



TESIS - TL255401

**ANALISIS PENGARUH KOMPOSISI rGO DAN
WAKTU HIDROTERMAL TERHADAP SIFAT
KAPASITIF rGO/ α -MnO₂/ACTIVATED CARBON
UNTUK APLIKASI SUPERKAPASITOR HYBRID**

DANIEL

NRP. 6011242011

Dosen Pembimbing

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

NIP. 197701162003122007

Yusuf Pradesar, S.T., M.T., M.Sc., Ph.D.

NIP. 199202212024061001

Dr. Fathan Bahfie, S.T., M.Si.

NIP. 199012182014011001

**Program Studi Teknik Material dan Metalurgi
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2026**



THESIS - TL255401

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF
COMPOSITION rGO AND HYDROTHERMAL
TIME ON CAPACITIVE PROPERTIES OF
rGO/ α -MnO₂/ACTIVATED CARBON FOR
HYBRID SUPERCAPACITOR APPLICATIONS**

DANIEL

NRP. 6011242011

Supervisors

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

NIP. 197701162003122007

Yusuf Pradesar, S.T., M.T., M.Sc., Ph.D.

NIP. 199202212024061001

Dr. Fathan Bahfie, S.T., M.Si.

NIP. 199012182014011001

**Master Study Program of Materials and Metallurgical Engineering
Department of Materials and Metallurgical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2026**

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (MT)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

DANIEL

NRP: 6011242011

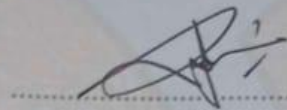
Tanggal Ujian: 20 Januari 2026

Periode Wisuda: Maret 2026

Disetujui oleh:

Pembimbing:

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



2. Yusuf Pradesar, S.T., M.T., M.Sc., Ph.D.
NIP: 199202212024061001

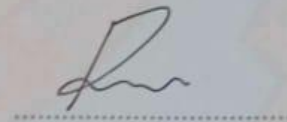


3. Dr. Fathan Bahfie, S.T., M.Si.
NIP: 199012182014011001

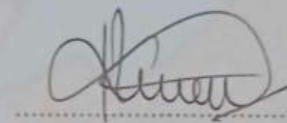


Penguji:

1. Fahkreza Abdul, S.T., M.T., Ph.D.
NIP: 199102172015041002



2. Respati Kevin Pramadewandaru, S.Si., M.Sc., Ph.D.
NIP: 1995202411005



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALISIS PENGARUH KOMPOSISI rGO DAN WAKTU
HIDROTHERMAL TERHADAP SIFAT KAPASITIF rGO/ α -
MnO₂/ACTIVATED CARBON UNTUK APLIKASI SUPERKAPASITOR
HYBRID**

Nama mahasiswa : Daniel
NRP : 6011242011
Dosen Pembimbing : Diah Susanti, ST, MT, Ph.D
Ko – Pembimbing : Yusuf Pradesar, S.T., M.T., M.Sc., Ph.D.
Ko – Pembimbing : Dr. Fathan Bahfie, S.T., M.Si.

ABSTRAK

Superkapasitor merupakan teknologi penyimpanan energi yang menggabungkan karakteristik *Electrical Double Layer Capacitor* (EDLC) dan pseudokapasitor. Salah satu material elektroda potensial adalah *reduced graphene oxide* yang memiliki konduktivitas listrik tinggi dan luas permukaan spesifik besar. Penelitian ini menggunakan komposit *reduced graphene oxide*/ α -MnO₂/*activated carbon* sebagai material elektroda superkapasitor. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi komposisi dan waktu hidrotermal terhadap struktur, morfologi, serta sifat kapasitif komposit tersebut. *Reduced graphene oxide* dipilih karena luas permukaan dan konduktivitasnya yang tinggi, sedangkan α -MnO₂ dipilih karena sifat pseudokapasitansinya yang baik. *Reduced graphene oxide* disintesis menggunakan metode *Hummers*, sementara komposit dibuat melalui metode hidrotermal dengan variasi komposisi dan waktu reaksi. Karakterisasi struktur dan morfologi dilakukan menggunakan *X-ray Diffraction*, *Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-ray*, dan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*. Sifat elektrokimia dianalisis menggunakan *Cyclic Voltammetry*, *Electrochemical Impedance Spectroscopy*, dan pengujian *charge–discharge galvanostatik* dengan elektrolit KOH. Kinerja kapasitansi spesifik terbaik diperoleh sebesar 630.23 F/g (*scan rate* 5 mV/s), 425.8 F/g (kerapatan arus 0.5 A/g), dan 652.39 F/g (frekuensi 0.01 Hz) pada komposisi 0.25:1:1 dengan waktu hidrotermal 10 jam. Perbedaan kondisi pengujian digunakan untuk merepresentasikan respon elektroda terhadap variasi laju reaksi, *transport* ion, dan resistansi internal. Uji retensi kapasitansi setelah 5000 siklus dilakukan untuk mengevaluasi kestabilan jangka panjang dan ketahanan struktur elektroda selama operasi berulang. Elektroda mempertahankan 95.96% kapasitansi awal, menunjukkan potensi tinggi untuk aplikasi superkapasitor.

Kata kunci: *α -MnO₂, Hidrotermal, Karbon Aktif, reduced graphene oxide, Superkapasitor hybrid*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF COMPOSITION rGO AND HYDROTHERMAL TIME ON THE CAPACITIVE PROPERTIES OF rGO/ α -MnO₂/ACTIVATED CARBON FOR HYBRID SUPERCAPACITOR APPLICATIONS

Name : Daniel
NRP : 6011242011
Supervisor : Diah Susanti, ST, MT, Ph.D
Co – Supervisor : Yusuf Pradesar, S.T., M.T., M.Sc., Ph.D.
Co – Supervisor : Dr. Fathan Bahfie, S.T., M.Si.

ABSTRACT

Supercapacitors are energy storage technologies that combine the characteristics of Electrical Double Layer Capacitors (EDLCs) and pseudocapacitors. One potential electrode material is reduced graphene oxide which has high electrical conductivity and a large specific surface area. This study uses reduced graphene oxide/ α -MnO₂/activated carbon composite as the supercapacitor electrode material. This study aims to analyze the influence of variations in composition and hydrothermal time on the structure, morphology, and capacitive properties of the composite. Reduced graphene oxide was chosen for its surface area and high conductivity, while α -MnO₂ was chosen for its good pseudocapacitance properties. Reduced graphene oxide is synthesized using the Hummers method, while composites are made using hydrothermal methods with variations in composition and reaction time. Structural and morphological characterization was carried out using X-ray Diffraction, Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-ray, and Fourier Transform Infrared Spectroscopy. The electrochemical properties were analyzed using Cyclic Voltammetry, Electrochemical Impedance Spectroscopy, and galvanostatic charge–discharge testing with KOH electrolyte. The best specific capacitance performance was obtained at 630.23 F/g (scan rate 5 mV/s), 425.8 F/g (current density 0.5 A/g), and 652.39 F/g (frequency 0.01 Hz) at a composition of 0.25:1:1 with a hydrothermal time of 10 hours. Different test conditions are used to represent the response of the electrode to variations in reaction rate, ion transport, and internal resistance. Capacitance retention tests after 5000 cycles are performed to evaluate the long-term stability and structural durability of the electrode during repeated operation. The electrode retains 95.96% initial capacitance, indicating high potential for supercapacitor applications..

Keywords: *α -MnO₂, Activated Carbon, Hybrid Supercapacitor, Hydrothermal, Reduced Graphene Oxide*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Superkapasitor	5
2.1.1 <i>Electric Double Layer Capacitor</i> (EDLC)	9
2.1.2 <i>Pseudocapacitor</i> (PC).....	11
2.1.3 <i>Hybrid Supercapacitor</i>	14
2.2 <i>Graphene</i>	18
2.3 <i>Graphene Oxide</i>	20
2.4 <i>Reduced Graphene Oxide</i>	21
2.5 Mangan Dioksida.....	24
2.6 Activated Carbon.....	27
2.7 Hidrotermal.....	30
2.8 Penelitian Sebelumnya	31
BAB III METODE PENELITIAN	37
3.1 Bahan Penelitian	37
3.2 Peralatan	37
3.2.1 Alat Penelitian	37
3.2.2 Instrumen Karakterisasi	38
3.3 Diagram Alir.....	39
3.3.1 Diagram Alir Sintesis <i>Graphene oxide</i> (GO)	39
3.3.2 Diagram Alir Sintesis <i>Reduced Graphene Oxide</i>	40
3.3.3 Diagram Alir Sintesis α -MnO ₂	41

3.3.4	Diagram Alir Sintesis rGO/ α -MnO ₂ / <i>Activated Carbon</i>	42
3.3.5	Diagram Alir Sintesis Elektroda	43
3.3.6	Diagram Alir Fabrikasi Superkapasitor Hibrida	44
3.4	Metode Penelitian	45
3.4.1	Sintesis <i>Graphene Oxide</i>	45
3.4.2	Sintesis <i>Reduced Graphene Oxide</i>	45
3.4.3	Sintesis α -MnO ₂	45
3.4.4	Sintesis rGO/ α -MnO ₂ / <i>Activated Carbon</i>	46
3.4.5	Sintesis Elektroda	46
3.4.6	Fabrikasi Superkapasitor Hibrida	46
3.5	Pengujian Material	47
3.5.1	<i>X-ray Diffraction</i> (XRD)	47
3.5.2	<i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM) dan <i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> (EDX)	49
3.5.3	<i>Fourier Transform Infra Red</i> (FTIR)	50
3.5.4	SAA – BET	51
3.5.5	<i>Cyclic Voltammetry</i> (CV)	52
3.5.6	<i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS)	53
3.5.7	<i>Galvanostatic Charge Discharge</i> (GCD)	54
3.6	Rancangan Penelitian	55
BAB IV		57
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN		57
4.1	Hasil Pengujian XRD	57
4.2	Hasil Pengujian FTIR	67
4.3	Hasil Pengujian SEM-EDX	75
4.4	Hasil Pengujian BET-AAS	81
4.5	Hasil Pengujian Cyclic Voltammetry	89
4.6	Hasil Pengujian EIS	100
4.7	Hasil Pengujian GCD	103
4.8	Cycle Stability	108
4.9	Superkapasitor RMA-ScITS	110
BAB V		115

DAFTAR PUSTAKA.....	117
LAMPIRAN.....	133
BIODATA PENULIS.....	159

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Ragone plot.....	5
Gambar 2.2 Proses <i>charge discharge</i> superkapasitor (Nurhasmia, 2021)	6
Gambar 2.3 Jenis-jenis superkapasitor (Theerthagiri, J., et al, 2020)	7
Gambar 2.4 Skema EDLC (Zhou, L., et al., 2018).....	9
Gambar 2.5 Proses <i>charge-discharge</i> pada <i>pseudocapacitor</i> (Choudhary, R. B., et al., 2020).....	12
Gambar 2.6 Ilustrasi <i>hybrid supercapacitor</i> (Zhou, L., et al., 2018)	15
Gambar 2.7 Struktur <i>graphene</i> (Putri, N. A., et al., 2023)	19
Gambar 2.8 (a) Aspek mendasar dari sifat ikatan <i>graphene</i> dan (d) SEM <i>graphene</i> satu lapis (Tiwari, S. K., et al., 2020)	19
Gambar 2.9 Struktur <i>graphene oxide</i> (Tan, Y. Y., et al., 2024).....	20
Gambar 2.10 Struktur material berbasis <i>graphene</i> (Kumar, S., et al., 2023)	22
Gambar 2.11 Hasil pengujian XRD (Pimklang, T., et al., 2025)	23
Gambar 2.12 Struktur kristal dari α -, β -, γ -, ϵ -, δ - and λ -MnO ₂ (Patil, P. H., et al., 2024).....	24
Gambar 2.13 (a) Struktur berpori dari karbon aktif dan (b) struktur molekul dari karbon aktif (Moosavi, S., et al, 2020).....	27
Gambar 2.14 Hasil pengujian XRD karbon aktif dan komposit karbon aktif/MnO ₂ (Shrestha, D. 2022)	29
Gambar 2.15 Hasil pengujian SEM karbon aktif (Shrestha, D. 2022)	29
Gambar 2.16 Hasil pengujian CV (Shrestha, D. 2022)	30
Gambar 2.17 Skema metode hidrotermal (da Silva, L. F., et al., 2021).....	31
Gambar 2.18 Skema sintesis GR/AC/MnO ₂ (Li, Y., et al., 2017).....	32
Gambar 2.19 Karakterisasi SEM dan TEM dari material (a) GR/AC, (b) dan (c) GAM, (d) TEM GR/MnO ₂ , (e) TEM GAM (Li, Y., et al., 2017).....	32
Gambar 2.20 (a) Raman spectra dari GR/AC dan GAM dan (b) Hasil XRD GR/AC dan GAM <i>hybrids</i> (Li, Y., et al., 2017).....	33
Gambar 2.21 (a) Hasil CV elektroda GR/AC, GAM 1:1, 2:3, 1:2, dan 1:3 dalam elektrolit KOH 7 M pada <i>scan rate</i> 50 mV/s, (b) Hasil CV elektroda GAM 2:3 dalam elektrolit KOH 7 M dengan berbagai <i>scan rate</i> (c) Kurva GCD elektroda GR/AC, GAM 1:1, 2:3, 1:2, 1:3 dalam elektrolit KOH 7 M pada kepadatan arus	

konstan 0,05 A/g (d) Hasil GCD dari elektroda 2:3 dalam elektrolit KOH 7 M pada berbagai kepadatan arus konstan (Li, Y., et al., 2017)	34
Gambar 3.1 Diagram alir sintesis <i>Grapeine Oxide</i> (GO).....	39
Gambar 3.2 Diagram alir sintesis <i>Reduce Graphene Oxide</i> (rGO)	40
Gambar 3.3 Diagram alir sintesis α -Mangan Oksida (MnO_2)	41
Gambar 3.4 Diagram alir sintesis komposit rGO/ α - MnO_2 / <i>Activated Carbon</i>	42
Gambar 3.5 Diagram alir sintesis elektroda.....	43
Gambar 3.6 Diagram alir fabrikasi superkapasitor hibrid.....	44
Gambar 3.7 Desain prototipe superkapasitor hybrid	47
Gambar 3.8 Ilustrasi difraksi sinar x (Callister dan Rethwisch, 2010)	48
Gambar 3.9 Alat instrumen XRD (Dokumentasi Pribadi).....	48
Gambar 3.10 Skema <i>scanning electron microscope</i> (SEM) (A. Mohammed, 2018)	49
Gambar 3.11 Alat instrumen SEM (Divisi Karakterisasi)	50
Gambar 3.12 Alat instrumen FTIR (Dokumentasi pribadi).....	51
Gambar 3.13 Alat instrumen BET	51
Gambar 3.14 Alat instrumen <i>cyclic voltammetry</i> (Dokumentasi pribadi)	52
Gambar 3.15 Alat instrumen EIS (Dokumentasi pribadi)	54
Gambar 3.16 Alat instrumen GCD (Dokumentasi Pribadi).....	55
Gambar 4.1 Hasil pengujian XRD (a) JCPDS, (b) grafit, (c) GO, (d) rGO.....	57
Gambar 4.2 Hasil pengujian xrd α - MnO_2	60
Gambar 4.3 Hasil pengujian xrd <i>activated carbon</i>	61
Gambar 4.4 Hasil pengujian XRD (a) JCPDS rGO, (b) JCPDS α - MnO_2 , (c) rGO, (d) α - MnO_2 , (e) <i>Activated carbon</i> , RMA (f) 0.25:1:1 10 Jam, (g) 0.5:1:1 10 Jam, (h) 1:1:1 10 Jam, (i) 1:1:1 9 Jam, (j) 1:1:1 8 Jam	63
Gambar 4.5 Hasil pengujian FTIR (a) GO, (b) rGO, (c) α - MnO_2 , (d) <i>activated carbon</i> , dan (e) RMA 0.25:1:1 10 Jam.....	67
Gambar 4.6 Hasil pengujian FTIR RMA (a) 0.25:1:1 10 Jam, (b) 0.5:1:1 10 Jam, (c) 1:1:1 10 Jam, (d) 1:1:1 9 Jam, (e) 1:1:1 8 Jam.....	73
Gambar 4.7 Hasil pengujian SEM (a) GO, (b) rGO (c) α - MnO_2 , (d) <i>activated carbon</i> dan EDX (e) GO, (f) rGO (g) α - MnO_2 , (h) <i>activated carbon</i>	76

Gambar 4.8 Hasil Pengujian SEM RMA (a) 0.25:1:1 10 Jam, (b) 0.5:1:1 10 Jam, (c) 1:1:1 10 jam, (d) 1:1:1 9 Jam, (e) 1:1:1 8 jam; Mapping RMA (f) 0.25:1:1 10 Jam, (g) 0.5:1:1 10 Jam, (h) 1:1:1 10 jam, (i) 1:1:1 9 Jam, (j) 1:1:1 8 jam; dan EDX RMA (k) 0.25:1:1 10 Jam, (l) 0.5:1:1 10 Jam, (m) 1:1:1 10 jam, (n) 1:1:1 9 Jam, (o) 1:1:1 8 jam	78
Gambar 4.9 Grafik adsorpsi-desorpsi BET (a) GO dan (b) rGO.....	81
Gambar 4.10 Grafik BJH <i>method</i> (a) GO dan (b) rGO	82
Gambar 4.11 Grafik (a) adsorpsi-desorpsi BET dan (b) BJH <i>method</i> α -MnO ₂ ..	83
Gambar 4.12 Grafik (a) adsorpsi-desorpsi BET dan (b) BJH <i>method</i> <i>activated carbon</i>	84
Gambar 4.13 Grafik adsorpsi-desorpsi BET komposit rGO/ α -MnO ₂ / <i>activated carbon</i> (a) 0.25:1:1 10 Jam, (b) 0.5:1:1 10 Jam, (c) 1:1:1 10 Jam, (d) 1:1:1 9 Jam, (e) 1:1:1 8 Jam.....	85
Gambar 4.14 Grafik BJH <i>method</i> komposit rGO/ α -MnO ₂ / <i>activated carbon</i> (a) 0.25:1:1 10 Jam, (b) 0.5:1:1 10 Jam, (c) 1:1:1 10 Jam, (d) 1:1:1 9 Jam, (e) 1:1:1 8 Jam	86
Gambar 4.15 Hasil pengujian <i>cyclic voltammetry</i> (a) rGO, (b) α -MnO ₂ , dan (c) <i>activated carbon</i>	90
Gambar 4.16 Hasil pengujian <i>cyclic voltammetry</i> komposit rGO/ α -MnO ₂ / <i>activated carbon</i> (a) 0.25:1:1 10 Jam, (b) 0.5:1:1 10 Jam, (c) 1:1:1 10 Jam, (d) 1:1:1 9 Jam, (e) 1:1:1 8 Jam	92
Gambar 4.17 Grafik <i>anodic</i> dan <i>cathodic</i> (a) rGO, (b) α -MnO ₂ , (c) <i>activated carbon</i> , (d) RMA-1, (e) RMA-2, (f) RMA-3, (g) RMA-4, (h) RMA-5.....	94
Gambar 4.18 Hasil pengujian <i>cyclic voltammetry</i> kapasitansi spesifik vs potensial komposit rGO/ α -MnO ₂ / <i>activated carbon</i> (a) 0.25:1:1 10 Jam, (b) 0.5:1:1 10 Jam, (c) 1:1:1 10 Jam, (d) 1:1:1 9 Jam, (e) 1:1:1 8 Jam	96
Gambar 4.19 Kapasitansi spesifik elektroda komposit komposit rGO/ α -MnO ₂ / <i>activated carbon</i>	97
Gambar 4.20 <i>Ragone plot</i> elektroda superkapasitor komposit rGO/ α -MnO ₂ / <i>activated carbon</i> variasi komposisi dan waktu hidrotermal.....	99
Gambar 4.21 <i>Equivalent circuit</i>	100

Gambar 4.22 Grafik (a) <i>Plot nyquist</i> , (b) frekuensi vs <i>phase angle</i> , (c) frekuensi vs <i>specific capacitance</i> , dan (d) <i>bode plot</i>	101
Gambar 4.23 Hasil pengujian <i>Galvanostatic Charge-Discharge</i> (GCD) (a) rGO, (b) α -MnO ₂ , (c) <i>activated carbon</i>	104
Gambar 4.24 Hasil pengujian <i>Galvanostatic Charge-Discharge</i> (GCD) sampel elektroda RMA (a) 0.25:1:1 10 Jam, (b) 0.5:1:1 10 Jam, (c) 1:1:1 10 Jam, (d) 1:1:1 9 Jam, (e) 1:1:1 8 Jam.....	105
Gambar 4.25 Hasil pengujian SEM elektroda (a) sebelum uji stabilitas dan (b) sesudah uji stabilitas	108
Gambar 4.26 Hasil pengujian <i>cycle stability</i>	109
Gambar 4.27 Prototipe RMA-ScITS.....	112
Gambar 4.28 Hasil pengujian elektrokimia RMA-ScITS (a) CV, (b) EIS, (c) GCD	112
Gambar 4.29 Hasil pengujian <i>cycle stability</i>	114

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Jenis-jenis material EDLC (Maria, S., et al., 2022)	10
Tabel 2.2 Tabel perbandingan sintesis tradisional dengan <i>Hummer method</i> untuk <i>graphene oxide</i> (Méndez-Lozano, N., et al., 2022)	21
Tabel 2.3 Kelebihan dan kekurangan <i>graphene</i> , <i>graphene oxide</i> , <i>reduced graphene oxide</i> (Trivedi, D. N., et al., 2022)	22
Tabel 2.4 Sifat fisik dan kimia dari karbon aktif (Moosavi, S., et al, 2020)	28
Tabel 2.5 Penelitian Terdahulu	36
Tabel 3.1 Rancangan penelitian	56
Tabel 4.1 Perbandingan grafit, GO, dan rGO	59
Tabel 4.2 Data puncak XRD α -MnO ₂	60
Tabel 4.3 Data puncak XRD <i>activated carbon</i>	62
Tabel 4.4 Data puncak XRD komposit rGO/ α -MnO ₂ / <i>activated carbon</i> variasi komposisi dan waktu hidrotermal	64
Tabel 4.5 Data ukuran kristal komposit	66
Tabel 4.6 Data gugus fungsi FTIR GO, rGO, α -MnO ₂ , dan <i>activated carbon</i>	70
Tabel 4.7 Data gugus fungsi FTIR komposit rGO/ α -MnO ₂ / <i>activated carbon</i> variasi komposisi dan waktu hidrotermal	74
Tabel 4.8 Persentase elemen pada pengujian EDX GO, rGO, α -MnO ₂ , dan <i>activated carbon</i>	77
Tabel 4.9 Persentase elemen pada pengujian EDX material komposit rGO/ α -MnO ₂ / <i>activated carbon</i> variasi komposisi dan waktu hidrotermal	79
Tabel 4.10 Hasil pengujian BET GO, rGO, α -MnO ₂ , dan <i>activated carbon</i>	85
Tabel 4.11 Hasil pengujian BET komposit rGO/ α -MnO ₂ / <i>activated carbon</i>	89
Tabel 4.12 Hasil perhitungan CDL dan ECSA	95
Tabel 4.13 Hasil perhitungan kapasitansi spesifik (Cs), <i>specific energy density</i> (E), dan <i>specific power density</i> (P)	98
Tabel 4.14 Hasil nilai <i>specific capacitance</i> pada pengujian EIS	103
Tabel 4.15 Hasil perhitungan kapasitansi spesifik	107
Tabel 4.16 Perbandingan nilai kapasitansi spesifik dan stabilitas retensi dengan penelitian terdahulu	110

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemakaian energi tak terbarukan terus menunjukkan adanya peningkatan setiap harinya. Peningkatan pemakaian energi ini disebabkan oleh adanya peningkatan jumlah penduduk setiap tahunnya. Menurut data *International Energy Agency* (IEA) pada tahun 2019 mencatat bahwa pasokan energi primer di dunia berasal dari bahan bakar fosil sebesar 81%. Jumlah yang besar tersebut menimbulkan dampak terhadap lingkungan seperti kenaikan emisi karbon dan pemanasan global (Sianipar, R.J., et al., 2024). Untuk mengatasi masalah tersebut, banyak negara beralih menggunakan energi terbarukan untuk transformasi energi dan menciptakan teknologi penyimpanan energi yang ramah lingkungan dan terbarukan yang memiliki tingkat efisiensi yang tinggi guna mewujudkan tujuan dari SDGs.

Superkapasitor merupakan terobosan baru teknologi penyimpanan energi yang memiliki *power density* yang lebih tinggi dibandingkan baterai serta memiliki *energy density* yang lebih tinggi dari kapasitor konvensional yang ada (Huda, N.A., et al., 2022). Selain itu, superkapasitor juga memiliki tingkat pengisian yang cepat serta umur siklus pengisian yang panjang. Salah satu jenis superkapasitor yaitu superkapasitor EDLC (*Electric Double Layer Capacitor*) yaitu superkapasitor yang memiliki kestabilan siklus yang sangat baik. Prinsip kerja EDLC yaitu mengumpulkan muatan-muatan elektron bebas yang dihasilkan dari hasil penyerapan ion elektrostatis ke permukaan elektroda yang dilengkapi dengan elektrolit antara bahan konduktif pada area permukaan spesifik (Haq, F.S., et al., 2022).

Salah satu jenis superkapasitor yang sedang berkembang saat ini yaitu superkapasitor *hybrid*. Superkapasitor hibrid merupakan superkapasitor yang tersusun atas EDLC dan *pseudocapacitor*. Karakteristik EDLC didapatkan dari material berbasis karbon seperti graphene, *Reduced graphene oxide*, *carbon aerogels*, dan karbon amorf. Sedangkan untuk karakteristik *pseudocapacitor* didapatkan dari material seperti oksida logam dan *conducting polymers* (Thallah, S.I.M., et al., 2023). Salah satu oksida logam yang digunakan sebagai elektroda

superkapasitor yaitu α -MnO₂ karena memiliki konduktivitas yang besar, kapasitas yang tinggi sebesar 1370 F/g, dan harganya murah (Liu, J., et al., 2022). Untuk mendapatkan karakteristik EDLC didapatkan dari material rGO dan *Activated Carbon*.

Reduced Graphene Oxide merupakan material karbon yang dihasilkan dari proses reduksi *graphene oxide* hasil oksidasi grafena. rGO memiliki konduktivitas Listrik tinggi serta luas permukaan spesifik yang besar sehingga dapat memfasilitasi transfer muatan yang cepat dan meningkatkan kinetika elektroda (Sivaram, H., et al., 2024).

Activated Carbon merupakan salah satu material berbasis karbon. *Activated carbon* memiliki beberapa keunggulan yaitu mudah didapat, biaya murah, memiliki konduktivitas listrik yang tinggi serta luas permukaan yang besar (Mossfika, E., et al., 2020).

Penelitian terkait rGO/MnO₂/*Activated Carbon* telah dilakukan oleh Li, et al, (2017) dan Mandal, et al. (2021). Li mensintesis komposit *graphene/Active carbon/MnO₂* pada temperatur 140°C selama 2 jam, dan didapatkan kapasitansi spesifik sebesar 378 F/g dengan retensi kapasitas 91,6% setelah 3000 siklus. Pada penelitian yang dilakukan oleh Mandal, et al. (2021) didapatkan nilai kapasitansi komposit MnO₂/*graphene/Activated carbon* sebesar 485 F/g dan retensi kapasitas 97% setelah 5000 siklus. Namun, pada dua penelitian di atas memiliki keterbatasan, dimana hanya menggunakan kondisi sintesis yang tetap, seperti rasio bahan konstan dan durasi reaksi hidrotermal tunggal, sehingga variasi parameter sintesis belum dieksplorasi secara menyeluruh. Selain itu, pada penelitian yang dilakukan oleh Mandal, et al. pada tahun 2021, tidak dilakukan pengujian FTIR dan EIS, serta pengujian stabilitas siklus yang terbatas pada beberapa ribu siklus sehingga perilaku kapasitif material hybrid dalam jangka panjang belum sepenuhnya terungkap. Untuk mengatasi hal tersebut, penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan rasio komposit rGO/ α -MnO₂/*Activated Carbon* dan waktu hidrotermal, serta melakukan karakterisasi yang menyeluruh pada material komposit agar dapat mengkorelasikan perubahan struktur material dan kinerja kapasitif komposit hybrid. Harapannya dengan melakukan penelitian ini dapat mendukung strategi pengembangan energi berkelanjutan demi tercapainya *Sustainable Development Goals* (SDGs).

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang diangkat pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh komposisi rGO dan waktu hidrotermal terhadap struktur dan morfologi material komposit rGO/ α -MnO₂/*Activated Carbon*?
2. Bagaimana pengaruh komposisi rGO dan waktu hidrotermal terhadap sifat kapasitif material komposit rGO/ α -MnO₂/*Activated Carbon* sebagai elektroda superkapasitor *hybrid*?

1.3 Batasan Masalah

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

1. Ukuran serbuk grafit dianggap homogen.
2. *Impurity* dari bahan-bahan yang digunakan diabaikan.
3. pH aquades dianggap netral (pH 5).
4. Material loss dianggap tidak ada saat proses reaksi.
5. Temperatur dan tekanan udara dianggap konstan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian tesis ini yaitu:

1. Menganalisis pengaruh komposisi rGO dan waktu hidrotermal terhadap struktur dan morfologi material komposit rGO/ α -MnO₂/*Activated Carbon*
2. Menganalisis pengaruh komposisi rGO dan waktu hidrotermal terhadap sifat kapasitif material komposit rGO/ α -MnO₂/*Activated Carbon* sebagai elektroda superkapasitor *hybrid*

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dibuat untuk dapat menghasilkan elektroda superkapasitor yang memiliki sifat kapasitif yang maksimal, ramah lingkungan, mudah dalam pembuatannya, dan dapat diterapkan dalam berbagai bidang yang membutuhkan penyimpanan energi listrik yang efektif, serta dapat mengurangi emisi karbon. Sehingga dapat mewujudkan langkah Indonesia dalam menyukseskan komitmen

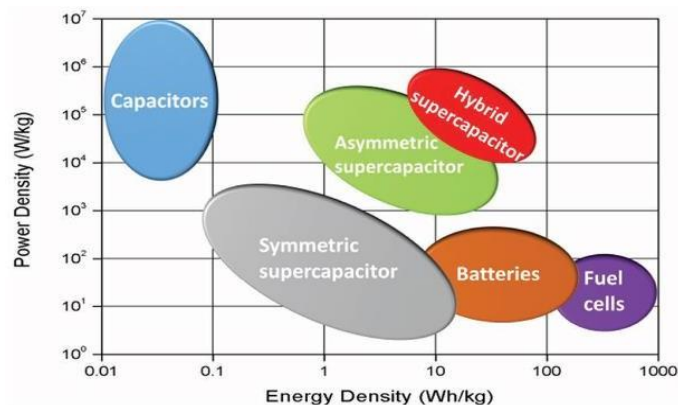
global dalam rangka pembangunan berkelanjutan atau Sustainable Development Goals (SDGs).

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Superkapasitor

Superkapasitor merupakan teknologi penyimpanan energi elektrokimia yang dapat digunakan sebagai penyimpan dan menyalurkan muatan melalui penyerapan dan pelepasan ion secara reversibel pada antarmuka antara elektroda dan elektrolit. Superkapasitor dapat menahan banyak siklus pengisian dan pengosongan dibandingkan dengan baterai yang dapat diisi ulang (Theerthagiri, J., et al, 2020).

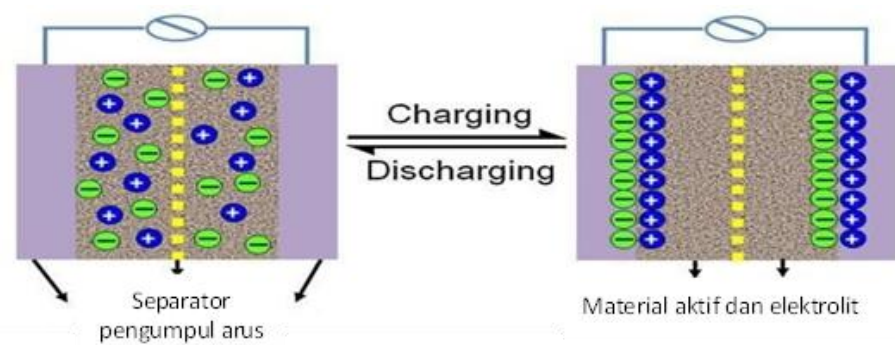


Gambar 2.1 Ragone plot (Kularatna, N., et al., 2021)

Pada **Gambar 2.1** ditunjukkan *Ragone plot* dari beberapa teknologi penyimpanan energi. Konsep dari *Ragone plot* yaitu hubungan antara *energy density* dan *power density*. Pada *Ragone plot* dapat menjelaskan karakteristik sistem penyimpanan energi. Perangkat yang memiliki kemampuan yang mumpuni memiliki kerapatan energi dan kerapatan daya yang besar (Kularatna, N., et al., 2021). Pada plot ragone, diperlihatkan untuk superkapasitor memiliki kepadatan energi dan kepadatan daya yang lebih tinggi dari pada baterai dengan nilai lebih dari 10 kW/Kg serta *life cycles* yang lebih panjang dengan nilai lebih dari 10⁵ siklus daripada kapasitor tradisional. Dari keunggulan tersebut, superkapasitor memiliki prospek yang besar sebagai teknologi penyimpanan energi untuk sistem elektronik di masa depan yang membutuhkan daya serta kepadatan energi yang tinggi namun

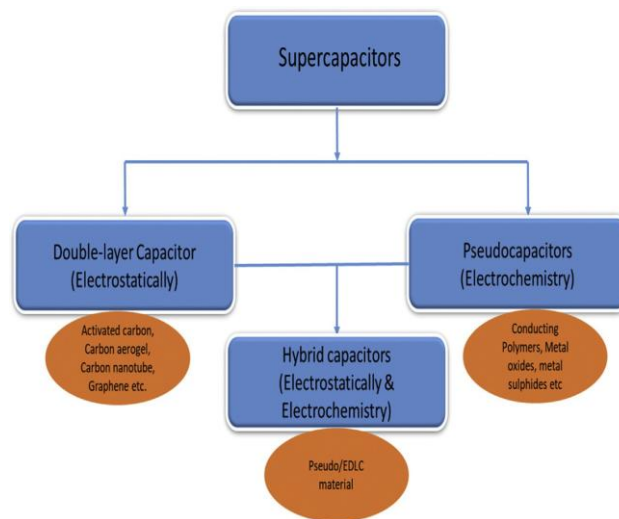
juga memiliki daya tahan serta pengisian/pengosongan daya yang cepat (Permatasari, F. A., et al., 2021).

Superkapasitor memiliki beberapa sifat yang unggul dibandingkan dengan baterai dan kapasitor. Superkapasitor memiliki keunggulan seperti kemampuan rapat daya yang besar, hal ini dikarenakan oleh luas permukaan yang besar dari material elektroda (Malis, E., et al., 2023). Selain itu, superkapasitor dapat menyediakan densitas dengan daya tinggi dan kecepatan pengisian dan pengosongan yang unggul sehingga menjadikan superkapasitor sebagai pilihan yang ideal untuk teknologi penyimpanan energi (Aziz, N., et al., 2024).



Gambar 2.2 Proses *charge discharge* superkapasitor (Nurhasmia, 2021)

Prinsip kerja dari superkapasitor ditunjukkan oleh **Gambar 2.2** yaitu pada saat pengisian, ion-ion dari kedua elektroda akan saling bertukar melalui separator. Ion negatif yang dimiliki elektroda positif akan bergerak menuju elektroda negatif melalui membran separator dan sebaliknya. Saat terjadi pertukaran ion, tersimpan dalam superkapasitor, saat pelepasan muatan, ion-ion dari dua elektroda yang melakukan proses pengisian akan kembali ke posisi semula. Ion negatif akan kembali ke elektroda positif begitu juga sebaliknya (Ervin, M. H., 2020). Hingga saat ini, sudah banyak jenis superkapasitor yang sudah diproduksi dan dijual belikan secara komersial. Superkapasitor yang dijual oleh beberapa perusahaan kebanyakan merupakan jenis EDLC.



Gambar 2.3 Jenis-jenis superkapasitor (Theerthagiri, J., et al, 2020)

Gambar 2.3 ditunjukkan jenis-jenis superkapasitor dan material yang umum digunakan pada jenis superkapasitor tersebut. Supercapacitor memiliki beberapa jenis berdasarkan prinsip penyimpanan energi yaitu EDLC, *pseudocapacitors*, dan *double-layer capacitor*. Ketiga jenis superkapasitor tersebut memiliki beberapa perbedaan yang disajikan pada **Tabel 2.1**

Tabel 2.1 Perbandingan EDLC, Pseudokapasitor, dan *Hybrid supercapacitor* (Lokhande, P. E., et.al., 2020)

Parameter	EDLC	Pseudocapacitor	Hybrid Supercapacitor
Storage mechanism	• Muatan listrik memiliki sifat non-faradaik/elektrostatik • Disimpan di antarmuka logam/elektrolit	• Reaksi redoks faradic • Reversibel	Memiliki dua sifat antara faradic dan non-faradic
Specific capacitance	Rendah	Tinggi	Tinggi
Energi density	Rendah	Tinggi	Tinggi
Cyclic life/stability	Tinggi	Rendah	Tinggi
Material	• Activated carbon • Carbon nantotubes	• NiO • MgO • PANI	• Ni(OH)₂/rGO • PANI/rGO

Nilai kontribusi terkendali difusi dan kontribusi kapasitif dari suatu superkapasitor ditentukan dengan cara menghitung nilai b . Persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai tersebut dapat menggunakan persamaan berikut

$$i(V) = av^b \quad (2.1)$$

Dimana i merupakan arus/*current*, dan v merupakan *sweep rate*. Dengan mengetahui nilai b dan bentuk kurva CV, dapat terlihat perbedaan antara EDLC, pseudokapasitor, dan *hybrid supercapacitor* seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 2.2** (Sharma, S., & Chand, P., 2023).

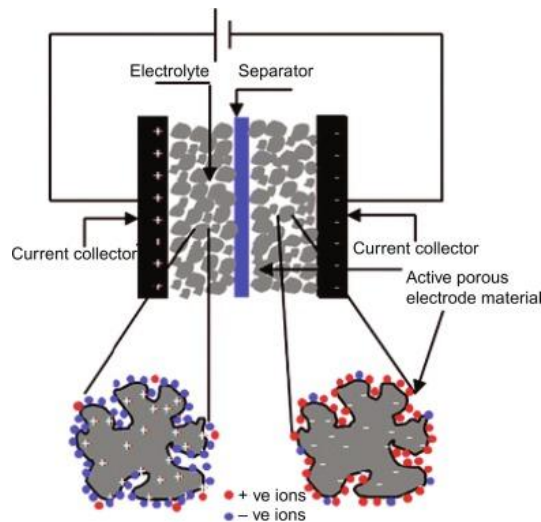
Tabel 2.2 Perbedaan EDLC, pseudokapasitor, dan *hybrid supercapacitor* berdasarkan bentuk kurva CV (nilai b) (Sharma, S., & Chand, P., 2023)

Material	EDLC	Pseudocapacitive	Battery type
Bentuk CV	Rectangular	Hampir persegi panjang	Redox peaks
Formula	$i(V) = av^b$	$i(V) = av^b$	$i(V) = av^b$
Nilai b	1	-1	0.5
Satuan	F	F	C atau mAh
<i>GCD profile</i>	Linear	Hampir linear	Plateau
<i>Sweep rate</i>	Rendah	Rendah	Rendah

Pada material EDLC, bentuk kurva yang dihasilkan berbentuk persegi panjang dengan nilai b selalu sama dengan 1. Jika kurva CV yang dihasilkan mempertahankan bentuk persegi panjang yang ideal dengan adanya peningkatan laju pemindaian tanpa menggeser puncak anoda secara positif dan puncak katoda secara negatif, menunjukkan sifat kapasitif yang superior. Pada material pseudokapasitor, bentuk kurva CV yang dihasilkan berbentuk persegi panjang dengan beberapa titik infleksi dan nilai b yang mendekati 1. Untuk material jenis baterai, bentuk kurva CV yang dihasilkan memiliki puncak redoks yang menunjukkan adanya proses transfer elektron kuasi-reversibel dengan nilai b sebesar 0.5. Pada ketiga jenis superkapasitor tersebut, *sweep rate* yang dimiliki rendah karena pada laju sapuan tinggi, kontribusi ohmik memainkan peran yang signifikan (Sharma, S., & Chand, P., 2023).

2.1.1 *Electric Double Layer Capacitor (EDLC)*

Electric Double Layer Capacitor (EDLC) merupakan jenis superkapasitor yang memiliki kestabilan siklus yang sangat baik. Kestabilan siklus yang baik dari EDLC dikarenakan penyimpanan muatan EDLC terjadi secara elektrostatis dan tidak ada transfer muatan yang terjadi antara elektroda dan elektrolit. EDLC terdiri dari elektroda, separator, elektrolit. Prinsip kerja dari EDLC yaitu mengumpulkan muatan-muatan elektron bebas yang berasal dari hasil penyerapan ion elektrostatis ke permukaan elektroda keping sejajar yang telah dilengkapi dengan elektrolit yang berada diantara bahan konduktif pada area permukaan spesifik (Nurul Huda, A., 2022).



Gambar 2.4 Skema EDLC (Zhou, L., et al., 2018)

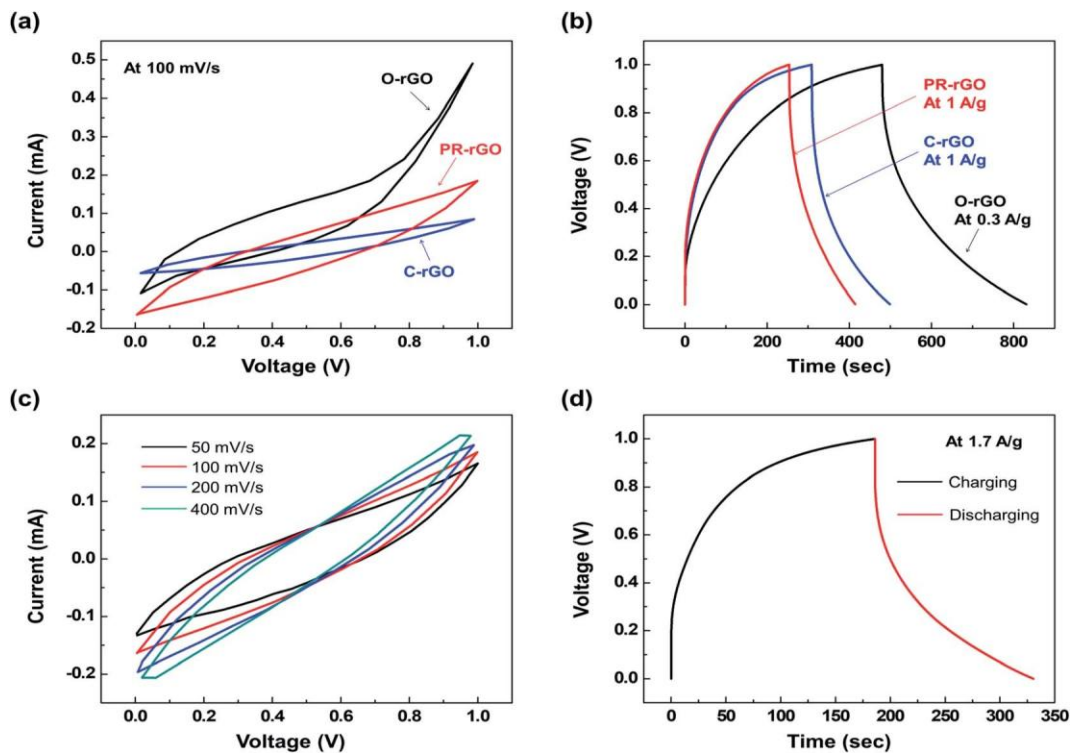
Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.4** terkait skema dari EDLC, kapasitansi lapisan ganda listrik berasal dari pemisahan muatan listrik yang berasal dari penyelarasan arah ion dan elektron pada antarmuka antara bahan elektroda dan elektrolit. Muatan listrik yang berlebih berkumpul pada permukaan elektroda positif atau negatif, sementara ion elektrolit dengan muatan kompensasi yang terakumulasi dalam larutan elektrolit untuk menjaga netralitas listrik (Zhou, L., et al., 2018).

Tabel 2.3 Jenis-jenis material EDLC (Maria, S., et al., 2022)

Electrode Material	Electrolyte	Cell voltage (V)	Power Density (Wh/kg)	Energy Density (Wh/kg)	Specific capacitance (F/g)
TiO ₂ @AC	1 M Na ₂ SO ₄	1.2	4200	28	282
Flexible PANI/rGO	1 M H ₂ SO ₄	0.8	368	24.45	299
Ac on surface of rGO	1 M Na ₂ SO ₄	1.6	469.24	11.9	541
AC	TEABF ₄ /AN	2.5	681	20	80
rGO	(AEI-TFSI)	2	940	61	250

Pada **Tabel 2.3** ditunjukkan jenis-jenis material yang biasa digunakan pada EDLC. Kebanyakan material yang digunakan pada EDLC merupakan material *base carbon* seperti *activated carbon*, *carbon nanotubes*, dan *graphene* (Maria, S., et al., 2022). EDLC dapat menyimpan energi melalui proses adsorpsi ion yang bersifat reversibel pada antarmuka elektroda dan elektrolit. Salah satu sifat utama EDLC yaitu luas permukaan spesifik yang tinggi, sehingga material karbon yang berukuran nano sering dipilih sebagai bahan untuk EDLC karena dapat memberikan luas permukaan yang besar serta konduktivitas listrik yang baik. EDLC memiliki stabilitas siklus yang tinggi dan kepadatan daya yang besar, yang biasa ditunjukkan melalui kurva pengujian *cyclic voltammetry* (CV) berbentuk persegi panjang dan pengujian *charge-discharge galvanostatic* (GCD) yang berbentuk segitiga (Kar, K. K., 2023).

Penelitian terkait EDLC telah dilakukan oleh Kil. Y.J., et.al, pada tahun 2020 yang meneliti terkait aplikasi *activated carbon* untuk aplikasi EDLC.



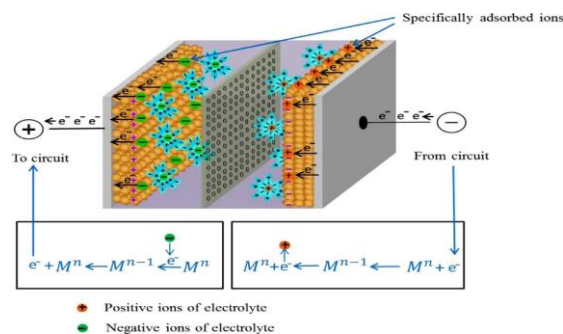
Gambar 2.5 Kurva cyclic voltammetry (CV) pada laju pindai 100 mV.s^{-1} , dan (b) grafik galvanostatic charging and discharging (GCD) (Kil. Y.J., et.al., 2020)

Pada **Gambar 2.5** ditunjukkan hasil pengujian CV pada *scan rate* 100 mV.s^{-1} dan pengujian GCD. Dari pengujian tersebut, PR-rGO menunjukkan performa terbaik dengan nilai performa sebesar 240 F/g dengan densitas energi 33.3 Wh/kg dan densitas daya 833.3 W/kg . Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan temperatur dapat menghasilkan elektroda dengan konduktivitas tinggi dan kinerja energi yang unggul.

2.1.2 Pseudocapacitor (PC)

Pseudocapacitor (PC) merupakan jenis superkapasitor yang dapat menyimpan muatan listrik secara elektrokimia melalui reaksi redoks yang sangat reversibel dan terjadi perpindahan muatan antara elektroda dan elektrolit. Saat tegangan diberikan pada *pseudocapacitor*, ion-ion dari elektrolit akan bergerak menuju elektroda dengan muatan yang berlawanan, dan reaksi redoks terjadi di permukaan elektroda. Karena adanya reaksi redoks, *pseudocapacitor* memiliki kapasitansi dan kerapatan energi (*energy density*) yang lebih tinggi dibandingkan

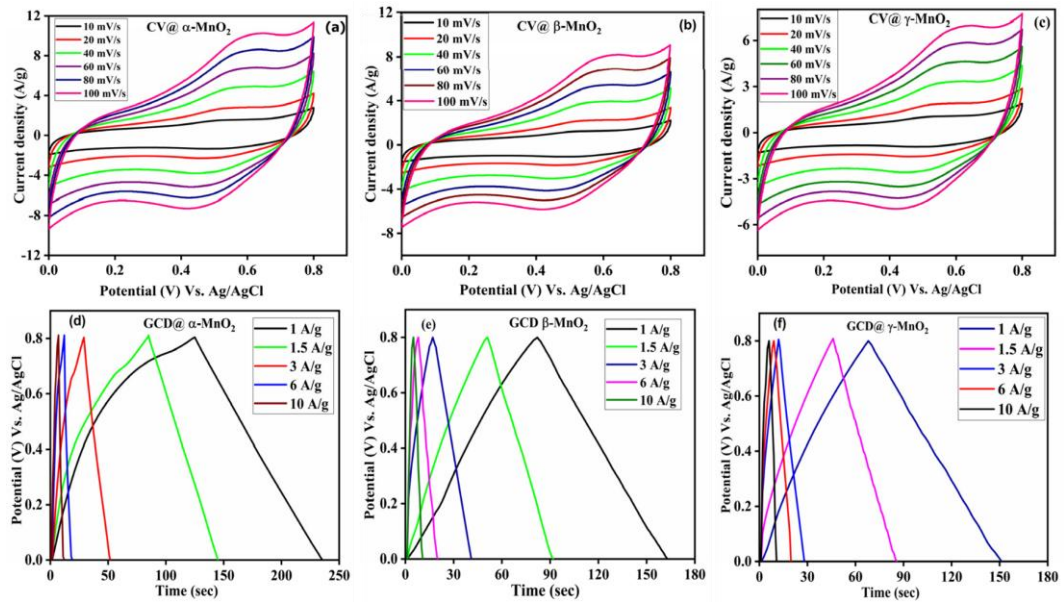
dengan EDLC. Namun, *pseudocapacitor* memiliki kekurangan yaitu *power density* dan stabilitas siklusnya lebih rendah dibandingkan EDLC (Gerard, O., et al., 2022).



Gambar 2.6 Proses *charge-discharge* pada *pseudocapacitor* (Choudhary, R. B., et al., 2020)

Pseudocapacitor dapat menyimpan energi listrik melalui proses transfer muatan secara faradik yang reversibel antara elektroda dan elektrolit, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.6** (Choudhary, R. B., et al., 2020). Oksida logam transisi banyak digunakan sebagai material elektroda yang digunakan dalam *pseudocapacitor*. Material *metal oxide* yang banyak digunakan yaitu mangan oksida (MnO_2), rutenium oksida (RuO_2), nikel oksida (NiO), dan kobalt oksida (Co_3O_4) (Adedoja, O. S., et al., 2023).

Penelitian terkait aplikasi material untuk pseudokapasitor telah dilakukan oleh Devi, R., et.al., pada tahun 2023 untuk menganalisis performa elektrokimia dari α , β , and γ MnO_2 .



Gambar 2.7 (a–c) Plot CV dan (d–f) plot GCD masing-masing α -, β -, dan γ -MnO₂

Pada **Gambar 2.7** ditunjukkan hasil pengujian dari CV dan GCD masing-masing jenis MnO₂. Dari hasil pengujian tersebut, didapatkan bahwa α -MnO₂ memiliki nilai kapasitansi spesifik yang baik sebesar 86 F/g pada 1 A/g dan memiliki energi spesifik maksimum sebesar 17, 2 Wh/kg dan daya spesifik 596 W/kg. Hal ini dikarenakan, struktur jaringan dari α -MnO₂ yang memiliki 2x2 *tunnel-containing network* yang dapat memfasilitasi pergerakan ion elektrolit atau proses transfer elektron dalam mekanisme penyimpanan muatan.

Tabel 2.4 Jenis-jenis material pseudokapasitor (Maria, et.al., 2022)

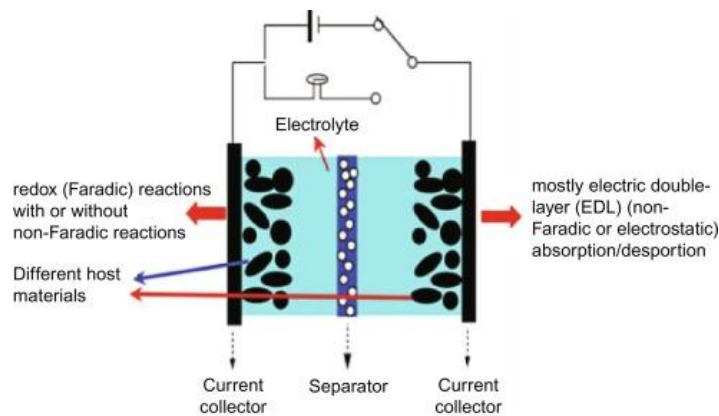
Electrode Material	Electrolyte	Cell voltage (V)	Power Density (Wh/kg)	Energy Density (Wh/kg)	Specific capacitance (F/g)
Cr ₂ O ₃ nanopartikel	6 M KOH	1	312.5	12.5	340
Ni ₃ BHT	1 M LiPF ₆	1.7	-	-	227
PHATN	6 M KOH	1	-	-	686
CO ₃ V ₂ O ₈	-	-	-	-	790

Electrode Material	Electrolyte	Cell voltage (V)	Power Density (Wh/kg)	Energy Density (Wh/kg)	Specific capacitance (F/g)
Fe-Alco-doped α -Ni(OH) ₂ and Ni(HCO ₃) ₂ composites	6 M KOH	0.5	370	30.27	495.6
FeCo ₂ O ₄ NSs@NiO NWs composite	3 M KOH	0.5	-	-	4746.2
MoS ₂ /rGO	1 M H ₂ SO ₄	1.5	370	23.0	361
TGCN/PANI	-	-	400	33.57	298.31
MnCo ₂ O ₄ HSs/NF	-	-	250.1	37.1	648/4
THPP-PA-Mn	1.0 M Na ₂ SO ₄	1	1000	12.6	90.9
VO(OH) ₂ /CNT	1.0 M LiClO ₄ /PC	2.2	63.65	32	265
NiCoHC/CDs	6 M KOH	1.5	-	-	1964.6
CuFeS ₂	1 M LiOH	1.4	166	4.74	95

Pada **Tabel 2.4** ditunjukkan jenis-jenis dan nilai kapasitansi dari material-material yang dapat diaplikasikan sebagai pseudokapasitor.

