

**PENGARUH VARIASI SUHU KALSINASI TERHADAP AKTIVITAS
FOTOKATALIS *EXFOLIATED GRAPHITE* PADA DEGRADASI
*METHYLENE BLUE***

SKRIPSI

Oleh:
LITURGI DZAUQI RAHMI
NIM. 210604110029



**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2025**

HALAMAN PENGANTAR

**PENGARUH VARIASI SUHU KALSINASI TERHADAP AKTIVITAS
FOTOKATALIS *EXFOLIATED GRAPHITE* PADA DEGRADASI
*METHYLENE BLUE***

SKRIPSI

Diajukan kepada:

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

Oleh:

**LITURGI DZAUQI RAHMI
210604110029**

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2025**

HALAMAN PERSETUJUAN

HALAMAN PERSETUJUAN

PENGARUH VARIASI SUHU KALSIINASI TERHADAP AKTIVITAS
FOTOKATALIS *EXFOLIATED GRAPHITE* PADA DEGRADASI
METHYLENE BLUE

SKRIPSI

Oleh:

Liturgi Dzauqi Rahmi
NIM. 210604110029

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji
Pada Tanggal, 16 Desember 2025

Pembimbing I

Utiya Hikmah, M.Si
NIP. 19880605 202321 2 054

Pembimbing II

Prof. Dr. Drs. Mokhammad Tirono, M.Si
NIP. 1965121119911111001



Mengetahui,
Kepada Program Studi

Prof. Dr. Drs. Hananto, S.Si, M.T
NIP. 19740513 200312 1 001

HALAMAN PENGESAHAN

HALAMAN PENGESAHAN

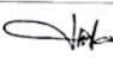
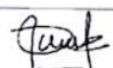
PENGARUH VARIASI SUHU KALSIKASI TERHADAP AKTIVITAS
FOTOKATALIS *EXFOLIATED GRAPHITE* PADA DEGRADASI
METHYLENE BLUE

SKRIPSI

Oleh :

LITURGI DZAUQI RAHIMI
NIM. 210604110029

Telah Dipertahankan Di Depan Dewan Penguji
Dan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)
Pada Tanggal, 23 Desember 2025

Penguji Utama	<u>Dr. Erna Hastuti, M.Si</u> NIP. 19811119 200801 2 009	
Ketua Penguji	<u>Erika Rani, M.Si</u> NIP. 19810613 200604 2 002	
Sekretaris Penguji	<u>Utiya Hikmah, M.Si</u> NIP. 19880605 202321 2 054	
Anggota Penguji	<u>Prof. Dr. Drs. Mokhammad Tirono, M.Si</u> NIP. 19651211 199111 1 001	



PERNYATAAN KEASLIAN

PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : LITURGI DZAUQI RAHMI

NIM : 210604110029

Jurusan : FISIKA

Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI

Judul Penelitian : PENGARUH VARIASI SUHU KALSINASI
TERHADAP AKTIVITAS FOTOKATALIS *EXFOLIATED*
GRAPHITE PADA DEGRADASI *METHYLENE BLUE*

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, 24 Desember 2025
Yang Membuat Pernyataan



Liturgi Dzauqi Rahmi
NIM. 2106041100029

MOTTO

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya”

(QS. Al-Baqarah: 286)

“In the midst of winter, I found there was, within me, an invincible summer.”

(Albert Camus)

“I am proud of the person I am becoming”

(Penulis)

HALAMAN PERSEMBAHAN

Segala puji dan syukur senantiasa kupanjatkan kepada Allah SWT atas setiap kelapangan dada, ketenangan hati, serta kekuatan yang Dia titipkan hingga langkah ini dapat tiba pada akhir yang membahagiakan. Sholawat dan salam semoga senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, suri teladan terbaik bagi seluruh umat manusia. Dengan penuh cinta, rasa hormat, dan ketulusan, karya sederhana ini kupersembahkan kepada :

1. Ibuku tersayang, perempuan paling berani dan tangguh yang Allah takdirkan dalam hidupku. Di saat dunia terasa terlalu bising dan badai di dalam pikiranku sendiri tak kunjung usai. Ibu adalah rumah paling tenang dimana aku diizinkan menjadi rapuh tanpa perlu rasa malu. Terima kasih telah menjadi sumber kekuatan yang paling sunyi namun paling kokoh. Pencapaian kecil ini hanya sekadar kertas, namun perjuangan dibaliknya adalah cara aku berterima kasih atas setiap doa yang ibu langitkan. Terima kasih untuk telah mencintaiku dengan cara paling tulus, meski aku bukan anak yang paling mudah dipahami.
2. Ayah, cinta pertamaku. Sosok yang barangkali tak banyak bicara denganku, namun suaranya selalu bergema dalam setiap arahan yang menuntun langkah studiku hingga titik ini. Terima kasih karena telah menjadi mata yang selalu memantau dari kejauhan, memastikan jalanku tetap lurus meski kakiku sering kali gemetar. Dibalik ketegasan dan optimisme Ayah, ada tangan yang selalu sibuk mengupayakan segala hal yang aku butuhkan. Ayah adalah fondasi yang kokoh yang memungkinkanku tetap memiliki tempat berpijak saat duniaku terasa

goyah. Terima kasih sudah menjadi tiang yang kuat, yang meski tak selalu tersentuh, selalu ada untuk menyangga atap hidupku.

3. Tiga bidadari kecilku, Salwa, Hana, dan Eca. Maafkan kakak yang terlalu sering tertinggal momen saat kalian bertumbuh. Yang barangkali tak selalu ada di samping kalian untuk menyaksikan setiap langkah kecil itu menjadi dewasa. Ada sesak yang tak terucap melihat kalian mekar tanpa kehadiran kakak disana, namun ketahuilah bahwa kalian adalah salah satu alasan kakak mampu tertawa ditengah badai sedih yang tak kunjung reda. Tumbuhkan menjadi cantik dan berani. Semoga tulisan ini menjadi pengingat bagi kalian kelak, bahwa seberat apapun hidup menghantam, kakak selalu berusaha bangkit dan menjadi tempat kalian bersandar.
4. Keluarga besarku, yang selalu menjadi sumber doa dan semangat. Terkhusus untuk Ibu Hartati, Ibu Asyanti, almarhumah Ibu Asfa, dan Ibu Mira. Terima kasih telah menjadi tangan-tangan yang merangkulku saat aku hampir terjatuh. Kalian adalah layar yang memastikan mimpiku tetap bisa berlayar dengan dukungan yang tidak terhingga. Kebaikan kalian adalah bukti bahwa kasih sayang tak selalu harus searah. Khusus untuk almarhumah Ibu Asfa, semoga pencapaian kecil ini sampai ke langit sebagai bentuk baktiku. Kalian bukan sekadar saudara bagi orang tuaku, kalian adalah pelindung bagi jiwaku.
5. Pembimbingku, Ibu Utiya Hikmah. Terima kasih telah membimbing saya dengan penuh pengertian dan ketegasan yang mendewasakan. Karya ini selesai berkat bimbingan yang melampaui sekadar kata-kata di atas kertas.

6. Teman-teman labku tersayang. Terima kasih telah menjadi ruang dimana aku tidak perlu selalu terlihat baik-baik saja. Terima kasih sudah menjadi saksi dari setiap air mata yang jatuh di sela-sela kegagalan eksperimen, juga menjadi alasan dari tawa meedak ditengah penahntnya hari. Diantara bisingnya alat lab dan tumpukan data, aku menemukan rumah yang hangat.
7. Teman-teman angkatan 2021, yang menjadi bagian dari masa-masa belajar, tumbuh, jatuh, dan bangkit bersama. Terima kasih untuk tiap perjalanan yang kita lalui dengan cara terbaik yang kita bisa.
8. *My own soul, Liturgi Dzauqi Rahmi. To the girl who fought silent battles and chose to keep going, thank you for staying. I want to thank me for realizing that I am my own 'Answer'. In a world that constantly asked me to run, thank you for learning that Just Walking is a victory too. Like a Diamond hidden deep within, the pressure prepared you to shine. You've proven that your Spring Day was a destination you earned every tear. You've done a great job, Ugii. You are finally blooming in the light you created for your self.*

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan segala rahmat dan nikmat berupa kesehatan, kesempatan, dan kesabaran sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan proposal skripsi dengan baik. Proposal skripsi yang telah penulis susun berjudul “Pengaruh Variasi Suhu Kalsinasi Terhadap Aktivitas Fotokatalis *Exfoliated Graphite* Pada Degradasi *Methylene Blue*”.

Sholawat dan salam penulis panjatkan kepada Nabi besar Rosululloh Muhammad SAW, yang telah menuntun umat manusia dari zaman Jahiliyah menuju zaman yang terang benerang dan penuh dengan ilmu pengetahuan yang sangat luar biasa ini.

Dalam penyusunan proposal skripsi ini, penulis menyadari kelemahan serta keterbatasan yang ada sehingga dalam menyelesaikan penulisan proposal skripsi ini tidak akan tersusun dengan baik tanpa adanya bantuan dari pihak-pihak terkait. Oleh karena itu, penulis dalam kesempatan ini menyampaikan ucapan terimakasih kepada semua pihak yang membantu penulis dalam penyusunan penulisan proposal skripsi ini.

Selanjutnya penulis ucapkan terimakasih kepada:

1. Prof. Dr. Hj. Ilfi Nur Diana, M.Si., CAHRM., CRMP selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Dr. Agus Mulyono, M.Kes selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

3. Farid Samsu Hananto, S.Si., M.T selaku Ketua Program Studi Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang Wali Dosen saya yang sudah banyak memberi ilmu dan saran.
4. Ibu Utiya Hikmah, M.Si, selaku Dosen pembimbing yang telah banyak memberikan arahan, tenaga, dukungan, kesabaran, waktu, dan ilmu dalam membimbing penulis agar skripsi ini tersusun dengan baik.
5. Prof. Dr. Drs. Mohammad Tirono, M.Si selaku Dosen pembimbing agama, yang bersedia meluangkan waktu untuk memberi bimbingan, arahan baik pada perkuliahan maupun skripsi dibidang integrasi Sains dan Al-Qur'an serta Hadits.
6. Ibu Dr. Erna Hastuti, M.Si selaku Dosen penguji Skripsi yang telah memberi ilmu dan masukan serta saran.
7. Ibu Erika Rani, M.Si selaku Dosen penguji Skripsi yang telah memberi ilmu dan masukan serta saran
8. Segenap dosen, Laboran dan Admin Jurusan Fisika UIN Maulana Malik Ibrahim Malang yang senantiasa memberikan pengarahan dan ilmu pengetahuan.
9. Orang tua tercinta beserta keluarga yang telah memberikan nasihat, do'a, bantuan dalam perkuliahan dan dukungan serta memotivasi penulis untuk senantiasa pantang menyerah hingga saat ini.
10. Segenap mahasiswa fisika angkatan 2021, yang telah mendukung dan memberi semangat kepada penulis hingga terselesaikannya skripsi ini.
11. Teman-teman di Lab Riset Fisika (Material) yang selalu memberikan dukungan dan motivasi.

12. Semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung memberikan dukungan dalam penulisan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih terdapat kekurangan oleh karena itu kritik dan saran sangat diharapkan demi kesempurnaan laporan ini. Serta penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberi manfaat bagi pembaca.

Malang, 18 Desember 2025

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGAJUAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
PERNYATAAN KEASLIAN	v
MOTTO	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR.....	x
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
ABSTRAK	xvii
ABSTRACT	xviii
مستخلص البحث	xix
 BAB I.....	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah.....	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
 BAB II	 6
2.1. Grafena	6
2.2. <i>Exfoliated graphite</i> (EG).....	7
2.3. Sintesis <i>Exfoliated Graphite</i>	9
2.3.1 <i>Chemical Exfoliation</i>	9
2.3.2 <i>Electrochemical Exfoliation</i>	9
2.4. Kalsinasi.....	12
2.5. Karakterisasi.....	13
2.4.1 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	13
2.4.2 <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR)	14
2.4.3 Spektrofotometer UV-Vis	15
2.4.4 <i>Inductance, Capacitance, and Resistance Meter</i> (LCR Meter) ...	16
2.4.5 <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	16
2.6. Fotokatalis	17
 BAB III.....	 20
3.1 Jenis Penelitian.....	20
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian	20
3.3 Alat dan Bahan.....	20
3.4 Langkah-langkah Penelitian.....	22
3.4.1 Diagram alir penelitian pembuatan sampel EG	22

3.4.2	Pre-Treatment <i>Graphite</i> Sheet	22
3.4.3	Sintesis Exfoliated graphite.....	23
3.4.4	Uji aktivitas fotokatalis	23
3.5	Prosedur Penelitian.....	23
3.5.1	<i>Pre-Treatment Graphite Sheet</i> (Abdillah dkk., 2021)	23
3.5.2	Sintesis <i>Exfoliated graphite</i> (Abdillah dkk., 2021).....	24
3.5.3	Pengujian Fotokatalis.....	25
3.6	Rencana Analisis Data	25
3.6.1	Karakterisasi Sampel <i>Exfoliated graphite</i> menggunakan XRD....	26
3.6.2	Karakterisasi Sampel <i>Exfoliated graphite</i> Menggunakan FTIR ...	26
3.6.3	Karakterisasi Sampel <i>Exfoliated graphite</i> dengan UV-Vis	27
3.6.4	Karakterisasi Sifat Listrik Menggunakan LCR Meter	27
3.6.5	Karakterisasi Morfologi Menggunakan SEM	28
3.6.6	Pengujian Pengaruh Suhu Kalsinasi Terhadap Fotokatalis.....	28
BAB VI		30
4.1	Data Hasil Penelitian.....	30
4.1.1	Karakterisasi <i>exfoliated graphite</i>	31
4.1.2	Uji aktivitas fotokatalis komposit EG	42
4.2	Pembahasan.....	48
4.3	Fotokatalis <i>Exfoliated Graphite</i> dalam perspektif Islam	56
BAB V		59
5.1	Kesimpulan	59
5.2	Saran	60
DAFTAR PUSTAKA		61
LAMPIRAN		70

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Rancangan Percobaan Menggunakan XRD	26
Tabel 3. 2 Rancangan Percobaan Menggunakan FTIR.....	26
Tabel 3. 3 Rancangan Percobaan Menggunakan UV-Vis.....	27
Tabel 3. 4 Rancangan Percobaan Menggunakan LCR Meter	28
Tabel 3. 5 Rancangan Pengujian Fotokatalis	29
Tabel 4. 1 Ukuran kristal dan jarak antar lapisan EG dan EG terkalsinasi	33
Tabel 4. 2 Gugus fungsi <i>Exfoliated Graphite</i>	35
Tabel 4. 3 konduktivitas listrik sampel <i>Exfoliated Graphite</i>	37
Tabel 4. 4 Nilai energi gap EG dan EG terkalsinasi	40
Tabel 4. 5 Hasil absorbansi <i>methylen blue</i>	44
Tabel 4. 6 Efisiensi degradasi <i>methylene blue</i>	45
Tabel 4. 7 Konstanta laju degradasi pewarna <i>methylene blue</i>	48

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema eksfoliasi grafit yang menghasilkan grafena	6
Gambar 2.2 Ilustrasi <i>exfoliated graphite</i>	8
Gambar 2.3 Gambar proses <i>Electrochemical Exfoliation</i>	10
Gambar 2.4 Proses pengelupasan pada grafit setelah <i>pre-treatmen</i>	11
Gambar 2.5 Hasil FTIR <i>graphite</i> dan <i>graphene</i>	15
Gambar 2.6 Mekanisme Fotokatalis	19
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	22
Gambar 3.2 Diagram alir proses <i>Pre-Treatment</i>	22
Gambar 3.3 Diagram Alir Sintesis <i>Exfoliated graphite</i>	23
Gambar 3. 4 Diagram alir uji aktivitas fotokatalis.....	23
Gambar 4. 1 Pola difraksi EG dan EG terkalsinasi.....	32
Gambar 4. 2 Spektrum IR EG dan EG terkalsinasi.....	34
Gambar 4. 3 Grafik fungsi frekuensi.....	37
Gambar 4. 4 Konduktivitas listrik <i>Exfoliated Graphite</i>	38
Gambar 4. 5 Grafik lamdha maksimum EG dan EG terkalsinasi	39
Gambar 4. 6 <i>Tauc plot</i> energi gap EG dan EG terkalsinasi	40
Gambar 4. 7 Struktur morfologi EG-350	41
Gambar 4. 8 Panjang gelombang maksimum <i>methylene blue</i>	42
Gambar 4. 9 Kurva standart <i>methylene blue</i>	43
Gambar 4. 10 Hasil pengujian fotokatalis.....	45
Gambar 4. 11 Efisiensi Degradasi <i>methylene blue</i>	46
Gambar 4. 12 Kinetika degradasi <i>methylene blue</i>	47

ABSTRAK

Rahmi, Liturgi Dzauqi. 2025. **Pengaruh Variasi Suhu Kalsinasi Terhadap Aktivitas Fotokatalis *Exfoliated Graphite* Pada Degradasi *Methylene Blue*** Skripsi. Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (I) Utiya Hikmah, M.Si (II) Prof. Dr. Drs. Mohammad Tirono, M.Si.

Kata kunci : *Exfoliated Graphite*, Kalsinasi, Konduktivitas, Fotokatalis, Metilen Biru

Limbah zat warna metilen biru dari industri tekstil merupakan polutan toksik yang membahayakan lingkungan, sehingga diperlukan metode penguraian yang efektif seperti fotokatalis. *Exfoliated Graphite* (EG) merupakan material karbon potensial yang konduktivitasnya dapat dimodifikasi melalui perlakuan panas untuk meningkatkan aktivitas fotokatalitik. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis EG menggunakan metode *electrochemical exfoliation* dan menyelidiki pengaruh variasi suhu kalsinasi (300°C, 350°C, dan 400°C) terhadap sifat fisis serta aktivitas fotokatalisnya. Karakterisasi dilakukan menggunakan XRD, FTIR, LCR *meter*, dan UV-Vis, sementara uji fotokatalis dilakukan terhadap degradasi metilen biru di bawah paparan sinar UV. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kalsinasi pada suhu 350°C memberikan kondisi optimum dengan ukuran kristal terbesar (12,33 nm) dan nilai energi gap terkecil (3,11 eV). Analisis LCR *meter* mengonfirmasi bahwa sampel EG-350 memiliki konduktivitas listrik tertinggi sebesar $6,486 \times 10^{-1}$ S/m karena hilangnya residu sisa eksfoliasi yang menghambat pergerakan elektron. Uji aktivitas fotokatalis menunjukkan bahwa sampel EG-350 mampu mendegradasi metilen biru dengan efisiensi tertinggi mencapai 86,45% dan konstanta laju reaksi sebesar $1,507 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$. Sebaliknya, kalsinasi pada suhu 400°C menyebabkan penurunan performa akibat degradasi termal yang merusak keteraturan struktur kristal. Temuan ini menyimpulkan bahwa suhu kalsinasi yang terkontrol efektif meningkatkan efisiensi fotokatalis EG melalui optimasi sifat listrik dan optik material

ABSTRACT

Rahmi, Liturgi Dzauqi. 2025. **The Effect of Calcination Temperature Variation on the Photocatalytic Activity of Exfoliated Graphite in Methylene Blue Degradation**. Undergraduate Thesis. Physics Department, Faculty of Science and Technology, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Advisors: (I) Utiya Hikmah, M.Si (II) Prof. Dr. Drs. Mohammad Tirono, M.Si.

Key Word: Exfoliated Graphite, Calcination, Conductivity, Photocatalyst, Methylene Blue.

Methylene blue dye waste from the textile industry is a toxic pollutant that endangers the environment, necessitating effective decomposition methods such as photocatalysis. *Exfoliated Graphite* (EG) is a potential carbon material whose conductivity can be modified through heat treatment to enhance photocatalytic activity. This study aims to synthesize EG using the electrochemical exfoliation method and investigate the effect of calcination temperature variations (300°C, 350°C, and 400°C) on its physical properties and photocatalytic activity. Characterization was performed using XRD, FTIR, LCR meter, and UV-Vis, while photocatalytic tests were conducted on the degradation of methylene blue under UV light exposure. The results showed that calcination at 350°C provided the optimum conditions, yielding the largest crystal size (13,05 nm) and the smallest energy gap (3.11 eV). LCR meter analysis confirmed that the EG-350 sample possessed the highest electrical conductivity at $6,486 \times 10^{-1}$ S/m, attributed to the removal of oxygen functional groups that hinder electron movement. Photocatalytic activity tests demonstrated that the EG-350 sample was capable of degrading methylene blue with the highest efficiency of 86.45% and a reaction rate constant of $1,507 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$. Conversely, calcination at 400°C led to a decline in performance due to thermal degradation that disrupted the regularity of the crystal structure. These findings conclude that controlled calcination temperature effectively increases the efficiency of EG photocatalysts by optimizing the electrical and optical properties of the material.

مستخلص البحث

رحمي، ليتورقي الذوقي. 2025. تأثير تنوع درجة حرارة الكلسنة على نشاط التحفيز الضوئي للجرافيت المقشور في تحليل الميثيلين بلو. بحث جامعي. قسم الفيزياء، كلية العلوم والتكنولوجيا، جامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. المشرفان: (الأول) أوتيا حكمة، الماجستير (والثاني) الأستاذ الدكتور محمد تيرونو، الماجستير

الكلمة الرئيسية: الجرافيت المقشور، التكليل، الموصلية، التحفيز الضوئي، الميثيلين الأزرق

النفائات الناتجة عن صبغة الميثيلين الأزرق من صناعة المنسوجات تعد ملوثات سامة تشكل خطراً على البيئة، لذلك هو مادة كربونية محتملة يمكن تعديل موصليتها عبر (EG) هناك حاجة إلى طرق تحليل فعالة مثل التحفيز الضوئي. الجرافيت المقشور باستخدام طريقة التقشير الكهربائي ودراسة EG المعالجة الحرارية لتعزيز نشاطها التحفيزي الضوئي. يهدف هذا البحث إلى تحليل على الخصائص الفيزيائية ونشاطها التحفيزي (°C، وC400، 350°C و300°C درجة حرارة التكليل variations تأثير ، بينما تم اختبار التحفيز الضوئي لتحلل UV-Vis، وLCR، جهاز XRD، FTIR، التحليل باستخدام يوفر الظروف °C أظهرت نتائج البحث أن التكليل عند درجة حرارة 350°C. الميثيلين الأزرق تحت التعرض للأشعة فوق البنفسجية أن LCR المثلثي بحجم البلورة الأكبر (13,05 نانومتر) وقيمة فجوة الطاقة الأدنى (3.11 إلكترون فولت). وأكد تحليل مقاييس تمتلك أعلى موصلية كهربائية بلغت 6.4×10^{-1} س/م بسبب إزالة بقايا التقشير التي تعيق حركة EG=350 العينة قادرة على تحليل الأزرق الميثيلين بكفاءة تصل إلى EG-350 الإلكترونات. أظهرت اختبارات النشاط الحفاز الضوئي أن العينة وثابت معدل التفاعل يبلغ 1.507×10^{-2} دقيقة⁻¹. وعلى النقيض من ذلك، أسفر التكليل عند درجة حرارة 86.45% عن انخفاض الأداء نتيجة التحلل الحراري الذي يضر بتنظيم بنية البلورة. وتخلص هذه النتائج إلى أن التحكم الفعال في 400°C من خلال تحسين الخصائص الكهربائية والبصرية للمادة EG درجة حرارة التكليل يعزز كفاءة الحفاز الضوئي

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri merupakan salah satu sektor yang berkembang pesat di Indonesia, baik industri makanan, material hingga industri tekstil. Perkembangan industri yang pesat memberikan dampak yang baik bagi perekonomian negara, namun memberikan dampak negatif seperti limbah yang membahayakan manusia dan lingkungan sekitar (Maryudi dkk., 2021). Limbah yang dihasilkan dari industri tekstil mayoritas merupakan limbah cair dengan jumlah yang besar, seperti logam berat, surfaktan dan detergen, serta pewarna tekstil seperti metilen biru (Haryono dkk., 2018). Metilen biru merupakan salah satu pewarna tekstil bersifat toksik. Limbah metilen biru yang dibuang tanpa diolah akan menjadi masalah lingkungan yang serius (Wati dkk., 2021). Manusia diharapkan dapat menjaga dan tidak merusak alam sekitar. Bahkan dalam Al-quran, Allah tidak menyukai manusia yang bersifat suka merusak. Sesuai dengan firman Allah pada QS Al-A'raaf ayat

56

وَلَا تَفْسُدُوا فِي الْأَرْضِ بَعْدَ إِصْلَاحِهَا وَادْعُوهُ خَوْفًا وَطَمَعًا ۚ إِنَّ رَحْمَتَ اللَّهِ قَرِيبٌ مِّنَ الْمُحْسِنِينَ

Artinya: “Dan janganlah kamu membuat kerusakan di muka bumi, sesudah (Allah) memperbaikinya dan Berdoalah kepada-Nya dengan rasa takut dan penuh harapan. Sesungguhnya rahmat Allah amat dekat kepada orang-orang yang berbuat baik”.

