



PPNS POLITEKNIK
PERKAPALAN
NEGERI SURABAYA

TUGAS AKHIR (WT43250)

ANALISIS EFEKTIVITAS KOMPOSIT $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$
TERDEKORASI *RH-CARBON DOT* PADA SINERGI
FOTOKATALIS-ADSORPSI UNTUK DEGRADASI *METHYL*
ORANGE PADA AIR LIMBAH

Rina Puji Astutik
1022040112

DOSEN PEMBIMBING:
DENNY DERMAWAN, Ph.D.
TARIKH AZIS RAMADANI, S.T.,M.T.

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

Halaman ini sengaja dikosongkan



PPNS POLITEKNIK
PERKAPALAN
NEGERI SURABAYA

TUGAS AKHIR (WT43250)

**ANALISIS EFEKTIVITAS KOMPOSIT $\text{TiO}_2\text{@Fe}_3\text{O}_4$
TERDEKORASI *RH-CARBON DOT* PADA SINERGI
FOTOKATALIS-ADSORPSI UNTUK DEGRADASI *METHYL
ORANGE* PADA AIR LIMBAH**

Rina Puji Astutik
1022040112

DOSEN PEMBIMBING:
DENNY DERMAWAN, Ph.D.
TARIKH AZIS RAMADANI, S.T.,M.T.

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

Halaman ini sengaja dikosongkan

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**ANALISIS EFEKTIVITAS KOMPOSIT $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ TERDEKORASI
RH-CARBON DOT PADA SINERGI FOTOKATALIS-ADSORPSI
UNTUK DEGRADASI METHYL ORANGE PADA AIR LIMBAH**

Disusun oleh:
Rina Puji Astutik
1022040112

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

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir Tanggal Ujian : 03 Juli 2026
Periode Wisuda : Oktober 2026

Menyetujui,

Dosen Penguji	NIDN/NUPTK	Tanda Tangan
1. Denny Dermawan, Ph.D.	(2740754655130122)	(.....)
2. Tarikh Azis Ramadani, S.T., M.T.	(6761771672130252)	(.....)
3. Novi Eka Mayangsari., S.T., M.T.	(8449768669230313)	(.....)
4. Puspita Khumairoh., S.T., M.Eng.	(0660772673230292)	(.....)

Dosen Pembimbing	NIDN/NUPTK	Tanda Tangan
1. Denny Dermawan, Ph.D.	(2740754655130122)	(.....)
2. Tarikh Azis Ramadani, S.T., M.T.	(6761771672130252)	(.....)

Menyetujui
Ketua Jurusan,


Dr. Ir. Priyo Agus Setiawan, S.T., M.T.
NIP. 197708192005011001

Mengetahui
Koordinator Program Studi,


Dr. Minna Apriani, S.T., M.T.
NIP. 197804142005012002



PPNS
PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN
NELAYAN

PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

No. : F.WD I. 021
Date : 3 Nopember 2015
Rev. : 01
Page : 1 dari 1

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Rina Puji Astutik

NRP. : 1022040112

Jurusan/Prodi : Teknik Permesinan Kapal/D4 Teknik Pengolahan Limbah

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa :

Tugas Akhir yang akan saya kerjakan dengan judul :

Analisis Efektivitas Komposit $\text{TiO}_2@ \text{Fe}_3\text{O}_4$ Terdekorasi RH-Carbon Dot Pada Sinergi Fotokatalis-Adsorpsi untuk Degradasi *Methyl Orange* Pada Air Limbah

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

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

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Surabaya, 30 Juni 2026

Yang membuat pernyataan,



(Rina Puji Astutik)
NRP. 1022040112

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah membeirkan kelimpahan berkah, karunia dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “Analisis Efektivitas Komposit Fotokatalis $\text{TiO}_2@ \text{Fe}_3\text{O}_4$ Terdekorasi RH-Carbon Dot Untuk Degradasi *Methyl Orange* Pada Air Limbah”. Penulisan Tugas Akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat kelulusan pada Program Studi Diploma IV Teknik Pengolahan Limbah, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Penulis menyadari bahwa dalam proses penyusunan tulisan ini masih jauh dari kata sempurna. Namun demikian, penyelesaian Tugas Akhir ini dapat terwujud atas bimbingan, doa dan dukungan dari berbagai pihak. Penghargaan serta ucapan terima kasih secara khusus penulis ucapkan kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Bapak Muh. Ali R. dan Ibu Puji R. yang selalu memberi arahan, mendukung setiap langkah penulis, tidak bosan menanyakan bagaimana keadaan penulis, dan tentunya tidak pernah berhenti untuk mendoakan penulis setiap waktu.
2. Kepada orang tua kedua penulis, Bapak Lukman dan Ibu Sri L. yang selalu mendukung pilihan penulis, memberikan dukungan dan bantuan dalam hal apapun, selalu menerima penulis untuk pulang bagaimanapun keadaannya.
3. Kepada pasangan hidup penulis, Bayu Anggoro S. yang selalu menjadi tempat penulis bersandar, berkeluh kesah dan selalu menjadi tempat penulis untuk pulang. Terima kasih telah belajar bersama dengan penulis dalam hal apapun hingga penulis dapat mencapai titik ini. Terima kasih untuk tidak pernah bosan menjadi sosok yang menenangkan penulis dalam hal apapun.
4. Bapak Rachmad Tri Soelistijono, S.T., M.T. selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
5. Bapak Dr. Ir. Priyo Agus Setiawan, S.T., M.T selaku Ketua Jurusan Teknik Permesinan Kapal.
6. Ibu Dr. Mirna Apriani, S.T., M.T selaku Koordinator Program Studi Diploma IV Teknik Pengolahan Limbah Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya atas dukungan, motivasi, nasihat, dan doa-doa yang diberikan kepada mahasiswa prodi Teknik Pengolahan Limbah.

7. Bapak Denny Dermawan, Ph.D. selaku Dosen Pembimbing I yang telah membantu, meluangkan waktu, memberikan masukan bimbingan dan konsultasi, nasihat, dan doa-doanya sehingga laporan Tugas Akhir dapat terselesaikan dengan baik.
8. Bapak Tarikh Azis Ramadani, S.T.,M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang telah membantu, meluangkan waktu, memberikan arahan, motivasi, dan menyalurkan banyak ilmu baru yang penulis dapatkan serta doa-doanya sehingga laporan Tugas Akhir dapat terselesaikan dengan baik.
9. Ibu Novi Eka Mayangsari, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji I yang selalu menjawab pertanyaan penulis, memberikan saran, masukan, dan bimbingan untuk mendukung penyempurnaan Tugas Akhir ini.
10. Ibu Puspita Khumairoh S.T., M.Eng selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan banyak saran, masukan, dan dukungan dalam penyempurnaan Tugas Akhir ini.
11. Ibu Ayu Nindyapuspa, S.T., M.T selaku Koordinator Tugas Akhir Program Studi Teknik Pengolahan Limbah Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya terima kasih atas kerja kerasnya untuk membimbing, mengatur jadwal sidang, dan doa-doanya mahasiswa prodi Teknik Pengolahan Limbah.
12. Ibu Ulvi Pri Astuti, S.T.,M.T, selaku Dosen Wali Kelas PL8D, yang hingga saat ini selalu memberikan semangat dan dukungan serta doa-doa yang tulus kepada penulis.
13. Seluruh penghuni grup QUEENBEEZ, Nidya Wulandari, Okta Anggraini, Maulidina Ismiati, Ayusa Zhulkha dan Nazua Yushanda yang telah memberikan dukungan kepada penulis dan selalu mengajak penulis untuk bersenang-senang
14. Teman-teman “Trauma Fotokatalis” Imelda Maharani, Indah Permata dan Yossie Rendy yang selalu membantu, mendukung, mencairkan suasana laboratorium dan selalu mengajak makan.
15. Penghuni meja depan yang telah berubah nama menjadi SIXPACK, Deswitha, Indirra, Imelda, Indah Per dan Vidi yang selalu menanyakan apakah penulis memerlukan bantuan dan selalu berceloteh hingga penulis tidak lagi merasa bosan.

16. Indah Nur dan Prabandaru yang selalu ada ketika penulis membutuhkan bantuan, dukungan dan semangat serta selalu menjadi orang kedua yang akan menghampiri penulis ketika penulis sedang tidak baik-baik saja.
17. Teman-teman “The Bujank -1” Rangga, Haqi, Iky, Hilmy dan Alfian yang selalu siap diajak ketika penulis sedang suntuk dan bosan.
18. Anggota grup “PL8D Kapan Wisuda” yang nama grupnya akan berganti tiap semester. Terima kasih selalu kebersamaan proses penulis hingga sampai di titik ini.
19. Ardi Galih sebagai adik penulis, keluarga penulis yang selalu mendukung pilihan penulis, menjadi teman yang mau mengerti, teman yang selalu siap untuk berdiskusi mengenai banyak hal. Terima kasih telah mengenalkan tempat-tempat yang tidak mungkin penulis kunjungi.
20. Dinanti dan Shafira sebagai teman yang selalu menghibur penulis serta teman-teman yang melakukan penelitian di Laboratorium Limbah yang selalu siap membantu penulis ketika penulis membutuhkan bantuan.
21. Kucing-kucing penulis, Alexander Christie (Ichi), Molly, Moka, Alm. Pika dan Daniel Wellington (Iel) yang selalu menghibur penulis dengan tingkah nakalnya sehingga penulis tidak pernah merasa kesepian.
22. Keluarga besar PL Angkatan 2022 “IGNESCENT” yang selalu berjuang bersama, saling merangkul, mendoakan dan melewati suka duka selama 4 tahun ini.
23. Rina Puji Astutik, yang telah berjuang dan dapat bertahan sejauh ini untuk mengejar mimpinya. Terima kasih untuk selalu bertanggung jawab dengan pilihannya dan tidak pernah menyerah dalam menghadapi segala situasi yang dijalani. Terima kasih sudah bertahan meskipun langkah yang dilalui tidaklah mudah dan penuh rintangan.
24. Semua pihak-pihak yang bersangkutan dan tidak dapat disebutkan satu persatu. Terima kasih atas semua doa, dukungan, dan bantuan yang telah diberikan.

Penulis menyadari bahwa banyak kekurangan dalam penyusunan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan adanya saran dan kritik dari berbagai pihak dalam penyempurnaan laporan Tugas Akhir ini. Semoga laporan ini

dapat menambah ilmu pengetahuan dan wawasan dalam perkuliahan dan dunia industri bagi penulis khususnya, serta pembaca pada umumnya.

**Analisis Efektivitas Komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ Terdekorasi *Carbon Dot* Sekam
Padi pada Sinergi Fotokatalis-Adsorpsi untuk Degradasi**

***Methyl Orange* pada Air Limbah**

Rina Puji Astutik

ABSTRAK

Methyl Orange (MO) adalah pewarna azo industri beracun yang berpotensi mencemari lingkungan. Untuk mengatasinya, penelitian ini mengembangkan komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ yang dimodifikasi dengan carbon dots (CDs) dari sekam padi guna mendegradasi MO. Keberhasilan sintesis komposit dikonfirmasi melalui pengujian FTIR, XRD, dan SEM-EDX, meskipun terdapat sedikit aglomerasi partikel. Untuk memaksimalkan degradasi fotokatalitik, berbagai parameter telah diuji. Kinerja paling optimal dicapai pada penggunaan rasio CDs 9% pada pH 5, dengan konsentrasi awal MO 40 ppm dan dosis katalis 0,1 g/L. Selain itu, komposit ini menunjukkan stabilitas yang sangat baik dan dapat digunakan kembali berkali-kali. Kesimpulannya, komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ yang dimodifikasi dengan CDs merupakan fotokatalis yang sangat menjanjikan untuk mengolah limbah air yang terkontaminasi MO.

Kata kunci : *Carbon Dots*, fotokatalis, Komposit Katalis, *Methyl Orange*

Halaman Sengaja Dikosongkan

Analysis of the Effectiveness of $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ Decorated Rice Husk-Carbon Dots Composite in Photocatalysis–Adsorption Synergy for Methyl Orange Degradation in Wastewater

Rina Puji Astutik

ABSTRACT

Methyl Orange (MO) is a widely used industrial azo dye that poses environmental risks due to its toxicity. To address this, a study developed a composite of $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ decorated with rice husk-derived carbon dots (CDs) to efficiently degrade MO. Characterization via FTIR, XRD, and SEM-EDX confirmed the successful synthesis of the composite, although some particle agglomeration was observed. To maximize photocatalytic degradation, various parameters were evaluated. The optimal performance was achieved using a 9% CD ratio at pH 5, an initial MO concentration of 40 ppm, and a catalyst dosage of 0.1 g/L. Furthermore, the composite demonstrated excellent stability across multiple reuse cycles. In conclusion, this CDs-decorated $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ composite is a highly promising and sustainable photocatalyst for treating MO-contaminated wastewater.

Keywords: Carbon Dots, composite catalyst, Methyl Orange, photocatalytic

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR GAMBAR.....	xxiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Tujuan	4
1.4 Manfaat Tugas Akhir	5
1.5 Batasan Masalah.....	6
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Sekam Padi (<i>Oryza sativa Linnaeus</i>)	7
2.2 <i>Carbon Nanomaterials</i> (CNMs)	8
2.3 <i>Carbon Quantum Dots</i> (CQDs)	9
2.4 Metode Sintesis CDs	10
2.4.1 <i>Top-Down Methode</i>	10
2.4.2 <i>Bottom-Up Methode</i>	10
2.5 Metode <i>Hydrothermal</i>	11
2.6 Katalis	12
2.6.1 Katalis Nano-komposit.....	13
2.7 <i>Methyl Orange</i>	13
2.8 Fotokatalis	14
2.8.1 Faktor-faktor yang Memengaruhi Fotokatalisis.....	14
2.8.2 Kemampuan Degradasi Fotokatalisis.....	15
2.8.3 Kinetika Fotokatalisis	16
2.8.4 Mekanisme Fotokatalisis.....	17
2.9 Titanium Dioksida (TiO ₂)	17
2.10 Fe ₃ O ₄	18

2.11	<i>UV-Visible Spectrophotometri (UV-Vis)</i>	18
2.12	<i>Dynamic Light Scattering- Particle Size Analyzer (DLS-PSA)</i> ..	19
2.13	<i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	20
2.14	<i>UV-Vis Diffuse Reflectance Spectroscopy (UV-Vis DRS)</i>	22
2.15	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)</i>	22
2.16	<i>Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX)</i>	23
2.17	<i>Vibrating Sample Magnetometer (VSM)</i>	24
2.18	<i>Analysis of Variance (ANOVA)</i>	24
2.18.1	Analisis Varian Satu-Arah (<i>One-Way ANOVA</i>).....	25
2.18.2	Analisis Varian Dua-Arah (<i>Two-Way ANOVA</i>).....	25
2.18.3	Analisis Varial Tiga-Arah (<i>Three-Way ANOVA</i>).....	25
2.19	Penelitian Terdahulu.....	27
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		29
3.1	Gambaran Umum Penelitian	29
3.2	Kerangka Penelitian.....	29
3.3	Identifikasi Masalah	30
3.4	Perumusan Ide Penelitian	31
3.5	Penentuan Rumusan Masalah dan Tujuan.....	31
3.6	Studi Literatur.....	31
3.7	Pengumpulan Data.....	31
3.7.1	Data Primer.....	31
3.7.2	Data Sekunder	32
3.8	Sampel Penelitian	32
3.9	Penentuan Variabel.....	32
3.9.1	Variabel Bebas.....	32
3.9.2	Variabel Terikat.....	37
3.9.3	Variabel Kontrol	38
3.10	Persiapan Penelitian.....	39
3.10.1	Alat	39
3.10.2	Bahan	40
3.11	Pelaksanaan Penelitian	40

3.11.1	<i>Pre-Treatment Rice Husk-Carbon Quantum Dots (RH-CDs)</i>	40
3.11.2	Persiapan <i>Carbon Quantum Dots</i> Sekam Padi (RH-CDs).....	41
3.11.3	Persiapan Material Fe ₃ O ₄	41
3.11.4	Persiapan <i>Coupling</i> Komposit TiO ₂ @ Fe ₃ O ₄	42
3.11.5	Pembuatan Composite Fe ₃ O ₄ @TiO ₂ Terdekorasi RH-CDs.....	43
3.11.6	Pembuatan Larutan Artifisial <i>Methyl Orange</i> (1000 ppm).....	43
3.11.7	Pembuatan Kurva Kalibrasi <i>Methyl Orange</i>	44
3.11.8	Pengujian Variasi Rasio RH-CDs : TiO ₂ dan Konsentrasi MO ..	44
3.11.9	Pengujian Variasi pH	45
3.11.10	Pengujian Variasi Dosis Komposit <i>Catalyst</i>	45
3.11.11	Pengujian Variasi Konsentrasi MO.....	46
3.11.12	<i>Reusability Test</i>	46
3.11.13	<i>Demineralization Test</i>	46
3.12	Pengujian Karakteristik.....	47
3.12.1	Spektrofotometri UV-Vis.....	47
3.12.2	<i>Dynamic Light Scattering – Particle Size Analysis (DLS-PSA)</i> . 47	
3.12.3	<i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	47
3.12.4	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)</i>	47
3.12.5	<i>Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray</i>	48
3.12.6	<i>Vibrating Sample Magnetometer (VSM)</i>	48
3.13	Analisis Data	48
3.14	Analisis Statistik	48
3.14.1	Uji Normalitas	48
3.14.2	Uji Homogenitas	49
3.14.3	Uji Anova (<i>Analysis of Variance</i>)	49
3.15	Kesimpulan dan Saran.....	50
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		51
4.1	Hasil Uji Karakterisasi	51
4.1.1	Sifat Optik CDs	51
4.1.2	<i>Particle Size Analysis (PSA)</i>	52
4.1.3	<i>Fourier Transform Infrared (FTIR)</i>	54

4.1.4	<i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	56
4.1.5	<i>Scanning Electron Microscopy- Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX) dan Mapping</i>	58
4.2	Pengujian <i>Point of zero charge</i> (pH_{pzc})	61
4.3	Uji Pengaruh pH dan Adsorpsi-Desorpsi pada Efektivitas Katalis	62
4.4.1	Uji Pengaruh pH awal	63
4.4.2	Uji Pengaruh Adsorpsi Desorpsi	65
4.4	Efektivitas Proses Fotokatalitik dalam Penyisihan <i>Methyl Orange</i>	66
4.5.1	Uji Pengaruh Rasio CDs dalam Komposit pada Proses Fotokatalis MO	66
4.5.2	Uji Pengaruh pH pada Proses Fotokatalis	70
4.5.3	Uji Pengaruh Konsentrasi MO pada Proses Fotokatalis.....	72
4.5.4	Uji Pengaruh Dosis Katalis pada Proses Fotokatalis.....	76
4.5.5	<i>Reusability Test</i>	78
4.5.6	<i>Demineralization Test</i>	80
4.5	Kinetika Fotokatalisis	81
4.6.1	<i>Pseudo-first-order</i>	81
4.6.2	<i>Pseudo-second-order</i>	82
4.6.3	<i>Pseudo-zeroth-order</i>	84
4.6	Mekanisme Fotokatalisis	87
4.7	Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya.....	89
4.8	Analisis Statistika	89
4.9.1	Uji Normalitas	89
4.9.2	Uji Homogenitas.....	90
4.9.3	Analisis Pengaruh Menggunakan Metode <i>Kruskal-Wallis</i>	91
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		95
5.1	Kesimpulan.....	95
5.2	Saran	96
DAFTAR PUSTAKA		97
DAFTAR LAMPIRAN		109

Lampiran 1 Perhitungan Larutan.....	111
Lampiran 2 Hasil Pengukuran Panjang Gelombang	119
Lampiran 3 Perhitungan <i>Band gap</i>	123
Lampiran 4 Hasil Pengujian Fotokatalis	131
Lampiran 5 Hasil Uji Statistik.....	161
Lampiran 6 Hasil Perhitungan Kristalinitas dan Ukuran Kristal	167
Lampiran 7 Hasil Pengukuran di Laboratorium Limbah PPNS.....	173
Lampiran 8 Hasil <i>Particle Size Analysis</i> (PSA)	191
Lampiran 9 Hasil <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR).....	199
Lampiran 10 Hasil <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	205
Lampiran 11 Hasil <i>Scanning Electron Microscopie-Energi Dispersive X-Ray Mapping</i> (SEM-EDX Mapping)	209
Lampiran 12 Hasil Analisis COD	219
Lampiran 13 Dokumentasi	223

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu	27
Tabel 3.1 Penentuan Variabel Bebas	32
Tabel 3.2 Variabel pengaruh rasio RH-CDs terhadap konsentrasi MO.....	33
Tabel 3.3 Variabel Pengujian Pengaruh Ph.....	34
Tabel 3.4 Variabel pengujian pengaruh konsentrasi <i>Methyl Orange</i>	35
Tabel 3.5 Variabel pengaruh dosis katalis pada proses fotokatalisis	36
Tabel 3.6 Variabel Terikat Penelitian	37
Tabel 4.1 Hasil Analisis EDX Komposit	60
Tabel 4.3 Hasil Analisis Kinetika Orde Pertama Semu	82
Tabel 4.4 Hasil Analisis Kinetika Orde Kedua Semu.....	83
Tabel 4.5 Hasil Analisis Kinetika Orde Kedua Semu.....	85
Tabel 4.6 Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya	89
Tabel 4.7 Hasil Uji Normalitas	90
Tabel 4.8 Hasil Uji Homogenitas.....	91
Tabel 4.9 Hasil Uji Statistik Non-Parametrik <i>Kruskal-Wallis</i>	92

Halaman Sengaja Dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Tanaman Padi (Pereira <i>et al.</i> , n.d.).....	7
Gambar 2.2 <i>Carbon Nanomaterial</i> (Hong <i>et al.</i> , 2015).....	9
Gambar 2.3 UV-Vis (<i>The Basics of UV-Vis Spectrophotometry</i> , n.d.).....	19
Gambar 2.4 DLS-PSA <i>Equipment</i> (Anton Paar, n.d.).....	20
Gambar 2.5 <i>X-Ray Diffraction Equipment</i> (Anton Paar, n.d.).....	21
Gambar 2.6 <i>Zeta Potential Equipment</i> (Anton Paar, n.d.).....	22
Gambar 2.7 <i>FTIRS Equipment</i> (Anton Paar, n.d.)	23
Gambar 2.8 <i>SEM-EDX Equipment</i> (CET Scientific Service, n.d.)	24
Gambar 2.9 <i>VSM Equipment</i> (M'hamed <i>et al.</i> , 2024).....	24
Gambar 3.1 Kerangka Penelitian	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.1 Hasil Uji Optik Sederhana Menggunakan Sinar UV	52
Gambar 4.2 a) Hasil PSA Proses <i>Hydrothermal</i> selama 2 jam b) Hasil PSA Proses <i>Hydrothermal</i> selama 6 jam	53
Gambar 4.3 Perbandingan Spektrum FTIR CDs dan Komposit Sebelum Fotokatalis	55
Gambar 4.4 Hasil Analisis XRD Komposit	57
Gambar 4.5 Hasil Uji SEM Komposit TiO ₂ @Fe ₃ O ₄ decorated CDs (a) 10.000x (b) 15.000x.....	59
Gambar 4.6 Hasil Analisis EDX Overlay Mapping.....	61
Gambar 4.7 Grafik Hasil pH _{pzc}	62
Gambar 4.9 Grafik Pengujian pH Awal (a) 0%; (b) 3%; (c) 6%; (d) 9%; dan (e) 12%	64
Gambar 4. 10 Hasil Uji Adsorpsi Desorpsi.....	65
Gambar 4.11 Grafik Pengaruh Rasio CDs (a) 0%; (b) 3%; (c) 6%; (d) 9%; dan (e) 12%.....	68
Gambar 4. 12 Hasil Uji Pengaruh Ph (a) Efisiensi Removal Adsorpsi Desorpsi; (b) Kapasitas Adsorpsi ; (c) Efisiensi Removal Fotokatalitik 45 Menit; dan (d) Kapasitas Fotokatalitik	71

Gambar 4. 13 Grafik Pengaruh Konsentrasi pada Proses (a) Adsorpsi-Desorpsi Rasio CDs 0%; (b) Adsorpsi-Desorpsi Rasio CDs 6%; (c) Fotokatalis Rasio CDs 0%; dan (d) Fotokatalis Rasio CDs 6%.....	73
Gambar 4. 14 Grafik Pengaruh Dosis Katalis pada Proses (a) Adsorpsi Desorpsi Rasio CDs 0%; (b) Adsorpsi Desorpsi Rasio CDs 6%; (c) Fotokatalis Rasio CDs 0%; (d) Fotokatalis Rasio CDs 6%.....	76
Gambar 4. 15 Hasil <i>Reusability Test</i>	79
Gambar 4. 16 Hasil Analisis Nilai COD Sebelum dan Sesudah Proses Fotokatalis	80
Gambar 4. 17 Grafik Kinetika Pseudo-First-Order (a) 0%; (b) 3%; (c) 6%; (d) 9%; dan (e) 12%.....	82
Gambar 4. 18 Grafik Kinetika Pseudo-Second-Order (a) 0%; (b) 3%; (c) 6%; (d) 9%; dan (e) 12%	83
Gambar 4. 19 Grafik Kinetika Pseudo-Zeroth-Order (a) 0%; (b) 3%; (c) 6%; (d) 9%; dan (e) 12%.....	85
Gambar 4. 20 Grafik Nilai Konstanta Orde Nol.....	86

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Methyl Orange merupakan salah satu jenis pewarna anionik azo yang banyak digunakan dalam industri tekstil, percetakan dan kulit (Al *et al.*, 2024; Y. Li *et al.*, 2020). Senyawa yang terkandung dalam pewarna azo paling banyak dihasilkan dari industri yaitu sekitar 60-70% (Hasan *et al.*, 2025) dengan 15% dibuang tanpa dilakukan pengolahan. Limbah mengandung pewarna seperti MO dapat menyebabkan perubahan warna sehingga mengurangi penetrasi cahaya yang mengganggu proses fotosintesis (Al *et al.*, 2024). Pewarna azo dapat tereduksi menjadi amina aromatik yang berpotensi toksik. Pewarna ini dapat masuk melalui kulit manusia dan dapat menyebabkan kematian jaringan paru-paru, muntah serta detak jantung menjadi cepat (Al *et al.*, 2024; Channei *et al.*, 2014). Keberadaan serta pembuangan pewarna sintetis perlu dikendalikan melalui proses pengolahan yang efektif.

Fotokatalisis merupakan salah satu proses pengolahan air limbah industri yang mengandung pewarna, disamping adsorpsi, koagulasi, dan sedimentasi (Saeed *et al.*, 2022). Fotokatalisis efektif untuk mengurangi kandungan polutan berupa zat warna seperti pewarna azo yang bersifat anionik (Sugiyana & Soenoko, 2017). Pada aplikasi fotokatalis TiO_2 umum digunakan karena sifat kimianya yang stabil, murah dan aman (Mohammad *et al.*, 2021). Namun, TiO_2 mengalami agregasi, sulit dipulihkan serta kurang efektif di bawah cahaya tampak sehingga memerlukan perakitan komposit untuk memperbaiki efisiensinya dan aspek operasionalnya (Ismael, 2020; Sahoo & Mansingh, 2021). TiO_2 banyak dikombinasikan dengan *Carbon Nanomaterials* (CNMs) seperti *Carbon Nanotube* (Mou *et al.*, 2023), *graphene* (Cai *et al.*, 2022), C_{60} (Hou *et al.*, 2019), *Carbon Quantum Dots* (CDs) (Zhao *et al.*, 2024) dan lain sebagainya untuk meningkatkan efektivitas TiO_2 .

Aplikasi *Carbon Nanomaterial* (CNMs) semakin meningkat karena sifat optik, mekanik dan termal yang unggul (Hamid *et al.*, 2026). Perkembangan tersebut didukung oleh proses produksi yang murah, toksisitas yang rendah serta

karakteristik permukaan CNMs yang serbaguna (Panwar *et al.*, 2019). Luas permukaan yang tinggi serta stabilitas kimia yang baik membuat CNMs banyak diaplikasikan pada metode penurunan kontaminan seperti adsorpsi, fotokatalis dan filtrasi membran (Sundar *et al.*, 2026). Salah satu material CNMs yang unggul dan banyak dikembangkan sebagai *co-catalyst* adalah *Carbon Quantum Dots* (CDs) (Maiti *et al.*, 2019). CDs berukuran <10 nm dengan gugus karboksil yang meningkatkan kelarutan air serta kandungan oksigen teroksidasi bervariasi mulai 5% hingga 50% (Chaudhary *et al.*, 2021). CDs juga memiliki kemampuan transfer elektron yang kuat sehingga menekan rekombinasi elektron dan meningkatkan pembentukan lubang aktif yang mendukung aktivitas fotogenik/fotokatalitik (L. Zhang *et al.*, 2021).

Secara tradisional sintesis CDs bergantung pada penggunaan prekursor fosil dan penggunaan pelarut kimia yang tidak ramah lingkungan (Krishna *et al.*, 2024; Thangaraj *et al.*, 2021). Oleh karena itu, penelitian mengenai CDs ramah lingkungan banyak dikembangkan (Xing *et al.*, 2024). Sekam padi dilaporkan mengandung silika dan karbon yang tinggi, 89-97% dan 30-50% sehingga menjadi bahan alami yang ideal dalam pembuatan CDs (Chung *et al.*, 2021; Sari *et al.*, 2023). Produksi padi yang tinggi juga berkontribusi terhadap meningkatnya limbah pertanian berupa sekam padi, dimana sekitar 20% dari berat padi total merupakan sekam padi sehingga diperlukan pengolahan yang memadai (Zou & Yang, 2019). Dari sisi ketersediaan, produksi padi dunia mencapai 770 juta metrik ton per tahun dan produksi padi Indonesia diperkirakan mencapai 54,20 juta ton per tahun (Kementerian Pertanian, 2024; Tan *et al.*, 2023).

Sintesis CDs ramah lingkungan berfokus pada metode “*bottom-up*” berupa *microwave irradiation*, *solvothetmal*, *hydrothetmal*, *ultrasonic*, dan *pyrolysis* (Malini *et al.*, 2026; Xing *et al.*, 2024). Dalam hal *green synthesis* CDs, *hydrothetmal process* lebih unggul dibandingkan *solvothetmal* yang memerlukan pelarut organik dalam prosesnya (Xing *et al.*, 2024). Metode *hydrothetmal* menghasilkan kristal dari larutan berair yang dijaga pada suhu dan tekanan uap yang tinggi, tidak memerlukan pelarut organik, dan konsumsi energi yang lebih rendah dibandingkan dengan pirolisis (W. Li *et al.*, 2017). Selain itu, *hydrothetmal* menghasilkan CDs dengan hasil kuantum yang lebih tinggi ($24\pm 2\%$) dan ukuran

partikel lebih kecil namun dengan massa total yang rendah jika dibandingkan dengan *microwave irradiation* (Dhandapani *et al.*, 2021; Sgreccia *et al.*, 2022). Proses *ultrasonic* biasanya dilakukan bersamaan dengan proses lain seperti *hydrothermal* untuk mengontrol morfologi dan struktur CDs (Qi *et al.*, 2021).

CDs dilaporkan mampu menekan rekombinasi elektron, menyerap serta mengonversi panjang gelombang cahaya tampak dan ultraviolet (UV) menjadi lebih pendek untuk meningkatkan efisiensi TiO₂ (Y. Li *et al.*, 2025; Zhao *et al.*, 2024; Zhu *et al.*, 2019). Komposit CDs@TiO₂ mampu mereduksi 48-99% *Methyl Orange* (MO) pada dosis 1-20 mg/10 ml membuktikan bahwa komposit tersebut merupakan kandidat yang potensial untuk fotokatalis (Shafique *et al.*, 2022). CDs dapat dikombinasikan dengan Fe₃O₄ untuk meningkatkan aspek pemulihan katalis, yang mampu mempercepat transfer elektron, meningkatkan luas permukaan, serta meningkatkan konduktivitas antarmuka (Waseem *et al.*, 2019). Selain itu komposit Fe₃O₄ lebih mudah dipisahkan dan digunakan ulang karena Fe₃O₄ bersifat magnetik (P. Chen *et al.*, 2023).

Berdasarkan uraian di atas, penelitian mengenai pemanfaatan sekam padi menjadi *Carbon Dots* (RH-CDs) yang dikompositkan dengan Fe₃O₄ dan TiO₂ untuk mendegradasi limbah mengandung *Methyl Orange* perlu dikembangkan, khususnya untuk memperoleh sistem fotokatalis yang tidak hanya efektif untuk mendegradasi MO tetapi juga mudah dipisahkan dan digunakan kembali. Penelitian difokuskan pada analisis efektivitas komposit TiO₂@Fe₃O₄ terdekori RH-CDs terhadap degradasi MO melalui proses fotokatalis dengan variasi rasio komposit, pH, dosis katalis dan konsentrasi MO sebagai evaluasi dan optimasi serta *reusability test* untuk menganalisis penggunaan kembali komposit dan *demineralization test* untuk mengkonfirmasi kemampuannya dalam mengurai kandungan zat organik pada air limbah.

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah pada penulisan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana karakteristik komposit katalis $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekorasi RH-CDs yang digunakan pada proses fotokatalis untuk degradasi *Methyl Orange*?
2. Bagaimana pengaruh penambahan rasio CDs terhadap waktu, pH, konsentrasi MO dan dosis komposit pada fotokatalis untuk degradasi *Methyl Orange*?
3. Bagaimana kinetika reaksi komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekorasi RH-CDs untuk degradasi *Methyl Orange* melalui proses fotokatalis?
4. Bagaimana mekanisme fotokatalis menggunakan nano komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekorasi RH-CDs untuk degradasi *Methyl Orange*?
5. Bagaimana kemampuan komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekorasi RH-CDs setelah dilakukan *reusability test* dan *demineralization test* dalam reduksi *Methyl Orange* dengan fotokatalis?

1.3 Tujuan

Tujuan penulisan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Mengidentifikasi karakteristik nano komposit katalis $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekorasi RH-CDs yang digunakan pada proses fotokatalis untuk degradasi *Methyl Orange*
2. Menganalisis pengaruh penambahan RH-CDs sebagai *co-catalyst*, pH, dosis komposit dan waktu penyinaran pada fotokatalis untuk degradasi *Methyl Orange*
3. Menganalisis kinetika reaksi nano komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekorasi RH-CDs untuk degradasi *Methyl Orange* melalui proses fotokatalis
4. Menganalisis mekanisme fotokatalis menggunakan komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekorasi RH-CDs untuk degradasi *Methyl Orange*
5. Mengevaluasi kemampuan komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekorasi RH-CDs setelah dilakukan *reusability test* dan *demineralization test* dalam reduksi *Methyl Orange* dengan fotokatalis.

1.4 Manfaat Tugas Akhir

Manfaat dari penelitian Tugas Akhir ini adalah

1. Manfaat bagi peneliti

Beberapa manfaat yang akan diperoleh penulis dari penelitian ini diantaranya adalah:

- a) Peneliti dapat menerapkan ilmu dan pengetahuannya selama masa kuliah di PPNS
- b) Menambah wawasan bagi peneliti terhadap ilmu dan pengetahuan terhadap bidang yang sedang diteliti
- c) Berkontribusi terhadap perwujudan *Green Manufacturing* untuk mencapai *Sustainable Development Goals (SDGs)* dengan mengaplikasikan $\text{TiO}_2@Fe_3O_4$ terdekori RH-CDs dalam pengolahan air limbah mengandung *Methyl Orange*.

2. Manfaat bagi Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Manfaat yang akan didapatkan dari penelitian ini terhadap PPNS diantaranya yaitu:

- a) Dapat memberikan citra baik kepada masyarakat tentang PPNS, dalam penelitian ini peneliti membantu masalah yang ada di masyarakat dengan melihat penerapan pengolahan limbah yang efisien berbasis nanopartikel untuk mewujudkan *Green Manufacturing* terhadap pencapaian *SDGs (Sustainable Development Goals)*
- b) Dapat memperkenalkan (branding) kampus PPNS terutama di Teknik Pengolahan Limbah pada masyarakat dan industri.

3. Manfaat bagi masyarakat

Adapun manfaat yang didapatkan oleh masyarakat dari penelitian ini diantaranya yaitu:

- a) Memberikan wawasan pada masyarakat untuk berpartisipasi dalam mencapai *SDGs (Sustainable Development Goals)* dengan melakukan pengolahan air berkelanjutan (SDG 6), mendorong pola konsumsi dan produksi berkelanjutan dengan melakukan pengelolaan limbah dengan tepat (SDG 12 dan SDG 13), serta

menguatkan kemitraan global untuk pembangunan berkelanjutan dengan kolaborasi semua pihak (SDG 17).

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada Tugas Akhir ini adalah :

1. Sekam padi yang digunakan merupakan sekam padi dari varietas padi campuran yang diperoleh dari industri penggilingan padi
2. Pada proses fotokatalis lampu yang digunakan adalah lampu LED 50 watt
3. *Reusability test* dilakukan sebanyak 3 kali dengan menggunakan kondisi terbaik berdasarkan hasil penelitian
4. *Demineralization test* dilakukan dengan melakukan analisis parameter COD pada sampel sebelum dan sesudah dilakukan fotokatalisis dengan menggunakan variasi terbaik hasil penelitian.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sekam Padi (*Oryza sativa* Linnaeus)

Sekam padi atau *rice husk* merupakan produk samping dari proses penggilingan padi (Tatiana *et al.*, 2024). Padi sendiri merupakan makanan pokok mayoritas populasi dunia dengan produksi mencapai 800 juta metrik ton per tahun (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 2025). Sebagai salah satu penghasil padi terbesar Indonesia memperkirakan produksi padi nasional sebesar 54,21 juta ton per tahun (Kementerian Pertanian, 2024). Klasifikasi tanaman padi menurut *Plants of the World Online* dalam *Royal Botanic Gardens* (2019) adalah sebagai berikut

Kingdom : *Plantae* – tanaman
Phylum : *Streptophyta* – tumbuhan hijau
Class : *Equisetopsida* – tumbuhan berpembuluh
Subclass : *Magnoliidae* – tumbuhan berbunga
Order : *Poales* – tumbuhan monokotil
Family : *Poaceae*
Genus : *Oryza*
Species : *Oryza sativa* L.

Adapun Gambar mengenai tanaman padi ditampilkan pada Gambar 3.1 berikut.



Gambar 2.1 Tanaman Padi (Pereira *et al.*, n.d.)

Sekam padi merupakan lapisan keras yang meliputi kariopsis dan terdiri dari dua bentuk yaitu kelopak dan mahkota. Pada kondisi normal, sekam memiliki

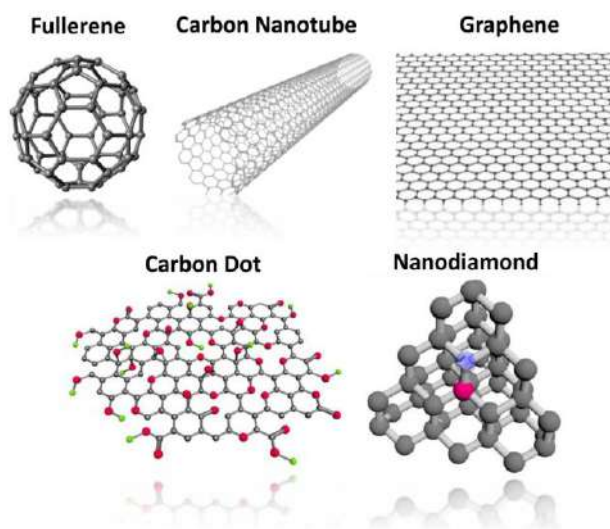
peran penting untuk melindungi biji beras dari kerusakan akibat jamur dan serangga (Listiana *et al.*, 2021). Sekam padi sebagai bagian terluar padi akan terpisah selama proses penggilingan padi menjadi beras (Cahayani *et al.*, 2024). Sebagai hasil samping produk pertanian, produksi sekam padi mencapai 20% dari total produksi padi sehingga produksinya akan semakin meningkat selaras dengan kenaikan produksi padi (Zou & Yang, 2019a).

Saat ini pemanfaatan sekam padi di Indonesia hanya sebatas dijadikan pupuk, media ternak atau bahkan langsung dibakar (Amalina *et al.*, 2024; Susana *et al.*, 2025). Pemanfaatan sekam padi yang kurang optimal dapat menimbulkan permasalahan bagi lingkungan dan kesehatan manusia (Susana *et al.*, 2025). Sekam padi memiliki kandungan utama bahan lignoselulosa, termasuk selulosa (32-47%), hemiselulosa (19-27%) dan lignin (20-28%). Sekam padi juga mengandung silika (SiO_2) yang relatif lebih tinggi hingga 15% jika dibandingkan dengan limbah biomassa lainnya yaitu sebanyak 89-97% dan kandungan karbon sebesar 30-50% (Sari *et al.*, 2023; Utomo & Fadila, 2020).

2.2 Carbon Nanomaterials (CNMs)

Carbon Nanomaterials (CNMs) merupakan material dimensi rendah yang terdiri atom karbon yang membentuk jaringan elektron terkonjugasi yang mulus. CNMs memiliki ukuran variatif mulai 1 nm hingga 1 μm (Hong *et al.*, 2015). Selain ketersediaannya yang melimpah, CNMs memiliki sifat unik seperti skala nano, kapasitas adsorpsi yang besar, kemampuan dispersi dan mempersempit celah pita yang baik, serta fleksibel untuk *co-catalyst* (Nayak & Pathan, 2023; A. Thakur *et al.*, 2024). Dalam praktiknya, CNMs meliputi; *Carbon Nanotubes* (CNTs), *Carbon Fibers* (CFs), *Graphene*, *Fullerenes*, *Carbon Quantum Dots* (CDs), *Nano-diamond*, *Carbon Nano-onion*, dan *Amorphous Nanostructures* (ANs) .

CNMs dibedakan menjadi beberapa jenis dimensi. *Zero-Dimensional (0D) Carbon Nanomaterial*, seperti *Fullerene*, *Carbon Dot* dan C_{60} ; *One-Dimensional (1D) Carbon Nanomaterial* seperti *Carbon Nanotube* serta *Two-Dimensional (2D) Carbon Nanomaterial* seperti *Graphene*. Berikut beberapa Gambar CNMs dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 *Carbon Nanomaterial* (Hong *et al.*, 2015)

2.3 *Carbon Quantum Dots (CQDs)*

Carbon nano dot atau juga dikenal dengan *carbon quantum dots* atau *graphene quantum dots* memiliki ukuran dibawah 10 nm (Hong *et al.*, 2015). CQDs dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis berdasarkan strukturnya yaitu *graphene quantum dots*, *amorphous or partially crystalline carbon quantum dots*, *fullerene quantum dots*, dan *carbon nanotube quantum dots* (Rasal *et al.*, 2025).

CDs memiliki koefisien adsorpsi yang tinggi sehingga memungkinkan penyerapan energi dan cahaya yang efisien (J. Zhang *et al.*, 2019). Keunggulan lain seperti sumber yang luas, murah, memiliki sifat fisik dan kimia yang stabil serta modifikasi fungsi yang mudah membuat CDs banyak dikembangkan (L. Zhang *et al.*, 2021). Selain itu CDs memiliki kelarutan yang baik terhadap air, ramah lingkungan, proses sintesis yang mudah serta menunjukkan efisiensi penyerapan cahaya tampak yang tinggi (Ettefaghi *et al.*, 2018; Thangaraj *et al.*, 2021).

Prinsip kerja CDs dalam konversi fototermal adalah mengeksitasi elektron di pita valensinya ketika terpapar cahaya tampak. Hal tersebut menyebabkan elektron tersebut berpindah ke pita konduksi (Makama & Umar, n.d.). struktur konjugasi yang unik serta gugus fungsi yang kaya meningkatkan efek foto termal melalui penggunaannya sebagai media elektronik dan situs bantu fototermal (Su *et al.*, 2025).

2.4 Metode Sintesis CDs

Banyak pendekatan yang dilakukan untuk melakukan sintesis CDs. Sintesis CDs secara tradisional memanfaatkan prekursor berupa hidrokarbon aromatik untuk menghasilkan kuantum yang tinggi. Potensi bahaya yang ditimbulkan akibat toksisitas hidrokarbon aromatik menjadi tantangan pada produksi CDs. Beberapa penelitian telah melakukan sintesis CDs ramah lingkungan melalui pemanfaatan biomassa sebagai prekursor (Hamid *et al.*, 2026).

Beberapa pendekatan efisien untuk CDs telah dilakukan seperti melalui proses *hydrothermal*, *microwave irradiation*, *acid oxidation*, *pyrolysis*, *laser ablation*, dan *electrochemical*. Sintesis CDs dengan prekursor biomassa dapat dilakukan melalui metode *top-down* dan metode *bottom-up* mengacu pada prekursor, ukuran target dan target deteksi ion.

2.4.1 Top-Down Methode

Sintesis *Top-Down CDs* berasal dari pemisahan prekursor karbon berukuran besar yang biasanya disiapkan dari material karbon termasuk *nanotube*, *graphene*, *carbon black* dan *fullerene*. *Top-Down Methode* melibatkan reduksi material berbasis *bulk-carbon* dengan metode fisika atau kimia (Abdolrezaei, 2020). *Top-Down Methode* melibatkan pembentukan CDs melalui struktur karbon yang bersifat makroskopis. *Top-Down Methode* meliputi *laser ablation*, *arc discharge*, *electrochemical oxidation*, dan *ultrasonic synthesis* (Malini *et al.*, 2026). Sintesis *Top-Down Methode* berbasis redoks, terutama ketika ditetapkan pada *fullerene*. Prosedur pembukaan atau penguraian yang terjadi akan meninggalkan gugus fungsional yang mengandung oksigen seperti hidroksil atau asam karboksilat pada bagian *fullerene* (Limosani *et al.*, 2021).

2.4.2 Bottom-Up Methode

Bottom-Up Methode melibatkan campuran molekul organik kecil yang telah mengalami pirolisis. Melalui polimerisasi, karbonasi prekursor dapat dicapai melalui perlakuan *microwave irradiation*, *ultrasonikasi*, *hydrothermal* atau *solvothermal*. Kondensasi atau pirolisis asam sitrat banyak digunakan

sebagai awal rangkaian sintesis menggunakan *Bottom-up Methode* (Carbone, 2020). Dalam *Bottom-Up Methode*, CDs disintesis menggunakan pirolisis asam sitrat pada 120–200 °C, diikuti penambahan air saat warna larutan berubah menjadi kuning pucat/jingga, kemudian dilakukan sentrifugasi dan dialisis (S. Thakur *et al.*, 2026).

Sintesis CDs berbasis biomassa lebih sering dilakukan dengan metode *bottom-up*. *Bottom-up methode* menawarkan banyak keuntungan salah satunya kemudahan untuk mengontrol keadaan permukaan dan distribusi ukuran CDs untuk mencapai hasil yang optimal. Teknik sintesis *bottom-up* yang sederhana, murah dan berskala besar dapat digunakan dalam kondisi yang berbeda (Saheeda *et al.*, 2019).

2.5 Metode Hydrothermal

Metode *hydrothermal* banyak digunakan dalam sintesis CDs. Metode *hydrothermal* merupakan salah satu metode sintesis CDs melalui *bottom-up methode*. Metode *hydrothermal* dikenal dengan prosesnya yang mudah, bersih dan unggul dalam aspek ekonomi (Kamilah *et al.*, 2021). Hydrothermal dilakukan dalam reaktor tertutup (autoclave). Sumber karbon dipanaskan dalam kelarutan berair sehingga menjadi dekomposisi dan karbonasi pada temperatur tinggi hingga membentuk tekanan dalam reaktor (Hamid *et al.*, 2026). Proses *hydrothermal* mendorong disintegrasi agregat karbon yang lebih besar menjadi nano struktur yang terdispersi dengan baik serta meningkatkan kelarutan dan kinerja fungsionalnya (S. Thakur *et al.*, 2026). Proses *hydrothermal* banyak dipakai dalam sintesis CDs karena ukuran dan karakteristik permukaan CDs dapat dimodifikasi dengan mengubah suhu, waktu reaksi dan pemilihan prekursor.

Hydrothermal dikategorikan sebagai metode sintesis ramah lingkungan karena merupakan proses sintesis yang tidak menghasilkan polutan akibat penggunaan material beracun. Pada proses *hydrothermal*, prekursor yang berbeda membutuhkan temperatur proses, waktu dan reaksi yang berbeda. Secara umum, bahan baku untuk sintesis CDs yang berasal dari biomassa dapat dibagi menjadi 3, yaitu;

- a. Mikromolekul yang berasal dari biomassa seperti asam sitrat, glukosa, sukrosa, asam askorbat dan lain sebagainya
- b. Biomassa atau komponen limbah tanaman seperti selulosa, hemiselulosa, lignin, dan
- c. Biomassa alami seperti kulit kacang, sekam padi, jerami dan lain lain (Kamilah *et al.*, 2021).

Sistem *hydrothermal* memfasilitasi pemecahan molekul air, menghasilkan ion hidrogen dan hidroksil pada lingkungan bertekanan tinggi hingga 3 MPa. Ion hidrogen dan hidroksil tersebut kemudian bereaksi dengan prekursor karbon. Reaksi tersebut kemudian menyebabkan lapisan karbon terpisah serta mendorong pembentukan ikatan hidrogen antara molekul air dan lignin. Titik kuantum dot yang memancarkan *blue fluorescence* di bawah sinar UV dihasilkan sebagai hasil interaksi (S. Thakur *et al.*, 2026).

Dengan menggunakan kelompok biomassa yang berbeda, berbagai struktur dan sifat optik CDs dapat dihasilkan karena jumlah atom, panjang rantai karbon dan gugus fungsi permukaan yang memengaruhi proses pembentukannya. Dalam proses *hydrothermal*, pembentukan CDs dibagi menjadi beberapa tahapan yaitu dehidrasi, polimerisasi, aromatisasi, karbonasi dan pasivisasi (Kamilah *et al.*, 2021).

2.6 Katalis

Katalis merupakan senyawa kimia yang digunakan untuk mempercepat suatu reaksi untuk mencapai kesetimbangan tanpa mengubah struktur kimia pada akhir reaksi. Katalis hanya berperan untuk menurunkan energi aktivasi tanpa mengubah nilai kesetimbangan. Penurunan energi aktivasi ini bertujuan untuk menurunkan energi minimum yang dibutuhkan untuk terjadinya tumbukan sehingga reaksi dapat berjalan lebih cepat. Katalis hanya mempengaruhi faktor-faktor kinetika suatu reaksi seperti energi aktivasi, laju reaksi, sifat dasar keadaan transisi tanpa menyatu dengan senyawa produk reaksi (Iskandar *et al.*, 2023).

Secara umum katalis digolongkan menjadi dua yaitu katalis homogen dan heterogen. Katalis homogen memiliki fase yang sama dengan reaktan atau biasanya bersifat cair, sedangkan katalis heterogen memiliki fase yang berbeda dari reaktan

seperti padatan. Katalis heterogen lebih mudah dipisahkan dan umum digunakan dalam pengolahan air limbah karena memungkinkan katalis untuk digunakan kembali (Basa *et al.*, 2026; Nan *et al.*, 2010).

2.6.1 Katalis Nano-komposit

Katalis nano-komposit melibatkan dua aspek yaitu katalis dan nano komposit. Nano komposit memanfaatkan ukuran nano untuk meningkatkan luas permukaan spesifik dan jumlah situs aktif yang dapat diakses oleh reaktan. Nano komposit katalis merupakan material katalis yang menggabungkan lebih dari dua komponen seperti logam + karbon + magnetik yang dirancang untuk meningkatkan efek sinergis. Efek sinergis sendiri meliputi penyerapan cahaya yang lebih luas, pemisahan muatan lebih efektif, peningkatan transfer elektron antar fase serta kemudahan pemisahan katalis pasca-reaksi. Pada reaksi, desain *heterojunction* atau kontak antar muka dua komponen sering disebut krusial untuk meningkatkan transfer muatan dan menekan rekombinasi (Sherly *et al.*, 2026).

2.7 Methyl Orange

Methyl Orange atau MO memiliki nama kimia 4-[4-(Dimethylamino)phenylazo]benzenesulfonic acid sodium salt. MO memiliki rumus molekul $C_{14}H_{14}NaO_3S$ dengan berat molekul 327,3 g/mol. MO merupakan zat warna azo yang memiliki sifat anionik atau *acidic* serta larut dalam air sehingga banyak dijumpai di air limbah. MO dan pewarna azo lainnya banyak digunakan di industri tekstil, farmasi, percetakan dan kulit. MO tidak memiliki pengulangan unit seperti polimer dengan molekul bermassa kecil yaitu 327 Da sehingga digolongkan sebagai pewarna azo mikromolekul (Y. Li *et al.*, 2020).

Limbah pewarna mengandung pewarna anionik seperti MO dapat menyebabkan perubahan warna pada badan air. Air mengandung pewarna dapat mengurangi penetrasi cahaya di perairan sehingga mengganggu fotosintesis dan metabolisme organik akuatik. MO dapat berinteraksi dengan kontaminan lain sehingga berpotensi memperluas penyebaran polutan di lingkungan perairan (Al *et al.*, 2024). Pewarna ini dapat masuk melalui kulit manusia dan dapat menyebabkan

kematian jaringan paru-paru, muntah serta detak jantung menjadi cepat (Channei *et al.*, 2014).

2.8 Fotokatalis

Metode degradasi warna dapat dilakukan melalui beberapa cara seperti *electrochemical oxidation*, *microbial degradation* dan fotokatalisis. Diantara teknologi tersebut, fotokatalisis memiliki potensi yang besar dalam aplikasi terhadap remediasi lingkungan karena sifatnya yang ramah lingkungan (Nie *et al.*, 2026). Fotokatalisis merupakan perubahan laju reaksi kimia atau inisiasi reaksi akibat radiasi dengan adanya suatu zat yang menyerap cahaya dan terlibat dalam transformasi kimia. Fotokatalis juga didefinisikan sebagai katalis yang setelah menyerap cahaya, menghasilkan transformasi kimia dan kembali beregenerasi setelah setiap siklus reaksi (*International Union of Pure and Applied Chemistry*, 2025). Pada fotokatalisis dengan menggunakan semikonduktor, penyerapan foton oleh semikonduktor akan terjadi jika energi cahaya lebih besar atau sama dengan *band gap*. Penyerapan foton akan membentuk pasangan muatan elektron di pita konduksi dan hole di pita valensi sehingga muatan tersebut bereaksi (Herrmann, 1999).

2.8.1 Faktor-faktor yang Memengaruhi Fotokatalisis

Fotokatalisis dipengaruhi oleh beberapa faktor berikut sehingga dapat berjalan dengan efisien

a. Faktor cahaya

Cahaya dapat mempengaruhi efisiensi fotokatalisis. Panjang gelombang serta spektrum cahaya yang digunakan pada proses fotokatalisis harus sesuai dengan *bandgap*. Selain itu, intensitas cahaya merupakan hal yang penting untuk diperhatikan. Laju intensitas cahaya dapat membuat proses tidak linier akibat rekombinasi dan limit transport (Nan *et al.*, 2010).

b. Faktor fotokatalis

Bandgap dan struktur elektronik fotokatalis dapat menentukan serapan dan kemampuan redoks dalam proses fotokatalisis. Luas permukaan dan ukuran partikel katalis mempengaruhi adsorpsi dan jumlah situs aktif,

permukaan katalis yang luas akan meningkatkan efektivitas proses katalisis. Selain itu, dosis katalis juga memiliki pengaruh terhadap proses fotokatalisis, dosis yang terlalu tinggi akan membuat *scattering* atau peneduhan cahaya pada reaksi .

c. Faktor larutan

Konsentrasi awal larutan akan mempengaruhi proses fotokatalisis. Kemampuan katalis dalam melakukan degradasi dapat dilihat melalui konsentrasi awal larutan. Selain itu, PH dalam larutan penting untuk diperhatikan. PH mampu mengubah muatan permukaan katalis serta target polutan karena untuk memastikan ketersediaan OH^- untuk membentuk *Reactive Oxygen Species* (ROS) yaitu radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) atau superoksida ($\bullet\text{O}^-$)

d. Faktor proses atau reaktor

Ketika proses fotokatalisis berlangsung, pengadukan diperlukan untuk menghindari aglomerasi katalis serta memastikan keseluruhan sampel berkontak dengan katalis dengan baik.