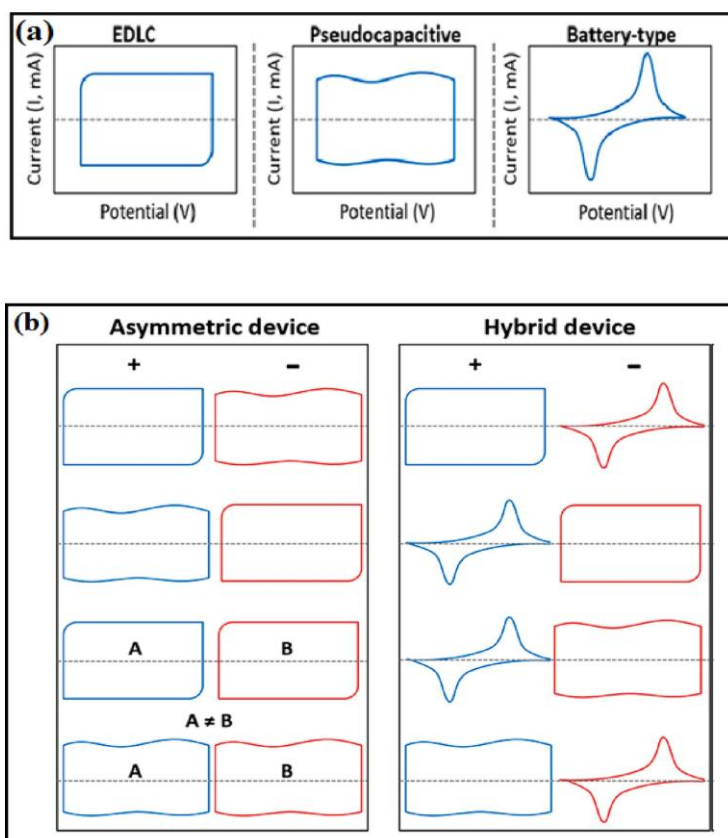
2.1.3 Hybrid Supercapacitor

Hybrid Supercapacitor merupakan jenis superkapasitor yang menggabungkan beberapa mekanisme penyimpanan energi yang dilakukan secara bersamaan dengan memanfaatkan keunggulan masing-masing. Keunggulan yang dimiliki oleh *hybrid supercapacitor* yaitu stabilitas siklus yang panjang, kepadatan daya yang tinggi, kapasitas pengisian daya dan kemampuan kerja yang lebih aman (Siddiki, M.R., et al., 2024).



Gambar 2.8 Ilustrasi *hybrid supercapacitor* (Zhou, L., et al., 2018)

Pada **Gambar 2.8** ditunjukkan ilustrasi terkait *hybrid supercapacitor*. Pada *hybrid supercapacitor*, mekanisme penyimpanan yang terjadi melibatkan mekanisme faradaik (reaksi redoks) yang dihasilkan dari *pseudocapacitor* dan mekanisme non-faradaik (penyerapan ion elektrostatik) yang dihasilkan dari EDLC. Dari kombinasi ini, dihasilkan setengah bagian bekerja seperti EDLC dan setengah lainnya bekerja seperti *pseudocapacitor*. Terdapat 3 jenis *hybrid supercapacitor* berdasarkan pada kombinasi bahan elektroda yang digunakan yaitu asimetris yang menggunakan elektroda negatif (EDLC) dari bahan karbon dan elektroda positif berbasis bahan pseudokapasitif. Tipe kedua yaitu tipe baterai, dimana pada tipe ini salah satu elektroda menggunakan bahan dari tipe baterai, dan elektroda lainnya menggunakan bahan dari superkapasitor sehingga pada jenis ini akan menghasilkan densitas daya dan densitas energi yang tinggi. Tipe ketiga yaitu elektroda komposit yang terbentuk dari bahan EDLC berbasis karbon dengan bahan pseudokapasitif seperti polimer dan metal oksida. Kombinasi dari kedua material tersebut, dapat meningkatkan kapasitansi spesifik, stabilitas terhadap korosi, serta memperluas jendela potensial dari superkapasitor (Pershaanaa, M., et al., 2022).



Gambar 2.9 (a) Bentuk CV yang berbeda untuk material EDLC, pseudo kapasitif, dan tipe baterai. (b) Konfigurasi CV yang berbeda secara asimetris dan hibrida dengan menggabungkan material A dan B (Sharma, S., & Chand, P., 2023)

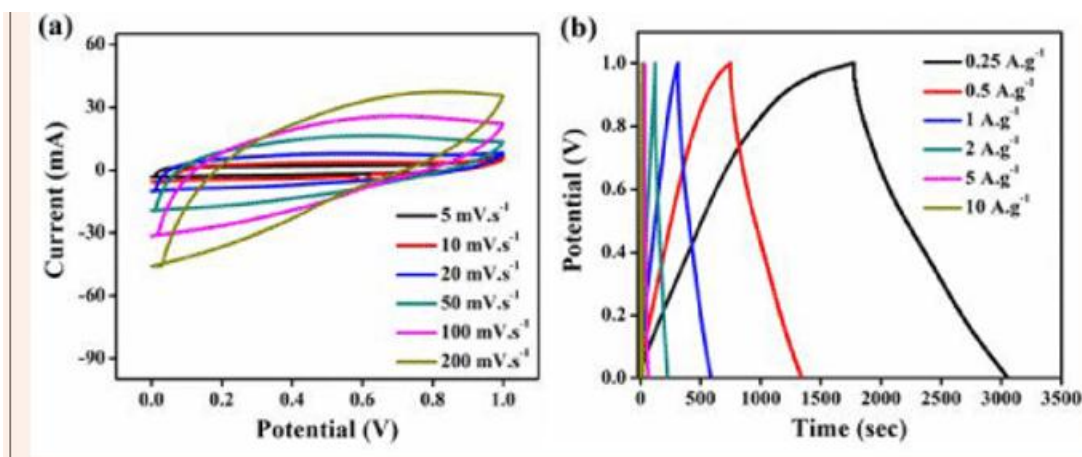
Pada **Gambar 2.9 (a)** dan **(b)** ditunjukkan jenis-jenis grafik dari EDLC, pseudokapasitor, dan *hybrid supercapacitor*. Pada grafik CV EDLC, bentuk yang dihasilkan berbentuk persegi panjang yang mencerminkan mekanisme non-faradaic, yaitu menyimpan muatan melalui pemisahan fisik ion pada surface elektroda-elektrolit. Mekanisme ini dapat membuat EDLC memiliki stabilitas yang tinggi, siklus pengisian-pengosongan cepat, serta kinerja yang konsisten. Material yang umum digunakan pada EDLC yaitu karbon aktif, *graphene*, carbon nanotubes (CNTs). Pada grafik CV *pseudocapacitor*, bentuk yang dihasilkan berupa quasi-persegi panjang. Bentuk tersebut menunjukkan adanya mekanisme faradaic berupa reaksi redoks yang terjadi pada permukaan elektroda. Sehingga dari reaksi tersebut memberikan kontribusi tambahan terhadap penyimpanan muatan yang membuat kapasitansinya lebih tinggi dibandingkan dengan EDLC. Material yang sering digunakan pada *pseudocapacitor* yaitu MnO_2 , RuO_2 , dan polimer konduktif.

Sementara itu, pada sistem faradaic atau supercapattery menampilkan kurva CV dengan puncak redoks yang jelas. Puncak ini menandakan adanya transfer elektron dan transformasi kimia dalam material elektroda. Mekanisme ini memungkinkan penyimpanan energi yang lebih besar, namun siklus yang dimiliki terbatas dibandingkan EDLC. Material yang biasa digunakan yaitu oksida logam, sulfida, dan hidroksida (Mohamad, A. A., 2025). Perbandingan nilai parameter dari masing-masing jenis kapasitor, ditunjukkan pada **Tabel 2.5**.

Tabel 2.5 Perbandingan parameter jenis-jenis kapasitor (Bharti, et.al., 2021)

Parameter	Baterai	Kapasitor elektrolitik	Carbon EDLC	Pseudokapasitor	Hybrid supercapacitor
<i>Specific Capacitance</i> (F/g)	N/A	N/A	20-240	20-1530	21-160
<i>Specific Power</i> (F/g)	<1000	>10000	500-10000	35-35000	10000-54000
<i>Specific Energy</i> (F/g)	20-150	<0.1	1-10	1-250	1-25
<i>Operating Voltage</i> (V)	Low	High	<3	0.5-3.65	0.5-3.5
<i>Working Temperature</i> (°C)	-20-60	-55-125	-40-70	-25-60	-50-85
<i>Charge-Discharge Cycles</i>	1500	$\gg 10^{-6}$	$> 10^{-6}$	1500-70000	500-23000
<i>Efficiency</i>	0.7-0.85	1.0	0.85-0.99	0.94	0.6-0.95

Penelitian terkait *hybrid supercapacitor*, telah dilakukan oleh Mothkuri S, et.al. pada tahun 2020 terkait aplikasi rGO/MnO₂ untuk superkapasitor. Hasil pengujian CV yang didapat, ditunjukkan pada **Gambar 2.10**.

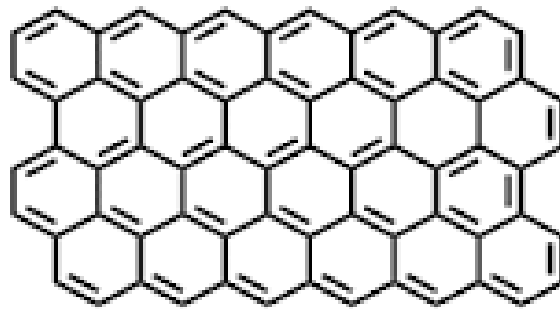


Gambar 2.10 (a) *Cyclic voltammetry* pada berbagai *scan rate* dan (b) GCD pada berbagai *current density* (Mothkuri S, et.al., 2020)

Dari hasil pengujian CV dan GCD yang ditunjukkan pada **Gambar 2.10**, didapatkan bahwa hibrida rGO-MnO₂ menghasilkan kapasitansi spesifik sebesar 633.6 F/g pada 0,25 A/g. Dimana hasil tersebut lebih tinggi dari MnO₂ murni (176.4 F/g) atau rGO (110,3 F/g). Pada CV dengan *scan rate* 5 mV/s, diperoleh 338,9 F/g. Energi spesifik dari sel hibrida yang dihasilkan sebesar 87,99 Wh/kg (0,25 A/g). Setelah diuji pada 1000 siklus, retensi kapasitansi yang dihasilkan sebesar 76,64%.

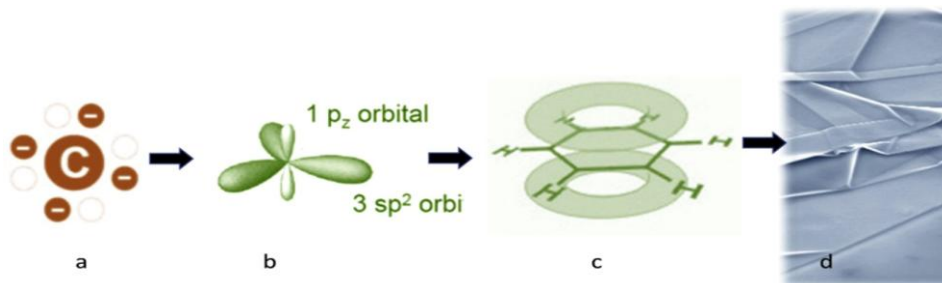
2.2 Graphene

Graphene merupakan istilah yang mengacu pada satu lapisan grafit, dengan atom karbon hidridisasi berupa sp² yang tersusun dalam kisi heksagonal dan sebagian diisi oleh orbital π yang berada pada bagian atas dan bawah bidang lembaran *graphene*. *Graphene* merupakan elemen struktur dasar pembentuk alotrop lainnya, dimana *graphene* dapat ditumpuk membentuk 3D grafit, dapat juga digulung membentuk 1D nanotube, serta dapat dibungkus untuk membentuk 0D fullerene. *Graphene* dapat juga dianggap sebagai molekul aromatik yang sangat besar, memiliki kelompok senyawa hidrokarbon polisiklik aromatik datar (Amri, A., 2019).



Graphene

Gambar 2.11 Struktur *graphene* (Putri, N. A., et al., 2023)

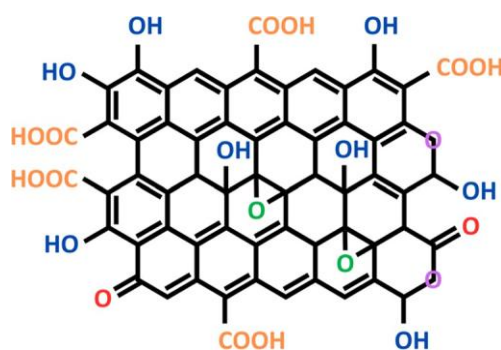


Gambar 2.12 (abc) Aspek mendasar dari sifat ikatan *graphene* dan (d) SEM *graphene* satu lapis (Tiwari, S. K., et al., 2020)

Pada **Gambar 2.11** ditunjukkan struktur dari *graphene*. *Graphene* memiliki struktur berbentuk planar dan hexagonal yang menyerupai sarang lebah (Zaman, K., 2021). Pada **Gambar 2.12** ditunjukkan ikatan dari *graphene* dan hasil SEM. Struktur elektronik yang dimiliki *graphene* terbilang unik, memungkinkan fonon bergerak secara bebas sehingga menghasilkan konduktivitas termal yang sangat tinggi. Sifat *graphene* juga dipengaruhi oleh jumlah lapisan dan cacat dalam strukturnya. *Graphene* dengan satu lapis memiliki luas permukaan teoritis sangat tinggi sebesar $\sim 2630 \text{ m}^2/\text{g}$ dan konduktivitas listrik yang luar biasa serta kemampuan mobilitas pembawa muatan yang sangat tinggi hingga $2 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V.s.}$ Selain itu, *graphene* bersifat transparansi yang tinggi hingga dapat menyerap 2,3% cahaya putih per lapisan, kekuatan mekanik dengan nilai *modulus young* sebesar 1 TPa, tahan hingga 42 N/m. Konduktivitas termal yang dimiliki oleh *graphene* bisa mencapai 3000-5000 W/m.K. karena sifat-sifat yang dimiliki, *graphene* menjadi material yang sangat potensial untuk aplikasi elektronik pada generasi mendatang (Tiwari, S. K., et al., 2020).

2.3 Graphene Oxide

Graphene oxide merupakan bentuk teroksidasi dari *graphene*. *Graphene oxide* merupakan material berlapis tunggal yang memiliki komposisi kimia non-stoikiometri yang terdiri dari karbon, hidrogen, dan oksigen (Kumar, S., et al., 2023). *Graphene oxide* dapat dimodifikasi tanpa merusak struktur heksagonal karbonnya, hal ini merupakan keunggulan utama yang dimiliki *graphene oxide* dibandingkan dengan karbon konvensional (Tan, Y. Y., et al., 2024).



Gambar 2.13 Struktur *graphene oxide* (Tan, Y. Y., et al., 2024)

Graphene oxide mengandung berbagai gugus fungsi, seperti gugus epoksi, hidroksil, dan karboksil yang ditunjukkan pada **Gambar 2.13** (Tan, Y. Y., et al., 2024). Pembuatan *graphene oxide* dilakukan dengan menggunakan metode *modified hummer*, dimana grafit dioksidasi dengan menggunakan agen pengoksidasi yaitu asam sulfat. Kemudian, ditambahkan NaNO_3 dan KMnO_4 hingga menghasilkan *graphene oxide* berlapis tunggal maupun banyak dengan gugus fungsi yang mengandung oksigen (Kumar, S., et al., 2023). Metode *modified hummer* memiliki keunggulan yang lebih baik dibandingkan dengan metode tradisional. Pada **Tabel 2.6** ditunjukkan kelebihan dan kekurangan antara metode tradisional dengan metode *modified hummer*.

Tabel 2.6 Tabel perbandingan sintesis tradisional dengan *Hummer method* untuk *graphene oxide* (Méndez-Lozano, N., et al., 2022)

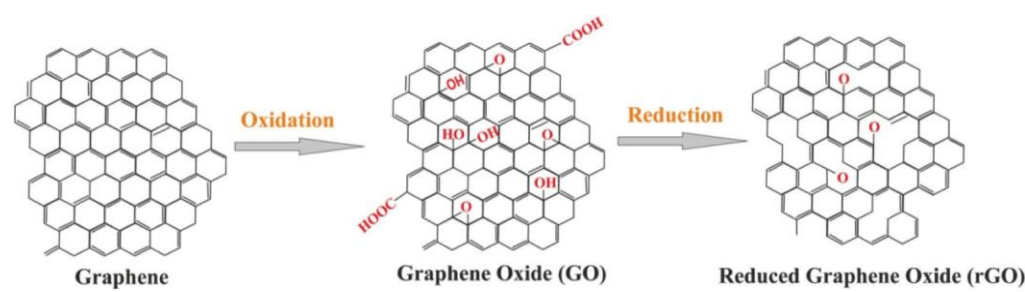
Metode	Oksidan	Kelebihan	Kekurangan
Tradisional	KClO ₃	-	Proses sintesis memerlukan waktu yang lama dan risiko berbahaya terhadap ledakan tinggi
	(NaClO ₃)		
	HNO ₃ , H ₂ SO ₄		
<i>Hummer modified</i>	KMnO ₄	Menghasilkan tingkat oksidasi yang lebih baik dan kinerja produk yang lebih baik	Proses pemisahan dan pemurnian membutuhkan waktu yang lama
	H ₂ SO ₄		
	NaNO ₃		

Graphene oxide memiliki sifat fisik dan kimia yang unik. Struktur kimia dari *graphene oxide* terdiri dari atom karbon yang berikatan sp^2 dan sp^3 , dengan gugus fungsional yang mengandung oksigen. Gugus fungsional terletak pada bidang basal dan tepi lembaran *graphene oxide*, dimana karbon sp^3 berada sedikit diatas atau dibawah bidang sp^2 , sehingga dapat menyebabkan distorsi pada struktur sarang lebah khas *graphene*. Karena kandungan oksigen yang tinggi, sehingga komposisi kimia yang dimiliki GO bersifat tidak tetap, dan rasio karbon terhadap oksigen (C/O) bergantung pada metode sintesis serta kondisi reduksi. GO bersifat isolator karena hambatan permukaan yang sangat tinggi, mencapai sekitar $10^{12} \Omega/\text{sq}$. Ketebalan lembaran GO monolayer sekitar 1 hingga 1,4 nanometer (Kornilov, D. Y., et al., 2020).

2.4 *Reduced Graphene Oxide*

Reduced graphene oxide merupakan material yang dihasilkan dari GO yang telah direduksi untuk menurunkan kandungan oksigennya. Proses reduksi dapat dilakukan dengan menggunakan bahan kimia seperti hidrazin hidrat, asam kuat seperti HNO₃ atau H₂SO₄, dan pemanasan. rGO dapat digunakan pada berbagai

aplikasi seperti sel surya, transistor efek medan (*field-effect transistor*), dan sensor gas (Damasceno, B. S., et al., 2023).



Gambar 2. 14 Struktur material berbasis *graphene* (Kumar, S., et al., 2023)

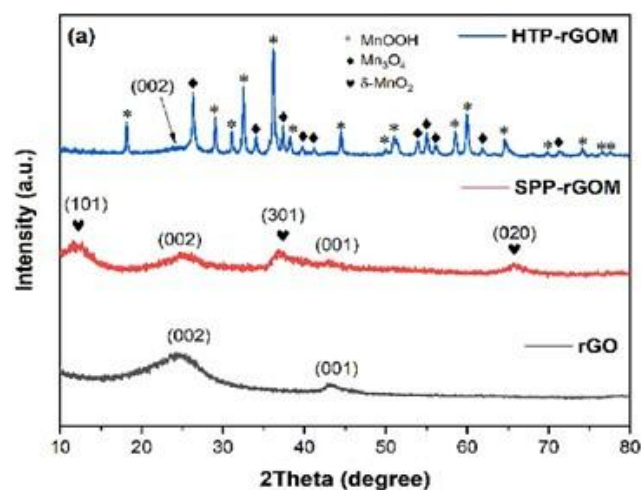
Struktur rGO ditunjukkan pada **Gambar 2.14**, dimana rGO memiliki struktur *graphene* setebal atom dengan kandungan gugus oksigen yang dikurangi. rGO memiliki konduktivitas listrik dan termal yang lebih tinggi dibandingkan dengan GO karena gugus oksigen yang dimiliki telah direduksi (Liu, Z., et al., 2022).

Tabel 2.7 Kelebihan dan kekurangan *graphene*, *graphene oxide*, *reduced graphene oxide* (Trivedi, D. N., et al., 2022)

Material	Kelebihan	Kekurangan
<i>Graphene</i>	• Peningkatan konduktivitas listrik dan thermal • Kontrol yang lebih baik terhadap fungsionalisasi	• Biaya tinggi • Sulit dikerjakan • Produksi dalam jumlah kecil • Sifat hidrofobik
GO	• Polar functionalization • Biaya rendah • Water dispersibility • Mudah disintesis	• Konduktivitas Listrik dan termal yang rendah • Permukaan acak pada fungsionalisasi • Sifat hidrofobik • Kontrol yang sulit terhadap fungsionalis pasca persiapan
rGO	• Memiliki konduktivitas Listrik dan termal yang tinggi	• Hidrofobisitas • Kemampuan kerja yang sulit

Material	Kelebihan	Kekurangan
	• Kontrol yang lebih baik pada fungsionalis • Lebih murah dibandingkan <i>graphene</i> murni	

Reduksi GO menjadi rGO dapat meningkatkan sifat dan karakteristik dari rGO seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 2.7**, dimana rGO memiliki sifat yang lebih baik dari GO. rGO memiliki sifat konduktivitas yang dapat diatur, hal ini dapat dilihat dari nilai *band gap* rGO yang nilainya lebih rendah daripada GO. rGO dapat meningkatkan transport muatan yang lebih baik dibandingkan GO karena adanya pemulihan konjugasi π dalam rGO (Rajguru, G. M., et al., 2024).

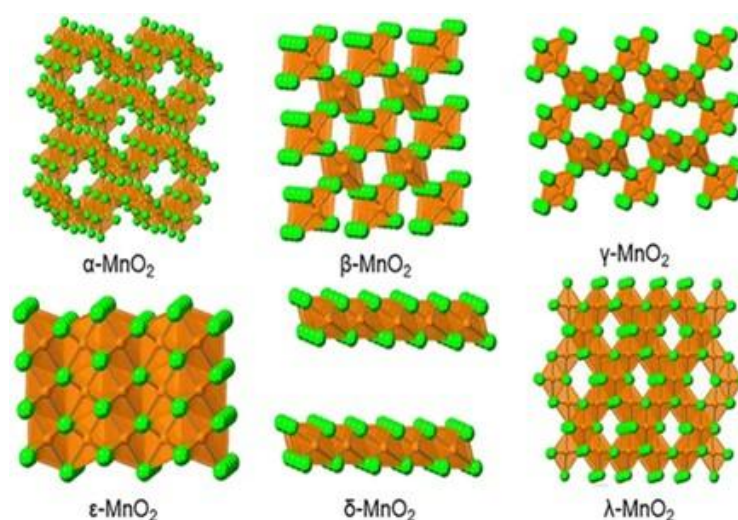


Gambar 2.15 Hasil pengujian XRD (Pimklang, T., et al., 2025)

Pada pengujian XRD yang ditunjukkan **Gambar 2.15**, rGO memiliki puncak 2θ sekitar 24° - 26° . Hal ini dibuktikan oleh penelitian yang telah dilakukan oleh (Pimklang, T., et al., 2025) yang menunjukkan puncak $2\theta = 24,5^\circ$ dengan bidang (002) yang menunjukkan proses reduksi rGO berhasil dan oksigen dalam rGO berkurang.

2.5 Mangan Dioksida

Manganese dioksida (MnO_2) merupakan material yang memiliki kapasitansi spesifik teoritis yang tinggi, stabilitas siklus yang sangat baik, serta biaya yang terjangkau. Dalam aplikasi MnO_2 sebagai superkapasitor, MnO_2 bekerja melalui reaksi redoks yang reversibel dengan ion elektrolit, sehingga dapat menyimpan muatan secara efisien. Namun, sifat pseudokapasitif yang efektif hanya terletak pada permukaan atau lapisan tipis. MnO_2 dalam skala nanometer memiliki nilai kapasitansi spesifik sebesar 700-1380 F/g. Sebaliknya, jika MnO_2 yang dihasilkan dalam skala mikrometer, kapasitansi yang dihasilkan hanya sekitar 150-250 F/g akibat konduktivitas yang rendah (Jayakumar, S., et al., 2024).



Gambar 2.16 Struktur kristal dari α -, β -, γ -, ϵ -, δ - and λ - MnO_2 (Patil, P. H., et al., 2024)

MnO_2 memiliki beberapa bentuk polimorfik seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.16**. Pada **Gambar 2.16** diatas, atom yang berwarna orange menandakan Mn, sedangkan atom yang berwarna hijau menandakan oksigen (O). Pola atom Mn dan O menunjukkan susunan oktahedral dalam masing-masing struktur kristal. Bentuk polimorfik ini berbeda-beda dalam susunan unit oktahedral dasar (MnO_6) yang mempengaruhi sifat dari MnO_2 (Jayakumar, S., et al., 2024). Bentuk-bentuk polimorfik MnO_2 dapat dijelaskan sebagai berikut:

- **α -MnO₂** : α -MnO₂ merupakan material yang tidak beracun, terjangkau, dan ramah lingkungan yang memiliki jendela potensial yang luas. Material ini memiliki struktur kristal berbentuk tetragonal tipe Hollandite dengan saluran 1D yang berbentuk terowongan (2x2) berukuran 4,6 Å. Karena struktur tersebut, α -MnO₂ memiliki performa elektrokimia yang baik serta kapasitansi dan kapasitas penyimpanan yang tinggi (Patil, P. H., et al., 2024). α -MnO₂ memiliki stabilitas termal yang tinggi sekitar 500°C. Ketahanan termal yang tinggi tersebut, didapatkan dari bentuk terowongan (2x2) yang dimiliki oleh α -MnO₂ (Hatakeyama, T., et.al., 2022).

Patil, et al. pada tahun 2023., melakukan penelitian terkait α -MnO₂ yang dilapisi dengan PANi dan rGO untuk superkapasitor. Kapasitansi yang dihasilkan dari material α -MnO₂/PANi meningkat dengan adanya penambahan rGO. kapasitansi spesifik yang dihasilkan sebesar 261 F/g pada *scan rate* 5 mV/s dan kehilangan kapasitansi sebesar 25% setelah 2000 siklus pada kerapatan arus 5 A/g. Densitas yang dihasilkan sebesar 11 Wh/Kg dan densitas daya yang dihasilkan sebesar 1250 W/Kg.

- **β -MnO₂**: β -MnO₂ memiliki struktur kristal tetragonal yang mirip dengan pirolusit. β -MnO₂ memiliki struktur tunnel 1D (1x1). Tunnel ini memiliki diameter sebesar 1,89 Å. pada β -MnO₂, pusat dari oktahedron [MnO₆] ditempati oleh atom Mn, sedangkan pada ruang heksagonal ditempati oleh atom O. Dalam hal stabilitas termodinamika, β -MnO₂ merupakan salah satu jenis polimorf yang paling stabil (Patil, P. H., et al., 2024). β -MnO₂ memiliki ketahanan termal pada temperatur 500°C dalam Ar dan 580°C pada udara. Namun jika panaskan pada temperatur lebih dari 580°C, maka akan melepas O₂ dan membentuk Mn₂O₃ (Hatakeyama, T., et.al., 2022).

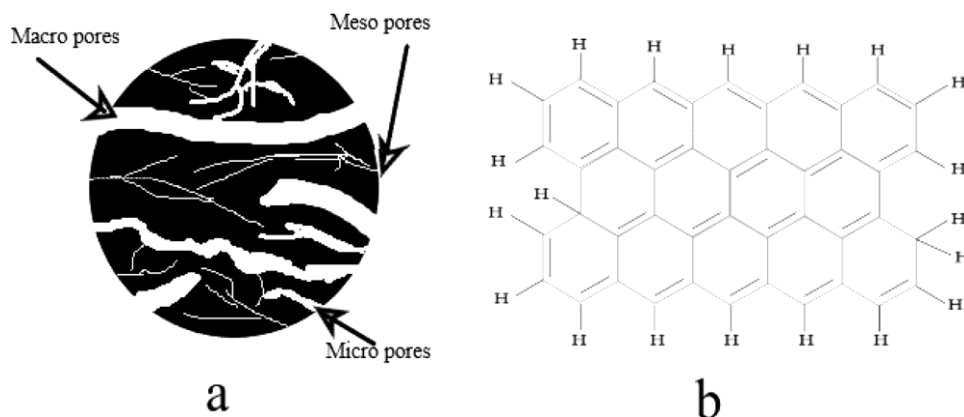
Pundir, et al., (2023), melakukan penelitian terkait *nanowire* 1D β -MnO₂ untuk aplikasi superkapasitor berkinerja tinggi. Kapasitansi spesifik yang dihasilkan sebesar 213 F/g pada kerapatan arus 0,2 A/g dengan retensi kapasitansi yang dihasilkan lebih dari 97,5% setelah 5000 siklus. Selain itu, superkapasitor simetris menghasilkan kapasitansi spesifik sebesar 37,57 F/g

pada kerapatan arus 0,2 A/g. Superkapasitor simetris tersebut memberikan retensi kapasitansi sebesar 101,1% setelah 5000 siklus.

- **γ -MnO₂:** γ -MnO₂ memiliki struktur boehmite yang terdistorsi. Struktur dari γ -MnO₂ tersusun secara heksagonal padat. Tipe pirolusit (1 x 1) dan rodokrosit (1 x 2) berkembang secara tidak teratur dan bergantian dalam struktur γ -MnO₂. γ -MnO₂ memiliki jarak antar lapisan sebesar 1,89 Å. γ -MnO₂ memiliki ketahanan termal dibawah 400°C (Hatakeyama, T., et.al., 2022). γ -MnO₂ biasanya digunakan dalam aplikasi superkapasitor dan baterai karena memiliki kemampuan untuk mempertahankan stabilitas dalam elektrolit asam. Selain itu, γ -MnO₂ menunjukkan performa elektrokimia yang baik untuk aplikasi pseudokapasitor (Patil, P. H., et al., 2024). γ -MnO₂ memiliki struktur polikristalin dengan nano-jarum tersebar secara acak. Kapasitansi yang dimiliki γ -MnO₂ sebesar 626,8 F/g pada kerapatan arus 2 A/g (Jayakumar, S., et al., 2024).
- **ϵ -MnO₂:** ϵ -MnO₂ memiliki struktur kristal heksagonal. ϵ -MnO₂ terbentuk struktur tunnel yang tidak teratur, serta dapat membentuk struktur jaringan tiga dimensi (3D). Sebagian besar celah yang berada dalam oktahedron diisi oleh ion Mn⁴⁺ (Patil, P. H., et al., 2024).
- **δ -MnO₂:** δ -MnO₂ memiliki struktur kristal monoklinik yang mirip dengan birnessite. Struktur berlapis yang dimiliki oleh δ -MnO₂ mengandung air struktural dan campuran non-stoikiometri dari Mn (IV)/Mn(III) atau Mn (IV)/Mn(II). δ -MnO₂ menunjukkan proses EDLC dan proses pseudokapasitif karena strukturnya yang berlapis. Sintesis δ -MnO₂ dilakukan pada sisi berbagi dari oktahedron. Sisi-sisi yang berbagi ini membentuk struktur berlapis dua dimensi (2D). ukuran tunnel dari δ -MnO₂ sebesar 7 Å (Patil, P. H., et al., 2024).
- **λ -MnO₂:** λ -MnO₂ mirip dengan γ -MnO₂ dan memiliki bentuk spinel. Struktur pirolusit dan rodokrosit pada λ -MnO₂ tumbuh secara tidak teratur dan bergantian. Akibatnya, λ -MnO₂ membentuk struktur jaringan 3D. *Potensial window* yang dimiliki λ -MnO₂ sebesar 2 V. λ -MnO₂ dapat diaplikasikan untuk superkapasitor dan baterai (Patil, P. H., et al., 2024). λ -MnO₂ memiliki ketahanan termal dibawah 240°C (Hatakeyama, T., et.al., 2022).

2.6 Activated Carbon

Activated carbon atau karbon aktif merupakan material yang menjanjikan dan banyak diteliti oleh banyak peneliti. Karbon aktif merupakan material dengan biaya rendah dan sifat yang menonjol seperti luas permukaan spesifik yang tinggi, porositas yang besar, dan fungsionalisasi permukaan yang diinginkan (Nille, O. S., et al., 2021). Karbon aktif dapat disiapkan melalui aktivasi fisik atau kimia yang berasal dari karbon yang telah dikarbonisasi. Aktivasi fisik dilakukan dengan cara oksidasi dalam atmosfer pengoksidasi pada temperature 600-1200°C. Sedangkan, pada aktivasi kimia, bahan ditambahkan dengan basa kuat, asam atau garam kemudian di karbonisasi pada temperature 450-900°C untuk mengaktifkan material tersebut (Mahene, W. L., et al., 2023).



Gambar 2.17 (a) Struktur berpori dari karbon aktif dan (b) struktur molekul dari karbon aktif (Moosavi, S., et al, 2020)

Pada **Gambar 2.17** ditunjukkan struktur berpori dari karbon aktif serta struktur molekul dari karbon aktif. Dalam aplikasi sebagai perangkat penyimpanan energi, khususnya superkapasitor, karbon aktif memiliki sifat-sifat yang cocok. Karbon aktif memiliki luas permukaan yang sangat besar, dapat menyediakan *surface area* yang luas untuk penyimpanan muatan. Struktur berpori yang dimiliki karbon aktif memungkinkan terjadinya difusi ion yang cepat dan mendukung siklus pengisian/pengosongan muatan yang efisien. Nilai kapasitansi yang dihasilkan dari superkapasitor karbon aktif lebih tinggi dibandingkan dengan kapasitor

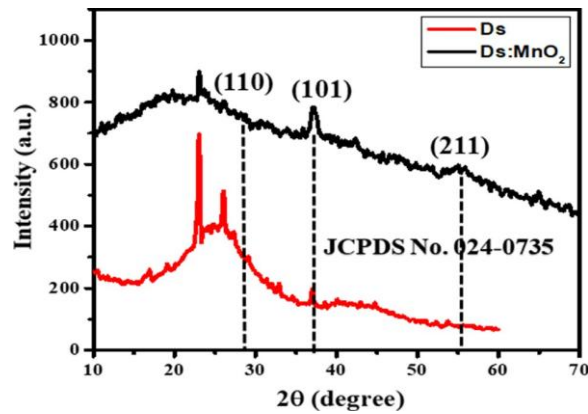
konvensional. Superkapasitor berbasis karbon aktif memiliki siklus hidup yang lebih panjang, serta dapat menghasilkan densitas daya yang tinggi dan menunjukkan karakteristik pengisian/pengosongan yang cepat, sehingga cocok untuk aplikasi yang memerlukan pelepasan energi secara cepat (Shrestha, R., et al., 2024).

Tabel 2.8 Sifat fisik dan kimia dari karbon aktif (Moosavi, S., et al, 2020)

Sifat	Keterangan
Kapasitas adsorpsi (mg/g)	5 – 5000
Volume pori (cm ³ /g)	Ukuran pori yang lebih besar dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi (rentang 0,08 – 1,5)
Luas permukaan BET (m ² /g)	Luas permukaan yang tinggi dapat menghasilkan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi (500 – 3362)
Kadar abu (%)	Kadar abu yang tinggi dianggap sebagai kelemahan dalam produksi karbon aktif (0,2 - 37)
Massa jenis spesifik (g/m ²)	120 – 240
Diameter pori rata-rata (nm)	Diameter pori yang lebih besar dapat menghasilkan karbon aktif yang lebih baik (0,2 dan 50)
Diameter karbon aktif (μm)	5 – 25
Porositas	Porositas yang tinggi dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi (0,4 dan 0,92)

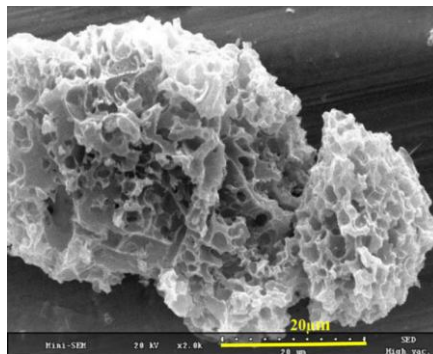
Efisiensi karbon aktif sebagai bahan adsorben sangat berkaitan dengan sifat fisik dan kimia yang signifikan. Pada **Tabel 2.8**, ditunjukkan sifat fisik dan kimia dari karbon aktif. Penelitian terkait karbon aktif untuk aplikasi superkapasitor telah banyak dilakukan. Pada tahun 2022, Shrestha, D., melakukan penelitian terkait

karbon aktif yang dikompositkan dengan mangan (IV) oksida untuk elektroda superkapasitor.

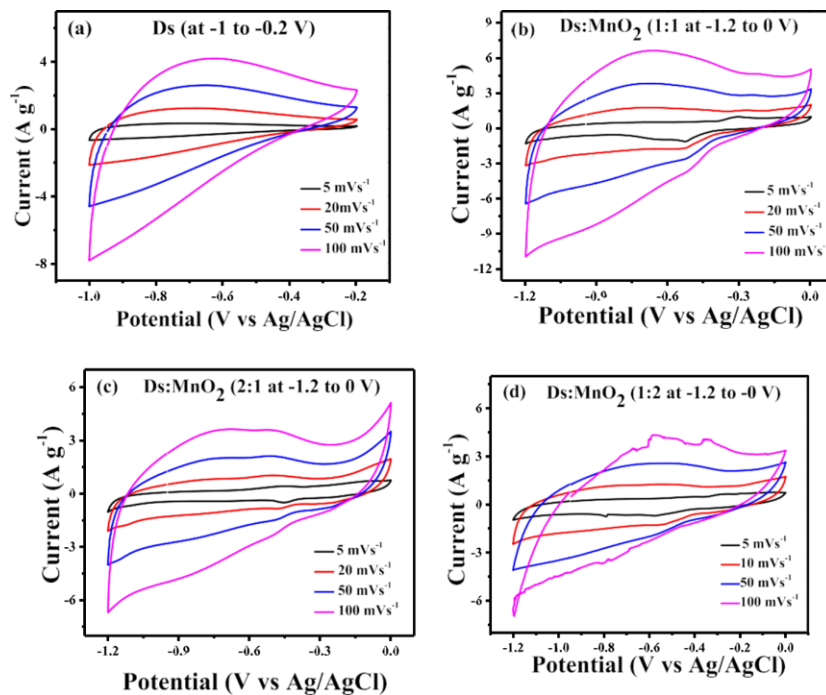


Gambar 2.18 Hasil pengujian XRD karbon aktif dan komposit karbon aktif/MnO₂ (Shrestha, D. 2022)

Pada hasil XRD yang ditunjukkan oleh **Gambar 2.18**, menunjukkan puncak yang berada sekitar 24 – 26° 2θ dengan bidang kristal (002) dan pada puncak 43 – 45° 2θ dengan bidang kristal (100), yang mengindikasikan bahwa karbon aktif memiliki sifat amorf dan adanya keberadaan kristalit grafitik dari karbon aktif. Morfologi dari karbon aktif ditunjukkan pada **Gambar 2.19**, dimana menunjukkan morfologi berpori yang terbentuk dengan baik pada perbesaran 2000x.



Gambar 2.19 Hasil pengujian SEM karbon aktif (Shrestha, D. 2022)



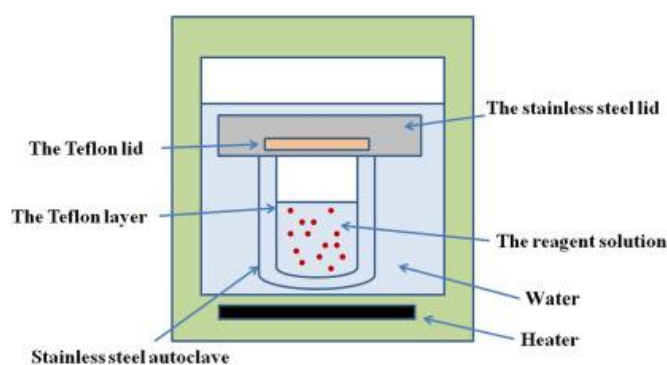
Gambar 2.20 Hasil pengujian CV (Shrestha, D. 2022)

Penambahan karbon aktif dapat meningkatkan kapasitansi spesifik. Pada **Gambar 2.20**, ditunjukkan hasil pengujian CV dari karbon aktif dan komposit karbon aktif/MnO₂. Berdasarkan hasil pengujian CV, didapatkan nilai kapasitansi spesifik yang unggul sebesar 300,1 F/g dengan komposisi 1:1. Hal ini menunjukkan bahwa adanya peningkatan kinerja elektrokimia pada material elektroda karena efek sinergis dalam kontribusi kapasitas redoks (Shrestha, D. 2022).

2.7 Hidrotermal

Hidrotermal merupakan metode yang paling banyak digunakan dalam sintesis material berbasis metal oksida dan sulfat. Metode hidrotermal merupakan metode yang digunakan untuk menyintesis kristal dari mineral yang larut dalam air panas di bawah tekanan tinggi. Material yang dihasilkan dari metode hidrotermal dipengaruhi oleh beberapa kondisi reaksi, seperti pelarut, temperatur, dan waktu (Nawaz, S., et al., 2022). Prinsip metode hidrotermal yaitu reaktan dipanaskan di dalam autoklaf yang berisi air yang temperatur dan tekanannya dinaikkan secara cepat. Material yang dihasilkan dengan metode hidrotermal, memiliki kemurnian dengan kristalinitas yang tinggi (Nurjanah, N., et al., 2022).

Metode hidrotermal memiliki banyak keunggulan, seperti ramah lingkungan, bekerja pada temperature relative rendah ($<300^{\circ}\text{C}$), dan dispersi yang baik dalam larutan. Namun, metode hidrotermal juga mempunyai kelemahan seperti pertumbuhan kristal yang tidak dapat dipantau selama proses reaksi berlangsung, serta biaya peralatan yang tinggi. Proses hidrotermal dapat dipengaruhi oleh tekanan dan temperatur yang berada di bawah titik kritis pelarut, dan perbedaan antara cairan dan uap menghilang serta dalam kondisi superkritis (Sirajudheen, P., et al., 2021). Skema alat hidrotermal ditunjukkan pada **Gambar 2.21**.



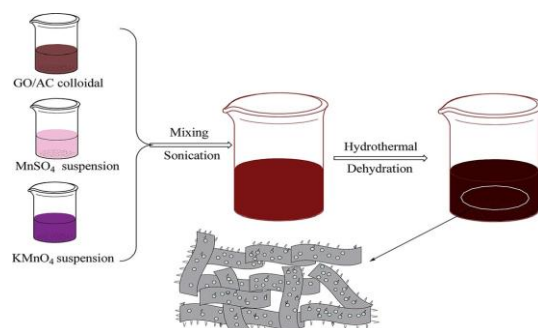
Gambar 2.21 Skema metode hidrotermal (da Silva, L. F., et al., 2021)

Pada tahun 2022, Jennifer, et al., melakukan penelitian terkait sintesis komposit $\text{MnO}_2/\text{CuO}/\text{rGO}$ untuk aplikasi superkapasitor menggunakan metode hidrotermal. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, didapatkan bahwa metode hidrotermal memberikan kontribusi secara signifikan dalam sintesis nanokomposit dengan menghasilkan struktur berpori dengan luas permukaan, dan morfologi yang optimal. Hal tersebut memberikan pengaruh terhadap kapasitansi spesifik, dimana kapasitansi spesifik yang dihasilkan sebesar 658, 97F/g, kerapatan energi sebesar 118,61 Wh/kg, serta stabilitas siklus yang baik dengan retensi 83,74% setelah 5000 siklus.

2.8 Penelitian Sebelumnya

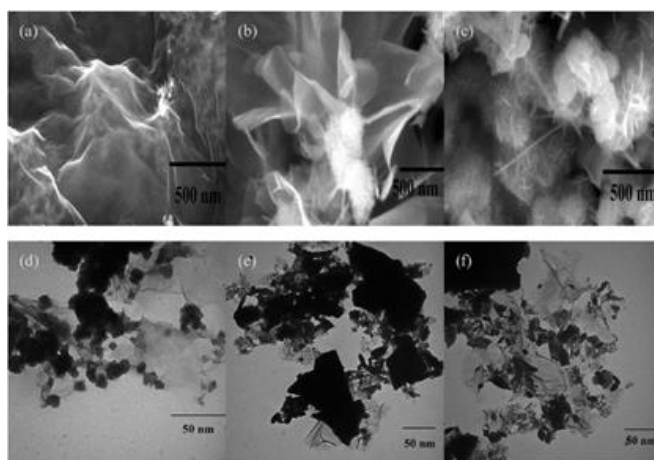
Penelitian terkait *hybrid* superkapasitor berbasis komposit $\text{rGO}/\text{MnO}_2/\text{Activated carbon}$ telah dilakukan oleh Li Yue, et al pada tahun 2017. Penelitian dilakukan dengan menggunakan metode hidrotermal dan *drying*.

Struktur dan morfologi dari sampel dianalisis menggunakan teknik SEM, XRD, dan Raman.



Gambar 2.22 Skema sintesis GR/AC/MnO₂ (Li, Y., et al., 2017)

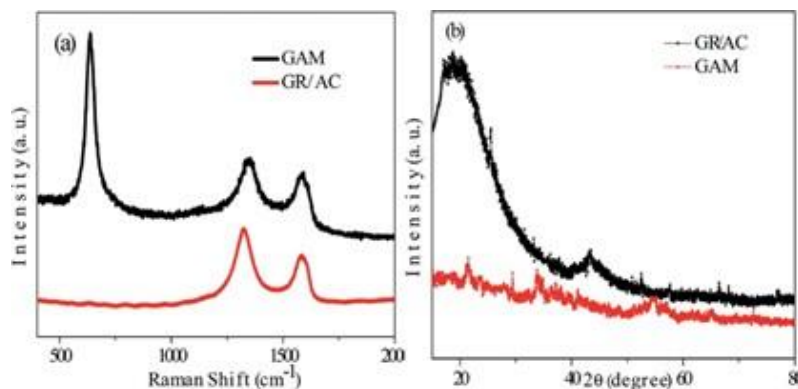
Pada **Gambar 2.22**, ditunjukkan skema terkait sintesis GR/AC/MnO₂ yang akan digunakan sebagai bahan elektroda superkapasitor, material disintesis menggunakan metode hidrotermal dengan variasi rasio massa penambahan MnO₂ yaitu 1:1 (0,3225 gr GR/AC + 0,3759 gr MnSO₄ + 0,2343 gr KMnO₄), 2:3 (0,3225 gr GR/AC + 0,5638 gr MnSO₄ + 0,3514 gr KMnO₄), 1:2 (0,3225 gr GR/AC + 0,7518 gr MnSO₄ + 0,4686 gr KMnO₄), dan 1:3 (0,3225 gr GR/AC + 1,1276 gr MnSO₄ + 0,7028 gr KMnO₄). Dilakukan penambahan larutan KMnO₄ secara bertahap pada temperatur kamar, untuk mengoksidasi Mn²⁺ menjadi MnO₂. MnO₂ yang terbentuk akan mengalami polimerisasi dan pertumbuhan terarah sepanjang lembaran GR/AC hingga membentuk nanoflake ultratipis.



Gambar 2.23 Karakterisasi SEM dan TEM dari material (a) GR/AC, (b) dan (c) GAM, (d) TEM GR/MnO₂, (e) TEM GAM (Li, Y., et al., 2017)

Pada **Gambar 2.23**, ditunjukkan hasil karakterisasi morfologi dari SEM dan TEM dari material rGO, *activated carbon*, MnO_2 dan komposit rGO/*Activated carbon*/ MnO_2 . **Gambar 2.23 (a)** ditunjukkan hasil SEM dari material GR/AC, seperti yang terlihat pada hasil SEM, graphene berperan sebagai substrat dan menopang partikel dari karbon aktif. Terlihat pula pada **Gambar 2.23 (b) dan (c)**, MnO_2 mempertahankan bentuk nanoflake dan tertanam pada permukaan lembaran GR/AC serta diantara lapisannya. Pertumbuhan MnO_2 yang berada diantara lapisan juga dapat memperbesar jarak antar lapisan *graphene*. Struktur komposit dimana MnO_2 tumbuh pada lembaran GR/AC dapat membuat persebaran MnO_2 menjadi seragam, serta dapat mendorong pemisahan lapisan *graphene*.

Gambar 2.23 (d) ditunjukkan hasil karakterisasi TEM pada material GR/ MnO_2 . Pada **Gambar 2.23 (e) dan (f)**, ditunjukkan hasil karakterisasi TEM dari material komposit, dimana terlihat bahwa nanopartikel MnO_2 berhasil disintesis dengan metode hidrotermal dan nanopartikel MnO_2 yang memiliki diameter rata-rata 5-6 nm tertanam pada permukaan *graphene*. Partikel dari karbon aktif, terdistribusi secara merata pada permukaan, sehingga tidak terdapat jalur tambahan untuk transmisi muatan selain *graphene*.

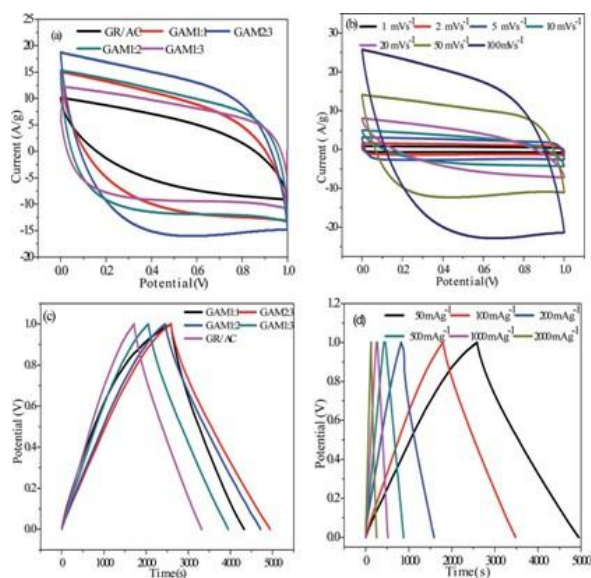


Gambar 2.24 (a) Raman spectra dari GR/AC dan GAM dan **(b)** Hasil XRD GR/AC dan GAM hybrids (Li, Y., et al., 2017)

Hasil pengujian Raman dan XRD ditunjukkan pada **Gambar 2.24**. Pada **Gambar 2.24 (a)** ditunjukkan adanya pita D (*defect band*) dan G (*graphite band*) pada sekitar 1353 cm^{-1} dan 1592 cm^{-1} . Pada Raman GAM (komposit), didapatkan

vibrasi regangan dari Mn-O sekitar 639 cm^{-1} yang menandakan adanya getaran simetris Mn-O dari MnO_6 yang dapat mengindikasikan pembentukan MnO_2 dalam komposit. Pada hasil raman juga ditunjukkan adanya peningkatan rasio IDE/IG pada material setelah ditambahkan MnO_2 , yang sebelumnya 1,23 menjadi 1,25.

Pada **Gambar 2.24 (b)**, ditunjukkan puncak pada 2θ sekitar 22° (002) dan 43° (101) pada material GR/AC. Setelah dilakukan penambahan MnO_2 , terbentuk puncak baru yang berada pada 12° , 37° , 55° , dan 66° yang menunjukkan MnO_2 dengan tipe birnessite. Puncak karbon di 43° menghilang yang menandakan bahwa struktur tumpukan dari *graphene* telah terkelupas, hasil ini juga sesuai dengan hasil pengujian TEM.



Gambar 2.25 (a) Hasil CV elektroda GR/AC, GAM 1:1, 2:3, 1:2, dan 1:3 dalam elektrolit KOH 7 M pada *scan rate* 50 mV/s, (b) Hasil CV elektroda GAM 2:3 dalam elektrolit KOH 7 M dengan berbagai *scan rate* (c) Kurva GCD elektroda GR/AC, GAM 1:1, 2:3, 1:2, 1:3 dalam elektrolit KOH 7 M pada kepadatan arus konstan 0,05 A/g (d) Hasil GCD dari elektroda 2:3 dalam elektrolit KOH 7 M pada berbagai kepadatan arus konstan (Li, Y., et al., 2017)

Pada **Gambar 2.25**, ditunjukkan hasil pengujian CV dan GCD dari material GR/AC, dan GAM dengan menggunakan elektrolit KOH 7 M. Pada **Gambar 2.25 (a)**, ditunjukkan pengujian CV pada material GR/AC dan GAM dengan variasi komposisi 1:1, 2:3, 1:2, dan 2:3. Hasil dari pengujian CV didapatkan bahwa elektroda komposit GAM dengan komposisi 2:3 memiliki luas area CV terbesar

dibandingkan dengan komposisi yang lain, sehingga memiliki kinerja kapasitif terbaik. Hal ini dikarenakan MnO_2 bersifat pseudokapasitif, sehingga memiliki kapasitansi gravimetri yang lebih tinggi. Selain itu, penambahan MnO_2 berpengaruh terhadap difusi ion yang terjadi pada material elektroda, jika MnO_2 yang ditambahkan terlalu banyak, maka dapat menghambat difusi ion diantara lapisan GR/AC. Nilai kapasitansi terbaik terdapat pada elektroda komposit GAM 2:3 dengan kapasitansi spesifik sebesar 378 F/g. Pada **Gambar 2.25 (b)**, ditunjukkan pengujian CV pada elektroda GAM dengan komposisi 2:3 pada *scan rate* 1 hingga 100 mV/s. Didapatkan *rate capability* dari elektroda GAM 2:3 sangat baik dan konsisten membentuk persegi panjang. Pada **Gambar 2.25 (c) dan (d)**, ditunjukkan hasil pengujian GCD dan didapatkan bahwa kurva GCD yang dihasilkan berbentuk simetris yang menunjukkan bahwa elektroda memiliki stabilitas yang cukup baik dan kontribusi dari pseudokapasitansi terlihat.

Penelitian lain terkait superkapasitor untuk melihat pengaruh waktu hidrotermal terhadap sifat material juga dilakukan oleh Fahrezi pada tahun 2023. Menggunakan material komposit N-rGO/ CuCr_2O_4 sebagai elektroda superkapasitor hibrida. Variasi waktu yang digunakan dalam penelitian ini yaitu 4 jam, 5 jam, dan 6 jam yang disintesis menggunakan metode hidrotermal. Hasil penelitian ini didapatkan bahwa, variasi waktu hidrotermal 6 jam menunjukkan nilai kapasitansi terbesar, dengan nilai CV sebesar 151,90 F/g, nilai konduktivitas yang dihasilkan dari pengujian EIS sebesar 0,55 S/m. Variasi waktu hidrotermal mempengaruhi nilai kapasitansi spesifik dari komposit, dimana semakin lama waktu hidrotermal yang diberikan, maka nilai spesifik kapasitansinya menjadi lebih tinggi.

Untuk mengetahui lebih banyak terkait penelitian superkapasitor, telah dikumpulkan terkait penelitian sebelumnya yang tersusun ke dalam **Tabel 2.9** untuk mengetahui terkait metode dan hasil penelitian.

