

TUGAS AKHIR - TL234839

**ANALISIS PENGARUH WAKTU *MICROWAVE ASSISTED*
HYDROTHERMAL TERHADAP SIFAT KAPASITIF
KOMPOSIT $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ UNTUK APLIKASI
SUPERKAPASITOR *HYBRID***

LUSI DWI ANGGRAINI
NRP 5011211043

Dosen Pembimbing
Diah Susanti, S.T., M.T., PhD
NIP 197701162003122007
Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.
NIP 199007262015041002

Program Studi Teknik Material dan Metalurgi
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2025

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



TUGAS AKHIR - TL234839

**ANALISIS PENGARUH WAKTU *MICROWAVE ASSISTED*
HYDROTHERMAL TERHADAP SIFAT KAPASITIF
KOMPOSIT $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ UNTUK APLIKASI
SUPERKAPASITOR *HYBRID***

**LUSI DWI ANGGRAINI
NRP 5011211043**

Dosen Pembimbing
Diah Susanti, S.T., M.T., PhD
NIP 197701162003122007
Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.
NIP 199007262015041002

Program Studi Teknik Material dan Metalurgi
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2025

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL234839

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF MICROWAVE ASSISTED
HYDROTHERMAL TIME ON THE CAPACITIVE
PROPERTIES OF $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ COMPOSITES FOR HYBRID
SUPERCAPACITOR APPLICATIONS**

**LUSI DWI ANGGRAINI
NRP 5011211043**

Advisor

Diah Susanti, S.T., M.T., PhD

NIP 197701162003122007

Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T

NIP 199007262015041002

Study Program of Material and Metallurgical Engineering

Department of Materials and Metallurgical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025

(This page is intentionally blank)

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS PENGARUH WAKTU *MICROWAVE ASSISTED HYDROTHERMAL* TERHADAP SIFAT KAPASITIF KOMPOSIT $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ UNTUK APLIKASI SUPERKAPASITOR *HYBRID*

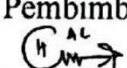
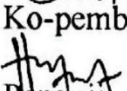
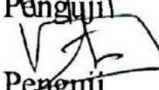
TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Teknik Material dan Metalurgi
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **LUSI DWI ANGGRAINI**
NRP. 5011211043

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D.
2. Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.
3. Dr. Eng Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc
4. Vania Mitha Pratiwi, S.T., M.T.


Pembimbing

Ko-pembimbing

Penguji

Penguji



SURABAYA
Juli, 2025

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

APPROVAL SHEET

ANALYSIS OF THE EFFECT OF MICROWAVE ASSISTED HYDROTHERMAL TIME ON THE CAPACITIVE PROPERTIES OF $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ COMPOSITES FOR HYBRID SUPERCAPACITOR APPLICATIONS

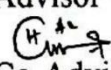
FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree of Bachelor of Engineering at
Undergraduate Study Program of Material and Metallurgical Engineering
Department of Materials and Metallurgical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : **LUSI DWI ANGGRAINI**
NRP. 5011211043

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D.
2. Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.
3. Dr. Eng Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc
4. Vania Mitha Pratiwi, S.T., M.T.


Advisor

Co-Advisor

Examiner

Examiner



SURABAYA
July, 2025

(This page is intentionally blank)

PERNYATAAN ORISINALITAS

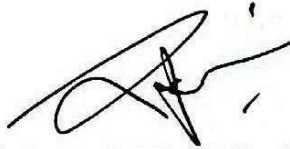
Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Lusi Dwi Anggraini / 5011211043
Program studi : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS - ITS
Dosen Pembimbing / NIP : Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D. /
197701162003122007
Dosen Co-Pembimbing/ NIP : Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T./
199007262015041002

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “ANALISIS PENGARUH WAKTU *MICROWAVE ASSISTED HYDROTHERMAL* TERHADAP SIFAT KAPASITIF KOMPOSIT $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ UNTUK APLIKASI SUPERKAPASITOR *HYBRID*” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Mengetahui
Dosen Pembimbing



Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197701162003122007

Surabaya, 23 Juli 2025

Mahasiswa



Lusi Dwi Anggraini
NRP. 5011211043

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Lusi Dwi Anggraini / 5011211043
Departement : Materials and Metallurgical Engineering INDSYS-ITS
Advisor / NIP : Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D./ 197701162003122007
Co-Advisor / NIP : Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T./ 199007262015041002

hereby declare that the Final Project with the title of "ANALYSIS OF THE EFFECT OF MICROWAVE ASSISTED HYDROTHERMAL TIME ON THE CAPACITIVE PROPERTIES OF $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ COMPOSITES FOR HYBRID SUPERCAPACITOR APPLICATIONS" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, July 23rd 2025

Acknowledged
Advisor

Student



Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197701162003122007



Lusi Dwi Anggraini
NRP. 5011211043

(This page is intentionally blank)

ANALISIS PENGARUH WAKTU *MICROWAVE ASSISTED HYDROTHERMAL* TERHADAP SIFAT KAPASITIF KOMPOSIT $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ UNTUK APLIKASI SUPERKAPASITOR *HYBRID*

Nama Mahasiswa / NRP : Lusi Dwi Anggraini / 5011211043
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS - ITS
Dosen Pembimbing : Diah Susanti, ST, MT, PhD
Dosen Ko-Pembimbing : Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T

Abstrak

Pertumbuhan populasi disertai kemajuan teknologi meningkatkan konsumsi energi secara signifikan. Bahan bakar fosil masih menjadi sumber energi utama yang memenuhi kebutuhan energi global. Ketergantungan terhadap energi fosil berisiko terhadap kesehatan, lingkungan, dan keseimbangan ekologi. Oleh karena itu, diperlukan teknologi penyimpan energi yang ramah lingkungan dan memiliki performa tinggi. Supercapacitor merupakan salah satu teknologi penyimpan energi dengan *charge/discharge* singkat, masa pakai panjang, dan *power density* tinggi. *Hybrid supercapacitor* merupakan kombinasi antara EDLC dan *pseudocapacitor*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh waktu *microwave assisted hydrothermal* terhadap struktur, morfologi, serta sifat kapasitif komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ sebagai material elektroda *hybrid supercapacitor*. *Reduced Graphene Oxide* (rGO) disintesis melalui metode Hummers, sedangkan Mn_3O_4 dan komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ disintesis melalui metode *microwave assisted hydrothermal*. Variasi waktu yang digunakan untuk sintesis komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$, yaitu 5 menit, 10 menit, dan 15 menit pada daya 600 watt. Metode *microwave assisted hydrothermal* dipilih karena reaksinya yang cepat, kontrol ukuran partikel tinggi, kristalinitas baik, minim penggumpalan, pemanasan merata, dan konsumsi energi lebih rendah sehingga bersifat ramah lingkungan. Pengujian karakterisasi komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ dilakukan melalui metode SEM-EDX, XRD, FTIR untuk menganalisis struktur dan morfologinya. Sementara itu, pengujian CV, EIS, serta GCD digunakan untuk mengukur nilai kapasitansi dan konduktivitas dari komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ dengan menggunakan elektrolit KOH 1M. Penelitian ini menghasilkan kapasitansi spesifik terbaik pada material komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ 15 menit (K-15) sebesar 250,73 F/g pada *scanrate* 5 mV/s, 87,867 F/g ketika *charge* dan 35,467 F/g ketika *discharge* pada *current density* 2 A/g, dan 103,428 F/g dengan frekuensi 0,01 Hz. *Energy density* yang dihasilkan sebesar 34,82 Wh/kg dan *power density* sebesar 627,29 W/kg. Kinerja elektroda komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ meningkat seiring dengan penambahan waktu *microwave assisted hydrothermal*, hal ini terjadi karena adanya peningkatan konduktivitas listrik dan penurunan impedansi pada elektroda komposit.

Kata kunci: *Hybrid Supercapacitor, Kapasitansi, Komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$, Microwave Assisted Hydrothermal.*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALYSIS OF THE EFFECT OF MICROWAVE ASSISTED HYDROTHERMAL TIME ON THE CAPACITIVE PROPERTIES OF Mn₃O₄/rGO COMPOSITES FOR HYBRID SUPERCAPACITOR APPLICATIONS

Student Name / NRP : Lusi Dwi Anggraini / 5011211043
Department : Materials and Metallurgical Engineering INDSYS-ITS
Advisor : Diah Susanti, ST, MT, PhD
Co-Advisor : Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T

Abstract

Population growth coupled with technological advances has significantly increased energy consumption. Fossil fuels remain the primary energy source meeting global energy needs. Dependence on fossil fuels poses risks to health, the environment, and ecological balance. Therefore, environmentally friendly energy storage technologies with high performance are needed. Supercapacitors are one such energy storage technology, characterized by short charge/discharge times, long lifespan, and high power density. Hybrid supercapacitors combine EDLC and pseudocapacitor technologies. This study aims to analyze the effect of microwave-assisted hydrothermal time on the structure, morphology, and capacitive properties of Mn₃O₄/rGO composite as a hybrid supercapacitor electrode material. Reduced Graphene Oxide (rGO) was synthesized using the Hummers method, while Mn₃O₄ and Mn₃O₄/rGO composite were synthesized using the microwave-assisted hydrothermal method. The synthesis of the Mn₃O₄/rGO composite was performed at three different times: 5 minutes, 10 minutes, and 15 minutes at a power of 600 watts. The microwave-assisted hydrothermal method was chosen due to its rapid reaction, high particle size control, good crystallinity, minimal agglomeration, uniform heating, and lower energy consumption, making it environmentally friendly. Characterization testing of the Mn₃O₄/rGO composite was conducted using SEM-EDX, XRD, and FTIR methods to analyze its structure and morphology. Meanwhile, CV, EIS, and GCD tests were used to measure the capacitance and conductivity values of the Mn₃O₄/rGO composite using a 1M KOH electrolyte. This study yielded the best specific capacitance for the Mn₃O₄/rGO composite material at 15 minutes (K-15) of 250.73 F/g at a scan rate of 5 mV/s, 87.867 F/g during charging, and 35.467 F/g during discharging at a current density of 2 A/g, and 103.428 F/g at a frequency of 0.01 Hz. The energy density achieved was 34.82 Wh/kg, and the power density was 627.29 W/kg. The performance of the Mn₃O₄/rGO composite electrode improved with increasing microwave-assisted hydrothermal treatment time, which occurred due to enhanced electrical conductivity and reduced impedance in the composite electrode.

Keywords: *Capacitance, Hybrid Supercapacitor, Microwave Assisted Hydrothermal, Mn₃O₄/rGO Composite.*

(This page is intentionally blank)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir dengan judul, “ANALISIS PENGARUH WAKTU *MICROWAVE ASSISTED HYDROTHERMAL* TERHADAP SIFAT KAPASITIF KOMPOSIT $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ UNTUK APLIKASI SUPERKAPASITOR *HYBRID*”. terselesaikannya laporan tugas akhir ini tidak luput dari dukungan, bantuan, serta motivasi dan partisipasi dari semua pihak, untuk itu penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir atas segala ilmu dan bimbingan yang telah diberikan selama pelaksanaan tugas akhir.
2. Bapak Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T selaku dosen pembimbing dan dosen wali penulis yang senantiasa memberikan arahan selama masa perkuliahan dan memberikan bimbingan selama pelaksanaan tugas akhir.
3. Bapak Sutarsis, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi FT-IRS ITS
4. Bapak/Ibu Dosen yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis.
5. Orang tua, keluarga, dan teman kuliah penulis yang selalu memberikan dukungan kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa laporan Tugas Akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Untuk itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca. Semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi penulis dan semua pihak terkait.

Surabaya, 23 Juli 2025
Penulis,

Lusi Dwi Anggraini

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
APPROVAL SHEET.....	ix
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	xi
STATEMENT OF ORIGINALITY.....	xiii
ABSTRAK.....	xv
ABSTRACT	xvii
KATA PENGANTAR	xix
DAFTAR ISI	xxi
DAFTAR GAMBAR	xxiii
DAFTAR TABEL.....	xxvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Superkapasitor.....	5
2.1.1 Electric Double Layer Capacitor (EDLC)	6
2.1.2 <i>Pseudocapacitor</i>	8
2.1.3 <i>Hybrid Supercapacitor</i>	11
2.1.4 Superkapasitor Komersial.....	14
2.2 Graphene	15
2.2.1 <i>Graphene Oxide</i> (GO).....	17
2.2.2 <i>Reduced Graphene Oxide</i> (rGO)	19
2.3 Mangan	20
2.3.1 Mangan Oksida	21
2.3.2 Mn_3O_4 (Trimangan Tetraoksida)	22
2.4 <i>Hydrothermal</i>	24
2.5 <i>Microwave Assisted Hydrothermal</i>	26
2.6 Penelitian Terdahulu	27
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	35
3.1 Diagram Alir	35
3.1.1 Diagram Alir Sintesis <i>Graphene Oxide</i> (GO).....	35
3.1.2 Diagram Alir Sintesis <i>Reduced Graphene Oxide</i> (rGO).....	36
3.1.3 Diagram Alir Sintesis Mn_3O_4	37
3.1.4 Diagram Alir Sintesis Komposit Mn_3O_4 /rGO.....	38
3.1.5 Diagram Alir Sintesis Elektroda	39
3.2 Alat Penelitian.....	40
3.3 Bahan Penelitian	41
3.4 Prosedur Penelitian	41
3.4.1 Prosedur Sintesis <i>Graphene Oxide</i> (GO).....	41
3.4.2 Prosedur Sintesis <i>Reduced Graphene Oxide</i> (GO)	41
3.4.3 Prosedur Sintesis Mn_3O_4	42
3.4.4 Prosedur Sintesis Komposit Mn_3O_4 /rGO.....	42
3.4.5 Prosedur Sintesis Elektroda	42

3.5	Pengujian	42
3.5.1	<i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	43
3.5.2	<i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	44
3.5.3	<i>Fourier Transform Infra Red</i> (FTIR)	45
3.5.4	<i>Brunauer Emmett Teller</i> (BET).....	46
3.5.5	<i>Cyclic Voltammetry</i> (CV).....	48
3.5.6	<i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS)	50
3.5.7	<i>Galvanostatic Charge/Discharge</i> (GCD).....	51
3.6	Rencana Penelitian	51
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN.....		53
4.1	Hasil Pengamatan Visual.....	53
4.2	Hasil Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	54
4.3	Hasil Pengujian <i>Fourier Transform Infrared Spectros</i> (FTIR).....	57
4.4	Hasil Pengujian <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM) dan <i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> (EDS)	62
4.5	Hasil Pengujian <i>Brunauer Emmett Teller</i> (BET)	67
4.6	Hasil Pengujian <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV)	70
4.7	Hasil Pengujian <i>Galvanostatic Charge-Discharge</i> (GCD).....	74
4.8	Hasil Pengujian <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS).....	77
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		85
5.1	Kesimpulan.....	85
5.2	Saran	85
DAFTAR PUSTAKA.....		87
LAMPIRAN.....		99
UCAPAN TERIMA KASIH		131
BIODATA PENULIS.....		133

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Plot Ragone pada Perangkat Penyimpan Energi(Pershaanaa et al, 2022)	5
Gambar 2.2 Superkapasitor tipe EDLC (Pershaanaa et al, 2022).....	7
Gambar 2.3 Kurva CV dari elektroda CNT- <i>graphene</i> (Ye et al, 2017).....	8
Gambar 2.4 (a) Sketsa plot Ragone untuk membandingkan berbagai jenis perangkat penyimpanan energi dan (b) Diagram khas <i>pseudocapacitor</i> (Mahala et al, 2023)	9
Gambar 2.5 Variasi proses <i>pseudocapacitance</i> : (a) <i>underpotential deposition</i> (b) <i>redox type pseudocapacitance</i> (c) <i>intercalation pseudocapacitance</i> (Banerjee et al, 2025)	10
Gambar 2.6 Kurva CV dari elektroda RuO ₂ dalam elektrolit H ₂ SO ₄ (Jiang & Liu, 2019).....	10
Gambar 2.7 <i>Hybrid Supercapacitor</i> (Pershaanaa et al, 2022)	11
Gambar 2.8 Kurva CV NiCo ₂ S ₄ dan komposit NiCo ₂ S ₄ /rGO pada laju pemindaian 10 mV/s (Ahamed & Kanagambal, 2024).....	12
Gambar 2.9 Superkapasitor komersial SAMWHA, kiri superkapsitor EDLC, Tengah hybrid superkapasitor, dan kanan pseudocapacitor (Subasinghage et al, 2022)	14
Gambar 2.10 Superkapasitor Maxwell BCAP3000 dan struktur dalam superkapasitor (Novak et al, 2014)	14
Gambar 2.11 Foto Skeleton technology (kiri), JSR micro (tengah), dan Yunasko (kanan) (Sa'adu et al, 2024)	15
Gambar 2.12 Jarak pada graphene (Olabi et al, 2021).....	16
Gambar 2.13 Skema Persiapan Graphene dengan pendekatan top-down dan bottom-up (Zhang et al, 2022).	16
Gambar 2.14 Hasil pengujian SEM grafit pada perbesaran 5000x (Angelica, 2022).....	17
Gambar 2.15 Model Graphene Oxide Lerf-Klinowski (Jiříčková et al., 2022).....	17
Gambar 2.16 Struktur molekuler dari (a) GO dan (b) rGO (Zhang et al, 2022).....	19
Gambar 2.17 Diagram Fasa Mn-O (Grundy et al, 2003).....	22
Gambar 2.18 Unit cell dalam struktur Mn ₃ O ₄ (a) konfigurasi atom oksigen (Mn)tet dan (Mn)okt dalam unit cell, (b) koordinasi oksigen dengan aton (Mn)tet dan (Mn)okt, (c) Pada sel satuan, tetrahedra terbentuk, (d) Tiap oktahedron merupakan sel terpisah, (e) oktahedral (Sukhdev et al, 2020).	23
Gambar 2.19 Pemanasan Hidrotermat (Peixoto et al, 2023).....	25
Gambar 2.20 (a) Komponen radiasi elektromagnetik gelombang mikro dan (b) interaksi medan listrik gelombang mikro dengan polaritas molekul (Becerra et al, 2022).....	26
Gambar 2.21 Tungku Milestone Ethos One komersial untuk sintesis microwave assisted hydrothermal (Ortiz Méndes et al, 2016).....	27
Gambar 2.22 (a-c) Gambar SEM dari sampel Mn ₃ O ₄ , MnO ₂ /rGO, dan Mn ₃ O ₄ /rGO, (d-e) Gambar TEM dan HRTEM dari sampel Mn ₃ O ₄ /rGO, (f) XRD dari sampel MnO ₂ /rGO dan Mn ₃ O ₄ /rGO (Huang et al, 2020)	27
Gambar 2.23 (a) Isoterm adsorpsi-desorpsi N ₂ dan kurva distribusi pori dari: (b) sampel Mn ₃ O ₄ , MnO ₂ /rGO, dan Mn ₃ O ₄ /rGO, (c) sampel Mn ₃ O ₄ /rGO pada temperatur <i>annealing</i> yang berbeda (Zhang et al, 2022)	28
Gambar 2.24 (a) Spektrum FTIR dari GO, MnO ₂ /rGO, dan Mn ₃ O ₄ /rGO. O 1s dari spektrum XPS dari (b) sampel Mn ₃ O ₄ , MnO ₂ /rGO, dan Mn ₃ O ₄ /rGO. Spektrum XPS dari komposit MnO ₂ /GO dan Mn ₃ O ₄ /rGO: (c) C 1s dan (d) Mn 3s (Huang et al, 2020)	29
Gambar 2.25 (a) Kurva CV pada berbagai <i>scan rate</i> , (b) Kurva GCD pada kerapatan arus 0,5 – 10 A/g, dan (c) Kinerja siklus pada 5 A/g Mn ₃ O ₄ /rGO. (d) Nilai kapasitansi	

spesifik yang diukur pada berbagai kerapatan arus, (e) Plot Nyquist dari spektrum EIS, dan (f) Kontribusi kapasitif yang dikontrol pada <i>scan rate</i> Mn ₃ O ₄ , Mn ₃ O ₄ /rGO, MrG-200, dan MrG-300 (Zhang et al, 2022)	30
Gambar 2.26 <i>Voltammetric responses</i> dari elektroda (a) Mn ₃ O ₄ , (b) MrG-200, (c) Mn ₃ O ₄ /rGO, dan (d) MrG-300 pada 10 mV/s (Huang et al, 2020)	31
Gambar 2.27 (a) kurva CV dan (b) kurva GCD dari hibrida Mn ₃ O ₄ /rGO dengan komposisi rGO yang berbeda pada <i>scan rate</i> 30 mV s ⁻¹ dan <i>current density</i> 2 Ag ⁻¹ , (c) Kurva CV dan (d) kurva GCD dari Mn ₃ O ₄ /rGO-20 pada <i>scan rate</i> berbeda (5 – 100 mV s ⁻¹) dan <i>current density</i> berbeda (1 – 20 Ag ⁻¹) (Zhang et al, 2022)	32
Gambar 3.1 Diagram Alir Sintesis Graphene Oxide (GO).....	35
Gambar 3.2 Diagram Alir Sintesis reduced Graphene Oxide (rGO).....	36
Gambar 3.3 Diagram alir sintesis Mn ₃ O ₄	37
Gambar 3.4 Diagram Alir Sintesis Komposit Mn ₃ O ₄ /rGO	38
Gambar 3.5 Diagram Alir Sintesis Elektroda.....	39
Gambar 3.6 Komponen dan skema dari SEM (Mohammed & Abdullah, 2018)	43
Gambar 3.7 Ilustrasi Prinsip Dasar XRD (Fatimah et al, 2021).....	44
Gambar 3.8 Mesin XRD (Dokumentasi pribadi)	45
Gambar 3.9 Diagram skematik FTIR (Tatulian, 2019)	46
Gambar 3.10 Mesin FTIR (Dokumentasi pribadi)	46
Gambar 3.11 Klasifikasi isoterm fisisorpsi berdasarkan IUPAC (Rahman et al, 2019)	47
Gambar 3.12 Pengaturan dasar untuk pengukuran CV dengan sambungan untuk 3 elektroda (Mohamad, 2025)	48
Gambar 3.13 Alat instrumentasi CV (Dokumentasi pribadi).....	49
Gambar 4.1 Hasil pengamatan visual sampel (a) GO, (b) rGO, (c) Mn ₃ O ₄ , (d) Komposit rGO/Mn ₃ O ₄ , dan (e) Elektroda Superkapasitor	53
Gambar 4.2 Pola XRD Grafit, GO, dan rGO	54
Gambar 4.3 Pola XRD Mn ₃ O ₄ , dan komposit rGO/Mn ₃ O ₄ (K-5, K-10, dan K-15)	55
Gambar 4.4 Perbesaran puncak rGO pada XRD komposit rGO/Mn ₃ O ₄	56
Gambar 4.5 Hasil pengujian FTIR pada material GO dan rGO	57
Gambar 4.6 Hasil pengujian FTIR pada material Mn ₃ O ₄	59
Gambar 4.7 Hasil pengujian FTIR pada komposit rGO/Mn ₃ O ₄	60
Gambar 4.8 Hasil pengujian SEM dengan perbesaran 15.000x pada sampel (a) GO, (b) rGO, (c) Mn ₃ O ₄ , dan (d) Komposit rGO/ Mn ₃ O ₄ 15 menit (K-15).....	62
Gambar 4.9 Hasil pengujian EDS pada sampel (a) GO, (b) rGO, (c) Mn ₃ O ₄ , dan (d) Komposit rGO/ Mn ₃ O ₄ 15 menit (K-15).....	64
Gambar 4.10 Hasil pengujian SEM pada sampel komposit (a) K-5, (b) K-10, dan (c) K-15 pada perbesaran 30.000x	66
Gambar 4.11 Hasil pengujian EDS pada komposit (a) K-15, (b) K-10, dan (c) K-15	67
Gambar 4.12 Grafik isothermal adsorpsi-desorpsi N ₂ pada sampel (a) GO, (b) rGO, dan (c) Mn ₃ O ₄	68
Gambar 4.13 Hasil pengujian CV pada elektroda material (a) rGO dan (b) Mn ₃ O ₄	70
Gambar 4.14 Hasil pengujian CV pada elektroda material komposit (a) K-5, (b) K-10, dan (c) K-15.....	71
Gambar 4.15 Kapasitansi spesifik elektroda komposit pada setiap <i>scan rate</i>	73
Gambar 4.16 Ragone plot elektroda komposit Mn ₃ O ₄ /rGO.....	73
Gambar 4.17 Hasil pengujian GCD pada elektroda material (a) rGO dan (b) Mn ₃ O ₄	74
Gambar 4.18 Hasil pengujian GCD pada elektroda material komposit rGO/Mn ₃ O ₄ (K-5, K-10, dan K-15).....	75
Gambar 4.19 <i>Equivalent Circuit</i>	77

Gambar 4.20	Hasil pengujian EIS pada <i>raw material</i> rGO dan Mn ₃ O ₄ (a) <i>Nyquist plot</i> , (b) <i>Bode plot frequency vs phase angle</i> , dan (c) <i>Bode plot frequency vs Z </i>	78
Gambar 4.21	<i>Nyquist plot</i> hasil pengujian EIS pada elektroda komposit rGO/ Mn ₃ O ₄	78
Gambar 4.22	Hasil <i>bode plot phase angle</i> (θ) vs frekuensi (Hz) variasi elektroda komposit rGO/Mn ₃ O ₄	81
Gambar 4.23	Hasil <i>bode plot Z </i> vs frekuensi (Hz) pada elektroda komposit rGO/ Mn ₃ O ₄ ...	82
Gambar 4.24	Kapasitansi spesifik (F/g) vs frekuensi pada elektroda komposit rGO/Mn ₃ O ₄ .	83

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Parameter Supercapacitor Dibandingkan dengan Kapasitor dan Baterai (Tamang et al, 2023)	6
Tabel 2.2 Perbandingan Variasi Carbon-based material yang digunakan pada Supercapacitor (Zhang et al, 2010).....	7
Tabel 2.3 Jenis-jenis Hybrid Supercapacitor (Singh et al, 2025)	11
Tabel 2.4 Perbandingan EDLC, <i>pseudocapacitor</i> , dan <i>hybrid supercapacitor</i>	13
Tabel 2.5 Spesifikasi modul superkapasitor komersial yang tersedia secara global (Sa'adu et al, 2024)	15
Tabel 2.6 Fitur yang terlibat dalam berbagai metode sintesis GO (Tamang et al, 2023)	18
Tabel 2.7 Metode reduksi dari GO menjadi rGO (Tamang et al, 2023).....	20
Tabel 2.8 Sifat fisik dari graphene, GO, dan rGO (Tamang et al, 2023).....	20
Tabel 2.9 Struktur Kristas dari Fasa Stabil pada Sistem Mn-O (Grundy et al, 2003)	22
Tabel 2.10 Sifat Elektrokimia Elektroda Mn ₃ O ₄ melalui berbagai metode sintesis (Cuéllar-Herrera et al, 2023)	23
Tabel 2.11 Nilai resistensi dari sampel (Huang et al, 2020).....	31
Tabel 2.12 Sintesis komposit Mn ₃ O ₄ /rGO menggunakan berbagai macam metode	33
Tabel 3.1 Pelaksanaan Penelitian.....	51
Tabel 3.2 Rancangan Jadwal Penelitian.....	52
Tabel 4.1 Puncak XRD Mn ₃ O ₄	56
Tabel 4.2 Hasil pengujian FTIR pada material GO dan rGO	58
Tabel 4.3 Hasil pengujian FTIR pada material Mn ₃ O ₄	59
Tabel 4.4 Hasil pengujian FTIR pada komposit rGO/Mn ₃ O ₄	61
Tabel 4.5 Persentase unsur pada pengujian EDS material GO, rGO, Mn ₃ O ₄ , dan Komposit rGO/Mn ₃ O ₄ 15 menit (K-15)	64
Tabel 4.6 Persentase unsur C, O, dan Mn pada pengujian EDS material komposit.....	67
Tabel 4.7 Hasil pengujian BET pada sampel GO, rGO, dan Mn ₃ O ₄	68
Tabel 4.8 Nilai kapasitansi spesifik pada material rGO, Mn ₃ O ₄ , dan komposit Mn ₃ O ₄ /rGO ..	72
Tabel 4.9 Hasil perhitungan kapasitansi spesifik dari pengujian GCD material rGO, Mn ₃ O ₄ , dan komposit rGO/Mn ₃ O ₄	76
Tabel 4.10 Hasil <i>fitting</i> elektroda komposit rGO/Mn ₃ O ₄ (K-5, K-10, dan K-15).....	79
Tabel 4.11 Hasil perhitungan EIS θ , $ Z $, konduktivitas, dan kapasitansi spesifik	82
Tabel 4.12 Perbandingan kapasitansi spesifik	83
Tabel 4.13 Perbandingan nilai kapasitansi spesifik	84

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi berperan penting untuk menggerakkan peralatan dan teknologi canggih yang meningkatkan kualitas hidup. Beragam perangkat, mulai dari komputer hingga teknologi yang dapat digunakan, membutuhkan energi agar berfungsi dengan optimal (Islam et al, 2025). Pertumbuhan populasi yang pesat disertai dengan kemajuan teknologi, menyebabkan lonjakan konsumsi energi yang signifikan (Ajith et al, 2025). Selama lebih dari satu abad, bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak, dan gas alam telah menjadi sumber energi utama, memenuhi lebih dari 80% kebutuhan energi global (Mahala et al, 2023). Pada tahun 2022, konsumsi energi global tahunan mencapai 580 juta tetra joule, setara dengan 13.865 juta ton bahan bakar minyak fosil (Islam et al, 2025).

Saat ini, 75% emisi gas rumah kaca dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil untuk memenuhi kebutuhan energi dunia (Islam et al, 2025). Jika produksi energi tetap bergantung pada pembakaran bahan bakar fosil, hal ini akan berdampak besar pada kesehatan manusia, keamanan, lingkungan, ketersediaan energi, serta keseimbangan ekologi di seluruh dunia. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan teknologi penyimpan energi yang ramah lingkungan dan memiliki performa tinggi guna menghadapi tantangan sosial dan ekologi di masa depan (Banerjee et al, 2025).

Baterai isi ulang dan superkapasitor merupakan dua teknologi utama dalam penyimpanan energi elektrokimia (Oyedotun & Mamba, 2024). Baterai isi ulang memiliki *energy density* yang tinggi, namun *power density* terbatas karena proses penyisipan ion yang lambat dalam material elektroda (Zhang et al, 2022). Sehingga baterai kurang efektif untuk aplikasi yang membutuhkan proses *charging/discharging* dalam hitungan detik (Mahala et al, 2023). Dibandingkan dengan baterai, superkapasitor memiliki keunggulan seperti, proses *charging/discharging* yang lebih cepat (1-10 detik vs 0,5-5 jam), *power density* lebih tinggi (500-10.000 W/kg vs <1.000 W/kg), masa pakai lebih lama (>500.000 jam vs 500-1.000 jam), serta pengoperasian yang lebih aman. Namun, *energy density* yang rendah pada superkapasitor (1-10 Wh/kg vs 10-100 Wh/kg) menjadi tantangan dalam pengembangannya (Zhang et al, 2022).

Superkapasitor dapat dibagi menjadi tiga jenis utama berdasarkan cara penyimpanan energinya yaitu, *electric double-layer capacitor* (EDLC) yang bekerja menggunakan kapasitansi lapis ganda atau mekanisme non-faradaik, *pseudocapacitor* yang menyimpan energi melalui proses faradaik yang melibatkan reaksi redoks, dan *hybrid* superkapasitor yang mengombinasikan mekanisme faradaik dan non-faradaik (Cevher & Cirpan, 2025). EDLC memiliki *power density* yang tinggi tetapi *energy density*-nya rendah, sedangkan *pseudocapacitor* memiliki *power density* rendah namun *energy density* tinggi. Kombinasi keduanya dalam *hybrid supercapacitor* berpotensi meningkatkan *energy density* dan *power density*. *Hybrid supercapacitor* menjadi jawaban akan permasalahan *energy density* yang rendah pada superkapasitor (Banerjee et al, 2025). Material elektroda memiliki peran krusial dalam superkapasitor, karena memengaruhi kapasitansi, siklus, serta laju superkapasitor (Zhang et al, 2022).

Graphene merupakan salah satu material elektroda EDLC yang memiliki konduktivitas listrik serta stabilitas kimia yang baik (Li et al, 2022). rGO merupakan salah satu turunan *graphene* yang memiliki sifat listrik, termal, dan mekanik unggul, serta struktur berpori yang fleksibel dengan kombinasi mesopori dan mikropori. Selain itu, rGO memiliki luas permukaan yang besar, konduktivitas tinggi, dan stabilitas elektrokimia yang sangat baik (Shah et al, 2018). Luas permukaan yang besar memungkinkan ion-ion dari elektrolit berinteraksi lebih optimal, sehingga membentuk kapasitansi lapisan ganda (Wu et al, 2020). Namun, *graphene* hanya mampu menghasilkan kapasitansi dan *energy density* yang relatif rendah.

Solusi untuk meningkatkan kinerjanya adalah mengombinasikannya dengan material *pseudocapacitive*, seperti oksida logam transisi (TMO) atau polimer konduktif.. Diantara berbagai jenis TMO, MnO_x menonjol sebagai material *pseudocapacitive* yang menjanjikan karena memiliki beragam keadaan valensi Mn dan variasi struktur kristalografi (Li et al, 2022). Material ini mampu menghasilkan kapasitansi tinggi dan *energy density* yang besar (Wu et al, 2020). Di antara berbagai jenis oksida mangan, trimangan tetraoksida (Mn_3O_4) banyak dimanfaatkan sebagai elektroda pseudokapasitif karena keberadaan ion Mn^{2+} dan Mn^{3+} , memungkinkan terjadinya reaksi redoks yang lebih efektif, sehingga meningkatkan kapasitas penyimpanan muatan (Gangwar et al, 2021).

Penelitian terkait *hybrid* superkapasitor $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ menggunakan metode *microwave assisted hydrothermal* dilakukan oleh Chien-Liang Liu pada tahun 2012 menggunakan metode *microwave assisted hydrothermal* untuk fabrikasi komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ dengan MnCl_2 sebagai prekursor mangan. Variabel yang digunakan berupa komposisi Mn_3O_4 dalam komposit (GMn55, GMn65, GMn80, GMn90). Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposit GMn80 (mengandung 82,4% Mn_3O_4) menunjukkan kapasitansi spesifik tertinggi (193 F/g) (Liu et al, 2012). Penelitian yang dilakukan oleh Joby dkk pada tahun 2024 menggunakan metode ultrasonifikasi untuk pembuatan komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ dengan $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ sebagai prekursor mangan dan menggunakan variasi berupa komposisi $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ (25:75, 33:66, dan 66:33). Hasil penelitian menunjukkan variasi 66:33 menghasilkan kapasitansi spesifik paling tinggi yaitu 21,89 F/g (Joby et al, 2024).

Penelitian lainnya dilakukan oleh Shah dkk pada tahun 2018 menggunakan metode *hydrothermal* untuk fabrikasi komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ dengan menggunakan MnCl_2 sebagai prekursor mangan. Kapasitansi spesifik yang dihasilkan sebesar 457 F/g pada arus 1 A/g (Shah et al, 2018). Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu yang telah dijelaskan, terdapat beberapa kekurangan pada metode sintesis yang digunakan, yaitu membutuhkan waktu lama dan konsumsi energi yang tinggi (*hydrothermal*) serta kapasitansi spesifik yang rendah. Oleh karena itu, metode *microwave assisted hydrothermal* dipilih sebagai metode sintesis komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ pada penelitian ini karena reaksi pada metode ini lebih cepat dan bersifat ramah lingkungan karena konsumsi energi yang rendah.

Namun, pada penelitian sebelumnya dengan metode *microwave assisted hydrothermal* kapasitansi spesifik yang diperoleh tergolong rendah. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan variasi waktu 5 menit, 10 menit, dan 15 menit pada daya 500 W dengan harapan dapat meningkatkan kapasitansi spesifik pada komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$. Selain itu, penggunaan variasi waktu pada metode *microwave assisted hydrothermal* untuk sintesis komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ pada aplikasi *hybrid* superkapasitor masih kurang dieksplorasi. Sehingga, masih

terdapat peluang untuk melakukan pengembangan lebih lanjut. Karakterisasi yang akan digunakan pada penelitian ini yaitu SEM, EDS, XRD dengan tujuan untuk menganalisis struktur dan morfologi komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$. Untuk kinerja superkapasitor dilakukan pengujian CV, GCD, dan EIS dengan tujuan untuk mengetahui nilai kapasitansi dan konduktivitas dari komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang ada pada penelitian ini, maka rumusan masalah yang dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh waktu *microwave assisted hydrothermal* terhadap struktur dan morfologi material komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$?
2. Bagaimana pengaruh waktu *microwave assisted hydrothermal* terhadap sifat kapasitif material komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$?

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah yang ada pada penelitian ini, maka batasan masalah yang diterapkan sebagai berikut:

1. Ukuran serbuk grafit dianggap homogen
2. *Impurity* dari bahan-bahan yang digunakan diabaikan
3. pH aquades dianggap netral
4. Temperatur dan tekanan udara dianggap konstan
5. Dianggap tidak ada material *loss* selama proses reaksi
6. Kecepatan *stirring* dianggap konstan
7. Fluktuasi temperatur pada *furnace* diabaikan

1.4 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang ada pada penelitian ini, maka tujuan yang diterapkan sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh waktu *microwave assisted hydrothermal* terhadap struktur dan morfologi material komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$.
2. Menganalisis pengaruh waktu *microwave assisted hydrothermal* terhadap sifat kapasitif material komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$.

1.5 Manfaat

Penelitian ini dibuat untuk dapat menghasilkan material elektroda superkapasitor hybrid yang memiliki sifat kapasitif yang maksimal, ramah lingkungan, mudah dalam pembuatannya, dan dapat diterapkan dalam berbagai bidang yang membutuhkan penyimpanan energi listrik yang efektif. Sehingga dapat mewujudkan langkah Indonesia dalam menyukseskan komitmen global dalam rangka pembangunan berkelanjutan atau Sustainable Development Goals (SDGs).

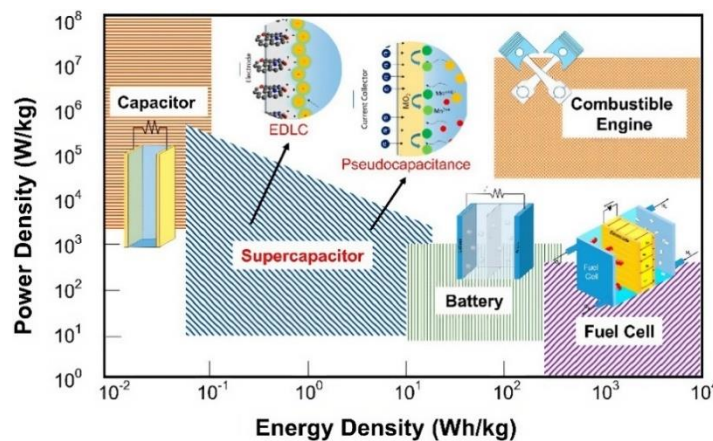
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Superkapasitor

Superkapasitor atau juga disebut kapasitor elektrokimia merupakan kapasitor dengan kapasitansi yang lebih tinggi daripada kapasitor biasa (Singh et al, 2025). Superkapasitor terdiri dari dua elektroda yaitu elektroda positif dan elektroda negatif, elektrolit, dan *separator* (pemisah) yang memisahkan kedua elektroda tersebut agar tidak terjadi kontak listrik langsung. Superkapasitor yang tipis, berpori, dan sangat konduktif terhadap ion akan mengoptimalkan kinerja superkapasitor tersebut. Superkapasitor mengisi celah antara kapasitor dan baterai dalam hal *power density* dan *energy density*. Superkapasitor mengombinasikan *power density* yang tinggi dan *charge/discharge* pada arus tinggi dengan *energy density* yang tinggi (Banerjee et al, 2025).



Gambar 2.1 Plot Ragone pada Perangkat Penyimpan Energi(Pershaanaa et al, 2022)

Berdasarkan **Gambar 2.1** superkapasitor memiliki *energy density* yang lebih tinggi daripada kapasitor, namun lebih rendah daripada baterai. Secara konvensional, superkapasitor memiliki ciri khas seperti *power density* yang tinggi (5000-10.000 W kg⁻¹), kapasitansi yang tinggi (500-3000 Fg⁻¹), siklus hidup yang sangat baik hingga ribuan siklus dengan retensi kapasitas yang tinggi, pengisian yang cepat, dan *energy density* relatif baik. *Power density* pada perangkat penyimpanan energi mengacu pada seberapa cepat energi tersebut ditransfer melalui volume tertentu. Sedangkan *energy density* mengacu pada berapa banyak energi yang disimpan di area tertentu diatas volumenya. Dengan demikian, *power density* dapat diartikan bagaimana suatu sistem dapat mengantarkan energi dengan cepat dan *energy density* dapat diartikan banyaknya energi yang disimpan dalam sistem (Pershaanaa et al, 2022).

Power density yang tinggi pada superkapasitor menyebabkan superkapasitor sering digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan lonjakan energi yang tinggi dalam waktu yang singkat seperti turbin angin, industri otomotif, dan panel surya (Pershaanaa et al, 2022). Properti pada superkapasitor dapat ditingkatkan dengan cara memodifikasi faktor-faktor tertentu seperti material elektroda dan elektrolit. Kapasitansi dan *energy density* pada superkapasitor dapat ditingkatkan dengan cara meningkatkan luas permukaan aktif dari material elektroda atau dengan cara menggunakan heteroatom seperti nitrogen (N) atau oksigen (O) atau gugus fungsi

permukaan ke dalam material elektroda. Selain itu, ukuran pori dari material elektroda akan mempengaruhi *energy density* superkapasitor (Pershaanaa et al, 2022). Pada **Tabel 2.1** terdapat perbedaan sifat elektrokimia pada sistem penyimpanan energi.

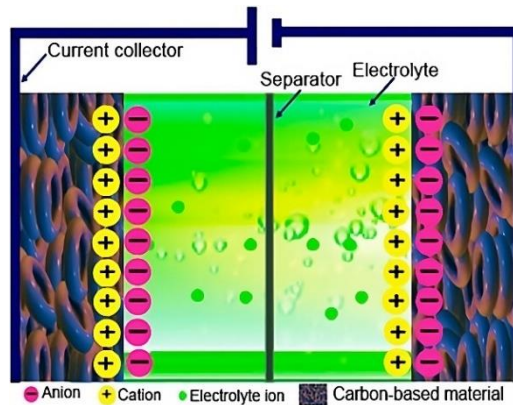
Tabel 2.1 Parameter Superkapasitor Dibandingkan dengan Kapasitor dan Baterai (Tamang et al, 2023)

Parameter	Superkapasitor	Kapasitor	Baterai
<i>Charging</i>	< 30 detik	$10^{-3} - 10^{-6}$ detik	> 1 jam
<i>Discharging</i>	< 30 detik	$10^{-3} - 10^{-6}$ detik	> 0,3 jam
<i>Charge/discharge efficiency</i>	~ 0,98	> 0,95	~ 0,85
<i>Lifetime</i> (jumlah siklus)	10^6	10^6	~ 10^3
<i>Energy density</i> (Wh/kg)	≤ 10	< 0,1	10 – 200
<i>Power density</i> (Wh/kg)	$\geq 10^4$	< 10^5	200 – 2000

Superkapasitor dapat dikategorikan menjadi tiga tipe berdasarkan mekanisme penyimpanan energinya, yaitu *Electric Double Layer Capacitor* (EDLC), *pseudocapacitor*, dan *hybrid supercapacitor*. Pemilihan material elektroda sangat mempengaruhi penentuan mekanisme penyimpanan energi pada superkapasitor (Cevher & Cirpan, 2025). Kinerja elektrokimia material elektroda dapat dievaluasi melalui dua parameter utama yaitu kurva *cyclic voltammetry* (CV) dan karakteristik *charge/discharge* (CD). Dalam kurva CV, puncak anoda dan katoda mencerminkan reaksi redoks yang *reversible* (Sayyed et al, 2021).

2.1.1 Electric Double Layer Capacitor (EDLC)

EDLC beroperasi dengan menyimpan muatan secara elektrostatik tanpa melibatkan reaksi redoks. Saat proses *charging*, gaya tarik elektrostatik menyebabkan ion positif dan negatif berkumpul pada permukaan elektroda dan mendorong pergerakan ion elektrolit menuju elektroda. Hal ini menyebabkan terjadinya penyerapan ion dan membentuk lapisan ganda pada antarmuka elektroda-elektrolit (Cevher & Cirpan, 2025). Pembentukan lapisan ganda bertujuan mencegah rekombinasi muatan (Taman et al, 2023). Lapisan ganda ini memiliki ketebalan antara 5 – 10 Å pada elektrolit pekat, memungkinkan terjadinya penyimpanan muatan kapasitatif spesifik. Pada saat proses *discharging*, ion akan meninggalkan elektroda dan kembali ke elektrolit (Cevher & Cirpan, 2025).



Gambar 2.2 Superkapasitor tipe EDLC (Pershaanaa et al, 2022)

Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.2**, EDLC memiliki komponen berupa dua elektroda, membran pemisah, dan elektrolit. Elektroda diposisikan terpisah dengan membran *separator* yang berada diantara kedua elektroda dan diisi dengan elektrolit. Membran *separator* berfungsi untuk memfasilitasi mobilitas ion serta mencegah terjadinya kontak listrik langsung antar kedua elektroda (Cevher & Cirpan, 2025). Membran pemisah tersusun dari material polimer, keramik, *paper*, atau serat kaca. Untuk kinerja yang optimal, membran pemisah harus memiliki resistansi listrik tinggi, konduktivitas ion tinggi, dan ketebalan kecil (Hung et al, 2022).

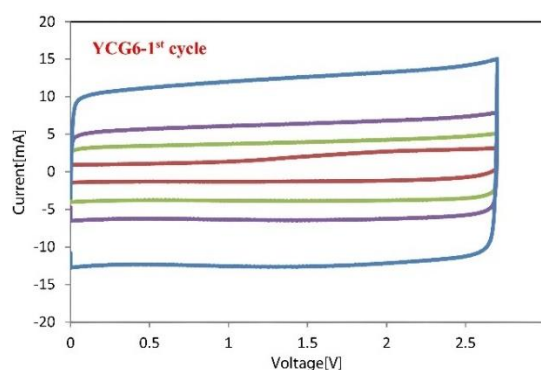
Proses *non-faraday* dalam EDLC menyebabkan superkapasitor terhindar dari pembengkakan saat proses *charging/discharging* (Cevher & Cirpan, 2025). Superkapasitor EDLC dapat bertahan hingga jutaan siklus tidak mengalami pembengkakan, berbeda dengan baterai yang hanya bertahan pada ribuan (Banerjee et al, 2025). Pemilihan material yang tepat dapat meningkatkan kinerja EDLC. EDLC menggunakan elektroda dari material berbasis karbon, seperti *activated carbon* (AC), *carbon fibers*, *carbon nanotubes* (CNT), dan *graphene*. Karbon merupakan material yang cocok digunakan dalam EDLC karena memiliki karakteristik seperti, *wettability* yang sangat baik, luas permukaan yang besar, konduktivitas tinggi, dan *electrochemical window* yang luas (Cevher & Cirpan, 2025). Pada **Tabel 2.2** terdapat *carbon-based material* yang digunakan pada EDLC.

Tabel 2.2 Perbandingan Variasi Carbon-based material yang digunakan pada Superkapasitor (Zhang et al, 2010)

Karbon	<i>Specific Surface Area</i> (m ² /g)	Konduktivitas Listrik (S/cm)	Biaya	<i>Aqueous Electrolyte</i>	
				F/g	F/cm ³
<i>Fullerence</i>	1100 – 1400 ¹⁷	10 ⁻⁸ – 10 ⁻¹⁴¹⁸	Sedang		
CNT	120 – 500	10 ⁴ – 10 ⁵¹⁹		50 – 100	<60
<i>Graphene</i>	2630 ²⁰	10 ⁶		100 – 205 ^{21,22}	>100 – 205
<i>Graphite</i>	10 ²⁰	10 ⁴²³			
AC	1000 – 3500	0,1 – 1		<200	<80
<i>Templated Porous Carbon</i>	500 – 3000	0,3 – 10 ²⁴		120 – 350	<200

Karbon	<i>Specific Surface Area</i> (m ² /g)	Konduktivitas Listrik (S/cm)	Biaya	<i>Aqueous Electrolyte</i>	
				F/g	F/cm ³
<i>Functionalized Porous Carbon</i>	300 – 2200	>300		150 – 300	<180
<i>Activated Carbon Fibers</i>	1000 – 3000	5 – 10		120 – 370	<150
<i>Carbon Aerogels</i>	400 – 1000	1 – 10		100 – 125	<80

Analisis *Cyclic Voltammetry* (CV) merupakan metode untuk menganalisis karakteristik elektrokimia dari elektroda superkapasitor. CV bertujuan untuk mendapat informasi terkait sifat sel elektrokimia, seperti potensial, kapasitansi, dan daya tahan (Zulhamida & Putra, 2024). Kurva CV EDLC biasanya berbentuk persegi panjang atau kotak. Bentuk ini menunjukkan proses non-faradaik, dimana penyimpanan muatan terjadi melalui pemisahan muatan secara fisik di antarmuka elektroda-elektrolit. Selain itu, bentuk persegi panjang mencerminkan perilaku kapasitif yang hampir ideal dengan siklus *charge/discharge* yang cepat dan kinerja yang konsisten pada berbagai potensi (Mohamad, 2025).



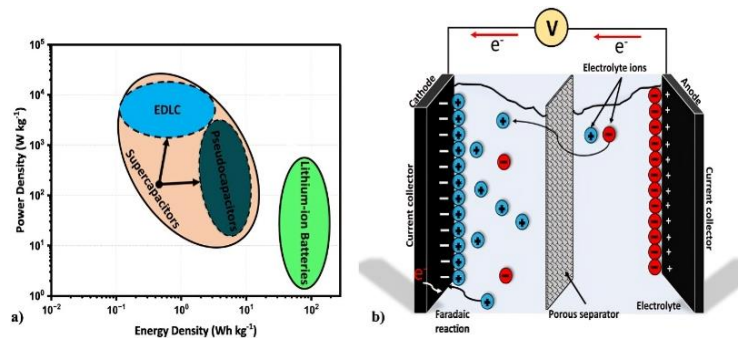
Gambar 2.3 Kurva CV dari elektroda CNT-graphene (Ye et al, 2017)

Pada **Gambar 2.3**, luas area dalam persegi panjang berhubungan dengan kapasitansi EDLC. Semakin besar area tersebut, semakin tinggi kapasitansi dan semakin baik kemampuan penyimpanan energinya. Tidak adanya puncak redoks menunjukkan keberadaan lapisan ganda muatan di permukaan elektroda (Hadi et al, 2024).

2.1.2 *Pseudocapacitor*

Permintaan pasar terhadap superkapasitor yang memiliki *energy density* tinggi terus meningkat dikarenakan ELDC memiliki *energy density* yang rendah. Oleh sebab itu, *pseudocapacitance* diusulkan untuk dibuat di permukaan atau didekat elektroda melalui reaksi redoks yang cepat dan *reversible* (Pershaanaa et al, 2022). Istilah “*pseudocapacitance*” pertama kali digunakan pada tahun 1941 oleh David C. Grahame untuk mengkarakterisasi kapasitas elektrokimia reversible yang berbeda dari proses EDLC (Islam et al, 2025). Dikarenakan kemampuannya menyimpan muatan melalui mekanisme permukaan dan *faradic*,

pseudocapacitor memiliki kapasitansi yang lebih tinggi daripada EDLC. Kapasitansi inilah yang membuat *energy density pseudocapacitor* lebih baik daripada EDLC (Mahala et al, 2023).

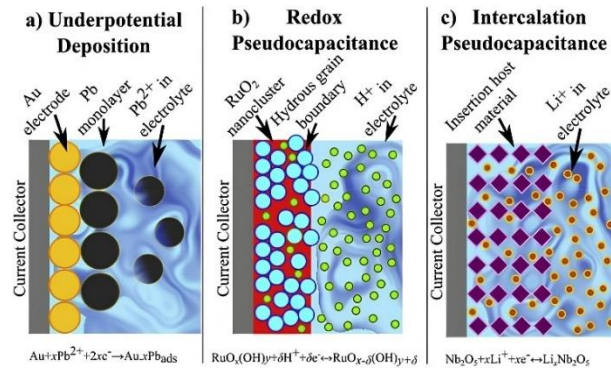


Gambar 2.4 (a) Sketsa plot Ragone untuk membandingkan berbagai jenis perangkat penyimpanan energi dan (b) Diagram khas *pseudocapacitor* (Mahala et al, 2023)

Berdasarkan **Gambar 2.4**, material *pseudocapacitor* memiliki *energy density* yang lebih tinggi daripada EDLC, namun *power density*-nya lebih rendah. Meskipun begitu, *pseudocapacitor* tetap lebih unggul daripada EDLC dalam hal kapasitas penyimpanan energi dan kinerja keseluruhan (Mahala et al, 2023). *Pseudocapacitor* mengisi celah antara EDLC dan baterai, dikarenakan *pseudocapacitor* melibatkan reaksi redoks yang sama dengan prinsip kerja baterai, ditunjukkan oleh kemiripannya dalam uji *cyclic voltammogram* (CV) dan *galvanostatic charge/discharge* (GCD). Namun, *pseudocapacitor* memiliki stabilitas siklik dan *energy density* yang lebih rendah daripada EDLC (Pershaanaa et al, 2022).

Pseudocapacitor tersusun atas dua material elektroda redoks aktif yang dipisahkan oleh elektrolit (Mahala et al, 2023). Ketika tegangan diberikan, elektron dan *holes* akan terkumpul di elektroda masing-masing. Ion bermuatan dalam elektrolit akan bergerak menuju elektroda dengan muatan yang berlawanan. Proses ini menyebabkan pertukaran muatan antara elektroda dan elektrolit, sehingga terbentuk jalur arus faradaik di lapisan ganda yang akan berperan dalam menentukan *energy density pseudocapacitor*. *Pseudocapacitor* memiliki tiga macam mekanisme *pseudocapacitive* yang berbeda, yaitu *underpotential deposition*, *redox pseudocapacitance*, dan *intercalation pseudocapacitance* seperti yang terlihat pada **Gambar 2.5** (Pershaanaa et al, 2022).

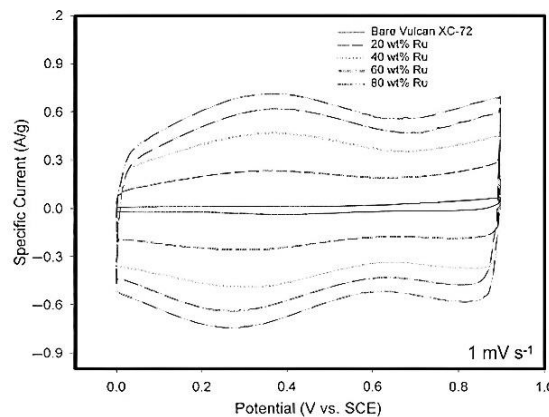
Pada **Gambar 2.5**, mekanisme *underpotential deposition*, atom hidrogen teradsorpsi ke dalam katalis logam mulia seperti, Pt, Rh, Ru, dan Ir pada potensial lebih rendah dari kation redoks. Misalnya, dalam proses deposisi Pt potensial hidrogen yang digunakan harus lebih rendah karena diperlukan potensial positif terhadap potensial reversible hidrogen agar reaksi elektrokimia berjalan (Islam et al, 2025). Jenis ini jarang terjadi karena ion yang terserap kedalam lapisan tunggal berasal dari ion logam pada permukaan logam yang berbeda. Namun, *energy density* yang dihasilkan tinggi karena kinetika *charge/discharge* sangat *reversible* (Pershaanaa et al, 2022). Kapasitansi spesifik yang dapat dicapai pada proses ini sekitar $2200 \mu\text{Fcm}^{-2}$ (Islam et al, 2025).



Gambar 2.5 Variasi proses *pseudocapacitance*: (a) *underpotential deposition* (b) *redox type pseudocapacitance* (c) *intercalation pseudocapacitance* (Banerjee et al, 2025)

Pada mekanisme *redox pseudocapacitor*, muatan disimpan melalui reaksi transfer muatan *faradic* yang terjadi ketika kation diserap secara elektrokimia ke permukaan komponen yang teroksidasi (seperti RuO₂ atau mangan oksida (MnO₂) atau polimer konduktif *p-doped*) (Islam et al, 2025). Reaksi redoks yang cepat dan *reversible* antara komponen elektroaktif yang berada di permukaan elektroda dan elektrolit menjadi karakteristik pada mekanisme ini (Mahala et al, 2023). Pada sistem *redox pseudocapacitor*, kapasitansi terbesar yang dapat dicapai adalah 5000 Fcm⁻³ (Islam et al, 2025). Mekanisme yang terakhir yaitu *intercalation pseudocapacitance* melibatkan penyisipan dan ekstraksi kation elektrolit seperti Na⁺, Li⁺, dan H⁺ secara *reversible* ke dalam atau ke luar struktur elektroda yang kaku dan berlapis. Proses ini disertai transfer muatan Faraday tanpa adanya perubahan kristalografi ataupun fase yang signifikan.

Pseudocapacitor menggunakan material elektroda berupa polimer konduktif dan oksida logam. Polimer konduktif berbiaya rendah dan tidak berbahaya, namun dapat menyusut dan membengkak, tidak seperti oksida logam (Tamang et al, 2023). Pada **Gambar 2.6**, kurva CV *pseudocapacitor* memiliki bentuk yang lebih membulat atau hampir berbentuk persegi panjang. Bentuk kurva ini mencerminkan adanya reaksi faradaik atau redoks yang berlangsung di atau dekat permukaan elektroda. Reaksi tersebut berperan dalam penyimpanan muatan, sehingga menghasilkan kapasitansi yang lebih tinggi dibandingkan EDLC (Mohamad, 2025).



