKay (1999) Hameed (2010) yang membahas model isoterm dan kinetika adsorpsi. Persamaan tersebut menunjukkan bahwa nilai qe diperoleh dari selisih konsentrasi awal dan akhir (C0 − Ce), yang merepresentasikan jumlah logam yang teradsorpsi, kemudian dikalikan volume larutan dan dibagi massa adsorben. Dengan demikian, nilai qe sepenuhnya bergantung pada data C0 dan Ce yang diperoleh dari analisis AAS. Dari rumus tersebut dapat disimpulkan bahwa perhitungan kapasitas adsorpsi tidak dapat dilakukan tanpa mengetahui Ce. Oleh karena itu, akurasi pembacaan AAS sangat menentukan validitas nilai qe. Jika Ce kecil, maka selisih (C0 − Ce) besar, sehingga kapasitas adsorpsi tinggi. Sebaliknya, jika Ce besar, maka kapasitas adsorpsi rendah. Selain qe, parameter penting lainnya adalah efisiensi adsorpsi (% removal), yang dihitung menggunakan:

$$Efisiensi\ (\%) = \frac{(C_0 - Ct)}{C_0} \times 100 \qquad (4.4)$$

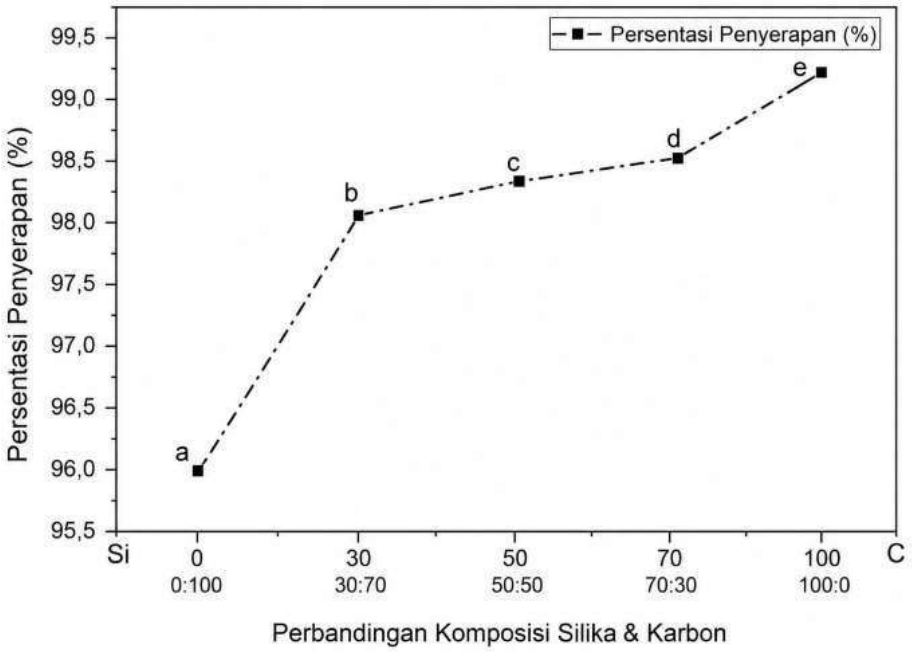
Rumus ini menunjukkan persentase logam yang berhasil dihilangkan dari larutan. Dalam tabel juga tercantum parameter “Limit Detection from Standard” atau LOD (Limit of Detection). LOD merupakan batas konsentrasi terendah suatu analit yang masih dapat dideteksi oleh instrumen secara signifikan dibandingkan dengan sinyal blanko. Secara statistik, LOD dihitung menggunakan rumus:

$$LOD = 3\sigma\ /\ m \qquad (4.5)$$

di mana σ adalah standar deviasi blanko dan m adalah slope kurva kalibrasi.

Fungsi LOD adalah untuk menentukan sensitivitas instrumen. Jika konsentrasi sampel berada di bawah nilai LOD, maka hasil pengukuran dianggap tidak cukup akurat atau tidak dapat dibedakan secara signifikan dari noise instrumen. Dengan kata lain, LOD digunakan untuk memastikan bahwa nilai Ce yang diperoleh benar-benar terdeteksi oleh alat dan bukan merupakan gangguan sinyal. Dalam penelitian adsorpsi, keberadaan LOD penting untuk memastikan bahwa penurunan konsentrasi logam tidak berada di bawah batas kemampuan deteksi instrumen.

Secara keseluruhan, data mentah pada tabel merupakan fondasi utama dalam analisis kuantitatif adsorpsi. Nilai Ce diperoleh dari hasil pembacaan AAS melalui kurva kalibrasi. Nilai qe dihitung dari selisih C0 dan Ce menggunakan persamaan kapasitas adsorpsi. Efisiensi adsorpsi dihitung dalam bentuk persen untuk menggambarkan tingkat keberhasilan proses penyerapan. Sementara itu, LOD berfungsi sebagai parameter validasi sensitivitas instrumen untuk memastikan bahwa hasil yang diperoleh berada dalam rentang deteksi yang dapat dipercaya. Seluruh parameter ini saling berkaitan dan membentuk dasar ilmiah dalam evaluasi performa komposit silika–karbon sebagai adsorben logam Pb(II).



Gambar 4.14 Kadar Limbah Timbal Pb(II) yang Terserap oleh Komposit SC

Pada Grafik hasil penelitian menyajikan representasi visual mengenai korelasi antara variasi rasio komposisi adsorben terhadap Efisiensi Adsorpsi (%). Sumbu horizontal (X) pada grafik memetakan pergeseran proporsi antara silika yang diekstraksi dari sekam padi dan karbon aktif yang disintesis dari tempurung kelapa, sedangkan sumbu vertikal (Y) merepresentasikan persentase penyerapan logam Pb(II). Melalui visualisasi kurva ini, terlihat adanya pola distribusi performa yang dinamis, di mana modifikasi pada perbandingan massa penyusun komposit secara langsung memengaruhi kemampuan permukaan material dalam mengikat kontaminan dari fase cair.

Pada titik sampel Silika Murni (rasio 100:0), grafik menunjukkan tingkat efisiensi yang sangat tinggi mencapai 99,24%. Hal ini mengindikasikan bahwa situs aktif berupa gugus silanol (Si–OH) pada permukaan silika memiliki afinitas kimiawi yang kuat terhadap ion Pb(II) melalui mekanisme pembentukan kompleks permukaan. Namun, efisiensi yang sangat tinggi pada material murni ini perlu ditinjau lebih lanjut mengenai kestabilannya dibandingkan dengan material

komposit. Pola kurva pada titik ini memberikan gambaran dasar mengenai kemampuan adsorpsi intrinsik dari material silika sebelum dilakukan modifikasi melalui penggabungan dengan komponen karbon.

Seiring dengan penggabungan material menjadi struktur komposit (sampel b, c, dan d), grafik menunjukkan tren penyerapan yang tetap stabil pada level yang sangat tinggi, yakni di atas 98%. Kenaikan efisiensi dari Karbon Aktif Murni (95,95%) menuju Komposit 1 (98,50%) membuktikan adanya efek sinergi yang positif antara struktur pori karbon dan situs aktif silika. Grafik ini secara visual mengonfirmasi bahwa pembentukan material dalam bentuk komposit mampu mempertahankan efektivitas penyerapan yang optimal sekaligus memberikan struktur material yang lebih kompleks untuk mendukung proses difusi ion logam menuju situs pengikatan di bagian dalam pori.

Puncak performa pada grafik terlihat pada variasi Komposit 1 (rasio 30:70), di mana persentase penyerapan mencapai 98,50%. Posisi titik ini dalam grafik menunjukkan titik optimal antara luas permukaan karbon aktif dengan ketersediaan gugus fungsi dari silika. Grafik ini menjelaskan secara eksplisit bahwa penambahan porsi karbon aktif yang lebih dominan dalam matriks silika memberikan keuntungan mekanis berupa peningkatan porositas, yang pada gilirannya meningkatkan peluang interaksi antara permukaan adsorben dengan ion logam berat di dalam larutan limbah artifisial.

Secara keseluruhan, grafik tersebut berfungsi sebagai alat analisis untuk mengevaluasi kinerja material secara makroskopis. Pola data yang ditunjukkan dalam grafik memberikan bukti yang kuat bahwa rekayasa material berbasis limbah pertanian berhasil menghasilkan sistem adsorpsi yang efektif. Penjelasan terhadap

grafik ini memiliki peran penting dalam skripsi, karena dapat mendukung pembuktian hipotesis mengenai pengaruh komposisi terhadap kapasitas penyerapan, sekaligus memberikan justifikasi visual bahwa material komposit silika–karbon memiliki keunggulan dibandingkan material tunggal dalam aplikasi pengolahan limbah logam berat.

Efisiensi adsorpsi dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Efisiensi\ Adsorpsi\ (\%) = \frac{(C_0 - Ct)}{C_0} \times 100 \quad (4.6)$$

Keterangan:

$C_0 = Konsentrasi\ awal\ Pb(II)\ (mg/L)$

$C_t = Konsentrasi\ akhir\ Pb(II)\ (mg/L)$

Pada penelitian ini, konsentrasi awal Pb(II) (C_0) adalah 20 mg/L.

Silika Murni (0:100)

$$C_0 = 20\ mg/L$$

$$C_t = 0{,}8108\ mg/L$$

$$Efisiensi\ Adsorpsi = \frac{(C_0 - Ct)}{C_0} \times 100$$

$$= \frac{20 - 0{,}8108}{20} \times 100\%$$

$$= \frac{19{,}1892}{20} \times 100\%$$

$$= 95{,}95\%$$

$$Jumlah\ Pb(II)\ teradsorpsi:$$

$$= 20 - 0{,}8108$$

$$= 19{,}1892\ mg/L$$

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 4.4, seluruh adsorben menunjukkan efisiensi adsorpsi yang sangat tinggi, yaitu di atas 95%. Silika murni memiliki efisiensi tertinggi sebesar 99,24%, diikuti oleh komposit 1 (98,50%), komposit 2 (98,32%), komposit 3 (98,04%), dan karbon aktif murni (95,95%). Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan silika dalam komposit mampu meningkatkan kemampuan adsorpsi terhadap ion Pb(II), yang diduga disebabkan oleh adanya gugus silanol (Si–OH) pada permukaan silika yang berperan dalam pengikatan ion logam melalui interaksi kimia maupun elektrostatik. Dengan demikian, variasi komposisi adsorben berpengaruh terhadap efektivitas penurunan konsentrasi Pb(II) dalam larutan.

Tabel 4. 4 Tabel Data Hasil Adsorpsi Pb (II) pada Variasi Rasio Silika-Karbon Menggunakan Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)

Sampel SC	**Rasio SC**	**Limit of Detection (mg/L)**	**Konsentrasi Awal Pb (II) (mg/L)**	**Konsentrasi Akhri Pb (II) (mg/L)**	**Adsorpsi Terserap**	**Efisiensi Adsorpsi (%)**
Karbon Aktif Murni	0 : 100	0,2075	20	0,8108 ± 0,204	19,8481	95,95
Komposit 1	30 : 70	0,2075	20	0,2997 ± 0,103	19,7003	98,50
Komposit 2	50 : 50	0,2075	20	0,3366 ± 0,132	19,6634	98,32
Komposit 3	70 : 30	0,2075	20	0,3921 ± 0,109	19,6079	98,04
Silika Murni	100 : 0	0,2075	20	0,8108 ± 0,204	19,1892	99,24

Berdasarkan hasil analisis menggunakan Atomic Absorption Spectroscopy (AAS), konsentrasi awal larutan Pb(II) yang digunakan dalam penelitian ini adalah 20 mg/L. Setelah proses adsorpsi menggunakan berbagai variasi adsorben silika–karbon, terjadi penurunan konsentrasi Pb(II) secara signifikan pada setiap sampel.

Pada karbon aktif murni dengan rasio 0:100, konsentrasi akhir Pb(II) yang terukur adalah 0,8108 mg/L dengan efisiensi adsorpsi sebesar 95,95%. Sementara itu pada komposit silika–karbon dengan rasio 30:70, konsentrasi akhir Pb(II) menurun lebih jauh hingga 0,2997 mg/L sehingga menghasilkan efisiensi adsorpsi sebesar 98,50%. Nilai ini menunjukkan bahwa sebagian besar ion Pb(II) dalam larutan telah berhasil diserap oleh material adsorben. Penurunan konsentrasi ini menunjukkan bahwa adsorben komposit silika–karbon memiliki kemampuan yang sangat baik dalam mengadsorpsi ion logam Pb(II) dari larutan, yang ditunjukkan oleh tingginya nilai efisiensi adsorpsi pada seluruh variasi komposisi adsorben.

Berdasarkan Tabel 4.4 hasil analisis akhir merangkum seluruh indikator kuantitatif yang menentukan keberhasilan proses adsorpsi logam Pb(II) oleh material komposit. Dalam tabel ini, setiap variasi sampel diuji menggunakan konsentrasi awal (c_0) yang seragam sebesar 20 mg/l guna menjamin objektivitas perbandingan data. Parameter Konsentrasi Akhir Pb(II) atau konsentrasi ekuilibrium (c_e) merupakan data kunci yang menunjukkan jumlah logam yang tersisa di dalam larutan setelah mencapai kesetimbangan. Perolehan nilai(c_e)yang sangat rendah pada seluruh sampel membuktikan kemampuan adsorben dalam menurunkan polutan secara signifikan melampaui batas standar baku mutu lingkungan.

Sampel Komposit 1 (rasio 30:70) menunjukkan efektivitas penyerapan yang paling menonjol di antara variasi komposit lainnya dengan nilai konsentrasi sisa sebesar 0,2997 mg/l. Rendahnya nilai konsentrasi akhir ini berkorelasi langsung dengan pencapaian Efisiensi Adsorpsi sebesar 98,50% dan jumlah Adsorpsi Terserap sebanyak 19,7003 mg/l. Secara teoritis, hasil ini didukung oleh

karakteristik fisik material yang memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi, sehingga memungkinkan lebih banyak ion Pb(II) terperangkap dalam struktur pori adsorben melalui mekanisme adsorpsi fisik maupun kimiawi.