2.8.2 Kemampuan Degradasi Fotokatalisis

Persen degradasi (%) zat warna dihitung dengan menggunakan persamaan 2.1 dan 2.2, kapasitas adsorpsi (q_e) dihitung dengan menggunakan persamaan 2.3 (Shafique *et al.*, 2022)

$$\% \text{ deg} = \frac{(A_0 - A_t) \times 100}{A_0} \quad (2.1)$$

$$q_e = \frac{(C_0 - C_t) \times V_L}{m_{(g)}} \quad (2.2)$$

Dimana

A_0 = Absorbansi awal larutan pewarna sebelum paparan radiasi pada waktu (t) = 0

A_t = Absorbansi akhir larutan pewarna setelah waktu paparan pada t $\neq$ 0

q_e = Jumlah adsorbat (pewarna) yang diambil oleh massa satuan adsorben (katalis) (mg/g)

- C_0 = Konsentrasi awal larutan pewarna sebelum paparan radiasi pada $t = 0$ (mg/l)
- C_t = Konsentrasi akhir larutan pewarna setelah paparan radiasi pada $t \neq 0$ (mg/l)
- $V_{(L)}$ = Volume larutan pewarna dalam liter
- $m_{(g)}$ = Massa katalis yang digunakan dalam gram

2.8.3 Kinetika Fotokatalisis

Pendekatan yang digunakan pada fotokatalisis heterogen (katalis padat-cair) adalah pendekatan *Langmuir-Hinshelwood* (L-H). Laju reaksi bergantung pada adsorpsi reaktan di permukaan ditambah dengan reaksi permukaan. Bentuk umum pendekatan *Langmuir-Hinshelwood* untuk satu reaktan organik dapat dilihat pada persamaan 2. 4 berikut.

$$r = -\frac{dC}{dt} = \frac{kKC}{1+KC} \quad (2. 2)$$

Dengan

K = konstanta adsorpsi (*Langmuir*), dan

k = konstanta reaksi permukaan yang dipengaruhi intensitas cahaya, sifat katalis dan sebagainya

Analisis kinetika laju degradasi zat warna MO perlu dipelajari untuk mengetahui mekanisme reaksi degradasi. Studi kinetika reaksi fotokatalisis didahului dengan mencari orde reaksi dan konstanta laju reaksi untuk fotokatalisis yang disintesis. Model kinetika reaksi orde nol, pertama dan kedua diselidiki untuk memeriksa kinetika reaksi fotokatalitis zat warna.

Degradasi pewarna fotokatalitik dengan larutan pewarna berkonsentrasi rendah diilustrasikan dengan model kinetika *Langmuir – Hinshelwood* yang disederhanakan menjadi hubungan kinetika orde pertama semu (Shafique *et al.*, 2022). Persamaan model kinetika *Langmuir-Hinshelwood* dapat dilihat pada persamaan 2. 5 hingga persamaan 2.8 berikut.

$$-\frac{dC_t}{dt} = k_1 \times C_t \quad (2. 3)$$

Hubungan untuk model kinetika orde kedua diberikan sebagai

$$-\frac{dC_t}{dt} = k_2 \times C_t^2 \quad (2. 4)$$

$$C_t = C_0 e^{-k_1 t} \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_0} + k_2 t \quad (2.6)$$

Dimana C_0 dan C_t adalah konsentrasi larutan pewarna pada $t = 0$ dalam mg/l. Setelah waktu kontak, t k_1 dan k_2 adalah konstanta laju orde pertama dan orde kedua yang tampak dan nilainya bergantung pada konsentrasi pewarna.

Persamaan model orde pertama semu dapat ditulis dengan Persamaan 2.9 berikut.

$$\ln\left(\frac{C_0}{C_t}\right) = k_1 \times t \quad (2.7)$$

Persamaan model orde nol dapat ditulis dengan Persamaan 2.10 berikut.

$$C_0 - C_t = k_0 t \quad (2.10)$$

Berdasarkan persamaan 2.9 dan 2.10, nilai k ditemukan langsung dari analisis regresi kurva linier pada plot $\ln(C_0/C_t)$ versus t .

2.8.4 Mekanisme Fotokatalisis

Mekanisme fotokatalis adalah proses di mana material semikonduktor (fotokatalis) menyerap energi cahaya (foton) yang setara atau lebih besar dari celah pita energinya (*band gap*), menyebabkan elektron tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi, menciptakan pasangan elektron (e^-) dan “lubang” (*hole*, h^+) yang sangat reaktif. Pasangan ini kemudian bermigrasi ke permukaan, dimana elektron mereduksi molekul (misalnya air menjadi H_2) sementara *hole* mengoksidasi polutan (membentuk radikal hidroksil ($\bullet OH$)) untuk mendegradasi senyawa berbahaya dengan tujuan memurnikan air, udara, atau menghasilkan hidrogen (Rahman & Sulistyowati, 2023).

2.9 Titanium Dioksida (TiO_2)

TiO_2 pertama dikenalkan oleh Fujishima dan Honda pada tahun 1972 sebagai sebuah fotokatalis semikonduktor. TiO_2 mampu menghasilkan berbagai spesies oksigen reaktif dalam air termasuk anion radikal superoksida, hidroksil radikal, hidrogen peroksida dan lain-lain. TiO_2 telah menarik perhatian dalam bidang fotokatalis karena stabilitas kimianya, rendah toksisitas, kekuatan oksidasi, ketersediaan, sifatnya yang sangat hidrofilik serta kapasitasnya yang luar biasa

dalam mendegradasi berbagai macam kontaminan organik dan anorganik di lingkungan (Sibakrishna & Jena, 2025).

Reaksi redoks terjadi ketika elektroda TiO_2 terpapar sinar UV. Oksidasi dan reduksi H_2O (evolusi oksigen) terjadi pada permukaan elektroda. Berbagai tahapan reaksi fotokatalitik berbasis semikonduktor adalah sebagai berikut :

- a. Semikonduktor fotokatalitik memperoleh foton dengan energi yang sama dengan *band gap*
- b. Reaksi tersebut kemudian menghasilkan pasangan elektron-lubang dan memisahkan pembawa muatan melalui migrasi
- c. Reaksi antara pembawa muatan dan air terjadi
- d. Pada saat yang bersamaan, pasangan elektron-lubang saling menyatu dan fotokatalis terlibat dalam evolusi hidrogen dan oksigen (Zafar, 2020).

2.10 Fe_3O_4

Fe_3O_4 merupakan material bersifat magnetik yang banyak digunakan dalam komposit. Fe_3O_4 menunjukkan responsivitas magnetik dan biokompatibilitas yang sangat baik. Fe_3O_4 yang dikombinasikan dengan CDs akan membentuk struktur inti cangkang magnetik yang akan memfasilitasi penyebaran nanopartikel di bawah medan magnet. Selain itu, kombinasi Fe_3O_4 dapat meningkatkan paparan dan pemanfaatan situs aktif melalui komponen fotokatalitik yang memiliki pengayaan terarah (E. Chen *et al.*, 2025). Fe_3O_4 memiliki *band gap* yang sempit yaitu sekitar (0,5 eV-2,0 eV), jumlah situs aktif yang melimpah serta memiliki kemampuan pemulihan magnetik. Kehadiran gugus Fe-O mampu meningkatkan kinerja adsorpsi dan fotokatalisis. (Liao *et al.*, 2025).

2.11 UV-Visible Spectrophotometri (UV-Vis)

Salah satu teknik karakterisasi untuk mengukur absorbansi sinar UV hingga cahaya tampak suatu material sebagai fungsi panjang gelombang adalah menggunakan UV-Vis Spectroscopy. Daerah cahaya tampak membentang dari 350 – 800 nm sedangkan daerah UV adalah sekitar 190-350 nm. Transisi elektron dari keadaan dasar hingga keadaan tereksitasi menyebabkan terjadinya absorpsi. Besar absorpsi tergantung pada hukum *Beer-Lambert* pada persamaan 2.10 berikut:

$$A = abc \quad (2. 8)$$

Dimana :

- A = absorbansi
- a = koefisien absorpsi yang bergantung pada panjang gelombang
- b = panjang lintasan melalui larutan dalam sel analisis, dan
- c = konsentrasi molar analit penyerap.

Informasi kualitatif dan kuantitatif tentang sampel cairan ditawarkan oleh metode spektroskopi non-destruktif ini. Menurut hukum *Beer-Lambert*, absorbansi suatu zat dalam larutan berbanding lurus dengan konsentrasinya. Selain itu, daya serap suatu molekul merupakan parameter yang bergantung pada panjang gelombang dan intensitasnya bergantung pada sifat kimianya (Omidi *et al.*, 2017). Alat untuk pengujian UV-Vis dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut



Gambar 2.3 UV-Vis (*The Basics of UV-Vis Spectrophotometry*, n.d.)

2.12 *Dynamic Light Scattering- Particle Size Analyzer (DLS-PSA)*

Particle Size Analyzer (PSA) merupakan teknik karakterisasi mendasar yang digunakan dalam aplikasi ilmiah. Distribusi ukuran partikel memengaruhi sifat fisik, kimia dan biologis suatu material. Secara tidak langsung, distribusi ukuran partikel memengaruhi fungsi dan kinerja suatu material (Saxena & Kaur, 2025). *Dynamic Light Scattering (DLS)* merupakan teknik pengukuran distribusi ukuran partikel tersuspensi pada wilayah submikron hingga nanometer. Metode DLS memanfaatkan efek perubahan hamburan cahaya dan gerak *Brown* dalam melakukan perkiraan ukuran partikel. DLS digunakan untuk mengetahui sebaran ukuran partikel, mendeteksi aglomerasi dan menganalisis kestabilan larutan. Teknik pengukuran DLS dilakukan dengan melewatkan sinar laser pada koloid

yang mengandung sampel tersuspensi. Partikel pada suspensi akan menghamburkan cahaya yang datang. Ukuran partikel yang lebih kecil dari panjang gelombang akan membuat cahaya terhambur secara isotropik ke segala arah atau disebut dengan hamburan *Rayleigh* (Riveli, 2023). Alat untuk pengujian DLS-PSA dapat dilihat pada Gambar 2.4 berikut



Gambar 2.4 DLS-PSA Equipment (Anton Paar, n.d.)

2.13 X-Ray Diffraction (XRD)

Karakterisasi struktur dan komposisi material banyak dilakukan dengan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) karena merupakan salah satu teknik yang efisien. Sebuah difraktometer sinar-X yang terdiri dari generator sinar-X, difraktometer yang mengontrol arah sinar-X dan posisi, orientasi sampel serta detektor. Selain itu XRD juga dilengkapi dengan komputer untuk mengumpulkan dan menganalisis data.

Metode XRD dilakukan dengan memancarkan berkas sinar-X monokromatik ke arah material dan mengukur intensitas berkas yang terdeteksi sebagai fungsi sudut datang. Jarak antar bidang kristal d , atau jarak antara bidang atom dalam material dihitung melalui Persamaan 2.11 berikut :

$$2d = \sin\theta = \lambda \quad (2.9)$$

Dimana λ adalah panjang gelombang sinar-X yang digunakan dan θ adalah sudut datang. Komposisi material, struktur seperti bentuk, dimensi sel satuan, lebar serta pergeseran dari difraksi yang mengandung berbagai informasi mengenai ukuran kristal dan tegangan sisa diungkapkan melalui jarak antar bidang atom d dan

sudut difraksi (Omidi *et al.*, 2017). Alat uji yang digunakan untuk pengujian XRD dapat dilihat pada Gambar 2. 5 berikut.



Gambar 2.5 X-Ray Diffraction Equipment (Anton Paar, n.d.)

Hasil yang diperoleh dari data XRD dapat digunakan untuk menghitung indeks kristalinitas melalui metode luas area atau dekonvolusi *peak*. Metode ini lebih umum untuk berbagai material dengan menghitung perbandingan area kristalin terhadap area total. Pada pola XRD, bagian kristalin biasanya muncul sebagai *peak* tajam, sedangkan bagian *amorf* muncul sebagai *broad hump* atau gundukan lebar. Perbedaan bentuk *peak* inilah yang digunakan untuk menghitung derajat kristalinitas. Pada perhitungan indeks kristalinitas menggunakan metode digunakan persamaan 2.12 berikut.

$$X_c(\%) = \frac{A_c}{A_c + A_a} \times 100\% \quad (2.10)$$

Keterangan:

X_c = Indeks kristalinitas (%)

A_c = Luas area *peak* kristalin

A_a = Luas area *amorf*

Fasa kristal hasil XRD dapat ditentukan melalui persamaan *Debye Scherrer* seperti pada persamaan 2.13 berikut.

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2.11)$$

Keterangan :

D = Ukuran Partikel (nm)

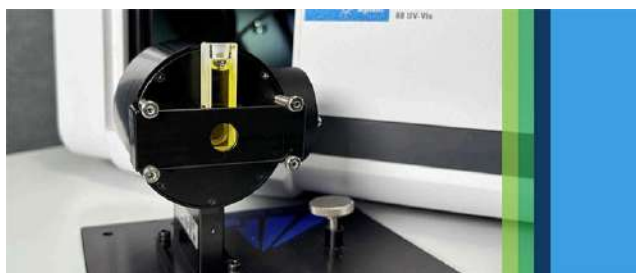
λ = Panjang gelombang radiasi (0,15406 nm)

β = Integrasi luas puncak refleksi (FWHM, radian)

K = Konstanta (0,9)

2.14 *UV-Vis Diffuse Reflectance Spectroscopy (UV-Vis DRS)*

UV-Vis DRS merupakan teknik yang digunakan untuk mengukur karakteristik penyerapan optik suatu material. UV-Vis DRS berfungsi untuk mendapatkan celah pita semikonduktor dan untuk menganalisis reaksi katalitik pada permukaan oksida logam. Penggunaan UV-Vis DRS sangat berguna untuk melakukan analisis *band gap* pada sampel serbuk karena efek hamburan mempersulit pengukuran penyerapan oleh UV-Vis biasa. Teknik UV-Vis DRS menggunakan refleksi difusi radiasi dalam rentang ultraviolet hingga tampak dengan panjang gelombang 190-800 nm (Kausor & Chakraborty, 2022). Gambar mengenai peralatan untuk pengujian *Zeta Potential* dapat dilihat pada Gambar 2.6 berikut.



Gambar 2.6 *Diffuse Reflectance Accessory (DRA)* (Agilent Carry, n.d.)

2.15 *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)*

Infrared Spectroscopy adalah teknik optik yang paling umum digunakan untuk identifikasi senyawa dan analisis struktur kimia pada suatu material. *Infrared Spectroscopy* menyimpulkan keberadaan gugus fungsional kimia melalui penyerapan radiasi IR pada berbagai frekuensi. Jenis instrumen IR yang paling banyak digunakan adalah *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) karena mudah digunakan, rasio sinyal ke derau yang tinggi serta biaya yang relatif rendah. FTIR memungkinkan pengukuran semua panjang gelombang secara bersamaan sehingga mampu mengumpulkan seluruh informasi spektrum pada satu waktu (Omidi *et al.*, 2017). Gambar mengenai peralatan pengujian FTIR dapat dilihat pada Gambar 2.7 berikut.



Gambar 2.7 FTIRS Equipment (Anton Paar, n.d.)

2.16 *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX)*

Salah satu metode umum untuk pencitraan mikrostruktur dan morfologi material adalah dengan melalui *Scanning Electron Microscope* (SEM). SEM bekerja dengan memancarkan energi rendah pada berkas elektron dan memindai permukaan sampel. Emisi foton dan elektron di dekat permukaan sampel disebabkan oleh interaksi berbeda yang terjadi saat berkas elektron mencapai atau memasuki material. Untuk membentuk citra, sinyal yang diterima dari hasil interaksi elektron sampel dideteksi dengan berbagai jenis detektor. SEM memiliki beberapa komponen yaitu;

- a. Senapan tungsten berbentuk jepit yang menghasilkan berkas elektron berdiameter besar sehingga dapat membentuk gambar beresolusi tinggi,
- b. Lensa dan aparatur elektromagnetik yang bertugas untuk memfokuskan dan membentuk berkas elektron hingga membentuk titik elektron kecil yang terkonsentrasi pada sampel,
- c. Lingkungan vakum yang memungkinkan elektron bergerak tanpa tersebar atau terserap oleh udara bebas (Omidi *et al.*, 2017).

Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX) merupakan teknik mikroanalisis unsur yang banyak digunakan. Puncak karakteristik sinar-X yang dieksitasi elektron memberikan identifikasi untuk semua unsur Tabel periodik selain H, He, dan Li (Newbury & Ritchie, 2012). Gambar untuk peralatan pengujian SEM-EDX dapat dilihat pada Gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.8 SEM-EDX Equipment (CET Scientific Service, n.d.)

2.17 *Vibrating Sample Magnetometer (VSM)*

Vibrating Sample Magnetometer (VSM) merupakan salah satu implementasi magnetometer yang tidak dipengaruhi ukuran dan massa sampel. VSM bekerja dengan memasukkan sampel ke dalam medan magnet eksternal seragam konstan yang menginduksi magnetisasi pada sampel. Saat sampel termagnetisasi digetarkan, akan menimbulkan gangguan pada medan magnet eksternal. Beberapa sensor medan magnet diatur untuk mengukur gangguan yang terjadi (Alamdara & Shah, 2013). Gambar mengenai peralatan pengujian VSM dapat dilihat pada Gambar 2.9 berikut.



Gambar 2.9 VSM Equipment (M'hamed et al., 2024)

2.18 *Analysis of Variance (ANOVA)*

Analysis of Variance (ANOVA) merupakan metode untuk menguji hubungan antara satu variabel dependen dengan satu atau lebih variabel independen

(Ghozali, 2023). ANOVA menghitung statistik F dan nilai p untuk setiap fitur guna mengestimasi rasio variabilitas antar-kelompok terhadap variabilitas dalam-kelompok serta menentukan kemungkinan memperoleh hasil yang ekstrem seperti hasil yang diamati jika tidak ada perbedaan signifikan antar kelompok. ANOVA mengasumsikan adanya hubungan linear antara fitur dan label kelas, serta kelompok yang terdistribusi normal dengan variasi yang sama. Teknik ini paling berguna ketika jumlah fitur secara signifikan lebih besar daripada jumlah sampel. Pengujian hipotesis dilakukan untuk mendefinisikan suatu dasar, sehingga didapatkan bukti berupa data dalam menentukan suatu keputusan apakah diterima atau ditolak kebenaran dari hipotesis yang sudah dibuat. Uji Anova dibagi menjadi 3, yaitu:

2.18.1 Analisis Varian Satu-Arah (*One-Way* ANOVA)

One-Way ANOVA digunakan untuk variabel tunggal (*single variable*) dan dilakukan dengan pengukuran dari sejumlah sampel untuk menguji hipotesis nol terhadap populasi yang (diperkirakan) memiliki rata-rata hitung sama. Variabel tersebut berupa variabel kuantitatif atau sering disebut sebagai variabel terikat (*dependent variable*).

2.18.2 Analisis Varian Dua-Arah (*Two-Way* ANOVA)

Two-Way ANOVA dapat digunakan untuk melakukan identifikasi terhadap 2 faktor yang mungkin dapat menyebabkan suatu perbedaan dalam variabel terikat (*dependent variable*).

2.18.3 Analisis Varial Tiga-Arah (*Three-Way* ANOVA)

Three-Way ANOVA dapat digunakan untuk melakukan identifikasi terhadap 3 faktor yang mungkin dapat menyebabkan suatu perbedaan dalam variabel terikat (*dependent variable*).

Halaman ini sengaja dikosongkan

2.19 Penelitian Terdahulu

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

Material	Dosis Katalis	pH	Konsentrasi MO	Jenis Cahaya	Waktu kontak	Removal	Referensi
CDs@TiO ₂	0,2 g/l	11	100 ppm	Solar light	180 menit	71,9%	(Shafique <i>et al.</i> , 2022)
TiO ₂ /ZnTiO ₃	NA	5	120 ppm	UV Light	300 menit	NA	(Oryza <i>et al.</i> , 2025)
UV/TiO ₂	0,01 g/l	4	90 ppm	UV light	300 menit	97,3%	(Vatanpour <i>et al.</i> , 2025)
Chio/Fe ₃ O ₄ @NAT	0,03 g/l	NA	50 ppm	UV light	90 menit	60%	(Zenebe <i>et al.</i> , 2025)
Pt/TiO ₂	0,2 g/l	NA	500 ppm	Visible light	60 menit	90,26%	(Thi <i>et al.</i> , 2025)
CDs/Layered Mesoporous TiO ₂	0,2 g/l	NA	666 ppm	Metal halide lamp	240 menit	91,04%	(L. Zhang <i>et al.</i> , 2021)

NA : *Not Available* / Tidak dicantumkan dalam literatur

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

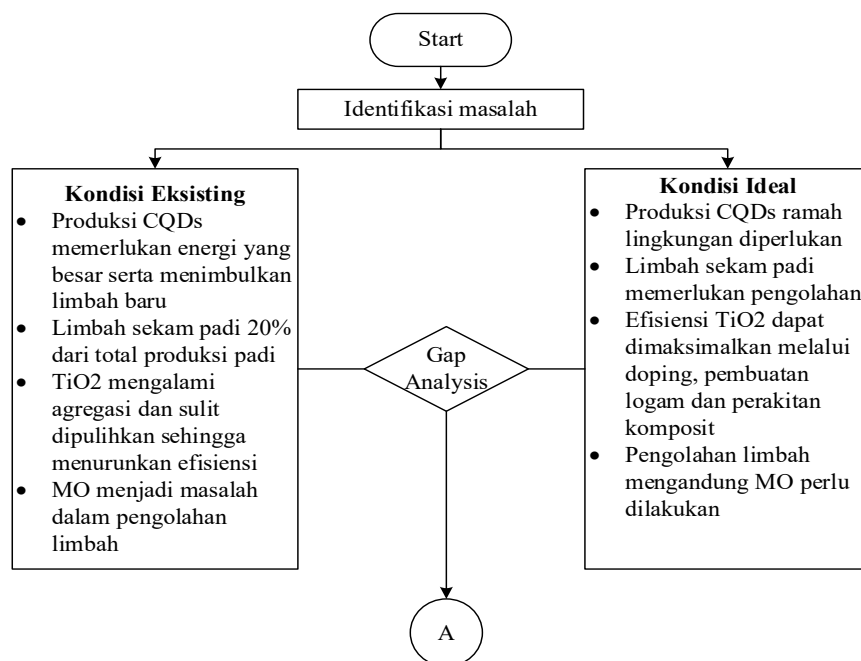
METODOLOGI PENELITIAN

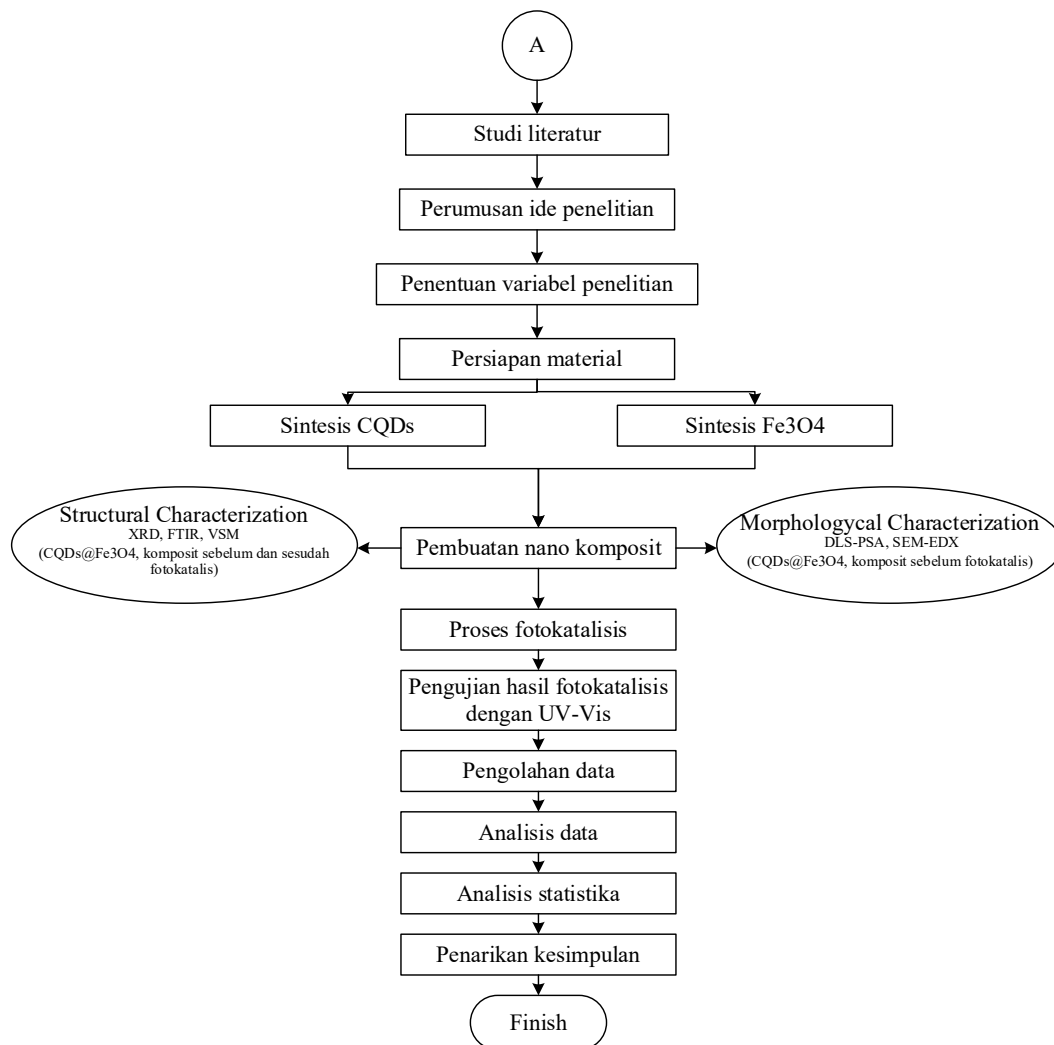
3.1 Gambaran Umum Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekori RH-CDs serta efektivitasnya untuk mendegradasi zat warna *Methyl Orange* dengan bantuan *photocatalyst*. Output dari keberhasilan penelitian ini adalah menganalisis kombinasi serta waktu kontak terbaik untuk mendegradasi zat warna *Methyl Orange* pada air limbah.

3.2 Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian yaitu langkah-langkah yang diambil oleh peneliti sehingga penelitian dan penulisan laporan dapat dilakukan dengan baik serta sistematis. Kerangka penelitian pada penelitian degradasi zat warna *Methyl Orange* menggunakan komposit partikel $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekori RH-CDs dan *photocatalyst* dapat dilihat pada Gambar 3.1.





Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian

3.3 Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah merupakan permasalahan yang digunakan sebagai topik utama sebuah penelitian. Jumlah sekam padi yang sangat besar akibat proses pengolahan hasil pertanian. Jumlah yang besar tersebut tentunya menimbulkan permasalahan lingkungan jika tidak ditangani dengan baik. Selain itu, pengolahan limbah warna *Methyl Orange* akibat kegiatan industri menyebabkan kelangkaan air bersih akibat pencemaran.

3.4 Perumusan Ide Penelitian

Perumusan ide penelitian merupakan langkah awal terbentuknya suatu penelitian. Dalam penelitian ini, peneliti telah menemukan suatu ide dengan memanfaatkan material sekam padi yang disintesis hingga menjadi *Carbon Dots* (CDs) yang dikompositkan dengan TiO_2 untuk degradasi zat warna *Methyl Orange* melalui proses fotokatalis.

3.5 Penentuan Rumusan Masalah dan Tujuan

Perumusan masalah dan tujuan penelitian adalah hal yang penting dalam suatu proses penelitian. Perumusan masalah dalam penelitian ini adalah mengetahui karakteristik komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekori RH-CDs serta pengaruh penambahan RH-CDs sebagai *co-catalyst* dalam mendegradasi zat warna *Methyl Orange*. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pH dan waktu kontak dalam proses katalis.

3.6 Studi Literatur

Studi literatur digunakan oleh peneliti untuk mencari referensi landasan teori serta penelitian terdahulu yang relevan dengan topik permasalahan yang diteliti. Studi literatur menjadi acuan dalam pengembangan dan penyelesaian masalah yang diangkat. Referensi yang digunakan berhubungan dengan metode sintesis CDs dari sekam padi serta aplikasinya dalam fotokatalis dengan bantuan TiO_2 .

3.7 Pengumpulan Data

Pada tahap ini, peneliti melakukan pengumpulan data primer untuk memenuhi tahapan dalam proses penelitian

3.7.1 Data Primer

Data primer merupakan data utama yang dibutuhkan dalam penelitian yang dilakukan. Data ini merupakan data yang diperoleh langsung oleh peneliti setelah melakukan berbagai uji. Data primer yang dibutuhkan dalam penelitian ini yaitu hasil uji analisis kandungan zat warna *Methyl Orange* awal sampel serta hasilnya setelah dilakukan fotokatalis. Selain itu diperlukan pula data hasil uji

karakteristik komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekori CDs menggunakan DLS-PSA, XRD, Zeta Potensial, FTIR, SEM-EDX, dan VSM sebagai data primer.

3.7.2 Data Sekunder

Data sekunder merupakan data yang diperoleh secara tidak langsung oleh peneliti. Data sekunder dapat diperoleh dari literatur baik jurnal maupun buku. Data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini adalah rentang dosis dan *range* pH terbaik serta waktu penyinaran.

3.8 Sampel Penelitian

Pada penelitian ini sampel yang digunakan adalah air limbah artifisial mengandung zat warna *Methyl Orange* dengan konsentrasi, 40, 60, 80, 100 dan 120 ppm. Dengan komparasi penelitian sebelumnya adalah 50 ppm (Hasan *et al.*, 2025).

3.9 Penentuan Variabel

Pada penentuan variabel ini, peneliti menggunakan beberapa variabel yaitu variabel bebas, variabel terikat dan variabel kontrol.

3.9.1 Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel independen yang diteliti pengaruhnya terhadap variabel terikat. Berdasarkan rumusan masalah pada penelitian, variabel bebas yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut ini.

Tabel 3.1 Penentuan Variabel Bebas

No.	Variasi	Definisi Operasional	Satuan	Alat ukur
1	Rasio <i>catalyst</i> dan <i>co-catalyst</i>	Digunakan pada pengujian sehingga dapat diketahui rasio terbaik antara katalis dan <i>co-katalis</i>	gram	Neraca analitik
2	Dosis katalis	Digunakan pada pengujian sehingga dapat diketahui massa katalis terbaik dalam proses fotokatalis zat warna <i>Methyl Orange</i>	gram	Neraca analitik
3	Konsentrasi zat warna <i>Methyl Orange</i>	Digunakan pada saat pengujian, sehingga dapat diketahui konsentrasi zat warna <i>Methyl Orange</i> yang telah direduksi selama proses berlangsung	mg/L	Spektrofotometer UV-Vis

No.	Variasi	Definisi Operasional	Satuan	Alat ukur
4	pH	Digunakan pada saat pengujian sehingga dapat diketahui PH terbaik dalam proses fotokatalis	-	pH meter
5	Waktu kontak fotokatalis	Digunakan pada saat pengujian untuk mengetahui waktu kontak terbaik dalam proses fotokatalis	menit	<i>stopwatch</i>

Berikut adalah variasi variabel bebas yang digunakan pada penelitian ini :

A. Pengaruh Penambahan Rasio *Rice Husk-Carbon Quantum Dots* (RH-CDs) pada komposit

Pada pengujian variasi dosis RH-CDs dilakukan dengan menggunakan dosis komposit katalis 0,02 gr/L, pH 7 dengan waktu adsorpsi desorpsi selama 90 menit dan waktu fotokatalisis selama 45 menit. Variasi pengujian rasio RH-CDs terhadap Waktu disajikan pada Tabel 3. 2 berikut

Tabel 3.2 Variabel pengaruh rasio RH-CDs terhadap konsentrasi MO

No	Waktu	Variasi Rasio CDs	Kode sampel
1	-30	0% CDs	A1B1
2		3% CDs	A1B2
3		6% CDs	A1B3
4		9% CDs	A1B4
5		12% CDs	A1B5
6	-60	0% CDs	A2B1
7		3% CDs	A2B2
8		6% CDs	A2B3
9		9% CDs	A2B4
10		12% CDs	A2B5
11	-90	0% CDs	A3B1
12		3% CDs	A3B2
13		6% CDs	A3B3
14		9% CDs	A3B4
15		12% CDs	A3B5
16	-120	0% CDs	A4B1
17		3% CDs	A4B2
18		6% CDs	A4B3
19		9% CDs	A4B4
20		12% CDs	A4B5
21	10	0% CDs	A5C1
22		3% CDs	A5C2

No	Waktu	Variasi Rasio CDs	Kode sampel
23		6% CDs	A5B3
24		9% CDs	A5C4
25		12% CDs	A5C5
26	15	0% CDs	A6D1
27		3% CDs	A6D2
28		6% CDs	A6D3
29		9% CDs	A6D4
30		12% CDs	A6D5
31	20	0% CDs	A7E1
32		3% CDs	A7E2
33		6% CDs	A7E3
34		9% CDs	A7E4
35		12% CDs	A7E5
36	30	0% CDs	A7F1
37		3% CDs	A7F2
38		6% CDs	A7F3
39		9% CDs	A7F4
40		12% CDs	A7F5
41	45	0% CDs	A7G1
42		3% CDs	A7G2
43		6% CDs	A7G3
44		9% CDs	A7G4
45		12% CDs	A7G5
46	60	0% CDs	A7H1
47		3% CDs	A7H2
48		6% CDs	A7H3
49		9% CDs	A7H4
50		12% CDs	A7H5
Jumlah Variasi			50

B. Pengaruh Variasi pH terhadap waktu dalam proses fotokatalis

Pada pengujian pengaruh pH dilakukan dengan menggunakan rasio RH-CDs sebagai *co-catalyst* terbaik dari variasi AB. Massa komposit dikunci pada 0,02 g/L dengan waktu adsorpsi desorpsi selama 90 menit dan waktu fotokatalisis selama 45 menit. Variasi pengujian pengaruh pH disajikan pada Tabel 3.3 berikut

Tabel 3.3 Variabel Pengujian Pengaruh pH

No	Rasio CDs	Waktu	Variasi pH	Kode sampel
1	0%	-90	5	A3I1
2			7	A3I2

No	Rasio CDs	Waktu	Variasi pH	Kode sampel
3			9	A3I3
4	6%	-90	5	A3J1
5			7	A3J2
6			9	A3J3
7	0%	+45	5	A9K1
8			7	A9K2
9			9	A9K3
10	6%	+45	5	A9L1
11			7	A9L2
12			9	A9L3
Jumlah Sampel				12

C. Pengaruh konsentrasi *Methyl Orange* dalam proses fotokatalis

Pada pengujian konsentrasi *Methyl Orange* digunakan dosis 0,02 gram/L dengan waktu adsorpsi desorpsi selama 90 menit dan fotokatalis selama 45 menit. Pengujian pengaruh konsentrasi dilakukan pada suasana netral dengan pH 7 pada suhu ruang. Variasi konsentrasi *Methyl Orange* disajikan pada Tabel 3.4 berikut

Tabel 3.4 Variabel pengujian pengaruh konsentrasi *Methyl Orange*

No	Rasio CDs	Waktu	Konsentrasi MO (ppm)	Kode sampel
1	0%	-90	40	A3K1
2			60	A3K2
3			80	A3K3
4			100	A3K4
5			120	A3K5
6	6%	-90	40	A3L1
7			60	A3L2
8			80	A3L3
9			100	A3L4
10			120	A3L5
11	0%	+45	40	A9K1
12			60	A9K2
13			80	A9K3
14			100	A9K4
15			120	A9K5
16	6%	+45	40	A9L1
17			60	A9L2
18			80	A9L3
19			100	A9L4

No	Rasio CDs	Waktu	Konsentrasi MO (ppm)	Kode sampel
20			120	A9L5
Jumlah Variasi				20

D. Pengaruh dosis katalis dalam proses fotokatalis

Pada pengujian pengaruh dosis katalis, digunakan konsentrasi MO sebesar 120 ppm dengan pH 7. Variasi Konsentrasi awal MO ditampilkan pada Tabel 3.5 berikut

Tabel 3.5 Variabel pengaruh dosis katalis pada proses fotokatalisis

No	Rasio CDs	Waktu	Variasi dosis katalis (g/L)	Kode sampel
1	0%	-90	0,02	A3M1
2			0,04	A3M2
3			0,06	A3M3
4			0,08	A3M4
5			0,1	A3M5
6	6%	-90	0,02	A3N1
7			0,04	A3N2
8			0,06	A3N3
9			0,08	A3N4
10			0,1	A3N5
11	0%	+45	0,02	A9M1
12			0,04	A9M2
13			0,06	A9M3
14			0,08	A9M4
15			0,1	A9M5
16	6%	+45	0,02	A9N1
17			0,04	A9N2
18			0,06	A9N3
19			0,08	A9N4
20			0,1	A9N5
Jumlah Variasi				20

E. *Reusablility test*

Reusability test dilakukan untuk mengetahui kemampuan komposit katalis ketika digunakan secara berulang. *Reusability test* dilakukan dengan menggunakan rasio dan konsentrasi katalis terbaik serta pada pH dan lama penyinaran yang memiliki kemampuan degradasi MO paling unggul. *Reusability test* dilakukan sebanyak 5 kali pengulangan.

F. *Demineralization Test*

Demineralization test dilakukan untuk mengetahui kemampuan fotokatalis dalam mengubah polutan organik menjadi $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{ion organik}$. *Demineralization test* dilakukan dengan uji kandungan COD pada sampel MO sebelum dan sesudah fotokatalis. Sampel setelah perlakuan fotokatalis diambil dari sampel *cycle* pertama *reusability test*.

3.9.2 Variabel Terikat

Variabel terikat merupakan variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas sehingga variabel terikat juga disebut sebagai variabel terpengaruh. Berikut merupakan variabel terikat pada penelitian ini. Variabel terikat dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Variabel Terikat Penelitian

No	Variabel	Definisi operasional	Satuan	Alat ukur
1	Intensitas cahaya acak CDs	Hasil karakterisasi CDs untuk mengukur fluktuasi intensitas cahaya acak dari partikel	nm	<i>Dynamic Light Scattering</i>
2	Pola difraksi material	Hasil identifikasi fase bahan kristal untuk memberikan informasi dimensi material dan komposit	-	<i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>
3	Material penyusun komposit	Hasil identifikasi material dengan penyinaran <i>infrared</i> untuk memeriksa kemurnian dan mengidentifikasi zat pada material komposit	-	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)</i>
4	Morfologi dan topografi komposit	Hasil identifikasi material yang menggabungkan SEM dengan analisis unsur kimia untuk mengidentifikasi komposisi elemen dan distribusinya	-	<i>Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX)</i>
5	Sifat magnetik	Hasil identifikasi sifat magnetik material untuk mengetahui aplikasi komposit magnetik	A/m	<i>Vibrating Sample Magnetometer</i>
6	<i>Methyl Orange</i>	Air limbah buatan yang mengandung <i>Methyl Orange</i> sebagai adsorbat dalam proses fotokatalisis menggunakan komposit RH-CDs@Fe ₃ O ₄ @TiO ₂	ppm	Spektrofotometer UV-Vis

3.9.3 Variabel Kontrol

Variabel kontrol adalah variabel yang diseragamkan pada sebuah penelitian sehingga nilai yang diperoleh pada setiap sampel konstan. Variabel kontrol dibedakan pada masing-masing pengujian dalam penelitian ini:

1. Pengaruh Rasio CDs pada Komposit
 - a. pH komposit diatur pada pH 7
 - b. Dosis komposit katalis adalah 0,02 gr/L
 - c. Waktu penyinaran adalah selama 45 menit dengan 90 menit adsorpsi desorpsi
 - d. Suhu yang digunakan dalam proses adalah suhu ruang
2. Pengujian Pengaruh pH
 - a. Rasio CDs terhadap komposit adalah pada rasio 6%
 - b. Dosis komposit katalis adalah 0,02g/L
 - c. Waktu penyinaran adalah selama 45 menit dengan 90 menit adsorpsi desorpsi
 - d. Suhu yang digunakan dalam proses fotokatalis adalah suhu ruang
3. Pengujian Pengaruh Dosis Komposit Katalis
 - a. Rasio CDs terhadap komposit adalah 6%
 - b. pH larutan MO adalah pH 7
 - c. Waktu penyinaran adalah selama 45 menit dengan 90 menit adsorpsi desorpsi
 - d. Suhu yang digunakan dalam proses fotokatalis adalah suhu ruang
4. Pengujian *Reusability Test*
 - a. Rasio CDs terhadap komposit adalah 6%
 - b. pH menggunakan pH 7
 - c. Dosis komposit menggunakan dosis 0,1 g/L
 - d. Suhu yang digunakan dalam proses fotokatalis adalah suhu ruang
 - e. Waktu penyinaran yang digunakan adalah 45 menit dengan 90 menit adsorpsi desorpsi
 - f. *Reusability test* dilakukan sebanyak 3 kali

3.10 Persiapan Penelitian

Pada penelitian yang dilakukan diperlukan alat dan bahan yang dapat menunjang proses pelaksanaannya. Berikut ini adalah peralatan dan bahan yang akan digunakan

3.10.1 Alat

Peralatan yang digunakan selama proses sintesis, proses fotokatalis, karakterisasi dan analisis adalah sebagai berikut;

1. *Glassware*
2. Neraca analitik (Fujitsu FSR A320))
3. *Magnetic stirrer* (SH-2 *Magnetic Stirrer and Hot Plate*)
4. *Hot plate* (SH-2 *Magnetic Stirrer and Hot Plate*)
5. Oven (JISICO J-HSD180)
6. Desikator
7. Mortar dan pestle
8. *Stopwatch*
9. pH meter (*Thermo Scientific*)
10. *Hydrothermal autoclave*
11. Sonicator (VEVOR 60W)
12. Sentrifuge (Nesco DM0506)
13. Nylon Syringe Filter, 0.22 μm
14. Vial kaca bening
15. *Refrigerator* (LG)
16. Reaktor fotokatalisis
17. Lampu LED 45 watt
18. Kuvet kuarsa
19. Alat uji Spektrofotometer UV-Vis (*Agilent Carry 60 Spectrophotometer*)
20. Alat uji DLS (Labtron LLPA-C10)
21. Alat uji XRD (X'pertama Pro Analytical)
22. Alat uji FTIR (Shimadzu)
23. Alat uji SEM-EDX (SEM-EDX JEOL JSM-6510LA)
24. Alat uji VSM

3.10.2 Bahan

Bahan yang dibutuhkan selama proses penelitian ini berlangsung adalah sebagai berikut;

1. Sekam padi (*rice husk / RH*) (*Oryza sativa L.*)
2. Air suling
3. Ethanol (smartlab)
4. HNO_3 (Merck)
5. NaOH (Merck)
6. Iron (II) chloride pentahydrat ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) (Merck)
7. Iron (III) chloride hexahydrat ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (Merck)
8. HCl (Merck)
9. *Methyl Orange*

3.11 Pelaksanaan Penelitian

Pelaksanaan penelitian yaitu tahap dimana peneliti melakukan runtutan proses mulai dari persiapan material, sintesis material, sintesis komposit, fotokatalis hingga penelitian ini selesai.

3.11.1 *Pre-Treatment Rice Husk-Carbon Quantum Dots (RH-CDs)*

Pre-treatment Rice Husk-Carbon Quantum Dots (RH-CDs) yang akan digunakan sebagai prekursor CDs mengacu pada penelitian terdahulu yang telah dilakukan (S. Thakur *et al.*, 2026).

1. Mengeringkan sekam padi di bawah sinar matahari untuk memperoleh sekam padi kering
2. Mencuci sekam padi sebanyak 3 kali dengan menggunakan air suling dengan rasio sampel : air adalah 1 gram : 10 ml dengan pengadukan selama 30 menit
3. Membilas sekam padi yang telah dicuci dengan ethanol untuk menghilangkan kontaminan organik dan lipid sebanyak 1 kali dengan rasio sampel dan ethanol adalah 1 gram : 10 ml dengan pengadukan selama 30 menit

4. Membilas sampel 2 kali dengan menggunakan air suling dengan rasio sampel : air adalah 1 gram :10 ml dengan pengadukan selama 30 menit
5. Mengeringkan sampel selama 24 jam pada suhu 60°C hingga mencapai berat konstan
6. Sampel kering kemudian digiling dengan mortar hingga lolos ayakan < 500 mesh

3.11.2 Persiapan *Carbon Quantum Dots* Sekam Padi (RH-CDs)

Carbon Quantum Dots Sekam Padi (RH-CDs) yang digunakan sebagai *co-catalyst* pada proses fotokatalis untuk mereduksi zat warna *Methyl Orange*. Pembuatan RH-CDs mengacu pada penelitian yang telah dilakukan oleh (Thongsai *et al.*, 2019) dengan dilakukan perubahan terhadap suhu yang digunakan dalam proses sintesis (Rosales *et al.*, 2025).

1. Mencampur 10 gram RH kering dengan 2,5 M HNO₃ (50 ml) dan melakukan sonikasi selama 15 menit pada 2 kHz
2. Memindahkan campuran ke dalam *Teflon-Lined autoclave* dan memanaskan menggunakan *muffle-furnace* dengan suhu 180°C selama 2 jam dengan tekanan < 3 MPa
3. Mendinginkan reaktor untuk menghentikan reaksi hingga suhu ruang
4. Memisahkan filtrat dari partikel pengotor dengan sentrifugasi 4000 rpm selama 15 menit
5. Memurnikan larutan sampel dengan melewati pada filter jarum suntik mikropori 0,22 µm untuk memastikan penghilangan agregat dan kontaminasi mikroba
6. Larutan kemudian disimpan pada vial bening pada suhu 4°C

3.11.3 Persiapan Material Fe₃O₄

Pembuatan material Fe₃O₄ yang digunakan sebagai material komposit mengacu pada penelitian mengenai Fe₃O₄ nano partikel yang dilakukan oleh (Araichimani *et al.*, 2022; Yagmur & Kaya, 2021). Berikut merupakan uraian langkah pembuatan material Fe₃O₄

1. Menimbang 7,32 gram FeSO₄.7H₂O dan 13,32 gram FeCl₃.6H₂O
2. Menyiapkan 400 ml DI water

3. Memasukkan 7,32 gram $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ke dalam labu leher 3 dan menambahkan sedikit DI *water*, aduk menggunakan pengaduk magnet hingga larut
4. Melarutkan 13,32 gram $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dalam 100 ml DI *water* pada gelas beaker
5. Tuang larutan $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ke dalam labu leher 3, bilas gelas beaker, corong dan pengaduk besi menggunakan DI *water* yang tersisa
6. Injeksikan gas N_2 selama 15 menit untuk menghilangkan *excess* CO_2 disertai dengan pengadukan cepat
7. Tutup *valve* tabung N_2 , kemudian tutup lubang pada karet sumbat menggunakan plastisin
8. Lanjutkan pengadukan hingga 1 jam
9. Menambahkan larutan $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ + $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dengan ammonia hingga mencapai pH 10 dan membentuk endapan magnetit berwarna hitam
10. Memisahkan padatan dan larutan dengan metode presipitasi menggunakan centrifuge 4000 rpm selama 5 menit
11. Mengeringkan padatan Fe_3O_4 selama 8 jam pada suhu 80°C

3.11.4 Persiapan *Coupling* Komposit $\text{TiO}_2@ \text{Fe}_3\text{O}_4$

Pembuatan *coupling nanomaterial* yang digunakan sebagai *catalyst* dalam degradasi MO dengan fotokatalisis mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh (Rasouli *et al.*, 2026). Berikut merupakan tahapan pembuatan *coupling* komposit *catalyst*

1. Menimbang 1,97 gram TiO_2 dan 3,93 gram Fe_3O_4 kemudian dilarutkan dalam 20 ml DI *water*
2. Suspensi TiO_2 dan Fe_3O_4 kemudian dihomogenkan dengan *ultrasonic bath* selama 1 jam
3. Suspensi kemudian di stirer selama 24 jam pada suhu 80°C dengan metode *refluks*
4. Suspensi kemudian dikeringkan pada suhu 60°C hingga kering
5. Padatan yang diperoleh kemudian di haluskan menggunakan mortar dan alu

3.11.5 Pembuatan Composite $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{TiO}_2$ Terdekorasi RH-CDs

Pembuatan *composite catalyst* dilakukan melalui microwave-assisted method yang mengacu pada prosedur penelitian yang dilakukan oleh (Kumalayanti *et al.*, 2025). Berikut merupakan tahapan pembuatan *composite catalyst*

1. Volume tertentu CDs didispersikan dalam 50 ml DI *water* dalam labu ukur 50 ml untuk berbagai konsentrasi 3% v/v, 6% v/v, 9% v/v, dan 12% v/v, dipipet 3 ml, 6 ml, 9 ml, dan 12 ml CDs dan dimasukkan dalam labu ukur 50 ml kemudian ditambah DI *water* hingga tanda batas
2. Menimbang 1 gram $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ dan dilarutkan dalam 50 ml DI *water*
3. Menambahkan larutan CDs kedalam larutan $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$
4. Larutan kemudian disonikasi selama 30 menit untuk memastikan dispersi yang tepat
5. Larutan kemudian disinari gelombang mikro pada daya 900 watt selama 3 menit untuk memfasilitasi pembentukan $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{TiO}_2$ terdekorasi RH-CDs
6. Larutan kemudian dikeringkan pada suhu 105°C selama 5 jam
7. Padatan dihaluskan menggunakan mortar dan alu kemudian disimpan dalam wadah tertutup pada suhu ruang.

3.11.6 Pembuatan Larutan Artifisial *Methyl Orange* (1000 ppm)

1. Timbang 1000 mg atau 1 gram MO menggunakan neraca analitik
2. Larutkan MO menggunakan air suling
3. Masukkan ke dalam labu ukur 1000 ml
4. Bilas gelas *beaker* menggunakan air suling 3 kali, masukkan bilasan dalam labu ukur
5. Tambahkan air suling hingga tanda batas
6. Kocok 10-15 kali, simpan di tempat gelap karena MO sangat sensitif terhadap cahaya
7. Lakukan pengenceran untuk membuat larutan dengan konsentrasi yang diinginkan

3.11.7 Pembuatan Kurva Kalibrasi *Methyl Orange*

1. Membuat larutan uji MO 10 titik (0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, dan 20 ppm)
2. Atur instrumen ke 464 nm (atau λ_{max} hasil *scanning*)
3. *Zero/baseline* dengan *blank* (dapat menggunakan air suling)
4. Ukur standar dari konsentrasi rendah ke tinggi, lakukan masing-masing secara *triplo*
5. Membuat kurva dan persamaan regresi dengan x = konsentrasi dan y adalah absorbansi
6. Cek kualitas R^2 mendekati 1 (target $\geq 0,995$)

3.11.8 Pengujian Variasi Rasio RH-CDs : TiO_2 dan Konsentrasi MO

Prosedur dasar untuk melakukan fotokatalis mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh (Hasan *et al.*, 2025). Penelitian tersebut menjelaskan mengenai fotodegradasi MO menggunakan *xenon lamp*. Berikut merupakan metode fotokatalis yang dilakukan pada penelitian ini.

1. Menyiapkan komposit dengan beberapa perbandingan yang telah dibuat pada langkah 3.10.5.
2. Menambahkan komposit *catalyst* sebanyak 0,002 gram pada 100 ml MO (120 mg/l)
3. pH diatur menggunakan 0,5 M HCl atau 0,5 M NaOH hingga mencapai pH 10
4. Untuk mencapai kesetimbangan adsorpsi-desorpsi, suspensi diaduk dalam kondisi gelap selama 90 menit, konsentrasi MO sebelum dan sesudah adsorpsi-desorpsi dianalisis menggunakan UV-Vis pada panjang gelombang sesuai λ_{max} hasil *scanning*
5. Proses fotokatalis dilakukan selama 10, 15, 20, 30, 45, dan 60 menit
6. Setelah fotokatalis dilakukan analisis konsentrasi MO menggunakan UV-Vis
7. Setelah proses selesai, katalis dipisahkan menggunakan magnet
8. Melakukan langkah 1-7 pada rasio CDs yang berbeda (0%, 3%, 6%, 9% dan 12%)

3.11.9 Pengujian Variasi pH

1. Menyiapkan komposit *catalyst* dengan perbandingan terbaik berdasarkan pengujian variasi perbandingan komposit *catalyst* yang telah dilakukan
2. Menimbang komposit *catalyst* sesuai sebanyak 0,002 gr dan melarutkan pada 100 ml sampel
3. pH diatur menggunakan 0,5 M HCl atau 0,5 M NaOH hingga mencapai pH yang diinginkan
4. Untuk mencapai kesetimbangan adsorpsi-desorpsi, suspensi diaduk dalam kondisi gelap selama 90 menit, konsentrasi MO sebelum dan sesudah adsorpsi-desorpsi dianalisis menggunakan UV-Vis pada panjang gelombang sesuai hasil *scanning*
5. Proses fotokatalisis dilakukan selama 45 menit
6. Setelah fotokatalisis dilakukan analisis konsentrasi MO menggunakan UV-Vis
7. Setelah proses selesai, katalis dipisahkan menggunakan magnet

3.11.10 Pengujian Variasi Dosis Komposit *Catalyst*

1. Menyiapkan komposit *catalyst* dengan perbandingan terbaik berdasarkan pengujian variasi perbandingan *nanocomposite catalyst* yang telah dilakukan
2. Menimbang *nanocomposite catalyst* sesuai variasi dosis yang digunakan dengan yaitu 0,02; 0,04; 0,06; 0,08; dan 0,1 g/L
3. pH diatur menggunakan 0,5 M HCl atau 0,5 M NaOH hingga mencapai pH 7
4. Untuk mencapai kesetimbangan adsorpsi-desorpsi, suspensi diaduk dalam kondisi gelap selama 90 menit, konsentrasi MO sebelum dan sesudah adsorpsi-desorpsi dianalisis menggunakan UV-Vis pada panjang gelombang sesuai hasil *scanning*
5. Proses fotokatalisis dilakukan selama 45 menit
6. Setelah fotokatalisis dilakukan analisis konsentrasi MO menggunakan UV-Vis

7. Setelah proses selesai, katalis dipisahkan menggunakan magnet

3.11.11 Pengujian Variasi Konsentrasi MO

1. Menyiapkan komposit *catalyst* dengan perbandingan 6%
2. Menimbang komposit *catalyst* sesuai dosis terbaik 0,02 g/L
3. pH diatur menggunakan 0,5 M HCl atau 0,5 M NaOH hingga mencapai pH 7
4. Untuk mencapai kesetimbangan adsorpsi-desorpsi, suspensi diaduk dalam kondisi gelap selama 90 menit, konsentrasi MO sebelum dan sesudah adsorpsi-desorpsi dianalisis menggunakan UV-Vis pada panjang gelombang sesuai hasil *scanning*
5. Proses fotokatalis dilakukan selama 45 menit
6. Lakukan proses untuk masing-masing variasi konsentrasi MO (40, 60, 80, 100 dan 120 ppm).
7. Setelah fotokatalisis dilakukan sesuai variasi waktu, analisis konsentrasi MO menggunakan UV-Vis
8. Setelah proses selesai, katalis dipisahkan menggunakan magnet

3.11.12 Reusability Test

Reusability test yang dilakukan pada penelitian ini mengacu pada penelitian yang telah dilakukan oleh (Hariani *et al.*, 2023). Langkah *reusability test* pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Melakukan *reusability test* menggunakan kondisi konsentrasi MO 100 ppm, dosis 0,1 g/L dan pH 7
2. Melakukan adsorpsi desorpsi selama 90 menit dilanjut dengan fotokatalis selama 45 menit
3. Memisahkan komposit *catalyst* menggunakan magnet
4. Mengeringkan komposit *catalyst* dengan menggunakan oven pada suhu 60 °C selama 60 menit.