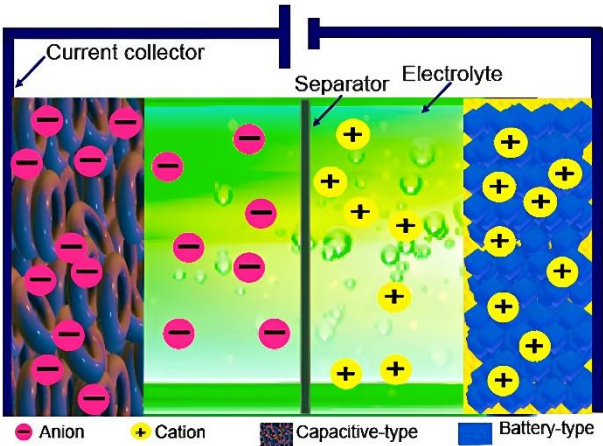
Gambar 2.6 Kurva CV dari elektroda RuO₂ dalam elektrolit H₂SO₄ (Jiang & Liu, 2019)

Pada **Gambar 2.6** kapasitansi spesifik dari RuO₂ berkisar antara 270-350 F/g yang melebihi kapasitansi spesifik dari karbon aktif komersial yaitu ~150 F/g (Jiang & Liu, 2019).

2.1.3 Hybrid Supercapacitor

Pseudocapacitor mampu mengatasi keterbatasan yang dimiliki oleh EDLC, namun tidak mampu mencapai stabilitas siklus dan *power density* dari ELDC. Para peneliti kemudian mengembangkan *hybrid supercapacitor* untuk mengatasi permasalahan tersebut. *Hybrid supercapacitor* merupakan kombinasi dari ELDC dan *pseudocapacitor* yang melibatkan proses penyimpanan *non-faradic* dan *faradic* dalam mekanisme kerjanya. Akibatnya, sebagian dari *hybrid supercapacitor* bertindak sebagai EDLC dan sebagian lainnya bertindak sebagai *pseudocapacitor* (Pershaanaa et al, 2022).

Pada *hybrid supercapacitor*, material berbasis karbon seperti GO dan rGO berperan dalam meningkatkan jalur transfer elektron, menjaga stabilitas morfologi, serta menyediakan luas permukaan spesifik yang lebih besar. Sementara itu, material *pseudocapacitor* seperti oksida logam memiliki kemampuan reaksi redoks yang cepat, sedangkan polimer konduktif menawarkan konduktivitas intrinsik yang lebih tinggi. Kombinasi kedua jenis material dalam elektroda *hybrid supercapacitor* akan meningkatkan kinerja elektrokimia (Tamang et al, 2023).



Gambar 2.7 Hybrid Supercapacitor (Pershaanaa et al, 2022)

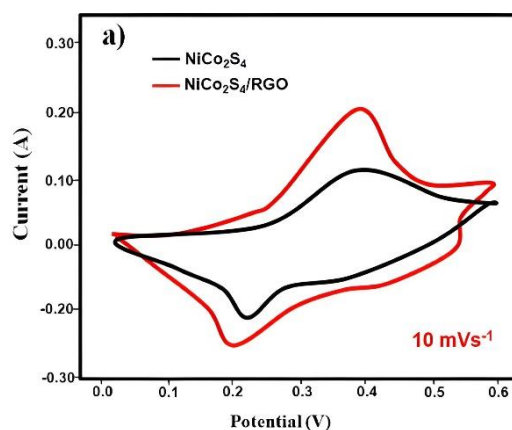
Berdasarkan kombinasi bahan yang digunakan, *hybrid supercapacitor* dibedakan menjadi tiga macam yaitu, asimetris, tipe baterai, dan hibrida komposit seperti yang disajikan pada **Tabel 2.3** (Pershaanaa et al, 2022).

Tabel 2.3 Jenis-jenis Hybrid Supercapacitor (Singh et al, 2025)

Jenis Hybrid Supercapacitor	Komposisi Elektroda	Keunggulan	Kelemahan
Asimetris	Elektroda positif berupa <i>metal oxide</i> atau polimer konduktif. Elektroda	Kapasitansi tinggi, stabilitas siklus kinerja	Perbedaan tegangan kerja antara dua elektroda dapat menyebabkan

Jenis Hybrid Supercapacitor	Komposisi Elektroda	Keunggulan	Kelemahan
Battery-like	negatif berupa karbon aktif.	elektrokimia unggul	degradasi material lebih cepat
	Salah satu elektroda mirip baterai (reaksi faradaik), elektroda lainnya mirip superkapasitor (non-faradaik)	<i>Energy density</i> tinggi dari baterai dan <i>power density</i> tinggi dari superkapasitor, proses <i>charging</i> lebih cepat dibanding baterai konvensional.	Siklus hidup lebih rendah dibandingkan EDLC.
Hibrida Komposit	Kombinasi karbon dengan oksida logam atau polimer konduktif dalam satu elektroda	<i>Energy density</i> dan <i>power density</i> yang tinggi, ramah lingkungan, dan siklus hidup panjang	Proses sintesis kompleks dan kestabilan material menjadi tantangan.

Kurva CV pada komposit $\text{NiCo}_2\text{S}_4/\text{rGO}$ menunjukkan dua puncak utama pada sekitar 0,4 dan 0,2 V seperti pada **Gambar 2.8**. Hal ini menunjukkan bahwa *pseudocapacitance* yang disebabkan oleh reaksi kimia redoks *reversible* ($\text{Co}^{2+}/\text{Co}^{3+}/\text{Co}^{4+}$ dan $\text{Ni}^{2+}/\text{Ni}^{3+}$) merupakan sumber utama kapasitas (Ahamed & Kanagambal, 2024). Profil CV tidak berbentuk persegi panjang dan bersifat asimetris mencerminkan sifat komposit yang menyerupai baterai. Selain *metal oxide*, rGO juga berperan penting dalam penyimpanan muatan faradaik karena keberadaan gugus fungsi yang mengandung oksigen (Sahoo et al, 2024). Pada **Tabel 2.4** terdapat perbandingan antara EDLC, *pseudocapacitor*, dan *hybrid* superkapasitor menggunakan beberapa parameter (Subasinghage, 2022).



Gambar 2.8 Kurva CV NiCo_2S_4 dan komposit $\text{NiCo}_2\text{S}_4/\text{rGO}$ pada laju pemindaian 10 mV/s (Ahamed & Kanagambal, 2024)

Tabel 2.4 Perbandingan EDLC, *pseudocapacitor*, dan *hybrid supercapacitor*

Parameter	EDLC	<i>Pseudocapacitor</i>	<i>Hybrid Supercapacitor</i>	Referensi
Mekanisme Penyimpanan	Non-faradaik Penyimpanan muatan melalui pemisahan fisik ion pada antarmuka elektroda-elektrolit (elektrostatik) tanpa reaksi kimia	Faradaik Penyimpanan energi melalui reaksi faradaik (redoks) yang cepat dan <i>reversible</i> pada atau di dekat permukaan elektroda	Faradaik dan non-faradaik Penyimpanan energi melalui kombinasi penyimpanan elektrostatis dan reaksi faradaik untuk meningkatkan kinerja	(Nanda et al, 2025)
Daya spesifik (kW/kg)	10.000 – 20.000	1000 – 10.000	10.000 – 15.000	(Ansari et al, 2025)
Energi spesifik (W/kg)	5 – 10	10 – 50	20 – 40	
Jumlah siklus <i>charge/discharge</i>	$10^5 - 10^6$	$10^4 - 10^5$	$2 \times 10^4 - 10^5$	(He & Zhang, 2022)
Material	Material berbasis karbon (seperti <i>activated carbon</i> , CNT)	Oksida logam atau polimer konduktif (seperti NiO, MgO, PANI)	Oksida logam/material berbasis karbon, atau polimer konduktif/material berbasis karbon, (seperti Ni(OH) ₂ /rGO, PANI/rGO)	(Subasinghage, 2022)
Kisaran temperatur (°C)	-40 sampai 70	-20 sampai 50	-20 sampai 60	(Subasinghage, 2022)
<i>Cycle Life</i>	Panjang	Lebih singkat daripada EDLC	Lebih lama dari <i>pseudocapacitor</i>	(Nanda et al, 2025)
<i>Self-discharge time</i> pada temperatur ruang	Sedang (minggu)	Lama (bulan)	Lama (bulan)	(Nanda et al, 2025)
Aplikasi	Aplikasi yang memerlukan <i>power density</i> tinggi dan waktu	Aplikasi yang memerlukan <i>energy density</i> besar namun	Cocok digunakan dalam sistem <i>hybrid</i> seperti	(Nanda et al, 2025)

Parameter	EDLC	<i>Pseudocapacitor</i>	<i>Hybrid Supercapacitor</i>	Referensi
	siklus singkat seperti cadangan, penyimpanan memori, serta sistem pengereman	<i>power density</i> rendah seperti <i>wearable electronics</i> dan energi terbarukan	kendaraan listrik, <i>smart grid</i> , dan teknologi penyimpanan energi yang <i>advance</i>	

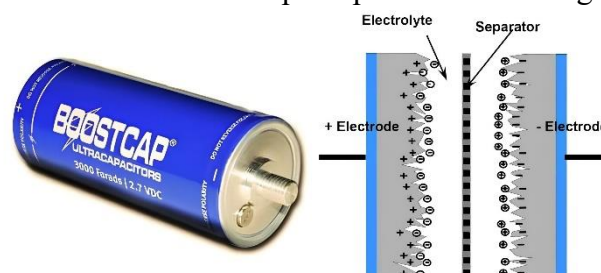
2.1.4 Superkapasitor Komersial

Superkapasitor telah berkembang dalam satu dekade terakhir Perusahaan SAMWHA merupakan salah satu perusahaan yang memproduksi superkapasitor. Beberapa contoh tipe superkapasitor yang diproduksi yaitu tipe SAMWHA 3000F EDLC dan Chroma 6314 A seperti **Gambar 2.9** (Sa'adu et al, 2024).



Gambar 2.9 Superkapasitor komersial SAMWHA, kiri superkapsitor EDLC, Tengah hybrid superkapasitor, dan kanan pseudocapacitor (Subasinghage et al, 2022)

Selain superkapsitor SAMWHA, superkapasitor Maxwell BOOSTCAP banyak digunakan dalam berbagai aplikasi. Salah satu contohnya, Marín-Coca dkk menggunakan Maxwell superkapasitor 2,7 v 3000F untuk mengumpulkan data guna memvalidasi metode baru dalam identifikasi parameter listrik model superkapasitor dua cabang (Sa'adu et al, 2024).



Gambar 2.10 Superkapasitor Maxwell BCAP3000 dan struktur dalam superkapasitor (Novak et al, 2014)

Selain itu, terdapat beberapa superkapasitor termasuk Yunasko, JSR *micro*, dan Skeleton *technology* yang diuji oleh Burke&Zhao (Sa'adu et al, 2024).



Gambar 2.11 Foto Skeleton technology (kiri), JSR micro (tengah), dan Yunasko (kanan)
(Sa'adu et al, 2024)

Pada **Tabel 2.5** terdapat spesifikasi modul superkapasitor komersial yang tersedia secara global.

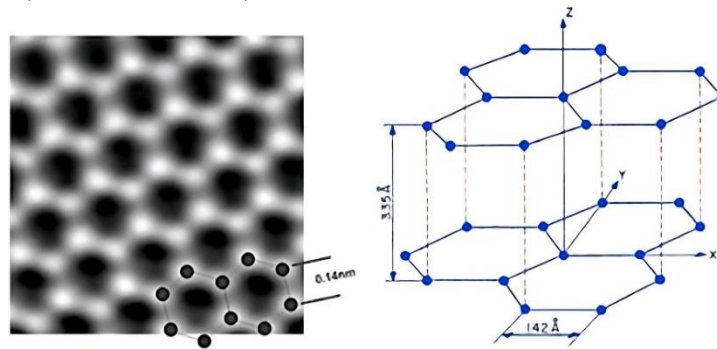
Tabel 2.5 Spesifikasi modul superkapasitor komersial yang tersedia secara global (Sa'adu et al, 2024)

Pabrik	Tipe	Kapasitansi (F)	Siklus	Energy density (Wh/kg)	Power density (Wh/kg)
Eaton	XL60	3000	10^6	3,04	7,9
GMCC	C60W-3R0-3000	3000	10^6	7,8	9,8
LS MTron		100 - 3400		3,3 – 7,5	0,9 – 2,4
Nesscap Co. Ltd		3 - 5000		2 – 5,7	6 - 17
Panasonic Corp		3,3 - 100		1,4 – 4,1	0,29-3,65
SPS Cap		1-5000		0,9 – 6,5	0,5 - 8
Maxwell		1-3400		0,7 – 7,4	2,4 - 14
Maxwell	BCAP0350	210	10^6	3	3
SKELETON	FSCA3200	3200	10^6	6,8	2,1
Ioxus		1250 - 3150		4,5-6,3	23-34
Yunasko		400 - 3000		4,7 – 6,2	7,1 - 41
Yunasko	YEDLM-0007E25R	13 - 500		2,1 – 3,9	3,3 – 11,3
JSR Micro		2300		8	
Vinatech		1 - 3000		0,7 – 6,5	1 – 11,3

2.2 Graphene

Graphene merupakan allotrop karbon yang berasal dari grafit (Taman et al, 2023). *Graphene* terdiri hanya dari atom karbon, dimana setiap atom karbon terikat pada tiga atom karbon lainnya dengan orbital hibridasi sp^2 sehingga membentuk kisi *honeycomb* (Jiříčková et

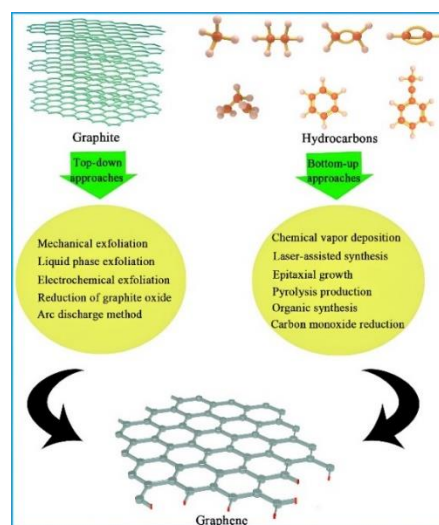
al., 2022). *Graphene* memiliki ketebalan yang bervariasi hingga setebal 10 nm dan bisa dipadukan hingga 30 lapisan. Antar lapisan *graphene* memiliki jarak sebesar 0,335 nm seperti pada **Gambar 2.12** (Olabi et al, 2021).



Gambar 2.12 Jarak pada *graphene* (Olabi et al, 2021)

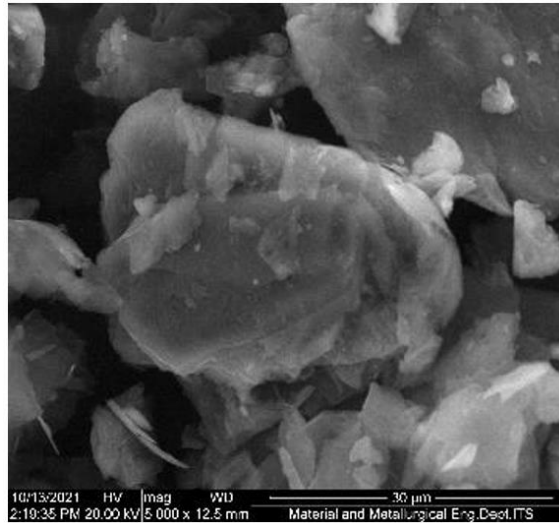
Satu dekade yang lalu, jenis *graphene* yang muncul paling awal berbentuk *flake* yang diperoleh melalui *mechanical exfoliation* dari grafit. *Graphene* yang diperoleh melalui teknik ini memiliki kualitas yang lebih unggul, namun terdapat tantangan pada produksi massal terkait metode fabrikasi dalam memecah *wafer scale graphene* (Olabi et al, 2021). Selain itu, terdapat beberapa metode fabrikasi *graphene* yang dibedakan menjadi dua pendekatan yaitu pendekatan *top-down* dan *bottom-up* seperti pada **Gambar 2.13** (Zhang et al, 2022).

Pendekatan *top-down* menggunakan *raw* grafit yang direduksi dan dieksfoliasi. Metode fabrikasi yang termasuk pendekatan *top-down* yaitu, *mechanical exfoliation*, *liquid phase exfoliation*, *electrochemical exfoliation*, *reduction of graphene oxide*, dan *arc discharge method*. Sedangkan pada pendekatan *bottom-up*, prekursor yang digunakan berupa hidrokarbon. Metode yang termasuk pendekatan *bottom-up* yaitu, *chemical vapor deposition*, *laser-assisted synthesis*, *epitaxial growth*, *pyrolysis production*, *organic synthesis*, dan *carbon monoxide reduction* (Zhang et al, 2022).



Gambar 2.13 Skema Persiapan *Graphene* dengan pendekatan *top-down* dan *bottom-up* (Zhang et al, 2022).

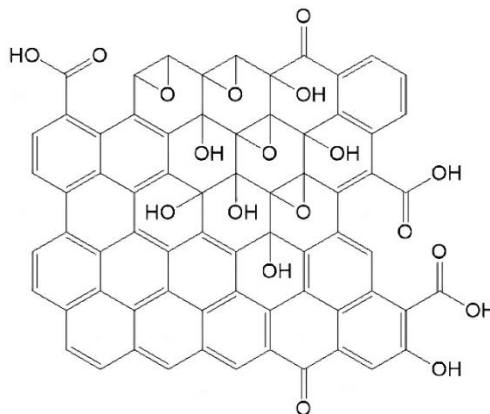
Morfologi dari grafit melalui pengujian *Scanning Electron Mixroscope* ditunjukkan pada **Gambar 2.14** berikut.



Gambar 2.14 Hasil pengujian SEM grafit pada perbesaran 5000x (Angelica, 2022)

2.2.1 *Graphene Oxide (GO)*

Graphene oxide merupakan turunan 3D dari *graphene*. Dikarenakan bukan struktur 2D, GO dapat disintesis lebih mudah daripada *graphene* 2D (Tamang et al, 2023). GO memiliki struktur karbon berlapis dengan gugus fungsi oksigen ($=O$, $-OH$, $-O$, $-COOH$) yang melekat pada kedua sisi lapisan serta pada tepi-tepi bidang (Jiříčková et al., 2022). Adanya gugus fungsi oksigen serta molekul air yang terperangkap akibat interaksi dengan hidrogen mengakibatkan jarak *interlamellar* pada GO ($6-9 \text{ \AA}$) lebih besar daripada *graphene* ($3,34 \text{ \AA}$).. Dengan adanya gugus fungsi oksigen menghasilkan *graphene oxide* yang bersifat hidrofilik berbeda dengan *graphene*, karena itu *graphene oxide* mudah membuat suspensi berbasis air atau pelarut organik (Jiříčková et al., 2022).



Gambar 2.15 Model Graphene Oxide Lorf-Klinowski (Jiříčková et al., 2022)

Model struktur *graphene oxide* pada **Gambar 2.14** diciptakan oleh Lorf-Klinowski pada tahun 1998. Pada model ini, *graphene oxide* dibagi menjadi dua daerah yang berbeda yaitu daerah dengan *six-membered aliphatic rings* dan daerah dengan *non-oxidized benzene aromatic rings*. Kedua daerah tersebut memiliki ukuran yang bergantung pada tingkat oksidasi material.

Struktur utama terdiri struktur aromatik, gugus epoksida, dan ikatan rangkap. Pada ikatan tunggal terjadi kerutan disebabkan oleh adanya distorsi konfigurasi tetrahedral dari gugus hidroksil yang terikat pada atom karbon. Gugus fungsi oksigen menempel di atas dan di bawah lapisan tunggal karbon, membentuk dua lapisan atom oksigen dengan konsentrasi bervariasi, didominasi oleh gugus epoksida dan hidroksil. Gugus fungsi oksigen, struktur aromatik, dan *oxidized rings* secara acak terdistribusi di lapisan tunggal karbon (Jiříčková et al., 2022).

Pada tahun 1958, metode Hummers pertama kali dipublikasikan oleh Hummer dan Offeman, dianggap sebagai metode paling efektif untuk menyintesis GO. Metode ini memiliki kelebihan antara lain, dapat diselesaikan dengan durasi waktu yang lebih singkat, menghindari pembentukan ClO_2 yang bersifat eksplosif dengan cara mengganti KClO_3 dengan KMnO_4 , dan mencegah terjadinya kabut asam dengan cara mengganti HNO_3 yang berasap dengan NaNO_3 (Sundar et al, 2025). Campuran reaksi dalam metode ini tersusun atas KMnO_4 yang berlebih, H_2SO_4 , dan sedikit NaNO_3 . Reaksi berlangsung selama 8 sampai 12 jam. KMnO_4 yang berlebih pada akhir reaksi akan dinetralkan oleh larutan H_2O_2 yang diencerkan (Jiříčková et al., 2022). Namun, metode ini tidak ramah lingkungan karena menghasilkan gas berbahaya seperti NO_2 dan N_2O_4 serta meninggalkan residu nitrat yang sulit dihilangkan. Oleh karena itu, untuk mengatasi hal tersebut metode Hummers mengalami modifikasi selama beberapa tahun terakhir (Sundar et al, 2025). Beberapa metode lain dalam sintesis GO beserta disajikan dalam **Tabel 2.6** berikut.

Tabel 2.6 Fitur yang terlibat dalam berbagai metode sintesis GO (Tamang et al, 2023)

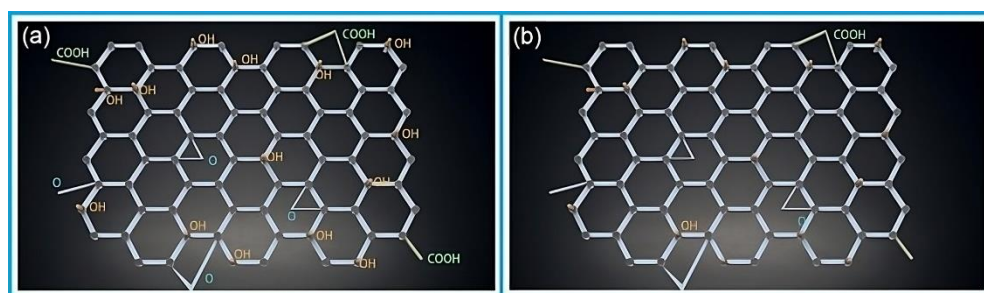
Metode	Karakteristik		Gas yang Dihasilkan		Waktu	Temperatur (°C)
Metode Brodie	Kristal sempurna	tidak	Beracun, mudah meledak	ClO_2	3 – 4 hari	60
Metode Staudenmayer	Kualitas relatif tinggi	GO	Beracun, mudah meledak	ClO_2	3 – 4 hari	0
Metode Hummers dan Offeman	Efisiensi waktu, kristal berkualitas baik	waktu, GO	NO_2 dan N_2O_4 yang beracun		< 24 jam	0, <20, dan ~98
Metode Tour	Kandungan tinggi gugus fungsional oksigen yang bersifat hidrofilik dalam GO, membutuhkan waktu lama		-		3 hari	20
Metode Hummer Modifikasi	Kandungan tinggi gugus fungsional oksigen yang		-		6-12 jam	Tidak diperlukan pemanasan

Metode	Karakteristik	Gas yang Dihasilkan	Waktu	Temperatur (°C)
	bersifat hidrofilik dalam GO, penggunaan H_2SO_4 sebagai pengganti $NaNO_3$, dapat diskalakan			ataupun pendinginan

2.2.2 *Reduced Graphene Oxide (rGO)*

Sifat reaktivitas kimia dan hidrofilitas yang tinggi pada *graphene oxide* menyebabkannya banyak digunakan sebagai material unggul dalam bidang industri dan medis. Namun, dalam aplikasi sensor, material elektroda, dan katalis dibutuhkan konduktivitas listrik yang baik sehingga diperlukan pemulihan jaringan pada *graphene oxide* (Gutiérrez-Cruz et al, 2022). *Reduced graphene oxide (rGO)* merupakan bentuk dari *graphene oxide* yang telah mengalami proses reduksi untuk memulihkan sebagian ikatan karbon sp^2 -nya (Nawaz et al, 2025).

Reduksi kimia merupakan metode umum yang digunakan untuk mereduksi *graphene oxide* menjadi *reduced graphene oxide* dengan memanfaatkan beberapa macam reduktan seperti hidrazin dan asam hidriodik. Pada proses ini gugus-gugus teroksigenasi yang ada pada permukaan *graphene oxide* dihilangkan, sehingga sebagian dari struktur sp^2 dapat dipulihkan meskipun terdapat *defect* pada kisi karbon sp^2 . Pemulihan parsial dan pengurangan gugus fungsional teroksigenisasi selama proses reduksi ini memberikan rGO sifat konduktivitas yang tinggi ($200\text{--}35100\text{ S m}^{-1}$). Selain itu, *optical band gap* pada rGO ($0,02 - 2\text{ eV}$) lebih kecil daripada GO ($1 - 3,5\text{ eV}$), sehingga sifat optik dan konduktivitasnya dapat disesuaikan dengan tingkat reduksi (Tamang et al, 2023). Melalui proses *chemical reduction*, gugus yang mengandung oksigen pada *reduced graphene oxide* lebih sedikit dibandingkan dengan *graphene oxide* seperti pada **Gambar 2.15** (Zhang et al, 2022).



Gambar 2.16 Struktur molekuler dari (a) GO dan (b) rGO (Zhang et al, 2022)

Defect yang terdapat pada rGO serta rasio gugus fungsi teroksigenasi dapat dikendalikan dan dimodifikasi melalui tingkat reaksi reduksi. Berbagai metode reduksi GO menjadi rGO beserta kelebihan dan kekurangannya disajikan pada **Tabel 2.7**.

Tabel 2.7 Metode reduksi dari GO menjadi rGO (Tamang et al, 2023)

Metode	Kelebihan	Kekurangan
<i>Thermal Reduction</i>	Cacat kristal lebih sedikit dan sederhana	Temperatur yang tinggi dan membutuhkan waktu yang lama
<i>Chemical Reduction</i>	Reduksi yang efektif pada temperatur ruang, ekonomis, dan dapat disesuaikan	Memerlukan penggunaan reagen beracun seperti hidrazin hidrat dan terdapat cacat yang terlihat jelas
<i>Green Synthesis</i>	Tidak berbahaya dan lebih sedikit cacat permukaan	Reduksi ringan dan melibatkan pencucian berulang kali
<i>Mechanical Exfoliation</i>	Produk berkualitas tinggi dengan sedikit cacat	Memakan banyak waktu dan tenaga, reproduktifitas rendah,
<i>Microwave-Assisted Reduction</i>	Waktu reduksi lebih singkat	Skala produksi tidak dapat diperluas, serta kurang cocok untuk pemantauan reaksi

Reduced graphene oxide menunjukkan sifat mekanik yang berbeda dari *graphene* dan *graphene oxide* meskipun cacat struktur yang terjadi pada *reduced graphene oxide* menyerupai *graphene*. Perbandingan sifat *graphene*, *graphene oxide*, dan *reduced graphene oxide* disajikan dalam **Tabel 2.8**.

Tabel 2.8 Sifat fisik dari *graphene*, GO, dan rGO (Tamang et al, 2023)

Sifat Fisik	<i>Graphene</i>	GO	rGO
Luas Permukaan	2630 m ² /g	2600 m ² /g	466 - 758 m ² /g
<i>Band Gap</i>	0	2 – 4 eV	Dapat disesuaikan (0,2 – 2 eV)
Konduktivitas Listrik	~ 6000 Sm ⁻¹	5,72 x 10 ⁻⁶ Sm ⁻¹	4,82x10 ² – 10 ⁶ Sm ⁻¹
Kelarutan	Hidrofobik	Hidrofilik	Hidrofobik/hidrofilik

2.3 Mangan

Mangan (Mn) merupakan salah satu dari logam transisi yang melimpah di kerak bumi (Hu et al, 2024). Kandungan rata-rata Mn yang berada di batuan kerak bumi sekitar 0,1 % (Guo et al, 2025). Mangan (Mn) berwarna putih keabu-abuan yang bersifat reaktif, sehingga mudah berikatan dengan ion yang berada pada air maupun udara. Mangan (Mn) tidak dapat dijumpai dalam bentuk logam bebas, namun keberadaannya dalam bumi berupa mineral dengan sifat fisik yang berbeda-beda (Awliahasanah et al, 2021).

Peningkatan konsentrasi mangan pada lingkungan terjadi akibat aktivitas penambangan global selama beberapa tahun terakhir (Hu et al, 2024). Kemampuannya dalam mengikat sulfur, mendeoksidasi, meningkatkan kekuatan, dan memperbaiki kinerja pada temperatur tinggi membuat logam Mn dimanfaatkan dalam pembuatan baja. Selain itu, pada paduan logam non-ferrous seperti paduan aluminium, logam mangan dimanfaatkan untuk meningkatkan ketahanan korosi dan kekuatan aluminium (Kishida et al, 2023). Dalam beberapa dekade terakhir, senyawa

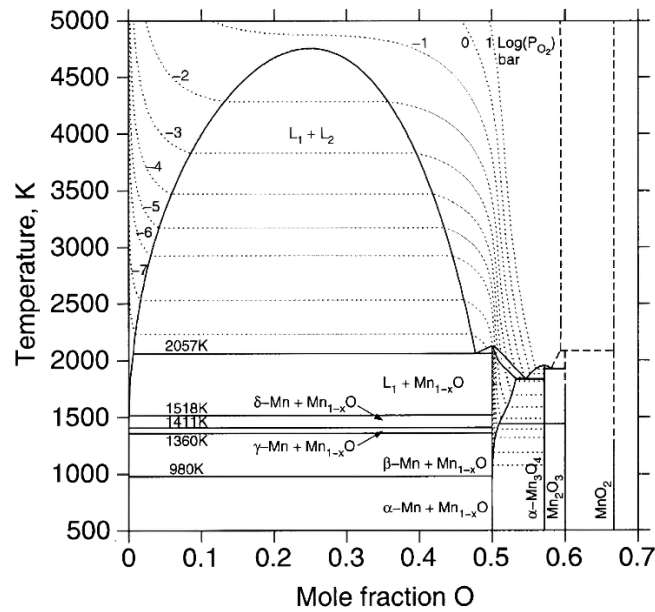
berbasis mangan telah dimanfaatkan dalam berbagai bidang termasuk, bidang magnetisme, kedokteran, katalisis, baterai, dan nanoteknologi. Hal ini disebabkan oleh rentang oksidasi dari logam mangan yang cukup luas yaitu mulai dari -3 sampai dengan +7 (Shieh & Li, 2024).

2.3.1 Mangan Oksida

Mangan oksida sering dijumpai di dasar laut, sedimen, tanah, batuan, serta perairan tawar. Mangan oksida yang berada di dasar laut biasanya menyerap ion logam seperti, Cu^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , dan MoO_4^{2-} . Mangan oksida yang berada di dalam tanah dapat mencegah terjadinya transformasi dan migrasi logam berat Cd^{2+} dan Ti^{+} (Shi et al, 2025). Mangan oksida pada tanah dan sedimen memiliki potensial redoks standar (E_H^0) sebesar 0,464 V yang menunjukkan bahwa mangan oksida dapat mengoksidasi berbagai kontaminan organik secara langsung serta merupakan salah satu oksidan alami terkuat yang ditemukan di lingkungan tanah dan sedimen (Liao et al, 2025).

Mangan oksida memiliki beberapa tingkat oksidasi dan bentuk kristal termasuk MnO_2 , Mn_2O_3 , dan Mn_3O_4 (Wang et al, 2024). Struktur kristal yang unik, keadaan oksidasi yang bervariasi, serta ketersediaannya yang melimpah menjadikan mangan oksida dipelajari secara luas dalam bidang penyimpanan energi. Selain itu, elektroda yang terbuat dari material mangan oksida memiliki kinerja yang stabil dalam larutan netral berbasis air, sehingga mangan oksida cocok digunakan dalam aplikasi berskala besar (Liu et al, 2024). Material mangan oksida dapat dimanfaatkan dalam beberapa macam aplikasi seperti, penyimpanan energi dan transformasi, katalis reaksi, dan penyerapan molekuler berdasarkan berbagai sifat fisik dan elektrokimianya (Karbak et al, 2024).

Mangan oksida memiliki kinetika yang lambat pada tahap oksidasi. Hal tersebut mempengaruhi efisiensi reversibilitas siklus mangan oksida, namun tetap mampu mencapai *energy density* secara gravimetrik sebesar 110 hingga 160 kJ/kg. (Mwatukange et al, 2024). Pada **Gambar 2.16**, diagram fasa Mn-O menggambarkan hubungan antara fase-fase oksida mangan (Mn) pada berbagai temperatur dan tekanan parsial oksigen. Diagram ini menunjukkan bagaimana perubahan temperatur dan kandungan oksigen mempengaruhi stabilitas masing-masing fase. Beberapa macam struktur dari mangan oksida ditunjukkan pada **Tabel 2.9** berikut (Grundy et al, 2003).



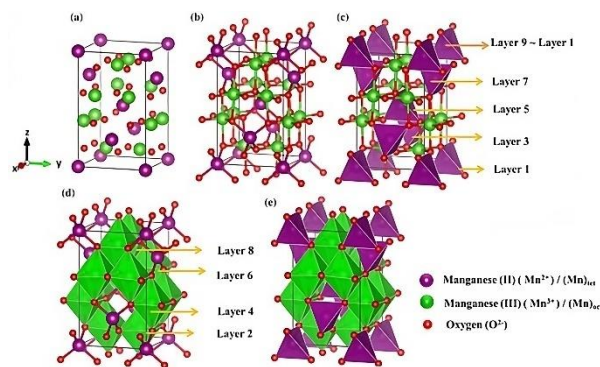
Gambar 2.17 Diagram Fasa Mn-O (Grundy et al, 2003)

Tabel 2.9 Struktur Kristas dari Fasa Stabil pada Sistem Mn-O (Grundy et al, 2003)

Nama	Komposisi	Space Group	Struktur
<i>Pyrolusite</i>	MnO ₂	$P4_2/mnm$	<i>Rutile</i>
<i>β-Bixbyite</i>	β-Mn ₂ O ₃	$Ia\bar{3}$	<i>Bixbyite</i>
<i>α-Hausmannite</i>	α-Mn ₃ O ₄	$I4_1/amd$	Spinel dengan Jahn-Teller
<i>β-Hausmannite</i>	β-Mn ₃ O ₄	$Fd\bar{3}m$	Spinel
<i>Manganosite</i>	Mn _{1-x} O	$Fm\bar{3}m$	<i>Halite</i>
α-Mn	Mn	$I43m$	α-Mn
β-Mn	Mn	$P4_132$	β-Mn
γ-Mn	Mn	$Fm\bar{3}m$	Cu
δ-Mn	Mn	$Im\bar{3}m$	W

2.3.2 Mn₃O₄ (Trimangan Tetraoksida)

Mn₃O₄ merupakan salah satu fase stabil mangan oksida dengan sifat elektrokimia yang mirip dengan MnO₂ (Beknalkar et al, 2022). *Unit cell* struktur spinel dari Mn₃O₄ terdiri atas 32 atom oksigen serta 24 kation, termasuk Mn divalent dan trivalent seperti yang terdapat pada **Gambar 2.17** (Sukhdev et al, 2020).



Gambar 2.18 Unit cell dalam struktur Mn_3O_4 (a) konfigurasi atom oksigen (Mn)tet dan (Mn)okt dalam unit cell, (b) koordinasi oksigen dengan aton (Mn)tet dan (Mn)okt, (c) Pada sel satuan, tetrahedra terbentuk, (d) Tiap oktahedron merupakan sel terpisah, (e) oktahedral (Sukhdev et al, 2020).

Dikarenakan struktur spinelnya, Mn_3O_4 memiliki dua tingkatan oksidasi yaitu Mn^{2+} dan Mn^{3+} . Ion Mn^{2+} menempati situs tetrahedral dan ion Mn^{3+} menempati situs oktahedral dalam struktur kristalnya (Shunmugapriya & Vijayakumar, 2022). Mn_3O_4 bersifat ramah lingkungan dibandingkan dengan oksida logam lainnya, *low cost*, serta ketersediaannya melimpah. Mn_3O_4 menunjukkan sifat redoks yang sangat baik dalam elektrolit *aqueous* dan memiliki kapasitansi teoritis yang tinggi (1400 F/g). Karakteristik tersebut menjadikan Mn_3O_4 sebagai material elektroda positif yang ideal untuk aplikasi superkapasitor asimetris (Wang et al, 2022).

Mn_3O_4 memiliki kinerja elektrokimia tinggi (1,0 V) yang penggunaannya dipadukan dengan elektrolit ramah lingkungan (Lankamsetty et al, 2025). Namun, konduktivitas listrik yang rendah ($\sim 10^{-6} \text{ S m}^{-1}$) pada Mn_3O_4 membatasi penggunaannya dalam berbagai aplikasi potensial. Upaya yang dilakukan untuk meningkatkan konduktivitas listriknya yaitu dengan menambahkan aditif konduktif, seperti senyawa berbasis karbon, termasuk *activated carbon* (AC), CNTs, *graphene*, dan *reduced graphene oxide* (rGO) yang menawarkan porositas dan luas permukaan tinggi, sehingga meningkatkan potensi penggunaannya sebagai elektroda superkapasitor (Madhuri et al, 2022).

Komposisi kimia serta metode sintesis berperan penting dalam menentukan morfologi dan ukuran partikel Mn_3O_4 , yang berpengaruh terhadap luas permukaan dan aktivitas reaksi. Metode sintesis yang biasa digunakan dalam fabrikasi Mn_3O_4 yaitu, metode *hydrothermal*, *solvothermal*, *reflux*, presipitasi, *surfactant free* Mn_3O_4 , *ionic liquid assisted* Mn_3O_4 , *sonochemical*, *solustion combustion*, *solid state*, *green synthesis*, dan metode lainnya (Sukhdev et al, 2020). Pada **Tabel 2.10** disajikan sifat elektrokimia dari elektroda Mn_3O_4 yang diperoleh melalui berbagai metode sintesis (Cuéllar-Herrera et al, 2023).

Tabel 2.10 Sifat Elektrokimia Elektroda Mn_3O_4 melalui berbagai metode sintesis (Cuéllar-Herrera et al, 2023)

Karakteristik Mn_3O_4	Metode	Elektrolit	Kapasitansi Spesifik (F/g)	Stabilitas Siklus
Serbuk	<i>Hydrothermal</i>	2 M KCl	148	400
Serbuk	<i>Hydrothermal</i>	1 M Na_2SO_4	170	1500

Karakteristik Mn ₃ O ₄	Metode	Elektrolit	Kapasitansi Spesifik (F/g)	Stabilitas Siklus
Serbuk	Presipitasi	1 M Na ₂ SO ₄	247	2000
Film	Iradiasi	6 M KOH	296	1000
	Ultrasonik			
Film	Co-presipitasi	2 M KOH	202	-
Film	Sol-gel	2 M KOH	285	-
Film	Elektrospinning	2 M KOH	150	-
Serbuk	Mekanosintesis serbuk	6 M KOH	485	5000

2.4 Hydrothermal

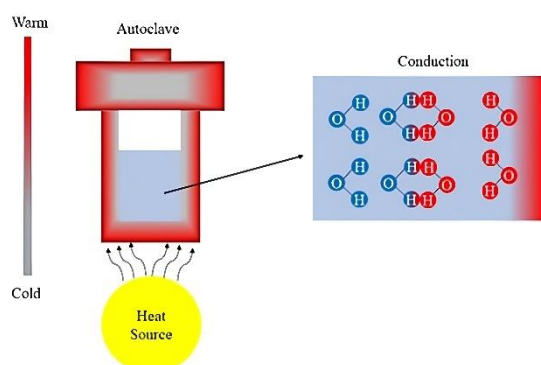
Istilah “hidrotermal” pertama kali digunakan pada abad ke-19 oleh para ahli geologi untuk merujuk pada interaksi air dengan temperatur dan tekanan tinggi dalam proses pembentukan mineral serta batuan yang berada pada kerak bumi. Penelitian awal mengenai sintesis hidrotermal dilakukan oleh ahli kimia Jerman bernama Robert Bunsen pada tahun 1839, yang melaporkan keberhasilannya dalam menghasilkan barium dan strontium karbonat pada temperatur di atas 200°C serta tekanan lebih dari 100 bar (Peixoto et al, 2023).

Seiring dengan perkembangan teknologi, sintesis hidrotermal turut mengalami kemajuan pesat, terutama dengan hadirnya *autoclave* dan material baru sebagai pelapis reaktor bertekanan tinggi. Hal ini memungkinkan metode hidrotermal dapat digunakan dalam sintesis berbagai jenis material, khususnya material berskala nano (Peixoto et al, 2023). Sintesis hidrotermal banyak dimanfaatkan dalam pembuatan berbagai nanostruktur oksida logam. Metode ini dikenal sebagai salah satu metode yang paling sederhana dan mudah diterapkan. Selain itu, metode ini tidak memerlukan peralatan khusus maupun kondisi persiapan yang kompleks (Nandagudi et al, 2022).

Metode hidrotermal merupakan teknik sintesis yang sederhana dan ekonomis, tetapi mampu menghasilkan nanostruktur dengan kualitas tinggi. Pada proses ini, berbagai parameter eksperimen, seperti temperatur reaksi, waktu reaksi, dan waktu anil berpengaruh terhadap pertumbuhan nanostruktur. Selain itu, sifat dari *aqueous solution*, termasuk konsentrasi asam atau basa memiliki peran krusial dalam menentukan morfologi struktur serta tingkat kristalinitas material yang akan dihasilkan (More et al, 2024). Metode hidrotermal dikategorikan sebagai salah satu metode kimia fase cair. Pada kondisi temperatur dan tekanan tinggi, proses ini berlangsung dalam bejana tertutup dimana air deionisasi berperan sebagai pelarut. Jika menggunakan pelarut selain air, metode ini dikenal sebagai *solvothermal* (Li et al, 2021).

Prekursor berupa garam logam atau kompleks logam dilarutkan dalam air (*hydrothermal*) atau dalam pelarut non-air (*solvothermal*), kemudian dimasukkan ke dalam *autoclave* dan dipanaskan pada temperatur serta tekanan tinggi (Nandagudi et al, 2022). Sintesis *hydrothermal* menggunakan reaktor baja tahan karat yang dilengkapi dengan bejana internal dari *polytetrafluoroethylene* (teflon). Teflon memiliki ketahanan terhadap temperatur tinggi, korosi, serta retak akibat tegangan. Selain itu, teflon tidak bereaksi dengan bahan kimia yang digunakan

sebagai prekursor dalam sintesis hidrotermal. Pemanasan sistem pada metode hidrotermal dapat dilihat pada **Gambar 2.18** (Peixoto et al, 2023).



Gambar 2.19 Pemanasan Hidrotermat (Peixoto et al, 2023)

Pemanasan sistem dilakukan menggunakan sumber panas eksternal, seperti pemanas listrik atau penangas minyak. Proses ini berlangsung melalui konduksi termal, dimana bagian larutan yang bersentuhan langsung dengan dinding reaktor akan mengalami pemanasan terlebih dahulu, sehingga terbentuk gradien termal. Panas ditransfer dari permukaan material menuju bagian dalam material (Peixoto et al, 2023). Proses sintesis berlangsung selama 6-48 jam, sehingga memungkinkan terjadinya pembubaran, nukleasi, dan kristalisasi pada material yang sulit atau bahkan tidak larut dalam kondisi normal. Temperatur menjadi faktor penting dalam metode hidrotermal, dimana reaksi umumnya dilakukan pada temperatur 180°C selama 24 jam. Namun, temperatur yang digunakan dapat bervariasi tergantung pada jenis material, rasio berat, serta faktor lainnya (Nandagudi et al, 2022).

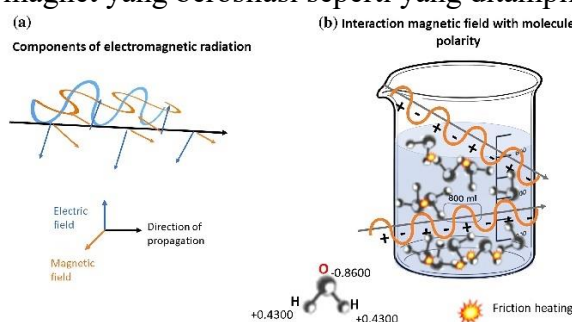
Seiring dengan kenaikan temperatur, viskositas dan tegangan permukaan air berkurang. Hal ini menyebabkan peningkatan pergerakan molekul dan ion dalam larutan, sehingga mendukung percepatan pertumbuhan kristal suatu material. Selain itu, kenaikan tekanan uap dalam sistem akan mempercepat reaksi, sehingga peluang terjadinya tumbukan antar molekul meningkat (Peixoto et al, 2023). Setelah reaksi selesai, peralatan harus didinginkan pada temperatur ruang. Hal ini penting untuk mencegah risiko terjadinya ledakan (Nandagudi et al, 2022).

Sintesis hidrotermal memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan metode sintesis lainnya yaitu, memiliki kemampuan menyintesis material yang tidak stabil pada temperatur mendekati titik leburnya. Selain itu, metode ini memungkinkan terbentuknya kristal berukuran besar dengan kualitas tinggi, menghasilkan partikel dengan ukuran yang dapat dikontrol, serta memastikan penggumpalan yang terkendali, dan tingkat kemurnian yang tinggi. Namun, metode hidrotermal juga memiliki beberapa kelemahan, seperti kebutuhan akan peralatan dengan spesifikasi tinggi, waktu reaksi yang panjang, konsumsi energi yang besar, serta keterbatasan dalam pengendalian reaksi. Selain itu, gradien termal yang terbentuk selama proses pemanasan mempersulit pertumbuhan partikel yang homogen (Peixoto et al, 2023).

2.5 Microwave Assisted Hydrothermal

Penelitian mengenai kinerja *microwave* dimulai sejak tahun 1930-an, dengan penerapan yang terbatas pada radio. Pada 1960-an, para ilmuwan menemukan efek termodinamika dari *microwave*, yang mendorong penerapan *microwave* pada bidang lainnya. Memasuki awal 1990-an, Dr. Komarneni dari Universitas Pennsylvania menjadi pelopor dalam membandingkan sintesis *hydrothermal* konvensional dengan sintesis *hydrothermal* berbasis *microwave* (Yang et al, 2019). Metode *microwave assisted hydrothermal* bekerja berdasarkan prinsip *hydrothermal*, namun berbeda dengan sintesis *hydrothermal* konvensional. *Microwave assisted hydrothermal* menggunakan gelombang mikro untuk pemanasan, sedangkan dalam sintesis *hydrothermal* konvensional yang digunakan berupa konduksi tunggal (Shahid et al, 2022).

Gelombang mikro adalah salah satu jenis gelombang elektromagnetik yang terdiri dari medan listrik dan medan magnet yang berosilasi seperti yang ditampilkan pada **Gambar 2.19**



Gambar 2.20 (a) Komponen radiasi elektromagnetik gelombang mikro dan (b) interaksi medan listrik gelombang mikro dengan polaritas molekul (Becerra et al, 2022)

Radiasi elektromagnetik memiliki rentang frekuensi antara 0,3 – 300 GHz dengan panjang gelombang antara 1 mm – 100 m. Frekuensi yang paling sering digunakan untuk pemanasan yaitu 2,45 GHz (Becerra et al, 2022).

Pemanasan pada *microwave assisted hydrothermal* terjadi ketika gelombang mikro dipaparkan pada reaktan dielektrik atau pelarut untuk reaksi kimia (Yin et al, 2022). Pemanasan dielektrik terjadi ketika material mampu menyerap energi gelombang mikro dan mengonversinya menjadi panas (Becerra et al, 2022). Energi pemanasan berasal dari dalam sistem reaksi, sehingga tidak memerlukan media pemindah panas maupun bergantung pada konveksi. Sistem memanaskan larutan reaktan secara menyeluruh dan merata, menciptakan lingkungan yang homogen yang ideal untuk proses nukleasi dan pertumbuhan kristal (Li et al, 2021). Meskipun sampel memiliki kedalaman tertentu, *microwave* tetap dapat menembusnya dan memanaskan setiap lapisan secara bersamaan. Hal ini mengeliminasi kebutuhan akan konduksi panas, mencegah perbedaan temperatur, dan secara signifikan mempercepat laju reaksi (Yang et al, 2019).

Pada metode *microwave assisted hydrothermal*, reaksi terjadi di dalam teflon. Teflon memungkinkan *microwave* tidak kehilangan energi ketika melewatinya. Teflon bersifat inert, sehingga dapat mencegah terjadinya reaksi yang tidak diinginkan. Selain itu, teflon memiliki ketahanan korosi yang baik, ketahanan terhadap temperatur tinggi, dan kinerja transmisi *microwave* (Li et al, 2021). Tungku komersial yang biasa digunakan untuk metode sintesis *microwave assisted hydrothermal* ditunjukkan oleh **Gambar 2.20**.



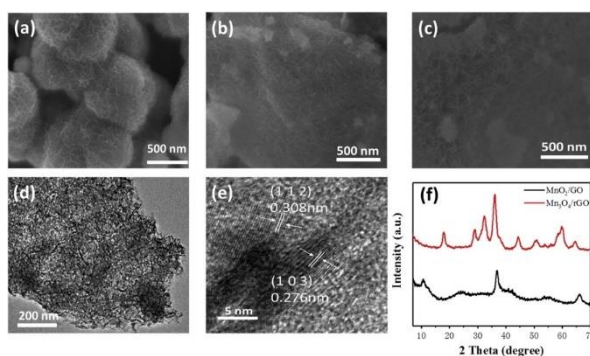
Gambar 2.21 Tungku Milestone Ethos One komersial untuk sintesis microwave assisted hydrothermal (Ortiz Méndes et al, 2016)

Daya dan waktu merupakan parameter utama yang harus diperhatikan pada *microwave* untuk mencapai temperatur dan durasi reaksi yang diinginkan dalam bejana reaksi hidrotermal. Temperatur dan tekanan yang dihasilkan akibat penyinaran gelombang mikro tidak dapat diperkirakan hanya berdasarkan pada daya dan waktu paparan. Oleh karena itu, perlu adanya teknologi sintesis canggih untuk mengontrol tekanan dan temperatur selama reaksi berlangsung (Ortiz Méndes et al, 2016). Daya dan waktu radiasi *microwave* mempengaruhi struktur kristal dari material yang disintesis, termasuk ukuran butir dan morfologi kristal (Li et al, 2021).

Dibandingkan dengan metode hidrotermal konvensional, *microwave assisted hydrothermal* memiliki keunggulan seperti reaksi yang lebih cepat, kontrol lebih baik terhadap ukuran partikel, tingkat kemurnian tinggi, kristalinitas yang baik, penggumpalan yang lebih sedikit, serta pemanasan yang lebih merata (Li et al, 2021). Selain itu, metode ini dianggap lebih ramah lingkungan karena mengonsumsi energi yang lebih sedikit (Becerra et al, 2022).

2.6 Penelitian Terdahulu

Penelitian terkait komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ dengan berbagai metode telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Penelitian yang dilakukan oleh Huang, dkk pada tahun 2020 menggunakan metode *chemical precipitation*. Morfologi sampel Mn_3O_4 , MnO_2/GO , dan $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ dianalisis berdasarkan pada **Gambar 2.21** (a-d).



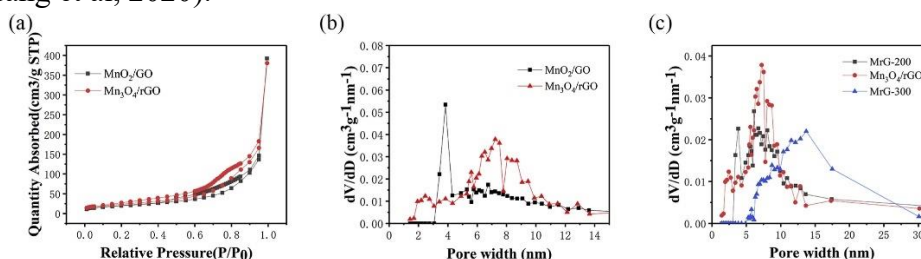
Gambar 2.22 (a-c) Gambar SEM dari sampel Mn_3O_4 , MnO_2/rGO , dan $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$, (d-e) Gambar TEM dan HRTEM dari sampel $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$, (f) XRD dari sampel MnO_2/rGO dan $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ (Huang et al, 2020)

Pada **Gambar 2.21** (a-d), semua sampel memiliki struktur berupa serpihan nano. Pada sampel Mn_3O_4 , partikel-partikel primer mengalami aglomerasi sehingga membentuk partikel yang lebih besar. Pada komposit MnO_2/GO , partikel MnO_2 primer terdistribusi merata di

permukaan GO. *Annealing* pada atmosfer Ar/H₂ tidak berpengaruh secara signifikan terhadap morfologi komposit. Serpihan nano spinel Mn₃O₄ yang tidak beraturan mengandung struktur berpori yang mampu mengekspos banyak situs aktif ke ion elektrolit, sehingga meningkatkan reaksi elektrokimia. Penggabungan serpihan nano Mn₃O₄ dengan grafena dapat memberikan permukaan luas untuk pertumbuhan oksida mangan dan dapat mencegah terjadinya aglomerasi oksida mangan serta menghindari penumpukan lembaran grafena (Huang et al, 2020).

Pada **Gambar 2.21** (e), HRTEM komposit Mn₃O₄/rGO memiliki pinggiran kisi dengan jarak *d* sebesar 0,49 nm, 0,31 nm, dan 0,28 nm yang sesuai dengan bidang (101), (112), dan (103) dari Mn₃O₄. Pola XRD untuk MnO₂/GO dan Mn₃O₄/rGO ditunjukkan oleh **Gambar 2.21** (f). Puncak karakteristik δ - MnO₂ (JCPDS 18-0802) pada $2\theta = 36,81^\circ$ (100) dan $65,70^\circ$ (110). Setelah pemanasan, muncul difraksi baru yang khas untuk Mn₃O₄ (JCPDS 24-07034) pada $18,02^\circ$; $28,97^\circ$; $32,41^\circ$; $36,04^\circ$; $44,37^\circ$; $60,02^\circ$; dan $64,67^\circ$. Munculnya puncak difraksi Mn₃O₄ dan hilangnya puncak difraksi MnO₂ menunjukkan bahwa pemanasan pada atmosfer Ar/H₂ dapat mereduksi MnO₂ menjadi Mn₃O₄ secara menyeluruh. Puncak difraksi GO pada $11,20^\circ$ yang terlihat pada pola XRD MnO₂/GO juga menghilang karena reduksi menjadi rGO (Huang et al, 2020).

Isoterm adsorpsi-desorpsi N₂ untuk MnO₂/GO dan Mn₃O₄/rGO dapat dilihat pada **Gambar 2.22** (a). Berdasarkan analisis BET, luas permukaan spesifik MnO₂/GO dan Mn₃O₄/rGO masing-masing mencapai 73,30 m²/g dan 84,79 m²/g yang menunjukkan bahwa pembentukan pori terkontrol berkontribusi pada peningkatan luas permukaan spesifik. Pada **Gambar 2.22** (b), ukuran pori dalam komposit Mn₃O₄/rGO mengalami perubahan setelah proses *annealing*. Rata-rata ukuran pori MnO₂/GO sebesar 3,87 nm dan Mn₃O₄/rGO sebesar 5-10 nm (Huang et al, 2020).

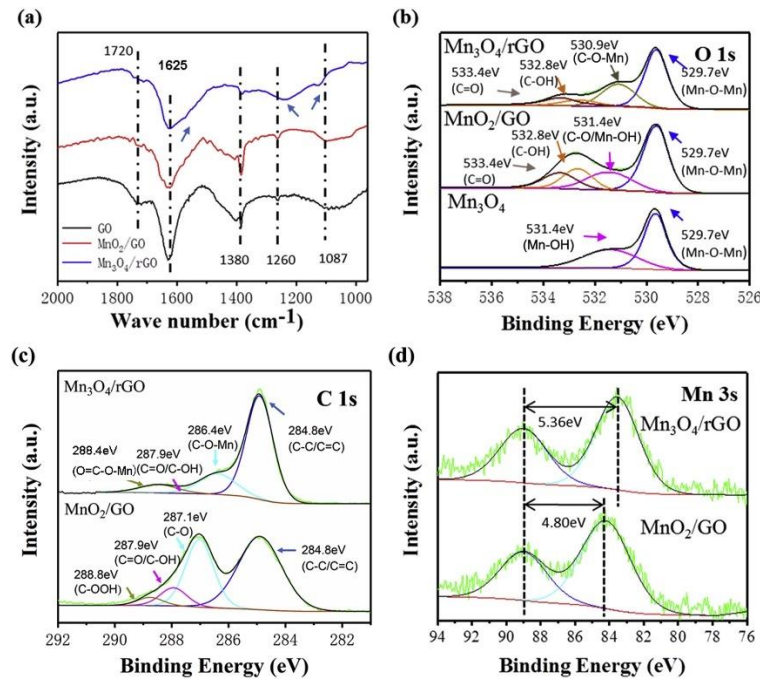


Gambar 2.23 (a) Isoterm adsorpsi-desorpsi N₂ dan kurva distribusi pori dari: (b) sampel Mn₃O₄, MnO₂/rGO, dan Mn₃O₄/rGO, (c) sampel Mn₃O₄/rGO pada temperatur *annealing* yang berbeda (Zhang et al, 2022)

Perubahan ukuran pori berkaitan dengan transisi fasa serta restrukturisasi kisi. Setelah proses *annealing*, transisi dari MnO₂ menjadi Mn₃O₄ dengan struktur spinel menyebabkan perubahan ukuran pori. Selain itu, pembentukan ulang kisi menjadi tajam dengan peningkatan temperatur. Dengan demikian, ukuran pori pada Mn₃O₄ dapat dikendalikan melalui penyesuaian temperatur *annealing*. Pada **Gambar 2.22** (c) merupakan hubungan antara ukuran pori dan temperatur *annealing*. Ukuran pori yang dianil pada 200°C, 250°C, dan 300°C masing-masing berada pada rentang 3,9 – 10 nm; 5 – 10 nm; dan 5 – 15 nm (Huang et al, 2020).

Pada **Gambar 2.23**, spektrum FTIR GO menunjukkan adanya gugus C – O (1087 cm⁻¹), C – OH (1260 cm⁻¹), COOH (1380 cm⁻¹), C – C atau C=C (1625 cm⁻¹), dan C=O (1720 cm⁻¹),

yang juga terdapat pada MnO_2/GO . $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ menunjukkan penurunan intensitas $\text{C}=\text{O}$, yang mengindikasikan reduksi GO. Selain itu, pergeseran puncak $\text{C}-\text{O}$ (1087 cm^{-1} menjadi 1121 cm^{-1}) dan $\text{C}-\text{OH}$ (1260 cm^{-1} menjadi 1237 cm^{-1}) setelah *annealing* menunjukkan terbentuknya ikatan $\text{C}-\text{O}-\text{Mn}$, yang dikonfirmasi oleh keberadaan bahu kecil pada 1580 cm^{-1} dan berkurangnya puncak COOH (Huang et al, 2020).