Metilen biru dapat diurai dengan berbagai macam metode. Terdapat metode fisika seperti adsorpsi dimana metilen biru diserap oleh permukaan bahan

berpori (Mafliah dkk., 2021), metode biologi seperti biodegradasi yaitu mengurai metilen biru dengan mikroorganisme (Pham dkk., 2022), dan metode kimia seperti fotokatalis. Metode-metode tersebut memiliki kelebihan dan kekurangan. Fotokatalisis merupakan reaksi kimia antara sinar UV dan material katalis (Sianita dkk., 2017). Metode ini merupakan salah satu metode penguraian zat warna yang sedang diminati di Indonesia. Hal ini dikarenakan letak Indonesia yang berada pada garis khatulistiwa yang mengakibatkan Indonesia mendapatkan cahaya matahari hampir sepanjang tahun. Hal ini menjadi salah satu peluang yang dapat digunakan pada pengaplikasian fotokatalis.

Mekanisme kerja fotokatalis melalui tiga tahapan utama, yaitu absorpsi cahaya, migrasi muatan dan reaksi redoks yang mendegradasi polutan. Dalam proses migrasi muatan, pasangan elektron hole yang terbentuk akibat proses absorpsi cahaya akan bergerak ke permukaan sehingga terjadilah reaksi redoks dan degradasi polutan. Konduktivitas listrik berperan aktif dalam proses migrasi muatan tersebut. Konduktivitas listrik yang tinggi dapat mempercepat pergerakan muatan dan menekan laju rekombinasi elektron hole (Minnekhanov dkk., 2017). Sehingga dapat meningkatkan aktivitas fotokatalik.

Konduktivitas listrik dapat dimodifikasi salah satunya dengan cara kalsinasi. Kalsinasi merupakan proses pemanasan pada material dengan tujuan untuk mengubah sifat fisik, dan kimia dari material tersebut. Penelitian Wang (2018) menyebutkan bahwa kalsinasi pada suhu tertentu dapat meningkatkan konduktivitas yang berpengaruh pada kemampuan transportasi elektron. Sehingga suhu kalsinasi berpengaruh terhadap performa fotokatalik dari material (M. Wang dkk., 2022).

Salah satu material yang konduktivitasnya dapat dimodifikasi dengan kalsinasi adalah *reduce graphene oxide* (rGO). rGO yang dipanaskan dengan suhu dan waktu tertentu dapat meningkatkan konduktivitas material. Peningkatan ini terjadi karena proses pemanasan mampu menghilangkan gugus oksigen dan memperbaiki keteraturan struktur sp^2 karbon, sehingga elektron dapat bergerak lebih bebas (Iskandar dkk., 2017). Selain rGO, material lain yang memiliki struktur karbon berlapis dan dapat dimodifikasi konduktivitasnya melalui perlakuan panas adalah *Exfoliated Graphite* (EG). EG merupakan lembaran yang terlepas dari grafit setelah proses eksfoliasi dengan struktur lembaran karbon terpisah serta memiliki luas permukaan yang lebih tinggi (Abidin dkk., 2023). Seperti halnya rGO, EG juga mengandung gugus fungsi oksigen sisa dari proses oksidasi dan eksfoliasi yang dapat menghambat aliran elektron. Sehingga perlakuan panas diperkirakan dapat menghilangkan gugus oksigen dan meningkatkan konduktivitas EG.

Penelitian yang dilakukan oleh Abdillah et al., (2021) menggunakan metode *Electrochemical Exfoliation* untuk sintesis EG. Proses *pre-treatment* pada eksfoliasi dapat mengontrol jumlah material EG yang dihasilkan. Pada penelitian tersebut, fraksi volume dengan pengelupasan optimal adalah perbandingan 95:5 pada larutan $H_2SO_4:H_2O_2$.

Metode sintesis elektrokimia pada grafit memiliki dua operasi utama, yaitu metode katodik dan anodik. Pengelupasan katodik terjadi ketika elektroda grafit diberi tegangan negatif lalu proses interkalasi dengan waktu yang lama. Sedangkan pengelupasan anodik menggunakan larutan elektrolit. Proses pengelupasan anodik ini lebih sering digunakan karena lebih murah, namun hasil

pengelupasan yang dihasilkan kurang maksimal. Sehingga proses *pre-treatment* dilakukan sebelum proses elektrokimia untuk meningkatkan efisiensi pengelupasan (Paredes & Munuera, 2017).

Berdasarkan uraian latar belakang diatas, pada penelitian ini akan dilakukan sintesis material EG menggunakan metode *Electrochemical Exfoliation* lalu di kalsinasi dengan variasi suhu. Untuk mengetahui sifat fisis pada sampel, dilakukan karakterisasi yaitu FTIR, UV-Vis dan XRD. Kemudian untuk mengetahui konduktivitas listrik dilakukan pengujian menggunakan LCR meter. Selanjutnya, EG diaplikasikan sebagai bahan fotokatalis yang kemudian dilakukan uji menggunakan UV-visible dengan menggunakan *methylene blue* sebagai polutan dan diselidiki kinetika degradasi pewarna *methylene blue*.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah

1. Bagaimana pengaruh variasi suhu kalsinasi terhadap sifat fisis (ukuran kristal, gugus fungsi, dan morfologi) dan konduktivitas listrik pada sampel EG?
2. Bagaimana aktivitas fotokatalis sampel EG dengan variasi suhu kalsinasi?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah

1. Untuk mengetahui pengaruh variasi suhu kalsinasi terhadap sifat fisis (ukuran kristal, gugus fungsi, dan morfologi) dan konduktivitas listrik pada sampel EG.
2. Untuk mengetahui aktivitas fotokatalis sampel EG dengan variasi suhu kalsinasi.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah

1. Bahan yang digunakan untuk eksfoliasi adalah grafit komersial.
2. Variasi suhu kalsinasi yang digunakan adalah 0°C, 300°C, 350°C, dan 400°C.
3. Pengujian fotokatalis menggunakan metilen biru sebagai polutan.
4. Karakterisasi sampel menggunakan XRD, FTIR, SEM, dan LCR Meter

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian ini adalah:

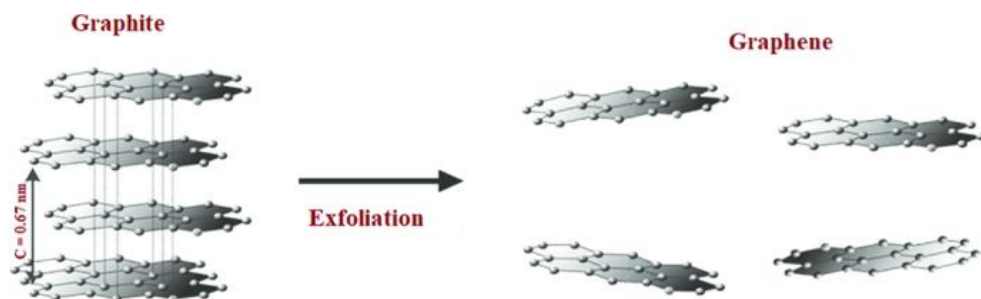
1. Memberikan informasi terkait sintesis EG menggunakan metode *Electrochemical Exfoliation* dan kalsinasi pada EG.
2. Manfaat umum dari penelitian ini adalah memberikan informasi kepada penulis maupun pembaca tentang potensi dari EG yang telah di kalsinasi sebagai material fotokatalis untuk mendegradasi polutan.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1. Grafena

Graphene merupakan material 2D berlapis tunggal dengan luas permukaan yang besar dan struktur berbentuk sarang lebah (Singh dkk., 2022). Pada *graphene* atom berbentuk jaringan segi enam seperti sarang lebah yang ditunjukkan pada gambar 2.1



Gambar 2.1 Skema eksfoliasi grafit yang menghasilkan *graphene* (Hadipour dkk., 2024)

Graphene juga termasuk bahan yang sangat diminati karena memiliki sifat listrik, termal, optik, mekanik, dan mobilitas elektron yang sangat baik (Sari dkk., 2022). Luas permukaan pada *graphene* juga tergolong tinggi, yaitu $2630 \text{ m}^2/\text{g}$ (Shubha dkk., 2023). Sehingga *graphene* menjadi salah satu material yang menjanjikan dalam beberapa aplikasi. Diantaranya bidang elektronika dan teknologi informasi, energi, kesehatan, dan lainnya.

Sifat listrik pada *graphene* tergolong baik. *Graphene* memiliki mobilitas elektron yang tinggi mencapai $25 \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ dan konduktivitas listrik sebesar 6500 S/m^{-1} . Hal ini dapat terjadi karena struktur 2D dari *graphene* yang terdiri atas karbon sp^2 setebal satu atom, sehingga memungkinkan pergerakan elektron lebih efisien (Smith dkk., 2019). Selain sifat listrik, *graphene* memiliki sifat termal

yang sangat baik. Mingyu Sang (2019) menjelaskan bahwa konduktivitas termal pada *graphene* mencapai sekitar $1600 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. *Graphene* juga menunjukkan kapasitas panas yang signifikan sehingga dapat digunakan dalam aplikasi manajemen termal dan sensor suhu (Sang dkk., 2019).

Sifat mekanis yang dimiliki oleh material *graphene* sangat tinggi. Kekuatan tarik pada *graphene* mencapai nilai 130 GPa, menjadikan *graphene* sebagai salah satu material kuat yang diketahui. *Graphene* menunjukkan elastisitas yang sangat baik sehingga memungkinkan material ini mengalami deformasi tanpa patah. Hal ini membuat *graphene* juga menjadi material yang menarik pada bidang teknik material (Ibrahim dkk., 2021).

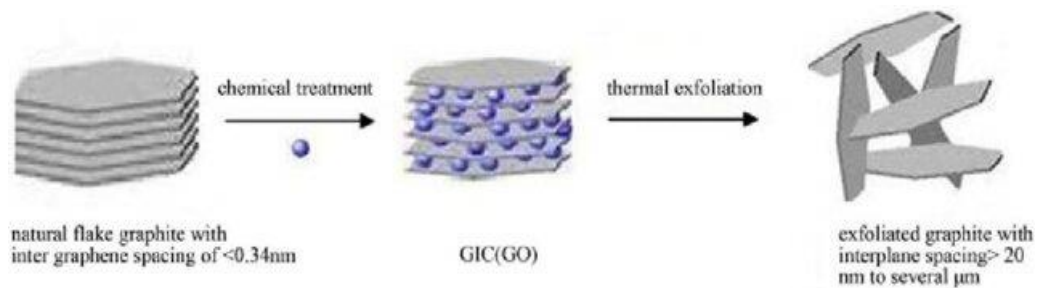
Sifat optik yang dimiliki *graphene* juga tergolong unik. Karena transmisi *graphene* ke cahaya yang berbeda, yaitu 2,3% lebih besar untuk setiap perbedaan dalam satu lapisan, hal ini dapat digunakan untuk menganalisis informasi lapisan. Selain hal ini, penyerapan cahaya saturasi nonlinier dapat terjadi pada *graphene* (Wu, 2018).

2.2. Exfoliated graphite (EG)

Exfoliated graphite (EG) merupakan lembaran yang terlepas dari grafit karena proses eksfoliasi (pengelupasan) (Abidin dkk., 2023). Proses pengelupasan karbon dalam material grafit dapat dilakukan menggunakan berbagai macam metode, yaitu teknik kimia, mekanik dan termal. Tidak semua lapisan karbon pada grafit dapat dipisah, dan pemisahan ini biasanya tidak terjadi secara merata diseluruh area lapisan karbon yang berdekatan (Chung, 2015).

Exfoliated graphite memiliki struktur atas lapisan-lapisan *graphene* yang terinterkalasi dengan molekul kimia tertentu, misalnya asam sulfat atau senyawa

lainnya, sebelum melalui proses eksfoliasi seperti pemanasan atau elektrokimia. Tujuan dari proses interkalasi tersebut adalah untuk memudahkan proses eksfoliasi, karena jarak antar lapisan *graphene* meningkat secara signifikan setelah proses interkalasi (Nguyen dkk., 2019).



Gambar 2. 2 Ilustrasi *exfoliated graphite* (Thanikachalam dkk., 2017)

Setelah proses eksfoliasi dilakukan, struktur lapisan *exfoliated graphite* akan lebih lebar dan menghasilkan lapisan yang lebih tipis sehingga meningkatkan luas permukaan total. Luas permukaan yang tinggi ini dapat dimanfaatkan untuk peningkatan konduktivitas, penyimpanan energi ataupun material superkapasitor (Aji dkk., 2023). EG juga memiliki porositas terbuka, sehingga terbentuk adanya ruang kosong di dalam struktur yang memungkinkan aliran gas atau cairan yang berguna untuk beberapa macam aplikasi penyimpanan energi (Chung, 2015).

Exfoliated graphite juga termasuk material dengan kepadatan yang rendah dan ketahanan suhu yang tinggi. Hal ini dikarenakan oleh lapisan-lapisan grafit mengalami proses pengembangan dan diperluas hingga ratusan kali lipat sepanjang sumbu c (Thanikachalam dkk., 2017). Menurut Aji (2023) *exfoliated graphite* menunjukkan konduktivitas listrik yang jauh lebih baik jika dibandingkan dengan grafit yang tidak tereksfoliasi. Grafit tereksfoliasi memiliki konduktivitas

listrik mencapai $10,5 \times 10^{-3} \text{ S/m}^2$, sedangkan grafit tanpa eksfoliasi memiliki konduktivitas $0,7 \times 10^{-3} \text{ S/m}^2$ (Aji dkk., 2023).

2.3. Sintesis *Exfoliated Graphite*

2.3.1 *Chemical Exfoliation*

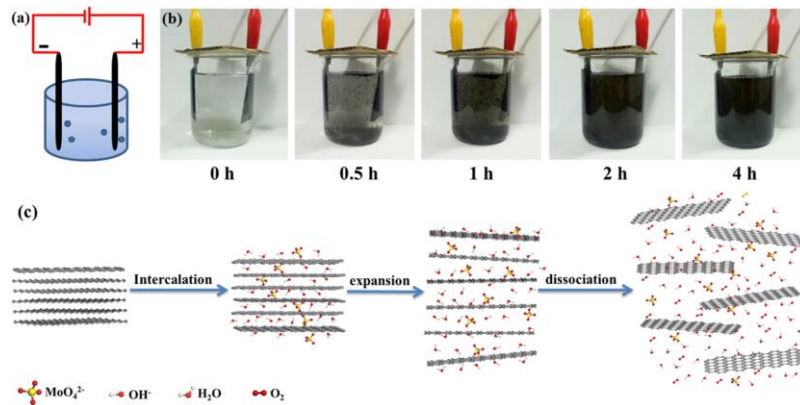
Metode kimia pada *exfoliated graphite* mencakup beberapa proses yang memiliki tujuan memisahkan lapisan *graphite*. Salah satu metode kimia yang sering digunakan adalah metode Hummers, yaitu grafit dioksidasi dalam waktu yang lebih lama pada suhu rendah untuk mengurangi pembentukan CO_2 (Gumfekar, 2018).

Metode lain yang sering digunakan pada proses eksfoliasi kimia yaitu penggunaan *microwave-solvothermal*. Dalam proses ini sampel menyerap radiasi *microwave* sehingga menyebabkan peningkatan suhu dan tekanan. Umumnya eksfoliasi kimia menawarkan berbagai pendekatan untuk menghasilkan *exfoliated graphite* yang sesuai dengan karakteristik yang diinginkan (Kaczmarek-Szczepańska dkk., 2023).

2.3.2 *Electrochemical Exfoliation*

Metode *electrochemical exfoliation* merupakan salah satu metode eksfoliasi yang digunakan dalam proses eksfoliasi grafit. Metode ini mencakup reaksi kimia dan aliran listrik (Salverda dkk., 2022). *Electrochemical* melibatkan interkalasi ion ke dalam lapisan grafit dengan menggunakan elektroda yang kemudian memfasilitasi eksfoliasi grafit menjadi *graphene*. Metode ini termasuk metode yang ramah lingkungan, karena tidak melalui proses beresiko. Metode ini juga menggunakan prekursor yang murah dan mudah didapatkan sehingga menjadi salah satu metode yang paling sering digunakan (Yu dkk., 2015).

Anoda dan katoda memiliki peran penting dalam metode elektrokimia ini. Anoda merupakan elektroda tempat terjadinya oksidasi, sedangkan katoda adalah elektroda terjadinya reduksi (Madurani dkk., 2020).

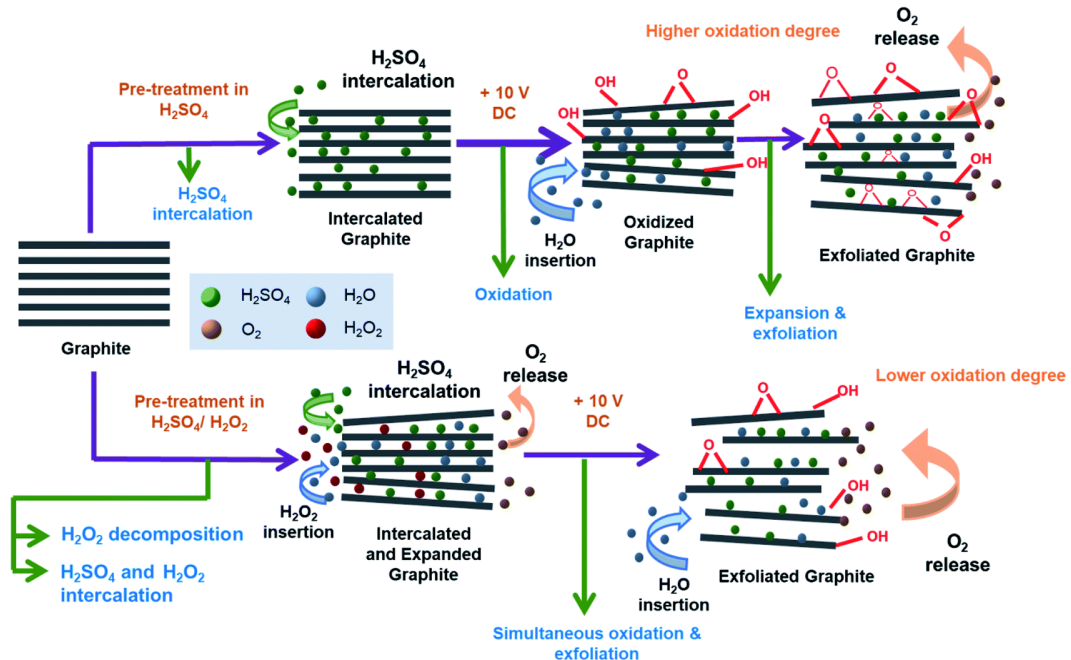


Gambar 2. 3 Gambar (a) proses *Electrochemical Exfoliation* (b) proses *Electrochemical Exfoliation* pada 0,1 M Na_2MoO_4 di bawah tegangan 10 V, (c) ilustrasi skema mekanisme *Electrochemical Exfoliation* grafit (Wu, 2018)

Exfoliated graphite dikelompokkan menjadi pengelupasan katodik dan anodik. Pengelupasan anodik terjadi pada elektroda yang terhubung ke kutub positif sumber listrik, atau anoda. Pada proses ini, lapisan grafit mengalami oksidasi yang mengakibatkan lemahnya ikatan Van Der Waals antar lapisan grafit dan mengalami pemisahan (F. Liu dkk., 2019). Sedangkan metode katodik terjadi pada elektroda yang dihubungkan ke kutub negatif sumber listrik, yaitu katoda. Dalam mekanisme ini, ion-ion positif dari larutan elektrolit mengalami reduksi menjadi gas hidrogen di permukaan elektroda yang membentuk gelembung-gelembung kecil. Gelembung ini yang akan masuk ke dalam celah antar lapisan grafit dan menyebabkan pengelupasan (Zhao dkk., 2024).

Pengelupasan anodik termasuk metode pengelupasan yang banyak digunakan karena pengelupasan ini menggunakan larutan elektrolit yang cenderung lebih terjangkau secara harga dibandingkan pengelupasan katodik. *Pre-*

treatment merupakan salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi pengelupasan anodik. Proses ini dapat dilakukan dengan merendam prekursor grafit dalam cairan asam sulfat pekat (H_2SO_4) dan H_2O_2 (Abdillah dkk., 2021).



Gambar 2. 4 Proses pengelupasan pada grafit setelah *pre-treatment* dalam H_2SO_4 dengan dan tanpa tambahan H_2O_2 (Abdillah dkk., 2021)

Gambar 2.4 menampilkan mekanisme proses *exfoliated graphite* menggunakan elektrokimia. Berdasarkan gambar tersebut, pengelupasan terjadi dalam tiga tahap yaitu tahap interkalasi, oksidasi dan eksfoliasi. Pada tahap interkalasi, larutan elektrolit dari proses *pre-treatment* masuk ke celah antar lapisan grafit dan membentuk grafit terinterkalasi. Ion seperti SO_4 terserap kedalam lapisan grafit dan memperluas jarak antar lapisan. Tahap oksidasi merupakan tahap selanjutnya, dimana pengaplikasian arus listrik digunakan untuk mempercepat reaksi oksidasi. Pada proses ini H_2O juga teradsorpsi ke dalam grafit sehingga menghasilkan gugus fungsi hidroksil ($-\text{OH}$) dan karbonil ($-\text{C}=\text{O}$) pada permukaan grafit. Selanjutnya adalah tahap eksfoliasi, yaitu lapisan grafit mengalami ekspansi secara signifikan dikarenakan pelepasan gas seperti O_2 .

Proses ini menghasilkan *exfoliated graphite* dengan struktur lapisan yang lebih tipis dan luas permukaan yang lebih besar (Lund dkk., 2021).

2.4. Kalsinasi

Kalsinasi merupakan salah satu tahap modifikasi material yang melibatkan pemanasan material pada suhu tertentu. Suhu dari kalsinasi beragam tergantung tujuan dari proses kalsinasi tersebut. Kalsinasi dapat mengubah struktur kristal, meningkatkan sifat fisik dan kimia, serta meningkatkan aktivitas fotokatalis. Kalsinasi juga dapat mempengaruhi luas permukaan dan celah pita suatu material (M. Wang dkk., 2022). Pemanasan pada suhu tinggi kalsinasi juga dapat menguapkan residu organik atau senyawa pengotor pada tahap sintesis (Sudharto, 2023).

Penelitian yang dilakukan oleh Iskandar (2017) melakukan penelitian tentang pengaruh perlakuan panas terhadap konduktivitas listrik dari material reduce graphene oxide (rGO). Penelitian ini menyatakan bahwa konduktivitas listrik rGO tanpa perlakuan panas adalah 18,10 S/m sedangkan setelah melalui perlakuan panas dengan suhu 300°C selama 30 menit meningkat hingga 23,26 S/m (Iskandar dkk., 2017). Peningkatan ini salah satunya disebabkan oleh berkurangnya gugus oksigen yang menghambat pergerakan elektron. Material rGO dan EG memiliki beberapa kesamaan. Selain merupakan material karbon yang memiliki struktur dasar sp^2 , kedua material memiliki gugus oksigen sisa proses sintesis. Fenomena berkurangnya gugus oksigen pada rGO juga mungkin dapat terjadi pada material *Exfoliated Graphite* (EG) yang masih memiliki gugus oksigen sisa dari proses eksfoliasi.

Chung (2015) mengemukakan bahwa kalsinasi pada grafit yang telah melalui proses *pre-treatment* menyebabkan ekspansi lapisan secara signifikan dan menghasilkan struktur berpori akibat proses eksfoliasi termal. Hal ini dapat terjadi saat senyawa dalam larutan *pre-treatment* menguap selama pemanasan, menciptakan tekanan internal yang mendorong pemisahan lapisan grafit (Chung, 2015). Prinsip perubahan struktur akibat perlakuan termal pada penelitian ini masih relevan untuk memahami efek kalsinasi pada EG yang sudah tereksfoliasi sebelumnya. Selain dapat mengurangi gugus oksigen yang tersisa, perlakuan kalsinasi juga dapat memperbaiki struktur sp^2 karbon yang terganggu.

2.5. Karakterisasi

2.4.1 X-Ray Diffraction (XRD)

X-Ray Diffraction atau XRD merupakan salah satu teknik analisis yang digunakan untuk menentukan struktur kristal suatu material dengan memanfaatkan interaksi sinar-X dengan atom dalam kristal (Hekstra, 2023). Pengujian XRD menggunakan sinar-X dengan panjang gelombang diatur ke $1,54184 \text{ \AA}$ (Cu $K\alpha$), dan menggunakan rentang 2θ adalah 0° hingga 90° . 2θ menunjukkan sudut sinar datang dan sinar yang tersebar (Suzuki dkk., 2020).