3.11.13 Demineralization Test

Demineralization test dilakukan dengan melakukan pengujian kandungan Chemical Oxygen Demand (COD) pada sampel sebelum dan setelah dilakukan fotokatalisis. Pengujian COD mengacu pada SNI 6989.73:2019

mengenai pengujian air limbah : *Chemical Oxygen Demand* (COD) dengan refluks tertutup secara titrimetri.

3.12 Pengujian Karakteristik

3.12.1 Spektrofotometri UV-Vis

Pengujian spektrofotometri UV-Vis dilakukan untuk mengukur transmittansi dan adsorbansi sampel *Methyl Orange* sebagai fungsi panjang gelombang. Pembacaan tersebut dilakukan dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 465 nm (Parida *et al.*, 2008). Hasil pengujian digunakan untuk melakukan analisis secara kuantitatif dan kualitatif sampel MO. Prosedur pengujian ini dilakukan berdasarkan

3.12.2 *Dynamic Light Scattering – Particle Size Analysis* (DLS-PSA)

Dynamic Light Scattering atau DLS adalah teknik untuk mengukur fluktuasi intensitas cahaya acak dari partikel (1nm - 10µm) dalam suspensi. DLS berfungsi untuk menentukan ukuran dan distribusi partikel dengan menganalisis gerak *Brown* melalui korelator foton. Cahaya laser tersebar dari partikel, menciptakan pergeseran intensitas. Pergeseran lebih cepat berarti partikel yang lebih kecil sedangkan pergeseran lebih lambat menunjukkan ukuran partikel yang lebih besar.

3.12.3 *X-Ray Diffraction* (XRD)

Pada penelitian ini dilakukan uji karakteristik dengan alat *X-Ray Diffraction* (XRD). Pengujian XRD digunakan untuk mengidentifikasi fase komposit, menentukan struktur kristal, melihat ukuran serta menganalisis parameter kisi material padat secara non destruktif. Material dengan struktur kristalin akan menghasilkan pola difraksi sinar X jika ditembak dengan menggunakan sinar X.

3.12.4 *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) merupakan teknik analisis menggunakan cahaya inframerah untuk mengidentifikasi komponen kimia dalam sampel. Hal tersebut dilakukan dengan mengukur pola serapan

inframerah sehingga menciptakan sidik jari molekul untuk mengidentifikasi senyawa tidak dikenal, memeriksa kemurnian, mendeteksi kontaminan atau mempelajari perubahan material dari waktu ke waktu.

3.12.5 Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray

Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX) merupakan *teknik* analisis yang menggabungkan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mendapatkan citra permukaan dengan resolusi tinggi dan analisis *Energi Dispersive X-Ray* (EDX) untuk mengidentifikasi komposisi unsur kimia sampel secara simultan.

3.12.6 Vibrating Sample Magnetometer (VSM)

Vibrating Sample Magnetometer atau VSM digunakan untuk mengkarakterisasi sifat magnetik dari suatu material komposit untuk memahami perilaku magnetiknya. Alat ini bekerja dengan mengukur perubahan fluks magnetik saat sampel digetarkan.

3.13 Analisis Data

Pada tahap analisis data dilakukan perhitungan persentase *removal* kandungan *Methyl Orange* pada air limbah buatan serta perhitungan kinetika fotokatalisis.

3.14 Analisis Statistik

Pengujian statistika dilakukan dengan mengolah data yang diperoleh dari hasil pengujian. Pengujian digunakan untuk mengetahui pengaruh antar variabel dalam pengujian fotokatalisis dalam mereduksi kandungan *Methyl Orange*. Pada penelitian ini, dilakukan beberapa metode pengujian, yaitu sebagai berikut:

3.14.1 Uji Normalitas

Pengujian normalitas dilakukan sebagai syarat dalam melakukan uji Anova. Uji normalitas dilakukan untuk menguji data telah terdistribusi secara normal (Ghozali, 2023). Pada penelitian ini, uji normalitas dilakukan dengan metode

Kolmogorov-Smirnov karena jumlah sampel lebih dari 50 sampel. Data yang digunakan dalam pengujian Anova harus terdistribusi normal agar data dapat dikatakan baik dan layak. Data dengan distribusi normal memiliki nilai residual > 0.05 (Sujarweni & Utami, 2023).

3.14.2 Uji Homogenitas

Perhitungan uji homogenitas dilakukan dengan *software* SPSS. Pengujian homogenitas pada penelitian ini hanya memerlukan *output Homogeneity of Variance Test*. Pada uji homogenitas dilakukan pembacaan dengan melihat nilai signifikansi $> 0,05$ yang dapat disimpulkan bahwa variasi data adalah homogen (Ghozali, 2023).

3.14.3 Uji Anova (*Analysis of Variance*)

Pengujian Anova dilakukan dengan pemuatan hipotesis penelitian. Hipotesis merupakan suatu pernyataan yang berisi dugaan adanya hubungan antara beberapa variabel yang digunakan. Berikut adalah hipotesis yang dirumuskan dalam penelitian ini:

a. Hipotesis Anova Rasio Nano Komposit Fotokatalis dan Konsentrasi *Methyl Orange*

H0 = Tidak terdapat pengaruh rasio komposit fotokatalis dan konsentrasi *Methyl Orange* terhadap % reduksi konsentrasi *Methyl Orange*

H1 = Terdapat pengaruh rasio komposit fotokatalis dan konsentrasi *Methyl Orange* terhadap % reduksi konsentrasi *Methyl Orange*

b. Hipotesis Anova pH Fotokatalisis

H0 = Tidak terdapat pengaruh pH fotokatalisis terhadap % reduksi konsentrasi *Methyl Orange*

H1 = Terdapat pengaruh pH fotokatalisis terhadap % reduksi konsentrasi *Methyl Orange*

c. Hipotesis Anova Dosis Nano Komposit Fotokatalis

H0 = Tidak terdapat pengaruh dosis nano komposit fotokatalis terhadap % reduksi konsentrasi *Methyl Orange*

H1 = Terdapat pengaruh nano komposit fotokatalisis terhadap % reduksi konsentrasi *Methyl Orange*

d. Hipotesis Anova Waktu Fotokatalisis

H0 = Tidak terdapat pengaruh waktu fotokatalisis terhadap % reduksi konsentrasi *Methyl Orange*

H1 = Terdapat pengaruh waktu fotokatalisis terhadap % reduksi konsentrasi *Methyl Orange*

3.15 Kesimpulan dan Saran

Peneliti melakukan penyusunan kesimpulan dan saran berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan. Kesimpulan menjadi tahap akhir dari penelitian ini yang menjelaskan mengenai hasil penelitian. Saran berisi mengenai solusi dari masalah atau kendala yang dihadapi peneliti selama penelitian ini berlangsung. Perumusan saran bertujuan agar penelitian mengenai topik terkait setelah ini dapat disempurnakan.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh fotokatalis pada zat warna *Methyl Orange* (MO) menggunakan komposit katalis TiO_2 , Fe_3O_4 yang didekorasi dengan *Carbon Dots* (CDs). CDs yang telah disintesis melalui metode *hydrothermal* dianalisis melalui *Dinamic Light Scattering* (DLS) untuk menentukan *Particle Size Analysis* (PSA) Komposit katalis yang telah disintesis dikarakterisasi dengan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) untuk menganalisis gugus fungsi senyawa yang dihasilkan. FTIR dilakukan pada CDs, material sebelum dan sesudah fotokatalis. Komposit katalis dengan rasio terbaik sebelum dan sesudah dikarakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscope* untuk mendapatkan citra permukaan dengan resolusi tinggi dan analisis *Energy Dispersive X-Ray* (EDX) untuk mengidentifikasi komposisi unsur kimia sampel secara simultan. Selain SEM-EDX, komposit dengan rasio terbaik sebelum dan sesudah fotokatalis dilakukan pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk menganalisis komposisi dan ukuran kristal yang dihasilkan. Kekuatan magnetik komposit sebelum dan sesudah digunakan untuk fotokatalis dianalisis melalui pengujian *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM) untuk mengetahui perubahan medan magnetik pada keduanya.

Pengujian efektivitas proses fotokatalis dilakukan dengan menganalisis pengaruh rasio CDs terhadap komposit, konsentrasi MO, dosis katalis, pH, waktu kontak serta *Reusability test* dan *demineralization test* dengan analisis COD pada MO sebelum dan sesudah dilakukan fotokatalis.

4.1 Hasil Uji Karakterisasi

4.1.1 Sifat Optik CDs

Carbon Dot (CDs) memiliki sifat optik yang unik karena mampu memancarkan *blue fluorescence* di bawah sinar UV dihasilkan sebagai hasil interaksi (S. Thakur *et al.*, 2026). Berdasarkan uji sederhana yang dilakukan dengan menggunakan sinar UV, tampak warna hijau yang mengindikasikan

terbentuknya Carbon Dot. Hasil uji sederhana yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut



Gambar 4.1 Hasil Uji Optik Sederhana Menggunakan Sinar UV

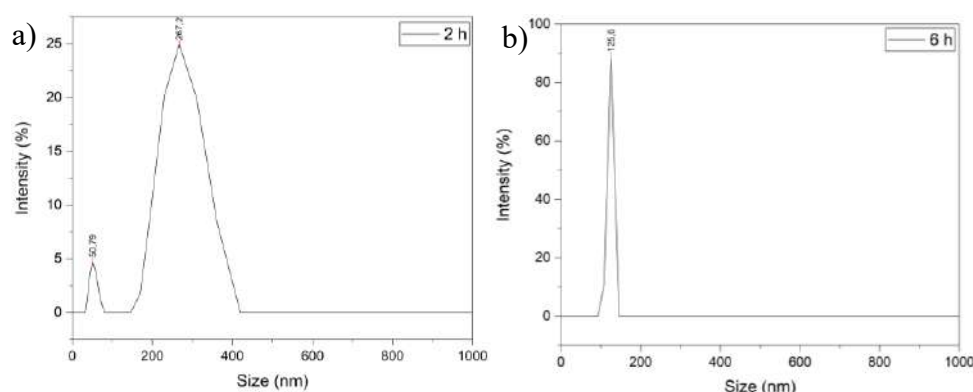
Larutan CDs menunjukkan pendaran berwarna hijau di bawah sinar UV. Fenomena ini menunjukkan adanya sifat *photoluminescent* pada CDs, yaitu kemampuan material menyerap energi dari sinar UV dan memancarkannya kembali dalam bentuk cahaya tampak. Emisi hijau tersebut diduga berasal dari kombinasi antara domain karbon terkonjugasi, *defect* struktur, serta gugus fungsi permukaan seperti C=O, C-O, -COOH, dan -OH yang terbentuk selama proses sintesis. Gugus-gugus tersebut dapat membentuk *surface states* yang berperan sebagai pusat emisi. CDs yang menerima energi UV, mengalami eksitasi elektron ke tingkat energi yang lebih tinggi kemudian kembali ke tingkat energi yang lebih rendah dengan melepaskan energi dalam bentuk cahaya hijau. Pendaran hijau yang terlihat pada pengujian UV menjadi indikasi awal bahwa CDs hasil sintesis memiliki karakter optik khas CDs.

4.1.2 Particle Size Analysis (PSA)

Grafik PSA yang diperoleh digunakan dalam menentukan waktu reaksi yang digunakan pada proses *hydrothermal*. Tujuan utama dalam pengujian PSA ini adalah untuk mengetahui ukuran partikel yang dihasilkan dari proses *hydrothermal* dengan dua waktu yaitu 2 jam dan 6 jam. Hasil yang diperoleh setelah dilakukan pengujian PSA adalah, ukuran partikel yang dihasilkan pada proses *hydrothermal* selama 2 jam memiliki dua puncak dispersi yaitu pada ukuran 50,79 nm dengan intensitas 5% dan 287,2 nm dengan intensitas 25%.

Sedangkan, ukuran partikel yang dihasilkan ketika proses *hydrothermal* berlangsung 6 jam adalah 125,6 nm dengan intensitas yang lebih besar yaitu sebanyak 86%.

Dalam penentuan waktu proses terbaik untuk proses sintesis CDs melalui proses *hydrothermal* ini, ukuran partikel dan intensitas saja tidak cukup untuk melakukan justifikasi. Analisis *Polydispersity Indeks* (PI) penting untuk menilai kualitas CDs. PI digunakan untuk melakukan karakterisasi agregasi suatu partikel, nilai PI yang lebih sempit mengacu pada sifat agregasi yang lebih rendah pada partikel dengan ukuran kecil (Hasanin *et al.*, 2026). Pada penelitian ini, hasil proses *hydrothermal* selama 6 jam memiliki nilai PI sebesar 1 dan hasil proses *hydrothermal* selama 2 jam memiliki nilai PI sebesar 0,5062. Hal tersebut menunjukkan bahwa hasil *hydrothermal* selama 2 jam memiliki sifat agregasi yang lebih rendah sehingga dipilih dalam metode syntesis CDs sebagai *co-catalyst*. Grafik PSA ditampilkan dalam Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.2 a) Hasil PSA Proses *Hydrothermal* selama 2 jam b) Hasil PSA Proses *Hydrothermal* selama 6 jam

Hasil PSA pada proses *hydrothermal* 2 jam menunjukkan bahwa sampel memiliki distribusi ukuran partikel bimodal, yang ditandai dengan munculnya dua puncak pada sekitar 60,79 nm dan 267,2 nm. Puncak pertama menunjukkan keberadaan partikel berukuran lebih kecil, sedangkan puncak kedua dengan intensitas lebih tinggi menunjukkan populasi partikel yang lebih dominan. Ukuran dominan sampel berada pada sekitar 267,2 nm dengan intensitas sekitar 24%. Munculnya dua puncak mengindikasikan bahwa partikel tidak sepenuhnya terdispersi secara homogen dan terdapat kemungkinan

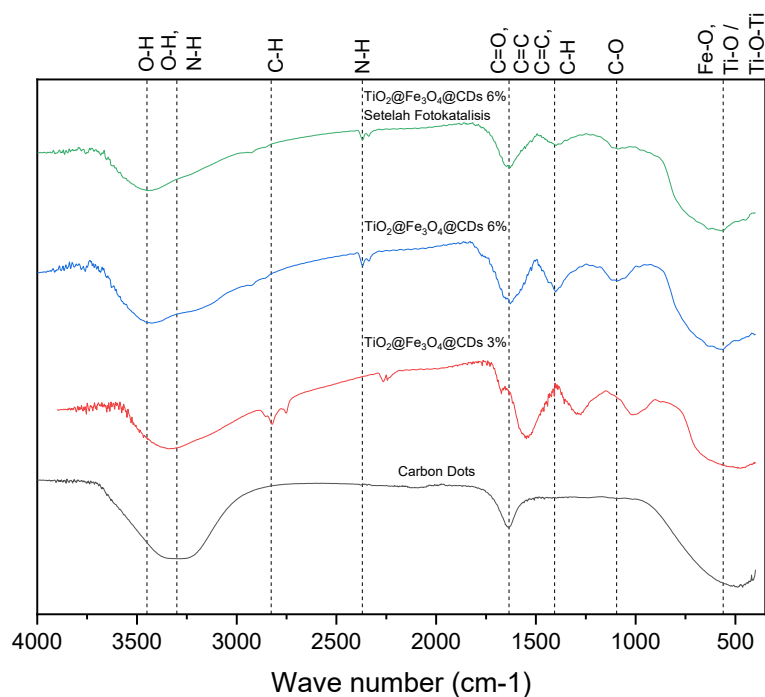
terjadinya agregasi atau aglomerasi selama proses sintesis maupun dispersi sampel.

Hasil PSA pada sampel dengan waktu sintesis 6 jam menunjukkan satu puncak dominan ukuran partikel pada 125,6 nm dengan intensitas yang sangat tinggi pada sekitar 88%. Pola ini menunjukkan bahwa sampel memiliki distribusi ukuran yang relatif lebih seragam dibandingkan sampel yang memiliki lebih dari satu puncak. Munculnya satu puncak utama mengindikasikan bahwa partikel dalam suspensi cenderung berada pada satu populasi ukuran dominan, sehingga sampel dapat dikatakan memiliki karakter distribusi yang lebih homogen. Namun, ukuran 125,6 nm yang terbaca pada PSA merupakan ukuran hidrodinamik, yaitu ukuran partikel beserta lapisan pelarut atau kemungkinan interaksi antarpartikel di dalam suspensi.

4.1.3 *Fourier Transform Infrared (FTIR)*

Analisis menggunakan FTIR dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui gugus-gugus fungsional dari CDs dan komposit baik sebelum fotokatalis maupun setelah fotokatalis. *Infrared Spectroscopy* menyimpulkan keberadaan gugus fungsional kimia melalui penyerapan radiasi IR pada berbagai frekuensi. Jenis instrumen IR yang paling banyak digunakan adalah *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) karena mudah digunakan, rasio sinyal ke derau yang tinggi serta biaya yang relatif rendah. FTIR memungkinkan pengukuran semua panjang gelombang secara bersamaan sehingga mampu mengumpulkan seluruh informasi spektrum pada satu waktu (Omidi *et al.*, 2017).

Analisis FTIR untuk material CDs dan komposit dilakukan pada panjang gelombang 400-4000 cm^{-1} . Hasil dari analisis yaitu berupa puncak pita serapan pada spektrum FTIR. Perbandingan spektrum hasil analisis FTIR CDs dan komposit sebelum fotokatalis ditampilkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Perbandingan Spektrum FTIR CDs dan Komposit Sebelum Fotokatalisis

Spektrum yang dihasilkan menunjukkan pita lebar pada 3200-3500 cm^{-1} yang dikaitkan dengan vibrasi peregangan O-H dari air yang teradsorpsi di permukaan (Lin *et al.*, 2026). Pita absorbansi pada 3300 dan 2827 cm^{-1} menunjukkan terbentuknya gugus amina primer alifatik N-H serta O-H. Pita pada 1635 cm^{-1} menunjukkan keberadaan gugus karbonil (C=O), ikatan C=C aromatik atau tekukan H-O-H dari air teradsorpsi. Selanjutnya, pita 1406 cm^{-1} dan 1095 cm^{-1} mengindikasikan keberadaan gugus permukaan CDs seperti C=C, C-N, dan C-O, yang menandakan adanya gugus beroksigen/bernitrogen pada permukaan material (Hazarika & Karak, 2016). Pada daerah bilangan gelombang rendah, pita 561 cm^{-1} berkaitan dengan vibrasi Fe-O dan Ti-O/Ti-O-Ti, sehingga mengonfirmasi keberadaan fase Fe_3O_4 dan TiO_2 dalam komposit (Roacho-p *et al.*, 2020).

Perbandingan antar variasi komposit, sampel yang mengandung CDs memperlihatkan karakter serapan berbasis karbon-oksigen yang lebih menonjol. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan komposisi CDs dapat meningkatkan jumlah gugus fungsional pada permukaan material. Dengan demikian, spektrum FTIR mengindikasikan bahwa material yang disintesis

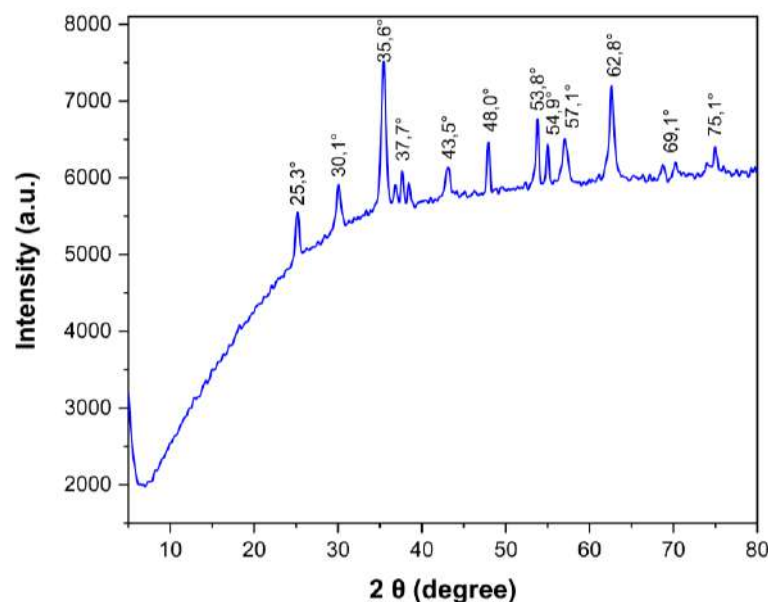
mengandung gugus aktif khas CDs serta ikatan logam–oksigen khas $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$, yang menunjukkan keberhasilan pembentukan komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ Terdekorasi CDs.

Setelah proses fotokatalisis, kurva menunjukkan pita khas komposit pada daerah Fe-O, Ti-O, dan Ti-O-Ti, sehingga struktur utama $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ tetap terdeteksi. Namun, adanya perubahan pada daerah sekitar $1600\text{--}1515\text{ cm}^{-1}$, $1450\text{--}1360\text{ cm}^{-1}$, $1180\text{--}1110\text{ cm}^{-1}$, dan sekitar $2920\text{--}2850\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya kontribusi gugus fungsi yang berkaitan dengan struktur *Methyl Orange*. Pita pada daerah $1600\text{--}1515\text{ cm}^{-1}$ dapat dikaitkan dengan gugus azo $\text{N}=\text{N}$ dan $\text{C}=\text{C}$ aromatik, sedangkan daerah $1450\text{--}1360\text{ cm}^{-1}$ berhubungan dengan C-N atau vibrasi aromatik. Selain itu, pita pada daerah $1180\text{--}1110\text{ cm}^{-1}$ berkaitan dengan gugus sulfonat $\text{S}=\text{O}/\text{SO}_3^-$, sedangkan daerah $2920\text{--}2850\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan C-H alifatik dari gugus metil pada struktur dimetilamino MO. Perubahan pita-pita tersebut pada spektrum setelah fotokatalisis mengindikasikan bahwa molekul MO atau produk intermediet hasil degradasinya masih berinteraksi dan teradsorpsi pada permukaan komposit. Dengan demikian, hasil FTIR mendukung bahwa $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CDs}$ 6% tidak hanya mempertahankan komponen penyusun utamanya, tetapi juga mampu berinteraksi dengan MO melalui gugus azo, aromatik, dimetilamino, dan sulfonat selama proses adsorpsi–fotokatalisis berlangsung (Nakamura *et al.*, 2003).

4.1.4 X-Ray Diffraction (XRD)

Pola puncak yang dihasilkan dari pengujian XRD digunakan untuk menganalisis kristalinitas dan fasa kristal pada komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ Terdekorasi CDs. Tujuan utama dari pengujian XRD ini adalah untuk mengevaluasi keberhasilan proses sintesis material dan komposit. Proses *coupling* TiO_2 dan Fe_3O_4 yang kemudian di dekorasi dengan CDs melalui *microwave irradiation* diharapkan mampu menciptakan katalis dengan sifat yang optimal. Pola difraksi yang dihasilkan dalam pengujian XRD dianalisis secara kuantitatif sehingga dapat memberikan informasi detail mengenai struktur kristal dan komposisi mineral pada sampel. Informasi yang dihasilkan dari XRD kemudian dapat digunakan untuk mengkonfirmasi keberhasilan *coupling*

material sehingga menjadi komposit. Pola difraktogram yang dihasilkan pada analisis XRD dapat dilihat pada Gambar 4.4 berikut.



Gambar 4.4 Hasil Analisis XRD Komposit

Gambar 4.4 menunjukkan pola XRD komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ Terdekorasi CDs. Pola difraksi tersebut menunjukkan beberapa puncak difraksi utama pada sudut $2\theta = 25,3^\circ; 30,1^\circ; 35,6^\circ; 37,7^\circ; 43,5^\circ; 48,0^\circ; 53,8^\circ; 54,9^\circ; 57,1^\circ; 62,8^\circ; 69,1^\circ; \text{ dan } 75,1^\circ$. Keberadaan puncak-puncak tersebut menunjukkan bahwa sampel memiliki struktur kristalin campuran yang berasal dari fase TiO_2 anatase dan Fe_3O_4 magnetit. Kontribusi CDs terlihat dari latar belakang difraksi yang relatif melebar terutama pada daerah sudut rendah hingga menengah (Pal *et al.*, 2020).

Puncak 2θ pada $25,3^\circ$ merupakan puncak khas TiO_2 fasa anatase yang berasosiasi dengan bidang kristal (101) (Hazarika & Karak, 2016). Selain itu, puncak pada $37,7^\circ, 48,0^\circ, 53,8^\circ, 54,9^\circ, 62,8^\circ, 69,1^\circ, \text{ dan } 75,1^\circ$ juga dapat dikaitkan dengan bidang kristal anatase TiO_2 , masing-masing mendekati bidang (004), (200), (105), (211), (204), (116), dan (215) (Dharmendra *et al.*, 2022; Karagianni *et al.*, 2026). Selain itu, karakterisasi TiO_2 menggunakan XRD juga menunjukkan bahwa puncak kuat pada sekitar 25° dan 48° mengindikasikan

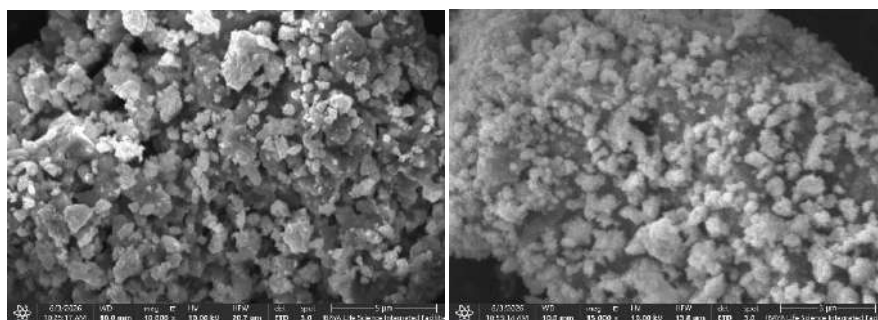
keberadaan TiO_2 fasa anatase, sedangkan puncak rutil umumnya muncul kuat pada sekitar 27° , 36° , dan 55° . Pola XRD, tidak terlihat puncak dominan pada sekitar $27,4^\circ$, sehingga fasa rutil kemungkinan tidak dominan atau tidak terbentuk secara signifikan (Thamaphat *et al.*, 2008).

Puncak 2θ pada $2\theta = 30,1^\circ$; $35,6^\circ$; $43,5^\circ$; $57,1^\circ$; dan $62,8^\circ$ menunjukkan karakteristik fasa Fe_3O_4 magnetite. Puncak-puncak tersebut secara umum dapat dikaitkan dengan bidang kristal (220), (311), (400), (511), dan (440) dari struktur spinel kubik Fe_3O_4 (Aghamali *et al.*, 2018). Literatur $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CDs}$ melaporkan bahwa Fe_3O_4 memiliki puncak difraksi pada $30,16^\circ$, $35,57^\circ$, $43,14^\circ$, $57,15^\circ$, dan $62,85^\circ$, masing-masing untuk bidang (220), (311), (400), (511), dan (440) (Arief & Muldarisnur, 2024).

Pada pola XRD juga terlihat adanya latar belakang difraksi yang relatif melebar pada daerah sudut rendah hingga menengah. Hal ini dapat dikaitkan dengan keberadaan carbon dots yang umumnya memiliki struktur *amorf* atau semi-kristalin. Puncak khas CDs di sekitar 20° – 26° berpotensi tumpang tindih dengan puncak utama TiO_2 anatase pada $25,3^\circ$, sehingga keberadaan CDs tidak selalu tampak sebagai puncak tajam yang terpisah. Dengan demikian, pola XRD menunjukkan bahwa komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekorasi CDs telah berhasil terbentuk, ditandai dengan keberadaan fasa anatase TiO_2 , magnetite Fe_3O_4 , serta kontribusi karbon dari CDs.

4.1.5 Scanning Electron Microscopy- Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX) dan Mapping

Karakterisasi Scanning Electron Microscopy (SEM) dilakukan untuk mengetahui morfologi komposit katalis yang telah disintesis. Hasil analisis SEM sampel katalis $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekorasi CDs dengan perbesaran 10.000x dan 15.000x dapat dilihat pada Gambar 4.5 berikut



Gambar 4.5 Hasil Uji SEM Komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ decorated CDs (a) 10.000x (b) 15.000x

Berdasarkan citra SEM pada perbesaran $10.000\times$ dengan skala $10\ \mu\text{m}$, komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekori CD menunjukkan morfologi berupa partikel-partikel tidak beraturan yang saling beraglomerasi. Permukaan sampel tampak kasar, granular, dan membentuk gumpalan-gumpalan partikel dengan ukuran yang tidak seragam. Struktur seperti ini umum dijumpai pada material komposit berbasis nanopartikel oksida logam, terutama karena partikel berukuran kecil memiliki energi permukaan tinggi sehingga cenderung bergabung membentuk agregat. Pada Fe_3O_4 , kecenderungan aglomerasi juga dapat diperkuat oleh interaksi magnetik antarpartikel. Literatur melaporkan bahwa nanopartikel magnetite Fe_3O_4 memiliki kecenderungan membentuk agregat akibat energi permukaan yang tinggi (Qureshi *et al.*, 2022).

Morfologi yang tampak menggumpal pada citra SEM mengindikasikan bahwa partikel TiO_2 dan Fe_3O_4 telah membentuk sistem komposit, di mana partikel-partikel kecil terdistribusi dan menempel pada permukaan agregat yang lebih besar (Kaur *et al.*, 2023). Selain itu, terlihat adanya rongga atau celah antarpartikel yang terbentuk akibat susunan aglomerat yang tidak rapat sempurna. Celah tersebut dapat memberikan area permukaan yang lebih besar dan menyediakan lebih banyak situs aktif pada permukaan material. Dalam aplikasi fotokatalis, permukaan kasar dan struktur berpori dapat menguntungkan karena meningkatkan kontak antara material dengan molekul target, misalnya zat warna atau polutan organik dalam larutan. Secara umum, morfologi dan karakter permukaan merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi performa material fotokatalis (Ganguli *et al.*, 2022).

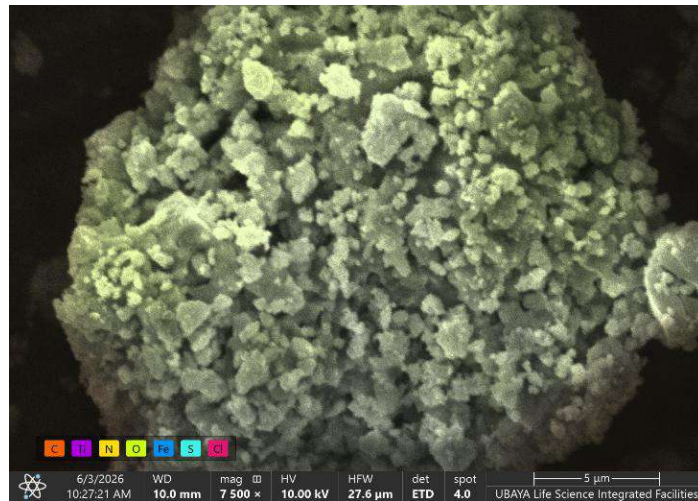
Morfologi komposit menunjukkan terbentuknya aglomerasi partikel dengan permukaan yang tidak seragam. Keberadaan CDs pada komposit

ditunjukkan dengan titik-titik kecil yang terdistribusi di permukaan komposit. Identifikasi CDs melalui citra SEM lebih tepat ditinjau sebagai bagian dari morfologi permukaan komposit, bukan sebagai partikel individual yang mudah dibedakan. Secara fungsional, penambahan CDs pada komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ berpotensi meningkatkan kinerja fotokatalitik karena CDs dapat berperan sebagai media transfer elektron dan akseptor elektron. Karakter ini membantu menekan rekombinasi pasangan elektron-hole pada TiO_2 , sehingga meningkatkan efisiensi pemanfaatan cahaya. Literatur menyebutkan bahwa carbon quantum dots memiliki kemampuan sebagai *electron-transporting* dan *electron-accepting* material yang dapat membantu pemisahan pasangan elektron-hole pada sistem fotokatalis (Kaur *et al.*, 2023).

Analisis EDX dilakukan untuk mengetahui komposisi unsur kimia pada permukaan suatu sampel. Mapping dalam analisis EDX berfungsi untuk melihat sebaran atau distribusi unsur-unsur tersebut pada suatu area sampel. Pada komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekori CDs, EDX dan mapping digunakan untuk mengkonfirmasi keberadaan unsur utama seperti Ti sebagai konfirmasi keberadaan TiO_2 , Fe untuk konfirmasi keberadaan Fe_3O_4 , C untuk karbon dot dan O yang berasal dari TiO_2 dan Fe_3O_4 . Hasil EDX dan mapping komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekori CDs dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.6 berikut.

Tabel 4.1 Hasil Analisis EDX Komposit

Element	Line	At. %	Wt. %
C	K	31.2	18.9
N	K	10.6	7.5
O	K	43.3	35.1
S	K	0.3	0.5
Cl	K	1.1	1.9
Ti	K	5.5	13.4
Fe	K	8.0	22.7

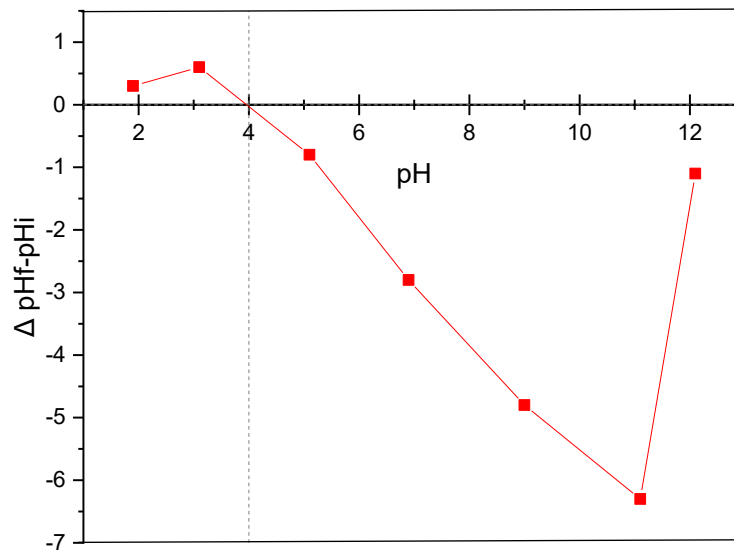


Gambar 4.6 Hasil Analisis EDX Overlay Mapping

Gambar SEM-EDX mapping menunjukkan distribusi unsur C, Ti, O, dan Fe pada permukaan komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ decorated CDs. Keberadaan unsur Ti dan O mengindikasikan keberadaan TiO_2 , sedangkan Fe dan O menunjukkan kontribusi Fe_3O_4 . Sementara itu, unsur C berkaitan dengan keberadaan carbon dots/CDs pada komposit. Hasil mapping menunjukkan bahwa unsur-unsur penyusun tersebar pada permukaan sampel, sehingga mendukung keberhasilan pembentukan komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekorasi CDs.

4.2 Pengujian *Point of zero charge* (pH_{pzc})

Point of zero charge (pH_{pzc}) merupakan parameter penting untuk menentukan pH pada katalis memiliki muatan positif atau negatif. pH_{pzc} didefinisikan sebagai pH larutan dimana larutan dengan muatan situs permukaan positif sama dengan muatan situs negatif. Yaitu, muatan permukaan adsorben bernilai nol. Muatan permukaan negatif pada $\text{pH} > \text{pH}_{\text{pzc}}$ dan positif pada $\text{pH} < \text{pH}_{\text{pzc}}$. Gugus fungsional yang dapat terionisasi pada katalis seperti NH_2 dan OH dapat memperoleh atau kehilangan proton sehingga menghasilkan muatan yang bervariasi dengan pH (Kragović *et al.*, 2019). Grafik hasil pengujian pH_{pzc} dapat dilihat pada Gambar 4.7 berikut.



Gambar 4.7 Grafik Hasil pH_{pzc}

Berdasarkan kurva pH_{pzc} , titik potong ΔpH ($pH_i - pH_f$) = 0 menunjukkan bahwa nilai pH_{pzc} komposit berada pada kisaran pH 3,8–4,0. Nilai ini menandakan bahwa pada pH di bawah pH_{pzc} permukaan komposit cenderung bermuatan positif, sedangkan pada pH di atas pH_{pzc} permukaan menjadi bermuatan negatif. Hasil ini relevan terhadap perilaku MO, karena MO merupakan zat warna azo anionik dengan pKa sekitar 3,4 pada pH di atas pKa, MO dominan berada dalam bentuk anion. Oleh karena itu, pada kondisi sedikit asam, terutama di sekitar pH 3,5–4,0, terjadi kondisi yang menguntungkan bagi interaksi elektrostatik antara permukaan komposit yang masih positif dengan MO yang bermuatan negatif. Interaksi ini mendukung adsorpsi awal MO pada permukaan komposit dan selanjutnya dapat meningkatkan efisiensi fotodegradasi. Sebaliknya, pada pH yang lebih tinggi dari pH_{pzc} , permukaan komposit dan MO sama-sama bermuatan negatif sehingga terjadi tolakan elektrostatik yang dapat menurunkan kemampuan adsorpsi (Iwuozor *et al.*, 2021). Dengan demikian, nilai pH_{pzc} komposit menunjukkan bahwa material ini secara teoritis lebih efektif untuk penghilangan MO pada suasana asam dibandingkan suasana netral atau basa.

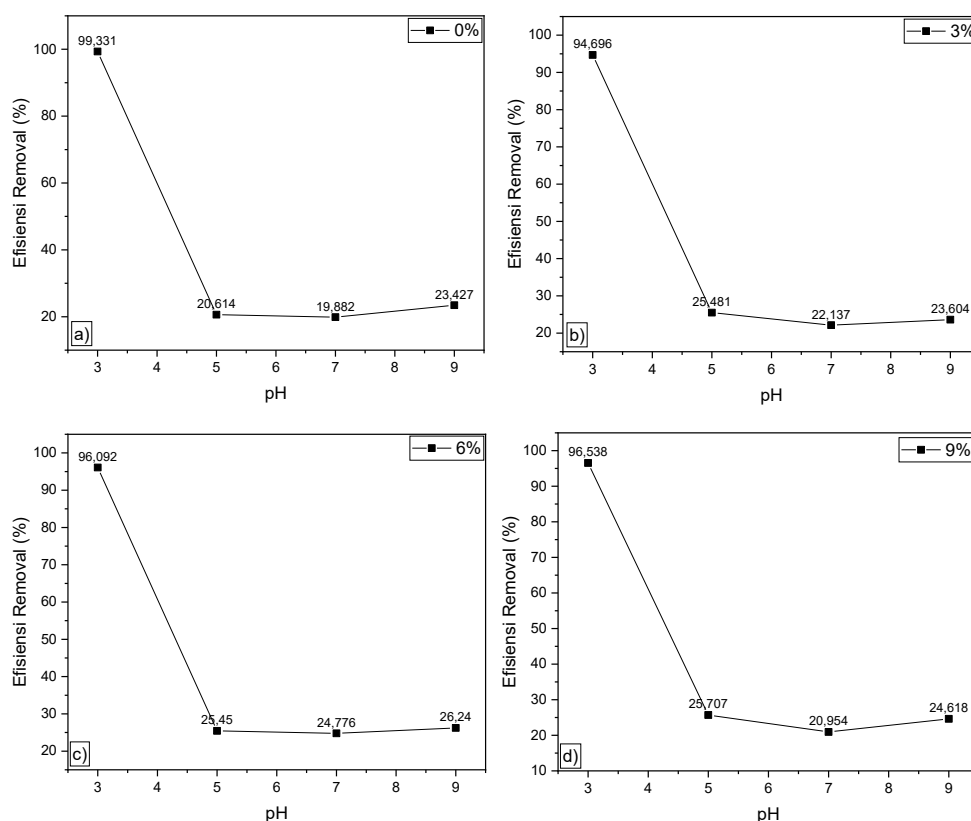
4.3 Uji Pengaruh pH dan Adsorpsi-Desorpsi pada Efektivitas Katalis

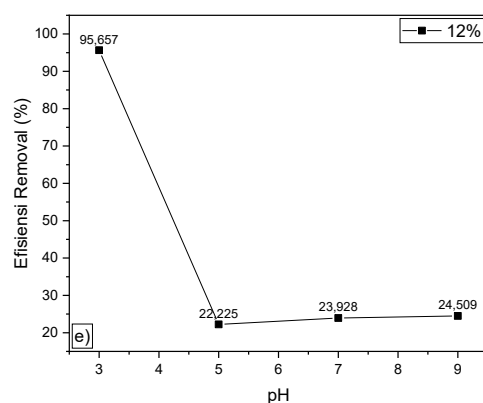
Uji pengaruh pH pada efektivitas katalis dilakukan dengan menganalisis efisiensi penyisihan MO pada pH 3, 5, 7 dan 9 selama 30 menit dalam kondisi gelap.

Hasil uji pH akan digunakan sebagai acuan dalam penentuan variasi pH pada proses fotokatalis. Waktu adsorpsi desorpsi yang digunakan pada proses fotokatalis juga ditentukan melalui tahap ini. Uji pengaruh waktu adsorpsi desorpsi dilakukan dengan waktu 30, 60, 90 dan 120 menit pada kondisi gelap. Konsentrasi MO yang digunakan adalah 120 ppm dengan dosis katalis sebanyak 0,02 g/L serta rasio CDs yang divariasikan.

4.4.1 Uji Pengaruh pH awal

Uji pengaruh pH awal digunakan untuk menentukan kondisi yang akan digunakan pada proses uji variasi. Pada uji pH ini, dosis katalis sebesar 0,02 g/L dengan konsentrasi MO sebesar 120 ppm. Proses uji berlangsung dalam kondisi gelap selama 30 menit dengan kecepatan pengadukan konstan dan pada suhu ruang. Uji pH dilakukan pada pH 3, 5, 7 dan 9 bagi masing-masing rasio CDs. Hasil analisis awal pH yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 4.11 berikut.



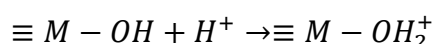


Gambar 4.8 Grafik Pengujian pH Awal (a) 0%; (b) 3%; (c) 6%; (d) 9%; dan (e) 12%

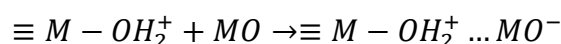
Secara keseluruhan efisiensi penyisihan MO oleh komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekori CDs pada pH 3 mencapai nilai lebih dari 90%. Nilai ini menunjukkan bahwa pada kondisi asam, permukaan komposit sangat mendukung untuk melakukan proses adsorpsi terhadap zat warna MO.

Permukaan oksida logam seperti TiO_2 dan Fe_3O_4 cenderung mengalami protonasi pada pH rendah secara kimiawi. Permukaan material akan bermuatan positif ketika pH larutan lebih rendah dari nilai point of zero charge (pH_{pzc}). Kondisi ini meningkatkan gaya elektrostatis terhadap MO sebagai zat warna anionik dengan gugus sulfonat bermuatan negatif ($-\text{SO}_3^-$) (Raji *et al.*, 2022).

Mekanisme interaksinya dapat dijelaskan sebagai berikut



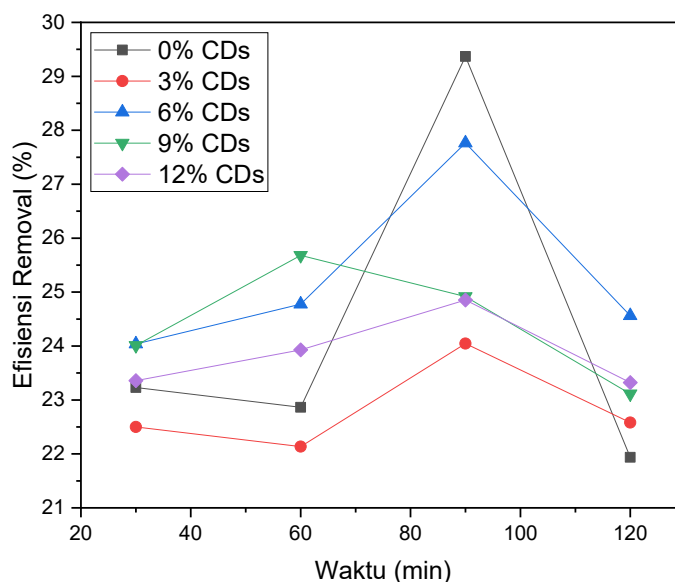
Kemudian permukaan bermuatan positif menarik MO bermuatan negatif :



Dengan demikian, adsorpsi yang sangat tinggi pada Ph 3 terutama disebabkan oleh tarikan elektrostatis kuat antara permukaan komposit yang terprotonasi dan molekul MO yang bersifat anionik. Hal ini sejalan dengan literatur yang melaporkan bahwa MO sebagai molekul anionik menunjukkan efisiensi adsorpsi yang lebih tinggi pada pH rendah sehingga menguntungkan proses degradasi fotokatalitik (Parsafard & Shabani, 2025).

4.4.2 Uji Pengaruh Adsorpsi Desorpsi

Proses adsorpsi desorpsi sebelum fotokatalitik dilakukan dengan tujuan untuk menciptakan kondisi awal reaksi setimbang sehingga penurunan konsentrasi zat warna saat penyinaran benar-benar dapat dikaitkan dengan proses fotokatalis. Setelah dilakukan proses adsorpsi desorpsi proses fotokatalis dapat terjadi bukan karena zat warna menempel di permukaan katalis. Uji pengaruh adsorpsi desorpsi dilakukan pada kondisi gelap pada waktu 30, 60, 90 dan 120 menit. Adsorpsi desorpsi dilakukan pada semua rasio komposit dengan dosis katalis sebesar 0,02 g/L dan konsentrasi MO sebesar 120 ppm. Grafik hasil pengujian adsorpsi desorpsi dapat dilihat pada grafik



Gambar 4. 9 Hasil Uji Adsorpsi Desorpsi

Berdasarkan hasil uji adsorpsi desorpsi, waktu terbaik untuk adsorpsi desorpsi adalah 90 menit. Hal ini menunjukkan bahwa pada menit ke-90 jumlah MO yang teradsorpsi pada permukaan katalis sudah mencapai kondisi maksimum. Setelah itu, sebagian molekul yang telah terikat mulai terlepas kembali ke larutan (desorpsi) sehingga efisiensi degradasi menurun.

Molekul polutan MO mulai menempel di permukaan katalis pada awal kontak, namun sebagian molekul yang sudah menempel dapat lepas secara bersamaan. Laju molekul yang menempel dan lepas menjadi setimbang seiring

dengan waktu sehingga kondisi ini disebut kondisi kesetimbangan adsorpsi desorpsi. Penurunan konsentrasi saat fotokatalis dapat terjadi secara simultan dengan efek adsorpsi sehingga tahap ini penting untuk dilakukan agar nilai awal fotokatalis lebih valid.

Permukaan katalis perlu berada pada kondisi yang stabil sebelum penyinaran. Tahap adsorpsi gelap membuat permukaan katalis sudah terisi oleh molekul polutan pada kondisi tertentu. Fotokatalis heterogen terjadi pada atau dekat permukaan katalis, sehingga jumlah polutan yang teradsorpsi dapat memengaruhi laju reaksi. Studi tentang peran adsorpsi dalam fotokatalisis juga menekankan bahwa adsorpsi polutan pada permukaan katalis berpengaruh terhadap interpretasi aktivitas fotokatalitik (Kusiak-nejman *et al.*, 2021).

4.4 Efektivitas Proses Fotokatalitik dalam Penyisihan *Methyl Orange*

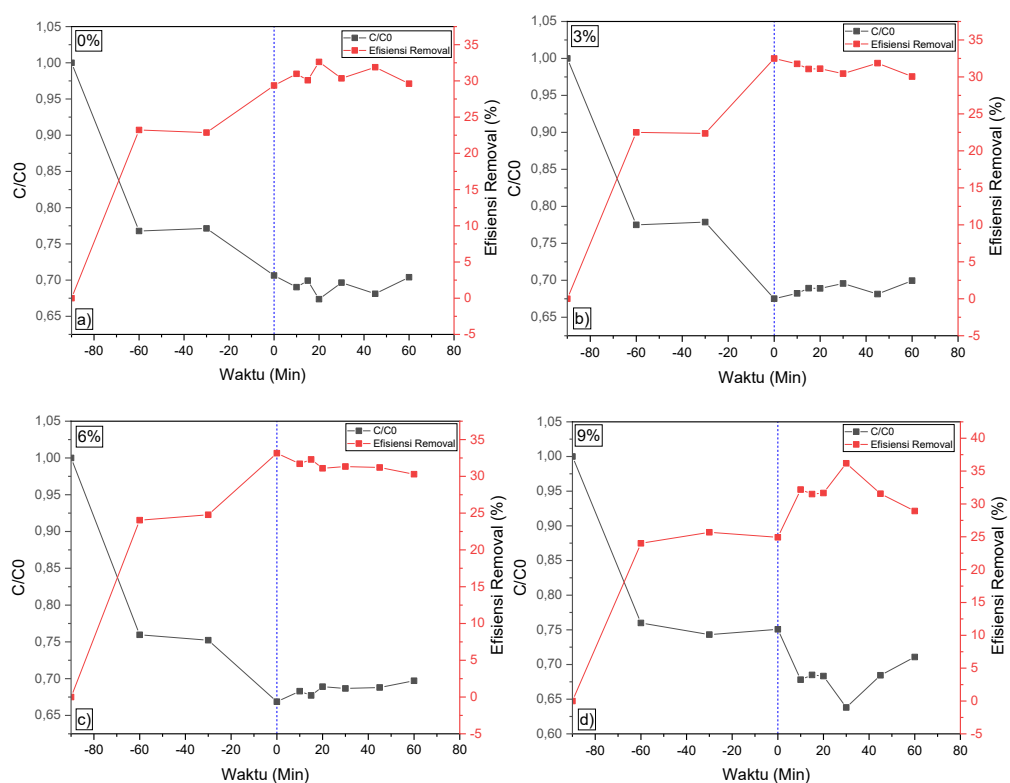
Pada proses fotokatalitik menggunakan katalis berupa komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{TiO}_2$ terdekorasi RH-CDs dengan rasio CDs terhadap komposit sebesar 0%, 3%, 6%, 9% dan 12% yang dikontakkan dengan limbah artifisial MO dengan waktu adsorpsi desorpsi yang di uji sebelum proses fotokatalis pada waktu 30, 60, dan 90 menit. pH yang digunakan merupakan hasil uji pra-fotokatalis. Proses fotokatalis dilakukan dengan memvariasikan rasio terhadap waktu fotokatalis 10, 15, 20, 30, 45 dan 60 menit. Uji pengaruh pH dilakukan pada waktu fotokatalis 45 menit dengan waktu adsorpsi desorpsi selama 90 menit yang dianalisis menggunakan katalis dengan rasio CDs 0% dan 6%. Uji pengaruh konsentrasi MO dilakukan pada variasi 40, 60, 80, 100 dan 120 ppm dengan dosis katalis sebesar 0,02 g/L. Uji pengaruh dosis katalis dilakukan pada dosis 0,02 g/L; 0,04 g/L; 0,06 g/L; 0,08 g/L dan 0,1 g/L.

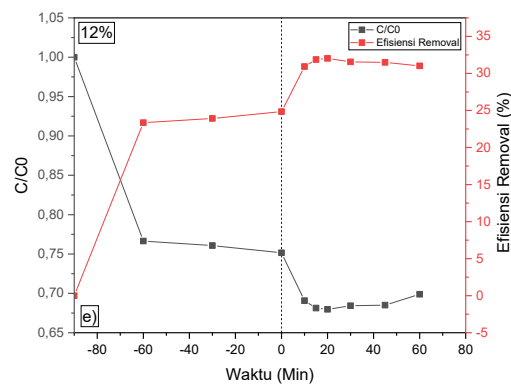
4.5.1 Uji Pengaruh Rasio CDs dalam Komposit pada Proses Fotokatalis MO

Pengaruh rasio CDs diuji sebagai fungsi waktu dengan melakukan analisis terhadap nilai C/C_0 , efisiensi removal dan nilai q_e . Analisis pengaruh rasio CDs dalam komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekorasi CDs dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan karbon dot pada kinerja fotokatalitik material terhadap penyisihan MO. Variasi rasio CDs menjadi parameter penting

karena keberadaan CDs dapat berperan dalam meningkatkan penyerapan cahaya, memperbaiki transfer elektron, serta menekan rekombinasi pasangan elektron-hole pada TiO_2 . Namun, jumlah CDs yang terlalu tinggi juga berpotensi menutupi situs aktif katalis dan menghambat kontak antara MO dengan permukaan $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$. Oleh karena itu, pengujian ini dilakukan dengan membandingkan beberapa rasio CDs, yaitu 0%, 3%, 6%, 9%, dan 12%, untuk mengevaluasi perubahan nilai C/C_0 dan efisiensi removal selama proses adsorpsi-desorpsi serta fotokatalisis. Hasil dari pengujian ini digunakan sebagai dasar dalam menentukan rasio komposit yang paling representatif untuk pengujian parameter lanjutan, seperti pengaruh dosis katalis dan konsentrasi awal MO.

Pengujian pengaruh rasio CDs dilakukan pada konsentrasi MO 120 ppm, dosis katalis sebesar 0,02g/L. Analisis pengaruh rasio CDs pada komposit sebagai fungsi waktu digambarkan pada Gambar 4. 15.





Gambar 4.10 Grafik Pengaruh Rasio CDs (a) 0%; (b) 3%; (c) 6%; (d) 9%; dan (e) 12%

Berdasarkan Gambar 4.15a, penurunan nilai C/C_0 cukup tajam pada tahap adsorpsi desorpsi dari sekitar 1,00 menjadi sekitar 0,76–0,77, kemudian mendekati 0,70 pada awal penyinaran pada rasio 0%. Efisiensi removal meningkat dari 0% menjadi sekitar 22–30% sebelum dan saat awal penyinaran. Setelah proses fotokatalitik berlangsung, C/C_0 cenderung berfluktuasi di sekitar 0,68–0,70, dengan efisiensi removal akhir sekitar 30–33%.