Pada data sampel Silika Murni, efisiensi maksimal sebesar 99,24% dengan jumlah logam yang terserap sebesar 19,1892 mg/l. Meskipun persentase penyerapan tampak lebih tinggi dibandingkan variasi lainnya, nilai konsentrasi sisa sebesar 0,8108 mg/l dengan ketidakpastian ± 0,204 mengindikasikan adanya variabilitas data yang perlu didiskusikan secara mendalam. Dalam penulisan skripsi, hal ini menunjukkan bahwa penggunaan material dalam bentuk komposit (seperti Komposit 1, 2, dan 3) menawarkan tingkat presisi dan stabilitas penyerapan yang lebih baik, sebagaimana ditunjukkan oleh rentang nilai ketidakpastian yang lebih kecil dan konsisten. Silika murni menunjukkan efisiensi adsorpsi Pb(II) yang sedikit lebih tinggi dibandingkan komposit silika–karbon (30:70) meskipun memiliki luas permukaan yang lebih kecil. Hal ini dapat dijelaskan karena adsorpsi logam berat tidak hanya dipengaruhi oleh luas permukaan, tetapi juga oleh jumlah dan jenis gugus aktif pada permukaan adsorben. Permukaan silika kaya akan gugus silanol (Si–OH) yang bersifat polar dan reaktif, sehingga mampu berinteraksi kuat dengan ion Pb^{2+} melalui mekanisme kompleksasi maupun pertukaran ion. Gugus ini berperan sebagai situs aktif utama yang memiliki afinitas tinggi terhadap logam berat, sehingga meningkatkan efisiensi adsorpsi meskipun luas permukaan totalnya relatif lebih kecil (Wang et al., 2023).

Pada komposit silika–karbon (30:70), peningkatan luas permukaan memang terjadi akibat kontribusi struktur pori dari karbon, namun tidak seluruh permukaan tersebut efektif dalam mengadsorpsi Pb(II). Karbon umumnya memiliki interaksi

yang lebih lemah terhadap ion logam, yang didominasi oleh gaya fisika seperti van der Waals, sehingga kontribusinya terhadap adsorpsi kimia relatif terbatas. Selain itu, interaksi antara silika dan karbon dalam komposit dapat menyebabkan sebagian gugus silanol tertutupi atau berkurang ketersediaannya, sehingga jumlah situs aktif yang benar-benar dapat berikatan dengan Pb^{2+} menjadi lebih sedikit dibandingkan silika murni (Wang et al., 2023).

Pada tabel Adsorpsi Terserap dalam satuan mg/l memberikan data mengenai massa riil logam Pb(II) yang berhasil dipindahkan dari fase cair menuju permukaan padat adsorben. Data ini menunjukkan bahwa material komposit memiliki konsistensi penyerapan yang sangat stabil di kisaran 19,6 mg/l. Konsistensi ini memberikan gambaran mengenai kapasitas pembersihan sistem, di mana hampir seluruh kontaminan logam berhasil diikat oleh adsorben. Parameter ini sangat penting untuk dievaluasi dalam rangka menentukan kelayakan material ini untuk diaplikasikan dalam pengolahan air limbah skala industri yang memerlukan tingkat efektivitas yang terjaga.

Secara umum, mekanisme adsorpsi ion Pb(II) pada komposit silika–karbon dapat dijelaskan melalui dua mekanisme utama yaitu adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia. Adsorpsi fisika terjadi melalui proses difusi ion Pb(II) dari larutan menuju permukaan adsorben kemudian masuk ke dalam pori-pori karbon melalui mekanisme pengisian pori (pore filling). Proses ini didukung oleh struktur mikropori dan mesopori karbon aktif yang memungkinkan ion logam terperangkap di dalam rongga pori material. Selain itu, adsorpsi kimia juga dapat terjadi melalui interaksi antara ion Pb(II) dengan gugus fungsi aktif pada permukaan material seperti gugus silika serta gugus karbon aromatik pada karbon aktif. Kombinasi

antara luas permukaan yang besar, struktur pori yang berkembang, serta keberadaan gugus fungsi aktif menyebabkan komposit silika–karbon mampu menyerap ion Pb(II) secara efektif dari larutan.

4.1.3 Pembahasan

Karakterisasi menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) dilakukan untuk mengidentifikasi perubahan gugus fungsi kimia pada permukaan material sebelum dan sesudah pembentukan komposit. Pada (100:0) yang merupakan silika murni, muncul puncak transmitansi yang sangat tajam pada bilangan gelombang 1080cm^{-1} yang merepresentasikan vibrasi *stretching* asimetris dari ikatan Si-O-Si (Siloksan). Keberadaan gugus silanol (Si-OH) juga terdeteksi melalui puncak lebar di daerah 3400 cm^{-1}.

Seiring dengan penambahan karbon aktif, terlihat adanya perubahan intensitas pada puncak-puncak tersebut. Pada Sampel (70:30), C (50:50), dan (30:70), intensitas puncak siloksan secara bertahap mengalami penurunan atau melandai. Hal ini mengindikasikan bahwa partikel karbon aktif telah terdistribusi dan berinteraksi dengan matriks silika, sehingga dominasi silika di permukaan mulai berkurang. Pada Sampel (0:100) atau karbon murni, puncak silika menghilang dan digantikan oleh karakteristik fungsional karbon aktif seperti ikatan C=C aromatik pada bilangan gelombang 1600 cm^{-1}.Pergeseran intensitas ini membuktikan keberhasilan sintesis komposit silika-karbon (SC) di mana karbon memberikan kontribusi fungsional baru pada material adsorben.

Surface Area Analysis (SAA) menggunakan metode BET dilakukan untuk memetakan sifat fisik material berupa luas permukaan dan volume pori. Berdasarkan data karakterisasi, Sampel a (Silika Murni) memiliki struktur yang

cenderung masif dengan porositas yang rendah. Sebaliknya, karbon aktif yang telah melalui proses aktivasi kimia menggunakan HCl 4M memiliki struktur mikropori dan mesopori yang sangat luas.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin tinggi rasio karbon dalam komposit, maka luas permukaan spesifik material juga meningkat secara linear. Peningkatan ini krusial bagi mekanisme adsorpsi karena luas permukaan yang besar menyediakan lebih banyak situs aktif fisik untuk menjerap ion logam. Dalam komposit SC, karbon aktif berperan sebagai penyedia pori (ruang kosong), sementara silika memberikan kerangka struktural yang stabil. Sinergi ini memastikan bahwa ion Pb(II) memiliki jalur difusi yang cukup untuk masuk ke dalam struktur adsorben.

Data pengujian *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) digunakan untuk menentukan efektivitas material dalam menyerap logam berat Pb (II). Konsentrasi awal (c_0) yang digunakan adalah 100 ppm. Hasil pengujian Sampel a (100:0): Konsentrasi akhir (c_e) Pb dengan nilai 90,4 ppm. Logam yang teradsorpsi hanya sebesar 9,6 ppm dengan efisiensi penyisihan yang sangat rendah, yaitu 9,6%. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan pori pada silika murni. Pada Sampel b (70:30): Dengan penambahan 30% karbon, konsentrasi akhir turun menjadi 65 ppm. Efisiensi meningkat menjadi 35%, yang menunjukkan bahwa kehadiran karbon mulai membuka porositas material meskipun sebagian pori masih tertutup oleh densitas silika (*pore blocking*). Sampel c (50:50): Rasio seimbang menghasilkan konsentrasi sisa sebesar 39,5 ppm. Efisiensi naik signifikan menjadi 60,5%, mengindikasikan distribusi karbon yang lebih merata untuk menangkap kation Pb(II). Sampel d (30:70): Menunjukkan performa yang unggul dengan konsentrasi

akhir Pb(II)sisa sebesar 15 ppm. Efisiensi adsorpsi melonjak hingga 85% karena dominasi luas permukaan karbon yang besar. Sampel e (0:100): Karbon murni memberikan hasil terbaik dengan konsentrasi akhir mencapai 0,1 ppm. Angka ini mendekati Limit of Detection (LOD) alat AAS, yang berarti hampir seluruh logam terserap sempurna dengan efisiensi 99,9%.

Untuk menentukan kapasitas adsorpsi (q_e), dilakukan perhitungan berdasarkan selisih konsentrasi awal dan akhir menggunakan rumus:

$$qe = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (4.7)$$

Di mana adalah volume larutan dan *m* adalah massa adsorben. Peningkatan nilai (q_e) dari Sampel a ke Sampel e menunjukkan bahwa mekanisme adsorpsi fisika melalui pengisian pori (*pore filling*). Interaksi antara ion Pb(II)yang bermuatan positif dengan permukaan komposit terjadi melalui gaya tarik elektrostatik dan gaya Van der Waals di dalam rongga-rongga karbon. Pada sampel dengan kandungan silika tinggi (a dan b), efisiensi tergolong rendah karena sifat silika yang padat menghambat ion logam untuk menjangkau pori-pori aktif. Sebaliknya, pada sampel kaya karbon (d dan e), ketersediaan mikropori yang melimpah memungkinkan logam Pb(II) terperangkap secara permanen, sehingga menurunkan konsentrasi polutan dalam larutan uji secara drastis. Analisis ini memvalidasi bahwa karbon aktif dari limbah pertanian adalah komponen kunci yang meningkatkan sifat adsorptif silika.

Keberhasilan penelitian dalam mengembangkan material komposit silika–karbon dari limbah pertanian sebagai adsorben logam berat Pb(II) menunjukkan adanya upaya nyata manusia untuk memperbaiki kondisi lingkungan. Prinsip

perubahan dan perbaikan ini sejalan dengan ajaran Islam sebagaimana dijelaskan dalam Surah Ar-Ra‘d ayat 11, yang berbunyi:

لَه ۥ مُعَقِّبٰتٌ ۢ مِّنۢ بَيۡنِ يَدَيۡهِ وَمِنۡ خَلۡفِهٖ يَحۡفَظُوۡنَهٗ مِنۡ اَمۡرِ اللّٰهِ ؕ اِنَّ اللّٰهَ لَا يُغَيِّرُ مَا بِقَوۡمٍ حَتّٰى يُغَيِّرُوۡا مَا

بِاَنۡفُسِهِمۡ ؕ وَاِذَاۤ اَرَادَ اللّٰهُ بِقَوۡمٍ سُوۡٓءًا فَلَا مَرَدَّ لَهٗ ۚ وَمَا لَهُمۡ مِّنۡ دُوۡنِهٖ مِنۡ وَّالٍ ﴿۱۱﴾

Artinya : *Baginya (manusia) ada (malaikat-malaikat) yang menyertainya secara bergiliran dari depan dan belakangnya yang menjaganya atas perintah Allah. Sesungguhnya Allah tidak mengubah keadaan suatu kaum hingga mereka mengubah apa yang ada pada diri mereka. Apabila Allah menghendaki keburukan terhadap suatu kaum, tidak ada yang dapat menolaknya, dan sekali-kali tidak ada pelindung bagi mereka selain Dia.*

Ayat ini mengandung makna bahwa perubahan ke arah yang lebih baik harus dimulai dari usaha manusia itu sendiri. Allah SWT memberikan kebebasan dan tanggung jawab kepada manusia untuk berupaya memperbaiki kondisi kehidupannya, termasuk dalam menjaga kelestarian alam.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa komposit silika–karbon dengan rasio 30:70 memiliki kemampuan adsorpsi logam berat Pb(II) hingga 98,50%, yang berarti material tersebut efektif dalam menurunkan kadar logam berat yang mencemari air. Inovasi ini mencerminkan semangat perubahan dan usaha manusia untuk memulihkan lingkungan yang telah tercemar akibat aktivitas industri.

Dengan demikian, ayat tersebut memiliki relevansi yang kuat dengan hasil penelitian ini. Melalui pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, manusia dapat menjadi agen perubahan yang memperbaiki kondisi alam, bukan merusaknya. Upaya ini juga merupakan bagian dari tanggung jawab manusia sebagai khalifah

fil-ardh, yaitu pengelola bumi yang bertugas menjaga keseimbangan ciptaan Allah SWT. Sebagai penutup, penelitian ini menggambarkan bagaimana ilmu pengetahuan dapat menjadi sarana perubahan yang bernilai ibadah apabila digunakan untuk memperbaiki dan melestarikan lingkungan sesuai dengan prinsip-prinsip Islam.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang berjudul "Analisis Struktur dan Sifat Komposit Silika-Karbon dari Limbah Pertanian untuk Aplikasi Adsorben Logam Berat Pb (II)", dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa komposit silika–karbon berbasis sekam padi dan tempurung kelapa berhasil disintesis dan memiliki karakteristik yang mendukung proses adsorpsi ion logam Pb(II). Keberhasilan sintesis ditunjukkan oleh terbentuknya gugus fungsi Si-O-Si, Si-OH dan Si-C pada komposit rasio silika-karbon 30:70.
2. Karakterisasi FTIR menunjukkan keberadaan gugus fungsi Si–O–Si, Si–OH, serta gugus karbon yang berperan sebagai situs aktif adsorpsi. Analisis BET menunjukkan bahwa komposit dengan rasio silika–karbon 30:70 memiliki luas permukaan tertinggi sebesar 346,204 m^2/g dengan struktur pori yang lebih berkembang dibandingkan komposisi lainnya. Ikatan antara silika dan karbon teridentifikasi pada pita serapan sekitar 786-941 cm^{-1} yang menunjukkan vibrasi Si-C pada material komposit. Struktur pori yang lebih berkembang ditunjukkan dengan meningkatnya luas permukaan dan volume pori adsorben sehingga menyediakan lebih banyak situs aktif untuk proses adsorpsi Pb(II).
3. Pengujian menggunakan AAS menunjukkan bahwa komposit silika–karbon mampu menyerap ion Pb(II) dengan efisiensi adsorpsi tertinggi sebesar

98,50% pada rasio silika–karbon 30:70. Tingginya efisiensi adsorpsi tersebut dipengaruhi oleh luas permukaan dan struktur pori yang lebih berkembang sehingga menyediakan lebih banyak situs aktif untuk proses adsorpsi. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa komposit silika–karbon dari limbah pertanian berpotensi sebagai adsorben ramah lingkungan untuk pengolahan limbah logam berat.