Selain untuk menentukan struktur kristal material, pengujian XRD juga dapat digunakan untuk mencari ukuran kristal dan jarak antar lapisan dari material. Untuk mencari ukuran kristal material digunakan persamaan Scherrer, yaitu (Qayyum dkk., 2022):

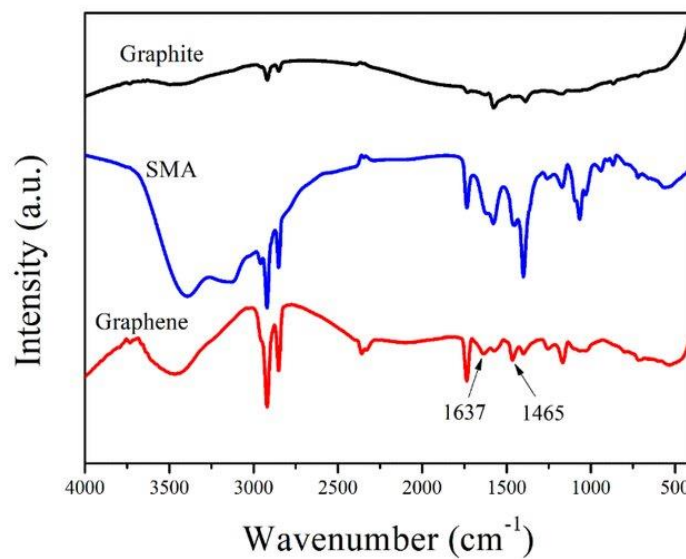
$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2.1)$$

Persamaan (2.1) merupakan persamaan Scherrer, dimana k adalah konstanta Scherrer dengan nilai 0,9 nm, λ merupakan panjang gelombang sinar-X yang digunakan dalam difraksi, biasanya bernilai 1,5406 Å. B mendefinisikan lebar puncak difraksi pada setengah tinggi (FWHM) setelah dikoreksi dari lebar instrumental. θ menunjukkan sudut difraksi yang diukur dalam derajat dan diperoleh dari posisi puncak difraksi sinar-X (Hossain & Ahmed, 2022). Dan untuk menentukan jarak antar lapisan digunakan persamaan Bragg, yaitu (Ihwani, 2022):

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (2.2)$$

2.4.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) merupakan salah satu teknik analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi material berdasarkan spektrum inframerah yang dihasilkan oleh interaksi cahaya dengan molekul dalam sampel (R. Wang & Wang, 2021). Pengujian FTIR dibagi menjadi dua cara, yaitu analisis kuantitatif dan kualitatif. Pada analisis kualitatif, FTIR digunakan untuk mengidentifikasi komponen kimia dalam material dengan analisis spektrum penyerapan inframerah. Sedangkan analisis kuantitatif FTIR dapat digunakan untuk menentukan konsentrasi komponen tertentu dalam material. Analisis ini dilakukan dengan membandingkan intensitas pita penyerapan pada spektrum dengan model standar yang telah dikalibrasi (Alkhuder, 2022). Gambar 2.5 merupakan salah satu contoh hasil pengujian FTIR pada material *graphite* dan *graphene* (Y. Wang dkk., 2019).



Gambar 2.5 Hasil FTIR *graphite* dan *graphene* (Y. Wang dkk., 2019)

2.4.3 Spektrofotometer UV-Vis

Spektrofotometer UV-Vis adalah instrumen yang digunakan untuk mengetahui absorbansi atau transmitansi cahaya dalam rentang ultraviolet (180 nm-390 nm) dan cahaya tampak (390 nm-780 nm) (Negash dkk., 2023). Untuk mengidentifikasi senyawa padat maupun cair pada analisis kimia berdasarkan absorbansi foton, Spektrofotometer UV-Vis ini juga termasuk salah satu instrumen yang sering digunakan (Irawan, 2019). Spektrofotometer UV-Vis juga sering digunakan untuk menentukan energi gap dari suatu material. Untuk menentukan energi gap, dapat digunakan persamaan berikut (Novitasari dkk., 2022):

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.3)$$

Persamaan (2.3) merupakan persamaan untuk menentukan E_g atau energi celah pita. Dimana h adalah konstanta plank ($6,624 \times 10^{-34}$ J.s atau $4,136 \times 10^{-15}$ eV.s), c adalah kecepatan cahaya di udara (3×10^8 m/s), dan λ adalah panjang gelombang (nm).

2.4.4 Inductance, Capacitance, and Resistance Meter (LCR Meter)

LCR Meter merupakan alat yang dapat digunakan untuk mengukur nilai induktansi (L), kapasitansi (C) dan resistansi (R) dari material. Dengan tiga nilai tersebut dapat diperoleh beberapa nilai lain, salah satunya adalah konduktivitas listrik. Konduktivitas listrik merupakan kemampuan suatu material untuk menghantarkan arus listrik (Dong & Choi, 2019). Untuk menentukan nilai konduktivitas listrik dapat menggunakan persamaan berikut (Lutfi dkk., 2015):

$$\sigma = \frac{L}{A.R} = \frac{1}{\rho} \quad (2.4)$$

Dimana L = tebal sampel (m)

A = luas penampang sampel (m²)

R = Hambatan (Ω)

Konduktivitas listrik juga merupakan kebalikan dari resistivitas. Satuan dari resistivitas listrik adalah ohm-meter [$(\Omega\text{m})^{-1}$], namun satuan SI untuk konduktivitas listrik adalah siemens per meter (S/m) dimana $1 \text{ S/m} = 1 (\Omega\text{m})^{-1}$. Sehingga dapat diketahui persamaan untuk mencari resistivitas suatu bahan adalah: (Lutfi dkk., 2015):

$$\rho = \frac{A.R}{L} \quad (2.5)$$

2.4.5 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Electro Microscopy (SEM) adalah teknik mikroskopi dengan berkas elektron dengan tujuan menghasilkan gambar permukaan sampel dengan resolusi tinggi (Falling dkk., 2020). SEM dapat menyajikan informasi tentang morfologi (bentuk, ukuran, dan struktur fisik dari permukaan material), topografi (karakteristik permukaan material), komposisi (proporsi elemen atau senyawa

dalam material), dan informasi kristalografi (bagaimana atom disusun dalam material) (Sayid dkk., 2020).

SEM memanfaatkan berkas elektron yang diarahkan ke permukaan sampel. Saat berkas elektron mengenai permukaan sampel, terdapat beberapa elektron yang dipantulkan kembali dan ada elektron yang diteruskan dan berinteraksi dengan atom dalam sampel. Elektron yang dipantulkan akan menghasilkan gambar berdasarkan intensitas elektron yang diterima dari pemantulan tersebut (Septiano dkk., 2021).

SEM dapat menyajikan gambar dengan perbesaran hingga satu juta kali tergantung pada jenis instrumen yang digunakan dan kondisi pengoperasiannya. SEM dirancang untuk memberi resolusi yang lebih tinggi dari mikroskop optik biasa yang hanya dapat memperbesar sekitar seribu kali (Laws dkk., 2022). Kemampuan menghasilkan gambar 3D dan analisis topografi dengan resolusi yang tinggi ini membuat SEM sering digunakan dalam berbagai bidang seperti material, nano teknologi, biologi dan lainnya. Analisis SEM juga dapat dipasangkan dengan teknik lain seperti spektroskopi energi-dispersif-sinar-X (EDX) untuk menganalisis komponen elemen. Hasil gambar analisis dari SEM juga dapat diolah di berbagai macam perangkat lunak diantaranya ImageJ, Amira, dan Imaris (Marshall dkk., 2023).

2.6. Fotokatalis

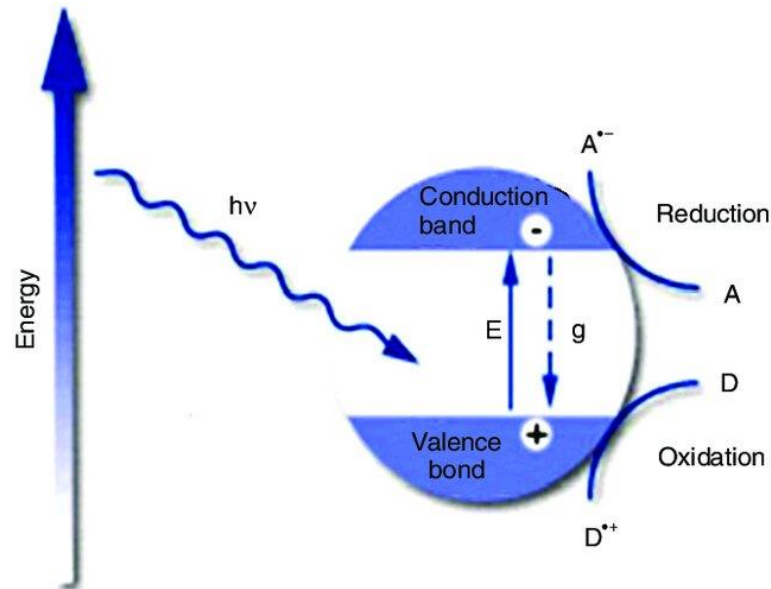
Fotokatalis merupakan suatu material yang dapat mempercepat reaksi kimia dengan menggunakan cahaya sebagai sumber energi. Penelitian fotokatalis bermula dari Fujishima dan Honda pada tahun 1972 yang menemukan bahwa TiO_2 dapat digunakan sebagai fotokatalis dalam fotolisis elektrokimia. Proses ini

memungkinkan pemisahan H_2O menjadi H dan O_2 ketika terkena sinar UV. Sejak saat itu, penelitian tentang fotokatalis semakin berkembang pesat dan mengalami peningkatan (Ma dkk., 2019). Dalam kerangka integrasi sains dan islam, Al-Qur'an menegaskan peran cahaya melalui penyebutan matahari sebagai *siraj* (lampu) dan bulan sebagai *nur* (cahaya) yaitu dalam Q.S. Nuh:16,

وَجَعَلَ نُورًا فِيهِنَّ لُقْمًا سِرَاجًا الشَّمْسُ

Artinya: “Di sana Dia menjadikan bulan bercahaya dan matahari sebagai pelita (yang cemerlang).”.

Ayat ini menjelaskan peran sumber cahaya yang memancar kuat (*siraj*) dan cahaya yang tampak/bermanfaat (*nur*) dalam tatanan alam. Hal ini selaras dengan posisi cahaya sebagai peran utama fotokatalisis. Penelitian ini memanfaatkan sinar UV yang bertindak sebagai *siraj* yang memasok cahaya berenergi. Menurut tafsir Ibnu Katsir, matahari disebut *siraj* (pelita/lampu yang menyinari) dan bulan disebut *nur* (cahaya bagi penghuni bumi), sehingga ditekankan adanya sumber dan cahaya berguna. Dengan demikian, peran cahaya menjadi fondasi proses fotokatalis.



Gambar 2. 6 Mekanisme Fotokatalis (Nath dkk., 2017)

Proses kerja fotokatalis dimulai dengan penyerapan cahaya oleh material fotokatalis yang dapat mengeksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi sehingga menghasilkan pasangan elektron dan *hole* (lubang). Pasangan elektron-*hole* ini akan mengalami reaksi redoks (reduksi oksidasi) dimana elektron akan bereaksi dengan O_2 membentuk $O_2^{\bullet-}$. Dan *hole* akan bereaksi dengan H_2O atau OH^- dan membentuk $OH^{\bullet}$. $OH^{\bullet}$ dan $O_2^{\bullet-}$ akan mengoksidasi polutan organik dan akan menjadikannya senyawa yang lebih sederhana seperti CO_2 dan H_2O (Chen dkk., 2024).

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian yang dilakukan merupakan jenis eksperimen untuk membuat *Exfoliated graphite* (EG) dari *graphite sheet* yang disintesis menggunakan metode *electrochemical exfoliation*. Selanjutnya dikalsinasi menggunakan variasi suhu kalsinasi. Sampel akan dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD), *Fourier-Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), *Scanning Electron Microscope* (SEM), Spektrofotometer UV-Vis, dan LCR Meter. Terakhir akan dilakukan uji aktivitas fotokatalis menggunakan polutan *methylene blue*.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan september 2024 bertempat di Laboratorium Material, Laboratorium Termodinamika, Laboratorium Optik Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Maulana Malik Ibrahim Malang.

3.3 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Gelas beaker
2. Gelas ukur
3. Cawan petri
4. Neraca digital
5. Kabel alligator
6. *Ultrasonic bath*

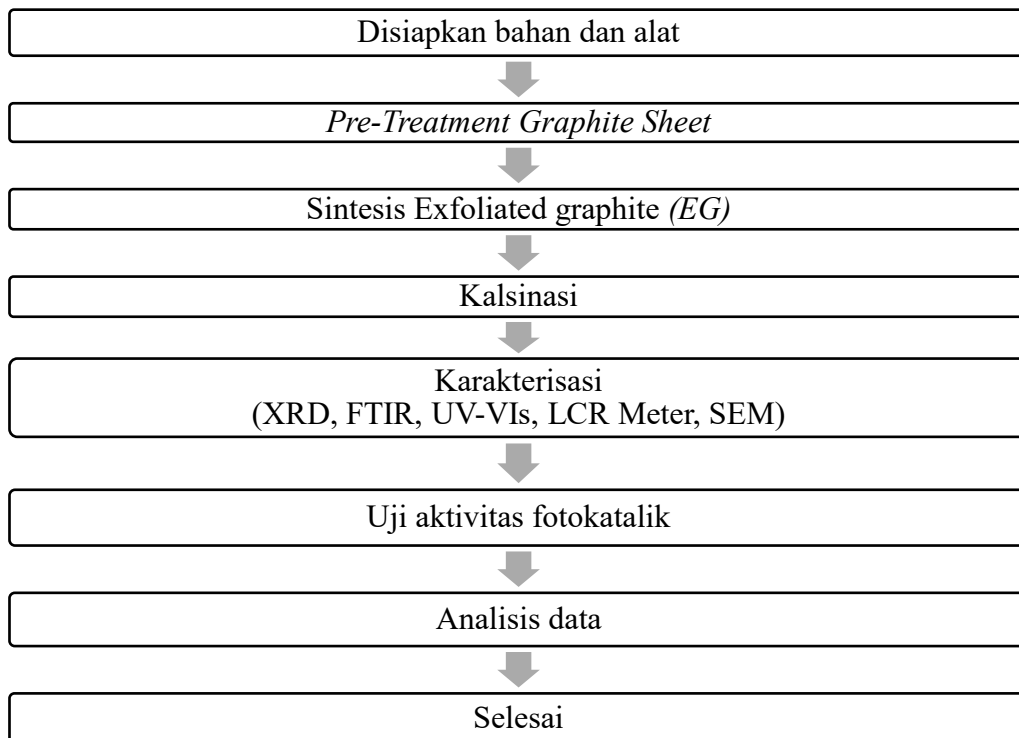
7. Elektroda *graphite*
8. Power supply DC
9. Oven
10. Furnace
11. Pinset
12. Pipet hisap
13. Spatula
14. Vial
15. *Hot plate*
16. *Magnetic stirrer*
17. *Aluminium foil*
18. PH meter

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. *Graphite Sheet*
2. Asam sulfat (H_2SO_4)
3. Hidrogen peroksida (H_2O_2)
4. Ammonium sulfat ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)
5. Aquadest

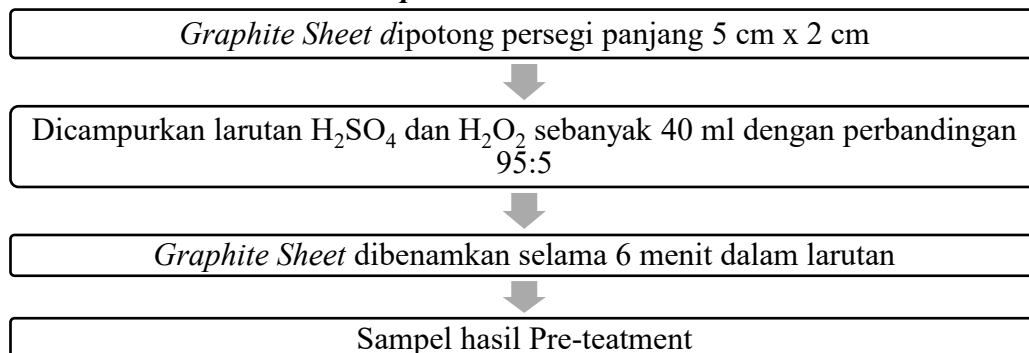
3.4 Langkah-langkah Penelitian

3.4.1 Diagram alir penelitian pembuatan sampel EG



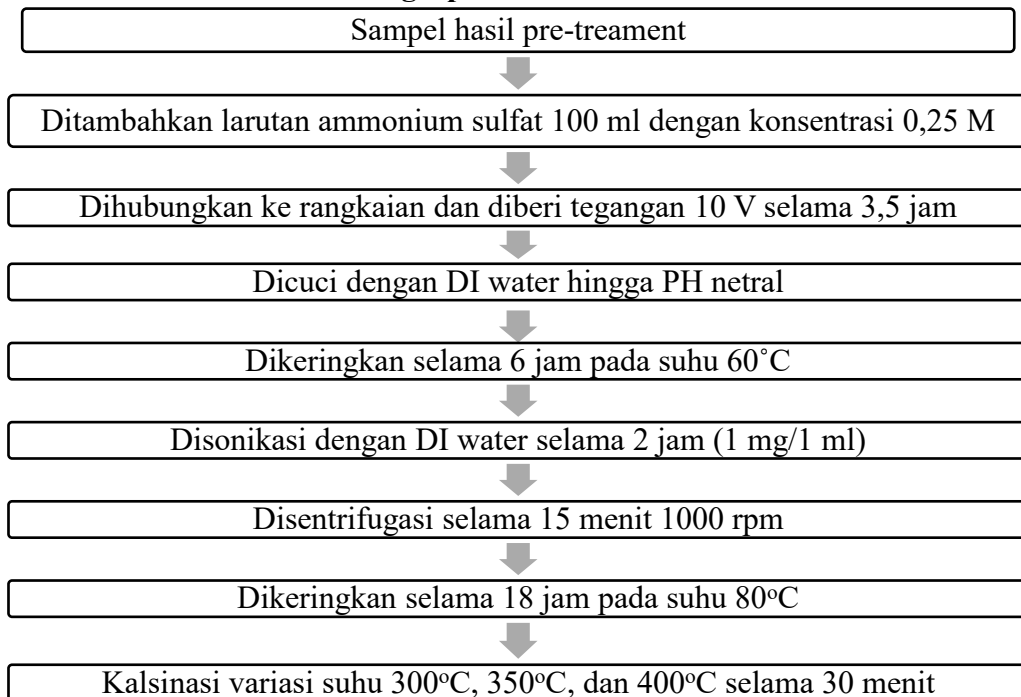
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.4.2 Pre-Treatment Graphite Sheet



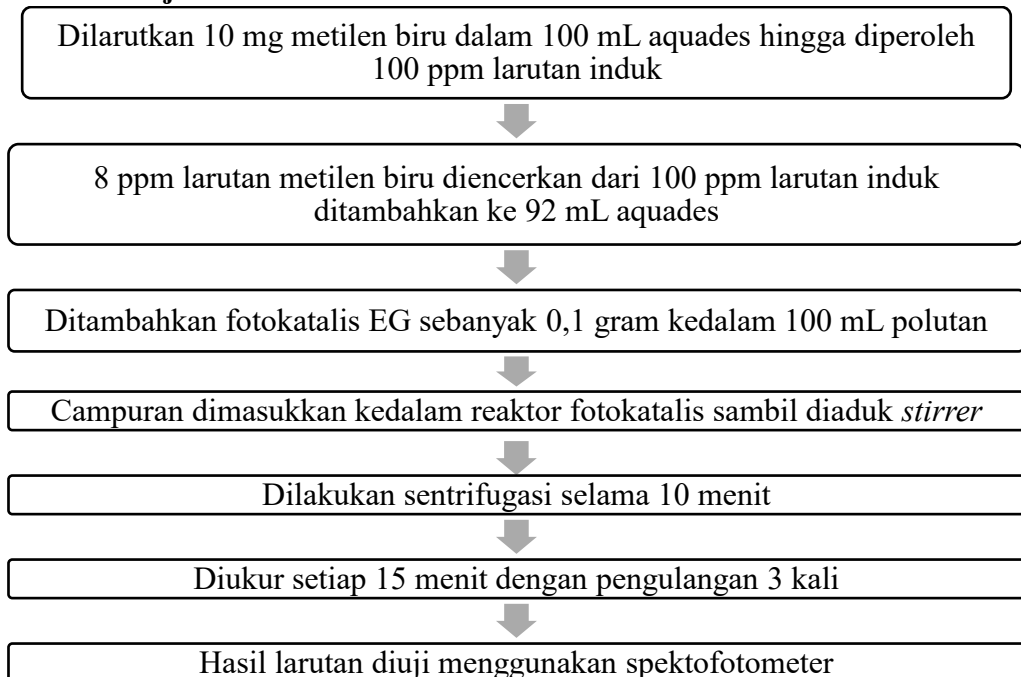
Gambar 3.2 Diagram alir proses Pre-Treatment

3.4.3 Sintesis Exfoliated graphite



Gambar 3.3 Diagram Alir Sintesis *Exfoliated graphite*

3.4.4 Uji aktivitas fotokatalis



Gambar 3. 4 Diagram alir uji aktivitas fotokatalis

3.5 Prosedur Penelitian

3.5.1 *Pre-Treatment Graphite Sheet* (Abdillah dkk., 2021)

1. *Graphite Sheet* dipotong persegi panjang dengan ukuran 5 cm x 2 cm.

2. Asam sulfat (H_2SO_4) 98% dicampur dengan larutan hidrogen peroksida (H_2O_2) 50% dengan fraksi volume 95:5.
3. *Graphite sheet* direndam dalam larutan asam selama 6 menit.
4. Setelah 6 menit *Graphite sheet* dipindahkan ke tempat berbeda untuk proses *electrochemical exfoliation*.

3.5.2 Sintesis *Exfoliated graphite* (Abdillah dkk., 2021)

1. Disiapkan 100 ml larutan elektrolit ammonium sulfat ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) dengan konsentrasi 0,25 M.
2. *Graphite sheet* yang telah melalui proses pre-treatment dihubungkan pada kutub negatif power supply dan elektroda *graphite* pada kutub negatif power supply DC.
3. *Graphite sheet* dan elektroda dimasukkan ke dalam larutan elektrolit dan dipastikan agar tidak tercelup secara keseluruhan.
4. Power supply DC disambungkan ke sumber listrik.
5. Elektroda diberi bias potensial konstan 10 V selama 3,5 jam sampai tidak ada arus atau gelembung yang tampak dalam larutan.
6. Hasil eksfoliasi dicuci menggunakan aquadest hingga pH netral (7,0).
7. Sampel dikeringkan menggunakan oven pada suhu 60°C selama 6 jam. Kemudian sampel didispersikan dalam DI water (1mg/ 1 ml) menggunakan *ultrasonikator bath* selama dua jam.
8. Sampel disentrifugasi selama 15 menit pada 1000 rpm dengan tujuan memisahkan partikel besar dari dispersi. Setelah itu sampel dikeringkan dengan suhu 80°C selama 18 jam.

9. Kemudian sampel dikalsinasi dengan variasi suhu 300°C, 350°C, dan 400°C selama 30 menit.

3.5.3 Pengujian Fotokatalis

1. *Methylene blue* sebanyak 10 mg dilarutkan dalam 100 ml aquades sehingga diperoleh 100 ppm larutan induk.
2. Diencerkan 8 ppm larutan *methylene blue* dari 100 ppm larutan induk ditambahkan ke 92 ml aquades, dilakukan pengujian menggunakan UV-Vis.
3. EG dimasukkan ke dalam 100 ml polutan.
4. Campuran dimasukkan ke dalam reaktor fotokatalis sambil diaduk menggunakan *stirrer*.
5. Dilakukan sentrifugasi 10 menit untuk memisahkan antara larutan dengan katalis.
6. Pengukuran dilakukan pada menit ke 30 dengan pengulangan 3 kali. Hasil larutan di uji menggunakan Spektrofotometer untuk mengetahui banyaknya *methylene blue*.

3.6 Rencana Analisis Data

Data hasil pengujian pada penelitian ini berupa data fisis dan listrik dari sampel *Exfoliated graphite*. Pengujian fisis yang dilakukan memiliki tujuan untuk mengetahui ukuran kristal, gugus fungsi, dan morfologi dari sampel. Pengujian listrik dilakukan untuk mengetahui nilai konduktivitas listrik dari sampel. Karakterisasi yang dilakukan antara lain; XRD, FTIR, SEM, UV-Vis, dan LCR meter.