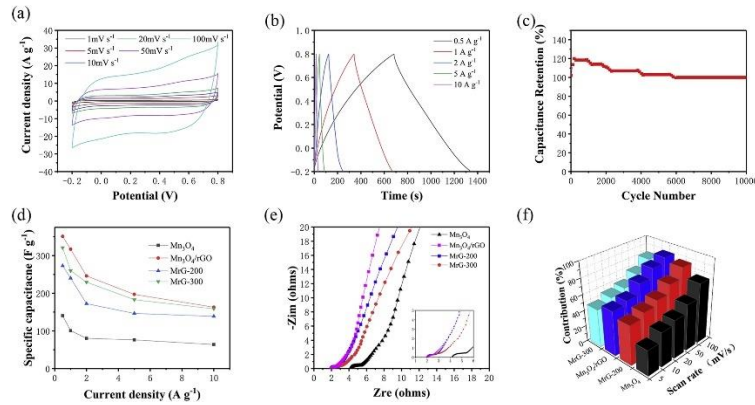
Gambar 2.24 (a) Spektrum FTIR dari GO, MnO_2/rGO , dan $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$. O 1s dari spektrum XPS dari (b) sampel Mn_3O_4 , MnO_2/rGO , dan $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$. Spektrum XPS dari komposit MnO_2/GO dan $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$: (c) C 1s dan (d) Mn 3s (Huang et al, 2020)

Analisis XPS pada **Gambar 2.23** (b) menunjukkan bahwa spektrum O 1s dalam Mn_3O_4 memiliki dua puncak pada 529,7 eV dan 531,4 eV yang terkait dengan $\text{Mn}-\text{O}-\text{Mn}$ dan $\text{Mn}-\text{O}-\text{H}$. Dalam MnO_2/GO , tambahan puncak pada 532,8 eV dan 533,4 eV menunjukkan keberadaan $\text{C}-\text{O}-\text{H}$ dan $\text{C}-\text{O}-\text{C}$. Setelah *annealing* dalam Ar/H_2 , puncak $\text{Mn}-\text{O}-\text{H}$ bergeser ke 530,9 eV, menandakan pembentukan ulang ikatan dan pembentukan $\text{C}-\text{O}-\text{Mn}$, serta mengonfirmasi reduksi GO melalui penurunan intensitas $\text{C}-\text{O}-\text{H}$ dan $\text{C}-\text{O}-\text{C}$. Pada **Gambar 2.23** (c), spektrum C 1s dari MnO_2/GO menunjukkan empat puncak utama yang sesuai dengan $\text{C}-\text{C}$, $\text{C}-\text{O}$, $\text{C}=\text{O}$ atau $\text{C}-\text{OH}$, dan COOH . Setelah *annealing*, puncak $\text{C}-\text{O}$ dan COOH dalam $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ bergeser ke energi yang lebih rendah, menunjukkan terbentuknya $(\text{O}=\text{C})-\text{O}-\text{Mn}$ dan mengonfirmasi reduksi GO (Huang et al, 2020).

Gambar 2.23 (d), pemisahan energi Mn 3s (ΔE) menunjukkan nilai 4,80 eV untuk MnO_2/GO dan 5,36 eV untuk $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ yang mengindikasikan bahwa material sebelum dan sesudah *annealing* adalah MnO_2 dan Mn_3O_4 . Hal ini menegaskan bahwa *annealing* dalam Ar/H_2 berhasil mereduksi MnO_2 menjadi Mn_3O_4 sekaligus meningkatkan konduktivitas dan stabilitas komposit.

Pengujian CV dan GCD dilakukan dalam elektrolit Na_2SO_4 1M untuk mengetahui sifat kapasitif elektroda $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$. **Gambar 2.24** (a) menunjukkan kurva CV yang tetap simetris

dan berbentuk kuasi-persegi panjang pada berbagai *scan rate*. Hal ini menandakan kinerja *pseudocapacitive* yang baik. Kurva GCD pada **Gambar 2.24** (b) berbentuk linier dan simetris dengan tetapan IR kecil, menunjukkan karakteristik *pseudocapacitive* yang stabil serta reversibilitas elektrokimia yang tinggi (Huang et al, 2020).



Gambar 2.25 (a) Kurva CV pada berbagai *scan rate*, (b) Kurva GCD pada kerapatan arus 0,5 – 10 A/g, dan (c) Kinerja siklus pada 5 A/g $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$. (d) Nilai kapasitansi spesifik yang diukur pada berbagai kerapatan arus, (e) Plot Nyquist dari spektrum EIS, dan (f) Kontribusi kapasitif yang dikontrol pada *scan rate* Mn_3O_4 , $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$, MrG-200, dan MrG-300 (Zhang et al, 2022)

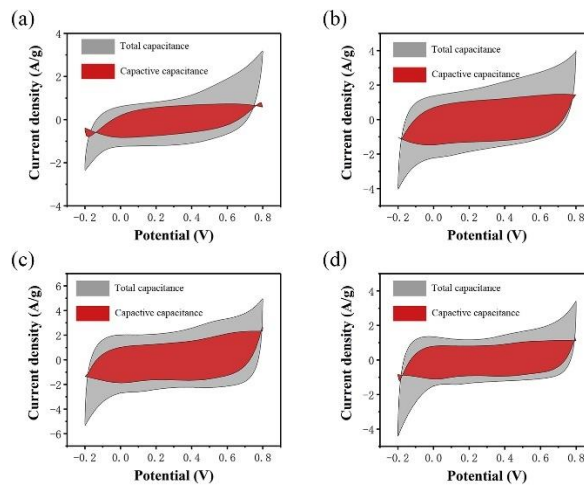
Pada **Gambar 2.24** (c) uji siklus pada 5 A/g menunjukkan peningkatan kapasitansi hampir 20% dalam 100 siklus pertama, lalu sedikit menurun, dengan retensi kapasitansi mencapai 80,1% setelah 10.000 siklus. Stabilitas ini dikaitkan dengan pembentukan ikatan $(\text{O}=\text{C})-\text{O}-\text{Mn}$, yang memperkuat struktur elektroda. Uji GCD pada berbagai temperatur *annealing* menunjukkan bahwa elektroda $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ yang dianil pada 250°C memiliki kapasitansi spesifik tertinggi (351 F/g pada 0,5 A/g). Pada **Gambar 2.24** (d), ukuran pori 5 – 10 nm terbukti lebih optimal untuk difusi ion elektrolit dibandingkan ukuran 3,9 – 10 nm atau 5 – 15 nm. Namun, pada kerapatan arus yang tinggi, pengaruh ukuran pori terhadap peningkatan kapasitansi menjadi lebih terbatas (Huang et al, 2020).

Spektrum EIS pada **Gambar 2.24** (e) menunjukkan bahwa elektroda $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ memiliki resistensi internal (R_s) sebesar $1,78 \Omega$, lebih rendah dibandingkan Mn_3O_4 ($4,64 \Omega$), MrG-200 ($1,98 \Omega$), dan MrG-300 ($1,92 \Omega$). Hal ini menunjukkan bahwa konduktivitas pada Mn_3O_4 dapat ditingkatkan dengan adanya ikatan grafena dan $(\text{O}=\text{C})-\text{O}-\text{Mn}$. Tabel 2.8 menunjukkan $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ memiliki nilai resistansi transfer muatan (R_{ct}) terendah. R_{ct} yang rendah menunjukkan bahwa *graphene* dan ukuran pori sedang dapat meningkatkan konduktivitas serta mempercepat difusi ion dan transfer muatan. Analisis kurva CV dengan metode Dunn pada **Gambar 2.24** (f) menunjukkan bahwa pada *scan rate* tinggi, mekanisme penyimpanan didominasi oleh kapasitansi spesifik, yang berkontribusi pada peningkatan kinerja elektroda $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ dalam penyimpanan energi (Huang et al, 2020).

Tabel 2.11 Nilai resistensi dari sampel (Huang et al, 2020)

Sampel	Mn ₃ O ₄	Mn ₃ O ₄ /rGO	MrG-200	MrG-300
R _s (Ω)	4,64	1,78	1,98	1,92
R _{ct} (Ω)	0,82	0,32	0,42	0,59

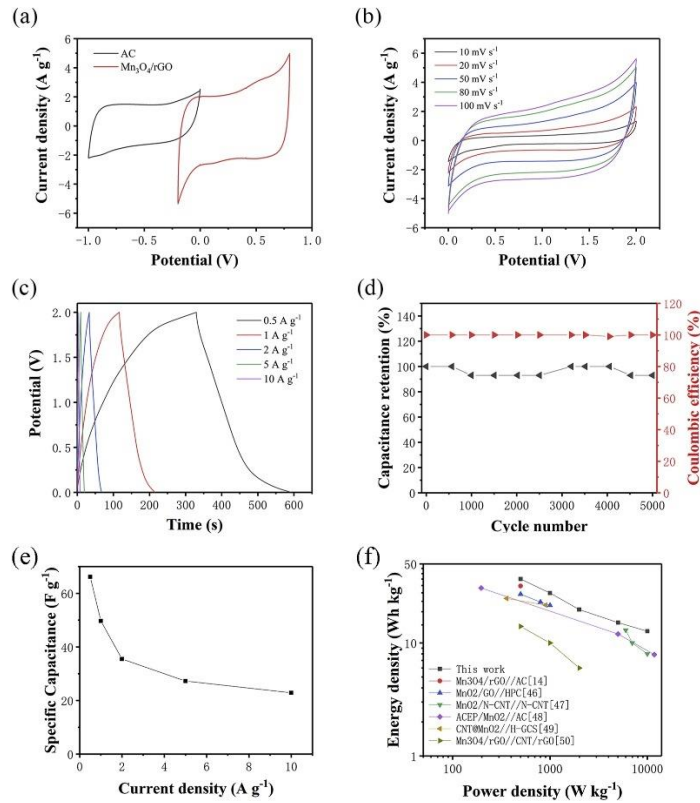
Gambar 2.25 menunjukkan rasio kapasitansi yang dikontrol kapasitif untuk Mn₃O₄, Mn₃O₄/rGO, MrG-200, dan MrG-300 pada 10 mV/s masing-masing adalah 43%, 60%, 56%, dan 55%. Mn₃O₄/rGO memiliki rasio tertinggi, menunjukkan bahwa ikatan (O=)C – O – Mn dan ukuran pori sedang berkontribusi pada peningkatan kapasitansi kapasitif (Huang et al, 2020).



Gambar 2.26 *Voltammetric responses* dari elektroda (a) Mn₃O₄, (b) MrG-200, (c) Mn₃O₄/rGO, dan (d) MrG-300 pada 10 mV/s (Huang et al, 2020)

Berdasarkan analisis sebelumnya, kombinasi *nanoflake* Mn₃O₄/rGO, ukuran pori sedang, dan ikatan (O=)C – O – Mn berperan dalam meningkatkan kinerja elektrokimia. *nanoflake* Mn₃O₄ menyediakan banyak situs aktif bagi ion elektrolit. Ukuran pori menciptakan jalur difusi optimal, mempercepat reaksi elektrokimia, dan mengurangi resistensi antarmuka. Pertumbuhan Mn₃O₄ pada *graphene* dapat mencegah aglomerasi oksida mangan dan penumpukan ulang *graphene*, dan meningkatkan luas permukaan spesifik. Ikatan (O=)C – O – Mn setelah proses *annealing* memungkinkan transfer elektron dari oksida mangan ke *graphene*, yang dapat meningkatkan konduktivitas serta stabilitas struktur elektroda (Huang et al, 2020).

Untuk mengevaluasi lebih lanjut terkait aplikasi praktis elektroda Mn₃O₄/rGO sebagai perangkat superkapasitor asimetris (ASC), Mn₃O₄/rGO dirakit sebagai elektroda positif dan AC (*activated carbon*) sebagai elektroda negatif. Uji elektrokimia elektroda AC dilakukan dalam sistem 3 elektroda dengan *potential window* -1 – 0 V. **Gambar 2.26** (a) menunjukkan kurva CV dari Mn₃O₄/rGO dan AC pada 10 mV/s dengan *potential window* masing-masing -1 – 0 v dan -0,2 – 0,8 V yang menunjukkan bahwa ASC memiliki *voltage window* sekitar 1,8 V. Untuk meningkatkan densitas energi, *voltage window* diperluas hingga 2 V, dan pengukuran elektrokimia dilakukan pada rentang 0 – 2 V (Huang et al, 2020).



Gambar 2.27 (a) kurva CV dan (b) kurva GCD dari hibrida Mn₃O₄/rGO dengan komposisi rGO yang berbeda pada *scan rate* 30 mV s⁻¹ dan *current density* 2 A g⁻¹, (c) Kurva CV dan (d) kurva GCD dari Mn₃O₄/rGO-20 pada *scan rate* berbeda (5 – 100 mV s⁻¹) dan *current density* berbeda (1 – 20 A g⁻¹) (Zhang et al, 2022)

Pada **Gambar 2.26** (b), kurva CV pada berbagai *scan rate* tetap simetris dan berbentuk kuasi-persegi panjang. Pada **Gambar 2.26** (c), kurva GCD mempertahankan bentuk linier dan simetris. **Gambar 2.26** (d) menunjukkan bahwa selama 5000 siklus, Mn₃O₄/rGO//AC ASC mempertahankan efisiensi *coulombik* mendekati 100%, dengan retensi kapasitansi 93%. Hasil ini mengonfirmasi bahwa *voltage window* ASC dapat diperluas hingga 2 V tanpa kehilangan kinerja elektrokimianya. Kapasitansi spesifik ASC pada berbagai *scan rate* ditampilkan pada **Gambar 2.26** (e), dengan nilai 66,18 F/g pada 0,5 A/g dan tetap 22,87 F/g pada 10 A/g. *Energy density* dan *power density* yang dihasilkan ditampilkan pada **Gambar 2.26** (f). Mn₃O₄/rGO//AC ASC mencapai *energy density* maksimum 36,76 Wh/kg dan *power density* maksimum 10 kW/kg. Kinerja ini kemudian dibandingkan dengan ASC lain yang dilaporkan sebelumnya dalam **Gambar 2.26** (f) (Huang et al, 2020).

Beberapa penelitian lainnya terkait sintesis komposit Mn₃O₄/rGO menggunakan berbagai macam metode disajikan pada **Tabel 2.12**.

Tabel 2.12 Sintesis komposit Mn₃O₄/rGO menggunakan berbagai macam metode

Material	Metode	Prekursor Mangan	Hasil	Referensi
Komposit Mn ₃ O ₄ /rGO	<i>Facile one-step process</i>	KMnO ₄	Kapasitansi 243 F/g pada densitas arus 0,5 A/g. <i>Energy density</i> sebesar 27,92 Wh/kg pada <i>power density</i> 277,78 W/kg. Setelah 1000 siklus <i>charge-discharge</i> pada densitas arus 5 A/g, kapasitansi terjaga hingga 82,3%.	(Wu et al, 2020)
Komposit Mn ₃ O ₄ /rGO	<i>Two-step synthesis</i>	MnCl ₂ .4H ₂ O	Sampel MGO-3 (70% Mn ₃ O ₄ dan 30% rGO) memiliki kapasitansi spesifik tertinggi yaitu 525 F/g pada 5mV/s. Stabilitas 85% setelah 5000 siklus dan menghasilkan <i>energy density</i> sebesar 6,25 Wh/kg pada <i>power density</i> 125 Wh/kg dengan densitas arus sebesar 0,5 A/g serta pada arus 2 A/g, <i>energy density</i> sebesar 5,36 Wh/kg dan <i>power density</i> sebesar 500 Wh/ kg.	(Cuéllar-Herrera et al, 2024)
Komposit Mn ₃ O ₄ /rGO	<i>Aqua-assisted precipitant free solvothermal</i>	Mn(CH ₃ COO) ₂ .4H ₂ O	Kapasitansi spesifik yang dihasilkan sebesar 177,8 F/g pada 0,5 A/g . <i>Energy density</i> yang dihasilkan sebesar 36 Wh/kg pada <i>power density</i> 442,5 W/kg. Daya tahan retensi sebesar 88,7% setelah 5000 siklus	(Lankamsetty et al, 2025)
Komposit Mn ₃ O ₄ /rGO	<i>One step solvothermal</i>	MnCl ₂	Kapasitas yang diperoleh mencapai 118,375 mAh g ⁻¹ pada 1 Ag ⁻¹ dan tetap	(Zhang et al, 2022)

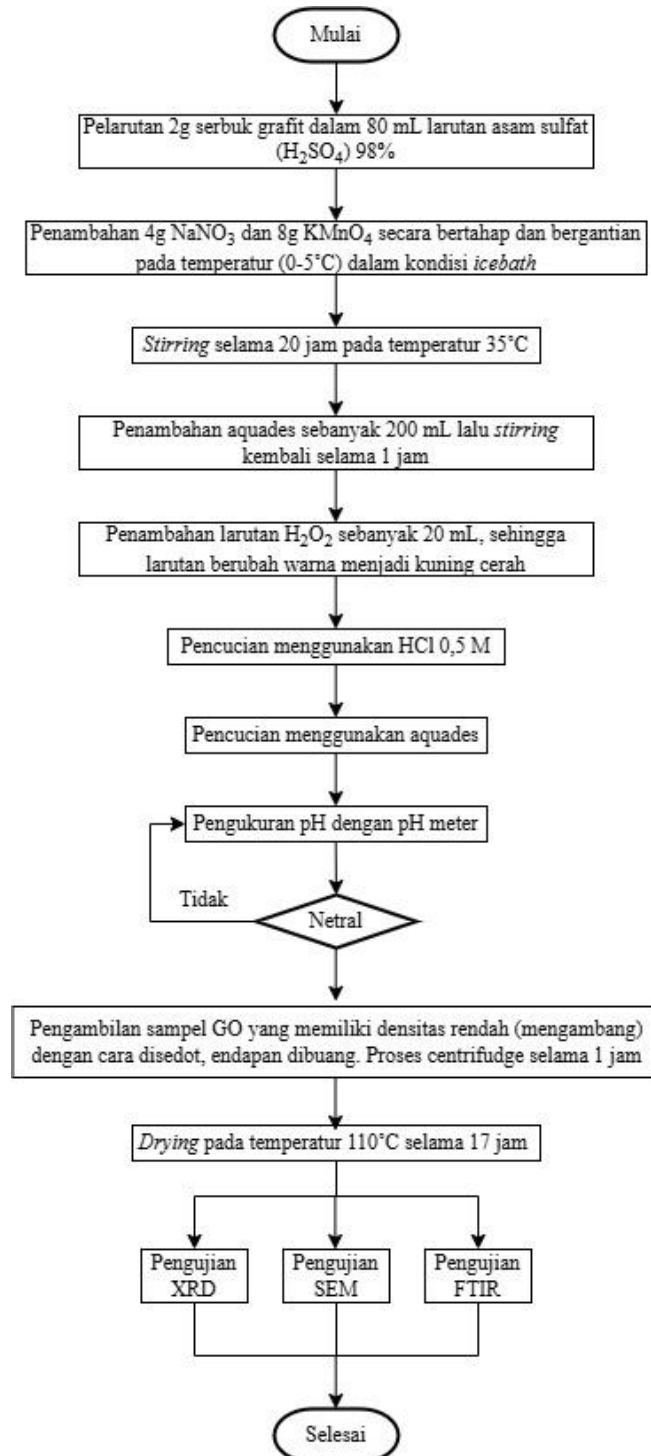
Material	Metode	Prekursor Mangan	Hasil	Referensi
			mencapai 76,5 mAh g ⁻¹ pada 20 Ag ⁻¹	
Komposit NiO/rGO	<i>hydrothermal</i>	-	Kapasitansi spesifik terbaik yang diperoleh sebesar 120,36 F/g pada <i>scan rate</i> 5 mV/s, 216,979 F/g pada kerapatan arus 0.5 A/g, dan 146,937 F/g dengan frekuensi 0.01 Hz. <i>Energy density</i> yang diperoleh sebesar 10,70 Wh/kg dan <i>power density</i> sebesar 241,786 W/kg.	(Alfin, 2025)
Komposit Mn ₃ O ₄ /rGO	<i>Ball Mill</i>	Mn(CH ₃ COO) ₂ .4H ₂ O	Kapasitansi spesifik yang diperoleh sebesar 420 F/g pada 0,5 A/g.	(Li et al, 2022)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

3.1.1 Diagram Alir Sintesis *Graphene Oxide* (GO)

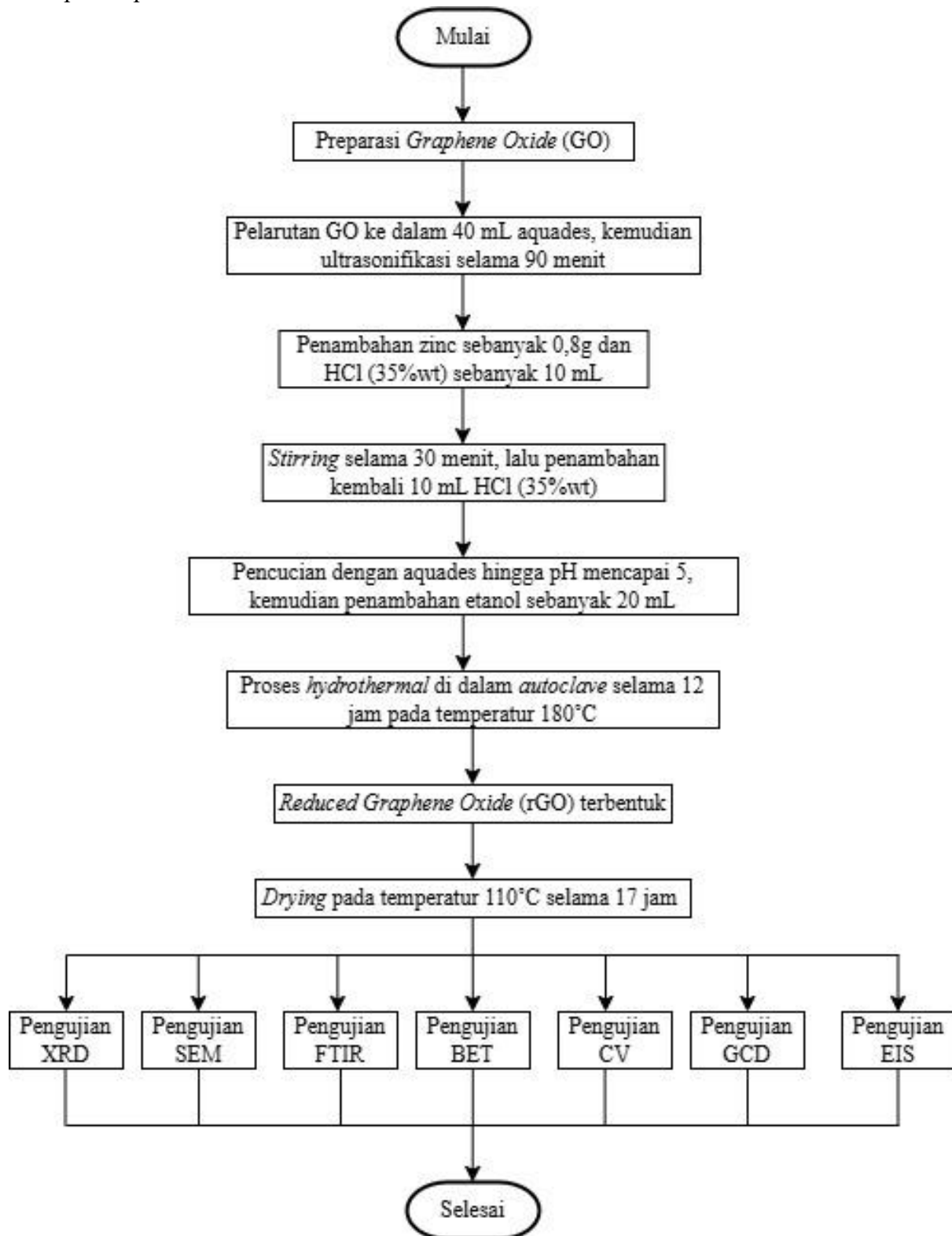
Berikut merupakan diagram alir sintesis *Graphene Oxide* (GO) yang ditampilkan pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Diagram Alir Sintesis Graphene Oxide (GO)

3.1.2 Diagram Alir Sintesis *Reduced Graphene Oxide* (rGO)

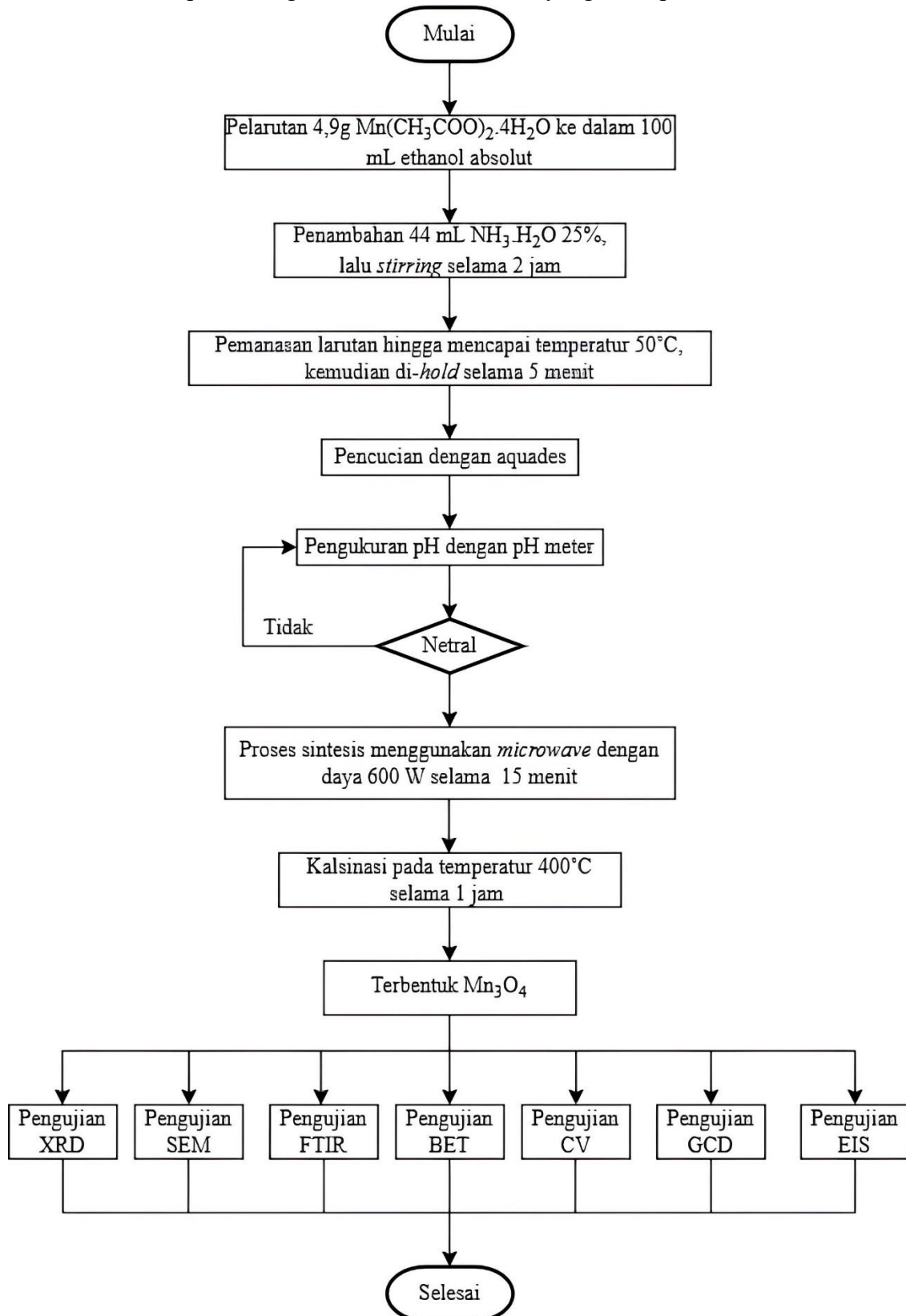
Berikut merupakan diagram alir sintesis *reduced Graphene Oxide* (rGO) yang ditampilkan pada **Gambar 3.2**



Gambar 3.2 Diagram Alir Sintesis reduced Graphene Oxide (rGO)

3.1.3 Diagram Alir Sintesis Mn₃O₄

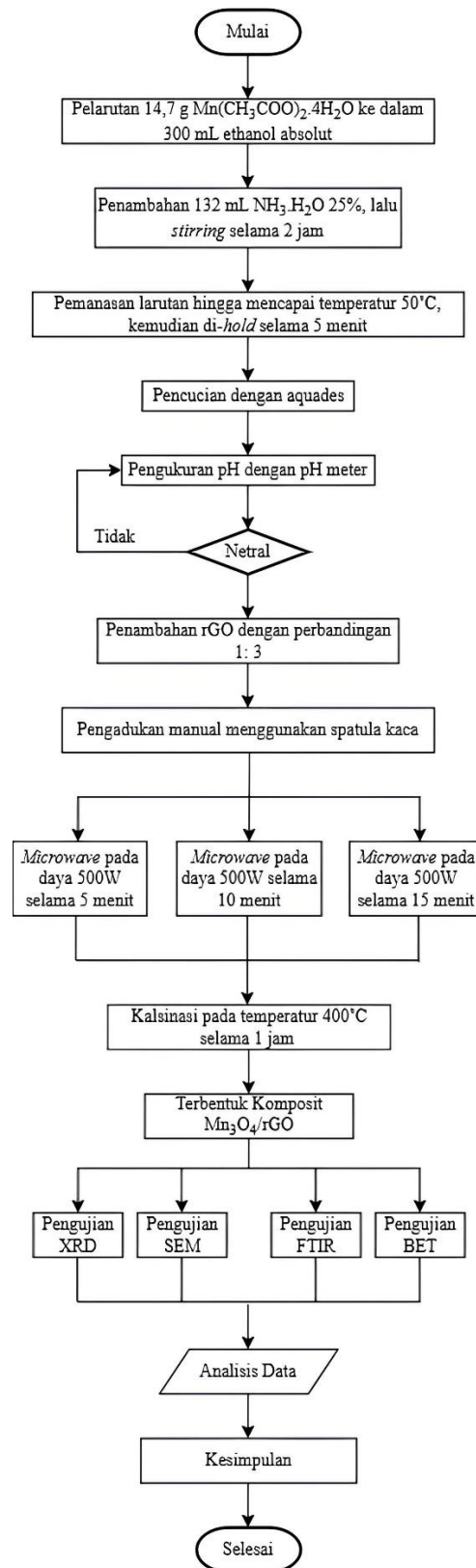
Berikut merupakan diagram alir sintesis Mn₃O₄ yang ditampilkan dalam **Gambar 3.3**



Gambar 3.3 Diagram alir sintesis Mn₃O₄

3.1.4 Diagram Alir Sintesis Komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$

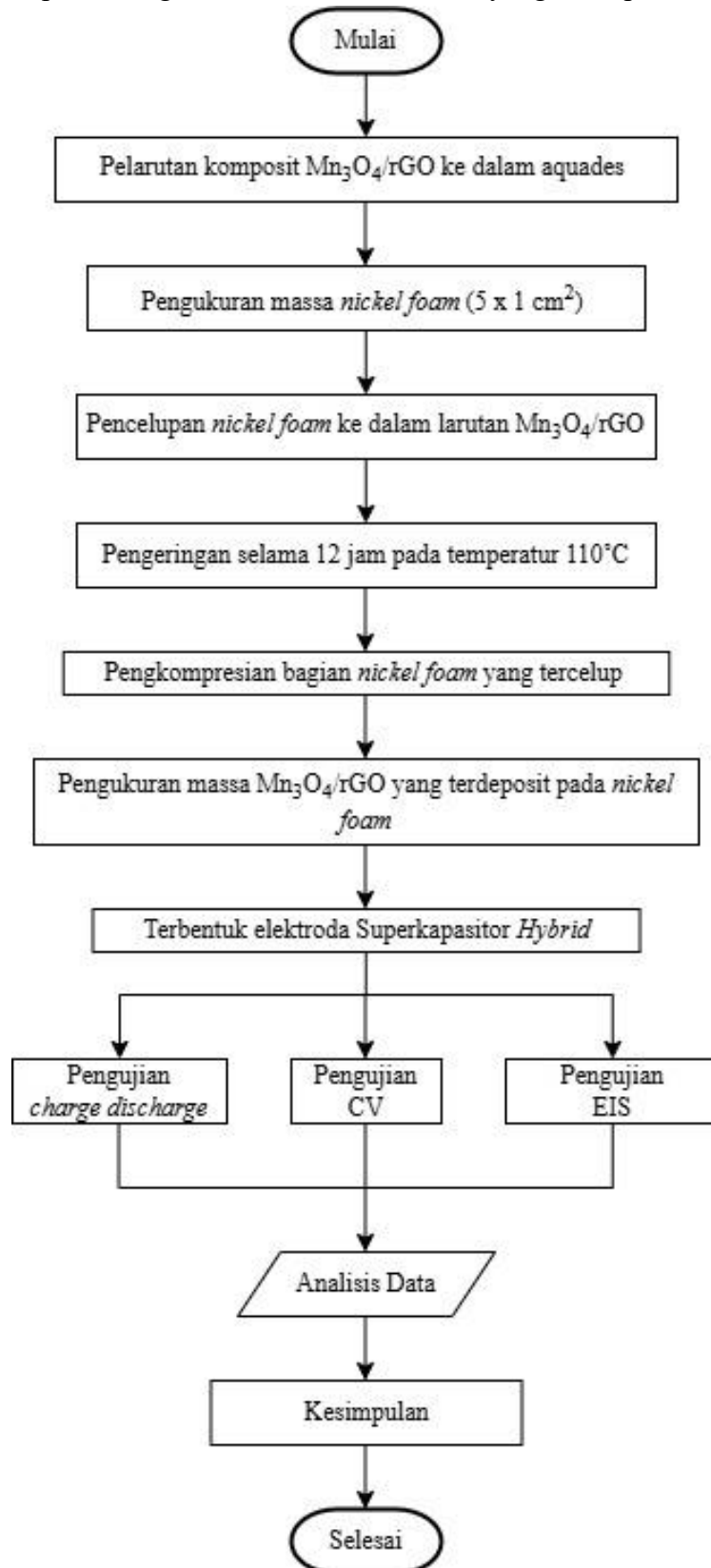
Berikut merupakan diagram alir sintesis komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ yang ditampilkan dalam Gambar 3.4



Gambar 3.4 Diagram Alir Sintesis Komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$

3.1.5 Diagram Alir Sintesis Elektroda

Berikut merupakan diagram alir sintesis elektroda yang ditampilkan dalam **Gambar 3.5**



Gambar 3.5 Diagram Alir Sintesis Elektroda

3.2 Alat Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Neraca Analitik
Digunakan untuk menimbang berat padatan
2. Cawan Petri
Digunakan untuk wadah padatan saat ditimbang dalam neraca analitik
3. Termometer
Digunakan untuk mengukur temperatur campuran
4. *Beaker Glass*
Digunakan sebagai wadah bahan-bahan kimia yang digunakan selama penelitian
5. Gelas Ukur
Digunakan untuk mengukur volume larutan yang digunakan
6. Pipet Ukur
Digunakan untuk mengukur volume larutan dengan tingkat ketelitian yang lebih tinggi dibandingkan gelas ukur
7. *Centrifuge*
Digunakan untuk memisahkan antara padatan dan cairan
8. Tabung *centrifuge*
Digunakan sebagai wadah meletakkan larutan yang akan melalui proses sentrifugasi
9. *Crucible*
Digunakan sebagai wadah sintesis dalam *furnace*
10. *Autoclave*
Digunakan sebagai wadah sintesis dalam *furnace*
11. Teflon
Digunakan sebagai wadah sintesis dalam *furnace* dan *microwave*
12. *Ultrasonic Cleaner*
Digunakan dalam proses ultrasonifikasi pada sintesis *reduced graphene oxide* (rGO)
13. *Hot Plate* dengan *Magnetic Stirrer*
Digunakan dalam proses homogenisasi ketika proses sintesis berlangsung
14. *Ice Bath*
Digunakan untuk menyerap panas berlebih ketika sintesis berlangsung, sehingga temperatur tidak naik secara drastis
15. Sarung Tangan dan Masker
Digunakan untuk melindungi tangan dari bahan kimia dan uap gas kimia
16. *Microwave*
Digunakan untuk mengeringkan dalam proses sintesis
17. *Furnace*
Digunakan untuk memanaskan pada temperatur tinggi
18. Instrumen Karakterisasi Material
 - *X-Ray Diffraction* (XRD)
Digunakan untuk mengidentifikasi senyawa dalam sampel serta struktur dan ukuran kristalnya.
 - *Scanning Electron Microscope* (SEM)
Digunakan untuk menganalisis morfologi, termasuk bentuk serta ukuran partikel yang menyusun sampel.

- *Fourier Transformation Infra-Red* (FTIR)
Digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat dalam sampel.
- *Cyclic Voltammetry* (CV)
Digunakan untuk mengukur nilai kapasitansi pada *hybrid* superkapasitor yang dihasilkan.
- *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS)
Digunakan untuk mengukur tingkat konduktivitas pada *hybrid* superkapasitor yang dihasilkan.
- *Galvanostatic Charge Discharge* (GCD)
Digunakan untuk menganalisis kinerja elektrokimia *hybrid* superkapasitor.

3.3 Bahan Penelitian

Adapun bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Serbuk grafit
2. Aquades (H_2O)
3. Larutan H_2SO_4 >98%
4. Serbuk padatan $KMnO_4$
5. Serbuk padatan $NaNO_3$
6. Larutan H_2O_2 30%
7. Larutan HCl 37%
8. Serbuk Zn
9. Larutan ethanol absolut
10. Serbuk padatan $Mn(CH_3COO)_2 \cdot 4H_2O$
11. Larutan $NH_3 \cdot H_2O$ 25%
12. Larutan KOH 1 M
13. *Nickel foam*

3.4 Prosedur Penelitian

3.4.1 Prosedur Sintesis *Graphene Oxide* (GO)

Graphene Oxide (GO) disintesis melalui pelarutan 2 gram serbuk grafit ke dalam 80 mL larutan H_2SO_4 98%. Selanjutnya, 4 gram $NaNO_3$ dan 8 gram $KMnO_4$ dimasukkan secara bertahap dan bergantian pada temperatur 0-5°C dalam kondisi *icebath*. Campuran di-*stirring* menggunakan *magnetic stirrer* selama 20 jam pada temperatur 35 °C. Kemudian, ditambahkan aquades sebanyak 200 mL dan di-*stirring* kembali selama 1 jam. Setelah 1 jam, H_2O_2 30% sebanyak 20 mL ditambahkan ke dalam campuran, sehingga campuran berubah warna menjadi kuning cerah. Campuran dicuci menggunakan HCl 0,5 M, diikuti dengan pencucian aquades hingga mencapai pH netral. Sampel GO yang memiliki densitas rendah disedot dan dilakukan proses *centrifuge*. Proses *drying* dilakukan selama 17 jam di dalam *furnace* pada temperatur 110°C. Karakterisasi material dilakukan menggunakan pengujian XRD, SEM, dan FTIR.

3.4.2 Prosedur Sintesis *Reduced Graphene Oxide* (rGO)

Proses sintesis *reduced graphene oxide* (rGO) diawali dengan preparasi *graphene oxide* (GO). GO dilarutkan dalam 40 mL aquades dan diultrasonifikasi selama 90 menit. Selanjutnya ditambahkan 8 gram zinc dan HCl 35% sebanyak 10 mL ke dalam larutan, diikuti oleh proses

stirring selama 30 menit. Selanjutnya, 10 mL HCl 35% kembali ditambahkan. Larutan kemudian dicuci menggunakan aquades hingga mencapai pH 5, lalu etanol sebanyak 20 mL ditambahkan ke dalam larutan. Proses berikutnya yaitu *hydrothermal* menggunakan *autoclave* selama 12 jam pada temperatur 180 °C. Setelah *reduced graphene oxide* (rGO) terbentuk, dilakukan proses *drying* selama 17 jam pada temperatur 110°C. Karakterisasi material dilakukan dengan pengujian XRD, SEM, FTIR, BET, CV, GCD, dan EIS.

3.4.3 Prosedur Sintesis Mn₃O₄

Proses sintesis diawali dengan pelarutan 4,9 gram Mn(CH₃COO)₂·4H₂O ke dalam 100 mL larutan etanol absolut. Kemudian, sebanyak 44 mL NH₃·H₂O 25% ditambahkan ke dalam campuran dan diikuti proses *stirring* selama 2 jam. Setelah 2 jam, campuran dipanaskan hingga mencapai temperatur 50°C dan di-*hold* selama 5 menit. Campuran dicuci menggunakan aquades hingga pH menjadi netral. Setelah pH mencapai pH netral, maka dilakukan proses sintesis di dalam *microwave* menggunakan daya sebesar 600 W selama 15 menit. Selanjutnya, dilakukan proses kalsinasi di dalam *furnace* pada temperatur 400°C selama 1 jam. Karakterisasi material dilakukan dengan pengujian XRD, SEM, FTIR, BET, CV, GCD, dan EIS.

3.4.4 Prosedur Sintesis Komposit Mn₃O₄/rGO

Proses sintesis diawali dengan pelarutan 14, gram Mn(CH₃COO)₂·4H₂O ke dalam 300 mL larutan etanol absolut. Kemudian, sebanyak 44 mL NH₃·H₂O 25% ditambahkan ke dalam campuran dan diikuti proses *stirring* selama 2 jam. Setelah 2 jam, campuran dipanaskan hingga mencapai temperatur 50°C dan di-*hold* selama 5 menit. Campuran dicuci menggunakan aquades hingga pH menjadi netral. Setelah mencapai pH netral, ditambahkan sampel rGO dengan perbandingan 1:3, kemudian diaduk secara manual menggunakan spatula kaca. Setelah itu, dilakukan proses sintesis di dalam *microwave* menggunakan daya sebesar 500 W pada variasi waktu 5 menit, 10 menit, dan 15 menit. Selanjutnya, sampel dikalsinasi dalam *furnace* pada temperatur 400°C selama 1 jam. Karakterisasi material dilakukan dengan pengujian XRD, SEM, FTIR, dan BET. Analisis data dilakukan berdasarkan dari hasil pengujian yang telah diperoleh.

3.4.5 Prosedur Sintesis Elektroda

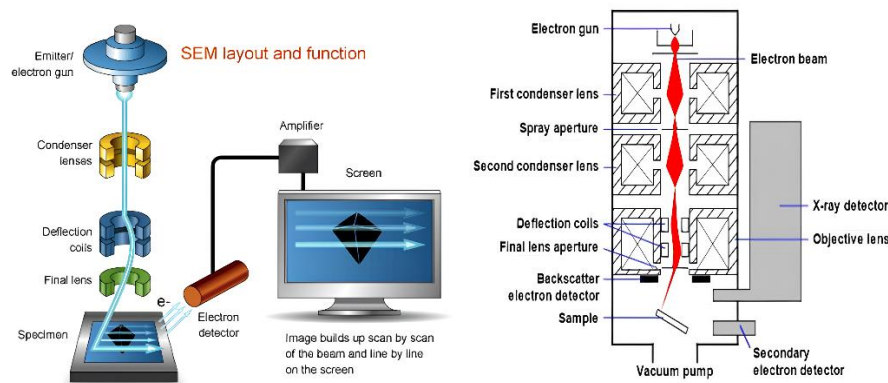
Komposit Mn₃O₄/rGO dilarutkan ke dalam aquades. *Nickel foam* (NF) dipotong dengan ukuran 5 x 1 cm². *Nickel foam* dipilih sebagai substrat karena memiliki luas permukaan yang besar sehingga dapat meningkatkan kontak antara bahan aktif dan elektrolit. Selanjutnya, NF dicelupkan ke dalam larutan Mn₃O₄/rGO. Tahap selanjutnya yaitu *drying* selama 12 jam pada temperatur 110°C. Bagian NF yang tercelup akan dikompresi. Massa Mn₃O₄/rGO yang terdeposit pada *nickel foam* diukur. Karakterisasi material dilakukan dengan pengujian GCD, CV, dan EIS. Analisis data dilakukan berdasarkan dari hasil pengujian yang telah diperoleh.

3.5 Pengujian

Data hasil pengujian perlu diuji kembali untuk memastikan validitasnya serta menjadi indikator keberhasilan dari penelitian. Berikut merupakan penjelasan mengenai jenis-jenis pengujian yang digunakan dalam penelitian ini.

3.5.1 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) merupakan alat yang digunakan untuk mengamati struktur mikro, morfologi, dan komposisi kimia suatu material (Celestine, 2024). Pada **Gambar 3.6**, analisis diawali dengan menerapkan berkas elektron berenergi tinggi (100 – 30.000 elektron volt). SEM dilengkapi dengan *condenser lenses* untuk memampatkan titik dan mengarahkan elektron agar terfokus pada spesimen, karena titik yang dihasilkan dari *electron gun* terlalu besar. Ukuran titik < 10 nm, dimana elektron yang dikumpulkan pada *final lens* akan berinteraksi dengan spesimen dan menembus spesimen hingga kedalaman 1 μm untuk menghasilkan sinyal yang digunakan untuk membentuk gambar (Mohammed & Abdullah, 2018)



Gambar 3.6 Komponen dan skema dari SEM (Mohammed & Abdullah, 2018)

Gambar spesimen dibentuk secara bertahap, titik demi titik tergantung pada pergerakan *scan coils*, yang menyebabkan berkas elektron bergerak ke berbagai titik jalur lurus hingga membentuk pola raster persegi panjang di permukaan spesimen. Seluruh proses bergantung pada perbesaran yang dibutuhkan. Jika dibutuhkan gambar dengan perbesaran lebih tinggi, maka *scan coils* mengarahkan berkas elektron ke area yang lebih kecil. Jarak dari *final lens* ke permukaan spesimen (jarak kerja) dapat disesuaikan secara otomatis untuk mempertahankan kualitas gambar pada berbagai tingkat perbesaran (Mohammed & Abdullah, 2018).

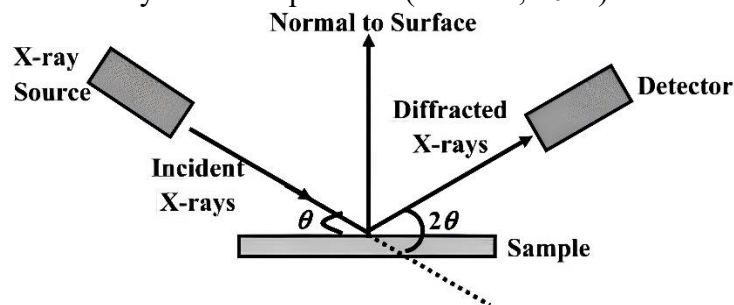
Detector berfungsi untuk mendeteksi elektron yang dipancarkan dari spesimen. Tanpa *detector*, sinyal yang dihasilkan dari interaksi elektron dengan spesimen akan menghasilkan gambar yang tidak dapat dipahami. Elektron yang digunakan dalam pembuatan gambar SEM terdiri dari *secondary electron* (SE) dan *backscattered electron* (BSE). Ketika tegangan positif diterapkan pada layar kolektor, baik SE dan BSE ditangkap. Sedangkan, ketika tegangan negatif diterapkan, hanya BSE yang ditangkap (Mohammed & Abdullah, 2018).

Setelah sinyal dikumpulkan, gambar ditampilkan pada layar dan kecerahan serta intensitas gambar dapat disesuaikan untuk mendapatkan gambar yang jelas. Apabila diperlukan detail kecil, maka perbesaran > 10.000 x harus diterapkan (Mohammed & Abdullah, 2018). SEM mampu mencapai resolusi hingga 5 nm dengan rentang perbesaran 15 – 100.000 kali (Celestine, 2024). Mode tegangan elektron yang dipancarkan dari *electron gun* mempengaruhi detail yang diberikan. Tegangan rendah (< 5 kV) menghasilkan gambar dengan informasi permukaan yang kompleks, sedangkan tegangan tinggi (15 – 30 kV) memungkinkan penetrasi

lebih dalam pada sampel dan memberi detail terkait bagian dalam sampel (Mohammed & Abdullah, 2018).

3.5.2 *X-Ray Diffraction (XRD)*

X-Ray Diffraction menjadi salah satu teknik utama untuk menganalisis komposisi, struktur, dan mikrostruktur material kristal. *X-ray* memiliki panjang gelombang sebanding dengan ukuran atom, sehingga pola difraksinya dimanfaatkan untuk menganalisis struktur atom (Ali et al, 2022). Prinsip dasar dari XRD adalah dengan membelokkan cahaya melalui celah kristal. Sinar-X merupakan foton berenergi tinggi yang memiliki panjang gelombang berkisar antara 0,5 samapi 2,5 Amstrong (Fatimah et al, 2021). Ketika sinar-X mengenai material padat, sinar tersebut akan dihamburkan oleh elektron yang mengelilingi inti atom, menghasilkan gelombang yang tersebar ke berbagai arah. Interferensi gelombang ini bisa bersifat konstruktif atau destruktif, tergantung pada arah dan jenis interaksi. Difraksi terjadi ketika interferensi bersifat konstruktif, yang dipengaruhi oleh susunan atom yang teratur dalam zat padat (Ali et al, 2022). Difraksi hamburan inilah yang dideteksi oleh XRD (Fatimah et al, 2021). Dalam analisis XRD, material kristal menunjukkan beberapa puncak difraksi yang khas akibat keteraturan atomnya. Sedangkan material amorf hanya menampilkan puncak rata-rata maksimum karena tidak adanya susunan periodik (Ali et al, 2022).



Gambar 3.7 Ilustrasi Prinsip Dasar XRD (Fatimah et al, 2021)

Pada **Gambar 3.7** ketika sinar-X ditembakkan ke dalam sampel padatan kristal, sinar akan dibelokkan ke segala arah. Detektor bergerak dengan kecepatan sudut tetap untuk menangkap sinar-X yang dibelokkan. Pola difraksi menjadi ciri khas tiap material, karena setiap sampel memiliki bidang kisi dengan orientasi acak (Fatimah et al, 2021)

Pengujian XRD dilakukan menggunakan instrumen PANAnalytical dengan rentang sudut 10° - 90° dan panjang gelombang $1,54056 \text{ \AA}$ untuk mengidentifikasi fasa dalam sampel. Pengujian ini berlangsung di divisi karakterisasi, Departemen Teknik Material dan Metalurgi, FTIRS-ITS.



Gambar 3.8 Mesin XRD (Dokumentasi pribadi)

Ukuran partikel dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Scherrer (3.1) berikut:

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

Dimana:

D = ukuran partikel,

K = konstanta Scherrer (0,9),

λ = panjang gelombang XRD,

B = lebar penuh pada setengah maksimum (FWHM) dalam radian, dan

θ = sudut difraksi.

Hasil pada XRD juga dapat digunakan untuk menghitung atau mencari nilai d_{spacing} yang menunjukkan jarak antar layer pada suatu material. Untuk menghitung d_{spacing} dapat menggunakan persamaan (3.2) berikut:

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

Dimana:

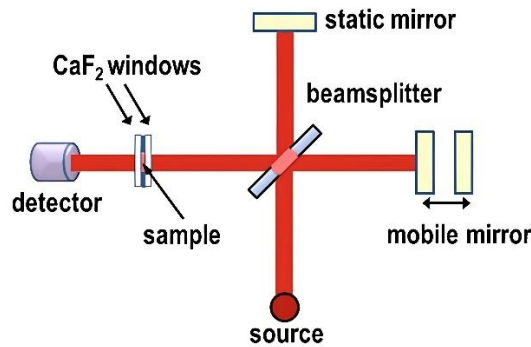
d = d_{spacing} (Å)

λ = Panjang gelombang Cu-K α (1.54060 Å)

3.5.3 *Fourier Transform Infra Red (FTIR)*

FTIR merupakan teknik analisis untuk mengidentifikasi bahan-bahan yang tidak diketahui dan menentukan kualitas dan/atau jumlah komponen dalam suatu sampel (Tkachenko & Niedzielski, 2022). FTIR bekerja dengan mengukur penyerapan radiasi inframerah oleh sampel, yang memberikan informasi mengenai getaran molekul dan gugus fungsi yang ada dalam sampel, yang direpresentasikan sebagai spektrum khas. Informasi ini dapat digunakan untuk mengidentifikasi komponen kimia tertentu dari sampel, menentukan kemurnian material, dan mendeteksi sejumlah kecil pengotor (Cherniienko et al, 2024).

Instrumentasi FTIR terdiri dari sumber cahaya inframerah, interferometer Michelson, sampel, dan detektor seperti pada **Gambar 3.9**



Gambar 3.9 Diagram skematik FTIR (Tatulian, 2019)

Cahaya inframerah dibagi oleh pemisah sinar, dipantulkan oleh cermin statis dan bergerak, lalu mengalami interferensi sebelum mencapai sampel dan detektor. Interferogram yang dihasilkan kemudian diubah menjadi spektrum menggunakan Transformasi Fourier. Resolusi spektrum bergantung pada perpindahan cermin, sementara kualitas spektrum meningkat dengan jumlah pemindaian. Spektrum absorbansi diperoleh dengan membandingkan transmisi sampel dan referensi, memungkinkan analisis struktur model secara akurat (Tatulian 2019).

Keunggulan dari FTIR yaitu mencakup analisis sampel dalam berbagai bentuk, seperti cairan, padatan, pasta, bubuk, film, dan gas. Metode ini hanya memerlukan sedikit sampel, dengan persiapan yang cepat dan mudah serta waktu analisis yang singkat. Selain itu, prinsip kerjanya sederhana dan dapat memberikan informasi mineralogi (Tkachenko & Niedzielski, 2022). Mesin FTIR yang digunakan untuk analisis dapat dilihat pada **Gambar 3.10**.



Gambar 3.10 Mesin FTIR (Dokumentasi pribadi)

3.5.4 *Brunauer Emmett Teller (BET)*

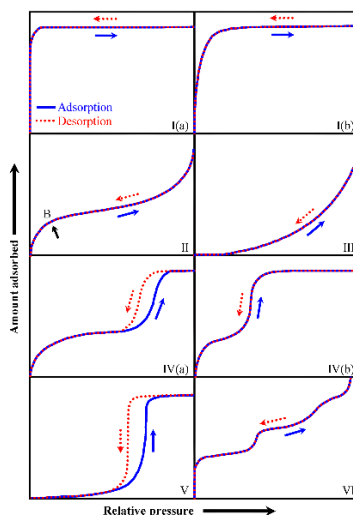
Brunauer Emmett Teller (BET) digunakan untuk pengukuran luas permukaan dan porositas. Luas permukaan yang besar dan porositas yang terstruktur dengan baik sangat diinginkan untuk meningkatkan kapasitansi superkapasitor. Analisis BET dapat menentukan luas permukaan dan porositas dengan mengukur proses adsorpsi dan desorpsi nitrogen, sehingga memberikan gambaran jelas mengenai potensi kinerja material dalam penyimpanan energi (Libber et al, 2024).

Isoterm adsorpsi memberikan informasi mengenai jumlah maksimum adsorbat yang dapat diserap oleh adsorben pada tekanan tertentu. *International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)* mengklasifikasikan pasangan adsorpsi ke dalam enam jenis yang berbeda berdasarkan sifat isoterm adsorpsinya seperti pada **Gambar 3.11**. Tipe-I (a) terjadi pada

adsorben mikropori dengan ukuran pori < 1 nm. Interaksi yang kuat antara adsorben dalam mikropori sempit menghasilkan kemiringan hampir linier pada tekanan parsial rendah, setelah pengisian mikropori secara menyeluruh, plateau tercapai dan diartikan sebagai beban maksimum. Tipe-I (b) ditemukan pada adsorben dengan ukuran pori lebih luas termasuk mikropori lebar dan mesopori sempit ($< 2,5$ nm) (Bläker et al, 2019).

Pada tipe-II ditandai dengan adanya adsorpsi *multilayer* dan hampir menyerupai tipe-I (b), namun terdapat perbedaan yaitu tidak adanya plateau pada tipe-II (Rahman et al, 2019). Tipe-II muncul akibat fisisorpsi gas pada adsorben non-pori atau mesopori. Lengkungan tajam pada titik B menunjukkan pembentukan *single layer*. Seiring dengan peningkatan tekanan relatif, adsorpsi *multi layer* dalam mesopori dan makropori serta pada permukaan luar menghasilkan kemiringan isoterm meningkat. Tipe III dan V terjadi ketika interaksi antara adsorban dan adsorbat sangat lemah. Tipe III terjadi pada adsorben non-pori atau makropori, sedangkan tipe V terjadi pada adsorben mesopori dan menunjukkan histeresis (Bläker et al, 2019).

Tipe IV menunjukkan keberadaan mesopori melalui fenomena histeresis. Kemiringan tajam pada tekanan yang relatif rendah mengindikasikan adanya mikroskopi tambahan. Tipe IV (b) tidak menunjukkan histeresis karena ukuran mesopori lebih kecil dari jari-jari kritis yang diperlukan untuk terjadinya histeresis (Bläker et al, 2019). Tipe-IV (a) memiliki lebar pori > 4 nm dan tipe-IV (b) memiliki ukuran pori < 4 nm (Rahman et al, 2019). Tipe VI mencerminkan proses adsorpsi berlapis pada permukaan seragam, dimana setiap lapisan terbentuk secara bertahap (Bläker et al, 2019).



Gambar 3.11 Klasifikasi isoterm fisisorpsi berdasarkan IUPAC (Rahman et al, 2019)

Dalam analisis BET, gas adsorbat (biasanya nitrogen) diadsorbsi ke permukaan partikel pada titik didih nitrogen (-196°C). Pada temperatur ini, nitrogen berada di bawah temperatur kritisnya dan akan mengembun pada permukaan partikel. Dengan mengasumsikan bahwa gas membentuk satu lapisan pada permukaan dan ukuran molekul gas diketahui, jumlah gas yang diadsorbsi dapat digunakan untuk menentukan luas total permukaan partikel, termasuk area dalam pori-porinya (Celestine, 2024). *Specific Surface Area* (SSA) dari material berbentuk serbuk dapat ditentukan melalui persamaan (3.3).

$$= \frac{V_m}{m \times 22400} Na \quad (3.3)$$

Dimana:

S = luas permukaan spesifik ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$),

V_m = volume gas yang diserap pada temperatur dan tekanan konstan (mL),

N = konstanta Avogadro ($6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$),

a = luas penampang efektif satu molekul adsorbat (m^2),

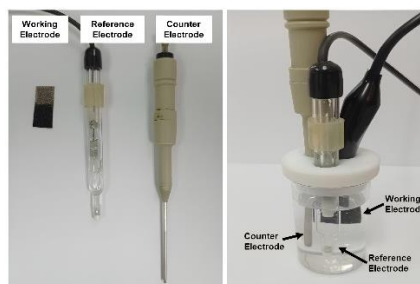
m = massa serbuk uji (g), dan

22400 = volume (mL) yang ditempati 1 mol gas adsorbat pada temperatur dan tekanan konstan .

