

TUGAS AKHIR - TL234839

**ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN MASSA CNT
TERHADAP SIFAT KAPASITIF SUPERKAPASITOR *HYBRID*
BERBAHAN KOMPOSIT $\text{MnO}_2/\text{N-rGO}/\text{CNT}$**

**THIERRY RAYHAN WISNU PUTRA
NRP 5011201122**

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

Program Studi Teknik Material
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2024

(Halaman ini Sengaja Dikosongkan)



TUGAS AKHIR - TL234839

**ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN MASSA CNT
TERHADAP SIFAT KAPASITIF SUPERKAPASITOR *HYBRID*
BERBAHAN KOMPOSIT $MnO_2/N-rGO/CNT$**

**THIERRY RAYHAN WISNU PUTRA
NRP 5011201122**

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

Program Studi Teknik Material
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2024

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL234839

**ANALYSIS EFFECTS OF CNT MASSA ADDITION TOWARDS
CAPACITIVE PROPERTIES OF $\text{MnO}_2/\text{N-rGO}/\text{CNT}$
COMPOSITE *HYBRID SUPERCAPACITOR***

THIERRY RAYHAN WISNU PUTRA
NRP 5011201122

Advisor
Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.
NIP 199007262015041002
Diah Susanti, S.T.,M.T., Ph.D.
NIP 197701162003122007

Study Program of Material Engineering
Department of Materials and Metallurgical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2024

(This page is intentionally blank)

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN MASSA CNT TERHADAP SIFAT KAPASITIF SUPERKAPASITOR *HYBRID* BERBAHAN KOMPOSIT MnO₂/N-rGO/CNT

TUGAS AKHIR

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

Oleh : **THIERRY RAYHAN WISNU PUTRA**
NRP. 5011201122

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Haniffudin Nurdiansah, ST., MT
2. Diah Susanti, ST., MT., PhD
3. Lukman Noerochiem, ST., M.Sc.Eng., PhD
4. Vania Mitha Pratiwi, ST., MT



SURABAYA
Juli, 2024

Handwritten signatures and names of the examiners:
- Pembimbing (Supervisor)
- Ko-Pembimbing (Co-Supervisor)
- Penguji (Examiner)
- Penguji (Examiner)

(Halaman ini Sengaja Dikosongkan)

APPROVAL SHEET

ANALYSIS EFFECTS OF CNT MASSA ADDITION TOWARDS CAPACITIVE PROPERTIES OF MnO₂/N-rGO/CNT COMPOSITE HYBRID SUPERCAPACITOR

FINAL PROJECT

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

By : **THIERRY RAYHAN WISNU PUTRA**
NRP. 5011201122

Approved by Final Project Examiner Team :


1. Haniffudin Nurdiansah, ST., MT
2. Diah Susanti, ST., MT., PhD
3. Lukman Noerochiem, ST., M.Sc.Eng., PhD
4. Vania Mitha Pratiwi, ST., MT



SURABAYA
July, 2024


Advisor


Co-Advisor


Examiner


Examiner

(This page is intentionally blank)

PERNYATAAN ORISINALITAS

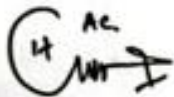
Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa/NRP : Thierry Rayhan Wisnu Putra /5011201122
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing/NIP : Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T. /
199007262015041002
Dosen Ko-Pembimbing/NIP : Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D. /
197701162003122007

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN MASSA CNT TERHADAP SIFAT KAPASITIF SUPERKAPASITOR HYBRID BERBAHAN KOMPOSIT MnO₂/N-rGO/CNT” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

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

Mengetahui
Dosen Pembimbing



(Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.)
NIP. 199007262015041002

Surabaya, 24 Juli 2024

Mahasiswa



(Thierry Rayhan Wisnu Putra)
NRP. 5011201122

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STATEMENT OF ORIGINALITY

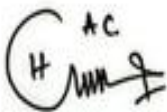
The undersigned below:

Name of student/NRP : Thierry Rayhan Wisnu Putra /5011201122
Departement : Materials and Metallurgical Engineering
Advisor/NIP : Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T. / 199007262015041002
Co-Advisor/NIP : Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D. / 197801132002121003

hereby declare that the Final Project with the title of “ANALYSIS EFFECTS OF CNT MASSA ADDITION TOWARDS CAPACITIVE PROPERTIES OF MnO₂/N-rGO/CNT COMPOSITE HYBRID SUPERCAPACITOR” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