Hasil analisis yang telah dilakukan menunjukkan bahwa pada rasio CDs 0%, penyisihan MO lebih banyak terjadi pada tahap awal melalui adsorpsi. Kontribusi fotokatalitik setelah penyinaran relatif terbatas. Rasio 0% merupakan sampel tanpa penambahan CDs sehingga material ini diposisikan sebagai kontrol untuk melihat pengaruh penambahan CDs dalam aktivitas fotokatalitik. Keterbatasan aktivitas pada rasio ini dapat berkaitan dengan karakter dasar TiO_2 yang memiliki *band gap* cukup lebar dan kecenderungan rekombinasi pasangan elektron hole. Pada fotokatalisis TiO_2 , penyinaran menghasilkan pasangan elektron hole yang kemudian membentuk spesies reaktif seperti $\cdot\text{OH}$ dan $\cdot\text{O}_2^-$, tetapi rekombinasi elektron hole dapat menurunkan efisiensi fotokatalitik (Abdullah et al., 2019).

Berdasarkan Gambar 4.15b dapat dilihat bahwa rasio 3% memiliki pola yang hampir sama dengan rasio 0%. Nilai C/C_0 turun dari 1,00 menjadi sekitar 0,77–0,78 pada tahap gelap, lalu turun lagi hingga sekitar 0,67 di sekitar awal penyinaran. Efisiensi removal mencapai sekitar 30–33%. Namun setelah penyinaran, C/C_0 terlihat sedikit naik dan stabil di kisaran 0,68–0,70, sehingga efisiensi removal sedikit menurun atau berfluktuasi. Pola ini menunjukkan bahwa penambahan CDs sebesar 3% belum memberikan peningkatan

fotokatalitik yang signifikan. Hal ini dapat disebabkan karena jumlah CDs pada rasio ini belum cukup optimal untuk memperbaiki transfer elektron atau memperluas penyerapan cahaya secara efektif. Fluktuasi setelah penyinaran juga dapat menunjukkan adanya kesetimbangan adsorpsi desorpsi dinamis, di mana sebagian MO atau produk antara dapat terlepas kembali ke larutan. Karena proses dilakukan pada pH 7, gaya tolak elektrostatik antara permukaan katalis yang negatif dan MO anionik juga dapat membuat adsorpsi tidak stabil sepenuhnya.

Gambar 4.15c menunjukkan bahwa pada rasio 6%, C/C_0 mengalami penurunan dari 1,00 ke sekitar 0,75 pada tahap adsorpsi desorpsi. Setelah proses fotokatalitik, C/C_0 berada pada kisaran 0,67. Efisiensi removal cenderung stabil ketika proses fotokatalitik berkisar 30-32% dan tidak menunjukkan peningkatan yang sangat jauh jika dibandingkan dengan rasio 3%. Rasio 6% mulai memberikan sistem yang lebih stabil akibat penambahan CDs yang dapat membantu meningkatkan pemisahan muatan dan menekan rekombinasi *elektron hole*.

Gambar 4.15d menunjukkan pola yang paling menarik jika dibandingkan dengan rasio sebelumnya. Pada tahap adsorpsi desorpsi, nilai C/C_0 turun dari 1,00 menjadi 0,75 dan pada proses fotokatalik nilai C/C_0 turun hingga 0,64. Efisiensi removal pada rasio ini mencapai 37% yang menunjukkan bahwa rasio 9% memiliki kontribusi fotokatalitik yang lebih kuat. Peningkatan ini dapat dijelaskan oleh jumlah CDs yang lebih sesuai untuk membantu transfer elektron dan menekan rekombinasi *electron hole* sehingga hasil eksitasi lebih mudah berpindah. Dengan demikian, pembentukan spesies reaktif seperti $\bullet OH$, $\bullet OH_2^-$, dan h^+ menjadi lebih efektif untuk mendegradasi MO (Shafique et al., 2022).

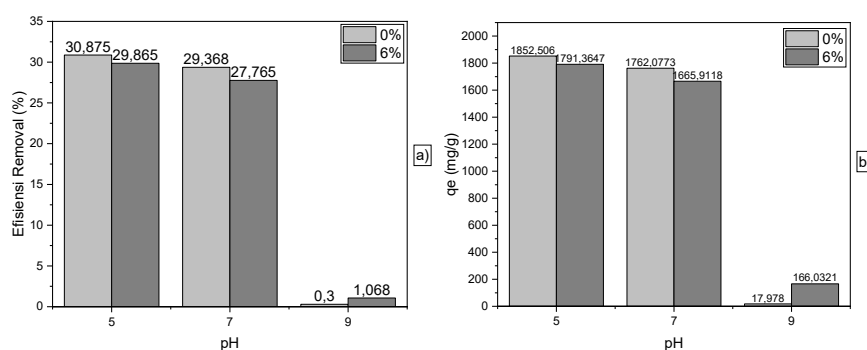
Gambar 4.15e menunjukkan pada rasio 12% penurunan C/C_0 pada tahap adsorpsi desorpsi dari 1,00 menjadi 0,76 dan setelah penyinaran nilai C/C_0 turun ke 0,68 kemudian cenderung stabil. Rasio 12% memberikan efisiensi yang stabil namun tidak lebih tinggi jika dibandingkan dengan rasio 9%. Penambahan CDs yang lebih tinggi tidak selalu menghasilkan aktivitas fotokatalitik yang lebih baik. Adanya CDs pada komposit yang terlalu banyak

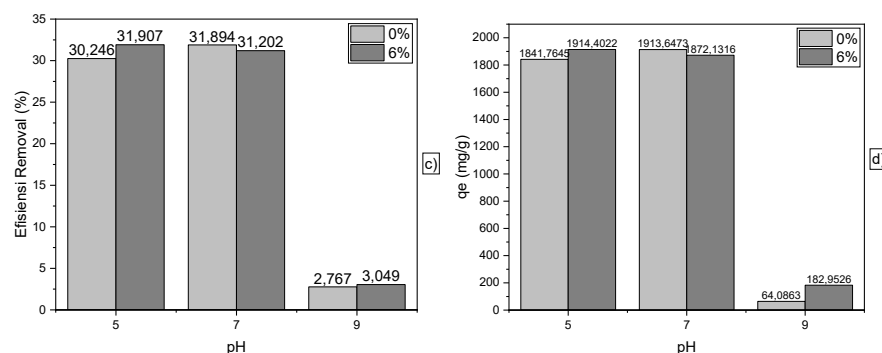
dapat menutup permukaan aktif $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ sehingga kontak langsung antara MO dan situs aktif berkurang. Selain itu jumlah karbon yang terlalu tinggi dapat menghalangi cahaya sehingga pembentukan spesies reaktif tidak dapat terbentuk secara maksimal.

Performa fotokatalitik secara umum pada analisis pengaruh rasio CDs pada komposit masih dipengaruhi oleh kondisi operasi, terutama konsentrasi awal MO yang tinggi sebesar 120 ppm dan dosis katalis yang rendah sebesar 0,02 g/L. Konsentrasi MO yang tinggi dapat mengurangi penetrasi cahaya ke permukaan katalis dan menurunkan efektivitas pembentukan radikal aktif. Oleh karena itu, rasio 9% dapat dianggap sebagai komposisi yang memberikan peningkatan fotokatalitik paling baik berdasarkan efisiensi maksimum.

4.5.2 Uji Pengaruh pH pada Proses Fotokatalis

Analisis pengaruh pH dilakukan dengan menggunakan dosis katalis sebesar 0,02 g/L dengan konsentrasi MO 120 ppm. Waktu adsorpsi desorpsi selama 90 menit dan waktu penyinaran selama 45 menit. Analisis pengaruh pH ini dilakukan pada rasio CDs 0% dan 6% serta masing-masing dilakukan pada pH 5, 7 dan 9. pH yang digunakan berada dibawah nilai pH_{pzc} material komposit yang memiliki nilai pZ sebesar 3-4. Hal ini dikarenakan ketika analisis dilakukan pada pH, hasil persentase penyisihan menunjukkan nilai yang sangat tinggi hingga 90% pada waktu yang relatif singkat yaitu 30 menit. Perubahan kondisi pH ini dimaksudkan untuk menekan efisiensi penyisihan di awal sehingga hasil dapat dianalisis seiring dengan waktu. Selain itu, kondisi aktual limbah diharapkan mendekati netral sehingga penelitian ini dimaksudkan untuk memberikan gambaran hasil apabila analisis dilakukan pada rentang pH netral. Grafik analisis pengaruh pH dapat dilihat pada Gambar 4.16 berikut.





Gambar 4. 11 Hasil Uji Pengaruh Ph (a) Efisiensi Removal Adsorpsi Desorpsi; (b) Kapasitas Adsorpsi ; (c) Efisiensi Removal Fotokatalitik 45 Menit; dan (d) Kapasitas Fotokatalitik

Hasil analisis pengaruh pH pada proses penyisihan MO menggunakan katalis $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ yang didekorasi CDs menunjukkan pada pH larutan memberikan pengaruh yang signifikan. Efisiensi penyisihan pada pH 5 dan 7 menunjukkan nilai yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan pH 9 pada tahap adsorpsi desorpsi. Nilai efisiensi penyisihan sebesar 30,875% untuk variasi 0% dan 29,865% untuk variasi 6% pada pH 5, sedangkan nilai efisiensi penyisihan sebesar 29,368% untuk variasi 0% dan 27,765% untuk variasi 6%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa MO masih dapat berinteraksi dengan permukaan katalis pada kondisi mendekati asam hingga netral. Penurunan efisiensi dan kapasitas adsorpsi sangat besar pada pH 9. Penurunan signifikan ini menunjukkan bahwa pada kondisi basa kuat kurang mendukung proses kontak antara MO dan permukaan katalis.

Proses fotokatalitik yang berjalan selama 45 menit menunjukkan hasil yang relatif baik pada pH 5 dan 7, namun menunjukkan penurunan yang cukup besar pada pH 9. Pola tersebut terjadi pada kedua rasio CDs baik 0% maupun 6%. Perbedaan hasil tersebut berkaitan dengan muatan permukaan katalis dan bentuk spesies MO dalam larutan. MO merupakan zat warna azo anionik yang memiliki gugus sulfonat, sehingga dalam air cenderung berada sebagai spesies bermuatan negatif.

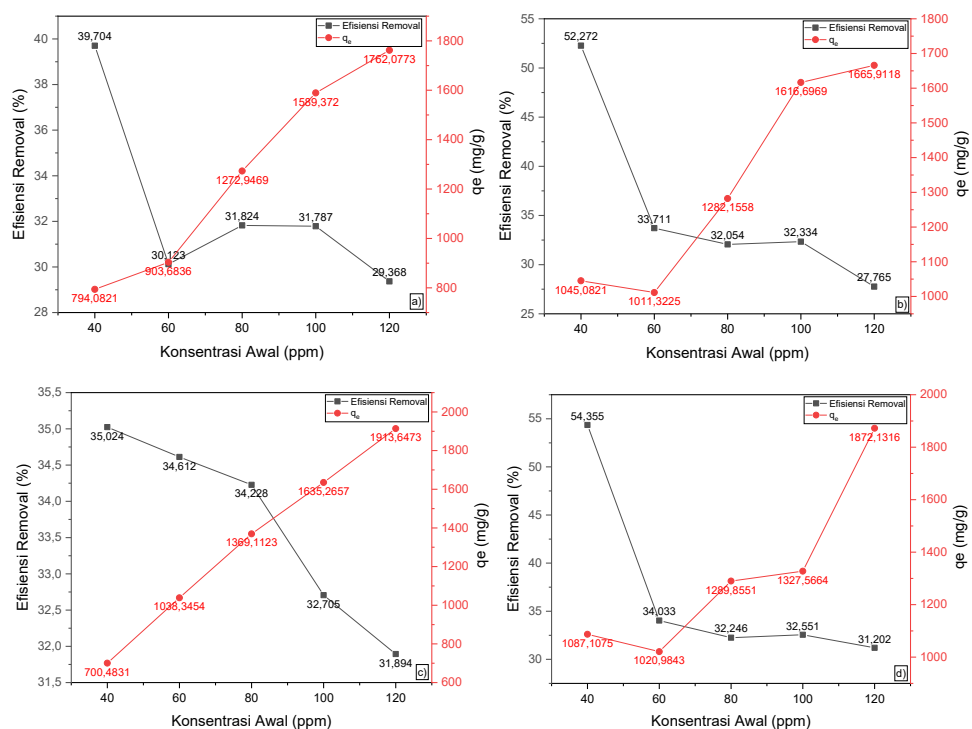
Hasil pH_{pzc} katalis berada pada rentang 3-4 menunjukkan bahwa permukaan katalis memiliki muatan total mendekati nol pada rentang 3-4. Permukaan katalis cenderung memiliki muatan positif ketika pH larutan lebih rendah dari pH_{pzc} dan memiliki muatan negatif ketika pH larutan lebih tinggi

dari nilai pH_{pzc} . pH yang digunakan pada penelitian ini adalah pH 5, 7 dan 9 sehingga keseluruhan variasi pH ini berada diatas nilai pH_{pzc} sehingga permukaan katalis cenderung bermuatan negatif (Parsafard & Shabani, 2025). Literatur fotokatalis MO juga menjelaskan bahwa pH dibawah pH_{pzc} membuat permukaan katalis yang bermuatan positif lebih mudah menarik MO yang bersifat anionik, sedangkan pada pH diatas pH_{pzc} , gaya tolak menolak elektrostatik dapat menurunkan adsorpsi dan degradasi MO (Hariani *et al.*, 2022).

Berdasarkan hasil pengujian, kondisi pH 5 dan pH 7 merupakan kondisi yang lebih efektif untuk proses penyisihan MO menggunakan katalis $TiO_2@Fe_3O_4$ terdekorasi CDs dibandingkan pH 9. Rendahnya efisiensi pada pH 9 disebabkan oleh dominannya gaya tolak-menolak elektrostatik antara permukaan katalis dan MO yang sama-sama bermuatan negatif. Oleh karena itu, pH larutan menjadi faktor penting yang perlu dikontrol dalam proses fotokatalisis, karena tidak hanya memengaruhi warna dan serapan MO, tetapi juga menentukan muatan permukaan katalis, kemampuan adsorpsi, serta efektivitas degradasi fotokatalitik.

4.5.3 Uji Pengaruh Konsentrasi MO pada Proses Fotokatalis

Pengujian pengaruh konsentrasi awal MO dilakukan untuk mengetahui kemampuan material katalis $TiO_2@Fe_3O_4$ terdekorasi CDs dalam menyisihkan MO pada konsentrasi yang berbeda. Parameter yang diamati meliputi efisiensi removal dan kapasitas adsorpsi/fotokatalitik (q_e). Efisiensi removal menunjukkan persentase MO yang berhasil disisihkan dari larutan, sedangkan nilai q_e menunjukkan jumlah MO yang dapat disisihkan per satuan massa katalis. Analisis pengaruh konsentrasi MO dilakukan pada kondisi pH 7 dengan dosis katalis sebesar 0,02 g/L. Hasil analisis pengaruh konsentrasi awal MO dapat dilihat pada Gambar 17 berikut.



Gambar 4. 12 Grafik Pengaruh Konsentrasi pada Proses (a) Adsorpsi-Desorpsi Rasio CDs 0%; (b) Adsorpsi-Desorpsi Rasio CDs 6%; (c) Fotokatalis Rasio CDs 0%; dan (d) Fotokatalis Rasio CDs 6%

Gambar 4.13 menunjukkan efisiensi removal tertinggi pada proses adsorpsi desorpsi dengan rasio CDs 0% berada pada konsentrasi 40 ppm. Ketika konsentrasi MO ditingkatkan menjadi 60-120 ppm efisiensi removal mengalami penurunan. Penurunan yang terjadi menunjukkan bahwa pada konsentrasi yang lebih rendah, jumlah molekul MO sebanding dengan jumlah situs aktif pada permukaan katalis sehingga proses penyisihan berlangsung lebih efektif. Ketika konsentrasi meningkat, jumlah molekul zat warna yang harus berinteraksi dengan permukaan katalis menjadi lebih banyak sedangkan situs aktif relatif tetap. Akibatnya persentase penyisihan menjadi lebih rendah.

Rasio CDs 6% menunjukkan pola yang sama dengan efisiensi removal yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan rasio CDs 0%. Peningkatan persentase removal ini menunjukkan bahwa penambahan CDs sebanyak 6% mampu meningkatkan interaksi awal antara MO dan permukaan katalis pada konsentrasi rendah. Efisiensi removal mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya konsentrasi, hal ini menandakan bahwa keberadaan CDs tidak

|

selalu memberikan peningkatan penyisihan pada seluruh rentang konsentrasi terutama ketika jumlah MO dalam larutan jauh lebih besar jika dibandingkan dengan ketersediaan situs aktif pada permukaan katalis.

Nilai kapasitas adsorpsi (q_e) cenderung meningkat seiring bertambahnya konsentrasi MO. Pada rasio CDs 0%, kapasitas meningkat dari sekitar 794,0821 mg/g pada 40 ppm menjadi 1762,0773 mg/g pada 120 ppm. Pada rasio CDs 6%, nilai q_e juga meningkat dari sekitar 1045,0821 mg/g pada 40 ppm menjadi 1665,9118 mg/g pada 120 ppm. Peningkatan q_e ini menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai konsentrasi awal larutan, semakin besar gaya dorong perpindahan massa polutan dalam larutan menuju permukaan katalis. Peningkatan konsentrasi awal zat warna dapat menyebabkan nilai q_e meningkat karena jumlah molekul yang tersedia untuk berdifusi ke permukaan adsorben lebih besar, meskipun efisiensi removal dalam persen dapat menurun akibat keterbatasan situs aktif (Gebremedhin *et al.*, 2025).

Hasil analisis pengaruh konsentrasi awal MO pada proses fotokatalitik ditunjukkan pada Gambar 4.16c dan Gambar 4.16d. Rasio CDs 0% menunjukkan efisiensi removal yang relatif stabil tetapi cenderung menurun seiring bertambahnya konsentrasi MO. Penurunan ini menunjukkan bahwa kenaikan konsentrasi MO menyebabkan proses fotokatalitik menjadi kurang efektif secara persentase. Pada konsentrasi tinggi, jumlah molekul MO yang harus didegradasi semakin banyak, sedangkan intensitas cahaya, waktu penyinaran, dan dosis katalis yang digunakan tetap. Kondisi tersebut menyebabkan jumlah radikal aktif yang terbentuk tidak sebanding dengan jumlah molekul MO dalam larutan.

Rasio CDs 6% memberikan hasil efisiensi removal sebesar 54,335% pada konsentrasi awal 40 ppm. Nilai ini menunjukkan bahwa penambahan CDs 6% memberikan pengaruh yang cukup besar pada konsentrasi rendah. CDs dapat membantu proses fotokatalitik karena berperan dalam meningkatkan pemanfaatan cahaya dan membantu pemisahan pasangan elektron *hole*, sehingga peluang terbentuknya spesies reaktif menjadi lebih baik. Beberapa kajian mengenai CDs/TiO₂ juga melaporkan bahwa keberadaan CDs dapat menekan rekombinasi elektron *hole* dan meningkatkan efisiensi fotokatalitik

(Du & Zeng, 2024). Efisiensi menurun pada konsentrasi 60-120 ppm, sehingga hal ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi MO tetap menjadi faktor pembatas meskipun katalis telah dimodifikasi menggunakan CDs. Pada konsentrasi tinggi, larutan menjadi lebih pekat sehingga sebagian cahaya dapat terserap atau terhalang oleh molekul zat warna sebelum mencapai permukaan katalis. Selain itu, molekul MO yang berlebih dapat menutupi situs aktif katalis dan menghambat pembentukan radikal hidroksil pada permukaan. Literatur tentang degradasi fotokatalitik zat warna menyebutkan bahwa pada konsentrasi awal yang semakin tinggi, efisiensi degradasi dapat menurun karena penetrasi cahaya ke permukaan katalis berkurang, situs aktif tertutup oleh molekul zat warna, dan jumlah radikal hidroksil yang terbentuk menjadi tidak sebanding dengan jumlah polutan yang harus didegradasi (Mamun *et al.*, 2017)

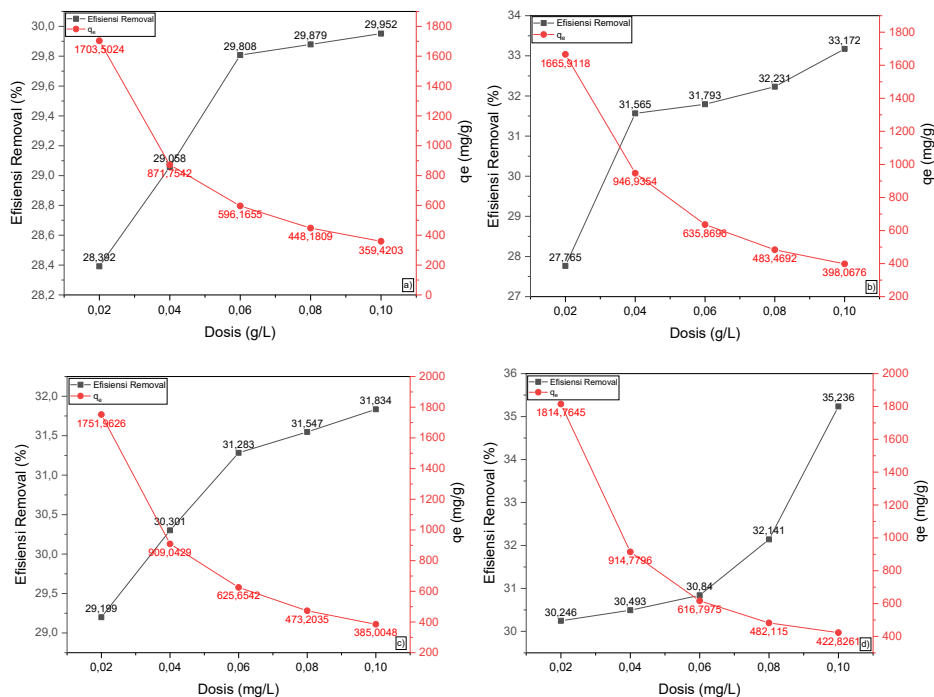
Penelitian ini menunjukkan bahwa konsentrasi awal MO berpengaruh nyata terhadap proses adsorpsi desorpsi maupun proses fotokatalitik. Pada konsentrasi rendah, terutama 40 ppm, efisiensi lebih tinggi karena jumlah MO dalam larutan masih relatif mudah dijangkau oleh situs aktif katalis dan spesies reaktif yang terbentuk selama penyinaran. Sebaliknya, pada konsentrasi tinggi, yaitu 100–120 ppm, efisiensi removal menurun karena jumlah molekul MO terlalu besar dibandingkan jumlah situs aktif dan radikal oksidatif yang tersedia. Akan tetapi, nilai kapasitas q_e meningkat karena semakin banyak molekul MO yang tersedia untuk berinteraksi dengan katalis.

Perbandingan antara rasio CDs 0% dan 6% menunjukkan bahwa penambahan CDs 6% memberikan peningkatan yang paling jelas pada konsentrasi rendah, baik pada proses adsorpsi desorpsi maupun fotokatalitik. Pada konsentrasi 40 ppm, rasio CDs 6% menghasilkan efisiensi removal yang lebih tinggi dibandingkan rasio 0%. Namun, pada konsentrasi yang lebih tinggi, perbedaan kinerja antara rasio 0% dan 6% menjadi lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi konsentrasi MO tinggi, faktor pembatas utama bukan hanya sifat material katalis, tetapi juga keterbatasan penetrasi cahaya, ketersediaan situs aktif, dan jumlah spesies reaktif yang terbentuk. Fotokatalisis pada material semikonduktor sangat bergantung pada kemampuan material menyerap cahaya, menghasilkan pasangan elektron *hole*, serta

membentuk spesies oksidatif yang dapat mendegradasi polutan organik (Hassaan *et al.*, 2023).

4.5.4 Uji Pengaruh Dosis Katalis pada Proses Fotokatalis

Analisis pengaruh dosis katalis dilakukan untuk mengetahui respon material $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ decorated CDs terhadap penyisihan *Methyl Orange* (MO) pada variasi massa katalis. Proses dilakukan dalam dua tahap, yaitu kondisi gelap selama 90 menit untuk mencapai tahap adsorpsi-desorpsi, kemudian dilanjutkan dengan penyinaran selama 45 menit untuk mengevaluasi proses fotokatalitik. Analisis pengaruh dosis dilakukan menggunakan dosis 0,02 g/L hingga 0,1 g/L dengan pH 9 dan konsentrasi MO 120 ppm. Grafik mengenai analisis pengaruh variasi dosis dapat dilihat pada Gambar 4.14 berikut.



Gambar 4. 13 Grafik Pengaruh Dosis Katalis pada Proses (a) Adsorpsi Desorpsi Rasio CDs 0%; (b) Adsorpsi Desorpsi Rasio CDs 6%; (c) Fotokatalis Rasio CDs 0%; (d) Fotokatalis Rasio CDs 6%

Berdasarkan Gambar 4.14 efisiensi removal pada kedua rasio meningkat secara tidak signifikan. Peningkatan tersebut tetap menunjukkan bahwa penambahan massa katalis tetap memberikan kontribusi terhadap

penyisihan MO pada tahap adsorpsi desorpsi. Penambahan dosis meningkatkan permukaan kontak antara katalis dengan larutan sehingga jumlah MO yang dapat tertahan pada permukaan katalis bertambah. Peningkatan efisiensi pada tahap adsorpsi desorpsi terlihat lebih jelas pada rasio 6%. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan CDs pada komposit dapat meningkatkan kemampuan penyisihan awal MO.

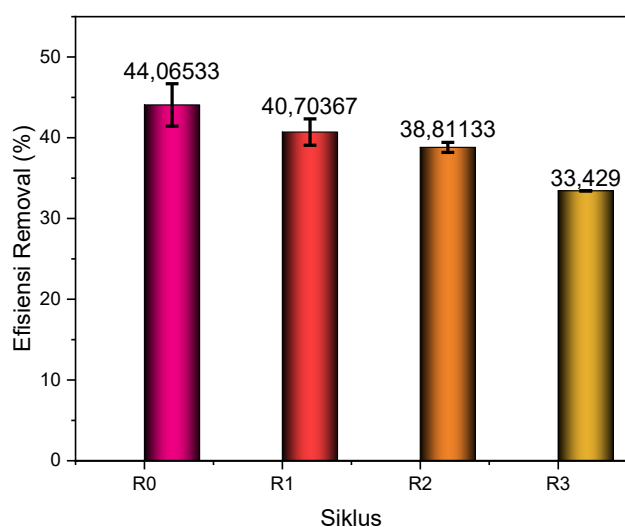
Gambar 4.14 menunjukkan peningkatan efisiensi fotokatalitik pada rasio 0% dan 6%. Kenaikan ini menunjukkan bahwa penambahan dosis katalis mampu meningkatkan jumlah pusat aktif yang dapat menyerap energi cahaya dan menghasilkan *electron hole*. Electron yang terdapat pada TiO_2 tereksitasi dan berpindah dari pita valensi ke pita konduksi sedangkan hole yang tertinggal dapat bereaksi dengan air atau ion hidoksida untuk membentuk radikal hidroksil yang mampu mengoksidasi senyawa organik dalam polutan. Pengaruh dosis terhadap proses fotokatalitik terlihat lebih kuat dibandingkan dengan rasio 0%. Nilai tertinggi pada dosis 0,10 g/L menunjukkan bahwa, dalam rentang dosis yang diuji, peningkatan jumlah katalis masih memberikan dampak positif terhadap penyisihan MO. Peningkatan efisiensi yang terjadi dapat dikaitkan dengan kombinasi antara bertambahnya jumlah situs aktif TiO_2 dan peran CDs dalam membantu pemisahan muatan. C-dots dapat berperan sebagai *electron reservoir* yang menangkap elektron, sehingga menekan rekombinasi elektron–hole dan membantu pembentukan spesies reaktif seperti $\cdot \text{O}_2^-$ dan $\cdot \text{OH}$ (L. Zhang *et al.*, 2021).

Kenaikan efisiensi yang terjadi akibat peningkatan dosis tidak memberikan pengaruh secara signifikan pada seluruh variasi. Kondisi ini umum terjadi pada sistem fotokatalitik karena setelah jumlah katalis tertentu ditambahkan ke dalam sistem tidak selalu sebanding dengan peningkatan degradasi. Apabila dosis terlalu tinggi, partikel katalis dapat menyebabkan larutan menjadi keruh, meningkatkan hamburan cahaya atau menutupi sebagian permukaan aktif akibat aglomerasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan dosis katalis dapat meningkatkan efisiensi degradasi MO baik pada tahap adsorpsi desorpsi maupun fotokatalitik. Rasio CDs 6% menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan rasio CDs 0%, khususnya pada dosis

tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa keberadaan CDs membantu meningkatkan performa komposit, terutama melalui peningkatan transfer elektron dan pengurangan rekombinasi muatan (Karakas & Donmez, 2025; Tolosana-Moranchel *et al.*, 2020). Namun, peningkatan dosis juga menyebabkan nilai q_e menurun karena massa katalis yang digunakan semakin besar. Dengan demikian, dosis katalis merupakan parameter penting yang perlu dikontrol agar diperoleh keseimbangan antara efisiensi penyisihan, kapasitas katalis, dan efektivitas penggunaan material.

4.5.5 Reusability Test

Reusability test dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan penggunaan ulang komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekori CDs sebagai katalis dalam mendegradasi MO. Pada penelitian ini, uji reusability dilakukan menggunakan dosis katalis 0,1 g/L dan konsentrasi awal MO sebesar 100 ppm. Proses diawali dengan tahap adsorpsi–desorpsi dalam kondisi gelap selama 90 menit untuk mencapai kesetimbangan antara MO dan permukaan katalis, kemudian dilanjutkan dengan proses fotokatalitik selama 45 menit di bawah penyinaran. Setelah setiap siklus pengujian, katalis dipisahkan dari larutan dan digunakan kembali pada siklus berikutnya untuk melihat perubahan efisiensi removal maupun kapasitas penyisihannya. Melalui pengujian ini, dapat diketahui apakah material $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ decorated CDs 6% memiliki stabilitas dan potensi aplikasi berulang dalam proses fotokatalitik MO. Grafik hasil evaluasi penggunaan ulang katalis dapat dilihat pada Gambar 4. 15 berikut.



Gambar 4. 14 Hasil *Reusability Test*

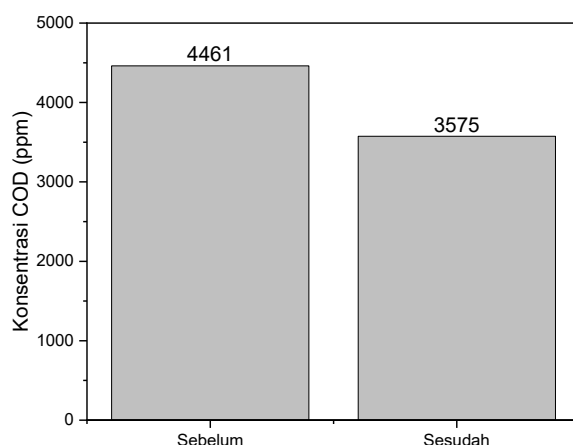
Berdasarkan grafik pada Gambar 4. 21 dapat diketahui bahwa efisiensi removal tertinggi diperoleh pada siklus pertama, kemudian mengalami penurunan secara bertahap pada siklus kedua, ketiga, dan keempat. Pola tersebut menunjukkan bahwa material masih dapat digunakan kembali, tetapi aktivitas fotokatalitiknya berkurang setelah beberapa kali pemakaian. Penurunan efisiensi pada setiap siklus dapat disebabkan oleh sebagian molekul MO maupun produk intermediat hasil degradasi dapat tertinggal atau teradsorpsi kuat pada permukaan katalis. eberadaan senyawa yang masih menempel pada permukaan material dapat menutup sebagian situs aktif, sehingga jumlah pusat reaksi yang tersedia pada siklus berikutnya menjadi lebih sedikit. Kondisi ini menyebabkan interaksi antara MO, permukaan katalis, dan spesies reaktif seperti radikal hidroksil maupun radikal superoksida menjadi kurang optimal (Buta *et al.*, 2025).

Hasil uji reusability tetap menunjukkan bahwa fotokatalis $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ decorated CDs 6% masih memiliki potensi penggunaan ulang meskipun terjadi penurunan. Keberadaan Fe_3O_4 menjadi keuntungan penting karena memungkinkan pemisahan katalis secara magnetik, sehingga proses pemulihan material menjadi lebih sederhana dibandingkan katalis nonmagnetik. Beberapa penelitian mengenai fotokatalis magnetik berbasis TiO_2 dan Fe_3O_4 juga menunjukkan bahwa material magnetik dapat digunakan kembali pada

beberapa siklus degradasi dengan penurunan aktivitas yang relatif kecil, selama struktur material dan permukaan aktifnya masih cukup stabil.

4.5.6 *Demineralization Test*

Uji demineralisasi dilakukan dengan mengukur parameter COD sebelum dan sesudah proses fotokatalis untuk mengetahui tingkat mineralisasi pada MO. Pengukuran UV-Vis hanya menunjukkan penurunan absorbansi atau perubahan warna larutan, sedangkan uji COD memberikan informasi mengenai penurunan kandungan senyawa organik yang masih dapat teroksidasi secara kimia. Oleh karena itu, penurunan nilai COD setelah proses fotokatalis menunjukkan bahwa molekul MO dan sebagian produk intermedietnya telah mengalami oksidasi lebih lanjut. Hasil analisis COD yang telah dilakukan menunjukkan hasil sebagaimana Gambar 4.20 berikut.



Gambar 4. 15 Hasil Analisis Nilai COD Sebelum dan Sesudah Proses Fotokatalis

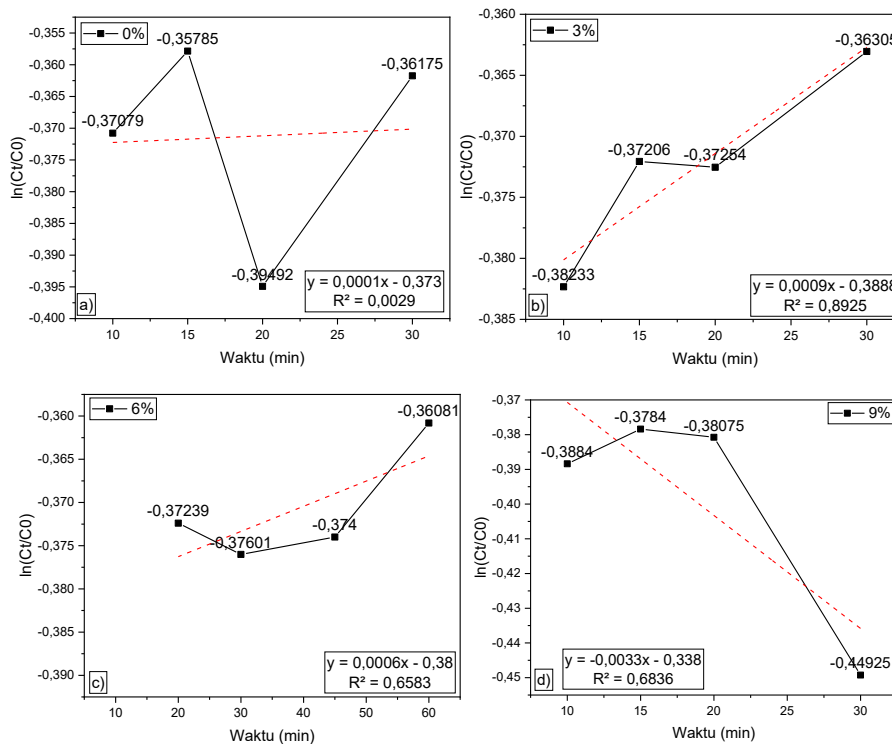
Berdasarkan Gambar 4.16 menunjukkan bahwa proses fotokatalis dapat menurunkan konsentrasi COD dari 4461 ppm menjadi 3575. Penurunan COD sebesar 19,86% terjadi akibat proses fotokatalis menggunakan komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekori RH-CDs. Nilai ini menunjukkan bahwa proses fotokatalisis tidak hanya menyebabkan penurunan warna larutan atau dekolorisasi MO, tetapi juga mulai mengarah pada oksidasi senyawa organik yang terdapat di dalam larutan (Fertal *et al.*, 2025).

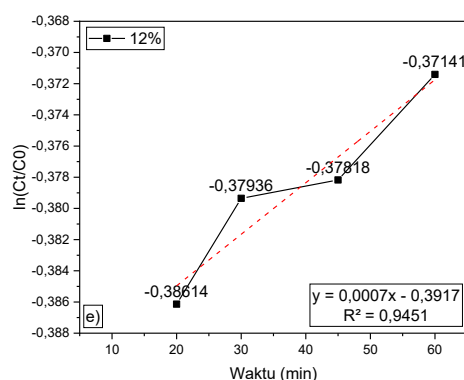
4.5 Kinetika Fotokatalisis

Analisis kinetika dilakukan untuk mengetahui model laju reaksi yang paling sesuai dalam menggambarkan proses fotokatalitik MO menggunakan komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekori CDs. Pendekatan kinetika yang digunakan pada penelitian ini meliputi kinetika orde nol, orde satu semua dan orde dua semua. Masing-masing model kinetika dianalisis berdasarkan hubungan linier antara fungsi rasio terhadap waktu. Nilai R^2 yang diperoleh dari analisis regresi digunakan sebagai dasar penentuan model kinetika yang paling sesuai dengan melihat nilai R^2 yang paling mendekati 1 secara dominan. Nilai R^2 yang semakin mendekati 1 berarti kesesuaian antara data hasil eksperimen dengan model kinetika yang digunakan semakin baik. Dengan demikian, penentuan orde kinetika tidak hanya dilihat dari satu titik data, tetapi berdasarkan kecenderungan nilai (R^2) yang paling konsisten dan dominan pada seluruh variasi pengujian.

4.6.1 Pseudo-first-order

Hasil analisis pada variasi rasio terhadap waktu kemudian dilakukan perhitungan terhadap konstanta laju dan koefisien regresi yang sesuai menggunakan persamaan kinetika orde pertama semua. Hasil analisis regresi dapat dilihat pada Gambar 4.17 berikut.





Gambar 4. 16 Grafik Kinetika *Pseudo-First-Order* (a) 0%; (b) 3%; (c) 6%; (d) 9%; dan (e) 12%

Hasil analisis regresi linear dari kinetika orde pertama semu dapat dilihat pada Tabel 4.3 berikut.

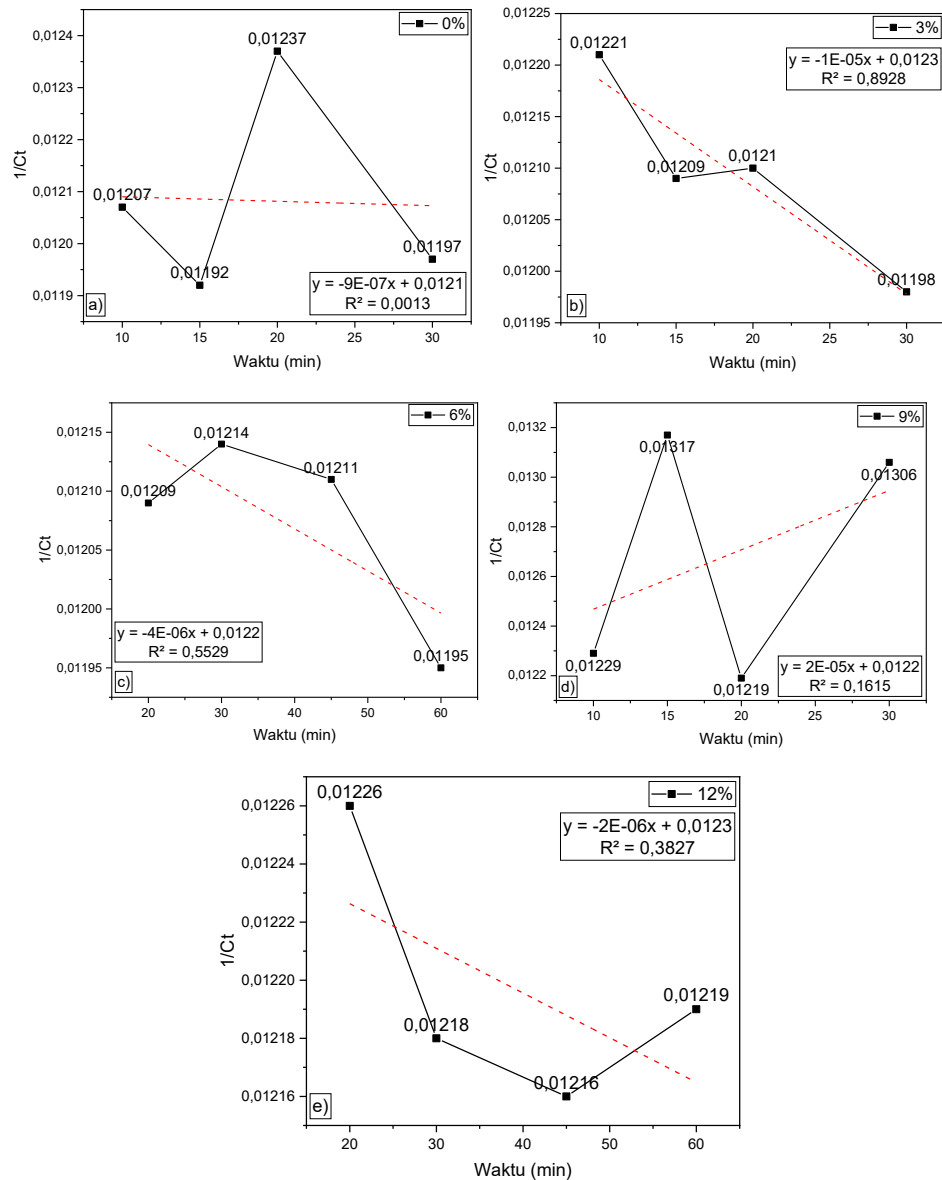
Tabel 4.2 Hasil Analisis Kinetika Orde Pertama Semu

Sampel	Slope (<i>m</i>)	Intercept (<i>c</i>)	Persamaan Regresi Linear	R ²	k
0%	0,0001	-0,373	$y = 0,0001x - 0,373$	0,0029	-0,0001
3%	0,0009	-0,3888	$y = 0,0009x - 0,3888$	0,8925	-0,0009
6%	0,0006	-0,38	$y = 0,0006x - 0,38$	0,6583	-0,0006
9%	-0,0033	-0,338	$y = 0,0033x - 0,338$	0,6836	0,0033
12%	0,0007	-0,3917	$y = 0,0007x - 0,3917$	0,9451	-0,0007

Hasil analisis kinetika menggunakan model orde pertama semu belum menunjukkan kesesuaian yang dominan terhadap data hasil fotokatalisis MO. Hal ini ditunjukkan oleh nilai koefisien determinasi R^2 yang tidak secara konsisten mendekati 1 pada sebagian besar variasi pengujian. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa laju penurunan konsentrasi MO pada sistem ini tidak sepenuhnya bergantung pada konsentrasi MO yang tersisa dalam larutan. Dengan demikian, model orde pertama semu belum dapat merepresentasikan mekanisme laju fotokatalitik secara paling tepat pada penelitian ini.

4.6.2 *Pseudo-second-order*

Hasil analisis pada variasi rasio terhadap waktu kemudian dilakukan perhitungan terhadap konstanta laju dan koefisien regresi yang sesuai menggunakan persamaan kinetika orde kedua semu. Hasil analisis regresi dapat dilihat pada Gambar 4.18 yang kemudian ditabulasi pada Tabel 4.3 berikut.



Gambar 4. 17 Grafik Kinetika *Pseudo-Second-Order* (a) 0%; (b) 3%; (c) 6%; (d) 9%; dan (e) 12%

Hasil analisis regresi linear dari kinetika orde kedua semu dapat dilihat pada Tabel 4.4 berikut.

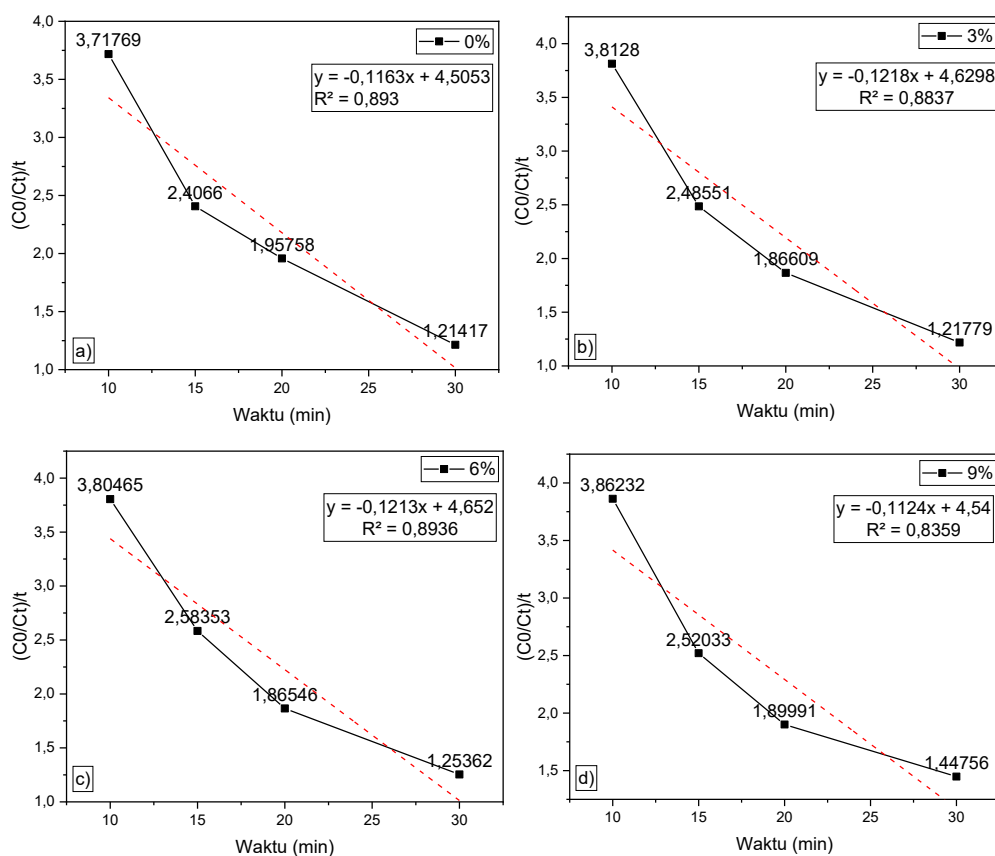
Tabel 4.3 Hasil Analisis Kinetika Orde Kedua Semu

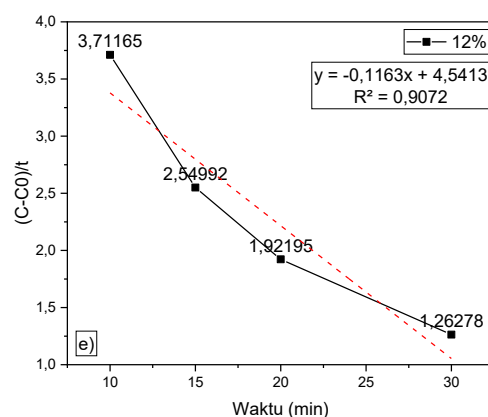
Sampel	Slope (m)	Intercept (c)	Persamaan Regresi Linear	R ²	k
0%	-9e-07	0,0121	$y = -9e - 07x + 0,0121$	0,0013	9e-07
3%	-1e-05	0,0123	$y = -1e - 05x + 0,0123$	0,8928	1e-05
6%	-4e-06	0,0122	$y = -4e - 06x + 0,0123$	0,5529	4e-06
9%	2e-05	0,0122	$y = 2e - 05x + 0,0123$	0,1615	-2e-05
12%	-2e-06	0,0123	$y = -2e - 06x + 0,0123$	0,3827	2e-06

Hasil analisis kinetika menggunakan model orde kedua semu belum menunjukkan kesesuaian yang dominan terhadap data hasil fotokatalisis MO. Hal ini ditunjukkan oleh nilai koefisien determinasi R^2 yang tidak secara konsisten mendekati 1 pada sebagian besar variasi pengujian. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa laju penurunan konsentrasi MO pada sistem ini tidak sepenuhnya bergantung pada konsentrasi MO yang tersisa dalam larutan. Dengan demikian, model orde kedua semu belum dapat merepresentasikan mekanisme laju fotokatalitik secara paling tepat pada penelitian ini.

4.6.3 Pseudo-zeroth-order

Hasil analisis pada variasi rasio terhadap waktu kemudian dilakukan perhitungan terhadap konstanta laju dan koefisien regresi yang sesuai menggunakan persamaan kinetika orde ke-nol. Hasil analisis regresi dapat dilihat pada Gambar 4.19 berikut.





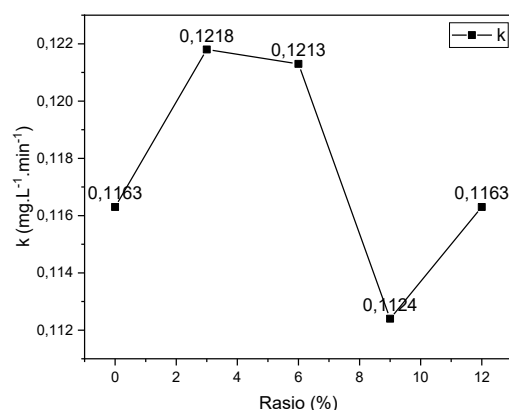
Gambar 4. 18 Grafik Kinetika *Pseudo-Zeroth-Order* (a) 0%; (b) 3%; (c) 6%; (d) 9%; dan (e) 12%

Hasil analisis regresi linear dari kinetika orde ke-nol dapat dilihat pada Tabel 4.5 berikut.

Tabel 4.4 Hasil Analisis Kinetika Orde Kedua Semu

Sampel	Slope (<i>m</i>)	Intercept (<i>c</i>)	Persamaan Regresi Linear	R ²	k
0%	-0,1163	4,5053	$y = -0,1163x + 4,5053$	0,893	0,1163
3%	-0,1218	4,6298	$y = -0,1218x + 4,6298$	0,8837	0,1218
6%	-0,1213	4,652	$y = -0,1213x + 4,652$	0,8936	0,1213
9%	-0,1124	4,54	$y = -0,1124x + 4,54$	0,8359	0,1124
12%	-0,1163	4,5413	$y = -0,1163x + 4,5413$	0,9072	0,1163

Hasil penyesuaian kinetika fotodegradasi MO oleh beberapa rasio CDs yang tercantum dalam Tabel 4.1 hingga Tabel 4.3 menunjukkan bahwa proses fotodegradasi MO sesuai dengan kinetika orde 0. Penggunaan model kinetika orde nol pada penelitian ini berdasarkan pada hasil regresi linear yang menunjukkan bahwa nilai R² lebih dominan mendekati 1 jika dibandingkan dengan model kinetika lainnya. Model orde nol menyatakan bahwa penurunan konsentrasi polutan berlangsung relatif konstan terhadap waktu sehingga laju degradasi tidak sepenuhnya dikontrol oleh konsentrasi MO yang tersisa dalam larutan. Model orde nol menunjukkan bahwa laju reaksi bergantung pada interaksi antarmolekul zat warna dan spesies reaktif yang tersedia (Al-bassami *et al.*, 2026).



Gambar 4. 19 Grafik Nilai Konstanta Orde Nol

Berdasarkan Gambar 4.20 variasi rasio CDs memberikan pengaruh terhadap laju fotokatalitik MO menggunakan komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekorasi CDs. Nilai konstanta orde nol (k_0) diperoleh dari nilai negatif slope pada persamaan regresi linear $C_t = C_0 - k_0 t$. Laju penurunan konsentrasi MO selama proses fotokatalitik semakin cepat jika nilai semakin k_0 besar.

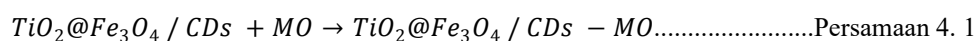
Nilai k_0 pada penelitian ini berada pada rentang 0,1124-0,1218. Nilai tertinggi pada rasio CDs 3% yaitu sebesar 0,1218 kemudian diikuti oleh rasio CDs 6% sebesar 0,1213. Kedua nilai tersebut menunjukkan bahwa penambahan CDs dalam jumlah tertentu mampu meningkatkan laju degradasi MO. Peningkatan ini dapat dikaitkan dengan peran CDs dalam membantu pemisahan pasangan elektron-hole, memperbaiki transfer elektron, serta memperluas respons cahaya pada sistem fotokatalis berbasis TiO_2 . Dengan pemisahan muatan yang lebih baik, peluang terbentuknya spesies reaktif seperti radikal hidroksil dan radikal superoksida menjadi lebih besar, sehingga proses oksidasi MO berlangsung lebih efektif. Namun, peningkatan rasio CDs tidak selalu diikuti oleh peningkatan nilai konstanta laju. Pada rasio CDs 9%, nilai (k_0) menurun menjadi 0,1124. Penurunan ini menunjukkan bahwa jumlah CDs yang lebih tinggi belum tentu memberikan kinerja fotokatalitik yang lebih baik. Jumlah CDs yang berlebih dapat menutupi sebagian situs aktif $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$, menghambat kontak antara MO dan permukaan katalis, atau menyebabkan distribusi material menjadi kurang homogen. Kondisi tersebut dapat mengurangi efektivitas pembentukan spesies reaktif selama penyinaran.

4.6 Mekanisme Fotokatalisis

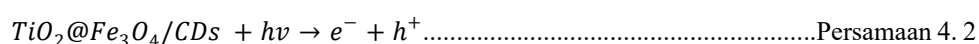
Mekanisme fotokatalitik degradasi MO oleh komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ decorated CDs diduga berlangsung melalui tahapan adsorpsi, eksitasi fotokatalis, pembentukan spesies reaktif, dan oksidasi MO. Pada tahap awal, molekul MO teradsorpsi pada permukaan katalis sehingga kontak antara MO dan situs aktif menjadi lebih baik. Ketika katalis menerima energi cahaya, TiO_2 mengalami eksitasi dan menghasilkan pasangan elektron (e^-) dan *hole* (h^+).