3.5.5 *Cyclic Voltammetry (CV)*

Cyclic voltammetry (CV) merupakan teknik analisis elektrokimia mengukur arus listrik sebagai respons terhadap perubahan tegangan potensial yang diberikan. Metode ini menggunakan dua kali sapuan bolak-balik yang memungkinkan pengamatan lebih jelas terhadap reaksi reduksi oksidasi dalam larutan analit (Nainggolan et al, 2024). Teknik ini memungkinkan evaluasi sifat elektrokimia superkapasitor, termasuk kapasitansi, kinetika *charge/discharge*, serta stabilitas siklusnya dengan mengamati bentuk serta karakteristik voltamogram yang dihasilkan (Mohamad, 2025).

Prinsip kerja CV bergantung pada interaksi tiga jenis elektroda yang berperan dalam perpindahan elektron melalui arus listrik sesuai dengan potensial yang diberikan.



Gambar 3.12 Pengaturan dasar untuk pengukuran CV dengan sambungan untuk 3 elektroda (Mohamad, 2025)

Ketiga elektroda seperti pada **Gambar 3.12** meliputi elektroda referensi yang biasanya berupa larutan jenuh $\text{Hg}_2\text{Cl}_2/\text{KCl}$ (SCE), elektroda lawan, serta elektroda kerja yaitu elektroda yang sedang diteliti (Nainggolan et al, 2024). Elektroda lawan merupakan material inert yang berfungsi untuk memfasilitasi pengumpulan elektron. Sedangkan elektroda referensi berfungsi sebagai penyedia potensial yang tetap dan telah diketahui, untuk memberikan nilai potensial elektroda kerja yang stabil yang dapat diukur dan dikontrol (Mohamad, 2025). Pada penelitian ini, elektroda kerja berupa komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$, elektroda lawan berupa grafit, elektroda referensi berupa SCE (*Saturated Calomel Electrode*), dan larutan elektrolit yang dipakai adalah

KOH 1 M. *Scan rate* yang digunakan pada penelitian ini, yaitu 5, 10, 50, 100, dan 500. *Potential window* yang digunakan yaitu 0-1 V.

Alat instrumen CV yang digunakan merupakan Corrtest (CS350 Potensial-Corrtest) yang berada pada Laboratorium Korosi dan Kegagalan Material Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3.13**.



Gambar 3.13 Alat instrumentasi CV (Dokumentasi pribadi)

Kapasitansi spesifik, C_s ($F\ cm^{-2}$) pada superkapasitor dapat ditentukan menggunakan persamaan (3.4):

$$C_s = \frac{1}{Av\Delta V} \int I(V)dV \quad (3.4)$$

Dimana:

$I(V)$ = arus sesaat sebagai fungsi tegangan,

v = laju pemindaian,

ΔV = jendela tegangan total dalam pemindaian CV, dan

A = area aktif permukaan elektroda.priy

Dari kurva CV dapat ditentukan *energy density* (E) dan *power density* (P) melalui persamaan (3.5) dan (3.6):

$$E\ (Wh\ kg^{-1}) = \frac{1}{2} \frac{CV^2}{3.6} \quad (3.5)$$

$$P\ (Wkg^{-1}) = \frac{E\ 3600}{t} \quad (3.6)$$

Dimana:

V = perubahan tegangan selama proses pelepasan muatan setelah penurunan IR (V),

t = waktu pelepasan muatan (s), dan

C = kapasitansi spesifik ($F\ g^{-1}$) dari material.

3.5.6 *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)*

Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) juga dikenal sebagai spektroskopi impedansi AC, merupakan metode nondestruktif yang digunakan untuk mengkarakterisasi superkapasitor. Teknik ini bekerja dengan memberikan gangguan sinyal sinusoidal beramplitudo kecil pada sistem elektrokimia dalam keadaan *steady-state*. Rasio perubahan tegangan eksitasi terhadap respons menghasilkan spektrum impedansi yang memberikan informasi tentang karakteristik sistem elektrokimia (Liu et al, 2023).

EIS menggunakan sel elektrokimia dengan tiga elektroda, yaitu elektroda kerja (material yang diteliti), elektroda lawan (Pt), dan elektroda referensi (misalnya Ag/AgCl atau SCE). Potensial elektrokimia antara elektroda kerja dan elektroda referensi disebut sebagai potensial rangkaian terbuka (EOCP) yang dapat digunakan untuk menganalisis degradasi logam seiring waktu. Pengukuran dilakukan dengan menerapkan sinyal stimulus yang mencakup komponen CD dan AC pada elektroda kerja (Grassini et al, 2018).

Spektrum impedansi terbentuk karena setiap frekuensi gangguan menghasilkan respons yang berbeda. Representasi grafis data impedansi dapat dilakukan melalui plot Nyquist dan Bode. Plot Nyquist menggambarkan hubungan antara hubungan real dan imajiner impedansi, yang dapat mengindikasikan berbagai proses kimia dan fisika dalam superkapasitor. Sedangkan, plot Bode menunjukkan pergeseran fasa serta perubahan magnitudo impedansi dalam berbagai frekuensi (Liu et al, 2023). Analisis spektrum EIS dilakukan menggunakan model rangkaian ekuivalen yang terdiri dari elemen-elemen listrik sederhana, seperti resistor, kapasitor, dan induktor. Karena kompleksitas interaksi elektrokimia, elemen khusus seperti Warburg dan *Constant Phase Element (CPE)* sering digunakan untuk memodelkan difusi ion dan heterogenitas permukaan (Grassini et al, 2018).

Nilai kapasitansi dapat dihitung menggunakan persamaan (3.7):

$$C = \frac{1}{2\pi m f Z_{im}} \quad (3.7)$$

Dimana:

m = massa karbon berpori (gram),

f = frekuensi pada garis lurus di wilayah frekuensi rendah (Hz), dan

Z_{im} = bagian imajiner dari impedansi dalam plot Nyquist (Ω).

Nilai konduktivitas dapat dicari menggunakan persamaan (3.8) berikut:

$$K = \frac{L}{|Z| A} \quad (3.8)$$

Dimana:

K = konduktivitas (Ω^{-1})

L = ketebalan elektroda (m)

$|Z|$ = impedansi ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)

A = luas penampang (m^2)

3.5.7 Galvanostatic Charge/Discharge (GCD)

Galvanostatic Charge/Discharge (GCD) merupakan metode yang melibatkan arus konstan untuk mengisi dan mengosongkan sel elektrokimia dan pengukuran perubahan potensial yang dihasilkan (Hardianto et al, 2025). Pengukuran dilakukan pada berbagai kepadatan muatan, seperti 1 Ag⁻¹, 2 Ag⁻¹, dan seterusnya dengan mencatat perubahan potensial terhadap waktu. Stabilitas siklus superkapasitor dievaluasi melalui kurva GCD dengan mengukur durasi proses *charge/discharge* muatan (Sharma & Chand, 2023).

Kepadatan arus dan kapasitansi spesifik memiliki hubungan berbanding terbalik. Pada material EDLC, kurva GDC bersifat linier yang menunjukkan sifat kapasitif elektrokimia yang baik. Pada material *pseudocapacitative*, profil *charge/discharge* muatan memiliki variasi non-linier dikarenakan reaksi faradik yang hampir *reversible*. Rasio muatan terhadap tegangan dalam reaksi faradik tidak konstan dan berubah seiring waktu, menghasilkan kurva yang asimetris. Sedangkan untuk material dengan karakteristik *battery like*, kurva GCD berbentuk plateau (Sharma & Chand, 2023).

Profil GDC dimanfaatkan untuk menganalisis kualitas respons kapasitif, mengidentifikasi kemungkinan adanya reaksi faradik yang *irreversible*, serta menentukan berbagai parameter elektrokimia utama, seperti kapasitansi, kapasitas, energi, dan daya (Licht et al, 2020). Kapasitansi spesifik elektroda (C_s) yang diperoleh dari data GCD dapat dihitung menggunakan persamaan (3.9):

$$C_s = \frac{I \times \Delta t}{\Delta V \times m} \quad (3.9)$$

Dimana:

- I = arus *discharge* (A),
 Δt = waktu *discharge*,
 ΔV = jendela potensial (V), dan
 m = massa bahan aktif (g).

3.6 Rencana Penelitian

Rancangan pengujian disusun untuk mempermudah pelaksanaan penelitian ini. Pelaksanaan penelitian yang akan dilakukan dapat dilihat pada **Tabel 3.1** dan **Tabel 3.2**

Tabel 3.1 Pelaksanaan Penelitian

Nama Material	Pengujian						
	SEM	FTIR	XRD	BET	CV	GCD	EIS
GO	√	√	√	-	-	-	-
rGO	√	√	√	√	√	√	√
Mn ₃ O ₄	√	√	√	√	√	√	√
Komposit Mn ₃ O ₄ /rGO 1	√	√	√	-	-	-	-
Komposit Mn ₃ O ₄ /rGO 2	√	√	√	-	-	-	-
Komposit Mn ₃ O ₄ /rGO 3	√	√	√	-	-	-	-
Elektroda Mn ₃ O ₄ /rGO 1	-	-	-	-	√	√	√
Elektroda Mn ₃ O ₄ /rGO 2	-	-	-	-	√	√	√

Elektroda $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ 3	-	-	-	-	√	√	√
--	---	---	---	---	---	---	---

Tabel 3.2 Rancangan Jadwal Penelitian

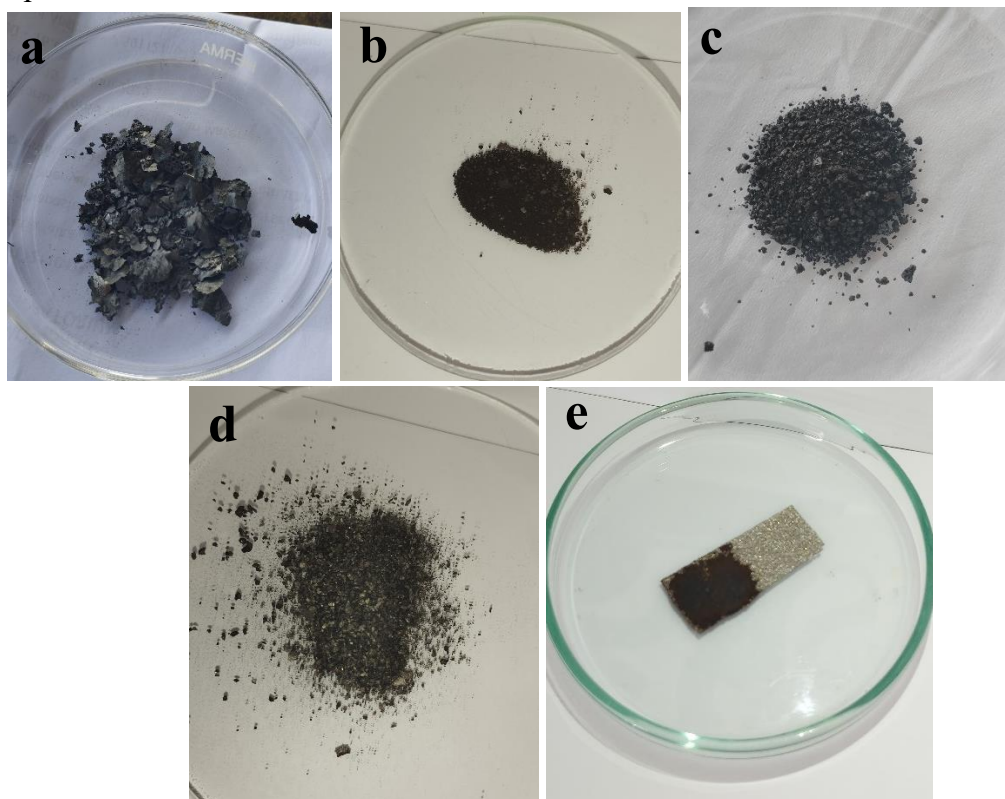
No	Kegiatan	Bulan																			
		Januari				Februari				Maret				April				Mei			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Studi Literatur																				
2	Bimbingan dengan Dosen																				
3	Persiapan Alat dan Bahan																				
4	Sintesis GO, rGO & Mn_3O_4																				
5	Sintesis Komposit rGO/ Mn_3O_4																				
6	Karakterisasi Material																				
8	Pembuatan Elektroda																				
9	Fabrikasi <i>Hybrid</i> Superkapasitor																				
10	Pengujian Elektrokimia																				
11	Pembuatan Laporan																				

BAB IV

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengamatan Visual

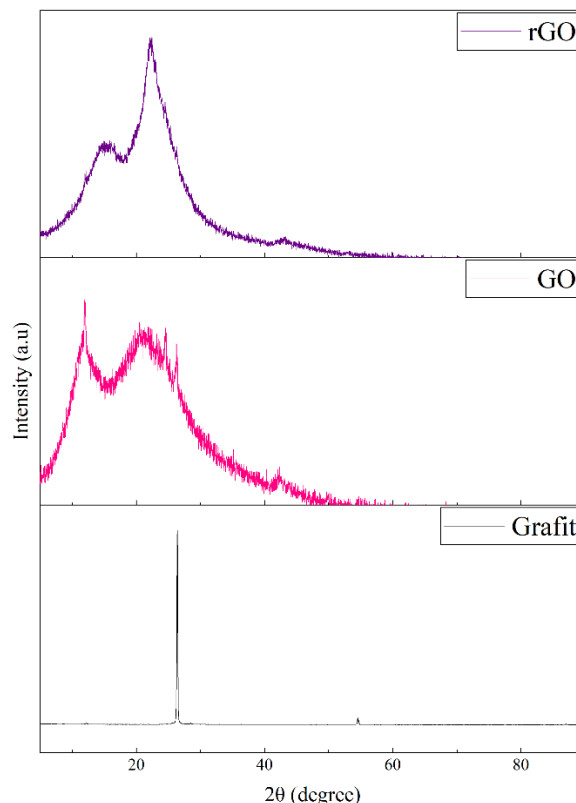
Dalam penelitian, telah dilakukan proses sintesis pada material GO (*Graphene Oxide*), rGO (*Reduced Graphene Oxide*), Mn_3O_4 (*Trimanganese Tetraoxide*), dan komposit rGO/ Mn_3O_4 . Pada material GO dan rGO, digunakan proses sintesis dengan metode *modified Hummers* dengan prekursor berupa serbuk grafit. GO yang didapatkan melalui proses sintesis tersebut memiliki karakteristik berupa bentuk lembaran dan berwarna hitam. Lembaran GO tersebut, selanjutnya akan dihaluskan menggunakan mortar dan disintesis lebih lanjut sehingga menghasilkan material rGO. rGO yang dihasilkan melalui proses sintesis memiliki karakteristik yaitu berwarna hitam keabuan dan berbentuk serbuk. Material Mn_3O_4 disintesis melalui metode *microwave assisted hydrothermal* dengan prekursor $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Karakteristik dari Mn_3O_4 yang didapatkan setelah proses sintesis berupa warna yang hitam kecoklatan dan berbentuk serbuk setelah dihaluskan menggunakan mortar. Material rGO dan Mn_3O_4 yang telah dihasilkan, kemudian dikompositkan dengan menggunakan metode *microwave assisted hydrothermal* dengan variasi waktu 5 menit, 10 menit, dan 15 menit. Komposit yang telah terbentuk, akan digunakan untuk fabrikasi elektroda superkapasitor. Pada **Gambar 4.1** menunjukkan hasil pengamatan visual terhadap material GO (*Graphene Oxide*), rGO (*Reduced Graphene Oxide*), Mn_3O_4 (*Trimanganese Tetraoxide*), komposit rGO/ Mn_3O_4 , dan elektroda superkapasitor.



Gambar 4.1 Hasil pengamatan visual sampel (a) GO, (b) rGO, (c) Mn_3O_4 , (d) Komposit rGO/ Mn_3O_4 , dan (e) Elektroda Superkapasitor

4.2 Hasil Pengujian X-Ray Diffraction (XRD)

Pengujian XRD digunakan untuk mengetahui fasa yang terbentuk pada sampel dan menentukan struktur kristal dari suatu material dengan memanfaatkan sinar-X. Pengujian XRD menggunakan instrumen *PAN Analytical* dengan sudut 5° - 90° dan menggunakan panjang gelombang sebesar $1,54060 \text{ \AA}$. Pengujian dilakukan pada sampel GO, rGO, Mn_3O_4 , dan komposit rGO/ Mn_3O_4 . Hasil pengujian XRD pada semua sampel tersebut dapat dilihat pada **Gambar 4.2**.

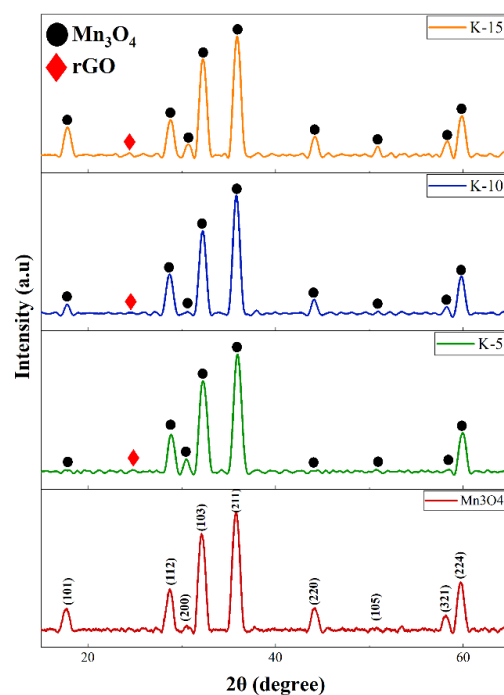


Gambar 4.2 Pola XRD Grafit, GO, dan rGO

Pada hasil pengujian XRD grafit terdapat puncak tajam pada sudut $2\theta = 26,43^{\circ}(002)$ dengan nilai $d'spacing$ sebesar $3,37\text{\AA}$ dan memiliki karakteristik fasa heksagonal, sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Reshma et al, 2024), dimana puncak grafit berada disekitar $2\theta = 26,78^{\circ}$. Pada pengujian material GO, terdapat puncak tajam pada $2\theta = 11,97^{\circ}(001)$ dengan $d'spacing$ sebesar $7,39\text{\AA}$ yang menunjukkan bahwa pembentukan struktur GO berlapis berhasil terbentuk sesuai dengan penelitian (Reshma et al, 2024) yaitu peak GO berada pada rentang $2\theta = 10-14^{\circ}$. Selain itu, terdapat puncak tambahan pada $2\theta = 24,55^{\circ}(002)$; $26,27^{\circ}(002)$; dan $42,38^{\circ}(100)$ dengan $d'spacing$ masing-masing sebesar $3,63 \text{ \AA}$; $3,39 \text{ \AA}$; dan $2,13 \text{ \AA}$, puncak-puncak tambahan tersebut menunjukkan masih adanya grafit yang berarti proses oksidasi GO belum sempurna, hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Reshma et al, 2024). Peningkatan nilai $d'spacing$ dari grafit ke GO yaitu $3,37 \text{ \AA}$ ke $7,39\text{\AA}$ disebabkan oleh ekspansi kisi karena adanya gugus fungsi oksigen di antara lapisan grafit (Kumari et al, 2024). Material GO yang dihasilkan, kemudian disintesis lebih lanjut untuk menghasilkan rGO dengan menggunakan *zinc powder* sebagai agen reduktor.

Hasil pengujian XRD rGO, terdapat puncak tajam pada $2\theta = 22,56^\circ$ (002) dengan $d'spacing$ sebesar 3,94 Å. Munculnya puncak tajam ini menunjukkan adanya proses reduksi dari GO menjadi rGO, puncak pada rGO sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Barros et al, 2023) yaitu puncak rGO berada disekitar $2\theta = 22^\circ$ - 25° . Selain itu, terdapat puncak lainnya pada $2\theta = 14,46^\circ$ (001) dengan $d'spacing$ sebesar 6,12 Å. Adanya puncak $2\theta = 14,46^\circ$ (001) pada material rGO menunjukkan bahwa masih terdapat sebagian GO yang tidak tereduksi secara sempurna, sesuai dengan penelitian oleh (Barros et al, 2023) yaitu puncak GO sekitar 10° terlihat dalam hasil XRD material rGO. Puncak rGO pada $2\theta = 22,56^\circ$ menunjukkan bahwa proses reduksi belum sempurna, hal ini dikonfirmasi masih adanya puncak GO pada $2\theta = 14,46^\circ$ pada material rGO (Huang et al, 2018). Penurunan nilai $d'spacing$ dari material GO ke rGO yaitu 7,39Å ke 3,94 Å menunjukkan adanya proses reduksi yaitu hilangnya gugus fungsional oksigen pada permukaan rGO (Zamani & Tadjarodi, 2024). Ukuran kristal pada puncak tertinggi dihitung menggunakan persamaan *Debye Scherrer* pada persamaan (3.1), ukuran kristal mengalami penurunan dari material GO ke rGO yaitu dari 34,38 nm menjadi 9,93 nm. Hal ini disebabkan oleh $d'spacing$ (jarak antar lapisan) mengecil sehingga susunan kristal pada rGO menjadi lebih rapat (Zamani & Tadjarodi, 2024).

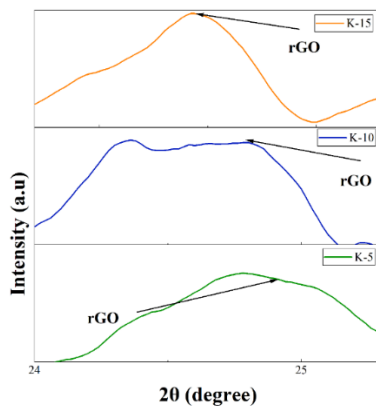
Mn_3O_4 merupakan material *metal oxide* yang digunakan dalam pembuatan elektroda *hybrid supercapacitor* dan berperan sebagai *psuedocapacitor*. **Gambar 4.3** menunjukkan hasil pengujian XRD pada material Mn_3O_4 yang memiliki puncak $2\theta = 17,68^\circ$ (101); $28,64^\circ$ (112); $30,80^\circ$ (200); $32,19^\circ$ (103); $35,93^\circ$ (211); $44,17^\circ$ (220); $50,57^\circ$ (105); $58,23^\circ$ (321); dan $59,75^\circ$ (224). Masing-masing puncak memiliki $d'spacing$ sebesar 5,02 Å; 3,12 Å; 2,78 Å; 2,50 Å; 2,05 Å; 1,58 Å; 1,80 Å; 1,55 Å; dan 1,45 Å. Puncak 2θ yang dihasilkan pada material Mn_3O_4 mendekati nilai puncak pada penelitian yang dilakukan oleh (Arias-Duque et al, 2025). Data XRD sampel Mn_3O_4 disajikan dalam **Tabel 4.1**.



Gambar 4.3 Pola XRD Mn_3O_4 , dan komposit rGO/ Mn_3O_4 (K-5, K-10, dan K-15)

Tabel 4.1 Puncak XRD Mn_3O_4

Sampel	2θ (°)	d' spacing (Å)
Mn_3O_4	17,68	5,02
	28,64	3,12
	30,80	2,90
	32,19	2,78
	35,93	2,50
	44,17	2,05
	50,57	1,80
	58,27	1,58
	59,75	1,55

**Gambar 4.4** Perbesaran puncak rGO pada XRD komposit $\text{rGO}/\text{Mn}_3\text{O}_4$

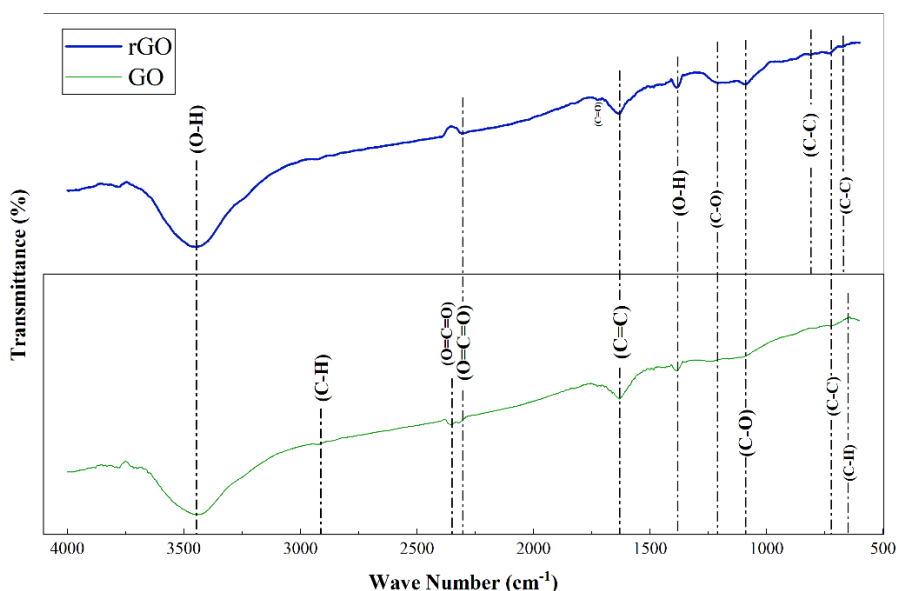
Hasil pengujian XRD pada ketiga variasi waktu sampel komposit $\text{rGO}/\text{Mn}_3\text{O}_4$ ditunjukkan oleh **Gambar 4.3**. Puncak Mn_3O_4 ditunjukkan dengan simbol bulat berwarna hitam dan puncak rGO ditunjukkan dengan simbol belah ketupat berwarna merah. Hasil XRD komposit menunjukkan kemiripan serta kesesuaian dengan hasil uji XRD dari Mn_3O_4 . Pada sampel komposit $\text{rGO}/\text{Mn}_3\text{O}_4$ 5 menit (K-5), didapatkan puncak-puncak pada sudut 2θ dengan posisi $17,75^\circ(101)$; $24,93^\circ(002)$; $28,93^\circ(112)$; $30,93^\circ(200)$; $32,24^\circ(103)$; $36,01^\circ(211)$; $44,42^\circ(220)$; $50,85^\circ(105)$; $58,43^\circ(321)$ dan $59,79^\circ(224)$. Dimana puncak $2\theta = 24,93^\circ(002)$ merupakan puncak rGO. Pada sampel komposit $\text{rGO}/\text{Mn}_3\text{O}_4$ 10 menit (K-10), didapatkan puncak-puncak pada sudut 2θ dengan posisi $17,73^\circ(101)$; $24,79^\circ(002)$; $28,73^\circ(112)$; $30,69^\circ(200)$; $32,22^\circ(103)$; $35,86^\circ(211)$; $44,14^\circ(220)$; $50,93^\circ(105)$; $58,01^\circ(321)$ dan $59,72^\circ(224)$. Dimana puncak $2\theta = 24,79^\circ(002)$ merupakan puncak rGO. Pada sampel komposit $\text{rGO}/\text{Mn}_3\text{O}_4$ 15 menit (K-15), didapatkan puncak-puncak pada sudut 2θ dengan posisi $17,90^\circ(101)$; $24,47^\circ(002)$; $28,70^\circ(112)$; $30,6^\circ(200)$; $32,42^\circ(103)$; $35,8^\circ(211)$; $44,24^\circ(220)$; $50,80^\circ(105)$; $58,17^\circ(321)$; dan $59,77^\circ(224)$. Dimana puncak $2\theta = 24,47^\circ(002)$ merupakan puncak rGO.

Pada **Gambar 4.4** menunjukkan perbesaran puncak rGO yang muncul dalam komposit $\text{rGO}/\text{Mn}_3\text{O}_4$. Intensitas puncak rGO dalam komposit sangat rendah, hal ini terjadi akibat rendahnya rasio rGO di dalam komposit sehingga puncak karakteristik rGO tidak terlihat jelas (Lu et al, 2021). Perbedaan komposisi antara Mn_3O_4 dan rGO dengan komposisi Mn_3O_4 lebih tinggi mengakibatkan pembebanan Mn_3O_4 pada rGO meningkat. Peningkatan pembebanan ini mengakibatkan lapisan rGO menjadi lebih tidak teratur, yang melemahkan intensitas puncak

difraksi rGO (Zhang et al, 2021). Pergeseran puncak rGO dalam XRD rGO dan XRD komposit yaitu dari $2\theta = 22^\circ$ menjadi $24-25^\circ$ terjadi karena adanya penurunan *dspacing* dari material rGO sebelum dikompositkan dan setelah dikompositkan (Zamani & Tadjarodi, 2024). Terjadinya penurunan *dspacing* ini bisa terjadi karena adanya proses reduksi tambahan. Sisa GO yang belum tereduksi secara sempurna saat proses reduksi rGO akan tereduksi ketika proses pemanasan komposit rGO/Mn₃O₄. Hal ini sesuai dengan penelitian (Liu et al, 2020), dimana GO yang dikompositkan dengan metal oksida akan menghasilkan komposit berupa rGO dan metal oksida dan menggeser posisi puncak ke 2θ yang lebih tinggi. Adanya variasi waktu *microwave assisted hydrothermal* menyebabkan sampel komposit memiliki kecenderungan pertambahan ukuran kristal seiring dengan pertambahan waktu yaitu dari 17,69 nm menjadi 53,04 nm. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Neto et al, 2020), dimana peningkatan waktu *microwave assisted hydrothermal* akan meningkatkan ukuran kristalit. Selain itu, terlihat bahwa seiring dengan pertambahan waktu *peak* Mn₃O₄ yang muncul pada komposit memiliki intensitas yang semakin tinggi.

4.3 Hasil Pengujian *Fourier Transform Infrared Spectros (FTIR)*

Pengujian FTIR dilakukan pada penelitian ini dengan tujuan untuk mengetahui spektrum vibrasi molekul dan untuk memprediksi struktur senyawa kimia yang terkandung dalam suatu sampel menggunakan pancaran sinar inframerah. Pengujian FTIR untuk analisis sampel akan memanfaatkan rentang panjang gelombang $400-4000\text{ cm}^{-1}$. Dalam penelitian ini, pengujian FTIR dilakukan untuk menganalisis sampel GO (*Graphene Oxide*), rGO (*Reduced Graphene Oxide*), Mn₃O₄ (*Trimanganese Tetraoxide*), dan komposit rGO/ Mn₃O₄.



Gambar 4.5 Hasil pengujian FTIR pada material GO dan rGO

Hasil pengujian FTIR pada material GO ditunjukkan pada **Gambar 4.5**. Spektrum FTIR dari material GO menunjukkan beberapa puncak yang menghasilkan jenis ikatan yang berbeda.

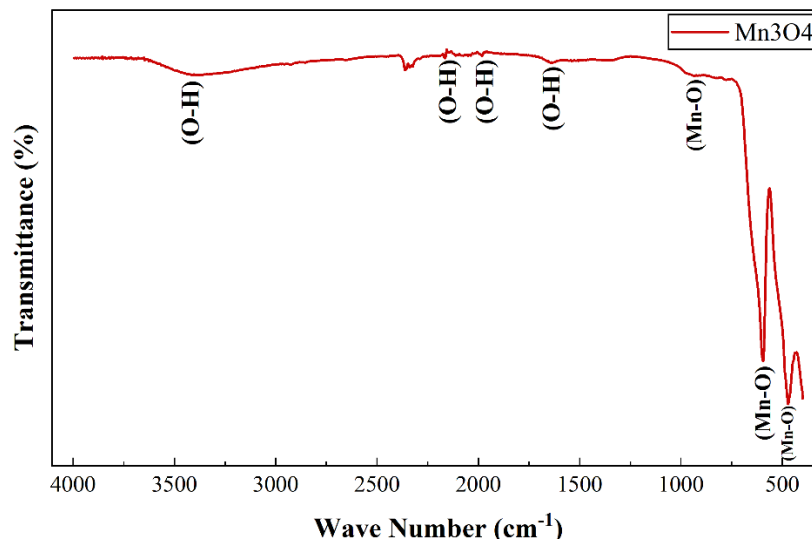
Pada *wavenumber* 621,08 cm^{-1} menunjukkan ikatan C – H *bending*, *wavenumber* 725 cm^{-1} menunjukkan ikatan C – C *bending*, *wavenumber* 1112,93 cm^{-1} menunjukkan ikatan C – O *stretching* dari alkoksi (Singh, 2021). *Wavenumber* 1242,16 cm^{-1} menunjukkan karakteristik ikatan C – O dalam kelompok epoksi (Li et al, 2025). *Wavenumber* 1386,82 cm^{-1} menunjukkan ikatan O – H *bending* yang kuat pada gugus asam karboksilat (Mohamed et al, 2024). *Wavenumber* 1624,06 cm^{-1} menunjukkan ikatan C=C *stretching* yang merupakan struktur aromatik dari grafit yang tidak teroksidasi (Das et al, 2021). *Wavenumber* 2320,37 cm^{-1} dan 2353,16 menunjukkan ikatan O=C=O *stretching* dari CO₂ yang menandakan keberadaan gas CO₂ di dalam sampel (Singh, 2021). *Wavenumber* 2926,01 cm^{-1} menunjukkan ikatan C – H *stretching*, dan *wavenumber* 3442,94 cm^{-1} menunjukkan ikatan O – H *stretching* dari gugus karboksilat (Mohamed et al, 2024).

Hasil pengujian FTIR pada material rGO ditunjukkan pada **Gambar 4.5**. Spektrum FTIR dari material rGO menunjukkan beberapa puncak yang menghasilkan jenis ikatan yang berbeda. Pada *wavenumber* 661,58 cm^{-1} , 719,45 cm^{-1} , dan 812,03 cm^{-1} menunjukkan ikatan C – C *bending* yang sesuai dengan penelitian (Zamani & Tadjarodi, 2024) yaitu ikatan C – C *bending* berada pada rentang *wavenumber* 640-825 cm^{-1} . *Wavenumber* 1089,78 cm^{-1} menunjukkan ikatan C – O *stretching*. *Wavenumber* 1205,51 cm^{-1} menunjukkan ikatan C – O dari grup epoksi (Khan et al, 2024). *Wavenumber* 1386,82 cm^{-1} menunjukkan ikatan O – H yang menandakan masih adanya gugus fungsional oksigen yang tersisa pada permukaan rGO (Khan et al, 2024). *Wavenumber* 1629,85 cm^{-1} menunjukkan ikatan C=C yang menandakan keberadaan ikatan karbon rangkap dua karakteristik dari hibridisasi sp^2 pada rGO (Mohamed et al, 2024). *Wavenumber* 1724,36 cm^{-1} menunjukkan ikatan C=O yang menandakan keberadaan gugus karbonil (Khan et al, 2024). *Wavenumber* 2303,01 cm^{-1} menunjukkan ikatan O=C=O *stretching* dari CO₂ yang menandakan keberadaan gas CO₂ di dalam sampel (Singh, 2021). *Wavenumber* 3462,22 cm^{-1} menunjukkan ikatan O – H *stretching* yang muncul akibat proses deoksigenasi (Zamani & Tadjarodi, 2024). **Tabel 4.2** menyajikan daftar ikatan pada material GO dan rGO ketika dilakukan pengujian FTIR.

Tabel 4.2 Hasil pengujian FTIR pada material GO dan rGO

Sampel	<i>Wavenumbers</i> (cm^{-1})	Gugus Fungsi		Referensi
Graphene Oxide (GO)	621,08	C – H	<i>bending</i>	(Jihad et al, 2021)
	725,23	C – C	<i>bending</i>	(Zamani & Tadjarodi, 2024)
	1112,93	C – O	<i>stretching</i>	(Singh, 2021)
	1242,16	C – O		(Li et al, 2025)
	1386,82	O – H	<i>bending</i>	(Mohamed et al, 2024)
	1624,06	C=C	<i>stretching</i>	(Das et al, 2021)
	2320,37	O=C=O	<i>stretching</i>	(Singh, 2021)
	2353,16	O=C=O	<i>stretching</i>	(Singh, 2021)
	2926,01	C – H	<i>stretching</i>	(Das et al, 2021)
	3442,94	O – H	<i>stretching</i>	(Mohamed et al, 2024)
	661,58	C – C	<i>bending</i>	(Zamani & Tadjarodi, 2024)
	719,45	C – C	<i>bending</i>	

Reduced Graphene Oxide (rGO)	812,03	C – C	<i>bending</i>	
	1089,78	C – O	<i>stretching</i>	(Sharma et al, 2017)
	1205,51	C – O		(Khan et al, 2024)
	1386,82	O – H	<i>bending</i>	(Mohamed et al, 2024)
	1629,85	C=C	<i>stretching</i>	(Barros et al, 2023)
	1724,36	C=O	<i>stretching</i>	(Singh, 2021)
	2303,01	O=C=O	<i>stretching</i>	(Singh, 2021)
	3462,22	O – H	<i>stretching</i>	(Zamani & Tadjarodi, 2024)



Gambar 4.6 Hasil pengujian FTIR pada material Mn_3O_4

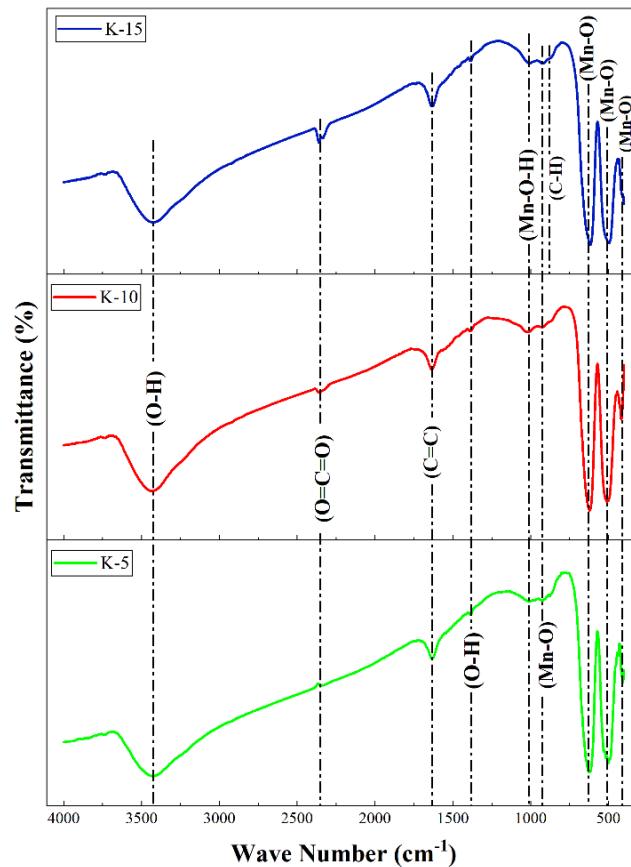
Hasil pengujian FTIR pada material Mn_3O_4 ditunjukkan pada **Gambar 4.6**. Spektrum FTIR dari material Mn_3O_4 menunjukkan beberapa puncak yang menghasilkan jenis ikatan yang berbeda. Pada *wavenumber* $471,58 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan ikatan Mn – O *bending* yang sesuai dengan penelitian (Lett et al, 2023) yaitu ikatan Mn – O *bending* berada pada sekitar *wavenumber* 485 cm^{-1} . *Wavenumber* $594,90 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan ikatan Mn – O *stretching* yang sesuai dengan situs tetrahedral Mn_3O_4 (Bakr et al, 2019). *Wavenumber* $933,70 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan ikatan Mn – O. Munculnya ikatan Mn – O menunjukkan bahwa sintesis Mn_3O_4 berhasil dilakukan. *Wavenumber* $1633,74 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan ikatan O – H yang menandakan adanya molekul air yang teradsorpsi di dalam material Mn_3O_4 (Sharma et al, 2024). *Wavenumber* $1981,44 \text{ cm}^{-1}$ dan $2164,58 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan ikatan O – H yang menandakan keberadaan ikatan hidrogen dalam material Mn_3O_4 . *Wavenumber* $2325,58 \text{ cm}^{-1}$ dan $2360,71 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan menunjukkan ikatan O=C=O dari CO_2 yang menandakan keberadaan gas CO_2 di dalam sampel (Li et al, 2023). *Wavenumber* $3414,26 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan ikatan O – H *stretching*. **Tabel 4.3** menyajikan daftar ikatan pada material Mn_3O_4 ketika dilakukan pengujian FTIR.

Tabel 4.3 Hasil pengujian FTIR pada material Mn_3O_4

Sampel	<i>Wavenumbers</i> (cm^{-1})	Gugus Fungsi		Referensi
Mn_3O_4	471,58	Mn – O	<i>bending</i>	(Lett et al, 2023)

	594,90	Mn – O	<i>stretching</i>	(Bakr et al, 2019)
	933,70	Mn – O		(Sharma et al, 2024)
	1633,74	O – H	<i>bending</i>	
	1981,44	O – H		(Hussain et al, 2024)
	2164,58	O – H		
	2325,24	O=C=O		(Li et al, 2023)
	2360,71	O=C=O		
	3414,26	O – H	<i>stretching</i>	(Perachiselvi et al, 2020)

Hasil pengujian FTIR pada material komposit rGO/Mn₃O₄ ditunjukkan pada **Gambar 4.7**. Spektrum FTIR dari material rGO/Mn₃O₄ menunjukkan beberapa puncak yang menghasilkan jenis ikatan yang berbeda. Pada material komposit K-5, *wavenumber* 406,98 cm⁻¹ dan 501,49 cm⁻¹ menunjukkan ikatan Mn – O *bending*. *Wavenumber* 624,94 cm⁻¹ menunjukkan ikatan Mn – O *stretching* yang menunjukkan situs tetrahedral Mn₃O₄, *wavenumber* 925,83 cm⁻¹ menunjukkan ikatan Mn – O, *wavenumber* 1006,84 cm⁻¹ menunjukkan ikatan Mn – O – H, *wavenumber* 1384,89 cm⁻¹ menunjukkan ikatan O – H, *wavenumber* 1637,56 cm⁻¹ menunjukkan ikatan C=C *stretching*, *wavenumber* 2345,44 cm⁻¹ menunjukkan ikatan O=C=O, dan *wavenumber* 3421,71 cm⁻¹ menunjukkan ikatan O – H *stretching*.



Gambar 4.7 Hasil pengujian FTIR pada komposit rGO/Mn₃O₄

Pada material komposit K-10, *wavenumber* 418,55 cm^{-1} dan 503,42 cm^{-1} menunjukkan ikatan Mn – O *bending*. *Wavenumber* 621,08 cm^{-1} menunjukkan ikatan Mn – O *stretching* yang menunjukkan situs tetrahedral Mn_3O_4 , *wavenumber* 925,83 cm^{-1} menunjukkan ikatan Mn – O, *wavenumber* 1024,20 cm^{-1} menunjukkan ikatan Mn – O – H, *wavenumber* 1386,82 cm^{-1} menunjukkan ikatan O – H, *wavenumber* 1633,71 cm^{-1} menunjukkan ikatan C=C *stretching*, *wavenumber* 2357,01 cm^{-1} menunjukkan ikatan O=C=O, dan *wavenumber* 3429,43 cm^{-1} menunjukkan ikatan O – H *stretching*.

Hasil pengujian FTIR pada material komposit K-15 ditunjukkan pada **Gambar 4.7**. Pada material komposit K-15, *wavenumber* 416,62 cm^{-1} dan 493,78 cm^{-1} menunjukkan ikatan Mn – O *bending*. *Wavenumber* 615,29 cm^{-1} menunjukkan ikatan Mn – O *stretching* yang menunjukkan situs tetrahedral Mn_3O_4 . *Wavenumber* 883,40 cm^{-1} menunjukkan ikatan C – H *stretching*, *wavenumber* 921,97 cm^{-1} menunjukkan ikatan Mn – O, *wavenumber* 1006,84 cm^{-1} menunjukkan ikatan Mn – O – H, *wavenumber* 1384,89 cm^{-1} menunjukkan ikatan O – H, *wavenumber* 1639,49 cm^{-1} menunjukkan ikatan C=C *stretching*, *wavenumber* 2360,87 cm^{-1} menunjukkan ikatan O=C=O, dan *wavenumber* 3423,63 cm^{-1} menunjukkan ikatan O – H *stretching*. **Tabel 4.4** menyajikan daftar ikatan pada material rGO/ Mn_3O_4 ketika dilakukan pengujian FTIR.

Tabel 4.4 Hasil pengujian FTIR pada komposit rGO/ Mn_3O_4

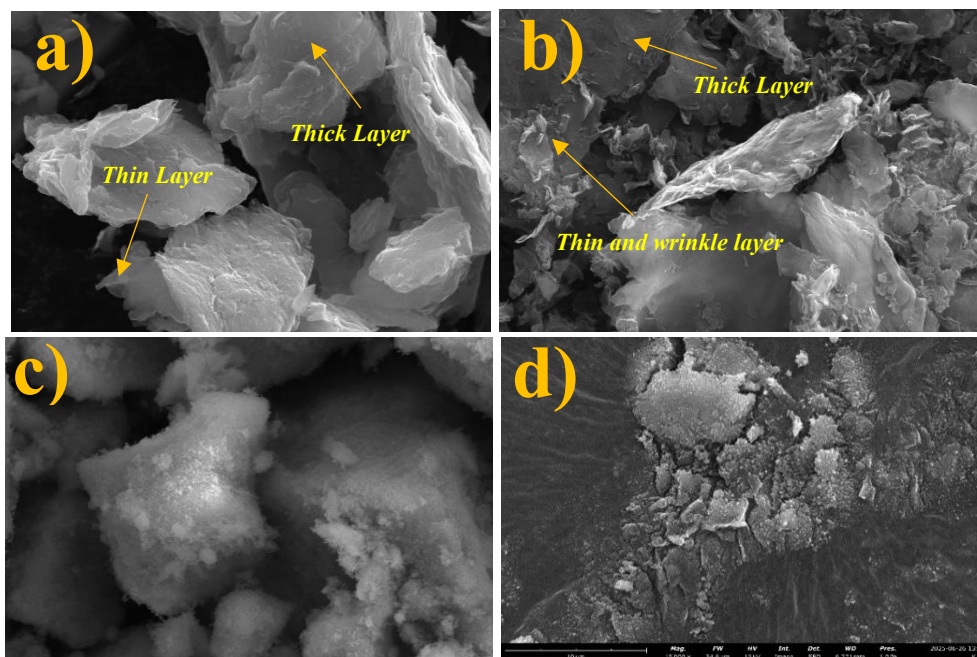
Sampel	Wavenumbers (cm^{-1})	Gugus Fungsi		Referensi
Komposit rGO/ Mn_3O_4 5 menit (K-5)	406,98	Mn – O	<i>bending</i>	(Lett et al, 2023)
	501,49	Mn – O	<i>stretching</i>	(Bakr et al, 2019)
	624,94	Mn-O	<i>stretching</i>	(Zhang et al, 2014)
	925,83	Mn – O		(Sharma et al, 2024)
	1006,84	Mn – O – H		(Kishore et al, 2025)
	1384,89	O – H	<i>bending</i>	(Mohamed et al, 2024)
	1637,56	C=C	<i>stretching</i>	(Barros et al, 2023)
	2345,44	O=C=O		(Li et al, 2023)
Komposit rGO/ Mn_3O_4 10 menit (K-10)	3421,72	O – H	<i>stretching</i>	(Perachiselvi et al, 2020)
	418,55	Mn-O	<i>bending</i>	(Lett et al, 2023)
	503,42	Mn-O	<i>stretching</i>	(Bakr et al, 2019)
	621,08	Mn-O	<i>stretching</i>	(Zhang et al, 2014)
	925,83	Mn – O		(Sharma et al, 2024)
	1024,20	Mn – O – H		(Kishore et al, 2025)
	1386,82	O – H	<i>bending</i>	(Mohamed et al, 2024)
	1633,71	C=C	<i>stretching</i>	(Barros et al, 2023)
	2357,01	O=C=O		(Li et al, 2023)
	3429,43	O – H	<i>stretching</i>	(Perachiselvi et al, 2020)

Komposit rGO/Mn ₃ O ₄ 15 menit (K-15)	416,62	Mn-O	<i>bending</i>	(Lett et al, 2023)
	493,78	Mn-O	<i>bending</i>	(Lett et al, 2023)
	615,29	Mn-O	<i>stretching</i>	(Zhang et al, 2014)
	883,40	C – H	<i>stretching</i>	(Supriyanto et al, 2018)
	921,97	Mn – O		(Sharma et al, 2024)
	1006,84	Mn – O – H		(Kishore et al, 2025)
	1384,89	O – H	<i>bending</i>	(Mohamed et al, 2024)
	1639,49	C=C	<i>stretching</i>	(Barros et al, 2023)
	2360,87	O=C=O		(Li et al, 2023)
	3423,65	O – H	<i>stretching</i>	(Perachiselvi et al, 2020)

Hasil pengujian FTIR menunjukkan bahwa material komposit rGO/Mn₃O₄ memiliki ikatan C=C *stretching*, O – H *stretching bending*, dan Mn – O *bending stretching* yang menunjukkan bahwa sintesis komposit rGO/Mn₃O₄ berhasil dilakukan.

4.4 Hasil Pengujian *Scanning Electron Microscope (SEM)* dan *Energy Dispersive Spectroscopy(EDS)*

Pengujian SEM-EDS digunakan untuk menganalisis morfologi sampel dan untuk mengidentifikasi unsur-unsur yang terkandung didalam sampel. Pada penelitian ini, pengujian SEM-EDS dilakukan pada sampel GO (*Graphene Oxide*), rGO (*Reduced Graphene Oxide*), Mn₃O₄ (*Trimanganese Tetraoxide*), dan komposit rGO/ Mn₃O₄ dengan menggunakan perbesaran 5.000x seperti pada **Gambar 4.8**



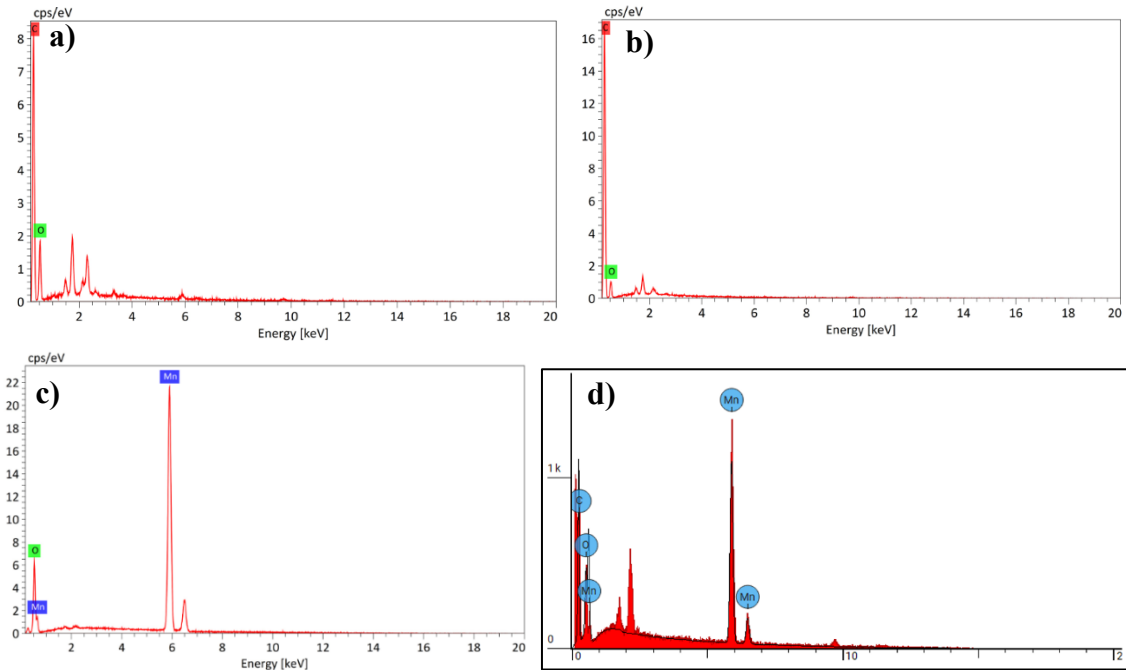
Gambar 4.8 Hasil pengujian SEM dengan perbesaran 15.000x pada sampel (a) GO, (b) rGO, (c) Mn₃O₄, dan (d) Komposit rGO/ Mn₃O₄ 15 menit (K-15)

Pada **Gambar 4.8 (a)** ditunjukkan hasil pengujian SEM pada sampel GO, terlihat bahwa material GO memiliki morfologi berupa lembaran yang saling menumpuk, yang menunjukkan bahwa proses pengelupasan grafit telah terjadi (Adotey et al, 2025). Dibandingkan dengan **Gambar 2.14**, grafit memiliki morfologi yang lebih tebal daripada GO. Pada penelitian ini, GO masih terlihat memiliki ketebalan yang tinggi dikarenakan proses oksidasi grafit yang tidak sempurna. Pada tepi lembaran GO, ketebalan lebih tinggi dikarenakan sebagian besar gugus fungsi oksigen terikat pada tepi lembaran GO (Alam et al, 2017).

Pada **Gambar 4.8 (b)** menunjukkan hasil pengujian SEM pada material rGO, pada gambar tersebut terlihat bahwa material rGO memiliki morfologi seperti lembaran yang tergulung dan terlipat. Lembaran yang terlipat ini kemungkinan terjadi karena adanya gaya Van der Waals yang lemah pada tepi lembaran GO tereduksi (Sharma et al, 2017). Lembaran yang terlihat keriting dan terlipat menunjukkan bahwa pada material rGO terdapat lebih banyak cacat struktural yang diakibatkan oleh penghilangan gugus fungsi oksigen. Selain itu, terlihat adanya lembaran yang masih tebal, menandakan bahwa proses reduksi GO menjadi rGO belum sempurna. Sifat hidrofilisitas pada lembaran rGO menurun dikarenakan proses reduksi yang menghilangkan sebagian gugus fungsi (Kumari et al, 2024).

Pada **Gambar 4.8 (c)** terdapat hasil pengujian SEM pada material Mn_3O_4 . Berdasarkan hasil SEM, dapat diketahui bahwa material Mn_3O_4 memiliki morfologi berupa tetragonal yang sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Xue & Zhang, 2019). Selain bentuk tetragonal, pada material Mn_3O_4 juga terlihat adanya nano partikel yang saling teragregasi atau tumpang tindih untuk menghasilkan partikel yang berukuran lebih besar, partikel-partikel tersebut terdistribusi secara acak (Lett et al, 2023). Dimana tersebarnya nanopartikel Mn_3O_4 memiliki pengaruh signifikan terhadap kapasitansi spesifik (Yewale et al, 2022).

Pada **Gambar 4.8 (d)**, terdapat hasil pengujian SEM sampel K-15. Berdasarkan hasil pengujian SEM, terlihat adanya morfologi berbentuk lembaran-lembaran yang menunjukkan bahwa terdapat material rGO dalam komposit tersebut. Sedangkan material Mn_3O_4 pada hasil SEM tersebut ditunjukkan oleh partikel yang lebih homogen dan terdeaglomerasi (Cuellar-Herrera et al, 2024). Partikel Mn_3O_4 terdeposit pada permukaan lembaran rGO. Bahkan, permukaan lembaran rGO hampir seluruhnya tertutup oleh partikel Mn_3O_4 (Aghazadeh, 2018). Penambahan rGO ke dalam material akan mengurangi aglomerasi dari partikel Mn_3O_4 (Shahid et al, 2022). Hal ini terjadi karena adanya ikatan kuat antara Mn_3O_4 dan rGO yang fleksibel, sehingga akan membatasi pertumbuhan dan mencegah terjadinya penggumpalan partikel Mn_3O_4 (Li et al, 2013).



Gambar 4.9 Hasil pengujian EDS pada sampel (a) GO, (b) rGO, (c) Mn_3O_4 , dan (d) Komposit rGO/ Mn_3O_4 15 menit (K-15)

Tabel 4.5 Persentase unsur pada pengujian EDS material GO, rGO, Mn_3O_4 , dan Komposit rGO/ Mn_3O_4 15 menit (K-15)

Sampel	Unsur	Wt%	At%
Graphene Oxide (GO)	Karbon (C)	63,38	69,75
	Oksigen (O)	36,62	30,25
Reduced Graphene Oxide (rGO)	Karbon (C)	81,43	85,38
	Oksigen (O)	18,57	14,62
Mn_3O_4	Mangan (Mn)	87,84	67,79
	Oksigen (O)	12,16	32,21
Komposit Mn_3O_4 /rGO 15 menit (K-15)	Karbon (C)	29,2	62,887
	Oksigen (O)	3,3	5,335
	Mangan (Mn)	67,5	31,779

Hasil pengujian EDS pada sampel GO dapat dilihat pada **Gambar 4.9 (a)** dan **Tabel 4.5** diatas. Berdasarkan hasil pengujian EDS, dapat diketahui unsur-unsur yang terkandung di dalam material GO adalah unsur karbon (C) dan oksigen (O). Unsur C yang terkandung di dalam material GO wt% sebesar 63,38% dan nilai atomik sebesar 69,75%. Sedangkan unsur oksigen (O) yang terkandung di dalam material GO memiliki wt% sebesar 36,62% dengan nilai atomik sebesar 30,25%. Hasil pengujian EDS pada material GO ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Naidoo et al, 2025) yaitu material GO mengandung unsur C sebesar 57,65% dan unsur O sebesar 42,35%.