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan variasi komposisi komposit silika–karbon atau menambahkan material lain guna meningkatkan luas permukaan serta jumlah situs aktif adsorpsi. Selain itu, diperlukan karakterisasi tambahan seperti SEM, XRD, serta analisis isoterm dan kinetika adsorpsi untuk memahami mekanisme penjerapan ion logam secara lebih mendalam

DAFTAR PUSTAKA

Al-mur, B. A. (2023). *Green Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticle Synthesis Using Mangrove Leaf Extract from Avicenna marina : Properties and*.

Anggraini, S. (n.d.). *No Title*. 4–11.

Barrios-Rodriguez, Y., Devia-Rodriguez, Y., & Gutierrez, N. (2022). Detection of adulterated coffee by fourier-transform infrared (ftir) spectroscopy associated with sensory analysis. Coffee Science, 17, 1-12. https://doi.org/10.25186/.v17i.1970

Basin, R. (2022). *Optimal Location of Water Quality Monitoring Stations Using an Artificial Neural Network Modeling in the Qarah-Chay*.

Brinker, C. J., & Scherer, G. W. (2019). *Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*. Academic Press.

Bromide, C., Sains, F., Diponegoro, U., & Prof, J. (2023). *Greensphere : Journal of Environmental Chemistry*. *3*(1).

Crivello, G., Fracchia, L., Ciardelli, G., & Boffito, M. (2023). *In Vitro Models of Bacterial Biofilms : Innovative Tools to Improve Understanding and Treatment of Infections*.

Dong, Y., Shi, S., Li, Q., Zhang, L., & Yu, X. (2020). An indirect analytical approach based on atr-ftir spectroscopy for determining the ffa content in vegetable oils. RSC Advances, 10(40), 24073-24078. https://doi.org/10.1039/d0ra03668d

Hafidoh, D. M. (2021). DARI BAMBU MENGGUNAKAN AKTIVATOR HCl SEBAGAI ADSORBEN TIMBAL (Pb) SKRIPSI Oleh : DINI MAHYA HAFIDOH. *Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang*.

Handika, G., Maulina, S., & Mentari, V. A. (2017). Tanaman Kelapa Sawit Dengan Penambahan Aktivator Natrium Karbonat (Na2CO3) Dan Natrium Klorida (Nacl) Characteristics Of Activated Carbon Using Palm Oil Waste Plants With Addition Activators Of Sodium Carbonate (Na2CO3). *Jurnal Teknik Kimia USU*, *6*(4), 41–44.

Haryono, Noviyanti, A. R., & Ernawati, E. E. (2023). Sintesis, Karakterisasi, dan Uji Adsorpsi Komposit Silika/Karbon dari Limbah Sekam Padi sebagai Adsorben Tembaga (II). *Jurnal Teknologi Lingkungan*, *24*(1), 058–066. https://doi.org/10.55981/jtl.2023.241

Impellizzeri, A. (2024). Co adsorption on pure, defective and mixed composition alf3 and mgf2 surfaces. Catalysis Science & Technology, 14(11), 3021-3028. https://doi.org/10.1039/d4cy00174e

Irnawati, I., Riyanto, S., Martono, S., & Rohman, A. (2019). Determination of sesame oil, rice bran oil and pumpkin seed oil in ternary mixtures using ftir spectroscopy and multivariate calibrations. Food Research, 4(1), 135-142. https://doi.org/10.26656/fr.2017.4(1).260

Johnson, A., Kong, F., Miao, S., Thomas, S., Ansar, S., & Kong, Z. (2021). *In-Vitro Antibacterial and Anti-Inflammatory Effects of Surfactin-Loaded Nanoparticles for Periodontitis Treatment*.

Khudzaifi, M., Retno, S., & Rohman, A. (2019). The employment of ftir spectroscopy and chemometrics for authentication of essential oil of curcuma mangga from candle nut oil. Food Research, 4(2), 515-521. https://doi.org/10.26656/fr.2017.4(2).313

Kumar, A., et al. (2023). *Sol-Gel Synthesis and Applications of Nanomaterials: A Review*. Materials Today Proceedings.

Lowell, S., Shields, J. E., Thomas, M. A., & Thommes, M. (2021). *Characterization of Porous Solids and Powders: Surface Area, Pore Size and Density*. Springer.

Pet, I., et al. (2024). *Recent Developments in the Implementation of Activated Carbon as Heavy Metal Removal Management*. Water Conservation Science and Engineering.

Pogula, S., Patwardhan, S., Perry, C., Gillespie, J., Yarlagadda, S., & Kiick, K. (2007). Continuous silica coatings on glass fibers via bioinspired approaches. Langmuir, 23(12), 6677-6683. https://doi.org/10.1021/la063685a

Rahman, I. A., et al. (2022). *Recent Advances in Sol-Gel Derived Materials for Environmental Applications*. Journal of Sol-Gel Science and Technology.

Raji, Z., et al. (2023). *Adsorption of Heavy Metals: Mechanisms and Applications*. Waste.

Rashid, M. M. (2021). *Influence of Titanium Dioxide Nanoparticles on Human Health and the Environment*.

Safitri, D. I., Sembiring, S., & Rumiyanti, L. (2022). Karakteristik Struktur Mikro, Struktur Fasa dan Sifat Fisis Komposit Silika Sekam Padi dengan Aspal. *Jurnal Teori Dan Aplikasi Fisika*, *10*(02), 251–258. https://doi.org/10.23960/jtaf.v10i2.2658

Safitri, O., & Alrasyid, H. (2020). *SEBAGAI ADSORBEN LOGAM BERAT PADA LIMBAH CAIR [REVIEW]*. *12*(2), 19–24.

Sari, R., Paramanandana, A., Isadiartuti, D., & Rahayyu, A. (2020). Pengaruh jumlah polimer terhadap karakteristik fisik dan pelepasan nanopartikel fraksi diterpen lakton sambiloto - kitosan. Jurnal Sains Farmasi & Klinis, 7(2), 99. https://doi.org/10.25077/jsfk.7.2.99-106.2020

Shkir, M., et al. (2021). *Sol-Gel Processed Nanomaterials: Fundamentals and Applications*. Ceramics International.

Sindim, S. B. P., Taunaumang, H., & Rampengan, A. M. (2023). *Pembuatan Karbon Aktif Bambu dengan Metode Termolisis dan Karakterisasinya*. *4*(2), 46–52.

Sing, K. S. W., et al. (2021). *Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity*. Pure and Applied Chemistry.

Sorrentino, R., Ruggiero, G., Borelli, B., Barlattani, A., & Zarone, F. (2022). *Dentin Exposure after Tooth Preparation for Laminate Veneers : A Microscopical Analysis to Evaluate the Influence of Operators ' Expertise*.

Thakur, A., & Kumar, A. (2024). *Activated Carbon in Remediation of Pollutants: A Review*. Chemosphere.

Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., et al. (2020). *Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report)*. Pure and Applied Chemistry.

Vancouver, C. R., Rollwagen-bollens, G., Connelly, K. A., Bollens, S. M., & Zimmerman, J. (2022). *Nutrient Control of Phytoplankton Abundance and Biomass , and Microplankton Assemblage Structure in the Lower*.

Verayana, Paputungan, M., & Iyabu, H. (2018). Effect of HCl and H3PO4 activators on the characteristics (pore morphology) of activated coconut shell charcoal and adsorption tests on lead (Pb) metal. *Jurnal Entropi*, *13*(1), 67–75.

Wang, B., et al. (2023). *Adsorption of Heavy Metal onto Biomass-Derived Activated Carbon: Review*. RSC Advances.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Analisis Data

1. Perhitungan Efisiensi

Rumus Efisiensi Adsorpsi

$$Efisiensi\ Adsorpsi\ (\%) = \frac{(C_0\ -\ Ct)}{C_0} \times 100$$

Keterangan:

C_0 = konsentrasi awal (mg/L)

C_e = konsentrasi akhir (mg/L)

Perhitungan Efisiensi Adsorpsi

2. Karbon Aktif Murni (0:100)

C_0 = 20 mg/L

C_e = 0,8108 mg/L

$$Efisiensi = \frac{20\ -\ 0{,}8108}{20} \times\ 100\%$$

$$= \frac{19{,}1892}{20} \times\ 100\%$$

$$=\ 95{,}95\%$$

$$Jumlah\ Pb(II)\ teradsorpsi:$$

$$=\ 20\ -\ 0{,}8108$$

$$=\ 19{,}1892\ mg/L$$

3. Komposit Silika–Karbon (30:70)

C_0 = 20 mg/L

C_e = 0,2997 mg/L

$$Efisiensi = \frac{20\ -\ 0{,}2997}{20} \times\ 100\%$$

$$= \frac{19{,}7003}{20} \times 100\%$$

$$= 98{,}50\%$$

$$Jumlah\ Pb(II)\ teradsorpsi:$$

$$= 20 - 0{,}2997$$

$$= 19{,}7003\ mg/L$$

4. Komposit Silika–Karbon (50:50)

C_o = 20 mg/L

C_e = 0,3366 mg/L

$$Efisiensi = \frac{20 - 0{,}3366}{20} \times 100\%$$

$$= \frac{19{,}6634}{20} \times 100\%$$

$$= 98{,}32\%$$

$$Jumlah\ Pb(II)\ teradsorpsi:$$

$$= 20 - 0{,}3366$$

$$= 19{,}6634\ mg/L$$

5. Komposit Silika–Karbon (70:30)

C_o = 20 mg/L

C_e = 0,3921 mg/L

$$Efisiensi = \frac{20 - 0{,}3921}{20} \times 100\%$$

$$= \frac{19{,}6079}{20} \times 100\%$$

$$= 98{,}04\%$$

$$Jumlah\ Pb(II)\ teradsorpsi:$$

$$= 20 - 0{,}3921$$

$$= 19{,}6079\ mg/L$$

6. Silika Murni (100:0)

C_0 = 20 mg/L

C_e = 0,8108 mg/L

$$Efisiensi = \frac{20 - 0{,}8108}{20} \times 100\%$$

$$= \frac{19{,}1892}{20} \times 100\%$$

$$= 95{,}95\%$$

$$Jumlah\ Pb(II)\ teradsorpsi:$$

$$= 20 - 0{,}8108$$

$$= 19{,}1892\ mg/L$$

7. Perhitungan Kapasitas Adsorpsi Pb(II)

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

Keterangan:

q_e = Kapasitas adsorpsi (mg/g)

C_0 = Konsentrasi awal (mg/L)

C_e = Konsentrasi akhir (mg/L)

V = Volume larutan (L)

m = Massa adsorben (g)

8. Silika Murni (100:0)

$$q_e = \frac{(20 - 0{,}8108) \times 0{,}05}{0{,}1}$$

$$q_e = \frac{19{,}1892 \times 0{,}05}{0{,}1}$$

$$q_e = \frac{0{,}95946}{0{,}1}$$

$$q_e = 9{,}59\ mg/g$$

9. Komposit Silika–Karbon (30:70)

$$q_e = \frac{(20 - 0{,}2997) \times 0{,}05}{0{,}1}$$

$$q_e = \frac{19{,}7003 \times 0{,}05}{0{,}1}$$

$$q_e = \frac{0{,}985015}{0{,}1}$$

$$q_e = 9{,}85 mg/g$$

10. Komposit Silika–Karbon (50:50)

$$q_e = \frac{(20 - 0{,}3366) \times 0{,}05}{0{,}1}$$

$$q_e = \frac{19{,}6634 \times 0{,}05}{0{,}1}$$

$$q_e = \frac{0{,}98317}{0{,}1}$$

$$q_e = 9{,}83 mg/g$$

11. Komposit Silika–Karbon (70:30)

$$q_e = \frac{(20 - 0{,}3921) \times 0{,}05}{0{,}1}$$

$$q_e = \frac{19{,}6079 \times 0{,}05}{0{,}1}$$

$$q_e = \frac{0{,}980395}{0{,}1}$$

$$q_e = 9{,}80 mg/g$$

12. Karbon Aktif Murni (0:100)

$$q_e = \frac{(20 - 0{,}8108) \times 0{,}05}{0{,}1}$$

$$q_e = \frac{19{,}1892 \times 0{,}05}{0{,}1}$$

$$q_e = \frac{0{,}95946}{0{,}1}$$

$$q_e = 9{,}83 mg/g$$

Tabel Hasil Kapasitas Adsorpsi

Sampel	**Ce (mg/L)**	**Efisiensi (%)**	**Kapasitas Adsorpsi (mg/g)**
Silika murni	0,8108	95,95	9,59
Komposit 30:70	0,2997	98,50	**9,85**
Komposit 50:50	0,3366	98,32	9,83
Komposit 70:30	0,3921	98,04	9,80
Karbon aktif	0,8108	95,95	9,59

Lampiran 2. Dokumentasi Penelitian

1. Sintesis Silika Sekam Padi

 Sekam Padi ditimbang terlebih dahulu sebelum difurnace	 Dicuci menggunkan air mengalir, Di keringkan menggunakan oven pada suhu 150℃ selama 1 jam
 Furnace dengan suhu 700℃ selama 7 jam menggunakan cawan porselin	 Gunakan ayakan 200 mesh
 3 gram abu sekam padi tambahkan 18 ml HCl 1M & 30ml aquades	 Aduk menggunkan magnetic stirer pada kecepatan 400 rpm dengan suhu 80℃ selama 1 jam