Elektron yang terbentuk dapat ditransfer menuju CDs, sehingga rekombinasi elektron-hole dapat berkurang. Selanjutnya, elektron bereaksi dengan oksigen terlarut membentuk radikal superoksida ($\cdot O_2^-$) sedangkan hole bereaksi dengan air atau ion hidroksida menghasilkan radikal hidroksil ($\cdot OH$). Kedua spesies reaktif tersebut berperan dalam menyerang struktur MO, terutama gugus azo ($-\text{N}=\text{N}-$) yang menjadi kromofor utama penyebab warna. Pemutusan ikatan azo menyebabkan terbentuknya senyawa intermediet yang kemudian teroksidasi lebih lanjut menjadi produk yang lebih sederhana seperti CO_2 , H_2O , dan ion anorganik. Reaksi yang terjadi digambarkan sebagai **Persamaan 4.1** hingga **Persamaan 4.10** berikut

a) Adsorpsi



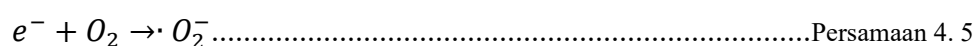
b) Eksitasi cahaya



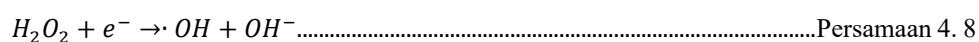
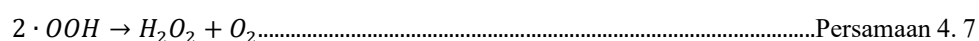
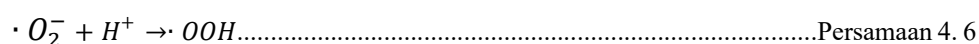
c) Pembentukan radikal hidroksil



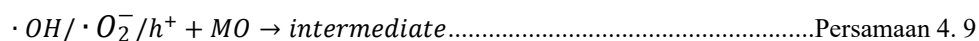
d) Pembentukan radikal superoksida



e) Reaksi lanjutan spesies oksigen reaktif



f) Degradasi MO



|

intermediate $\rightarrow CO_2 + H_2O \dots + ion\ lain \dots$Persamaan 4. 10

4.7 Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Analisis perbandingan dengan penelitian sebelumnya dilakukan dengan membandingkan beberapa penelitian sejenis. Berikut merupakan hasil perbandingan penelitian yang dilakukan dengan penelitian sebelumnya dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.5 Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Material	Dosis Katalis (g/L)	pH	Konsentrasi MO (ppm)	Jenis Cahaya	Waktu (menit)	Removal (%)	Referensi
CDs@TiO ₂	0,2	11	100	Solar light	180	71,90	(Shafique <i>et al.</i> , 2022)
TiO ₂ /ZnTiO ₃	NA	5	120	UV Light	300	NA	(Oryza <i>et al.</i> , 2025)
UV/TiO ₂	0,01	4	90	UV light	300	97,30	(Vatanpour <i>et al.</i> , 2025)
Chio/Fe ₃ O ₄ @NAT	0,03	NA	50	UV light	90	60,00	(Zenebe <i>et al.</i> , 2025)
Pt/TiO ₂	0,2	NA	500	Visible light	60	90,26	(Thi <i>et al.</i> , 2025)
CDs/Layered Mesoporous TiO ₂	0,2	NA	666	Metal halide lamp	240	91,04	(L. Zhang <i>et al.</i> , 2021)
TiO ₂ @Fe ₃ O ₄ Terdekorasi CDs	0,02	3	120	LED Lamp	45	94,70	Penelitian ini

NA : *Not Available* / Tidak dicantumkan dalam literatur

Hasil penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa komposit TiO₂@Fe₃O₄ Terdekorasi CDs memiliki kemampuan penyisihan yang lebih besar jika dibandingkan dengan penelitian menggunakan material sejenis. Hasil tersebut menunjukkan bahwa material memiliki potensi untuk dikembangkan menjadi material yang lebih baik.

4.8 Analisis Statistika

Analisis statistik dilakukan berdasarkan data yang telah diperoleh untuk mengetahui pengaruh antar variabel. Pengaruh variasi pada proses penyisihan zat warna MO dianalisis menggunakan uji statistika dengan *software* SPSS.

4.9.1 Uji Normalitas

Pengaruh setiap variasi terhadap nilai absorbansi yang kemudian dapat digunakan untuk menghitung efisiensi removal dianalisis menggunakan uji

statistik untuk mengetahui apakah data yang telah dihimpun terdistribusi secara normal. Hasil uji normalitas yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan metode *Kolmogorov-Smirnov*. Metode ini digunakan karena jumlah data yang telah dihimpun lebih dari 50. Hasil analisis menggunakan *software* SPSS dapat dilihat pada Tabel 4.7 berikut.

Tabel 4.6 Hasil Uji Normalitas

Variabel Terikat	Uji Normalitas		
	Nilai Sig. (<i>p value</i>) Kolmogorov-Smirnov	$\alpha = 0,05$	Keputusan
Nilai Absorbansi	0,000	Sig. < α	Data tidak terdistribusi normal

Berdasarkan Tabel 4.7, hasil uji normalitas terhadap variabel terikat nilai absorbansi menggunakan metode *Kolmogorov-Smirnov* menunjukkan nilai signifikansi 0,000. Hasil pengujian menunjukkan nilai Sig. = 0,000 < 0,05 sehingga dapat disimpulkan bahwa data nilai absorbansi tidak berdistribusi normal. Dengan demikian, asumsi normalitas pada data tersebut tidak terpenuhi. Kondisi ini menunjukkan bahwa sebaran data nilai absorbansi tidak mengikuti pola distribusi normal, sehingga terdapat kemungkinan data memiliki penyimpangan sebaran, seperti adanya nilai ekstrem, variasi data yang tidak merata, atau pola data yang cenderung tidak simetris.

Hasil ini menjadi pertimbangan dalam pemilihan metode analisis statistik selanjutnya. Apabila analisis yang digunakan mensyaratkan data berdistribusi normal, maka perlu dilakukan penyesuaian, misalnya melalui transformasi data atau penggunaan metode statistik non-parametrik yang tidak mensyaratkan distribusi normal.

4.9.2 Uji Homogenitas

Uji homogenitas dilakukan untuk mengetahui kesamaan varian data antar kelompok perlakuan. Uji homogenitas penting dilakukan sebelum analisis lebih lanjut karena beberapa metode statistik parametrik mensyaratkan data harus homogen. Pada penelitian ini, uji homogenitas dilakukan terhadap variabel terikat efisiensi menggunakan metode *Levene's Test of Equality of*

Error Variances dengan taraf signifikansi sebesar 0,05. Adapun hasil uji homogenitas ditampilkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.7 Hasil Uji Homogenitas

Variabel Terikat	Uji Levene		
	Nilai Sig. (<i>p value</i>)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
Nilai Absorbansi	0,000	Sig. < α	Data tidak berdistribusi homogen

Berdasarkan hasil uji homogenitas menggunakan *Levene's Test of Equality of Error Variances*, diperoleh nilai signifikansi sebesar 0,000. Uji Levene digunakan untuk mengetahui apakah varians data antar kelompok memiliki kesamaan atau tidak. Kriteria pengambilan keputusan pada uji homogenitas adalah apabila nilai signifikansi lebih besar dari 0,05, maka data dinyatakan homogen. Sebaliknya, apabila nilai signifikansi lebih kecil dari 0,05, maka data dinyatakan tidak homogen.

Pada hasil pengujian diperoleh nilai Sig. = 0,000 < 0,05, sehingga dapat disimpulkan bahwa varians data antar kelompok pada variabel terikat Efisiensi tidak sama atau tidak homogen. Dengan demikian, asumsi homogenitas varians tidak terpenuhi. Kondisi ini menunjukkan bahwa sebaran data efisiensi pada masing-masing kelompok perlakuan memiliki tingkat variasi yang berbeda.

4.9.3 Analisis Pengaruh Menggunakan Metode *Kruskal-Wallis*

Berdasarkan hasil uji prasyarat yang telah dilakukan, diketahui bahwa data tidak memenuhi asumsi normalitas dan homogenitas. Nilai signifikansi pada uji normalitas menunjukkan bahwa data tidak berdistribusi normal, sedangkan hasil uji homogenitas menunjukkan bahwa varians antar kelompok tidak homogen. Oleh karena itu, analisis statistik parametrik tidak dapat digunakan secara langsung. Sebagai alternatif, digunakan uji non-parametrik *Kruskal-Wallis* untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan antar kelompok perlakuan terhadap variabel efisiensi. Uji *Kruskal-Wallis* dipilih karena tidak mensyaratkan data berdistribusi normal maupun memiliki varians yang homogen, sehingga sesuai digunakan pada kondisi data penelitian ini. Hasil analisis *Kruskal-Wallis* disajikan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Hasil Uji Statistik Non-Parametrik *Kruskal-Wallis*

Variabel Terikat	Variabel Bebas	Uji Statistik Non-Parametrik <i>Kruskal-Wallis</i>		
		Nilai Asymp. Sig. (<i>p value</i>)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
Nilai Absorbansi	Rasio CDs vs waktu	0,000	Asymp. Sig. $< \alpha$	H ₁ diterima (variasi mempunyai pengaruh)
	Rasio CDs	0,000	Asymp. Sig. $< \alpha$	H ₁ diterima (variasi mempunyai pengaruh)
	Waktu	0,000	Asymp. Sig. $< \alpha$	H ₁ diterima (variasi mempunyai pengaruh)
	pH	0,003	Asymp. Sig. $< \alpha$	H ₁ diterima (variasi mempunyai pengaruh)
	Konsentrasi	0,000	Asymp. Sig. $< \alpha$	H ₁ diterima (variasi mempunyai pengaruh)
	Dosis Katalis	0,163	Asymp. Sig. $> \alpha$	H ₁ ditolak (variasi tidak mempunyai pengaruh)

Berdasarkan Tabel 4.9, hasil uji statistik non-parametrik *Kruskal-Wallis* menunjukkan bahwa sebagian besar variabel bebas memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai absorbansi. Pengujian ini dilakukan karena data tidak memenuhi asumsi normalitas dan homogenitas, sehingga analisis dilanjutkan menggunakan metode non-parametrik. Kriteria pengambilan keputusan pada uji *Kruskal-Wallis* adalah apabila nilai Asymp. Sig. lebih kecil dari $\alpha = 0,05$, maka H₁ diterima, yang berarti terdapat pengaruh atau perbedaan yang signifikan antar variasi perlakuan. Sebaliknya, apabila nilai Asymp. Sig. lebih besar dari $\alpha = 0,05$, maka H₁ ditolak, yang berarti variasi perlakuan tidak memberikan pengaruh yang signifikan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa variabel rasio CDs terhadap waktu, rasio CDs, waktu, pH, dan konsentrasi memiliki nilai Asymp. Sig. lebih kecil dari 0,05. Hal ini menunjukkan bahwa kelima variabel tersebut memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai absorbansi. Dengan demikian, perubahan variasi pada rasio CDs, waktu kontak, pH, konsentrasi, maupun kombinasi rasio CDs terhadap waktu dapat menyebabkan perbedaan nilai absorbansi yang nyata secara statistik. Sementara itu, variabel dosis katalis memperoleh nilai Asymp. Sig. sebesar 0,163. Nilai tersebut lebih besar dari 0,05, sehingga H₁ ditolak. Artinya, variasi dosis katalis tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai absorbansi. Kondisi ini dapat menunjukkan bahwa perubahan dosis katalis pada rentang yang digunakan

dalam penelitian belum mampu menghasilkan perbedaan nilai absorbansi yang cukup besar secara statistik. Oleh karena itu, dosis katalis bukan merupakan faktor dominan terhadap perubahan nilai absorbansi dibandingkan variabel lain seperti waktu, pH, konsentrasi, dan rasio CDs.

Secara keseluruhan, hasil uji *Kruskal-Wallis* menunjukkan bahwa nilai absorbansi lebih dipengaruhi oleh variasi rasio CDs, waktu, pH, konsentrasi, serta interaksi rasio CDs terhadap waktu, sedangkan variasi dosis katalis tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan. Hasil analisis deskriptif pada uji Kruskal Wallis dapat dilihat pada Tabel 4.9 berikut

|

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan:

1. Hasil karakterisasi FTIR komposit menunjukkan keberadaan gugus karbonil, ikatan C=C, Fe-O dan Ti-O/Ti-O-Ti. Pada hasil SEM menunjukkan aglomerasi antara TiO₂ dan Fe₃O₄ yang terdekorasi CDs. Selain itu, hasil XRD menunjukkan indeks kristalinitas sebesar 58,59612% dengan rata-rata ukuran kristal 9,7860 nm. Keberhasilan sintesis komposit ini juga dapat dilihat berdasarkan EDX *spectrum* dimana terdapat elemen C, N, Ti dan Fe serta O.
2. Variasi rasio CDs, pH, konsentrasi awal MO, dan dosis katalis memberikan pengaruh pada proses fotokatalis. Kondisi terbaik berada pada rasio CDs 0%, pH 3, konsentrasi MO 40 ppm dan dosis 0,1 g/L.
3. Hasil analisis kinetika menunjukkan bahwa degradasi MO oleh komposit TiO₂@Fe₃O₄ terdekorasi RH-CDs lebih sesuai mengikuti model kinetika orde nol. Hal ini ditunjukkan oleh nilai koefisien determinasi (R^2) pada model orde nol yang secara dominan lebih mendekati 1 dibandingkan model orde satu semu dan orde dua.
4. Mekanisme fotokatalisis TiO₂@Fe₃O₄ terdekorasi RH-CDs dalam degradasi *Methyl Orange* diawali dengan adsorpsi MO pada permukaan katalis, kemudian TiO₂ mengalami eksitasi akibat penyinaran dan menghasilkan pasangan elektron-hole. Elektron yang terbentuk ditransfer dengan bantuan RH-CDs sehingga rekombinasi elektron-hole dapat ditekan. Selanjutnya, elektron bereaksi dengan oksigen terlarut membentuk radikal superoksida ($\cdot\text{O}_2$), sedangkan hole bereaksi dengan air atau ion hidroksida membentuk radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$). Spesies reaktif tersebut menyerang struktur MO, terutama gugus azo ($-\text{N}=\text{N}-$), sehingga molekul MO terdegradasi menjadi senyawa intermediet dan produk yang lebih sederhana. Fe₃O₄ berperan

dalam membantu pemisahan katalis secara magnetik setelah proses fotokatalisis.

5. Hasil uji penggunaan ulang komposit 6% CDs pada 3 *cycle* menunjukkan bahwa katalis memiliki potensi penggunaan. Pada siklus ke-0 menunjukkan efisiensi sebesar 44,065% dan pada siklus ke-3 menunjukkan efisiensi removal sebesar 33,429%. Penurunan COD sebesar 19,86% terjadi akibat proses fotokatalis menggunakan komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekori RH-CDs. Nilai ini menunjukkan bahwa proses fotokatalisis tidak hanya menyebabkan dekolorisasi MO tetapi juga mengarah pada penurunan COD di dalam larutan.

5.2 Saran

Saran yang diberikan penulis untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Menggunakan sekam padi bersih dengan ukuran <50 mesh yang memungkinkan *yield* lebih besar;
2. Pada sintesis CDs menggunakan proses *hydrothermal* dapat dilakukan dengan waktu yang lebih panjang sehingga ukuran partikel dapat lebih kecil dan mampu memenuhi syarat untuk menjadi *Carbon Quantum Dot*;
3. Menggunakan *Titanium Isopropoxide* sebagai prekursor TiO_2 sehingga klaim nano dapat dilakukan dan mencegah warna larutan MO menjadi keruh akibat TiO_2 yang larut sehingga efektivitasnya dapat meningkat;
4. Melakukan uji TEM atau FE-SEM sehingga morfologi permukaan katalis dapat terlihat lebih jelas;
5. Melakukan uji XPS sehingga dapat mengetahui komposisi unsur kimia, keadaan kimiawi, dan struktur elektronik pada permukaan material;
6. Melakukan uji *Band Gap* dengan UV-Vis DRS untuk mengetahui penurunan *Band Gap* akibat penambahan *co-catalyst*;
7. Menurunkan konsentrasi MO sehingga efisiensi dapat meningkat serta dapat mengikuti kinetika *Langmuir-Hinshelwood* orde pertama.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdolrezaei, F. (2020). *In situ green synthesis of highly fluorescent Fe₂O₃ @ CQD / graphene oxide using hard pistachio shells via the hydrothermal-assisted ball milling method*. **Luminescence**, December 2019, 1–10. <https://doi.org/10.1002/bio.3773>
- Abdullah, A. ., Gracia-Pinilla, M. Á. G.-P., Pillai, S. C., & O'Shea, K. (2019). *UV and Visible Light-Driven Production of Hydroxyl Radicals by Reduced Forms of N, F, and P Codoped Titanium Dioxide*. **Molecules**.
- Aghamali, A., Khosravi, M., Hamishehkar, H., Modirshahla, N., & Behnajady, M. A. (2018). *Materials Science Semiconductor Processing Preparation / C / / N- Materials Science in Semiconductor Processing*, 87(June), 142–154. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2018.07.018>
- Al-bassami, N. S., Mansour, S. F., Beevi, M., Yusuf, M., Usha, N., Alsmail, N. H., & Abdo, M. A. (2026). *Ni-Zn – Mn* **Ceramics International**, 52(6), 7436–7449. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.12.484>
- Al, A., Al-fawwaz, A. T., & Ibrahim, M. M. (2024). *Remediation of Methyl Orange Dye in Aqueous Solutions by Green Microalgae (Bracteacoccus sp .): Optimization , Isotherm , Kinetic , and Thermodynamic Studies*.
- Alamdard, S., & Shah, H. (2013). *Vibrating Sample Magnetometry : Analysis and*.
- Amalina, D., Khoirunnisa, K., Putri, T. W. S., & Silvian, T. (2024). *Potensi Agriwana Jurnal Pertanian Dan Kehutanan*, 2(2), 10–15.
- Araichimani, P., Prabu, K. M., Kumar, G. S., Karunakaran, G., Surendhiran, S., Shkir, M., & Ali, H. E. (2022). *2* **Ceramics International**, 48(7), 10339–10345. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.02.001>
- Arief, S., & Muldarisnur, M. (2024). *Green Synthesis of CDs Nanocomposites and its Performance on Optical and Magnetic Properties*. **Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy**, 11(02), 673–681.
- Basa, W., Pankiewicz-sperka, M., Struga, A., Xu, D., Duan, P., Hao, B., Wang, Y., Leng, L., Yang, L., Fan, L., & Kapusta, K. (2026). *Biomass Bioenergy Experimental* 208(July 2025). <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108833>

- Buta, I., Nistor, M. A., & Muntean, S. G. (2025). *Efficient Photodegradation of Dyes from Single and Binary Aqueous Solutions Using Copper (II) Coordination Polymers. Ii.*
- Cahayani, E., Yunus, A. I., & Rohman, D. (2024). Tinjauan Pemanfaatan Limbah Abu Sekam Padi dalam Industri Kerajinan Kreatif di Desa Sandi Kecamatan Pattallassang Kabupaten Takalar . (Studi Kasus Sentra Kerajinan Gerabah Keramik Desa Sandi). **HUMAN: South Asean Journal of Social Studies**, 4(2), 209–220.
- Cai, Z., Hu, X., He, H., Li, T., Yuan, H., Zhang, Y., Tan, B., & Wang, J. (2022). *Hypercrosslinking : Enhanced Water Research*, 227(November), 119341. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119341>
- Carbone, M. (2020). *CQDs @ NiO : An Tool for Sensing. Applied Science*, 10. <https://doi.org/doi:10.3390/app10186251>
- Channei, D., Inceesungvorn, B., Wetchakun, N., Ukritnukun, S., Nattestad, A., & Chen, J. (2014). *Photocatalytic Degradation of Methyl Films under Visible Light Irradiation. Scientific Repots*, 4(57). <https://doi.org/10.1038/srep05757>
- Chaudhary, S., Kumari, M., Chauhan, P., & Chaudhary, G. R. (2021). *Upcycling : An C- Waste Management*, 120, 675–686. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.038>
- Chen, E., Chen, Z., Liu, Z., Zhou, M., Li, B., Li, R., Shen, L., Jiao, Y., Lin, H., & Xu, Y. (2025). *Magnetically Chemical Engineering Journal*, 523(June), 168926. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.168926>
- Chen, P., Zhang, X., Cheng, Z., Xu, Q., Zhang, X., Liu, Y., & Qiu, F. (2023). *Peroxymonosulfate (PMS) Rhodamine B (: DFT Journal of Cleaner Production*, 426(September), 139202. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139202>
- Chung, K., Lun, W., & Soraya, N. (2021). *Nitrogen Journal of Photochemistry & Photobiology, A: Chemistry*, 418(March), 113411. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2021.113411>
- Dhandapani, E., Duraisamy, N., Periasamy, P., & T, P. V. (2021). *Materials Today : Proceedings Highly Materials Today: Proceedings*, 26(2020), A1–A5. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.396>

- Dharmendra, D., Chundawat, P., & Vyas, Y. (2022). *Eco- 2 Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 28(March), 100732. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100732>
- Du, M., & Zeng, G. (2024). *Visible Light Enhancement of Biocarbon Quantum-Dot-Decorated for Naphthalene Removal*. 1–15.
- Ettefaghi, E., Rashidi, A., Ghobadian, B., & Naja, G. (2018). *Experimental* 90(December 2017), 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.10.002>
- Fertal, D. R., Young, E. R., & Oldacre, A. N. (2025). *Revealing Inaccuracies in Using Chemical Oxygen Demand to Evaluate Azo Dye Mineralization: A Case for Control Experiments*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c01532>
- Ganguli, A. K., Kunde, G. B., Raza, W., & Kumar, S. (2022). *Assessment of Performance of Photocatalytic Nanostructured Materials with Varied Morphology Based on Reaction Conditions*. **Molecules**.
- Gebremedhin, K. H., Gebreegziabher, H. G., Weldegebrical, G. K., & Ali, Y. M. (2025).
- Hamid, A., Sohal, N., Singh, P., & Kolte, J. (2026). *Biomass Bioenergy Green : A Biomass and Bioenergy*, 204(July 2025), 108447. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108447>
- Hariani, P. L., Said, M., Aprianti, N., Asina, Y., & Rohana, L. (2022). *High Efficient Photocatalytic Degradation of Methyl Orange Dye in an Aqueous Solution by Magnetic Catalyst*. *Journal of Ecological Engineering*, 23(1), 118–128.
- Hariani, P. L., Salni, S., Said, M., & Farahdiba, R. (2023). *Core-shell Magnetic Modified Ag for the Photocatalytic Degradation of Congo Red Dye and Antibacterial Activity*. 18(2), 315–330. <https://doi.org/10.9767/bcrec.19275>
- Hasan, K., Malik, A. H., Iqbal, S. M. S., Sarkar, S. M., Arooj, M., & Patole, S. P. (2025). *Stepwise @ SA @ PANI @ : An Chemical Engineering Journal Advances*, 24(September), 100874. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2025.100874>
- Hasanin, M. S., Mahmoud, E. R. I., El-hadek, M. A., Bassyouni, M., Demirci, G., Al-qabandi, O. A., & El, M. (2026). *Unveiling Inorganic Chemistry Communications*, 188(P2), 116510.

- <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2026.116510>
- Hassaan, M. A., El, M. A., & Marwa, N. (2023). *Principles of Photocatalysts and Their Different Applications : A Review. In Topics in Current Chemistry (Vol. 381, Issue 6). Springer International Publishing.* <https://doi.org/10.1007/s41061-023-00444-7>
- Hazarika, D., & Karak, N. (2016). *Applied Surface Science Photocatalytic Applied Surface Science*, 376, 276–285. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.03.165>
- Herrmann, J.-M. (1999). *Heterogeneous Catalysis Today*, 53(1), 115–129. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(99\)00107-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0920-5861(99)00107-8)
- Hong, G., Diao, S., Antaris, A. L., & Dai, H. (2015). *Carbon Nanomaterials for Biological Imaging and Nanomedicinal Therapy.* <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00008>
- Hou, J., Lan, X., Shi, J., Yu, S., Zhang, Y., Wang, H., & Ren, C. (2019). *A (P25) International Journal of Hydrogen Energy*, 45(4), 2852–2861. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.180>
- Ia, F. J., Ong, L. F. G., & Ao, C. Y. (2011). *Spectroscopic Studies of the Interaction between Methyl Orange and Gemini Surfactant. Asian Journal of Chemistry*, 23(2), 729–732.
- International Union of Pure and Applied Chemistry. (2025). *Photocatalysis. Gold Book.* <https://doi.org/doi:10.1351/goldbook.P04580>
- Iskandar, N., Jurusan, M., Mesin, T., Teknik, F., Diponegoro, U., Jurusan, D., Mesin, T., Teknik, F., & Diponegoro, U. (2023). Pengaruh persentase binder bentonit terhadap densitas pelet katalis zeolit alam. *11*(1), 44–47.
- Ismael, M. (2020). *A Solar Energy*, 211(July), 522–546. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.073>
- Iwuozor, K. O., Ighalo, J. O., Chizitere, E., Adewale, L., & Adaobi, C. (2021). *Current Research Green Sustainable Chemistry Adsorption : A Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4(July), 100179. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100179>
- Kamilah, N., Anuar, K., Tan, H. L., Lim, Y. P., & Su, M. (2021). *A Review on Multifunctional Carbon-Dots Synthesized From Biomass Waste : Design / Fabrication , Characterization and Applications.* 9(April), 1–22.

<https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.626549>

- Karagianni, A., Zourou, A., Ntziouni, A., Qu, C., Terrones, M., Argirusis, C., Alexandratou, E., & Kordatos, K. V. (2026). *Carbon Dots – TiO₂ Hybrid Nanomaterials with Enhanced Photochemical Properties and Photodynamic Therapy Activity*. **Process**, 1–27.
- Karakas, Z. K., & Donmez, Z. (2025). *A Sustainable Approach in the Removal of Pharmaceuticals: The Effects of Operational Parameters in the Photocatalytic Degradation of Tetracycline with MXene / ZnO Photocatalysts*.
- Kaur, A., Kaur, M., Singh, V., & Vyas, P. (2023). *Nanocomposites of Ferrites with and Carbon Quantum Dots as Photocatalysts for Degradation of Organic Pollutants and Microbes*. **Magnetochemistry**.
- Kausor, M. Al, & Chakraborty, D. (2022). *Chapter 7 - Carbon* In S. Chowdhury & M. Naushad (Eds.), **Nanostructured Carbon Nitrides for Sustainable Energy and Environmental Applications** (pp. 137–174). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823961-2.00010-0>
- Kementerian Pertanian. (2024). *Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian: Outlook Komoditas Pertanian Pangan*.
- Kragović, M., Stojmenović, M., Petrović, J., Loredó, J., Petrović, J., Loredó, J., & Petrović, M. (2019). *Influence of Alginate Encapsulation on Point of Zero Charge (pH_{pzc})* *Influence of Alginate Encapsulation Point of Zero Charge (pH and Thermodynamic Properties on of the Natural and Fe (III)* **Procedia Manufacturing**, 32, 286–293. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.216>
- Krishna, S., Ahmed, M., Kamil, G., Kaur, M., Al-ani, A. M., Alshahrani, M. Y., Kadhém, M., Salih, S., & Yahaia, D. (2024). *A Synthesis*, 162(February).
<https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112279>
- Kumalayanti, L., Mahatnirunkul, T., Chimupala, Y., & Pinitsoontorn, S. (2025). *Journal Water Process Engineering Facile 2* **Journal of Water Process Engineering**, 72(February), 107551.
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107551>
- Kusiak-nejman, E., Sienkiewicz, A., Wanag, A., & Rokicka-konieczna, P. (2021). *The Role of Adsorption in the Photocatalytic Decomposition of. Catalyst*.

- Li, W., Wang, S., Li, Y., Ma, C., Huang, Z., Wang, C., Li, J., Chen, Z., & Liu, S. (2017). *Carbohydrate Polymers*, 175, 7–17. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.07.062>
- Li, Y., Hu, T., Li, L., Wang, H., Wu, Q., Gao, Q., Zhao, Z., & Cao, Y. (2025). *International Journal Hydrogen Energy* 3DOM Bi 191(June). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.152254>
- Li, Y., Wang, Y., Bian, C., Stejskal, J., Zheng, Y., & Jing, X. (2020). *Dyes And Pigments Azo Dye Aggregates And Their Roles In The Morphology And Conductivity Of Polypyrrole*. 177(March). <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2020.108329>
- Liao, M., Huang, B., He, J., Xiong, R., & Xie, Y. (2025). *Fe 3 O 4 And Cqds Co-Doped Zro 2 Composite For Efficient And Recyclable Removal Of Glyphosate : A Synergistic Effect Of Adsorption And Photocatalysis*. *Journal of Environmental Management*, 393(August), 126993. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126993>
- Limosani, F., Bauer, E. M., Cecchetti, D., Biagioni, S., Orlando, V., Pizzoferrato, R., Proposito, P., & Carbone, M. (2021). *Top-Down N-Doped Carbon Quantum Dots for Multiple Purposes: Heavy Metal Detection and Intracellular Fluorescence*.
- Lin, K., Yen, Y., Lin, C., Chen, P., Ko, W., Tien, T., & Lin, K. (2026). *Subject Category: Subject Areas: Author for correspondence: Green synthesis of carbon quantum dots embedded onto titanium dioxide nanowires for enhancing photocurrent*. April. <https://doi.org/10.1098/rsos.161051/509067/rsos.161051.pdf>
- Listiana, I., Bursan, R., Widyastuti, R., Rahmat, A., & Jimad, H. (2021). *Pemanfaatan Limbah Sekam Padi Dalam Pembuatan Arang Sekam di Pekon Bulurejo Kecamatan Gadingrejo Kabupaten Pringsewu*. *Informasi Artikel*.
- M'hamed, O., Younes, A., Touhami, O., & Ibtouen, R. (2024). *Assessing Electrical Engineering*, 106, 1–11. <https://doi.org/10.1007/s00202-023-02203-9>
- Maiti, D., Tong, X., Mou, X., & Yang, K. (2019). *Carbon-Based Nanomaterials for Biomedical Applications: A Recent Study*. 9(March), 1–16.

<https://doi.org/10.3389/fphar.2018.01401>

- Makama, A. B., & Umar, M. (n.d.). *CQD-Based Composites Composites as as Visible-Light Visible-Light Active Active Photocatalysts for Purification of Water Photocatalysts*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74245>
- Malini, M. R., Devendra, B. K., Panchami, H. R., Kottam, N., & Krishna, B. S. (2026). : *An Synthetic Metals*, 316(July 2025), 117977. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2025.117977>
- Mamun, K., Asw, R., & Fahmida, K. (2017). *Parameters Applied Water Science*, 7(4), 1569–1578. <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0367-y>
- Mohammad, A., Ehtisham, M., Hwan, M., & Yoon, T. (2021). *Fabrication 2 / 2 : Tuning Ceramics International*, 47(11), 15073–15081. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.065>
- Mou, Z., Meng, T., Li, J., Wang, Y., Wang, X., Guo, H., Meng, W., & Zhang, K. (2023). *Significantly 2 / International Journal of Hydrogen Energy*, 51, 748–757. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.060>
- Nakamura, R., Imanishi, A., Murakoshi, K., & Nakato, Y. (2003). *In Situ FTIR Studies of Primary Intermediates of Photocatalytic Reactions on Nanocrystalline TiO 2 Films in Contact with Aqueous Solutions*. 21, 7443–7450.
- Nan, M., Jin, B., Chow, C. W. K., & Saint, C. (2010). *Recent : A Water Research*, 44(10), 2997–3027. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.02.039>
- Nayak, T., & Pathan, A. (2023). *Materials Today : Proceedings Environmental : A Materials Today: Proceedings*, 92, 1659–1670. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.227>
- Newbury, D. E., & Ritchie, N. W. M. (2012). *Is Scanning Electron Microscopy / Energy Dispersive X-ray Spectrometry (SEM / EDS) Quantitative Surface and Microanalysis*, 00, 1–28. <https://doi.org/10.1002/sca.21041>
- Nie, Z., Huang, X., Huang, S., Zhong, J., & Ma, D. (2026). *Enhanced photocatalytic activity of Bi 2 WO 6 treated by KOH. Chemical Physics Letters*, 883(August 2025), 142539. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2025.142539>
- Omidi, M., Fatehinya, A., Farahani, M., Akbari, Z., Shahmoradi, S., Yazdian, F., Tahriri, M., Moharamzadeh, K., Tayebi, L., & Vashae, D. (2017). 7.

- Characterization of biomaterials. In Biomaterials for Oral and Dental Tissue Engineering. Elsevier Ltd.* <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100961-1.00007-4>
- Oryza, S., Patah, A., Hendra, W., & Ali, M. (2025). *Effect UV- Next Materials*, 9(October), 101298. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.101298>
- Pal, A., Sk, P. M., & Chattopadhyay, A. (2020). *Recent Materials Advances, 2015*, 525–553. <https://doi.org/10.1039/d0ma00108b>
- Panwar, N., Soehartono, A. M., Chan, K. K., Zeng, S., Xu, G., Qu, J., Coquet, P., Yong, K.-T., & Chen, X. (2019). *Nanocarbons for Biology and Medicine: Sensing, Imaging, and Drug Delivery. Chemical Reviews*, 119(16), 9559–9656. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00099>
- Parida, K. M., Sahu, N., Biswal, N. R., Naik, B., & Pradhan, A. C. (2008). *Preparation* , 318, 231–237. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.10.028>
- Parsafard, N., & Shabani, F. (2025).
- Pereira, E., Santos, D., Ketut, D., Martini, T., Lele, O. K., & Kiuk, Y. (n.d.). Teknologi Budidaya Tanaman Padi (*Oryza Sativa L .*) Berbasis Pemupukan Organik Dalam Mewujudkan Ketahanan Pangan Di Wilayah Perbatasan RI
- Plants of the World Online. (2019). *Royal Botanic Garden*. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s12284-009-9022-2>
- Qi, C., Wang, H., Yang, A., Wang, X., & Xu, J. (2021). *Facile Fabrication of Highly Fluorescent N - Doped Carbon Quantum Dots Using an Ultrasonic-Assisted Hydrothermal Method: Optical Properties and Cell Imaging*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04903>
- Qureshi, A. A., Javed, S., Muhammad, H., Javed, A., Jamshaid, M., Ali, U., & Akram, M. A. (2022). *Systematic Investigation of Structural , Morphological , Thermal , Optoelectronic , and Magnetic Properties of High-Purity Hematite / Magnetite Nanoparticles for Optoelectronics. Nanomaterial*.
- Rahman, D. Y., & Sulistyowati, R. (2023). Aplikasi *Environmental Science Journal (ESJo): Jurnal Ilmu Lingkungan*, 1(2), 89–105.
- Raji, Y., Nadi, A., Rouway, M., Sbai, S. J., Yassine, W., Elmahbouby, A., Cherkaoui, O., & Zyade, S. (2022). *Efficient Adsorption of Methyl Orange on Nanoporous Carbon from Agricultural Wastes : Characterization , Kinetics ,*

Thermodynamics , Regeneration and Adsorption Mechanism.

- Rasal, A. S., Subrahmanya, T. M., Kizhepat, S., Getachew, G., Vithal, A., Devan, R. S., Hung, W., Fahmi, M. Z., Wibrianto, A., & Chang, J. (2025). : *Classification- Coordination Chemistry Reviews*, 533(August 2024), 216510. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2025.216510>
- Rasouli, A., Shahabi-ghahfarrokhi, I., Namdari, M., & Shaterian, M. (2026). *Magnetically-: Characterization Cleaner Waste Systems*, 13(November 2025), 100492. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2026.100492>
- Riveli, N. (2023). *Dynamic Jurnal Material Dan Energi Indonesia*, 13(01), 39–44.
- Roacho-p, J. A., Ruiz-hernandez, F. G., Chapa-gonzalez, C., Mart, H. G., Flores-urquizo, I. A., Pedroza-montoya, F. E., Garza-treviño, E. N., Bautista-villareal, M., & Garc, P. E. (2020). *Magnetite Nanoparticles Coated with PEG Primary Cell Cultures. Polymers*, 12(200).
- Rosales, S., Medina, O. E., Garzon, N., Zapata, K., Cort, F. B., Taborda, E. A., & Ord, J. C. (2025). *Systematic (CQD): Definition* , 219(May). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115854>
- Saeed, M., Muneer, M., Haq, A. ul, & Akram, N. (2022). *Photocatalysis: Environmental Science and Pollution Research*, 29(1), 293–311. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16389-7>
- Saheeda, P., Sabira, K., Joseph, J., & Jayalekshmi, S. (2019).
- Sahoo, S. S., & Mansingh, S. (2021). *Nanoscale Advances* 5487–5524. <https://doi.org/10.1039/d1na00477h>
- Sari, S. P., Putri, R. T., & Fabiani, V. A. (2023). Ekstraksi dan Karakterisasi Silika dari Sekam Padi Asal Bangka I(November), 78–81.
- Saxena, C. S., & Kaur, A. K. (2025). *Analytical : A International Journal of Trends in Emerging Research and Development*, 3(1), 7–10.
- Sgreccia, A. R. N. E., Cabibbo, R. P. M., Bolli, S. K. E., & Knauth, L. P. P. (2022). *Tuneable Journal of Nanostructure in Chemistry*, 12(4), 565–580. <https://doi.org/10.1007/s40097-021-00431-8>
- Shafique, M., Shabir, M., Yaseen, M., & Nawaz, H. (2022). *CQD / 2 Materials Chemistry and Physics*, 278(March 2021), 125583.

- <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125583>
- Sherly, A., Subramani, S., Paulraj, R., & Sivakumar, R. (2026). *2 S 4 / 2 / MWCNT : A Journal of Water Process Engineering*, 81(June 2025), 109275. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.109275>
- Sibakrishna, P., & Jena, H. M. (2025). *Preparation , 2 Coconut Shell Granular Activated Carbon (2 / CSGAC) Surfaces and Interfaces*, 78(October), 108138. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.108138>
- Su, N., Zhang, H., Wang, X., Xu, C., Yan, Q., Yang, D., Zhou, Y., & Lu, C. (2025). *Boosted Applied Surface Science*, 692(January). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.162728>
- Sundar, S., Jayaprakash, N., & Govindaraj, D. (2026). *Carbon- Advances, Environmental Pollution and Management*, 3(November 2025), 99–116. <https://doi.org/10.1016/j.epm.2025.11.002>
- Susana, I. G. B., Putra, I. K. P., & Aryadi, I. gudti K. C. A. W. (2025). Analisis Potensi Biomassa Sekam Padi di Pulau Lombok Sebagai Sumber Energi Terbarukan. *Energi, Materials and Product Design*, 1(4), 260–265.
- Tan, B. L., Norhaizan, M. E., & Chan, L. C. (2023). *Rice Bran : From Waste to Nutritious Food Ingredients*.
- Tatiana, A., Ramírez, O., Tovar, M. R., & Marrufo, O. S. (2024). *Scientific Reports*, 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60115-5>
- Thakur, A., Kumar, A., & Singh, A. (2024). *Adsorptive : Carbon- Carbon*, 217(August 2023), 118621. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118621>
- Thakur, S., Alasiri, G., Bains, A., Nagraik, R., Alaseem, A. M., Fareed, M., & Chawla, P. (2026). *Food Bioscience Synergistic : A Food Bioscience*, 75(November 2025), 108034. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.108034>
- Thamaphat, K., Limsuwan, P., & Ngotawornchai, B. (2008). *Phase Characterization of TiO 2 Powder by XRD and TEM. National Science*, 361, 357–361.
- Thangaraj, B., Solomon, P. R., Chuangchote, S., & Wongyao, N. (2021). *Biomass-derived Carbon Quantum Dots – A Review Part 1 : Preparation and Characterization*. 4, 1–38. <https://doi.org/10.1002/cben.202000029>
- The Basics of UV-Vis Spectrophotometry.

- Thi, V., Nhu, T., & Nguyen, V. (2025). *Pt / 2 Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B*, 558(October 2024), 165560. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2024.165560>
- Thongsai, N., Tanawannapong, N., Praneerad, J., & Kladsomboon, S. (2019). *Real-Colloids and Surfaces A*, 560(September 2018), 278–287. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.09.077>
- Tolosana-Moranchel, A., Pecharromán, C., Faraldos, M., & Bahamonde, A. (2020). *Strong Effect Of Light Scattering By Distribution Of TiO2 Particle Aggregates On Photocatalytic Efficiency In Aqueous Suspensions. Chemical Engineering Journal*, 403, 126186. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126186>
- Utomo, Y., & Fadila, E. N. (2020). Isolasi Lignin dari Sekam Padi (Oriza Sativa L) Serta Pemanfaatanya Sebagai Adsorben Ion Cd (II). *JC-T (Journal Cis-Trans)*, 4(2), 19–26. <https://doi.org/10.17977/um0260v4i22020p019>
- Vatanpour, A., Zakariapoornaeini, M., & Rezazadeh, N. (2025). *Evaluation UV / 2 Journal of Molecular Liquids*, 439(PA), 128940. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.128940>
- Waseem, M., Ali, R., Hussain, N., Zahoor, M., Avci, A., Pehlivan, E., Richard, K., & Willander, M. (2019). *Microchemical Journal*, 146(January), 517–524. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.01.034>
- Xie, S., Huang, P., Kruzic, J. J., Zeng, X., & Qian, H. (2016). *Fe- Nature Publishing Group, February*, 1–10. <https://doi.org/10.1038/srep21947>
- Xing, S., Zheng, K., Shi, L., Kang, K., Peng, Z., Zhang, X., Liu, B., Yang, H., & Yue, G. (2024). *Fluorescence Detection of Pb 2 + in Environmental Water Using Biomass Carbon Quantum Dots Modified with Acetamide-Glycolic Acid Deep Eutectic Solvent*.
- Yagmur, H. K., & Kaya, I. (2021). *Synthesis 2 - Journal of Molecular Structure*, 1232. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.130071>
- Zafar, M. (2020). *Titanium dioxide nanostructures as efficient photocatalyst : Progress , challenges and perspective. August*, 1–21. <https://doi.org/10.1002/er.6079>
- Zenebe, A., Dikamu, M., & Ezez, D. (2025). *Synthesis of Chitosan-Natrolite modified magnetite nanocomposite (Chio / Fe 3 O 4 @ NAT) for*

- photocatalytic degradation of Methyl Orange using response surface model (RSM). Scientific African, 30(September), e03004. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e03004>*
- Zhang, J., Kuang, M., Wang, J., Liu, R., Xie, S., & Ji, Z. (2019). *Fabrication Chemical Physics Letters, 730(June), 391–398. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2019.06.011>*
- Zhang, L., Han, Y., Yang, J., Deng, S., & Wang, B. (2021). *Construction / LM- 2) Applied Surface Science, 546(January), 149089. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.149089>*
- Zhao, J., Deng, Q., Yang, Z., Zhang, H., & Zhang, C. (2024). *Synthesis -C 3 N 4 / 3 / Optical Materials, 147(October 2023), 114757. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.114757>*
- Zhu, Y., Zhu, R., Xi, Y., Zhu, J., Zhu, G., & He, H. (2019). *Applied Catalysis B : Environmental Strategies Fenton : A Applied Catalysis B: Environmental, 255(January), 117739. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.05.041>*
- Zou, Y., & Yang, T. (2019a). *Chapter 9 - Rice Husk, Rice Husk Ash and Their Applications. In L.-Z. Cheong & X. Xu (Eds.), Rice Bran and Rice Bran Oil (pp. 207–246). AOCS Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812828-2.00009-3>*
- Zou, Y., & Yang, T. (2019b). *Rice Husk , Rice Husk Ash and Their. In Rice Bran and Rice Bran Oil. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812828-2.00009-3>*

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Perhitungan Larutan
Lampiran 2	Hasil Pengujian Fotokatalis
Lampiran 3	Perhitungan Kinetika Fotokatalis
Lampiran 4	Hasil Perhitungan Kristalinitas dan Ukuran Kristal
Lampiran 5	Hasil Pengukuran di Laboratorium Limbah PPNS
Lampiran 6	Hasil PSA
Lampiran 7	Hasil FTIR
Lampiran 8	Hasil XRD
Lampiran 9	Hasil SEM-EDX Mapping
Lampiran 10	Dokumentasi Penelitian

|

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

Lampiran 1

Perhitungan Larutan

|

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

1. Pembuatan Larutan HNO₃ 2,5 M 500 ml

- a. Menentukan molaritas HNO₃ 65%

$$\rho_{\text{HNO}_3} = 1,51 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Mr HNO}_3 = 63 \text{ g/mol}$$

$$\begin{aligned} [\text{HNO}_3 \text{ 65\%}] &= \frac{\rho_{\text{HNO}_3}}{\text{Mr HNO}_3} \times 65\% \times \frac{1000 \text{ mL}}{L} \\ &= \frac{1,51 \text{ gr/cm}^3}{63 \text{ g/mol}} \times 65\% \times \frac{1000 \text{ mL}}{L} \\ &\approx 15,579 \text{ M} \end{aligned}$$

- b. Menentukan kebutuhan larutan HNO₃ untuk HNO₃ 2,5 M 500 ml

$$M_1 \times V_1 = M_2 V_2$$

$$15,579 \text{ M} \times V_1 = 2,5 \text{ M} \times 500 \text{ ml}$$

$$V_1 = 80,236 \text{ ml}$$

2. Pembuatan Larutan NaOH 10 M

$$\text{Mr NaOH} = 40 \text{ g/mol}$$

- a. Larutan NaOH 10 M 100 mL

$$\begin{aligned} \text{Massa NaOH} &= \frac{\text{Mr} \times V(\text{ml}) \times M}{1000 \text{ mL}} \\ &= \frac{40 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \times 100 \text{ mL} \times 10 \text{ M}}{1000 \text{ mL}} \\ &= 40 \text{ gram} \end{aligned}$$

- b. Larutan NaOH 5 M 100 mL dari NaOH 10 M

$$M_1 \times V_1 = M_2 V_2$$

$$10 \text{ M} \times V_1 = 5 \text{ M} \times 100 \text{ mL}$$

$$V_1 = 50 \text{ mL}$$

- c. Larutan NaOH 0,5 M 100 mL dari NaOH 5 M

$$M_1 \times V_1 = M_2 V_2$$

$$5 \text{ M} \times V_1 = 0,5 \text{ M} \times 100 \text{ mL}$$

$$V_1 = 10 \text{ mL}$$

3. Membuat Larutan FeCl₂·4H₂O 4 M Sebanyak 100 ml

$$\text{Mr FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} = 198,83 \text{ g/mol}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Massa } FeCl_2 \cdot 4H_2O &= \frac{Mr \times V(ml) \times M}{1000 \text{ mL}} \\
 &= \frac{198,83 \frac{g}{mol} \times 100 \text{ ml} \times 4 \text{ M}}{1000 \text{ mL}} \\
 &= 79,532 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

4. Membuat Larutan $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 4 M Sebanyak 100 ml

$$Mr = 270,3 \text{ gr/mol}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Massa } FeCl_3 \cdot 460 &= \frac{Mr \times V(ml) \times M}{1000 \text{ mL}} \\
 &= \frac{270,3 \frac{g}{mol} \times 100 \text{ ml} \times 4 \text{ M}}{1000 \text{ mL}} \\
 &= 108,12 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

5. Membuat Larutan HCl 0,5 M Sebanyak 100 ml

a. Menentukan molaritas HCl 36%

$$\rho_{HNO_3} = 1,91 \text{ gr/cm}^3$$

$$Mr \quad HCl = 36,46 \text{ g/mol}$$

$$\begin{aligned}
 [HCl \text{ 37\%}] &= \frac{\rho_{HCl}}{Mr \text{ HCl}} \times 37\% \times \frac{1000 \text{ mL}}{L} \\
 &= \frac{1,91 \text{ gr/cm}^3}{36,46 \text{ g/mol}} \times 37\% \times \frac{1000 \text{ mL}}{L} \\
 &\approx 12,06 \text{ M}
 \end{aligned}$$

b. Menentukan kebutuhan larutan HCl untuk HCl 0,5 M 100 ml

$$M_1 \times V_1 = M_2 V_2$$

$$12,06 \text{ M} \times V_1 = 0,5 \text{ M} \times 100 \text{ ml}$$

$$V_1 \approx 4,14594 \text{ ml}$$

6. Membuat Larutan Induk *Methyl Orange* 1000 ppm

Larutan induk MO 1000 ppm dibuat dengan melarutkan 1 gram MO dengan 1000 ml air suling.

- Menimbang 1 gram MO
- Melarutkan MO dengan menggunakan ± 100 ml air dalam gelas beaker
- Mengaduk MO hingga larut dengan sempurna
- Memindahkan larutan ke dalam labu ukur 1000 ml

- e. Membilas gelas *beaker* sebanyak 3 kali
- f. Melakukan pengenceran dengan menambahkan air suling hingga tanda batas
- g. Kocok hingga homogen
- h. Simpan dalam wadah gelap dengan dilapisi aluminium foil

7. Membuat Larutan Standar MO untuk Kurva Kalibrasi

- a. Menentukan kebutuhan larutan induk MO untuk 1000 ml MO 10 ppm

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$1000 \text{ ppm} \times V_1 = 10 \text{ ppm} \times 1000 \text{ ml}$$

$$V_1 = 10 \text{ ml}$$

- b. Menentukan kebutuhan larutan standar MO 10 ppm untuk 50 ml MO 9 ppm

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$10 \text{ ppm} \times V_1 = 9 \text{ ppm} \times 50 \text{ ml}$$

$$V_1 = 45 \text{ ml}$$

- c. Menentukan kebutuhan larutan standar MO 10 ppm untuk 50 ml MO 8 ppm

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$10 \text{ ppm} \times V_1 = 8 \text{ ppm} \times 50 \text{ ml}$$

$$V_1 = 40 \text{ ml}$$

- d. Menentukan kebutuhan larutan standar MO 10 ppm untuk 50 ml MO 7 ppm

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$10 \text{ ppm} \times V_1 = 7 \text{ ppm} \times 50 \text{ ml}$$

$$V_1 = 35 \text{ ml}$$

- e. Menentukan kebutuhan larutan standar MO 10 ppm untuk 50 ml MO 6 ppm

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$10 \text{ ppm} \times V_1 = 6 \text{ ppm} \times 50 \text{ ml}$$

$$V_1 = 30 \text{ ml}$$

- f. Menentukan kebutuhan larutan standar MO 10 ppm untuk 50 ml MO 5 ppm

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$10 \text{ ppm} \times V_1 = 5 \text{ ppm} \times 50 \text{ ml}$$

$$V_1 = 25 \text{ ml}$$

- g. Menentukan kebutuhan larutan standar MO 10 ppm untuk 50 ml MO 4 ppm

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$10 \text{ ppm} \times V_1 = 4 \text{ ppm} \times 50 \text{ ml}$$

$$V_1 = 20 \text{ ml}$$

- h. Menentukan kebutuhan larutan standar MO 10 ppm untuk 50 ml MO 3 ppm

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$10 \text{ ppm} \times V_1 = 3 \text{ ppm} \times 50 \text{ ml}$$

$$V_1 = 15 \text{ ml}$$

- i. Menentukan kebutuhan larutan standar MO 10 ppm untuk 50 ml MO 2 ppm

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$10 \text{ ppm} \times V_1 = 2 \text{ ppm} \times 50 \text{ ml}$$

$$V_1 = 10 \text{ ml}$$

- j. Menentukan kebutuhan larutan standar MO 10 ppm untuk 50 ml MO 1 ppm

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$10 \text{ ppm} \times V_1 = 1 \text{ ppm} \times 50 \text{ ml}$$

$$V_1 = 5 \text{ ml}$$

8. Membuat Larutan Standar MO untuk Pengujian

- a. Menentukan kebutuhan larutan induk MO untuk 100 ppm sebanyak 100 ml

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$1000 \text{ ppm} \times V_1 = 100 \text{ ppm} \times 1000 \text{ ml}$$

$$V_1 = 100 \text{ ml}$$

- b. Menentukan kebutuhan larutan induk MO untuk 80 ppm sebanyak 100 ml

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$1000 \text{ ppm} \times V_1 = 80 \text{ ppm} \times 1000 \text{ ml}$$

$$V_1 = 80 \text{ ml}$$

- c. Menentukan kebutuhan larutan induk MO untuk 60 ppm sebanyak 100 ml

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$1000 \text{ ppm} \times V_1 = 60 \text{ ppm} \times 1000 \text{ ml}$$

$$V_1 = 60 \text{ ml}$$

- d. Menentukan kebutuhan larutan induk MO untuk 40 ppm sebanyak 100 ml

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$1000 \text{ ppm} \times V_1 = 40 \text{ ppm} \times 1000 \text{ ml}$$

$$V_1 = 40 \text{ ml}$$

- e. Menentukan kebutuhan larutan induk MO untuk 20 ppm sebanyak 100 ml

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$1000 \text{ ppm} \times V_1 = 20 \text{ ppm} \times 1000 \text{ ml}$$

$$V_1 = 20 \text{ ml}$$

|

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

Lampiran 2

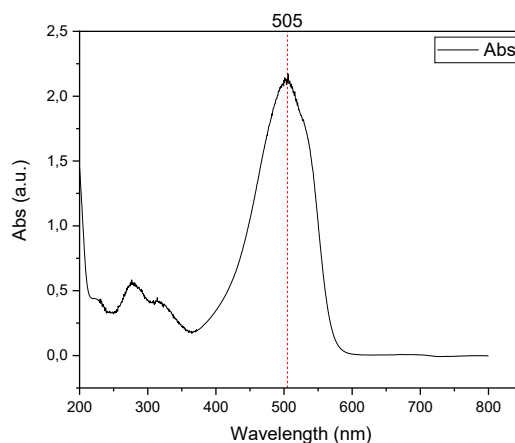
Hasil Pengukuran Panjang Gelombang

Pengukuran Panjang Gelombang

Pengukuran panjang gelombang dilakukan untuk mengetahui puncak serapan maksimum MO. Pada penelitian ini scan panjang gelombang dilakukan pada MO dengan konsentrasi 20 ppm dengan suasana asam pada pH 3, pH 7 dan pH 9.

Pengukuran Panjang Gelombang Suasana Asam

Hasil pemindaian panjang gelombang MO pada suasana asam dengan pH 3 dapat dilihat pada **Gambar L2.1** berikut.



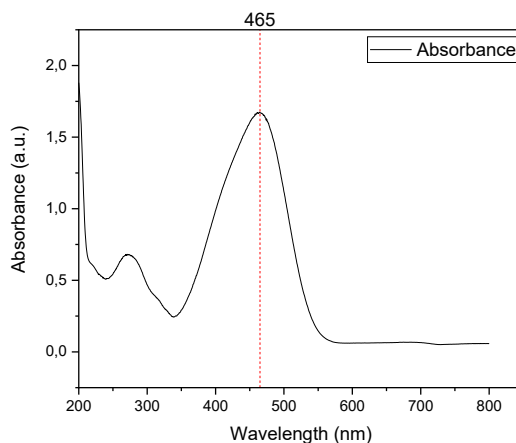
Gambar Gambar L2.1 Hasil Scan Panjang Gelombang MO pada Suasana Asam

Hasil scan panjang gelombang larutan MO menunjukkan bahwa puncak serapan maksimum (λ_{max}) berada pada panjang gelombang 505 nm. Puncak ini merupakan pita serapan utama MO pada daerah tampak dan berkaitan dengan sistem kromofor azo. Secara umum, literatur melaporkan bahwa MO memiliki dua pita serapan karakteristik, yaitu sekitar 271 nm yang berasal dari cincin aromatik dan sekitar 464 nm yang berasal dari gugus azo pada bentuk normalnya. Pergeseran puncak ke sekitar 505 nm pada penelitian ini menunjukkan adanya pergeseran puncak serapan ke arah yang lebih besar, yang mengindikasikan bahwa MO berada dalam medium asam. Pada variasi konsentrasi 20 ppm, panjang gelombang maksimum ini dapat digunakan sebagai panjang gelombang kerja untuk analisis kuantitatif, karena menurut hukum *Beer-Lambert* absorbansi berbanding lurus dengan konsentrasi selama kondisi pengukuran tetap. Dengan demikian,

peningkatan konsentrasi MO diharapkan meningkatkan intensitas absorbansi pada λ_{max} yang sama (Xie *et al.*, 2016).

Pengukuran Panjang Gelombang Suasana Netral

Hasil pemindaian panjang gelombang MO pada suasana netral dengan pH 7 dapat dilihat pada **Gambar L2.2** berikut.