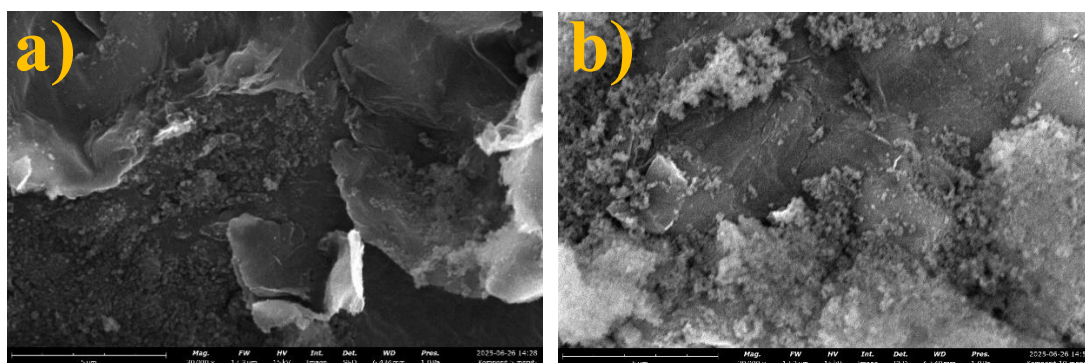
Hasil pengujian EDS pada sampel GO dapat dilihat pada **Gambar 4.9 (b)** dan **Tabel 4.5** diatas. Berdasarkan hasil pengujian EDS, dapat diketahui unsur-unsur yang terkandung di dalam material rGO adalah unsur karbon (C) dan oksigen (O). Unsur C yang terkandung di

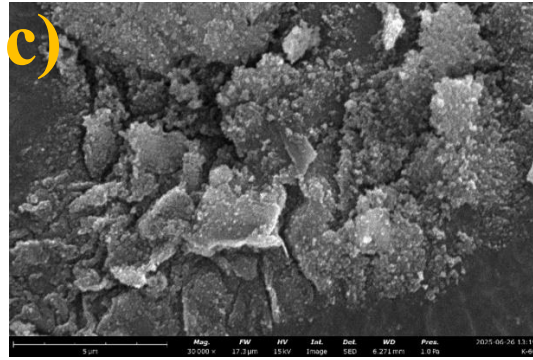
dalam material rGO wt% sebesar 81,43% dan nilai atomik sebesar 85,38%. Sedangkan unsur oksigen (O) yang terkandung di dalam material rGO memiliki wt% sebesar 18,57% dengan nilai atomik sebesar 14,62%. Hasil pengujian EDS pada material rGO ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Naidoo et al, 2025) yaitu material rGO mengandung unsur C sebesar 82,28% dan unsur O sebesar 17,72%.

Kehadiran unsur karbon (C) dan oksigen (O) dalam jumlah besar pada material GO dan rGO menandakan bahwa kedua unsur tersebut merupakan unsur utama dalam material GO dan rGO. Sementara itu, unsur-unsur lain yang muncul hanya dalam jumlah kecil dapat diabaikan karena unsur tersebut kemungkinan besar berasal dari sisa pengotor atau prekursor selama proses sintesis. Jumlah unsur oksigen (O) pada material rGO lebih sedikit daripada dalam material GO, hal ini disebabkan karena adanya proses reduksi yang akan menghilangkan sebagian gugus fungsi oksigen pada material (Naidoo et al, 2025). Berdasarkan **Gambar 4.9 (a)**, ditunjukkan adanya puncak yang lumayan tinggi di sekitar energi 1,8 – 2,2 keV, namun puncak tersebut dalam penelitian ini tidak dianalisis karena pada hasil EDX GO dan rGO hanya difokuskan untuk menganalisis unsur karbon dan oksigennya saja.

Berdasarkan hasil pengujian EDS pada **Gambar 4.9 (c)** dan **Tabel 4.5**, analisis EDS pada material Mn_3O_4 menunjukkan bahwa unsur utama yang terkandung dalam material Mn_3O_4 merupakan unsur mangan (Mn) dan oksigen (O) yang ditandai oleh munculnya beberapa puncak tajam Mn dan O, dengan komposisi unsur Mn sebesar 87,84 wt% dan unsur O sebesar 12,16 wt% (Adeyemi et al, 2022). Komposisi unsur yang diperoleh sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Binjawhar et al, 2024) dengan komposisi unsur Mn sebesar 81,1 wt% dan unsur O sebesar 18,9 wt%.

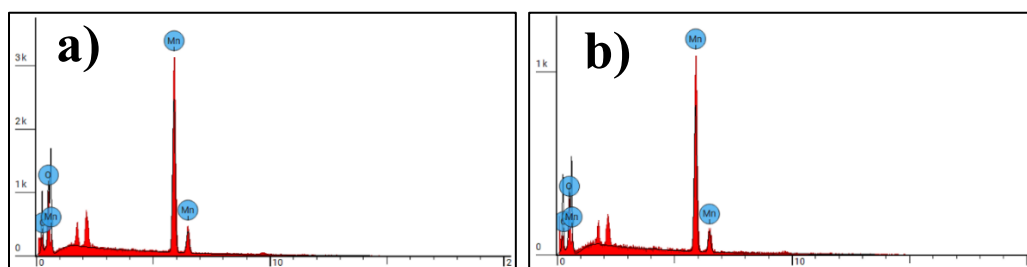
Berdasarkan hasil pengujian EDS pada **Gambar 4.9 (d)** dan **Tabel 4.5**, ditunjukkan bahwa material komposit memiliki kandungan unsur karbon (C), oksigen (O), dan mangan (Mn). Keberadaan unsur C (karbon) menunjukkan bahwa material komposit tersebut mengandung rGO (Shahid et al, 2022). Komposit Mn_3O_4 /rGO 15 menit (K-15) mengandung unsur C sebesar 29,2 wt%, unsur O sebesar 3,3 wt% dan unsur Mn sebesar 67,5 wt %. Hasil EDS yang didapatkan pada penelitian ini, sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Shahid et al, 2022).

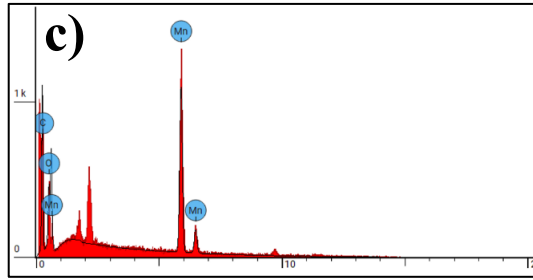




Gambar 4.10 Hasil pengujian SEM pada sampel komposit (a) K-5, (b) K-10, dan (c) K-15 pada perbesaran 30.000x

Pada **Gambar 4.10 (a), (b), dan (c)** terdapat hasil pengujian SEM sampel K-5, K-10, dan K-15. Berdasarkan hasil pengujian SEM, terlihat adanya morfologi berbentuk lembaran-lembaran yang menunjukkan bahwa terdapat material rGO dalam komposit tersebut. Sedangkan material Mn_3O_4 pada hasil SEM tersebut ditunjukkan oleh partikel yang lebih homogen dan terdeaglomerasi (Cuellar-Herrera et al, 2024). Partikel Mn_3O_4 terdeposit pada permukaan lembaran rGO. Bahkan, permukaan lembaran rGO hampir seluruhnya tertutup oleh partikel Mn_3O_4 (Aghazadeh, 2018). Berdasarkan **Gambar 4.10**, ditunjukkan bahwa terdapat interaksi yang erat antara partikel Mn_3O_4 dengan lembaran rGO. Lembaran rGO memungkinkan transpor elektron cepat dari matriks rGO ke nanopartikel Mn_3O_4 (Li et al, 2013). Meskipun komposisi Mn_3O_4 lebih tinggi daripada rGO dalam komposit (3:1), Mn_3O_4 tetap berperan sebagai *filler* dikarenakan Mn_3O_4 terdispersi diatas permukaan lembaran rGO, hal ini sesuai dengan penelitian (Ayhan et al, 2016) dimana Mn_3O_4 tetap menjadi *filler* pada matriks rGO dengan menggunakan perbandingan komposisi yang sama seperti pada penelitian ini. Penambahan rGO ke dalam material akan mengurangi aglomerasi dari partikel Mn_3O_4 (Shahid et al, 2022). Hal ini terjadi karena adanya ikatan kuat antara Mn_3O_4 dan rGO yang fleksibel, sehingga akan membatasi pertumbuhan dan mencegah terjadinya penggumpalan partikel Mn_3O_4 (Li et al, 2013). Variasi waktu sintesis pada komposit menunjukkan bahwa semakin lama waktu yang digunakan, maka material komposit menunjukkan partikel yang lebih homogen (Cuellar-Herrera et al, 2024). Hal ini menyebabkan peningkatan laju transfer elektron pada komposit K-15, yang disebabkan oleh terbentuknya jalur konduktif yang lebih baik antara nanopartikel Mn_3O_4 lan lembaran rGO (Ayhan et al, 2016). Peningkatan laju transfer elektron dapat meningkatkan nilai kapasitansi spesifik karena resistansi antar elektroda-elektrolit menurun sehingga muatan listrik dapat disimpan dan dilepaskan lebih efisien.





Gambar 4.11 Hasil pengujian EDS pada komposit (a) K-15, (b) K-10, dan (c) K-15

Tabel 4.6 Persentase unsur C, O, dan Mn pada pengujian EDS material komposit

Sampel	Unsur	Wt%	At%
Komposit Mn ₃ O ₄ /rGO 5 menit (K-5)	Karbon (C)	16,2	44,594
	Oksigen (O)	3,4	7,025
	Mangan (Mn)	80,4	48,381
Komposit Mn ₃ O ₄ /rGO 10 menit (K-10)	Karbon (C)	19,8	50,042
	Oksigen (O)	4,2	7,968
	Mangan (Mn)	76	41,99
Komposit Mn ₃ O ₄ /rGO 15 menit (K-15)	Karbon (C)	29,2	62,887
	Oksigen (O)	3,3	5,335
	Mangan (Mn)	67,5	31,779

Berdasarkan hasil pengujian EDS pada **Gambar 4.11** dan **Tabel 4.6** ditunjukkan bahwa material komposit memiliki kandungan unsur karbon (C), oksigen (O), dan mangan (Mn). Keberadaan unsur C (karbon) menunjukkan bahwa material komposit tersebut mengandung rGO (Shahid et al, 2022). Pada **Gambar 4.11 (a)**, komposit Mn₃O₄/rGO 5 menit (K-5) mengandung unsur C sebesar 16,2 wt%, unsur O sebesar 3,4 wt% dan unsur Mn sebesar 80,4 wt %. Pada **Gambar 4.11 (b)**, komposit Mn₃O₄/rGO 10 menit (K-10) mengandung unsur C sebesar 19,8 wt%, unsur O sebesar 4,22 wt% dan unsur Mn sebesar 76 wt %. Sedangkan pada **Gambar 4.11 (c)**, komposit Mn₃O₄/rGO 15 menit (K-15) mengandung unsur C sebesar 29,2 wt%, unsur O sebesar 3,3 wt% dan unsur Mn sebesar 67,5 wt %. Hasil EDS yang didapatkan pada penelitian ini, sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Shahid et al, 2022). Berdasarkan **Tabel 4.6**, diketahui bahwa semakin lama waktu *microwave assisted hydrothermal*, maka kandungan karbon dalam komposit semakin meningkat. Semakin tinggi nilai karbon menyebabkan luas permukaan meningkat sehingga meningkatkan nilai kapasitansi spesifik dari material komposit (Irfan et al, 2024). Berdasarkan **Gambar 4.11 (c)**, ditunjukkan adanya puncak yang lumayan tinggi, namun puncak tersebut dalam penelitian ini tidak dianalisis karena pada hasil EDX material komposit Mn₃O₄/rGO hanya difokuskan untuk menganalisis unsur karbon, mangan, dan oksigennya saja.

4.5 Hasil Pengujian Brunauer Emmett Teller (BET)

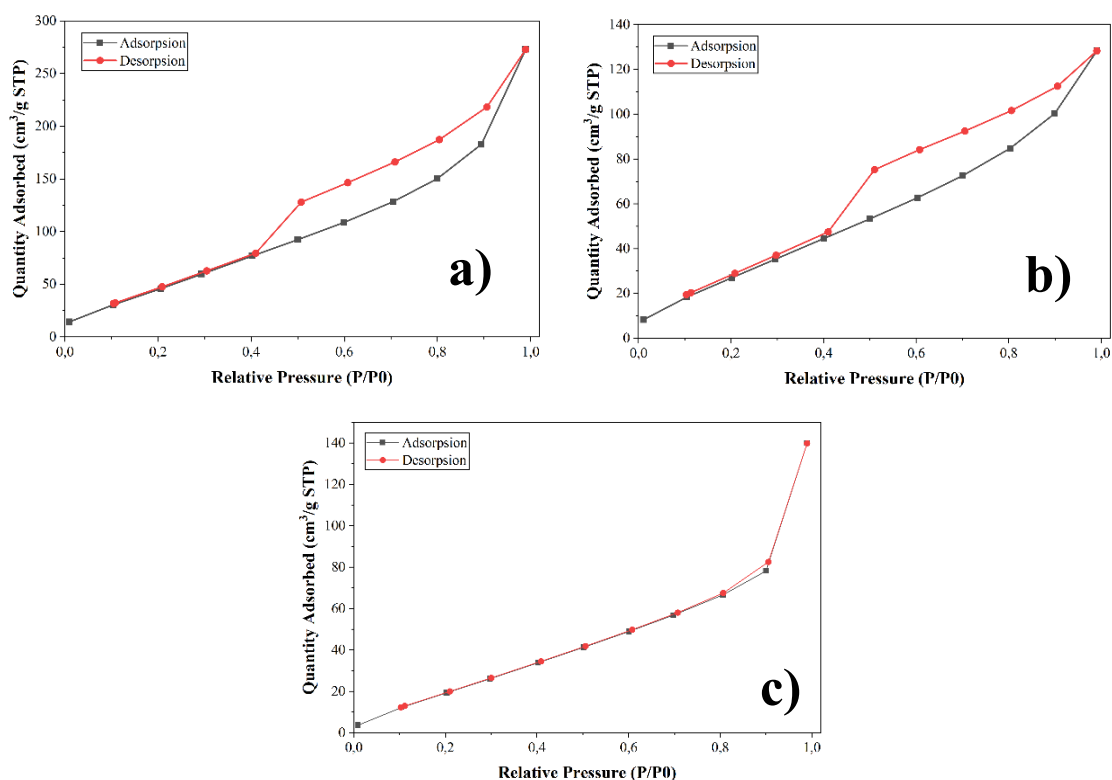
Pengujian BET digunakan untuk menganalisis luas permukaan spesifik dari material berpori pada sampel GO (*Graphene Oxide*), rGO (*Reduced Graphene Oxide*), dan Mn₃O₄

(Trimanganese Tetraoxide). Hasil pengujian BET pada material GO, rGO, dan Mn₃O₄ disajikan dalam Tabel 4.7 berikut.

Tabel 4.7 Hasil pengujian BET pada sampel GO, rGO, dan Mn₃O₄

Sampel	BET Surface Area (m ² /g)	Pore Volume (cm ³ /g STP)	Average Pore Diameter (Å)
Graphene Oxide (GO)	230,10	0,422	66,392
Reduced Graphene Oxide (rGO)	134,41	0,198	55,610
Mn ₃ O ₄	107,03	0,216	65,198

Tabel 4.7 menunjukkan hasil pengujian BET pada material GO, rGO, dan Mn₃O₄. Berdasarkan **Tabel 4.7**, GO memiliki luas permukaan spesifik sebesar 230,10 m²/g, rGO memiliki luas permukaan spesifik sebesar 134,41 m²/g. Pada hasil pengujian BET, terlihat adanya penurunan nilai luas permukaan spesifik dari GO ke rGO yaitu dari 230,10 m²/g menjadi 134,41 m²/g. Penurunan nilai luas permukaan spesifik ini terjadi karena adanya penghilangan gugus fungsi oksigen selama proses reduksi GO, yang mengurangi luas permukaan pada material (Saputra et al, 2025). Mn₃O₄ memiliki luas permukaan spesifik sebesar 107,03 m²/g, hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Shunmugapriya & Vijayakumar, 2022) yaitu nilai luas permukaan spesifiknya sebesar 93,449 m²/g.



Gambar 4.12 Grafik isothermal adsorpsi-desorpsi N₂ pada sampel (a) GO, (b) rGO, dan (c) Mn₃O₄

Berdasarkan hasil pada **Gambar 4.12** menunjukkan grafik isothermal adsorpsi-desorpsi pada material GO, rGO, dan Mn₃O₄. Sumbu horizontal pada grafik diatas menunjukkan rentang tekanan relatif, dimana P merupakan tekanan kesetimbangan dan P₀ merupakan tekanan uap jenuh gas yang teradsorpsi. Sedangkan sumbu vertikal menunjukkan jumlah gas yang teradsorpsi (dalam satuan cm³/g STP). Pada **Gambar 4.12 (a)**, menunjukkan grafik isothermal adsorpsi-desorpsi pada material GO. Tekanan dan jumlah gas yang teradsorpsi relatif meningkat pada $P/P_0 \sim 0 - 0,8$. Jumlah gas yang teradsorpsi meningkat secara signifikan pada $P/P_0 \sim 0,9 - 1,0$ hingga saat berada pada titik jenuh jumlah gas yang teradsorpsi mencapai 272,78 cm³/g STP.

Pada **Gambar 4.12 (b)**, menunjukkan grafik isothermal adsorpsi-desorpsi pada material rGO. Tekanan dan jumlah gas yang teradsorpsi relatif meningkat pada $P/P_0 \sim 0 - 0,8$. Jumlah gas yang teradsorpsi meningkat secara signifikan pada $P/P_0 \sim 0,9 - 1,0$ hingga saat berada pada titik jenuh jumlah gas yang teradsorpsi mencapai 128,28 cm³/g STP. Berdasarkan hasil yang diperoleh dari grafik isothermal adsorpsi-desorpsi tersebut, material GO mampu menyerap N₂ lebih banyak daripada material rGO. Hal ini disebabkan karena material GO memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi dan volume pori lebih besar daripada material rGO, sehingga material GO memiliki lebih banyak ruang untuk berikteraksi dengan molekul N₂. Pada **Gambar 4.12 (c)**, menunjukkan grafik isothermal adsorpsi-desorpsi pada material Mn₃O₄. Tekanan dan jumlah gas yang teradsorpsi relatif meningkat pada $P/P_0 \sim 0 - 0,8$. Jumlah gas yang teradsorpsi meningkat secara signifikan pada $P/P_0 \sim 0,8 - 1,0$ hingga saat berada pada titik jenuh jumlah gas yang teradsorpsi mencapai 139,86 cm³/g STP.

Pada **Gambar 4.12 (a)** dan **(b)**, grafik isothermal adsorpsi-desorpsi termasuk ke dalam tipe IV (a) dengan *hysteresis loop*. tipe H3 yang sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Saputra et al, 2025). Pada **Gambar 4.12 (c)**, grafik isothermal adsorpsi-desorpsi termasuk ke dalam tipe IV (a) dengan *hysteresis loop*. tipe H5 pada kisaran tekanan $P/P_0 = 0,8 - 0,89$ yang sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Mohanty et al, 2023).

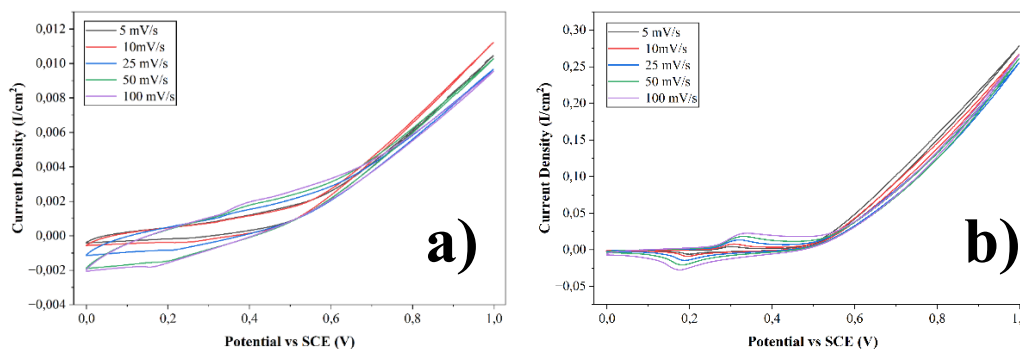
Hysteresis loop muncul ketika proses adsorpsi-desorpsi mencapai titik jenuh, namun jalur desorpsi tidak sama dengan jalur saat adsorpsi berlangsung. *Hysteresis loop* biasanya terjadi pada proses adsorpsi-desorpsi material berpori sedang (*mesoporous*). *Hysteresis loop* tipe H3 memiliki karakteristik penurunan yang tajam saat proses desorpsi. Penurunan biasanya terjadi dalam kisaran tekanan relatif yang sempit yaitu pada sekitar $P/P_0 = 0,4 - 0,5$, ketika menggunakan gas nitrogen pada temperatur 77 K. Selain itu, tipe H3 juga menunjukkan bahwa gas masih bisa teradsorpsi pada tekanan relatif tinggi ($P/P_0 = 0,9$), yang berarti tidak terdapat batas dalam proses adsorpsi pada tekanan tersebut. Tipe H3 ini tidak menutup sempurna, menunjukkan gas masih teradsorpsi dalam tekanan tinggi (Irwansyah et al, 2024).

Berdasarkan **Tabel 4.7** diatas, didapatkan data *pore volume* dan *pore diameter* menggunakan metode BJH (*Barrett-Joyner-Halenda*). Data yang digunakan untuk menentukan *pore volume* dan *pore diameter* merupakan data desorpsi, hal ini dikarenakan pada saat proses desorpsi dianggap lebih akurat karena menghindari efek-efek *hysteresis* atau ketidakstabilan seperti yang terjadi pada saat adsorpsi (Fu et al, 2021). Diketahui bahwa material GO memiliki *pore diameter* sebesar 66,392 - 73,349 Å. Pada material rGO, memiliki *pore diameter* sebesar 55,610 - 59,052 Å. Pada material Mn₃O₄, memiliki *pore diameter* sebesar 65,198 - 80,851 Å. Hasil *pore diameter* pada ketiga material tersebut menunjukkan bahwa material GO, rGO, dan

Mn₃O₄ termasuk material *mesoporous* dengan ukuran pori-pori yang berada pada rentang 20 – 500 Å (Celestine, 2024). Struktur *mesoporous* pada material rGO berperan penting dalam meningkatkan kinerja elektrokimia material, khususnya dalam proses transfer elektron (Saputra et al, 2025).

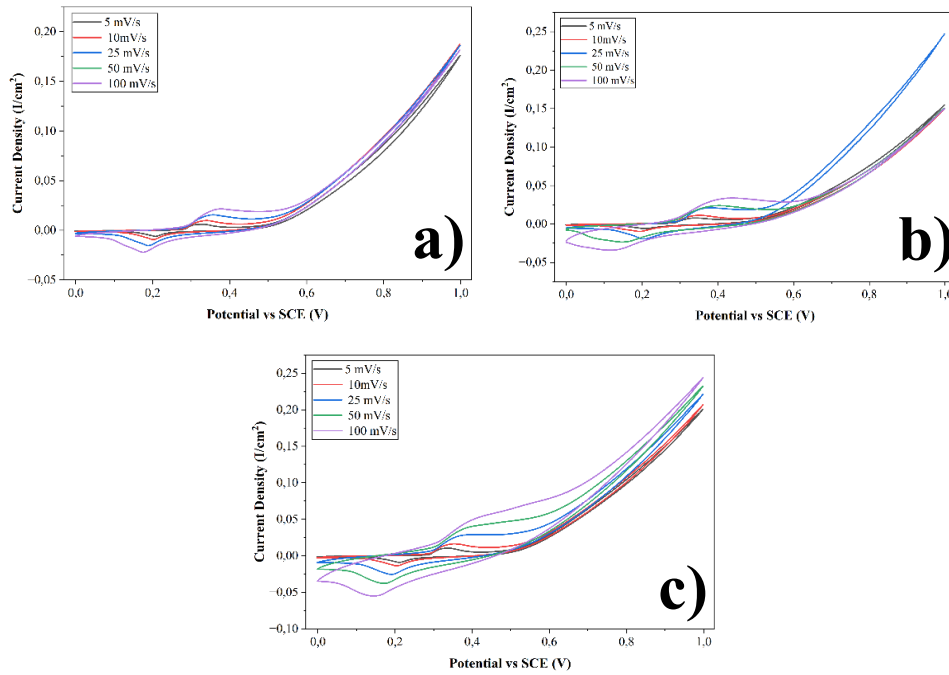
4.6 Hasil Pengujian *Cyclic Voltammetry* (CV)

Pengujian *cyclic voltammetry* (cv) digunakan untuk menentukan nilai kapasitansi spesifik dari elektroda rGO (*Reduced Graphene Oxide*), Mn₃O₄ (*Trimanganese Tetraoxide*), dan komposit rGO/ Mn₃O₄. Pengujian CV dilakukan dengan menggunakan elektrolit KOH 1M dan *reference electrode* berupa SCE (*Saturated Calomel Electrode*) untuk semua sampel. Material yang akan diuji didepositkan diatas *nickel foam*, kemudian dilakukan proses *drying* dan kompresi. Parameter pengujian CV pada penelitian ini menggunakan *potential window* 0 – 1 V dengan variasi *scan rate* 5 mV/s, 10 mV/s, 25 mV/s, 50 mV/s, dan 100 mV/s. Berikut merupakan hasil pengujian CV pada material elektroda rGO dan Mn₃O₄.



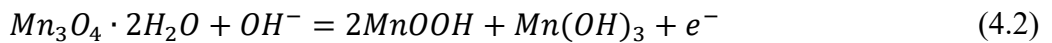
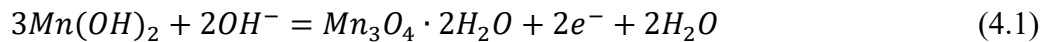
Gambar 4.13 Hasil pengujian CV pada elektroda material (a) rGO dan (b) Mn₃O₄

Hasil pengujian CV pada elektroda rGO dan Mn₃O₄ ditunjukkan pada **Gambar 4.13** diatas. Pada **Gambar 4.13 (a)** terlihat bahwa kurva CV pada material rGO berbentuk tidak simetris dan tidak mendekati bentuk persegi panjang. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Krishnan & Biju, 2021), dimana kurva CV dari material rGO akan terdistorsi lebih parah pada konsentrasi elektrolit KOH yang rendah dan akan menjadi simetris dan berbentuk persegi panjang pada konsentrasi KOH yang tinggi yaitu diatas 6M. Kurva CV yang berbentuk persegi panjang mengindikasikan bahwa rGO merupakan material yang bersifat EDLC (Krishnan & Biju, 2021). Pada **Gambar 4.13 (b)** terlihat bahwa kurva CV pada material Mn₃O₄ terdapat dua puncak reaksi redoks. Puncak tersebut berada pada potensial 0,35 V dan 0,2 V yang menunjukkan karakteristik *pseudocapacitance* (Sayyed et al, 2021). Hasil pengujian CV pada material elektroda Mn₃O₄ memiliki kesamaan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Yewale et al, 2022) yaitu pengujian CV pada material elektroda Mn₃O₄ menggunakan elektrolit berupa KOH dan hasil pengujian menunjukkan adanya 2 puncak reaksi redoks.



Gambar 4.14 Hasil pengujian CV pada elektroda material komposit (a) K-5, (b) K-10, dan (c) K-15

Hasil pengujian CV pada elektroda komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ (K-5, K-10, dan K-15) dapat dilihat pada **Gambar 4.14** diatas. Pengujian CV dilakukan dengan menggunakan elektrolit KOH 1M dengan *potential window* 0 – 1 V. Pada **Gambar 4.14**, menunjukkan dua puncak kuat yang terkait dengan reaksi reduksi-oksidasi yang masing-masing muncul di sekitar 0,4 dan 0,2. Kemunculan puncak redoks ini menandakan bahwa kapasitas utama berasal dari *pseudocapacitance* yang dihasilkan oleh reaksi redoks *reversible* dari ion $\text{Mn}^{2+}/\text{Mn}^{3+}$ (Zhang et al, 2022). Bentuk kurva CV simetris terhadap titik asal pada *scan rate* yang berbeda menunjukkan bahwa proses elektrokimia pada elektroda berlangsung secara *reversible*, baik saat *charging* maupun *discharging* (Gangwar et al, 2021). Mekanisme penyimpanan muatan secara *pseudocapacitative* pada elektroda $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ berlangsung melalui reaksi kimia yang ditunjukkan dalam **Persamaan (4.1)** dan **(4.2)** berikut.



Dibandingkan dengan Mn_3O_4 , elektroda material komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ 15 menit (K-15) memiliki luas area CV yang lebih besar. Hal ini menandakan kemampuan komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ 15 menit (K-15) dalam menyimpan energi dan mempercepat reaksi redoks lebih tinggi dibandingkan Mn_3O_4 (Ahamed & Kanagambal, 2024). Luas kurva CV bertambah seiring meningkatnya *scan rate* dikarenakan arus juga ikut meningkat sebanding dengan tegangan, sesuai dengan hukum Ohm (Gangwar et al, 2021). Pada *scan rate* yang tinggi, puncak redoks mengalami pergeseran ke arah potensial yang lebih positif dan negatif. Hal ini disebabkan oleh adanya polarisasi elektroda dan meningkatnya hambatan difusi ion ketika pemindaian berlangsung secara cepat (Abdel-Aal et al, 2019). Nilai kapasitansi spesifik dari material rGO,

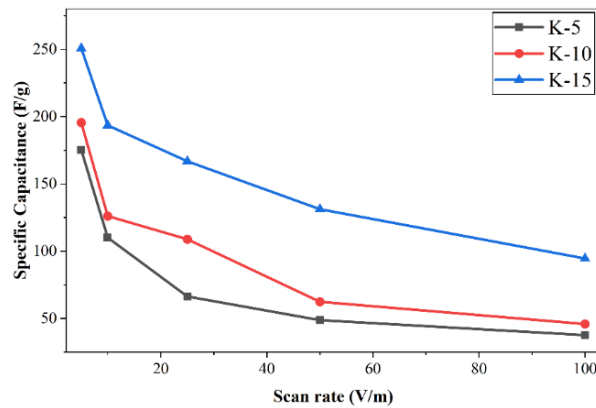
Mn₃O₄, dan elektroda komposit Mn₃O₄/rGO (K-5, K-10, dan K-15) dapat dilihat pada **Tabel 4.8** berikut.

Tabel 4.8 Nilai kapasitansi spesifik pada material rGO, Mn₃O₄, dan komposit Mn₃O₄/rGO

Sampel	Massa terdepresiasi (gram)	Scan rate (mV/s)	Specific Capacitance (F/g)	Specific Energy Density (Wh/Kg)	Specific Power Density
rGO	0,0012	5	38,82	5,39	97,12
		10	21,52	2,99	108
		25	13,41	1,86	168,55
		50	8,51	1,18	213,41
		100	4,85	0,67	243,90
Mn ₃ O ₄	0,0036	5	118,52	16,46	296,528
		10	70,18	9,75	351,62
		25	40,92	5,69	514,688
		50	27,72	3,85	695,539
		100	18,79	2,61	945,395
K-5	0,0021	5	175,20	24,33	438,33
		10	110,09	15,29	551,54
		25	66,34	9,21	833,82
		50	48,80	6,78	1223,9
		100	37,65	5,23	1893,6
K-10	0,0019	5	195,51	27,15	489,14
		10	126,07	17,51	631,75
		25	108,87	15,12	1368,4
		50	62,41	8,67	1565,7
		100	45,90	6,37	2308,7
K-15	0,0018	5	250,73	34,82	627,29
		10	193,47	26,87	969,53
		25	166,77	23,16	2095,6
		50	131,19	18,22	3292,2
		100	94,59	13,14	4758

Berdasarkan **Gambar 4.15**, terdapat grafik hubungan antara *scan rate* yang digunakan dalam pengujian CV dengan nilai kapasitansi spesifik dari setiap material elektroda komposit. Berdasarkan **Gambar 4.15**, diketahui bahwa semakin besar *scan rate* yang digunakan, maka kapasitansi spesifik yang dihasilkan akan semakin kecil. Hal ini disebabkan pada *scan rate* yang tinggi, ion-ion dari elektrolit hanya mampu menembus permukaan luas elektroda dan tidak dapat mencapai pori-pori terdalam, sehingga reaksi redoks yang terjadi terbatas dan kapasitansi spesifik menurun. Sebaliknya, pada *scan rate* rendah ion-ion elektrolit memiliki cukup waktu untuk menjangkau lebih banyak reaksi *insertion/deinsertion* dan adsorpsi/desorpsi permukaan

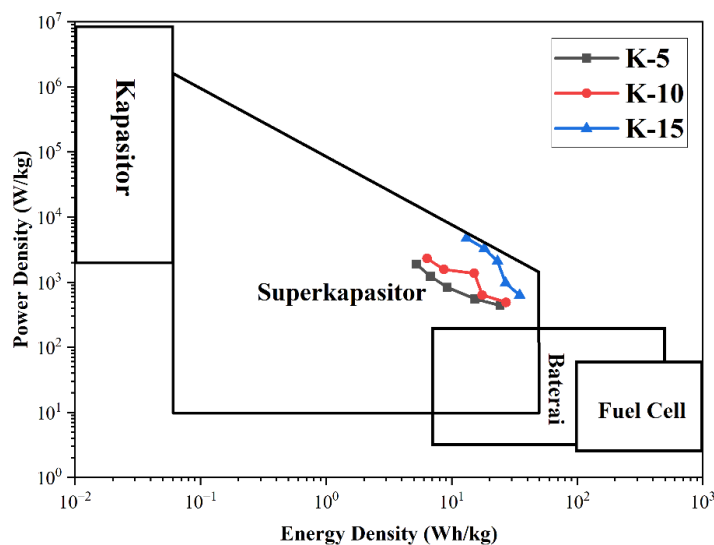
kation elektrolit, karena durasi yang lama memungkinkan penyisipan atom yang ada lebih baik, sehingga kapasitansi spesifik yang lebih tinggi diperoleh (Cuéllar-Herrera et al, 2021).



Gambar 4.15 Kapasitansi spesifik elektroda komposit pada setiap *scan rate*

Berdasarkan **Tabel 4.8**, kapasitansi spesifik tertinggi diperoleh pada material elektroda komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ dengan variasi waktu 15 menit (K-15) yaitu sebesar 257,89 F/g, lalu disusul dengan material elektroda komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ dengan variasi waktu 10 menit (K-10) yaitu sebesar 212,27 F/g, dan terakhir material elektroda komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ dengan variasi waktu 5 menit (K-5) yaitu sebesar 210,24 F/g. Dari hasil tersebut, dapat dilihat bahwa semakin lama waktu *microwave assisted hydrothermal* yang digunakan, maka nilai kapasitansi spesifik yang dihasilkan semakin tinggi. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Zhang et al, 2014), dimana semakin lama waktu *microwave assisted hydrothermal* yang digunakan, maka nilai kapasitansi spesifik yang dihasilkan semakin tinggi.

Dari hasil perhitungan *specific power density* dan *specific energy density* pada setiap elektroda material komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ selanjutnya akan diplot pada Ragone plot untuk mengetahui apakah komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ termasuk ke dalam *hybrid supercapacitor*. Ragone plot dari material komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ pada setiap variasi waktu *microwave assisted hydrothermal* ditunjukkan pada **Gambar 4.16**.

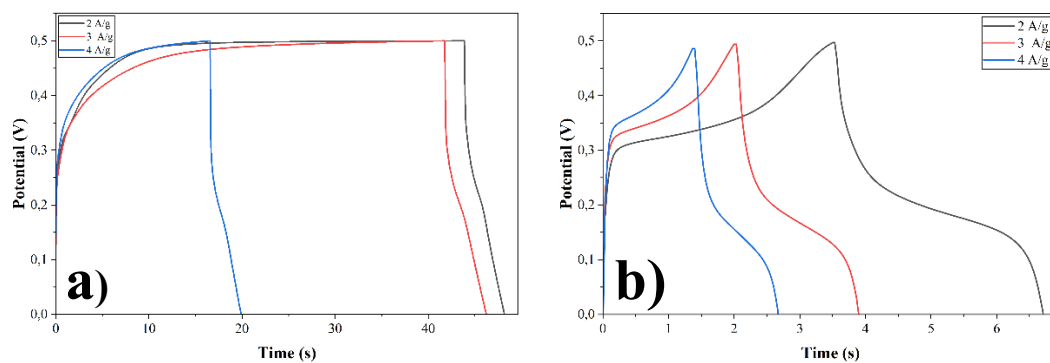


Gambar 4.16 Ragone plot elektroda komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$

Pada **Gambar 4.16** menunjukkan ragone plot dari elektroda komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ dengan variasi waktu 5 menit, 10 menit, dan 15 menit (K-5, K-10, dan K-15). Ragone plot tersebut menunjukkan hubungan antara *power density* dan *energy density* dari elektroda komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ serta menunjukkan spesifikasi elektroda material termasuk ke dalam *energy storage device* tertentu. Berdasarkan ragone plot tersebut mengindikasikan bahwa elektroda komposit K-5, K-10, dan K-15 berada pada daerah superkapasitor.

4.7 Hasil Pengujian Galvanostatic Charge-Discharge (GCD)

Pengujian *Galvanostatic Charge-Discharge* (GCD) dilakukan untuk menganalisis kemampuan penyimpanan energi dari material elektroda rGO (*Reduced Graphene Oxide*), Mn_3O_4 (*Trimanganese Tetraoxide*), dan komposit rGO/ Mn_3O_4 dengan melibatkan penerapan arus positif dan negatif atau *current density* secara konstan untuk *charging* dan *discharging* sistem dalam batas potensial dan jumlah siklus tertentu.

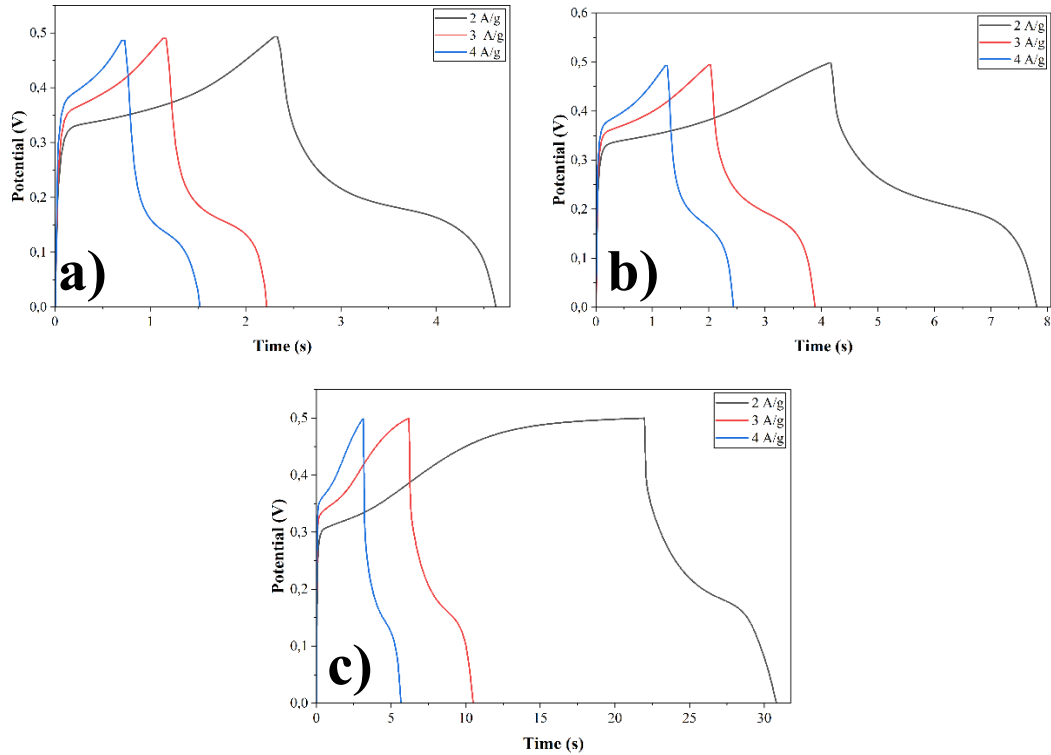


Gambar 4.17 Hasil pengujian GCD pada elektroda material (a) rGO dan (b) Mn_3O_4

Pada **Gambar 4.17** menunjukkan hasil pengujian GCD pada elektroda rGO dan Mn_3O_4 dengan menggunakan variasi *current density* sebesar 2 A/g, 3 A/g, dan 4 A/g. Pada **Gambar 4.17 (a)** kurva GCD pada material rGO berbentuk tidak linier, hal ini sesuai dengan hasil pengujian CV yang didapatkan. Selain itu, kurva GCD rGO yang tidak linear sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Krishnan & Biju, 2021) dimana pada konsentrasi elektrolit KOH kurang dari 6M, kurva GCD rGO memiliki bentuk seperti pada **Gambar 4.17 (a)**, dan ketika konsentrasi elektrolit KOH ditingkatkan hingga mencapai 6M, kurva GCD rGO semakin linear. Waktu *charge* yang dihasilkan pada masing-masing *current density* secara berturut-turut adalah 18,733 detik; 31,4 detik; dan 14,567 detik. Sedangkan waktu *discharge* yang dihasilkan pada masing-masing *current density* secara berturut-turut adalah 3,767 detik; 4,4 detik; dan 3,333 detik. Berdasarkan data yang diperoleh pada material rGO, waktu *discharge* menjadi lebih singkat. Hal ini berdampak pada penurunan nilai kapasitansi spesifik (Irfan et al, 2024).

Pada **Gambar 4.17 (b)** ditunjukkan grafik GCD berbentuk non-linier yang menunjukkan bahwa elektroda material Mn_3O_4 memiliki karakteristik *pseudocapacitive*. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Irfan et al, 2024), dimana ketidaklinieran kurva GCD selaras dengan hasil pengujian CV yang didapatkan. Waktu *charge* yang dihasilkan pada masing-masing *current density* secara berturut-turut adalah 3,533 detik; 2,033 detik; dan 1,4

detik. Sedangkan waktu *discharge* yang dihasilkan pada masing-masing *current density* secara berturut-turut adalah 3,2 detik; 1,867 detik; dan 1,3 detik.



Gambar 4.18 Hasil pengujian GCD pada elektroda material komposit rGO/Mn₃O₄ (K-5, K-10, dan K-15)

Pada **Gambar 4.18**, ditunjukkan hasil pengujian GCD pada elektroda komposit rGO/Mn₃O₄ dengan variasi waktu *microwave assisted hydrothermal* 5 menit, 10 menit, dan 15 menit dengan menggunakan variasi *current density* sebesar 2 A/g, 3 A/g, dan 4 A/g. Pada **Gambar 4.18** terlihat bahwa grafik GCD berbentuk non-linier yang menunjukkan bahwa elektroda material komposit rGO/Mn₃O₄ memiliki karakteristik *pseudocapacitive*. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Irfan et al, 2024), dimana ketidaklinieran kurva GCD selaras dengan hasil pengujian CV yang didapatkan. Pada **Gambar 4.18 (a)** ditunjukkan hasil pengujian GCD dari material komposit rGO/Mn₃O₄ 5 menit (K-5). Waktu *charge* yang dihasilkan pada masing-masing *current density* secara berturut-turut adalah 2,333 detik; 1,167 detik; dan 0,733 detik. Sedangkan waktu *discharge* yang dihasilkan pada masing-masing *current density* secara berturut-turut adalah 2,3 detik; 1,067 detik; dan 0,8 detik.

Pada **Gambar 4.18 (b)** ditunjukkan hasil pengujian GCD dari material komposit rGO/Mn₃O₄ 10 menit (K-10). Waktu *charge* yang dihasilkan pada masing-masing *current density* secara berturut-turut adalah 3,167 detik; 2,033 detik; dan 1,233 detik. Sedangkan waktu *discharge* yang dihasilkan pada masing-masing *current density* secara berturut-turut adalah 4,667 detik; 1,867 detik; dan 1,233 detik. Pada **Gambar 4.18 (c)** ditunjukkan hasil pengujian GCD dari material komposit rGO/Mn₃O₄ 15 menit (K-15). Waktu *charge* yang dihasilkan pada masing-masing *current density* secara berturut-turut adalah 21,967 detik; 5,9 detik; dan 3,133

detik. Sedangkan waktu *discharge* yang dihasilkan pada masing-masing *current density* secara berturut-turut adalah 8,867 detik; 4,633 detik; dan 2,533 detik. Analisis perhitungan kapasitansi spesifik dari pengujian GCD dapat dihitung menggunakan **Persamaan (3.9)**.

Tabel 4.9 Hasil perhitungan kapasitansi spesifik dari pengujian GCD material rGO, Mn₃O₄, dan komposit rGO/Mn₃O₄

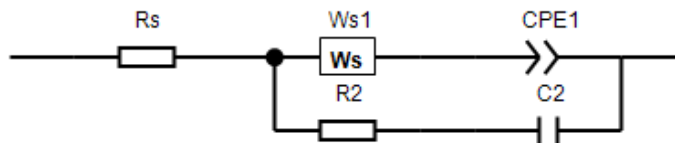
Elektroda	<i>Current Density</i> (A/g)	<i>Time Charge</i> (s)	<i>Time Discharge</i> (s)	<i>Specific Capacitance - Charge</i> (F/g)	<i>Specific Capacitance - Discharge</i> (F/g)
rGO	2	18,733	3,767	74,934	15,066
	3	31,4	4,4	188,4	26,4
	4	14,567	3,333	116,534	26,666
Mn ₃ O ₄	2	3,533	3,2	14,134	12,8
	3	2,033	1,867	12,2	11,2
	4	1,4	1,3	11,2	10,4
K-5	2	2,333	2,3	9,333	9,2
	3	1,167	1,067	7	6,4
	4	0,733	0,8	5,867	6,399
K-10	2	3,167	4,667	12,666	18,667
	3	2,033	1,867	12,2	11,2
	4	1,233	1,233	9,867	9,866
K-15	2	21,967	8,867	87,867	35,467
	3	5,9	4,633	35,4	27,8
	4	3,133	2,533	25,066	20,266

Berdasarkan hasil perhitungan pada **Tabel 4.9**, didapatkan hasil dimana semakin tinggi *current density* yang digunakan maka waktu *charge-discharge* juga semakin singkat. Hal ini disebabkan karena pada *current density* tinggi, hanya bagian permukaan material yang terlibat dalam proses difusi ion, sementara ion dari elektrolit tidak mampu mencapai bagian dalam material. Akibatnya, siklus *charging-discharging* berlangsung lebih cepat, yang menyebabkan penurunan nilai kapasitansi spesifik (C_s) (Irfan et al, 2024). Selain itu, semakin bertambahnya waktu *microwave assisted hybrothermal*, kapasitansi spesifik semakin meningkat. Nilai kapasitansi spesifik *charge-discharge* yang paling besar terdapat pada K-15 yaitu sebesar 87,867 F/g untuk *charging* dan 35,467 F/g untuk *discharging*. Mn₃O₄ yang bekerja melalui proses faradaik akan meningkatkan kapasitansi spesifik, jika luas permukaan komposit tidak terganggu. Namun, kapasitansi spesifik yang dihasilkan melalui pengujian GCD ini tergolong rendah. Hal ini mungkin disebabkan karena kandungan Mn₃O₄ yang lebih tinggi daripada rGO (3:1), sehingga cenderung menghasilkan struktur yang sulit diakses karena terjadinya *pore blocking*. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Fernández-Jiménez et al, 2024), dimana komposit rGO/ Mn₃O₄ dengan perbandingan komposisi rGO: Mn₃O₄ (4:1) memiliki kapasitansi spesifik paling tinggi.

4.8 Hasil Pengujian *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS)

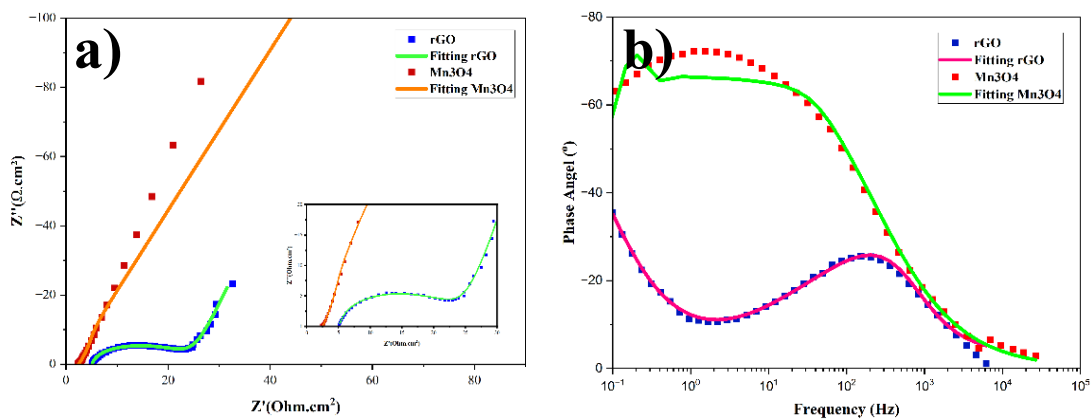
Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) dapat dimanfaatkan untuk menganalisis proses-proses seperti perpindahan massa, perpindahan muatan, dan difusi. Oleh karena itu, teknik ini mampu menunjukkan karakteristik intrinsik material maupun proses-proses tertentu yang berpengaruh terhadap konduktansi, resistensi, atau kapasitansi dari suatu sistem elektrokimia (Magar et al, 2021). Parameter yang digunakan pada pengujian EIS material rGO (*Reduced Graphene Oxide*), Mn_3O_4 (*Trimanganese Tetraoxide*), dan komposit rGO/ Mn_3O_4 adalah frekuensi 140 kHz – 0,01 Hz. Melalui pengujian EIS, didapatkan dua grafik utama yaitu *Nyquist plot* dan *Bode plot*. *Bode plot* menunjukkan hubungan antara frekuensi dan *phase angle*, sedangkan *Nyquist plot* menunjukkan nilai impedansi real (Z') dan impedansi imajiner (Z'') (Ratha & Samantara, 2018).

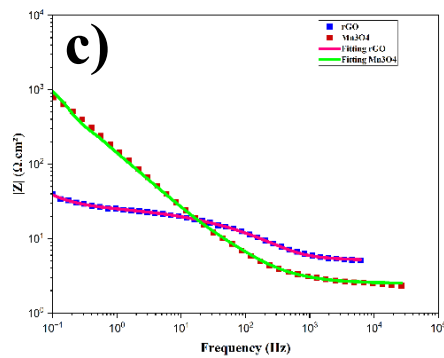
Penentuan nilai konduktivitas pada material rGO, Mn_3O_4 , dan komposit rGO/ Mn_3O_4 menggunakan *equivalent circuit* yang ditunjukkan pada **Gambar 4.19**. Rangkaian sirkuit dimulai ketika muncul resistensi dalam larutan elektrolit (R_1). Kemudian terjadi difusi ion elektrolit pada antarmuka elektroda-elektrolit (Ws_1) diikuti dengan adanya resistensi pada material (R_2). *Warburg* ditandai dengan kemiringan tajam yang terbentuk pada $\theta = 45^\circ$ dengan sumbu absis (sumbu x). Selanjutnya, terjadi proses penyimpanan muatan pada CPE1 dan C2. CPE1 pada gambar berfungsi sebagai kapasitor dan resistor, sedangkan C2 sebagai kapasitor.



Gambar 4.19 *Equivalent Circuit*

Nyquist plot dan *Bode plot* dari material rGO dan Mn_3O_4 ditunjukkan pada **Gambar 4.20** berikut.



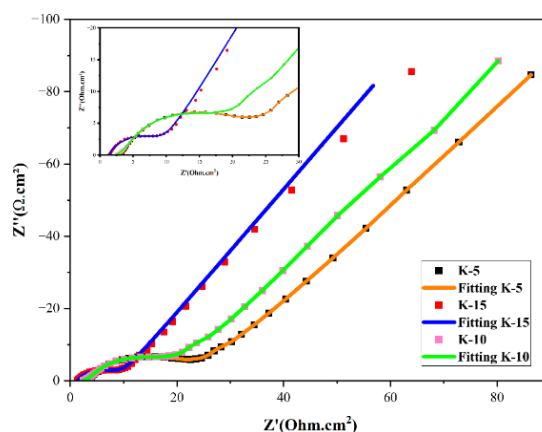


Gambar 4.20 Hasil pengujian EIS pada *raw material* rGO dan Mn₃O₄ (a) *Nyquist plot* , (b) *Bode plot frequency vs phase angle*, dan (c) *Bode plot frequency vs |Z|*

Berdasarkan **Gambar 4.20 (a)**, ditunjukkan bahwa material rGO membentuk *semi circle* pada wilayah frekuensi tinggi. Sedangkan material Mn₃O₄ tidak menunjukkan adanya bentuk *semi circle*. Setelah dilakukan *fitting*, didapatkan data resistensi elektrolit (Rs), resistansi *Warburg* (Ws), nilai CPE-P dan CPE-T, serta C2 dari material rGO dan Mn₃O₄. Nilai resistensi elektrolit (Rs) untuk rGO dan Mn₃O₄ secara berturut-turut yaitu sebesar 3,6769 Ω.cm² dan 2,4887 Ω.cm². Terdapat tiga jenis nilai resistansi *Warburg* yaitu Ws-R, Ws-T, dan Ws-P. Untuk elektroda material rGO masing-masing nilai resistansi *Warburg*-nya yaitu sebesar 22,094 Ω.cm²; 0,0033749 F; dan 0,2648. Untuk material Mn₃O₄, nilai resistansi *Warburg*-nya masing-masing yaitu sebesar 488,85 Ω.cm²; 2,713 F; dan 0,70201. Nilai CPE-P pada material rGO dan Mn₃O₄ berturut-turut yaitu sebesar 0,81428 dan 0,74582. Nilai CPE-T pada material rGO dan Mn₃O₄ berturut-turut yaitu sebesar 0,064854 F dan 0,0029932 F. Nilai C2 pada material rGO dan Mn₃O₄ berturut-turut yaitu sebesar 4,3917 x 10⁻⁵ F dan 8,1557 x 10⁻⁵ F.

Berdasarkan **Gambar 4.20 (b)**, ditunjukkan bahwa material rGO mencapai *phase angle* sebesar 35,452° dan Mn₃O₄ sebesar 47,0879°. Berdasarkan **Gambar 4.20 (c)**, didapatkan nilai |Z| untuk material rGO dan Mn₃O₄ berturut-turut sebesar 40,1153 Ω.cm² dan 2188,93 Ω.cm². Sehingga didapatkan nilai konduktivitas untuk material rGO dan Mn₃O₄ masing-masing sebesar 0,249 S/m dan 0,005 S/m.

Plot *Nyquist* dari komposit rGO/ Mn₃O₄ dengan variasi waktu 5 menit, 10 menit, dan 15 menit. Ditunjukkan pada **Gambar 4.21** berikut.



Gambar 4.21 *Nyquist plot* hasil pengujian EIS pada elektroda komposit rGO/ Mn₃O₄

Berdasarkan **Gambar 4.21**, plot *Nyquist* dari komposit rGO/ Mn₃O₄ dengan variasi waktu 5 menit, 10 menit, dan 15 menit memiliki bentuk setengah lingkaran atau *semi circle* pada frekuensi tinggi, dan garis yang miring pada frekuensi rendah. Diameter lingkaran yang lebih kecil pada plot *Nyquist* menunjukkan konduktivitas material yang lebih tinggi (Gangwar et al, 2021). Grafik miring pada $\theta = 45^\circ$ yang lebih pendek menunjukkan bahwa difusi ion lebih cepat dalam elektrolit ke antarmuka elektroda. Kurva berbentuk miring ini menunjukkan kualitas superkapasitor. Semakin vertikal kurva, semakin baik transpor ion dan semakin tinggi kinerja superkapasitor. Sudut mendekati $\theta = 90^\circ$ menunjukkan sifat kapasitif yang lebih tinggi (Zhang et al, 2014). Berdasarkan **Gambar 4.21** komposit rGO/ Mn₃O₄ 15 menit (K-15) memiliki grafik yang paling pendek dan ukuran *semi circle* paling kecil.

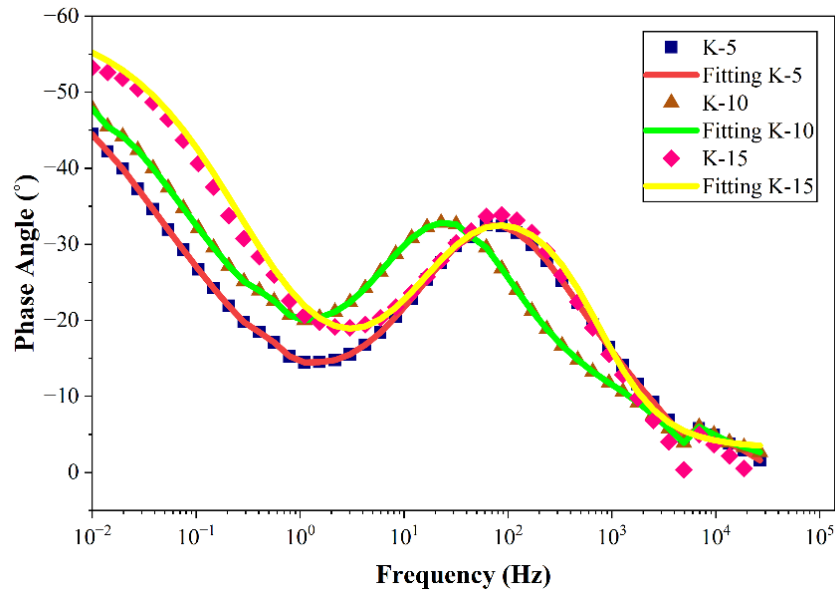
Berdasarkan hasil pengujian EIS pada material komposit rGO/ Mn₃O₄, dilakukan proses *fitting* seperti pada **Gambar 4.21**. Kurva hasil *fitting* yang dihasilkan menunjukkan bentuk kurva yang mirip dengan kurva hasil penelitian. Hal ini menunjukkan bahwa *equivalent circuit* yang digunakan sesuai untuk material elektroda komposit rGO/ Mn₃O₄. Berdasarkan hasil *fitting*, didapatkan nilai resistensi elektrolit (Rs), resistansi Warburg (Ws), nilai CPE-P dan CPE-T, serta C2 dari masing-masing elektroda komposit rGO/ Mn₃O₄. Nilai resistensi elektrolit (Rs) untuk elektroda komposit rGO/ Mn₃O₄ K-5, K-10, dan K-15 secara berturut-turut yaitu sebesar 2,651 $\Omega \cdot \text{cm}^2$, 2,3261 $\Omega \cdot \text{cm}^2$, dan 1,1589 $\Omega \cdot \text{cm}^2$. Terdapat tiga jenis nilai resistansi Warburg yaitu Ws-R, Ws-T, dan Ws-P. Untuk elektroda komposit K-5 masing-masing nilai resistansi Warburg-nya yaitu sebesar 19,301 $\Omega \cdot \text{cm}^2$; 0,029009 F; dan 0,36965. Untuk elektroda komposit K-10 masing-masing nilai resistansi Warburg-nya yaitu sebesar 14,589 $\Omega \cdot \text{cm}^2$; 0,05672 F; dan 0,42237. Untuk elektroda komposit K-15 masing-masing nilai resistansi Warburg-nya yaitu sebesar 7,9892 $\Omega \cdot \text{cm}^2$; 0,025584 F; dan 0,35135.