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

Acknowledged
Advisor



(Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.)
NIP. 199007262015041002

Surabaya, July 24 2024

Student



(Thierry Rayhan Wisnu Putra)
NRP. 5011201122

(This page is intentionally blank)

**ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN MASSA CNT TERHADAP SIFAT
KAPASITIF SUPERKAPASITOR *HYBRID* BERBAHAN KOMPOSIT
MnO₂/N-rGO/CNT**

Nama Mahasiswa / NRP : Thierry Rayhan Wisnu Putra/ 5011201122
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.
Dosen Ko-Pembimbing : Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D.

Abstrak

Kebutuhan akan mobil listrik semakin meningkat untuk mencapai lingkungan *zero emission* dan mengurangi penggunaan bahan bakar fosil. Salah satu komponen penting dalam mobil listrik adalah superkapasitor, yang berfungsi untuk pengisian dan pengosongan energi, terutama saat pengereman. Penelitian terbaru berfokus pada superkapasitor hybrid yang menggabungkan karakteristik EDLC (*electric double layer capacitor*) dengan material seperti reduced graphene oxide (rGO) dan Carbon Nanotubes (CNT), serta karakteristik pseudocapacitor dengan material MnO₂. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis elektroda superkapasitor *hybrid* menggunakan Nitrogen-doped rGO (N-rGO) dan CNT yang dikompositkan dengan MnO₂, serta menganalisis pengaruh variasi massa CNT (25 mg, 50 mg, 75 mg) terhadap struktur, morfologi, konduktivitas, dan sifat kapasitif komposit (MnO₂/N-rGO/CNT). Karakterisasi dilakukan melalui SEM-EDX, XRD, dan FTIR, sementara pengujian performa elektrokimia meliputi CV, EIS, dan GCD. Hasil menunjukkan bahwa penambahan CNT meningkatkan kapasitansi, dengan nilai tertinggi pada pengujian CV K75. Dari hasil XRD didapatkan bahwa penambahan massa CNT membuat d_{spacing} material komposit semakin lebar yang menandakan semakin banyak adsorpsi ion, hal ini dapat meningkatkan sifat kapasitif dari komposit. Nilai kapasitansi spesifik dari pengujian CV yang paling tinggi adalah K75 dengan nilai kapasitansi sebesar 313.78 F/g, dari pengujian EIS didapatkan kapasitansi sebesar 297.071 F/g dengan nilai konduktivitas sebesar 1.977 sm^{-1} , selanjutnya dari pengujian GCD diperoleh kapasitansi sebesar 502.187 F/g. Pada penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa penambahan massa CNT untuk superkapasitor *hybrid* berbahan komposit mampu meningkatkan sifat kapasitifnya.

Kata Kunci: *CNT, MnO₂, N-rGO, Kapasitansi, Superkapasitor Hybrid*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALYSIS EFFECTS OF CNT MASS ADDITION TOWARDS CAPACITIVE PROPERTIES OF $\text{MnO}_2/\text{N-rGO}/\text{CNT}$ COMPOSITE *HYBRID SUPERCAPACITOR*

Student Name / NRP : Thierry Rayhan Wisnu Putra / 5011201122
Department : Materials and Metallurgical Engineering INDSYS-ITS
Advisor : Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.
Co-Advisor : Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D.,