Tabel 2.9 Penelitian Terdahulu

Material	Metode Sintesis	Struktur	Kapasitansi Spesifik (F/g)	<i>Cyclic Performance</i>		Peneliti
				<i>Capacity Retention (%)</i>	<i>Number of Cycle</i>	
MnO ₂ -Ni/rGO	Kopresipitasi satu tahap	Spherical	493,15	73,5	3000	Tan, B., et al, 2025
MnO ₂ /CuO/rGO	Hidrotermal	Nanosheets	793,14	94	10000	Sengodan, P., et al., 2022
rGO/MnO ₂	Refluks	Microspheres	575	98,7	5000	Vimuna, V. M., et al., 2022
AC-MnO ₂	Elektroforetik	Nanosheet	155,03	82,3	10000	Tagsin, P., et al., 2021
rGO/MnO ₂	Hidrotermal	-	288,4	-	-	Alvan, et al., 2024

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Serbuk Grafit
2. Aquades (H_2O)
3. Larutan H_2SO_4
4. Serbuk padatan KMnO_4
5. Serbuk padatan NaNO_3
6. Larutan H_2O_2
7. Larutan HCl
8. Larutan etanol
9. Serbuk *Activated Carbon*
10. Serbuk Zn
11. Larutan NaOH
12. KOH
13. *Nickel foam*

3.2 Peralatan

3.2.1 Alat Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Neraca analitik
2. *Beaker glass*
3. Gelas ukur
4. *Centrifuge*
5. Tabung *centrifuge*
6. *Crucible*
7. *Ultrasonik cleaner*
8. *Hot plate* dengan *magnetic stirrer*
9. *Ice bath*
10. Sarung tangan dan masker

11. Oven
12. *Furnace*

3.2.2 Instrumen Karakterisasi

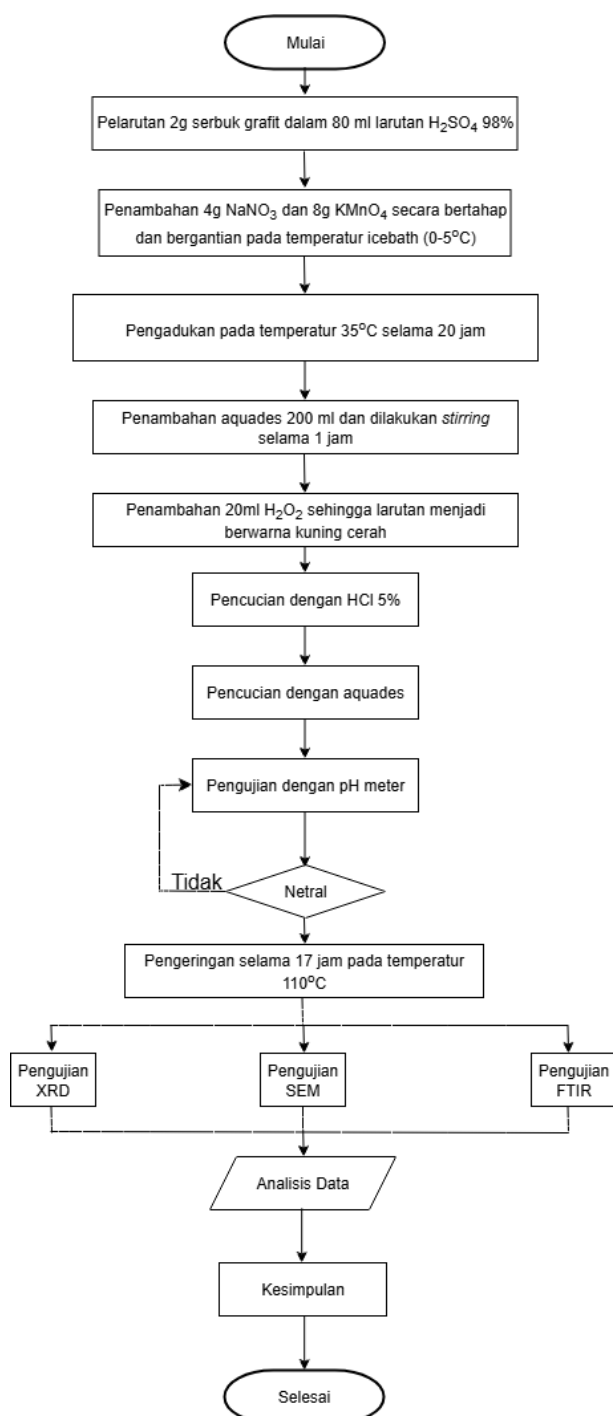
Untuk karakterisasi material digunakan alat sebagai berikut:

1. *X-Ray Diffraction* (XRD)
Digunakan untuk mengetahui senyawa yang ada dalam sampel serta struktur dan ukuran kristal sampel.
2. *Scanning Electron Microscope* (SEM)
Digunakan untuk menganalisis morfologi dari material.
3. *Fourier Transform Infra-Red* (FTIR)
Digunakan untuk mengetahui gugus fungsi yang terkandung dalam sampel.
4. *Cyclic Voltammetry* (CV)
Digunakan untuk mengetahui nilai kapasitansi dari hasil superkapasitor *hybrid*.
5. *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS)
Digunakan untuk mengetahui nilai konduktivitas dari hasil superkapasitor *hybrid*.
6. *Galvanostatic Charge Discharge* (GCD)
Digunakan menganalisis performa elektrokimia superkapasitor *hybrid*.

3.3 Diagram Alir

3.3.1 Diagram Alir Sintesis *Graphene oxide* (GO)

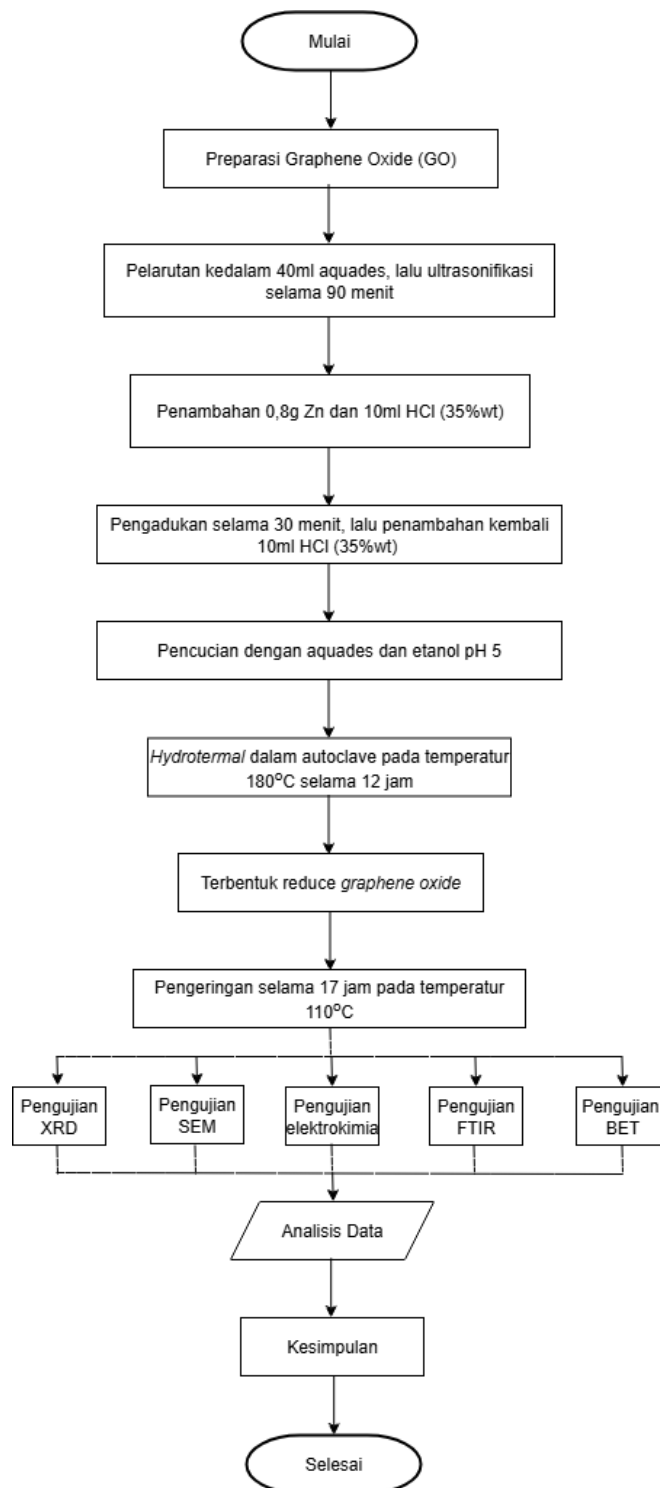
Berikut merupakan diagram alir sintesis *graphene oxide* (GO) yang ditunjukkan pada **Gambar 3.1**



Gambar 3.1 Diagram alir sintesis *Graphene Oxide* (GO)

3.3.2 Diagram Alir Sintesis *Reduced Graphene Oxide*

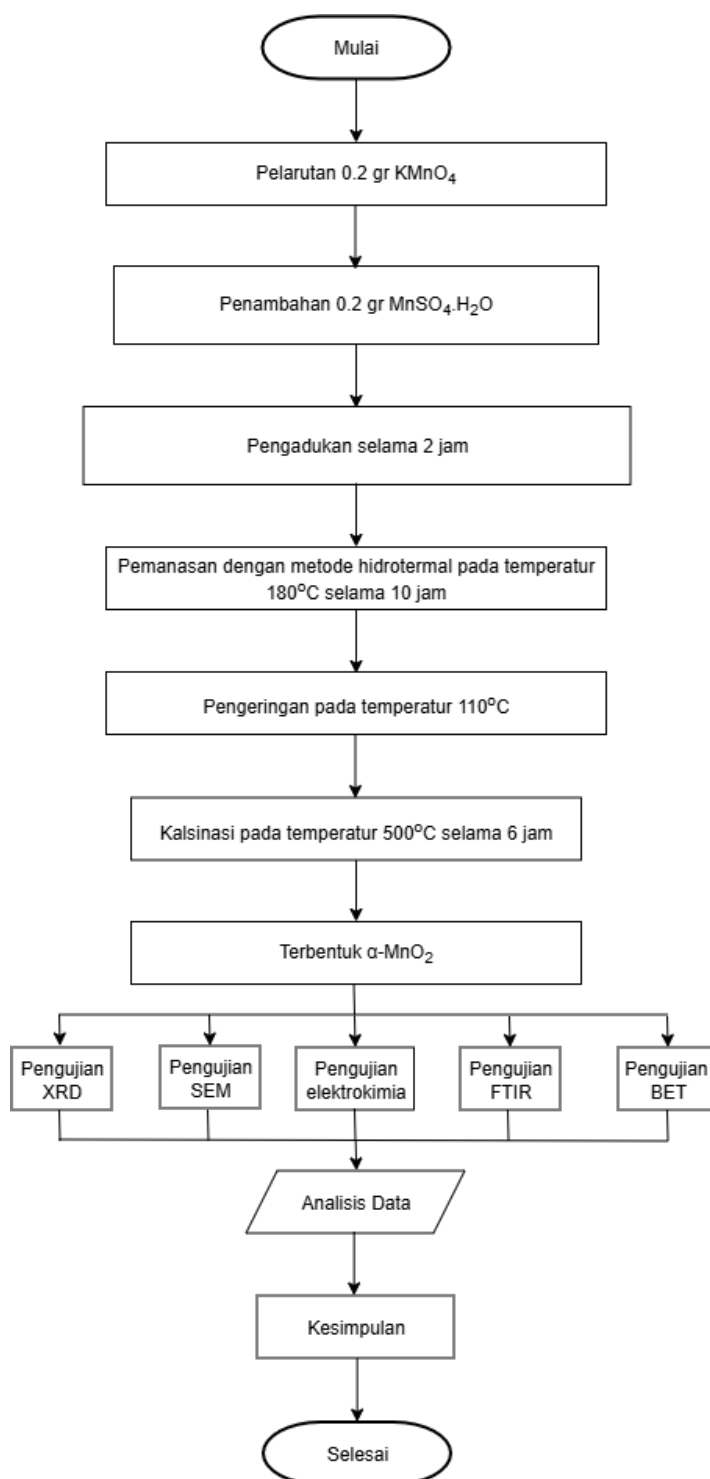
Berikut merupakan diagram alir sintesis *reduced graphene oxide* (rGO) yang ditunjukkan pada **Gambar 3.2**



Gambar 3.2 Diagram alir sintesis *Reduce Graphene Oxide* (rGO)

3.3.3 Diagram Alir Sintesis α -MnO₂

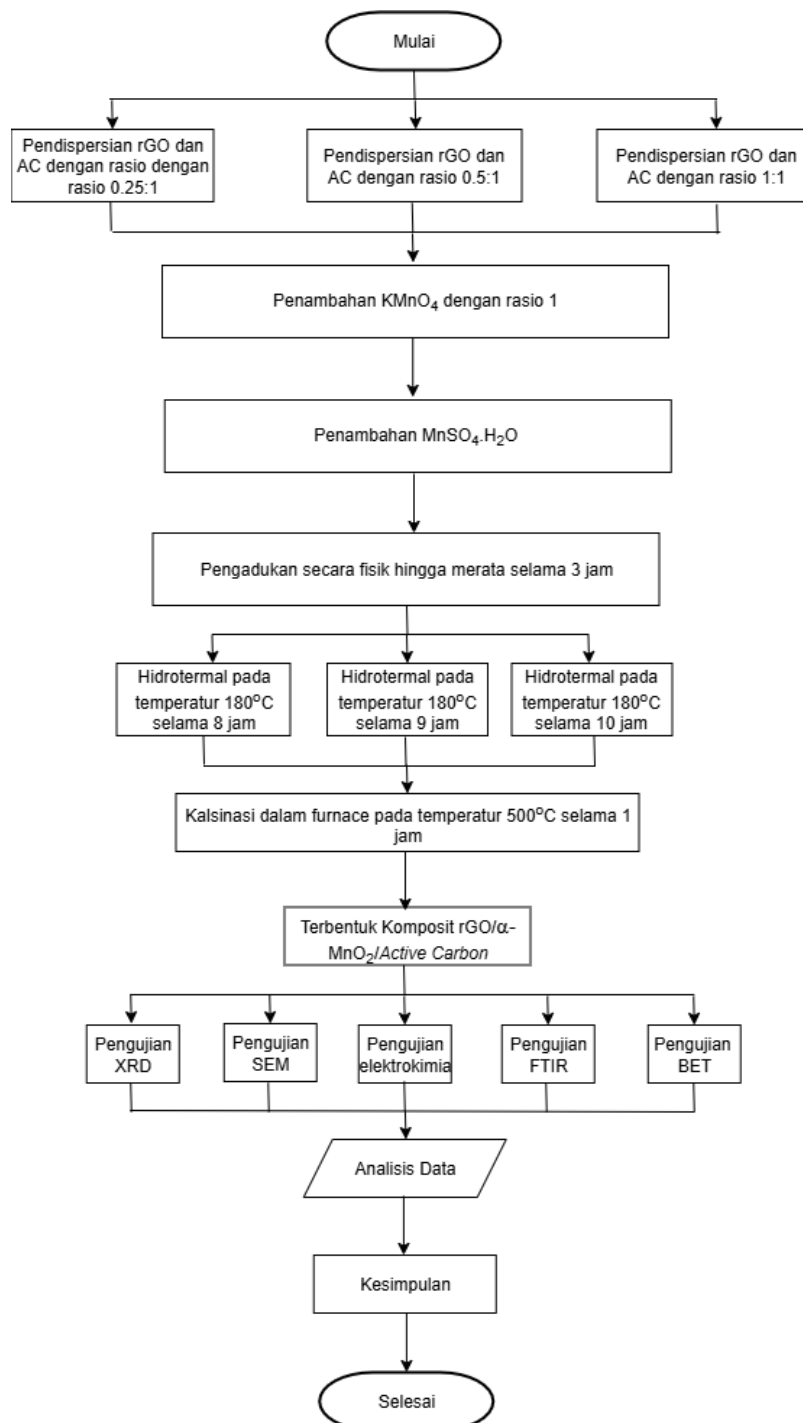
Berikut merupakan diagram alir sintesis α -Mangan Oksida (MnO₂) yang ditunjukkan pada **Gambar 3.3**



Gambar 3.3 Diagram alir sintesis α -Mangan Oksida (MnO₂)

3.3.4 Diagram Alir Sintesis rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon

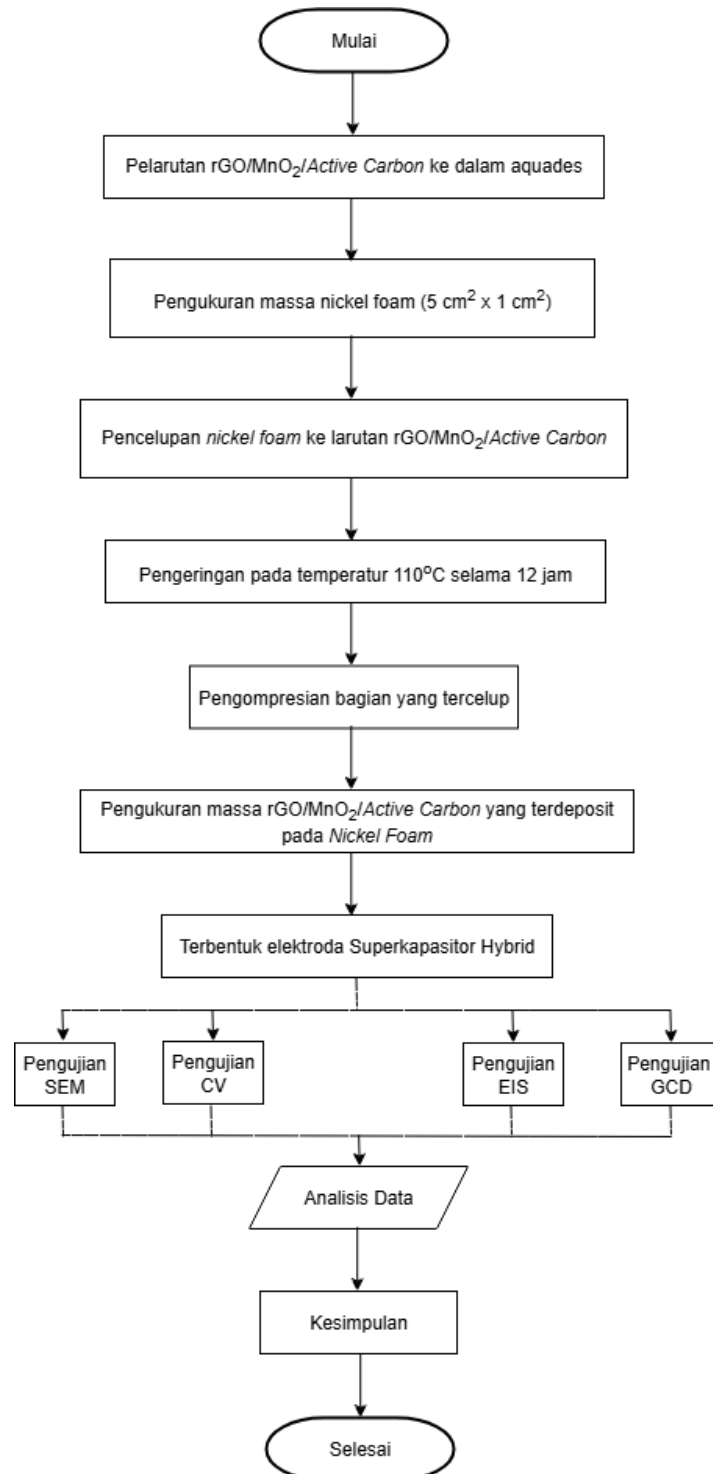
Berikut merupakan diagram alir sintesis komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon yang ditunjukkan pada **Gambar 3.4**



Gambar 3.4 Diagram alir sintesis komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon

3.3.5 Diagram Alir Sintesis Elektroda

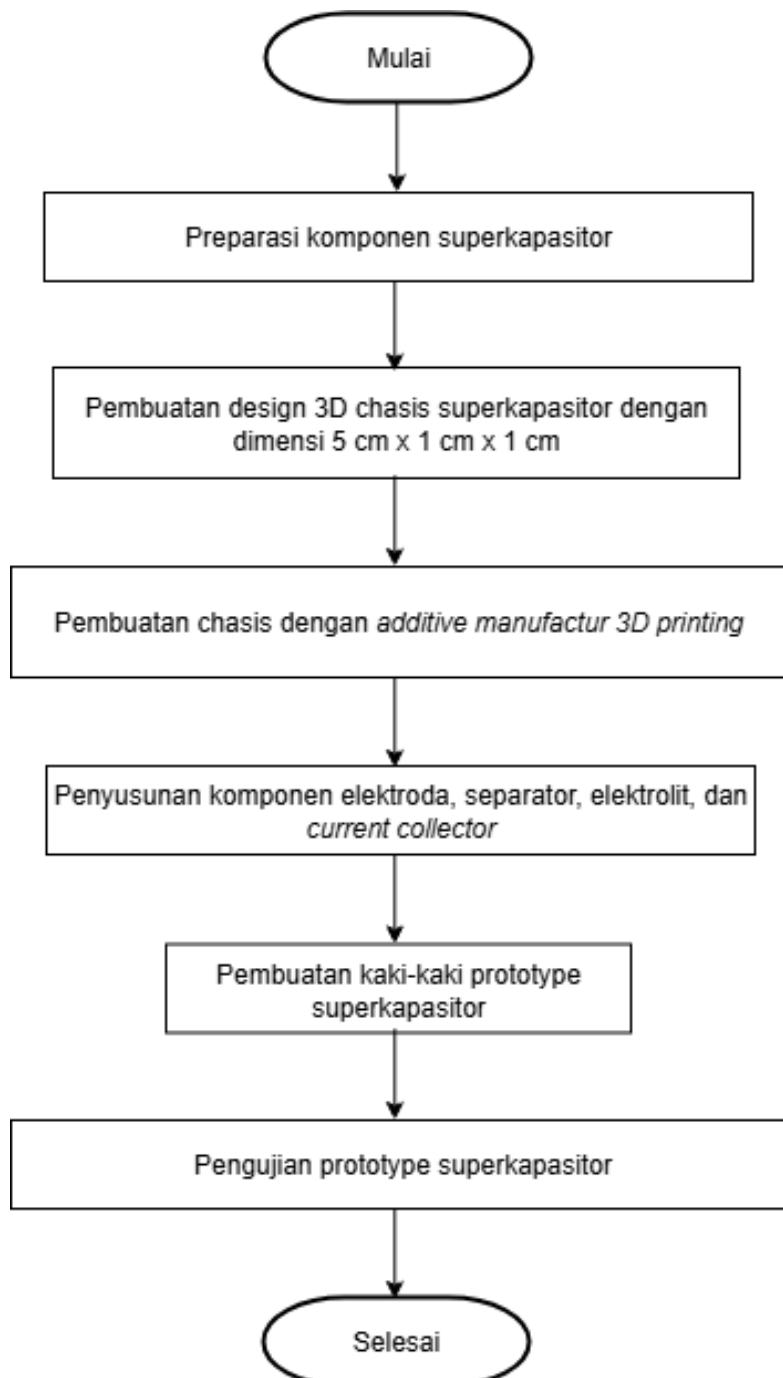
Berikut merupakan diagram alir sintesis elektroda yang ditunjukkan pada Gambar 3.5



Gambar 3.5 Diagram alir sintesis elektroda

3.3.6 Diagram Alir Fabrikasi Superkapasitor Hibrida

Berikut merupakan diagram alir sintesis elektroda yang ditunjukkan pada Gambar 3.6



Gambar 3.6 Diagram alir fabrikasi superkapasitor hibrid

3.4 Metode Penelitian

3.4.1 Sintesis *Graphene Oxide*

Graphene oksida pertama kali dibuat dengan melarutkan 2 gram bubuk grafit dalam 80 ml larutan H_2SO_4 98%, kemudian menambahkan 4 gram NaNO_3 dan 8 gram KMnO_4 yang ditambahkan secara bertahap dan bergantian pada suhu penangas es ($0-5^\circ\text{C}$). Pengadukan dilakukan pada suhu 35°C selama 20 jam, kemudian 200 ml aquades ditambahkan dalam keadaan mengaduk selama 1 jam. Selanjutnya, 20 ml H_2O_2 ditambahkan hingga larutan berubah menjadi kuning cerah. Kemudian dilakukan pencucian dengan HCl 5%, dilanjutkan dengan pencucian menggunakan aquades hingga larutan mencapai pH normal. Pengeringan dilakukan pada larutan yang telah mencapai pH normal selama 17 jam pada suhu 110°C . Uji karakterisasi material dilakukan dengan menggunakan uji XRD, SEM, FTIR, dan BET.

3.4.2 Sintesis *Reduced Graphene Oxide*

Proses sintesis rGO dimulai dengan persiapan *graphene oxide* (GO). Kemudian dilarutkan menjadi 40 ml aquades dan ultrasonikasi dilakukan selama 90 menit. Zn ditambahkan sebanyak 0,8 gram Zn dan HCl (35% wt). Kemudian larutan diaduk selama 30 menit, kemudian 10 ml HCl (35% wt) ditambahkan. Selanjutnya, pencucian dilakukan dengan menggunakan aquades dan etanol hingga pH larutan mencapai 5. Setelah itu, proses hidrotermal dilakukan dengan menggunakan *autoclave* pada suhu 180°C selama 12 jam. Setelah peredam graphene oksida terbentuk, ia dikeringkan selama 17 jam pada suhu 110°C . Kemudian, uji karakterisasi material dilakukan dengan menggunakan uji XRD, SEM, FTIR, dan BET.

3.4.3 Sintesis $\alpha\text{-MnO}_2$

Untuk mensintesis nanowire $\alpha\text{-MnO}_2$, sejumlah 0.2 g KMnO_4 dan 0.2 g MnSO_4 dilarutkan ke dalam 80 mL air suling ganda, kemudian diaduk hingga terbentuk larutan homogen. Kemudian diaduk selama 30 menit. Campuran yang telah terbentuk dipindahkan ke dalam autoklaf hidrotermal berkapasitas 100 mL dan dipanaskan pada suhu 180°C selama 15 jam. Produk yang dihasilkan kemudian

dicuci berulang kali menggunakan air suling ganda dan dikeringkan dalam oven pada suhu 80 °C hingga diperoleh material akhir.

3.4.4 Sintesis rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon

AC dan r-GO (0,1 g dan 0,1 g) yang telah disiapkan di dispersikan secara ultrasonik selama 30 menit untuk mencapai larutan homogen sebelum dipindahkan ke dalam 30 ml air DI. Setelah itu, 0,2 g KMnO₄ dilarutkan ke dalam larutan yang disebutkan sebelumnya sambil diaduk secara magnetis. Kemudian tambahkan 0,2 g MnSO₄.H₂O ke dalam larutan yang diberikan. Campuran tersebut ditempatkan dalam autoklaf dan dijaga pada suhu kontinu 180°C selama 10 jam dengan tekanan 1 MPa. Setelah pendinginan hingga suhu sekitar, produk disaring dan dikeringkan dalam oven pada suhu 80°C. Selanjutnya, produk jadi dibakar dalam tungku tabung selama 2 jam pada suhu 600°C.

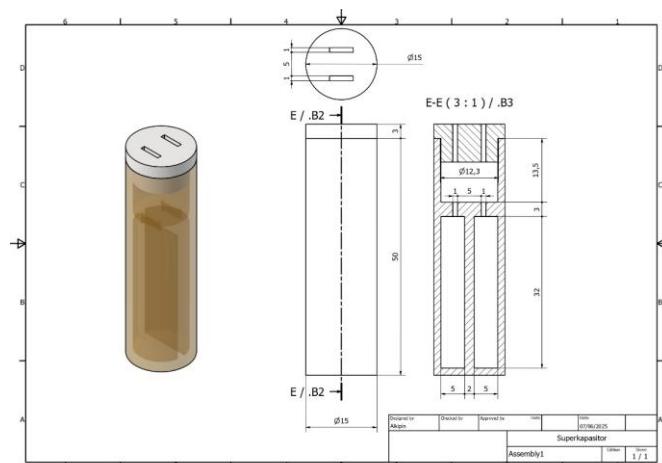
3.4.5 Sintesis Elektroda

Prosedur sintesis elektroda dilakukan dengan melarutkan rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon ke dalam aquades. Selanjutnya, pengukuran massa *nickel foam* dilakukan dengan ukuran 5 cm² x 1 cm². Selanjutnya, *nickel foam* dicelup dalam larutan rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon. Kemudian, larutan dikeringkan pada suhu 110°C selama 12 jam. Kemudian, kompresi dilakukan pada elektroda yang telah dikeringkan dan massa diukur dengan tujuan untuk menentukan massa komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon yang diendapkan pada permukaan *nickel foam*. Setelah elektroda terbentuk, pengujian dilakukan pada elektroda dengan pengujian pelepasan muatan, pengujian CV, dan pengujian EIS. Analisis data dilakukan dari hasil pengujian yang telah dilakukan.

3.4.6 Fabrikasi Superkapasitor Hibrida

Sebanyak 1 gram material aktif berupa komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon disiapkan dalam bentuk slurry dengan melarutkannya menggunakan air deionisasi (*aquades*). *Slurry* ini kemudian dioleskan secara merata ke permukaan *nickel foam* menggunakan kuas. Untuk meratakan dan mengontrol ketebalan lapisan secara lebih presisi, digunakan metode *doctor blade*. Setelah pengolesan

selesai, lapisan tersebut dikeringkan dalam oven pada suhu 80°C selama satu jam untuk menguapkan sisa pelarut dan menghasilkan permukaan padat dari material aktif. Langkah selanjutnya elektroda dilapisi menggunakan *thermal paper* yang berfungsi sebagai separator. Seluruh komponen elektroda dan separator kemudian digulung agar saling menempel dengan baik, sehingga membentuk struktur superkapasitor yang lebih ringkas. Setelah itu, larutan KOH 1M sebagai elektrolit disuntikkan ke dalam struktur tersebut untuk memastikan setiap lapisan elektroda terjenuhkan dengan baik. Prototipe superkapasitor hibrida ini kemudian didiamkan selama beberapa hari agar elektrolit dapat meresap sempurna ke seluruh bagian.



Gambar 3.7 Desain prototipe superkapasitor hybrid

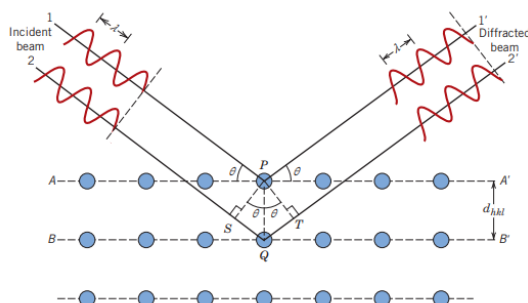
Pada **Gambar 3.7**, ditunjukkan desain superkapasitor yang digunakan pada penelitian ini.

3.5 Pengujian Material

3.5.1 *X-ray Diffraction* (XRD)

X-ray diffraction (XRD) merupakan metode karakterisasi material yang digunakan untuk melakukan identifikasi fasa kristalin dalam suatu material serta mendapatkan ukuran partikel dari suatu material (Mbiliyora, C., 2024). Prinsip dari pengujian XRD yaitu ketika sinar-X diarahkan ke suatu material, sebagian dari sinar tersebut akan diserap, sebagian lainnya diteruskan, dan sisanya akan

dipantulkan atau dihamburkan. Hamburan sinar-X inilah yang kemudian dideteksi oleh alat XRD (Rani, 2022).



Gambar 3.8 Ilustrasi difraksi sinar x (Callister dan Rethwisch, 2010)

Pada **Gambar 3.8** ditunjukkan ilustrasi difraksi sinar x. Untuk mengidentifikasi fase yang terbentuk pada sampel dalam penelitian ini, dilakukan pengujian menggunakan XRD. Instrumen yang digunakan adalah PAN Analytical dari Inggris dengan rentang sudut antara 10° hingga 90° serta panjang gelombang 1,54056 Å. Pengujian ini dilaksanakan di divisi karakterisasi, Departemen Teknik Material dan Metalurgi, FTIRS-ITS, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 3.9**.



Gambar 3.9 Alat instrumen XRD (Dokumentasi Pribadi)

Data hasil XRD dapat dimanfaatkan untuk memperkirakan ukuran kristalit suatu material. Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan rumus Debye-Scherrer, yang dijelaskan dalam Persamaan 3.1 berikut.

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

Dimana

D : Ukuran Kristal (nm)

λ : Panjang gelombang Cu-K α

β : FWHM (rad)

K : Konstanta *Scherrer* dengan nilai 0.9

Data yang diperoleh dari hasil XRD juga bisa dimanfaatkan untuk menghitung nilai d-spacing, yaitu jarak antar lapisan dalam suatu material. Nilai d-spacing ini dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 3.2 berikut.

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

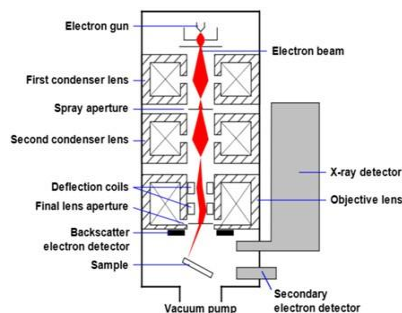
Dimana

d : d_{spacing} (Å)

λ : Panjang gelombang Cu-K α

3.5.2 Scanning Electron Microscope (SEM) dan Energy Dispersive Spectroscopy (EDX)

Scanning Electron Microscope (SEM) merupakan jenis mikroskop elektron yang digunakan untuk menghasilkan resolusi tinggi dari gambaran permukaan morfologi dari suatu material (Fachrulli dan Susilo, 2021). Dari pengujian SEM, kita bisa memperoleh berbagai informasi penting tentang material, seperti topografi permukaan, bentuk dan struktur morfologinya, komposisi unsur, orientasi butir kristal, serta informasi kristalografi lainnya (Akhtar, et al., 2018).



Gambar 3.10 Skema *scanning electron microscope* (SEM) (A. Mohammed, 2018)

Gambar 3.10 ditunjukkan skema *scanning electron microscope* (SEM). Prinsip kerja SEM (*Scanning Electron Microscope*) didasarkan pada pemanfaatan pantulan atau hamburan balik berkas elektron yang diarahkan ke permukaan sampel. Gambar kemudian dihasilkan dengan mendeteksi elektron yang terpancar dari permukaan tersebut (Fachrulli dan Susilo, 2021).



Gambar 3.11 Alat instrumen SEM (Divisi Karakterisasi)

Jenis mesin SEM yang digunakan pada penelitian ini adalah mesin merek HITACHI SU3500 yang berasal dari Jepang seperti pada **Gambar 3.11**.

3.5.3 *Fourier Transform Infra Red* (FTIR)

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) digunakan untuk mengidentifikasi senyawa organik maupun anorganik, dengan rentang bilangan gelombang 14.000 cm^{-1} hingga 10 cm^{-1} . Rentang ini dibagi menjadi 3 bagian, yaitu inframerah dekat ($14.000\text{--}4.000\text{ cm}^{-1}$) sensitif terhadap getaran overtone, inframerah tengah ($4.000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$) berkaitan dengan transisi energi vibrasi molekul dan dapat memberikan informasi tentang gugus fungsi, inframerah jauh ($400\text{--}10\text{ cm}^{-1}$) untuk menganalisis senyawa dengan atom-atom berat, contohnya senyawa anorganik (Faturachman, et al., 2025). Alat FTIR yang digunakan yaitu Nicolet iS10 yang berasal dari Amerika Serikat yang ditampilkan pada **Gambar 3.12**.



Gambar 3.12 Alat instrumen FTIR (Dokumentasi pribadi)

Prinsip dari FTIR yaitu molekul menyerap cahaya inframerah pada frekuensi tertentu yang disesuaikan dengan getaran ikatan kimia di dalamnya. Spektrum serapan yang dihasilkan dapat digunakan untuk mengenali dan mengkarakterisasi berbagai zat organik maupun anorganik. Gugus fungsi dari suatu material akan menyerap radiasi inframerah pada rentang bilangan gelombang yang sesuai (Pasiczna-Patkowska, et al., 2025).

3.5.4 SAA – BET

Surface Area Analyzer (SAA) – Brunauer-Emmett-Teller (BET) merupakan pengujian yang dilakukan untuk menghitung luas permukaan spesifik dengan berdasarkan pengukuran isoterm adsorpsi nitrogen pada temperatur 77 K. BET mengasumsikan terjadinya proses adsorpsi gas pada permukaan adsorben (Jaroniec, M., et al., 1998). Alat BET yang digunakan yaitu TMAXCN yang berasal dari negara Cina yang ditampilkan pada **Gambar 3.13**.



Gambar 3.13 Alat instrumen BET

Mekanisme adsorpsi gas ini melibatkan penyerapan gas seperti nitrogen, argon, atau helium pada permukaan suatu bahan padat yang ingin di karakterisasi, dan proses ini dilakukan pada suhu yang tetap. Jika volume gas yang teradsorpsi pada permukaan padat diketahui pada kondisi suhu dan tekanan tertentu, serta luas permukaan teoritis dari satu molekul gas juga diketahui, maka luas permukaan total dari bahan padat tersebut dapat dihitung (Putri, W. K., & Sabani, 2019).

3.5.5 *Cyclic Voltammetry* (CV)

Cyclic voltammetry merupakan metode elektrokimia potensiostatik yang bekerja dengan cara memberikan tegangan (potensial) dalam bentuk gelombang segitiga pada sebuah elektroda yang diam dan terendam dalam larutan (Nisticò, N., et al., 2023). Pengujian CV memberikan informasi terkait perilaku redoks dari material, laju transfer elektron, reaksi kimia dan elektrokimia yang terjadi secara bersamaan, dan proses adsorpsi yang berlangsung (Bhuvanendran, N., et al., 2022). Alat instrument *cyclic voltammetry* yang digunakan yaitu CS310 Single-Channel Electrochemical Workstation yang berasal dari Cina yang ditunjukkan pada **Gambar 3.14**.



Gambar 3.14 Alat instrumen *cyclic voltammetry* (Dokumentasi pribadi)

Hasil dari pengujian *Cyclic voltammetry* (CV) berupa grafik *Cyclic voltammetry*. Untuk dapat menghitung besar kapasitansi spesifik yang didapatkan, dapat menggunakan rumus persamaan di bawah ini

$$C = \frac{\int IdV}{2\Delta E m v} \quad (3.3)$$

Dimana:

C = kapasitansi spesifik (F/g)

$\int IdV$ = Luas area di bawah kurva CV

ΔE = *Potential Window* (Volt)

m = Massa Elektroda (g)

v = *Scan Rate* (V/s)

Hasil dari pengujian CV juga dapat mengetahui nilai densitas energi spesifik (E) dan densitas daya spesifik (P) dengan menggunakan persamaan di bawah ini

$$E = \frac{(0,5)CV^2}{3.6} \quad (3.4)$$

$$P = \frac{E \times 3600}{t} \quad (3.5)$$

Dimana:

E = Densitas energi (Wh/kg)

C = Kapasitansi (F/g)

V = *Potential Window* (Volt)

P = Densitas Power (W/kg)

t = Waktu *discharge* (s)

3.5.6 *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS)

Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) merupakan metode elektrokimia yang digunakan untuk mengidentifikasi impedansi sel elektrokimia (Padha, B., et al., 2022). Pengujian EIS dilakukan untuk mengetahui seberapa baik lembar elektrolit untuk menghantarkan listrik. Alat untuk pengujian EIS berada di laboratorium Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS yang ditunjukkan pada **Gambar 3.15**.



Gambar 3.15 Alat instrumen EIS (Dokumentasi pribadi)

Data pengujian EIS yang didapatkan berupa nilai impedansi rill (Z') dan impedansi imajiner (Z''), dari data tersebut kemudian di plot ke dalam kurva *nyquist*. Untuk mengetahui nilai kapasitansi spesifik dan konduktivitas dari pengujian EIS, dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$C = \frac{1}{2 \pi f Z'' M} \quad (3.6)$$

$$K = \frac{L}{|Z|} \quad (3.7)$$

Dimana:

C = spesifik kapasitansi (F/g)

f = frekuensi (Hz)

Z'' = impedansi imajiner (Ω/cm^2)

M = massa material aktif (g)

K = konduktivitas (Ω^{-1})

L = ketebalan elektroda (m)

$|Z|$ = impedansi

3.5.7 *Galvanostatic Charge Discharge (GCD)*

Galvanostatic Charge Discharge (GCD) merupakan pengujian elektrokimia untuk melihat seberapa baik material untuk merespon secara kapasitif, serta dapat membantu untuk mengidentifikasi apakah ada reaksi kimia yang bersifat reversibel ketika proses berlangsung (Licht, F., et al., 2020). Dalam pengujian GCD arus yang digunakan konstan untuk mengisi dan mengosongkan material atau

sistem dalam batas tegangan tertentu. Alat yang digunakan pada pengujian ini adalah CS350 Potentiostat/Galvanostat yang berada di Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS yang ditunjukkan pada **Gambar 3.16**.



Gambar 3.16 Alat instrumen GCD (Dokumentasi Pribadi)

Nilai kapasitansi dapat diketahui dari hasil pengujian *Charge Discharge* dengan menggunakan persamaan berikut:

$$C = \frac{I \times t}{m \times \Delta E} \quad (3.8)$$

Dimana:

C = Kapasitansi (F/g)

I = Arus (A)

t = Waktu *discharge* (sekon)

m = Massa aktif dari material elektroda (gram)

ΔE = *Potential Window* (volt)

3.6 Rancangan Penelitian

Untuk mempermudah pelaksanaan penelitian, telah disusun rancangan pengujian untuk material yang digunakan dalam penelitian ini. Rancangan penelitian disajikan dalam bentuk tabel yang memuat informasi terkait material yang difabrikasi sendiri dan akan dilakukan pengujian karakterisasi material. proses penelitian yang direncanakan secara lengkap dapat dilihat pada **Tabel 3.1**.

Tabel 3.1 Rancangan penelitian

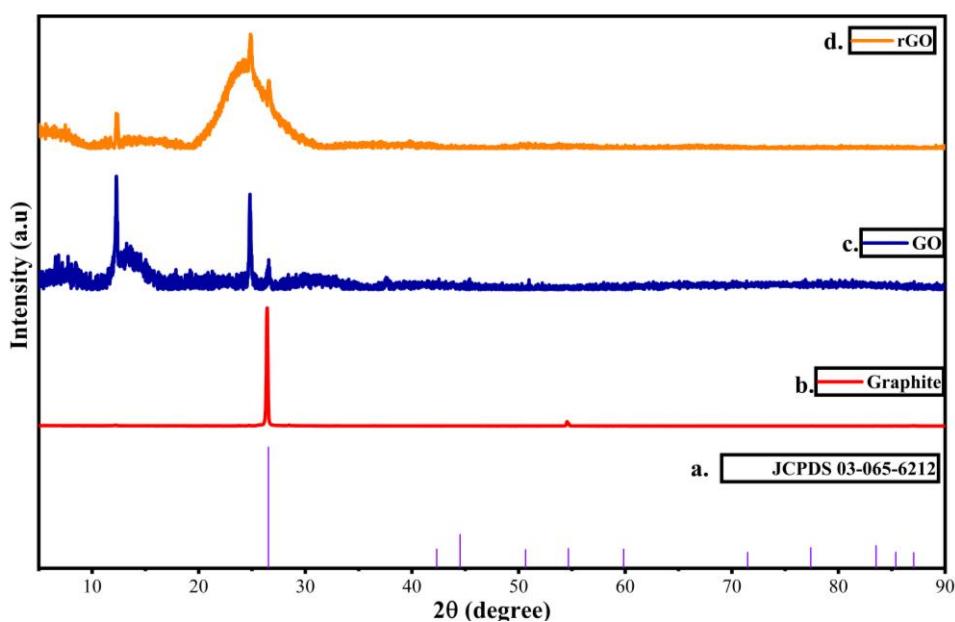
Spesimen	Komposisi	Waktu Hidrotermal (Jam)	Uji XRD	Uji FTIR	Uji SEM/EDX	Uji BET	Uji CV	Uji EIS	Uji GCD
GO	*	*	✓	✓	✓	*	*	*	*
rGO	*	*	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MnO ₂	*	*	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
AC	*	*	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RMA-1	0.25:1:1	10 Jam	✓	✓	✓	✓	*	*	*
RMA-2	0.5:1:1		✓	✓	✓	✓	*	*	*
RMA-3	1:1:1		✓	✓	✓	✓	*	*	*
RMA-4	1:1:1	9 Jam	✓	✓	✓	✓	*	*	*
RMA-5	1:1:1	8 Jam	✓	✓	✓	✓	*	*	*
Elektroda RMA-1	0.25:1:1	10 Jam	*	*	✓	*	✓	✓	✓
Elektroda RMA-2	0.5:1:1		*	*	*	*	✓	✓	✓
Elektroda RMA-3	1:1:1		*	*	*	*	✓	✓	✓
Elektroda RMA-4	1:1:1	9 Jam	*	*	*	*	✓	✓	✓
Elektroda RMA-5	1:1:1	8 Jam	*	*	*	*	✓	✓	✓

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian XRD

Pengujian *x-ray diffraction* (XRD) dilakukan untuk menentukan struktur kristal dari suatu material menggunakan energi *x-ray*. Alat yang digunakan untuk pengujian XRD yaitu Phillip Analytical dengan parameter sudut 2θ antara 5° hingga 90° dengan panjang gelombang Cu-K α 1.54060 Å. Tujuan dilakukan pengujian ini yaitu untuk memperoleh informasi tentang perbedaan posisi puncak (*peak*) pada sampel grafit, GO, rGO, α -MnO₂, dan komposit rGO/ α -MnO₂/*activated carbon*. Pengujian XRD grafit, GO, rGO, α -MnO₂ dan *activated carbon* ditunjukkan oleh **Gambar 4.1**.



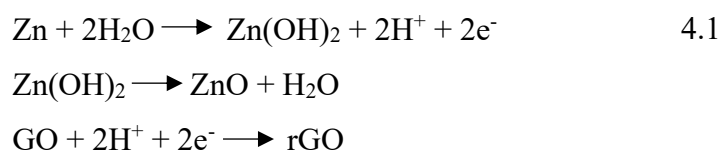
Gambar 4.1 Hasil pengujian XRD (a) JCPDS, (b) grafit, (c) GO, (d) rGO

Pada pengujian XRD grafit yang ditunjukkan pada **Gambar 4.1 (b)**, didapatkan puncak peak tertinggi berada pada *peak* [002] pada $2\theta = 26.38^\circ$ dengan nilai *dspacing* sebesar 3.37 Å. Terdapat *peak* lain yang terdeteksi pada $2\theta = 54.53^\circ$ dengan nilai *dspacing* sebesar 1.68 Å. Hasil pengujian XRD grafit menunjukkan bahwa grafit memiliki struktur kristal heksagonal (JCPDS *Reference code*: 03-065-6212 seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.1 (a)**). Hasil XRD grafit sesuai

dengan penelitian yang dilakukan oleh Hidayah, et.al. pada tahun 2017, dimana *peak* yang dihasilkan berada pada $2\theta = 26.62^\circ$ [002].

Grafit, kemudian di proses melalui reaksi oksidasi menggunakan metode Hummer untuk mengubahnya menjadi GO (*graphene oxide*). Hasil pengujian XRD GO pada **Gambar 4.1 (c)** menunjukkan *peak* yang terdeteksi pada $2\theta = 12.28^\circ$ [001] dengan nilai *dspacing* = 7.20 Å. Pada hasil XRD, terdapat *peak* lain pada $2\theta = 24.78^\circ$ dan $2\theta = 26.53^\circ$. Adanya *peak* pada $2\theta = 24.78^\circ$ dan $2\theta = 26.53^\circ$ dikarenakan adanya sisa grafit yang belum teroksidasi secara sempurna selama proses sintesis berlangsung. Pada hasil XRD GO, terjadi perubahan *peak*, *dspacing* yang disebabkan oleh interkalasi gugus fungsi oksigen akibat dari proses oksidasi grafit sehingga membuat jarak antara lapisan-lapisan karbon meningkat (Hidayah, N. M. S., et.al., 2017). Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Siburian pada tahun 2017, dimana puncak yang terbentuk pada $2\theta = 11.6^\circ$ dengan nilai *dspacing* = 7.5 Å.

GO kemudian disintesis menjadi rGO dengan menggunakan metode *hummer*. Proses reduksi GO ke rGO menggunakan Zn dan HCl yang ditambahkan pada larutan yang bereaksi dengan HCl dan membentuk ion H^+ yang dihasilkan dari HCl untuk menginisiasi proses reduksi tersebut (Azizah, et.al., 2014). Penambahan Zn sebagai agen pereduksi digunakan untuk mengurangi gugus-gugus oksigen yang terdapat pada GO (Anwar, et.al., 2023). Persamaan reaksi dari proses reduksi GO menjadi rGO ditunjukkan pada **persamaan 4.1**.



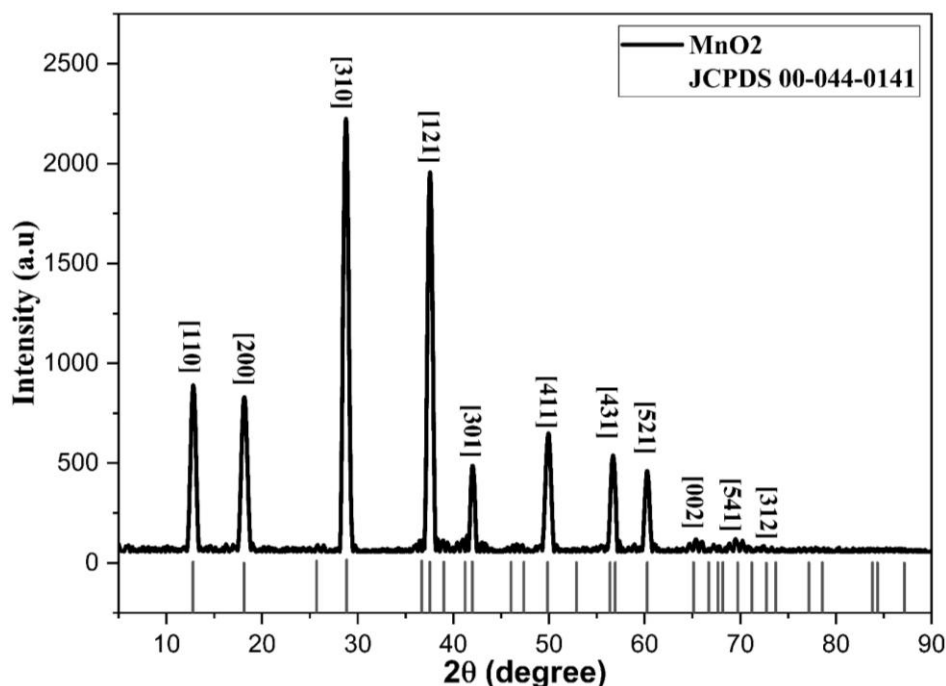
Dari hasil pengujian XRD rGO pada **Gambar 4.1 (d)**, didapatkan bahwa terjadi pergeseran *peak* dari $2\theta = 12.28^\circ$ menjadi $2\theta = 24.89^\circ$ dan $2\theta = 26.56^\circ$. Pergeseran *peak* yang terjadi, menunjukkan bahwa GO berhasil direduksi menjadi rGO yang melibatkan hilangnya beberapa gugus fenol, epoksi, keton, karbonil, dan karboksil (Yuningsih, L. M., et.al., 2025). Hasil pengujian XRD rGO menunjukkan pola difraksi yang tidak teratur, menunjukkan bahwa material rGO memiliki

struktur amorf. Pola difraksi tersebut menunjukkan kurangnya keteraturan jangka panjang (*long-range order*) serta campuran karbon yang berikatan hidridisasi sp^2 dan sp^3 . Struktur yang dihasilkan cenderung memiliki kepadatan cacat yang tinggi dan susunan atom yang acak, yang dapat memberikan keuntungan tertentu, seperti dapat meningkatkan kapasitas penyimpanan energi (Zainuddin, M. S., et.al., 2025). Hasil ini telah sesuai atau mendekati penelitian yang dilakukan oleh Yuan. S., et.al pada tahun 2020, menunjukkan puncak rGO terbentuk pada $2\theta = 24.8^\circ$. Hasil ini juga didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Sarkar, et.al., 2020, dimana puncak rGO yang terbentuk berada pada rentang $24-26^\circ$.

Tabel 4.1 Perbandingan grafit, GO, dan rGO

Sampel	2θ ($^\circ$)	<i>Dspacing</i> ($\text{\AA}$)
Grafit	26.38	3.37
<i>Graphene Oxide</i>	12.28	7.20
<i>Reduced Graphene Oxide</i>	24.89	3.57
	26.56	3.35

Pada **Tabel 4.1** menunjukkan perbedaan jarak antar lapisan grafit, GO, dan rGO. Jarak antar lapisan pada sampel rGO lebih kecil dibandingkan GO. Hal ini disebabkan karena gugus fungsi oksigen yang hilang secara efisien selama proses reduksi. Hal tersebut menunjukkan, bahwa lembaran tipis rGO saling menumpuk membentuk struktur yang bertumpuk tebal akibat adanya gaya Van der Waals yang kuat antar lapisan (Yuningsih, L. M., et.al., 2025).



Gambar 4.2 Hasil pengujian xrd α -MnO₂

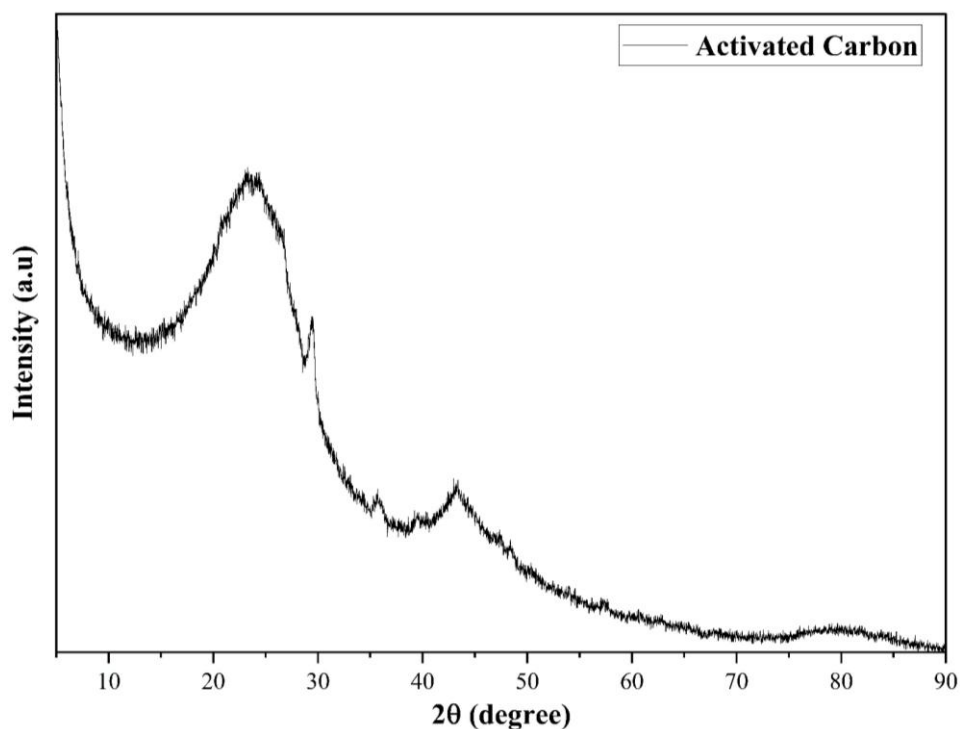
Oksida logam yang digunakan dalam pembuatan elektroda hidrid yaitu α -MnO₂ sebagai material aktif untuk aplikasi superkapasitor. **Gambar 4.2** menunjukkan hasil pengujian XRD α -MnO₂. Pada sampel α -MnO₂, terdapat puncak-puncak pada 2θ dengan posisi 12.8 [110]; 18.14 [200]; 28.73 [310]; 37.55 [121]; 41.05 [301]; 49.93 [411]; 56.68 [431]; 60.21 [521]; 65.34 [002]; 69.6 [541]; 72.54 [312]. Puncak-puncak yang dihasilkan, sesuai dengan *space group* α -MnO₂ berdasarkan nomor basis data JCPDS: 00-044-0141. Hasil ini juga didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh J. Liu et al., pada tahun 2022 bahwa α -MnO₂ memiliki *space group* I4/m yang menunjukkan bahwa MnO₂ yang terbentuk memiliki bentuk kristal α -MnO₂. Selanjutnya, **Tabel 4.2** menampilkan data hasil XRD sampel α -MnO₂.