3.6.1 Karakterisasi Sampel *Exfoliated graphite* menggunakan XRD

Pengujian pola difraksi (XRD) sampel yang digunakan sebanyak 0,15 gram. setelah pengujian dilakukan analisis data menggunakan aplikasi rietica, bertujuan untuk mengetahui struktur kristal dari sampel yang dihasilkan. Dilakukan pencocokan puncak yang terbentuk dengan acuan referensi pendukung. Analisa ini menggunakan beberapa persamaan, diantaranya untuk mengetahui ukuran kristal (D) dan jarak antar lapisan (d) dapat dihitung menggunakan persamaan *scherrer* (Saputri dkk., 2022):

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3.1)$$

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (3.2)$$

Tabel 3. 1 Rancangan Percobaan Menggunakan XRD

No	Sampel	2 θ	FWHM	D (nm)	d (nm)
1.	EG murni tanpa sonikasi				
2.	EG murni dengan sonikasi				
3.	EG kalsinasi suhu 300°C				
4.	EG kalsinasi suhu 350°C				
5.	EG kalsinasi suhu 400°C				

3.6.2 Karakterisasi Sampel *Exfoliated graphite* Menggunakan FTIR

Tujuan dari pengujian FTIR adalah untuk menentukan gugus fungsi dari sampel *Exfoliated graphite*, data yang didapatkan dari pengujian FTIR adalah grafik gugus fungsi dari sampel yang akan dianalisis menggunakan *software* Origin 2024. Kemudian puncak gugus fungsi pada grafik dianalisis menggunakan referensi literatur. Adapun rancangan percobaan menggunakan FTIR

Tabel 3. 2 Rancangan Percobaan Menggunakan FTIR

No	Sampel	Wavenumber	Gugus Fungsi	Nama Senyawa
1	EG murni tanpa sonikasi			
2	EG murni dengan sonikasi			
3	EG kalsinasi suhu 300°C			

4	EG kalsinasi suhu 350°C			
5	EG kalsinasi suhu 400°C			

3.6.3 Karakterisasi Sampel *Exfoliated graphite* dengan UV-Vis

Pengujian menggunakan Spektrofotometer UV-Vis bertujuan untuk mengetahui nilai absorbansi panjang gelombang. Kemudian akan dihitung *band gap* menggunakan persamaan berikut:

$$Eg = \frac{1240}{\lambda} \quad (3.3)$$

$$\alpha h\nu = (h\nu - Eg)^n \quad (3.4)$$

Tabel 3. 3 Rancangan Percobaan Menggunakan UV-Vis

No	Sampel	Absorbansi	Band Gap (eV)
1.	EG murni tanpa sonikasi		
2.	EG murni dengan sonikasi		
3.	EG kalsinasi suhu 300°C		
4.	EG kalsinasi suhu 350°C		
5.	EG kalsinasi suhu 400°C		

3.6.4 Karakterisasi Sifat Listrik Menggunakan LCR Meter

Karakterisasi listrik dalam penelitian menggunakan LCR meter HIOKI 3532-50 LCR HiTESTER. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui sifat konduktivitas listrik dari sampel, setelah data konduktivitas didapat akan diolah menggunakan *software* origin 2018. Untuk menentukan konduktivitas listrik sampel dapat digunakan persamaan

$$\Sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{l}{AR} \quad (3.5)$$

Dimana,

Σ = konduktivitas listrik (S/m)

ρ = Resistivitas listrik (Ω .cm)

l = ketebalan sampel (cm)

A = luas sampel (cm^2)

R = resistensi (Ω)

Adapun rancangan percobaan yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 4 Rancangan Percobaan Menggunakan LCR Meter

No	Sampel	Konduktivitas
1.	EG murni tanpa sonikasi	
2.	EG murni dengan sonikasi	
3.	EG kalsinasi suhu 300°C	
4.	EG kalsinasi suhu 350°C	
5.	EG kalsinasi suhu 400°C	

3.6.5 Karakterisasi Morfologi Menggunakan SEM

Karakterisasi morfologi menggunakan SEM ini bertujuan untuk melihat morfologi dari sampel. Sampel yang diuji menggunakan SEM adalah sampel terbaik, pengujian ini merupakan analisa struktur mikro dengan perbesaran yang sesuai yang diinginkan.

3.6.6 Pengujian Pengaruh Suhu Kalsinasi Terhadap Aktivitas Fotokatalis

Uji aplikasi fotokatalis *Exfoliated graphite* menggunakan polutan *methylene blue*. Pengujian ini diawali dengan pembentukan kurva standar. Pembuatan kurva standar diawali dengan pembuatan larutan metilen biru dengan variasi 2 ppm, 4 ppm, 6 ppm, 8 ppm, dan 10 ppm. Masing-masing variasi larutan diukur absorbansinya menggunakan uji UV-Vis pada panjang gelombang maksimumnya. Hasil nilai absorbansi akan diplot dengan nilai konsentrasi sehingga mendapatkan persamaan regresi linier digunakan untuk menentukan konsentrasi terukur dari larutan induk. Persamaan yang dihasilkan berupa (Maretta & Helmy, 2015):

$$y = ax + b \quad (3.6)$$

Y merupakan absorbansi, x merupakan konsentrasi sampel EG, a adalah gradient dan b adalah intersep. Nilai a dan b akan terlihat setelah kurva diplot. Setelah pengujian selesai, data akan dianalisis menggunakan persamaan 3.6 untuk mengetahui kinetika degradasi, yaitu (Adeleye dkk., 2022):

$$\ln \frac{C_0}{C} = kt \quad (3.7)$$

Dengan C_0 adalah konsentrasi pewarna awal, C adalah konsentrasi pewarna akhir pada t waktu, K adalah konsentrasi laju degradasi.

Persamaan lainnya yang digunakan adalah persamaan untuk menentukan efisiensi degradasi, yaitu (Kumaravel dkk., 2023):

$$\text{Efisiensi degradasi} = \frac{C_0 \times C}{C_0} \times 100 \quad (3.8)$$

Tabel 3. 5 Rancangan Pengujian Fotokatalis

Nama Sampel	Konsentrasi (menit)					
	0	15	30	60	90	120
EG murni tanpa sonikasi						
EG murni dengan sonikasi						
EG kalsinasi suhu 300°C						
EG kalsinasi suhu 350°C						
EG kalsinasi suhu 400°C						

BAB VI

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

Penelitian ini melewati lima tahap, tahap pertama yaitu *pre-treatment graphite sheet* dengan H_2SO_4 dan H_2O_2 . Selanjutnya, *graphite sheet* di eksfoliasi menggunakan metode *electrochemical exfoliation* di dalam larutan ammonium sulfat, pH dinetralkan lalu dikeringkan. Setelah itu, sampel melalui proses kalsinasi dengan variasi suhu 300°C , 350°C dan 400°C . Kemudian, pengujian aktivitas fotokatalis menggunakan *methylene blue* sebagai polutan. Dan tahap terakhir yaitu karakterisasi. Karakter fisik sampel EG kalsinasi diketahui melalui karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk memetakan pola difraksi serta memperkirakan ukuran kristal. Spektroskopi *Fourier Transform Infrared* (FTIR) yang digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi, dan komponen kimia. *Ultraviolet-Visible* (Uv-Vis) untuk menentukan energi celah pita (band gap) dan *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk mengamati morfologi EG kalsinasi. Dan LCR Meter untuk memperoleh sifat listrik yaitu konduktivitas listrik sampel EG kalsinasi.

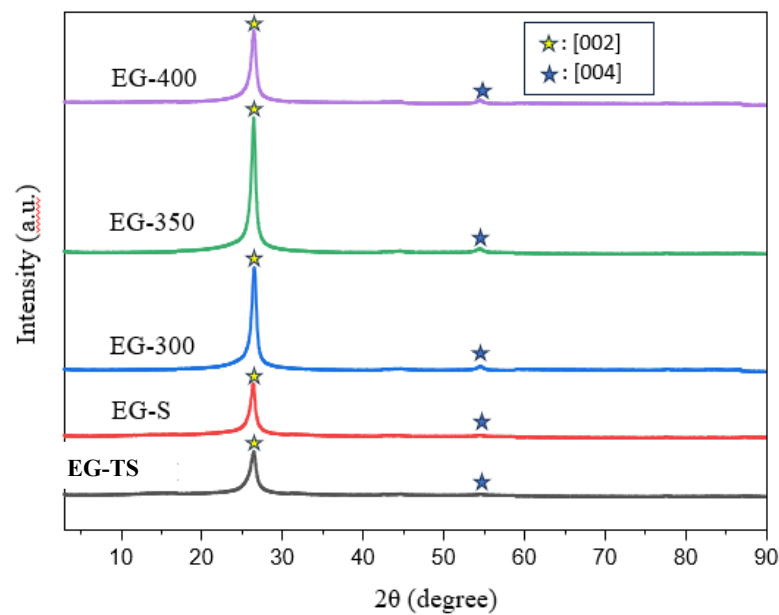
Sintesis diawali dengan proses *pre-treatment* yang bertujuan untuk memperluas antar-lapisan *graphite* melalui interkalasi O_2 ke dalam rongga dan mengubah *graphite* menjadi bahan higroskopis sehingga proses eksfoliasi berikutnya dapat berlangsung optimal (Abdillah dkk., 2021). *Graphite sheet* dipotong dengan ukuran 5 cm x 2 cm, lalu direndam dalam campuran asam sulfat (H_2SO_4) dan hidrogen peroksida (H_2O_2) selama 6 menit.

Proses *Electrochemical Exfoliation* merupakan proses pengelupasan yang berlangsung secara anodik dengan menyambungkan prekursor *graphite* ke kutub positif dan elektroda ke kutub negatif. Selama proses, terjadi interkalasi ion sulfat (SO_4) ke dalam sela-sela lapisan *graphite*. Selanjutnya, reduksi anion SO_4 dan oksidasi H_2O menghasilkan gas seperti SO_2 dan O_2 yang kemungkinan akan menyerang Gaya Van der Waals antarlapis, sehingga lapisan *graphite* tereksfoliasi menjadi lembaran-lembaran yang telah terkelupas. Sampel hasil eksfoliasi dikeringkan dan diberi kode EG-TS yang berarti *exfoliated graphite* tanpa sonikasi. Selanjutnya sampel di sonikasi dan menghasilkan sampel dengan kode EG-S atau *exfoliated graphite* dengan sonikasi. Sonikasi dilakukan sebagai tahap eksfoliasi lanjutan. Tahap kalsinasi dilakukan untuk memodifikasi sampel EG. sampel EG kering ditempatkan dalam cawan porselen lalu di kalsinasi di furnace selama 30 menit dengan variasi suhu 300°C , 350°C , dan 400°C . Kalsinasi dimaksud untuk mengurangi residu dan gugus oksigen yang ada pada sampel sehingga dapat meningkatkan konduktivitas listrik sampel EG. sampel hasil kalsinasi diberi kode EG-300, EG-350, dan EG-400 untuk digunakan pada pengujian fotokatalis berikutnya

4.1.1 Karakterisasi *exfoliated graphite*

1. Analisis data X-ray Diffraction (XRD)

EG dan EG terkalsinasi melewati proses karakterisasi menggunakan X-Ray Diffraction di Greenlab Bandung. Karakterisasi menggunakan rentang sudut 2θ mulai dari 3° hingga 90° dengan radiasi Cu $K\alpha$ yaitu $\lambda=1,54060 \text{ \AA}$. Hasil karakterisasi membentuk pola seperti berikut



Gambar 4. 1 Pola difraksi EG dan EG terkalsinasi

Gambar diatas menyajikan pola difraksi dari EG pada berbagai kondisi perlakuan. Seluruh sampel menampilkan puncak utama pada $2\theta \approx 26^\circ$. Hal ini sesuai dengan bidang kristal [002], serta puncak kecil pada sekitar $2\theta \approx 54^\circ$ yang berkaitan dengan [004]. Kedua puncak ini merupakan ciri khas struktur grafit hexagonal (Abdillah dkk., 2021).

Intensitas puncak [002] meningkat dari EG-TS ke EG-S, kemudian naik lagi pada EG-300 dan puncak terlihat menajam hingga EG-350. Namun pada EG-400 mengalami penurunan intensitas meskipun posisi sudut tidak berubah secara signifikan. Selain perubahan intensitas, kelebaran puncak difraksi juga menunjukkan pola yang berbeda. Dimana puncak pada EG-TS dan EG-S relatif terlihat lebih lebar, kemudian berangsur menyempit hingga EG-350 dan sedikit kembali melebar pada EG-400. Hal ini dapat disebabkan oleh pemanasan berlebih (Lähde dkk., 2024).

Analisis hasil uji dengan XRD dapat dilihat dari ukuran kristal dan jarak antar lapisan sampel. Ukuran kristal dianalisis pada bidang [002] karena puncak

tersebut merupakan puncak utama grafit (Abdillah dkk., 2021). Untuk mengetahui jarak antar lapisan, perhitungan dilakukan menggunakan persamaan Bragg (Callister & Rethwisch, 2018)

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad 4.1$$

Sedangkan untuk menghitung ukuran kristal akan menggunakan persamaan Scherrer.

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad 4.2$$

Hasil analisis dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4. 1 Ukuran kristal dan jarak antar lapisan EG dan EG terkalsinasi

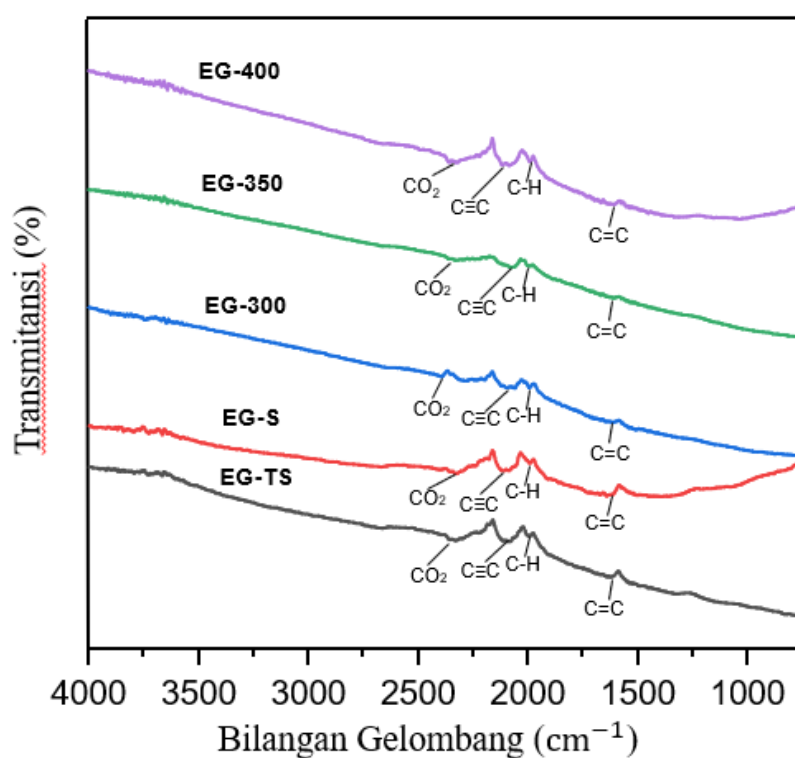
Sampel	Peak position (deg)	FWHM (deg)	d-spacing (Å)	D (nm)
EG-TS	26,445	0,887	3,36804	9,201
EG-S	26,391	0,735	3,37481	11,1
EG-300	26,515	0,660	3,36121	12,36
EG-350	26,448	0,625	3,36767	13,05
EG-400	26,478	0,725	3,36392	11,25

Tabel diatas menunjukkan bahwa pada sampel EG-TS ke EG-S ukuran kristal (D) meningkat sementara nilai FWHM menurun, yang menunjukkan bahwa setelah perlakuan sonikasi domain grafitik bidang [002] menjadi lebih teratur. Sonikasi memecah gumpalan agregat menjadi partikel yang lebih kecil secara makroskopik, tetapi pada saat yang sama juga mengeliminasi bagian yang cacat dan tidak teratur dengan bantuan sentrifugasi sehingga yang tersisa adalah bagian yang relatif lebih bersih dan teratur (Turner dkk., 2019). Peningkatan ukuran kristal berlanjut pada sampel EG-300 dan mencapai puncak pada EG-350. Peningkatan ini disertai dengan nilai FWHM yang menyempit, yang menandakan kristalinitas meningkat. Pada sampel EG-400, FWHM kembali sedikit melebar

dan ukuran kristal menurun dibanding EG-350 yang menandakan adanya kerusakan setelah kalsinasi dengan suhu 400°C (S. Liu dkk., 2022).

2. Analisis gugus fungsi EG

Karakterisasi gugus fungsi sampel EG kalsinasi menggunakan FTIR yang dilakukan di Laboratorium Kimia Universitas Brawijaya. Data yang didapatkan dari pengujian ini berupa transmitansi dan *wavenumber*. *Wavenumber* mengartikan vibrasi struktur kimia sedangkan transmitansi mengindikasikan korelasi linier dengan variasi sampel spektrum IR dapat ditampilkan pada gambar dibawah.



Gambar 4. 2 Spektrum IR EG dan EG terkalsinasi

Karakterisasi menggunakan FTIR bertujuan untuk mengetahui gugus fungsi yang terbentuk selama proses sintesis. Gugus fungsi yang terbentuk selama sintesis ditampilkan pada tabel berikut

Tabel 4. 2 Gugus fungsi *Exfoliated Graphite*

Sampel	Bilangan Gelombang [cm^{-1}]	Gugus Fungsi	Nama senyawa
EG-TS	1613	C=C stretching	Aromatik
	1992	C-H bending	Aromatik
	2107	C $\equiv$ C stretching	Alkali
	2333	CO ₂ stretching	Karbon dioksida
EG-S	1613	C=C stretching	Aromatik
	1989	C-H bending	Aromatik
	2117	C $\equiv$ C stretching	Alkali
	2324	CO ₂ stretching	Karbon dioksida
EG-300	1613	C=C stretching	Aromatik
	1989	C-H bending	Aromatik
	2097	C $\equiv$ C stretching	Alkali
	2391	CO ₂ stretching	Karbon dioksida
EG-350	1613	C=C stretching	Aromatik
	1989	C-H bending	Aromatik
	2095	C $\equiv$ C stretching	Alkali
	2356	CO ₂ stretching	Karbon dioksida
EG-400	1613	C=C stretching	Aromatik
	1988	C-H bending	Aromatik
	2111	C $\equiv$ C stretching	Alkali
	2354	CO ₂ stretching	Karbon dioksida

Data spektrum IR menampilkan gugus fungsi dari setiap sampel *exfoliated graphite*. Pita serapan di daerah antara 2300-2400 cm^{-1} menunjukkan keberadaan CO₂ yang teradsorpsi pada permukaan semua sampel. Intensitas dari EG-TS ke EG-S tidak terlihat berbeda secara signifikan. Perbedaan terlihat ketika sampel mengalami perlakuan kalsinasi. CO₂ mengalami penurunan pada EG-300 dan EG-350. Namun intensitas kembali meningkat pada EG-400.

Bilangan gelombang pada daerah 1613 cm^{-1} terlihat muncul pita serapan C=C dengan getaran regangan. Pita serapan ini berasal dari kerangka karbon sp² (Kumar & Srivastava, 2018). Terlihat bahwa dari EG-TS ke EG-S, intensitas pita cenderung stabil. Selama kalsinasi, intensitas pita C=C menunjukkan penurunan yang signifikan dari EG-S menuju EG-300 dan EG-350, kemudian sedikit meningkat kembali dan menjadi sedikit lebih tegas pada EG-400. Penurunan

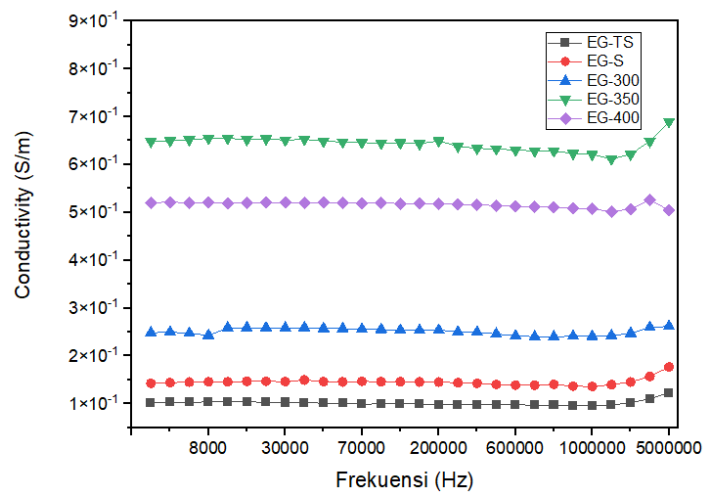
intensitas awal mengindikasikan bahwa kalsinasi mengeliminasi C=C yang tidak teratur. Sehingga intensitasnya berkurang. Namun intensitas EG-400 meningkat kembali. Gugus fungsi ini menunjukkan kerangka karbon yang masih terlihat setelah proses sonikasi dan kalsinasi.

Di daerah sekitar $2095\text{-}2117\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya getaran yang berkaitan dengan ikatan $\text{C}\equiv\text{C}$ pada material berbasis karbon. Pada $300\text{-}350^\circ\text{C}$ pita ini tampak melebar, yang mengindikasikan bahwa lingkungan kimia di sekitar ikatan $\text{C}\equiv\text{C}$ menjadi lebih bervariasi akibat pemanasan. Misalnya karena lepasnya gugus samping seperti C-H atau O-H serta terbentuknya defek pada permukaan karbon. Pada 400°C , pita tersebut tampak lebih terdefinisikan, yang diartikan struktur karbon mulai mencapai stabilitas baru setelah perlakuan panas lebih tinggi (Mohapatra dkk., 2017).

3. Konduktivitas listrik EG

Uji konduktivitas listrik menggunakan LCR Meter 3532-50 LCR HiTESTER dengan bantuan HIOKI L2001 PINGKER PROBE. Pengujian dilakukan di Laboratorium Termodinamika, Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pengukuran ini dilakukan untuk mengetahui konduktivitas listrik pada sampel *Exfoliated Graphite* dengan menggunakan parameter frekuensi antara 5 KHz hingga 5 MHz.

Pemilihan frekuensi yang ditampilkan di dalam data penelitian dilakukan dengan melihat grafik fungsi frekuensi. Terlihat dari grafik bahwa pada frekuensi 4 MHz konduktivitas di semua sampel cenderung lebih naik.