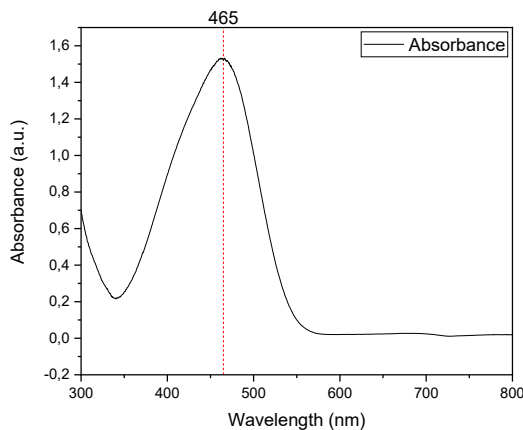
Gambar L2. 2 Hasil Scan Panjang Gelombang MO pada Suasana Netral

Hasil pemindaian panjang gelombang MO pada pH 7 menunjukkan puncak serapan maksimum pada daerah cahaya tampak dengan nilai panjang gelombang 465 nm. Puncak serapan 465 menunjukkan bahwa pada pH 7 MO masih memberikan serapan kuat pada wilayah visibel sehingga warna larutan tampak kuning-oranye. Serapan pada daerah visibel berkaitan dengan struktur azo pada MO khususnya gugus kromofor $-N=NN-$ yang terkonjugasi dengan cincin aromatik (Xie *et al.*, 2016).

Perubahan warna MO sangat bergantung pada pH larutan. MO termasuk salah satu indikator asam basa dengan rentang perubahan warna sekitar 3,1-4,4. MO menunjukkan warna merah ketika dalam suasana asam dan berubah menjadi oranye ketika pH meningkat melewati rentang tersebut. Perubahan pH pada MO membuat struktur MO mengalami protonasi sehingga sistem konjugasinya berubah. Perubahan struktur ini menyebabkan pergeseran panjang gelombang maksimum ke daerah yang lebih besar sehingga larutan berubah warna. Pergeseran ini menunjukkan adanya perbedaan bentuk molekul MO ketika berada dalam kondisi asam dan basa (Ia *et al.*, 2011).

Pengukuran Panjang Gelombang Suasana Basa

Hasil pemindaian panjang gelombang MO pada suasana basa dengan pH 7 dapat dilihat pada **Gambar L2.3** berikut.

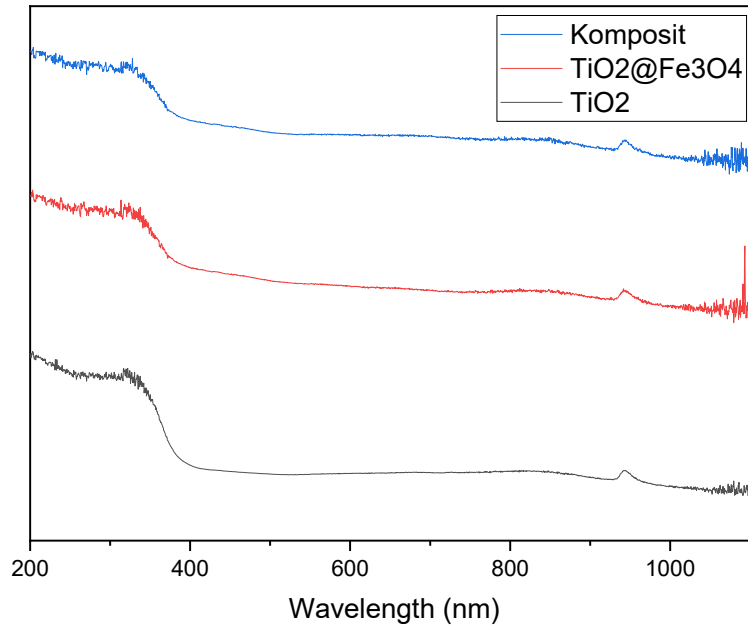


Gambar L2. 3 Hasil Scan Panjang Gelombang MO pada Suasana Basa

Hasil pemindaian panjang gelombang pada ph basa dengan nilai ph 9 menunjukkan puncak serapan maksimum MO berada pada daerah cahaya tampak dengan nilai 465. Larutan MO dengan pH 9 berada jauh di atas rentang perubahan warna MO yaitu pada pH 3.1-4,4. Struktur MO tidak berada dalam bentuk asam melainkan dominan dalam bentuk basa. Perubahan bentuk molekul ini berpengaruh terhadap sistem konjugasi pada gugus azo $-N=N-$ yang menjadi penyebab utama munculnya warna pada MO. Sistem konjugasi MO pada kondisi basa menghasilkan serapan pada panjang gelombang yang lebih pendek dibandingkan kondisi asam, sehingga puncak absorbansi berada pada daerah sekitar 464 nm. Pergeseran puncak ke panjang gelombang yang lebih besar terjadi karena adanya protonasi pada struktur molekulnya (Ia *et al.*, 2011).

Lampiran 3

Perhitungan *Band gap*



Hasil nilai absorbansi yang telah diperoleh kemudian dapat dihitung untuk menentukan nilai *band gap* pada material. Berikut contoh kalkulasi nilai absorbansi hingga metode Tauc-plot.

Diketahui :

Panjang gelombang (nm) : 1099,986572

Absorbansi : -0,11096

1. Menghitung nilai Reflektansi Relatif (R)

$$A = \log\left(\frac{1}{R}\right)$$

$$R = 10^{-A}$$

$$R = 10^{0,11096}$$

$$R = 1,291106464$$

2. Menghitung fungsi Kubelka-Munk

$$F(R) = \frac{(1-R)^2}{2R}$$

$$F(R) = \frac{(1-1,291106464)^2}{2 \cdot 1,291106464}$$

$$F(R) = 0,032817965$$

3. Menghitung nilai Energi Foton $h\nu$ (Ev)

$$hv = \frac{1240}{\lambda}$$

$$hv = \frac{1240}{1099,986572}$$

$$hv = 1,127286488$$

4. Menghitung persamaan Tauc

a. Direct

$$Direct Allowed = (F(R) \times hv)^2$$

$$Direct Allowed = (0,032817965 \times 1,127286488)^2$$

$$Direct Allowed = 0,001368648$$

b. Indirect

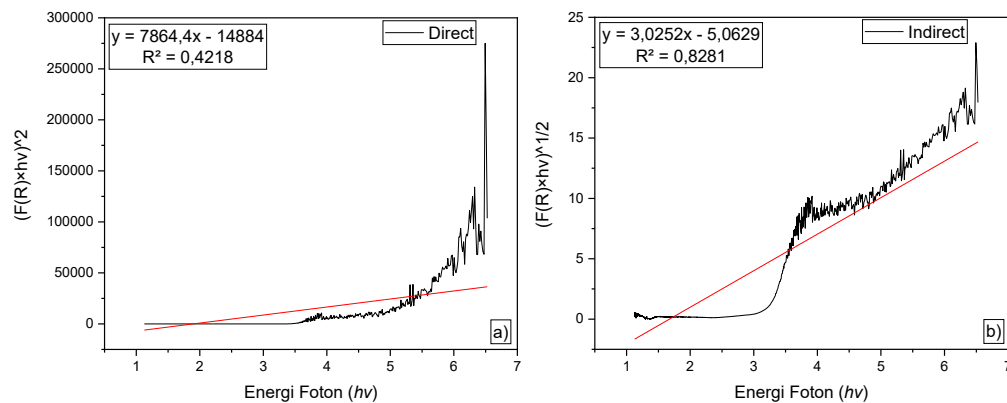
$$Indirect Allowed = (F(R) \times hv)^{\frac{1}{2}}$$

$$Indirect Allowed = (0,032817965 \times 1,127286488)^{\frac{1}{2}}$$

$$Indirect Allowed = 0,192341489$$

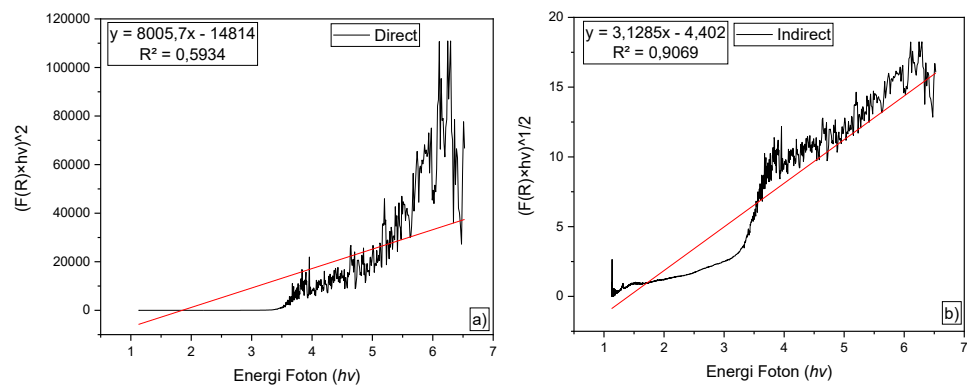
Nilai dari *Tauc-Plot* tersebut kemudian digunakan untuk menentukan nilai *band gap* berdasarkan persamaan linier garis. Grafik berikut memuat hasil perhitungan yang telah dilakukan.

1. TiO₂



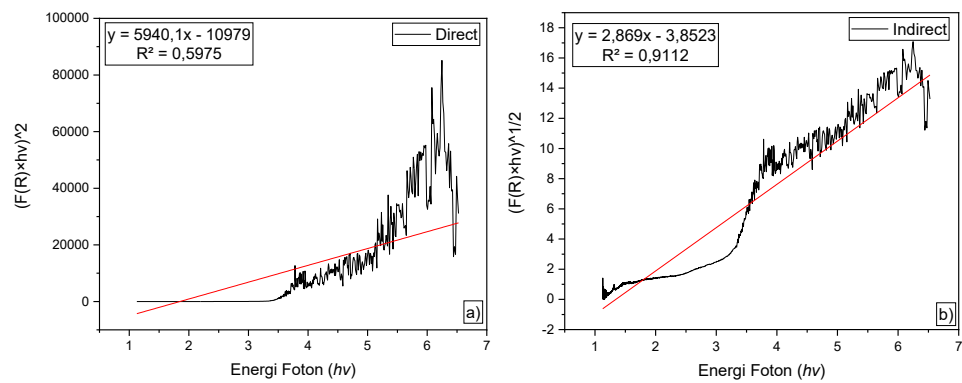
Gambar 1 TiO₂ (a) *Direct Tauc-Plot* (b) *Indirect Tauc-Plot*

2. $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$



Gambar 2. $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ (a) *Direct Tauc-Plot* (b) *Indirect Tauc-Plot*

3. $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ Terdekorasi CDs

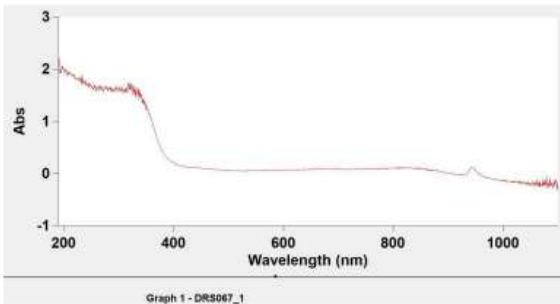


Gambar 3. $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekorasi CDs (a) *Direct Tauc-Plot* (b) *Indirect Tauc-Plot*

HASIL UJI DRS TiO_2



KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS NEGERI MALANG (UM)
UPT LABORATORIUM TERPADU
Jalan Semarang 5, Malang 65145
email: integratedlab@um.ac.id
Laman: www.integratedlab.um.ac.id

LAPORAN HASIL UJI LTUM.LHU.DRS.067.2026	
Test Equipment	: UV-Vis DRS
Received Date	: 2 Juni 2026
Order Number	: LTUM.P.660.2026
SPECIMEN DESCRIPTION	
Condition of Samples	: Sample serbuk
Sample Code	: DRS067
Material Name	: TiO_2
Measurement time	: 11 Juni 2026
OPERATOR, ANALYZER & SUPERVISOR	
Analyzer	: Atika Sari Puspita Dewi, M.Si
Supervisor	: Prof. Hadi Nur, Ph.D
RESULTS	
Remark:	
 Graph 1 - DRS067_1	
-Hasil analisa hanya berlaku untuk sampel yang diuji	

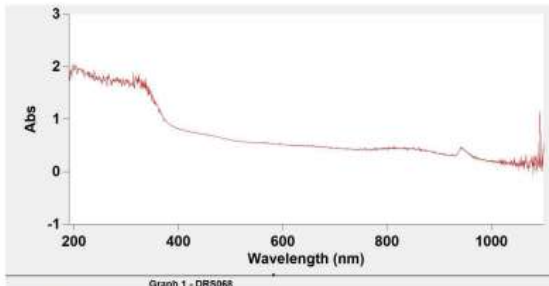
Malang, 30 Juni 2026
Menyetujui
Kepala UPT Lab Terpadu UM

Prof. Hadi Nur, Ph.D
NIP. 202108196905061003

HASIL UJI DRS $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$



KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS NEGERI MALANG (UM)
UPT LABORATORIUM TERPADU
Jalan Semarang 5, Malang 65145
email: integratedlab@um.ac.id
Laman: www.integratedlab.um.ac.id

LAPORAN HASIL UJI LTUM.LHU.DRS.068.2026	
Test Equipment	: UV-Vis DRS
Received Date	: 2 Juni 2026
Order Number	: LTUM.P.660.2026
SPECIMEN DESCRIPTION	
Condition of Samples	: Sample serbuk
Sample Code	: DRS068
Material Name	: $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$
Measurement time	: 11 Juni 2026
OPERATOR, ANALYZER & SUPERVISOR	
Analyzer	: Atika Sari Puspita Dewi, M.Si
Supervisor	: Prof. Hadi Nur, Ph.D
RESULTS	
Remark:  Graph 1 - DRS068	
-Hasil analisa hanya berlaku untuk sampel yang diuji	

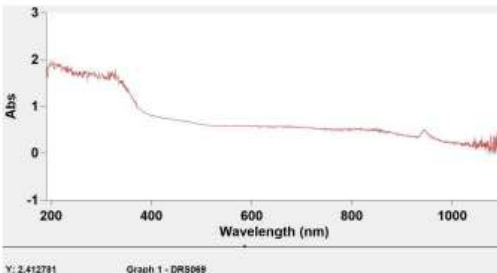
Malang, 30 Juni 2026
Menyetujui
Kepala UPT Lab Terpadu UM

Prof. Hadi Nur, Ph.D
NIP. 202108196905061003

HASIL UJI DRS KOMPOSIT $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ terdekori CDs



KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS NEGERI MALANG (UM)
UPT LABORATORIUM TERPADU
Jalan Semarang 5, Malang 65145
email: integratedlab@um.ac.id
Laman: www.integratedlab.um.ac.id

LAPORAN HASIL UJI LTUM.LHU.DRS.069.2026	
Test Equipment	: UV-Vis DRS
Received Date	: 2 Juni 2026
Order Number	: LTUM.P.660.2026
SPECIMEN DESCRIPTION	
Condition of Samples	: Sample serbuk
Sample Code	: DRS069
Material Name	: $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CQDS}$
Measurement time	: 11 Juni 2026
OPERATOR, ANALYZER & SUPERVISOR	
Analyzer	: Atika Sari Puspita Dewi, M.Si
Supervisor	: Prof. Hadi Nur, Ph.D
RESULTS	
Remark:	 Y: 2.412781 Graph 1 - DRS069
-Hasil analisa hanya berlaku untuk sampel yang diuji	

Malang, 30 Juni 2026
Menyetujui
Kepala UPT Lab Terpadu UM

Prof. Hadi Nur, Ph.D
NIP. 202108196905061003

|

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran 4

Hasil Pengujian Fotokatalis

|

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

A) Kurva Kalibrasi

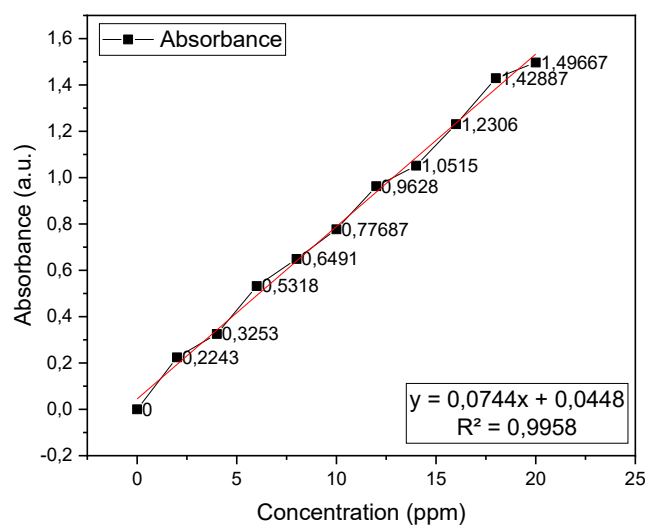
Penentuan kurva kalibrasi dilakukan dengan pembacaan nilai absorbansi larutan *Methyl Orange* (MO) menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Pada penelitian ini digunakan tiga kurva kalibrasi MO pada pH 3, 7, dan 9 karena masing-masing memiliki panjang gelombang pembacaan UV-Vis yang berbeda. Konsentrasi MO yang digunakan pada pembacaan absorbansi untuk menentukan kurva kalibrasi adalah 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, dan 20 ppm. Hasil pembacaan absorbansi dengan spektrofotometer UV-Vis disajikan pada Tabel berikut.

1) Kurva Kalibrasi pH 3

Hasil pembacaan absorbansi untuk pH 3 pada rentang konsentrasi 0 hingga 20 ppm adalah sebagai berikut.

Conc (ppm)	Abs			Mean ABS
	1	2	3	
0	0	0	0	0
2	0,2246	0,2241	0,2242	0,2243
4	0,3252	0,3254	0,3253	0,3253
6	0,5317	0,532	0,5317	0,5318
8	0,6495	0,6491	0,6487	0,6491
10	0,7766	0,7771	0,7769	0,7769
12	0,9627	0,9628	0,9629	0,9628
14	1,0512	1,0516	1,0517	1,0515
16	1,2305	1,2305	1,2308	1,2306
18	1,4288	1,4293	1,4285	1,4289
20	1,4965	1,4968	1,4967	1,4967

Grafik kurva kalibrasi dibuat dengan menghubungkan garis antara sumbu y sebagai data absorbansi dan sumbu x sebagai data konsentrasi MO. Kurva kalibrasi didapatkan persamaan regresi linier, yaitu $y=0,0744X+0,0448$ dengan R^2 sebesar 0,9956. Hasil kurva kalibrasi disajikan pada Gambar berikut.

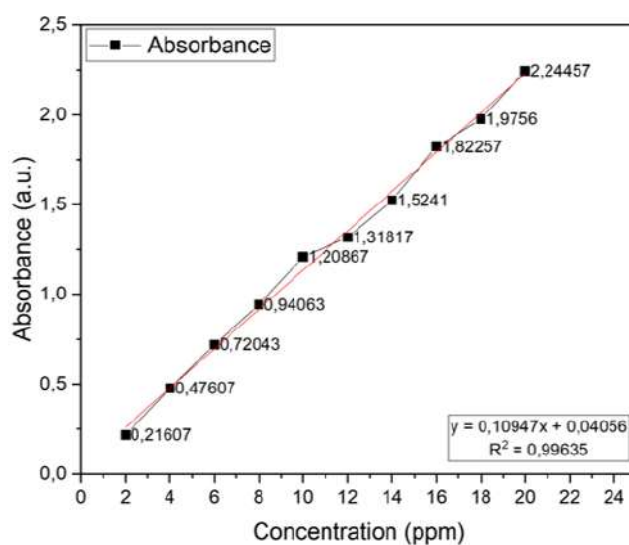


2) Kurva Kalibrasi pH 7

Hasil pembacaan absorbansi untuk pH 7 pada rentang konsentrasi 0 hingga 20 ppm adalah sebagai berikut.

Conc (ppm)	Abs			Mean ABS
	1	2	3	
0	0	0	0	0
2	0,216	0,2164	0,2158	0,2161
4	0,4759	0,4762	0,4761	0,4761
6	0,7205	0,7203	0,7205	0,7204
8	0,9408	0,9402	0,9409	0,9406
10	1,2088	1,2085	1,2087	1,2087
12	1,3176	1,3186	1,3183	1,3182
14	1,5237	1,5241	1,5245	1,5241
16	1,8225	1,8227	1,8225	1,8226
18	1,974	1,975	1,9778	1,9756
20	2,2446	2,2449	2,2442	2,2446

Grafik kurva kalibrasi dibuat dengan menghubungkan garis antara sumbu y sebagai data absorbansi dan sumbu x sebagai data konsentrasi MO. Kurva kalibrasi didapatkan persamaan regresi linier, yaitu $y=0,10947x+0,04056$ dengan R^2 sebesar 0,99635. Hasil kurva kalibrasi disajikan pada Gambar berikut.

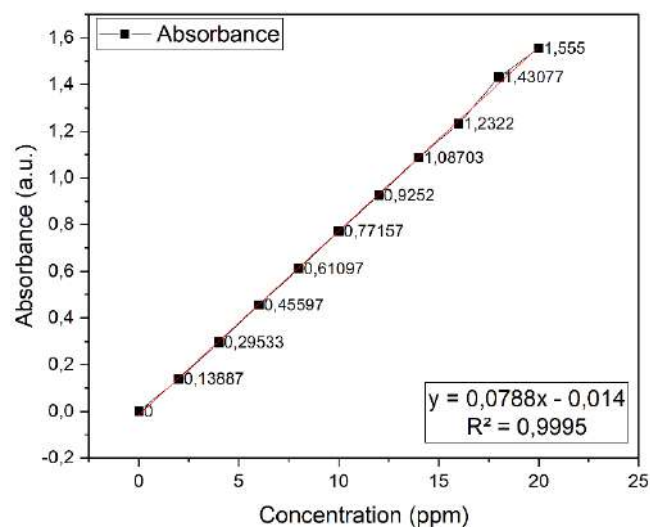


3) Kurva Kalibrasi pH 9

Hasil pembacaan absorbansi untuk pH 7 pada rentang konsentrasi 0 hingga 20 ppm adalah sebagai berikut.

Conc (ppm)	Abs			Mean ABS
	1	2	3	
0	0,0000	0,0000	0,0000	0
2	0,1388	0,1388	0,1390	0,1389
4	0,2953	0,2955	0,2952	0,2953
6	0,4559	0,4560	0,4560	0,4560
8	0,6110	0,6110	0,6109	0,6110
10	0,7716	0,7713	0,7718	0,7716
12	0,9253	0,9253	0,9250	0,9252
14	1,0869	1,0870	1,0872	1,0870
16	1,2323	1,2321	1,2322	1,2322
18	1,4309	1,4308	1,4306	1,4308
20	1,5553	1,5550	1,5547	1,5550

Grafik kurva kalibrasi dibuat dengan menghubungkan garis antara sumbu y sebagai data absorbansi dan sumbu x sebagai data konsentrasi MO. Kurva kalibrasi didapatkan persamaan regresi linier, yaitu $y=0,0788x+0,014$ dengan R^2 sebesar 0,9995. Hasil kurva kalibrasi disajikan pada Gambar berikut.



B) Perhitungan Penurunan Konsentrasi

Konsentrasi MO dihitung menggunakan persamaan regresi linear kurva kalibrasi. Berikut merupakan contoh perhitungan konsentrasi akhir MO pada Variasi 1 dengan rasio CDs 0%, waktu fotokatalitik 10 menit, konsentrasi awal 120 ppm, rata-rata absorbansi 0,9421 dan pengenceran 10 kali. Dalam perhitungan ini digunakan kurva kalibrasi pH 7 dengan persamaan linear $y = 0,10947x + 0,04056$.

$$y = 0,10947x + 0,04056$$

$$x = \frac{y - 0,04056}{0,10947} \times 10$$

$$x = \frac{0,9421 - 0,04056}{0,10947} \times 10$$

$$x = 82,8231 \text{ ppm}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut didapatkan konsentrasi akhir MO pada konsentrasi awal 120 ppm dengan waktu fotokatalitik selama 10 menit adalah 82,8231 ppm.

C) Perhitungan Kapasitas Adsorpsi dan Fotokatalitik

Perhitungan kapasitas adsorpsi atau fotokatalitik dilakukan sesuai dengan persamaan 2.3. Berikut merupakan contoh perhitungan kapasitas adsorpsi atau fotokatalitik pada Variasi 1 dengan rasio CDs 0%, waktu fotokatalitik 10 menit,

konsentrasi awal 120 ppm, dosis katalis sebanyak 0,02 g/L, dan volume sebanyak 0,1 L.

$$q_e = \frac{(C_0 - C_t) \times V_L}{m_{(g)}}$$

$$q_e = \frac{(120 \text{ pp}, -82,8231 \text{ ppm}) \times 0,1}{0,002 \text{ g}}$$

$$q_e = 1858,8466 \text{ mg/g}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut diperoleh nilai kapasitas adsorpsi dan fotokatalitik dengan sampel Variasi 1 dengan rasio CDs 0%, waktu fotokatalitik 10 menit, konsentrasi awal 120 ppm, dosis katalis sebanyak 0,02 g/L, dan volume sebanyak 0,1 L adalah sebesar 1858,8466 mg/g.

D) Perhitungan Efisiensi Removal

Konsentrasi akhir setelah penyisihan MO telah diketahui, selanjutnya dapat dilakukan perhitungan terhadap efisiensi degradasi dalam satuan persen. Kemampuan penyisihan MO pada proses fotokatalitik oleh komposit TiO₂@Fe₃O₄/CDs dihitung menggunakan persamaan 2.2. berikut merupakan contoh perhitungan kemampuan penyisihan MO pada Variasi 1 dengan rasio CDs 0%, waktu fotokatalitik 10 menit, konsentrasi awal 120 ppm, dosis katalis sebanyak 0,02 g/L, dan volume sebanyak 0,1 L. Diketahui konsentrasi akhir sebesar 82,8231 ppm.

$$\% \text{ deg} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100\%$$

$$\% \text{ deg} = \frac{(120 \text{ ppm} - 82,8231 \text{ ppm})}{120 \text{ ppm}} \times 100\%$$

$$\% \text{ deg} = 30,981\%$$

Dengan demikian, kemampuan fotokatalis dalam menyisihkan MO dengan konsentrasi awal 120 ppm pada waktu penyinaran selama 10 menit adalah sebesar 30,981%. Hasil perhitungan efisiensi ini digunakan untuk menentukan waktu kontak terbaik pada uji fotokatalis. Hasil analisis yang telah dilakukan, menghasilkan nilai konsentrasi akhir dan efisiensi removal sebagai berikut.

|

Halaman ini sengaja dikosongkan

E) Data Hasil Penelitian

Hasil analisis yang telah dilakukan, menghasilkan nilai konsentrasi akhir dan efisiensi removal sebagai berikut.

1) Hasil Pengujian Awal pH

No.	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis (g/L)	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
1	P1A1	0%	120	-30	0,02	3	25	0,1	0,0366	0,0366	0,8031	99,331%	595,9843
									0,0367				
									0,0364				
2	P1A2		120	-30	0,02	5	25	0,1	1,0202	1,0794	95,2627	20,614%	123,6866
									1,0200				
									1,1980				
3	P1A3		120	-30	0,02	7	25	0,1	1,0891	1,0891	96,1413	19,882%	119,2935
									1,0891				
									1,0891				
4	P1A4		120	-30	0,02	9	25	0,1	1,0421	1,0421	91,8871	23,427%	140,5646
									1,0423				
									1,0420				
5	P2A1	3%	120	-30	0,02	3	25	0,1	0,0979	0,0980	6,3647	94,696%	568,1763
									0,0982				
									0,0978				
6	P2A2		120	-30	0,02	5	25	0,1	1,0148	1,0149	89,4233	25,481%	152,8835
									1,0149				
									1,0151				
7	P2A3		120	-30	0,02	7	25	0,1	1,0592	1,0592	93,4360	22,137%	132,8200

No.	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis (g/L)	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
8	P2A4		120	-30	0,02	9	25	0,1	1,0592	1,0398	91,6757	23,604%	141,6214
									1,0593				
									1,0398				
									1,0398				
									1,0398				
9	P3A1	6%	120	-30	0,02	3	25	0,1	0,0794	0,0795	4,6890	96,092%	576,5550
									0,0795				
									0,0795				
10	P3A2		120	-30	0,02	5	25	0,1	1,0152	1,0153	89,4595	25,450%	152,7023
									1,0154				
									1,0154				
11	P3A3		120	-30	0,02	7	25	0,1	1,0243	1,0243	90,2687	24,776%	148,6564
									1,0242				
									1,0243				
12	P3A4		120	-30	0,02	9	25	0,1	1,0049	1,0049	88,5115	26,240%	157,4426
									1,0049				
									1,0048				
13	P4A1	9%	120	-30	0,02	3	25	0,1	0,0737	0,0736	4,1546	96,538%	579,2271
									0,0736				
									0,0734				
14	P4A2		120	-30	0,02	5	25	0,1	1,0118	1,0119	89,1516	25,707%	154,2421
									1,0119				
									1,0121				

No.	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis (g/L)	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
15	P4A3	12%	120	-30	0,02	7	25	0,1	1,0748 1,0748 1,0751	1,0749	94,8551	20,954%	125,7246
16	P4A4		120	-30	0,02	9	25	0,1	1,0264 1,0264 1,0263	1,0264	90,4589	24,618%	147,7053
17	P5A1		120	-30	0,02	3	25	0,1	0,0853 0,0853 0,0851	0,0852	5,2114	95,657%	573,9432
18	P5A2		120	-30	0,02	5	25	0,1	1,0582 1,0581 1,0579	1,0581	93,3303	22,225%	133,3484
19	P5A3		120	-30	0,02	7	25	0,1	1,0354 1,0355 1,0356	1,0355	91,2862	23,928%	143,5688
20	P5A4		120	-30	0,02	9	25	0,1	1,0276 1,0278 1,0280	1,0278	90,5888	24,509%	147,0562

2) Hasil Analisis Waktu Adsorpsi Desorpsi

No	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis (g)	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
1	A1B1	0%	120	-30	0,002	7	25	0,1	1,0448	1,0447	92,1226	23,231%	1393,8708
									1,0446				
									1,0448				
2	A1B2	3%	120	-30	0,002	7	25	0,1	1,0563	1,0544	93,0012	22,499%	1349,9396
									1,0506				
									1,0564				
3	A1B3	6%	120	-30	0,002	7	25	0,1	1,0340	1,0340	91,1534	24,039%	1442,3309
									1,0340				
									1,0341				
4	A1B4	9%	120	-30	0,002	7	25	0,1	1,0343	1,0344	91,1896	24,009%	1440,5193
									1,0345				
									1,0345				
5	A1B5	12%	120	-30	0,002	7	25	0,1	1,0432	1,0431	91,9716	23,357%	1401,4191
									1,0430				
									1,0430				
6	A2B1	0%	120	-60	0,002	7	25	0,1	1,0193	1,0496	92,5634	22,864%	1371,8297
									1,0196				
									1,1099				
7	A2B2	3%	120	-60	0,002	7	25	0,1	1,0592	1,0592	93,4360	22,137%	1328,2005
									1,0592				
									1,0593				
8	A2B3	6%	120	-60	0,002	7	25	0,1	1,0243	1,0243	90,2687	24,776%	1486,5640

No	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis (g)	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
									1,0242				
									1,0243				
9	A2B4	9%	120	-60	0,002	7	25	0,1	1,0122	1,0123	89,1818	25,682%	1540,9118
									1,0122				
									1,0124				
10	A2B5	12%	120	-60	0,002	7	25	0,1	1,0354	1,0355	91,2862	23,928%	1435,6884
									1,0355				
									1,0356				
11	A3B1	0%	120	-90	0,002	7	25	0,1	0,9635	0,9634	84,7585	29,368%	1762,0773
									0,9635				
									0,9633				
12	A3B2	3%	120	-90	0,002	7	25	0,1	1,0339	1,0339	91,1443	24,046%	1442,7838
									1,0338				
									1,0341				
13	A3B3	6%	120	-90	0,002	7	25	0,1	0,9846	0,9847	86,6818	27,765%	1665,9118
									0,9848				
									0,9846				
14	A3B4	9%	120	-90	0,002	7	25	0,1	1,0222	1,0224	90,0996	24,917%	1495,0181
									1,0224				
									1,0226				
15	A3B5	12%	120	-90	0,002	7	25	0,1	1,0234	1,0233	90,1781	24,852%	1491,0930
									1,0232				
									1,0232				
16	A4B1	0%	120	-120	0,002	7	25	0,1	1,0620	1,0619	93,6745	21,938%	1316,2742

No	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis (g)	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
17	A4B2	3%	120	-120	0,002	7	25	0,1	1,0619	1,0533	92,9016	22,582%	1354,9215
									1,0617				
									1,0533				
18	A4B3	6%	120	-120	0,002	7	25	0,1	1,0535	1,0271	90,5254	24,562%	1473,7319
									1,0532				
									1,0270				
19	A4B4	9%	120	-120	0,002	7	25	0,1	1,0271	1,0463	92,2615	23,115%	1386,9263
									1,0272				
									1,0461				
20	A4B5	12%	120	-120	0,002	7	25	0,1	1,0463	1,0435	92,0139	23,322%	1399,3056
									1,0435				
									1,0436				

3) Hasil Analisis Pengaruh Rasio Terhadap Waktu

No	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis (g/L)	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
1	A3B1	0%	120	-90	0,002	7	25	0,1	0,9635	0,9634	84,7585	29,368%	1762,0773
									0,9635				
									0,9633				
2	A3B2	3%	120	-90	0,002	7	25	0,1	0,9221	0,9221	81,0175	32,485%	1949,1244

No	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis (g/L)	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
									0,9221				
									0,9222				
3	A3B3	6%	120	-90	0,002	7	25	0,1	0,9135	0,9134	80,2264	33,145%	1988,6775
									0,9134				
									0,9133				
4	A3B4	9%	120	-90	0,002	7	25	0,1	1,0222	1,0224	90,0996	24,917%	1495,0181
									1,0224				
									1,0226				
5	A3B5	12%	120	-90	0,002	7	25	0,1	1,0234	1,0233	90,1781	24,852%	1491,0930
									1,0232				
									1,0232				
6	A5C1	0%	120	10	0,002	7	25	0,1	0,9419	0,9421	82,8231	30,981%	1858,8466
									0,9420				
									0,9423				
7	A5C2	3%	120	10	0,002	7	25	0,1	0,9313	0,9316	81,8720	31,773%	1906,4010
									0,9317				
									0,9317				
8	A5C3	6%	120	10	0,002	7	25	0,1	0,9323	0,9325	81,9535	31,705%	1902,3249
									0,9325				
									0,9326				
9	A5C4	9%	120	10	0,002	7	25	0,1	0,9261	0,9261	81,3768	32,186%	1931,1594
									0,9259				
									0,9263				
10	A5C5	12%	120	10	0,002	7	25	0,1	0,9428	0,9427	82,8835	30,930%	1855,8273

No	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis (g/L)	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
									0,9428				
									0,9426				
11	A6D1	0%	120	15	0,002	7	25	0,1	0,9506	0,9540	83,9010	30,083%	1804,9517
									0,9606				
									0,9507				
12	A6D2	3%	120	15	0,002	7	25	0,1	0,9411	0,9409	82,7174	31,069%	1864,1304
									0,9407				
									0,9409				
13	A6D3	6%	120	15	0,002	7	25	0,1	0,9247	0,9247	81,2470	32,294%	1937,6510
									0,9247				
									0,9246				
14	A6D4	9%	120	15	0,002	7	25	0,1	0,9351	0,9351	82,1950	31,504%	1890,2476
									0,9353				
									0,9350				
15	A6D5	12%	120	15	0,002	7	25	0,1	0,9303	0,9302	81,7512	31,874%	1912,4396
									0,9301				
									0,9303				
16	A7E1	0%	120	20	0,002	7	25	0,1	0,9203	0,9203	80,8484	32,626%	1957,5785
									0,9203				
									0,9202				
17	A7E2	3%	120	20	0,002	7	25	0,1	0,9405	0,9405	82,6781	31,102%	1866,0930
									0,9405				
									0,9404				
18	A7E3	6%	120	20	0,002	7	25	0,1	0,9405	0,9406	82,6902	31,091%	1865,4891

No	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis (g/L)	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
									0,9405				
									0,9408				
19	A7E4	9%	120	20	0,002	7	25	0,1	0,9327	0,9330	82,0018	31,665%	1899,9094
									0,9331				
									0,9332				
20	A7E5	12%	120	20	0,002	7	25	0,1	0,9281	0,9281	81,5610	32,033%	1921,9505
									0,9282				
									0,9281				
21	A8F1	0%	120	30	0,002	7	25	0,1	0,9504	0,9504	83,5749	30,354%	1821,2560
									0,9503				
									0,9504				
22	A8F2	3%	120	30	0,002	7	25	0,1	0,9492	0,9492	83,4662	30,445%	1826,6908
									0,9493				
									0,9490				
23	A8F3	6%	120	30	0,002	7	25	0,1	0,9373	0,9373	82,3913	31,341%	1880,4348
									0,9370				
									0,9376				
24	A8F4	9%	120	30	0,002	7	25	0,1	0,8729	0,8731	76,5731	36,189%	2171,3466
									0,8731				
									0,8732				
25	A8F5	12%	120	30	0,002	7	25	0,1	0,9343	0,9343	82,1165	31,570%	1894,1727
									0,9342				
									0,9343				
26	A9G1	0%	120	45	0,002	7	25	0,1	0,9300	0,9300	81,7271	31,894%	1913,6473

No	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis (g/L)	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
									0,9300				
									0,9299				
27	A9G2	3%	120	45	0,002	7	25	0,1	0,9303	0,9303	81,7572	31,869%	1912,1377
									0,9303				
									0,9303				
28	A9G3	6%	120	45	0,002	7	25	0,1	0,9392	0,9391	82,5574	31,202%	1872,1316
									0,9391				
									0,9391				
29	A9G4	9%	120	45	0,002	7	25	0,1	0,9344	0,9345	82,1347	31,554%	1893,2669
									0,9345				
									0,9345				
30	A9G5	12%	120	45	0,002	7	25	0,1	0,9352	0,9353	82,2132	31,489%	1889,3418
									0,9354				
									0,9354				
31	A10H1	0%	120	60	0,002	7	25	0,1	0,9601	0,9602	84,4626	29,615%	1776,8720
									0,9604				
									0,9600				
32	A10H2	3%	120	60	0,002	7	25	0,1	0,9504	0,9544	83,9402	30,050%	1802,9891
									0,9560				
									0,9568				
33	A10H3	6%	120	60	0,002	7	25	0,1	0,9513	0,9512	83,6534	30,289%	1817,3309
									0,9512				
									0,9512				
34	A10H4	9%	120	60	0,002	7	25	0,1	0,9696	0,9694	85,2989	28,918%	1735,0543

No	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis (g/L)	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
35	A10H5	12%	120	60	0,002	7	25	0,1	0,9694	0,9415	82,7717	31,024%	1861,4130
									0,9692				
									0,9414				
									0,9417				

4) Hasil Analisis Pengaruh Ph

No	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis (g/L)	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
1	A3I1	0%	120	-90	0,002	5	25	0,1	0,9433	0,9435	82,9499	30,875%	1852,5060
									0,9437				
									0,9434				
2	A3I2	0%	120	-90	0,002	7	25	0,1	0,9635	0,9634	84,7585	29,368%	1762,0773
									0,9635				
									0,9633				
3	A3I3	0%	120	-90	0,002	9	25	0,1	0,9280	0,9281	119,6404	0,300%	17,9780
									0,9282				
									0,9280				
4	A3J1	6%	120	-90	0,002	5	25	0,1	0,9572	0,9570	84,1727	29,856%	1791,3647
									0,9569				
									0,9568				
5	A3J2	6%	120	-90	0,002	7	25	0,1	0,9846	0,9847	86,6818	27,765%	1665,9118

No	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis (g/L)	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
									0,9848				
									0,9846				
6	A3J3	6%	120	-90	0,002	9	25	0,1	0,9208	0,9208	118,7183	1,068%	64,0863
									0,9205				
									0,9211				
									0,9518				
7	A9I1	0%	120	45	0,002	5	25	0,1	0,9519	0,9518	83,7047	30,246%	1814,7645
									0,9517				
									0,9300				
8	A9I2	0%	120	45	0,002	7	25	0,1	0,9300	0,9300	81,7271	31,894%	1913,6473
									0,9299				
									0,9047				
9	A9I3	0%	120	45	0,002	9	25	0,1	0,9046	0,9047	116,6794	2,767%	166,0321
									0,9049				
									0,9298				
10	A9J1	6%	120	45	0,002	5	25	0,1	0,9296	0,9298	81,7120	31,907%	1914,4022
									0,9300				
									0,9392				
11	A9J2	6%	120	45	0,002	7	25	0,1	0,9391	0,9391	82,5574	31,202%	1872,1316
									0,9391				
									0,9018				
12	A9J3	6%	120	45	0,002	9	25	0,1	0,9021	0,9021	116,3409	3,049%	182,9526
									0,9023				

5) Hasil Analisis Pengaruh Konsentrasi MO

No	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis (g/L)	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
1	A3K1	0%	40	-90	0,002	7	25	0,1	0,2940	0,2940	24,1184	39,704%	794,0821
									0,2940				
									0,2939				
2	A3K2	0%	60	-90	0,002	7	25	0,1	0,4906	0,4906	41,9263	30,123%	903,6836
									0,4906				
									0,4905				
3	A3K3	0%	80	-90	0,002	7	25	0,1	0,6298	0,6298	54,5411	31,824%	1272,9469
									0,6298				
									0,6299				
4	A3K4	0%	100	-90	0,002	7	25	0,1	0,7810	0,7808	68,2126	31,787%	1589,3720
									0,7808				
									0,7805				
5	A3K5	0%	120	-90	0,002	7	25	0,1	0,9635	0,9634	84,7585	29,368%	1762,0773
									0,9635				
									0,9633				
6	A3L1	6%	40	-90	0,002	7	25	0,1	0,2385	0,2385	19,0912	52,272%	1045,4408
									0,2385				
									0,2384				
7	A3L2	6%	60	-90	0,002	7	25	0,1	0,4667	0,4668	39,7736	33,711%	1011,3225
									0,4668				
									0,4669				
8	A3L3	6%	80	-90	0,002	7	25	0,1	0,6278	0,6278	54,3569	32,054%	1282,1558

No	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis (g/L)	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
									0,6277				
									0,6279				
									0,7746				
9	A3L4	6%	100	-90	0,002	7	25	0,1	0,7748	0,7747	67,6661	32,334%	1616,6969
									0,7748				
									0,7748				
10	A3L5	6%	120	-90	0,002	7	25	0,1	0,9846	0,9847	86,6818	27,765%	1665,9118
									0,9848				
									0,9846				
11	A9K1	0%	40	45	0,002	7	25	0,1	0,3146	0,3146	25,9903	35,024%	700,4831
									0,3146				
									0,3147				
12	A9K2	0%	60	45	0,002	7	25	0,1	0,4607	0,4608	39,2331	34,612%	1038,3454
									0,4609				
									0,4609				
13	A9K3	0%	80	45	0,002	7	25	0,1	0,6121	0,6086	52,6178	34,228%	1369,1123
									0,6120				
									0,6017				
14	A9K4	0%	100	45	0,002	7	25	0,1	0,7707	0,7706	67,2947	32,705%	1635,2657
									0,7705				
									0,7707				
15	A9K5	0%	120	45	0,002	7	25	0,1	0,9300	0,9300	81,7271	31,894%	1913,6473
									0,9300				
									0,9299				

No	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis (g/L)	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
16	A9L1	6%	40	45	0,002	7	25	0,1	0,2293	0,2293	18,2579	54,355%	1087,1075
									0,2293				
									0,2292				
17	A9L2	6%	60	45	0,002	7	25	0,1	0,4644	0,4647	39,5803	34,033%	1020,9843
									0,4648				
									0,4648				
18	A9L3	6%	80	45	0,002	7	25	0,1	0,6256	0,6261	54,2029	32,246%	1289,8551
									0,6265				
									0,6262				
19	A9L4	6%	100	45	0,002	7	25	0,1	0,7723	0,7723	67,4487	32,551%	1627,5664
									0,7722				
									0,7725				
20	A9L5	6%	120	45	0,002	7	25	0,1	0,9392	0,9391	82,5574	31,202%	1872,1316
									0,9391				
									0,9391				

6) Hasil Analisis Pengaruh Dosis Katalis

No	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis g	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)
1	A3M1	0%	120	-90	0,002	7	25	0,1	0,9764	0,9764	85,9300	28,392%
									0,9764			

No	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis g	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)
									0,9763			
2	A3M2	0%	120	-90	0,004	7	25	0,1	0,9673	0,9675	85,1298	29,058%
									0,9676			
									0,9677			
									0,9573			
3	A3M3	0%	120	-90	0,006	7	25	0,1	0,9576	0,9576	84,2301	29,808%
									0,9579			
									0,9566			
4	A3M4	0%	120	-90	0,008	7	25	0,1	0,9566	0,9567	84,1455	29,879%
									0,9568			
									0,9559			
5	A3M5	0%	120	-90	0,010	7	25	0,1	0,9558	0,9557	84,0580	29,952%
									0,9554			
									0,9846			
1	A3N1	6%	120	-90	0,002	7	25	0,1	0,9848	0,9847	86,6818	27,765%
									0,9846			
									0,9343			
2	A3N2	6%	120	-90	0,004	7	25	0,1	0,9342	0,9343	82,1226	31,565%
									0,9345			
									0,9312			
3	A3N3	6%	120	-90	0,006	7	25	0,1	0,9314	0,9313	81,8478	31,793%
									0,9313			
									0,9255			
4	A3N4	6%	120	-90	0,008	7	25	0,1	0,9255	0,9255	81,3225	32,231%

No	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis g	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)
									0,9254			
									0,9256			
5	A3N5	6%	120	-90	0,010	7	25	0,1	0,9138	0,9130	80,1932	33,172%
									0,9121			
									0,9132			
									0,9654			
1	A9M1	0%	120	45	0,002	7	25	0,1	0,9659	0,9657	84,9607	29,199%
									0,9657			
									0,9511			
2	A9M2	0%	120	45	0,004	7	25	0,1	0,9511	0,9511	83,6383	30,301%
									0,9510			
									0,9379			
3	A9M3	0%	120	45	0,006	7	25	0,1	0,9381	0,9381	82,4607	31,283%
									0,9382			
									0,9346			
4	A9M4	0%	120	45	0,008	7	25	0,1	0,9342	0,9346	82,1437	31,547%
									0,9349			
									0,9306			
5	A9M5	0%	120	45	0,010	7	25	0,1	0,9307	0,9308	81,7995	31,834%
									0,9310			
									0,9519			
1	A9N1	6%	120	45	0,002	7	25	0,1	0,9518	0,9518	83,7047	30,246%
									0,9517			

No	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis g	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)
2	A9N2	6%	120	45	0,004	7	25	0,1	0,9486	0,9485	83,4088	30,493%
									0,9481			
									0,9489			
3	A9N3	6%	120	45	0,006	7	25	0,1	0,9441	0,9439	82,9921	30,840%
									0,9438			
									0,9439			
4	A9N4	6%	120	45	0,008	7	25	0,1	0,9267	0,9267	81,4312	32,141%
									0,9268			
									0,9266			
5	A9N5	6%	120	45	0,010	7	25	0,1	0,8859	0,8857	77,7174	35,236%
									0,8855			
									0,8857			

7) Hasil *Reusability Test*

No	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis g	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
1	A9R1	6%	120	45	0,100	7	25	1	0,8138	0,8137	71,1957	40,670%	488,0435
									0,8135				
									0,8138				
2		6%	120	45	0,100	7	25	1	0,8307	0,8310	72,7627	39,364%	472,3732
									0,8311				

No	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis g	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
									0,8312				
3		6%	120	45	0,100	7	25	1	0,7952	0,7285	63,4813	47,099%	565,1872
									0,7953				
									0,5951				
4		6%	120	45	0,100	7	25	1	0,7902	0,7905	69,0942	42,421%	509,0580
									0,7905				
									0,7908				
5		6%	120	45	0,100	7	25	1	0,8202	0,8193	71,6999	40,250%	483,0012
									0,8188				
									0,8188				
6		6%	120	45	0,100	7	25	1	0,8072	0,8071	70,6008	41,166%	493,9915
									0,8072				
									0,8070				
7		6%	120	45	0,100	7	25	1	0,8319	0,8317	72,8261	39,312%	471,7391
									0,8319				
									0,8313				
8		6%	120	45	0,100	7	25	1	0,8282	0,8283	72,5211	39,566%	474,7886
									0,8284				
									0,8284				
9		6%	120	45	0,100	7	25	1	0,8384	0,8383	73,4269	38,811%	465,7307
									0,8384				
									0,8382				
10		6%	120	45	0,100	7	25	1	0,8073	0,8072	70,6039	41,163%	493,9614

No	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis g	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
11		6%	120	45	0,100	7	25	1	0,8071	0,8014	70,0785	41,601%	499,2150
									0,8071				
									0,8013				
									0,8013				
									0,8015				
									0,7988				
									0,7994				
									0,7993				
									0,8584				
									0,8540				
									0,8582				
									0,8103				
12		6%	120	45	0,100	7	25	1	0,8103	0,8103	70,8847	40,929%	491,1534
									0,8103				
									0,8102				
									0,8317				
									0,8316				
									0,8319				
									0,8091				
									0,8090				
									0,8092				
									0,7873				
									0,7870				
									0,7871				

No	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis g	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
18		6%	120	45	0,100	7	25	1	0,7992	0,7992	69,8792	41,767%	501,2077
									0,7994				
									0,7989				
19		6%	120	45	0,100	7	25	1	0,8255	0,8256	72,2736	39,772%	477,2645
									0,8257				
									0,8256				
20		6%	120	45	0,100	7	25	1	0,8207	0,8207	71,8297	40,142%	481,7029
									0,8207				
									0,8207				
21		6%	120	45	0,100	7	25	1	0,8273	0,8275	72,4457	39,629%	475,5435
									0,8275				
									0,8277				
22		6%	120	45	0,100	7	25	1	0,8004	0,8005	69,9970	41,669%	500,0302
									0,8004				
									0,8006				
23		6%	120	45	0,100	7	25	1	0,8560	0,8560	75,0302	37,475%	449,6981
									0,8561				
									0,8560				
24		6%	120	45	0,100	7	25	1	0,7961	0,7960	69,5954	42,004%	504,0459
									0,7958				
									0,7962				
1	A9R1	6%	120	45	0,100	7	25	1	0,7392	0,7391	64,4384	46,301%	555,6159
									0,7391				

No	Kode Sampel	Rasio CDs	Konsentrasi Awal (ppm)	Waktu Kontak (min)	Dosis g	pH	Suhu (°C)	Volume Larutan (L)	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
									0,7390				
2		6%	120	45	0,100	7	25	1	0,7886	0,7885	68,9161	42,570%	510,8394
									0,7885				
									0,7885				
									0,7885				
3		6%	120	45	0,100	7	25	1	0,8288	0,8289	72,5679	39,527%	474,3207
									0,8289				
									0,8288				
4		6%	120	45	0,100	7	25	1	0,7390	0,7390	64,4293	46,309%	555,7065
									0,7390				
									0,7390				
5		6%	120	45	0,100	7	25	1	0,8223	0,8224	71,9837	40,014%	480,1630
									0,8223				
	0,8226												
6	A9R2	6%	120	45	0,100	7	25	1	0,8467	0,8466	74,1757	38,187%	458,2428
									0,8465				
									0,8466				
7		6%	120	45	0,100	7	25	1	0,8299	0,8301	72,6781	39,435%	473,2186
									0,8300				
									0,8303				
8	A9R3	6%	120	45	0,100	7	25	1	0,9099	0,9096	79,8853	33,429%	401,1473
									0,9096				
									0,9094				

Lampiran 5

Hasil Uji Statistik

|

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

1. Uji Normalitas

Tests of Normality						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Residual for Efisiensi	.206	291	.000	.848	291	.000
Residual for Efisiensi	.206	291	.000	.848	291	.000
Residual for Efisiensi	.206	291	.000	.848	291	.000

a. Lilliefors Significance Correction

2. Uji Homogenitas

Levene's Test of Equality of Error Variances ^a			
Dependent Variable: Efisiensi			
F	df1	df2	Sig.
64.436	86	204	.000

Tests the null hypothesis that the error variance of the dependent variable is equal across groups.

a. Design: Intercept + Konsentrasi + Dosis + pH + Rasio + Waktu + Rasio * Waktu

3. Uji Non-Parametrik Kruskal-Wallis

Test Statistics ^{a,b}	
Efisiensi	
Kruskal-Wallis H	20.562
df	4
Asymp. Sig.	.000
a. Kruskal Wallis Test	
b. Grouping Variable: Rasio	

Test Statistics ^{a,b}	
Efisiensi	
Kruskal-Wallis H	11.597
df	2
Asymp. Sig.	.003
a. Kruskal Wallis Test	
b. Grouping Variable: pH	

Test Statistics^{a,b} <table> <tr><th colspan="2">Efisiensi</th></tr> <tr><td>Kruskal-Wallis H</td><td>6.528</td></tr> <tr><td>df</td><td>4</td></tr> <tr><td>Asymp. Sig.</td><td>.163</td></tr> </table> a. Kruskal Wallis Test b. Grouping Variable: Dosis	Efisiensi		Kruskal-Wallis H	6.528	df	4	Asymp. Sig.	.163	Test Statistics^{a,b} <table> <tr><th colspan="2">Efisiensi</th></tr> <tr><td>Kruskal-Wallis H</td><td>121.064</td></tr> <tr><td>df</td><td>4</td></tr> <tr><td>Asymp. Sig.</td><td>.000</td></tr> </table> a. Kruskal Wallis Test b. Grouping Variable: Konsentrasi	Efisiensi		Kruskal-Wallis H	121.064	df	4	Asymp. Sig.	.000
Efisiensi																	
Kruskal-Wallis H	6.528																
df	4																
Asymp. Sig.	.163																
Efisiensi																	
Kruskal-Wallis H	121.064																
df	4																
Asymp. Sig.	.000																
Test Statistics^{a,b} <table> <tr><th colspan="2">Efisiensi</th></tr> <tr><td>Kruskal-Wallis H</td><td>133.443</td></tr> <tr><td>df</td><td>44</td></tr> <tr><td>Asymp. Sig.</td><td>.000</td></tr> </table> a. Kruskal Wallis Test b. Grouping Variable: Raiso_Waktu	Efisiensi		Kruskal-Wallis H	133.443	df	44	Asymp. Sig.	.000	Test Statistics^{a,b} <table> <tr><th colspan="2">Efisiensi</th></tr> <tr><td>Kruskal-Wallis H</td><td>104.491</td></tr> <tr><td>df</td><td>8</td></tr> <tr><td>Asymp. Sig.</td><td>.000</td></tr> </table> a. Kruskal Wallis Test b. Grouping Variable: Waktu	Efisiensi		Kruskal-Wallis H	104.491	df	8	Asymp. Sig.	.000
Efisiensi																	
Kruskal-Wallis H	133.443																
df	44																
Asymp. Sig.	.000																
Efisiensi																	
Kruskal-Wallis H	104.491																
df	8																
Asymp. Sig.	.000																

Tabel Hasil Analisis Menggunakan Kruskal Wallis

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
0% -60	3	1,0447	0,0001	0,0001	1,0444	1,0450	1,0446	1,0448
3% -60	3	1,0544	0,0033	0,0019	1,0462	1,0627	1,0506	1,0564
6% -60	3	1,0340	0,0001	0,0000	1,0339	1,0342	1,0340	1,0341
9% -60	3	1,0344	0,0001	0,0001	1,0341	1,0347	1,0343	1,0345
12% -60	3	1,0431	0,0001	0,0001	1,0428	1,0434	1,0430	1,0432
0% -30	3	1,0496	0,0522	0,0302	0,9199	1,1793	1,0193	1,1099
3% -30	3	1,0592	0,0001	0,0000	1,0591	1,0594	1,0592	1,0593
6% -30	3	1,0243	0,0001	0,0000	1,0241	1,0244	1,0242	1,0243
9% -30	3	1,0123	0,0001	0,0001	1,0120	1,0126	1,0122	1,0124
12% -30	3	1,0355	0,0001	0,0001	1,0353	1,0357	1,0354	1,0356
0% 0 min	3	0,9634	0,0001	0,0001	0,9631	0,9637	0,9633	0,9635
3% 0 min	3	0,9221	0,0001	0,0000	0,9220	0,9223	0,9221	0,9222
6% 0 min	3	0,9134	0,0001	0,0001	0,9132	0,9136	0,9133	0,9135
9% 0 min	3	1,0224	0,0002	0,0001	1,0219	1,0229	1,0222	1,0226
12% 0 min	3	1,0233	0,0001	0,0001	1,0230	1,0236	1,0232	1,0234
0% 10 min	3	0,9421	0,0002	0,0001	0,9416	0,9426	0,9419	0,9423
3% 10 min	3	0,9316	0,0002	0,0001	0,9310	0,9321	0,9313	0,9317

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
6% 10 min	3	0,9325	0,0002	0,0001	0,9321	0,9328	0,9323	0,9326
9% 10 min	3	0,9261	0,0002	0,0001	0,9256	0,9266	0,9259	0,9263
12% 10 min	3	0,9427	0,0001	0,0001	0,9424	0,9430	0,9426	0,9428
0% 15 min	3	0,9540	0,0057	0,0033	0,9397	0,9682	0,9506	0,9606
3% 15 min	3	0,9409	0,0002	0,0001	0,9404	0,9414	0,9407	0,9411
6% 15 min	3	0,9247	0,0001	0,0000	0,9245	0,9248	0,9246	0,9247
9% 15 min	3	0,9351	0,0002	0,0001	0,9348	0,9355	0,9350	0,9353
12% 15 min	3	0,9302	0,0001	0,0001	0,9299	0,9305	0,9301	0,9303
0% 20 min	3	0,9203	0,0001	0,0000	0,9201	0,9204	0,9202	0,9203
3% 20 min	3	0,9405	0,0001	0,0000	0,9403	0,9406	0,9404	0,9405
6% 20 min	3	0,9406	0,0002	0,0001	0,9402	0,9410	0,9405	0,9408
9% 20 min	3	0,9330	0,0003	0,0002	0,9323	0,9337	0,9327	0,9332
12% 20 min	3	0,9281	0,0001	0,0000	0,9280	0,9283	0,9281	0,9282
0% 30 min	3	0,9504	0,0001	0,0000	0,9502	0,9505	0,9503	0,9504
3% 30 min	3	0,9492	0,0002	0,0001	0,9488	0,9495	0,9490	0,9493
6% 30 min	3	0,9373	0,0003	0,0002	0,9366	0,9380	0,9370	0,9376
9% 30 min	3	0,8731	0,0002	0,0001	0,8727	0,8734	0,8729	0,8732
12% 30 min	3	0,9343	0,0001	0,0000	0,9341	0,9344	0,9342	0,9343
0% 45 min	3	0,9300	0,0001	0,0000	0,9298	0,9301	0,9299	0,9300
3% 45 min	3	0,9303	0,0000	0,0000	0,9303	0,9303	0,9303	0,9303
6% 45 min	3	0,9391	0,0001	0,0000	0,9390	0,9393	0,9391	0,9392
9% 45 min	3	0,9345	0,0001	0,0000	0,9343	0,9346	0,9344	0,9345
12% 45 min	3	0,9353	0,0001	0,0001	0,9350	0,9356	0,9352	0,9354
0% 60 min	3	0,9602	0,0002	0,0001	0,9597	0,9607	0,9600	0,9604
3% 60 min	3	0,9544	0,0035	0,0020	0,9457	0,9631	0,9504	0,9568
6% 60 min	3	0,9512	0,0001	0,0000	0,9511	0,9514	0,9512	0,9513
9% 60 min	3	0,9694	0,0002	0,0001	0,9689	0,9699	0,9692	0,9696
12% 60 min	3	0,9415	0,0002	0,0001	0,9411	0,9419	0,9414	0,9417
Total	135	0,9633	0,0475	0,0041	0,9552	0,9714	0,8729	1,1099

|

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran 6

Hasil Perhitungan Kristalinitas dan Ukuran Kristal

|

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

I. Indeks Kristalinitas

Kristalinitas partikel dinyatakan dalam bentuk persentase kristal. Nilai persentase kristal diperoleh dari perbandingan antara luas daerah kristalin terhadap luas total, kemudian dikalikan 100%. Pada pola XRD, bagian kristalin biasanya muncul sebagai *peak* tajam, sedangkan bagian *amorf* muncul sebagai *broad hump* atau gundukan lebar. Perbedaan bentuk *peak* inilah yang digunakan untuk menghitung derajat kristalinitas. Perhitungan luas kristalin dan luas total dilakukan menggunakan perangkat lunak Origin dengan memasukkan data hasil pengujian XRD.