Tabel 4.2 Data puncak XRD α -MnO₂

Sampel	2θ (°)	<i>Dspacing</i> (Å)	Ukuran Kristal (nm)
α -MnO ₂	12.8	6.91266	37.63
	18.14	4.88973	17.55
	28.73	3.10648	41.85
	37.55	2.39524	25.71
	41.05	2.19842	30.41

	49.93	1.82648	61.69
	56.68	1.62382	28.50
	60.21	1.53694	66.81
	65.34	1.42808	36.93
	69.6	1.35070	36.65
	72.54	1.30303	37.62

Pada **Gambar 4.3** ditunjukkan hasil pengujian XRD dari *activated carbon*. Dari hasil pengujian XRD tersebut, didapatkan puncak-puncak pada 2θ dengan posisi 23.24° ; 23.94° ; 26.56° ; 29.13° ; 35.70° ; 43.20° ; 43.71° . Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Njewa, et.al pada tahun 2022, dimana puncak xrd yang dihasilkan berada pada $2\theta = 20-30^\circ$. Selain itu, terbentuknya punuk pada xrd *activated carbon*, menunjukkan tingginya tingkat ketidakteraturan yang dimana menjadi ciri khas dari material karbon. Tidak terbentuknya puncak-puncak tajam pada material *activated carbon*, menunjukkan bahwa tidak ada mineral yang terdeteksi pada material tersebut. Data puncak hasil pengujian xrd *activated carbon*, dapat dilihat pada **Tabel 4.3**.

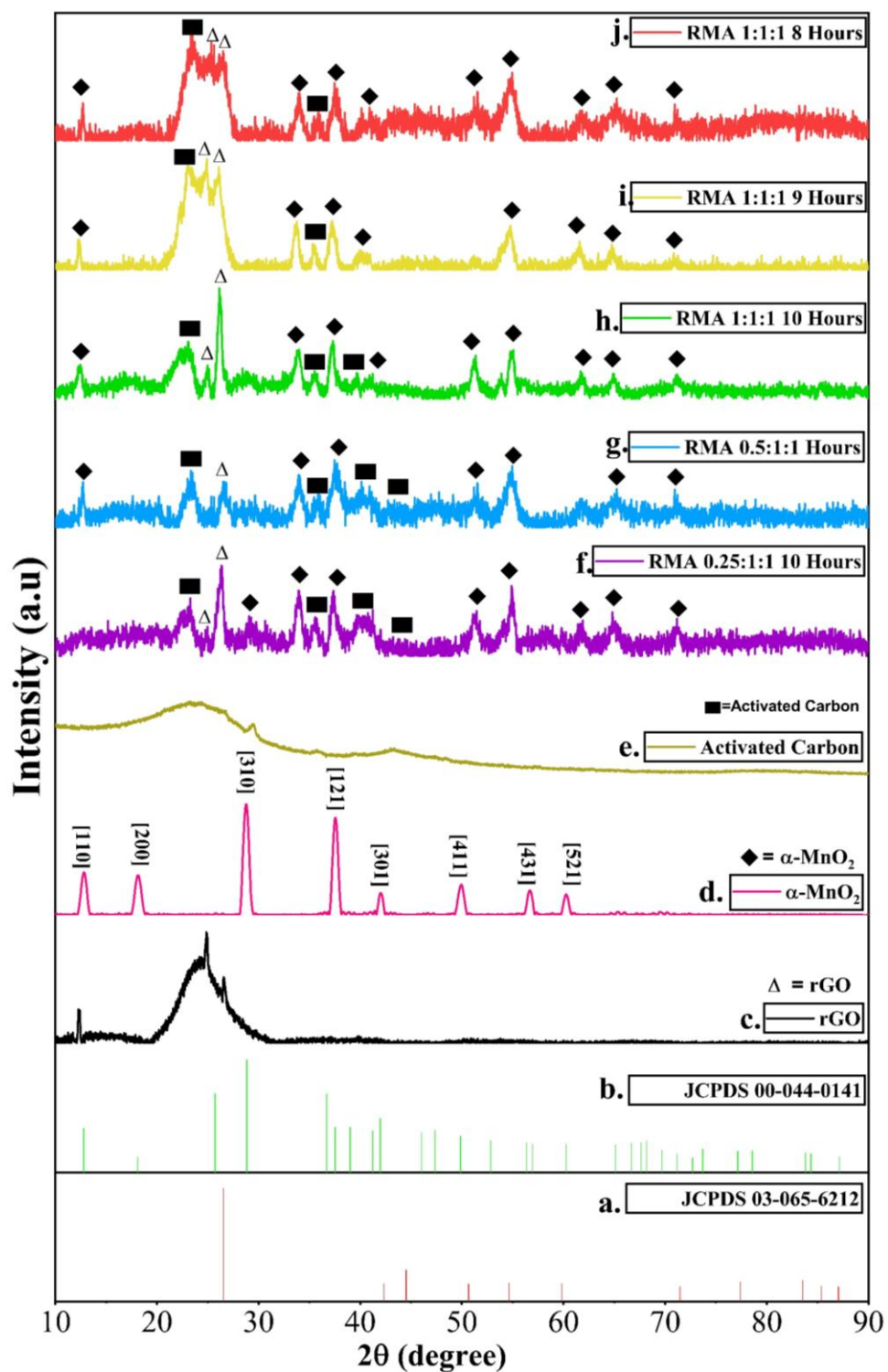


Gambar 4.3 Hasil pengujian xrd *activated carbon*

Tabel 4.3 Data puncak XRD *activated carbon*

Sampel	2 θ (°)	<i>Dspacing</i> (Å)
Activated Carbon	23.24	3.82414
	23.94	3.71341
	26.56	3.35328
	29.13	3.06259
	29.46	3.02859
	35.70	2.51241
	39.47	2.28068
	43.20	2.09215
	43.71	2.06917

Material rGO, α -MnO₂, dan *activated carbon* kemudian disintesis menjadi komposit komposit rGO/ α -MnO₂/*activated carbon* dengan variasi rasio rGO 0.25:1:1, 0.5:1:1, dan 1:1:1 serta variasi waktu hidrotermal 8 jam, 9 jam, dan 10 jam. Kemudian, komposit tersebut dilakukan pengujian xrd yang ditampilkan pada **Gambar 4.4**.



Gambar 4.4 Hasil pengujian XRD (a) JCPDS rGO, (b) JCPDS α -MnO₂, (c) rGO, (d) α -MnO₂, (e) *Activated carbon*, RMA (f) 0.25:1:1 10 Jam, (g) 0.5:1:1 10 Jam, (h) 1:1:1 10 Jam, (i) 1:1:1 9 Jam, (j) 1:1:1 8 Jam

Pada **Gambar 4.4**, ditunjukkan hasil pengujian xrd komposit rGO/ α -MnO₂/activated carbon masing-masing variasi. Hasil xrd dari komposit menunjukkan kemiripan serta kesesuaian dengan hasil xrd rGO, α -MnO₂, dan activated carbon. Komposit dengan waktu hidrotermal 8 jam pada **Gambar 4.4 (e)**, memiliki ukuran kristal tertinggi, diikuti oleh komposit dengan waktu hidrotermal 9 jam pada **Gambar 4.4 (d)**, dan ukuran kristal terkecil pada komposit dengan waktu hidrotermal 10 jam pada **Gambar 4.4 (c)**. Hal ini menunjukkan bahwa, semakin lama waktu hidrotermal yang diberikan, ukuran kristal semakin kecil. Ukuran kristal yang semakin kecil, dapat memberikan luas permukaan aktif yang besar (Nurhidayah, V., et.al., 2021). Variasi penambahan rGO juga mempengaruhi ukuran Kristal. Ukuran Kristal tertinggi terdapat pada komposit 1:1:1 pada **Gambar 4.4 (c)**, kemudian diikuti oleh komposit 0.5:1:1 pada **Gambar 4.4 (b)**, dan ukuran kristal terkecil pada komposit 0.25:1:1 pada **Gambar 4.4 (a)**. Data puncak dan nilai *dspacing* ditunjukkan pada **Tabel 4.4**. Variasi penambahan rGO juga mempengaruhi intensitas relatif dari puncak α -MnO₂ yang dimana cenderung menurun dan puncaknya menjadi lebih lebar. Hal ini dikarenakan puncak α -MnO₂ yang tumpang tindih atau termodulasi oleh material rGO.

Tabel 4.4 Data puncak XRD komposit rGO/ α -MnO₂/activated carbon variasi komposisi dan waktu hidrotermal

Sampel	2 θ (°)	<i>Dspacing</i> (Å)
RMA-1	23.2729	3.81901
	24.7943	3.58801
	26.1691	3.40255
	33.8784	2.64383
	35.7415	2.51017
	37.3229	2.40737
	40.3585	2.23302
	44.5188	2.03352
	51.2357	1.78159
	53.9968	1.69682
	54.8674	1.67194
	61.6302	1.50370
	64.9188	1.43525
	71.12	1.32455
RMA-2	12.6835	6.97365
	14.8041	5.97914
	22.4977	3.94883

Sampel	2 θ (°)	<i>Dspacing</i> (Å)
	23.1476	3.83941
	23.639	3.76069
	25.0022	3.55865
	26.2015	3.39841
	26.4945	3.36149
	26.8116	3.32245
	33.969	2.63699
	35.7923	2.50673
	37.3979	2.40271
	37.7819	2.37917
	40.1779	2.24264
	40.5356	2.22367
	45.8074	1.97927
	51.2925	1.77975
	54.7769	1.67449
	61.6809	1.50258
RMA-3	12.4355	7.11213
	23.3511	3.80641
	24.6181	3.61330
	24.6975	3.60186
	24.9571	3.56497
	26.0307	3.42033
	26.1217	3.40862
	26.2154	3.39664
	33.8467	2.64624
	35.5673	2.52207
	37.199	2.41510
	39.6429	2.27166
	40.814	2.20914
	51.1737	1.78360
	53.7671	1.70353
	54.8314	1.67295
	61.6969	1.50223
	64.8787	1.43604
	71.1212	1.32453
RMA-4	11.1874	7.90267
	12.2657	7.21024
	12.4399	7.10968
	13.5196	6.54419
	19.7361	4.49470
	22.6053	3.93027
	23.305	3.81383
	24.7148	3.59938
	26.036	3.41965

Sampel	2 θ (°)	Dspacing (Å)
	33.6835	2.65868
	35.4549	2.52980
	37.2291	2.41322
	40.0017	2.25211
	40.8628	2.20662
	51.1728	1.78363
	54.5681	1.68040
	61.4405	1.50789
	64.7627	1.43833
	70.8771	1.32849
	75.0379	1.26481
	75.6789	1.25568
RMA-5	12.2867	7.19795
	12.4522	7.10265
	22.9873	3.86581
	24.4701	3.63481
	24.9238	3.56967
	26.1484	3.40519
	33.8685	2.64459
	35.5192	2.52537
	37.1904	2.41564
	39.6119	2.27337
	40.9427	2.20250
	51.1891	1.78310
	53.7374	1.70440
	54.8076	1.67362
	56.1401	1.63701
	56.2039	1.63531
	61.6695	1.50284
	64.9135	1.43535
	71.1321	1.32436

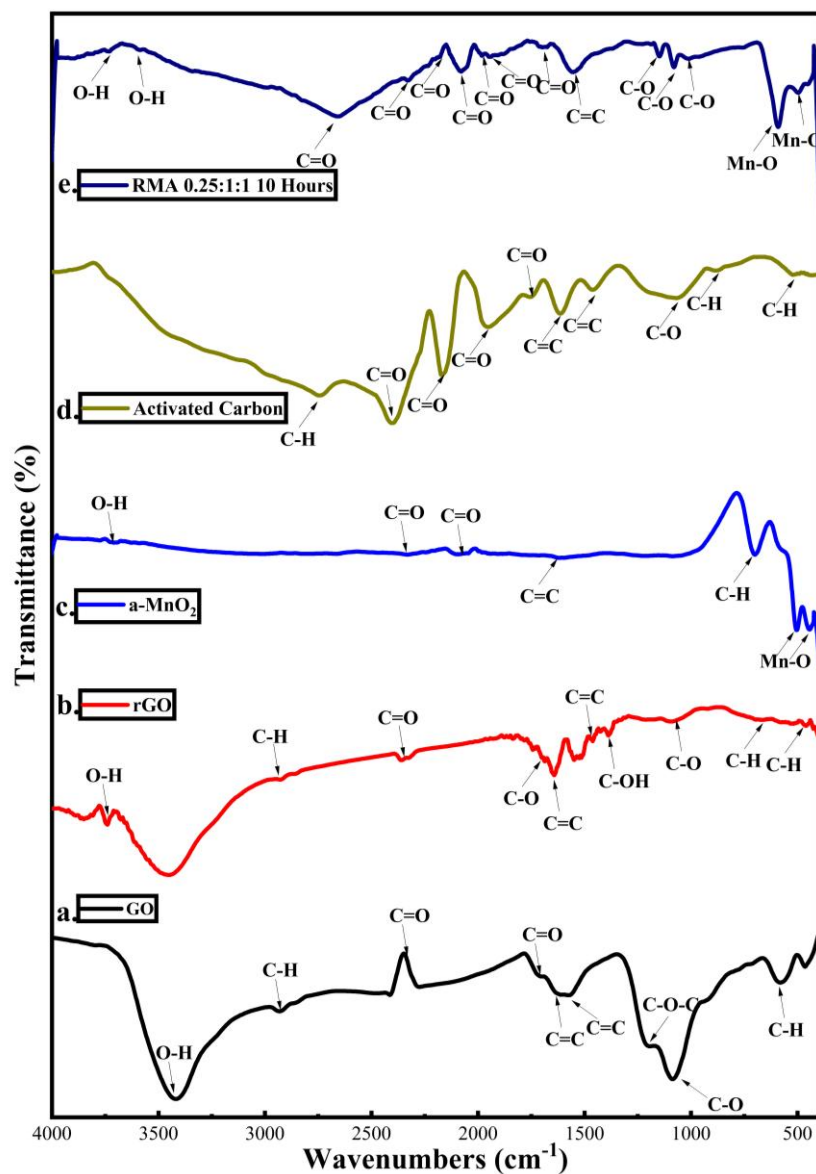
Tabel 4.5 Data ukuran kristal komposit

Sampel	2 θ (°)	Ukuran Kristal	Ukuran Kristal rata-rata
RMA-1	37.32	11.68	20.36
RMA-2	37.40	12.67	25.54
RMA-3	37.20	16.37	26.8
RMA-4	37.23	17.76	27.59
RMA-5	37.19	21.67	27.91

Pada **Tabel 4.5**, ditunjukkan nilai ukuran kristal dari masing-masing material komposit rGO/ α -MnO₂/activated carbon.

4.2 Hasil Pengujian FTIR

Pengujian FTIR dilakukan untuk mengetahui vibrasi molekul dan gugus fungsi yang ada dalam suatu material menggunakan pancaran sinar inframerah. Dalam penelitian ini, pengujian FTIR dilakukan pada sampel GO, rGO, α -MnO₂, *activated carbon*, dan komposit rGO/ α -MnO₂/*activated carbon*. Panjang gelombang yang digunakan pada pengujian FTIR yaitu 4000 hingga 400 cm⁻¹.



Gambar 4.5 Hasil pengujian FTIR (a) GO, (b) rGO, (c) α -MnO₂, (d) *activated carbon*, dan (e) RMA 0.25:1:1 10 Jam

Pada **Gambar 4.5** menunjukkan hasil pengujian FTIR GO, rGO, α -MnO₂, *activated carbon*, dan RMA 0.25:1:1 10 Jam. Pada **gambar 4.5 (a)**, ditunjukkan hasil pengujian FTIR pada GO. Dari hasil tersebut, ditunjukkan beberapa ikatan yang terbentuk. Pada panjang gelombang 408.91 cm⁻¹, 437.84 cm⁻¹, 464.84 cm⁻¹, 536.21 cm⁻¹, 590.22 cm⁻¹, 630.72 cm⁻¹, ikatan gugus fungsi yang terbentuk yaitu C-H dengan vibrasi molekul *bending* dan *stretching*. Pada panjang gelombang 1062.78 cm⁻¹ dan 1097.5 cm⁻¹, terbentuk ikatan gugus fungsi yaitu C-O dengan vibrasi molekul *stretching*. Pada panjang gelombang 1209.37 cm⁻¹, terbentuk ikatan gugus fungsi yaitu C-O-C dengan vibrasi molekul *stretching*. Pada panjang gelombang 1575.84 cm⁻¹ dan 1639.49 cm⁻¹, terbentuk ikatan gugus fungsi yaitu C=C dengan vibrasi molekul *stretching*. Pada panjang gelombang 1670.35 cm⁻¹, 1734.01 cm⁻¹, 2287.58 cm⁻¹, dan 2345.44 cm⁻¹, ikatan gugus fungsi yang terbentuk yaitu C=O dengan vibrasi molekul *stretching*. Pada panjang gelombang 2856.58 cm⁻¹ dan 2926.01 cm⁻¹, terbentuk ikatan gugus fungsi yaitu C-H dengan vibrasi molekul *stretching*. Pada panjang gelombang 3433.29 cm⁻¹, terbentuk ikatan gugus fungsi yaitu O-H dengan vibrasi molekul *stretching*. Hasil pengujian FTIR GO sudah sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Xu, et.al., pada tahun 2017, dimana gugus fungsi yang terbentuk yaitu C-O, dan O-H.

GO kemudian direduksi menjadi rGO, kemudian dilakukan pengujian FTIR yang ditunjukkan pada **gambar 4.5 (b)**. Hasil pengujian FTIR sampel rGO menghasilkan beberapa jenis ikatan kimia yang terbentuk selama proses sintesis. Spektrum FTIR rGO menunjukkan bilangan gelombang 426.27 cm⁻¹, 459.06 cm⁻¹, 532.35 cm⁻¹ menunjukkan ikatan C-H dalam mode *bending*, bilangan gelombang 1089.78 cm⁻¹ menunjukkan ikatan C-O *stretching*. Pada bilangan gelombang 1332.81 cm⁻¹ dan 1388.75 cm⁻¹ menunjukkan ikatan C-OH *stretching*, pada bilangan gelombang 1425.40 cm⁻¹, 1462.04 cm⁻¹, 1514.12 cm⁻¹, 1548.84 cm⁻¹ dan 1641.42 cm⁻¹ menunjukkan ikatan C=C *stretching*. Pada bilangan gelombang 1687.71 cm⁻¹, 1743.65 cm⁻¹, dan 1836.23 cm⁻¹ menunjukkan ikatan C=O *stretching*. Pada bilangan gelombang 2326.15 cm⁻¹ dan 2358.94 cm⁻¹ menunjukkan ikatan C=O *stretching*. Pada bilangan gelombang 2927.94 cm⁻¹ menunjukkan ikatan C-H *stretching*. Pada bilangan gelombang 3450.65 cm⁻¹ dan 3739.97 cm⁻¹ menunjukkan ikatan O-H *stretching*. Hasil pengujian ini menunjukkan ikatan O-H, C-O, C=C dan

C=O pada sampel rGO. Terbentuknya ikatan tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Kristiyanti, dkk. 2019) dimana gugus fungsi yang terkandung dalam rGO adalah ikatan C=C, C-O, C=O, dan O-H. Gugus fungsi utama dari rGO yaitu C=C dan O-H yang saling berikatan sehingga membentuk struktur heksagonal atom karbon.

Hasil pengujian FTIR α -MnO₂ ditunjukkan pada **Gambar 4.5 (c)**. Hasil pengujian FTIR dari α -MnO₂ menunjukkan adanya ikatan Mn-O pada panjang gelombang 445.46 cm⁻¹, 499.19 cm⁻¹, 701.72 cm⁻¹. Selain ikatan Mn-O, terdapat beberapa ikatan yang terbentuk, seperti pada panjang gelombang 1635.82 cm⁻¹ terbentuk ikatan C=C dengan vibrasi molekul *stretching*. Kemudian, pada panjang gelombang 2094.60 cm⁻¹, 2330.19 cm⁻¹, terbentuk ikatan C=O dengan vibrasi molekul *stretching*. Pada panjang gelombang 3702.41 cm⁻¹, terbentuk ikatan O-H dengan vibrasi molekul *stretching*. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Devi, et.al pada tahun 2023, dimana terbentuk ikatan Mn-O pada panjang gelombang 718, 524, dan 476 cm⁻¹.

Hasil pengujian FTIR *activated carbon* ditunjukkan oleh **Gambar 4.5 (d)**. Hasil pengujian FTIR *activated carbon*, menghasilkan beberapa ikatan gugus fungsi dan vibrasi molekul. Pada panjang gelombang 870.66 cm⁻¹, terbentuk ikatan gugus fungsi yaitu C-H dengan vibrasi molekul *bending*. Pada panjang gelombang 1454.22 cm⁻¹ dan 1618.15 cm⁻¹, terbentuk ikatan gugus fungsi yaitu C=C dengan vibrasi molekul *stretching*. Pada panjang gelombang 1993.41 cm⁻¹, 2066.17 cm⁻¹, 2357.64 cm⁻¹, dan 2325.29 cm⁻¹, ikatan gugus fungsi yang terbentuk yaitu C=O dengan vibrasi molekul *stretching*. Pada panjang gelombang 2657.46 cm⁻¹, terbentuk ikatan gugus fungsi yaitu C-H dengan vibrasi molekul *stretching*. Hasil pengujian FTIR *activated carbon*, telah sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Hussain et.al., pada tahun 2023. Dari hasil penelitian tersebut, didapatkan bahwa ikatan gugus fungsi FTIR pada *activated carbon* yang terbentuk yaitu C-H, C=C, dan C=O.

Pada RMA 0.25:1:1 10 jam pada **Gambar 4.5 (e)**, teridentifikasi ikatan Mn-O pada panjang gelombang 445.46, 495.06, 598.39 cm⁻¹ dengan vibrasi molekul *bending* dan *stretching*, ikatan C-O *stretching* pada panjang gelombang 1011.71, 1081.97, 1143.97 cm⁻¹, ikatan C=C *stretching* pada panjang gelombang 1567.29

cm⁻¹, ikatan C=O *stretching* pada panjang gelombang 1697.81, 1937.54, 1978.87, 2078.07, 2202.06, 2326.06 cm⁻¹, ikatan C-H *stretching* pada panjang gelombang 2660.84 cm⁻¹, ikatan O-H *stretching* pada panjang gelombang 3590.81, 3735.47 cm⁻¹. Data gugus fungsi yang terbentuk dari hasil pengujian FTIR GO, rGO, α -MnO₂, dan *activated carbon* ditunjukkan pada **Tabel 4.6**.

Tabel 4.6 Data gugus fungsi FTIR GO, rGO, α -MnO₂, dan *activated carbon*

Sampel	Wavenumbers (cm ⁻¹)	Gugus Fungsi	
GO	457.86	C-H	<i>Bending</i>
	577.72	C-H	<i>Stretching</i>
	1086.10	C-O	<i>Stretching</i>
	1189.48	C-O-C	<i>Stretching</i>
	1590.35	C=C	<i>Stretching</i>
	1710.21	C=O	<i>Stretching</i>
	2276.46	C=O	<i>Stretching</i>
	2416.99	C=O	<i>Stretching</i>
	2933.63	C-H	<i>Stretching</i>
	3421.35	O-H	<i>Stretching</i>
rGO	426.27	C-H	<i>Bending</i>
	459.06	C-H	<i>Bending</i>
	532.35	C-H	<i>Bending</i>
	1089.78	C-O	<i>Stretching</i>
	1332.81	C-OH	<i>Bending</i>
	1388.75	C-OH	<i>Bending</i>
	1425.4	C=C	<i>Bending</i>
	1462.04	C=C	<i>Bending</i>
	1514.12	C=C	<i>Stretching</i>
	1548.84	C=C	<i>Stretching</i>
	1641.42	C=C	<i>Stretching</i>
	1687.71	C=O	<i>Stretching</i>
	1743.65	C=O	<i>Stretching</i>
	1836.23	C=O	<i>Stretching</i>
	2326.15	C=O	<i>Stretching</i>
	2358.94	C=O	<i>Stretching</i>
	2927.94	C-H	<i>Stretching</i>
	3450.65	O-H	<i>Stretching</i>
	3739.97	O-H	<i>Stretching</i>
α -MnO ₂	445.46	Mn-O	<i>Bending</i>
	499.19	Mn-O	<i>Stretching</i>
	701.72	Mn-O	<i>Bending</i>
	1635.82	C=C	<i>Stretching</i>
	2094.60	C=O	<i>Stretching</i>
	2330.19	C=O	<i>Stretching</i>
	3702.41	O-H	<i>Stretching</i>

Sampel	Wavenumbers (cm ⁻¹)	Gugus Fungsi	
Activated Carbon	519.86	C-H	<i>Bending</i>
	895.98	C-H	<i>Bending</i>
	1053.04	C-O	<i>Stretching</i>
	1462.22	C-H	<i>Bending</i>
	1602.75	C=C	<i>Stretching</i>
	1751.54	C=O	<i>Stretching</i>
	1958.20	C=C	<i>Stretching</i>
	2156.60	C=O	<i>Stretching</i>
	2404.59	C=O	<i>Stretching</i>
	2735.24	C-H	<i>Stretching</i>

Hasil pengujian FTIR komposit rGO/ α -MnO₂/activated carbon ditunjukkan pada **Gambar 4.6**. Pada RMA 0.25:1:1 10 jam pada **Gambar 4.6 (a)**, teridentifikasi ikatan Mn-O pada panjang gelombang 445.46, 495.06, 598.39 cm⁻¹ dengan vibrasi molekul *bending* dan *stretching*, ikatan C-O *stretching* pada panjang gelombang 1011.71, 1081.97, 1143.97 cm⁻¹, ikatan C=C *stretching* pada panjang gelombang 1567.29 cm⁻¹, ikatan C=O *stretching* pada panjang gelombang 1697.81, 1937.54, 1978.87, 2078.07, 2202.06, 2326.06 cm⁻¹, ikatan C-H *stretching* pada panjang gelombang 2660.84 cm⁻¹, ikatan O-H *stretching* pada panjang gelombang 3590.81, 3735.47 cm⁻¹.

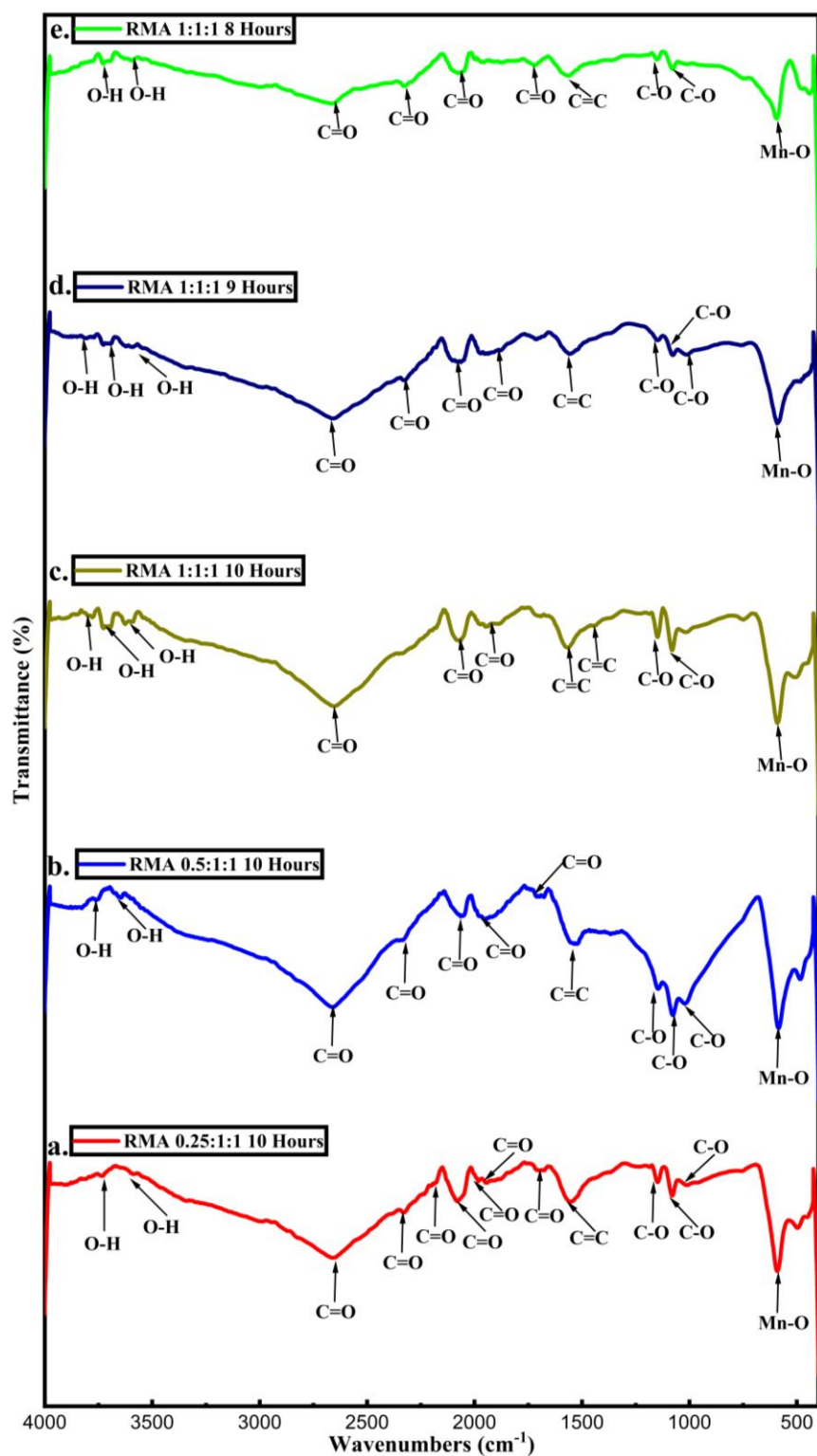
Pada RMA 0.5:1:1 10 jam pada **Gambar 4.6 (b)**, terdeteksi ikatan Mn-O *bending* pada panjang gelombang 482.66, 585.99 cm⁻¹, ikatan C-O *stretching* pada panjang gelombang 1024.11, 1073.71, 1143.97 cm⁻¹, ikatan C=C *stretching* pada panjang gelombang 1532.49 cm⁻¹, ikatan C=O pada panjang gelombang 1706.08, 1945.81, 2057.40, 2334.32, 2656.71 cm⁻¹, ikatan O-H *stretching* terbentuk pada panjang gelombang 3648.67, 3756.14 cm⁻¹.

Pada RMA 1:1:1 10 jam pada **Gambar 4.6 (c)**, terdeteksi ikatan Mn-O *bending* pada panjang gelombang 499.19, 590.12 cm⁻¹, ikatan C-O *stretching* pada panjang gelombang 1073.71, 1148.10 cm⁻¹, ikatan C=C *stretching* pada panjang gelombang 1441.56, 1565.55 cm⁻¹, ikatan C=O pada panjang gelombang 1937.54, 2065.67, 2656.71 cm⁻¹, ikatan O-H *stretching* terbentuk pada panjang gelombang 3537.08, 3623.88, 3723.07, 3776.81 cm⁻¹. Dari hasil pengujian FTIR, dapat dilihat bahwa semakin meningkatnya rasio rGO, menyebabkan gugus fungsi C=O dan C-O berkurang dan bertambahnya gugus fungsi C=C.

Pada RMA 1:1:1 8 jam pada **Gambar 4.6 (e)**, teridentifikasi ikatan Mn-O pada panjang gelombang 437.19, 478.53, 590.12 cm^{-1} dengan vibrasi molekul *bending* dan *stretching*, ikatan C-O *stretching* pada panjang gelombang 1077.84, 1152.23 cm^{-1} , ikatan C=C *stretching* pada panjang gelombang 1561.42 cm^{-1} , ikatan C=O *stretching* pada panjang gelombang 1722.61, 1871.41, 2065.67, 2321.92, 2656.71 cm^{-1} , ikatan O-H *stretching* pada panjang gelombang 3594.94, 3727.21 cm^{-1} .

Pada RMA 1:1:1 9 jam pada **Gambar 4.6 (d)**, teridentifikasi ikatan Mn-O pada panjang gelombang 499.19, dan 585.99 cm^{-1} dengan vibrasi molekul *bending*, ikatan C-O *stretching* pada panjang gelombang 1007.57, 1077.84, 1143.97 cm^{-1} , ikatan C=C *stretching* pada panjang gelombang 1557.29 cm^{-1} , ikatan C=O *stretching* pada panjang gelombang 1933.41, 2061.53, 2313.66, 2656.71 cm^{-1} , ikatan O-H *stretching* pada panjang gelombang 3586.68, 3727.21, 3814.00 cm^{-1} .

Pada RMA 1:1:1 10 jam pada **Gambar 4.6 (c)**, terdeteksi ikatan Mn-O *bending* pada panjang gelombang 499.19, 590.12 cm^{-1} , ikatan C-O *stretching* pada panjang gelombang 1073.71, 1148.10 cm^{-1} , ikatan C=C *stretching* pada panjang gelombang 1441.56, 1565.55 cm^{-1} , ikatan C=O pada panjang gelombang 1937.54, 2065.67, 2656.71 cm^{-1} , ikatan O-H *stretching* terbentuk pada panjang gelombang 3537.08, 3623.88, 3723.07, 3776.81 cm^{-1} . Data gugus fungsi yang terbentuk, disajikan pada **Tabel 4.7**.



Gambar 4.6 Hasil pengujian FTIR RMA (a) 0.25:1:1 10 Jam, (b) 0.5:1:1 10 Jam, (c) 1:1:1 10 Jam, (d) 1:1:1 9 Jam, (e) 1:1:1 8 Jam

Tabel 4.7 Data gugus fungsi FTIR komposit rGO/ α -MnO₂/activated carbon variasi komposisi dan waktu hidrotermal

Sampel	Wavenumbers (cm ⁻¹)	Gugus Fungsi	
RMA-1	445.46	Mn-O	<i>Bending</i>
	495.06	Mn-O	<i>Stretching</i>
	598.39	Mn-O	<i>Bending</i>
	1011.71	C-O	<i>Stretching</i>
	1081.97	C-O	<i>Stretching</i>
	1143.97	C-O	<i>Stretching</i>
	1567.29	C=C	<i>Stretching</i>
	1697.81	C=O	<i>Stretching</i>
	1937.54	C=O	<i>Stretching</i>
	1978.87	C=O	<i>Stretching</i>
	2078.07	C=O	<i>Stretching</i>
	2202.06	C=O	<i>Stretching</i>
	2326.06	C=O	<i>Stretching</i>
	2660.84	C-H	<i>Stretching</i>
	3590.81	O-H	<i>Stretching</i>
	3735.47	O-H	<i>Stretching</i>
RMA-2	482.66	Mn-O	<i>Bending</i>
	585.99	Mn-O	<i>Bending</i>
	1024.11	C-O	<i>Stretching</i>
	1073.71	C-O	<i>Stretching</i>
	1143.97	C-O	<i>Stretching</i>
	1532.49	C=C	<i>Stretching</i>
	1706.08	C=O	<i>Stretching</i>
	1945.81	C=O	<i>Stretching</i>
	2057.40	C=O	<i>Stretching</i>
	2334.32	C=O	<i>Stretching</i>
	2656.71	C=O	<i>Stretching</i>
	3648.67	O-H	<i>Stretching</i>
	3756.14	O-H	<i>Stretching</i>
RMA-3	499.19	Mn-O	<i>Bending</i>
	590.12	Mn-O	<i>Bending</i>
	1073.71	C-O	<i>Stretching</i>
	1148.10	C-O	<i>Stretching</i>
	1441.56	C=C	<i>Stretching</i>
	1565.55	C=C	<i>Stretching</i>
	1937.54	C=O	<i>Stretching</i>
	2065.67	C=O	<i>Stretching</i>
	2656.71	C=O	<i>Stretching</i>
	3537.08	O-H	<i>Stretching</i>
	3623.88	O-H	<i>Stretching</i>
	3723.07	O-H	<i>Stretching</i>
	3776.81	O-H	<i>Stretching</i>

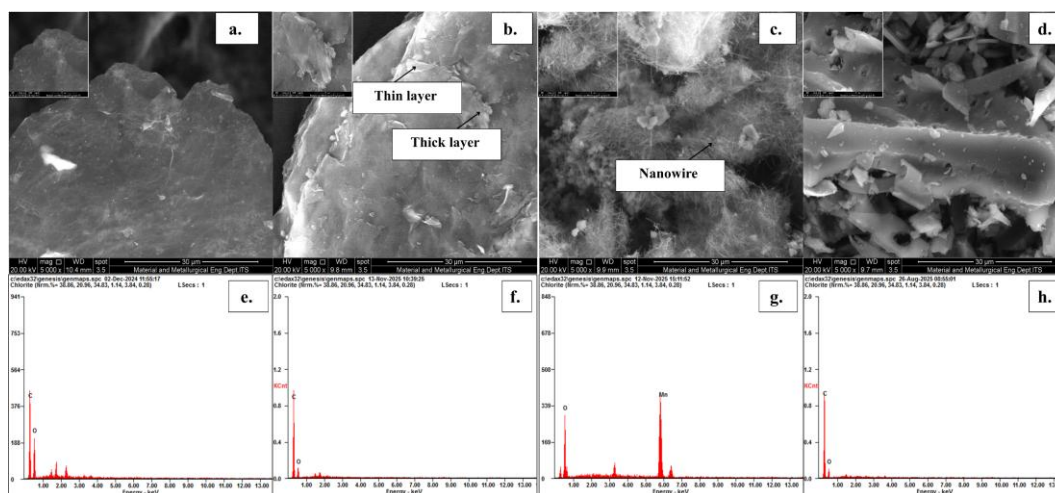
Sampel	Wavenumbers (cm ⁻¹)	Gugus Fungsi	
RMA-4	499.19	Mn-O	<i>Bending</i>
	585.99	Mn-O	<i>Bending</i>
	1007.57	C-O	<i>Stretching</i>
	1077.84	C-O	<i>Stretching</i>
	1143.97	C-O	<i>Stretching</i>
	1557.29	C=C	<i>Stretching</i>
	1933.41	C=O	<i>Stretching</i>
	2061.53	C=O	<i>Stretching</i>
	2313.66	C=O	<i>Stretching</i>
	2656.71	C=O	<i>Stretching</i>
	3586.68	O-H	<i>Stretching</i>
	3727.21	O-H	<i>Stretching</i>
	3814.00	O-H	<i>Stretching</i>
RMA-5	437.19	Mn-O	<i>Bending</i>
	478.53	Mn-O	<i>Stretching</i>
	590.12	Mn-O	<i>Bending</i>
	1077.84	C-O	<i>Stretching</i>
	1152.23	C-O	<i>Stretching</i>
	1561.42	C=C	<i>Stretching</i>
	1722.61	C=O	<i>Stretching</i>
	1871.41	C=O	<i>Stretching</i>
	2065.67	C=O	<i>Stretching</i>
	2321.92	C=O	<i>Stretching</i>
	2656.71	C=O	<i>Stretching</i>
	3594.94	O-H	<i>Stretching</i>
	3727.21	O-H	<i>Stretching</i>

Hasil pengujian FTIR menunjukkan bahwa sampel komposit NiO/rGO memiliki ikatan C=C *stretching*, C-O *stretching*, dan C=O *stretching*, dan Mn-O *stretching* dan *bending*. Peningkatan waktu hidrotermal tidak menyebabkan hilangnya gugus fungsi oksigen secara signifikan selama proses sintesis komposit komposit rGO/ α -MnO₂/*activated carbon*.

4.3 Hasil Pengujian SEM-EDX

Pengujian SEM-EDX dilakukan pada penelitian ini untuk menganalisis morfologi dan komposisi kimia dari material. SEM digunakan untuk mengamati struktur morfologi dari material, sementara EDX digunakan untuk menentukan komposisi kimia dari material dengan cara mengukur intensitas sinar-X yang

dihasilkan. Dalam penelitian ini, pengujian SEM-EDX dilakukan pada material GO, rGO, α -MnO₂, *activated carbon*, komposit rGO/ α -MnO₂/*activated carbon*.



Gambar 4.7 Hasil pengujian SEM (a) GO, (b) rGO (c) α -MnO₂, (d) *activated carbon* dan EDX (e) GO, (f) rGO (g) α -MnO₂, (h) *activated carbon*

Pada **Gambar 4.7**, ditunjukkan hasil SEM dan EDX pada material GO, rGO, α -MnO₂, dan *activated carbon*. GO memiliki morfologi berupa lembaran yang ditunjukkan **Gambar 4.7 (a)**, struktur khas dari GO. Permukaan yang dihasilkan dari morfologi GO, terlihat kasar, tidak rata serta memiliki struktur berupa tumpukan lapisan yang tidak seragam. Hal ini dikarenakan gaya tarik antar lapisan GO serta adanya pengelupasan dari grafit menjadi GO dan adanya gugus fungsi oksigen pada permukaan GO (Patil, B. et.al., 2023).

rGO memiliki morfologi yang terdiri dari lembaran tipis dan tebal yang ditunjukkan pada **Gambar 4.7 (b)**. Morfologi lembaran yang terbentuk, terjadi karena GO yang mengalami pengelupasan selama proses reduksi. Lembaran tipis yang terbentuk, menunjukkan proses reduksi yang diberikan efektif serta berkurangnya kandungan oksigen dalam rGO (Fauzi, et.al., 2021). Lembaran tebal yang terbentuk pada rGO, terjadi karena lapisan rGO yang bertumpuk dan adanya sisa GO yang belum tereduksi secara sempurna (Pourmoghaddam, N., et.al., 2024).

Hasil SEM α -MnO₂ ditunjukkan pada **Gambar 4.7 (c)**. Morfologi α -MnO₂ yang dihasilkan berbentuk nanowire. Hasil morfologi nanowire, didapatkan melalui metode hidrotermal yang merupakan morfologi khasnya polimorf dari α -MnO₂

(Ilcheva, V., et.al., 2025). Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Manikandan, S., et.al., pada tahun 2024, dimana dengan metode hidrotermal didapatkan morfologi dari α -MnO₂ berbentuk nanowire.

Hasil pengujian SEM *activated carbon* ditunjukkan pada **Gambar 4.7 (d)**. Morfologi yang dihasilkan berbentuk serpihan atau lempengan yang memanjang. Selain itu, pada morfologi *activated carbon* memiliki pori-pori yang terdapat pada permukaannya. Adanya pori-pori tersebut, membuat *activated carbon* memiliki luas permukaan yang tinggi. Hasil sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Bakti, et.al, pada tahun 2018. Dimana pada penelitian tersebut, morfologi *activated carbon* yang dihasilkan menunjukkan permukaan yang memanjang.

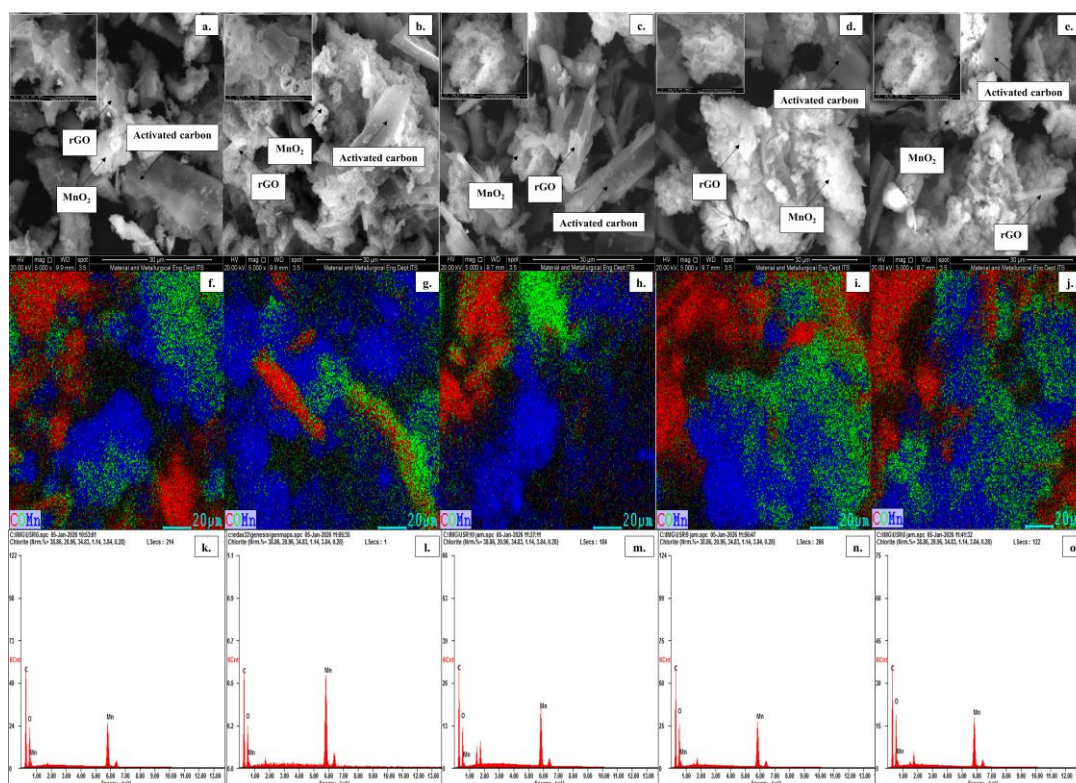
Tabel 4.8 Persentase elemen pada pengujian EDX GO, rGO, α -MnO₂, dan *activated carbon*

Material	Element	Wt%	At%
GO	CK	46.74	53.90
	OK	53.26	46.10
rGO	CK	67.32	73.29
	OK	32.68	26.71
α -MnO ₂	OK	18.64	44.04
	MnK	81.36	55.96
<i>Activated Carbon</i>	CK	70.59	76.18
	OK	29.41	23.82

Pada **gambar 4.7** dan **tabel 4.8**. Pada **gambar 4.7 (e) dan (f)**, ditunjukkan hasil pengujian EDX dari GO dan rGO. Terlihat bahwa terjadi penurunan kadar oksigen ketika GO direduksi menjadi rGO serta peningkatan kadar karbon. Hal ini menandakan bahwa proses reduksi dari GO menjadi rGO berhasil dilakukan. Hasil ini juga didukung dengan penelitian yang dilakukan oleh Aragaw, et.al pada tahun 2020 dan Odja, et.al, pada tahun 2024. Dimana pada kedua penelitian tersebut, didapatkan bahwa terjadi peningkatan kadar karbon dan berkurangnya kadar oksigen pada rGO yang dapat meningkatkan konduktivitas dari rGO.

Pada **gambar 4.9 (g)**, ditunjukkan hasil pengujian EDX dari α -MnO₂. Dari hasil pengujian EDS, ditunjukkan bahwa pada α -MnO₂ memiliki kadar Mn sebesar 81.36 wt% dan 55.96 at% dan O sebesar 55.96 wt% dan 44.04 at%.

Pada **gambar 4.9 (h)**, ditunjukkan hasil pengujian EDX dari *activated carbon*. Dari hasil pengujian EDX, ditunjukkan bahwa pada *activated carbon* memiliki kadar karbon sebesar 70.59 wt% dan 76.18 at% dan O sebesar 29.41 wt% dan 23.82 at%.



Gambar 4.8 Hasil Pengujian SEM RMA (a) 0.25:1:1 10 Jam, (b) 0.5:1:1 10 Jam, (c) 1:1:1 10 jam, (d) 1:1:1 9 Jam, (e) 1:1:1 8 jam; Mapping RMA (f) 0.25:1:1 10 Jam, (g) 0.5:1:1 10 Jam, (h) 1:1:1 10 jam, (i) 1:1:1 9 Jam, (j) 1:1:1 8 jam; dan EDX RMA (k) 0.25:1:1 10 Jam, (l) 0.5:1:1 10 Jam, (m) 1:1:1 10 jam, (n) 1:1:1 9 Jam, (o) 1:1:1 8 jam

Hasil pengujian komposit rGO/ α -MnO₂/*activated carbon* variasi komposisi dan waktu hidrotermal ditunjukkan oleh **Gambar 4.8 (a)-(e)**. Pada hasil pengujian SEM komposit rGO/ α -MnO₂/*activated carbon* terlihat memiliki morfologi lembaran. Pada material komposit, juga ditunjukkan adanya morfologi nanowire dan serpihan panjang yang menandakan adanya α -MnO₂ dan *activated carbon*.

Adanya morfologi lembaran, nanowire, dan serpihan panjang menunjukkan bahwa terdapat rGO, α -MnO₂ dan *activated carbon*. Terlihat juga pada semua variasi komposit komposit rGO/ α -MnO₂/*activated carbon* terbentuk morfologi

lembaran, nanowire, dan serpihan panjang yang menandakan adanya material rGO, α -MnO₂, dan *activated carbon*. Nanowire dari α -MnO₂ terlihat menempel dan tumbuh pada permukaan rGO dan *activated carbon* yang dapat meningkatkan konduktivitas dari material serta meningkatkan perendaman efektif dari larutan elektrolit dan transmisi elektron dan ion yang efisien (Li, Y., et.al., 2017).

Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Manikandan, et.al., pada tahun 2024. Dari penelitian tersebut, didapatkan morfologi dari komposit MAG berupa lembaran, nanowire, dan serpihan panjang pori-pori dari rGO, α -MnO₂, dan *activated carbon*.

Tabel 4.9 Persentase elemen pada pengujian EDX material komposit rGO/ α -MnO₂/*activated carbon* variasi komposisi dan waktu hidrotermal

Material	Element	Wt%	At%
RMA-1	CK	30.70	56.59
	OK	15.79	21.85
	MnK	53.51	21.56
RMA-2	CK	34.59	57.64
	OK	20.89	26.14
	MnK	44.52	16.22
RMA-3	CK	37.76	59.12
	OK	23.49	27.61
	MnK	38.74	13.26
RMA-4	CK	32.70	52.00
	OK	29.08	34.71
	MnK	38.22	13.29
RMA-5	CK	28.86	50.81
	OK	23.29	30.77
	MnK	47.85	18.42

Pada **Gambar 4.8** dan **Tabel 4.9** menunjukkan hasil pengujian EDX-*mapping* dari material komposit rGO/ α -MnO₂/*activated carbon*. Pada **gambar 4.8 (k)** ditunjukkan hasil pengujian EDX-*mapping* dari RMA 0.25:1:1 10 Jam dihasilkan elemen C, Mn dan O. Terlihat pada hasil *mapping* pada **gambar 4.8 (f)**, menunjukkan adanya elemen C yang ditunjukkan oleh warna merah, O yang ditunjukkan oleh warna hijau dan, elemen Mn yang ditunjukkan oleh warna biru. Elemen C yang dihasilkan memiliki berat (*weight%*) sebesar 30.70 %, dan atomik (*atomic%*) sebesar 56.59 %. Pada elemen O yang dihasilkan memiliki berat (*weight%*) sebesar 15.79 % dan atomik (*atomic%*) sebesar 21.85 %. Pada elemen

Mn yang dihasilkan memiliki berat (*weight%*) sebesar 53.51 % dan atomik (*atomic%*) sebesar 21.56 %.

Pada gambar 4.8 (l) ditunjukkan hasil pengujian EDX-mapping RMA 0.5:1:1 10 Jam dihasilkan elemen C, Mn dan O. Terlihat pada hasil *mapping* pada **gambar 4.8 (g)**, menunjukkan adanya elemen C yang ditunjukkan oleh warna merah, O yang ditunjukkan oleh warna hijau dan, elemen Mn yang ditunjukkan oleh warna biru. Elemen C yang dihasilkan memiliki berat (*weight%*) sebesar 34.59 %, dan atomik (*atomic%*) sebesar 57.64 %. Pada elemen O yang dihasilkan memiliki berat (*weight%*) sebesar 20.89 % dan atomik (*atomic%*) sebesar 26.14 %. Pada elemen Mn yang dihasilkan memiliki berat (*weight%*) sebesar 44.52 % dan atomik (*atomic%*) sebesar 16.22 %.

Pada Gambar 4.8 (m) ditunjukkan hasil pengujian EDX-mapping RMA 1:1:1 10 Jam dihasilkan elemen C, Mn dan O. Terlihat pada hasil *mapping* pada **gambar 4.8 (h)**, menunjukkan adanya elemen C yang ditunjukkan oleh warna merah, O yang ditunjukkan oleh warna hijau dan, elemen Mn yang ditunjukkan oleh warna biru. Elemen C yang dihasilkan memiliki berat (*weight%*) sebesar 37.76 %, dan atomik (*atomic%*) sebesar 59.12 %. Pada elemen O yang dihasilkan memiliki berat (*weight%*) sebesar 23.49 % dan atomik (*atomic%*) sebesar 27.61 %. Pada elemen Mn yang dihasilkan memiliki berat (*weight%*) sebesar 38.74 % dan atomik (*atomic%*) sebesar 13.26 %.

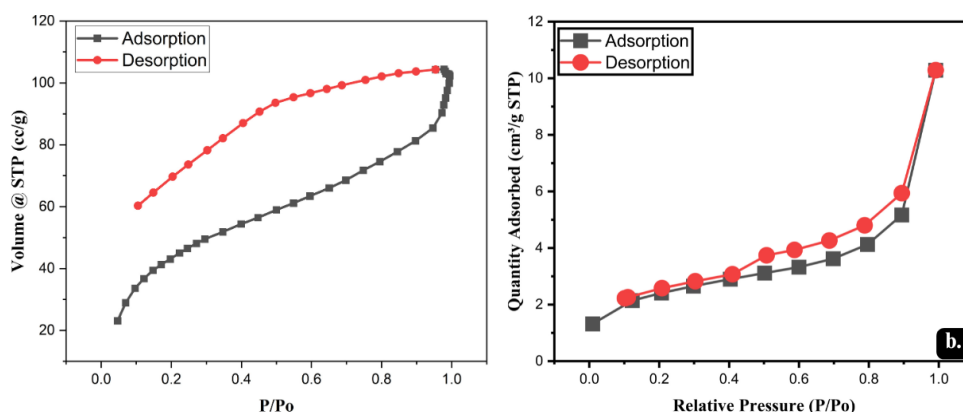
Pada Gambar 4.8 (n) ditunjukkan hasil pengujian EDX-mapping RMA 1:1:1 9 Jam dihasilkan elemen C, Mn dan O. Terlihat pada hasil *mapping* pada **gambar 4.8 (i)**, menunjukkan adanya elemen C yang ditunjukkan oleh warna merah, O yang ditunjukkan oleh warna hijau dan, elemen Mn yang ditunjukkan oleh warna biru. Elemen C yang dihasilkan memiliki berat (*weight%*) sebesar 32.70 %, dan atomik (*atomic%*) sebesar 52 %. Pada elemen O yang dihasilkan memiliki berat (*weight%*) sebesar 29.08 % dan atomik (*atomic%*) sebesar 34.71 %. Pada elemen Mn yang dihasilkan memiliki berat (*weight%*) sebesar 38.22 % dan atomik (*atomic%*) sebesar 13.29 %.