 Dinginkan kemudan saring dengan kertas saring hingga pH netral (7)	 Masukkan residu hasil perendaman asam, tambahkan 18 ml NaOH 1M & 40ml aquades
 Aduk menggunkan magnetic stirer pada kecepatan 400 rpm dengan suhu 90℃ selama 1 jam	 Dinginkan kemudan saring dengan kertas saring hingga pH netral (7), simpan filtratnya
 Teteskan HCl 1M ke dalam filtrat sambil diaduk dengan magnetic strirer 300 rpm hingga pH (7)	 Silika gel mulai terbentuk, diamkan selama 18 jam pada suhu ruang agar gel matang sempurna
 Cuci gel berulang kali dengan aquades hingga filtart bebas ion Cl^-(teteskan	

larutan $AgNO_3$ 1M sampai tidak ada endapan putih	Keringkan gel dengan ovenpada suhu 100℃ selama 12 jam
 Haluskan silika dengan mortar & alu	 Kemudian ayak menggunkan ayakan 200 mesh, dan Hasil akhir berupa serbuk silika amorf putih

2. Sintesis Karbon Tempurung Kelapa

 Tempurung Kelapa dibersihkan dari sabut & dipotong kecil-kecil	 Dicuci, kemudian di keringkan dengan oven 100℃ selama 2 jam
 Kemudian di furnace 700℃ selama 5 jam	 Dihaluskan dengan alu dan mortar

 Diayak menggunkan ayakan 200 mesh	 Timbang sebanyak 3 gram untuk setiap sampel
 Aktivasi menggunkan HCl 4M sebanyak 75 ml (stirer pada suhu 180℃, 300 rpm selama 1 jam)	 Diamkan selama 24 jam
 Disaring & dicuci dengan aquades hingga pHnetral (7)	 Dikeringkan dalam oven pada suhu 150℃ selama 1 jam & Hasil akhir berupa serbuk karbon aktif

3. Sintesis Komposit Silika-Karbon

 Timbang sesuai rasio (100:0, 0:100, 70:30, 50:50, 30:70)	 tambahkan aquades 5-10 ml, kemudian aduk menggunakan magnetic stirrer dengan suhu 70℃ 300 rpm selama 1 jam
 keringkan menggunakan oven dengan suhu 100℃ selama 1 jam	 Komposit Silika-Karbon siap di uji

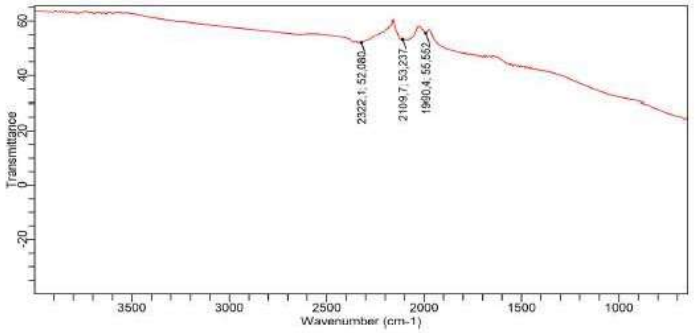
Lampiran 3 Hasil Pengujian Sampel

1. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

100 : 0

Agilent Technologies

Sample ID:Silika Karbon 0-100
Method Name:C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Methods\UIN MALANG.2.a2m
Sample Scans:16
User:admin
Background Scans:16
Date/Time:11/17/2025 4:10:39 PM
Resolution:8
Range:4000 - 650
System Status:Good
Apodization:Happ-Genzel
File Location:C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Results\Silika Karbon 0-100_2025-11-17T16-10-51.a2r



Peak Number	Wavenumber (cm^{-1})	Intensity
1	1990,4	55,552
2	2109,7	53,237
3	2322,1	52,080

0 :100

Agilent Technologies

Sample ID:Silika Karbon 0-100

Method Name:C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Methods\UIN MALANG.2.a2m

Sample Scans:16

User:admin

Background Scans:16

Date/Time:11/17/2025 4:10:39 PM

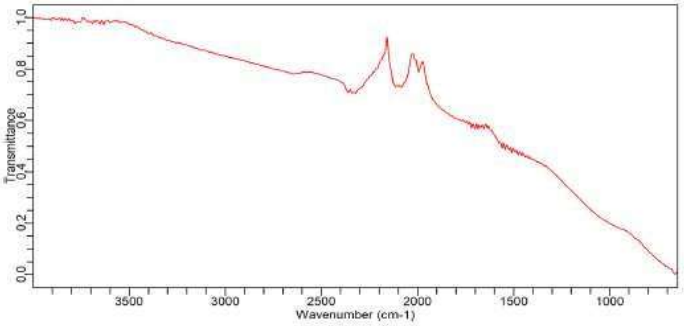
Resolution:8

Range:4000 - 650

System Status:Good

Apodization:Happ-Genzel

File Location: C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Results\ Silika Karbon 0-100_2025-11-17T16-10-51.a2r



Peak Number	Wavenumber (cm^{-1})	Intensity
1	1990,4	55,552
2	2109,7	53,237
3	2322,1	52,080

Quality	Library	CAS#	Name

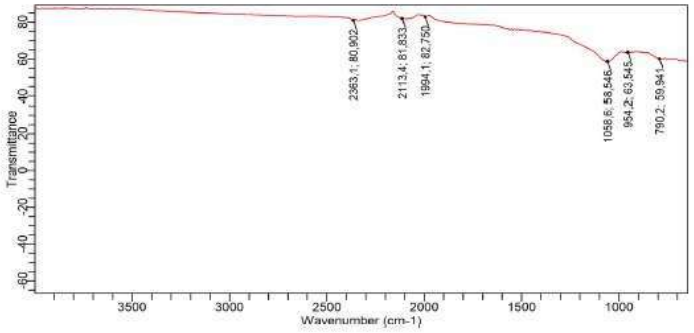
11/17/2025 4:11:13 PM

page 1 of 1

30 : 70

Agilent Technologies

Sample ID:Silika Karbon 30-70
Method Name:C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Methods\UIN MALANG.2.a2m
Sample Scans:16
User:admin
Background Scans:16
Date/Time:11/17/2025 4:07:24 PM
Resolution:8
Range:4000 - 650
System Status:Good
Apodization:Happ-Genzel
File Location:C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Results\Silika Karbon 30-70_2025-11-17T16-07-37.a2r



Peak Number	Wavenumber (cm^{-1})	Intensity
1	790,2	59,941
2	954,2	63,545
3	1058,6	58,546
4	1994,1	82,750
5	2113,4	81,833

Agilent Technologies

Sample ID:Silika Karbon 30-70

Method Name:C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Methods\UIN MALANG.2.a2m

Sample Scans:16

User:admin

Background Scans:16

Date/Time:11/17/2025 4:07:24 PM

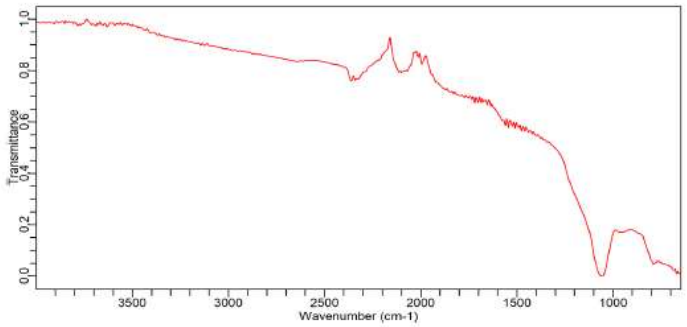
Resolution:8

Range:4000 - 650

System Status:Good

Apodization:Happ-Genzel

File Location: C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Results\ Silika Karbon 30-70_2025-11-17T16-07-37.a2r



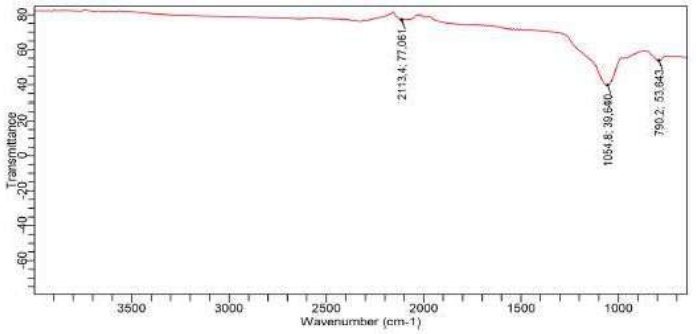
Peak Number	Wavenumber (cm^{-1})	Intensity
1	790,2	59,941
2	954,2	63,545
3	1058,6	58,546
4	1994,1	82,750
5	2113,4	81,833
6	2363,1	80,902

11/17/2025 4:08:07 PM

page 1 of 2

Agilent Technologies

Sample ID:Silika Karbon 50-50
Method Name:C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Methods\UIN MALANG.2.a2m
Sample Scans:16
User:admin
Background Scans:16
Date/Time:11/17/2025 3:59:51 PM
Resolution:8
Range:4000 - 650
System Status:Good
Apodization:Happ-Genzel
File Location:C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Results\Silika Karbon 50-50_2025-11-17T16-00-13.a2r



Peak Number	Wavenumber (cm^{-1})	Intensity
1	790,2	53,643
2	1054,8	39,640
3	2113,4	77,061

Agilent Technologies

Sample ID:Silika Karbon 50-50

Method Name:C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Methods\UIN MALANG.2.a2m

Sample Scans:16

User:admin

Background Scans:16

Date/Time:11/17/2025 3:59:51 PM

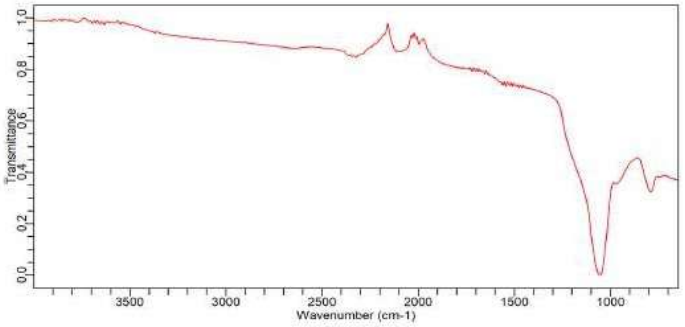
Resolution:8

Range:4000 - 650

System Status:Good

Apodization:Happ-Genzel

File Location: C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Results\ Silika Karbon 50-50_2025-11-17T16-00-13.a2r



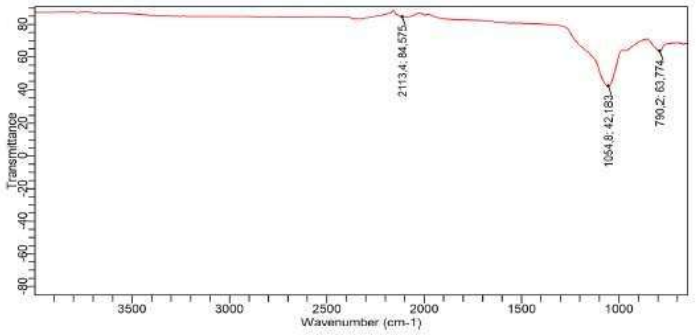
Peak Number	Wavenumber (cm^{-1})	Intensity
1	790,2	53,643
2	1054,8	39,640
3	2113,4	77,061

Quality	Library	CAS#	Name

70 : 30

Agilent Technologies

Sample ID:Silika Karbon 70-30
Method Name:C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Methods\UIN MALANG.2.a2m
Sample Scans:16
User:admin
Background Scans:16
Date/Time:11/17/2025 4:04:07 PM
Resolution:8
Range:4000 - 650
System Status:Good
Apodization:Happ-Genzel
File Location:C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Results\Silika Karbon 70-30_2025-11-17T16-04-21.a2r



Peak Number	Wavenumber (cm^{-1})	Intensity
1	790,2	63,774
2	1054,8	42,183
3	2113,4	84,575

Agilent Technologies

Sample ID:Silika Karbon 70-30

Method Name:C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Methods\UIN MALANG.2.a2m

Sample Scans:16

User:admin

Background Scans:16

Date/Time:11/17/2025 4:04:07 PM

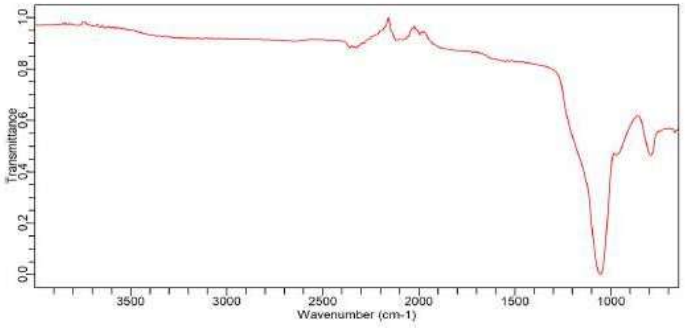
Resolution:8

Range:4000 - 650

System Status:Good

Apodization:Happ-Genzel

File Location: C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Results\ Silika Karbon 70-30_2025-11-17T16-04-21.a2r



Peak Number	Wavenumber (cm^{-1})	Intensity
1	790,2	63,774
2	1054,8	42,183
3	2113,4	84,575

Quality	Library	CAS#	Name

2. *Surface Area Analyzer* (SAA)

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
LABORATORIUM TERPADU
LAB. INSTRUMENTASI, FISIKA DASAR DAN KIMIA DASAR
Jl Kaliurang Km 14,5 Yogyakarta 55584 Telp. (0274)895920 ext. 3045, 3016, Fax (0274) 896439 ext. 3020
Website: http://lab.uii.ac.id , e-mail : lab.terpadu@uii.ac.id

No. Dok : Form-36/Hasil Uji Rev. 0
Tgl. Terbit : 24 Oktober 2018

Hasil Analisis Spektrofotometer Serapan Atom (SSA)

Sampel : **Padat**
Kode Sampel : **19231125**
Asal Sampel :
Tanggal diterima :
Tanggal dianalisis : **12 Desember 2025**
Parameter : **Pb**