Gambar 4. 3 Grafik fungsi frekuensi

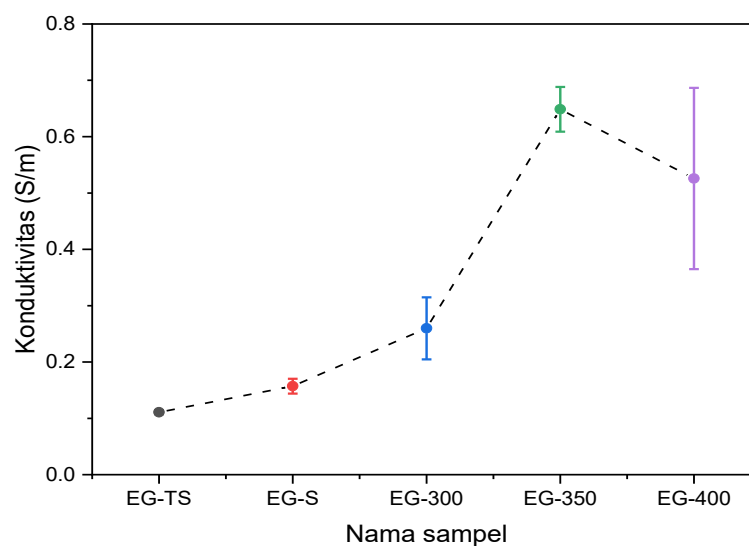
. Sehingga konduktivitas Listrik pada frekuensi 4 MHz dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4. 3 konduktivitas listrik sampel *Exfoliated Graphite*

Sampel	Konduktivitas (S/m)
EG-TS	$1,108 \times 10^{-1} \pm 0,0036$
EG-S	$1,570 \times 10^{-1} \pm 0,0131$
EG-300	$2,598 \times 10^{-1} \pm 0,0551$
EG-350	$6,486 \times 10^{-1} \pm 0,0397$
EG-400	$5,257 \times 10^{-1} \pm 0,1609$

Berdasarkan tabel menunjukkan bahwa nilai konduktivitas listrik pada sampel EG terkalsinasi mengalami peningkatan seiring perlakuan yang diberikan. Sampel EG murni memiliki konduktivitas awal sebesar $1,108 \times 10^{-1}$ S/m, kemudian meningkat menjadi $1,570 \times 10^{-1}$ S/m setelah proses sonikasi. Peningkatan yang lebih signifikan terlihat pada sampel EG yang dikalsinasi, yakni $2,598 \times 10^{-1}$ S/m pada suhu 300 °C dan mencapai nilai rata-rata tertinggi sebesar $6,486 \times 10^{-1}$ S/m pada suhu 350 °C. Pada suhu 400 °C, konduktivitas masih berada pada orde 10^{-3} S/m dengan nilai $5,257 \times 10^{-1}$ S/m, sedikit lebih rendah dibandingkan sampel 350 °C namun tetap lebih tinggi daripada sampel lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan sonikasi dan kalsinasi mampu

memperbaiki jalur hantaran muatan pada EG, dengan kondisi optimum konduktivitas tercapai pada suhu kalsinasi 350 °C. peningkatan konduktivitas listrik dapat melalui grafik dibawah

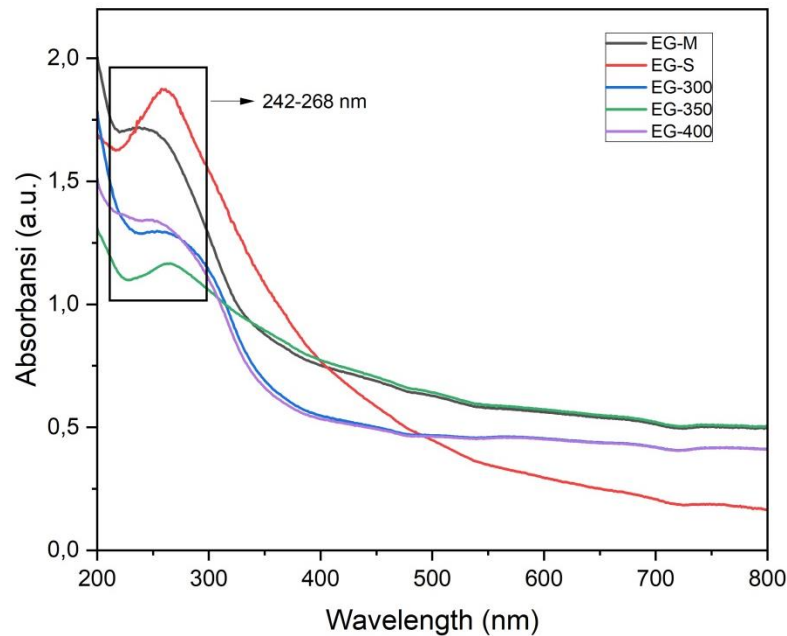


Gambar 4. 4 Konduktivitas listrik *Exfoliated Graphite*

Gambar diatas menunjukan bahwa nilai konduktivitas listrik pada sampel EG dan EG terkalsinasi mengalami peningkatan seiring penambahan suhu kalsinasi, menjadi 350°C. Namun, ketika suhu ditambah menjadi 400°C, konduktivitas listrik menurun.

4. Nilai energi gap EG

Sampel EG dan EG terkalsinasi melewati proses pengujian menggunakan Spektrofotometer UV-Vis. Pengujian ini bertempat di Laboratorium Kimia UIN Maulana Malik Ibrahim Malang. Hasil yang diperoleh pada pengujian kali ini berupa nilai absorbansi dan panjang gelombang setiap sampel. Partikel dalam larutan koloid menyerap energi pada rentang 200-800 nm.

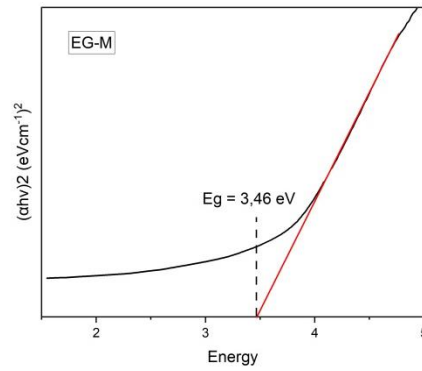


Gambar 4. 5 Grafik lamdha maksimum EG dan EG terkalsinasi

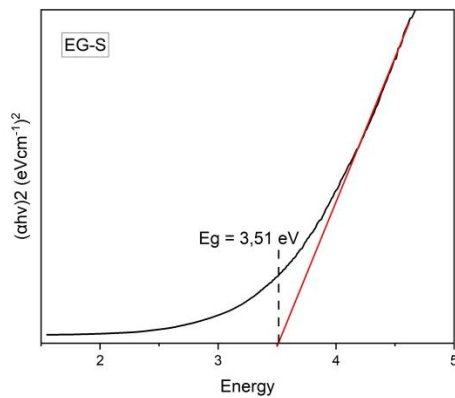
Gambar diatas memperlihatkan spektrum UV-Vis dari sampel EG dan EG terkalsinasi yang memiliki pola serapan khas material karbon terkonjugasi, dengan pita utama pada rentang panjang gelombang 242-268 nm. Hal ini umumnya ditemukan pada material grafitik salah satunya yaitu EG (De Lima dkk., 2020). Keberadaan puncak ini pada seluruh sampel EG dan EG terkalsinasi menunjukkan bahwa struktur dasar grafitik tetap dipertahankan meskipun sampel mengalami proses kalsinasi.

Nilai absorbansi cenderung menurun setelah kalsinasi. Hal ini dapat disebabkan oleh peningkatan ukuran kristal. Dimana Ketika ukuran kristal membesar jumlah hamburan cahaya berkurang.

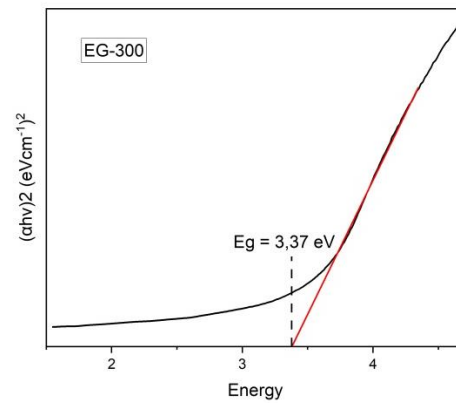
Data UV-Vis diatas akan dianalisis lebih lanjut untuk mengetahui nilai energi gap (E_g) menggunakan metode *Tauc plot*. Metode ini umumnya digunakan untuk mempelajari sifat optik material. Nilai E_g diperoleh dari perpotongan garis regresi linier pada grafik $(\alpha h\nu)^n$ terhadap energi foton ($h\nu$) (Klein dkk., 2023). Energi gap dapat dilihat pada gambar berikut



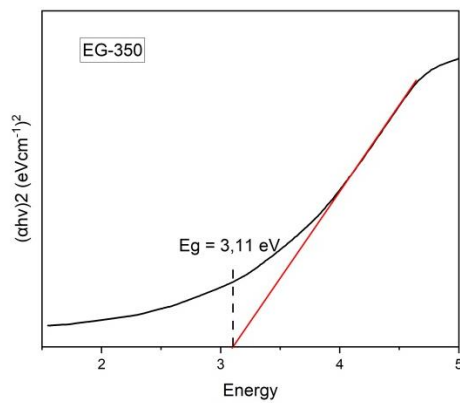
a. EG-TS



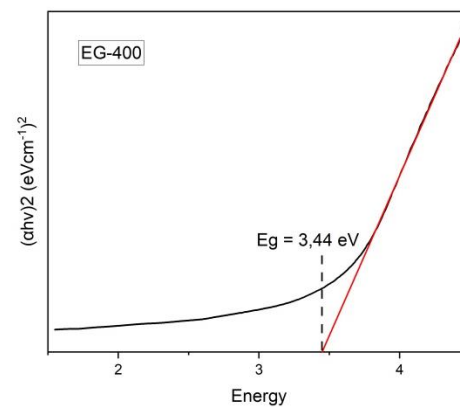
b. EG-S



c. EG-300



d. EG-350



e. EG-400

Gambar 4. 6 Tauc plot energi gap EG dan EG terkalsinasi

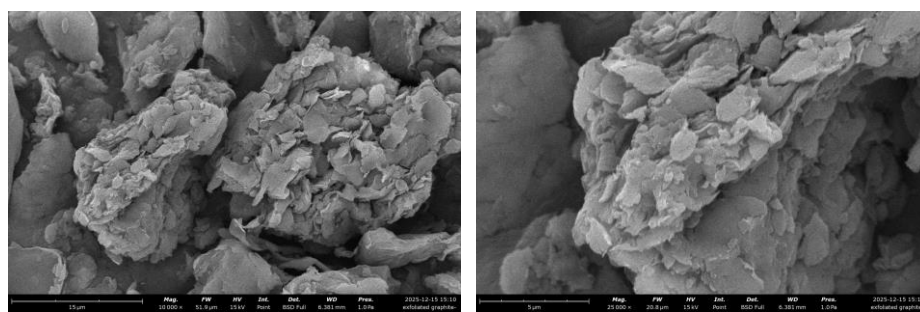
Tabel 4. 4 Nilai energi gap EG dan EG terkalsinasi

Sampel	Energi Gap (eV)
EG-TS	3,46
EG-S	3,51
EG-300	3,37
EG-350	3,11
EG-400	3,44

Nilai energi gap sampel EG dan EG terkalsinasi dianalisis dengan metode *Tauc plot* sebagaimana yang ditampilkan pada gambar diatas. Tabel 4.3 juga menunjukkan bahwa energi gap EG-TS memiliki nilai 3,46 eV, sedangkan EG-S mengalami peningkatan menjadi 3,51 eV akibat pengaruh sonikasi. Pada sampel EG terkalsinasi, nilai energi gap menurun menjadi 3,37 eV pada sampel EG-300 dan mencapai nilai terendah pada EG-350 dengan nilai 3,11 eV. Namun energi gap mengalami kenaikan kembali pada sampel EG-400 dengan nilai 3,44 eV. Energi gap yang semakin kecil akan menyebabkan perpindahan elektron semakin mudah sehingga berpotensi meningkatkan konduktivitas listrik material (Callister & Rethwisch, 2018).

5. Struktur Morfologi

Karakterisasi SEM dilakukan untuk mengetahui morfologi sampel EG-350 yang terbentuk. Morfologi sampel pada perbesaran 10.000 dan 25.000 kali seperti ditunjukkan pada gambar di bawah. Pengujian dilakukan di Laboratorium Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)



Gambar 4. 7 Struktur morfologi EG-350

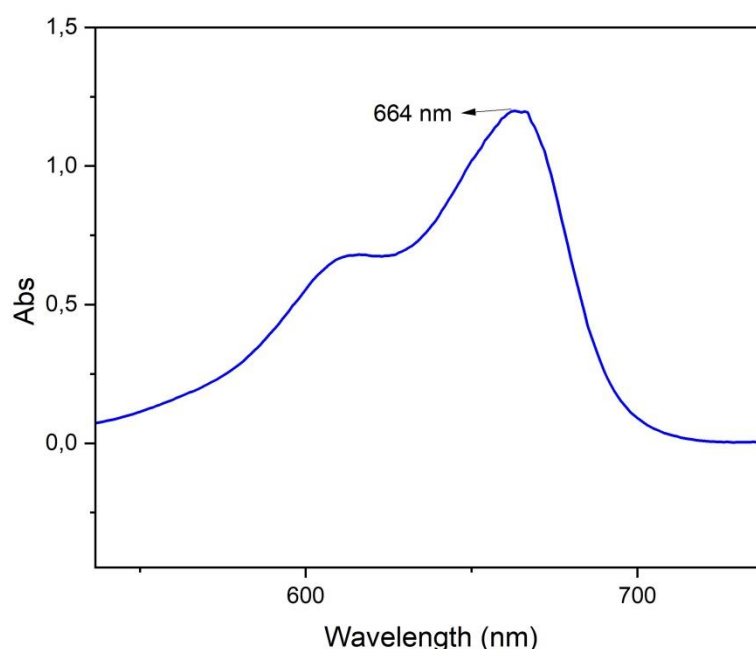
Gambar diatas menunjukkan struktur sampel *Exfoliated graphite* dengan variasi kalsinasi 350°C. Berdasarkan hasil uji SEM dengan perbesaran 10.000x

dan 25.000x, lembaran EG-350 tampak tidak sepenuhnya terpisah menjadi lapisan tunggal, tetapi membentuk struktur berlapis dengan celah dan rongga diantaranya.

Pengamatan SEM pada perbesaran 10.000x menunjukkan morfologi umum EG-350 yang masih di dominasi oleh tumpukan lembaran grafit. Pada perbesaran yang lebih tinggi yaitu 25.000x, terlihat detail mikrosstruktur berupa lembaran yang saling bertumpuk dengan jarak antar lapisan yang masih relative rapat.

4.1.2 Uji aktivitas fotokatalis komposit EG

1. Penentuan panjang gelombang maksimum *methylene blue*



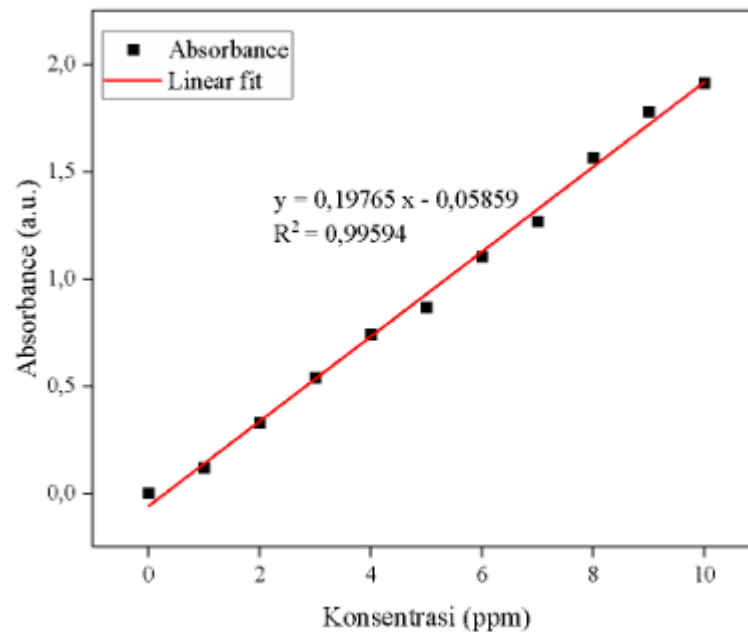
Gambar 4. 8 Panjang gelombang maksimum *methylene blue*

Larutan *methylene blue* melalui proses pengukuran panjang gelombang maksimum dari panjang gelombang 400 hingga 800 nm menggunakan spektrofotometer Uv-Vis.

2. Pembuatan kurva standar *methylene blue*

Pembuatan kurva standart disusun dengan menyiapkan larutan *methylene blue* dengan konsentrasi 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 ppm. Setiap larutan diukur

nilai absorbansinya menggunakan spektrofotometer Uv-Vis pada panjang gelombang 664 nm. Data absorbansi yang diperoleh kemudian dibuatkan grafik konsentrasi larutan terhadap absorbansinya sehingga diperoleh grafik kurva standar seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah



Gambar 4. 9 Kurva standart *methylene blue*

Kurva standart pada gambar 4.7 menunjukkan bahwa terdapat hubungan yang berbanding lurus antara absorbansi dan konsentrasi larutan *methylene blue*. Dari kurva standart tersebut diperoleh nilai koefisien determasi (R^2) sebesar 0,9959 dengan persamaan garis regrasi $y = 0,1976x - 0,0587$, dimana x menyatakan konsentrasi dan y menyatakan absorbansi hasil pengukuran Uv-Vis. Nilai R^2 yang mendekati 1 ini menunjukkan bahwa keterkaitan antara konsentrasi dan absorbansi memiliki tingkat linieritas yang sangat baik.

3. Pengujian aktivitas fotokatalis EG kalsinasi terhadap *methylene blue*

Pengujian aktivitas fotokatalis EG dan EG terkalsinasi dilakukan di Laboratorium Optik Fisika UIN Maulana Malik Ibrahim Malang menggunakan

reaktor fotokatalis. Kemudian dipapari sinar UV dengan variasi waktu 0, 15, 30, 60, 60, dan 120 menit. Hasil absorbansi menggunakan spektrofotometer Uv-Vis dapat dilihat dalam tabel 4.5

Tabel 4. 5 Hasil absorbansi *methyelen blue*

Waktu degradasi (menit)	Nilai absorbansi <i>methylene blue</i>				
	EG-TS	EG-S	EG-300	EG-350	EG-400
0	1,453	1,479	1,408	1,402	1,432
15	1,378	1,353	1,136	1,071	1,105
30	1,248	1,233	0,668	0,593	0,653
60	1,235	1,198	0,422	0,327	0,368
90	1,204	1,119	0,315	0,241	0,253
120	1,185	0,991	0,295	0,19	0,237

Berdasarkan tabel 4.5 Nilai absorbansi larutan *methylene blue* untuk sampel EG dan EG terkalsinasi cenderung menurun seiring bertambahnya waktu degradasi dari 0 hingga 120 menit. Pada 0 menit, nilai absorbansi setiap sampel berada pada kisaran yang hampir sama, yaitu 1,40-1,48. Sedangkan pada akhir proses penurunan paling kecil ditunjukkan oleh EG-TS dan EG-S, dan penurunan paling besar tampak pada EG terkalsinasi yaitu EG-350. Nilai absorbansi ini kemudian digunakan untuk mencari konsentrasi dari polutan. Perhitungan konsentrasi ini menggunakan rumus persamaan regresi yang didapat dari pengujian kurva standart.

$$Y = aX + b \quad 4.3$$

Dimana X adalah konsentrasi dan Y adalah absorbansi. Berikut merupakan tabel hasil perhitungan

Tabel 4. 6 Tabel konsentrasi *methylene blue*

Waktu degradasi (menit)	Nilai konsentrasi <i>methylene blue</i> (ppm)				
	EG-TS	EG-S	EG-300	EG-350	EG-400
0	7,64	7,77	7,71	7,83	7,53

15	7,26	7,13	5,98	5,71	5,88
30	6,60	6,53	3,67	3,29	3,59
60	6,54	6,35	2,43	1,94	2,15
90	6,38	5,95	1,88	1,51	1,57
120	6,28	5,30	1,78	1,25	1,49

Nilai konsentrasi inilah yang kemudian digunakan sebagai dasar perhitungan efisiensi degradasi *methylene blue*. Perhitungan efisiensi degradasi menggunakan persamaan:

$$\text{Efisiensi degradasi} = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100\% \quad 4.4$$

Dimana A_0 adalah absorbansi awal dan A_t adalah absorbansi pada t menit. Dari tabel 4.6 diatas menunjukkan bahwa persentase efisiensi degradasi berbanding lurus dengan waktu penyinaran UV dalam reaktor fotokatalis. Hasil perhitungan efisiensi degradasi dicantumkan pada tabel berikut

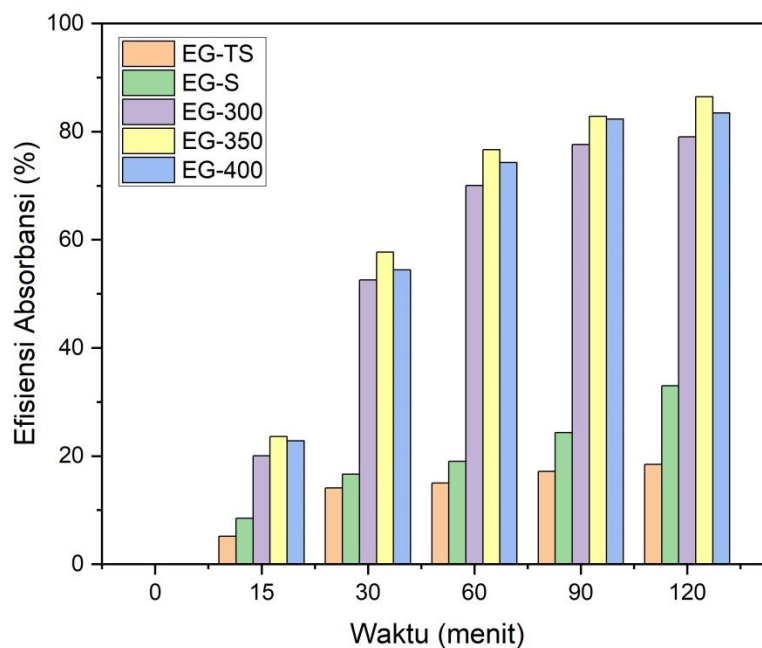
Tabel 4. 7 Efisiensi degradasi *methylene blue*

Waktu degradasi (menit)	Efisiensi degradasi <i>methylene blue</i> (%)				
	EG-TS	EG-S	EG-300	EG-350	EG-400
0	0	0	0	0	0
15	5,161	8,159	20,028	23,609	22,835
30	14,108	16,632	52,556	57,703	54,3994
60	15,003	18,999	70,028	76,676	74,301
90	17,136	24,340	77,627	82,810	82,332
120	18,444	32,995	79,048	86,447	83,447



Gambar 4. 10 Hasil pengujian fotokatalis

Gambar diatas menunjukkan bahwa fotodegradasi yang terjadi pada menit ke 120 merupakan aktivitas degradasi terbaik dengan persentase nilai mulai 79% hingga 86%. Peningkatan hasil degradasi ini juga ditunjukkan pada grafik berikut.



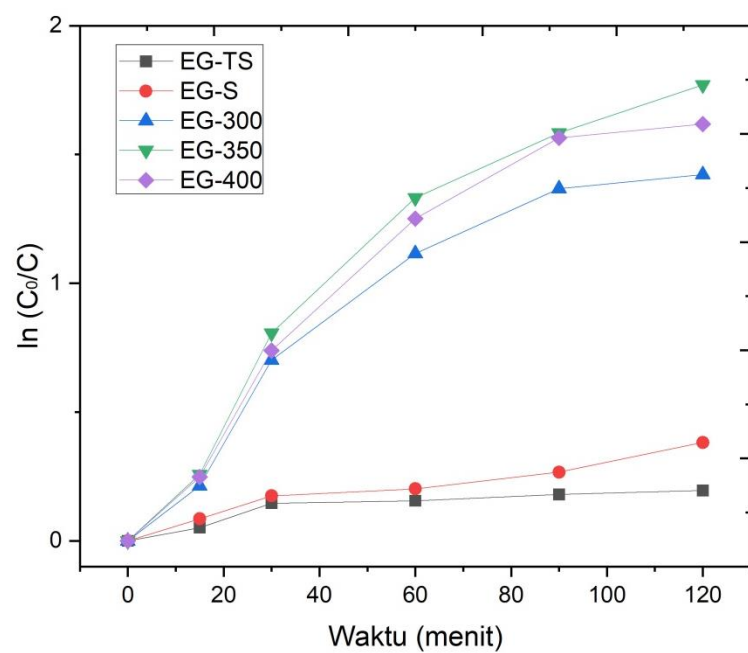
Gambar 4. 11 Efisiensi Degradasi *methylene blue*

Grafik 4.9 menunjukkan persentase efisiensi degradasi *methylene blue* yang mengalami peningkatan seiring bertambahnya waktu pencahayaan. Efisiensi tertinggi yaitu sampel EG-350 yang mencapai 86,447%. Berdasarkan penurunan absorbansi dan persentase degradasi pada berbagai variasi sampel EG yang bertahap, diketahui pula perbedaan kemampuan masing-masing fotokatalis dalam kecepatan reaksi degradasinya. Perubahan konsentrasi dalam degradasi *methylene blue* dapat diketahui melalui perilaku kinetika reaksi fotokatalik.

Kinetika degradasi *methylene blue* dapat dianalisis menggunakan persamaan berikut (Deshmukh dkk., 2020):

$$\ln \frac{C_0}{C} = kt \quad 4.5$$

Dimana C_0 adalah konsentrasi (ppm) *methylene blue* pada waktu 0 menit, C merupakan konsentrasi (ppm) *methylene blue* pada waktu t menit, k adalah konstanta laju reaksi yang diamati (menit^{-1}) dan t adalah waktu reaksi.



Gambar 4. 12 Kinetika degradasi *methylene blue*

Gambar diatas menampilkan kinetika degradasi pada *methylene blue* pada sampel EG dan EG terkalsinasi yang berbeda dengan waktu degradasi 0 hingga 120 menit. Kinetika degradasi *methylene blue* dihitung untuk mengetahui cepat reaksi degradasi yang terjadi. Laju reaksi sendiri merupakan ukuran perubahan konsentrasi reaktan per satuan waktu. Konstanta laju fotodegradasi dinyatakan sebagai nilai slope (kemiringan garis) pada kurva regresi linier antara $\ln(C_0/C)$ dengan waktu degradasi.