Pada Gambar 4.8 (o) ditunjukkan hasil pengujian EDX-mapping RMA 1:1:1 8 jam dihasilkan elemen C, Mn dan O. Terlihat pada hasil *mapping* pada **gambar 4.8 (j)**, menunjukkan adanya elemen C yang ditunjukkan oleh warna

merah, O yang ditunjukkan oleh warna hijau dan, elemen Mn yang ditunjukkan oleh warna biru. Elemen C yang dihasilkan memiliki berat (*weight%*) sebesar 28.86 %, dan atomik (*atomic%*) sebesar 50.81 %. Pada elemen O yang dihasilkan memiliki berat (*weight%*) sebesar 23.29 % dan atomik (*atomic%*) sebesar 30.77 %. Pada elemen Mn yang dihasilkan memiliki berat (*weight%*) sebesar 47.85 % dan atomik (*atomic%*) sebesar 18.42 %.

4.4 Hasil Pengujian BET-AAS

Pengujian BET-AAS digunakan untuk menganalisis luas permukaan spesifik, distribusi ukuran pori, dan struktur pori dari material. Dalam penelitian ini, pengujian BET-AAS dilakukan pada material GO, rGO, α -MnO₂, *activated carbon*, komposit rGO/ α -MnO₂/*activated carbon*.

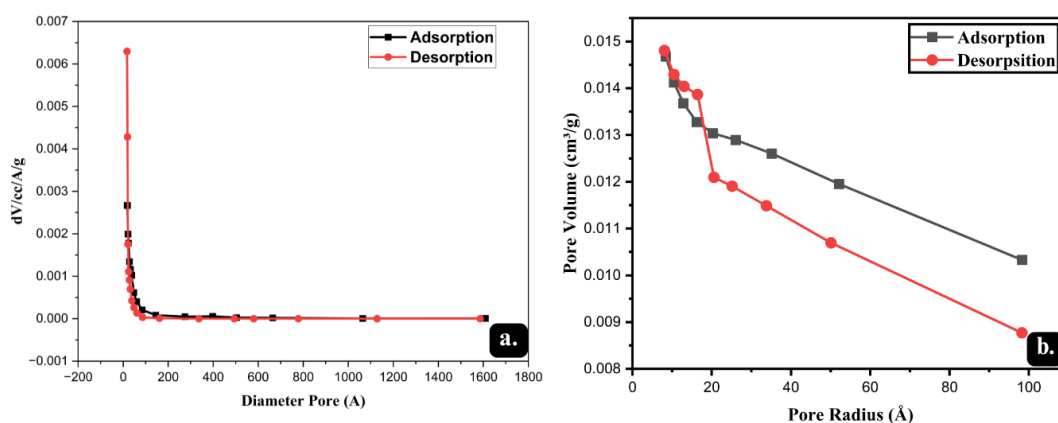


Gambar 4.9 Grafik adsorpsi-desorpsi BET (a) GO dan (b) rGO

Pada **gambar 4.9** ditunjukkan hasil pengujian BET *isotherm* GO dan rGO. pada grafik diatas, sumbu x menunjukkan *relative pressure* dan sumbu y menunjukkan jumlah gas yang teradsorpsi. Pada **gambar 4.9 (a)** menunjukkan grafik *isotherm* adsorpsi-desorpsi dari material GO, pada grafik tersebut ditunjukkan bahwa pada tekanan 0 hingga 0.4 terjadi peningkatan jumlah gas yang teradsorpsi secara perlahan. Pada tekanan relatif 0.4 sampai 1.0, terjadi peningkatan signifikan pada jumlah gas yang teradsorpsi, mencapai puncaknya 104.40 cc/g STP pada P/Po 1.0. Grafik BET dari GO menunjukkan adanya *hysteresis loop* yang terbentuk karena adanya perbedaan jumlah gas yang teradsorpsi dan terdesorpsi

saat peningkatan dan penurunan tekanan. Pada grafik GO menunjukkan tipe IV *isotherm* menurut IUPAC (*Internasional Union of Pure and Applied Chemistry*). Hal ini menunjukkan bahwa GO termasuk golongan mesoporous. Dari hasil pengujian tersebut, didapatkan nilai *surface area* sebesar 151.80 m²/g, volume pori 0.15 cc/g, dan ukuran pori 10.10 Å.

Pada **gambar 4.9 (b)** ditunjukkan hasil BET *isotherm* dari rGO. Pada hasil pengujian BET *isotherm* rGO menunjukkan adanya peningkatan adsorpsi hingga tekanan mendekati nilai 1.0 dan terbentuk *hysteresis loop*. Pada grafik rGO menunjukkan tipe IV *isotherm* menurut IUPAC (*Internasional Union of Pure and Applied Chemistry*). Hal ini menunjukkan bahwa GO termasuk golongan mesoporous. Tipe IV juga menunjukkan adanya konektivitas ukuran pori mikropori dan mesopori pada adsorben. Dari hasil pengujian tersebut, didapatkan nilai *surface area* sebesar 8.0769 m²/g

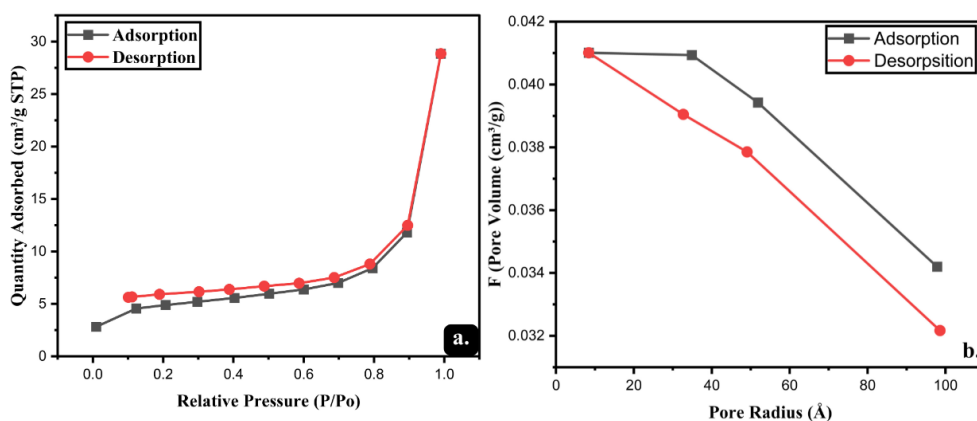


Gambar 4.10 Grafik BJH *method* (a) GO dan (b) rGO

Pada **gambar 4.10** ditunjukkan hasil pengujian BET menggunakan metode BJH. BJH (*Barret-Joyner-Halenda Model*) digunakan untuk menentukan distribusi ukuran pori dari material berdasarkan adsorpsi *isotherm* nitrogen (Amaya, J., et.al, 2020). Pori diklasifikasikan menurut IUPAC: mikropori (<2 nm, radius < 10 Å), mesopori (2–50 nm, radius 10–500 Å) dan makropori (>50 nm). Pada **gambar 4.10 (a)** ditunjukkan distribusi pori pada volume pori 0.0026723 cc/Å/g dengan ukuran pori sebesar 16.9851 Å pada kondisi adsorpsi, sedangkan pada kondisi desorpsi distribusi pori pada volume pori sebesar 0.0062965 cc/Å/g dengan ukuran pori

sebesar 17.1822 Å. Dari hasil distribusi pori pada kondisi adsorpsi dan desorpsi, didapatkan GO termasuk dalam mikropori karena ukuran pori yang dimiliki kurang dari 2 nm.

Pada **gambar 4.10 (b)** ditunjukkan distribusi pori pada volume pori 0.01468 cm³/g dengan ukuran pori sebesar 39.395 Å, sedangkan pada kondisi desorpsi distribusi pori pada volume pori sebesar 0.014806 cm³/g dengan ukuran pori sebesar 32.303 Å. Dari hasil distribusi pori pada kondisi adsorpsi dan desorpsi, didapatkan GO termasuk dalam mesoporus karena ukuran pori yang dimiliki berada pada rentang 2-50 nm. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Kusumawati, et.al., pada tahun 2020, dimana rGO yang dihasilkan memiliki ukuran pori mesoporus.

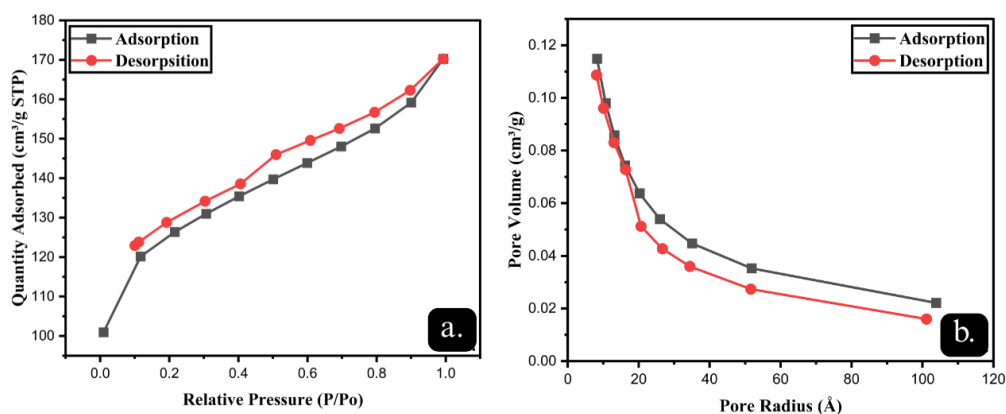


Gambar 4.11 Grafik (a) adsorpsi-desorpsi BET dan (b) BJH *method* α -MnO₂

Pada **gambar 4.11** ditunjukkan hasil pengujian BET *isotherm* dan BJH dari material α -MnO₂. Pada **gambar 4.11 (a)** didapatkan grafik *isotherm* tipe IV dengan *hysteresis loop* tipe H3. Pada grafik tersebut, terjadi peningkatan jumlah gas yang teradsorpsi pada tekanan relatif 0.2 - 1.0 hingga mencapai puncaknya 30 cm³/g STP. Dari hasil pengujian tersebut, didapatkan nilai *surface area* dari α -MnO₂ sebesar 15.2817 m²/g. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Asiri, et.al., 2019, dimana hasil BET dari α -MnO₂ memiliki tipe IV menurut IUPAC.

Pada **gambar 4.11 (b)** ditunjukkan distribusi pori pada kondisi adsorpsi pada volume pori 0.041009 cm³/g dengan ukuran pori sebesar 58.393 Å, sedangkan pada kondisi desorpsi distribusi pori pada volume pori sebesar 0.039047 cm³/g

dengan ukuran pori sebesar 44.250 Å. Dari hasil distribusi pori pada kondisi adsorpsi dan desorpsi, didapatkan α -MnO₂ termasuk dalam mesoporus karena ukuran pori yang dimiliki berada pada rentang 2-50 nm.



Gambar 4.12 Grafik (a) adsorpsi-desorpsi BET dan (b) BJH *method activated carbon*

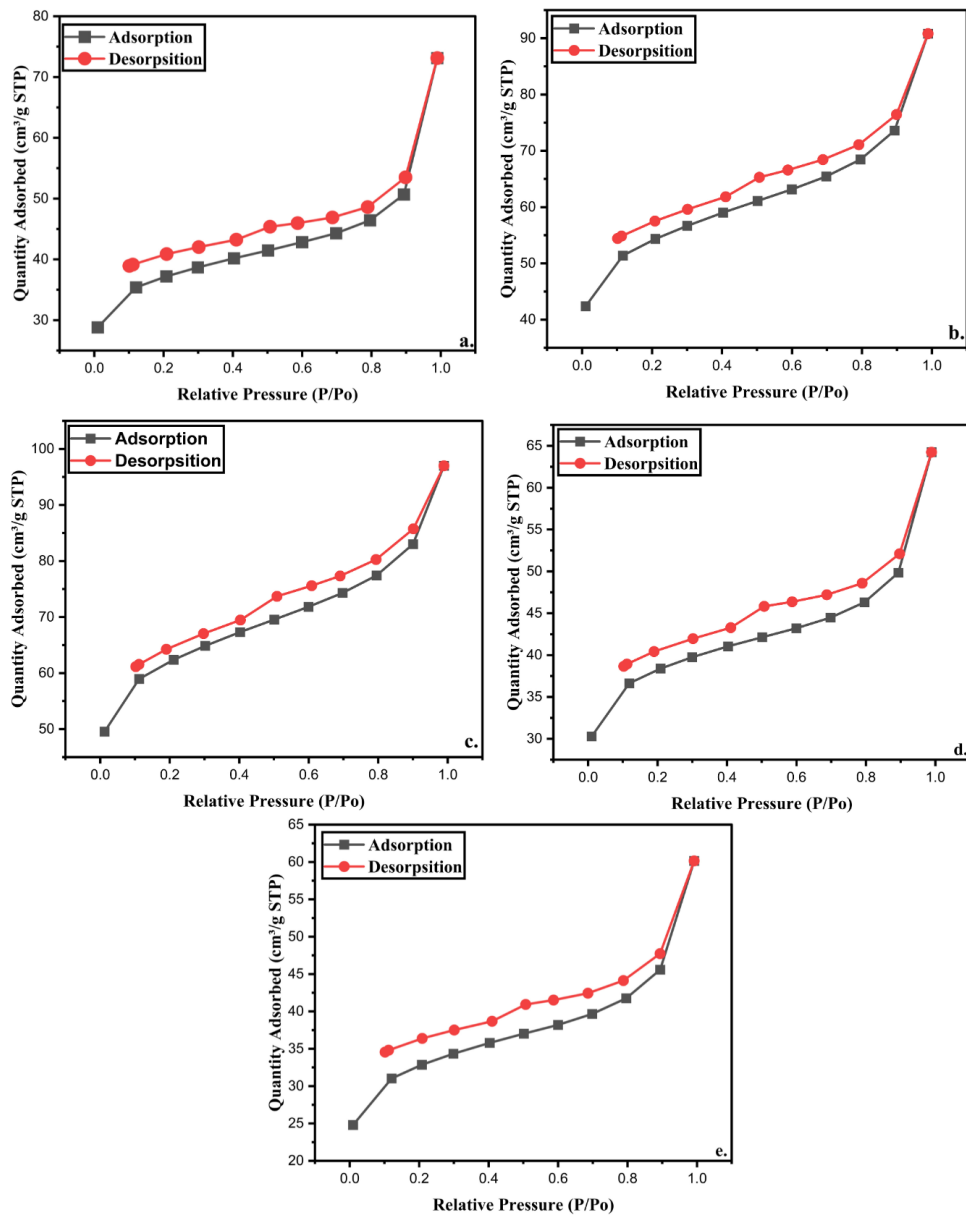
Hasil pengujian BET dan BJH dari material *activated carbon* ditunjukkan pada **gambar 4.12**. Pada **gambar 4.12 (a)** ditunjukkan grafik BET *isotherm* material *activated carbon*. Dari grafik tersebut termasuk ke dalam tipe II dan tipe IV. Tipe II menunjukkan adanya sifat mikropori pada tekanan relatif yang rendah. ketika tekanan dinaikkan, terbentuk *hysteresis loop* yang menunjukkan tipe IV yang dikaitkan dengan adsorpsi monolayer dan multilayer yang disertai dengan adanya kondensasi kapiler. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Gupta, et.al., tahun 2021, dimana dari hasil BET *activated carbon* didapatkan bahwa material tersebut tergolong tipe II dan tipe IV. Dari hasil BET tersebut, didapatkan nilai *surface area* sebesar 373.8361 m²/g.

Pada **gambar 4.12 (b)** ditunjukkan grafik adsorpsi-desorpsi metode BJH. Dari grafik tersebut terlihat bahwa distribusi pori pada kondisi adsorpsi terjadi pada puncak volume pori sebesar 0.11482 cm³/g dengan ukuran pori yang dihasilkan sebesar 14.087 Å dan pada kondisi desorpsi sebesar 0.10864 cm³/g dengan ukuran pori yang dihasilkan sebesar 13.792 Å. Dari hasil distribusi pori pada kondisi adsorpsi dan desorpsi, didapatkan *activated carbon* termasuk dalam mikropori karena ukuran pori yang dimiliki kurang dari rentang 2-50 nm.

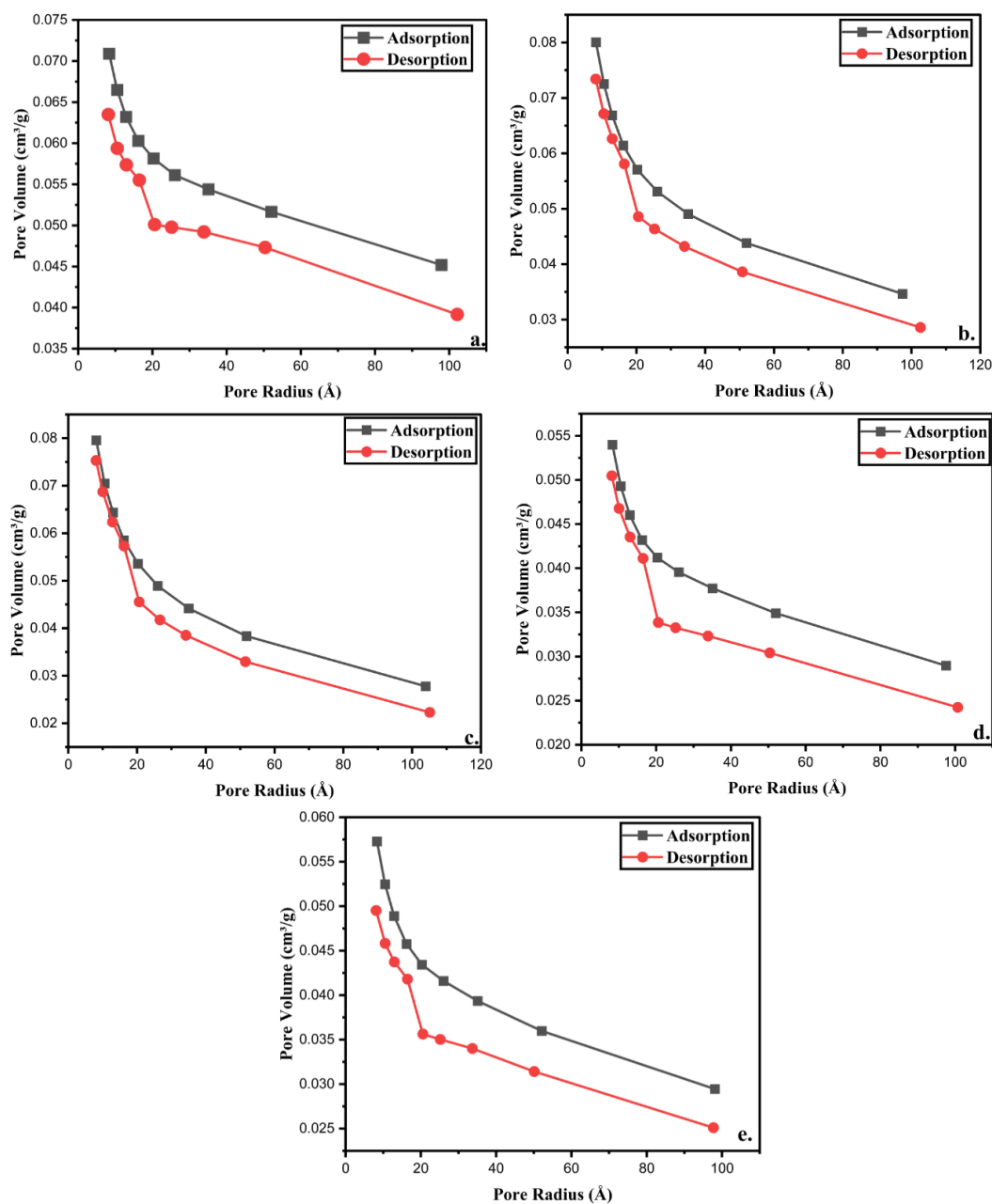
Tabel 4.10 Hasil pengujian BET GO, rGO, α -MnO₂, dan *activated carbon*

Material	Surface Area (m ² /g)	Pore Volume (cm ³ /g)	Pore Size (Å)
GO	151.80	0.15	10.10
rGO	8.0769	0.015910	39.395
α -MnO ₂	15.2817	0.044617	58.393
<i>Activated carbon</i>	373.8361	0.263320	14.087

Hasil pengujian BET material GO, rGO, α -MnO₂, *activated carbon* disajikan pada **tabel 4.10**.



Gambar 4.13 Grafik adsorpsi-desorpsi BET komposit rGO/ α -MnO₂/*activated carbon* (a) 0.25:1:1 10 Jam, (b) 0.5:1:1 10 Jam, (c) 1:1:1 10 Jam, (d) 1:1:1 9 Jam, (e) 1:1:1 8 Jam



Gambar 4.14 Grafik BJH *method* komposit rGO/ α -MnO₂/activated carbon (a) 0.25:1:1 10 Jam, (b) 0.5:1:1 10 Jam, (c) 1:1:1 10 Jam, (d) 1:1:1 9 Jam, (e) 1:1:1 8 Jam

Pada **gambar 4.13** dan **gambar 4.14** ditunjukkan hasil pengujian BET *isotherm* dan BJH dari komposit rGO/ α -MnO₂/activated carbon. Dari **gambar 4.13** terlihat bahwa komposit rGO/ α -MnO₂/activated carbon memiliki bentuk grafik tipe IV menurut IUPAC. Hal ini ditandai dengan adanya *hysteresis loop* pada grafik *isotherm* BET pada tekanan relatif 0.4-0.8 P/P_o. Hasil ini sesuai dengan penelitian

yang dilakukan oleh Manikandan, et.al., pada tahun 2024. Dimana komposit rGO/ α -MnO₂/*activated carbon* memiliki tipe IV.

Pada **gambar 4.14 (a)** ditunjukkan hasil BET metode BJH dari RMA 0.25:1:1 10 Jam. Dari grafik tersebut terlihat bahwa distribusi pori pada kondisi adsorpsi terjadi pada puncak volume pori sebesar 0.070896 cm³/g dengan ukuran pori yang dihasilkan sebesar 20.279 Å dan pada kondisi desorpsi sebesar 0.06349 cm³/g dengan ukuran pori yang dihasilkan sebesar 17.906 Å. Dari hasil distribusi pori pada kondisi adsorpsi dan desorpsi, didapatkan komposit rGO/ α -MnO₂/*activated carbon* 0.25:1:1 10 Jam termasuk dalam mikropori karena ukuran pori yang dimiliki kurang dari rentang 2-50 nm. Hasil *surface area* dari pengujian BET untuk komposit rGO/ α -MnO₂/*activated carbon* 0.25:1:1 10 Jam (RMA-1) sebesar 111.5378 m²/g.

Pada **gambar 4.14 (b)** ditunjukkan hasil BET metode BJH dari RMA 0.5:1:1 10 Jam. Dari grafik tersebut terlihat bahwa distribusi pori pada kondisi adsorpsi terjadi pada puncak volume pori sebesar 0.080045 cm³/g dengan ukuran pori yang dihasilkan sebesar 17.148 Å dan pada kondisi desorpsi sebesar 0.073403 cm³/g dengan ukuran pori yang dihasilkan sebesar 15.975 Å. Dari hasil distribusi pori pada kondisi adsorpsi dan desorpsi, didapatkan komposit rGO/ α -MnO₂/*activated carbon* 0.5:1:1 10 Jam termasuk dalam mikropori karena ukuran pori yang dimiliki kurang dari rentang 2-50 nm. Hasil *surface area* dari pengujian BET untuk komposit rGO/ α -MnO₂/*activated carbon* 0.5:1:1 10 Jam (RMA-2) sebesar 163.8141 m²/g.

Pada **gambar 4.14 (c)** ditunjukkan hasil BET metode BJH dari RMA 1:1:1 10 Jam. Dari grafik tersebut terlihat bahwa distribusi pori pada kondisi adsorpsi terjadi pada puncak volume pori sebesar 0.079577 cm³/g dengan ukuran pori yang dihasilkan sebesar 16.013 Å dan pada kondisi desorpsi sebesar 0.075322 cm³/g dengan ukuran pori yang dihasilkan sebesar 15.183 Å. Dari hasil distribusi pori pada kondisi adsorpsi dan desorpsi, didapatkan komposit rGO/ α -MnO₂/*activated carbon* 1:1:1 10 Jam termasuk dalam mikropori karena ukuran pori yang dimiliki kurang dari rentang 2-50 nm. Hasil *surface area* dari pengujian BET untuk komposit rGO/ α -MnO₂/*activated carbon* 1:1:1 10 Jam (RMA-3) sebesar 187.3787 m²/g.

Pada **gambar 4.14 (d)** ditunjukkan hasil BET metode BJH dari RMA 1:1:1 9 Jam. Dari grafik tersebut terlihat bahwa distribusi pori pada kondisi adsorpsi terjadi pada puncak volume pori sebesar $0.053989 \text{ cm}^3/\text{g}$ dengan ukuran pori yang dihasilkan sebesar $17.390 \text{ \AA}$ dan pada kondisi desorpsi sebesar $0.050474 \text{ cm}^3/\text{g}$ dengan ukuran pori yang dihasilkan sebesar $16.004 \text{ \AA}$. Dari hasil distribusi pori pada kondisi adsorpsi dan desorpsi, didapatkan komposit *rGO/ α -MnO₂/activated carbon* 1:1:1 9 Jam termasuk dalam mikropori karena ukuran pori yang dimiliki kurang dari rentang 2-50 nm. Hasil *surface area* dari pengujian BET untuk komposit *rGO/ α -MnO₂/activated carbon* 1:1:1 9 Jam (RMA-4) sebesar $114.2786 \text{ m}^2/\text{g}$.

Pada **gambar 4.14 (e)** ditunjukkan hasil BET metode BJH dari RMA 1:1:1 8 Jam. Dari grafik tersebut terlihat bahwa distribusi pori pada kondisi adsorpsi terjadi pada puncak volume pori sebesar $0.057276 \text{ cm}^3/\text{g}$ dengan ukuran pori yang dihasilkan sebesar $18.705 \text{ \AA}$ dan pada kondisi desorpsi sebesar $0.049517 \text{ cm}^3/\text{g}$ dengan ukuran pori yang dihasilkan sebesar $17.058 \text{ \AA}$. Dari hasil distribusi pori pada kondisi adsorpsi dan desorpsi, didapatkan komposit *rGO/ α -MnO₂/activated carbon* 1:1:1 8 Jam termasuk dalam mikropori karena ukuran pori yang dimiliki kurang dari rentang 2-50 nm. Hasil *surface area* dari pengujian BET untuk komposit *rGO/ α -MnO₂/activated carbon* 1:1:1 8 Jam (RMA-5) sebesar $99.4845 \text{ m}^2/\text{g}$.

Dari hasil pengujian BET, didapatkan bahwa peningkatan komposisi rGO pada material komposit dapat meningkatkan *surface area* dari material komposit. Hal ini dikarenakan lembaran rGO dapat meningkatkan area aktif serta mencegah penurunan area dari karbon aktif (Fan, K., et.al., 2022). Hasil ini juga didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Syafri, et.al., tahun 2025, dimana penambahan rGO dapat meningkatkan luas area aktif dari material. Peningkatan waktu hidrotermal juga mempengaruhi nilai *surface area* yang dihasilkan. Semakin meningkatnya waktu hidrotermal, dapat meningkatkan *surface area* dari material komposit. Hal ini dikarenakan waktu hidrotermal yang lebih lama menyebabkan pertumbuhan struktur yang lebih optimal. Luas permukaan yang dihasilkan dapat mempengaruhi kapasitansi spesifik dari elektroda. Walaupun hasil *surface area* tertinggi terdapat pada RMA-3, namun kapasitansi spesifik tertinggi dihasilkan oleh

RMA-1. Hal ini dikarenakan peningkatan rasio rGO dapat mengurangi situs aktif dari α -MnO₂ sehingga menyebabkan kontribusi dari pseudokapasitif menurun (Diantoro, et.al., 2022). Hasil *surface area* dari pengujian BET disajikan pada **tabel 4.11**.

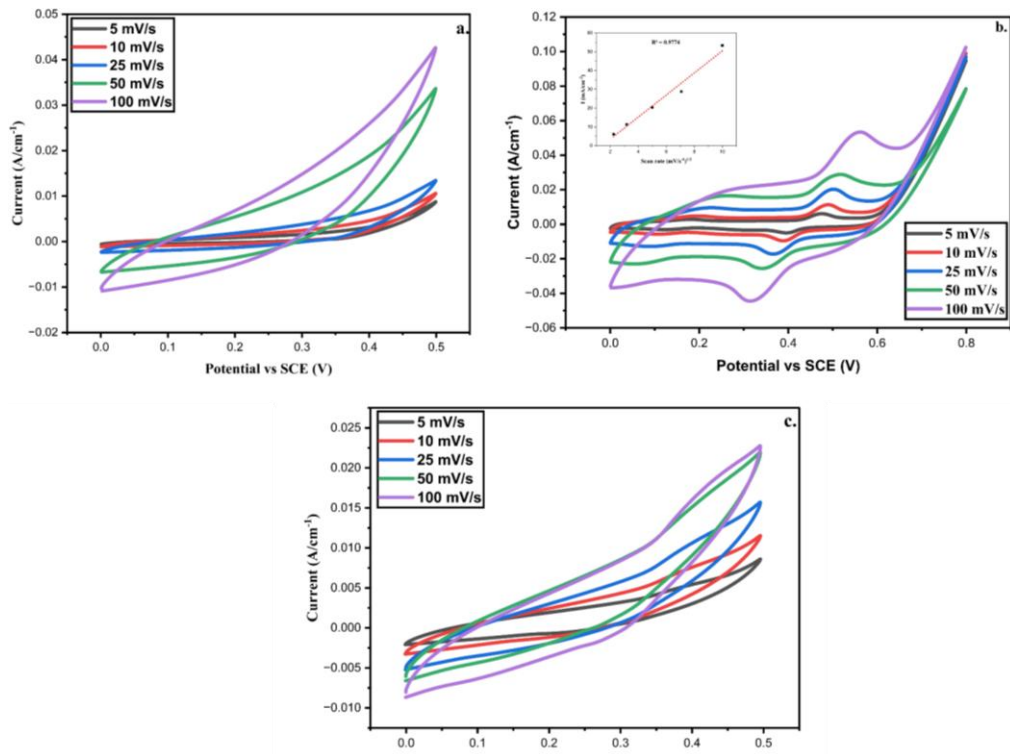
Tabel 4.11 Hasil pengujian BET komposit rGO/ α -MnO₂/*activated carbon*

Material	Surface Area (m ² /g)	Pore Volume (cm ³ /g)	Pore Size (Å)
RMA-1	111.5378	0.113095	20.279
RMA-2	163.8141	0.140450	17.148
RMA-3	187.3787	0.150024	16.013
RMA-4	114.2786	0.099363	17.390
RMA-5	99.4845	0.093041	18.705

4.5 Hasil Pengujian Cyclic Voltammetry

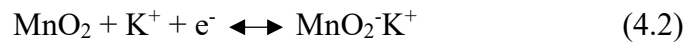
Pengujian *cyclic voltammetry* digunakan untuk menentukan nilai kapasitansi spesifik dari elektroda yang telah disintesis. Pengujian dilakukan pada elektroda rGO, α -MnO₂, *activated carbon* dan komposit rGO/ α -MnO₂/*activated carbon* variasi komposisi rGO dan waktu hidrotermal. Tiga elektroda yang digunakan dalam pengujian ini adalah elektroda SCE sebagai elektroda referensi, grafit sebagai elektroda *counter*, dan sampel elektroda penelitian sebagai elektroda kerja. Larutan yang digunakan adalah KOH 1M dengan pengaturan alat CV pada rentang potensial 0-0.5 V. *Scan rate* yang digunakan adalah 5 mV/s, 10 mV/s, 25 mV/s, 50 mV/s, dan 100 mV/s.

Pada **Gambar 4.15** ditunjukkan hasil pengujian CV dari material rGO, α -MnO₂, dan *activated carbon*. Pada grafik cv rGO dan *activated carbon* pada **Gambar 4.15 (a)** dan **(c)** diperlihatkan bentuk kuasi persegi panjang yang merupakan ciri khas dari material EDLC. Grafik cv rGO terlihat memiliki bentuk kurva yang kecil, dikarenakan ion OH⁻ dari KOH yang menginduksi adanya reaksi evolusi oksigen (Hazwani, N., et.al., 2025). Pada grafik cv *activated carbon*, diperlihatkan bentuk yang hampir persegi panjang dan bentuk-bentuk yang berbeda-beda pada setiap *scan rate*. Hal ini dikarenakan, pada *scan rate* tinggi menyebabkan ion dari elektrolit tidak mempunyai cukup waktu untuk bereaksi pada permukaan material aktif, sehingga membatasi proses terbentuknya *double layer* pada material aktif dengan baik (Yunita, et.al., 2023).



Gambar 4.15 Hasil pengujian *cyclic voltammetry* (a) rGO, (b) α -MnO₂, dan (c) *activated carbon*

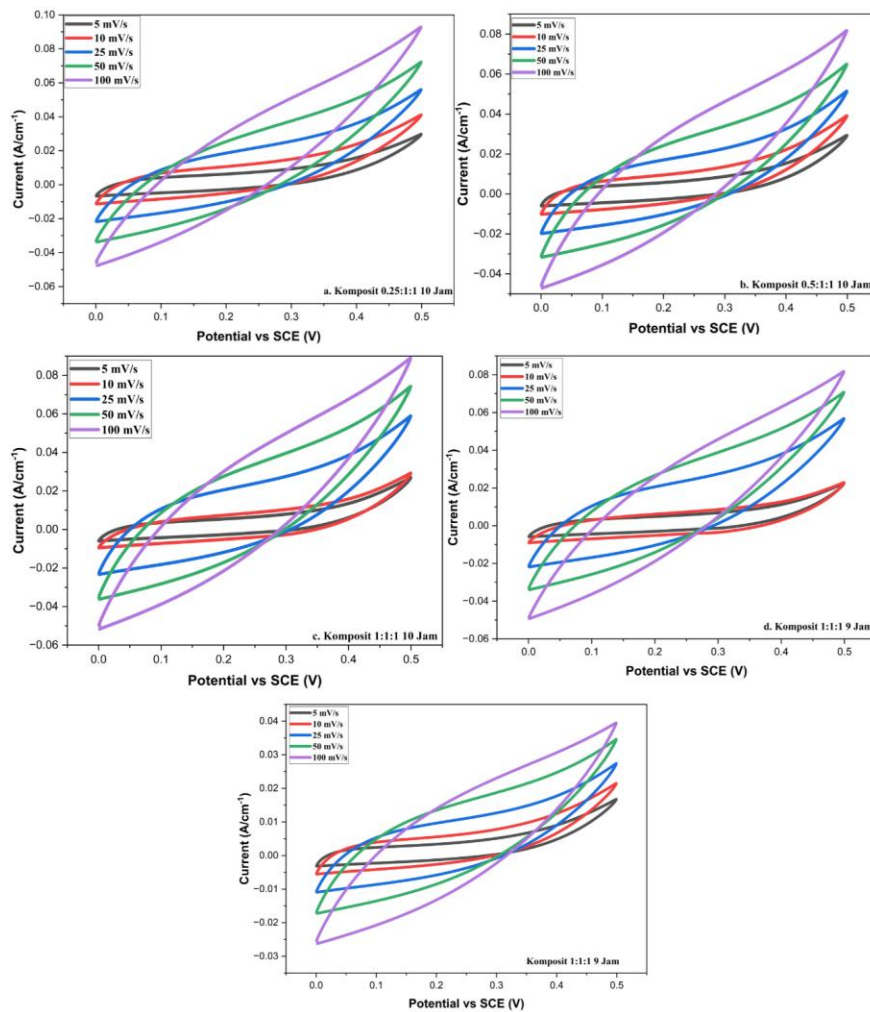
Pada **Gambar 4.15 (b)** ditunjukkan hasil cv dari material α -MnO₂, pada grafik tersebut diperlihatkan bahwa terbentuk puncak anodik dan katodik yang dihasilkan dari reaksi redoks *faradaic* dan interkalasi dari α -MnO₂ yang terjadi dalam elektroda. Reaksi *faradaic* dan interkalasi dari α -MnO₂ ditunjukkan pada **persamaan 4.2**



Reaksi elektrokimia yang terjadi pada α -MnO₂ dengan menggunakan elektrolit KOH melibatkan proses adsorpsi dan desorpsi dari ion K⁺ pada permukaan α -MnO₂. Proses interkalasi dan deinterkalasi dari ion elektrolit di dalam struktur nanowire α -MnO₂. Puncak redoks yang muncul disebabkan oleh adanya difusi elektrolit ke dalam material elektroda (Joseph, A., et.al., 2024). Pada *scan rate* 5 mV.s⁻¹, dapat dilihat puncak anodik dan katodik berada pada 0.4794 V dan 0.3958 V, sehingga diperoleh nilai selisih potensial puncak (ΔE_p) sebesar 0.07914

V. Pada *scan rate* 100 mV.s^{-1} , didapatkan nilai puncak anodik dan katodik sebesar 0.5624 V dan 0.3134 V, sehingga diperoleh nilai selisih potensial puncak (ΔE_p) sebesar 0.2489 V. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi pergeseran puncak anodik ke potensial yang lebih tinggi, sedangkan puncak katodik bergeser ke potensial yang lebih rendah sehingga menyebabkan nilai ΔE_p meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa proses elektrokimia yang terjadi pada $\alpha\text{-MnO}_2$ bersifat quasi-reversibel. Hal ini didukung juga oleh nilai rasio antara puncak anodik dan katodik, dimana sistem elektrokimia dikatakan reversibel jika nilainya mendekati satu (Aoki, et.al., 2020). Pada hasil cv $\alpha\text{-MnO}_2$ didapatkan nilai rasio puncak anodik dan katodiknya sebesar 1.2 V.

Nilai puncak anodik dan katodik (ΔE_p) dapat digunakan untuk menghitung nilai transfer elektron yang terlibat dengan menggunakan persamaan $58/n \text{ mV}$ pada 25°C . Berdasarkan nilai ΔE_p yang didapatkan, nilai elektron transfer dari sistem elektrokimia tersebut berapa pada kisaran 0.23 hingga 0.73, yang lebih kecil dari 1, sehingga menegaskan sifat quasi-reversibel proses redoks yang terjadi pada $\alpha\text{-MnO}_2$.

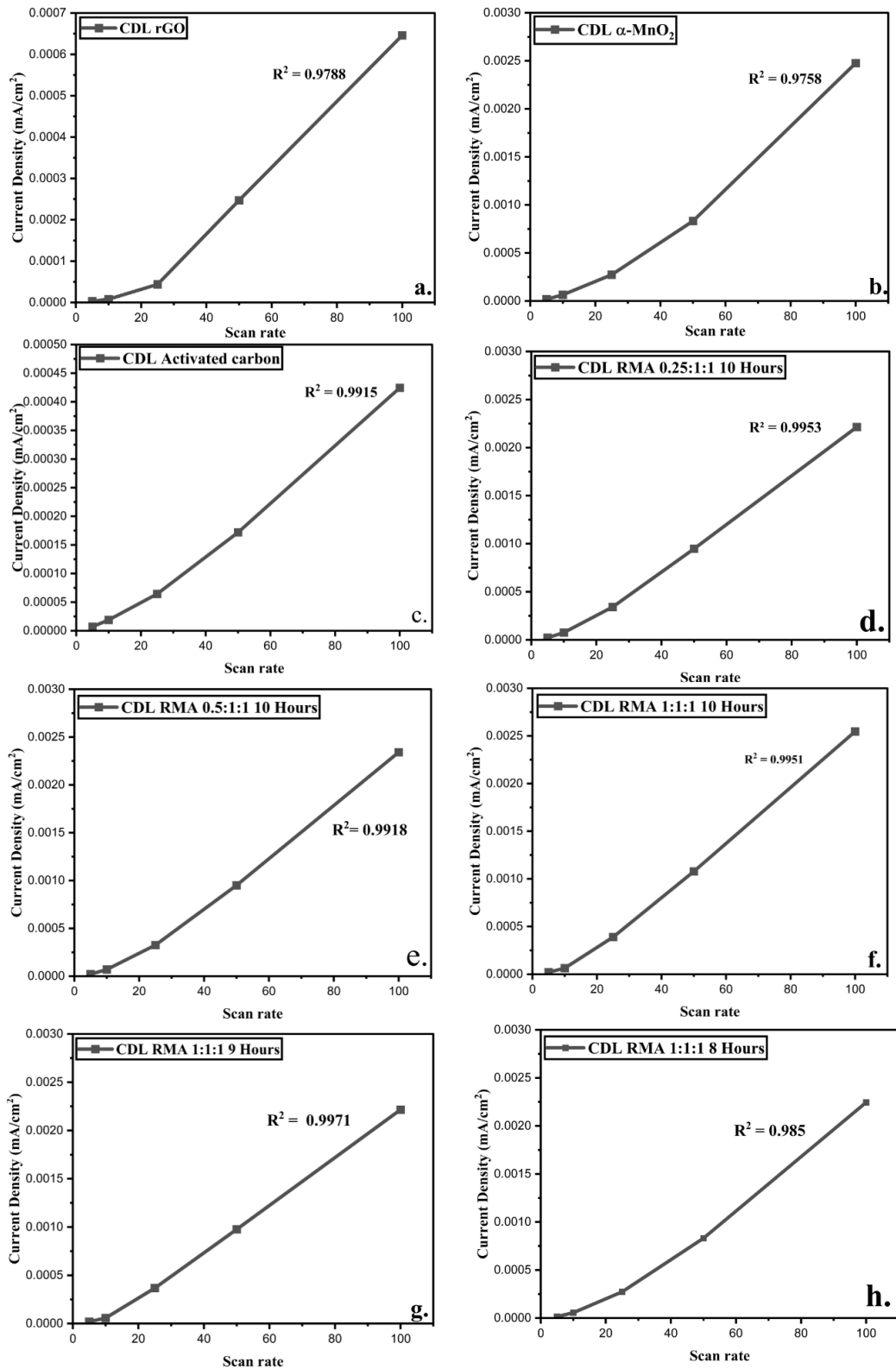


Gambar 4.16 Hasil pengujian *cyclic voltammetry* komposit rGO/ α -MnO₂/activated carbon (a) 0.25:1:1 10 Jam, (b) 0.5:1:1 10 Jam, (c) 1:1:1 10 Jam, (d) 1:1:1 9 Jam, (e) 1:1:1 8 Jam

Pada **Gambar 4.16** ditunjukkan hasil pengujian cv dari komposit rGO/ α -MnO₂/activated carbon variasi komposisi rGO dan waktu hidrotermal. Kurva yang dihasilkan menunjukkan bahwa rGO/ α -MnO₂/activated carbon memiliki bentuk gabungan antara EDLC dan pseudokapasitor. Terlihat bahwa adanya sedikit puncak redoks yang menandakan adanya α -MnO₂ sebagai pseudokapasitor. Pada kurva cv, diperlihatkan bahwa *scan rate* mempengaruhi luas permukaan. Dimana, semakin kecil *scan rate* yang digunakan, maka kurva yang dihasilkan memiliki luas area yang kecil sehingga dapat menghasilkan nilai kapasitansi spesifik yang besar. Hal ini dikarenakan waktu yang dibutuhkan untuk ion-ion elektrolit dapat berdifusi ke dalam elektroda sehingga dapat mempengaruhi luas area dan kapasitansi spesifik

yang dihasilkan. *Scan rate* juga dapat mempengaruhi nilai spesifik energi dan spesifik daya yang dihasilkan, dimana semakin kecil *scan rate* maka nilai spesifik energi dan spesifik daya yang dihasilkan akan menurun (Andrameda, Y. A., et.al., 2018). Dari hasil pengujian cv, didapatkan bahwa penambahan rasio rGO menurunkan luasan kurva cv. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan massa rGO menurunkan nilai *current rate* yang dihasilkan. Dengan penambahan waktu hidrotermal didapatkan bahwa semakin lama waktu hidrotermal, maka luasan kurva cv meningkat dan nilai *current rate* juga meningkat.

Hasil pengujian cv juga dapat digunakan untuk menghitung nilai *capacitance double layer* (CDL) dan *electrochemical surface area* (ECSA) dari masing-masing material komposit. Perhitungan CDL dilakukan dengan membagi nilai antara *current anodic* dan *current cathodic* pada kurva cv seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.17**. Pada rGO yang ditunjukkan pada **Gambar 4.17 (a)**, didapatkan nilai CDL nya sebesar 0.0655 F/cm^2 dan nilai ECSA sebesar 1637.69 cm^2 . Pada $\alpha\text{-MnO}_2$ yang ditunjukkan pada **Gambar 4.17 (b)**, didapatkan nilai CDL nya sebesar 0.2148 F/cm^2 dan nilai ECSA sebesar 5371.50 cm^2 . Pada *activated carbon* yang ditunjukkan pada **Gambar 4.17 (c)**, didapatkan nilai CDL nya sebesar 0.0284 F/cm^2 dan nilai ECSA sebesar 710.30 cm^2 . Pada komposit rGO/ $\alpha\text{-MnO}_2$ /*activated carbon* komposisi 0.25:1:1 10 jam yang ditunjukkan pada **Gambar 4.17 (d)**, didapatkan nilai CDL nya sebesar 0.1761 F/cm^2 dan nilai ECSA sebesar 4403.25 cm^2 . Nilai CDL dan ECSA yang dihasilkan komposit rGO/ $\alpha\text{-MnO}_2$ /*activated carbon* komposisi 0.5:1:1 10 jam pada **Gambar 4.17 (e)** sebesar 0.1953 F/cm^2 dan 4482.43 cm^2 . Pada komposit rGO/ $\alpha\text{-MnO}_2$ /*activated carbon* komposisi 1:1:1 10 jam pada **Gambar 4.17 (f)**, didapatkan nilai CDL nya sebesar 0.2190 F/cm^2 dan nilai ECSA sebesar 5474.83 cm^2 . Pada komposit rGO/ $\alpha\text{-MnO}_2$ /*activated carbon* komposisi 1:1:1 9 jam pada **Gambar 4.17 (g)**, didapatkan nilai CDL nya sebesar 0.1866 F/cm^2 dan nilai ECSA sebesar 4666.05 cm^2 . Pada komposit rGO/ $\alpha\text{-MnO}_2$ /*activated carbon* komposisi 1:1:1 8 jam pada **Gambar 4.17 (h)**, didapatkan nilai CDL nya sebesar 0.1974 F/cm^2 dan nilai ECSA sebesar 4933.78 cm^2 .



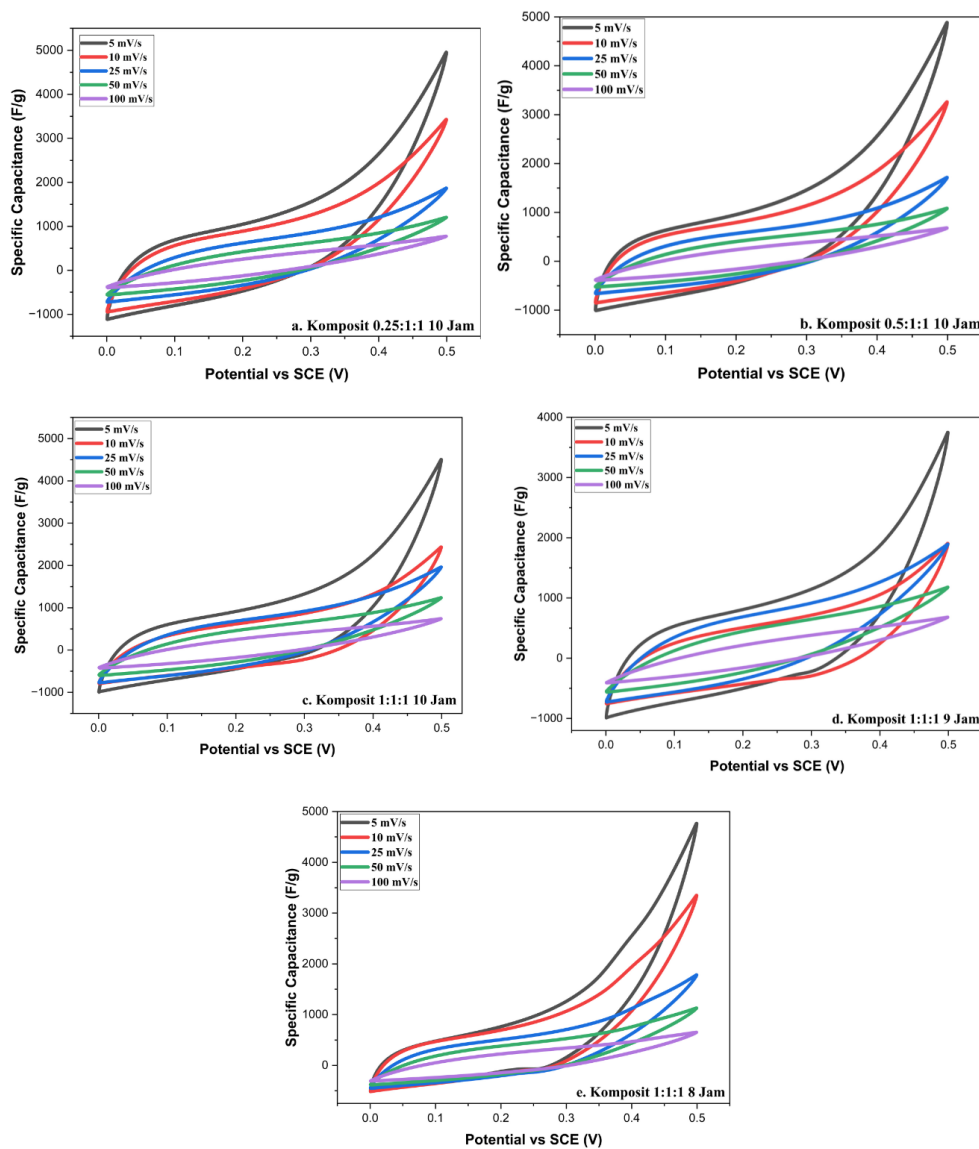
Gambar 4.17 Grafik *anodic* dan *cathodic* (a) rGO, (b) α -MnO₂, (c) *activated carbon*, (d) RMA-1, (e) RMA-2, (f) RMA-3, (g) RMA-4, (h) RMA-5

Dari hasil perhitungan CDL dan ECSA diatas didapatkan bahwa penambahan komposisi rGO dan waktu hidrotermal, meningkatkan nilai CDL dan ECSA. Nilai CDL dan ECSA meningkat seiring dengan penambahan rasio komposisi rGO, karena rGO dapat memberikan luas permukaan elektroaktif dan konduktivitas listrik yang lebih tinggi (Choi, J.K, et.al., 2020). Namun, hasil tersebut tidak selaras dengan kapasitansi spesifik yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan, penambahan rGO yang semakin banyak dapat menurunkan peran α -MnO₂ sebagai pseudokapasitansi sehingga menurunkan nilai kapasitansi spesifik yang dihasilkan meskipun nilai CDL dan ECSA nya meningkat seiring dengan peningkatan komposisi rGO (Wu, D., et.al., 2020). Pada variasi waktu hidrotermal, didapatkan bahwa semakin meningkatnya waktu hidrotermal dapat meningkatkan nilai cdl dan ecsa. Hal ini dikarenakan, pertumbuhan MnO₂ pada permukaan rGO/AC menjadi lebih optimal sehingga meningkatkan luas permukaan elektroaktif (ECSA). Peningkatan ECSA ini berbanding lurus dengan kenaikan nilai Cdl, yang mencerminkan bertambahnya kontribusi kapasitansi lapisan ganda. Akibatnya, kapasitansi spesifik total meningkat sebagai hasil sinergi antara mekanisme kapasitansi lapisan ganda dan pseudokapasitansi MnO₂ (Ilcheva, V., et.al., 2025).

Tabel 4.12 Hasil perhitungan CDL dan ECSA

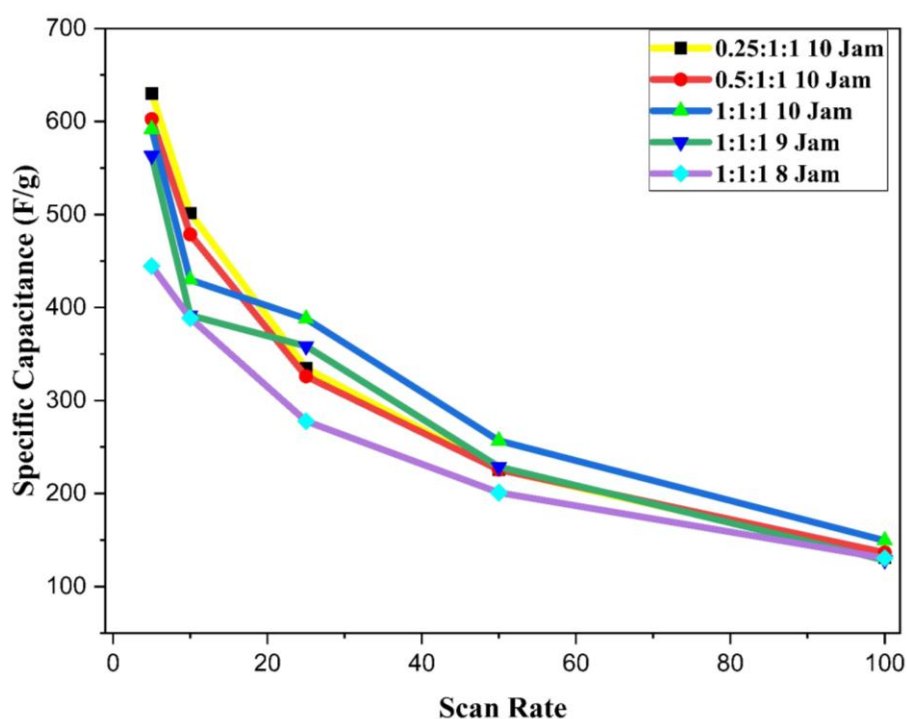
Material	CDL (F/cm²)	ECSA (cm²)
rGO	0.00698	174.64
α- MnO₂	0.02613	653.29
<i>Activated carbon</i>	0.00444	111.01
RMA-1	0.02343	585.92
RMA-2	0.02482	620.63
RMA-3	0.02707	676.86
RMA-4	0.02355	588.92
RMA-5	0.01841	460.47

Data perhitungan CDL dan ECSA dari masing-masing material, disajikan pada **Tabel 4.12**.



Gambar 4.18 Hasil pengujian *cyclic voltammetry* kapasitansi spesifik vs potensial komposit rGO/ α -MnO₂/activated carbon (a) 0.25:1:1 10 Jam, (b) 0.5:1:1 10 Jam, (c) 1:1:1 10 Jam, (d) 1:1:1 9 Jam, (e) 1:1:1 8 Jam

Pada **Gambar 4.18** menunjukkan kurva yang mempresentasikan *potential window* vs kapasitansi spesifik. Pada kurva, didapatkan bahwa pada elektroda RMA 0.25:1:1 memiliki kapasitansi spesifik yang tinggi dibandingkan dengan elektroda variasi rasio lainnya. Sedangkan pada variasi waktu hidrotermal, didapatkan bahwa pada elektroda RMA dengan waktu 10 jam, memiliki nilai kapasitansi spesifik tertinggi.