No	Sample ID	Seq No.	El	Standar	Mean Sig (Absorbance)	Limit Detection from standard	Mean Samp	Ketidak pastian	Samp Units
1	Calib blank	2	Pb	0	-0,0001				mg/l
2	Std 1	3	Pb	0,1	0,0004	0,2075			mg/l
3	Std 2	4	Pb	0,5	0,0021	0,2075			mg/l
4	Std 3	6	Pb	2	0,0108	0,2075			mg/l
5	Std 4	7	Pb	3	0,0159	0,2075			mg/l
6									
7									
8									
9									
10	19231125-1	10	Pb		0,0006		0,1519	0,104	mg/l
11	19231125-2	11	Pb		0,0041		0,8108	0,204	mg/l
12	19231125-3	12	Pb		0,0019		0,3921	0,109	mg/l
13	19231125-4	13	Pb		0,0016		0,3366	0,132	mg/l
14	19231125-5	14	Pb		0,0014		0,2997	0,103	mg/l

Yogyakarta, 12/12/2025

Koord Teknis	Kalab Instrumentasi	Laboran
Thorikul H	Pinus J.	Yusuf H

3. *Atomic Absorption Spectroscopy* AAS

100 : 0

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date: Tue Dec 2 2025 **Operator:** Yusuf
Filename: 18781125_1.qcuPhysIso

Analysis Information

Sample
ID 1878_1 **Weight** 0.0668 g
Description 100:0
Analysis
Data ID {a25f8836-1a48-41af-be3d-40e74fb8511a)
Operator Yusuf **Date** 2025.12.02 **Duration** 81.5 min
Instrument St 1 on NOVA touch 4LX [s/n:1701705100011 **Firmware** 1.07
Comments description of sample
Ambient Temp. 30.16 °C **Void Volume Mode** NOVA mode **Cell ID** 41
Cell Type 9mm w/o rod **Thermal Delay** 300 sec **Po Mode** Continuous
Adsorbate
Name Nitrogen **Molecular Weight** 28.013 g/mol **Cross Section Area** 16.2 A²/mol
Non-ideality 6.580000e-05 1/torr **Bath Temperature** 77.35 K
Degas information
Time 6.0 hours **Temp** 300.000000 °C

Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration yes **Eff. Molec. Diameter** 0 A
Eff. Cell Diameter 0 mm
Adsorbate Model
Name Nitrogen **Molecular Weight** 28.0134 g **Cross Section Area** 16.2 A²/molec
Bath Temperature 77.35 K

BET Multi-point BET results

Isotherm Branch Adsorption
Slope 11.0261
Intercept 0.0783106
Correlation coeff., r 0.999839
C constant 141.8
Surface area 313.614 m²/g

Table - BET Multi-point BET

Relative Pressure	Volume Adsorbed @STP cc/g	1 / [W((P/Po) - 1)]
0.0463978	63.8058	0.6101
0.0911233	73.6370	1.0894
0.133789	80.7666	1.5301
0.171087	84.6763	1.9503
0.211959	89.2188	2.4121
0.258358	95.5518	2.9170
0.299642	100.481	3.4068

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date: Tue Dec 2 2025 **Operator:** Yusuf
Filename: 18781125_1.qcuPhysIso

Analysis Information

Sample
ID 1878_1 Weight 0.0668 g
Description 100:0

Analysis
Data ID {a25f8836-1a48-41af-be3d-40e74fb8511a}
Operator Yusuf Date 2025.12.02 Duration 81.5 min
Instrument St 1 on NOVA touch 4LX [s/n:1701705100011] Firmware 1.07
Comments description of sample
Ambient Temp. 30.16 °C Void Volume Mode NOVA mode Cell ID 41
Cell Type 9mm w/o rod Thermal Delay 300 sec Po Mode Continuous

Adsorbate
Name Nitrogen Molecular Weight 28.013 g/mol Cross Section Area 16.2 Å²/mol
Non-ideality 6.580000e-05 1/torr Bath Temperature 77.35 K

Degas information
Time 6.0 hours Temp 300.000000 °C

Data Reduction Parameters

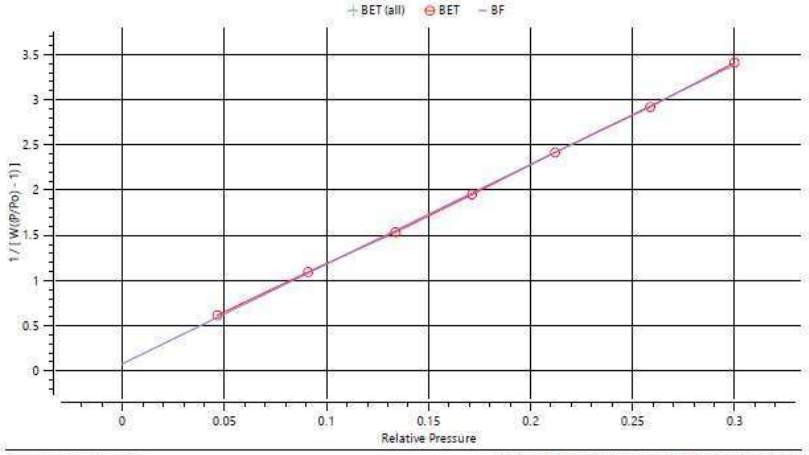
Thermal Transpiration yes Eff. Molec. Diameter 0 Å
Eff. Cell Diameter 0 mm

Adsorbate Model
Name Nitrogen Molecular Weight 28.0134 g Cross Section Area 16.2 Å²/molec
Bath Temperature 77.35 K

BET Multi-point BET results

Isotherm Branch	Adsorption
Slope	11.0261
Intercept	0.0783106
Correlation coeff., r	0.999839
C constant	141.8
Surface area	313.614 m²/g

Graph - BET Multi-point BET



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Ygyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date: Tue Dec 2 2025 **Operator:** Yusuf
Filename: 18781125_1.qcuPhysIso

Analysis Information

Sample
ID 1878_1 **Weight** 0.0668 g
Description 100:0
Analysis
Data ID {a25f8836-1a48-41af-be3d-40e74fb8511a}
Operator Yusuf **Date** 2025.12.02 **Duration** 81.5 min
Instrument St 1 on NOVA touch 4LX [s/n:170170510001] **Firmware** 1.07
Comments description of sample
Ambient Temp. 30.16 °C **Void Volume Mode** NOVA mode **Cell ID** 41
Cell Type 9mm w/o rod **Thermal Delay** 300 sec **Po Mode** Continuous
Adsorbate
Name Nitrogen **Molecular Weight** 28.013 g/mol **Cross Section Area** 16.2 Å²/mol
Non-ideality 6.580000e-05 1/torr **Bath Temperature** 77.35 K
Degas information
Time 6.0 hours **Temp** 300.000000 °C

Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration yes **Eff. Molec. Diameter** 0 Å
Eff. Cell Diameter 0 mm

Table - Isotherm Isotherm

Relative Pressure, P/Po	Volume Adsorbed @STP cc/g
0.0463978	63.8058
0.0911233	73.6370
0.133789	80.7666
0.171087	84.6763
0.211959	89.2188
0.258358	95.5518
0.299642	100.481

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date: Tue Dec 2 2025 **Operator:** Yusuf
Filename: 18781125_1.qcuPhysIso

Analysis Information

Sample
ID 1878_1 **Weight** 0.0668 g
Description 100:0

Analysis
Data ID {a25f8836-1a48-41af-be3d-40e74fb8511a}
Operator Yusuf **Date** 2025.12.02 **Duration** 81.5 min
Instrument St 1 on NOVA touch 4LX [s/n:1701705100001] **Firmware** 1.07
Comments description of sample
Ambient Temp. 30.16 °C **Void Volume Mode** NOVA mode **Cell ID** 41
Cell Type 9mm w/o rod **Thermal Delay** 300 sec **Po Mode** Continuous

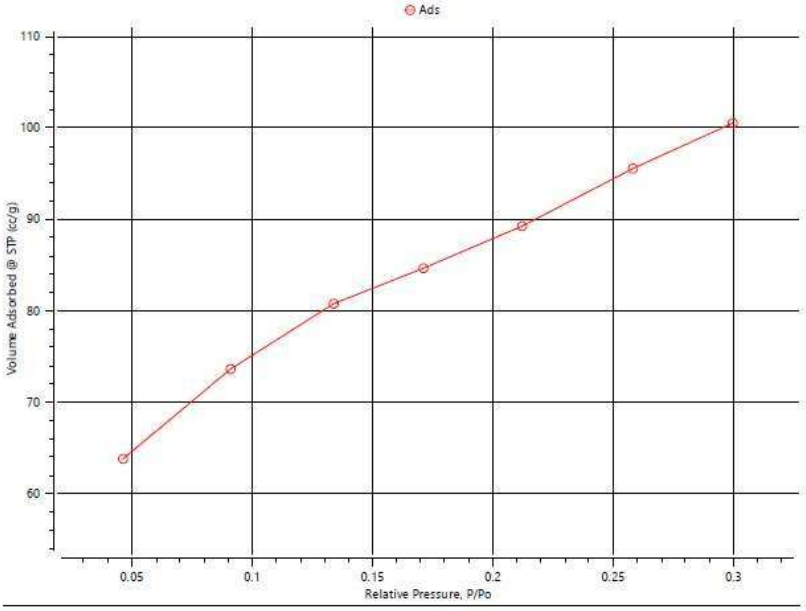
Adsorbate
Name Nitrogen **Molecular Weight** 28.013 g/mol **Cross Section Area** 16.2 Å²/mol
Non-ideality 6.580000e-05 1/torr **Bath Temperature** 77.35 K

Degas information
Time 6.0 hours **Temp** 300.000000 °C

Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration yes **Eff. Molec. Diameter** 0 Å
Eff. Cell Diameter 0 mm

Graph - Isotherm Isotherm



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date: Tue Dec 2 2025 **Operator:** Yusuf
Filename: 18781125_1.qcuPhysIso

Analysis Information

Sample
ID 1878_1 **Weight** 0.0668 g
Description 100:0
Analysis
Data ID {a25f8836-1a48-41af-be3d-40e74fb8511a}
Operator Yusuf **Date** 2025.12.02 **Duration** 81.5 min
Instrument St 1 on NOVA touch 4LX [s/n:170170510001] **Firmware** 1.07
Comments description of sample
Ambient Temp. 30.16 °C **Void Volume Mode** NOVA mode **Cell ID** 41
Cell Type 9mm w/o rod **Thermal Delay** 300 sec **Po Mode** Continuous
Adsorbate
Name Nitrogen **Molecular Weight** 28.013 g/mol **Cross Section Area** 16.2 Å²/mol
Non-ideality 6.580000e-05 1/torr **Bath Temperature** 77.35 K
Degas information
Time 6.0 hours **Temp** 300.000000 °C

Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration yes **Eff. Molec. Diameter** 0 Å
Eff. Cell Diameter 0 mm
Thickness Method deBoer

t plot results

Isotherm Branch Adsorption
Slope 199.995 cc/nm/g
Intercept 0.424395 cc/g
Correlation coefficient, r 0.999195
Micropore volume 0.000658089 cc/g
Micropore area 3.491 m²/g
External surface area 310.123 m²/g

Table - t plot

Relative Pressure	Volume Adsorbed @STP cc/g	Statistical Thickness nm
0.211959	89.2188	0.4446
0.258358	95.5518	0.4743
0.299642	100.481	0.5010

0 : 100

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date: Tue Dec 2 2025 **Operator:** Yusuf
Filename: 18781125_2.qcuPhysIso

Analysis Information

Sample
ID 1878_2 **Weight** 0.0739 g
Description 0:100
Analysis
Data ID {5d5a8650-ef2c-4cf3-acd2-5156fe2c2dd1}
Operator Yusuf **Date** 2025.12.02 **Duration** 76.0 min
Instrument St 2 on NOVA touch 4LX [s/n:1701705100011] **Firmware** 1.07
Comments description of sample
Ambient Temp. 30.02 °C **Void Volume Mode** NOVA mode **Cell ID** 42
Cell Type 9mm w/o rod **Thermal Delay** 300 sec **Po Mode** Continuous
Adsorbate
Name Nitrogen **Molecular Weight** 28.013 g/mol **Cross Section Area** 16.2 Å²/mol
Non-ideality 6.580000e-05 1/torr **Bath Temperature** 77.35 K
Degas information
Time 6.0 hours **Temp** 300.000000 °C

Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration yes **Eff. Molec. Diameter** 0 Å
Eff. Cell Diameter 0 mm
Adsorbate Model
Name Nitrogen **Molecular Weight** 28.0134 g **Cross Section Area** 16.2 Å²/molec
Bath Temperature 77.35 K

BET Multi-point BET results

Isotherm Branch Adsorption
Slope 11.5201
Intercept -0.311838
Correlation coeff., r 0.994354
C constant -35.9424
Surface area 310.711 m²/g

Table - BET Multi-point BET

Relative Pressure	Volume Adsorbed @STP cc/g	1 / [W((P/Po) - 1)]
0.0464815	106.434	0.3665
0.0924856	107.753	0.7567
0.135205	107.753	1.1609
0.177426	106.946	1.6137
0.219298	106.176	2.1168
0.261415	105.038	2.6961
0.302169	104.112	3.3277

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date: Tue Dec 2 2025 **Operator:** Yusuf
Filename: 18781125_2.qcuPhysIso

Analysis Information

Sample
ID 1878_2 Weight 0.0739 g
Description 0:100
Analysis
Data ID {5d5a8650-ef2c-4cf3-acd2-5156fe2c2dd1}
Operator Yusuf Date 2025.12.02 Duration 76.0 min
Instrument St 2 on NOVA touch 4LX [s/n:1701705100001] Firmware 1.07
Comments description of sample
Ambient Temp. 30.02 °C Void Volume Mode NOVA mode Cell ID 42
Cell Type 9mm w/o rod Thermal Delay 300 sec Po Mode Continuous
Adsorbate
Name Nitrogen Molecular Weight 28.013 g/mol Cross Section Area 16.2 Å²/mol
Non-ideality 6.580000e-05 1/torr Bath Temperature 77.35 K
Degas information
Time 6.0 hours Temp 300.000000 °C