Berdasarkan *output* dari *software* Origin, diperoleh posisi puncak 2θ , nilai luas puncak dan nilai FWHM pada Tabel berikut:

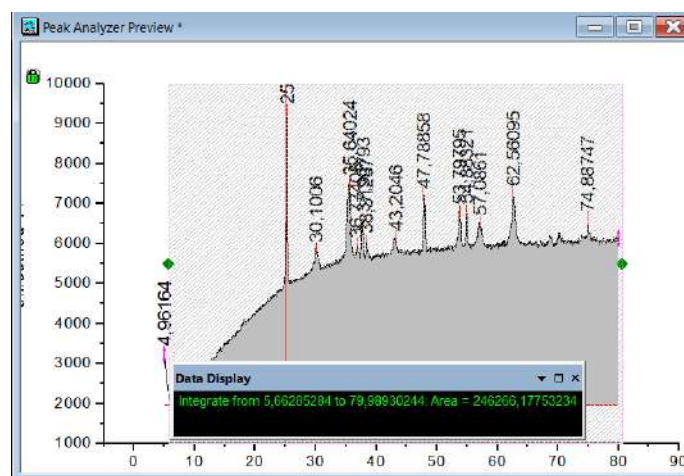
Smoothed Y1		Number of Points	3451
		Degrees of Freedom	3408
		Reduced Chi-Sqr	11924,83579
		Residual Sum of Squares	4,06398E7
		R-Square (COD)	0,99236
		Adj. R-Square	0,99226
		Fit Status	Failed(-200)

Fit Status Code:
-200: fit did not converge. Maximum iteration setting of 400 was reached.

Summary	y0	Value	Standard Error	xc	Value	Standard Error	w	Value	Standard Error	A	Value	Standard Error	sigma	FWHM	Height	Statistics
Peak1(Smoothed Y1)	3570,59141	479,87419	7,48514	0,38421	9,64224	0,92095	-1,7624,99762	5809,98437	4,82112	11,35287	-1,458,43995	11924,83579	0,99226			
Peak2(Smoothed Y1)	3570,59141	479,87419	25,17551	0,00126	0,19965	0,00255	1079,70712	12,34587	0,09698	0,23542	4308,48301					
Peak3(Smoothed Y1)	3570,59141	479,87419	30,06901	0,01647	0,49647	0,0343	322,20315	20,7785	0,24823	0,58455	517,91893					
Peak4(Smoothed Y1)	3570,59141	479,87419	35,43701	0,00497	0,5317	0,01017	1207,20805	21,81816	0,26595	0,62503	1811,57613					
Peak5(Smoothed Y1)	3570,59141	479,87419	35,43701	3,39583	22,23655	6,98406	55611,79161	38046,67015	11,10328	28,14622	1998,19392					
Peak6(Smoothed Y1)	3570,59141	479,87419	43,08656	0,02306	0,5367	0,04866	280,52118	22,48386	0,26695	0,63544	395,75687					
Peak7(Smoothed Y1)	3570,59141	479,87419	47,8422	0,00436	0,23429	0,00504	351,20862	13,77034	0,11715	0,27586	1332,46261					
Peak8(Smoothed Y1)	3570,59141	479,87419	55,83051	0,09498	3,0688	0,40179	2334,47006	618,18015	1,5343	3,613	606,98642					
Peak9(Smoothed Y1)	3570,59141	479,87419	55,83051	0,02543	1,01956	0,08826	-734,44012	129,0834	0,50679	1,20044	-574,75433					
Peak10(Smoothed Y1)	3570,59141	479,87419	55,83051	2,0791	17,8808	8,31931	38411,26379	35675,08493	8,8404	20,81755	1733,39175					
Peak11(Smoothed Y1)	3570,59141	479,87419	62,64222	0,00859	0,5267	0,01961	699,90967	28,97402	0,26495	0,62367	1054,36053					
Peak12(Smoothed Y1)	3570,59141	479,87419	65,33408	1,62993	5,48117	7,60441	10801,14228	112152,38089	2,74058	6,45358	1572,30461					
Peak13(Smoothed Y1)	3570,59141	479,87419	65,5419	1,66297	4,58988	5,29318	-7374,39721	116590,64385	2,29433	5,37919	-1287,98592					
Peak14(Smoothed Y1)	3570,59141	479,87419	77,43357	2,23747	19,05081	4,62375	58916,19883	31567,28067	9,5254	22,43061	2467,52434					

ANOVA	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Regression	43	1,00495E11	2,33687E9	195969,74915	0
Residual	3408	4,06398E7	11924,83579		
Uncorrected Total	3451	1,00528E11			
Corrected Total	3450	5,31679E9			

Luas area total diperoleh pada hasil analisis grafik pada Gambar berikut:



Berikut disajikan contoh perhitungan indeks kristalinitas pada komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ Terdekorasi CDs.

$$X_c(\%) = \frac{A_c}{A_c + A_a} \times 100\%$$

Keterangan:

X_c = Indeks kristalinitas (%)

A_c = Luas area *peak* kristalin

A_a = Luas area *amorf*

$$\begin{aligned} X_c(\%) &= \frac{144302,4}{246266,2} \times 100\% \\ &= 58,59612\% \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan, diperoleh kristalinitas komposit $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ Terdekorasi CDs sebesar 58,59612%. Hasil perhitungan kristalinitas pada sampel disajikan pada Tabel berikut:

No	Sampel	Luas Area <i>Peak</i> Kristalin	Luas Area <i>Amorf</i>	Indeks Kristalinitas (%)
1	$\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ Terdekorasi CDs	144302,4	246266,2	58,59612%

II. Ukuran Kristal

Perhitungan ukuran partikel dilakukan sesuai dengan Persamaan 2.13 dengan menggunakan data posisi puncak 2θ tertinggi dan FWHM dari hasil uji XRD. Berikut disajikan contoh perhitungan ukuran partikel kristal sampel komposit katalis $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ Terdekorasi CDs. Ukuran kristal dapat dihitung mengikuti langkah berikut:

1. Menganalisis derajat 2θ pada nilai intensitas dari titik tertinggi
Derajat 2θ pada nilai intensitas dari titik tertinggi : $35,5803^\circ$
2. Mengukur nilai FWHM
Nilai FWHM : $0,62603^\circ$
3. Mengubah FWHM menjadi radian

$$\beta(\text{radians}) = \frac{FWHM}{180} \pi$$

$$\theta(radians) = \frac{2\theta}{2}$$

Keterangan:

$\beta(radians)$ = Indeks kristalinitas (%)

$FWHM$ = nilai intensitas dari titik tertinggi

$\theta(radians)$ = setengah dari nilai θ

Sehingga,

$$\begin{aligned}\beta(radians) &= \frac{0,62603^\circ}{180} \times \pi \\ &= 0,0182105 \text{ radians}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(radians) &= \frac{35,5803^\circ}{2} \\ &= 17,79015 \text{ radians}\end{aligned}$$

4. Menggunakan persamaan Scherrer

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

Keterangan :

D = Ukuran Partikel (nm)

λ = Panjang gelombang radiasi (0,15406 nm)

β = Integrasi luas puncak refleksi (FWHM, radian)

K = Konstanta (0,9)

Sehingga, ukuran kristal dapat dihitung sebagai berikut

$$D = \frac{0,9 \times 0,15406}{0,0182105 \times \cos(17,79015)}$$

$$D = \frac{0,1386544}{0,0182105 \times 0,48939}$$

$$D \approx 15,5491 \text{ nm}$$

Jadi, diperoleh ukuran partikel kristal sampel komposit katalis $\text{TiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ Terdekorasi CDs sebesar 15,5491 nm. Hasil perhitungan ukuran kristal untuk masing masing puncak adalah sebagai berikut

Posisi puncak 2 theta	FWHM	D(nm)	Rata-rata ukuran kristal (nm)
7,4851	11,3529	0,7013	9,7860
25,1755	0,2354	34,5763	

Posisi puncak 2 theta	FWHM	D(nm)	Rata-rata ukuran kristal (nm)
30,6901	0,5846	14,0929	
35,4370	0,6260	13,3219	
35,4370	26,1462	0,3190	
43,9856	0,6354	13,4832	
47,9422	0,2759	31,5166	
55,8305	3,6130	2,4883	
55,8305	1,2004	7,4893	
55,8305	20,8176	0,4319	
62,6422	0,6237	14,9110	
65,3341	6,4536	1,4623	
65,5419	5,3792	1,7564	
77,4336	22,4306	0,4539	

Lampiran 7

Hasil Pengukuran di Laboratorium Limbah PPNS

|

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

HASIL ANALISIS DI LABORATORIUM LIMBAH PPNS

Nama Praktikan : Rina Puji Astutik

NRP : 1022040112

Tanggal : 23 April 2026 hingga 23 Juni 2026

Kode sampel pada masing-masing pengujian

a) Uji pH Awal

pH	Rasio CDs				
	0%	3%	6%	9%	12%
3	P1A1	P1A2	P1A3	P1A4	P1A5
5	P2A1	P2A2	P2A3	P2A4	P2A5
7	P3A1	P3A2	P3A3	P3A4	P3A5
9	P4A1	P4A2	P4A3	P4A4	P4A5
Jumlah Sampel	20				

b) Uji Adsorpsi-Desorpsi

Waktu (menit)	Rasio CDs				
	0%	3%	6%	9%	12%
-30	A1B1	A1B2	A1B3	A1B4	A1B5
-60	A2B1	A2B2	A2B3	A2B4	A2B5
-90	A3B1	A3B2	A3B3	A3B4	A3B5
-120	A4B1	A4B2	A4B3	A4B4	A4B5
Jumlah Sampel	20				

c) Variasi Rasio vs Waktu

Waktu (menit)	Rasio CDs				
	0%	3%	6%	9%	12%
-90	A3B1	A3B2	A3B3	A3B4	A3B5
10	A5C1	A5C2	A5C3	A5C4	A5C5
15	A6D1	A6D2	A6D3	A6D4	A6D5
20	A7E1	A7E2	A7E3	A7E4	A7E5
30	A8F1	A8F2	A8F3	A8F4	A8F5
45	A9G1	A9G2	A9G3	A9G4	A9G5
60	A10H1	A10H2	A10H3	A10H4	A10H5
Jumlah Sampel	35				

d) Variasi pH

Rasio	Waktu	pH		
		5	7	9
0%	-90	A3I1	A3I2	A3I3
6%		A3J1	A3J2	A3J3
0%	45	A9I1	A9I2	A9I3
6%		A9J1	A9J2	A9J3
Jumlah Sampel		12		

e) Variasi Konsentrasi MO

Rasio	Waktu	Konsentrasi Awal MO (ppm)				
		40	60	80	100	120
0%	-90	A3K1	A3K2	A3K3	A3K4	A3K5
6%		A3L1	A3L2	A3L3	A3L4	A3L5
0%	45	A9K1	A9K2	A9K3	A9K4	A9K5
6%		A9L1	A9L2	A9L3	A9L4	A9L5
Jumlah Sampel		20				

f) Variasi Dosis Katalis

Rasio	Waktu	Dosis Katalis (g/L)				
		0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
0%	-90	A3M1	A3M2	A3M3	A3M4	A3M5
6%		A3N1	A3N2	A3N3	A3N4	A3N5
0%	45	A9M1	A9M2	A9M3	A9M4	A9M5
6%		A9N1	A9N2	A9N3	A9N4	A9N5
Jumlah Sampel		20				

g) Reusability test

Siklus	Kode Sampel
0	R1
1	R2
2	R3
3	R4
Jumlah Sampel	4

Hasil Pengujian Masing-masing Variasi

a) Uji pH Awal

No .	Kode Sampel	p H	Dosis Katalis (g/L)	Konsentrasi Awal (ppm)	Absorbansi	Rata-rata Absorbansi	Konsentrasi Akhir (ppm)	Persentase Removal (%)
1	P1A1	3	0,02	120	0,0366	0,0366	0,8031	99,331%
					0,0367			
					0,0364			
2	P1A2	5	0,02	120	1,0202	1,0794	95,2627	20,614%
					1,0200			
					1,1980			
3	P1A3	7	0,02	120	1,0891	1,0891	96,1413	19,882%
					1,0891			
					1,0891			
4	P1A4	9	0,02	120	1,0421	1,0421	91,8871	23,427%
					1,0423			
					1,0420			
5	P2A1	3	0,02	120	0,0979	0,0980	6,3647	94,696%
					0,0982			
					0,0978			
6	P2A2	5	0,02	120	1,0148	1,0149	89,4233	25,481%
					1,0149			
					1,0151			
7	P2A3	7	0,02	120	1,0592	1,0592	93,4360	22,137%
					1,0592			
					1,0593			
8	P2A4	9	0,02	120	1,0398	1,0398	91,6757	23,604%
					1,0398			
					1,0398			
9	P3A1	3	0,02	120	0,0794	0,0795	4,6890	96,092%
					0,0795			
					0,0795			
10	P3A2	5	0,02	120	1,0152	1,0153	89,4595	25,450%
					1,0154			
					1,0154			
11	P3A3	7	0,02	120	1,0243	1,0243	90,2687	24,776%
					1,0242			
					1,0243			
12	P3A4	9	0,02	120	1,0049	1,0049	88,5115	26,240%
					1,0049			
					1,0048			
13	P4A1	3	0,02	120	0,0737	0,0736	4,1546	96,538%
					0,0736			
					0,0734			
14	P4A2	5	0,02	120	1,0118	1,0119	89,1516	25,707%

No .	Kode Sampel	pH	Dosis Katalis (g/L)	Konsentrasi Awal (ppm)	Absorbansi	Rata-rata Absorbansi	Konsentrasi Akhir (ppm)	Persentase Removal (%)
					1,0119			
					1,0121			
15	P4A3	7	0,02	120	1,0748	1,0749	94,8551	20,954%
					1,0748			
					1,0751			
16	P4A4	9	0,02	120	1,0264	1,0264	90,4589	24,618%
					1,0264			
					1,0263			
17	P5A1	3	0,02	120	0,0853	0,0852	5,2114	95,657%
					0,0853			
					0,0851			
18	P5A2	5	0,02	120	1,0582	1,0581	93,3303	22,225%
					1,0581			
					1,0579			
19	P5A3	7	0,02	120	1,0354	1,0355	91,2862	23,928%
					1,0355			
					1,0356			
20	P5A4	9	0,02	120	1,0276	1,0278	90,5888	24,509%
					1,0278			
					1,0280			

b) Uji Adsorpsi-Desorpsi

No	Kode Sampel	Konsentrasi Awal (ppm)	Dosis (g)	pH	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)
1	A1B1	120	0,002	7	1,0448	1,0447	92,1226	23,231%
					1,0446			
					1,0448			
2	A1B2	120	0,002	7	1,0563	1,0544	93,0012	22,499%
					1,0506			
					1,0564			
3	A1B3	120	0,002	7	1,0340	1,0340	91,1534	24,039%
					1,0340			
					1,0341			
4	A1B4	120	0,002	7	1,0343	1,0344	91,1896	24,009%
					1,0345			
					1,0345			
5	A1B5	120	0,002	7	1,0432	1,0431	91,9716	23,357%
					1,0430			

N o	Kode Sampe l	Konsentra si Awal (ppm)	Dosi s (g)	p H	Absorban si	Rata- rata	Konsentra si Akhir (ppm)	Efisiens i Remov al (%)
					1,0430			
6	A2B1	120	0,00 2	7	1,0193	1,049 6	92,5634	22,864 %
					1,0196			
					1,1099			
					1,0592			
7	A2B2	120	0,00 2	7	1,0592	1,059 2	93,4360	22,137 %
					1,0592			
					1,0593			
8	A2B3	120	0,00 2	7	1,0243	1,024 3	90,2687	24,776 %
					1,0242			
					1,0243			
9	A2B4	120	0,00 2	7	1,0122	1,012 3	89,1818	25,682 %
					1,0122			
					1,0124			
10	A2B5	120	0,00 2	7	1,0354	1,035 5	91,2862	23,928 %
					1,0355			
					1,0356			
11	A3B1	120	0,00 2	7	0,9635	0,963 4	84,7585	29,368 %
					0,9635			
					0,9633			
12	A3B2	120	0,00 2	7	1,0339	1,033 9	91,1443	24,046 %
					1,0338			
					1,0341			
13	A3B3	120	0,00 2	7	0,9846	0,984 7	86,6818	27,765 %
					0,9848			
					0,9846			
14	A3B4	120	0,00 2	7	1,0222	1,022 4	90,0996	24,917 %
					1,0224			
					1,0226			
15	A3B5	120	0,00 2	7	1,0234	1,023 3	90,1781	24,852 %
					1,0232			
					1,0232			
16	A4B1	120	0,00 2	7	1,0620	1,061 9	93,6745	21,938 %
					1,0619			
					1,0617			
17	A4B2	120	0,00 2	7	1,0533	1,053 3	92,9016	22,582 %
					1,0535			
					1,0532			
18	A4B3	120	0,00 2	7	1,0270	1,027 1	90,5254	24,562 %
					1,0271			
					1,0272			

N o	Kode Sampe l	Konsentra si Awal (ppm)	Dosi s (g)	p H	Absorban si	Rata- rata	Konsentra si Akhir (ppm)	Efisiens i Remov al (%)
19	A4B4	120	0,00 2	7	1,0461	1,046 3	92,2615	23,115 %
					1,0463			
					1,0464			
20	A4B5	120	0,00 2	7	1,0435	1,043 5	92,0139	23,322 %
					1,0435			
					1,0436			

c) Variasi Rasio vs Waktu

N o	Kode Samp el	Konsentra si Awal (ppm)	Dosi s (g/L)	p H	Absorban si	Rata- rata	Konsentras i Akhir (ppm)	Efisiensi Remova l (%)
1	A3B1	120	0,00 2	7	0,9635	0,963 4	84,7585	29,368%
					0,9635			
					0,9633			
2	A3B2	120	0,00 2	7	0,9221	0,922 1	81,0175	32,485%
					0,9221			
					0,9222			
3	A3B3	120	0,00 2	7	0,9135	0,913 4	80,2264	33,145%
					0,9134			
					0,9133			
4	A3B4	120	0,00 2	7	1,0222	1,022 4	90,0996	24,917%
					1,0224			
					1,0226			
5	A3B5	120	0,00 2	7	1,0234	1,023 3	90,1781	24,852%
					1,0232			
					1,0232			
6	A5C1	120	0,00 2	7	0,9419	0,942 1	82,8231	30,981%
					0,9420			
					0,9423			
7	A5C2	120	0,00 2	7	0,9313	0,931 6	81,8720	31,773%
					0,9317			
					0,9317			
8	A5C3	120	0,00 2	7	0,9323	0,932 5	81,9535	31,705%
					0,9325			
					0,9326			
9	A5C4	120	0,00 2	7	0,9261	0,926 1	81,3768	32,186%
					0,9259			
					0,9263			
10	A5C5	120		7	0,9428		82,8835	30,930%

N o	Kode Samp el	Konsentra si Awal (ppm)	Dosi s (g/L)	p H	Absorban si	Rata- rata	Konsentras i Akhir (ppm)	Efisiensi Remova l (%)
			0,00 2		0,9428 0,9426	0,942 7		
11	A6D1	120	0,00 2	7	0,9506 0,9606 0,9507	0,954 0	83,9010	30,083%
12	A6D2	120	0,00 2	7	0,9411 0,9407 0,9409	0,940 9	82,7174	31,069%
13	A6D3	120	0,00 2	7	0,9247 0,9247 0,9246	0,924 7	81,2470	32,294%
14	A6D4	120	0,00 2	7	0,9351 0,9353 0,9350	0,935 1	82,1950	31,504%
15	A6D5	120	0,00 2	7	0,9303 0,9301 0,9303	0,930 2	81,7512	31,874%
16	A7E1	120	0,00 2	7	0,9203 0,9203 0,9202	0,920 3	80,8484	32,626%
17	A7E2	120	0,00 2	7	0,9405 0,9405 0,9404	0,940 5	82,6781	31,102%
18	A7E3	120	0,00 2	7	0,9405 0,9405 0,9408	0,940 6	82,6902	31,091%
19	A7E4	120	0,00 2	7	0,9327 0,9331 0,9332	0,933 0	82,0018	31,665%
20	A7E5	120	0,00 2	7	0,9281 0,9282 0,9281	0,928 1	81,5610	32,033%
21	A8F1	120	0,00 2	7	0,9504 0,9503 0,9504	0,950 4	83,5749	30,354%
22	A8F2	120	0,00 2	7	0,9492 0,9493 0,9490	0,949 2	83,4662	30,445%
23	A8F3	120	0,00 2	7	0,9373 0,9370	0,937 3	82,3913	31,341%

N o	Kode Samp el	Konsentra si Awal (ppm)	Dosi s (g/L)	p H	Absorban si	Rata- rata	Konsentras i Akhir (ppm)	Efisiensi Remova l (%)
					0,9376			
24	A8F4	120	0,00 2	7	0,8729	0,873 1	76,5731	36,189%
					0,8731			
					0,8732			
					0,9343			
25	A8F5	120	0,00 2	7	0,9342	0,934 3	82,1165	31,570%
					0,9343			
					0,9300			
26	A9G1	120	0,00 2	7	0,9300	0,930 0	81,7271	31,894%
					0,9299			
					0,9303			
27	A9G2	120	0,00 2	7	0,9303	0,930 3	81,7572	31,869%
					0,9303			
					0,9303			
28	A9G3	120	0,00 2	7	0,9392	0,939 1	82,5574	31,202%
					0,9391			
					0,9391			
29	A9G4	120	0,00 2	7	0,9344	0,934 5	82,1347	31,554%
					0,9345			
					0,9345			
30	A9G5	120	0,00 2	7	0,9352	0,935 3	82,2132	31,489%
					0,9354			
					0,9354			
31	A10H 1	120	0,00 2	7	0,9601	0,960 2	84,4626	29,615%
					0,9604			
					0,9600			
32	A10H 2	120	0,00 2	7	0,9504	0,954 4	83,9402	30,050%
					0,9560			
					0,9568			
33	A10H 3	120	0,00 2	7	0,9513	0,951 2	83,6534	30,289%
					0,9512			
					0,9512			
34	A10H 4	120	0,00 2	7	0,9696	0,969 4	85,2989	28,918%
					0,9694			
					0,9692			
35	A10H 5	120	0,00 2	7	0,9414	0,941 5	82,7717	31,024%
					0,9414			
					0,9417			

d) Variasi pH

N o	Kode Samp el	Konsentr asi Awal (ppm)	Dosi s (g/L)	p H	Absorban si	Rata- rata	Konsentra si Akhir (ppm)	Efisiens i Remova l (%)
1	A3I1	120	0,00 2	5	0,9433	0,9435	82,9499	30,875%
					0,9437			
					0,9434			
2	A3I2	120	0,00 2	7	0,9635	0,9634	84,7585	29,368%
					0,9635			
					0,9633			
3	A3I3	120	0,00 2	9	0,9280	0,9281	119,6404	0,300%
					0,9282			
					0,9280			
4	A3J1	120	0,00 2	5	0,9572	0,9570	84,1727	29,856%
					0,9569			
					0,9568			
5	A3J2	120	0,00 2	7	0,9846	0,9847	86,6818	27,765%
					0,9848			
					0,9846			
6	A3J3	120	0,00 2	9	0,9208	0,9208	118,7183	1,068%
					0,9205			
					0,9211			
7	A9I1	120	0,00 2	5	0,9518	0,9518	83,7047	30,246%
					0,9519			
					0,9517			
8	A9I2	120	0,00 2	7	0,9300	0,9300	81,7271	31,894%
					0,9300			
					0,9299			
9	A9I3	120	0,00 2	9	0,9047	0,9047	116,6794	2,767%
					0,9046			
					0,9049			
10	A9J1	120	0,00 2	5	0,9298	0,9298	81,7120	31,907%
					0,9296			
					0,9300			
11	A9J2	120	0,00 2	7	0,9392	0,9391	82,5574	31,202%
					0,9391			
					0,9391			
12	A9J3	120	0,00 2	9	0,9018	0,9021	116,3409	3,049%
					0,9021			
					0,9023			

e) Variasi Konsentrasi MO

N o	Kode Samp el	Konsentr asi Awal (ppm)	Dosi s (g/L)	pH	Absorba nsi	Rata- rata	Konsentr asi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)
1	A3K1	40	0,00 2	7	0,2940	0,2940	24,1184	39,704%
					0,2940			
					0,2939			
2	A3K2	60	0,00 2	7	0,4906	0,4906	41,9263	30,123%
					0,4906			
					0,4905			
3	A3K3	80	0,00 2	7	0,6298	0,6298	54,5411	31,824%
					0,6298			
					0,6299			
4	A3K4	100	0,00 2	7	0,7810	0,7808	68,2126	31,787%
					0,7808			
					0,7805			
5	A3K5	120	0,00 2	7	0,9635	0,9634	84,7585	29,368%
					0,9635			
					0,9633			
6	A3L1	40	0,00 2	7	0,2385	0,2385	19,0912	52,272%
					0,2385			
					0,2384			
7	A3L2	60	0,00 2	7	0,4667	0,4668	39,7736	33,711%
					0,4668			
					0,4669			
8	A3L3	80	0,00 2	7	0,6278	0,6278	54,3569	32,054%
					0,6277			
					0,6279			
9	A3L4	100	0,00 2	7	0,7746	0,7747	67,6661	32,334%
					0,7748			
					0,7748			
10	A3L5	120	0,00 2	7	0,9846	0,9847	86,6818	27,765%
					0,9848			
					0,9846			
11	A9K1	40	0,00 2	7	0,3146	0,3146	25,9903	35,024%
					0,3146			
					0,3147			
12	A9K2	60	0,00 2	7	0,4607	0,4608	39,2331	34,612%
					0,4609			
					0,4609			
13	A9K3	80	0,00 2	7	0,6121	0,6086	52,6178	34,228%
					0,6120			
					0,6017			

N o	Kode Sampel	Konsentrasi Awal (ppm)	Dosis (g/L)	pH	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)
14	A9K4	100	0,002	7	0,7707	0,7706	67,2949	32,705%
					0,7705			
					0,7707			
15	A9K5	120	0,002	7	0,9300	0,9300	81,7271	31,894%
					0,9300			
					0,9299			
16	A9L1	40	0,002	7	0,2293	0,2293	18,2579	54,355%
					0,2293			
					0,2292			
17	A9L2	60	0,002	7	0,4644	0,4647	39,5803	34,033%
					0,4648			
					0,4648			
18	A9L3	80	0,002	7	0,6256	0,6261	54,2029	32,246%
					0,6265			
					0,6262			
19	A9L4	100	0,002	7	0,7723	0,7723	67,4487	32,551%
					0,7722			
					0,7725			
20	A9L5	120	0,002	7	0,9392	0,9391	82,5574	31,202%
					0,9391			
					0,9391			

f) Variasi Dosis Katalis

N o	Kode Sampel	Konsentrasi Awal (ppm)	Dosis g	pH	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)
1	A3M1	120	0,002	7	0,9764	0,9764	85,9300	28,392%
					0,9764			
					0,9763			
2	A3M2	120	0,004	7	0,9673	0,9675	85,1298	29,058%
					0,9676			
					0,9677			
3	A3M3	120	0,006	7	0,9573	0,9576	84,2301	29,808%
					0,9576			
					0,9579			
4	A3M4	120	0,008	7	0,9566	0,9567	84,1455	29,879%
					0,9566			
					0,9568			
5	A3M5	120		7	0,9559		84,0580	29,952%

N o	Kode Samp el	Konsentr asi Awal (ppm)	Dosi s g	pH	Absorba nsi	Rata- rata	Konsentra si Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)
6	A3N1	120	0,00 2	7	0,9558	0,955 7	86,6818	27,765%
					0,9554			
					0,9846			
7	A3N2	120	0,00 4	7	0,9848	0,984 7	82,1226	31,565%
					0,9846			
					0,9343			
8	A3N3	120	0,00 6	7	0,9342	0,934 3	81,8478	31,793%
					0,9345			
					0,9312			
9	A3N4	120	0,00 8	7	0,9314	0,931 3	81,3225	32,231%
					0,9313			
					0,9255			
10	A3N5	120	0,01 0	7	0,9254	0,925 5	80,1932	33,172%
					0,9256			
					0,9138			
11	A9M1	120	0,01 2	7	0,9121	0,913 0	84,9607	29,199%
					0,9132			
					0,9654			
12	A9M2	120	0,00 4	7	0,9659	0,965 7	83,6383	30,301%
					0,9657			
					0,9511			
13	A9M3	120	0,00 6	7	0,9511	0,951 1	82,4607	31,283%
					0,9510			
					0,9379			
14	A9M4	120	0,00 8	7	0,9381	0,938 1	82,1437	31,547%
					0,9382			
					0,9346			
15	A9M5	120	0,01 0	7	0,9342	0,934 6	81,7995	31,834%
					0,9349			
					0,9306			
16	A9N1	120	0,01 2	7	0,9307	0,930 8	83,7047	30,246%
					0,9310			
					0,9519			
17	A9N2	120	0,00 4	7	0,9518	0,951 8	83,4088	30,493%
					0,9517			
					0,9486			
18	A9N3	120	0,00 6	7	0,9481	0,948 5	82,9921	30,840%
					0,9489			
					0,9441			
					0,9438	0,943 9		
					0,9439			

N o	Kode Sampel	Konsentrasi Awal (ppm)	Dosis g	pH	Absorbansi	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)
19	A9N4	120	0,008	7	0,9267	0,9267	81,4312	32,141%
					0,9268			
					0,9266			
20	A9N5	120	0,010	7	0,8859	0,8857	77,7174	35,236%
					0,8855			
					0,8857			

g) Reusability test

Kode Sampel	Konsentrasi Awal (ppm)	Dosis (g)	pH	Abs	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)
A9R1	120	0,100	7	0,8138	0,8137	71,1957	40,670%
				0,8135			
				0,8138			
	120	0,100	7	0,8307	0,8310	72,7627	39,364%
				0,8311			
				0,8312			
	120	0,100	7	0,7952	0,7285	63,4813	47,099%
				0,7953			
				0,5951			
	120	0,100	7	0,7902	0,7905	69,0942	42,421%
				0,7905			
				0,7908			
	120	0,100	7	0,8202	0,8193	71,6999	40,250%
				0,8188			
				0,8188			
	120	0,100	7	0,8072	0,8071	70,6008	41,166%
				0,8072			
				0,8070			
	120	0,100	7	0,8319	0,8317	72,8261	39,312%
				0,8319			
				0,8313			
	120	0,100	7	0,8282	0,8283	72,5211	39,566%
				0,8284			
				0,8284			
	120	0,100	7	0,8384	0,8383	73,4269	38,811%
				0,8384			
				0,8382			
	120	0,100	7	0,8073	0,8072	70,6039	41,163%
				0,8071			

Kode Sampel	Konsentrasi Awal (ppm)	Dosis (g)	pH	Abs	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)
				0,8071			
	120	0,100	7	0,8013	0,8014	70,0785	41,601%
				0,8013			
				0,8015			
				0,8015			
	120	0,100	7	0,7988	0,7992	69,8792	41,767%
				0,7994			
				0,7993			
				0,7993			
	120	0,100	7	0,8584	0,8569	75,1057	37,412%
				0,8540			
				0,8582			
				0,8582			
	120	0,100	7	0,8103	0,8103	70,8847	40,929%
				0,8103			
				0,8102			
				0,8102			
	120	0,100	7	0,8317	0,8317	72,8291	39,309%
				0,8316			
				0,8319			
				0,8319			
	120	0,100	7	0,8091	0,8091	70,7790	41,018%
				0,8090			
				0,8092			
				0,8092			
	120	0,100	7	0,7873	0,7871	68,7893	42,676%
				0,7870			
				0,7871			
				0,7871			
	120	0,100	7	0,7992	0,7992	69,8792	41,767%
				0,7994			
				0,7989			
				0,7989			
	120	0,100	7	0,8255	0,8256	72,2736	39,772%
				0,8257			
				0,8256			
				0,8256			
	120	0,100	7	0,8207	0,8207	71,8297	40,142%
				0,8207			
				0,8207			
				0,8207			
	120	0,100	7	0,8273	0,8275	72,4457	39,629%
				0,8275			
				0,8277			
				0,8277			
	120	0,100	7	0,8004	0,8005	69,9970	41,669%
				0,8004			
				0,8006			
				0,8006			
	120	0,100	7	0,8560	0,8560	75,0302	37,475%
				0,8561			
				0,8560			
				0,8560			
	120	0,100	7	0,7961	0,7960	69,5954	42,004%

Kode Sampel	Konsentrasi Awal (ppm)	Dosis (g)	pH	Abs	Rata-rata	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Removal (%)
A9R1	120	0,100	7	0,7958	0,7391	64,4384	46,301%
				0,7962			
				0,7392			
	120	0,100	7	0,7391	0,7885	68,9161	42,570%
				0,7390			
				0,7886			
	120	0,100	7	0,7885	0,8289	72,5679	39,527%
				0,7885			
				0,8288			
	120	0,100	7	0,8289	0,7390	64,4293	46,309%
				0,8288			
				0,7390			
	120	0,100	7	0,7390	0,8224	71,9837	40,014%
				0,8223			
				0,8223			
A9R2	120	0,100	7	0,8226	0,8466	74,1757	38,187%
				0,8467			
				0,8465			
	120	0,100	7	0,8466	0,8301	72,6781	39,435%
				0,8299			
A9R3	120	0,100	7	0,8300	0,9096	79,8853	33,429%
				0,8303			
				0,9099			
				0,9096	0,9096		
				0,9094			

Surabaya, 25 Juni 2026
Mengetahui
Kepala Laboratorium Limbah


Vivin Setiani, S.T., M.Eng
NIP. 198909162015042002

|

Halaman ini sengaja dikosongkan

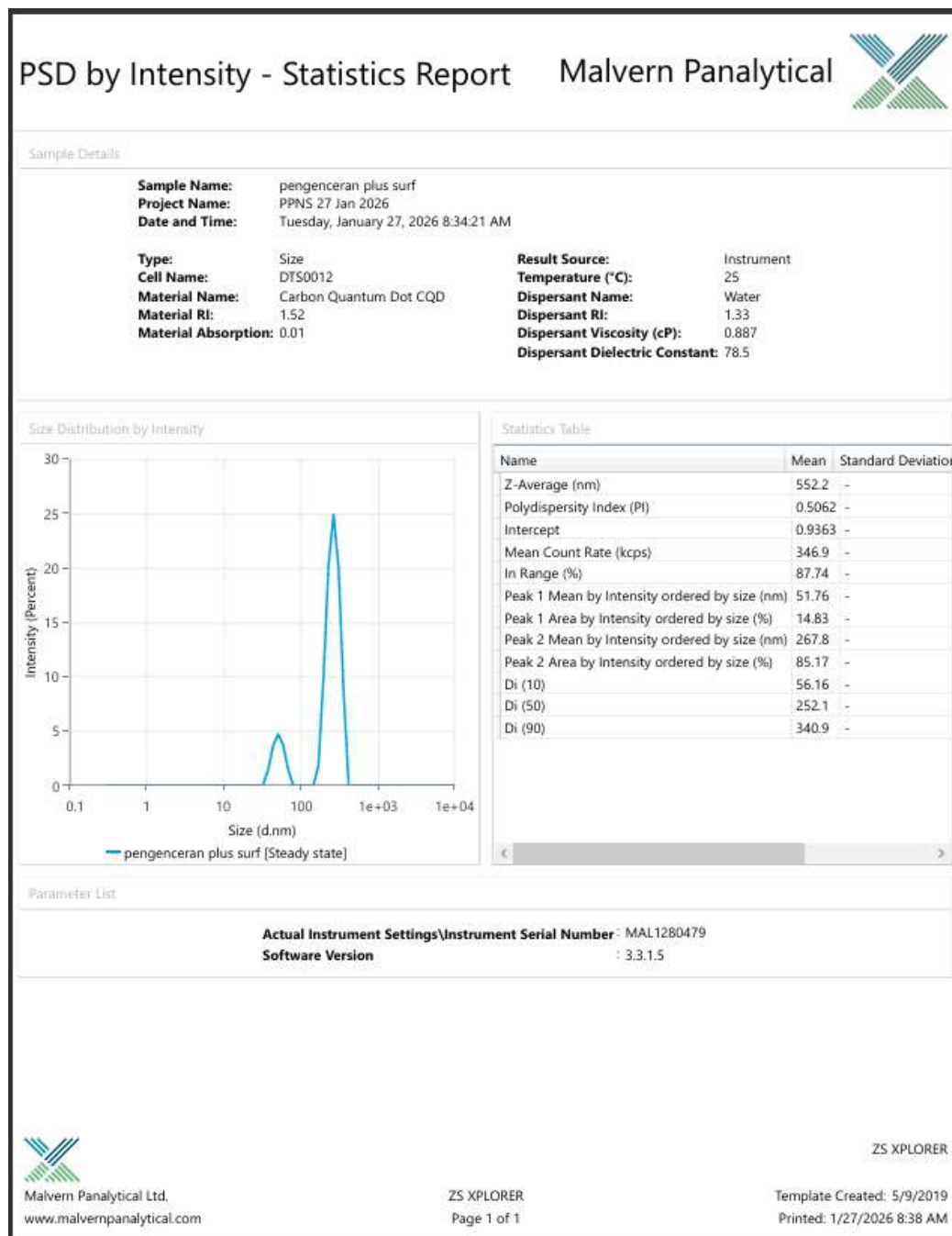
Lampiran 8

Hasil *Particle Size Analysis* (PSA)

|

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

1) Analisis PSA Hasil Hydrothermal 2 Jam



PSD by Intensity - Statistics Report

Malvern Panalytical



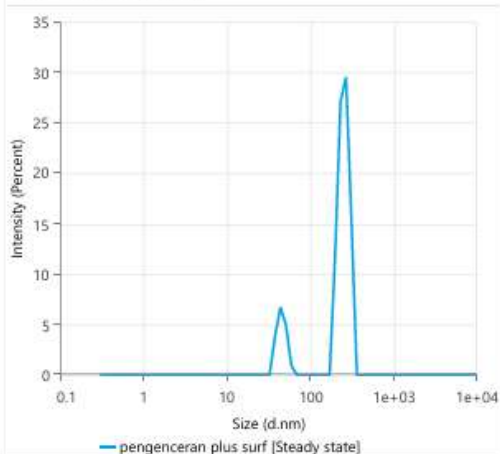
Sample Details

Sample Name: pengenceran plus surf
Project Name: PPNS 27 Jan 2026
Date and Time: Tuesday, January 27, 2026 8:36:33 AM

Type: Size
Cell Name: DTS0012
Material Name: Carbon Quantum Dot CQD
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Size Distribution by Intensity



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation
Z-Average (nm)	766.8	-
Polydispersity Index (PI)	0.5715	-
Intercept	0.9442	-
Mean Count Rate (kcps)	438.6	-
In Range (%)	77.92	-
Peak 1 Mean by Intensity ordered by size (nm)	45.27	-
Peak 1 Area by Intensity ordered by size (%)	16.37	-
Peak 2 Mean by Intensity ordered by size (nm)	253.2	-
Peak 2 Area by Intensity ordered by size (%)	83.63	-
Di (10)	47.15	-
Di (50)	240.7	-
Di (90)	306.1	-

Parameter List

Actual Instrument Settings/Instrument Serial Number: MAL1280479
Software Version: 3.3.1.5



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLOER
 Page 1 of 1

ZS XPLOER

Template Created: 5/9/2019
 Printed: 1/27/2026 8:38 AM

PSD by Intensity - Statistics Report

Malvern Panalytical



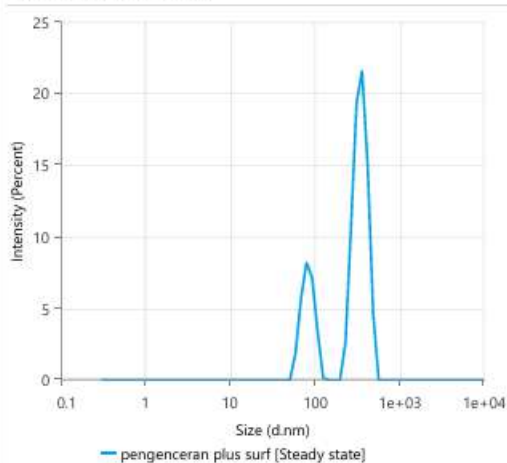
Sample Details

Sample Name: pengenceran plus surf
Project Name: PPNS 27 Jan 2026
Date and Time: Tuesday, January 27, 2026 8:38:00 AM

Type: Size
Cell Name: DTS0012
Material Name: Carbon Quantum Dot CQD
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Size Distribution by Intensity



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation
Z-Average (nm)	614.3	-
Polydispersity Index (PI)	0.5467	-
Intercept	0.9189	-
Mean Count Rate (kcps)	414	-
In Range (%)	75.81	-
Peak 1 Mean by Intensity ordered by size (nm)	83.37	-
Peak 1 Area by Intensity ordered by size (%)	26.37	-
Peak 2 Mean by Intensity ordered by size (nm)	349.9	-
Peak 2 Area by Intensity ordered by size (%)	73.63	-
Di (10)	77.24	-
Di (50)	312.7	-
Di (90)	435	-

Parameter List

Actual Instrument Settings\Instrument Serial Number: MAL1280479
Software Version: 3.3.1.5



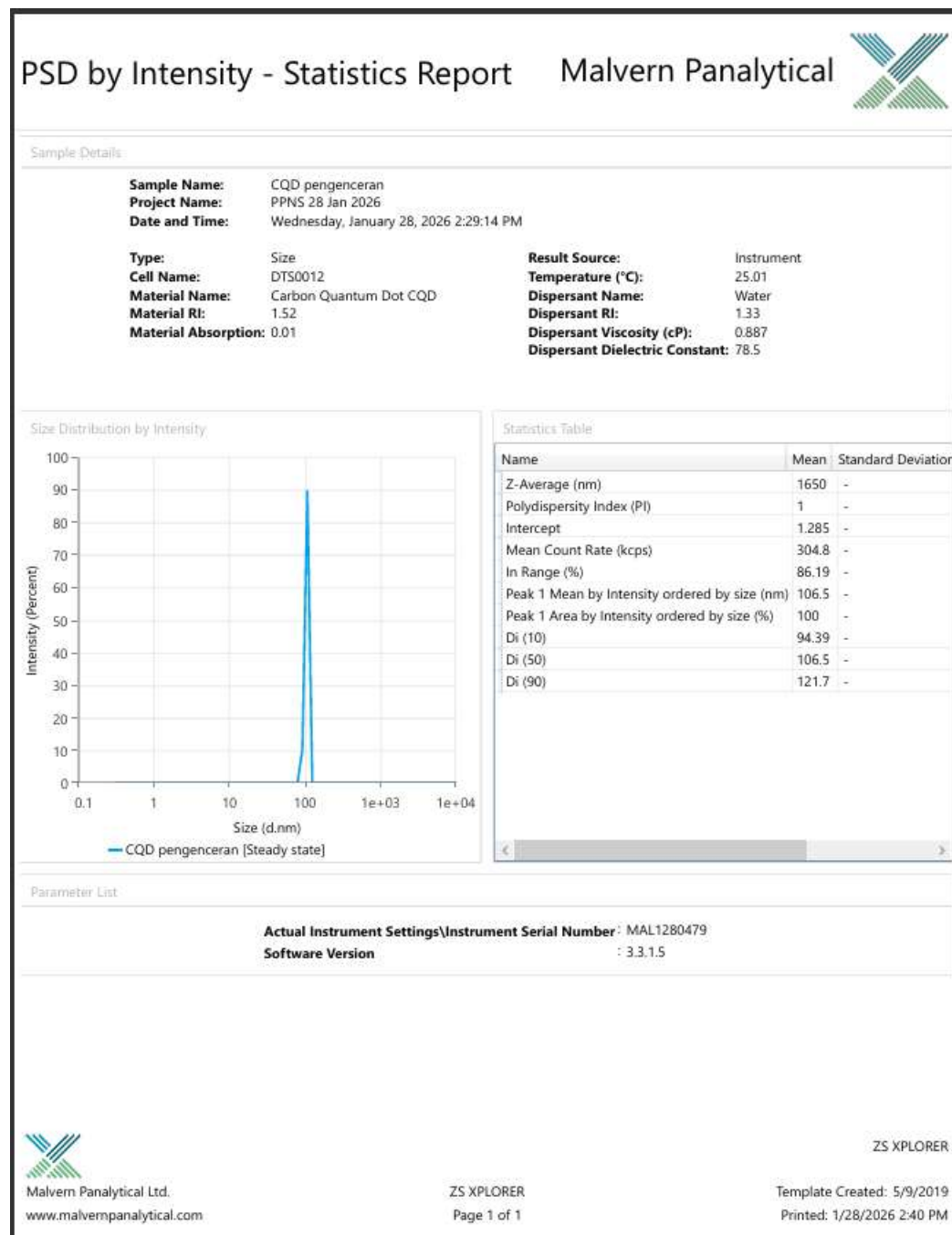
Malvern Panalytical Ltd.
 www.malvernpanalytical.com

ZS XPLOER
 Page 1 of 1

ZS XPLOER

Template Created: 5/9/2019
 Printed: 1/27/2026 8:39 AM

2) Analisis PSA Hasil Hydrothermal 2 Jam



PSD by Intensity - Statistics Report

Malvern Panalytical



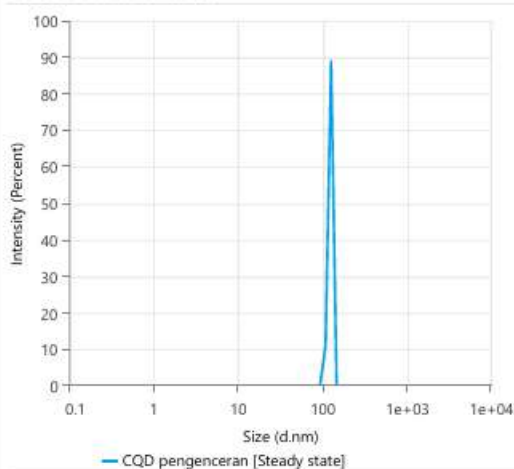
Sample Details

Sample Name: CQD pengenceran
Project Name: PPNS 28 Jan 2026
Date and Time: Wednesday, January 28, 2026 2:31:08 PM

Type: Size
Cell Name: DTS0012
Material Name: Carbon Quantum Dot CQD
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Size Distribution by Intensity



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation
Z-Average (nm)	1207	-
Polydispersity Index (PI)	0.8886	-
Intercept	1.155	-
Mean Count Rate (kcps)	311.9	-
In Range (%)	81.41	-
Peak 1 Mean by Intensity ordered by size (nm)	123.7	-
Peak 1 Area by Intensity ordered by size (%)	100	-
Di (10)	109.6	-
Di (50)	123.7	-
Di (90)	141.5	-

Parameter List

Actual Instrument Settings\Instrument Serial Number: MAL1280479
Software Version: 3.3.1.5



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLOER
 Page 1 of 1

ZS XPLOER

Template Created: 5/9/2019
 Printed: 1/28/2026 2:41 PM

PSD by Intensity - Statistics Report

Malvern Panalytical



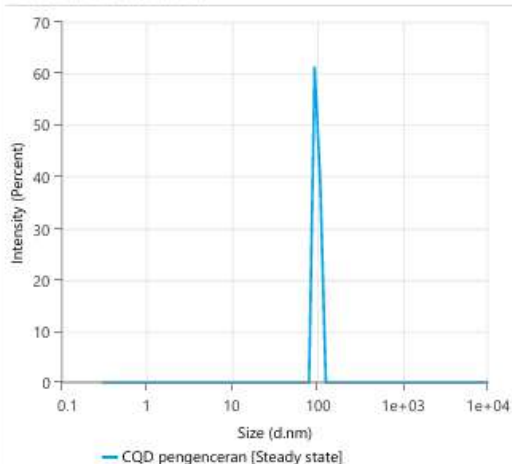
Sample Details

Sample Name: CQD pengenceran
Project Name: PPNS 28 Jan 2026
Date and Time: Wednesday, January 28, 2026 2:27:55 PM

Type: Size
Cell Name: DTS0012
Material Name: Carbon Quantum Dot CQD
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Size Distribution by Intensity



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation
Z-Average (nm)	2215	-
Polydispersity Index (PI)	1	-
Intercept	1.43	-
Mean Count Rate (kcps)	321.7	-
In Range (%)	91.72	-
Peak 1 Mean by Intensity ordered by size (nm)	98.76	-
Peak 1 Area by Intensity ordered by size (%)	100	-
Di (10)	84.13	-
Di (50)	98.76	-
Di (90)	116.5	-

Parameter List

Actual Instrument Settings\Instrument Serial Number: MAL1280479
Software Version: 3.3.1.5



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLOER
 Page 1 of 1

ZS XPLOER

Template Created: 5/9/2019
 Printed: 1/28/2026 2:40 PM

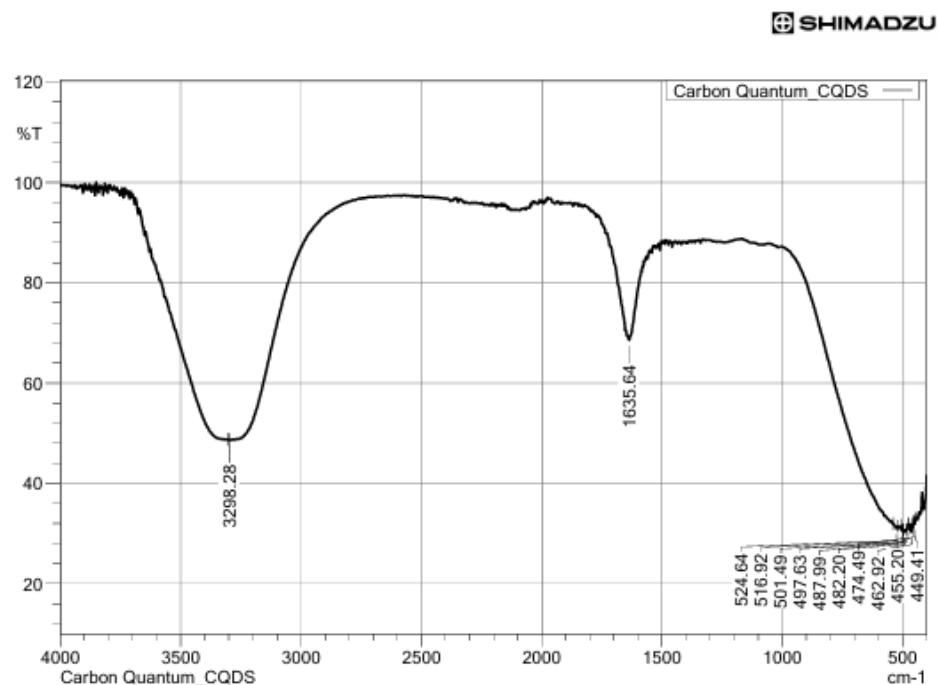
Lampiran 9

Hasil *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)

|

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

1) Hasil FTIR CDs



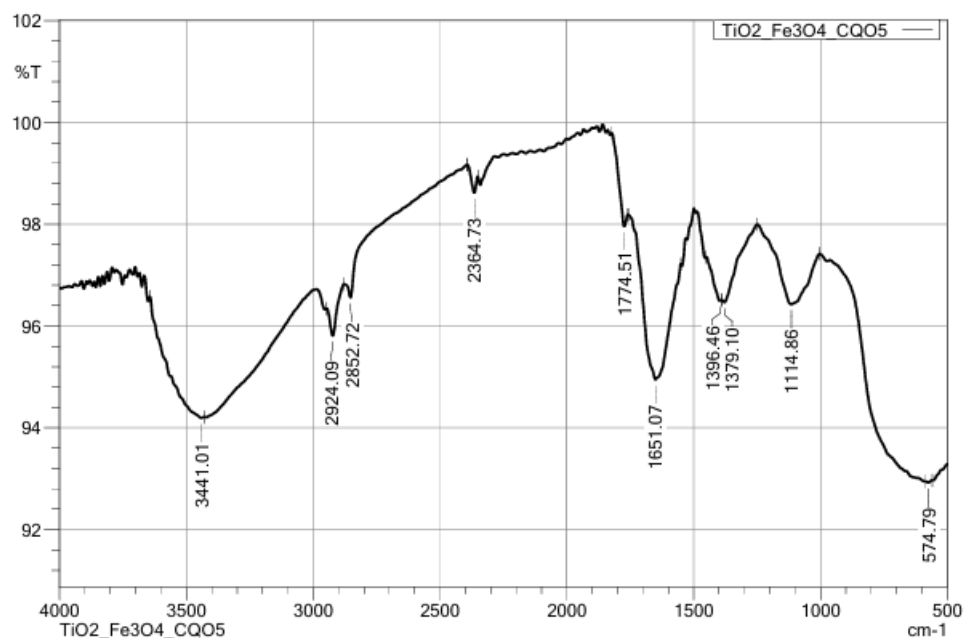
D:\Carbon Quantum_CQDS1.ispd
Carbon Quantum_CQDS