Gambar 4.19 Kapasitansi spesifik elektroda komposit komposit rGO/ α -MnO₂/activated carbon

Pada **Gambar 4.19** ditunjukkan kurva *scan rate* vs *specific capacitance*. Dari kurva didapatkan bahwa nilai kapasitansi menurun seiring meningkatnya *scan rate*. Hal ini dikarenakan, tidak cukupnya waktu bagi ion-ion dapat berdifusi dalam elektroda untuk membentuk *double layer* sehingga luas permukaan yang dihasilkan kecil ketika *scan rate* meningkat (Lu, T., et.al., 2011). Pada variasi komposisi 0.25:1:1 dengan waktu 10 jam, nilai kapasitansi spesifik pada *scan rate* 5 mV/s, 10 mV/s, 25 mV/s, 50 mV/s, dan 100 mV/s berturut-turut adalah 630.23 F/g, 501.5 F/g, 334.6 F/g, 225.81 F/g, 131.30 F/g. Pada variasi komposisi 0.5:1:1 dengan waktu 10 jam, nilai kapasitansi spesifik pada *scan rate* 5 mV/s, 10 mV/s, 25 mV/s, 50 mV/s, dan 100 mV/s berturut-turut adalah 602.55 F/g, 478.68 F/g, 326.06 F/g, 225.67 F/g, 136.51 F/g. Pada variasi komposisi 1:1:1 dengan waktu 10 jam, nilai kapasitansi spesifik pada *scan rate* 5 mV/s, 10 mV/s, 25 mV/s, 50 mV/s, dan 100 mV/s berturut-turut adalah 591.80 F/g, 429.81 F/g, 387.90 F/g, 256.82 F/g, 149.50 F/g. Pada variasi komposisi 1:1:1 dengan waktu 9 jam, nilai kapasitansi spesifik pada *scan rate* 5 mV/s, 10 mV/s, 25 mV/s, 50 mV/s, dan 100 mV/s berturut-turut adalah 563.27 F/g, 391.59 F/g, 358.47 F/g, 228.68 F/g, 128.48 F/g. Pada variasi

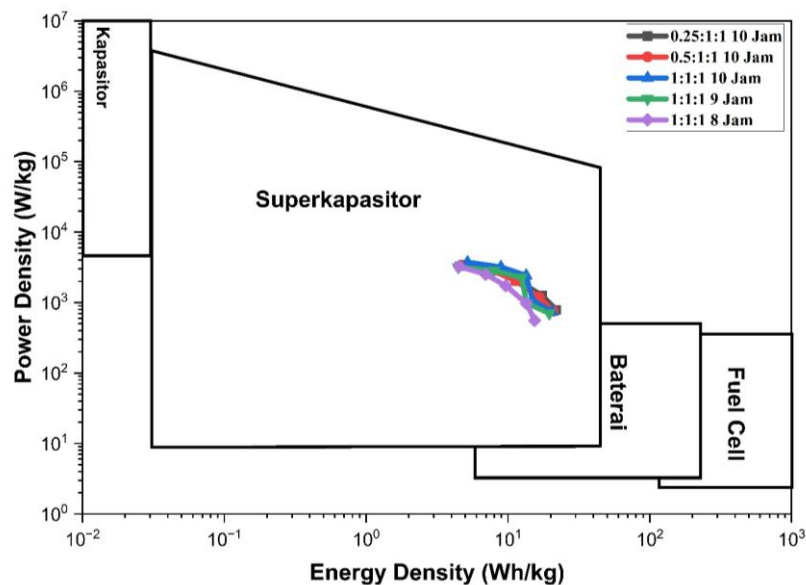
komposisi 1:1:1 dengan waktu 8 jam, nilai kapasitansi spesifik pada *scan rate* 5 mV/s, 10 mV/s, 25 mV/s, 50 mV/s, dan 100 mV/s berturut-turut adalah 307.98 F/g, 245.52 F/g, 167.16 F/g, 117.18 F/g, 80.56 F/g.

Tabel 4.13 Hasil perhitungan kapasitansi spesifik (Cs), *specific energy density* (E), dan *specific power density* (P)

Elektroda	Scanrate	Specific Capacitance (F/g)	Specific Energy Density(Wh/kg)	Specific Power Density (W/Kg)
rGO	5	83.56	2.90	104.55
	10	69.74	2.42	174.42
	25	47.35	1.64	296.08
	50	62.26	2.16	778.21
	100	40.35	1.40	1008.69
α -MnO ₂	5	369.76	32.87	739.98
	10	322.26	28.65	1289.84
	25	256.65	22.81	2567.26
	50	215.09	19.12	4301.87
	100	160.18	14.24	6407.09
Activated Carbon	5	200.95	6.98	251.56
	10	156.84	5.45	392.69
	25	84.30	2.93	528.21
	50	68.07	2.36	854.33
	100	36.54	1.27	918.19
RMA-1	5	630.23	21.88	788.58
	10	501.5	44.58	3211.21
	25	334.6	29.74	5356.29
	50	225.81	20.07	7229.76
	100	131.30	11.67	8403.80
RMA-2	5	602.55	20.92	753.56
	10	478.68	16.62	1197.31
	25	326.06	11.32	2038.90
	50	225.67	7.84	2822.25
	100	136.51	4.74	3412.74
RMA-3	5	591.80	20.55	740.12
	10	429.81	14.92	1075.06
	25	387.90	13.47	2425.59
	50	256.82	8.92	3211.82
	100	149.50	5.19	3737.53
RMA-4	5	563.27	19.56	704.44
	10	391.59	13.60	979.47
	25	358.47	12.45	2241.54
	50	228.68	7.94	2859.98

Elektroda	Scanrate	Specific Capacitance (F/g)	Specific Energy Density(Wh/kg)	Specific Power Density (W/Kg)
	100	128.48	4.46	3211.90
RMA-5	5	444.62	15.44	556.05
	10	388.70	13.50	972.24
	25	277.88	9.65	1737.64
	50	201.02	6.98	2513.97
	100	130.45	4.53	3261.28

Pada **Tabel 4.13**, disajikan data lengkap dari hasil pengujian cv berupa hasil perhitungan kapasitansi spesifik, *specific energy density*, dan *specific power density*. Perhitungan nilai kapasitansi spesifik dihitung menggunakan **persamaan [3.3]**, perhitungan *specific energy density* menggunakan **persamaan [3.4]**, dan perhitungan *specific power density* menggunakan **persamaan [3.5]**.



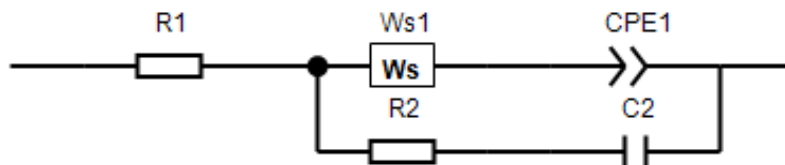
Gambar 4.20 Ragone plot elektroda superkapasitor komposit rGO/ α -MnO₂/activated carbon variasi komposisi dan waktu hidrotermal

Pada **Gambar 4.20** ditunjukkan plot ragone yang menunjukkan hubungan antara densitas energi dan densitas daya dari elektroda komposit rGO/ α -MnO₂/activated carbon yang telah dianalisis. Dari plot ragone tersebut, diperlihatkan bahwa elektroda komposit rGO/ α -MnO₂/activated carbon pada

penelitian ini berada di area superkapasitor karena energi dan densitas daya yang dihasilkan sesuai dengan karakteristik yang dimiliki oleh superkapasitor.

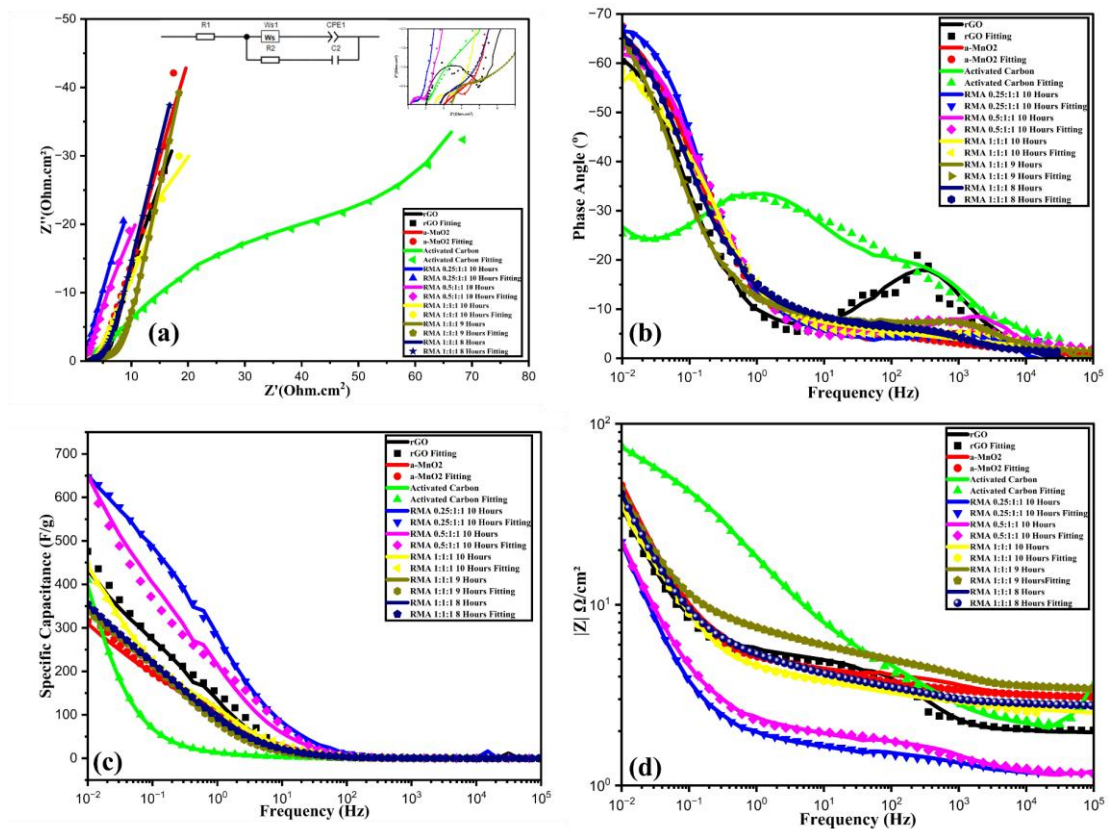
4.6 Hasil Pengujian EIS

Pengujian EIS dilakukan untuk menghitung nilai impedansi dalam frekuensi tertentu serta mengevaluasi sifat kapasitif dari suatu material. Sifat kapasitif dari suatu material dapat diidentifikasi melalui kurva *Nyquist* yang menggambarkan hubungan Z_{real} (Z') pada sumbu x dan Z imajiner daerah frekuensi rendah. Untuk mengetahui nilai konduktivitas dari suatu elektroda, dapat diperoleh dengan menggunakan sirkuit ekuivalen yang ditunjukkan pada **Gambar 4.21**.



Gambar 4.21 *Equivalent circuit*

Rangkaian sirkuit ekuivalen dimulai dengan proses munculnya resistansi dalam larutan elektrolit yang ditunjukkan dengan R1. Kemudian, pada Ws1 terjadi difusi ion elektrolit di material yang berlangsung bersamaan dengan adanya resistansi dalam material yang terjadi pada R2. Selanjutnya, pada CPE1 dan C2 terjadi proses penyimpanan muatan. Pada CPE1 berfungsi sebagai kapasitor dan resistor, sedangkan pada C2 berfungsi sebagai kapasitor.



Gambar 4.22 Grafik (a) *Plot nyquist*, (b) frekuensi vs *phase angle*, (c) frekuensi vs *specific capacitance*, dan (d) *bode plot*

Pada **Gambar 4.22 (a)**, ditunjukkan *plot nyquist* material rGO, α -MnO₂, *activated carbon*, dan komposit rGO/ α -MnO₂/*activated carbon* variasi waktu dan komposisi rGO. *Plot nyquist*, menunjukkan hasil pengujian elektroda material, dengan garis yang merepresentasikan data pengujian serta bentuk geometris mewakili hasil *fitting* menggunakan sirkuit ekuivalen. Pada *plot nyquist* terbentuk pola setengah lingkaran pada frekuensi tinggi yang mengindikasikan adanya proses redoks yang terjadi dan adanya proses resistensi transfer muatan (Grindal, A, et.al., 2024). Dari *plot nyquist* tersebut, dapat dilihat bahwa RMA 0.25:1:1 10 jam memiliki nilai resistansi yang paling rendah dibandingkan dengan variasi komposit yang lain. Hal ini menandakan bahwa RMA 0.25:1:1, memiliki nilai kapasitansi spesifik yang lebih baik dibandingkan dengan komposit variasi yang lain. Selain itu, RMA 0.25:1:1 10 Jam, memiliki nilai theta yang mendekati 90°, diikuti oleh RMA 1:1:1 8 jam, RMA 1:1:1 9 jam, RMA 0.5:1:1 10 jam, dan RMA 1:1:1 10 jam. Walaupun nilai theta dari komposit 1:1:1 8 jam lebih mendekati nilai 90°, namun

nilai Z'' dan $|Z|$ yang dihasilkan lebih besar. Berbanding terbalik dengan RMA 1:1:1 10 jam, RMA 0.5:1:1 10 jam, dan RMA 1:1:1 9 jam, dimana nilai Z'' dan $|Z|$ yang dihasilkan kecil walaupun theta yang dihasilkan tidak terlalu mendekati 90° . Hal ini menunjukkan bahwa, sudut yang dihasilkan tidak mempengaruhi nilai Z'' yang dihasilkan, namun hanya menunjukkan elektroda bersifat kapasitif. Nilai Z'' cenderung menjadi tak terhingga ketika frekuensi mendekati 0 (Lazanas, A. C., et.al., 2023). Ketika nilai Z'' yang dihasilkan besar, maka nilai $|Z|$ yang dihasilkan juga besar. Hasil ini searah dengan hasil yang ditunjukkan pada pengujian cv yang telah dilakukan.

Pada **gambar 4.22 (b)** ditunjukkan kurva frekuensi dan *phase angle* dari elektroda material tunggal dan komposit rGO/ α -MnO₂/*activated carbon*. Dari grafik ditunjukkan bahwa RMA 0.25:1:1 10 jam memiliki nilai theta yang mendekati 90° sebesar 66.57° , diikuti oleh RMA 1:1:1 8 jam sebesar 65.97° , RMA 1:1:1 9 jam sebesar 64.76° , RMA 0.5:1:1 10 jam sebesar 61.85° , dan RMA 1:1:1 10 jam sebesar 58.12° . Frekuensi ketika $\theta^\circ = 45^\circ$ menunjukkan respon dari frekuensi terhadap sifat kapasitif dari material. Frekuensi yang mendekati atau sesuai dengan nilai $\theta^\circ = 45^\circ$ menandakan titik keseimbangan antara komponen impedansi resistif dan kapasitif yang seimbang, sehingga dapat menyebabkan pergeseran perilaku menjadi ke arah yang lebih resistif pada superkapasitor (Qashqay, M., et.al., 2024). Frekuensi tersebut menunjukkan waktu relaksasi dari material, dimana semakin besar frekuensi yang dihasilkan, maka semakin cepat respon *capacitive rate*-nya. Dari kurva tersebut didapatkan waktu relaksasi dari masing-masing variasi komposit RMA-1, RMA-2, RMA-3, RMA-4, RMA-5 secara berturut turut sebesar 10.60 s, 10.60 s, 15.64 s, 19.65 s, 19.26 s.

Pada **gambar 4.22 (d)** ditunjukkan *bode plot* yang merepresentasikan frekuensi vs $|Z|$. Dari *bode plot* didapatkan nilai $|Z|$ dari masing-masing elektroda komposit rGO/ α -MnO₂/*activated carbon*. Nilai $|Z|$ yang didapatkan dari elektroda RMA 0.25:1:1 10 jam sebesar $22.16 \Omega \cdot \text{cm}^2$, elektroda RMA 0.5:1:1 10 jam sebesar $22.56 \Omega \cdot \text{cm}^2$, elektroda RMA 1:1:1 10 jam sebesar $35.33 \Omega \cdot \text{cm}^2$, elektroda RMA 1:1:1 9 jam sebesar $43.33 \Omega \cdot \text{cm}^2$, elektroda RMA 1:1:1 8 jam sebesar $41.13 \Omega \cdot \text{cm}^2$. jika nilai $|Z|$ semakin besar maka konduktivitasnya semakin kecil.

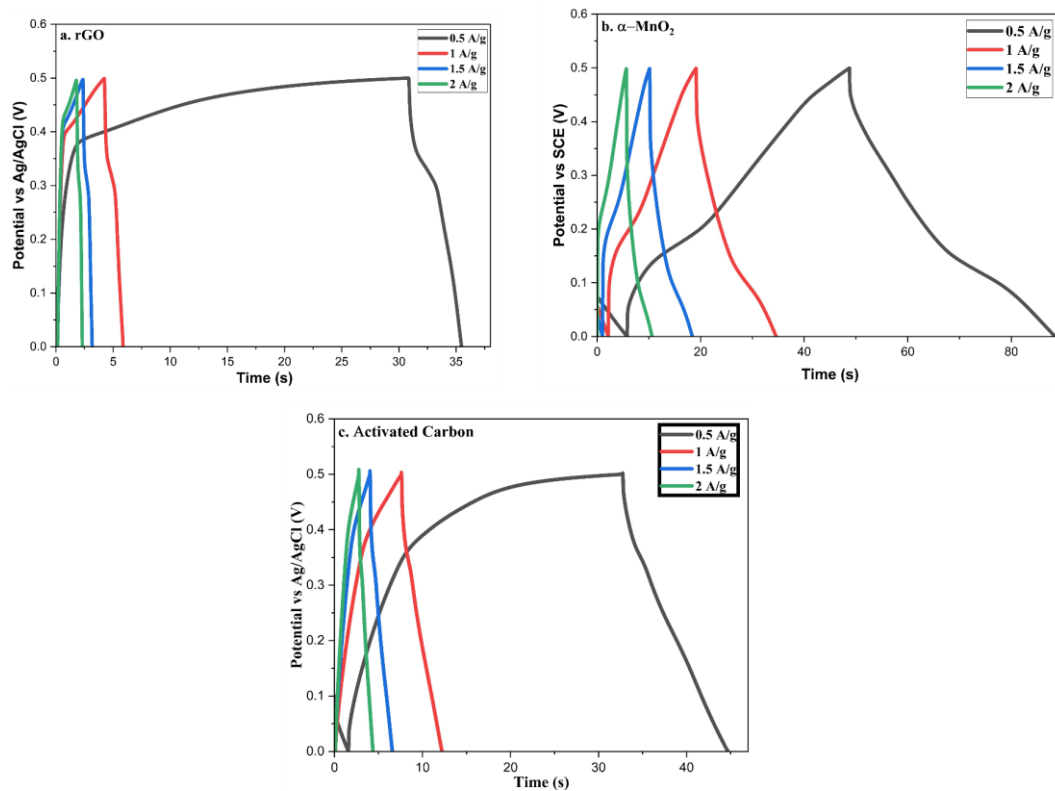
Tabel 4.14 Hasil nilai *specific capacitance* pada pengujian EIS

Sampel	Frekuensi (Hz)	Θ (°)	$ Z $ ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	σ (S/m)	Specific Capacitance (F/g)
rGO	0.01	60.87	35.16	0.284	432.09
α -MnO ₂	0.01	65.39	47.1	0.212	309.89
Activated carbon	0.01	39.11	213.9	0.047	98.36
RMA-1	0.01	66.57	22.16	0.451	652.39
RMA-2	0.01	61.85	22.56	0.443	647.95
RMA-3	0.01	57.85	35.33	0.283	449.21
RMA-4	0.01	64.76	43.43	0.230	337.73
RMA-5	0.01	65.97	41.13	0.243	353.29

Pada **Gambar 4.22 (c)** ditunjukkan kurva plot EIS frekuensi vs *specific capacitance*. Dari kurva tersebut terlihat bahwa pada frekuensi yang tinggi, nilai *specific capacitance* menjadi lebih kecil dan pada frekuensi yang rendah, didapatkan nilai *specific capacitance* yang tinggi. Pada kurva tersebut, didapatkan bahwa komposit rGO/ α -MnO₂/activated carbon dengan variasi 0.25:1:1 10 jam memiliki nilai kapasitansi yang tinggi dibandingkan dengan variasi komposisi yang lain. Sedangkan pada variasi waktu, pada komposit rGO/ α -MnO₂/activated carbon dengan variasi 1:1:1 10 jam memiliki nilai kapasitansi spesifik tertinggi dibandingkan dengan variasi waktu hidrotermal yang lain. Hasil ini selaras dengan hasil pengujian *cyclic voltammetry* yang telah dilakukan. Hasil pengujian EIS, disajikan pada **Tabel 4.14**.

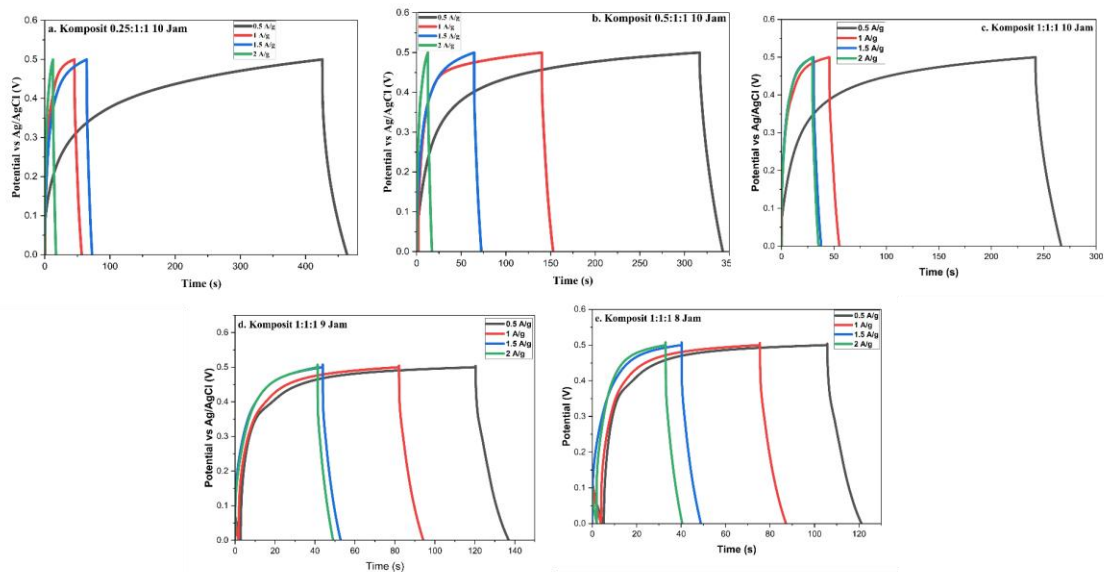
4.7 Hasil Pengujian GCD

Pengujian GCD dilakukan untuk mengukur kemampuan penyimpanan energi dan sifat kapasitif dari material yang ditunjukkan oleh waktu *discharge* ketika diberikan arus tertentu, dan diperoleh grafik hubungan antara potensial vs waktu.



Gambar 4.23 Hasil pengujian *Galvanostatic Charge-Discharge* (GCD) (a) rGO, (b) α -MnO₂, (c) *activated carbon*

Pada **gambar 4.23**, ditunjukkan hasil pengujian GCD pada material rGO, α -MnO₂, dan *activated carbon*. Pada ketiga material, terlihat bentuk kurva yang dihasilkan hampir mendekati bentuk segitiga simetri, yang menandakan bahwa kurva yang memiliki sifat reversibel yang baik dan perilaku kapasitif material (Manikandan, M., et.al, 2024).



Gambar 4.24 Hasil pengujian *Galvanostatic Charge-Discharge* (GCD) sampel elektroda RMA (a) 0.25:1:1 10 Jam, (b) 0.5:1:1 10 Jam, (c) 1:1:1 10 Jam, (d) 1:1:1 9 Jam, (e) 1:1:1 8 Jam

Hasil pengujian GCD untuk material komposit, ditunjukkan pada **Gambar 4.24**. Dari kurva GCD yang dihasilkan, terlihat bahwa kurva yang terbentuk merupakan segitiga tidak simetris. Hal ini dikarenakan adanya perilaku yang buruk dari material EDLC yang ditandai bentuk kurva *charge* yang lebih melengkung dibandingkan kurva *discharge* nya. Sehingga mengakibatkan waktu *charge* yang dihasilkan lebih lama dibandingkan dengan waktu *discharge* nya (Nurdandi, et.al., 2022). Bentuk kurva yang seperti ini, mengindikasikan adanya degradasi pada elektrolit yang digunakan pada proses pengujian (Nurdiansah, H., 2014).

Pada RMA 0.25:1:1 10 jam dari grafik pada **Gambar 4.24 (a)** tampak bahwa waktu pengambilan muatan (*charge*) dengan *current density* 0.5 A/g adalah 425.8 detik. Sementara waktu pelepasan muatan (*discharge*) dengan *current density* 0.5 A/g adalah 38.00 detik. Untuk *current density* 1 A/g, 1.5 A/g, dan 2 A/g, masing-masing waktu *charge* adalah 92.8, 22.3, dan 23.1 detik. Sementara untuk *discharge*, masing-masing adalah 11.2, 6.9, 5.6 detik. Dari hasil pengujian GCD tersebut, didapatkan bahwa semakin tinggi *current density* yang digunakan, maka semakin cepat waktu *charge-discharge* yang digunakan. Hal ini dikarenakan, pada *current density* yang tinggi, terjadi perubahan potensial yang semakin cepat,

sehingga menyebabkan ion-ion yang ada di dalam elektrolit menjadi sulit masuk ke bagian dalam pori-pori elektroda (Zainuddin, et.al., 2025).

Pada RMA 0.5:1:1 10 jam dari grafik pada **Gambar 4.24 (b)** tampak bahwa waktu pengambilan muatan (*charge*) dengan *current density* 0.5 A/g adalah 316.7 detik. Sementara waktu pelepasan muatan (*discharge*) dengan *current density* 0.5 A/g adalah 26.2 detik. Untuk *current density* 1 A/g, 1.5 A/g, dan 2 A/g, masing-masing waktu *charge* adalah 138.4, 64.4, 12.7 detik. Sementara untuk *discharge*, masing-masing adalah 12.8, 8.2, 4.6 detik.

Pada RMA 1:1:1 10 jam dari grafik pada **Gambar 4.24 (c)** tampak bahwa waktu pengambilan muatan (*charge*) dengan *current density* 0.5 A/g adalah 242.2 detik. Sementara waktu pelepasan muatan (*discharge*) dengan *current density* 0.5 A/g adalah 24.6 detik. Untuk *current density* 1 A/g, 1.5 A/g, dan 2 A/g, masing-masing waktu *charge* adalah 45.4, 30.7, 29.5 detik. Sementara untuk *discharge*, masing-masing adalah 9.6, 7.2, 5.8 detik. Sementara untuk *discharge*, masing-masing adalah 12.8, 8.2, 4.6 detik.

Pada RMA 1:1:1 9 jam dari grafik pada **Gambar 4.24 (d)** tampak bahwa waktu pengambilan muatan (*charge*) dengan *current density* 0.5 A/g adalah 122.4 detik. Sementara waktu pelepasan muatan (*discharge*) dengan *current density* 0.5 A/g adalah 28.9 detik. Untuk *current density* 1 A/g, 1.5 A/g, dan 2 A/g, masing-masing waktu *charge* adalah 80.3, 43.9, 41.3 detik. Sementara untuk *discharge*, masing-masing adalah 9.6, 7.2, 5.8 detik.

Pada RMA 1:1:1 pada waktu hidrotermal 8 jam dari grafik pada **Gambar 4.24 (e)** tampak bahwa waktu pengambilan muatan (*charge*) dengan *current density* 0.5 A/g adalah 100.6 detik. Sementara waktu pelepasan muatan (*discharge*) dengan *current density* 0.5 A/g adalah 15.4 detik. Untuk *current density* 1 A/g, 1.5 A/g, dan 2 A/g, masing-masing waktu *charge* adalah 39.8, 23.2, 21.7 detik. Sementara untuk *discharge*, masing-masing adalah 11.1, 8.4, 7.2 detik.

Tabel 4.15 Hasil perhitungan kapasitansi spesifik

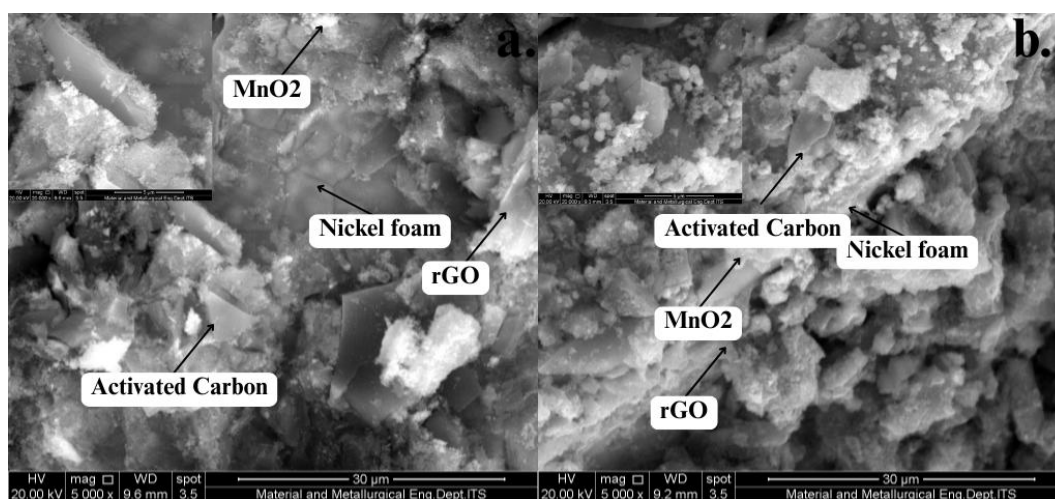
Elektroda	Current Density (A/g)	Time Charge (s)	Time Discharge (s)	Specific Capacitance - Charge (F/g)	Specific Capacitance - Discharge (F/g)
rGO	0.5	30.9	4.6	30.867	4.63
	1	4.2	1.7	8.467	3.33
	1.5	2.4	0.8	7.100	2.50
	2	1.8	0.5	7.200	2.13
α-MnO₂	0.5	48.7333	39.8	48.733	39.8
	1	19.1333	15.4667	38.267	30.9
	1.5	10.2	8.2333	30.500	24.7
	2	5.7	4.9666	22.667	19.9
Activated Carbon	0.5	32.7	12.0	32.733	11.97
	1	7.6	4.6	15.200	9.27
	1.5	4.0	2.6	12.100	7.70
	2	2.8	1.6	11.067	6.53
RMA-1	0.5	425.8	38.0	425.800	38.00
	1	92.8	11.2	185.600	22.40
	1.5	22.3	6.9	66.900	20.70
	2	23.1	5.6	92.400	22.53
RMA-2	0.5	316.7	26.2	316.733	26.17
	1	138.4	12.8	276.867	25.53
	1.5	64.4	8.2	193.100	24.60
	2	12.7	4.6	50.667	18.27
RMA-3	0.5	242.2	24.6	242.167	24.57
	1	45.4	9.6	90.867	19.20
	1.5	30.7	7.2	92.000	21.70
	2	29.5	5.8	118.133	23.07
RMA-4	0.5	122.4	28.9	122.400	28.90
	1	80.3	12.2	160.667	24.40
	1.5	43.9	9.0	131.600	26.90
	2	41.3	7.8	165.067	31.20
RMA-5	0.5	100.6	15.4	100.600	15.37
	1	39.8	11.1	79.533	22.27
	1.5	23.2	8.4	69.600	25.10
	2	21.7	7.2	86.934	28.67

Dari hasil pengujian GCD didapatkan nilai kapasitansi spesifik yang disajikan pada **tabel 4.15**. Hasil pengujian GCD menunjukkan bahwa semakin meningkatnya komposisi rGO, mengakibatkan kapasitansi spesifik yang dihasilkan menurun. Pada variasi waktu hidrotermal, didapatkan bahwa semakin

meningkatnya waktu hidrotermal, maka kapasitansi yang dihasilkan meningkat. Hasil ini selaras dengan hasil pengujian CV.

4.8 Cycle Stability

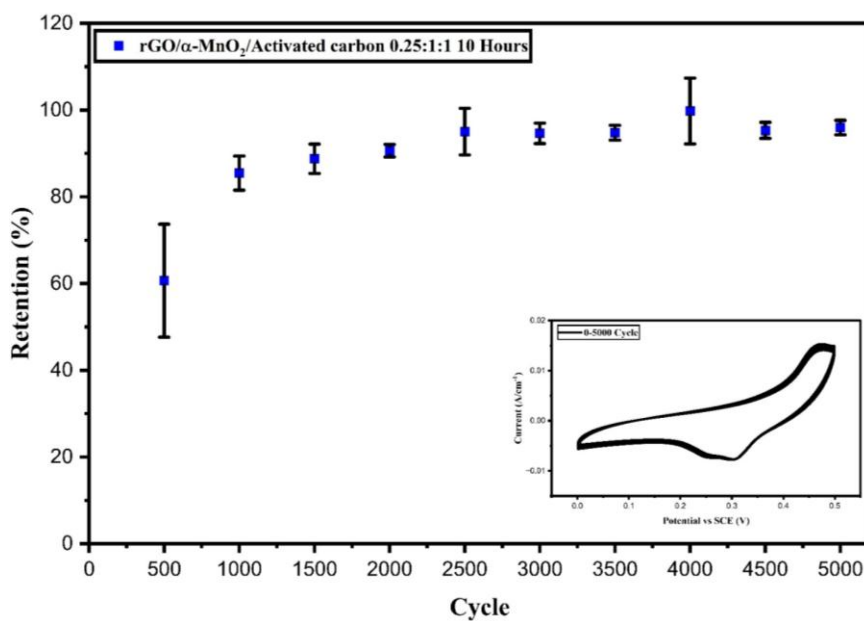
Pengujian *cycle stability* dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan elektroda dalam mempertahankan kinerjanya selama ratusan hingga ribuan siklus. Pengujian ini penting dilakukan karena superkapasitor dirancang sebagai aplikasi yang membutuhkan daya yang stabil, umur panjang dalam penyimpanan energi, cadangan daya, serta sistem kelistrikan yang mendukung teknologi modern. Metode pengujian yang digunakan yaitu voltametri siklik dan material diberikan 5000x siklus sehingga dapat dievaluasi berapa retensi dari kapasitansi spesifik yang dihasilkan.



Gambar 4.25 Hasil pengujian SEM elektroda (a) sebelum uji stabilitas dan (b) sesudah uji stabilitas

Hasil pengujian SEM pada elektroda komposit rGO/ α -MnO₂/activated carbon 0.25:1:1 10 jam sebelum dan sesudah pengujian *cycle stability*. Pada **Gambar 4.25 (a)** ditunjukkan hasil SEM elektroda sebelum diuji *cycle stability*. Terlihat bahwa, morfologi yang dihasilkan berupa lembaran dari rGO, nanowire dari α -MnO₂ yang terdistribusi secara merata pada nickel foam, dan karbon aktif yang mengisi rongga-rongga nickel foam. Pada **Gambar 4.25 (b)** ditunjukkan hasil SEM setelah uji *cycle stability*. Dari hasil tersebut, tampak bahwa partikel α -MnO₂ dan karbon aktif mengalami aglomerasi, serta adanya indikasi munculnya

delaminasi pada lapisan aktif dari *nickel foam* dan retakan mikro pada struktur material komposit. Dari hasil pengujian SEM diatas, menunjukkan bahwa tidak ada perubahan struktur morfologi yang signifikan pada elektroda RMA 0.25:1:1 10 jam sebelum dan sesudah pengujian *cycle stability*.



Gambar 4.26 Hasil pengujian *cycle stability*

Pada **Gambar 4.26** menunjukkan stabilitas siklus dari superkapasitor berbasis komposit *rGO/α-MnO₂/activated carbon* dengan memantau retensi kapasitansi selama 5000 siklus. Pada siklus ke-500, retensi kapasitansi yang dihasilkan 60.66%. Pada siklus ke-1000, retensi kapasitansi mengalami peningkatan menjadi 85.47%, dan meningkat lagi menjadi 88.47% pada siklus ke-1500. Pada 2000 dan 2500 siklus, nilai retensi kapasitansi meningkat menjadi 90.63% dan meningkat lagi menjadi 95.03%. Pada 3000 siklus, terjadi penurunan nilai retensi kapasitansi menjadi 94.64%, dan meningkat sedikit menjadi 94.77% setelah 3500 siklus. Pada siklus ke-4000, terjadi peningkatan nilai retensi kapasitansi menjadi 99.79%, dan mengalami penurunan menjadi 92.32 pada siklus ke-4500. Pada akhir pengujian, setelah 5000 siklus, retensi kapasitansi berada di 95.96%. Data ini menunjukkan bahwa superkapasitor berbasis komposit *rGO/α-MnO₂/activated carbon* memiliki stabilitas siklus yang relatif stabil dan hanya mengalami penurunan retensi kapasitansi yang relatif kecil dan bertahap. Elektroda

ini mampu mempertahankan sebagian besar kapasitansinya bahkan setelah 5000 siklus.

Pada **Tabel 4.16**, ditunjukkan perbandingan nilai kapasitansi spesifik pada penelitian ini dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dengan menggunakan material yang sama.

Tabel 4.16 Perbandingan nilai kapasitansi spesifik dan stabilitas retensi dengan penelitian terdahulu

Material Elektroda	Metode Sintesis	Stabilistas Retensi	Kapasitansi Spesifik (F/g)	Referensi
rGO/MnO ₂ /Activated Carbon	<i>Hydrothermal</i>	91.58% 3000 cycles	378	Li, Y., et.al., 2017
δ-MnO ₂ /rGO	<i>Hydrothermal</i>	80% 1000 cycles	445.2	Shinde, D. P., et.al., 2025
MnO ₂ @N-doped activated carbon	<i>Hydrothermal</i>	88.2% 10000 cycles	408	Sun, B., et.al., 2022
rGO/α-MnO₂/activated carbon	<i>Hydrothermal</i>	95.96% 5000 cycles	630.23	Penelitian ini

4.9 Superkapasitor RMA-ScITS

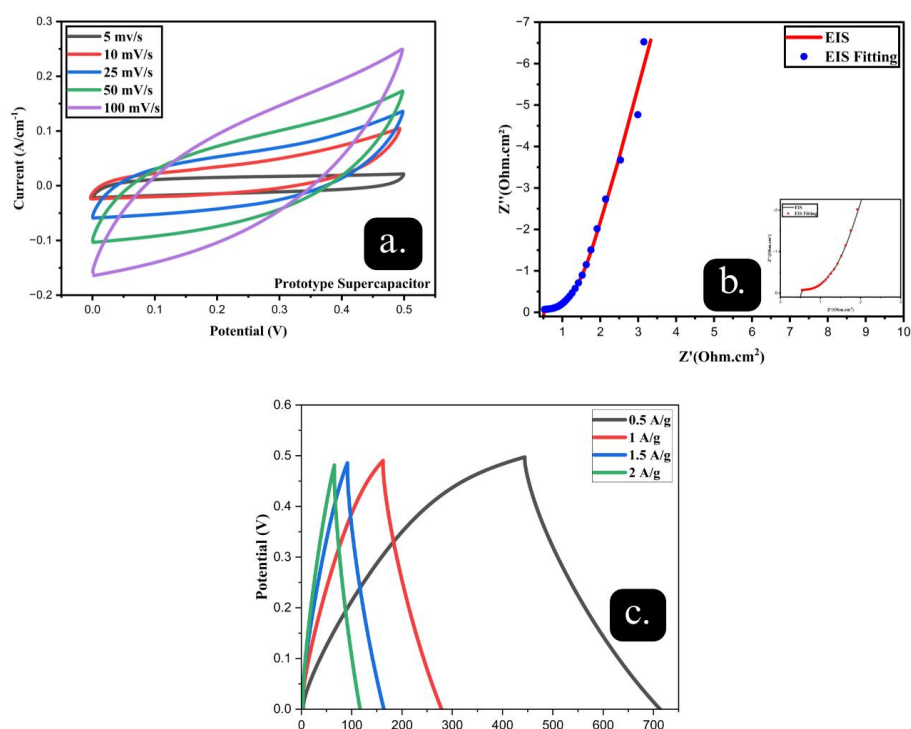
Dalam pengembangan teknologi penyimpanan energi yang ramah lingkungan, efisien, dan berkelanjutan, superkapasitor menjadi salah satu produk yang menjanjikan karena memiliki keunggulan gabungan kapasitor dan baterai. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan pembuatan prototipe superkapasitor yang disebut RMA-ScITS. RMA-ScITS merupakan singkatan dari rGO/α-MnO₂/activated carbon Supercapacitor Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) yang merupakan tempat perguruan tinggi peneliti dalam melakukan riset. RMA-ScITS merupakan prototipe superkapasitor berbahan rGO/α-MnO₂/activated carbon yang dirancang untuk memiliki kapasitansi spesifik yang baik, umur siklus yang panjang, serta waktu *charge discharge* yang cepat untuk aplikasi dalam berbagai kebutuhan.

Pembuatan prototipe superkapasitor dilakukan dengan serangkaian langkah teknis yang mencakup pemilihan material elektroda, desain elektroda, pemilihan elektrolit, dan perakitan serta pengujian perangkat. Material aktif yang digunakan adalah komposit $\text{rGO}/\alpha\text{-MnO}_2/\text{activated carbon}$ dengan rasio perbandingan 0.25:1:1 dengan waktu hidrotermal 10 jam. *Current collector* yang digunakan adalah *nickel foam* dengan ukuran 4x6 cm dan terminal untuk transfer muatan dengan panjang 1.2 cm. Untuk elektrolit yang digunakan yaitu KOH 1M.

Proses perakitan prototipe dilakukan dengan menyiapkan material aktif komposit $\text{rGO}/\alpha\text{-MnO}_2/\text{activated carbon}$ sebanyak 1 gram dalam bentuk slurry dengan mencampurkan pelarut etanol. *Slurry* material aktif kemudian dioleskan secara merata dan ketebalan yang konsisten pada permukaan *nickel foam*. Kemudian, dilakukan pengeringan pada temperatur 80°C selama 1 jam dalam oven untuk menguapkan pelarut, hanya meninggalkan lapisan komposit $\text{rGO}/\alpha\text{-MnO}_2/\text{activated carbon}$. Selanjutnya, elektroda dilapisi *thermal paper* yang berfungsi sebagai separator. Penyusunan elektroda dan separator dilakukan dengan hati-hati untuk mencegah terjadinya kontak langsung dan kemungkinan korsleting, serta memungkinkan ion dapat bergerak bebas dalam elektrolit. Setelah penyusunan telah sesuai, dilakukan proses rolling untuk memastikan kontak yang erat dan mengoptimalkan penggunaan ruang. Setelah proses *rolling*, dilakukan penambahan elektrolit KOH 1 M dengan cara menyuntikkan ke dalam struktur elektroda dan separator, untuk memastikan bahwa seluruh lapisan elektroda terjenuhkan dengan elektrolit maka prototipe RMA-ScITS dibiarkan selama beberapa hari. Setelah itu dilakukan pengujian elektrokimia dengan CV, GCD, dan EIS. Hasil prototipe RMA-ScITS ditunjukkan pada **Gambar 4.27**.



Gambar 4.27 Prototipe RMA-ScITS



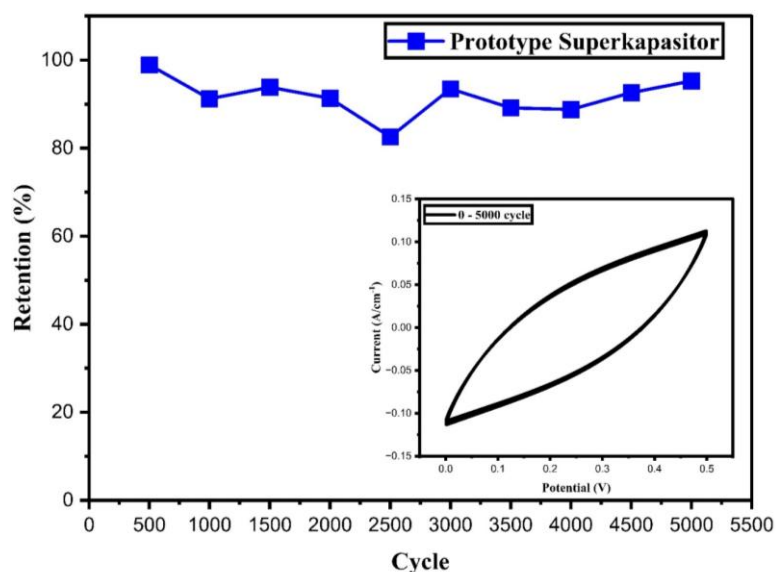
Gambar 4.28 Hasil pengujian elektrokimia RMA-ScITS (a) CV, (b) EIS, (c) GCD

Pada **gambar 4.28** ditunjukkan hasil pengujian elektrokimia prototipe RMA-ScITS. Pada **gambar 4.28 (a)**, menyajikan hasil pengujian CV yang menunjukkan kapasitansi spesifik dari prototipe RMA-ScITS yang diukur pada berbagai *scan rate*. Pada *scan rate* 0.005 V/s, kapasitansi spesifik yang dihasilkan sebesar 660.31 F/g. Pada *scan rate* ini dihasilkan kapasitansi spesifik tertinggi, hal

ini menunjukkan kemampuan superkapasitor untuk menyimpan muatan secara maksimal pada *scan rate* yang sangat rendah. Nilai kapasitansi spesifik menurun seiring dengan meningkatnya *scan rate* yang digunakan. Pada *scan rate* 0.01 V/s dihasilkan kapasitansi spesifik sebesar 570.46 F/g. Kemudian pada *scan rate* 0.025, kapasitansi spesifik yang dihasilkan sebesar 400.71 F/g. Pada *scan rate* 0.05 V/s, kapasitansi spesifik yang dihasilkan sebesar 289.60 F/g. Pada *scan rate* 0.1 V/s, dihasilkan kapasitansi spesifik yang dihasilkan sebesar 188.57 F/g. Dengan adanya penurunan kapasitansi spesifik seiring dengan peningkatan *scan rate*, menunjukkan bahwa pada *scan rate* yang lebih tinggi, waktu yang dibutuhkan untuk proses muatan dan pemakaian menjadi lebih singkat.

Pada **gambar 4.28 (b)** menunjukkan hasil pengujian GCD dari RMA-ScITS pada berbagai kerapatan arus (*current density*). Pengujian dilakukan pada empat tingkat kerapatan arus yang berbeda, yaitu 0.5 A/g, 1 A/g, 1.5 A/g, 2 A/g. Pada kerapatan arus 0.5 A/g, waktu *charge* muatan tercatat sebesar 440.4 detik dan waktu *discharge* muatan sebesar 271.4 detik dengan kapasitansi spesifik sebesar 440.4 F/g. Pada kerapatan arus 1 A/g, waktu *charge* muatan tercatat sebesar 161.5 detik dan waktu *discharge* muatan sebesar 120.1 detik dengan kapasitansi spesifik sebesar 323.07 F/g. Pada kerapatan arus 1.5 A/g, waktu *charge* muatan tercatat sebesar 90.8 detik dan waktu *discharge* muatan sebesar 75.9 detik dengan kapasitansi spesifik sebesar 272.3 F/g. Pada kerapatan arus 2 A/g, waktu *charge* muatan tercatat sebesar 63 detik dan waktu *discharge* muatan sebesar 75.9 detik dengan kapasitansi spesifik sebesar 251.86 F/g.

Pada **gambar 4.28 (c)** ditunjukkan plot nyquist dari prototipe RMA-ScITS. Pada grafik Plot Nyquist terdapat garis yang merepresentasikan data pengujian dan bentuk geometris yang mewakili hasil *fitting* menggunakan sirkuit ekivalen. Pada plot nyquist menunjukkan adanya kurva setengah lingkaran pada frekuensi tinggi yang menunjukkan resistansi transfer muatan, dan garis lurus pada daerah frekuensi rendah yang menandakan adanya resistansi difusi. Sudut yang dihasilkan pada plot nyquist sebesar 64.11° . Hasil tersebut menunjukkan bahwa prototipe RMA-ScITS memiliki sifat kapasitif yang baik karena sudut yang dihasilkan mendekati nilai 90° . Kapasitansi spesifik yang dihasilkan sebesar 621.85 F/g.



Gambar 4.29 Hasil pengujian *cycle stability*

Pada **gambar 4.29** menunjukkan stabilitas siklus dari prototipe RMA-ScITS dengan memantau retensi kapasitansi spesifik selama 5000 siklus. Pada siklus ke-500, retensi kapasitansi yang dihasilkan 98.93%. Pada siklus ke-1000, retensi kapasitansi mengalami penurunan menjadi 91.21%, dan meningkat lagi menjadi 93.82 pada siklus ke 1500. Pada 2000 dan 2500 siklus, nilai retensi kapasitansi menurun menjadi 91.32% dan menurun lagi menjadi 82.55%. Pada 3000 siklus, terjadi peningkatan nilai retensi kapasitansi menjadi 93.48%, dan menurun sedikit menjadi 89.14% setelah 3500 siklus. Pada siklus ke-4000, terjadi penurunan nilai retensi kapasitansi menjadi 88.77%, dan mengalami peningkatan menjadi 92.59% pada siklus ke-4500. Pada akhir pengujian, setelah 5000 siklus, retensi kapasitansi berada di 95.24%. Data ini menunjukkan bahwa prototipe RMA-ScITS memiliki stabilitas siklus yang relatif stabil dan hanya mengalami penurunan retensi kapasitansi yang relatif kecil dan bertahap. Prototipe RMA-ScITS ini mampu mempertahankan sebagian besar kapasitansinya bahkan setelah 5000 siklus.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan seluruh hasil karakterisasi dan pengujian elektrokimia yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan rGO dalam jumlah yang lebih besar membuat partikel α -MnO₂ dan karbon aktif tersebar lebih merata, karena lembaran rGO berfungsi sebagai penopang sekaligus jalur konduktif yang mengurangi penggumpalan partikel. Hal ini terlihat jelas dari citra SEM dan peta sebaran unsur C, O, dan Mn yang semakin homogen. Di sisi lain, perbedaan waktu hidrotermal juga berpengaruh terhadap pembentukan kristal, di mana waktu yang lebih lama mendorong pertumbuhan dan keteraturan kristal α -MnO₂, sebagaimana ditunjukkan oleh puncak XRD yang semakin tajam dan ukuran kristal yang cenderung meningkat. Meskipun demikian, waktu yang terlalu lama dapat menyebabkan partikel mulai saling beraglomerasi.
2. Penambahan rasio rGO pada elektroda superkapasitor terbukti menyebabkan penurunan kapasitansi spesifik, yang disebabkan oleh berkurangnya jumlah situs aktif α -MnO₂ sebagai material pseudokapasitif. Hal ini ditunjukkan dari hasil pengujian CV pada scan rate 5 mV/s, di mana kapasitansi spesifik elektroda RMA-1, RMA-2, dan RMA-3 masing-masing menurun dari 630.23 F/g menjadi 602.55 F/g dan 591.80 F/g. Tren penurunan ini diperkuat oleh hasil pengujian EIS dan GCD, yang juga menunjukkan penurunan kapasitansi spesifik seiring meningkatnya rasio rGO. Sebaliknya, peningkatan waktu hidrotermal memberikan pengaruh positif terhadap kapasitansi spesifik material komposit, karena waktu reaksi yang lebih lama memungkinkan pertumbuhan struktur yang lebih optimal dan meningkatkan keteraturan material aktif. Hal ini terlihat dari hasil CV, EIS, dan GCD yang menunjukkan kecenderungan peningkatan kapasitansi spesifik pada variasi waktu hidrotermal tertentu, menegaskan bahwa optimasi waktu sintesis berperan penting dalam meningkatkan kinerja elektrokimia elektroda superkapasitor.

5.2 Saran

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

1. Menjaga kualitas grafit agar tidak terkontaminasi dengan partikel lain
2. Melakukan pengujian elektrokimia menggunakan sistem 2 elektroda

DAFTAR PUSTAKA

- A. Fahrezi, Diah, S., Hariyati, P. (2023). *ANALISIS PENGARUH WAKTU HIDROTHERMAL TERHADAP SIFAT KAPASITIF KOMPOSIT N-rGO/CuCr₂O₄ UNTUK APLIKASI ELEKTRODA SUPERKAPASITOR HYBRID*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Alvan, M.H., Retno, A., Darminto. (2024). *Synthesis and characterization of MnO₂/rGO composites for energy storage applications* (Undergraduate thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember). ITS
- A. Mohammed, & A. Abdullah. (2018). Scanning Electron Microscopy (SEM): A review. *Proceedings of 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics - HERVEX, January*, 77–85.
- Adedoya, O. S., Sadiku, E. R., & Hamam, Y. (2023). An Overview of the Emerging Technologies and Composite Materials for Supercapacitors in Energy Storage Applications. *Polymers*, 15(10), 1–32. <https://doi.org/10.3390/polym15102272>
- Akhtar, K., Khan, S. A., Khan, S. B., & Asiri, A. M. (2018). Scanning electron microscopy: Principle and applications in nanomaterials characterization. In *Handbook of Materials Characterization*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92955-2_4
- Amaya, J., Suarez, N., Moreno, A., Moreno, S., & Molina, R. (2020). *Bifunctional catalysts supported on modified vermiculite for the hydroconversion of decane . Effect of the metal phase (Mo or W) and promoters (Ni or Co)*. 356(December 2019), 271–283. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.11.023>
- Amri, A. (2019). *Mengenal Grafena (Graphene) dan Aplikasinya* (Vol. 1, Issue March). <https://www.researchgate.net/publication/369361287>
- Aoki, K. J., Chen, J., Liu, Y., & Jia, B. (2020). *Peak potential shift of fast cyclic voltammograms owing to capacitance of redox reactions*. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 856, 113609. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.113609>
- Aragaw, B. A. (2020). Reduced graphene oxide-intercalated graphene oxide nano-hybrid for enhanced photoelectrochemical water reduction. *Journal of*

Nanostructure in Chemistry, 10(1), 9–18. <https://doi.org/10.1007/s40097-019-00324-x>

Aziz, N., Putra, E., Ferdianto, S. A., Qunefi, F., & Adelyadi, J. (n.d.). *Perbandingan Material Superkapasitor Berbasis Karbon dan Oksida Logam untuk Optimalisasi Penyimpanan Energi dalam Aplikasi Sistem Energi Terbarukan : Systematic Literature Review*. <https://doi.org/10.14710/jebt.2024.24858>

Bakti, A. I., & Gareso, P. L. (2018). *CHARACTERIZATION OF ACTIVE CARBON PREPARED FROM COCONUTS SHELLS USING FTIR, XRD AND SEM TECHNIQUES*. 07(April), 33–39. <https://doi.org/10.24042/jipfalbiruni.v7i1.2459>

Bharti, Kumar, A., Ahmed, G., Gupta, M., Bocchetta, P., Adalati, R., Chandra, R., & Kumar, Y. (2021). Theories and models of supercapacitors with recent advancements: impact and interpretations. *Nano Express*, 2(2). <https://doi.org/10.1088/2632-959X/abf8c2>

Bhuvanendran, N., Ravichandran, S., Xu, Q., Maiyalagan, T., & Su, H. (2022). A quick guide to the assessment of key electrochemical performance indicators for the oxygen reduction reaction: A comprehensive review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(11), 7113–7138. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.072>

Callister, W.D., Rethwisch, D.G., 2010. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. John Wiley & Sons Canada, Limited

Choi, J. R., Lee, J. W., Yang, G., Heo, Y. J., & Park, S.-J. (2020). *Activated carbon/MnO₂ composites as electrode for high performance supercapacitors*. *Catalysts*, 10(2), 256. <https://doi.org/10.3390/catal10020256>

Choudhary, R. B., Ansari, S., & Purty, B. (2020). Robust electrochemical performance of polypyrrole (PPy) and polyindole (PIn) based hybrid electrode materials for supercapacitor application: A review. *Journal of Energy Storage*, 29(February), 101302. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101302>

Damasceno, B. S., Horta, I. M., de Oliveira, R. S., Pereira, R. M., Schatkoski, V. M., Bacher, G., Massi, M., Thim, G. P., André, A. L., da Silva Sobrinho, A.