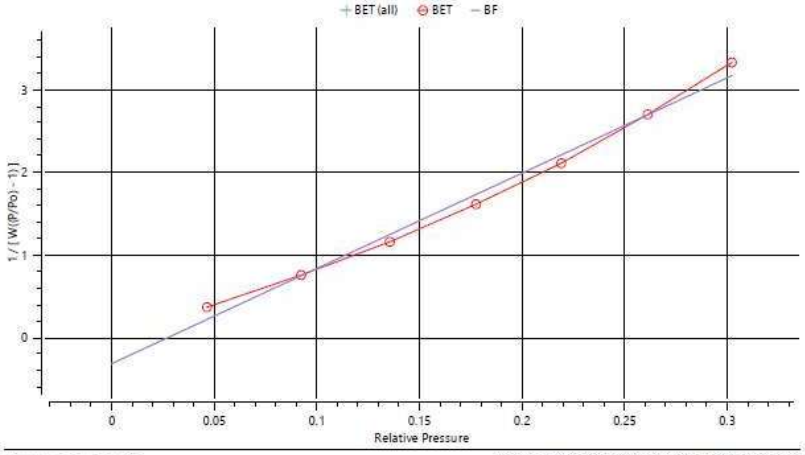
Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration yes Eff. Molec. Diameter 0 Å
Eff. Cell Diameter 0 mm
Adsorbate Model
Name Nitrogen Molecular Weight 28.0134 g Cross Section Area 16.2 Å²/molec
Bath Temperature 77.35 K

BET Multi-point BET results

Isotherm Branch	Adsorption
Slope	11.5201
Intercept	-0.311838
Correlation coeff., r	0.994354
C constant	-35.9424
Surface area	310.711 m²/g

Graph - BET Multi-point BET



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date: Tue Dec 2 2025 **Operator:** Yusuf
Filename: 18781125_2.qcuPhysIso

Analysis Information

Sample

ID	1878_2	**Weight**	0.0739 g		
Description	0:100				

Analysis

Data ID	{5d5a8650-ef2c-4cf3-acd2-5156fe2c2dd1}				
Operator	Yusuf	**Date**	2025.12.02	**Duration**	76.0 min
Instrument	St 2 on NOVA touch 4LX [s/n:1701705100011]			**Firmware**	1.07
Comments	description of sample				
Ambient Temp.	30.02 °C	**Void Volume Mode**	NOVA mode	**Cell ID**	42
Cell Type	9mm w/o rod	**Thermal Delay**	300 sec	**Po Mode**	Continuous

Adsorbate

Name	Nitrogen	**Molecular Weight**	28.013 g/mol	**Cross Section Area**	16.2 Å²/mol
Non-ideality	6.580000e-05 1/torr	**Bath Temperature**	77.35 K		

Degas information

Time	6.0 hours	**Temp**	300.000000 °C

Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration	yes	**Eff. Molec. Diameter**	0 Å
Eff. Cell Diameter	0 mm		

Table - Isotherm Isotherm

Relative Pressure, P/Po	Volume Adsorbed @STP cc/g
0.0464815	106.434
0.0924856	107.753
0.135205	107.753
0.177426	106.946
0.219298	106.176
0.261415	105.038
0.302169	104.112

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date: Tue Dec 2 2025 **Operator:** Yusuf
Filename: 18781125_2.qcuPhysIso

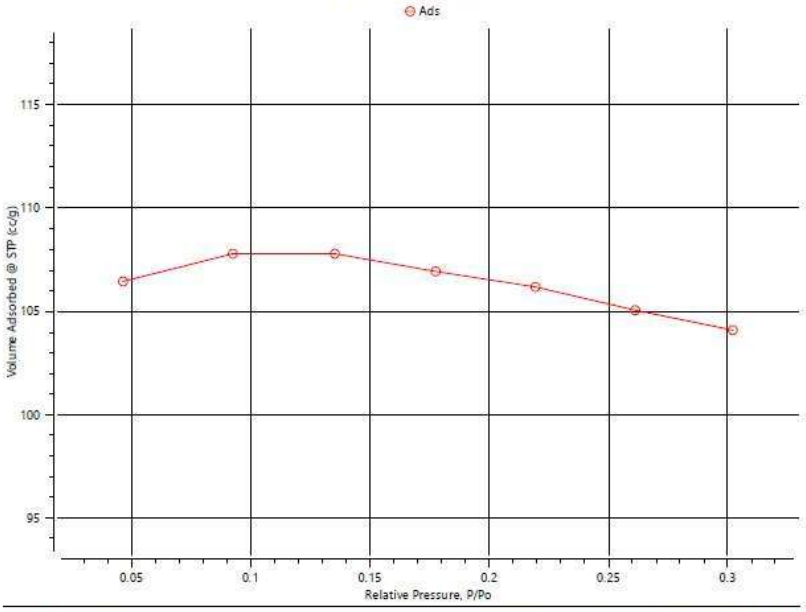
Analysis Information

Sample
ID 1878_2 **Weight** 0.0739 g
Description 0:100
Analysis
Data ID {5d5a8650-ef2c-4cf3-acd2-5156fe2c2dd1}
Operator Yusuf **Date** 2025.12.02 **Duration** 76.0 min
Instrument St 2 on NOVA touch 4LX [s/n:170170510001] **Firmware** 1.07
Comments description of sample
Ambient Temp. 30.02 °C **Void Volume Mode** NOVA mode **Cell ID** 42
Cell Type 9mm w/o rod **Thermal Delay** 300 sec **Po Mode** Continuous
Adsorbate
Name Nitrogen **Molecular Weight** 28.013 g/mol **Cross Section Area** 16.2 Å²/mol
Non-ideality 6.580000e-05 1/cm³ **Bath Temperature** 77.35 K
Degas information
Time 6.0 hours **Temp** 300.000000 °C

Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration yes **Eff. Molec. Diameter** 0 Å
Eff. Cell Diameter 0 mm

Graph - Isotherm Isotherm



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date:	Tue Dec 2 2025	**Operator:**	Yusuf
Filename:	18781125_2.qcuPhysIso		

Analysis Information

Sample

ID	1878_2	**Weight**	0.0739 g
Description	0:100		

Analysis

Data ID	{5d5a8650-ef2c-4cf3-acd2-5156fe2c2dd1}				
Operator	Yusuf	**Date**	2025.12.02	**Duration**	76.0 min
Instrument	St 2 on NOVA touch 4LX [s/n:1701705100001]			**Firmware**	1.07
Comments	description of sample				
Ambient Temp.	30.02 °C	**Void Volume Mode**	NOVA mode	**Cell ID**	42
Cell Type	9mm w/o rod	**Thermal Delay**	300 sec	**Po Mode**	Continuous

Adsorbate

Name	Nitrogen	**Molecular Weight**	28.013 g/mol	**Cross Section Area**	16.2 Å²/mol
Non-ideality	6.580000e-05 1/torr	**Bath Temperature**	77.35 K		

Degas information

Time	6.0 hours	**Temp**	300.000000 °C

Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration	yes	**Eff. Molec. Diameter**	0 Å
Eff. Cell Diameter	0 mm		
Thickness Method	deBoer		

t plot results

Isotherm Branch	Adsorption
Slope	-38.7158 cc/nm/g
Intercept	123.541 cc/g
Correlation coefficient, r	0.998635
Micropore volume	0.191569 cc/g
Micropore area	370.746 m²/g
External surface area	-60.035 m²/g

Table - t plot

Relative Pressure	Volume Adsorbed @STP cc/g	Statistical Thickness nm
0.219298	106.176	0.4493
0.261415	105.038	0.4763
0.302169	104.112	0.5026

70 : 30

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date: Tue Dec 2 2025 **Operator:** Yusuf
Filename: 18781125_3.qcuPhysIso

Analysis Information

Sample
ID 1878_3 **Weight** 0.0716 g
Description 70:30
Analysis
Data ID {220e6445-8a20-4a63-8aee-d5b0dd03e3ae}
Operator Yusuf **Date** 2025.12.02 **Duration** 79.2 min
Instrument St 3 on NOVA touch 4LX [s/n:1701705100011] **Firmware** 1.07
Comments description of sample
Ambient Temp. 30.05 °C **Void Volume Mode** NOVA mode **Cell ID** 43
Cell Type 9mm w/o rod **Thermal Delay** 300 sec **Po Mode** Continuous
Adsorbate
Name Nitrogen **Molecular Weight** 28.013 g/mol **Cross Section Area** 16.2 Å²/mol
Non-ideality 6.580000e-05 1/torr **Bath Temperature** 77.35 K
Degas information
Time 6.0 hours **Temp** 300.000000 °C

Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration yes **Eff. Molec. Diameter** 0 Å
Eff. Cell Diameter 0 mm
Adsorbate Model
Name Nitrogen **Molecular Weight** 28.0134 g **Cross Section Area** 16.2 Å²/molec
Bath Temperature 77.35 K

BET Multi-point BET results

Isotherm Branch Adsorption
Slope 11.1266
Intercept -0.09296
Correlation coeff., r 0.999012
C constant -118.692
Surface area 315.627 m²/g

Table - BET Multi-point BET

Relative Pressure	Volume Adsorbed @STP cc/g	1 / [W((P/Po) - 1)]
0.0496761	81.2477	0.5148
0.0917249	86.6867	0.9321
0.129430	90.4370	1.3153
0.174929	94.0488	1.8037
0.211777	96.4896	2.2279
0.254148	99.8159	2.7314
0.296232	103.180	3.2641

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date: Tue Dec 2 2025 **Operator:** Yusuf
Filename: 18781125_3.qcuPhysIso

Analysis Information

Sample
ID 1878_3 Weight 0.0716 g
Description 70:30
Analysis
Data ID {220e6445-8a20-4a63-8aee-d5b0dd03e3ae}
Operator Yusuf Date 2025.12.02 Duration 79.2 min
Instrument St 3 on NOVA touch 4LX [s/n:170170510001] Firmware 1.07
Comments description of sample
Ambient Temp. 30.05 °C Void Volume Mode NOVA mode Cell ID 43
Cell Type 9mm w/o rod Thermal Delay 300 sec Po Mode Continuous
Adsorbate
Name Nitrogen Molecular Weight 28.013 g/mol Cross Section Area 16.2 Å²/mol
Non-ideality 6.580000e-05 1/torr Bath Temperature 77.35 K
Degas information
Time 6.0 hours Temp 300.000000 °C

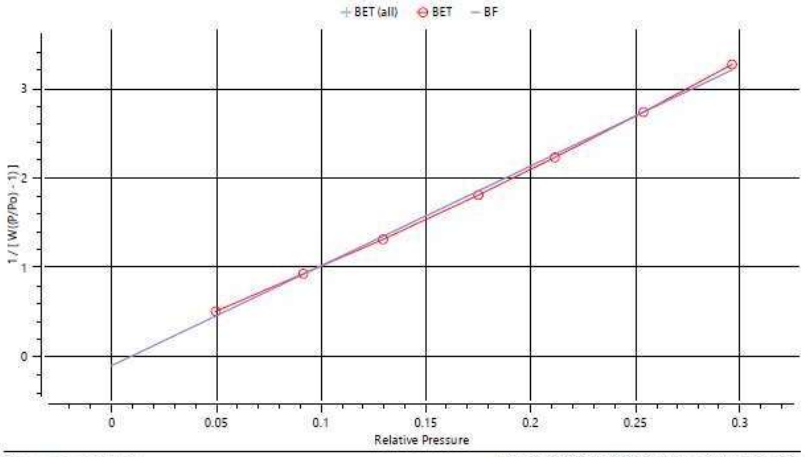
Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration yes Eff. Molec. Diameter 0 Å
Eff. Cell Diameter 0 mm
Adsorbate Model
Name Nitrogen Molecular Weight 28.0134 g Cross Section Area 16.2 Å²/molec
Bath Temperature 77.35 K

BET Multi-point BET results

Isotherm Branch	Adsorption
Slope	11.1266
Intercept	-0.09296
Correlation coeff., r	0.999012
C constant	-118.692
Surface area	315.627 m²/g

Graph - BET Multi-point BET



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date: Tue Dec 2 2025 **Operator:** Yusuf
Filename: 18781125_3.qcuPhysIso

Analysis Information

Sample

ID	1878_3	**Weight**	0.0716 g		
Description	70:30				

Analysis

Data ID	{220e6445-8a20-4a63-8aee-d5b0dd03e3ae}				
Operator	Yusuf	**Date**	2025.12.02	**Duration**	79.2 min
Instrument	St 3 on NOVA touch 4LX [s/n:1701705100001]			**Firmware**	1.07
Comments	description of sample				
Ambient Temp.	30.05 °C	**Void Volume Mode**	NOVA mode	**Cell ID**	43
Cell Type	9mm w/o rod	**Thermal Delay**	300 sec	**Po Mode**	Continuous

Adsorbate

Name	Nitrogen	**Molecular Weight**	28.013 g/mol	**Cross Section Area**	16.2 Å²/mol
Non-ideality	6.580000e-05 1/atm	**Bath Temperature**	77.35 K		

Degas information

Time	6.0 hours	**Temp**	300.000000 °C		

Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration	yes	**Eff. Molec. Diameter**	0 Å
Eff. Cell Diameter	0 mm		

Table - Isotherm Isotherm

Relative Pressure, P/Po	Volume Adsorbed @STP cc/g
0.0496761	81.2477
0.0917249	86.6867
0.129430	90.4370
0.174929	94.0488
0.211777	96.4896
0.254148	99.8159
0.296232	103.180

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date: Tue Dec 2 2025 **Operator:** Yusuf
Filename: 18781125_3.qcuPhysIso