Nilai CPE-T berkisar antara 0-1, dimana ketika nilai CPE-P mendekati 1 maka material memiliki karakteristik kapasitor sempurna, sedangkan ketika CPE-P mendekati 0 maka material memiliki karakteristik sebagai resistor (Socorro-Perdomo et al, 2021). Nilai CPE-P pada elektroda komposit K-5, K-10, dan K15 secara berturut-turut yaitu sebesar 0,58803; 0,59271; dan 0,66408. Berdasarkan nilai CPE-P pada ketiga material komposit tersebut, dapat diketahui bahwa ketiga elektroda tersebut mendekati karakteristik kapasitor sempurna. Selain itu, semakin bertambahnya waktu *microwave assisted hydrothermal* maka nilai CPE-P akan semakin meningkat. Nilai CPE-T pada elektroda komposit K-5, K-10, dan K-15 secara berturut-turut yaitu sebesar 0,051728 F; 0,049198 F; dan 0,66279 F. Nilai C2 pada elektroda komposit K-5, K-10, dan K-15 secara berturut-turut yaitu sebesar $5,535 \times 10^{-5}$ F; $7,2372 \times 10^{-5}$ F; dan 0,00017529 F. Pada **Tabel 4.10** disajikan hasil *fitting* dari masing-masing elektroda komposit rGO/ Mn₃O₄.

Tabel 4 10 Hasil *fitting* elektroda komposit rGO/Mn₃O₄ (K-5, K-10, dan K-15)

Sampel	Komponen	Hasil
rGO	Rs ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	3,6769
	Ws-R ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	22,094
	Ws-T (F)	0,033749
	Ws-P	0,2648

Sampel	Komponen	Hasil
	CPE-T (F)	0,064854
	CPE-P	0,81428
	R2 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	2,9618
	C2 (F)	$4,3917 \times 10^{-5}$
Mn ₃ O ₄	Rs ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	2,4887
	Ws-R ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	488,85
	Ws-T (F)	2,713
	Ws-P	0,70201
	CPE-T (F)	0,0029932
	CPE-P	0,74582
	R2 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	-56,547
	C2 (F)	$8,1557 \times 10^{-5}$
K-5	Rs ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	2,651
	Ws-R ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	19,301
	Ws-T (F)	0,029009
	Ws-P	0,36965
	CPE-T (F)	0,051728
	CPE-P	0,58803
	R2 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	2,0147
	C2 (F)	$5,535 \times 10^{-5}$
K-10	Rs ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	2,3261
	Ws-R ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	14,589
	Ws-T (F)	0,05672
	Ws-P	0,42237
	CPE-T (F)	0,049198
	CPE-P	0,59271
	R2 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	7,125
	C2 (F)	$7,2372 \times 10^{-5}$
K-15	Rs ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	1,1589
	Ws-R ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	7,9892
	Ws-T (F)	0,025584
	Ws-P	0,35135
	CPE-T (F)	0,066279
	CPE-P	0,66408
	R2 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	0,60652
	C2 (F)	0,00017529



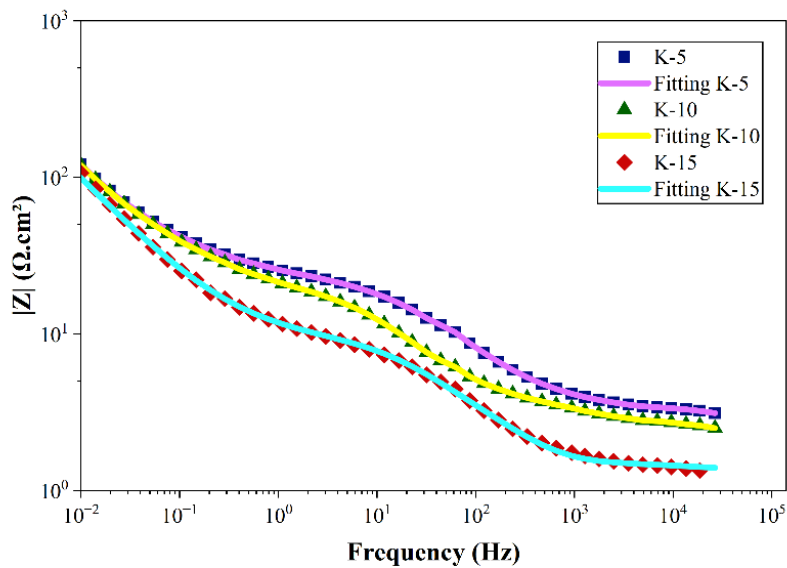
Gambar 4.22 Hasil *bode plot phase angle* (θ) vs frekuensi (Hz) variasi elektroda komposit rGO/Mn₃O₄

Grafik *bode plot* pada **Gambar 4.22** menunjukkan hubungan antara *phase angle* dengan frekuensi yang menunjukkan adanya ketergantungan proses difusi atau transportasi ion elektrolit terhadap frekuensi. Berdasarkan **Gambar 4.22**, komposit K-15 memiliki *phase angle* tertinggi, diikuti dengan K-10, dan terakhir K-5 dimana nilai *phase angle* secara berturut-turut yaitu sebesar 53,2196°; 47,8283°; dan 44,4358°. Dapat dilihat bahwa pada rentang frekuensi yang rendah, *phase angle* maksimum mencapai 53,2196°, yang menandakan *pseudocapacitive* yang sesuai untuk aplikasi superkapasitor (Gangwar et al, 2021).

Berdasarkan *bode plot* diatas, nilai frekuensi dapat digunakan untuk menghitung nilai admitansi. Admitansi mencerminkan seberapa responsif aliran muatan dalam perangkat, yang nilainya berbanding terbalik dengan impedansi total rangkaian. Nilai admitansi berkaitan dengan *knee frequency* (frekuensi tengah, $\theta = 45^\circ$) dan waktu relaksasi. Nilai admitansi dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\tau = 1/f_0 \quad (4.1)$$

Dimana τ menunjukkan waktu relaksasi (detik) yang merefleksikan kecepatan respons muatan selama proses reduksi-oksidasi, dan f_0 merupakan *knee frequency* (Hz) (Gangwar et al, 2021). Berdasarkan *bode plot* pada **Gambar 4.22** didapatkan nilai *knee frequency* pada K-5, K-10, dan K-15 secara berturut-turut yaitu sebesar 0,00100125 Hz; 0,0140485 Hz; dan 0,0384615 Hz. Sehingga diperoleh nilai waktu relaksasi untuk K-5, K-10, dan K-15 secara berturut-turut sebesar 99,875 detik, 71,182 detik, dan 26 detik. Semakin kecil nilai waktu relaksasi maka respons elektroda semakin cepat karena resistensi total sel yang rendah. Hal ini dipengaruhi oleh struktur nanomaterial yang berpori sehingga meningkatkan mobilitas muatan dan konduktivitas (Gangwar et al, 2021). Berdasarkan hasil nilai waktu relaksasi, diketahui bahwa komposit K-15 memiliki nilai yang paling kecil.



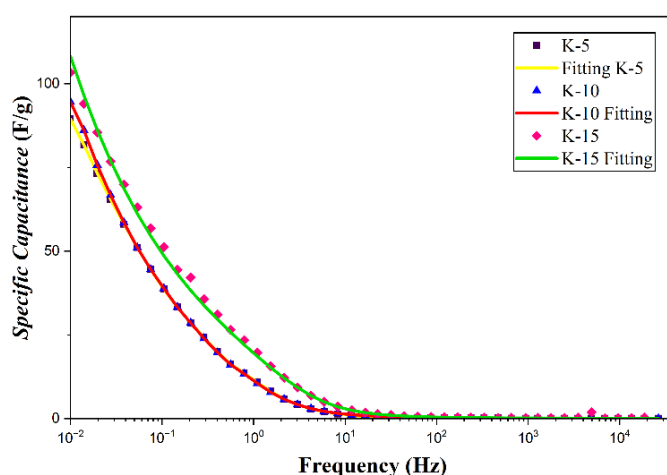
Gambar 4.23 Hasil *bode plot* $|Z|$ vs frekuensi (Hz) pada elektroda komposit rGO/ Mn_3O_4

Grafik *bode plot* pada **Gambar 4.23** menunjukkan hubungan antara $|Z|$ dengan frekuensi (Hz). Berdasarkan grafik tersebut, didapatkan nilai $|Z|$ untuk setiap variasi elektroda komposit rGO/ Mn_3O_4 . Untuk elektroda komposit K-5, K-10, dan K-15, nilai $|Z|$ yang diperoleh secara berturut-turut yaitu sebesar $120,972 \Omega.\text{cm}^2$; $119,486 \Omega.\text{cm}^2$; dan $106,791 \Omega.\text{cm}^2$. Melalui nilai $|Z|$ tersebut, diketahui bahwa K-15 memiliki nilai yang paling kecil. Semakin kecil nilai $|Z|$ maka semakin tinggi konduktivitas dari material tersebut. Setelah didapatkan nilai $|Z|$ maka konduktivitas material dan kapasitansi spesifik dapat dihitung menggunakan **Persamaan (3.8)** dan **Persamaan (3.7)**. Hasil dari perhitungan disajikan dalam **Tabel 4.11** berikut.

Tabel 4.11 Hasil perhitungan EIS θ , $|Z|$, konduktivitas, dan kapasitansi spesifik

Sampel	Frekuensi (Hz)	θ (°)	$ Z $ (Ω/cm^2)	σ (S/m)	Specific Capacitance (F/g)
rGO	0,1	35,452	40,1153	0,249	57,03
Mn_3O_4	0,01	47,0879	2188,93	0,005	2,759
K-5	0.01	44,4358	120,972	0,083	89,53
K-10	0.01	47,8283	119,486	0,084	94,64
K-15	0.01	53,2196	106,791	0,094	103,428

Berdasarkan **Tabel 4.11** didapatkan nilai konduktivitas pada elektroda komposit K-5, K-10, dan K-15 secara berturut-turut sebesar 0,083 S/m; 0,084 S/m; dan 0,094 S/m. Selain itu juga didapatkan nilai kapasitansi spesifik untuk komposit K-5, K-10, dan K-15 secara berturut-turut sebesar 89,53 F/g; 94,64 F/g; dan 103,428 F/g. Berdasarkan hasil tersebut, nilai konduktivitas dan kapasitansi spesifik tertinggi dimiliki oleh elektroda komposit rGO/ Mn_3O_4 15 menit (K-15) yang selaras dengan perhitungan pada pengujian CV dan GCD pada subbab sebelumnya. Hubungan antara kapasitansi spesifik dan frekuensi ditunjukkan pada **Gambar 4.24** berikut.



Gambar 4.24 Kapasitansi spesifik (F/g) vs frekuensi pada elektroda komposit rGO/Mn₃O₄

Berdasarkan tiga jenis pengujian elektrokimia yang dilakukan yaitu CV, GCD, dan EIS, hasil pengujian dari ketiganya disajikan dalam **Tabel 4.12**. Hasil CV yang disajikan dalam tabel yaitu pada *scan rate* 5 mV/s, GCD pada *current density* 2 A/g pada saat *charging*, dan EIS pada frekuensi 0,01 Hz.

Tabel 4.12 Perbandingan kapasitansi spesifik

Sampel	Pengujian	Kapasitansi (F/g)
K-5	CV	175,20
	GCD	9,333
	EIS	89,530
K-10	CV	195,51
	GCD	12,666
	EIS	94,640
K-15	CV	250,73
	GCD	87,867
	EIS	103,428

Berdasarkan hasil pengujian pada **Tabel 4.12**, ditunjukkan bahwa ketika waktu *microwave assisted hydrothermal* dinaikkan, maka kapasitansi spesifiknya akan ikut meningkat. Sehingga dapat dikatakan bahwa waktu *microwave assisted hydrothermal* berpengaruh terhadap nilai kapasitansi spesifik material komposit rGO/Mn₃O₄. Hal ini juga dibuktikan melalui pengujian SEM-EDS dimana pada sampel komposit K-15, persebaran partikel semakin homogen dan kandungan karbon pada sampel K-15 memiliki nilai yang paling tinggi dibandingkan variasi komposit lainnya. Kandungan karbon menandakan adanya material rGO dalam material komposit rGO/Mn₃O₄. Semakin tinggi nilai karbon menyebabkan luas permukaan meningkat sehingga meningkatkan nilai kapasitansi spesifik (Irfan et al, 2024). Perbandingan nilai kapsitansi spesifik pada penelitian yang dilakukan dengan penelitian terdahulu dapat dilihat pada **Tabel 4.13** berikut.

Tabel 4.13 Perbandingan nilai kapasitansi spesifik

Material	Metode	<i>Specific Capacitance (F/g)</i>	Referensi	Penelitian ini
rGO/Mn ₃ O ₄	Ultrasonifikasi	21,89 pada <i>scan rate</i> 5 mV/s	(Joby et al, 2024)	250,73 F/g pada <i>scan rate</i> 5 mV/s
rGO/Mn ₃ O ₄	<i>Microwave assisted hydrothermal</i>	193 pada <i>scan rate</i> 25 mV/s	(Liu et al, 2012)	166,77 pada <i>scan rate</i> 25 mV/s
rGO/Mn ₃ O ₄	<i>One step solvothermal</i>	132 pada <i>current density</i> 2	(Lankamsetty et al, 2025)	87,867 F/g pada <i>current density</i> 2

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan waktu *microwave assisted hydrothermal* ketika proses sintesis komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ berpengaruh terhadap struktur kristal dan berpengaruh terhadap morfologi komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$. Berdasarkan hasil pengujian XRD didapatkan struktur Mn_3O_4 yang berbentuk tetragonal dan struktur rGO berbentuk heksagonal. XRD komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ menunjukkan adanya peningkatan ukuran kristal pada komposit dengan variasi waktu 5, 10, dan 15 menit. Penambahan waktu *microwave assisted hydrothermal* juga mempengaruhi persebaran partikel dari material komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$. Hal ini dapat dilihat melalui pengujian SEM, dimana semakin bertambahnya waktu sintesis maka persebaran partikel menjadi lebih homogen. Dari pengujian EDS diketahui bahwa semakin lama waktu *microwave assisted hydrothermal* yang digunakan maka akan meningkatkan persentase karbon di dalam komposit, sedangkan persentase Mn_3O_4 dalam komposit akan menurun. Pada komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ 15 menit, didapatkan persentase karbon sebesar 29,2 wt%, mangan sebesar 67,5 wt%, dan oksigen sebesar 3,3 wt%.
2. Penambahan waktu *microwave assisted hydrothermal* ketika proses sintesis komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ mempengaruhi nilai kapasitansi spesifik dari komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$. Semakin lama waktu yang digunakan, maka nilai kapasitansi spesifik yang dihasilkan semakin tinggi. Nilai kapasitansi spesifik tertinggi dimiliki oleh sampel elektroda komposit $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ 15 menit (K-15). Berdasarkan hasil pengujian *cyclic voltammetry*, kapasitansi spesifik K-15 mencapai 250,73 F/g. Komposit K-15 memiliki nilai konduktivitas tertinggi yang sesuai dengan hasil pengujian EIS yaitu sebesar 0,094 S/m dan kapasitansi spesifik sebesar 103,428 F/g. Berdasarkan hasil pengujian GCD dari elektroda komposit K-15, didapatkan hasil kapasitansi spesifiknya sebesar 87,867 F/g saat *charge* dan sebesar 35,467 F/g saat *discharge* pada *current density* 2 A/g.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Menyimpan sampel yang telah selesai disintesis dan melakukan pengecekan sampel secara berkala.
2. Mencicil pengujian elektrokimia agar tidak kalang kabut.
3. Melakukan pengujian BET jauh-jauh hari.
4. Melakukan pengolahan data sesegera mungkin setelah hasil pengujian didapatkan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-Aal, S. K., Attia, S. Y., & Mohamed, S. G. (2019). Facile Synthesis of Mn₃O₄-rGO Nanocomposite As an Efficient Electrode Material for Application in Supercapacitors. *Journal of Electronic Materials*, 48(8), 4977–4986. <https://doi.org/10.1007/s11664-019-07305-4>
- Adeyemi, J. O., Onwudiwe, D. C., & Oyediji, A. O. (2022). In vitro α -glucosidase enzyme inhibition and anti-inflammatory studies of Mn₃O₄ nanoparticles mediated using extract of *Dalbergiella welwitschia*. *Results in Chemistry*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100497>
- Adotey, E., Kurbanova, A., Ospanova, A., Ardakkyzy, A., Toktarbay, Z., Kydyrbay, N., Zhazitov, M., Nuraje, N., & Toktarbaiuly, O. (2025). Development of Superhydrophobic Reduced Graphene Oxide (rGO) for Potential Applications in Advanced Materials. *Nanomaterials*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/nano15050363>
- Afif, A., Rahman, S. M., Tasfiah Azad, A., Zaini, J., Islam, M. A., & Azad, A. K. (2019). Advanced materials and technologies for hybrid supercapacitors for energy storage – A review. In *Journal of Energy Storage* (Vol. 25). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100852>
- Aghazadeh, M. (2018). *One-step Electrophoretic/electrochemical Synthesis of Reduced Graphene Oxide/Manganese Oxide (rGO- Mn₃O₄) Nanocomposite and Study of its Capacitive Performance*.
- Ahamed, A. J., & Kanagambal, P. (2024). Design and fabrication of reduced graphene oxide (RGO) incorporated NiCo₂S₄ hybrid composites as electrode materials for high performance supercapacitors. *Chemical Physics Impact*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.chphi.2024.100675>
- Ajith, A., Thomas, E., Suresh, C. H., & Philip, R. R. (2025). Advances and strategies in nanoarchitected TiO₂-based electrodes for supercapacitors. In *Journal of Energy Storage* (Vol. 111). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115289>
- Alam, S. N., Sharma, N., & Kumar, L. (2017). Synthesis of Graphene Oxide (GO) by Modified Hummers Method and Its Thermal Reduction to Obtain Reduced Graphene Oxide (rGO)*. *Graphene*, 06(01), 1–18. <https://doi.org/10.4236/graphene.2017.61001>
- Ali, A., Chiang, Y. W., & Santos, R. M. (2022). X-Ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization: A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions. *Minerals*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/min12020205>
- Allegretta, I., Legrand, S., Alfeld, M., Gattullo, C. E., Porfido, C., Spagnuolo, M., Janssens, K., & Terzano, R. (2022). SEM-EDX hyperspectral data analysis for the study of soil aggregates. *Geoderma*, 406. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115540>
- Ansari, K. B., Mashkoo, R., Naim, M. A., Shakeelur Rahman, A. R., Ansari, M. Y., Khan, P., Hasib, R., & Shkir, M. (2025). A critical review on pure and hybrid electrode supercapacitors, economics of HESCs, and future perspectives. In *Journal of Energy Storage* (Vol. 112). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115564>

- Arias-Duque, N. P., Torres-Ceron, D. A., Giraldo-Osorio, O. H., Amaya-Roncancio, S., & Aguirre-Cortés, J. M. (2025). Electrical performance of non-stoichiometry manganese oxides. *Materials Today Chemistry*, 43. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2024.102498>
- Awliahasanah, R., Sari, D. N. S. N., Yanti, D., Azrinindita, E. D., Ghassani, D., Maulidia, N. S., & Sulistiyorini, D. (2021). Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Kandungan Mangan Pada Air Sumur Warga Kota Depok. *Jurnal Sanitasi Lingkungan*, 1(2), 80–86. <https://doi.org/10.36086/salink.v1i2.1051>
- Ayhan, I. A., Li, Q., Meduri, P., Oh, H., Bhimanapati, G. R., Yang, G., Robinson, J. A., & Wang, Q. (2016). Effect of Mn₃O₄ nanoparticle composition and distribution on graphene as a potential hybrid anode material for lithium-ion batteries. *RSC Advances*, 6(39), 33022–33030. <https://doi.org/10.1039/c5ra27343a>
- Banerjee, S., Mordina, B., Sinha, P., & Kar, K. K. (2025). Recent advancement of supercapacitors: A current era of supercapacitor devices through the development of electrical double layer, pseudo and their hybrid supercapacitor electrodes. In *Journal of Energy Storage* (Vol. 108). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.115075>
- Barreto, M. S. C., Elzinga, E. J., & Alleoni, L. R. F. (2020). Hausmannite as potential As(V) filter. Macroscopic and spectroscopic study of As(V) adsorption and desorption by citric acid. *Environmental Pollution*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114196>
- Becerra-Paniagua, D. K., Díaz-Cruz, E. B., Baray-Calderón, A., Garcia-Angelmo, A. R., Regalado-Pérez, E., del Pilar Rodriguez-Torres, M., & Martínez-Alonso, C. (2022). Nanostructured metal sulphides synthesized by microwave-assisted heating: a review. In *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* (Vol. 33, Issue 29, pp. 22631–22667). Springer. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-09024-9>
- Beknalkar, S. A., Teli, A. M., Bhat, T. S., Pawar, K. K., Patil, S. S., Harale, N. S., Shin, J. C., & Patil, P. S. (2022). Mn₃O₄ based materials for electrochemical supercapacitors: Basic principles, charge storage mechanism, progress, and perspectives. In *Journal of Materials Science and Technology* (Vol. 130, pp. 227–248). Chinese Society of Metals. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.03.036>
- Binjawhar, D. N., Al-Enazi, N. M., Alsamhary, K., & Kha, M. (2024). Plant mediated biosynthesis of Mn₃O₄ nanostructures and their biomedical applications. *Heliyon*, 10(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27695>
- Bläker, C., Muthmann, J., Pasel, C., & Bathen, D. (2019). Characterization of Activated Carbon Adsorbents – State of the Art and Novel Approaches. In *ChemBioEng Reviews* (Vol. 6, Issue 4, pp. 119–138). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/cben.201900008>
- Celestine, M. (2024). *Innovative Nanotechnology Techniques for Exploring Surface Area, Microstructure, Morphology, And Chemical Composition*.
- Cevher, D., & Cirpan, A. (2025). Design, strategies and recent advances in conjugated polymers for supercapacitors. In *Journal of Energy Storage* (Vol. 109). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.115246>
- Chen, S., Wang, L., Huang, M., Kang, L., Lei, Z., Xu, H., Shi, F., & Liu, Z. H. (2017). Reduced graphene oxide/Mn₃O₄ nanocrystals hybrid fiber for flexible all-solid-state supercapacitor with excellent volumetric energy density. *Electrochimica Acta*, 242, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.05.013>

- Cherniienko, A., Lesyk, R., Zaprutko, L., & Pawełczyk, A. (2024). IR-EcoSpectra: Exploring sustainable ex situ and in situ FTIR applications for green chemical and pharmaceutical analysis. In *Journal of Pharmaceutical Analysis* (Vol. 14, Issue 9). Xi'an Jiaotong University. <https://doi.org/10.1016/j.jppha.2024.02.005>
- Cuéllar-Herrera, L., Arce-Estrada, E., Romero-Serrano, A., Pacheco-Catalán, D. E., Baas-López, J. M., & López-Rodríguez, J. (2023). Practical mechanochemical synthesis and electrochemical properties of Mn₃O₄ for use in supercapacitors. *International Journal of Electrochemical Science*, 18(12). <https://doi.org/10.1016/J.IJOES.2023.100383>
- Cuéllar-Herrera, L., Arce-Estrada, E. M., Pacheco-Catalán, D. E., Vivas, L., Ortiz-Landeros, J., Jiménez-Lugos, C., & Romero-Serrano, A. (2024). Chemical synthesis and electrochemical performance of Hausmannite Mn₃O₄/rGO composites for supercapacitor applications. *International Journal of Electrochemical Science*, 19(9). <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100737>
- Cuéllar-Herrera, L., Arce-Estrada, E., Romero-Serrano, A., Ortiz-Landeros, J., Cabrera-Sierra, R., Tirado-López, C., Hernández-Ramírez, A., & López-Rodríguez, J. (2021). Microwave-Assisted Synthesis and Characterization of γ -MnO₂ for High-Performance Supercapacitors. *Journal of Electronic Materials*, 50(10), 5577–5589. <https://doi.org/10.1007/s11664-021-09098-x>
- Dan, S., Ojha, H., Nath, D., Pal, A., & Sah, M. K. (2025). Preparation, characterization, and biocompatibility assessment of Mn²⁺ doped graphene oxide and reduced graphene oxide hydrothermally synthesized from Terminalia arjuna. *Materials Today Communications*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.112522>
- Das, P., Deoghare, A. B., & Maity, S. R. (2021). A Novel Approach to Synthesize Reduced Graphene Oxide (RGO) at Low Thermal Conditions. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(6), 5467–5475. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04956-y>
- de Barros, N. G., Gonzaga Neto, A. C., Vacciolli, K. B., Angulo, H. R. V., de Andrade e Silva, L. G., Toffoli, S. M., & Valera, T. S. (2023). Graphene Oxide: A Comparison of Reduction Methods. *C-Journal of Carbon Research*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/c9030073>
- Fatimah, S., Ragadhita, R., Fitria, D., Husaeni, A., Bayu, A., & Nandiyanto, D. (2021). *How to Calculate Crystallite Size from X-Ray Diffraction (XRD) using Scherrer Method*. <https://doi.org/10.17509/ijost.v6i6>
- Fernández-Jiménez, V., de Bernardi-Martín, S., García-Gómez, A., López-Díaz, D., Sánchez-Montero, M. J., Velázquez, M. M., & Merchán, M. D. (2024). The Role of the Manganese Content on the Properties of Mn₃O₄ and Reduced Graphene Oxide Nanocomposites for Supercapacitor Electrodes. *Coatings*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/coatings14091136>
- Fu, S., Fang, Q., Li, A., Li, Z., Han, J., Dang, X., & Han, W. (2021). Accurate characterization of full pore size distribution of tight sandstones by low-temperature nitrogen gas adsorption and high-pressure mercury intrusion combination method. *Energy Science and Engineering*, 9(1), 80–100. <https://doi.org/10.1002/ese3.817>
- Gangwar, A., Das, T., Shaw, S. K., & Prasad, N. K. (2021). Nanocomposite of (α -Mn₃O₄/MnO)₂/rGO as a high performance electrode material for supercapacitors. *Electrochimica Acta*, 390. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138823>

- Grassini, S., Corbellini, S., Parvis, M., Angelini, E., & Zucchi, F. (2018). A simple Arduino-based EIS system for in situ corrosion monitoring of metallic works of art. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 114, 508–514. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.014>
- Grundy, A. N., Hallstedt, B., & Gauckler, L. J. (2003). *Assessment of the Mn-O System*.
- Guo, Y., Wang, R., Wang, H., Li, Y., Hu, C., Yan, K., Chen, Q., Zhou, C., & Ma, D. (2025). Overlooked impacts of manganese oxides in biochar sustainable stability: Coupled redox performance and aging mechanisms. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(1). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.115074>
- Gutiérrez-Cruz, A., Ruiz-Hernández, A. R., Vega-Clemente, J. F., Luna-Gazcón, D. G., & Campos-Delgado, J. (2022). A review of top-down and bottom-up synthesis methods for the production of graphene, graphene oxide and reduced graphene oxide. In *Journal of Materials Science* (Vol. 57, Issue 31, pp. 14543–14578). Springer. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07514-z>
- Hadi, J. M., Aziz, S. B., Abdulwahid, R. T., Brza, M. A., Tahir, H. B., Hamad, S. M., Shamsuri, N. A., Woo, H. J., Alias, Y., Hamsan, M. H., Steve, O. J. S., & Kadir, M. F. Z. (2024). Characterizing sodium-conducting biopolymer blend electrolytes with glycerol plasticizer for EDLC application. *Ionics*, 30(4), 2409–2423. <https://doi.org/10.1007/s11581-024-05412-9>
- Hardianto, Y. P., Shah, S. S., Shuaibu, A. D., Mohamed, M., Sarker, S., Alzahrani, A. S., & Aziz, Md. A. (2025). Modeling supercapacitors with the simplified Randles circuit: Analyzing electrochemical behavior through cyclic voltammetry and Galvanostatic charge-discharge. *Electrochimica Acta*, 513, 145552. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.145552>
- Hu, X., Zhang, L., An, Y., Wang, W., Li, H., & Lian, Z. (2024). Simultaneous removal of manganese and ammonium nitrogen from mine water using sodium hexametaphosphate modified natural zeolite loaded by 3D MnOx. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112509>
- Huang, H. H., de Silva, K. K. H., Kumara, G. R. A., & Yoshimura, M. (2018). Structural Evolution of Hydrothermally Derived Reduced Graphene Oxide. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25194-1>
- Huang, Z., Li, S., Li, Z., Li, J., Zhang, G., Cao, L., & Liu, H. (2020). Mn₃O₄ nanoflakes/rGO composites with moderate pore size and (O=)C-O-Mn bond for enhanced supercapacitor performance. *Journal of Alloys and Compounds*, 830. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154637>
- Hung, P. yan, Zhang, H., Lin, H., Guo, Q., Lau, K. tak, & Jia, B. (2022). Specializing liquid electrolytes and carbon-based materials in EDLCs for low-temperature applications. In *Journal of Energy Chemistry* (Vol. 68, pp. 580–602). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2021.12.012>
- Irfan, M., Sarfraz, F., Tariq, A., Waqas, U., Ramay, S. M., Afzal, F., & Atiq, S. (2024). Enhanced supercapacitor dynamics mediated by systematic incorporation of rGO in Mn₃O₄ matrix. *Diamond and Related Materials*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.110948>

- Irwansyah, F. S., Amal, A. I., Diyanthi, E. W., Hadisantoso, E. P., Noviyanti, A. R., Eddy, D. R., & Risdiana, R. (2024). How to Read and Determine the Specific Surface Area of Inorganic Materials using the Brunauer-Emmett-Teller (BET) Method. *ASEAN Journal of Science and Engineering*, 4(1), 61–70. <https://doi.org/10.17509/ajse.v4i1.60748>
- Islam, M., Hossain, M. S., Adak, B., Rahman, M. M., Moni, K. kubra, Nur, A. S. M., Hong, H., Younes, H., & Mukhopadhyay, S. (2025). Recent advancements in carbon-based composite materials as electrodes for high-performance supercapacitors. In *Journal of Energy Storage* (Vol. 107). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114838>
- Jiang, Y., & Liu, J. (2019). Definitions of Pseudocapacitive Materials: A Brief Review. In *Energy and Environmental Materials* (Vol. 2, Issue 1, pp. 30–37). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/eem2.12028>
- Jihad, M. A., Noori, F. T. M., Jabir, M. S., Albukhaty, S., Almalki, F. A., & Alyamani, A. A. (2021). Polyethylene glycol functionalized graphene oxide nanoparticles loaded with nigella sativa extract: A smart antibacterial therapeutic drug delivery system. *Molecules*, 26(11). <https://doi.org/10.3390/molecules26113067>
- Jiříčková, A., Jankovský, O., Sofer, Z., & Sedmidubský, D. (2022). Synthesis and Applications of Graphene Oxide. In *Materials* (Vol. 15, Issue 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ma15030920>
- Joby, A., Kumbhakar, P., & Balachandran, M. (2024). Magnetic field and light dependant supercapacitor behaviours of Mn₃O₄-rGO hybrid nanocomposites. *Emergent Materials*. <https://doi.org/10.1007/s42247-024-00744-8>
- Karbak, M., Baazizi, M., Sayah, S., Autret-Lambert, C., Tison, Y., Martinez, H., Chafik, T., & Ghamouss, F. (2024). Valence-controlled manganese oxide by solvent-assisted permanganate reduction for advanced aqueous zinc-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 102. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114041>
- Khan, A., Sapakal, S. N., & Kadam, A. (2024). Comparative analysis of graphene oxide (GO) reduction methods: impact on crystallographic, morphological, and optical properties. *Graphene and 2D Materials*, 9(1–2), 101–109. <https://doi.org/10.1007/s41127-024-00072-y>
- Kishida, K., Suzuki, H., Okutani, M., & Inui, H. (2023). Room-temperature plastic deformation of single crystals of α -manganese - Hard and brittle metallic element. *International Journal of Plasticity*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2022.103510>
- Krishnan, P., & Biju, V. (2021). Effect of electrolyte concentration on the electrochemical performance of RGO–KOH supercapacitor. *Bulletin of Materials Science*, 44(4). <https://doi.org/10.1007/s12034-021-02576-2>
- Kumari, P., Kumar, A., Sabri, Y., Ippolito, S. J., Gupta, G., Shivagan, D. D., & Bapna, K. (2024). A comparative study on humidity response of graphene oxide with reduced graphene oxide and its multifunctional applications. *Materials Research Bulletin*, 180. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2024.113037>
- L. Sa'adu, I. Abdullahi, A. B. Isah, & Y. Yusuf. (2024). Commercially Available Supercapacitors –A Perspective on Global, African and Nigerian Markets. *Nigerian Journal of Pure and Applied Sciences*, 4925–4935. <https://doi.org/10.48198/NJPAS/23.B21>

- Lankamsetty, K. B., Veerasubramani, G. K., Nagaraju, G., Sengodan, S., AlHammadi, A. A. K., Hiremath, V., Karanikolos, G. N., & Yang, H. K. (2025). High-performance aqueous sodium-ion storage using scalable and surfactant-free flower-like manganese oxide/reduced graphene oxide electrodes. *Journal of Power Sources*, 631. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.236221>
- Lett, J. A., Alshahateet, S. F., Fatimah, I., Sivasankaran, R. P., Sibhatu, A. K., Le, M. V., & Sagadevan, S. (2023). Hydrothermal Synthesis and Photocatalytic Activity of Mn₃O₄ Nanoparticles. *Topics in Catalysis*, 66(1–4), 126–138. <https://doi.org/10.1007/s11244-022-01710-6>
- Li, L., Seng, K. H., Chen, Z., Liu, H.-K., & Nevirkovets, I. P. (2013). *Synthesis of Mn₃O₄-encapsulated graphene sheet nanocomposites via a facile, fast microwave hydrothermal method and their supercapacitive behaviour*. <https://ro.uow.edu.au/eisapers>
- Li, Q., Feng, F., Jiang, C., Song, S., Peng, H., & Liao, Z. (2025). Carboxyl graphene oxide/graphene composite structure for the chemiresistive detection of acetaldehyde at room temperature. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 427. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2024.137179>
- Li, W., Xu, A., Zhang, Y., Yu, Y., Liu, Z., & Qin, Y. (2022). Metal-organic framework-derived Mn₃O₄ nanostructure on reduced graphene oxide as high-performance supercapacitor electrodes. *Journal of Alloys and Compounds*, 897. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162640>
- Li, Y., Lu, Y. L., Wu, K. di, Zhang, D. Z., Debliquy, M., & Zhang, C. (2021). Microwave-assisted hydrothermal synthesis of copper oxide-based gas-sensitive nanostructures. In *Rare Metals* (Vol. 40, Issue 6, pp. 1477–1493). University of Science and Technology Beijing. <https://doi.org/10.1007/s12598-020-01557-4>
- Liao, X., Zhou, C., Zheng, F., & Peng, M. (2025). Methyl parathion degradation from the sulfite oxidation catalyzed by crystallographic manganese oxides: Formation and role of singlet oxygen. *Separation and Purification Technology*, 361. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.131325>
- Libber, M., Gariya, N., & Kumar, M. (2024). A comprehensive analysis of supercapacitors with current limitations and emerging trends in research. In *Journal of Solid State Electrochemistry*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10008-024-06107-x>
- Licht, F., Davis, M. A., & Andreas, H. A. (2020). Charge redistribution and electrode history impact galvanostatic charging/discharging and associated figures of merit. *Journal of Power Sources*, 446. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227354>
- Liu, S., Luo, C., Ye, L., & Xie, K. (2024). Oxygen vacancy engineering of porous single-crystalline manganese oxides for boosting pseudocapacitance. *Journal of Energy Storage*, 84. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110863>
- Liu, Y., Wang, L., Li, D., & Wang, K. (2023). State-of-health estimation of lithium-ion batteries based on electrochemical impedance spectroscopy: a review. In *Protection and Control of Modern Power Systems* (Vol. 8, Issue 1). Springer. <https://doi.org/10.1186/s41601-023-00314-w>

- Liu, Z., Fu, H., Gao, B., Wang, Y., Li, K., Sun, Y., Yin, J., & Kan, J. (2020). In-situ synthesis of Fe₂O₃/rGO using different hydrothermal methods as anode materials for lithium-ion batteries. *Reviews on Advanced Materials Science*, 59(1), 477–487. <https://doi.org/10.1515/rams-2020-0046>
- Lu, M., Cao, Y., Xue, Y., & Qiu, W. (2021). Preparation of Graphene Oxide/La₂Ti₂O₇Composites with Enhanced Electrochemical Performances for Supercapacitors. *ACS Omega*, 6(42), 27994–28003. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03863>
- Madhuri, S., Shilpa Chakra, C., Sadhana, K., & Divya, V. (2022). Sketchy synthesis of Mn₃O₄, Mn₃O₄/AC and Mn₃O₄/CNT composites for application of/in energy cache. *Materials Today: Proceedings*, 65, 2812–2818. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.247>
- Magar, H. S., Hassan, R. Y. A., & Mulchandani, A. (2021). Electrochemical impedance spectroscopy (Eis): Principles, construction, and biosensing applications. In *Sensors* (Vol. 21, Issue 19). MDPI. <https://doi.org/10.3390/s21196578>
- Mahala, S., Khosravinia, K., & Kiani, A. (2023). Unwanted degradation in pseudocapacitors: Challenges and opportunities. In *Journal of Energy Storage* (Vol. 67). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107558>
- Mohamad, A. A. (2025). Cyclic voltammetry of hybrid supercapacitors: A characterization review. In *Inorganic Chemistry Communications* (Vol. 172). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113677>
- Mohamed, A., Shaban, M., Kordy, M. G. M., Al-Senani, G. M., Eissa, M. F., & Hamdy, H. (2024). Fabrication and characterization of NiCu/GO and NiCu/rGO nanocomposites for fuel cell application. *RSC Advances*, 14(10), 6776–6792. <https://doi.org/10.1039/d3ra07822a>
- Mohamed, M. M., Khairy, M., Amer, A. A., & Mousa, M. A. (2022). Nonconventional synthesis of polyhedral Mn₃O₄nanoarchitectures incorporated reduced graphene oxide: Superior supercapacitor capabilities. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 2555–2570. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.066>
- Mohanty, B., Senapati, S., Mitra, A., Bal, R., & Jena, B. (2023). Synthesis of octahedral shaped Mn₃O₄ and its reduced graphene oxide composite for electrocatalytic oxygen evolution reaction. *Catalysis Today*, 423. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2022.09.003>
- More, M. A., More, S. A., Femi, M. D., Jain, G. H., Shinde, S. D., Patil, D. Y., Kajale, D. D., & Patil, G. E. (2024). Hydrothermally synthesized nanostructured NiTiO₃ thick films for H₂S and room temperature CO₂ gas sensing. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 35(26). <https://doi.org/10.1007/s10854-024-13429-z>
- Mwatukange, J. P., Rahman, A., & Chiguvare, Z. (2024). Synthesis and Characterisation of iron doped manganese oxides for thermal energy storage. *Results in Chemistry*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101923>
- Naidoo, L., Drexel, R., Meier, F., & Bisetty, K. (2025). Novel insights into the field-flow fractionation characterization and their electrical properties of graphene oxide and reduced graphene oxide materials. *Emergent Materials*. <https://doi.org/10.1007/s42247-025-01135-3>

- Nainggolan, I., Saisa, Agusnar, H., Alfian, Z., Alva, S., Nasution, T. I., Rahman, R., & Sembiring, A. (2024). Sensitivity of chitosan film based electrode modified with reduced graphene oxide (rGO) for formaldehyde detection using cyclic voltammetry. *South African Journal of Chemical Engineering*, 48, 184–193. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.02.001>
- Nandagudi, A., Nagarajarao, S. H., Santosh, M. S., Basavaraja, B. M., Malode, S. J., Mascarenhas, R. J., & Shetti, N. P. (2022). Hydrothermal synthesis of transition metal oxides, transition metal oxide/carbonaceous material nanocomposites for supercapacitor applications. In *Materials Today Sustainability* (Vol. 19). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2022.100214>
- Nawaz, M. H., Shahid, M. K., Gupta, R. K., Jalil, R., Chuang, F. C., & Pham, P. v. (2025). Flatland of Graphene's derivatives: Classification, synthesis, mechanisms, role of defects, applications, and prospectives. In *Coordination Chemistry Reviews* (Vol. 528). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.216421>
- Neto, N. F. A., Nunes, T. B. O., Li, M., Longo, E., Bomio, M. R. D., & Motta, F. v. (2020). Influence of microwave-assisted hydrothermal treatment time on the crystallinity, morphology and optical properties of ZnWO₄ nanoparticles: Photocatalytic activity. *Ceramics International*, 46(2), 1766–1774. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.151>
- Novak, T., Novak, T., Sokansky, K., & Carbol, Z. (2014). *SUPERCAPACITOR AS A SOURCE FOR AUTONOMOUS EMERGENCY LUMINAIRE*. <https://www.researchgate.net/publication/367161193>
- Olabi, A. G., Abdelkareem, M. A., Wilberforce, T., & Sayed, E. T. (2021). Application of graphene in energy storage device – A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 135). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110026>
- Ortiz Méndez, Ubaldo., Kharisov, B. I. ., & Kharissova, O. Vasilievna. (2016). *CRC concise encyclopedia of nanotechnology*. Taylor & Francis, CRC Press.
- Oyedotun, K. O., & Mamba, B. B. (2024). New trends in supercapacitors applications. *Inorganic Chemistry Communications*, 170, 113154. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113154>
- Peixoto, D. A., Silva, S. C., Borges, P. H. S., Lima, R. C., & Nossol, E. (2023). Hydrothermal synthesis as a versatile tool for the preparation of metal hexacyanoferrates: a review. In *Journal of Materials Science* (Vol. 58, Issue 7, pp. 2993–3024). Springer. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08190-3>
- Pershaanaa, M., Bashir, S., Ramesh, S., & Ramesh, K. (2022). Every bite of Supercap: A brief review on construction and enhancement of supercapacitor. In *Journal of Energy Storage* (Vol. 50). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104599>
- Rahman, M. M., Muttakin, M., Pal, A., Shafiullah, A. Z., & Saha, B. B. (2019). A statistical approach to determine optimal models for IUPAC-classified adsorption isotherms. *Energies*, 12(23). <https://doi.org/10.3390/en12234565>
- Ratha, S., & Samantara, A. K. (2018). *SPRINGER BRIEFS IN MATERIALS Supercapacitor: Instrumentation, Measurement and Performance Evaluation Techniques*. <http://www.springer.com/series/10111>

- Reshma, R. P., Abishek, N. S., & Gopalakrishna, K. N. (2024). Synthesis and characterization of graphene oxide, tin oxide, and reduced graphene oxide-tin oxide nanocomposites. *Inorganic Chemistry Communications*, 165. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112451>
- Ruilin, L., Yee, K. Y., Salleh, N. A., Deghfel, B., Zakaria, Z., Yaakob, M. K., Ong, H. R., Rahiman, W., Akbulut, H., Wang, D., Kheawhom, S., & Mohamad, A. A. (2024). Hydrothermal synthesis of manganese doped zinc oxide wurtzite nanoparticles for supercapacitors – A brief review. In *Inorganic Chemistry Communications* (Vol. 170). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113311>
- Sahoo, S., Milton, A., Sood, A., Kumar, R., Choi, S., Maity, C. K., & Han, S. S. (2024). Microwave-assisted synthesis of perovskite hydroxide-derived $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{SnO}_2$ /reduced graphene oxide nanocomposites for advanced hybrid supercapacitor devices. *Journal of Energy Storage*, 99. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113321>
- Saputra, A. M. A., Marpongahtun, Andriyani, Goei, R., Tok, A. I. Y., Goutianos, S., & Gea, S. (2025). Facile synthesis of reduced graphene oxide using natural plant extracts as green reducing agents. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 37(3). <https://doi.org/10.1007/s44444-025-00007-9>
- Sayyed, S. G., Shaikh, A. v., Dubal, D. P., & Pathan, H. M. (2021). Paving the Way towards Mn_3O_4 Based Energy Storage Systems. *ES Energy and Environment*, 14, 3–21. <https://doi.org/10.30919/eseec8c522>
- Shah, H. U., Wang, F., Javed, M. S., Shaheen, N., Saleem, M., & Li, Y. (2018). Hydrothermal synthesis of reduced graphene oxide- Mn_3O_4 nanocomposite as an efficient electrode materials for supercapacitors. *Ceramics International*, 44(4), 3580–3584. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.11.062>
- Shahid, M., Katugampalage, T. R., Khalid, M., Ahmed, W., Kaewsaneha, C., Sreearunothai, P., & Opaprakasit, P. (2022). Microwave assisted synthesis of Mn_3O_4 nanograins intercalated into reduced graphene oxide layers as cathode material for alternative clean power generation energy device. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23622-x>
- Sharma, N., Tomar, S., Shkir, M., Kant Choubey, R., & Singh, A. (2019). Study of Optical and Electrical Properties of Graphene Oxide. *Materials Today: Proceedings*, 36, 730–735. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.861>
- Sharma, S., & Chand, P. (2023). Supercapacitor and electrochemical techniques: A brief review. In *Results in Chemistry* (Vol. 5). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.100885>
- Sharma, V., Jain, Y., Kumari, M., Gupta, R., Sharma, S. K., & Sachdev, K. (2017). Synthesis and Characterization of Graphene Oxide (GO) and Reduced Graphene Oxide (rGO) for Gas Sensing Application. *Macromolecular Symposia*, 376(1). <https://doi.org/10.1002/masy.201700006>
- Shi, M., Qiu, R., Li, Q., Liao, Q., Yang, W., Si, M., Wang, Q., & Yang, Z. (2025). The mechanism of cobalt enrichment by biogenic manganese oxides with different average oxidation states. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(2). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115412>

- Shieh, M., & Li, Y. H. (2024). Syntheses, paramagnetism, and semiconducting characteristics of polynuclear manganese carbonyl chalcogenide anions: A review. *Journal of Organometallic Chemistry*, 1006. <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2024.123020>
- Shunmugapriya, B., & Vijayakumar, T. (2022). Investigation on the synthesis of Mn₃O₄ nanoparticles embedded on nano rods as an electrode material for supercapacitor application. *Inorganic Chemistry Communications*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.110179>
- Silva, J. P., Irikura, K., Biaggio, S. R., Bocchi, N., & Rocha-Filho, R. C. (2022). Rapid microwave-assisted solid-state obtention of Mn₃O₄ and its electrochemical characterization for application as supercapacitor electrodes. *Ionics*, 28(8), 3963–3974. <https://doi.org/10.1007/s11581-022-04627-y>
- Singh, A., Shah, S. S., Dubey, A., Ahmed, A., ud Din Rather, M., Ranganayakulu, S. V., Sundramoorthy, A. K., & Arya, S. (2025). Advancements in wearable energy storage devices via fabric-based flexible supercapacitors. In *Journal of Energy Storage* (Vol. 109). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.115183>
- Singh, I., Sharma, R., kaur, A., Pathak, D., Singh, A., Hamza, M., Singh, M., & Vasishth, A. (2025). A review on supercapacitors: Development trends, challenges, and future perspectives. *Next Research*, 2(2), 100228. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100228>
- Socorro-Perdomo, P. P., Florido-Suárez, N. R., Voiculescu, I., & Mirza-Rosca, J. C. (2021). Comparative eis study of alxcocrfeni alloys in ringer's solution for medical instruments. *Metals*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/met11060928>
- Subasinghage, K., Gunawardane, K., Padmawansa, N., Kularatna, N., & Moradian, M. (2022). Modern Supercapacitors Technologies and Their Applicability in Mature Electrical Engineering Applications. In *Energies* (Vol. 15, Issue 20). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en15207752>
- Sukhdev, A., Challa, M., Narayani, L., Manjunatha, A. S., Deepthi, P. R., Angadi, J. v., Mohan Kumar, P., & Pasha, M. (2020). Synthesis, phase transformation, and morphology of hausmannite Mn₃O₄ nanoparticles: photocatalytic and antibacterial investigations. In *Heliyon* (Vol. 6, Issue 1). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03245>
- Sundar, L. S., & Ashraf, M. W. (2025). Synthesis and characterization methods of graphene oxide nanomaterial for biomedical and toxicity applications: A comprehensive review. *Inorganic Chemistry Communications*, 113936. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.113936>
- Tamang, S., Rai, S., Bhujel, R., Bhattacharyya, N. K., Swain, B. P., & Biswas, J. (2023). A concise review on GO, rGO and metal oxide/rGO composites: Fabrication and their supercapacitor and catalytic applications. In *Journal of Alloys and Compounds* (Vol. 947). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.169588>
- Tatulian, S. A. (2019). FTIR Analysis of Proteins and Protein–Membrane Interactions. In *Methods in Molecular Biology* (Vol. 2003, pp. 281–325). Humana Press Inc. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9512-7_13
- Tkachenko, Y., & Niedzielski, P. (2022). FTIR as a Method for Qualitative Assessment of Solid Samples in Geochemical Research: A Review. In *Molecules* (Vol. 27, Issue 24). MDPI. <https://doi.org/10.3390/molecules27248846>

- Trinity Rabecca, H. J., Priyajanani, Y., Manivannan, S., & Lourduraj, A. J. C. (2023). Investigation of electrochemical behavior of Co₃O₄–Mn₂O₃/rGO nanocomposite for supercapacitor applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(17). <https://doi.org/10.1007/s10854-023-10810-2>
- Umar, M., Ajaz, H., Javed, M., Iqbal, S., Shuaib Khan, M., Alhujaily, A., Awwad, N. S., & Ibrahim, H. A. (2023). Synthesis and characterization of highly efficient Te-doped Mn₃O₄ and s-g-C₃N₄ /Te- Mn₃O₄ nanocomposites as an excellent antimicrobial and photocatalytic agent. *Inorganic Chemistry Communications*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111353>
- Ural, N. (2021). The significance of scanning electron microscopy (SEM) analysis on the microstructure of improved clay: An overview. In *Open Geosciences* (Vol. 13, Issue 1, pp. 197–218). De Gruyter Open Ltd. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0145>
- Wang, B., Yu, J., Lu, Q., Xiao, Z., Ma, X., & Feng, Y. (2022). Preparation of Mn₃O₄ microspheres via glow discharge electrolysis plasma as a high-capacitance supercapacitor electrode material. *Journal of Alloys and Compounds*, 926. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166775>
- Wang, P., Zhang, X., Zhang, X., Du, P., Zhou, B., Meng, F., Wei, C., Zhou, L., Wen, G., & Wang, Y. (2024). Manganese oxide catalytic materials for degradation of organic pollutants in advanced oxidation processes: A review. In *Journal of Water Process Engineering* (Vol. 66). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106048>
- Wu, H., He, D., & Wang, Y. (2020). Facile one-step process synthesized reduced graphene oxide/Mn₃O₄ nanocomposite for a symmetric supercapacitor. *Materials Letters*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127613>
- Xue, Q., & Zhang, Q. (2019). Agar hydrogel template synthesis of Mn₃O₄ nanoparticles through an ion diffusion method controlled by ion exchange membrane and electrochemical performance. *Nanomaterials*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/nano9040503>
- Yang, G., & Park, S. J. (2019). Conventional and microwave hydrothermal synthesis and application of functional materials: A review. In *Materials* (Vol. 12, Issue 7). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma12071177>
- Ye, S., Nguyen, D. C. T., Kim, I. J., Yang, S. hye, & Oh, W. C. (2017). High performance for electric double-layer capacitors based on CNT–CG composite synthesized as additive material by CVD method. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 54, 428–433. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.06.023>
- Yewale, M. A., Jadhavar, A. A., Kadam, R. A., Velhal, N. B., Nakate, U. T., Teli, A. M., Shin, J. C., Nguyen, L. N., Shin, D. K., & Kaushik, N. K. (2022). Hydrothermal synthesis of manganese oxide (Mn₃O₄) with granule-like morphology for supercapacitor application. *Ceramics International*, 48(19), 29429–29437. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.06.144>
- Yin, W., Liu, M., Chen, Y. Y., Yao, Q. Z., Fu, S. Q., & Zhou, G. T. (2022). Microwave-assisted preparation of Mn₃O₄@sepiolite nanocomposite for highly efficient removal of uranium. *Applied Clay Science*, 228. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106597>
- Zamani, A., & Tadjarodi, A. (2024). Development and fabrication of graphene oxide and reduced graphene oxide incorporated MnFe₂O₄@Bi₂WO₆ nanocomposite for efficient

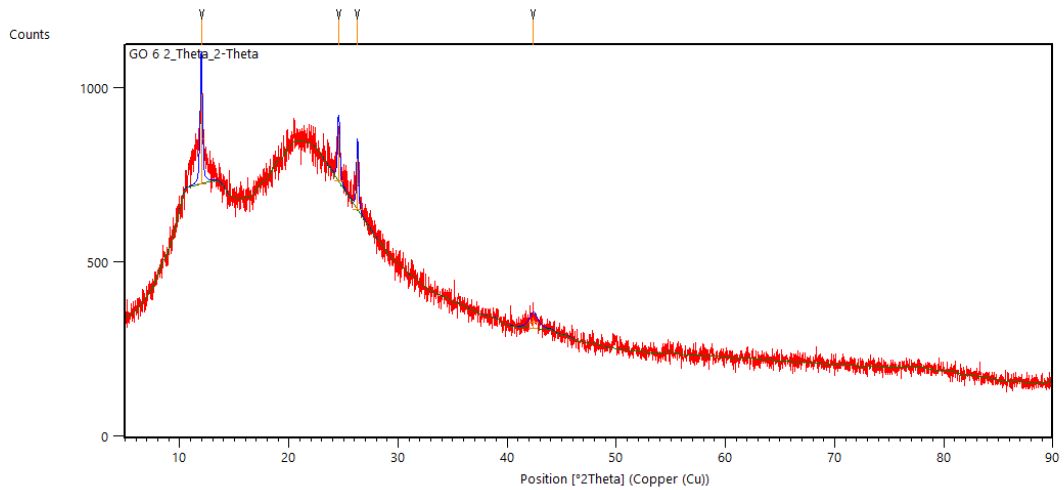
- degradation of antibiotic drug as water contaminant under visible-light illumination. *Ceramics International*, 50(24), 53456–53481. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.10.196>
- Zhang, C., Zhu, X., Wang, Z., Sun, P., Ren, Y., Zhu, J., Zhu, J., & Xiao, D. (2014). *Facile synthesis and strongly microstructure-dependent electrochemical properties of graphene/manganese dioxide composites for supercapacitors*. <http://www.nanoscalereslett.com/content/9/1/490>
- Zhang, D., Tan, C., Zhang, W., Pan, W., Wang, Q., & Li, L. (2022). Expanded Graphite-Based Materials for Supercapacitors: A Review. In *Molecules* (Vol. 27, Issue 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/molecules27030716>
- Zhang, F., Yang, K., Liu, G., Chen, Y., Wang, M., Li, S., & Li, R. (2022). Recent advances on graphene: Synthesis, properties and applications. In *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* (Vol. 160). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107051>
- Zhang, L. L., Zhou, R., & Zhao, X. S. (2010). *Graphene-based materials as supercapacitor electrodes*.
- Zhang, W., Guo, X., Zhao, J., Zheng, Y., Xie, H., Zhang, Z., Wang, S., Xu, Q., Fu, Q., & Zhang, T. (2022). High performance Flower-Like Mn₃O₄/rGO composite for supercapacitor applications. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 910. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2022.116170>
- Zulhamida; Putra, A. (2024). *Sintesis dan Karakterisasi Elektroda Superkapasitor Berbasis Karbon Akrif Limbah Tongkol Jagung*.