Abstract

The need for electric cars is increasing to achieve a zero emission environment and reduce the use of fossil fuels. One of the important components in electric cars is a supercapacitor, which functions to charge and discharge energy, especially during braking. Recent research focuses on hybrid supercapacitors that combine the characteristics of EDLC (electric double layer capacitor) with materials such as reduced graphene oxide (rGO) and Carbon Nanotubes (CNT), as well as the characteristics of pseudocapacitors with MnO_2 materials. This study aims to synthesize hybrid supercapacitor electrodes using Nitrogen-doped rGO (N-rGO) and CNTs composited with MnO_2 , and to analyze the effect of variations in CNT mass (25 mg, 50 mg, 75 mg) on the structure, morphology, conductivity, and capacitive properties of the composite ($\text{MnO}_2/\text{NrGO}/\text{CNT}$). Characterization was carried out using SEM-EDX, XRD, and FTIR, while electrochemical performance testing included CV, EIS, and GCD. The results show that the addition of CNT increases the capacitance, with the highest value in the CV K75 test. From the XRD results, it was found that the addition of CNT mass made the composite material spacing wider, indicating more ion adsorption, this can increase the capacitive properties of the composite. The highest specific capacitance value from the CV test was K75 with a capacitance value of 313.78 F/g, from the EIS test a capacitance of 297.071 F/g was obtained with a conductivity value of 1.977 sm^{-1} , then from the GCD test a capacitance of 502.187 F/g was obtained. In this study, it can be concluded that the addition of CNT mass to hybrid supercapacitors made of composites can increase their capacitive properties.

Keywords: *CNT, Hybrid Supercapacitor, Capacitance MnO_2 , N-rGO*

(This page is intentionally blank)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
APPROVAL SHEET	vii
PERNYATAAN ORISINALITAS	ix
STATEMENT OF ORIGINALITY	xi
Abstrak	xiii
Abstract	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Superkapasitor.....	5
2.2 Carbon Nanotubes.....	10
2.3 <i>Reduced Graphene Oxide</i>	12
2.4 <i>Doping Nitrogen</i>	13
2.5 Mangan Dioksida.....	14
2.6 Komposit.....	16
2.7 Proses Hidrotermal Oven.....	17
2.8 Penelitian Sebelumnya.....	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Alat dan Bahan Penelitian.....	21
3.1.1 Alat Penelitian.....	21
3.1.2 Bahan Penelitian.....	22
3.2 Diagram Alir.....	23
3.2.1 Diagram Alir Sintesis reduced Graphite Oxide.....	23
3.2.2 Diagram Alir Sintesis N-rGO.....	24
3.2.2 Diagram Alir Sintesis Komposit MnO ₂ /N-rGO/CNT.....	25
3.2.4 Diagram Alir Sintesis Elektroda dan Pengujian Performa Elektrokimia.....	26
3.2 Metode Penelitian.....	26
3.2.3 Preparasi <i>reduced Graphite Oxide</i>	27
3.2.4 Preparasi <i>Nitrogen-Doped rGO</i>	27
3.2.5 Preparasi Komposit MnO ₂ / N-rGO/CNT.....	27
3.2.6 Preparasi Elektroda Superkapasitor <i>Hybrid</i>	27
3.3 Pengujian.....	28
3.3.3 Pengujian XRD.....	28
3.3.4 Pengujian SEM/EDX.....	30
3.3.5 Pengujian FTIR.....	31
3.3.6 Pengujian <i>Cyclic Voltammetry</i>	32
3.3.7 Pengujian <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i>	34

3.3.8 Pengujian Galvanostatic Charge/Discharge.....	35
3.4 Rancangan Penelitian.....	35
3.5 Jadwal Penelitian.....	37
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....	39
4.1 Hasil Pengamatan Visual.....	39
4.2 Hasil Pengujian X-Ray Diffractometry (XRD).....	39
4.3 Hasil Pengujian <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR).....	44
4.4 Hasil Pengujian <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	48
4.5 Hasil Pengujian <i>Energy Dispersive X-ray</i> (EDX).....	52
4.6 Hasil Pengujian <i>Cyclic Voltammetry</i>	56
4.7 Hasil Pengujian <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (EIS).....	66
4.8 Hasil Pengujian Galvanostatic Charge/Discharge (GCD).....	74
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	82
5.1 Kesimpulan.....	82
5.2 Saran.....	82
DAFTAR PUSTAKA.....	84
LAMPIRAN.....	92
UCAPAN TERIMA KASIH.....	100
BIODATA PENULIS.....	102