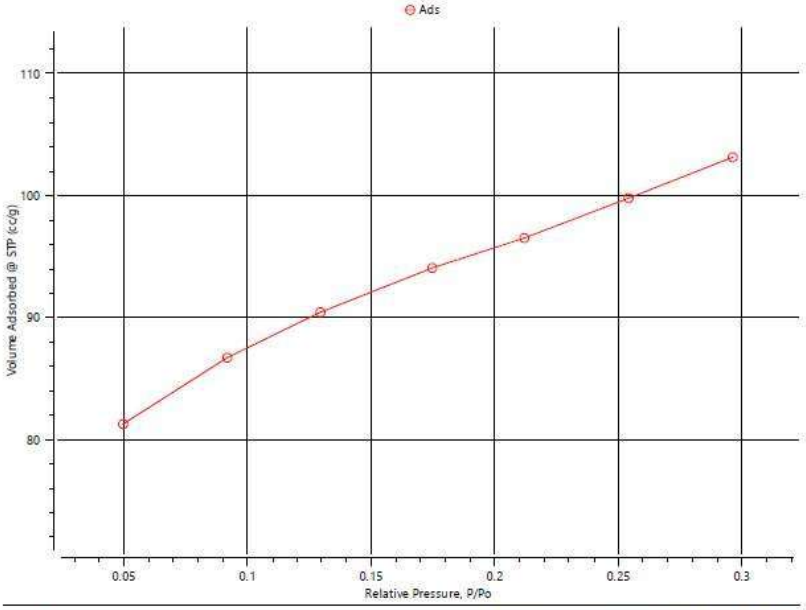
Analysis Information

Sample
ID 1878_3 **Weight** 0.0716 g
Description 70:30
Analysis
Data ID {220e6445-8a20-4a63-8aee-d5b0dd03e3ae}
Operator Yusuf **Date** 2025.12.02 **Duration** 79.2 min
Instrument St 3 on NOVA touch 4LX [s/n:1701705100001] **Firmware** 1.07
Comments description of sample
Ambient Temp. 30.05 °C **Void Volume Mode** NOVA mode **Cell ID** 43
Cell Type 9mm w/o rod **Thermal Delay** 300 sec **Po Mode** Continuous
Adsorbate
Name Nitrogen **Molecular Weight** 28.013 g/mol **Cross Section Area** 16.2 Å²/mol
Non-ideality 6.580000e-05 1/torr **Bath Temperature** 77.35 K
Degas information
Time 6.0 hours **Temp** 300.000000 °C

Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration yes **Eff. Molec. Diameter** 0 Å
Eff. Cell Diameter 0 nm

Graph - Isotherm Isotherm



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date: Tue Dec 2 2025 **Operator:** Yusuf
Filename: 18781125_3.qcuPhysIso

Analysis Information

Sample
ID 1878_3 **Weight** 0.0716 g
Description 70:30
Analysis
Data ID {220e6445-8a20-4a63-8aee-d5b0dd03e3ae}
Operator Yusuf **Date** 2025.12.02 **Duration** 79.2 min
Instrument St 3 on NOVA touch 4LX [s/n:1701705100011] **Firmware** 1.07
Comments description of sample
Ambient Temp. 30.05 °C **Void Volume Mode** NOVA mode **Cell ID** 43
Cell Type 9mm w/o rod **Thermal Delay** 300 sec **Po Mode** Continuous
Adsorbate
Name Nitrogen **Molecular Weight** 28.013 g/mol **Cross Section Area** 16.2 Å²/mol
Non-ideality 6.580000e-05 t/torr **Bath Temperature** 77.35 K
Degas information
Time 6.0 hours **Temp** 300.000000 °C

Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration yes **Eff. Molec. Diameter** 0 Å
Eff. Cell Diameter 0 nm
Thickness Method deBoer

t plot results

Isotherm Branch Adsorption
Slope 123.237 cc/nm/g
Intercept 41.7058 cc/g
Correlation coefficient, r 0.999993
Micropore volume 0.0646712 cc/g
Micropore area 124.528 m²/g
External surface area 191.098 m²/g

Table - t plot

Relative Pressure	Volume Adsorbed @STP cc/g	Statistical Thickness nm
0.211777	96.4896	0.4445
0.254148	99.8159	0.4716
0.296232	103.180	0.4988

50 : 50

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date: Tue Dec 2 2025 **Operator:** Yusuf
Filename: 18781125_4.qcuPhysIso

Analysis Information

Sample
ID 1878_4 **Weight** 0.0738 g
Description 50:50
Analysis
Data ID {6b56c47c-a2ef-4e0e-a764-a088ddfd7b7e}
Operator Yusuf **Date** 2025.12.02 **Duration** 74.0 min
Instrument St 4 on NOVA touch 4LX [s/n:1701705100011] **Firmware** 1.07
Comments description of sample
Ambient Temp. 30.10 °C **Void Volume Mode** NOVA mode **Cell ID** 44
Cell Type 9mm w/o rod **Thermal Delay** 300 sec **Po Mode** Continuous
Adsorbate
Name Nitrogen **Molecular Weight** 28.013 g/mol **Cross Section Area** 16.2 Å²/mol
Non-ideality 6.580000e-05 1/torr **Bath Temperature** 77.35 K
Degas information
Time 6.0 hours **Temp** 300.000000 °C

Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration yes **Eff. Molec. Diameter** 0 Å
Eff. Cell Diameter 0 mm
Adsorbate Model
Name Nitrogen **Molecular Weight** 28.0134 g **Cross Section Area** 16.2 Å²/molec
Bath Temperature 77.35 K

BET Multi-point BET results

Isotherm Branch Adsorption
Slope 13.0709
Intercept -0.239208
Correlation coeff., r 0.997238
C constant -53.6425
Surface area 271.399 m²/g

Table - BET Multi-point BET

Relative Pressure	Volume Adsorbed @STP cc/g	1 / [W((P/Po) - 1)]
0.0502015	80.7189	0.5239
0.0898473	83.3922	0.9471
0.131695	85.5032	1.4193
0.174315	86.8813	1.9442
0.214969	87.8251	2.4947
0.257365	89.0019	3.1155
0.298746	89.9382	3.7900

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date: Tue Dec 2 2025 **Operator:** Yusuf
Filename: 18781125_4.qcuPhysIso

Analysis Information

Sample
ID 1878_4 **Weight** 0.0738 g
Description 50:50

Analysis
Data ID {6b56c47c-a2ef-4e0e-a764-a088ddfd7b7e}
Operator Yusuf **Date** 2025.12.02 **Duration** 74.0 min
Instrument St 4 on NOVA touch 4LX [s/n:1701705100001] **Firmware** 1.07
Comments description of sample
Ambient Temp. 30.10 °C **Void Volume Mode** NOVA mode **Cell ID** 44
Cell Type 9mm w/o rod **Thermal Delay** 300 sec **Po Mode** Continuous

Adsorbate
Name Nitrogen **Molecular Weight** 28.013 g/mol **Cross Section Area** 16.2 Å²/mol
Non-ideality 6.580000e-05 1/torr **Bath Temperature** 77.35 K

Degas information
Time 6.0 hours **Temp** 300.000000 °C

Data Reduction Parameters

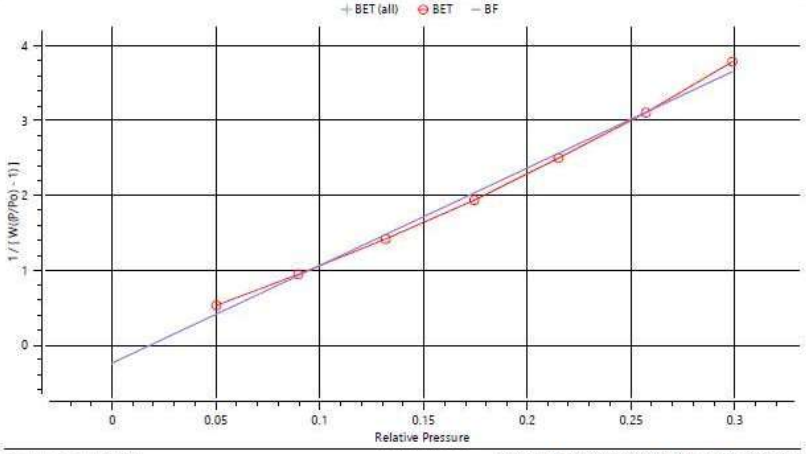
Thermal Transpiration yes **Eff. Molec. Diameter** 0 Å
Eff. Cell Diameter 0 mm

Adsorbate Model
Name Nitrogen **Molecular Weight** 28.0134 g **Cross Section Area** 16.2 Å²/molec
Bath Temperature 77.35 K

BET Multi-point BET results

Isotherm Branch	Adsorption
Slope	13.0709
Intercept	-0.239208
Correlation coeff., r	0.997238
C constant	-53.6425
Surface area	271.399 m²/g

Graph - BET Multi-point BET



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date: Tue Dec 2 2025 **Operator:** Yusuf
Filename: 18781125_4.qcuPhysIso

Analysis Information

Sample
ID 1878_4 **Weight** 0.0738 g
Description 50:50
Analysis
Data ID {6b56c47c-a2ef-4e0e-a764-a088ddfd7b7e}
Operator Yusuf **Date** 2025.12.02 **Duration** 74.0 min
Instrument St 4 on NOVA touch 4LX [s/n:170170510001] **Firmware** 1.07
Comments description of sample
Ambient Temp. 30.10 °C **Void Volume Mode** NOVA mode **Cell ID** 44
Cell Type 9mm w/o rod **Thermal Delay** 300 sec **Po Mode** Continuous
Adsorbate
Name Nitrogen **Molecular Weight** 28.013 g/mol **Cross Section Area** 16.2 Å²/mol
Non-ideality 6.580000e-05 1/torr **Bath Temperature** 77.35 K
Degas information
Time 6.0 hours **Temp** 300.000000 °C

Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration yes **Eff. Molec. Diameter** 0 Å
Eff. Cell Diameter 0 mm

Table - Isotherm Isotherm

Relative Pressure, P/Po	Volume Adsorbed @STP cc/g
0.0502015	80.7189
0.0898473	83.3922
0.131695	85.5032
0.174315	86.8813
0.214969	87.8251
0.257365	89.0019
0.298746	89.9382

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date: Tue Dec 2 2025 **Operator:** Yusuf
Filename: 18781125_4.qcuPhysIso

Analysis Information

Sample
ID 1878_4 Weight 0.0738 g
Description 50:50

Analysis
Data ID {6b56c47c-a2ef-4e0e-a764-a088ddfd7b7e}
Operator Yusuf Date 2025.12.02 Duration 74.0 min
Instrument St 4 on NOVA touch 4LX [s/n:170170510001] Firmware 1.07
Comments description of sample
Ambient Temp. 30.10 °C Void Volume Mode NOVA mode Cell ID 44
Cell Type 9mm w/o rod Thermal Delay 300 sec Po Mode Continuous

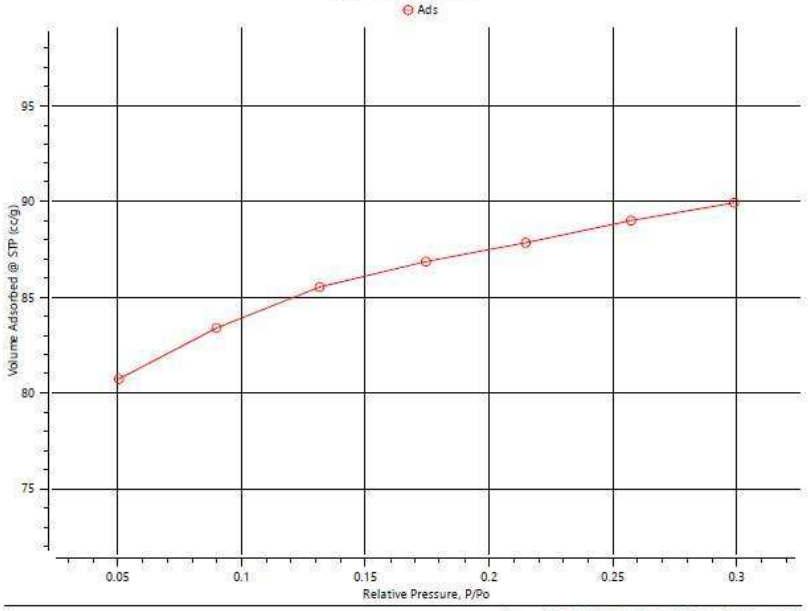
Adsorbate
Name Nitrogen Molecular Weight 28.013 g/mol Cross Section Area 16.2 Å²/mol
Non-ideality 6.580000e-05 1/torr Bath Temperature 77.35 K

Degas information
Time 6.0 hours Temp 300.000000 °C

Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration yes Eff. Molec. Diameter 0 Å
Eff. Cell Diameter 0 mm

Graph - Isotherm Isotherm



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date: Tue Dec 2 2025 **Operator:** Yusuf
Filename: 18781125_4.qcuPhysIso

Analysis Information

Sample

ID	1878_4	**Weight**	0.0738 g		
Description	50:50				

Analysis

Data ID	{6b56c47c-a2ef-4e0e-a764-a088ddfd7b7e}				
Operator	Yusuf	**Date**	2025.12.02	**Duration**	74.0 min
Instrument	St 4 on NOVA touch 4LX [s/n:1701705100011]			**Firmware**	1.07
Comments	description of sample				
Ambient Temp.	30.10 °C	**Void Volume Mode**	NOVA mode	**Cell ID**	44
Cell Type	9mm w/o rod	**Thermal Delay**	300 sec	**Po Mode**	Continuous

Adsorbate

Name	Nitrogen	**Molecular Weight**	28.013 g/mol	**Cross Section Area**	16.2 Å²/mol
Non-ideality	6.580000e-05 1/torr	**Bath Temperature**	77.35 K		

Degas information

Time	6.0 hours	**Temp**	300.000000 °C		

Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration	yes	**Eff. Molec. Diameter**	0 Å
Eff. Cell Diameter	0 mm		
Thickness Method	deBoer		

t plot results

Isotherm Branch	Adsorption
Slope	39.2383 cc/nm/g
Intercept	70.3405 cc/g
Correlation coefficient, r	0.998166
Micropore volume	0.109074 cc/g
Micropore area	210.554 m²/g
External surface area	60.845 m²/g