LAMPIRAN

Lampiran 1

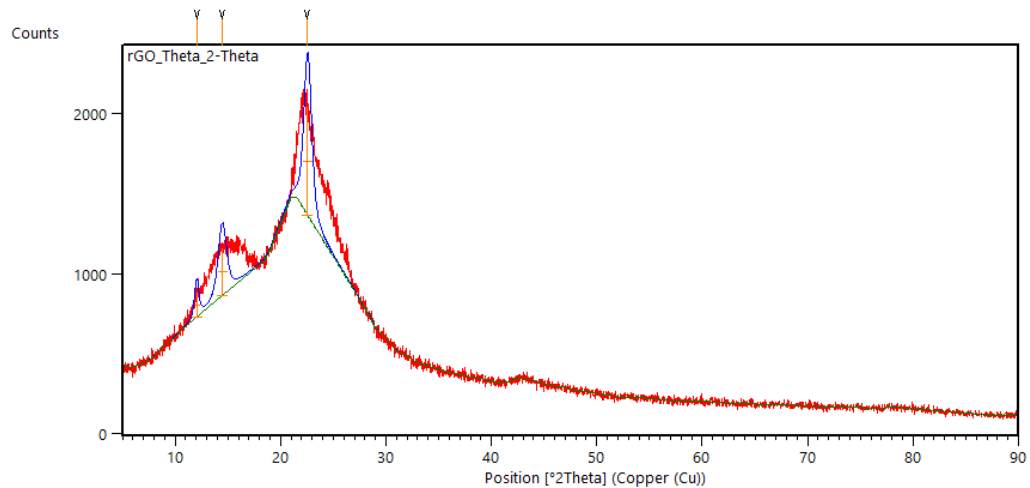
Hasil Pengujian XRD

a. Graphene Oxide (GO)



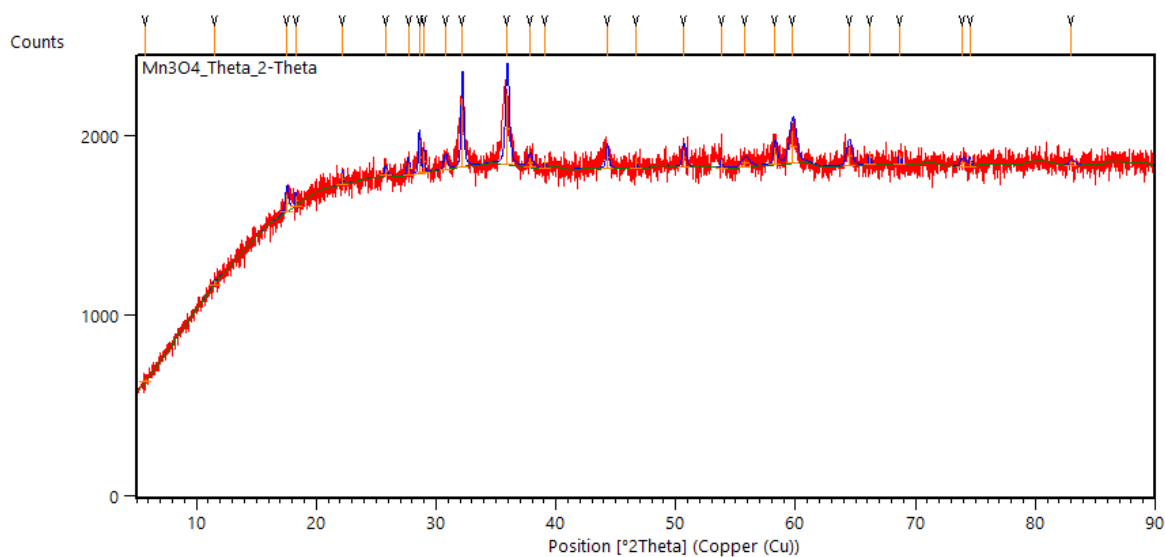
Pos. [$^{\circ}2\text{Th.}$]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}2\text{Th.}$]	d-spacing [$\text{\AA}$]	Rel. Int. [%]
11,9711	262,47	0,2362	7,39310	100
24,5451	138,75	0,2362	3,62687	52,86
26,2730	151,02	0,1968	3,39214	57,54
42,3755	31,41	0,9446	2,13305	11,97

b. Reduced Graphene Oxide (rGO)



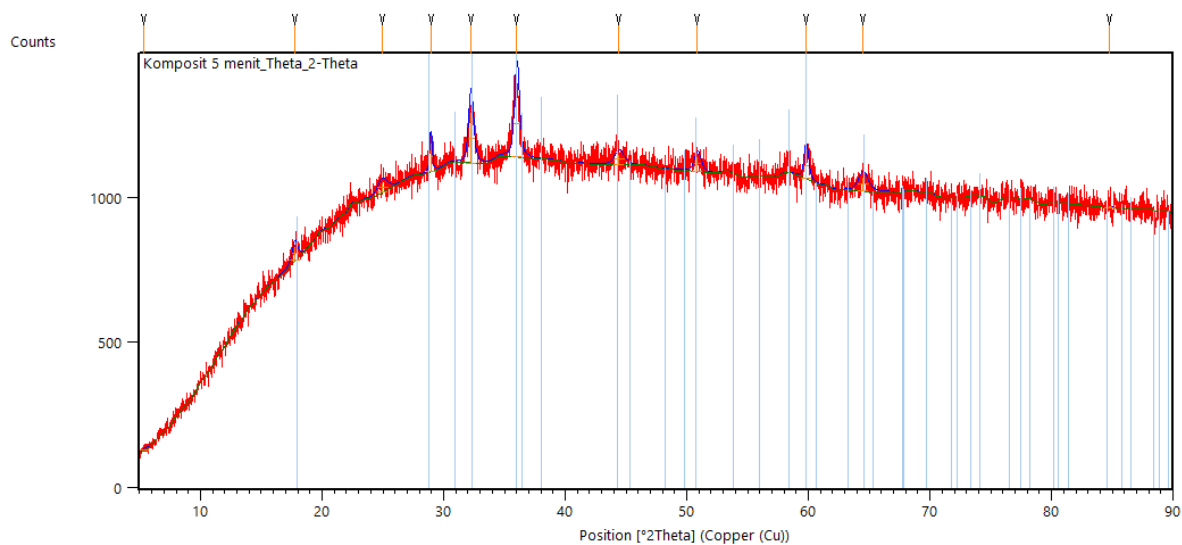
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
14,4621	306,61	0,9446	6,12482	44,07
22,5671	695,77	0,8659	3,94102	100

c. Trimanganese Tetraoxide (Mn₃O₄)



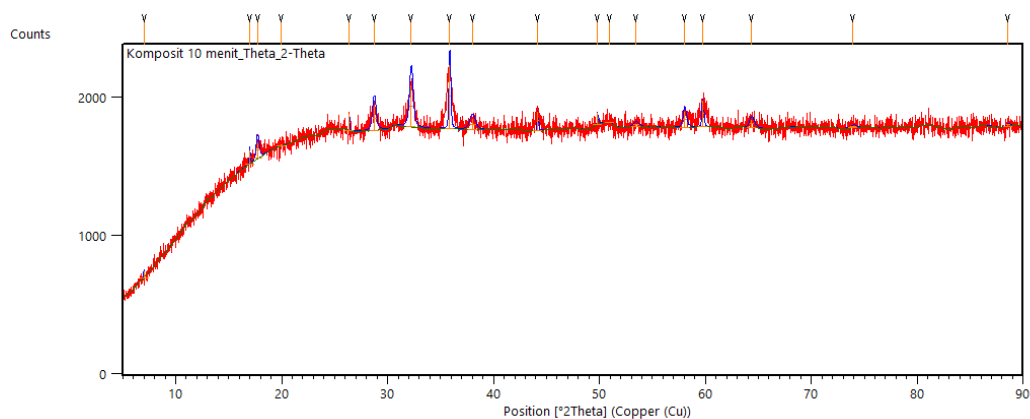
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
17,6841	96,2	0,4723	5,0155	23,98
28,6426	184,27	0,2362	3,11667	45,94
30,8046	69	0,3149	2,90268	17,20
32,1882	393,97	0,2362	2,78100	98,22
35,9321	401,11	0,3542	2,49936	100
44,1746	117,25	0,3936	2,05026	29,23
50,5699	92,37	0,3149	1,08148	23,03
58,2686	117,12	0,4723	1,58549	29,2
59,7468	186,87	0,3936	1,54780	46,59

d. Komposit rGO/ Mn₃O₄ 5 menit (K-5)



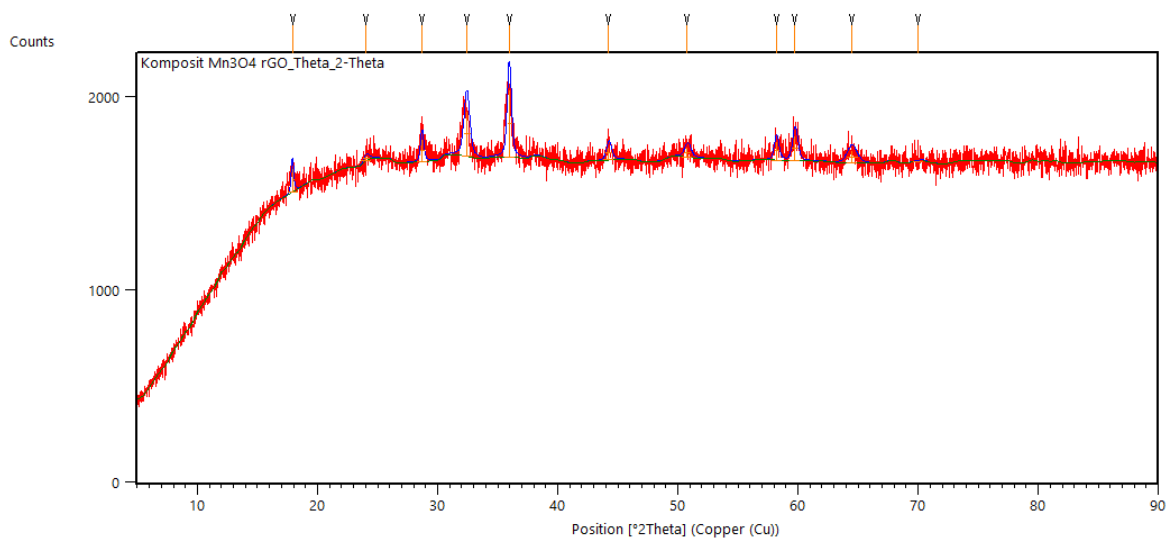
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
17,7466	49,48	0,4723	4,99796	21,35
24,9296	33,37	0,9446	3,57181	21,35
28,9333	102,57	0,2362	3,08601	44,27
30,925	31,90	0,2362	2,90039	11,4
32,2424	179,22	0,4723	2,77645	77,35
36,0119	231,71	0,4723	2,49401	100
44,4244	34,66	0,9466	2,03931	14,96
50,8517	1,79562	0,6298	51,07	22,04
58,4337	22,72	0,4723	1,57941	9,81
59,7893	94,53	0,3936	1,54680	40,8

e. Komposit rGO/ Mn₃O₄ 10 menit (K-10)



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
17,73	120,74	0,3149	5,00296	25,35
24,7947	86,09	0,0787	3,5905	26,26
28,73	177,32	0,3936	3,10712	37,23
30,6919	16,58	0,4723	2,91309	3,48
32,22	311,45	0,3936	2,77819	65,39
35,86	476,30	0,1574	2,50408	100
44,14	138,37	0,0787	2,05101	29,05
50,9298	37,39	0,6298	1,79305	7,85
58,01	24,86	0,3149	1,58984	5,22
59,72	116,9	0,1378	1,54848	24,54

f. Komposit rGO/ Mn₃O₄ 15 menit (K-15)

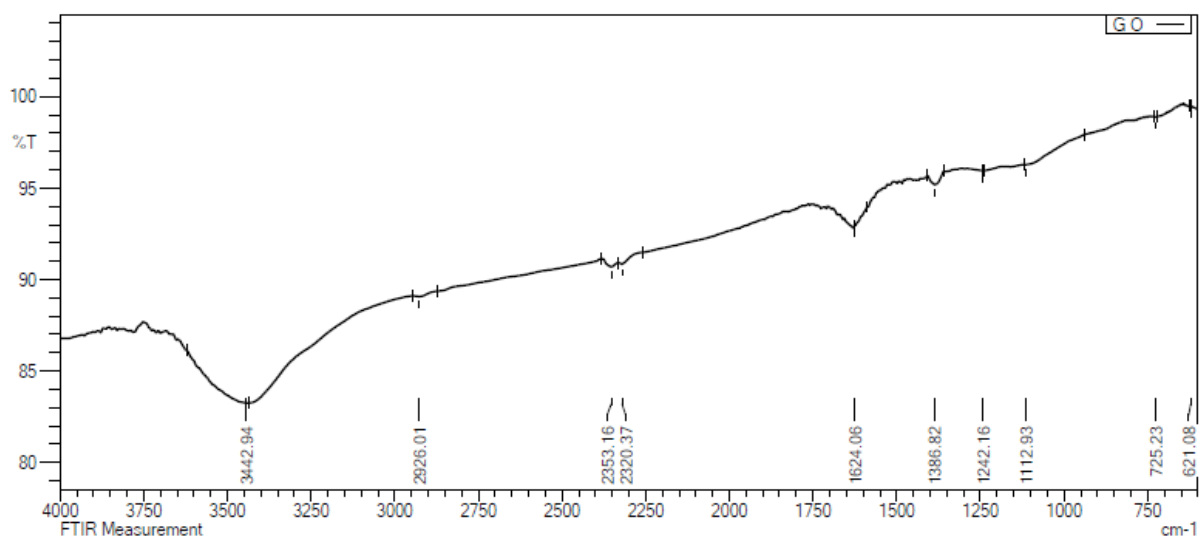


Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
17,8999	112	0,2362	4,9551	34,15
24,4697	22,39	0,6298	3,63794	6,27
28,6922	116,92	0,3149	3,11135	32,73
30,68	89,41	0,00394	2,92138	22,19
32,4150	239,26	0,5510	2,76206	66,97
35,8	380,41	0,1574	2,50818	100
44,2375	71,07	0,4723	2,04749	19,90
50,7870	52,76	0,6298	1,79776	14,77
58,1747	100,41	0,3936	1,58583	28,11
59,7252	131,23	0,4723	1,54831	36,73

Lampiran 2

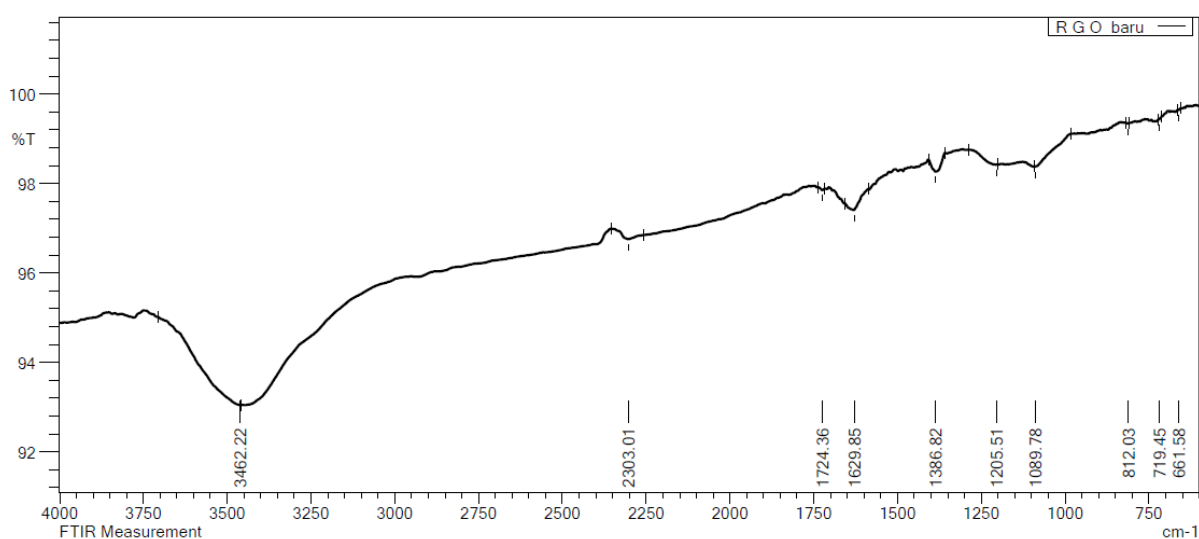
Hasil Pengujian FTIR

a. Graphene Oxide (GO)



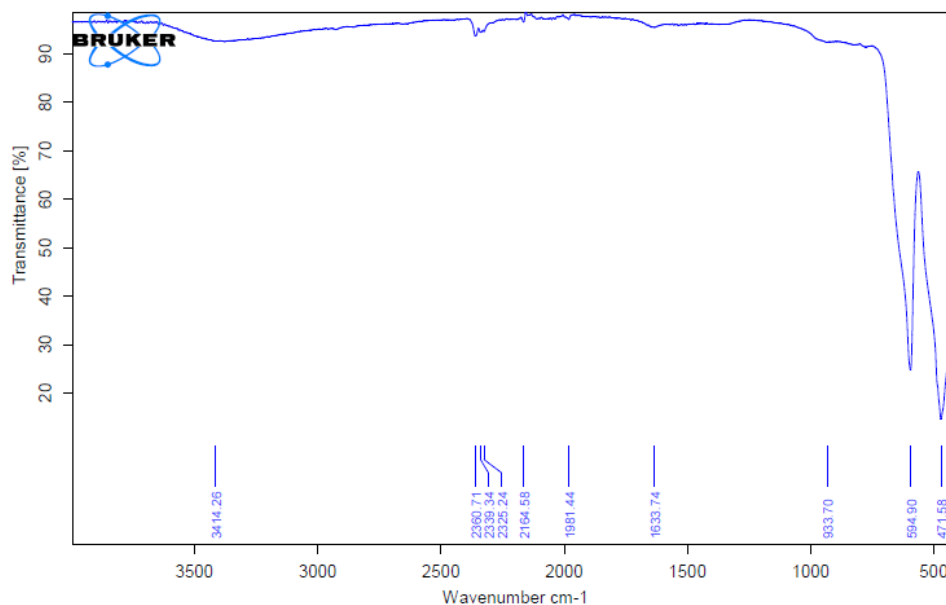
No	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area
1	621.08	99.47	0.01	624.94	619.15	3.011	0.047
2	725.23	98.87	0.04	731.02	719.45	12.719	0.199
3	1112.93	96.28	0.04	1116.78	939.33	518.087	5.611
4	1242.16	95.97	0.00	1244.09	1236.37	31.092	0.013
5	1386.82	95.19	0.61	1408.04	1359.82	220.488	18.518
6	1624.06	92.95	0.05	1625.99	1587.42	253.616	1.621
7	2320.37	90.84	0.20	2333.87	2260.57	646.163	1.847
8	2353.16	90.70	0.32	2382.09	2333.87	440.489	8.629
9	2926.01	89.07	0.11	2947.23	2872.01	813.003	3.624
10	3442.94	83.25	0.10	3622.32	3437.15	2912.905	80.649

b. Reduced Graphene Oxide (rGO)

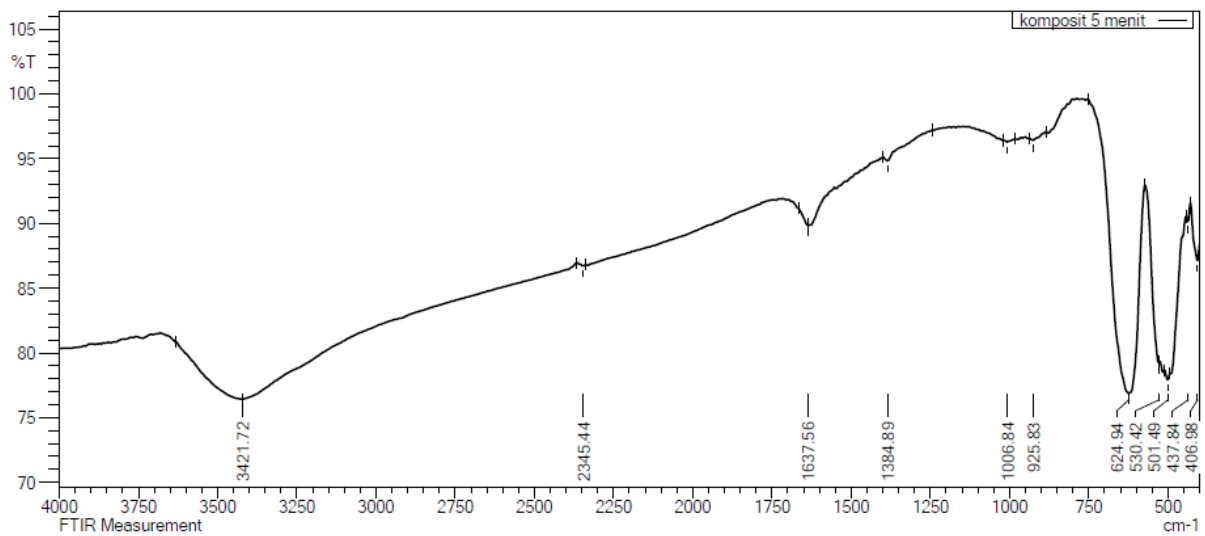


No	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area
1	661.58	99.64	0.02	665.44	653.87	3.962	0.097
2	719.45	99.43	0.02	721.38	711.73	5.207	0.094
3	812.03	99.34	0.02	819.75	808.17	7.522	0.142
4	1089.78	98.38	0.01	1091.71	981.77	138.166	0.378
5	1205.51	98.42	0.03	1286.52	1199.72	123.835	1.701
6	1386.82	98.27	0.34	1408.04	1357.89	79.872	10.372
7	1629.85	97.41	0.27	1656.85	1587.42	167.656	9.195
8	1724.36	97.85	0.04	1735.93	1716.65	40.912	0.442
9	2303.01	96.76	0.16	2355.08	2258.64	303.533	6.401
10	3462.22	93.05	0.03	3707.18	3458.37	1495.422	10.487

c. Trimanganese Tetraoxide (Mn_3O_4)

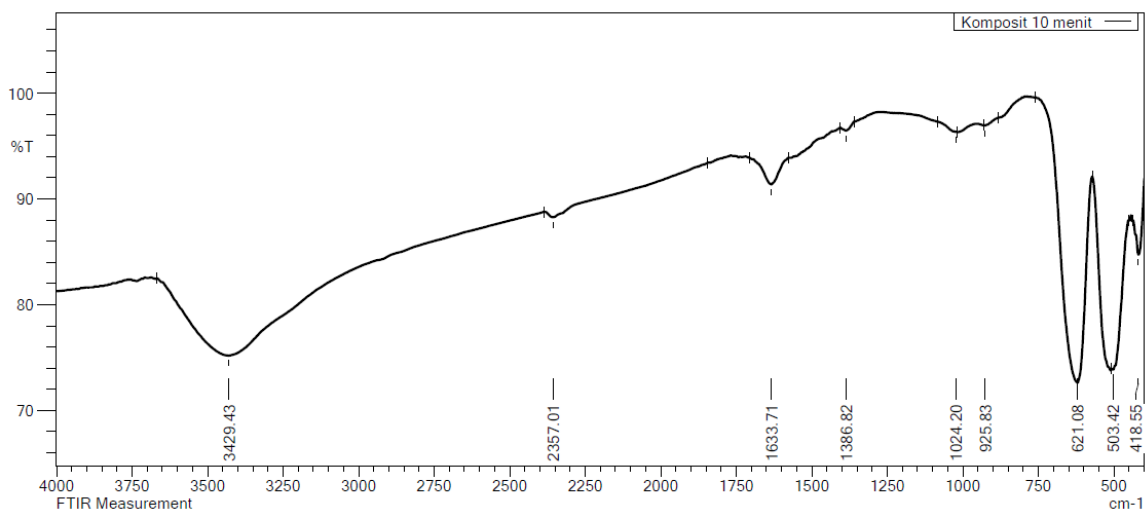


d. Komposit rGO/ Mn_3O_4 5 menit (K-5)



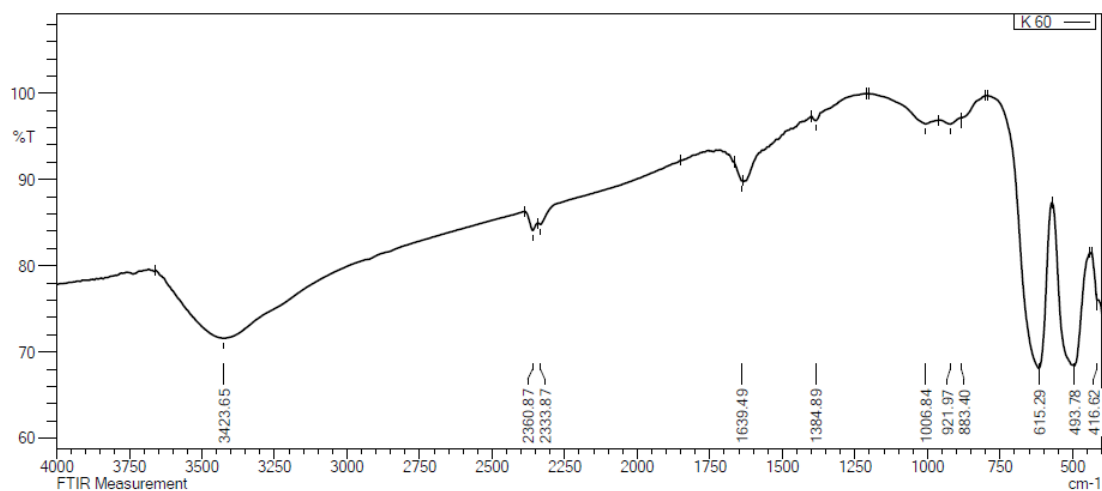
No	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area
1	406.98	87.14	2.11	430.13	399.26	347.866	39.860
2	437.84	90.15	0.82	443.63	430.13	127.539	6.684
3	501.49	77.93	0.61	511.14	493.78	377.638	5.280
4	530.42	79.27	1.21	572.86	526.57	660.704	19.702
5	624.94	76.91	17.97	752.24	572.86	2279.372	1612.240
6	925.83	96.43	0.23	937.40	885.33	172.611	6.776
7	1006.84	96.30	0.15	1018.41	981.77	131.890	2.693
8	1384.89	94.84	0.49	1400.32	1242.16	609.956	5.214
9	1637.56	89.88	0.12	1666.50	1635.64	293.718	2.184
10	2345.44	86.72	0.13	2366.66	2337.72	381.203	1.940
11	3421.72	76.44	5.42	3630.03	2366.66	23111.876	2787.411

e. Komposit rGO/ Mn₃O₄ 10 menit (K-10)



No	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area
1	418.55	84.73	5.12	435.91	399.26	481.097	113.068
2	503.42	73.85	1.06	507.28	451.34	1139.122	74.534
3	621.08	72.63	21.48	759.95	570.93	2550.826	1772.115
4	925.83	96.96	0.11	931.62	883.40	131.628	3.010
5	1024.20	96.34	0.07	1083.99	1020.34	202.792	1.367
6	1386.82	96.47	0.52	1406.11	1359.82	151.292	14.216
7	1633.71	91.38	2.51	1705.07	1575.84	931.849	142.983
8	2357.01	88.27	0.77	2385.95	1843.95	4985.698	167.060
9	3429.43	75.20	8.45	3666.68	2385.95	22266.033	3872.542

f. Komposit rGO/ Mn₃O₄ 15 menit (K-15)



No	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area
1	416.62	76.06	0.56	433.98	414.70	410.449	1.799
2	493.78	68.39	15.45	570.93	441.70	3270.287	1254.849
3	615.29	68.12	21.67	792.74	570.93	3282.051	1842.531
4	883.40	97.16	0.07	885.33	802.39	132.459	2.705
5	921.97	96.42	0.61	960.55	885.33	246.166	22.339
6	1006.84	96.44	1.03	1201.65	960.55	422.579	40.473
7	1384.89	96.81	0.73	1400.32	1209.37	234.172	-24.124
8	1639.49	89.81	0.33	1666.50	1635.64	286.361	7.290
9	2333.87	84.79	0.26	2341.58	1849.73	5402.616	-217.478
10	2360.87	84.09	1.41	2387.87	2341.58	692.500	26.404
11	3423.65	71.60	9.11	3658.96	2387.87	26391.420	4611.527

Hasil Pengujian BET

a. *Graphene Oxide (GO)*

		
TriStar II Plus 3.03	TriStar II Plus Version 3.03 Serial # 2117 Unit 1 Port 2	Page 2 of 35
Sample: GO Operator: FELIS Submitter: FATHAN File: D:\TriStar II Plus\Data\2025\FATHAN\ID 219890\GO.SMP		
Started: 6/20/2025 9:12:48 AM	Analysis adsorptive: N2	
Completed: 6/20/2025 5:52:06 PM	Analysis bath temp.: -195,850 °C	
Report time: 6/24/2025 8:35:23 AM	Thermal correction: No	
Sample mass: 0,2811 g	Ambient free space: 0,5145 cm ³ Measured	
Analysis free space: 2,1224 cm ³	Equilibration interval: 10 s	
Low pressure dose: None	Sample density: 1,000 g/cm ³	
Automatic degas: No		
Summary Report		
Surface Area		
Single point surface area at P/Po = 0,293611206:		182,8814 m ² /g
BET Surface Area:		230,1001 m ² /g
Pore Volume		
Single point adsorption total pore volume of pores less than 1.832,677 Å diameter at P/Po = 0,989435495:		0,421939 cm ³ /g
Pore Size		
Adsorption average pore diameter (4V/A by BET):		73,349 Å
Desorption average pore diameter (4V/A by BET):		66,392 Å



TriStar II Plus 3.03

TriStar II Plus Version 3.03
Serial # 2117 Unit 1 Port 2

Page 3 of 35

Sample: GO
Operator: FELIS
Submitter: FATHAN
File: D:\TriStar II Plus\Data\2025\FATHAN\ID 219890\GO.SMP

Started: 6/20/2025 9:12:48 AM Analysis adsorptive: N2
Completed: 6/20/2025 5:52:06 PM Analysis bath temp.: -195.850 °C
Report time: 6/24/2025 8:35:23 AM Thermal correction: No
Sample mass: 0.2811 g Ambient free space: 0.5145 cm³ Measured
Analysis free space: 2.1224 cm³ Equilibration interval: 10 s
Low pressure dose: None Sample density: 1,000 g/cm³
Automatic degas: No

Validation errors exist for this report. Review the validation report for details.

Isotherm Tabular Report

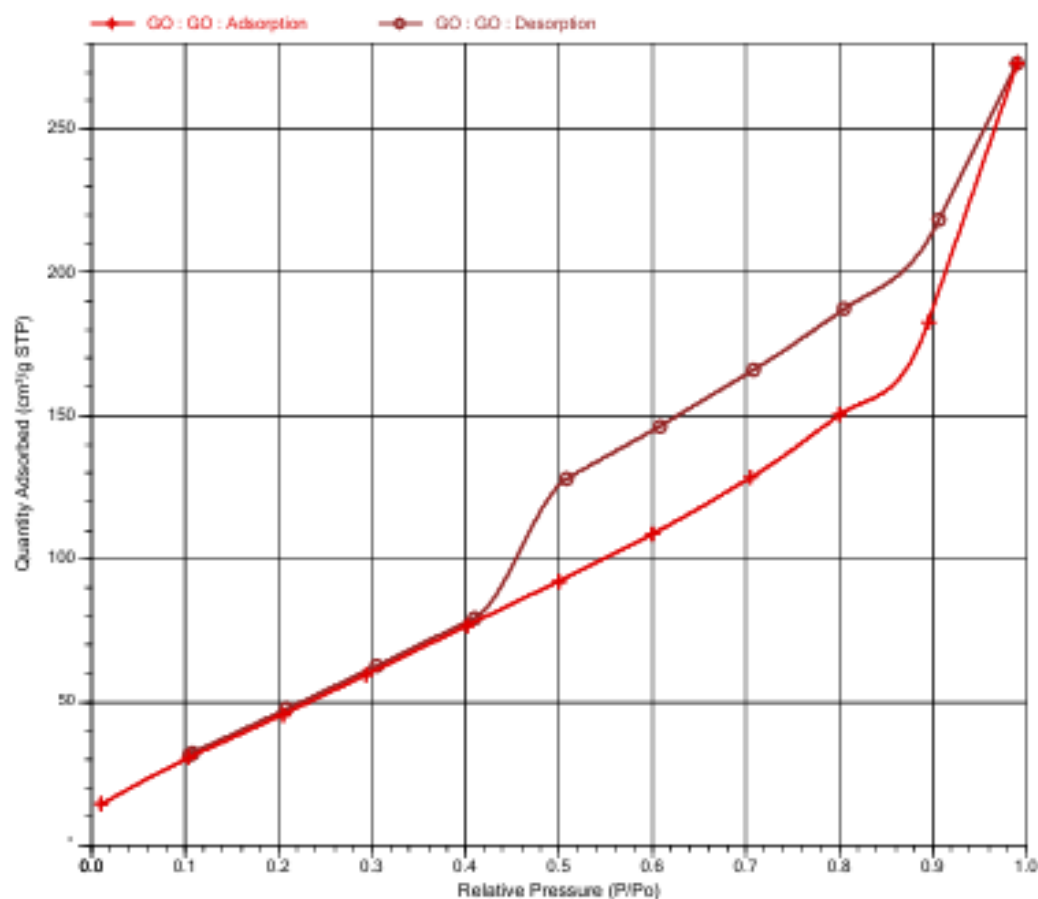
Relative Pressure (P/Po)	Absolute Pressure (mmHg)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g STP)	Elapsed Time (h:min)	Saturation Pressure (mmHg)
0.009640584	7.047656	14.1964	01:17	733.485718
0.103765141	75.845123	30.4329	02:20	731.040283
0.205688374	150.317551	45.6988	02:29	730.930664
0.293611206	214.574829	59.4811	02:38	730.802368
0.401896142	293.596832	76.6822	02:44	730.812805
0.499949948	365.185181	92.2062	02:50	730.529114
0.599842490	438.078400	108.6985	02:56	730.443481
0.705072648	514.979614	128.3227	03:04	730.322388
0.800131568	584.322205	150.2450	03:15	730.392273
0.894504499	653.013672	182.7749	03:28	730.282654
0.989435495	721.431274	272.7816	03:48	730.028381
0.906228777	660.592712	218.1956	05:13	729.134216
0.804098217	586.189514	187.1747	05:56	728.946960
0.708866319	516.757446	166.0376	06:20	729.002380
0.607528802	442.903625	146.3608	06:34	728.991394
0.507695975	370.151703	127.9063	06:45	729.024902
0.409820583	298.880920	79.4414	06:58	729.081421
0.304524674	222.073578	62.6097	07:18	729.296997
0.208925053	152.393509	47.5026	07:24	729.246582
0.108115445	78.871490	32.2719	07:33	729.417114
0.104460216	76.206871	31.7045	07:41	729.511780
			07:44	729.530090

Sample: GO
Operator: FELIS
Submitter: FATHAN
File: D:\TriStar II Plus\Data\2025\FATHAN\ID 21989\GO.SMP

Started: 6/20/2025 9:12:48 AM	Analysis adsorptive: N2
Completed: 6/20/2025 5:52:06 PM	Analysis bath temp.: -195.850 °C
Report time: 6/24/2025 8:35:23 AM	Thermal correction: No
Sample mass: 0.2811 g	Ambient free space: 0.5145 cm ³ Measured
Analysis free space: 2.1224 cm ³	Equilibration interval: 10 s
Low pressure dose: None	Sample density: 1.000 g/cm ³
Automatic degas: No	

Validation errors exist for this report. Review the validation report for details.

Isotherm Linear Plot





TriStar II Plus 3.03

TriStar II Plus Version 3.03
Serial # 2117 Unit 1 Port 2

Page 16 of 35

Sample: GO
Operator: FELIS
Submitter: FATHAN

File: D:\TriStar II Plus\Data\2025\FATHAN\ID 219890\GO.SMP

Started: 6/20/2025 9:12:48 AM Analysis adsorptive: N2
Completed: 6/20/2025 5:52:06 PM Analysis bath temp.: -195,850 °C
Report time: 6/24/2025 8:35:23 AM Thermal correction: No
Sample mass: 0,2811 g Ambient free space: 0,5145 cm³ Measured
Analysis free space: 2,1224 cm³ Equilibration interval: 10 s
Low pressure dose: None Sample density: 1,000 g/cm³
Automatic degas: No

BJH Adsorption Pore Distribution Report

Faas Correction

Harkins and Jura

$$t = [13.99 / (0.034 - \log(P/P_0))] ^{0.5}$$

Diameter range: 17,000 to 3,000,000 Å

Adsorbate property factor: 9,53000 Å

Density conversion factor: 0,0015468

Fraction of pores open at both ends: 0,00

Pore Diameter Range (Å)	Average Diameter (Å)	Incremental Pore Volume (cm ³ /g)	Cumulative Pore Volume (cm ³ /g)	Incremental Pore Area (m ² /g)	Cumulative Pore Area (m ² /g)
1828.9 - 193.2	208.5	0.174542	0.174542	33.489	33.489
193.2 - 102.4	120.9	0.056987	0.231528	18.856	52.345
102.4 - 68.1	78.2	0.038100	0.269628	19.496	71.841
68.1 - 48.3	54.7	0.034516	0.304144	25.240	97.081
48.3 - 36.6	40.8	0.028971	0.333116	28.407	125.488
36.6 - 28.5	31.5	0.027173	0.360289	34.458	159.945
28.5 - 21.7	24.2	0.029360	0.389648	48.564	208.509
21.7 - 17.1	18.8	0.020608	0.410257	43.737	252.246



TriStar II Plus 3.03

TriStar II Plus Version 3.03
Serial # 2117 Unit 1 Port 2

Page 18 of 35

Sample: GO
Operator: FELIS
Submitter: FATHAN

File: D:\TriStar II Plus\Data\2025\FATHAN\ID 219890\GO.SMP

Started: 6/20/2025 9:12:48 AM Analysis adsorptive: N2
Completed: 6/20/2025 5:52:06 PM Analysis bath temp.: -195,850 °C
Report time: 6/24/2025 8:35:23 AM Thermal correction: No
Sample mass: 0,2811 g Ambient free space: 0,5145 cm³ Measured
Analysis free space: 2,1224 cm³ Equilibration interval: 10 s
Low pressure dose: None Sample density: 1,000 g/cm³
Automatic degas: No

BJH Desorption Pore Distribution Report

Faas Correction

Harkins and Jura

$$t = [13.99 / (0.034 - \log(P/P_0))] ^{0.5}$$

Diameter range: 17,000 to 3,000,000 Å

Adsorbate property factor: 9,53000 Å

Density conversion factor: 0,0015468

Fraction of pores open at both ends: 0,00

Pore Diameter Range (Å)	Average Diameter (Å)	Incremental Pore Volume (cm ³ /g)	Cumulative Pore Volume (cm ³ /g)	Incremental Pore Area (m ² /g)	Cumulative Pore Area (m ² /g)
1828.5 - 216.4	235.4	0.103488	0.103488	17.582	17.582
216.4 - 104.0	123.5	0.057468	0.160956	18.617	36.199
104.0 - 68.6	78.9	0.039182	0.200138	19.859	56.058
68.6 - 49.0	55.4	0.037059	0.237197	26.759	82.817
49.0 - 36.9	41.2	0.034971	0.272168	33.942	116.760
36.9 - 28.7	31.7	0.113249	0.385417	142.766	259.525
28.7 - 21.9	24.4	0.017901	0.403318	29.393	288.918
21.9 - 16.8	18.7	0.014153	0.417471	30.295	319.214

b. Reduced Graphene Oxide (rGO)

		
TriStar II Plus 3.03	TriStar II Plus Version 3.03 Serial # 2117 Unit 1 Port 1	Page 2 of 35
Sample: RGO Operator: FELIS Submitter: FATHAN File: D:\TriStar II Plus\Data\2025\FATHAN\ID 219890\RGO.SMP		
Started: 6/20/2025 9:12:48 AM	Analysis adsorptive: N2	
Completed: 6/20/2025 5:52:06 PM	Analysis bath temp.: -195,850 °C	
Report time: 6/24/2025 8:35:23 AM	Thermal correction: No	
Sample mass: 0,4631 g	Ambient free space: 0,5607 cm ³ Measured	
Analysis free space: 3,6060 cm ³	Equilibration interval: 10 s	
Low pressure dose: None	Sample density: 1,000 g/cm ³	
Automatic degas: No		
Summary Report		
Surface Area		
Single point surface area at P/Po = 0,296205167: 108,2772 m ² /g		
BET Surface Area: 134,4080 m ² /g		
Pore Volume		
Single point adsorption total pore volume of pores less than 1.983,233 Å diameter at P/Po = 0,990248305: 0,198426 cm ³ /g		
Pore Size		
Adsorption average pore diameter (4V/A by BET): 59,052 Å		
Desorption average pore diameter (4V/A by BET): 55,610 Å		



TriStar II Plus 3.03

TriStar II Plus Version 3.03
Serial # 2117 Unit 1 Port 1

Page 3 of 35

Sample: RGO
Operator: FELIS
Submitter: FATHAN

File: D:\TriStar II Plus\Data\2025\FATHAN\ID 219890\RGO.SMP

Started: 6/20/2025 9:12:48 AM
Completed: 6/20/2025 5:52:06 PM
Report time: 6/24/2025 8:35:23 AM
Sample mass: 0.4631 g
Analysis free space: 3.6060 cm³
Low pressure dose: None
Automatic degas: No

Analysis adsorptive: N₂
Analysis bath temp.: -195,850 °C
Thermal correction: No
Ambient free space: 0.5607 cm³ Measured
Equilibration interval: 10 s
Sample density: 1,000 g/cm³

Validation errors exist for this report. Review the validation report for details.

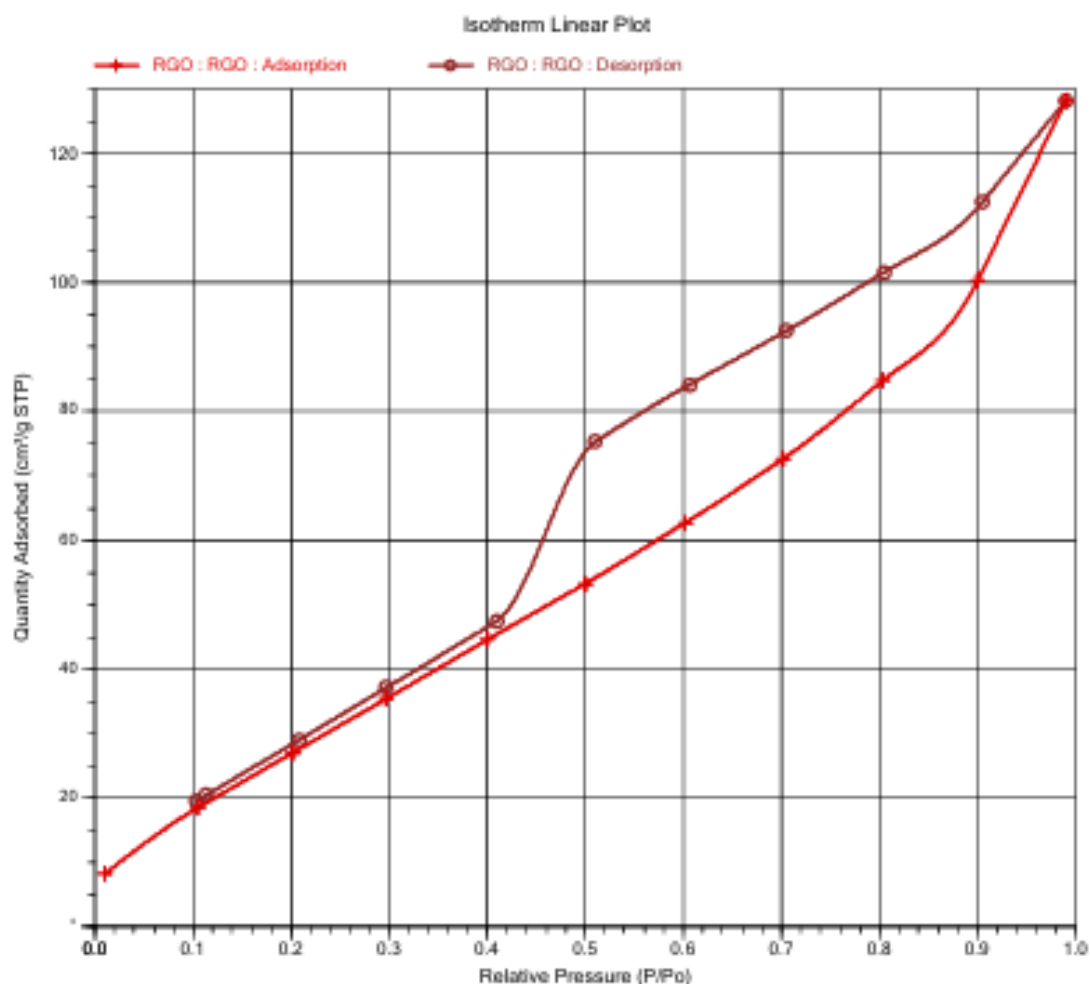
Isotherm Tabular Report

Relative Pressure (P/Po)	Absolute Pressure (mmHg)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g STP)	Elapsed Time (h:min)	Saturation Pressure (mmHg)
0.010282236	7.514587	8.1978	01:17	733.485718
0.105097097	76.760735	18.4488	02:32	730.831970
0.201728959	147.334747	27.0051	02:58	730.379211
0.296205167	216.306137	35.3463	03:14	730.359924
0.400563875	292.466736	44.5416	03:28	730.257813
0.499337847	364.513702	53.2416	03:40	730.137573
0.602409937	439.601776	62.6891	03:50	729.994141
0.700942023	511.478729	72.6333	04:01	729.738586
0.803056131	585.847534	84.7670	04:12	729.701904
0.899384804	656.082825	100.3100	04:25	729.522522
0.990248305	722.060730	128.2814	04:40	729.479553
0.905379606	660.125732	112.5178	05:19	729.171387
0.805712654	587.344116	101.6323	05:38	729.114868
0.705225565	514.083740	92.4940	05:49	728.974670
0.607360747	442.803314	84.2023	05:58	728.963562
0.509899722	371.708588	75.2379	06:06	729.061462
0.409767523	298.766693	67.4596	06:32	728.983704
0.297252037	216.812286	37.0653	07:08	729.112671
0.208223568	151.921829	28.9772	07:34	729.388733
0.113118712	82.559586	20.3806	07:59	729.609192
0.103376703	75.454399	19.4602	08:28	729.849060
			08:38	729.897522

Sample: RGO
Operator: FELIS
Submitter: FATHAN
File: D:\TriStar II Plus\Data\2025\FATHAN\ID 219890\RGO.SMP

Started: 6/20/2025 9:12:48 AM	Analysis adsorptive: N2
Completed: 6/20/2025 5:52:06 PM	Analysis bath temp.: -195.850 °C
Report time: 6/24/2025 8:35:23 AM	Thermal correction: No
Sample mass: 0.4631 g	Ambient free space: 0.5607 cm ³ Measured
Analysis free space: 3.6060 cm ³	Equilibration interval: 10 s
Low pressure dose: None	Sample density: 1.000 g/cm ³
Automatic degas: No	

Validation errors exist for this report. Review the validation report for details.





TriStar II Plus 3.03

TriStar II Plus Version 3.03
Serial # 2117 Unit 1 Port 1

Page 16 of 35

Sample: RGO
Operator: FELIS
Submitter: FATHAN

File: D:\TriStar II Plus\Data\2025\FATHAN\ID 219890\RGO.SMP

Started: 6/20/2025 9:12:48 AM Analysis adsorptive: N2
Completed: 6/20/2025 5:52:06 PM Analysis bath temp.: -195,850 °C
Report time: 6/24/2025 8:35:23 AM Thermal correction: No
Sample mass: 0,4631 g Ambient free space: 0,5607 cm³ Measured
Analysis free space: 3,6060 cm³ Equilibration interval: 10 s
Low pressure dose: None Sample density: 1,000 g/cm³
Automatic degas: No

BJH Adsorption Pore Distribution Report

Faas Correction
Harkins and Jura

$$t = [13.99 / (0.034 - \log(P/P_0))] ^{0.5}$$

Diameter range: 17,000 to 3,000,000 Å
Adsorbate property factor: 9,53000 Å
Density conversion factor: 0,0015468
Fraction of pores open at both ends: 0,00

Pore Diameter Range (Å)	Average Diameter (Å)	Incremental Pore Volume (cm³/g)	Cumulative Pore Volume (cm³/g)	Incremental Pore Area (m²/g)	Cumulative Pore Area (m²/g)
1979.8 - 202.7	218.3	0.054043	0.054043	9.904	9.904
202.7 - 104.2	123.3	0.029130	0.083173	9.454	19.358
104.2 - 67.4	77.7	0.023119	0.106292	11.899	31.256
67.4 - 49.0	55.1	0.019125	0.125416	13.878	45.134
49.0 - 36.9	41.1	0.018184	0.143600	17.681	62.815
36.9 - 28.8	31.8	0.016521	0.160121	20.807	83.622
28.8 - 22.2	24.6	0.016885	0.177006	27.480	111.102
22.2 - 17.2	19.0	0.013676	0.190682	28.728	139.830



TriStar II Plus 3.03

TriStar II Plus Version 3.03
Serial # 2117 Unit 1 Port 1

Page 18 of 35

Sample: RGO
Operator: FELIS
Submitter: FATHAN

File: D:\TriStar II Plus\Data\2025\FATHAN\ID 219890\RGO.SMP

Started: 6/20/2025 9:12:48 AM Analysis adsorptive: N2
Completed: 6/20/2025 5:52:06 PM Analysis bath temp.: -195,850 °C
Report time: 6/24/2025 8:35:23 AM Thermal correction: No
Sample mass: 0,4631 g Ambient free space: 0,5607 cm³ Measured
Analysis free space: 3,6060 cm³ Equilibration interval: 10 s
Low pressure dose: None Sample density: 1,000 g/cm³
Automatic degas: No

BJH Desorption Pore Distribution Report

Faas Correction
Harkins and Jura

$$t = [13.99 / (0.034 - \log(P/P_0))] ^{0.5}$$

Diameter range: 17,000 to 3,000,000 Å
Adsorbate property factor: 9,53000 Å
Density conversion factor: 0,0015468
Fraction of pores open at both ends: 0,00

Pore Diameter Range (Å)	Average Diameter (Å)	Incremental Pore Volume (cm³/g)	Cumulative Pore Volume (cm³/g)	Incremental Pore Area (m²/g)	Cumulative Pore Area (m²/g)
1979.3 - 214.8	232.3	0.030045	0.030045	5.174	5.174
214.8 - 105.3	124.8	0.020675	0.050720	6.627	11.801
105.3 - 68.0	78.5	0.017828	0.068548	9.086	20.887
68.0 - 49.3	55.5	0.016496	0.085044	11.885	32.772
49.3 - 37.5	41.7	0.018443	0.103487	17.689	50.462
37.5 - 29.0	32.1	0.068023	0.171509	84.746	135.208
29.0 - 21.8	24.4	0.013387	0.184896	21.986	157.194
21.8 - 17.1	18.9	0.008984	0.193880	19.041	176.235

c. Trimanganese Tetraoxide (Mn₃O₄)

		
TriStar II Plus 3.03	TriStar II Plus Version 3.03 Serial # 2117 Unit 1 Port 3	Page 2 of 34
Sample: MN3O4 Operator: FELIS Submitter: FATHAN File: D:\TriStar II Plus\Data\2025\FATHAN\219890\MN3O4.SMP		
Started: 6/20/2025 9:12:48 AM	Analysis adsorptive: N2	
Completed: 6/20/2025 5:52:06 PM	Analysis bath temp.: -195,850 °C	
Report time: 6/24/2025 8:35:23 AM	Thermal correction: No	
Sample mass: 0.4941 g	Ambient free space: 0.5012 cm ³ Measured	
Analysis free space: 1.0103 cm ³	Equilibration interval: 10 s	
Low pressure dose: None	Sample density: 1,000 g/cm ³	
Automatic degas: No		
Summary Report		
Surface Area		
Single point surface area at P/Po = 0.297450642:	79,7460 m ² /g	
BET Surface Area:	107,0298 m ² /g	
Pore Volume		
Single point adsorption total pore volume of pores less than 1.905,869 Å diameter at P/Po = 0.989846887:	0.216335 cm ³ /g	
Pore Size		
Adsorption average pore diameter (4V/A by BET):	80,851 Å	
Desorption average pore diameter (4V/A by BET):	65,198 Å	



TriStar II Plus 3.03

TriStar II Plus Version 3.03
Serial # 2117 Unit 1 Port 3

Page 3 of 34

Sample: MN3O4
Operator: FELIS
Submitter: FATHAN

File: D:\TriStar II Plus\Data\2025\FATHAN\219890\MN3O4.SMP

Started: 6/20/2025 9:12:48 AM	Analysis adsorptive: N2
Completed: 6/20/2025 5:52:06 PM	Analysis bath temp.: -195,850 °C
Report time: 6/24/2025 8:35:23 AM	Thermal correction: No
Sample mass: 0.4941 g	Ambient free space: 0,5012 cm ³ Measured
Analysis free space: 1,0103 cm ³	Equilibration interval: 10 s
Low pressure dose: None	Sample density: 1,000 g/cm ³
Automatic degas: No	

Validation errors exist for this report. Review the validation report for details.

Isotherm Tabular Report

Relative Pressure (P/Po)	Absolute Pressure (mmHg)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g STP)	Elapsed Time (h:min)	Saturation Pressure (mmHg)
0.009558808	6.986253	3.6777	01:17	733.485718
0.104913473	76.686684	12.2551	02:22	730.870789
0.202855017	148.252151	19.2853	02:29	730.951721
0.297450642	217.371552	26.0787	02:36	730.828125
0.402403748	294.070465	33.7819	02:39	730.781921
0.502461886	367.078094	41.3031	02:43	730.784607
0.600836131	438.882629	48.9186	02:47	730.559082
0.697790284	509.671875	56.7983	02:50	730.453125
0.806166048	588.806824	66.6632	02:55	730.408386
0.899996591	657.379944	78.1203	03:02	730.379089
0.989846887	721.799927	139.8600	03:12	730.424927
0.905551817	660.140808	82.5811	05:20	729.203613
0.806847875	588.144775	67.5107	06:24	728.992859
0.707522836	515.791748	58.0528	06:37	728.941345
0.607657632	442.974365	49.7790	06:45	729.010742
0.505967318	368.843628	41.8576	06:51	728.986755
0.408882622	298.081146	34.5306	06:56	728.987061
0.300207386	218.873062	26.5357	06:59	729.013977
0.209662327	152.864349	20.0193	07:03	729.072876
0.111369148	81.204491	12.9665	07:07	729.097839
0.102712175	74.900703	12.3335	07:13	729.147095
			07:16	729.229065

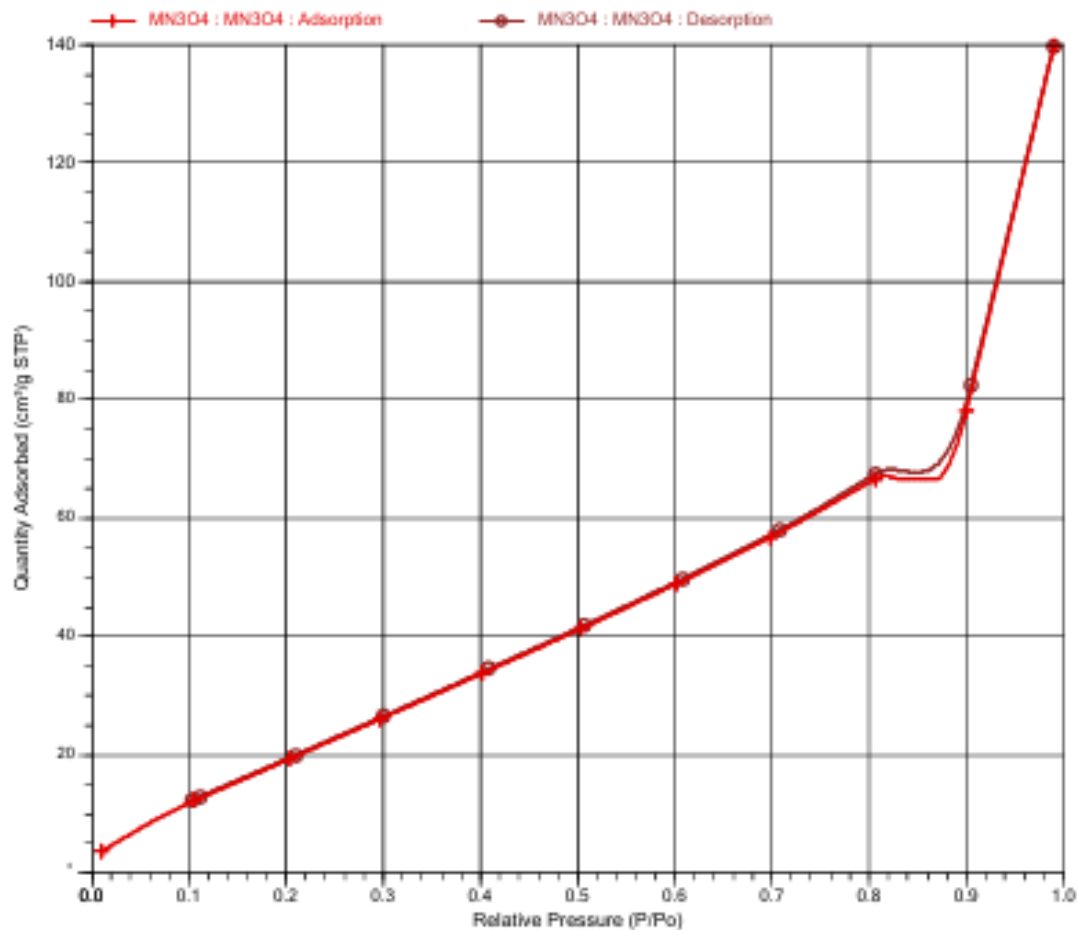
Sample: MN3O4
Operator: FELIS
Submitter: FATHAN

File: D:\TriStar II Plus\Data\2025\FATHAN\219890\MN3O4.SMP

Started: 6/20/2025 9:12:48 AM	Analysis adsorptive: N2
Completed: 6/20/2025 5:52:06 PM	Analysis bath temp.: -195.850 °C
Report time: 6/24/2025 8:35:23 AM	Thermal correction: No
Sample mass: 0.4941 g	Ambient free space: 0.5012 cm ³ Measured
Analysis free space: 1.0103 cm ³	Equilibration interval: 10 s
Low pressure dose: None	Sample density: 1,000 g/cm ³
Automatic degas: No	

Validation errors exist for this report. Review the validation report for details.