Analisis kinetika degradasi *methylene blue* dilakukan menggunakan model kinetika orde satu, yang dinyatakan dalam hubungan linier antara $\ln (C_0/C_t)$

terhadap waktu. Meskipun pendekatan linier pada grafik $\ln(C_0/C)$ terhadap waktu banyak digunakan, metode ini memiliki keterbatasan, antara lain ketergantungan pada asumsi kinetika orde satu serta potensi distorsi error akibat transformasi logaritmik. Selain itu, pendekatan linier kurang sensitif dalam mengidentifikasi perubahan mekanisme reaksi selama proses degradasi. Pendekatan ini umum digunakan dalam studi degradasi zat warna pada konsentrasi rendah. Meskipun demikian, beberapa penelitian juga melaporkan penggunaan model non-linier seperti Langmuir–Hinshelwood, terutama pada sistem dengan mekanisme reaksi yang lebih kompleks. Nilai konstanta laju degradasi dapat dilihat pada tabel dibawah.

Tabel 4. 8 Konstanta laju degradasi pewarna *methylene blue*

Sampel	Laju Degradasi (min^{-1})
EG-TS	$1,49 \times 10^{-3} \pm 0,39 \times 10^{-3}$
EG-S	$2,28 \times 10^{-3} \pm 0,36 \times 10^{-3}$
EG-300	$1,23 \times 10^{-2} \pm 0,20 \times 10^{-2}$
EG-350	$1,507 \times 10^{-2} \pm 0,21 \times 10^{-2}$
EG-400	$1,41 \times 10^{-2} \pm 0,21 \times 10^{-2}$

Berdasarkan tabel diatas dapat dilihat bahwa EG terkalsinasi dapat meningkatkan konstanta laju degradasi. Penambahan suhu pada sampel EG terlihat dapat meningkatkan laju degradasi, dengan rata-rata laju degradasi tertinggi yaitu EG-350 dengan nilai $1,507 \times 10^{-2}$.

4.2. Pembahasan

Penelitian ini menerangkan tentang proses sintesis *Exfoliated Graphite* (EG) yang dilakukan dengan metode elektrokimia. Tahap *pre-treatment* dilakukan sebelum memasuki proses eksfoliasi elektrokimia. Pada proses *pre-treatment* lembaran grafit direndam selama enam menit dalam campuran asam sulfat (H_2SO_4) dan hidrogen peroksida (H_2O_2). Proses *pre-treatment* ini bertujuan untuk

melemahkan ikatan van der Waals sebelum eksfoliasi dengan memanfaatkan interkalasi campuran H_2SO_4 dan H_2O_2 ke dalam celah lembaran grafit. Setelah itu lembaran grafit melalui proses eksfoliasi elektrokimia yang bertujuan untuk membuka lapisan grafit menggunakan arus listrik yang mengalir pada cairan elektrolit. Proses selanjutnya yaitu perlakuan sonikasi. Sonikasi merupakan eksfoliasi lanjutan yang bertujuan untuk melemahkan ikatan van der Waals sehingga eksfoliasi lanjutan dapat berlangsung (Perumal dkk., 2021) dan memecah aglomerat menjadi partikel yang lebih kecil (Turner dkk., 2019). Material EG yang telah melewati proses sonikasi kemudian mendapat perlakuan tambahan berupa kalsinasi dengan variasi suhu 300°C , 350°C dan 400°C . Proses ini bertujuan untuk menghilangkan residu dari proses sebelumnya (Ojeda-López dkk., 2021).

Pola difraksi EG menampilkan intensitas puncak yang mengalami peningkatan dan penajaman bertahap dari EG-TS hingga EG-350 dan kemudian turun pada EG-400. Puncak EG-S terlihat lebih tajam dibandingkan dengan puncak [002] milik EG-TS. Hal ini dapat terjadi karena sonikasi menghasilkan gelembung pecah (kavitasi) yang dapat dengan selektif memotong *flakes* menjadi lebih kecil dan disaat bersamaan juga memisahkan area paling cacat. Sehingga lapisan menjadi lebih teratur, *stacking disorder* (kekacauan susunan) berkurang dan FWHM mengecil (Turner dkk., 2019). Nilai FWHM yang mengecil berpengaruh pada ukuran kristal EG-S. Terlihat bahwa ukuran kristal dari EG-S membesar dibandingkan EG-TS. Ini merupakan salah satu akibat dari terpisahnya area yang cacat dari partikel, sehingga walaupun ukuran partikel mengecil karena sonikasi tetapi ukuran kristalnya membesar (Turner dkk., 2019).

Perlakuan sonikasi dapat memisahkan area cacat pada dari partikel, namun belum bisa menghilangkan residu kimia dan molekul interkalat yang tersisa. Perlakuan kalsinasi diberikan untuk menghilangkan residu tersebut (Ojeda-López dkk., 2021). Pola difraksi pada sampel EG terkalsinasi menunjukkan peningkatan dari EG-300 hingga EG-350 dan menurun pada EG-400. Penajaman puncak yang disertai dengan mengecilnya FWHM dari EG-300 ke EG-350 menandakan adanya perbaikan struktur grafitik dan peningkatan kristalinitas. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses kalsinasi pada suhu 350°C cukup untuk menghilangkan residu dari eksfoliasi. Namun pada EG-400 terlihat adanya penurunan intensitas dan meningkatnya FWHM, ini menandakan bahwa adanya degradasi termal akibat panas berlebih, proses ini menciptakan cacat tepi yang berlebih dan dapat mengganggu keteraturan lapisan tadi (Marsden dkk., 2016).

Berdasarkan persamaan Scherrer, ukuran kristal EG meningkat dari EG-300 mencapai maksimum pada EG-350 dan menurun kembali pada EG-400. Meningkatnya ukuran kristal dapat disebabkan oleh hilangnya residu yang mengganggu keteraturan struktur kristal (Huang dkk., 2022). Dan dapat disebabkan oleh penyatuan domain yang berdekatan sehingga ukuran kristal bertambah (Lähde dkk., 2024). Ukuran kristal yang menurun pada EG-400 dapat dikaitkan dengan degradasi termal akibat panas berlebih. Ukuran kristal yang lebih besar berkaitan dengan jalur pergerakan elektron yang lebih teratur, sehingga peningkatan ukuran kristal dapat berkontribusi pada kenaikan konduktivitas listrik material (Abdelrahman dkk., 2023).

Spektrum FTIR pada EG memperlihatkan beberapa pita serapan yang terkait dengan gugus fungsi khas struktur grafitik. Pita serapan pada sekitar 2300-

2400 cm^{-1} muncul pada semua sampel dan berkaitan dengan vibrasi peregangan CO_2 . Gugus fungsi ini menunjukkan adanya molekul CO_2 atmosfer yang teradsorpsi secara fisik di permukaan sampel. Permukaan cacat cenderung akan mengikat CO_2 dari atmosfer sehingga keberadaan CO_2 dapat digunakan untuk indikator cacat struktur pada sampel. Intensitas CO_2 pada EG-TS dan EG-S tidak terlihat signifikan. Penurunan terlihat ketika EG dikalsinasi. Penurunan ini menegaskan keberhasilan proses penghilangan residu dan struktur cacat pada sampel sehingga menghasilkan permukaan yang lebih bersih dan kecil cacat struktur. Sebaliknya, sampel EG-400 menampilkan kenaikan intensitas pada pita ini. Kenaikan ini adalah bukti degradasi struktural yang diinduksi oleh panas berlebih, dimana suhu 400°C menciptakan cacat tepi dan ketidakteraturan baru yang bertindak sebagai tempat adsorpsi aktif untuk CO_2 (Mehra & Paul, 2022).

Pada sekitar rentang pita 1613 cm^{-1} merupakan vibrasi peregangan $\text{C}=\text{C}$ dari ikatan rangkap sp^2 yang mengindikasikan keberadaan cincin aromatik pada struktur grafit (Kumar & Srivastava, 2018). EG-TS dan EG-S tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Perbedaan terlihat ketika EG dikalsinasi. Penurunan intensitas awal mengindikasikan bahwa kalsinasi mengeliminasi $\text{C}=\text{C}$ yang tidak teratur. Sehingga intensitasnya berkurang. Berkurangnya intensitas $\text{C}=\text{C}$ tidak selalu menunjukkan hal buruk, karena penurunan tersebut dapat berasal dari domain yang tidak teratur. Hal ini sejalan dengan peningkatan kristalinitas EG terkalsinasi. EG-400 kembali menunjukkan peningkatan $\text{C}=\text{C}$. Gugus fungsi ini menunjukkan kerangka karbon yang masih terlihat setelah proses sonikasi dan kalsinasi.

Keberadaan pita serapan C–H pada seluruh sampel dari EG-TS hingga EG-400 menunjukkan bahwa masih terdapat sejumlah gugus hidrokarbon yang menempel pada permukaan dan tepi lapisan exfoliated graphite. Selama proses sonikasi dan kalsinasi pada rentang suhu yang digunakan, gugus-gugus C–H ini relatif stabil atau hanya terdekomposisi sebagian, sehingga perubahan intensitasnya tidak tampak signifikan antar sampel. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa perlakuan yang diberikan lebih banyak memodifikasi keteraturan kerangka sp^2 dan jumlah cacat dibandingkan secara drastis menghilangkan gugus C–H, sehingga kontribusi C–H terhadap spektrum FTIR tetap serupa dari EG-TS hingga EG-400.

Nilai konduktivitas listrik EG menunjukkan peningkatan setelah proses sonikasi dan kalsinasi. Sampel EG-TS memiliki konduktivitas paling rendah, yaitu $1,108 \times 10^{-1}$ S/m, sedangkan EG-S mengalami kenaikan hingga $1,570 \times 10^{-1}$ S/m. Hal ini mungkin terjadi karena proses sonikasi mampu meningkatkan keteraturan jalur elektron. Pemberian perlakuan kalsinasi memperlihatkan peningkatan konduktivitas yang lebih signifikan, ditandai dengan nilai $2,598 \times 10^{-1}$ S/m pada EG-300, kemudian meningkat menjadi $6,486 \times 10^{-1}$ S/m pada EG-350. Sampel EG-400 masih menunjukkan nilai yang tinggi, yaitu $5,257 \times 10^{-1}$ S/m, meskipun sedikit menurun dibanding EG-350.

Peningkatan konduktivitas pada suhu 300–400 °C terjadi akibat berkurangnya residu hasil eksfoliasi yang bersifat penghambat gerak elektron. Proses kalsinasi menurunkan residu sisa eksfoliasi, sehingga jalur pergerakan elektron menjadi lebih bebas. Penyempitan nilai FWHM dan bertambahnya ukuran kristal menunjukkan bahwa susunan atom karbon pada bidang grafit menjadi lebih

teratur, dan keteraturan ini membantu elektron berpindah dengan hambatan yang lebih rendah (Mehmood dkk., 2024) Penurunan kecil pada EG-400 dapat terjadi karena munculnya cacat baru akibat pemanasan yang lebih tinggi, sehingga sebagian jalur konduksi menjadi kurang efektif (Viprya dkk., 2023).

Nilai energi gap exfoliated graphite menunjukkan perubahan akibat perlakuan sonikasi dan kalsinasi. Sampel EG-TS memiliki energi gap sebesar 3,46 eV, sedangkan EG-S meningkat menjadi 3,51 eV. Kenaikan ini dapat terjadi karena proses sonikasi menghasilkan cacat struktural pada permukaan grafit yang memengaruhi transisi elektronik, sehingga jarak energi antar pita menjadi sedikit lebih besar. Perlakuan kalsinasi memberikan pengaruh yang berbeda, ditandai dengan penurunan energi gap pada suhu 300 °C hingga mencapai 3,37 eV dan mencapai nilai terkecil pada EG-350 yaitu 3,11 eV. Energi gap yang lebih kecil menunjukkan bahwa elektron lebih mudah berpindah dari pita valensi menuju pita konduksi, karena energi yang dibutuhkan untuk proses tersebut semakin rendah (Callister & Rethwisch, 2018).

Penurunan energi gap pada suhu 300–350 °C berkaitan dengan berkurangnya residu sisa eksfoliasi elektrokimia. Hilangnya residu meningkatkan dominasi struktur sp^2 dan memperluas delokalisasi elektron π , sehingga jarak energi antar pita menjadi lebih sempit. Kenaikan energi gap pada EG-400 dapat disebabkan oleh terbentuknya cacat baru atau penataan ulang sebagian domain sp^2 akibat pemanasan yang lebih tinggi. Kondisi ini dapat membatasi delokalisasi elektron dan menyebabkan nilai energi gap kembali meningkat. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa perlakuan termal pada rentang tertentu dapat menurunkan energi gap exfoliated graphite, sementara pemanasan berlebih dapat

menghasilkan efek sebaliknya. Nilai konduktivitas menunjukkan kecenderungan berlawanan dengan besarnya energi gap. Sampel yang memiliki energi gap lebih kecil cenderung memberi ruang yang lebih mudah bagi elektron untuk berpindah dari pita valensi ke pita konduksi, sehingga arus listrik dapat mengalir lebih efektif. Kemampuan material dalam menangkap serta mengalirkan elektron yang tereksitasi juga membuat kemungkinan terjadinya rekombinasi elektron dan hole menjadi lebih rendah. Kondisi tersebut menghasilkan proses perpindahan muatan yang lebih efisien dan berdampak langsung pada meningkatnya konduktivitas listriknya (Mehmood dkk., 2024).

Proses fotokatalis berlangsung ketika material terkena radiasi UV, yang memicu pembentukan pasangan elektron dan hole pada permukaan sampel. Elektron yang tereksitasi akan bergerak menuju pita konduksi, sedangkan hole tertinggal pada pita valensi dan berperan sebagai agen oksidasi. Kehadiran exfoliated graphite mendukung mekanisme ini melalui kemampuan EG dalam menampung serta mengalirkan elektron, sehingga perpindahan muatan menjadi lebih cepat. Mobilitas elektron yang tinggi pada EG membantu mengurangi kemungkinan rekombinasi elektron–hole. Struktur EG yang berlapis dan memiliki luas permukaan besar juga mempermudah adsorpsi molekul polutan, sehingga meningkatkan interaksi antara polutan dan spesies reaktif selama proses fotokatalitik (Deshmukh dkk., 2020).

Pengujian aktivitas fotokatalis menunjukkan bahwa efisiensi degradasi *methylene blue* meningkat seiring bertambahnya waktu penyinaran. Sampel dengan perlakuan kalsinasi 350 °C memberikan nilai degradasi tertinggi hingga 87,46% pada menit ke-120, diikuti oleh EG-400 dengan nilai 83,13%. Efisiensi

yang tinggi pada EG-350 berkaitan dengan energi gap yang lebih kecil sebesar 3,11 eV serta konduktivitas listrik yang cukup tinggi, sehingga proses eksitasi dan perpindahan elektron berlangsung lebih mudah. Kondisi ini memungkinkan lebih banyak elektron mencapai permukaan material dan berpartisipasi dalam pembentukan radikal reaktif yang berperan dalam proses degradasi.

Hubungan antara energi gap, konduktivitas, dan efisiensi fotokatalis terlihat jelas pada sampel tanpa perlakuan panas seperti EG-TS dan EG-S, yang menunjukkan degradasi paling rendah masing-masing sebesar 18,24% dan 32,99% pada menit ke-120. Energi gap yang lebih besar serta konduktivitas lebih rendah pada kedua sampel tersebut membuat proses transfer elektron kurang efektif, sehingga peluang rekombinasi elektron-hole menjadi lebih tinggi. Kondisi ini menurunkan jumlah partikel bermuatan yang dapat berinteraksi dengan molekul *methylene blue*.

Variasi hasil antar sampel dapat dipengaruhi oleh mekanisme rekombinasi elektron dan hole yang terjadi selama penyinaran UV. Intensitas cahaya yang tinggi mampu menghasilkan pasangan elektron-hole dalam jumlah besar, tetapi juga dapat meningkatkan peluang rekombinasi sebelum elektron berpartisipasi dalam reaksi oksidasi. Suhu reaksi yang meningkat akibat paparan UV yang lama juga berpotensi mempercepat rekombinasi serta menurunkan stabilitas beberapa gugus aktif, sehingga menyebabkan efisiensi pada beberapa sampel tidak selalu berbanding lurus dengan kenaikan suhu kalsinasi.

Gambar SEM menunjukkan struktur sampel *Exfoliated graphite* dengan variasi kalsinasi 350°C. Berdasarkan hasil uji SEM dengan perbesaran 10.000x

dan 20.000x, lembaran EG-350 tampak tidak sepenuhnya terpisah menjadi *nanosheet* tunggal, tetapi membentuk struktur berlapis dengan celah dan rongga diantaranya

4.3. Fotokatalis *Exfoliated Graphite* dalam perspektif Islam

Pemanfaatan fotokatalis dengan bahan dasar *Exfoliated Graphite* (EG) dalam proses degradasi polutan merupakan bagian dari upaya manusia menjaga kelestarian lingkungan. Prinsip dasar fotokatalisis yaitu pemanfaatan sinar UV untuk mengaktifkan elektron dan menghasilkan radikal oksidatif yang mampu menguraikan kontaminan. Hal ini sejalan dengan ayat Allah dalam QS. An-Naba' ayat 13:

وَجَعَلْنَا سِرَاجًا وَهَّاجًا ۝

“Dan kami jadikan pelita (matahari) yang amat terang.”

Menurut Tafsir Tahlili Kemenag, ayat ini menegaskan bahwa matahari adalah sumber energi yang sangat kuat, memberikan manfaat bagi kehidupan, serta memiliki kemampuan untuk menghilangkan kuman serta mikroorganisme yang berbahaya. Energi panas dari radiasi matahari dapat memberikan efek penyucian terhadap lingkungan. Dalam konteks penelitian ini, kuman yang dimaksud dalam tafsir dianalogikan sebagai polutan karena keduanya berdampak buruk pada kehidupan. *Methylene Blue* sebagai zat warna sintetis yang mencemari air menyebabkan kerusakan lingkungan dan membahayakan makhluk hidup apabila tidak ditangani.

Dalam konteks penelitian ini, sinar UV dari matahari atau lampu UV menjadi energi utama yang memicu proses fotokatalisis. Ketika material EG disinari, elektron pada struktur karbon sp^2 dapat tereksitasi ke pita konduksi sehingga memicu pembentukan radikal yang mampu mendegradasi methylene blue. Pemanfaatan energi cahaya ini mencerminkan bagaimana manusia menggunakan tanda-tanda ciptaan Allah untuk memperbaiki lingkungan

Eksfoliasi grafit yang dilakukan melalui proses elektrokimia, sonikasi, dan kalsinasi pada penelitian ini bertujuan menghasilkan material yang mampu mempercepat proses pemurnian air melalui fotokatalisis. Upaya ini merupakan bentuk pemanfaatan ilmu pengetahuan sebagaimana dianjurkan dalam Q.S. Al-Mujadalah ayat 11, yang menyatakan bahwa Allah akan meninggikan derajat orang-orang yang berilmu. Pengembangan material seperti EG-300, EG-350, dan EG-400 yang menunjukkan kemampuan lebih baik dalam memfasilitasi transfer elektron serta meningkatkan efisiensi degradasi polutan merupakan contoh konkret penerapan ilmu untuk kemaslahatan

Mekanisme fotokatalisis yang melibatkan transfer elektron, pembentukan radikal hidroksil ($-OH$), dan oksidasi polutan juga relevan dengan perintah Allah untuk menjaga kebersihan. Islam sangat menekankan kebersihan sebagai bagian dari iman. Material berbasis EG yang mampu meningkatkan degradasi polutan merupakan bentuk penerapan teknologi yang mendukung prinsip kebersihan dan pemeliharaan lingkungan

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berorientasi pada inovasi teknologi, tetapi juga sejalan dengan nilai-nilai Islam: memanfaatkan cahaya

sebagai energi (sebagaimana disebut dalam QS. Yunus 5), menjaga kebersihan air, mencegah kerusakan lingkungan (QS. Al-A'raf 56), dan menggunakan ilmu untuk kemaslahatan. Penelitian Exfoliated Graphite sebagai fotokatalis merupakan implementasi nyata dari perintah Allah untuk menjaga bumi dan memanfaatkan ciptaan-Nya secara bijaksana.

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Variasi suhu kalsinasi memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat fisis dan listrik sampel *Exfoliated Graphite* (EG), di mana peningkatan suhu hingga 350°C terbukti memperbaiki kristalinitas yang ditandai dengan peningkatan ukuran kristal mencapai nilai maksimum 13,05 nm. Analisis gugus fungsi melalui FTIR menunjukkan bahwa proses kalsinasi berhasil mereduksi residu organik dan gugus oksigen pengganggu, sehingga menciptakan permukaan yang lebih bersih. Kondisi struktur yang lebih teratur ini berbanding lurus dengan kemampuan hantaran listriknya, di mana konduktivitas listrik mencapai nilai tertinggi pada suhu kalsinasi 350°C sebesar $6,486 \times 10^{-1}$ S/m. Namun, pemberian panas berlebih pada suhu 400°C justru menyebabkan degradasi termal yang menurunkan ukuran kristal menjadi 11,25 nm serta menurunkan efektivitas jalur konduksi listrik akibat munculnya cacat struktur baru. Variasi suhu kalsinasi berpengaruh pada
2. Aktivitas fotokatalis sampel EG menunjukkan peningkatan performa seiring dengan perlakuan kalsinasi, dengan efisiensi degradasi metilen biru tertinggi dicapai oleh sampel EG-350 sebesar 86,45% dalam waktu penyinaran 120 menit. Peningkatan aktivitas ini didukung oleh nilai energi gap terendah pada suhu 350°C, yaitu sebesar 3,11 eV, yang memudahkan proses eksitasi

elektron dari pita valensi ke pita konduksi untuk membentuk radikal oksidatif. Selain itu, tingginya mobilitas elektron pada sampel hasil kalsinasi 350°C berperan penting dalam menekan laju rekombinasi elektron-hole, sehingga menghasilkan konstanta laju degradasi tercepat mencapai $1,507 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$. Sebaliknya, sampel tanpa kalsinasi (EG-TS dan EG-S) memiliki aktivitas fotokatalitik yang jauh lebih rendah karena energi gap yang lebar dan konduktivitas yang rendah membatasi efisiensi transfer muatan

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, disarankan bagi peneliti selanjutnya untuk melakukan optimasi pada rentang variasi suhu kalsinasi yang lebih spesifik, terutama di antara 300°C hingga 400°C, guna menemukan titik suhu aktivasi yang paling presisi dalam meningkatkan konduktivitas listrik. Pengujian aktivitas fotokatalis juga sebaiknya diperluas menggunakan berbagai jenis zat warna lain dan variasi konsentrasi polutan untuk melihat selektivitas material EG pada spektrum limbah yang lebih luas. Terakhir, perlu dilakukan uji stabilitas penggunaan berulang (*reusability test*) serta karakterisasi tambahan seperti BET untuk menganalisis hubungan antara luas permukaan spesifik dengan efisiensi degradasi secara lebih mendalam

DAFTAR PUSTAKA

- Abdillah, O. B., Floweri, O., Mayangsari, T. R., Santosa, S. P., Ogi, T., & Iskandar, F. (2021). Effect of H_2SO_4/H_2O_2 pre-treatment on electrochemical properties of exfoliated graphite prepared by an electro-exfoliation method. *RSC Advances*, 11(18), 10881–10890. <https://doi.org/10.1039/D0RA10115J>
- Abidin, A. Z., Santoso, R. A., Aji, I. B., Andiani, L., & Rosi, M. (2023). *VARIASI ELEKTROLIT DAN BEDA POTENSIAL DALAM PEMBUATAN GRAFIT TEREKSFOLIASI MENGGUNAKAN METODA ELEKTROKIMIA. SEMINAR NASIONAL FISIKA 2016 UNJ*. <https://doi.org/10.21009/03.1101.FA18>
- Adeleye, A. T., John, K. I., Ighalo, J. O., Ogunniyi, S., Adeyanju, C. A., Adeniyi, A. G., Elawad, M., & Omorogie, M. O. (2022). Photocatalytic remediation of methylene blue using hydrothermally synthesized H-Titania and Na-Titania nanotubes. *Heliyon*, 8(12), e12610. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12610>
- Aji, I. B., Rosi, M., & Andiani, L. (2023). *Sintesis Grafit Tereksfoliasi Dengan Larutan Garam K_2SO_4 Menggunakan Metode Elektrokimia*.
- Alkhuder, K. (2022). Attenuated total reflection-Fourier transform infrared spectroscopy: A universal analytical technique with promising applications in forensic analyses. *International Journal of Legal Medicine*, 136(6), 1717–1736. <https://doi.org/10.1007/s00414-022-02882-2>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: An introduction* (10th edition). John Wiley & Sons, Inc.
- Chen, C.-X., Yang, S.-S., Pang, J.-W., He, L., Zang, Y.-N., Ding, L., Ren, N.-Q., & Ding, J. (2024). Anthraquinones-based photocatalysis: A comprehensive review. *Environmental Science and Ecotechnology*, 22, 100449. <https://doi.org/10.1016/j.esec.2024.100449>
- Chung, D. D. L. (2015). A review of exfoliated graphite. *Journal of Materials Science*, 51(1), 554–568. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9284-6>