- S., & Leite, D. M. G. (2023). Recent improvements on surface acoustic wave sensors based on graphenic nanomaterials. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 167(April).
<https://doi.org/10.1016/j.mssp.2023.107811>
- da Silva, L. F., Ricci, G. P., & de Oliveira, H. P. (2021). *Synthesis process of functionalized ZnO nanostructure for additive manufacturing*. In *Additive Manufacturing of Emerging Materials* (pp. 1–26). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823152-4.00002-8>
- Devi, R., Kumar, V., Kumar, S., Bulla, M., Sharma, S., & Sharma, A. (2023). applied sciences Electrode for High-Performance Supercapacitor Application. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2.
- Diantoro, M., Istiqomah, I., Fath, Y. Al, Mufti, N., & Nasikhudin, N. (2022). *Hierarchical Activated Carbon – MnO₂ Composite for Wide Potential Window Asymmetric Supercapacitor Devices in Organic Electrolyte*.
<https://doi.org/10.3390/mi13111989>
- Double, E., Capacitors, L., Ervin, M. H., Pereira, C. M., Capacitors, P. T., Freeman, Y., Alapatt, G. F., Pritzl, D., & Bumberger, A. E. (2020). *Study of the effect of supercapasitors types on crystal structure and microstructure of supercapasitor electrode materials*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/725/1/012042>
- Fachrully S, A., Erna S, N., & Susilo. (2021). Analisis Citra Hasil Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-Ray (SEM EDX) Komposit Resin Timbal dengan Metode Contrast to Noise Ratio (CNR). *Indonesian Journal of Mathematics and Natural Sciences*, 44(2), 81–85.
<http://journal.unnes.ac.id/nju/index.php/JM>
- Fan, K., Chen, Q., Zhao, J., & Liu, Y. (2023). *Preparation of MnO₂-Carbon Materials and Their Applications in Photocatalytic Water Treatment*.
<https://doi.org/10.3390/nano13030541>
- Faturachman, G. F., Ramanda, A. A., Maharani, S., Latif, A., Arthurito, G., Belo, G., Grafi, S., & Ayubi, A. (2025). *Application of Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) for Quantitative Analysis of Pharmaceutical Compounds*. 5(1), 27–33. <https://doi.org/10.37311/ijpe.v5i1.23309>

- Gerard, O., Numan, A., Krishnan, S., Khalid, M., Subramaniam, R., & Kasi, R. (2022). A review on the recent advances in binder-free electrodes for electrochemical energy storage application. *Journal of Energy Storage*, 50(February). <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104283>
- Grindal, A., & Azimi, G. (2024). *Advancing aluminum-ion batteries : unraveling the charge storage mechanisms of cobalt sulfide cathodes*. 1–17.
- Nurdiansah, H. (2014). Pengaruh Temperatur Hidrotermal Dan Waktu Ultrasonikasi Terhadap Nilai Kapasitansi Elektroda Electric Double Layer Capacitor (EDLC) Dari Material Grafena.
- Haq, F.S., Khanafih, N., Fitrilawati, Joni, M.I., Syakir, N. (2022). Padjadjaran, U., Barat, J., & Padjadjaran, U. PERBANDINGAN KARAKTERISTIK SEL SUPERKAPASITOR BERBAHAN KOMPOSIT GO / TiO₂ YANG DIBUAT MELALUI PROSES TERMAL DENGAN DAN dispersi GO 06(02), 158–165.
- Hatakeyama, T., Okamoto, N. L., & Ichitsubo, T. (2022). Thermal stability of MnO₂ polymorphs. *Journal of Solid State Chemistry*, 305(October 2021). <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2021.122683>
- Hazwani, N., Rosli, A., Shamsudin, I. J., Amat, A., Abdul, N. A., Ahmad, N., Azmi, A., Chia, C. H., & Kar, M. (2025). *Electrochemical Performance of S-rGO Electrodes on Different Aqueous Electrolytes for Supercapacitor Applications*. 1(1), 110–118.
- Hidayah, N. M. S., Liu, W. W., Lai, C. W., Noriman, N. Z., Khe, C. S., Hashim, U., & Lee, H. C. (2017). Comparison on graphite, graphene oxide and reduced graphene oxide: Synthesis and characterization. *AIP Conference Proceedings*, 1892(October). <https://doi.org/10.1063/1.5005764>
- Hussain, O. A., Hathout, A. S., Abdel-Mobdy, Y. E., Rashed, M. M., Abdel Rahim, E. A., & Fouzy, A. S. M. (2023). Preparation and characterization of activated carbon from agricultural wastes and their ability to remove chlorpyrifos from water. *Toxicology Reports*, 10(December 2022), 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2023.01.011>
- Ilcheva, V., Boev, V., Dimitrova, M., Mladenova, B., Karashanova, D., Lefterova, E., Rey-Raap, N., Arenillas, A., & Stoyanova, A. (2025). *Influence of*

- synthesis conditions on the capacitance performance of hydrothermally prepared MnO₂ for carbon xerogel-based solid-state supercapacitors. Gels*, **11**(1), 68. <https://doi.org/10.3390/gels11010068>
- Jaroniec, M., Kruk, M., & Sayari, A. (1998). Adsorption methods for characterization of surface and structural properties of mesoporous molecular sieves. In L. Bonneviot, F. Béland, C. Danumah, S. Giasson, & S. Kaliaguine (Eds.), *Studies in Surface Science and Catalysis* (Vol. 117, pp. 325–337). Elsevier Science B.V.
- Jayakumar, S., Santhosh, P. C., Mohideen, M. M., & Radhamani, A. V. (2024). A comprehensive review of metal oxides (RuO₂, Co₃O₄, MnO₂ and NiO) for supercapacitor applications and global market trends. *Journal of Alloys and Compounds*, **976**(September 2023). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.173170>
- Joseph, A., Sangeetha, C. K., Abraham, D. S., Bhagyialakshmi, M., & Aneesh, P. M. (2024). Hydrothermally synthesised α -MnO₂ and β -MnO₂ nanorods for pseudocapacitor electrode applications. *MRS Communications*, **14**, 1480–1487. <https://doi.org/10.1557/s43579-024-00677-7>
- Joselene Suzan Jennifer, P., Muthupandi, S., Niranjana, S. R., Joe Raja Ruban, M., Madhavan, J., Prathap, S., & Victor Antony Raj, M. (2022). Investigation of MnO₂/CuO/rGO ternary nanocomposite as electrode material for high-performance supercapacitor. *Inorganic Chemistry Communications*, **146**(November). <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.110218>
- Kar, K. K. (Ed.). (2023). *Handbook of nanocomposite supercapacitor materials IV: Next-generation supercapacitors* (Vol. 331). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-23701-0>
- Kil, H. J., Yun, K., Yoo, M. E., Kim, S., & Park, J. W. (2020). Solution-processed graphene oxide electrode for supercapacitors fabricated using low temperature thermal reduction. *RSC Advances*, **10**(37), 22102–22111. <https://doi.org/10.1039/d0ra03985c>
- Kornilov, D. Y., & Gubin, S. P. (2020). Graphene Oxide: Structure, Properties, Synthesis, and Reduction (A Review). *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, **65**(13), 1965–1976. <https://doi.org/10.1134/S0036023620130021>

- Kularatna, N., & Gunawardane, K. (2021). *Fundamentals of energy storage devices*. Dalam N. Kularatna & K. Gunawardane (Eds.), *Energy Storage Devices for Renewable Energy-Based Systems: Rechargeable Batteries and Supercapacitors* (Bab 5). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820778-9.00005-X>
- Kumar, S., Kumar, S., Rai, R. N., Lee, Y., Hong, T., Nguyen, C., Young, S., Le, Q. Van, & Singh, L. (2023). *Recent development in two-dimensional material-based advanced photoanodes for high-performance dye-sensitized solar cells*. 249(September 2022), 606–623.
- Kusumawati, D. H., Putri, N. P., Asnawi, Dewi, T. S., & Munasir. (2020). *Porosity characteristics and electrochemical performance of rGO coconut shell as supercapacitor electrodes*. Journal of Physics: Conference Series, 1491, 012058. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1491/1/012058>
- Lazanas, A. C., & Prodromidis, M. I. (2023). *Electrochemical impedance spectroscopy—A tutorial*. ACS Measurement Science Au, 3(2), 162–193.
- 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(July 2019). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227354>
- Liu, J., Bao, J., Zhang, X., Gao, Y., Zhang, Y., Liu, L., & Cao, Z. (2022). MnO₂-based materials for supercapacitor electrodes: challenges, strategies and prospects. *RSC Advances*, 12(55), 35556–35578. <https://doi.org/10.1039/d2ra06664e>
- Li, Y., Xu, L., Gao, J., & Jin, X. (2017). Hydrothermal fabrication of reduced graphene oxide/activated carbon/MnO₂ hybrids with excellent electrochemical performance for supercapacitors. *RSC Advances*, 7(62), 39024–39033. <https://doi.org/10.1039/c7ra07056j>
- Liu, Z., Navik, R., Tan, H., Xiang, Q., Wahyudiono, Goto, M., Ibarra, R. M., & Zhao, Y. (2022). Graphene-based materials prepared by supercritical fluid technology and its application in energy storage. *Journal of Supercritical Fluids*, 188(December 2021). <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2022.105672>

- Lokhande, P. E., Chavan, U. S., & Pandey, A. (2020). Materials and Fabrication Methods for Electrochemical Supercapacitors: Overview. In *Electrochemical Energy Reviews* (Vol. 3, Issue 1). Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/s41918-019-00057-z>
- Lu, T., Pan, L., Li, H., Zhu, G., Lv, T., Liu, X., Sun, Z., Chen, T., & Chua, D. H. C. (2011). Microwave-assisted synthesis of graphene-ZnO nanocomposite for electrochemical supercapacitors. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(18), 5488–5492. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.02.136>
- Mahene, W. L., Kivevele, T., & Machunda, R. (2023). *The role of textural properties and surface chemistry of activated carbon support in catalytic deoxygenation of triglycerides into renewable diesel*. 181(May).
- Mahmoudi-Qashqay, S., Zamani-Meymian, M.-R., & Maleki, A. (2024). *A simple method of fabrication hybrid electrodes for supercapacitors*. *Scientific Reports*, 14, 29105. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80243-2>
- Malis, E., Ridho, R., Ayun, Q., & Eka Evi Susanti, R. (2023). Superkapasitor Studi Perbandingan Sifat Elektroda Superkapasitor Dari Arang Aktif Tempurung Kelapa Banyuwangi Dengan Activator Asam Dan Basa. *Jurnal Crystal : Publikasi Penelitian Kimia Dan Terapannya*, 5(2), 38–45. <https://doi.org/10.36526/jc.v5i2.3101>
- Mandal, M., Subudhi, S., Alam, I., Subramanyam, B., Patra, S., & Mahanandia, P. (2021). Hydrothermal synthesis of MnO₂ @graphene/activated carbon composite electrode with enhanced electrochemical performance for supercapacitor applications . *International Journal of Innovative Research in Physics*, 3(1), 1–10. <https://doi.org/10.15864/ijiiip.3101>
- Manikandan, S., & Sasikumar, D. (2024). *Synthesis, structural, and optical properties of MnO₂/AC/r-GO nanocomposites for highly efficient under visible light photocatalytic activity*. **Ionics**, 30, 6591–6610. <https://doi.org/10.1007/s11581-024-05735-7>
- Manikandan, M., Prasankumar, T., Manikandan, E., Papanasam, E., & Ramesh, K. (2024). *Hydrothermal synthesis of rGO and MnCoS composite for enhanced supercapacitor application*. 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-77245-5> 1

- Maria, S., Pandey, M., Bhattacharjya, D., & Saikia, B. K. (2022). *Recent trends in supercapacitor-battery hybrid energy storage devices based on carbon materials*. 52(May).
- Mbayachi, V. B., Ndayiragije, E., Sammani, T., Taj, S., Mbuta, E. R., & Khan, A. ullah. (2021). Graphene synthesis, characterization and its applications: A review. *Results in Chemistry*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2021.100163>
- Mbiliyora, C. (2024). *Analisis Karakteristik Mineral Pada Pasir Besi Dengan Metode X-Ray Diffraction (Xrd) Di Pantai Nangaba Kecamatan Ende Flores*. 9(1), 9–12.
- Méndez-Lozano, N., Pérez-Reynoso, F., & González-Gutiérrez, C. (2022). Eco-Friendly Approach for Graphene Oxide Synthesis by Modified Hummers Method. *Materials*, 15(20). <https://doi.org/10.3390/ma15207228>
- Mohamad, A. A. (2025). Cyclic voltammetry of hybrid supercapacitors: A characterization review. *Inorganic Chemistry Communications*, 172(September 2024). <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113677>
- Moosavi, S., Lai, C. W., Gan, S., Zamiri, G., Akbarzadeh Pivehzhani, O., & Johan, M. R. (2020). Application of efficient magnetic particles and activated carbon for dye removal from wastewater. *ACS Omega*, 5(33), 20684–20697. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01905>
- Mossfika, E., Syukri, S., & Aziz, H. (2020). Preparation of Activated Carbon from Tea Waste by NaOH Activation as A Supercapacitor Material. *Journal of Aceh Physics Society*, 9(2), 42–47. <https://doi.org/10.24815/jacps.v9i2.15905>
- Mousa, S., Asiri, M., Cevik, E., Sabit, H., & Bozkurt, A. (2019). Alginate-guided size and morphology-controlled synthesis of MnO₂ nanoflakes. *Soft Materials*, 00(00), 1–9. <https://doi.org/10.1080/1539445X.2019.1672192>
- Nawaz, S., Ahmad, M., Asif, S., Klemeš, J. J., Mubashir, M., Munir, M., Zafar, M., Bokhari, A., Mukhtar, A., Saqib, S., Khoo, K. S., & Show, P. L. (2022). Phyllosilicate derived catalysts for efficient conversion of lignocellulosic derived biomass to biodiesel: A review. *Bioresource Technology*, 343(October 2021). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126068>

- Njewu, J. B., Vunain, E., & Biswick, T. (2022). Synthesis and Characterization of Activated Carbons Prepared from Agro-Wastes by Chemical Activation. *Journal of Chemistry*, 2022, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2022/9975444>
- Niken, K., & Wipsar, S. B. D. (2019). Sintesis dan Karakterisasi Reduced Graphene Oxide Berbahan Dasar Karbon Baterai NMC Menggunakan Metode Audiosonikasi. Universitas Negeri Yogyakarta, 1–25
- Nille, O. S., Patil, A. S., Waghmare, R. D., Naik, V. M., Gunjal, D. B., Kolekar, G. B., & Gore, A. H. (2021). Valorization of tea waste for multifaceted applications: A step toward green and sustainable development. *Valorization of Agri-Food Wastes and By-Products: Recent Trends, Innovations and Sustainability Challenges, January*, 219–236. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824044-1.00046-5>
- Nisticò, N., Greco, M., Bruno, M. C., Giuliano, E., Sinopoli, P., & Cosco, D. (2023). Biomimetic lipid membranes: An overview on their properties and applications. *Applied Materials Today*, 35(September). <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2023.101998>
- Nurdandi, D., Kurniawan, W. B., & Adilia, H. (2022). Sintesis dan karakterisasi elektroda komposit karbon–kitosan berbasis karbon biomassa yang diaktivasi menggunakan metode microwave. *Jurnal Riset Fisika Indonesia*, 22(1), 1–9. <https://doi.org/10.22146/jrfi.3216>
- NURHASMIA, N. (2021). Studi Penggunaan Superkapasitor Sebagai Media Penyimpan Energi. *Progressive Physics Journal*, 2(2), 79. <https://doi.org/10.30872/ppj.v2i2.770>
- Nurhidayah, V., & Manurung, P. (2021). *Pengaruh Laju Penambahan Doping Fosfor terhadap Struktur Kristal dan Luas Permukaan Spesifik Nanotitania dengan Metode Sol Gel*. 2(2).
- Nurjanah, N., Adzkia, Q. A. A., Rustana, R., Carolline, S. C., Agustine, S. M., & Nandiyanto, A. B. D. (2022). A Review: Nanoparticles NiFe₂O₄ Synthesis and Its Application as Hyperthermia Agents in Biomedicine. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 11(2), 103–113. <https://doi.org/10.15294/ijcs.v11i2.52590>

- Nurul Huda, A. (2022). Pemanfaatan Karbon Aktif dari Sekam Padi Sebagai Elektroda Superkapasitor. *Jurnal Ilmu Dan Inovasi Fisika*, 6(2), 102–113. <https://doi.org/10.24198/jiif.v6i2.39639>
- Odja, E. A., Raya, I., Maming, Zakir, M., Karim, A., & Basir, D. N. (2024). Characterization and electrochemical properties analysis of reduced graphene oxide from corncob carbon as an electrode candidate: Synthesized using modified Hummers method. *Communications in Science and Technology*, 9(1), 25–29. <https://doi.org/10.21924/cst.9.1.2024.1365>
- Padha, B., Verma, S., Mahajan, P., & Arya, S. (2022). Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Performance Analysis and Challenges in Fuel Cell Applications. *Journal of Electrochemical Science and Technology*, 13(2), 167–176. <https://doi.org/10.33961/jecst.2021.01263>
- Pasieczna-Patkowska, S., Cichy, M., & Flieger, J. (2025). Application of Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy in Characterization of Green Synthesized Nanoparticles. *Molecules*, 30(3), 1–36. <https://doi.org/10.3390/molecules30030684>
- Patil, A. B., Tupe, U. J., Halwar, D. K., Deshmane, V. V., & Patil, A. V. (2023). Investigation of structural and optical properties of graphene derivatives as a route for optical sensing. *Materials Today: Proceedings*, 73, 418–426. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.549>
- Patil, P. H., & Jadhav, S. A. (2024). Manganese dioxide (MnO_2) and biomass-derived carbon-based electroactive composite materials for supercapacitor applications. *RSC Applied Interfaces*, 1(4), 624–647. <https://doi.org/10.1039/d4lf00085d>
- Patil, P. H., Kulkarni, V. V., Dongale, T. D., & Jadhav, S. A. (2023). α -Manganese Dioxide ($\alpha\text{-MnO}_2$) Coated with Polyaniline (PANI) and Reduced Graphene Oxide (rGO)-Based Nanocomposite for Supercapacitor Application. *Journal of Composites Science*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/jcs7040167>
- Permatasari, F. A., Irham, M. A., Bisri, S. Z., & Iskandar, F. (2021). Carbon-based quantum dots for supercapacitors: Recent advances and future challenges. *Nanomaterials*, 11(1), 1–34. <https://doi.org/10.3390/nano11010091>

- Pershaanaa, M., Bashir, S., Ramesh, S., & Ramesh, K. (2022). Every bite of Supercap: A brief review on construction and enhancement of supercapacitor. *Journal of Energy Storage*, 50(April). <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104599>
- Pimklang, T., Watthanaphanit, A., Hemnon, W., Sodtipinta, J., Panomsuwan, G., Chantaramethakul, J., Sriprachuabwong, C., Poochai, C., Tuantranont, A., & Pakawatpanurut, P. (2025). Selective phase control and enhanced electrochemical performance of rGO-MnO₂ nanocomposites for supercapacitor electrodes via solution plasma process: A greener alternative to hydrothermal process. *Materials Chemistry and Physics*, 341(April). <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.130948>
- Pourmoghaddam, N., & Ayas, N. (2024). Synthesis, structure characterization, and electrochemical hydrogen storage of reduced graphene oxide and graphene. *International Journal of Hydrogen Energy*, 82(July), 1422–1434. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.08.053>
- Pundir, S., Upadhyay, S., Priya, R., Kumar, N., Chetana, S., Hossain, I., Joshi, N. C., & Pandey, O. P. (2023). Synthesis of 1D β -MnO₂ for high-performance supercapacitor application. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 27(2), 531–538. <https://doi.org/10.1007/s10008-022-05347-z>
- Putri, N. A., & Supardi, Z. A. I. (2023). Sintesis Dan Karakterisasi Graphene Oxide (Go) Dari Bahan Alam Tempurung Kelapa. *Inovasi Fisika Indonesia*, 12(2), 47–55. <https://doi.org/10.26740/ifi.v12n2.p47-55>
- Putri, W. K., & Sabani. (2019). Aktivasi zeolit alam sebagai adsorben logam berat Mg, Al, dan ZnO menggunakan larutan NaOH. *EINSTEIN (e-Journal)*, 6(3), 22–28. <https://doi.org/10.24114/einstein.v6i3.12110>
- Rajguru, G. M., Mishra, R. K., Kharat, P. B., & Khirade, P. P. (2024). Structural, microstructural and optical characteristics of rGO-ZnO nanocomposites via hydrothermal approach. *Optical Materials*, 154(June), 115720. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.115720>
- Rani, S. R. A. (2022). Studi Analisis Data Difraksi Sinar-X Pada Material Zircon Pasir Alam Melalui Metode Rietveld. *JFT: Jurnal Fisika Dan Terapannya*, 9(1), 16–22. <https://doi.org/10.24252/jft.v9i1.25470>

- Sarkar, S., Akshaya, R., & Ghosh, S. (2020). Nitrogen doped graphene/CuCr₂O₄ nanocomposites for supercapacitors application: Effect of nitrogen doping on coulombic efficiency. *Electrochimica Acta*, 332. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135368>
- Sengodan, P., Govindan, R., Arumugam, G., Chettiannan, B., Navaneethan, M., Pallavolu, M. R., Hussien, M., Selvaraj, M., & Rajendran, R. (2022). A rational design of MnO₂/CuO/r-GO hybrid and biomass-derived activated carbon for asymmetric supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, 50(January). <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104625>
- Shan, X., Wang, L., Li, L., Zuo, Y., Fu, Z., Wu, J., Wang, Z., Zhang, X., & Wang, X. (2023). *Hydrothermal regulation of MnO₂ on a wood-based RGO composite for achieving wide voltage windows and high energy density supercapacitors*. **iScience**, 26, Article xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.xxxxxx>
- Sharma, S., & Chand, P. (2023). Supercapacitor and electrochemical techniques: A brief review. *Results in Chemistry*, 5(November 2022). <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.100885>
- Shinde, D. P., Mane, A. T., Pathak, Y. A., Mane, A. T., Hingangavkar, G. M., Tamboli, S. L., Ubale, S. B., Dalavi, D. S., Jadhav, V. S., & Chavan, S. D. (2025). *Synergistic integration of δ -MnO₂/rGO composite electrode for enhanced electrochemical performance in supercapacitor applications*. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 322, 118616. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2025.118616>
- Shrestha, D. (2022). Activated carbon and its hybrid composites with manganese (IV) oxide as effectual electrode materials for high performance supercapacitor. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(7), 0–10. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.103946>
- Shrestha, R., & Phulara, N. (2024). Review on Activated Carbon for Supercapacitors. *Semiconductor Science and Information Devices*, 5(2), 11–18. <https://doi.org/10.30564/ssid.v5i2.6171>
- Sianipar, R. J., Januar, R. R., & Silalahi, S. D. C. (2024). Analisis Pemetaan Potensi dan Realisasi Energi Baru Terbarukan (EBT) dengan Pemodelan Determinan

- Konsumsi dan Metode Grouping Analysis EBT di Indonesia. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 5(2), 30–49.
<https://doi.org/10.14710/jebt.2024.22970>
- Siddiki, M. R., & Arafat, M. M. (2024). Hybrid Supercapacitor. Dalam *Comprehensive Materials Processing* (Edisi ke-2). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96020-5.00284-3>
- Sirajudheen, P., Poovathumkuzhi, N. C., Vigneshwaran, S., Chelaveettil, B. M., & Meenakshi, S. (2021). Applications of chitin and chitosan based biomaterials for the adsorptive removal of textile dyes from water — A comprehensive review. *Carbohydrate Polymers*, 273(July).
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118604>
- Sivaram, H., Selvakumar, D., Kumar, S. A., & Laroze, D. (2024). Enhanced electrochemical properties of PbO-rGO nanocomposite prepared by wet chemical method for supercapacitor applications. *Nano-Structures and Nano-Objects*, 38(November 2023), 101173.
<https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101173>
- Sun, B., Zhang, X., Fan, X., Wang, R., & Bai, H. (2022). *Interface modification based on MnO₂ @ N-doped activated carbon composites for flexible solid-state asymmetric supercapacitors*. 249.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123659>
- Tagsin, P., Suksangrat, P., Klangtakai, P., Srepusharawoot, P., Ruttanapun, C., Kumnorkaew, P., Pimanpang, S., & Amornkitbamrung, V. (2021). Electrochemical mechanisms of activated carbon, α -MnO₂ and composited activated carbon- α -MnO₂ films in supercapacitor applications. *Applied Surface Science*, 570(May). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151056>
- Tan, B., Chen, N., Gao, X., Huang, L., Tan, L., & Feng, H. (2025). High performance 2.4 V aqueous asymmetric supercapacitors based on a cathode material of Ni-doped MnO₂/reduced graphene oxide nanocomposite. *Journal of Energy Storage*, 118(December 2024).
<https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116339>
- Tan, Y. Y., Abdul Raman, A. A., Zainal Abidin, M. I. I., & Buthiyappan, A. (2024). A review on sustainable management of biomass: physicochemical

modification and its application for the removal of recalcitrant pollutants—challenges, opportunities, and future directions. In *Environmental Science and Pollution Research* (Vol. 31, Issue 25). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33375-x>

- THALLAH, S. I. M., FITRILAWATI, F., JONI, I. M., & SYAKIR, N. (2023). KARAKTERISTIK LAPISAN KOMPOSIT rGO/CeO₂ SEBAGAI ELEKTRODA PADA MODEL SUPERKAPASITOR SIMETRIS DENGAN ELEKTROLIT POTASIMUM KLOORIDA. *Jurnal Material Dan Energi Indonesia*, 12(02), 50. <https://doi.org/10.24198/jme.v12i02.44897>
- Theerthagiri, J., Lee, S. J., Shanmugam, P., & Choi, M. Y. (2020). Basic principles in energy conversion and storage. In *Nanostructured, Functional, and Flexible Materials for Energy Conversion and Storage Systems*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819552-9.00001-4>
- Tiwari, S. K., Sahoo, S., Wang, N., & Huczko, A. (2020). Graphene research and their outputs: Status and prospect. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 5(1), 10–29. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2020.01.006>
- Trivedi, D. N., & Rachchh, N. V. (2022). Graphene and its application in thermoplastic polymers as nano-filler- A review. *Polymer*, 240(December 2021). <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.124486>
- Vimuna, V. M., Karthika, U. M., Alex, S., & Xavier, T. S. (2022). Microsphere rGO/MnO₂ composites as electrode materials for high-performance symmetric supercapacitors synthesized by reflux reaction. *Inorganic Chemistry Communications*, 141(January). <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.109508>
- Wu, D., Xie, X., Zhang, Y., Zhang, D., Du, W., & Zhang, X. (2020). MnO₂ / Carbon Composites for Supercapacitor: Synthesis and Electrochemical Performance. 7(February), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00002>
- Xu, Y., Li, J., & Huang, W. (2017). Porous graphene oxide prepared on nickel foam by electrophoretic deposition and thermal reduction as high-performance supercapacitor electrodes. *Materials*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/ma10080936>

- Yuan, S. X., Yang, M. H., Lu, C. X., & Wang, X. M. (2020). Synthesis of a rGO/NiO composite with a hierarchical pore structure by self-assembly and its electrochemical performance as a supercapacitor electrode. Xinxing Tan Cailiao/New Carbon Materials, 35(6), 731–738. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(20\)60525-X](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(20)60525-X)
- Yuningsih, L. M., Anwar, D. I., & Fauziah, E. (2025). Synthesis and Characterization of Reduced Graphene Oxide (RGO) as a Solid-State Electrolyte in Batteries. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 15(1), 124. <https://doi.org/10.13057/ijap.v15i1.88878>
- Yunita, A., Farma, R., Awitdrus, A., & Apriyani, I. (2023). Materials Today : Proceedings The effect of various electrolyte solutions on the electrochemical properties of the carbon electrodes of supercapacitor cells based on biomass waste. *Materials Today: Proceedings*, 87, 246–252. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.102>
- Andrameda, Y. A., Nurdiansah, H., & Susanti, D. (2018). Analisa Pengaruh Doping Boron Terhadap Sifat Kapasitif Material Graphene u ntuk Aplikasi Superkapasitor. *Analisa Pengaruh Doping Boron Terhadap Sifat Kapasitif Material Graphene u Ntuk Aplikasi Superkapasitor*, 7(1), 0–5.
- Zainuddin, M. S., Susanti, D., Pramata, A. D., & Bahfie, F. (2025). Effect of hydrothermal temperature on the electrochemical performance of NiO/rGO supercapacitor electrodes. *Journal of Physics: Conference Series*, 2945(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2945/1/012018>
- Zaman, K. (2021). Pengaruh Graphene Oxide (go) Grafit Pensil Sebagai Additive Untuk Meningkatkan Strength Semen Pemboran. *Skripsi*, 23(2), 1–100. <https://repository.uir.ac.id/9389/1/153210162.pdf>
- Zhou, L., Li, C., Liu, X., Zhu, Y., Wu, Y., & Ree, T. Van. (2018). 7 - Metal oxides in supercapacitors. In *Metal Oxides in Energy Technologies*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811167-3.00007-9>

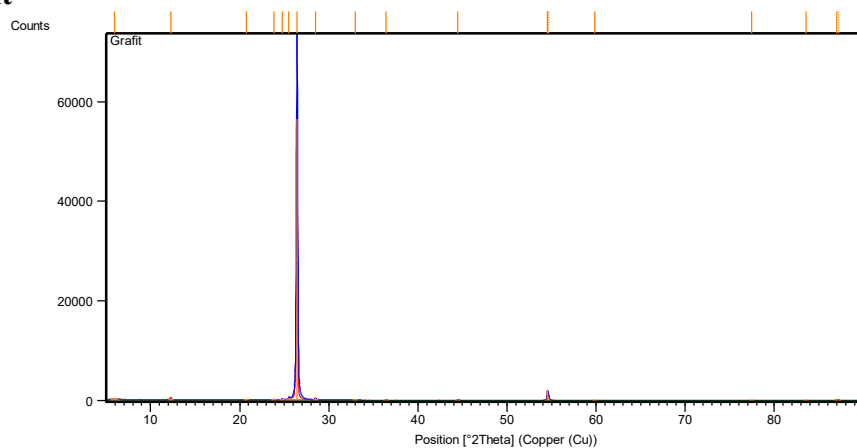
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

Lampiran 1

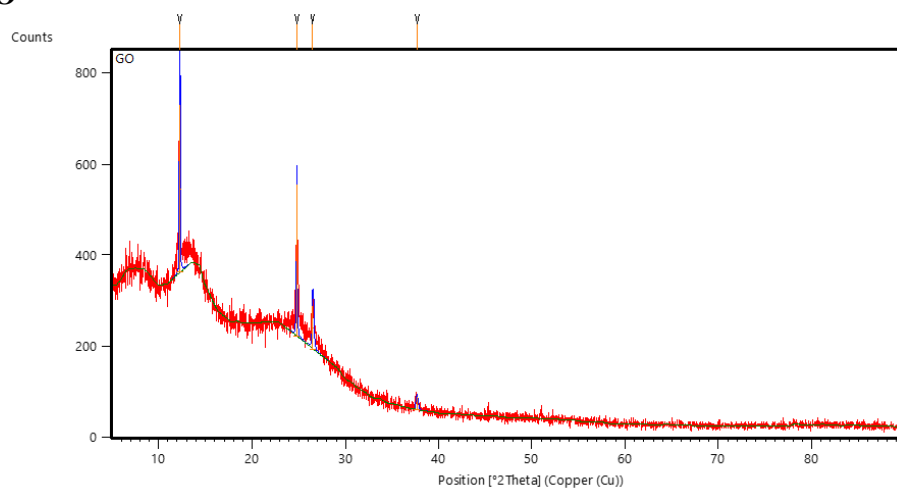
Hasil Pengujian XRD

a. Grafit



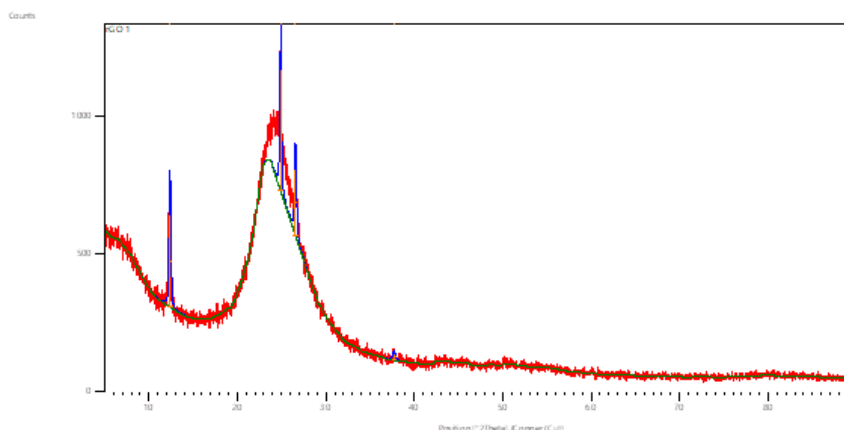
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
5.9349	34.69	0.8029	14.89203	0.06
12.2452	327.34	0.1338	7.22821	0.58
20.7187	36.21	0.2007	4.28725	0.06
23.8061	144.87	0.0836	3.73776	0.26
24.7390	223.09	0.1004	3.59889	0.40
25.5242	361.81	0.1004	3.48993	0.64
26.4162	56342.80	0.1506	3.37407	100.00
28.4787	352.35	0.0836	3.13423	0.63
32.9986	21.76	0.5353	2.71453	0.04
36.4090	63.22	0.1004	2.46771	0.11
44.4956	33.22	0.2676	2.03621	0.06
54.5443	2032.64	0.1020	1.68108	3.61
54.6816	1151.71	0.1020	1.68135	2.04
59.8281	22.69	0.4896	1.54461	0.04
77.4679	14.45	0.4896	1.23109	0.03
83.5683	16.40	0.4896	1.15604	0.03
86.9753	198.57	0.1428	1.11930	0.35
87.2442	106.92	0.1224	1.11931	0.19

b. GO



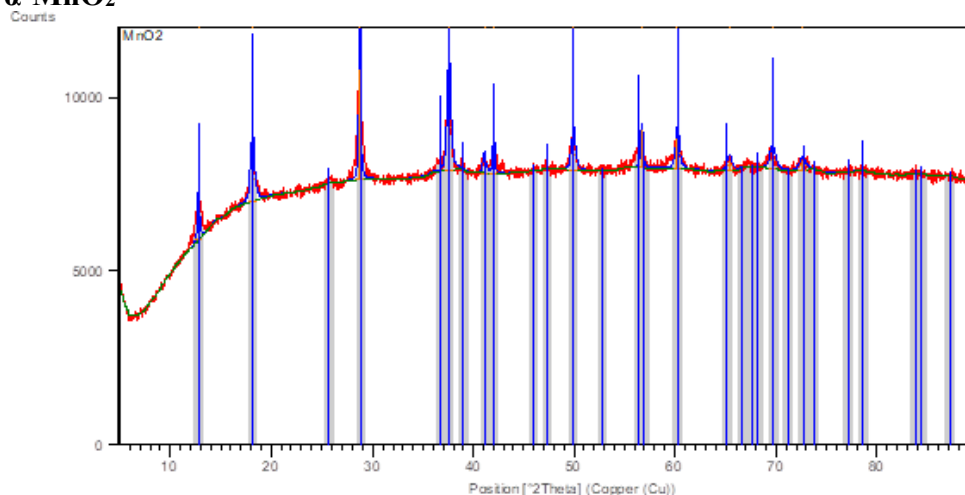
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
12.2810	371.50	0.0836	7.20723	100.00
24.7832	336.14	0.0836	3.59257	90.48
26.5328	94.88	0.2007	3.35951	25.54

c. rGO



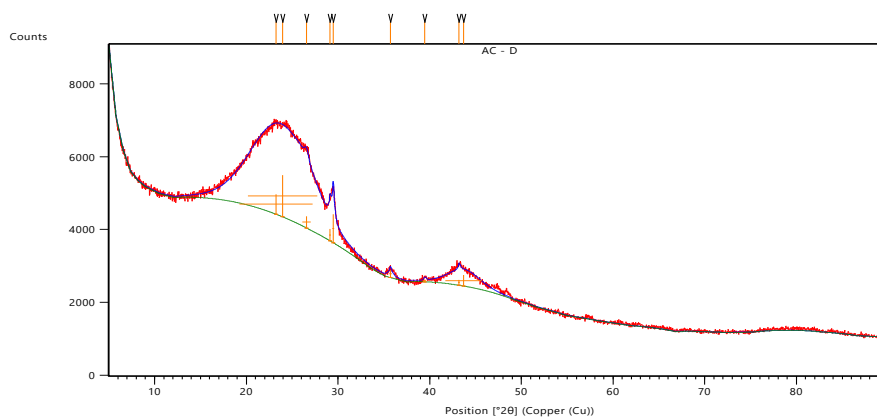
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
12.3846	336.90	0.2342	7.14717	76.55
24.8939	440.08	0.2007	3.57684	100.00
26.5608	240.01	0.2342	3.35603	54.54
37.6944	23.58	0.4015	2.38647	5.36

d. α -MnO₂



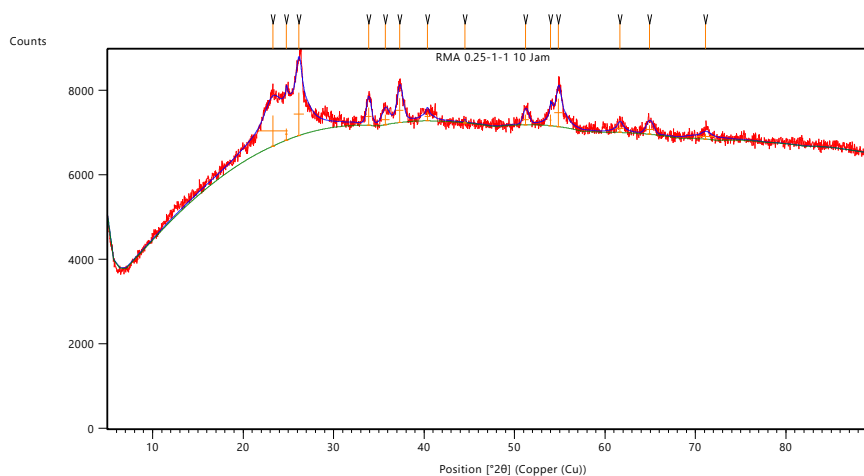
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
12.8065	1313.53	0.2165	6.91266	40.84
18.1427	1265.69	0.4763	4.88973	39.35
28.7386	3216.53	0.2165	3.10648	100.00
37.5512	2509.83	0.3897	2.39524	78.03
41.0575	413.82	0.3464	2.19842	12.87
41.9716	984.12	0.1732	2.15263	30.60
49.9332	864.00	0.4330	1.82648	26.86
56.6884	1083.87	0.2165	1.62382	33.70
60.2127	896.12	0.4330	1.53694	27.86
65.3459	313.13	0.5196	1.42808	9.74
69.6076	482.37	0.6061	1.35070	15.00
72.5481	245.83	0.6927	1.30303	7.64

e. Activated Carbon



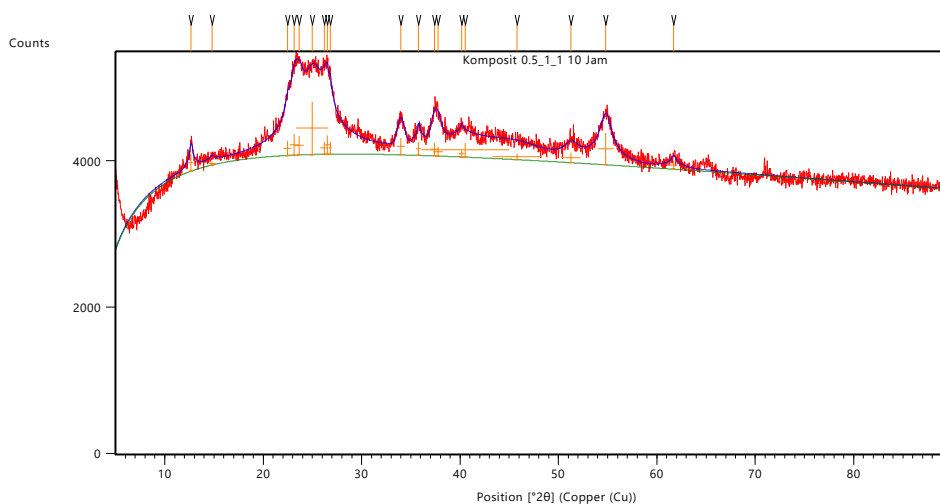
Pos. [°2θ]	Height [cts]	FWHM Left [°2θ]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
23,2412	543,30	8,0195	3,82414	47,50
23,9444	1143,72	7,5277	3,71341	100,00
26,5606	321,18	0,8729	3,35328	28,08
29,1348	324,21	0,1895	3,06259	28,35
29,4693	774,35	0,2028	3,02859	67,71
35,7086	199,40	0,3250	2,51241	17,43
39,4797	57,88	0,3091	2,28068	5,06
43,2074	152,04	0,1575	2,09215	13,29
43,7119	301,32	4,0330	2,06917	26,35

f. Komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon 0.25:1:1 10 Jam



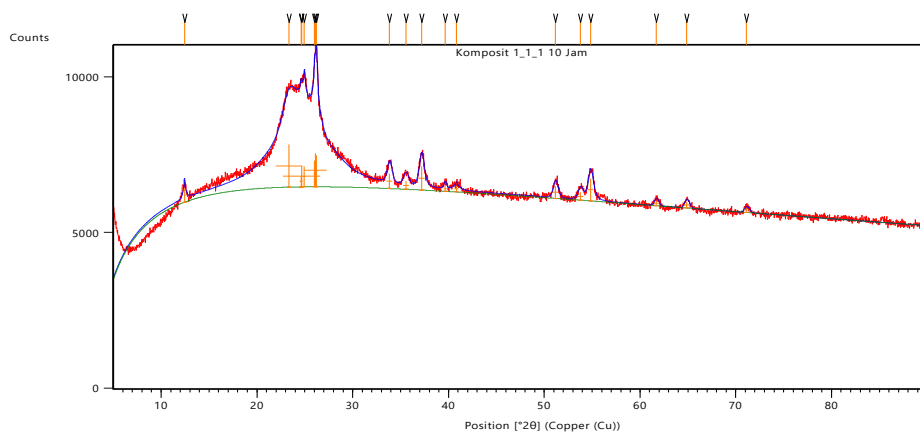
Pos. [°2 θ]	Height [cts]	FWHM Left [°2 θ]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
23.2729	731.42	3.2841	3.81901	72.20
24.7943	275.62	0.2975	3.58801	27.21
26.1691	1013.01	1.1147	3.40255	100.00
33.8784	426.56	0.6226	2.64383	42.11
35.7415	235.93	0.9581	2.51017	23.29
37.3229	580.96	0.7884	2.40737	57.35
40.3585	202.23	0.6391	2.23302	19.96
44.5188	66.60	0.0440	2.03352	6.57
51.2357	247.14	0.7303	1.78159	24.40
53.9968	260.00	0.1850	1.69682	25.67
54.8674	663.18	0.8751	1.67194	65.47
61.6302	174.62	0.8387	1.50370	17.24
64.9188	217.00	0.9341	1.43525	21.42
71.1200	125.79	1.9508	1.32455	12.42

g. Komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon 0.5:1:1 10 Jam



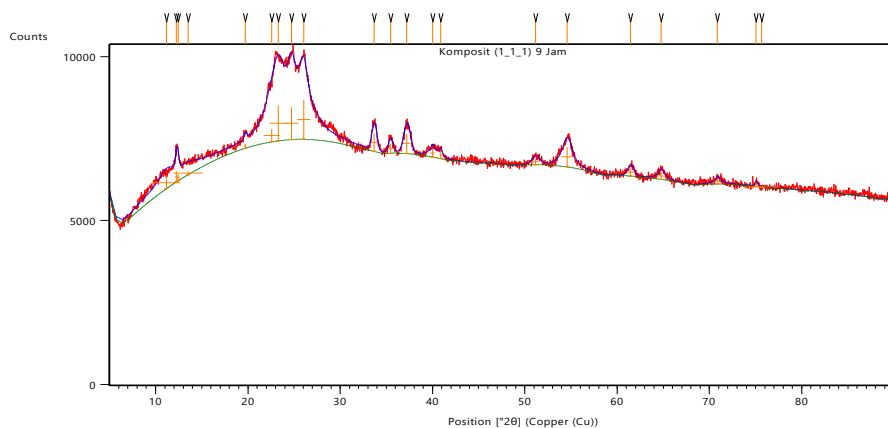
Pos. [°2 θ]	Height [cts]	FWHM Left [°2 θ]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
12.6835	232.41	0.04823	6.97365	32.24
14.8041	49.46	0.06786	5.97914	6.86
22.4977	202.23	0.8673	3.94883	28.05
23.1476	289.28	0.9113	3.83941	40.13
23.6390	259.14	0.9498	3.76069	35.95
25.0022	720.83	3.310	3.55865	100.00
26.2015	172.60	0.8135	3.39841	23.94
26.4945	255.99	0.6101	3.36149	35.51
26.8116	171.02	0.3058	3.32245	23.73
33.9690	232.76	0.8291	2.63699	32.29
35.7923	187.26	0.4676	2.50673	25.98
37.3979	177.17	0.8558	2.40271	24.58
37.7819	129.28	1.0574	2.37917	17.93
40.1779	91.04	0.5685	2.24264	12.63
40.5356	193.75	8.8982	2.22367	26.88
45.8074	79.17	5.0529	1.97927	10.98
51.2925	139.38	1.9876	1.77975	19.34
54.7769	434.64	1.6735	1.67449	60.30
61.6809	111.44	0.8511	1.50258	15.46

h. Komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon 1:1:1 10 Jam



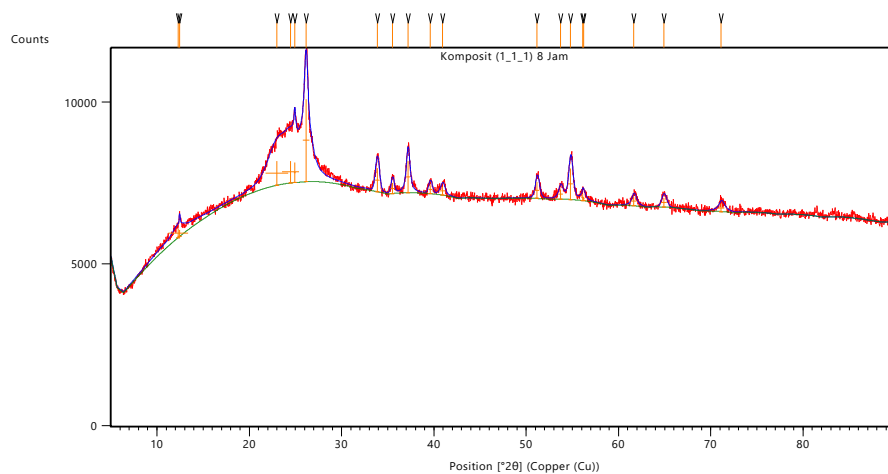
Pos. [°2θ]	Height [cts]	FWHM Left [°2θ]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
12.4355	449.62	0.1852	7.11213	32.77
23.3511	1372.13	2.7156	3.80641	100.00
24.6181	360.23	0.3028	3.61330	26.25
24.6975	672.72	3.9243	3.60186	49.03
24.9571	658.31	0.2175	3.56497	47.98
26.0307	843.48	0.1438	3.42033	61.47
26.1217	1070.16	2.3148	3.40862	77.99
26.2154	1012.22	0.2183	3.39664	73.77
33.8467	474.96	0.5828	2.64624	34.61
35.5673	254.39	0.6479	2.52207	18.54
37.1990	753.25	0.6091	2.41510	54.90
39.6429	163.25	0.3276	2.27166	11.90
40.8140	189.54	0.3638	2.20914	13.81
51.1737	389.45	0.6048	1.78360	28.38
53.7671	256.44	0.5797	1.70353	18.69
54.8314	709.62	0.6422	1.67295	51.72
61.6969	163.27	0.5151	1.50223	11.90
64.8787	195.78	0.5682	1.43604	14.27
71.1212	143.07	0.5392	1.32453	10.43

i. Komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon 1:1:1 9 Jam



Pos. [°2θ]	Height [cts]	FWHM Left [°2θ]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
11.1874	357.39	2.9930	7.90267	29.69
12.2657	322.83	0.2955	7.21024	26.82
12.4399	193.54	0.2631	7.10968	16.08
13.5196	102.12	3.1930	6.54419	8.48
19.7361	132.53	0.3296	4.49470	11.01
22.6053	388.34	1.7080	3.93027	32.27
23.3050	1080.45	1.9130	3.81383	89.77
24.7148	988.05	1.4469	3.59938	82.09
26.0360	1203.59	1.4752	3.41965	100.00
33.6835	559.26	0.6077	2.65868	46.47
35.4549	278.72	0.5492	2.52980	23.16
37.2291	604.25	0.8142	2.41322	50.20
40.0017	247.48	0.5282	2.25211	20.56
40.8628	193.64	0.3492	2.20662	16.09
51.1728	167.62	0.9377	1.78363	13.93
54.5681	607.43	1.3217	1.68040	50.47
61.4405	232.19	0.7389	1.50789	19.29
64.7627	222.44	0.8175	1.43833	18.48
70.8771	165.77	0.5857	1.32849	13.77
75.0379	146.09	0.1213	1.26481	12.14
75.6789	16.51	3.6691	1.25568	1.37

j. Komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon 1:1:1 8 Jam

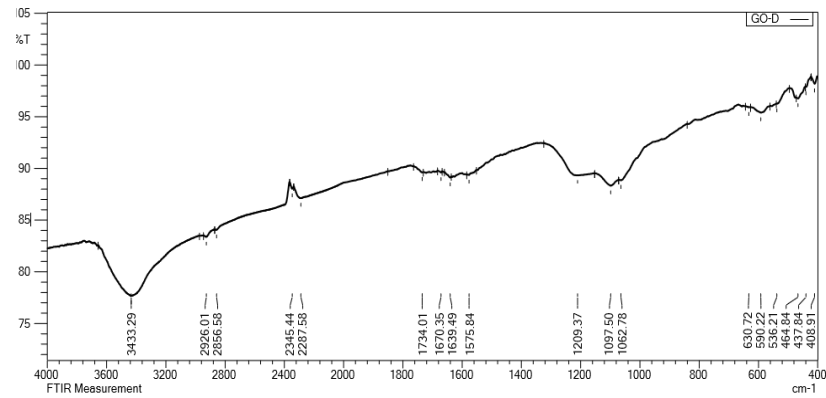


Pos. [°2θ]	Height [cts]	FWHM Left [°2θ]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
12.2867	274.81	2.1985	7.19795	10.80
12.4522	210.61	0.1128	7.10265	8.28
22.9873	742.73	2.4538	3.86581	29.19
24.4701	678.83	1.8805	3.63481	26.68
24.9238	613.85	0.1750	3.56967	24.13
26.1484	2544.23	0.6654	3.40519	100.00
33.8685	733.36	0.5117	2.64459	28.82
35.5192	333.85	0.3970	2.52537	13.12
37.1904	973.35	0.4601	2.41564	38.26
39.6119	266.69	0.4584	2.27337	10.48
40.9427	266.22	0.5822	2.20250	10.46
51.1891	506.67	0.5145	1.78310	19.91
53.7374	304.22	0.5305	1.70440	11.96
54.8076	956.11	0.5207	1.67362	37.58
56.1401	205.32	0.2777	1.63701	8.07
56.2039	104.02	0.2431	1.63531	4.09
61.6695	283.28	0.5771	1.50284	11.13
64.9135	290.36	0.6277	1.43535	11.41
71.1321	241.95	0.7668	1.32436	9.51

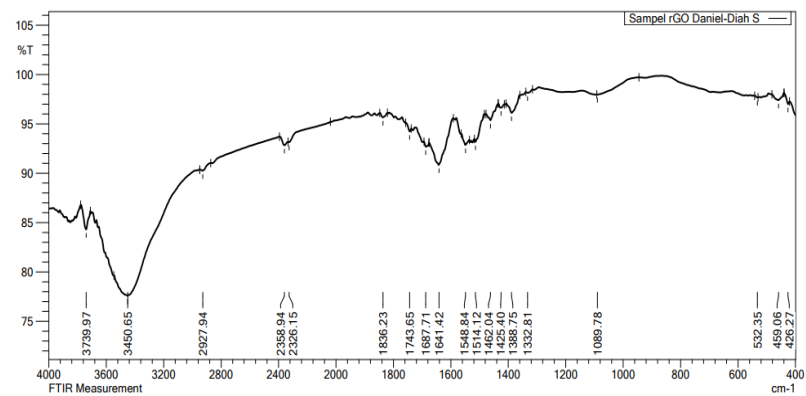
Lampiran 2

Hasil Pengujian FTIR

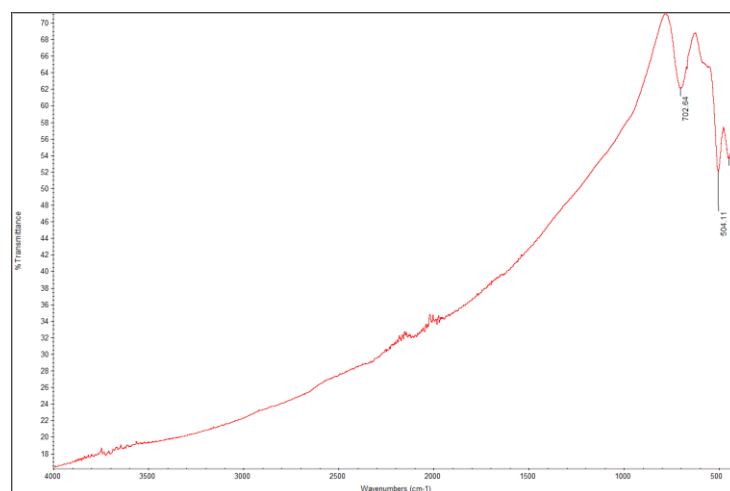
a. GO



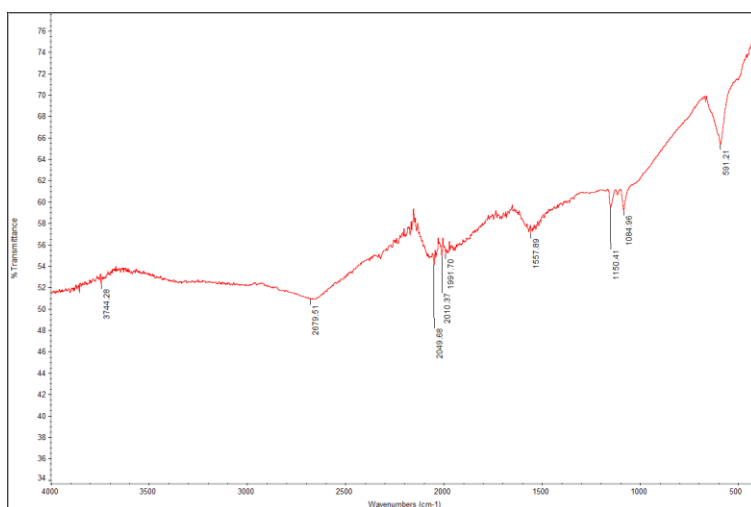
b. rGO



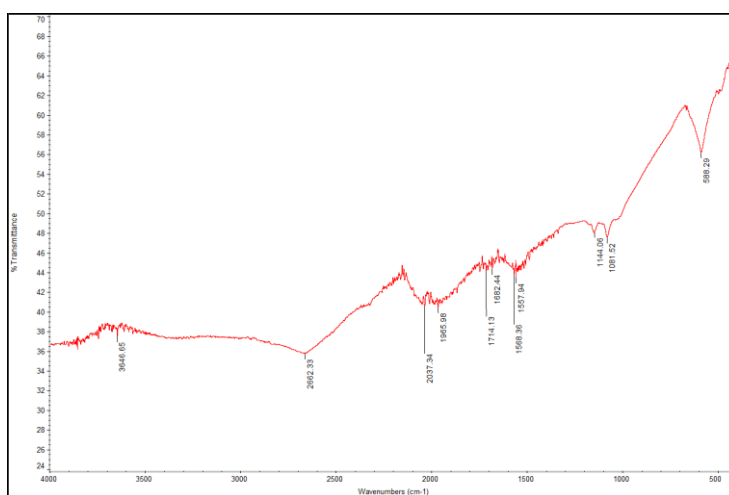
c. α -MnO₂



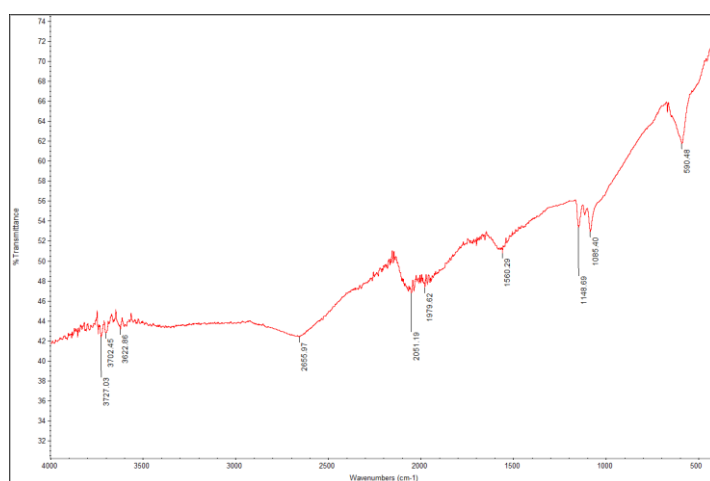
d. Komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon 0.25:1:1 10 Jam