Table - t plot

Relative Pressure	Volume Adsorbed @ STP cc/g	Statistical Thickness nm
0.214969	87.8251	0.4465
0.257365	89.0019	0.4737
0.298746	89.9382	0.5004

30 : 70

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date: Tue Dec 2 2025 **Operator:** Yusuf
Filename: 18781125_5.qcuPhysIso

Analysis Information

Sample
ID 1878_5 **Weight** 0.0729 g
Description 30:70
Analysis
Data ID {e6a68dbe-4a5a-483a-853a-54c2fe93285e}
Operator Yusuf **Date** 2025.12.02 **Duration** 61.5 min
Instrument St 4 on NOVA touch 4LX [s/n:170170510001] **Firmware** 1.07
Comments description of sample
Ambient Temp. 29.79 °C **Void Volume Mode** NOVA mode **Cell ID** 24
Cell Type 9mm w/o rod **Thermal Delay** 300 sec **Po Mode** Continuous
Adsorbate
Name Nitrogen **Molecular Weight** 28.013 g/mol **Cross Section Area** 16.2 Å²/mol
Non-ideality 6.580000e-05 1/torr **Bath Temperature** 77.35 K
Degas information
Time 6.0 hours **Temp** 300.000000 °C

Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration yes **Eff. Molec. Diameter** 0 Å
Eff. Cell Diameter 0 mm
Adsorbate Model
Name Nitrogen **Molecular Weight** 28.0134 g **Cross Section Area** 16.2 Å²/molec
Bath Temperature 77.35 K

BET Multi-point BET results

Isotherm Branch Adsorption
Slope 10.2431
Intercept -0.183954
Correlation coeff., r 0.996944
C constant -54.6828
Surface area 346.204 m²/g

Table - BET Multi-point BET

Relative Pressure	Volume Adsorbed @ STP cc/g	1 / [W((P/Po) - 1)]
0.0452073	102.618	0.3692
0.0870996	106.599	0.7161
0.130546	109.230	1.0998
0.174052	110.925	1.5200
0.215932	112.265	1.9628
0.257805	113.386	2.4511
0.299400	114.438	2.9879

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date: Tue Dec 2 2025 **Operator:** Yusuf
Filename: 18781125_5.qcuPhysIso

Analysis Information

Sample
ID 1878_5 **Weight** 0.0729 g
Description 30.70
Analysis
Data ID {e6a68dbe-4a5a-483a-853a-54c2fe93285e}
Operator Yusuf **Date** 2025.12.02 **Duration** 61.5 min
Instrument St 4 on NOVA touch 4LX [s/n:1701705100001] **Firmware** 1.07
Comments description of sample
Ambient Temp. 29.79 °C **Void Volume Mode** NOVA mode **Cell ID** 24
Cell Type 9mm w/o rod **Thermal Delay** 300 sec **Po Mode** Continuous
Adsorbate
Name Nitrogen **Molecular Weight** 28.013 g/mol **Cross Section Area** 16.2 Å²/mol
Non-ideality 6.580000e-05 1/torr **Bath Temperature** 77.35 K
Degas information
Time 6.0 hours **Temp** 300.000000 °C

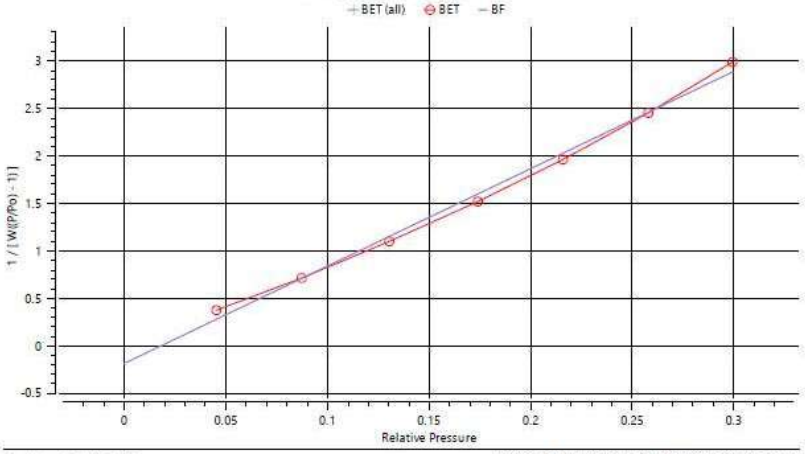
Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration yes **Eff. Molec. Diameter** 0 Å
Eff. Cell Diameter 0 mm
Adsorbate Model
Name Nitrogen **Molecular Weight** 28.0134 g **Cross Section Area** 16.2 Å²/molec
Bath Temperature 77.35 K

BET Multi-point BET results

Isotherm Branch	Adsorption
Slope	10.2431
Intercept	-0.183954
Correlation coeff., r	0.996944
C constant	-54.6828
Surface area	346.204 m²/g

Graph - BET Multi-point BET



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date: Tue Dec 2 2025 **Operator:** Yusuf
Filename: 18781125_5.qcuPhysIso

Analysis Information

Sample

ID	1878_5	**Weight**	0.0729 g		
Description	30:70				

Analysis

Data ID	{e6a68dbe-4a5a-483a-853a-54c2fe93285e}				
Operator	Yusuf	**Date**	2025.12.02	**Duration**	61.5 min
Instrument	St 4 on NOVA touch 4LX [s/n:1701705100001]			**Firmware**	1.07
Comments	description of sample				
Ambient Temp.	29.79 °C	**Void Volume Mode**	NOVA mode	**Cell ID**	24
Cell Type	9mm w/o rod	**Thermal Delay**	300 sec	**Po Mode**	Continuous

Adsorbate

Name	Nitrogen	**Molecular Weight**	28.013 g/mol	**Cross Section Area**	16.2 Å²/mol
Non-ideality	6.580000e-05 1/torr	**Bath Temperature**	77.35 K		

Degas information

Time	6.0 hours	**Temp**	300.000000 °C		

Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration	yes	**Eff. Molec. Diameter**	0 Å
Eff. Cell Diameter	0 mm		

Table - Isotherm Isotherm

Relative Pressure, P/Po	Volume Adsorbed @STP cc/g
0.0452073	102.618
0.0870996	106.599
0.130546	109.230
0.174052	110.925
0.215932	112.265
0.257805	113.386
0.299400	114.438

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date: Tue Dec 2 2025 **Operator:** Yusuf
Filename: 18781125_5.qcuPhysIso

Analysis Information

Sample

ID	1878_5	**Weight**	0.0729 g		
Description	30:70				

Analysis

Data ID	{e6a68dbe-4a5a-483a-853a-54c2fe93285e}				
Operator	Yusuf	**Date**	2025.12.02	**Duration**	61.5 min
Instrument	St 4 on NOVA touch 4LX [s/n:1701705100011]			**Firmware**	1.07
Comments	description of sample				
Ambient Temp.	29.79 °C	**Void Volume Mode**	NOVA mode	**Cell ID**	24
Cell Type	9mm w/o rod	**Thermal Delay**	300 sec	**Po Mode**	Continuous

Adsorbate

Name	Nitrogen	**Molecular Weight**	28.013 g/mol	**Cross Section Area**	16.2 Å²/mol
Non-ideality	6.580000e-05 1/torr	**Bath Temperature**	77.35 K		

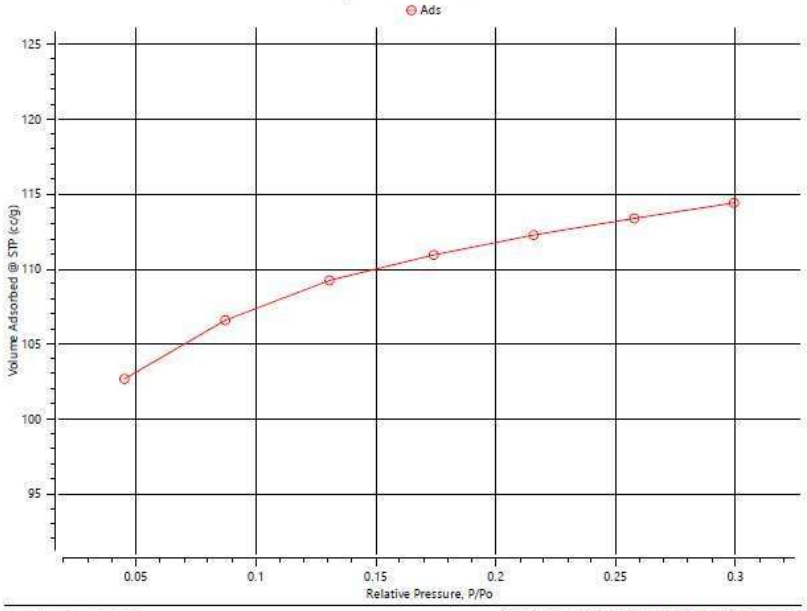
Degas information

Time	6.0 hours	**Temp**	300.000000 °C		

Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration	yes	**Eff. Molec. Diameter**	0 Å
Eff. Cell Diameter	0 mm		

Graph - Isotherm Isotherm



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman Yogyakarta
LABORATORIUM TERPADU
Quantachrome TouchWin v1.22

Report date: Tue Dec 2 2025 **Operator:** Yusuf
Filename: 18781125_5.qcuPhysIso

Analysis Information

Sample

ID	1878_5	**Weight**	0.0729 g
Description	30:70		

Analysis

Data ID	(e6a68dbe-4a5a-483a-853a-54c2fe93285e)				
Operator	Yusuf	**Date**	2025.12.02	**Duration**	61.5 min
Instrument	St 4 on NOVA touch 4LX [s/n:1701705100001]			**Firmware**	1.07
Comments	description of sample				
Ambient Temp.	29.79 °C	**Void Volume Mode**	NOVA mode	**Cell ID**	24
Cell Type	9mm w/o rod	**Thermal Delay**	300 sec	**Po Mode**	Continuous

Adsorbate

Name	Nitrogen	**Molecular Weight**	28.013 g/mol	**Cross Section Area**	16.2 Å²/mol
Non-ideality	6.580000e-05 1/torr	**Bath Temperature**	77.35 K		

Degas information

Time	6.0 hours	**Temp**	300.000000 °C

Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration	yes	**Eff. Molec. Diameter**	0 Å
Eff. Cell Diameter	0 mm		
Thickness Method	deBoer		

t plot results

Isotherm Branch	Adsorption
Slope	40.4847 cc/nm/g
Intercept	94.1736 cc/g
Correlation coefficient, r	0.999826
Micropore volume	0.146031 cc/g
Micropore area	283.427 m²/g
External surface area	62.778 m²/g

Table - t plot

Relative Pressure	Volume Adsorbed @STP cc/g	Statistical Thickness nm
0.215932	112.265	0.4472
0.257805	113.386	0.4740
0.299400	114.438	0.5008

KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM MALANG
Jalan Gajayana Nomor 50 Telepon (0341)551354 Fax. (0341) 572533
Website: http://www.uin-malang.ac.id Email: info@uin-malang.ac.id

JURNAL BIMBINGAN SKRIPSI/TESIS/DISERTASI

IDENTITAS MAHASISWA

NIM	:	210604110036
Nama	:	FATMA NABILLA NUR'AINI
Fakultas	:	SAINS DAN TEKNOLOGI
Prodi	:	FISIKA
Dosen Pembimbing 1	:	FIKRIYATUL AZIZAH SU'UD,M.Si
Dosen Pembimbing 2	:	ARISTA ROMADANI,S.Si., M.Sc
Judul Skripsi/Tesis/Disertasi	:	ANALISIS STRUKTUR DAN SIFAT KOMPOSIT SILIKA-KARBON DARI LIMBAH PERTANIAN UNTUK APLIKASI ADSORBEN LOGAM BERAT Pb (II)

IDENTITAS BIMBINGAN

No	Tanggal Bimbingan	Nama Pembimbing	Deskripsi Proses Bimbingan	Tahun Akademik	Status
1	18 Maret 2025	FIKRIYATUL AZIZAH SU'UD,M.Si	Pengajuan Judul serta Bimbingan Tekait	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
2	18 Juli 2025	FIKRIYATUL AZIZAH SU'UD,M.Si	Bimbingan Proposal Skripsi	Ganjil 2025/2026	Sudah Dikoreksi
3	08 Agustus 2025	FIKRIYATUL AZIZAH SU'UD,M.Si	Bimbingan Revisi Proposal	Ganjil 2025/2026	Sudah Dikoreksi
4	24 Oktober 2025	FIKRIYATUL AZIZAH SU'UD,M.Si	Persetujuan Draft Untuk Komprehensif	Ganjil 2025/2026	Sudah Dikoreksi
5	27 Oktober 2025	ARISTA ROMADANI,S.Si., M.Sc	Bimbingan Integrasi Bab 1	Ganjil 2025/2026	Sudah Dikoreksi
6	03 November 2025	FIKRIYATUL AZIZAH SU'UD,M.Si	Bimbingan Revisi Draft setelah Komprehensif	Ganjil 2025/2026	Sudah Dikoreksi
7	12 November 2025	ARISTA ROMADANI,S.Si., M.Sc	Bimbingan Integrasi Bab 4	Ganjil 2025/2026	Sudah Dikoreksi
8	16 Desember 2025	FIKRIYATUL AZIZAH SU'UD,M.Si	Bimbingan Bab 4	Ganjil 2025/2026	Sudah Dikoreksi
9	06 Januari 2026	ARISTA ROMADANI,S.Si., M.Sc	Bimbingan Bab 4	Genap 2026/2027	Sudah Dikoreksi
10	12 Januari 2026	FIKRIYATUL AZIZAH SU'UD,M.Si	Bimbingan terkait revisi Analisis data dan pembahasan	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi

Telah disetujui
Untuk mengajukan ujian Skripsi/Tesis/Desertasi

Malang, _____

Dosen Pembimbing 2

ARISTA ROMADANI,S.Si., M.Sc

Dosen Pembimbing 1

FIKRIYATUL AZIZAH SU'UD,M.Si

Kajur / Kaprodi,