	Item			Value					
2	Sample name				Carbon Quantum CQDS				
3	Sample ID				13042026				
4	Option				QATR				
5	Intensity Mode				%Transmittance				
6	Apodization				Happ-Genzel				
9	No. of Scans				32				
10	Resolution				4 cm-1				

	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area	Comment
1	449.41	31.92	0.72	453.27	445.56	522.586	2.899	
2	455.20	31.79	0.32	457.13	453.27	262.530	0.608	
3	462.92	30.30	1.60	472.56	457.13	1060.433	9.629	
4	474.49	31.56	0.36	476.42	472.56	263.321	0.689	
5	482.20	30.65	0.48	484.13	476.42	531.375	2.051	
6	487.99	30.28	0.56	495.71	484.13	804.108	3.606	
7	497.63	30.65	0.07	499.56	495.71	267.381	0.129	
8	501.49	30.66	0.24	507.28	499.56	532.625	1.264	
9	516.92	30.94	0.51	520.78	507.28	928.572	3.653	
10	524.64	31.04	0.49	538.14	520.78	1189.834	4.100	
11	1635.64	68.56	4.75	1651.07	1579.70	1813.997	165.967	
12	3298.28	48.67	0.03	3304.06	3296.35	395.850	0.265	

2) Hasil FTIR Komposit dengan Rasio CDs 3%

SHIMADZU



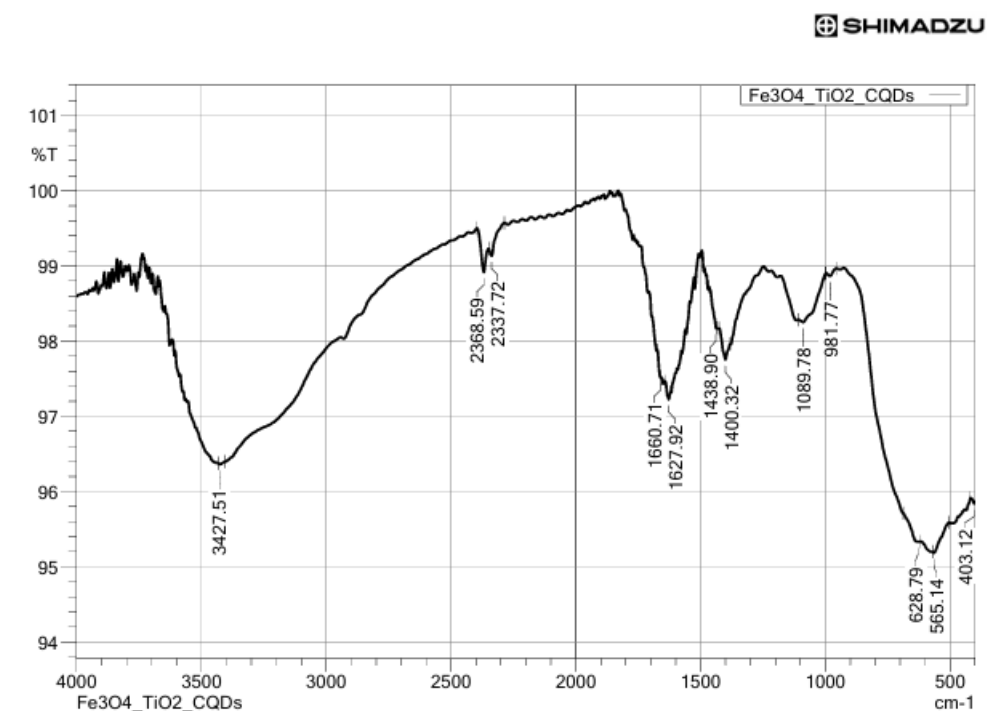
D:\TiO2_Fe3O4_CQO51.ispd

TiO2_Fe3O4_CQO5

	Item		Value					
2	Sample name	TiO2_Fe3O4_CQO5						
3	Sample ID	12032026						
4	Option	DRS8000A						
5	Intensity Mode	%Transmittance						
6	Apodization	Happ-Genzel						
9	No. of Scans	32						
10	Resolution	4 cm-1						

	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area	Comment
1	574.79	92.92	0.04	588.29	559.36	204.192	0.436	
2	1114.86	96.43	1.25	1249.87	1002.98	716.912	150.801	
3	1379.10	96.46	0.15	1388.75	1249.87	377.360	-3.971	
4	1396.46	96.50	0.12	1450.47	1388.75	193.554	4.270	
5	1651.07	94.95	2.74	1759.08	1550.77	772.460	294.127	
6	1774.51	97.96	0.62	1822.73	1759.08	80.143	15.892	
7	2364.73	98.62	0.39	2393.66	2351.23	47.671	7.457	
8	2852.72	96.56	0.39	2877.79	2393.66	840.038	-130.237	
9	2924.09	95.81	0.69	2947.23	2877.79	256.362	19.165	
10	3441.01	94.20	0.14	3643.53	3429.43	1086.141	99.976	

3) Hasil FTIR Komposit dengan Rasio CDs 6% Sebelum Fotokatalitik

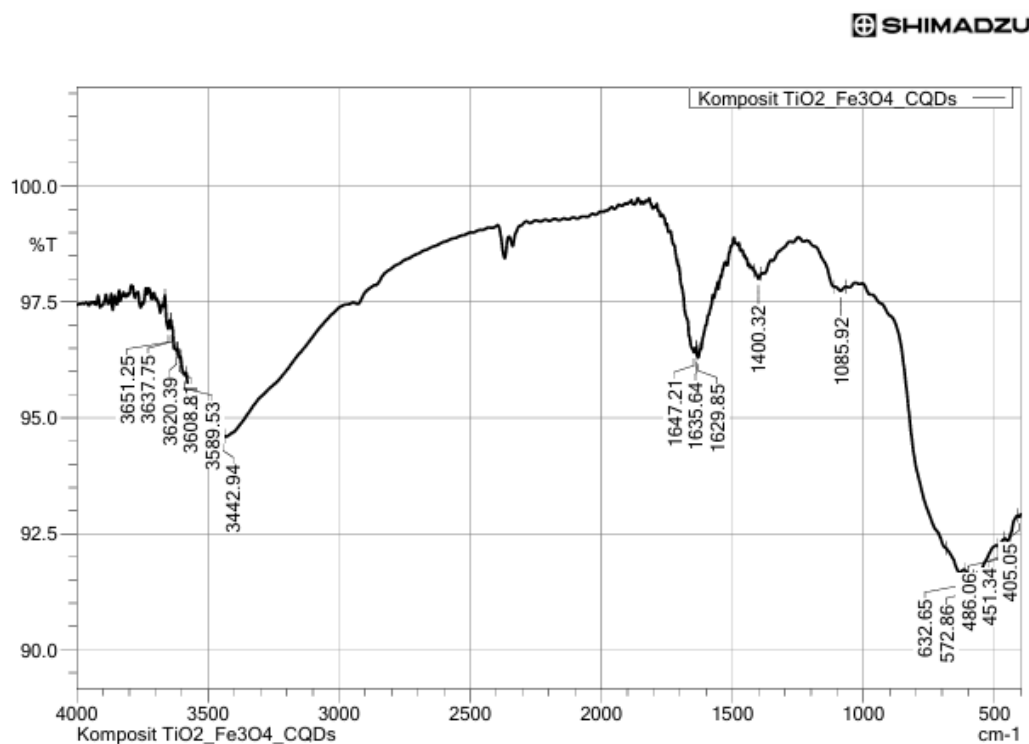


D:\PPNS\FE3O4_TiO2_CQDs1.ispd
Fe₃O₄-TiO₂-CQDs

	Item	Value
2	Sample name	Fe ₃ O ₄ -TiO ₂ -CQDs
3	Sample ID	08062026
4	Option	DRS
5	Intensity Mode	%Transmittance
6	Apodization	Happ-Genzel
9	No. of Scans	32
10	Resolution	4 cm ⁻¹

	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area	Comment
1	403.12	95.84	0.04	418.55	399.26	79.476	0.250	
2	565.14	95.18	0.05	570.93	505.35	303.414	1.390	
3	628.79	95.33	0.06	686.66	619.15	304.906	2.664	
4	981.77	98.87	0.06	997.20	956.69	44.312	1.195	
5	1089.78	98.25	0.13	1107.14	997.20	167.735	13.153	
6	1400.32	97.75	0.30	1425.40	1381.03	92.325	6.630	
7	1438.90	98.17	0.04	1465.90	1436.97	44.634	-0.137	
8	1627.92	97.22	0.15	1641.42	1620.21	56.949	1.654	
9	1660.71	97.52	0.06	1672.28	1658.78	31.848	0.811	
10	2337.72	99.13	0.16	2349.30	2285.65	39.388	1.311	
11	2368.59	98.91	0.43	2395.59	2349.30	37.598	8.254	
12	3427.51	96.36	0.02	3431.36	3404.36	97.834	0.276	

4) Hasil FTIR Komposit dengan Rasio CDs 6% Setelah Fotokatalitik



D:\PPNS\Komposit TiO₂_Fe₃O₄_CQDs1.ispd

Komposit TiO₂_Fe₃O₄_CQDs

Item		Value						
2	Sample name	Komposit TiO ₂ _Fe ₃ O ₄ _CQDs						
3	Sample ID	23062026						
4	Option	DRS						
5	Intensity Mode	%Transmittance						
6	Apodization	Happ-Genzel						
9	No. of Scans	32						
10	Resolution	4 cm ⁻¹						

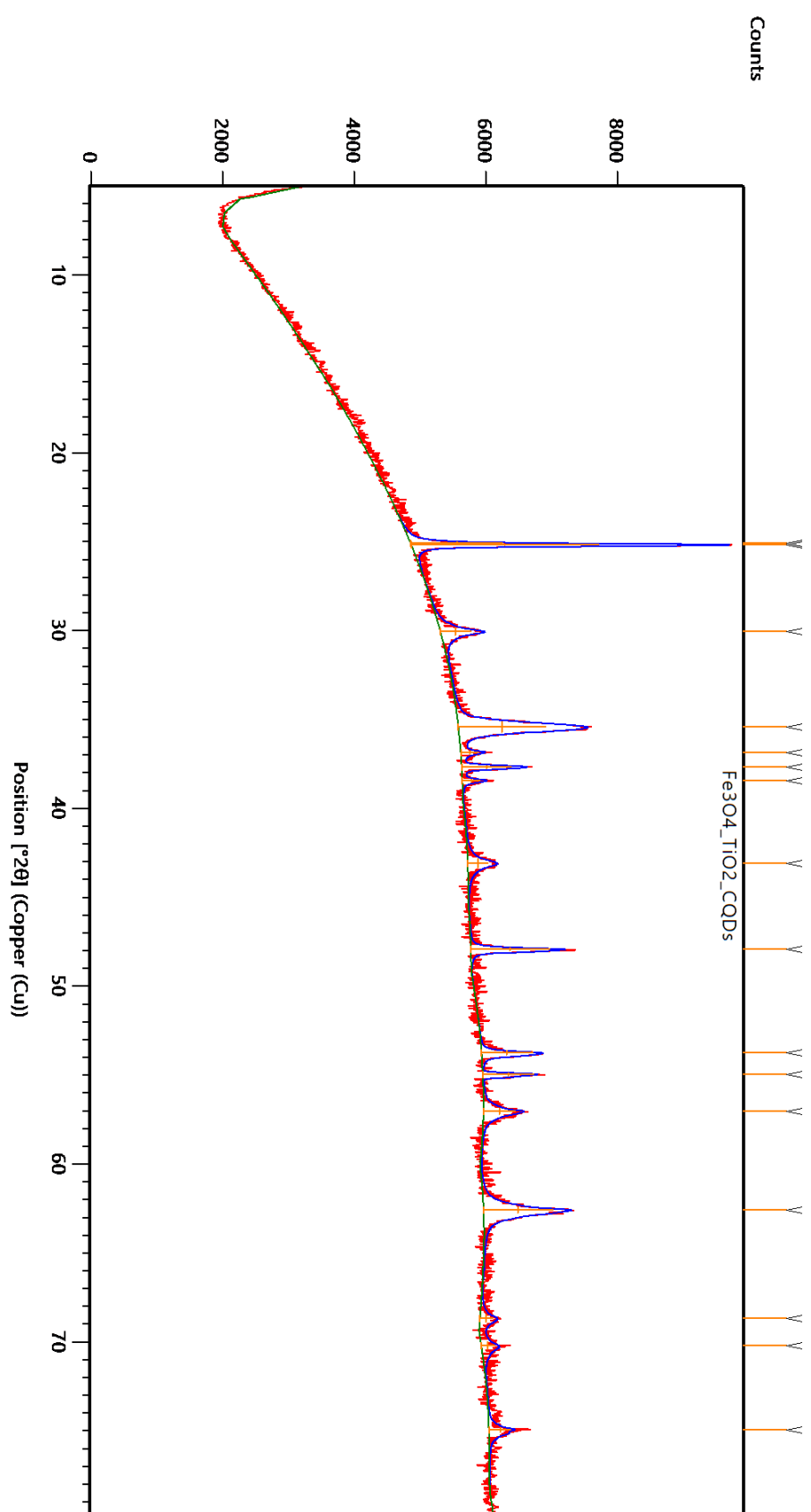
Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area	Comment
1	405.05	92.86	0.04	410.84	399.26	82.364	0.264
2	451.34	92.35	0.15	460.99	410.84	371.873	3.057
3	486.06	92.23	0.05	491.85	460.99	237.531	0.678
4	572.86	91.54	0.02	580.57	569.00	97.692	0.118
5	632.65	91.67	0.18	684.73	615.29	563.899	5.592
6	1085.92	97.74	0.09	1109.07	1066.64	93.824	1.742
7	1400.32	98.00	0.14	1415.75	1390.68	48.230	1.742
8	1629.85	96.30	0.13	1633.71	1622.13	41.794	0.683
9	1635.64	96.35	0.10	1639.49	1633.71	20.734	0.273
10	1647.21	96.41	0.31	1705.07	1639.49	187.195	16.786
11	3442.94	94.58	0.09	3545.16	3433.29	577.009	14.368
12	3589.53	95.92	0.14	3604.96	3583.74	84.040	2.250
13	3608.81	96.29	0.08	3616.53	3604.96	42.103	0.519
14	3620.39	96.45	0.04	3624.25	3616.53	27.237	0.148

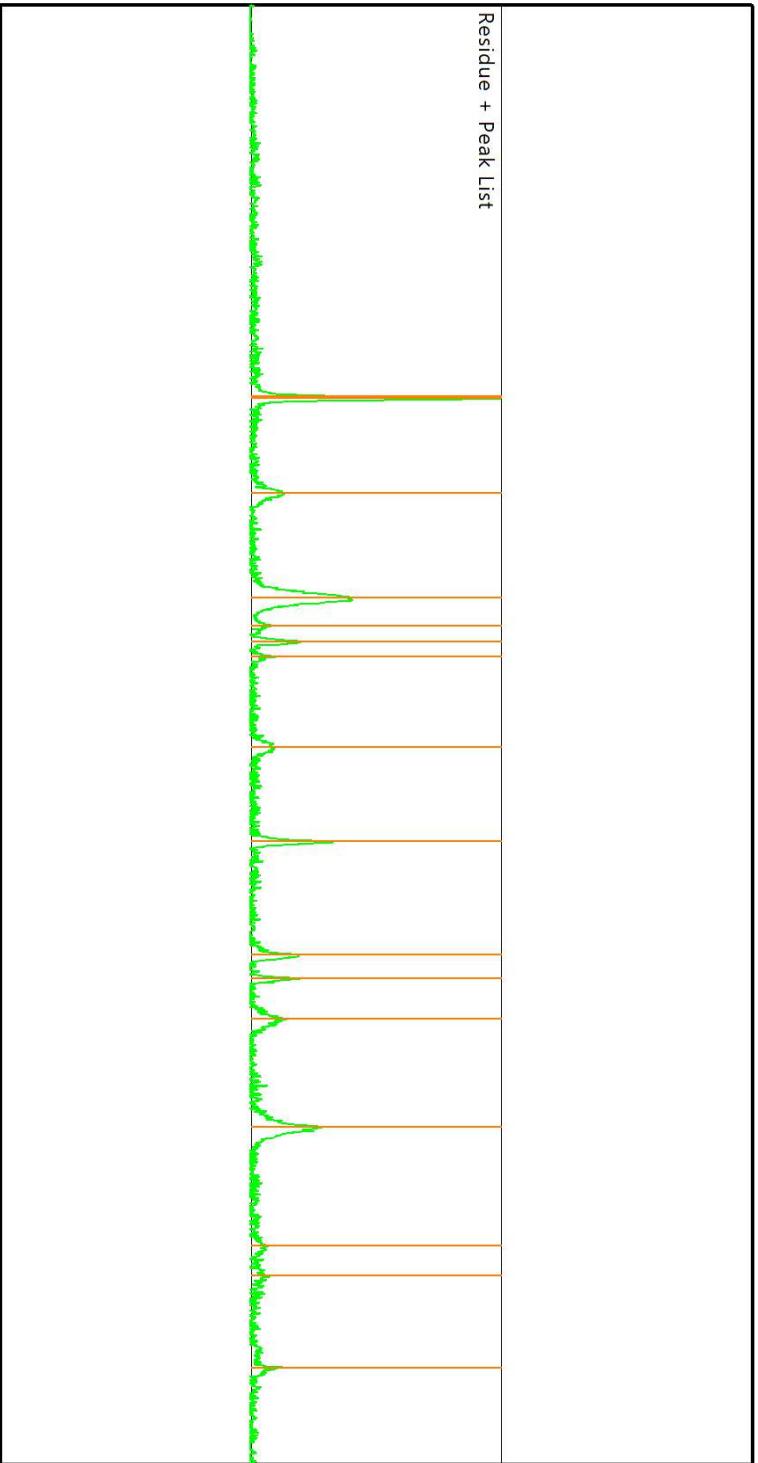
Lampiran 10

Hasil *X-Ray Diffraction* (XRD)

|

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan





Lampiran 11

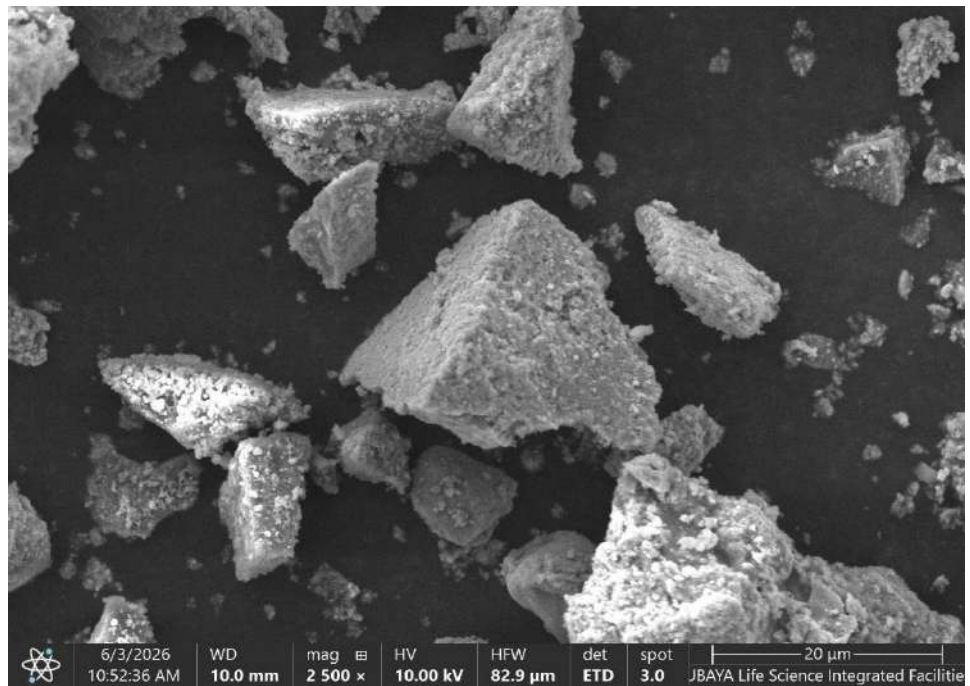
Hasil *Scanning Electron Microscop-Energi Dispersive X-Ray Mapping* (SEM-EDX Mapping)

|

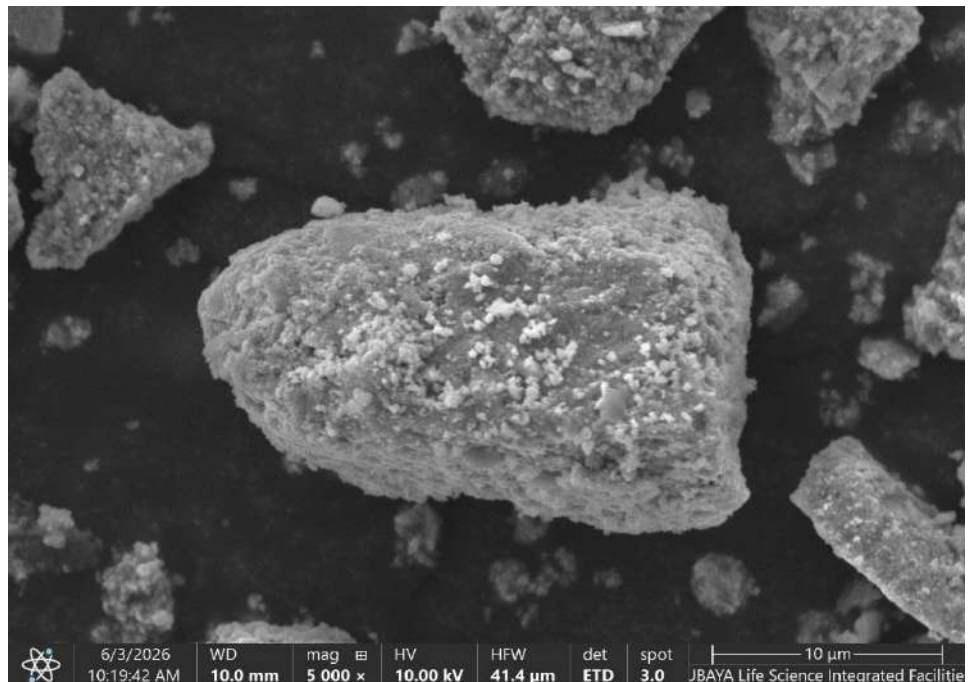
Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

Hasil uji SEM-EDX pada komposit

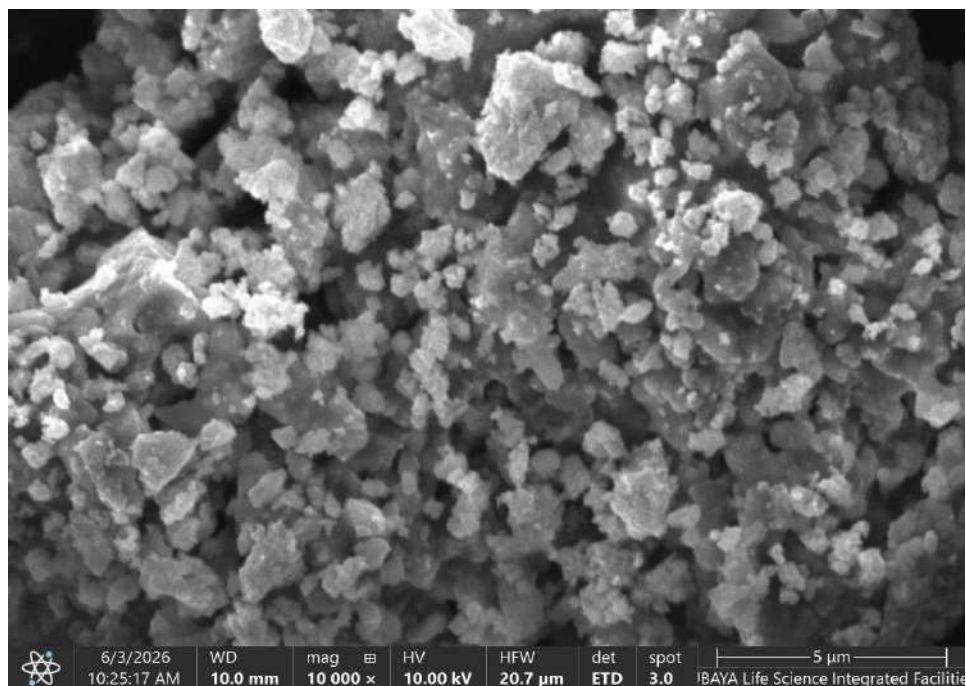
1) Pembesaran 2500x



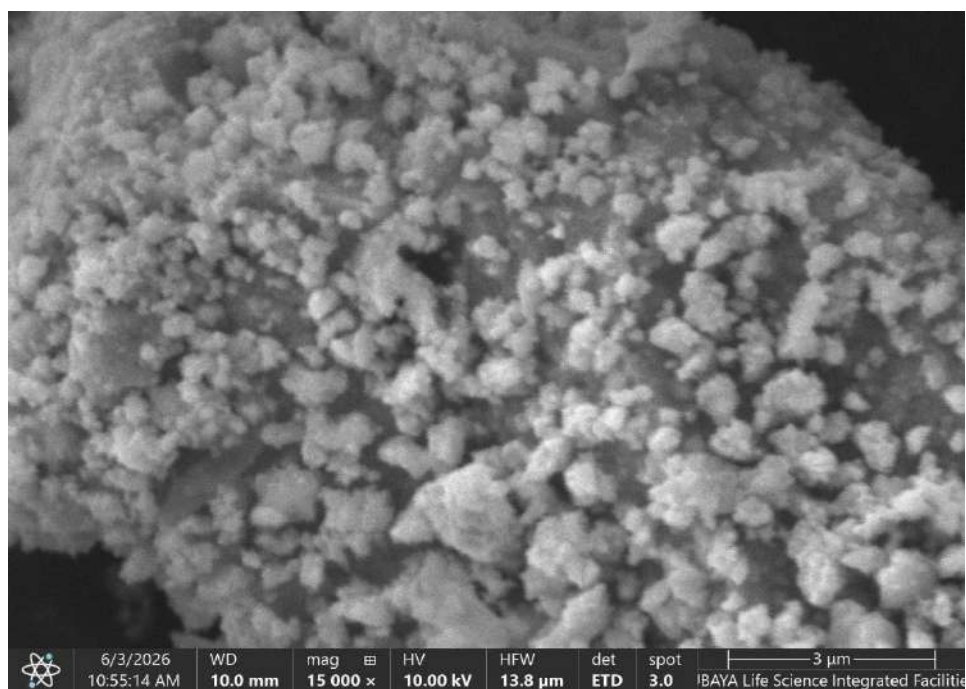
2) Pembesaran 5000x



3) Pembesaran 10.000x

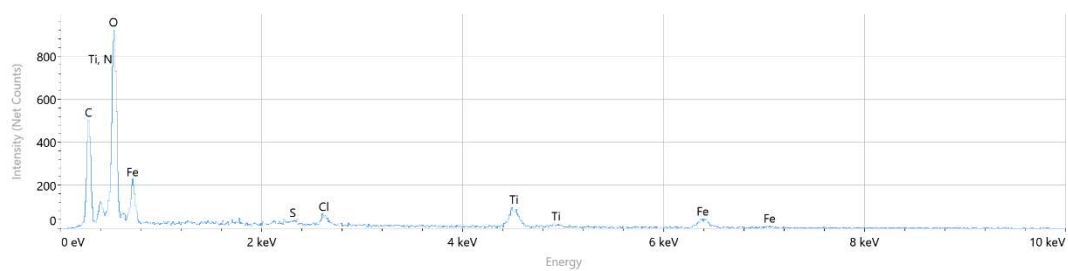


4) Pembesaran 15.000x

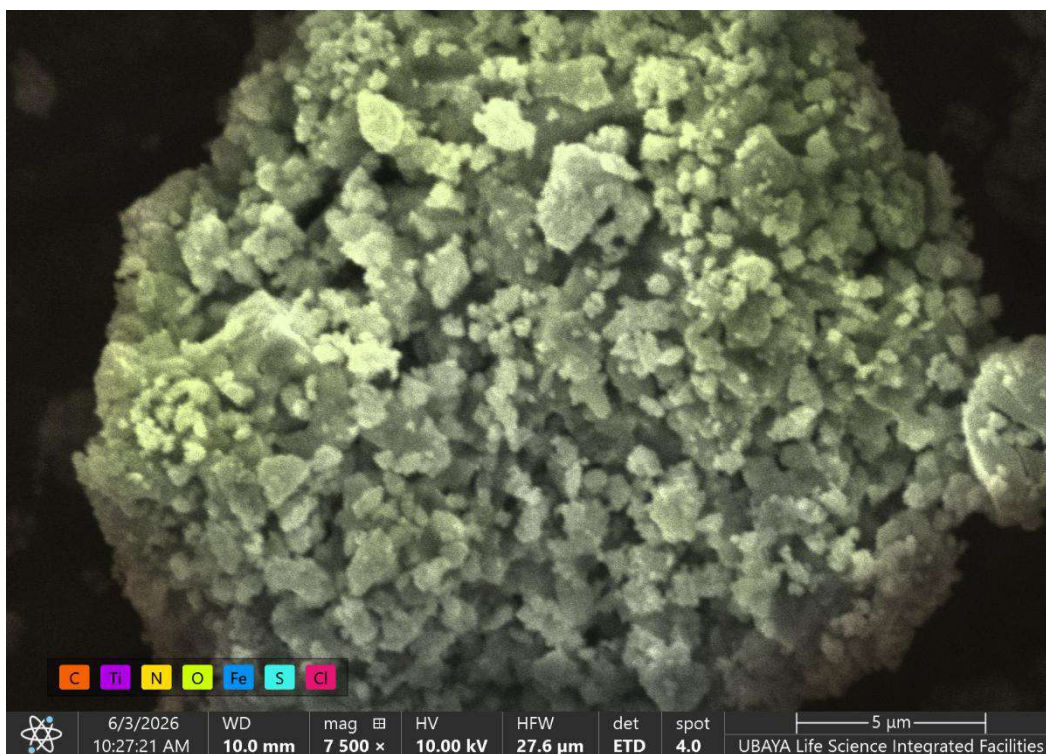


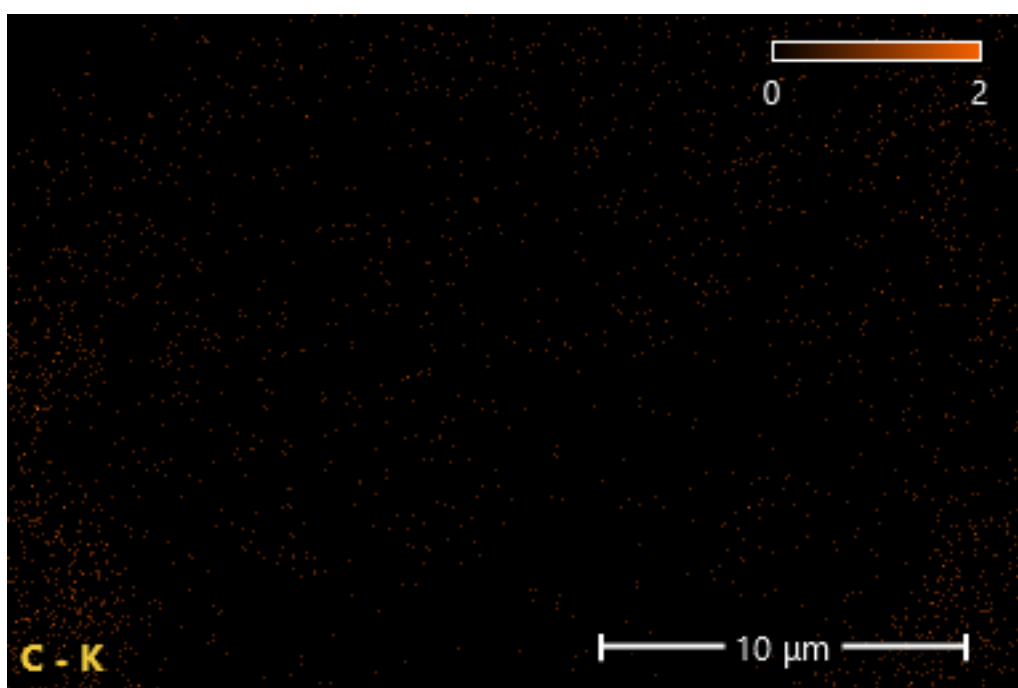
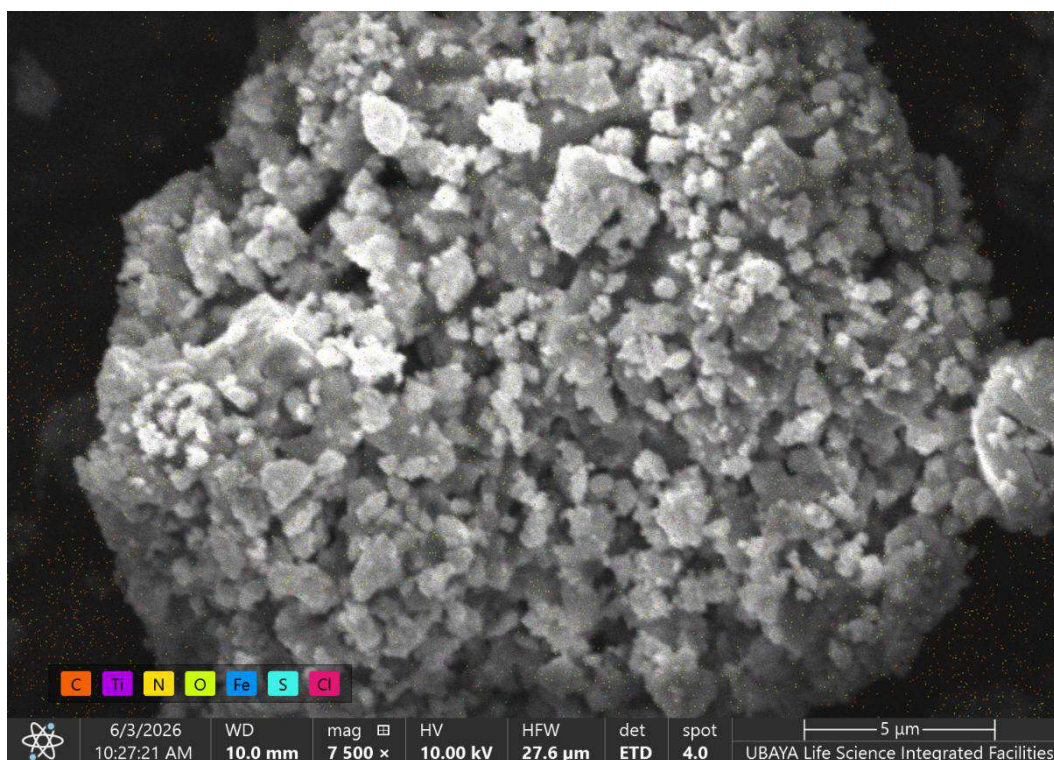
EDX Spectrum Komposit

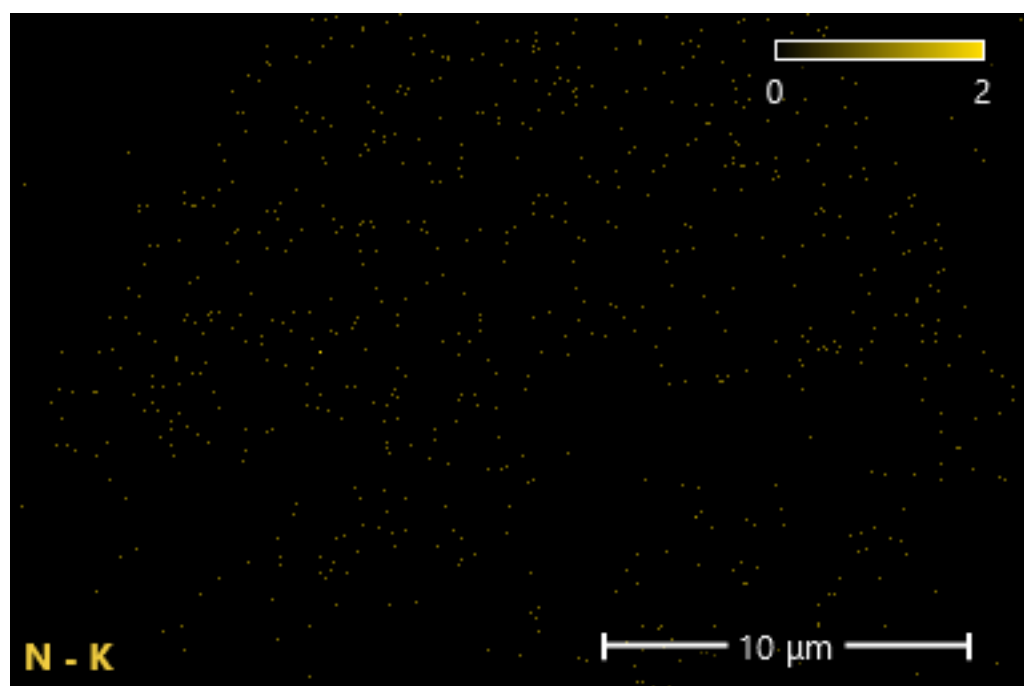
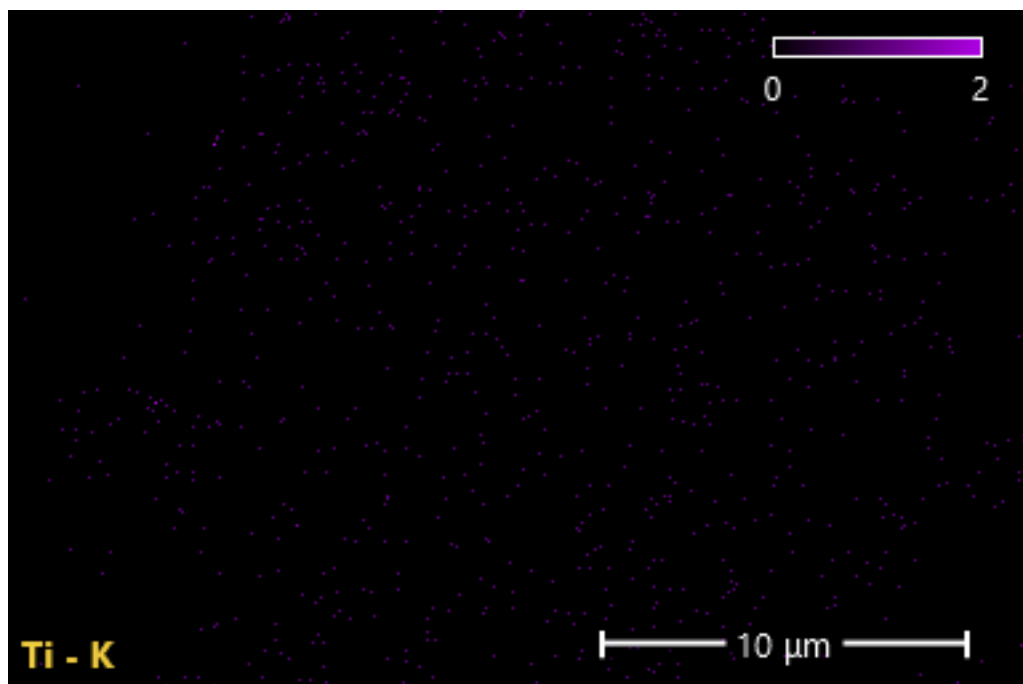
Element	Line	At. %	Wt. %	Net Counts	At. % Error	Wt. % Error
C	K	31.2	18.9	2 551	0.6	0.3
N	K	10.6	7.5	826	0.9	0.6
O	K	43.3	35.1	5 626	0.7	0.5
S	K	0.3	0.5	155	0.1	0.1
Cl	K	1.1	1.9	454	0.1	0.1
Ti	K	5.5	13.4	1 106	0.2	0.5
Fe	K	8.0	22.7	505	0.9	2.5

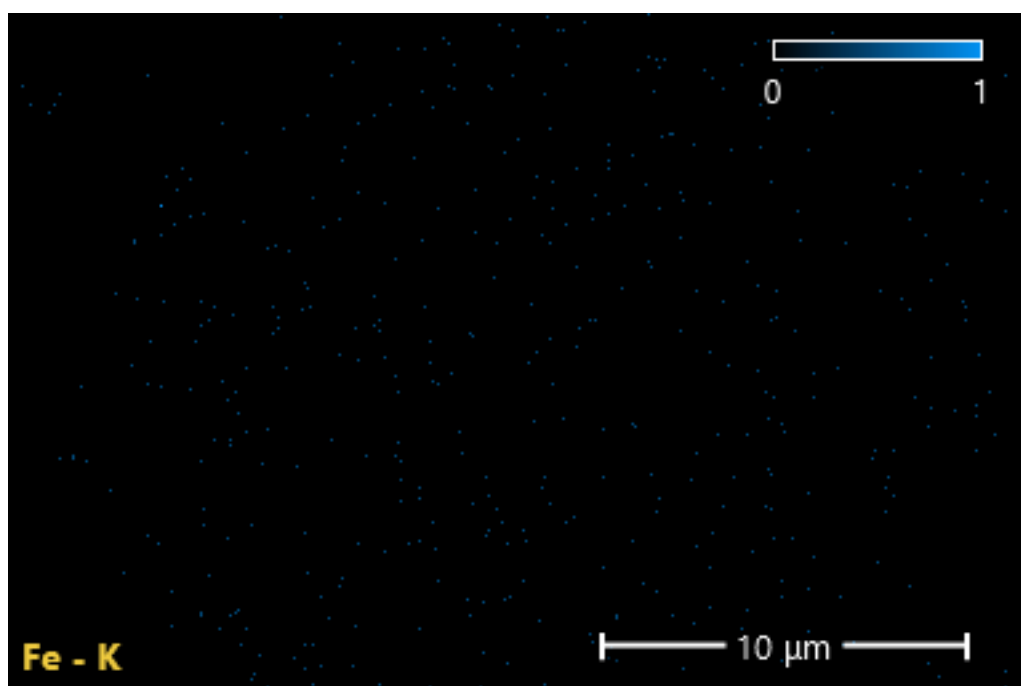
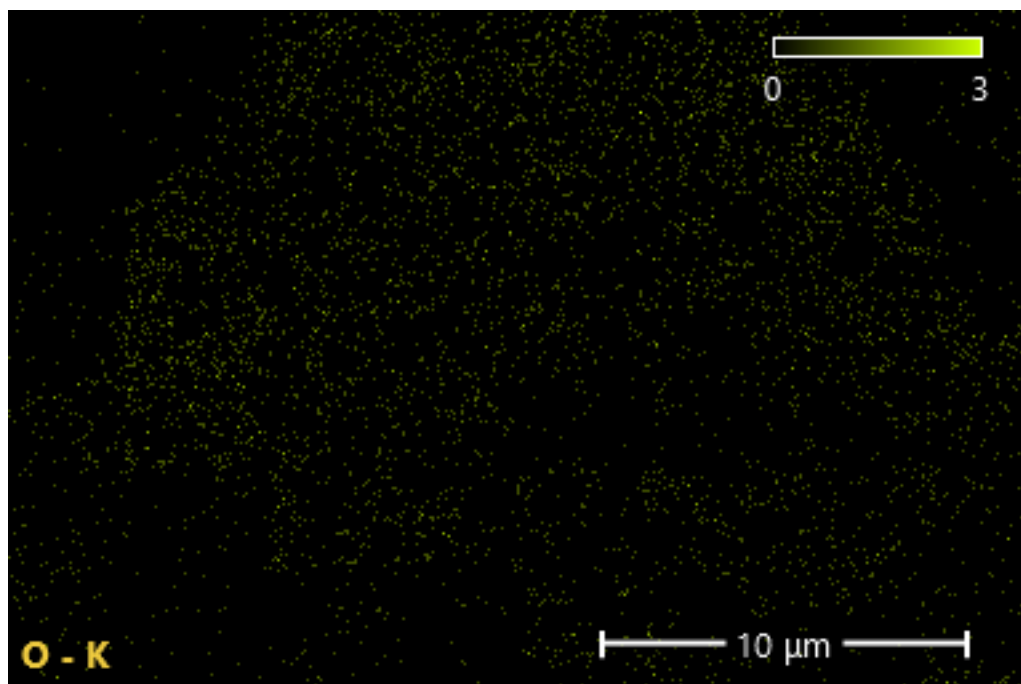


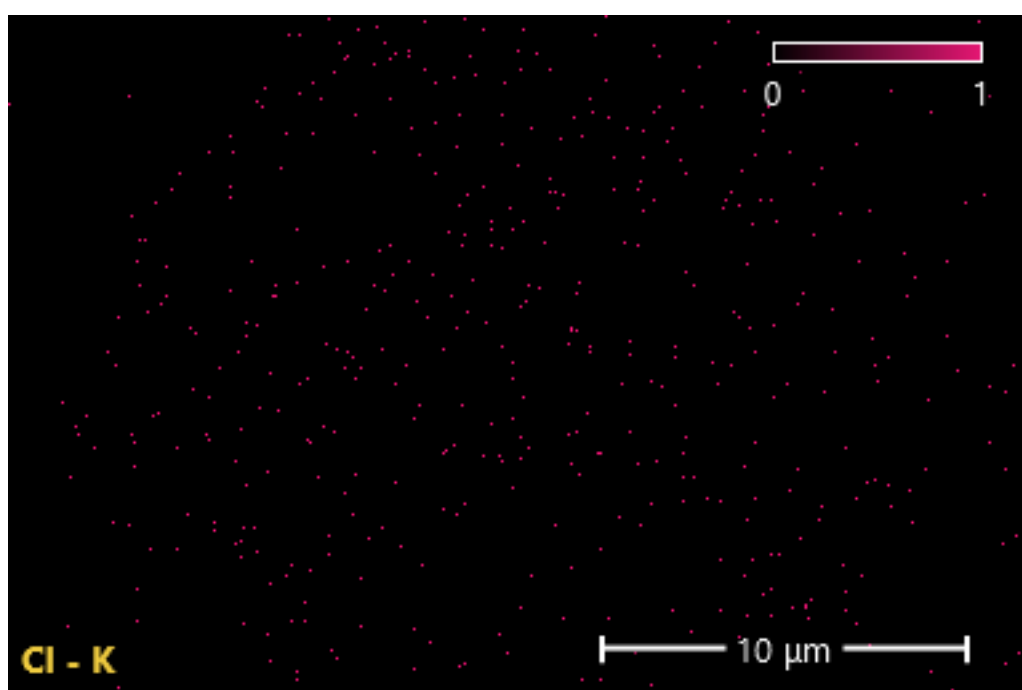
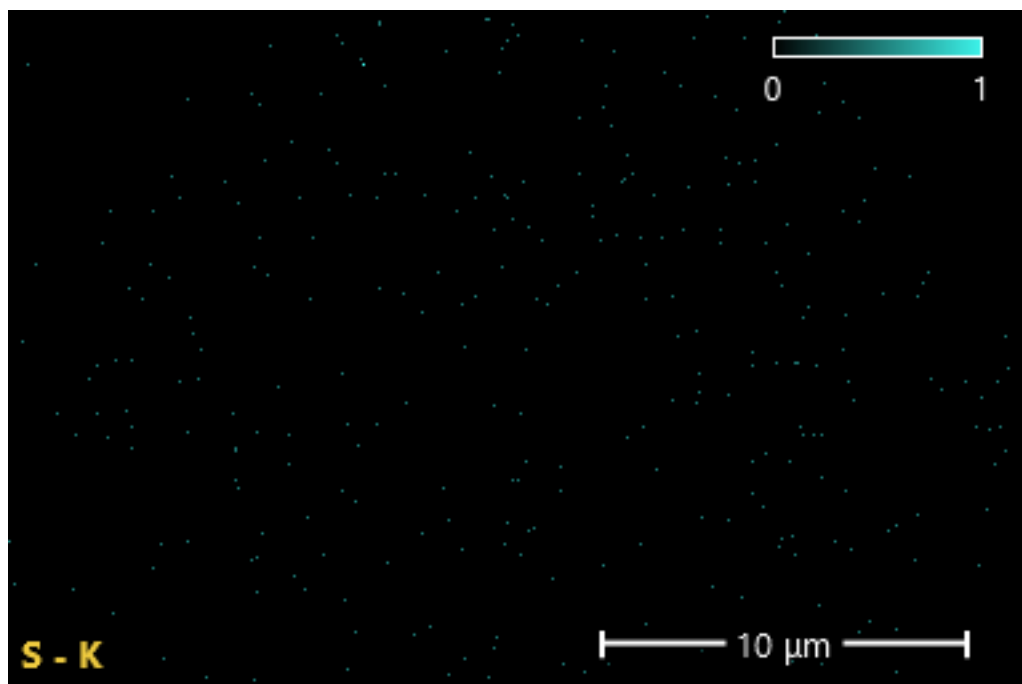
Hasil Mapping











|

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran 12

Hasil Analisis COD

|

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan



LABORATORIUM MANAJEMEN KUALITAS LINGKUNGAN
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

KAMPUS ITS SUKOLILO SURABAYA
TELEPON (031)5948886 FAX. (031)5938387

DATA ANALISA CUPLIKAN

Pengirim : Sdr. Rina
Dikirim Tanggal : 19 Juni 2026
Sampel : Larutan MO 100 ppm

Kode Sampel	COD (mg/L O ₂)
Before Photocatalytic	4.461,00
After Photocatalytic	3.575,00
Metoda Analisa	Refluks

Surabaya, 25 Mei 2026

Laboratorium Manajemen Kualitas Lingkungan
Departemen Teknik Lingkungan FTSPK ITS



Ervin Satrio, ST., MT., PhD

Catatan :

- Laporan ini dibuat untuk cuplikan yang diterima laboratorium kami

|

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran 13

Dokumentasi

|

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan



Sekam padi bersih ukuran 50 mesh



Sonikasi sekam padi + HNO_3 2,5 M



Persiapan proses hydrothermal



Reaktor hydrothermal



Proses hydrothermal 6 jam suhu
160°C



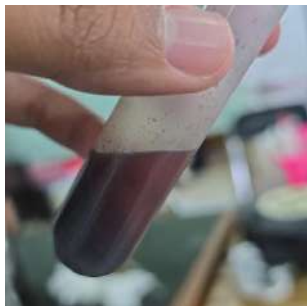
Proses hydrothermal 2 jam suhu
160°C



Hasil proses hydrothermal



Proses centrifuge



Hasil centrifuge



Filtrasi menggunakan nylon syringe filter 0,22 μm



Hasil CDs



Proses dialisis



CDs dibawah sinar UV



Menimbang FeCl_3 untuk pembuatan Fe_3O_4



Menimbang FeSO_4 untuk pembuatan Fe_3O_4



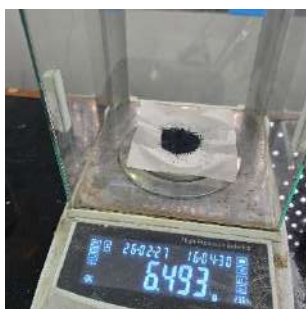
Sintesis material Fe_3O_4



Penambahan larutan amonium hingga pH 10 dan terjadi presipitasi



Proses centrifuge Fe_3O_4



Hasil Fe_3O_4 yang sudah dikeringkan



Menimbang Fe_3O_4 untuk komposit



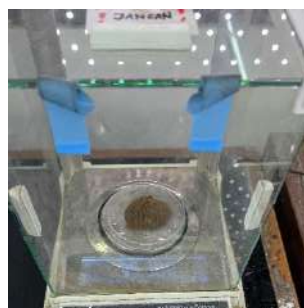
Menimbang TiO_2 untuk komposit



Sonikasi 20 ml Aquabides, TiO_2 dan Fe_3O_4 selama 1 jam



Refluk 24 jam pada suhu 80°C



Hasil komposit



Menimbang 1 gram komposit untuk didekorasi dengan CDs



Sonikasi komposit + CDs sesuai variasi



Microwave 750 watt selama 3 menit



Larutan komposit siap dikeringkan



Pengujian pHpzc



Membuat larutan induk MO



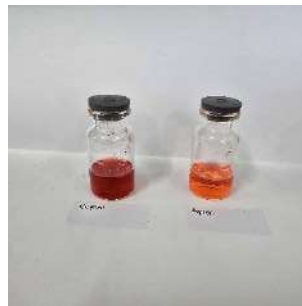
Membuat MO untuk kurva kalibrasi



Pembacaan menggunakan UV-Vis



Proses fotokatalisis



Salah satu hasil fotokatalis



Uji pH 0%



Uji pH 3%



Uji pH 6%



Uji pH 9%



Uji pH 12%



Uji adsorpsi desorpsi 30 menit

 Uji adsorpsi desorpsi 60 menit	 Uji adsorpsi desorpsi 90 menit
 Uji adsorpsi desorpsi 120 menit	 Variasi 1 -90 menit
 Variasi 1 +10 menit	 Variasi 1 +15 menit
 Variasi 1 +20 menit	 Variasi 1 +30 menit



Variasi 1 +45 menit



Variasi 1 +60 menit



Variasi 2 : 0% -90 menit



Variasi 2 : 6% -90 menit



Variasi 2 : 0% +45 menit



Variasi 2 : 6% +45 menit



Variasi 3 : 0% -90 menit



Variasi 3 : 6% -90 menit



Variasi 3 : 0% +45 menit



Variasi 3 : 6% +45 menit



Variasi 4 : 0% -90 menit



Variasi 4 : 6% -90 menit



Variasi 4 : 0% +45 menit



Variasi 4 : 6% +45 menit