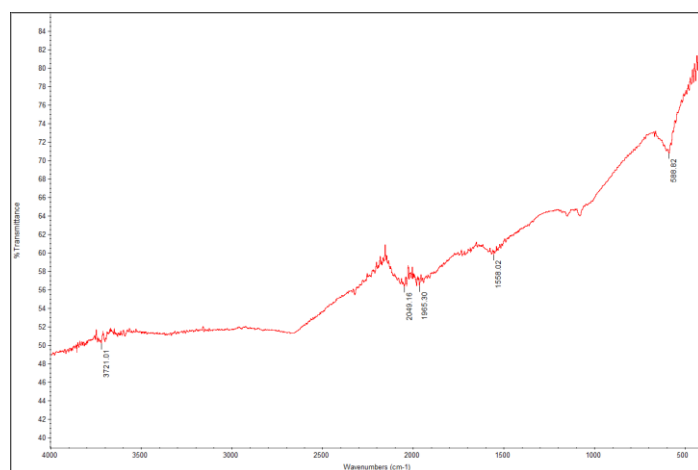
e. Komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon 0.5:1:1 10 Jam



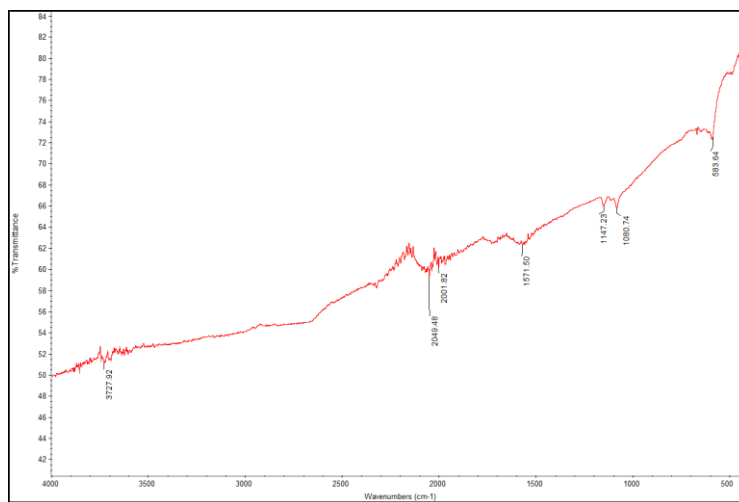
f. Komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon 1:1:1 10 Jam



g. Komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon 1:1:1 9 Jam



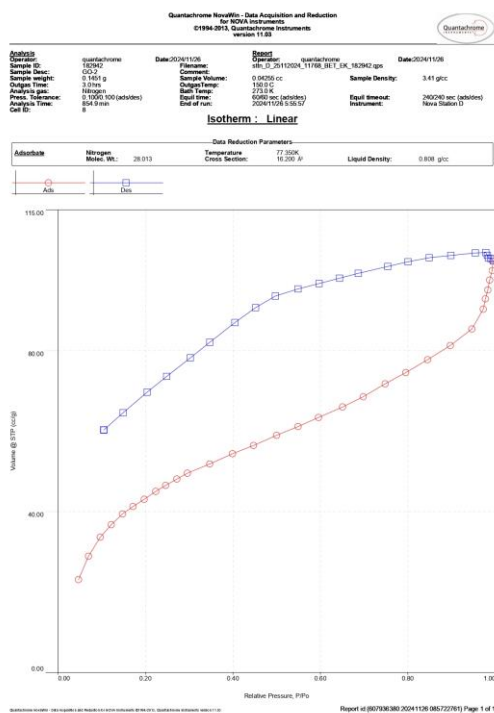
h. Komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon 1:1:1 8 Jam



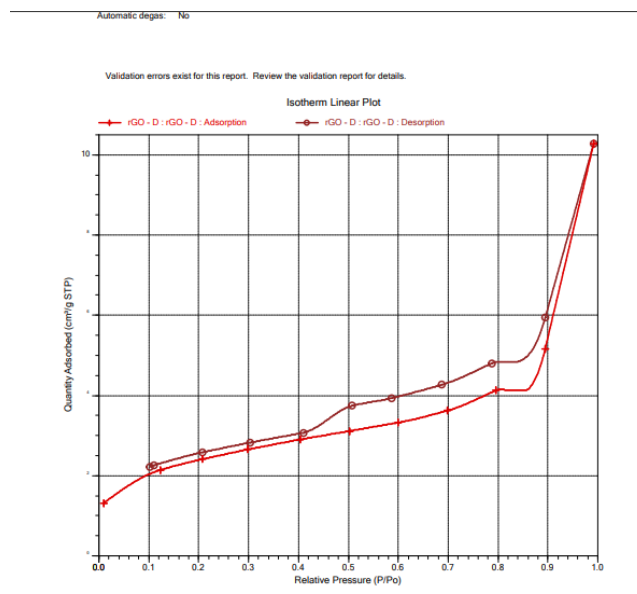
Lampiran 3

Hasil Pengujian BET

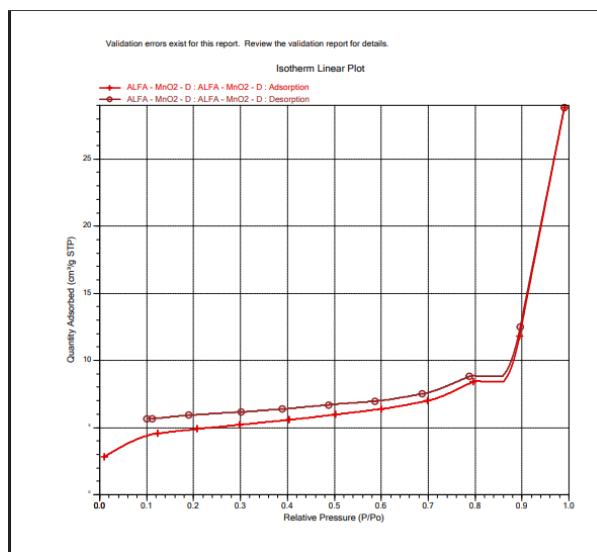
a. GO



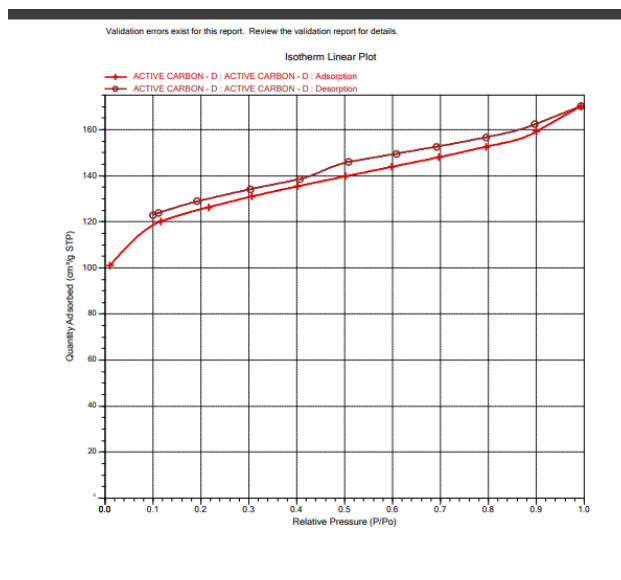
b. rGO



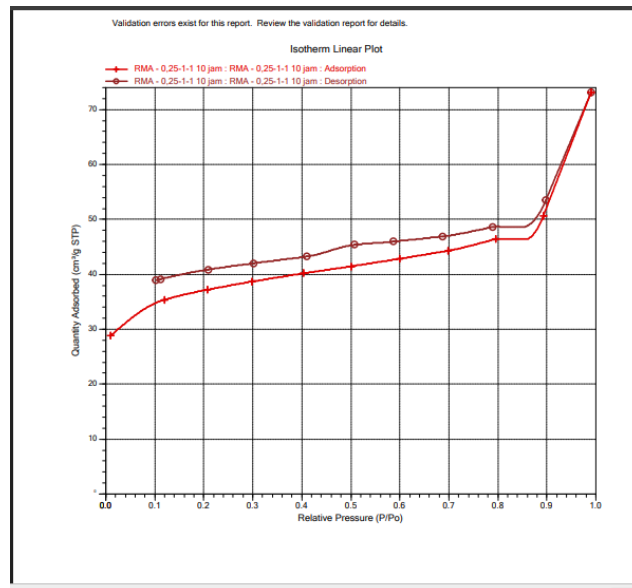
c. α -MnO₂



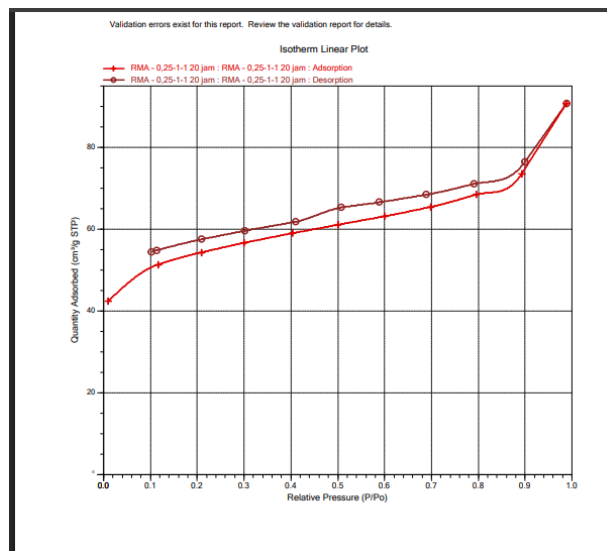
d. Activated carbon



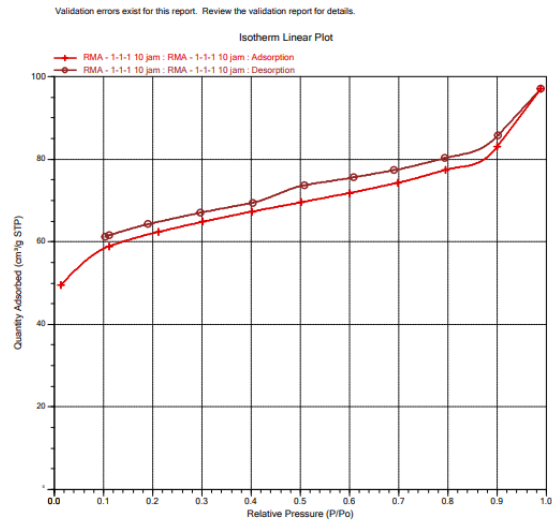
e. Komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon 0.25:1:1 10 Jam



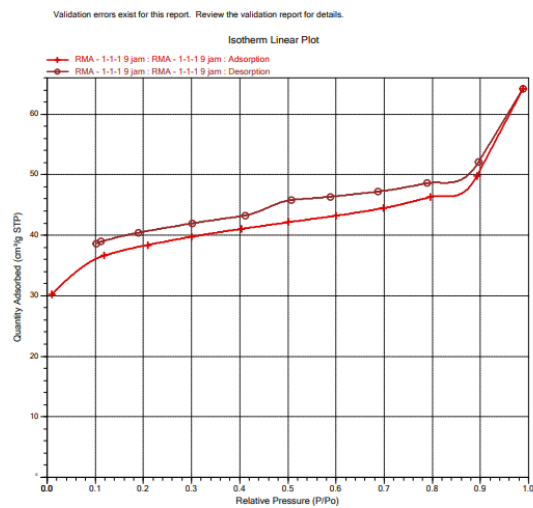
f. Komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon 0.5:1:1 10 Jam



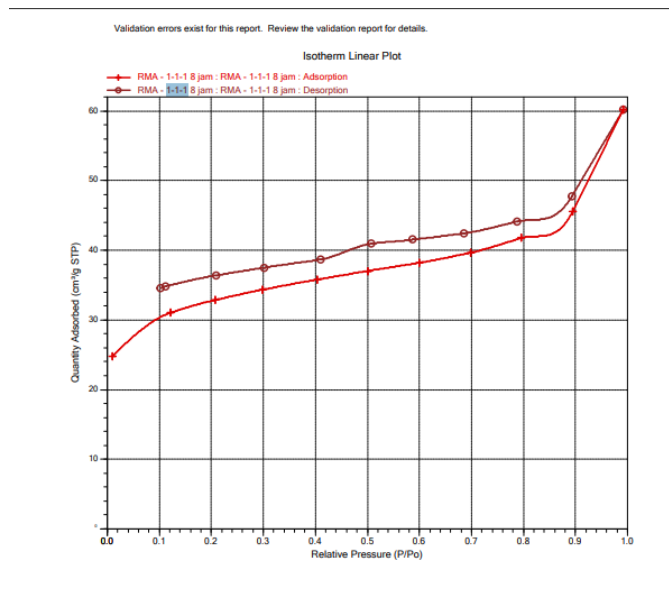
g. Komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon 1:1:1 10 Jam



h. Komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon 1:1:1 9 Jam



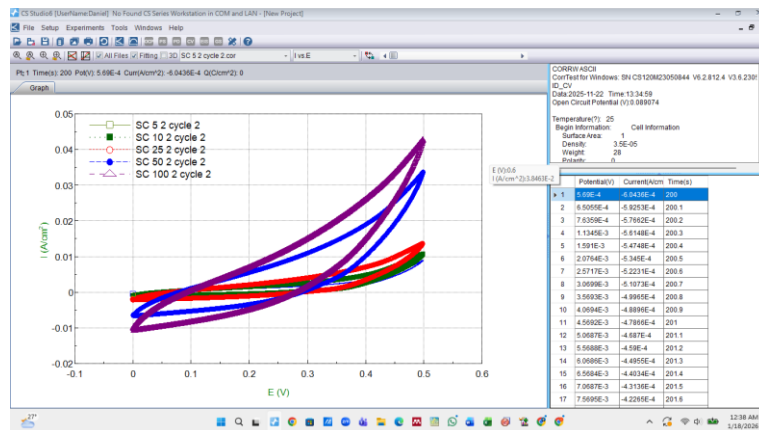
i. Komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon 1:1:1 8 Jam



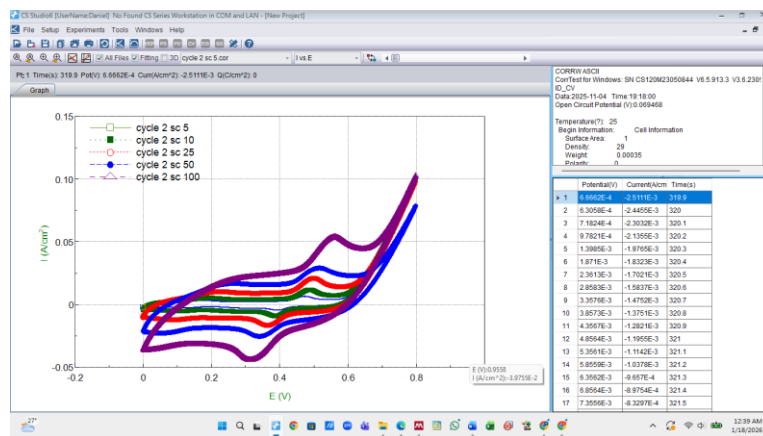
Lampiran 4

Hasil Pengujian CV

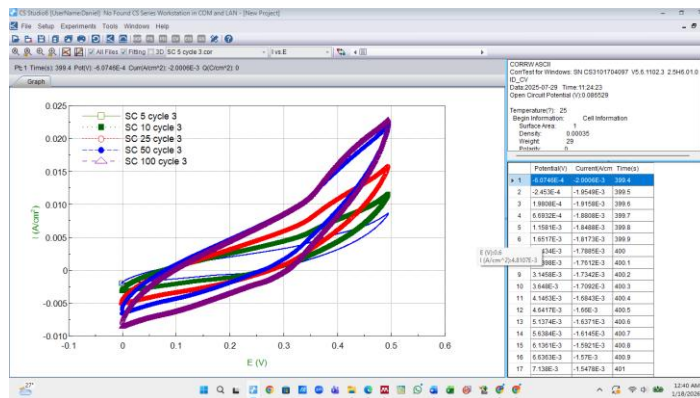
a. rGO



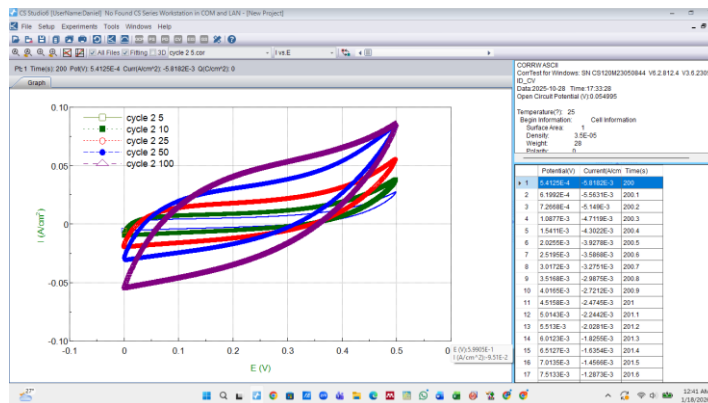
b. α -MnO₂



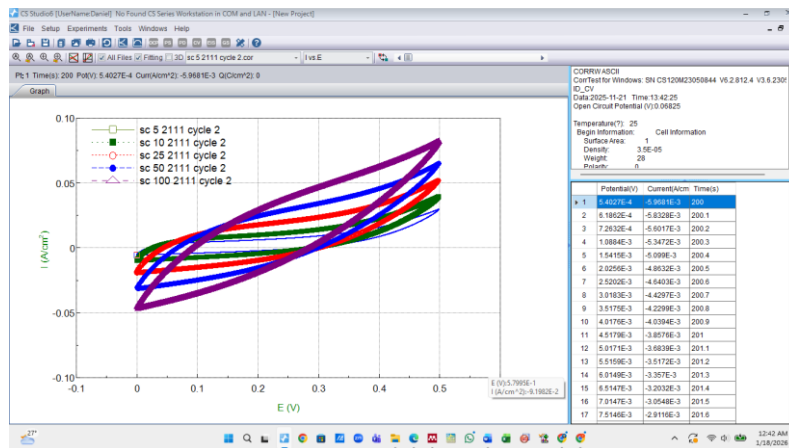
c. Activated carbon



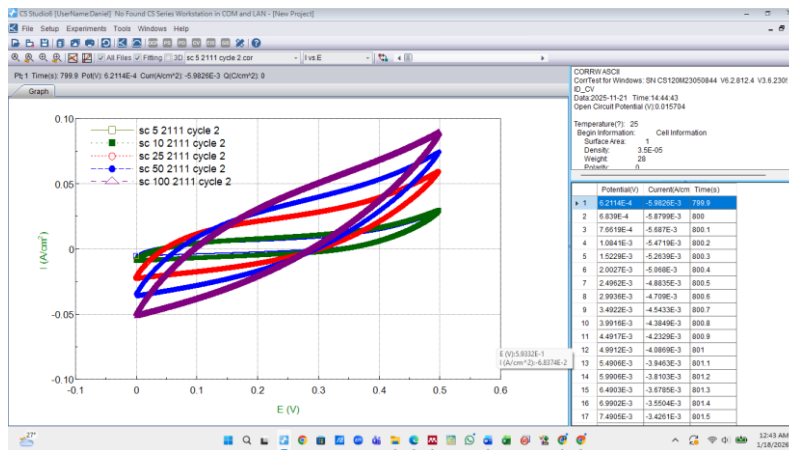
d. Komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon 0.25:1:1 10 Jam



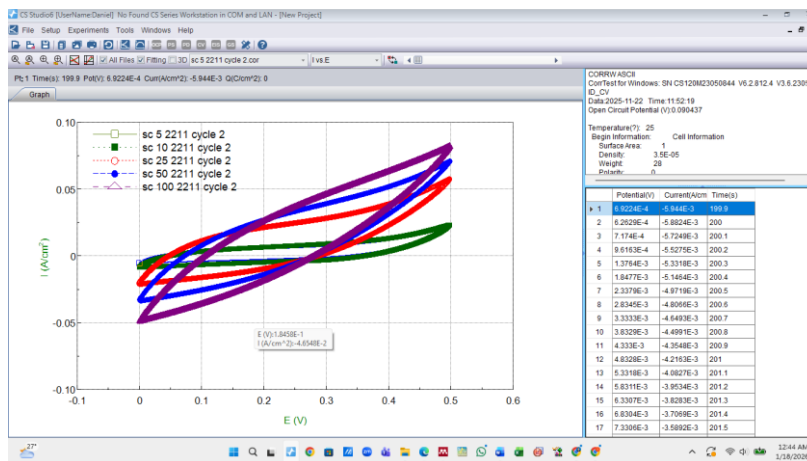
e. Komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon 0.5:1:1 10 Jam



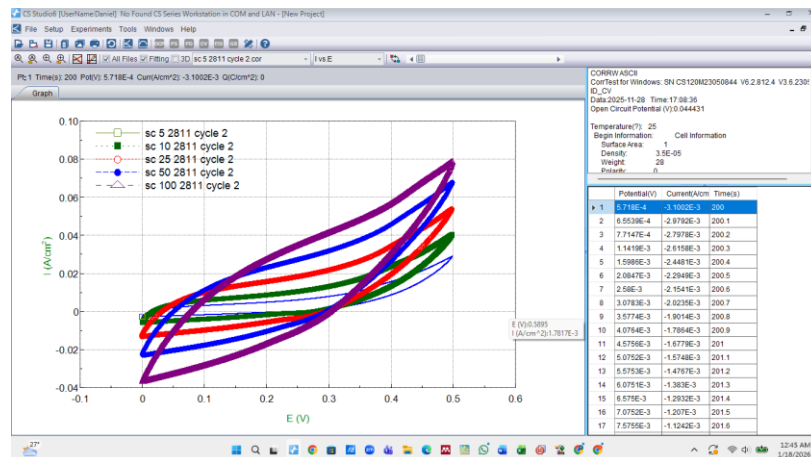
f. Komposit rGO/α-MnO₂/Activated Carbon 1:1:1 10 Jam



g. Komposit rGO/α-MnO₂/Activated Carbon 1:1:1 9 Jam



h. Komposit rGO/α-MnO₂/Activated Carbon 1:1:1 8 Jam



i. Perhitungan Kapasitansi Spesifik, *Specific Energy Density*, *Specific Power Density*

• **Kapasitanasi Spesifik**

Diketahui :

$$\int IdV = 0.0037814$$

$$m = 0.0012 \text{ gram}$$

$$v = 5 \text{ mV/s} = 0.005 \text{ V/s}$$

$$\Delta E = 0.5 \text{ V}$$

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

$$C = \frac{0.0037814}{2 \cdot 0.5 \cdot 0.0012 \cdot 0.005} = 630.23 \text{ F/g}$$

• ***Specific Energy Density***

Diketahui:

$$C = 630.23 \text{ F/g}$$

$$V = 0.5 \text{ V}$$

$$E = \frac{(0,5)CV^2}{3.6}$$

$$E = \frac{(0,5)630.23 \cdot 0.5^2}{3.6} = 21.88 \text{ Wh/kg}$$

• ***Specific Power Density***

Diketahui:

$$E = 21.88 \text{ Wh/kg}$$

$$t = 100 \text{ s}$$

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

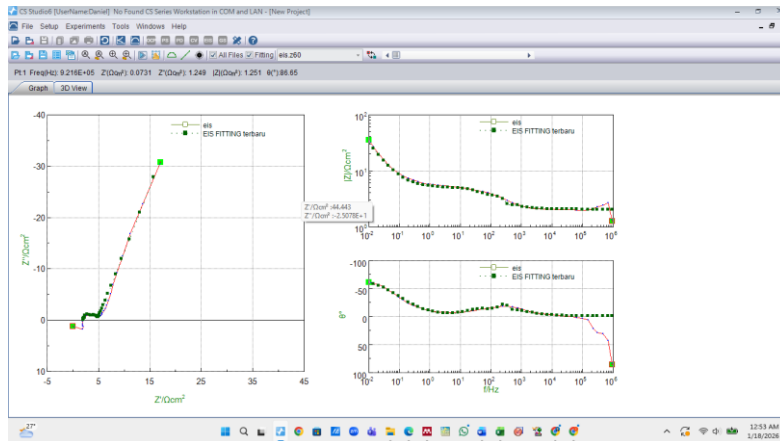
$$P = \frac{21.88 \times 3600}{100}$$

$$= 787.792 \text{ W/kg}$$

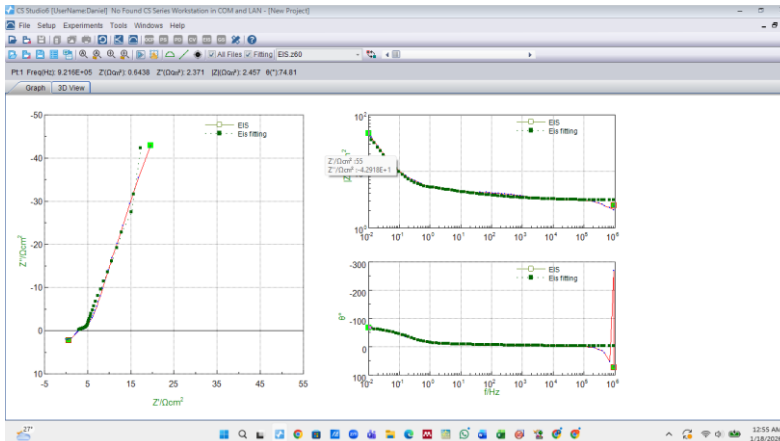
Lampiran 5

Hasil Pengujian EIS

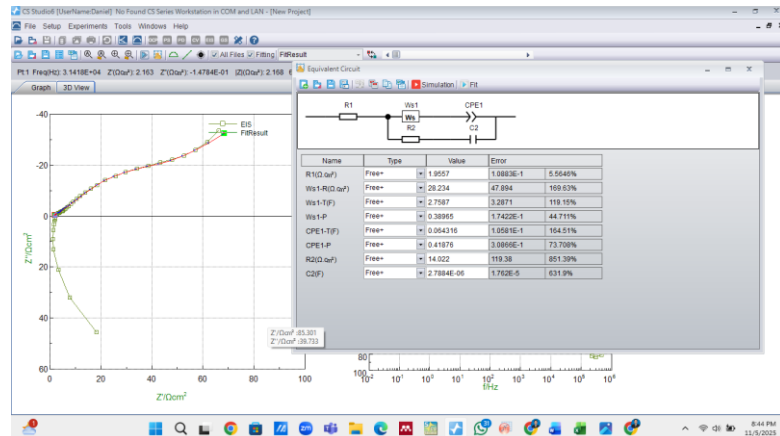
a. rGO



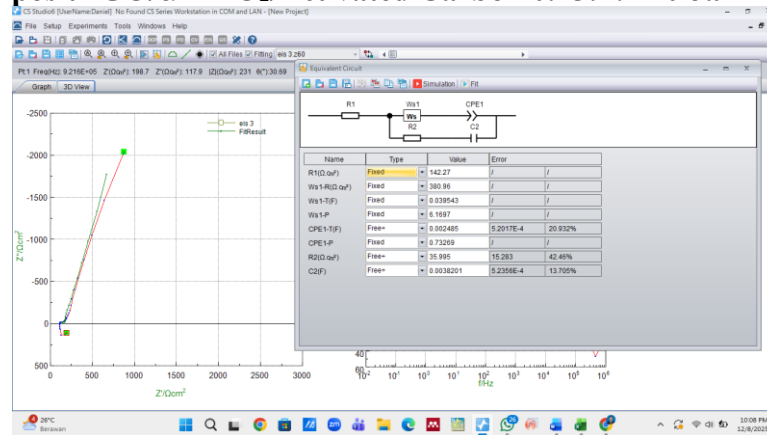
b. α -MnO₂



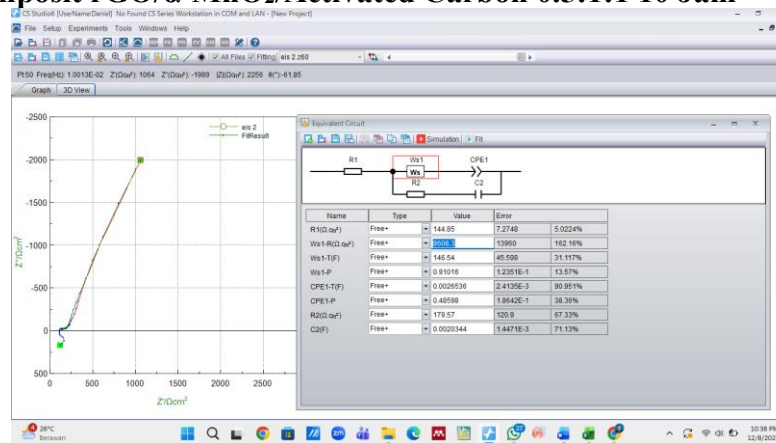
c. Activated Carbon



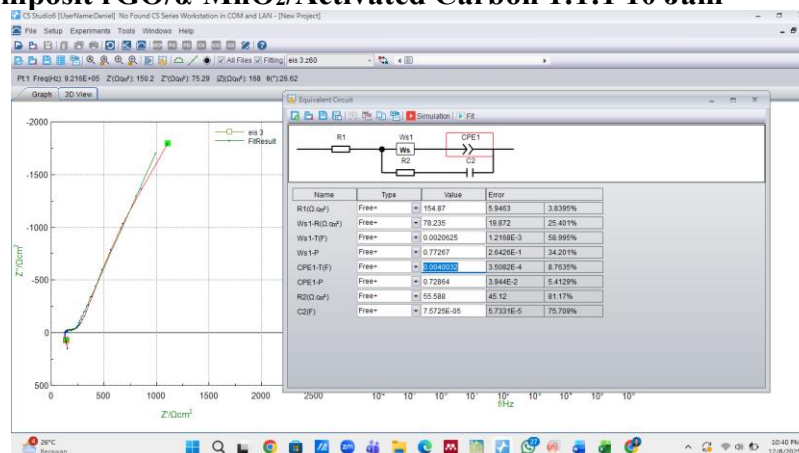
d. Komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon 0.25:1:1 10 Jam



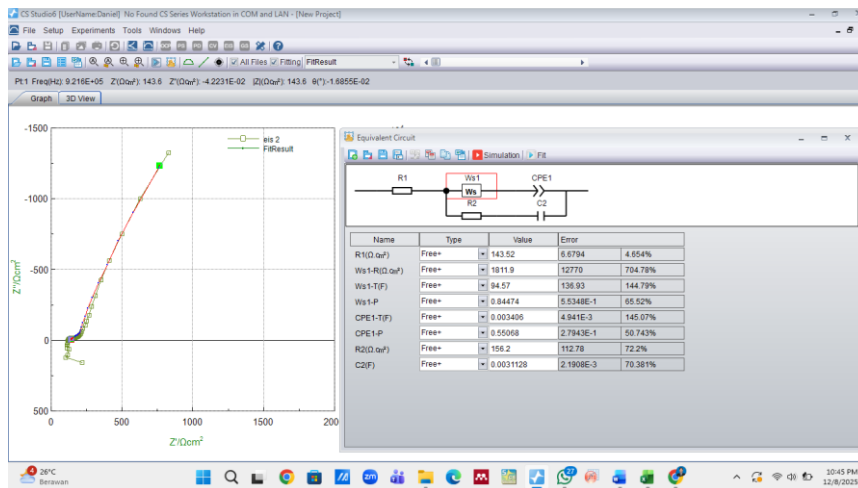
e. Komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon 0.5:1:1 10 Jam



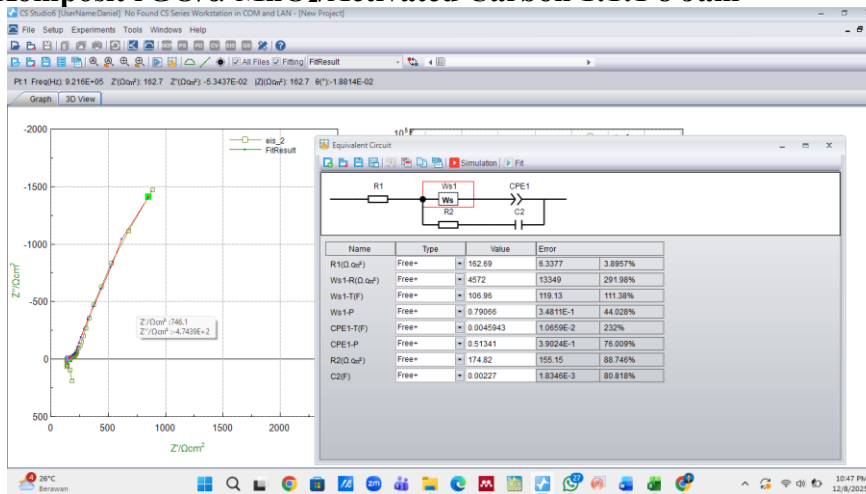
f. Komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon 1:1:1 10 Jam



g. Komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon 1:1:1 9 Jam



h. Komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon 1:1:1 8 Jam



i. Perhitungan Kapasitansi Spesifik Konduktivitas

Diketahui:

$$L = 0.001 \text{ m}$$

$$|Z| = 22.16 \Omega \cdot \text{cm}^2$$

$$K = \frac{L}{|Z|} = \frac{0.001 \text{ m}}{22.16 \Omega \cdot \text{cm}^2 \times 0.0001 \text{ m}^2}$$

$$K = 0.451 \text{ s/m}$$

Kapasitansi Spesifik

Diketahui:

$$f = 0.01 \text{ Hz}$$

$$Z'' = 20.34 \Omega \cdot \text{cm}^2$$

$$m = 0.0012 \text{ gr}$$

$$C = \frac{1}{2 \pi f z'' M}$$

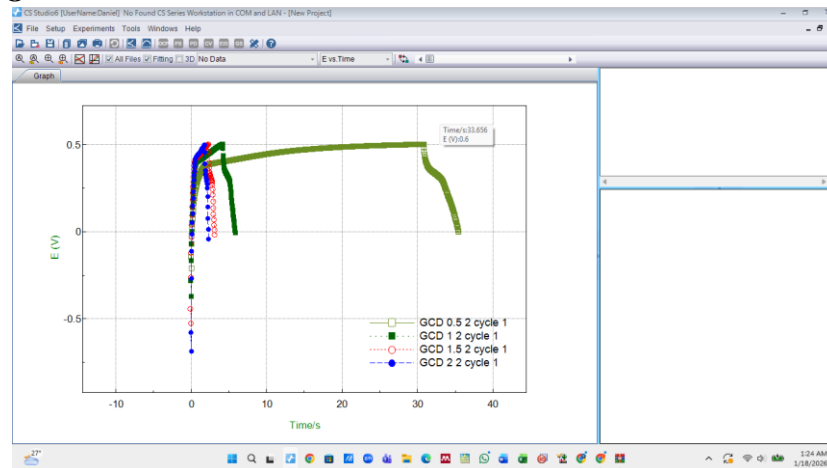
$$C = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 0.01 \times 20.34 \Omega \cdot \text{cm}^2 \times 0.0012 \text{ gr/cm}^2}$$

$$C = 621.85 \text{ F/g}$$

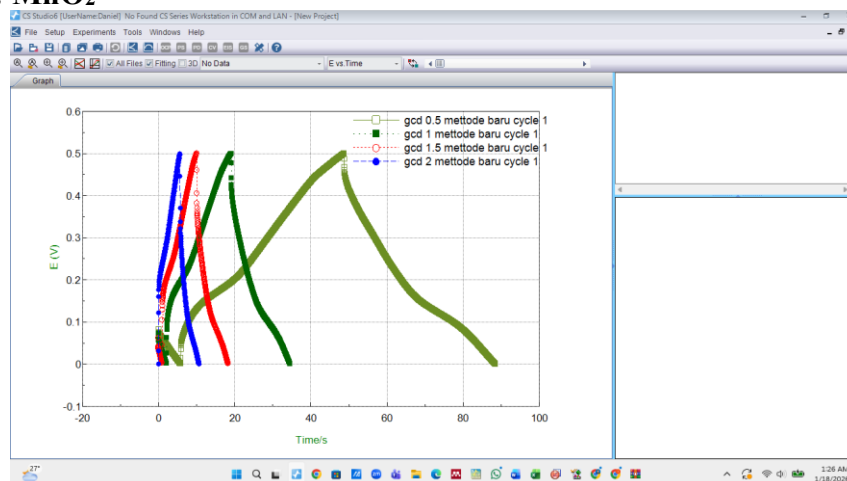
Lampiran 6

Hasil Pengujian GCD

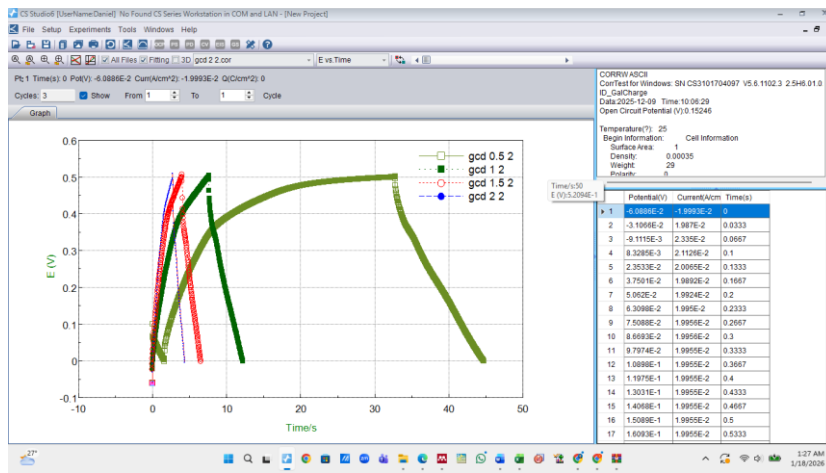
a. rGO



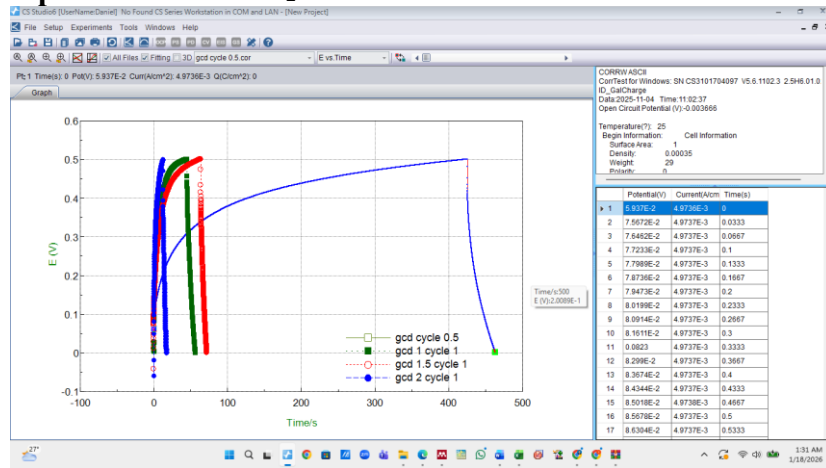
b. α -MnO₂



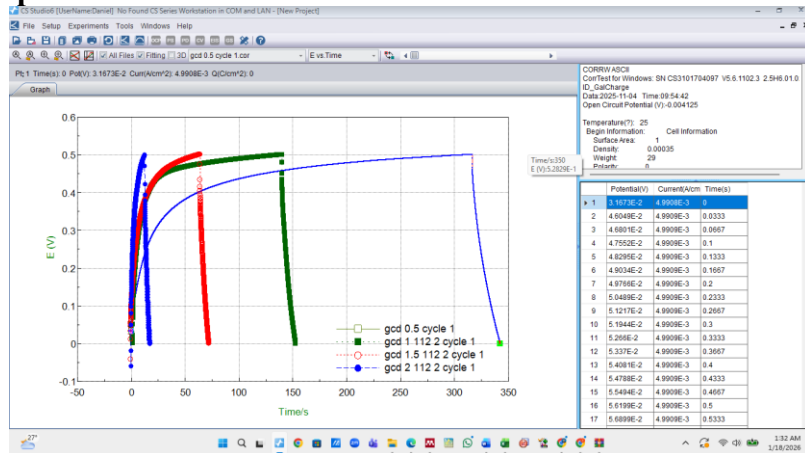
c. Activated Carbon



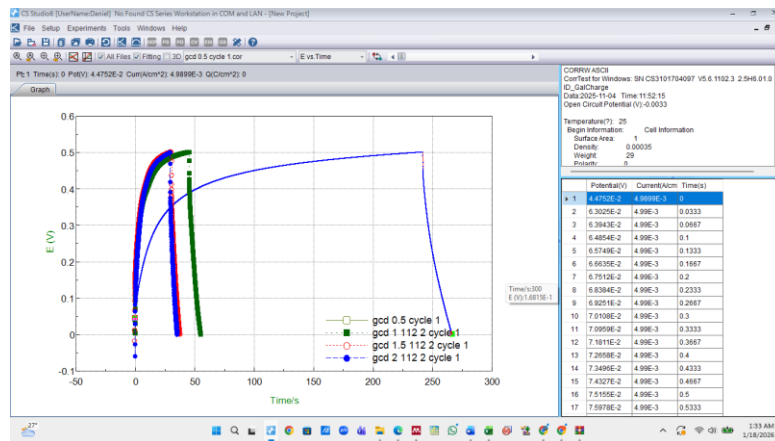
d. Komposit rGO/α-MnO₂/Activated Carbon 0.25:1:1 10 Jam



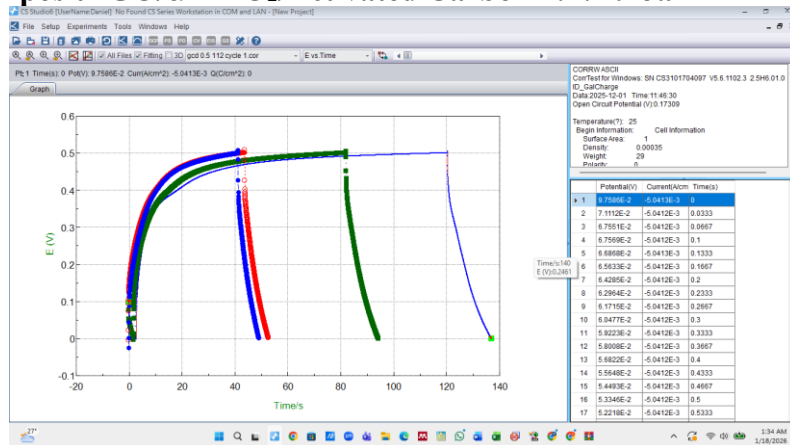
e. Komposit rGO/α-MnO₂/Activated Carbon 0.5:1:1 10 Jam



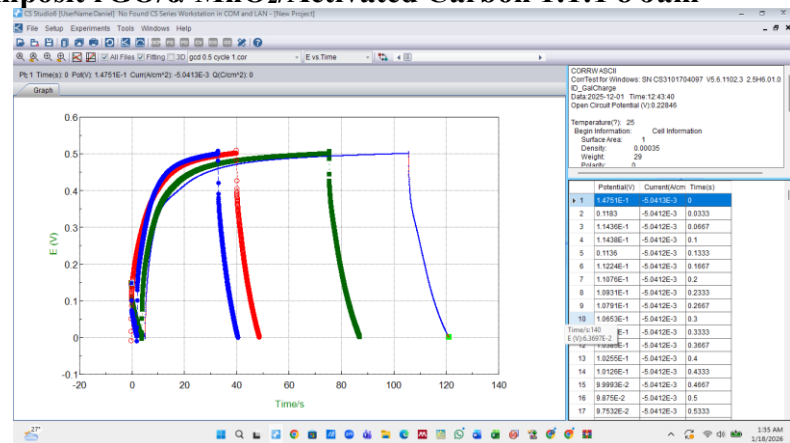
f. Komposit rGO/α-MnO₂/Activated Carbon 1:1:1 10 Jam



g. Komposit rGO/α-MnO₂/Activated Carbon 1:1:1 9 Jam



h. Komposit rGO/α-MnO₂/Activated Carbon 1:1:1 8 Jam



i. Perhitungan Kapasitansi Spesifik

Diketahui:

$$I = 0.5 \text{ A/g}$$

$$t = 101.6 \text{ s}$$

$$\Delta E = 0.5 \text{ V}$$

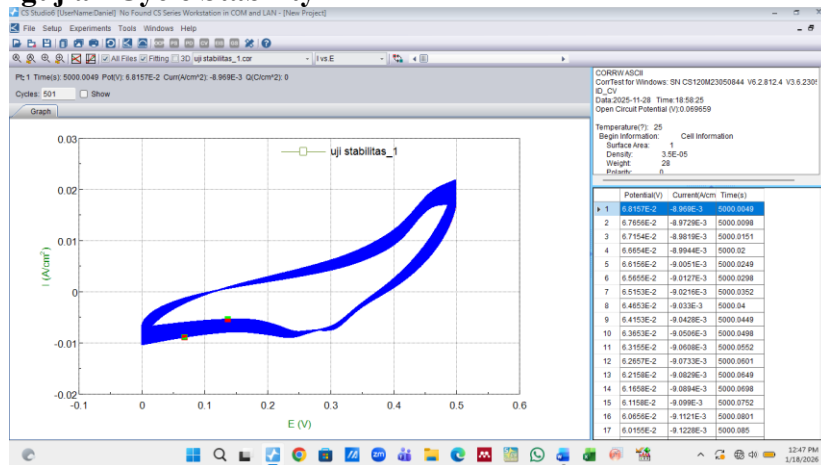
$$C = \frac{I \times t}{V}$$

$$C = \frac{0.5 \frac{A}{g} \times 101.6 \text{ s}}{0.5 \text{ V}}$$

$$C = 101.567 \text{ F/g}$$

Lampiran 7

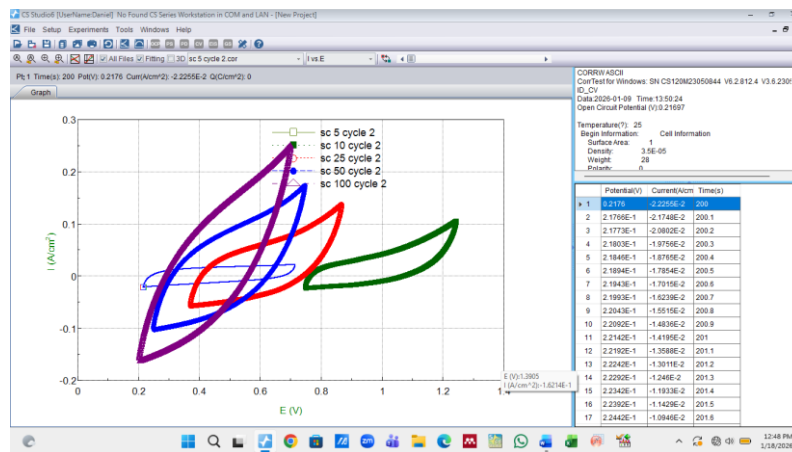
Hasil Pengujian Cycle Stability



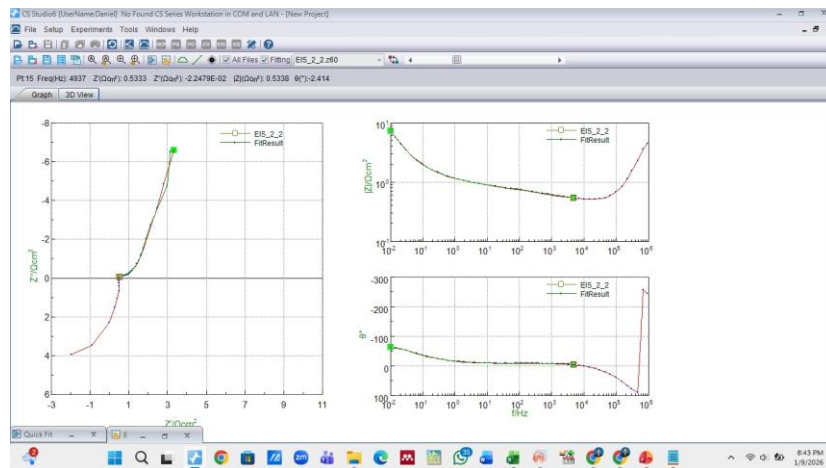
Lampiran 8

Hasil Pengujian Prototype Superkapasitor

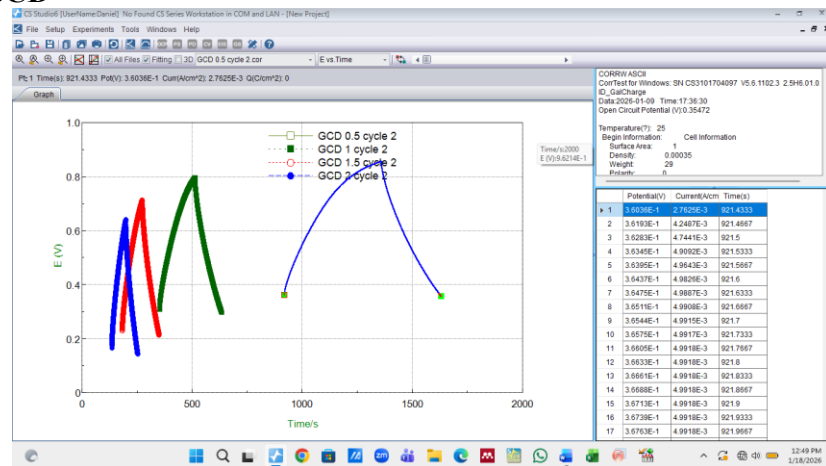
a. CV



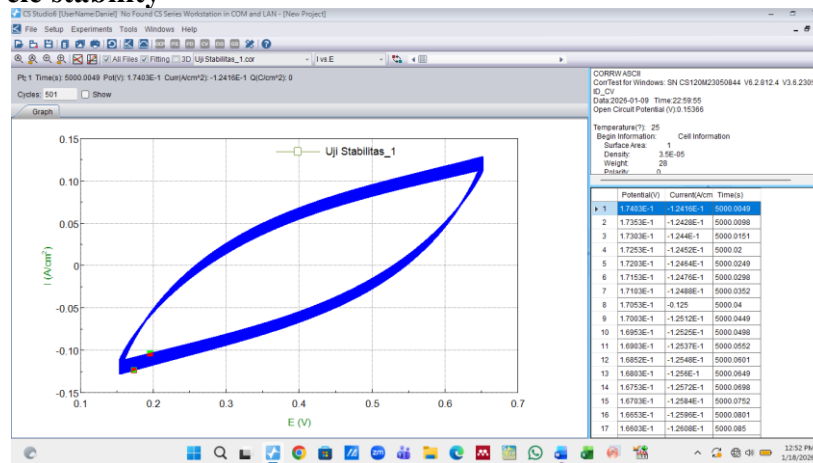
b. EIS



c. GCD



d. Cycle stability



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis dengan nama Daniel lahir di Surabaya, 26 Mei 2001, merupakan anak kelima dari 5 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TK Citra Ananda Surabaya, SDN Wonokusumo VI/45 Surabaya, SMPN 9 Surabaya dan SMKN 5 Surabaya. Setelah lulus dari SMKN tahun 2021, Penulis melanjutkan pendidikan sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) dan mengambil jurusan departemen Teknik Material dan Metalurgi. Saat ini sebagai mahasiswa pascasarjana (S2) di departemen yang sama. Selama berkuliah penulis aktif dalam kegiatan akademik seperti Asisten Laboratorium Kimia Material dan Grader Mata Kuliah Teknik Pengecoran. Pada bidang non akademik penulis aktif di beberapa pelatihan kewirausahaan (LKMW TD), media dan desain (BMS), dan manajerial (LKMM TD). Selain itu juga penulis aktif di Himpunan Teknik Material dan Metalurgi ITS sebagai staf Kesma HMMT dan Kepala Bagian Biro Finansial Kesma HMMT pada periode selanjutnya. Penulis juga aktif di Persekutuan Mahasiswa Kristen ITS sebagai staff Pembinaan PKMBK dan *Steering Committee* Pembinaan PKMBK pada periode selanjutnya. Penulis juga telah melakukan kerja praktik di perusahaan Kereta Api Indonesia Balai Yasa Yogyakarta selama 30 hari di bagian Inspeksi kegagalan. Untuk menyelesaikan studi S2, penulis melakukan penelitian dalam bidang Material Inovatif tentang rekayasa material superkapasitor dengan judul tugas akhir “Analisis Pengaruh Komposisi rGO dan Waktu Hidrotermal Terhadap Sifat Kapasitif Komposit rGO/ α -MnO₂/Activated Carbon Untuk Aplikasi Elektroda Superkapasitor *Hybrid*”. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email dinodaniel095@gmail.com dan nomor telepon +6288009305333.