Isotherm Linear Plot





TriStar II Plus 3.03

TriStar II Plus Version 3.03
Serial # 2117 Unit 1 Port 3

Page 16 of 34

Sample: MN3O4
Operator: FELIS
Submitter: FATHAN
File: D:\TriStar II Plus\Data\2025\FATHAN\ID 219890\MN3O4.SMP

Started: 6/20/2025 9:12:48 AM Analysis adsorptive: N2
Completed: 6/20/2025 5:52:06 PM Analysis bath temp.: -195,850 °C
Report time: 6/24/2025 8:35:23 AM Thermal correction: No
Sample mass: 0,4941 g Ambient free space: 0,5012 cm³ Measured
Analysis free space: 1,0103 cm³ Equilibration interval: 10 s
Low pressure dose: None Sample density: 1,000 g/cm³
Automatic degas: No

BJH Adsorption Pore Distribution Report

Faas Correction

Harkins and Jura

$$t = [13.99 / (0.034 - \log(P/P_0))] ^{0.5}$$

Diameter range: 17,000 to 3,000,000 Å
Adsorbate property factor: 9,53000 Å
Density conversion factor: 0,0015468
Fraction of pores open at both ends: 0,00

Pore Diameter Range (Å)	Average Diameter (Å)	Incremental Pore Volume (cm³/g)	Cumulative Pore Volume (cm³/g)	Incremental Pore Area (m²/g)	Cumulative Pore Area (m²/g)
1901.6 - 203.1	219.4	0.118201	0.118201	21.551	21.551
203.1 - 105.1	124.4	0.016364	0.134565	5.263	26.814
105.1 - 65.8	76.4	0.015274	0.149840	8.002	34.816
65.8 - 47.9	53.9	0.013027	0.162867	9.659	44.475
47.9 - 36.4	40.5	0.013047	0.175914	12.886	57.361
36.4 - 28.1	31.1	0.012857	0.188771	16.531	73.892
28.1 - 21.4	23.8	0.012481	0.201252	20.944	94.836
21.4 - 16.4	18.3	0.009482	0.210734	20.755	115.591



TriStar II Plus 3.03

TriStar II Plus Version 3.03
Serial # 2117 Unit 1 Port 3

Page 18 of 34

Sample: MN3O4
Operator: FELIS
Submitter: FATHAN
File: D:\TriStar II Plus\Data\2025\FATHAN\ID 219890\MN3O4.SMP

Started: 6/20/2025 9:12:48 AM Analysis adsorptive: N2
Completed: 6/20/2025 5:52:06 PM Analysis bath temp.: -195,850 °C
Report time: 6/24/2025 8:35:23 AM Thermal correction: No
Sample mass: 0,4941 g Ambient free space: 0,5012 cm³ Measured
Analysis free space: 1,0103 cm³ Equilibration interval: 10 s
Low pressure dose: None Sample density: 1,000 g/cm³
Automatic degas: No

BJH Desorption Pore Distribution Report

Faas Correction

Harkins and Jura

$$t = [13.99 / (0.034 - \log(P/P_0))] ^{0.5}$$

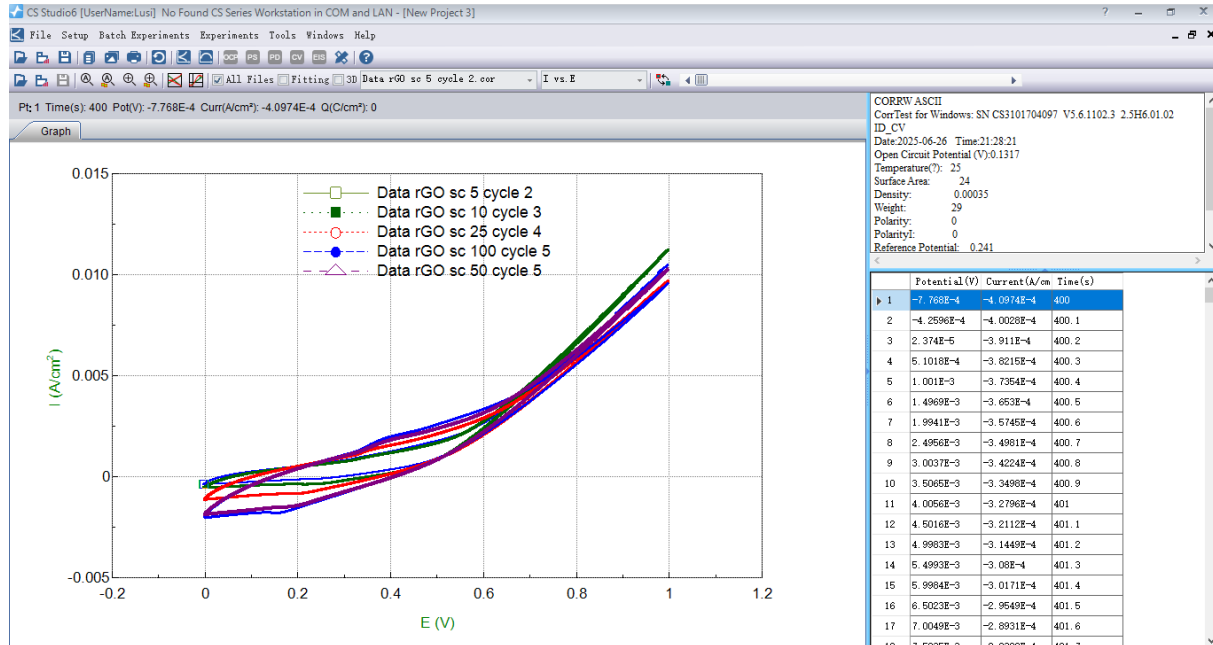
Diameter range: 17,000 to 3,000,000 Å
Adsorbate property factor: 9,53000 Å
Density conversion factor: 0,0015468
Fraction of pores open at both ends: 0,00

Pore Diameter Range (Å)	Average Diameter (Å)	Incremental Pore Volume (cm³/g)	Cumulative Pore Volume (cm³/g)	Incremental Pore Area (m²/g)	Cumulative Pore Area (m²/g)
1901.6 - 214.8	233.0	0.108745	0.108745	18.669	18.669
214.8 - 105.5	125.2	0.024258	0.133002	7.753	26.421
105.5 - 68.3	78.8	0.014881	0.147883	7.557	33.979
68.3 - 49.0	55.3	0.013744	0.161627	9.939	43.917
49.0 - 36.7	41.0	0.013606	0.175233	13.259	57.176
36.7 - 28.6	31.6	0.012556	0.187788	15.893	73.070
28.6 - 21.6	24.1	0.013045	0.200834	21.637	94.707
21.6 - 16.8	18.6	0.009201	0.210034	19.770	114.476

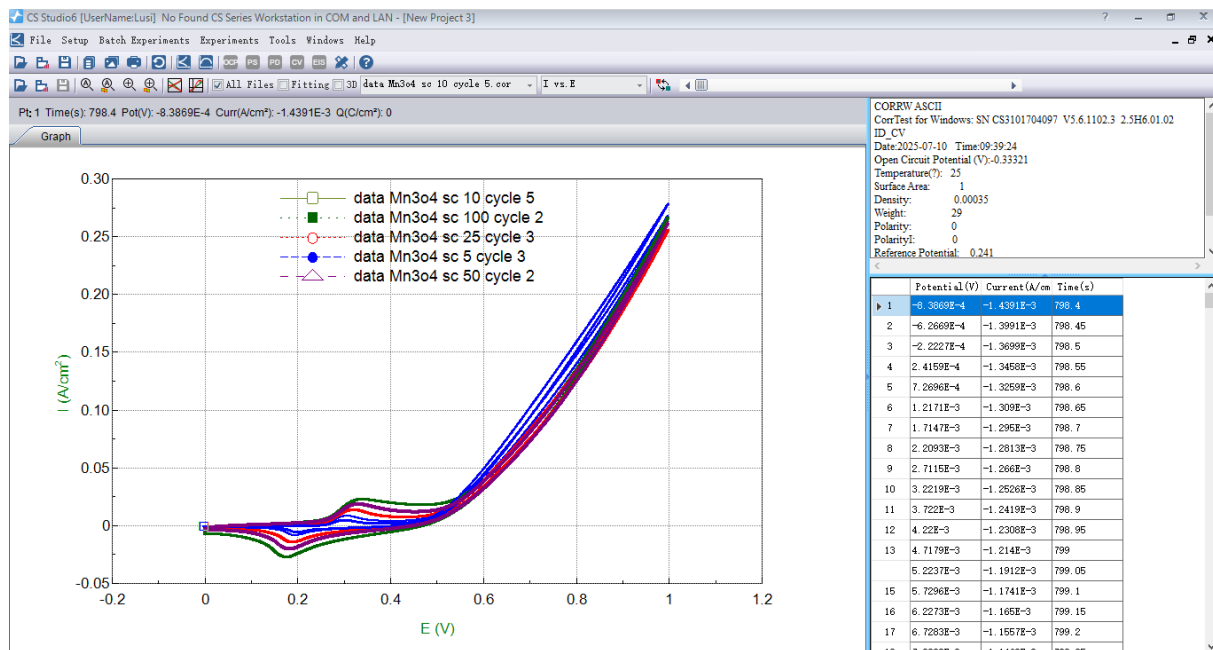
Lampiran 4

Hasil Pengujian CV

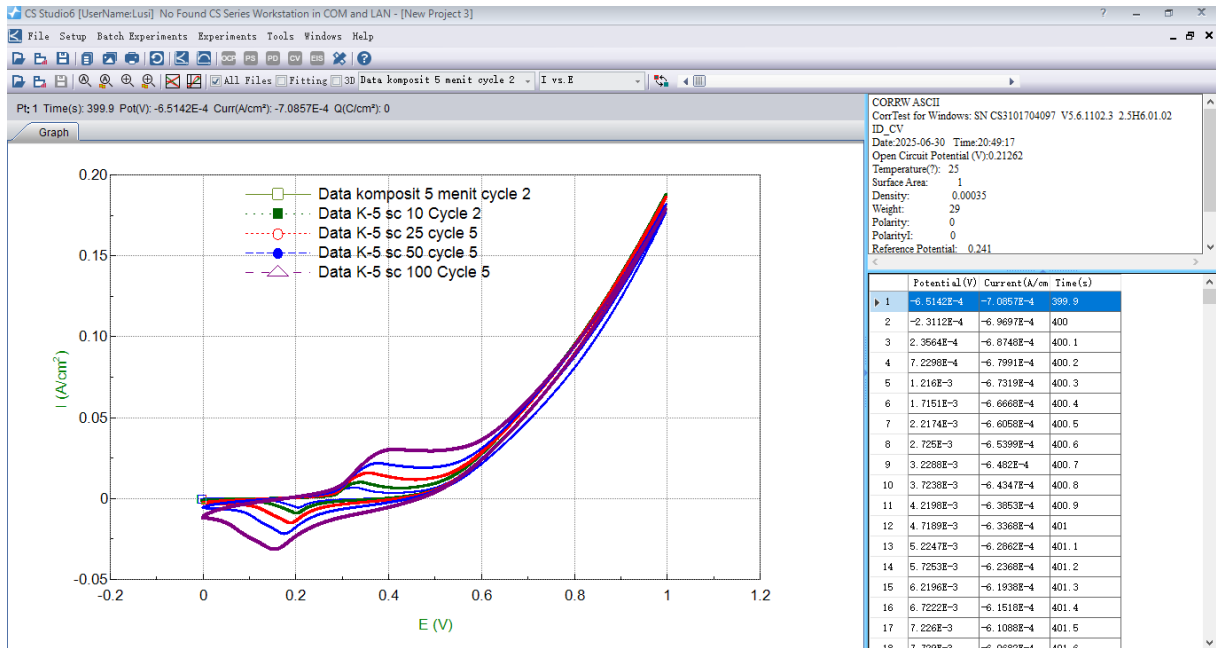
a. *Reduced Graphene Oxide (rGO)*



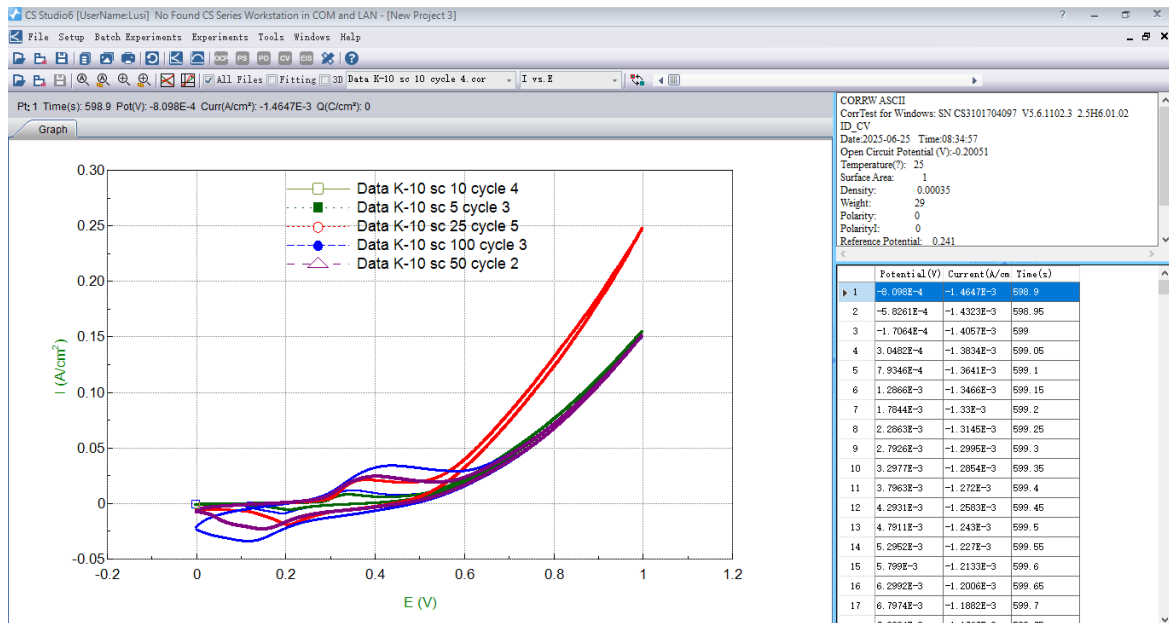
b. *Trimanganese Tetraoxide (Mn₃O₄)*



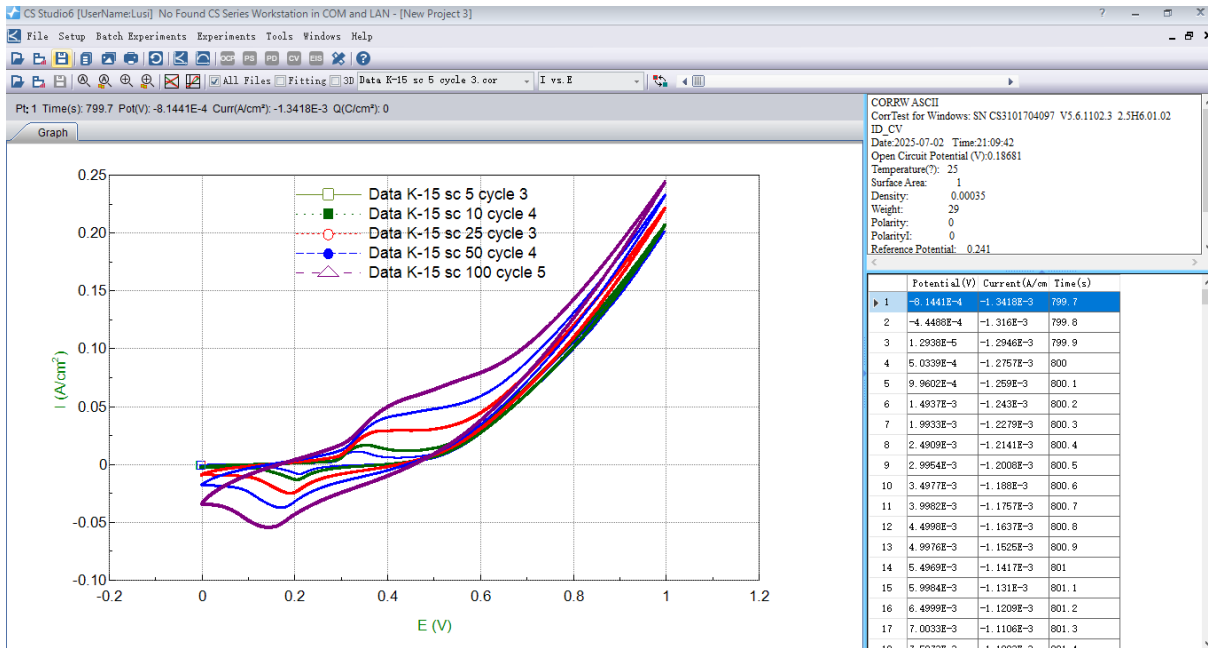
c. Komposit rGO/ Mn₃O₄ 5 menit (K-5)



d. Komposit rGO/ Mn₃O₄ 10 menit (K-10)



e. Komposit rGO/ Mn₃O₄ 15 menit (K-15)



f. Perhitungan Kapasitansi Spesifik, *Specific Energy Density*, dan *Specific Power Energy*

Contoh perhitungan menggunakan data dari pengujian CV material rGO/Mn₃O₄ 15 menit (K-15)

❖ Kapasitansi Spesifik

Diketahui:

$$\int IdV = 0,0045131$$

$$m = 0,0018 \text{ gram}$$

$$v = 5 \text{ mV/s} = 0,005 \text{ V/s}$$

$$\Delta E = 1 \text{ V}$$

$$C = \frac{\int IdV}{2 \cdot \Delta E \cdot m \cdot v}$$

$$C = \frac{0,0045131}{2 \times 1 \times 0,0018 \times 0,005}$$

$$C = 250,73 \text{ F/g}$$

❖ *Specific Energy Density*

Diketahui:

$$C = 250,73 \text{ F/g}$$

$$V = 1 \text{ V}$$

$$E = \frac{(0,5)CV^2}{3,6}$$

$$E = \frac{(0,5)250,73 \times 1^2}{3,6}$$

$$E = 34,82 \text{ Wh/kg}$$

❖ **Specific Power Density**

Diketahui:

$$E = 34,82 \text{ Wh/kg}$$

$$t = 199,7 \text{ s}$$

$$P = \frac{E \times 3600}{t}$$

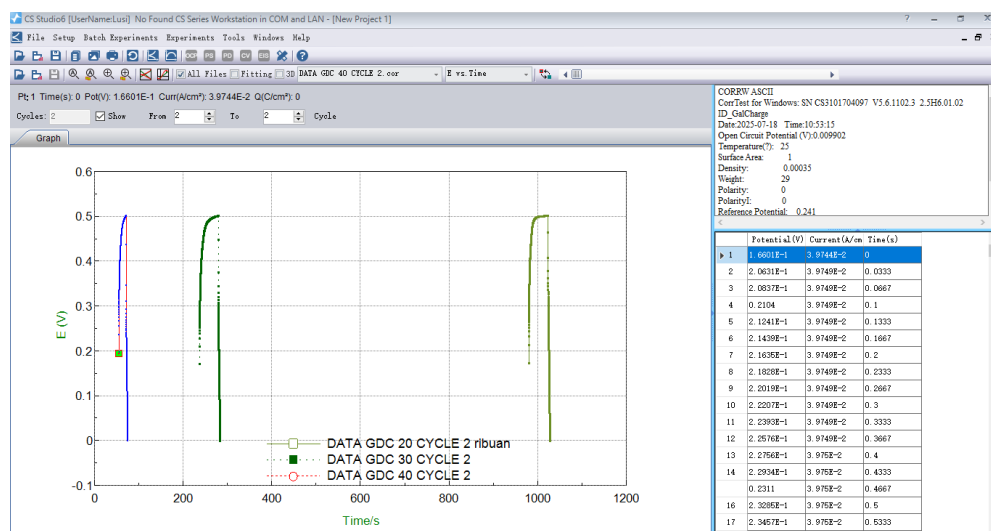
$$P = \frac{34,82 \times 3600}{199,7}$$

$$P = 627,761 \text{ W/kg}$$

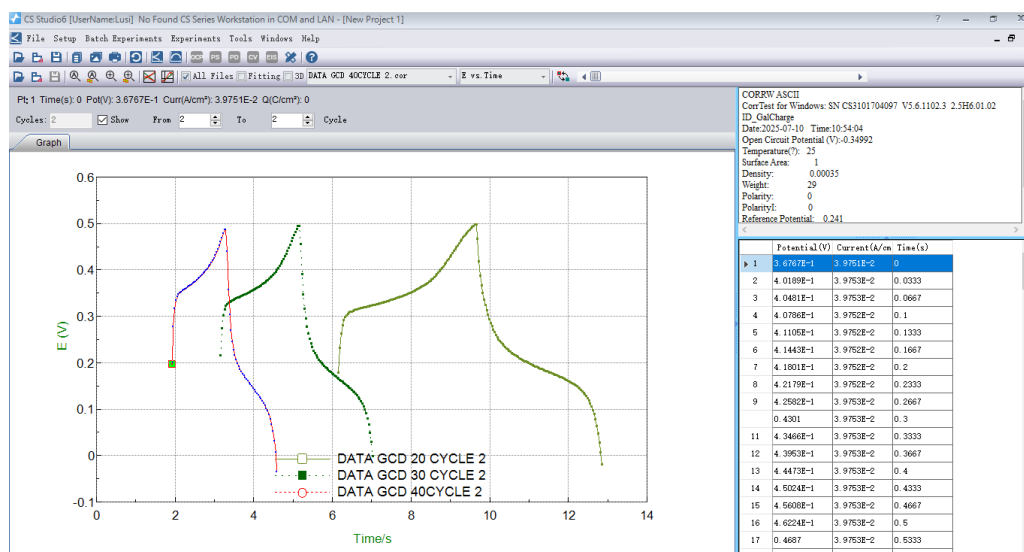
Lampiran 5

Hasil Pengujian GCD

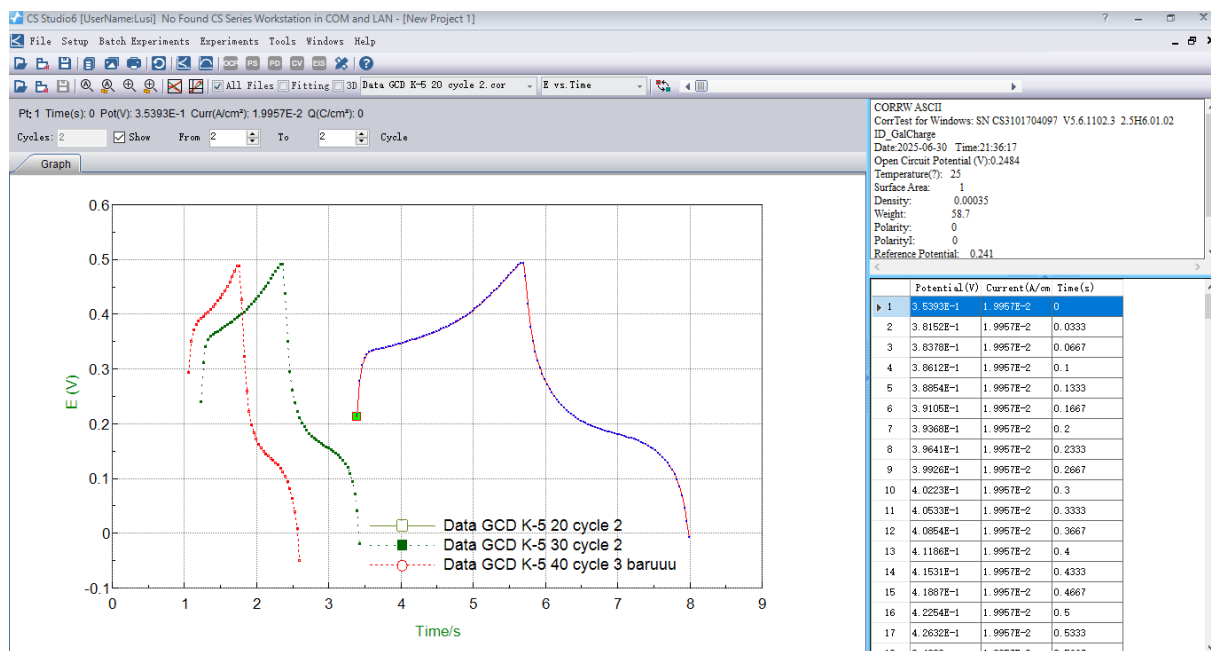
a. *Reduced Graphene Oxide (rGO)*



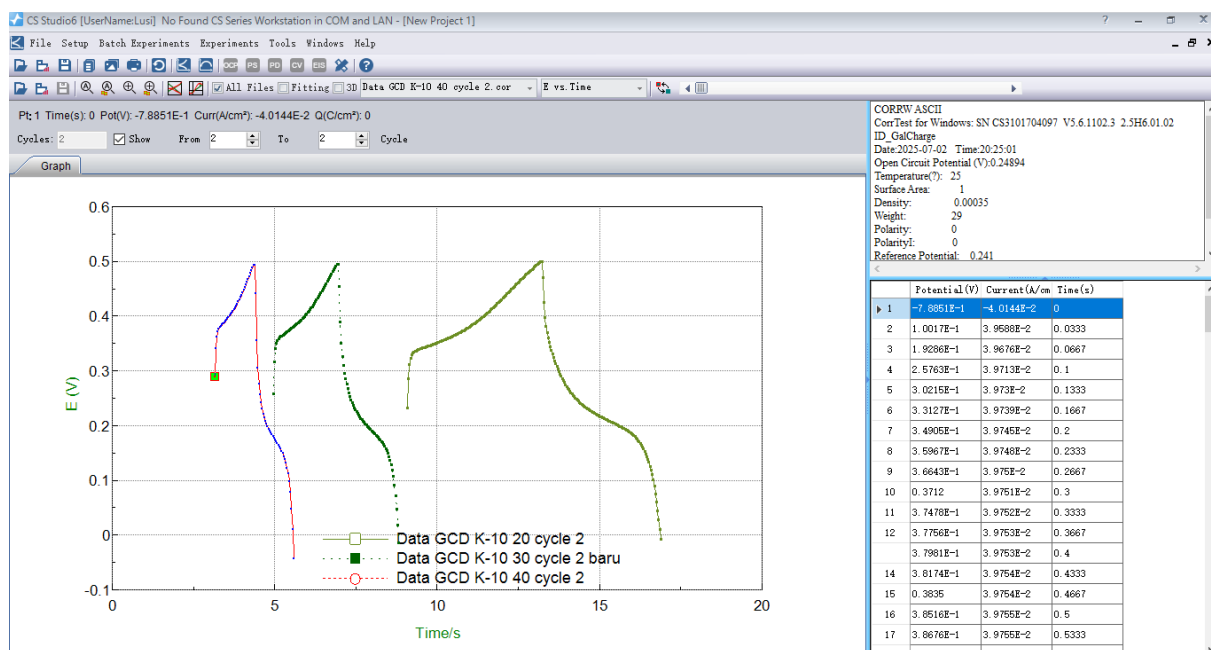
b. *Trimanganese Tetraoxide (Mn₃O₄)*



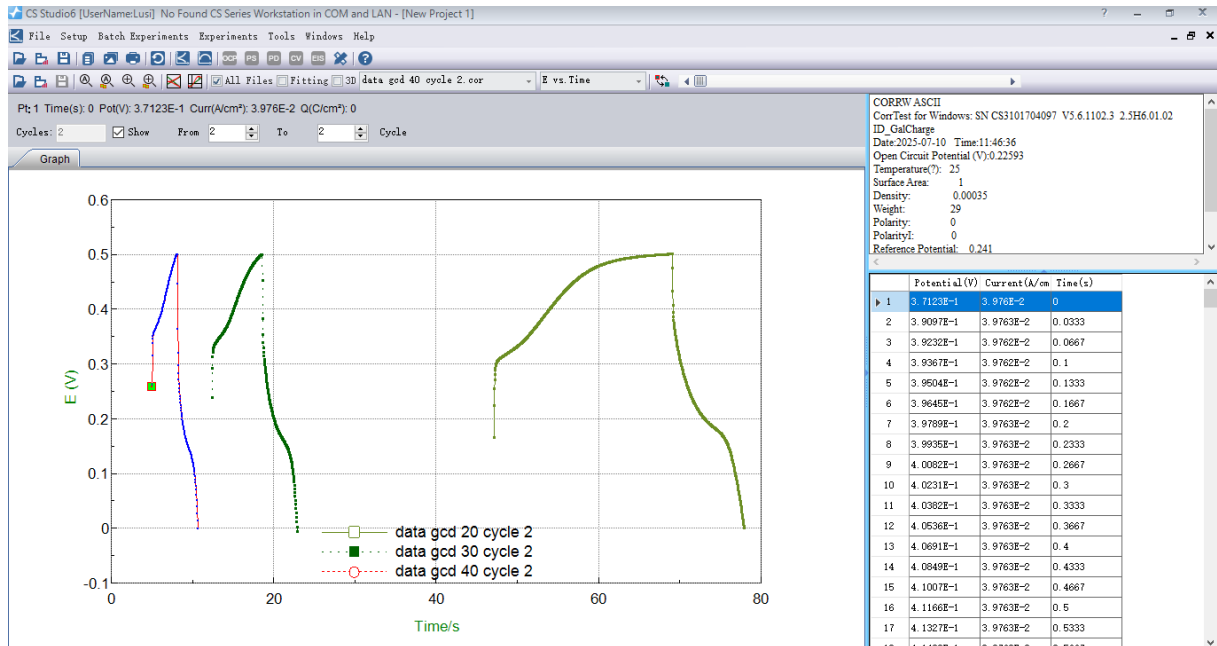
c. Komposit rGO/ Mn₃O₄ 5 menit (K-5)



d. Komposit rGO/ Mn₃O₄ 10 menit (K-10)



e. Komposit rGO/ Mn₃O₄ 15 menit (K-15)



f. Perhitungan Kapasitansi Spesifik

Contoh perhitungan menggunakan data dari pengujian CV material rGO/Mn₃O₄ 15 menit (K-15)

Diketahui:

$$I = 2 \text{ A/g}$$

$$t = 21,967 \text{ s}$$

$$\Delta E = 0,5 \text{ V}$$

$$C = \frac{I \times t}{\Delta E}$$

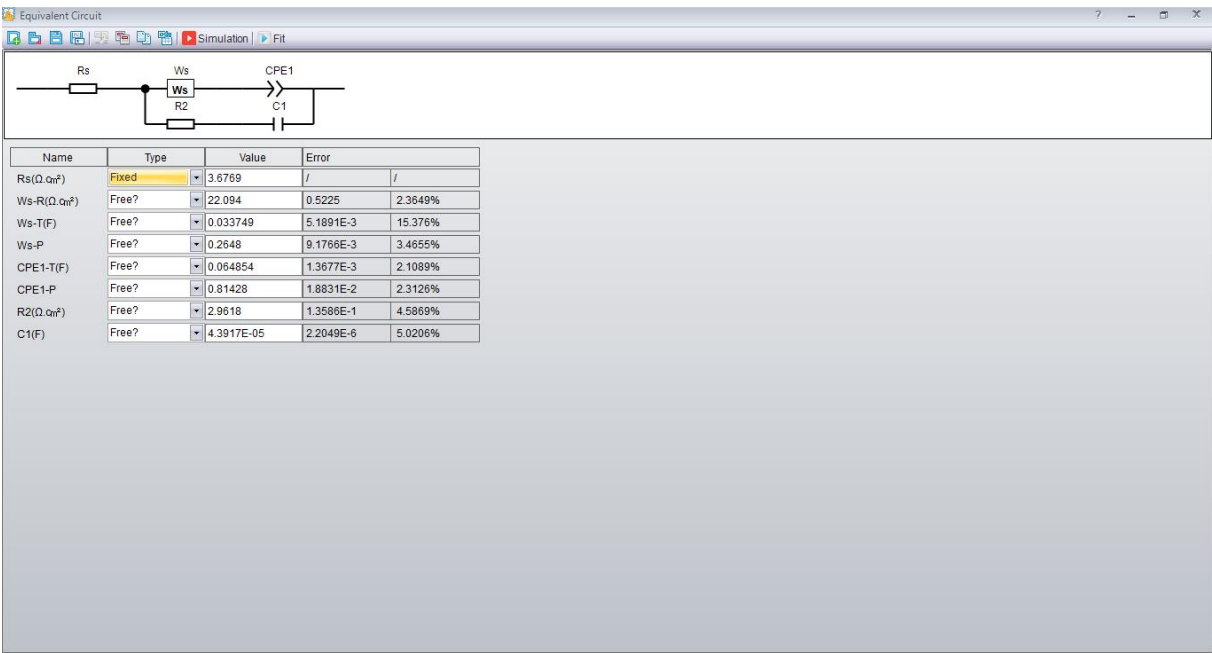
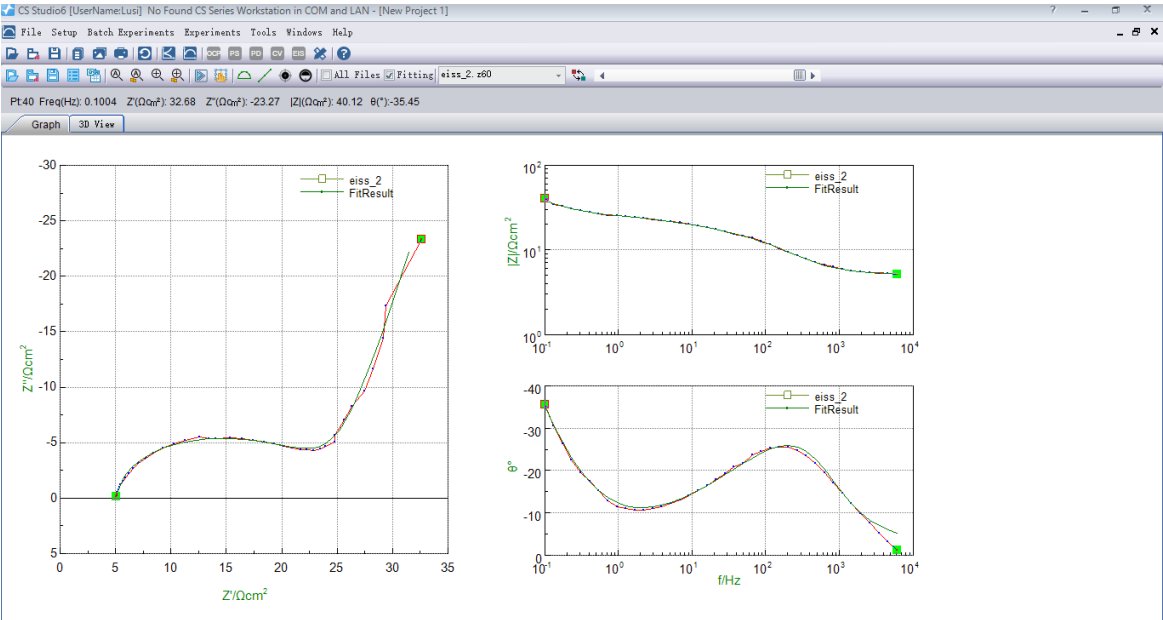
$$C = \frac{2 \times 21,967}{0,5}$$

$$C = 87,867 \text{ F/g}$$

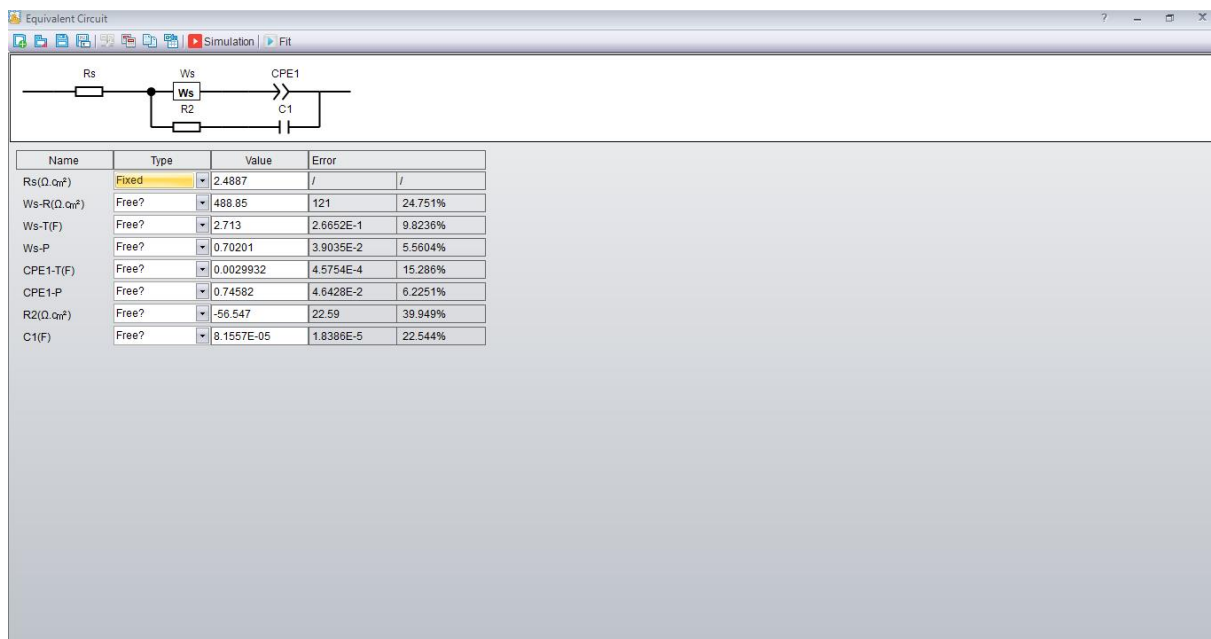
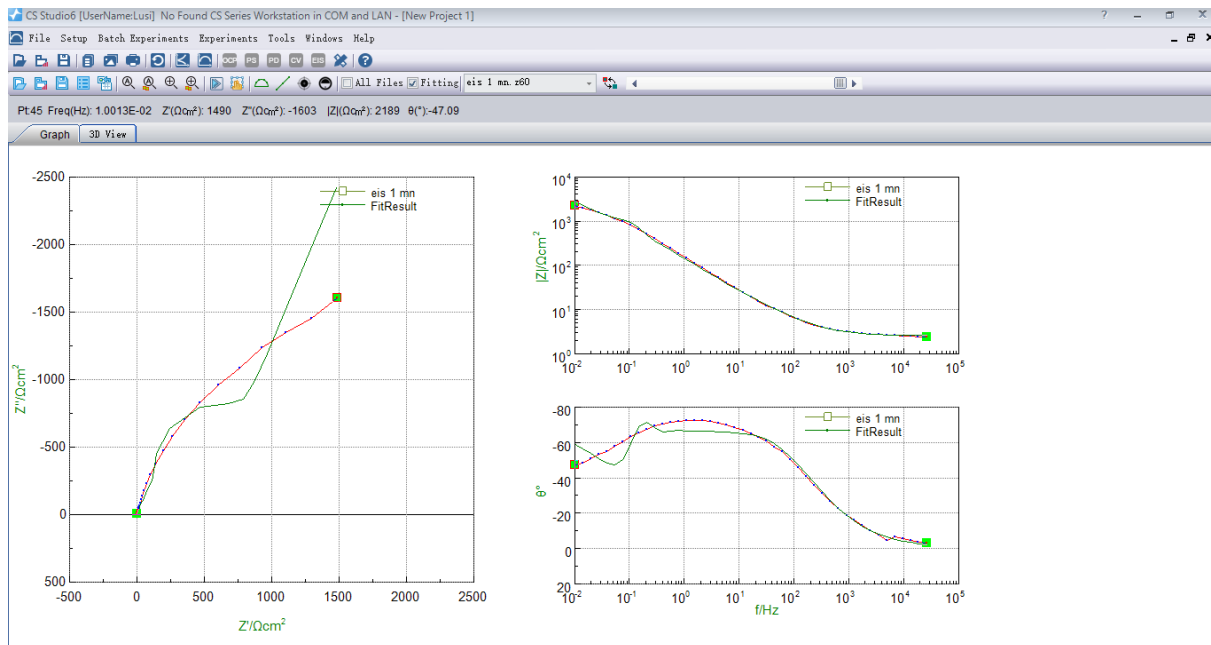
Lampiran 6

Hasil Pengujian EIS

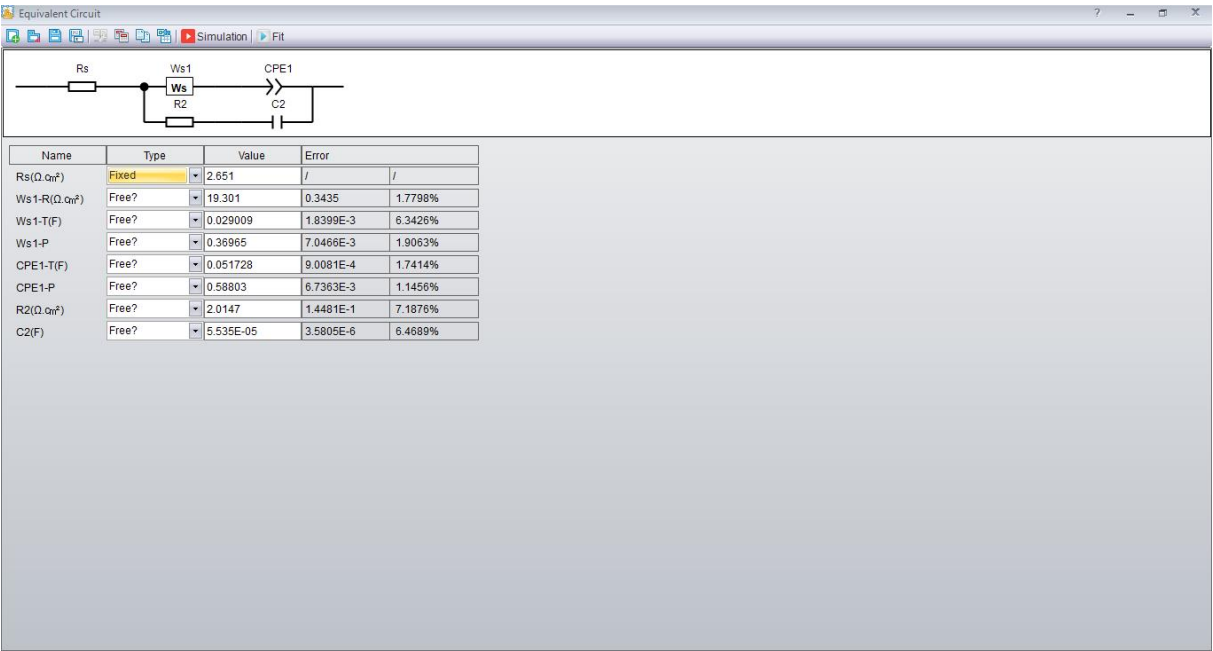
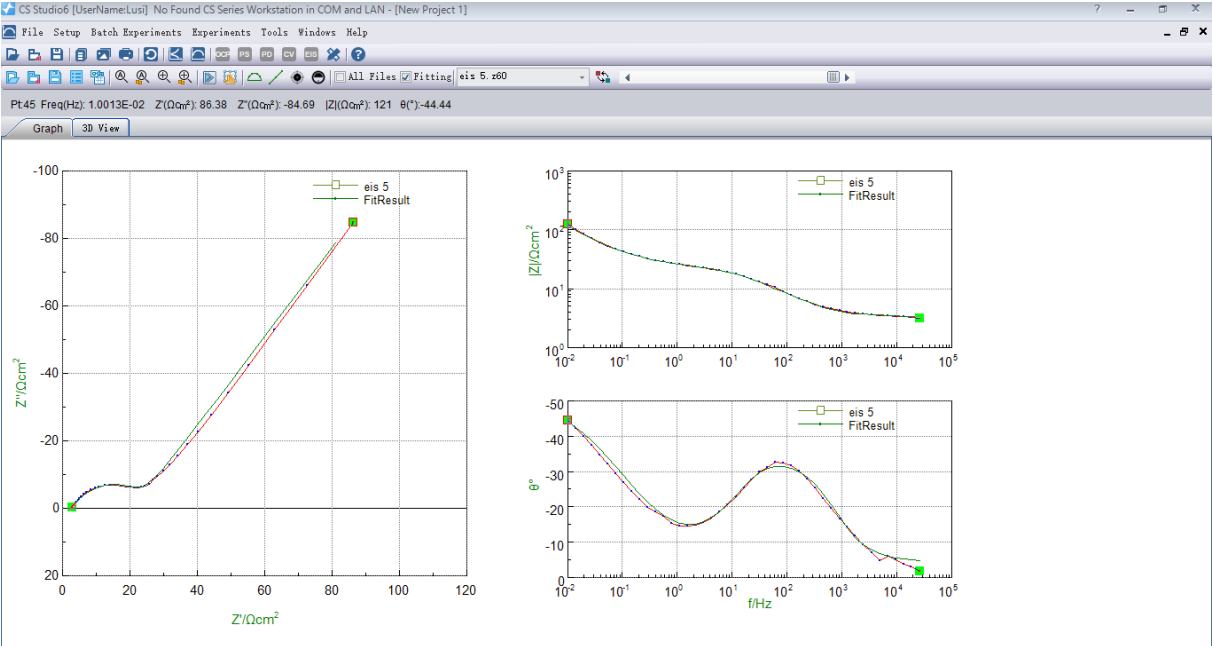
a. Reduced Graphene Oxide (rGO)



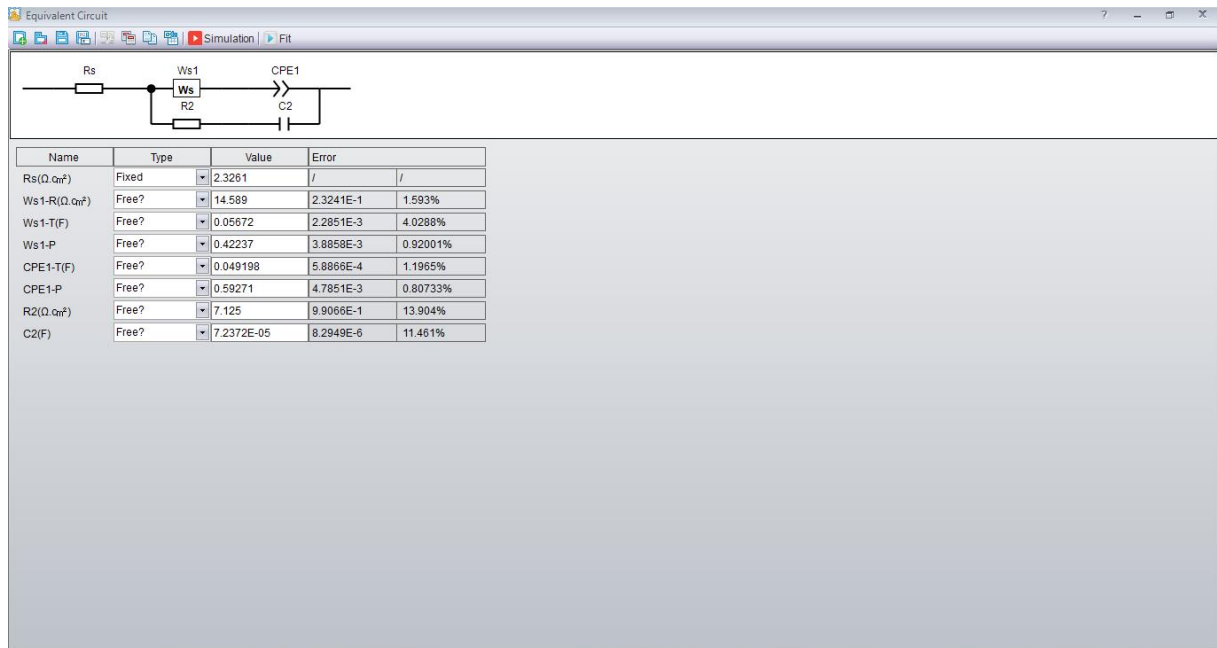
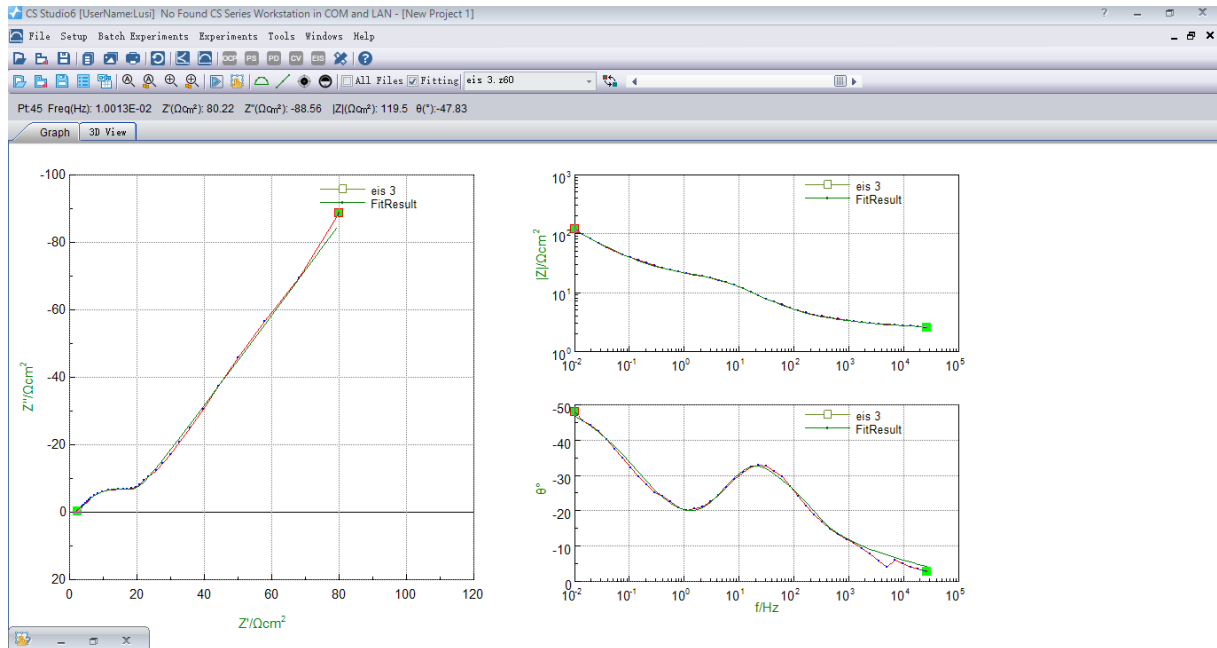
b. Trimanganese Tetraoxide (Mn_3O_4)



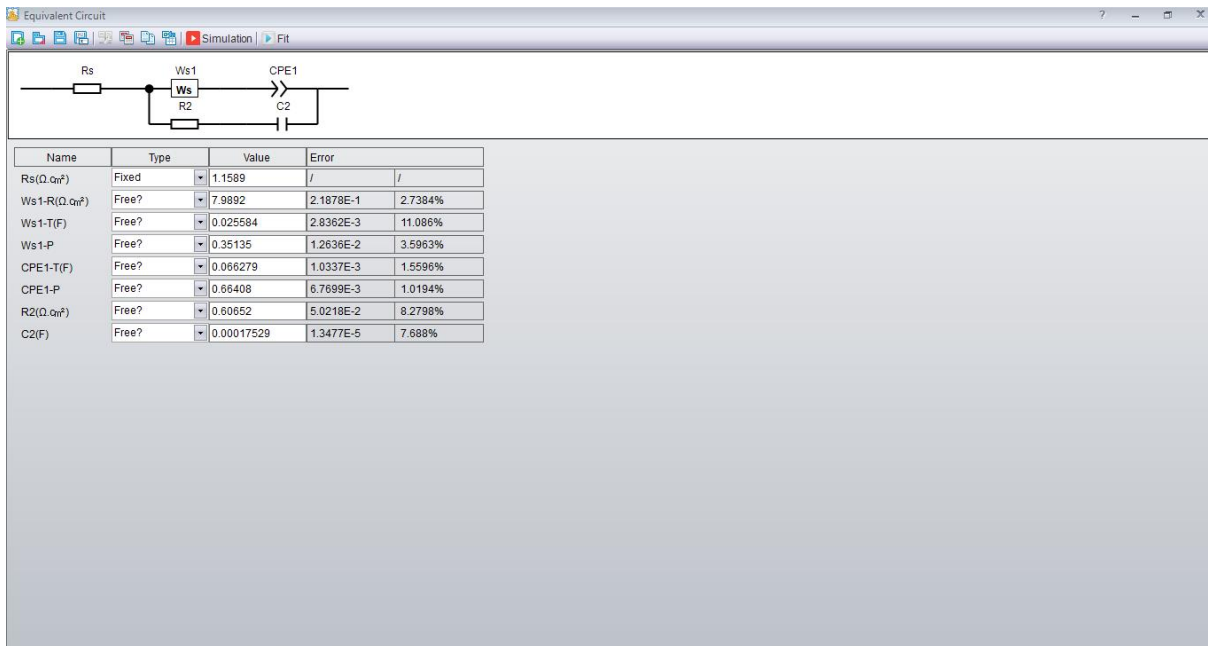
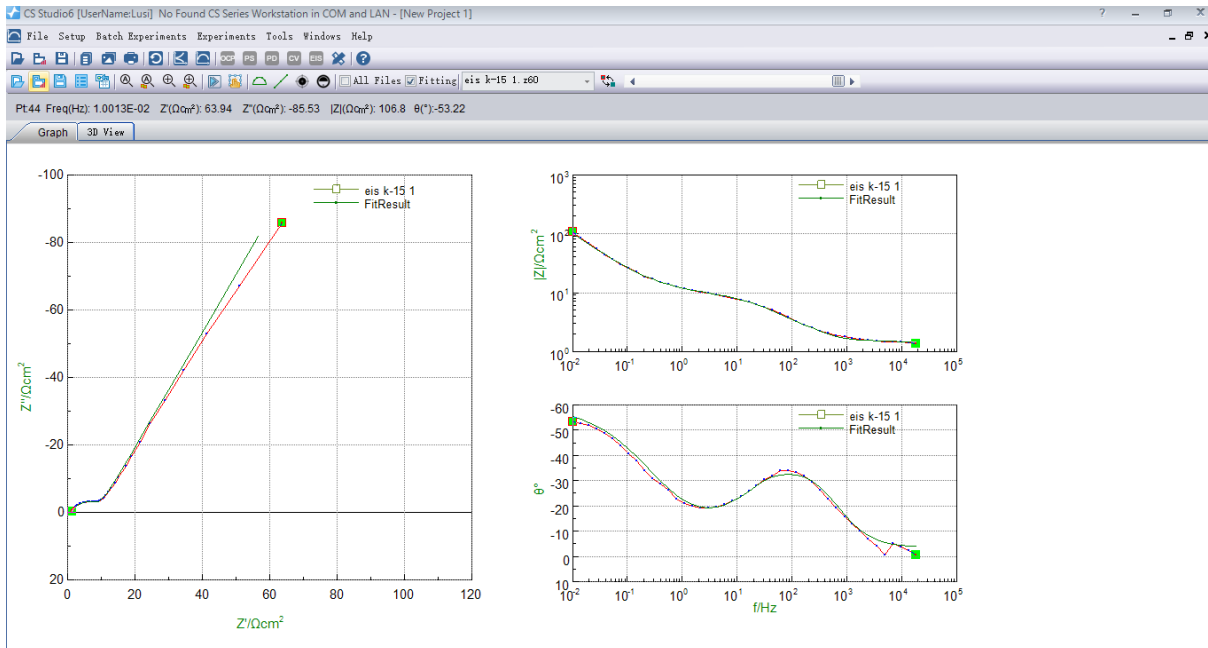
c. Komposit rGO/ Mn₃O₄ 5 menit (K-5)



d. Komposit rGO/ Mn₃O₄ 10 menit (K-10)



e. Komposit rGO/ Mn₃O₄ 15 menit (K-15)



f. Perhitungan Kapasitansi Spesifik

Contoh perhitungan menggunakan data dari pengujian CV material rGO/Mn₃O₄ 15 menit (K-15)

❖ Konduktivitas

Diketahui:

$$L = 0,001 \text{ m}$$

$$|Z| = 106,791 \Omega \cdot \text{cm}^2$$

$$A = 0,0001$$

$$= \frac{L}{|Z|A}$$

$$K = \frac{0,001}{106,791 \times 0,0001}$$

$$K = 0,094 \text{ S/m}$$

Kapasitansi Spesifik

Diketahui:

$$f = 0,01 \text{ Hz}$$

$$Z'' = 85,5326 \Omega.cm^2$$

$$m = 0,0018 \text{ gram}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f Z'' m}$$

$$C = \frac{1}{2 \times 3,14 \times 0,01 \times 85,5326 \times 0,0018}$$

$$C = 103,428 \text{ F/g}$$

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam proses penelitian dan penyusunan laporan tugas akhir, penulis menyadari bahwa tanpa adanya bantuan dan dukungan dari berbagai belah pihak, penelitian ini tidak dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, ucapan terima kasih tak lupa penulis sampaikan kepada semua pihak yang turut serta membantu, di antaranya:

1. Bapak dan kakak yang selalu mengusahakan segala hal untuk mendukung penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir serta memberikan dukungan dan doa kepada penulis di segala kondisi.
2. Ibu Diah Susanti, S.T, M.T, Ph.D. selaku dosen pembimbing 1 yang senantiasa membimbing dan memberi kepercayaan untuk selalu optimis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Haniffuddin Nurdiansah, S.T, M.T. selaku dosen pembimbing 2 dan dosen wali yang senantiasa membimbing dan memberi kepercayaan untuk selalu optimis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Muhammad Alfin Hadiq selaku kekasih dari penulis yang selalu menyemangati dan menghibur penulis ketika penulis putus asa, selalu mendampingi dan membantu penulis selama mengerjakan penelitian, dan selalu mendengarkan keluh-kesah penulis yang tidak bisa penulis ungkapkan ke orang lain.
5. Refiana Ika Putri selaku teman seperjuangan penulis ketika pengerjaan Tugas Akhir dan merupakan teman terdekat penulis ketika menjalani kehidupan perkuliahan.
6. Tittanara Eka Putri Februarna selaku teman terdekat penulis yang selalu memberikan dukungan kepada penulis.
7. Anggritha Shilla, Rosianah, Yuniar, serta Azizah yang merupakan teman penulis yang selalu mendengarkan keluh kesah penulis dan memberi semangat kepada penulis.
8. Mbak Yeny Widya Rakhmawati dan keluarga besar Laboratorium Kimia Material yang selalu membantu dan membimbing penulis saat melakukan penelitian.
9. Pak Fathan Bahfie dan pihak BRIN Lampung yang memfasilitasi pengujian yang diperlukan dalam penelitian.
10. Abe, Ritsuki, dan Natsuki keponakan-keponakan online penulis yang selalu menghibur penulis lewat tingkah lucu dan random kalian ketika penulis dilanda kesedihan selama pengerjaan Tugas Akhir.
11. Keluarga besar MT 23 yang telah menjadi angkatan terbaik dan menghiasi masa-masa perkuliahan di DTMM.
12. Seluruh pihak yang telah ambil bagian dalam kehidupan penulis sehingga bisa sampai di titik ini.

Surabaya, 23 Juli 2025

Penulis

Lusi Dwi Anggraini

NRP. 5011211043

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Lusi Dwi Anggraini, biasa dikenal sebagai Lusi. Penulis lahir di Kabupaten Magetan pada tanggal 1 Juli 2003, anak kedua dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal, yaitu di SDN Sukowidi 1 selama 6 tahun, MTsN Ar-Rohman Tegalrejo selama 3 tahun, dan SMAN 1 Geger selama 3 tahun dengan mengambil program Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (MIPA). Setelah lulus dari SMAN 1 Geger tahun 2021, penulis mengikuti SNMPTN dan diterima di Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) dan terdaftar dengan NRP 5011211043. Penulis aktif menjabat sebagai Kepala Biro Learning Departemen ASRD HMMT pada periode 2023/2024, serta pernah menjabat sebagai Ketua Umum Unit Kegiatan Tari dan Karawitan ITS pada periode 2022/2023. Pelatihan yang pernah diikuti, antara lain Pelatihan Karya Tulis Ilmiah Tingkat Dasar (PKTI-TD) BEM ITS, Latihan Keterampilan Mahasiswa Wirausaha Tingkat Dasar (LKMW TD) HMMT FTIRS-ITS, Latihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa Pra Tingkat Dasar (LKMM Pra-TD) BEM FTIRS ITS, dan Basic Media Schooling (BMS) HMMT FTIRS-ITS. Untuk semua informasi dan masukan terkait kepenulisan tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui e-mail lusidwianggraini00@gmail.com dan nomor telepon +6282232819398.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)