- De Lima, A. H., Tavares, C. T., Da Cunha, C. C. S., Vicentini, N. C., Carvalho, G. R., Fragneaud, B., Maciel, I. O., Legnani, C., Quirino, W. G., De Oliveira, L. F. C., Sato, F., & De Mendonça, J. P. A. (2020). Origin of optical bandgap fluctuations in graphene oxide. *The European Physical Journal B*, 93(6), 105. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2020-100578-7>
- Deshmukh, S. P., Kale, D. P., Kar, S., Shirsath, S. R., Bhanvase, B. A., Saharan, V. K., & Sonawane, S. H. (2020). Ultrasound assisted preparation of rGO/TiO₂ nanocomposite for effective photocatalytic degradation of methylene blue under sunlight. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 21, 100407. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2019.100407>
- Dong, Y. Z., & Choi, H. J. (2019). Electrorheological Characteristics of Poly(diphenylamine)/magnetite Composite-Based Suspension. *Materials*, 12(18), 2911. <https://doi.org/10.3390/ma12182911>
- Elsheikh Abdelrahman, A., Abbas, F., Assistance Professor, Biology Department, Faculty of Science, King Khalid University, Saudi Arabia, Elsheikh Abdelrahman, S., & Assistance Professor, Director of computer programs and Training Act Center, Singa, Sudan. (2023). Crystallites Dimensions and Electrical Conductivity of Solid Carbon Pellets (SCPs) from Date Palm Leaves (*Phoenix dactylifera* L.). *Academic Journal of Research and Scientific Publishing*, 4(45), 05–21. <https://doi.org/10.52132/Ajrsp.en.2023.45.1>
- Falling, L. J., Mom, R. V., Sandoval Diaz, L. E., Nakhaie, S., Stotz, E., Ivanov, D., Hävecker, M., Lunkenbein, T., Knop-Gericke, A., Schlögl, R., & Velasco-Vélez, J.-J. (2020). Graphene-Capped Liquid Thin Films for Electrochemical Operando X-ray Spectroscopy and Scanning Electron Microscopy. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(33), 37680–37692. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c08379>
- Gumfekar, S. P. (2018). Graphene-Based Materials for Clean Energy Applications. Dalam *Nanomaterials for Green Energy* (hlm. 351–383). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813731-4.00011-4>
- Hadipour, S., Rezaei, P., & Norouzi-Razani, A. (2024). Multi band square-shaped polarization-insensitive graphene-based perfect absorber. *Optical and Quantum Electronics*, 56(3), 471. <https://doi.org/10.1007/s11082-023-06081-0>

- Haryono, H., Faizal D, M., Liamita N, C., & Rostika, A. (2018). Pengolahan Limbah Zat Warna Tekstil Terdispersi dengan Metode Elektroflotasi. *EduChemia (Jurnal Kimia dan Pendidikan)*, 3(1), 94. <https://doi.org/10.30870/educhemia.v3i1.2625>
- Hekstra, D. R. (2023). Emerging Time-Resolved X-Ray Diffraction Approaches for Protein Dynamics. *Annual Review of Biophysics*, 52(1), 255–274. <https://doi.org/10.1146/annurev-biophys-111622-091155>
- Hossain, Md. S., & Ahmed, S. (2022). Synthesis of nano-crystallite gypsum and bassanite from waste *Pila globosa* shells: Crystallographic characterization. *RSC Advances*, 12(38), 25096–25105. <https://doi.org/10.1039/D2RA04881G>
- Huang, L., Xiao, G., Wang, Y., Li, H., Zhou, Y., Jiang, L., & Wang, J. (2022). Self-Exfoliation of Flake Graphite for Bioinspired Compositing with Aramid Nanofiber toward Integration of Mechanical and Thermoconductive Properties. *Nano-Micro Letters*, 14(1), 168. <https://doi.org/10.1007/s40820-022-00919-0>
- Ibrahim, A., Klopocinska, A., Horvat, K., & Abdel Hamid, Z. (2021). Graphene-Based Nanocomposites: Synthesis, Mechanical Properties, and Characterizations. *Polymers*, 13(17), 2869. <https://doi.org/10.3390/polym13172869>
- Ihwani, S. A. (2022). PENGARUH FRAKSI-X SELENIUM PADA STRUKTUR DAN PARAMETER KISI Pb(S,Se) MASIF PREPARASI TEKNIK BRIDGMAN.
- Irawan, A. (2019). Kalibrasi Spektrofotometer Sebagai Penjaminan Mutu Hasil Pengukuran dalam Kegiatan Penelitian dan Pengujian. *Indonesian Journal of Laboratory*, 1(2), 1. <https://doi.org/10.22146/ijl.v1i2.44750>
- Iskandar, F., Hikmah, U., Stavila, E., & Aimon, A. H. (2017). Microwave-assisted reduction method under nitrogen atmosphere for synthesis and electrical conductivity improvement of reduced graphene oxide (rGO). *RSC Advances*, 7(83), 52391–52397. <https://doi.org/10.1039/C7RA10013B>
- Kaczmarek-Szczepańska, B., Michalska-Sionkowska, M., Binkowski, P., Lukaszewicz, J. P., & Kamedulski, P. (2023). 3D-Structured and Blood-Contact-Safe Graphene Materials. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(4), 3576. <https://doi.org/10.3390/ijms24043576>

- Klein, J., Kampermann, L., Mockenhaupt, B., Behrens, M., Strunk, J., & Bacher, G. (2023). Limitations of the Tauc Plot Method. *Advanced Functional Materials*, 33(47), 2304523. <https://doi.org/10.1002/adfm.202304523>
- Kumar, N., & Srivastava, V. C. (2018). Simple Synthesis of Large Graphene Oxide Sheets via Electrochemical Method Coupled with Oxidation Process. *ACS Omega*, 3(8), 10233–10242. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b01283>
- Kumaravel, A., Selvamani, V., & Hong, S. H. (2023). Photocatalytic Reduction of Methylene Blue by Surface-Engineered Recombinant *Escherichia coli* as a Whole-Cell Biocatalyst. *Bioengineering*, 10(12), 1389. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10121389>
- Lähde, A., Välikangas, J., Meščeriakovas, A., Karhunen, T., Meščeriakovė, S.-M., Sippula, O., Leinonen, S., Lassi, U., & Jokiniemi, J. (2024). Effect of high temperature thermal treatment on the electrochemical performance of natural flake graphite. *Journal of Materials Research*, 39(6), 944–954. <https://doi.org/10.1557/s43578-024-01282-z>
- Laws, R., Steel, D. H., & Rajan, N. (2022). Research Techniques Made Simple: Volume Scanning Electron Microscopy. *Journal of Investigative Dermatology*, 142(2), 265-271.e1. <https://doi.org/10.1016/j.jid.2021.10.020>
- Liu, F., Wang, C., Sui, X., Riaz, M. A., Xu, M., Wei, L., & Chen, Y. (2019). Synthesis of graphene materials by electrochemical exfoliation: Recent progress and future potential. *Carbon Energy*, 1(2), 173–199. <https://doi.org/10.1002/cey2.14>
- Liu, S., Ren, Z., Fakudze, S., Shang, Q., Chen, J., Liu, C., Han, J., & Tian, Z. (2022). Structural Evolution of Graphitic Carbon Derived from Ionic Liquids-Dissolved Cellulose and Its Application as Lithium-Ion Battery Anodes. *Langmuir*, 38(1), 320–331. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c02559>
- Lund, S., Kauppila, J., Sirkiä, S., Palosaari, J., Eklund, O., Latonen, R.-M., Smått, J.-H., Peltonen, J., & Lindfors, T. (2021). Fast high-shear exfoliation of natural flake graphite with temperature control and high yield. *Carbon*, 174, 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.11.094>
- Lutfi, L. K., Kusumawati, D. H., & Si, M. (2015). PENGARUH PENAMBAHAN TiO_2 DAN KARBON AKTIF PADA

PADUAN PANi/TiO₂/KARBON AKTIF SEBAGAI BAHAN PENYERAP GELOMBANG MIKRO.

- Ma, D., Zhai, S., Wang, Y., Liu, A., & Chen, C. (2019). TiO₂ Photocatalysis for Transfer Hydrogenation. *Molecules*, 24(2), 330. <https://doi.org/10.3390/molecules24020330>
- Madurani, K. A., Suprpto, S., Machrita, N. I., Bahar, S. L., Illiya, W., & Kurniawan, F. (2020). Progress in Graphene Synthesis and its Application: History, Challenge and the Future Outlook for Research and Industry. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 9(9), 093013. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/abbb6f>
- Mafliah, I., Ubang, I., Podung, P. N., Nurbaiti, W., & Lestari, S. (2021). ADSORPSI METILEN BIRU DENGAN MENGGUNAKAN ARANG AKTIF DARI AMPAS KOPI.
- Maretta, A., & Helmy, Q. (2015). DEGRADASI SURFAKTAN SODIUM LAURYL SULFAT DENGAN PROSES FOTOKATALISIS MENGGUNAKAN NANO PARTIKEL ZNO. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 21(1), 1–8. <https://doi.org/10.5614/jtl.2015.21.1.1>
- Marsden, B. J., Haverty, M., Bodel, W., Hall, G. N., Jones, A. N., Mummery, P. M., & Treifi, M. (2016). Dimensional change, irradiation creep and thermal/mechanical property changes in nuclear graphite. *International Materials Reviews*, 61(3), 155–182. <https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1136460>
- Marshall, A. G., Damo, S. M., & Hinton, A. (2023). Revisiting focused ion beam scanning electron microscopy. *Trends in Biochemical Sciences*, 48(6), 585–586. <https://doi.org/10.1016/j.tibs.2023.02.005>
- Maryudi, M., Aktawan, A., & Amelia, S. (2021). Pengolahan Limbah Pewarna Metilen Biru Menggunakan Arang Aktif dan Zeolit Aktif dengan Katalis Fe dan Oksidator Hidrogen Peroksida. *Jurnal Riset Kimia*, 12(2). <https://doi.org/10.25077/jrk.v12i2.414>
- Mehmood, Z., Shah, S. A. A., Omer, S., Idrees, R., & Saeed, S. (2024). Scalable synthesis of high-quality, reduced graphene oxide with a large C/O ratio and its dispersion in a chemically modified polyimide matrix for electromagnetic interference shielding applications. *RSC Advances*, 14(11), 7641–7654. <https://doi.org/10.1039/D4RA00329B>

- Mehra, P., & Paul, A. (2022). Decoding Carbon-Based Materials' Properties for High CO₂ Capture and Selectivity. *ACS Omega*, 7(38), 34538–34546. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c04269>
- Minnekhanov, A. A., Le, N. T., Konstantinova, E. A., & Kashkarov, P. K. (2017). Influence of Defects on Photoconductivity and Photocatalytic Activity of Nitrogen-Doped Titania. *Applied Magnetic Resonance*, 48(4), 335–345. <https://doi.org/10.1007/s00723-017-0870-4>
- Mohapatra, P., Shaw, S., Mendivelso-Perez, D., Bobbitt, J. M., Silva, T. F., Naab, F., Yuan, B., Tian, X., Smith, E. A., & Cademartiri, L. (2017). Calcination does not remove all carbon from colloidal nanocrystal assemblies. *Nature Communications*, 8(1), 2038. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02267-9>
- Nath, R. K., Hyder, M. K. M. Z., & Zain, M. F. M. (2017). Improvement of Indoor Air Quality by Applying LiNbO₃ on Concrete. *Asian Journal of Chemistry*, 29(12), 2692–2700. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2017.20806>
- Negash, A., Mohammed, S., Weldekirstos, H. D., Ambaye, A. D., & Gashu, M. (2023). Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue dye using eco-friendly synthesized rGO@ZnO nanocomposites. *Scientific Reports*, 13(1), 22234. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48826-7>
- Nguyen, T. T., Nguyen, T. N. T., Bach, L. G., Nguyen, D. T., & Bui, T. P. Q. (2019). Adsorptive removal of Pb (II) using exfoliated graphite adsorbent: influence of experimental conditions and magnetic CoFe₂O₄ decoration. *IJUM Engineering Journal*, 20(1), 202–215. <https://doi.org/10.31436/ijumej.v20i1.965>
- Novitasari, D., Lusiana, L. A., Sembiring, S., & Junaidi, J. (2022). Studi Pendahuluan Penentuan Nilai Energi Band Gap Komposit Perak Silika (Ag/SiO₂) Berbasis Sekam Padi. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, 10(1), 36. <https://doi.org/10.23960/jtaf.v10i1.2892>
- Ojeda-López, R., Ramos-Sánchez, G., García-Mendoza, C., C. S. Azevedo, D., Guzmán-Vargas, A., & Felipe, C. (2021). Effect of Calcination Temperature and Chemical Composition of PAN-Derived Carbon Microfibers on N₂, CO₂, and CH₄ Adsorption. *Materials*, 14(14), 3914. <https://doi.org/10.3390/ma14143914>

- Paredes, J. I., & Munuera, J. M. (2017). Recent advances and energy-related applications of high quality/chemically doped graphenes obtained by electrochemical exfoliation methods. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(16), 7228–7242. <https://doi.org/10.1039/C7TA01711A>
- Perumal, S., Atchudan, R., & Cheong, I. W. (2021). Recent Studies on Dispersion of Graphene–Polymer Composites. *Polymers*, 13(14), 2375. <https://doi.org/10.3390/polym13142375>
- Pham, V. H. T., Kim, J., Chang, S., & Chung, W. (2022). Biodegradation of Methylene Blue Using a Novel Lignin Peroxidase Enzyme Producing Bacteria, Named *Bacillus* sp. React3, as a Promising Candidate for Dye-Contaminated Wastewater Treatment. *Fermentation*, 8(5), 190. <https://doi.org/10.3390/fermentation8050190>
- Qayyum, A., Batool, Z., Fatima, M., Buzdar, S. A., Ullah, H., Nazir, A., Jabeen, Q., Siddique, S., & Imran, R. (2022). Antibacterial and in vivo toxicological studies of Bi₂O₃/CuO/GO nanocomposite synthesized via cost effective methods. *Scientific Reports*, 12(1), 14287. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17332-7>
- Salverda, M., Thirupathi, A. R., Pakravan, F., Wood, P. C., & Chen, A. (2022). Electrochemical Exfoliation of Graphite to Graphene-Based Nanomaterials. *Molecules*, 27(24), 8643. <https://doi.org/10.3390/molecules27248643>
- Sang, M., Shin, J., Kim, K., & Yu, K. J. (2019). Electronic and Thermal Properties of Graphene and Recent Advances in Graphene Based Electronics Applications. *Nanomaterials*, 9(3), 374. <https://doi.org/10.3390/nano9030374>
- Saputri, E. D., Munir, R., & Natalisanto, A. I. (2022). Investigasi pola XRD dan ukuran kristal pada TiO₂ terdoping vanadium menggunakan aplikasi VESTA. *Progressive Physics Journal*, 3(1), 125. <https://doi.org/10.30872/ppj.v3i1.909>
- Sari, R., Mastura, C. D., Rihayat, T., Dewi, R., & Hakim, L. (2022). Pembuatan Grafena dengan Metode Reduksi Graphene Oxide Menggunakan Bahan Baku Grafit dan Reduktor Natrium Hipoposfit.
- Sayid, S. A., Dadan-Garba, A., Enenche, D. E., & Ikyo, B. A. (2020). Scanning Electron Microscopy (SEM) of the Bug

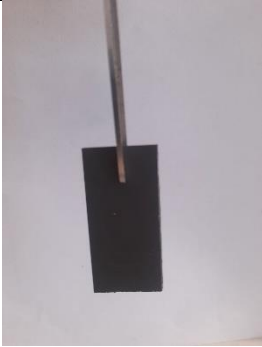
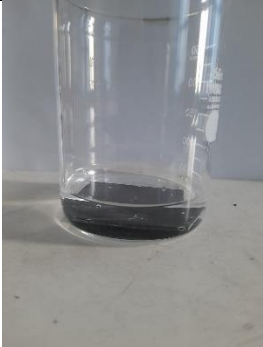
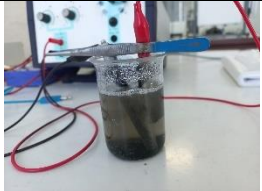
Eye and Sand Coral. *Microscopy Research*, 08(01), 1–7.
<https://doi.org/10.4236/mr.2020.81001>

- Septiano, A. F., Susilo, S., & Setyaningsih, N. E. (2021). Analisis Citra Hasil Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-Ray (SEM EDX) Komposit Resin Timbal dengan Metode Contrast to Noise Ratio (CNR). *Indonesian Journal of Mathematics and Natural Sciences*, 44(2), 81–85. <https://doi.org/10.15294/ijmns.v44i2.33143>
- Shubha, B. S., Praveen, B. M., & Bhat, V. (2023). Graphene—Calculation of Specific Surface Area. *International Journal of Applied Engineering and Management Letters*, 91–97. <https://doi.org/10.47992/IJAEML.2581.7000.0168>
- Sianita, M. S., Darmawan, A., & Azmiyawati, C. (2017). Uji Aktivitas Fotokatalis Genteng Berglasir Silika/TiO₂ terhadap Degradasi Larutan Indigo Carmine, Metanil Yellow dan Rhodamin. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 20(2), 53–57. <https://doi.org/10.14710/jksa.20.2.53-57>
- Singh, S., Hasan, Mohd. R., Sharma, P., & Narang, J. (2022). Graphene nanomaterials: The wondering material from synthesis to applications. *Sensors International*, 3, 100190. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2022.100190>
- Smith, A. T., LaChance, A. M., Zeng, S., Liu, B., & Sun, L. (2019). Synthesis, properties, and applications of graphene oxide/reduced graphene oxide and their nanocomposites. *Nano Materials Science*, 1(1), 31–47. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2019.02.004>
- Sudharto, J. (2023). PENGARUH KALSINASI PELET KATALIS ZEOLIT ALAM PADA KEKUATAN MEKANIS DENGAN BINDER KAOLIN. 11(4).
- Suzuki, Y., Hino, H., Hawai, T., Saito, K., Kotsugi, M., & Ono, K. (2020). Symmetry prediction and knowledge discovery from X-ray diffraction patterns using an interpretable machine learning approach. *Scientific Reports*, 10(1), 21790. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77474-4>
- Thanikachalam, J., Nagaraj, P., Krishnan, S., & Manian, M. (2017). Desalination technique using optimised solar still and solar foam. *International Journal of Materials and Product Technology*, 55(1/2/3), 156. <https://doi.org/10.1504/IJMPT.2017.084959>

- Turner, P., Hodnett, M., Dorey, R., & Carey, J. D. (2019). Controlled Sonication as a Route to in-situ Graphene Flake Size Control. *Scientific Reports*, 9(1), 8710. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45059-5>
- Viprya, P., Kumar, D., & Kowshik, S. (2023). Study of Different Properties of Graphene Oxide (GO) and Reduced Graphene Oxide (rGO). *RAiSE-2023*, 84. <https://doi.org/10.3390/engproc2023059084>
- Wang, M., Li, C., Liu, B., Qin, W., & Xie, Y. (2022). Influence of Calcination Temperature on Photocatalyst Performances of Floral Bi₂O₃/TiO₂ Composite. *Catalysts*, 12(12), 1635. <https://doi.org/10.3390/catal12121635>
- Wang, R., & Wang, Y. (2021). Fourier Transform Infrared Spectroscopy in Oral Cancer Diagnosis. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(3), 1206. <https://doi.org/10.3390/ijms22031206>
- Wang, Y., Zhang, X., Liu, H., & Zhang, X. (2019). SMA-Assisted Exfoliation of Graphite by Microfluidization for Efficient and Large-Scale Production of High-Quality Graphene. *Nanomaterials*, 9(12), 1653. <https://doi.org/10.3390/nano9121653>
- Wati, A. M., Mahatmanti, F. W., Jumaeri, J., & Prasetya, A. T. (2021). Adsorpsi Metilen Biru oleh Abu Layang Batu Bara yang Teraktivasi Menggunakan Proses Hidrotermal dengan Bantuan Gelombang Mikro. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 18(1), 58. <https://doi.org/10.20961/alchemy.18.1.50935.58-69>
- Wu, X. (2018). *Influence of Particle Beam Irradiation on the Structure and Properties of Graphene*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-6457-9>
- Yu, P., Lowe, S. E., Simon, G. P., & Zhong, Y. L. (2015). Electrochemical exfoliation of graphite and production of functional graphene. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 20(5–6), 329–338. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2015.10.007>
- Zhao, M., Casiraghi, C., & Parvez, K. (2024). Electrochemical exfoliation of 2D materials beyond graphene. *Chemical Society Reviews*, 53(6), 3036–3064. <https://doi.org/10.1039/D3CS00815K>

LAMPIRAN

Lampiran I Gambar Selama Pelaksanaan Penelitian

	
Potong grafit menjadi ukuran 2x5 cm	Rendam dalam cairan <i>pre-treatment</i> selama 6 menit
	
Proses eksfoliasi dengan metode elektrokimia	Hasil eksfoliasi
	
Penetrulan pH dengan sentrifugasi	Pengeringan dengan suhu 60°C selama 6 jam
	
EG-TS setelah kering	Proses Sonikasi



Sentrifugasi



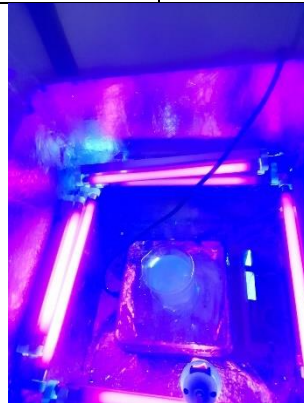
EG-S setelah di keringkan



Sampel sebelum di kalsinasi



Sampel sebelum uji LCR



Proses fotokatalis di ruang gelap

Lampiran 2 Hasil Uji

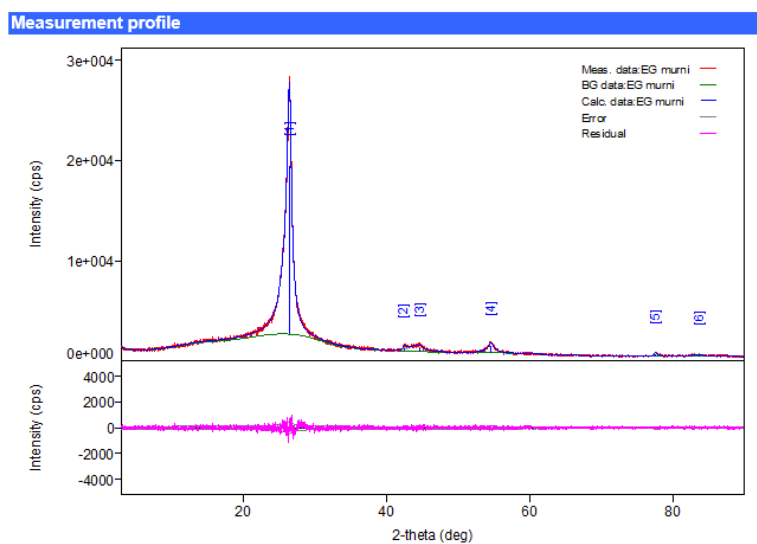
1. Hasil uji XRD

a. EG-TS

Peak list

Peak list							
No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Int. W(deg)	Asym. factor
1	26.445(5)	3.3677(6)	16876(375)	0.887(8)	26367(105)	1.56(4)	1.56(5)
2	42.470(17)	2.1268(8)	266(47)	0.48(6)	146(18)	0.55(16)	0.5(3)
3	44.65(6)	2.028(2)	446(61)	2.17(10)	1281(58)	2.9(5)	2.7(5)
4	54.67(2)	1.6774(6)	697(76)	0.96(5)	1158(40)	1.7(2)	1.9(2)
5	77.57(4)	1.2297(6)	277(48)	0.44(5)	178(19)	0.64(18)	1.1(4)
6	83.75(7)	1.1540(8)	83(26)	1.0(2)	114(39)	1.4(9)	4(6)

Measure profile



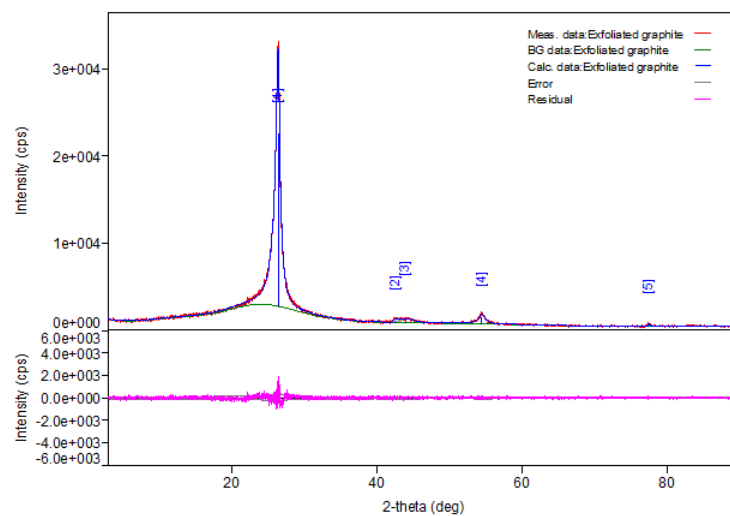
b. EG-S

Peak list

Peak list							
No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Int. W(deg)	Asym. factor
1	26.391(4)	3.3745(5)	19920(407)	0.735(7)	25790(65)	1.29(3)	1.57(5)
2	42.53(3)	2.1239(13)	256(46)	0.92(6)	266(286)	1.0(13)	0.52(10)
3	43.97(4)	2.0578(17)	295(50)	2.31(8)	768(35)	2.6(6)	0.52(10)
4	54.46(4)	1.6836(10)	814(82)	0.95(5)	1311(25)	1.61(19)	0.89(17)
5	77.51(2)	1.2305(3)	255(46)	0.26(5)	108(9)	0.42(11)	1.6(6)

Measure profile

Measurement profile



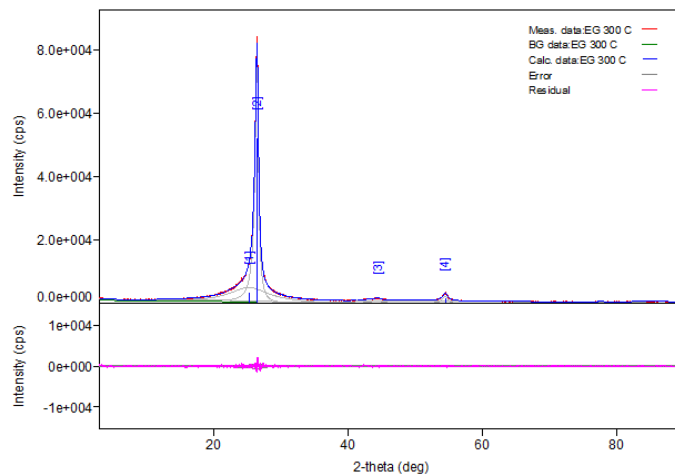
c. EG-300
Peak list

Peak list

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Int. W(deg)	Asym. factor
1	25.03(10)	3.555(14)	1285(103)	2.57(13)	4656(527)	3.6(7)	1.6(7)
2	26.515(3)	3.3689(4)	40959(584)	0.660(4)	42809(347)	1.05(2)	1.32(3)
3	44.28(8)	2.044(3)	508(65)	2.81(7)	1726(142)	3.4(7)	1.34(16)
4	54.56(3)	1.6807(7)	1428(109)	0.90(3)	2126(36)	1.49(14)	1.11(16)
5	77.73(7)	1.2276(9)	270(47)	0.52(7)	171(11)	0.63(15)	1.6(10)
6	83.82(10)	1.1532(12)	99(29)	1.34(17)	172(29)	1.7(8)	3.6(18)
7	86.94(5)	1.1197(6)	90(27)	1.29(18)	140(54)	1.5(11)	1.4(12)

Measure profile

Measurement profile



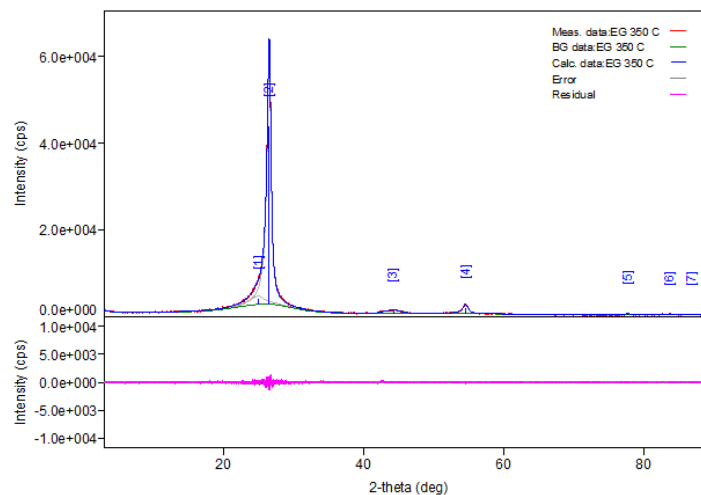
d. EG-350
Peak list

Peak list

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Int. W(deg)	Asym. factor
1	25.35(14)	3.511(19)	3163(162)	7.2(2)	35863(1127)	11.3(9)	0.91(8)
2	26.448(3)	3.3673(4)	51983(658)	0.625(3)	52216(357)	1.00(2)	1.44(3)
3	44.55(4)	2.0321(16)	513(65)	2.47(7)	1701(56)	3.3(5)	3.2(3)
4	54.53(3)	1.6814(7)	1595(115)	0.95(3)	2422(39)	1.52(13)	1.39(19)
5	77.55(4)	1.2299(6)	306(51)	0.39(5)	170(17)	0.56(15)	1.0(4)
6	82.71(12)	1.1658(13)	1263(103)	25.3(13)	66312(13191)	52(15)	5(5)
7	87.43(11)	1.1146(11)	645(73)	7.6(5)	5212(603)	8.1(19)	0.5

Measure profile

Measurement profile



e. EG-400

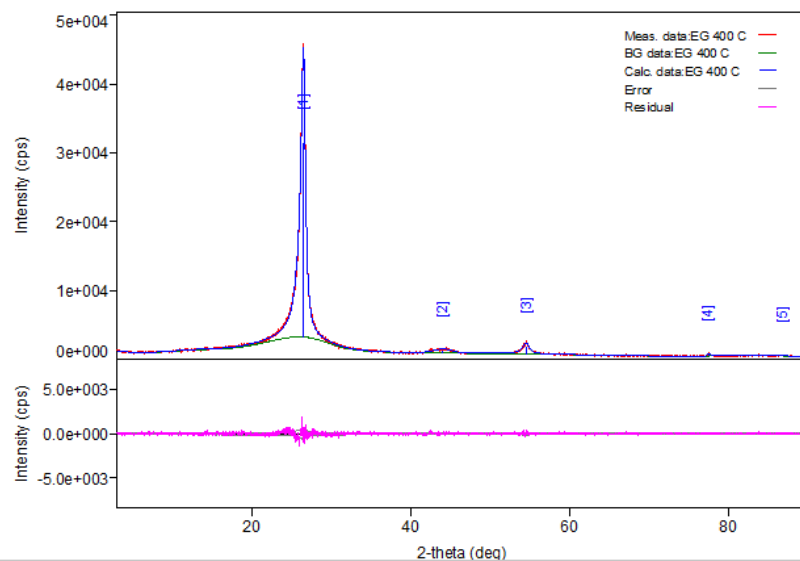
Peak list

Peak list

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Int. W(deg)	Asym. factor
1	26.478(4)	3.3636(5)	28307(486)	0.725(5)	34294(123)	1.21(3)	1.53(4)
2	44.08(10)	2.053(4)	397(58)	2.89(8)	1237(159)	3.1(9)	1.15(16)
3	54.55(3)	1.6808(10)	1080(95)	0.98(4)	1710(38)	1.58(17)	1.3(2)
4	77.55(3)	1.2300(4)	325(52)	0.31(4)	154(14)	0.47(12)	1.3(3)
5	86.90(7)	1.1201(8)	63(23)	0.8(4)	103(29)	1.6(11)	5(9)

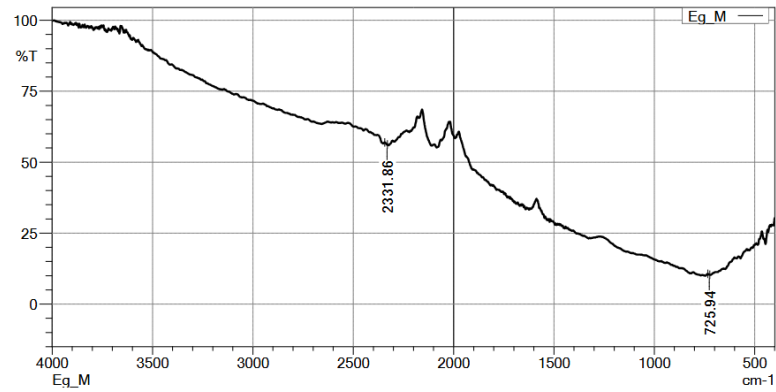
Measure profile

Measurement profile

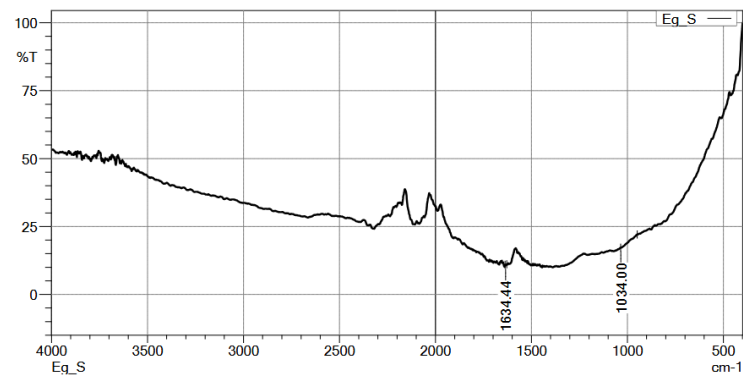


2. Hasil uji menggunakan FTIR

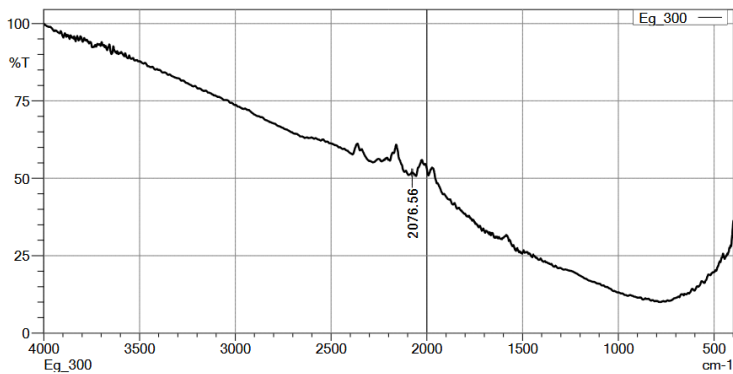
a. EG-TS



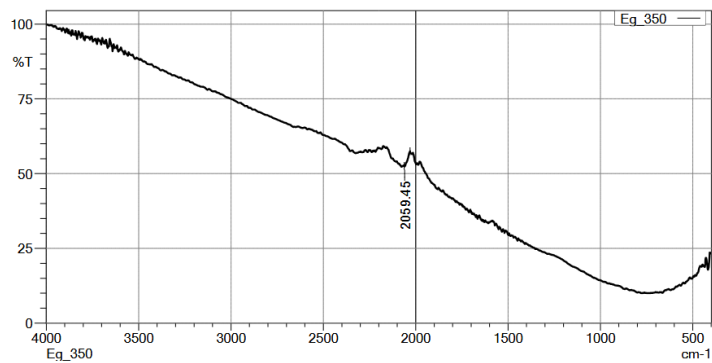
b. EG-S



c. EG-300



d. EG-350



[illegible]

$$D = \frac{Kc\lambda}{\beta \cos \theta} = \frac{0,9 \times 1,54}{0,0128216 \cos 0,2301881} = 111,02 \text{ \AA} = 11,1 \text{ nm}$$

c. EG-300

Diket :

$$Kc = 0,9$$

$$\lambda = 1,54 \text{ \AA}$$

$$\theta = 13,2575^\circ = 0,2312697 \text{ rad}$$

$$\beta = 0,660^\circ = 0,0115133 \text{ rad}$$

Ditanya :

- d = ...?

- D = ...?

Jawab:

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,54}{2 \sin 0,2312697} = 3,36121 \text{ \AA}$$

$$D = \frac{Kc\lambda}{\beta \cos \theta} = \frac{0,9 \times 1,54}{0,0115133 \cos 0,2312697} = 123,6 \text{ \AA} = 12,36 \text{ nm}$$

d. EG-350

Diket :

$$Kc = 0,9$$

$$\lambda = 1,54 \text{ \AA}$$

$$\theta = 13,224^\circ = 0,230685 \text{ rad}$$

$$\beta = 0,625^\circ = 0,0109027 \text{ rad}$$

Ditanya :

- d = ...?

- D = ...?

Jawab:

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,54}{2 \sin 0,230685} = 3,36767 \text{ \AA}$$

$$D = \frac{Kc\lambda}{\beta \cos \theta} = \frac{0,9 \times 1,54}{0,0109027 \cos 0,230685} = 130,58 \text{ \AA} = 13,05 \text{ nm}$$

e. EG-400

Diket :

$$Kc = 0,9$$

$$\lambda = 1,54 \text{ \AA}$$

$$\theta = 13,239^\circ = 0,230947 \text{ rad}$$

$$\beta = 0,725^\circ = 0,0126472 \text{ rad}$$

Ditanya :

- d = ...?

- D = ...?

Jawab:

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,54}{2 \sin 0,230947} = 3,36392 \text{ \AA}$$

$$D = \frac{Kc\lambda}{\beta \cos \theta} = \frac{0,9 \times 1,54}{0,0126472 \cos 0,230947} = 112,57 \text{ \AA} = 11,25 \text{ nm}$$

2. Perhitungan konduktivitas

Pada frekuensi 4 MHz

a. EG-TS

Diket :

$$F = 4 \times 10^6 \text{ Hz}$$

$$R_{p1} = 1,7209 \times 10^2 \Omega$$

$$R_{p2} = 1,6697 \times 10^2 \Omega$$

$$R_{p3} = 1,6138 \times 10^2 \Omega$$

$$l = 1,45 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$A = 7,85 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

Ditanya :

$$\sigma = \dots ?$$

Jawab:

$$\begin{aligned} - \rho_1 &= \frac{R_{p1} \times A}{l} = \frac{1,7209 \times 10^2 \times 7,85 \times 10^{-5}}{1,45 \times 10^{-3}} = 9,316 \text{ } \Omega/m \\ \sigma &= \frac{1}{\rho_1} = \frac{1}{9,316} = 1,07 \times 10^{-1} \text{ S/m} \\ - \rho_2 &= \frac{R_{p2} \times A}{l} = \frac{1,6697 \times 10^2 \times 7,85 \times 10^{-5}}{1,45 \times 10^{-3}} = 9,039 \text{ } \Omega/m \\ \sigma &= \frac{1}{\rho_2} = \frac{1}{9,039} = 1,11 \times 10^{-1} \text{ S/m} \\ - \rho_3 &= \frac{R_{p3} \times A}{l} = \frac{1,6138 \times 10^2 \times 7,85 \times 10^{-5}}{1,45 \times 10^{-3}} = 8,736 \text{ } \Omega/m \\ \sigma &= \frac{1}{\rho_3} = \frac{1}{8,736} = 1,14 \times 10^{-1} \text{ S/m} \\ - \sigma_{rata-rata} &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = 1,108 \times 10^{-1} \text{ S/m} \end{aligned}$$

b. EG-S

$$F = 4 \times 10^6 \text{ Hz}$$

$$R_{p1} = 1,2578 \times 10^2 \Omega$$

$$R_{p2} = 1,2115 \times 10^2 \Omega$$

$$R_{p3} = 1,0745 \times 10^2 \Omega$$

$$l = 1,45 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$A = 7,85 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

Ditanya :

$$\sigma = \dots ?$$

Jawab:

$$\begin{aligned} - \rho_1 &= \frac{R_{p1} \times A}{l} = \frac{1,2578 \times 10^2 \times 7,85 \times 10^{-5}}{1,45 \times 10^{-3}} = 6,8094 \text{ } \Omega/m \\ \sigma &= \frac{1}{\rho_1} = \frac{1}{6,8094} = 1,47 \times 10^{-1} \text{ S/m} \\ - \rho_2 &= \frac{R_{p2} \times A}{l} = \frac{1,2115 \times 10^2 \times 7,85 \times 10^{-5}}{1,45 \times 10^{-3}} = 6,5588 \text{ } \Omega/m \\ \sigma &= \frac{1}{\rho_2} = \frac{1}{6,5588} = 1,52 \times 10^{-1} \text{ S/m} \\ - \rho_3 &= \frac{R_{p3} \times A}{l} = \frac{1,0745 \times 10^2 \times 7,85 \times 10^{-5}}{1,45 \times 10^{-3}} = 5,8171 \text{ } \Omega/m \\ \sigma &= \frac{1}{\rho_3} = \frac{1}{5,8171} = 1,72 \times 10^{-1} \text{ S/m} \\ - \sigma_{rata-rata} &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = 1,1571 \times 10^{-1} \text{ S/m} \end{aligned}$$

c. EG-300

$$F = 4 \times 10^6 \text{ Hz}$$

$$R_{p1} = 5,546 \times 10^1 \Omega$$

$$R_{p2} = 7,369 \times 10^1 \Omega$$

$$R_{p3} = 8,2633 \times 10^1 \Omega$$

$$l = 1,4 \times 10^{-3} m$$

$$A = 7,85 \times 10^{-5} m^2$$

Ditanya :

$$\sigma = ..?$$

Jawab:

$$- \rho_1 = \frac{R_{p1} \times A}{l} = \frac{5,2546 \times 10^1 \times 7,85 \times 10^{-5}}{1,4 \times 10^{-3}} = 3,1097 \Omega/m$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho_1} = \frac{1}{3,1097} = 3,22 \times 10^{-1} S/m$$

$$- \rho_2 = \frac{R_{p2} \times A}{l} = \frac{7,369 \times 10^1 \times 7,85 \times 10^{-5}}{1,4 \times 10^{-3}} = 4,1319 \Omega/m$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho_2} = \frac{1}{4,1319} = 2,42 \times 10^{-1} S/m$$

$$- \rho_3 = \frac{R_{p3} \times A}{l} = \frac{8,2633 \times 10^1 \times 7,85 \times 10^{-5}}{1,4 \times 10^{-3}} = 4,6333 \Omega/m$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho_3} = \frac{1}{4,6333} = 2,16 \times 10^{-1} S/m$$

$$- \sigma_{rata-rata} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = 2,6197 \times 10^{-1} S/m$$

d. EG-350

$$F = 4 \times 10^6 Hz$$

$$R_{p1} = 3,3456 \times 10^1 \Omega$$

$$R_{p2} = 2,9596 \times 10^1 \Omega$$

$$R_{p3} = 3,1458 \times 10^1 \Omega$$

$$l = 1,6 \times 10^{-3} m$$

$$A = 7,85 \times 10^{-5} m^2$$

Ditanya :

$$\sigma = ..?$$

Jawab:

$$- \rho_1 = \frac{R_{p1} \times A}{l} = \frac{3,3456 \times 10^1 \times 7,85 \times 10^{-5}}{1,6 \times 10^{-3}} = 1,64143 \Omega/m$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho_1} = \frac{1}{1,64143} = 6,09 \times 10^{-1} S/m$$

$$- \rho_2 = \frac{R_{p2} \times A}{l} = \frac{2,9596 \times 10^1 \times 7,85 \times 10^{-5}}{1,6 \times 10^{-3}} = 1,45205 \Omega/m$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho_2} = \frac{1}{1,45205} = 6,89 \times 10^{-1} S/m$$

$$- \rho_3 = \frac{R_{p3} \times A}{l} = \frac{3,1458 \times 10^1 \times 7,85 \times 10^{-5}}{1,6 \times 10^{-3}} = 1,5434 \Omega/m$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho_3} = \frac{1}{1,5434} = 6,48 \times 10^{-1} S/m$$

$$- \sigma_{rata-rata} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = 6,4860 \times 10^{-1} S/m$$

e. EG-400

$$F = 4 \times 10^6 Hz$$

$$R_{p1} = 2,9415 \times 10^1 \Omega$$

$$R_{p2} = 3,9768 \times 10^1 \Omega$$

$$R_{p3} = 5,4806 \times 10^1 \Omega$$

$$l = 1,6 \times 10^{-3} m$$

$$A = 7,85 \times 10^{-5} m^2$$

Ditanya :

$$\sigma = ..?$$

Jawab:

$$\begin{aligned}
 - \quad \rho_1 &= \frac{Rp_1 \times A}{l} = \frac{2,9415 \times 10^1 \times 7,85 \times 10^{-5}}{1,6 \times 10^{-3}} = 1,44317 \, \Omega/m \\
 \sigma &= \frac{1}{\rho_1} = \frac{1}{1,44317} = 6,93 \times 10^{-1} \, S/m \\
 - \quad \rho_2 &= \frac{Rp_2 \times A}{l} = \frac{3,9768 \times 10^1 \times 7,85 \times 10^{-5}}{1,6 \times 10^{-3}} = 1,95111 \, \Omega/m \\
 \sigma &= \frac{1}{\rho_2} = \frac{1}{1,95111} = 5,13 \times 10^{-1} \, S/m \\
 - \quad \rho_3 &= \frac{Rp_3 \times A}{l} = \frac{5,4806 \times 10^1 \times 7,85 \times 10^{-5}}{1,6 \times 10^{-3}} = 2,6889 \, \Omega/m \\
 \sigma &= \frac{1}{\rho_3} = \frac{1}{2,6889} = 3,72 \times 10^{-1} \, S/m \\
 - \quad \sigma_{rata-rata} &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = 5,0459 \times 10^{-1} \, S/m
 \end{aligned}$$



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM MALANG
Jalan Tugu Pahlawan Nomor 501, Telp: 0341-531134, Fax: 0341-532533
Website: <http://www.uin-malang.ac.id> Email: info@uin-malang.ac.id

JURNAL BIMBINGAN SKRIPSI/TESIS/DISERTASI

IDENTITAS MAHASISWA

NIM 210604110029
Nama UTIYA HIKMAH S.Si, M.Si
Fakultas SAINS DAN TEKNOLOGI
Jurusan FISIKA
Dosen Pembimbing 1 UTIYA HIKMAH S.Si, M.Si
Dosen Pembimbing 2 Prof. Dr. Drs. MOKHAMMAD TIRONO, M.Si
Judul Skripsi/Tesis/Disertasi PENGARUH VARIASI SUHU KALSINASI TERHADAP AKTIVITAS FOTOKATALIS EXFOLIATED GRAPHITE PADA DEGRADASI METHYLENE BLUE

IDENTITAS BIMBINGAN

No	Tanggal Bimbingan	Nama Pembimbing	Deskripsi Proses Bimbingan	Tahun Akademik	Status
1	14 Agustus 2024	UTIYA HIKMAH S.Si, M.Si	Pengajuan judul skripsi dan bimbingan terkait	Ganjil 2024/2025	Sudah Dikoreksi
2	01 Februari 2025	UTIYA HIKMAH S.Si, M.Si	Bimbingan bab 1, 2, dan 3	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
3	04 Februari 2025	UTIYA HIKMAH S.Si, M.Si	Persetujuan judul skripsi	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
4	17 Februari 2025	UTIYA HIKMAH S.Si, M.Si	Bimbingan draft bab 1, 2, dan 3 serta persetujuan draft seminar proposal	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
5	30 April 2025	UTIYA HIKMAH S.Si, M.Si	Revisi bab 1, 2, dan 3 setelah ujian seminar proposal	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
6	28 Oktober 2025	Prof. Dr. Drs. MOKHAMMAD TIRONO, M.Si	Bimbingan integrasi bab 1 dan 2	Ganjil 2025/2026	Sudah Dikoreksi
7	05 November 2025	Prof. Dr. Drs. MOKHAMMAD TIRONO, M.Si	Revisi integrasi bab 1 dan 2	Ganjil 2025/2026	Sudah Dikoreksi
8	11 November 2025	UTIYA HIKMAH S.Si, M.Si	Revisi Bab 5	Ganjil 2025/2026	Sudah Dikoreksi
9	26 November 2025	Prof. Dr. Drs. MOKHAMMAD TIRONO, M.Si	Bimbingan integrasi bab 4	Ganjil 2025/2026	Sudah Dikoreksi
10	02 Desember 2025	UTIYA HIKMAH S.Si, M.Si	Bimbingan bab 4	Ganjil 2025/2026	Sudah Dikoreksi
11	03 Desember 2025	Prof. Dr. Drs. MOKHAMMAD TIRONO, M.Si	Bimbingan bab 4 dan pembahasan	Ganjil 2025/2026	Sudah Dikoreksi
12	31 Desember 2025	UTIYA HIKMAH S.Si, M.Si	Revisi bab 5	Ganjil 2025/2026	Sudah Dikoreksi

Telah disetujui
Untuk mengajukan ujian Skripsi/Tesis/Desertasi

Dosen Pembimbing 2

Prof. Dr. Drs. MOKHAMMAD TIRONO, M.Si

Malang, _____

Dosen Pembimbing 1

UTIYA HIKMAH S.Si, M.Si