DAFTAR GAMBAR

Gambar 4.1 Hasil pengamatan visual sampel a) CNT, b) rGO, c) N-rGO d).....	39
Gambar 4.2 Hasil Pengujian XRD Grafit, rGO, N-rGO	40
Gambar 4.3 Hasil Pengujian XRD CNT	41
Gambar 4.4 Hasil Pengujian XRD MnO ₂	42
Gambar 4.5 Hasil Pengujian XRD Variasi Komposit.....	43
Gambar 4.6 Hasil Pengujian FTIR Grafit, rGO dan N-rGO	45
Gambar 4.7 Hasil Pengujian FTIR CNT, MnO ₂ dan Komposit	46
Gambar 4.8 Hasil Pengujian FTIR K25, K50 dan K75	47
Gambar 4.9 Hasil uji SEM sampel rGO perbesaran 5000x	49
Gambar 4.10 Hasil uji Sampel NrGO a) perbesaran 7500x.....	49
Gambar 4.11 Hasil uji Sampel MnO ₂ perbesaran 20000x	50
Gambar 4.12 Hasil uji Sampel CNT perbesaran 20000x.....	50
Gambar 4.13 Hasil Uji Sampel variasi komposit a) K25, b) K50, dan c) K75 perbesaran 10000x	51
Gambar 4.14 Hasil Pengujian EDX rGO	52
Gambar 4.15 Hasil Pengujian EDX N-rGO.....	52
Gambar 4.16 Gambar Hasil Pengujian EDX CNT	53
Gambar 4.17 Hasil Pengujian EDX MnO ₂	54
Gambar 4.18 Hasil Pengujian EDX K25	54
Gambar 4.19 Hasil Pengujian EDX K50	55
Gambar 4.20 Hasil Pengujian EDX K75	56
Gambar 4.21 Hasil Pengujian CV <i>current vs</i> potensial rGO	57
Gambar 4.22 Hasil Pengujian CV <i>current vs</i> potensial N-rGO.....	57
Gambar 4.23 Hasil Pengujian CV <i>current vs</i> potensial MnO ₂	58
Gambar 4.24 Hasil Pengujian <i>current vs</i> potential CNT	59
Gambar 4.25 Hasil Pengujian <i>current vs</i> potential K25	59
Gambar 4.26 Hasil Pengujian <i>current vs</i> potential K50	59
Gambar 4.27 Hasil Pengujian <i>current vs</i> potential K75	60
Gambar 4.28 Hasil Pengujian Kapasitansi vs <i>Potential</i> rGO	61
Gambar 4.29 Hasil Pengujian Kapasitansi vs <i>Potential</i> N-rGO	61
Gambar 4.30 Hasil Pengujian Kapasitansi vs <i>Potential</i> MnO ₂	61
Gambar 4.31 Hasil Pengujian Kapasitansi vs <i>Potential</i> CNT	62
Gambar 4.32 Hasil Pengujian Kapasitansi vs <i>Potential</i> K25	62
Gambar 4.33 Hasil Pengujian Kapasitansi vs <i>Potential</i> K50	63
Gambar 4.34 Hasil Pengujian Kapasitansi vs <i>Potential</i> K75	63
Gambar 4.35 Grafik Hasil Uji CV Kapasitansi vs Scan Rate.....	65
Gambar 4.36 <i>Ragone Plot</i>	65
Gambar 4.37 <i>Equivalent Circuit</i>	66
Gambar 4.38 <i>Nyquist Plot</i> rGO dan N-rGO.....	67
Gambar 4.41 <i>Nyquist Plot</i> MnO ₂	67
Gambar 4.42 <i>Nyquist Plot</i> CNT.....	68
Gambar 4.43 <i>Nyquist Plot</i> Komposit	68
Gambar 4.44 Hasil <i>Bode Plot</i> rGO dan N-rGO	69
Gambar 4.45 Hasil <i>Bode Plot</i> MnO ₂	70
Gambar 4.46 Hasil <i>Bode Plot</i> CNT	70
Gambar 4.47 Hasil <i>Bode Plot</i> Komposit.....	71
Gambar 4.48 Hasil <i>Bode Plot</i> rGO dan N-rGO	71

Gambar 4.49 Hasil <i>Bode Plot</i> MnO ₂	72
Gambar 4.50 Hasil <i>Bode Plot</i> CNT	72
Gambar 4.51 Hasil <i>Bode Plot</i> Komposit	73
Gambar 4.52 Hasil Nilai specific capacitance dari hasil pengujian EIS	74
Gambar 4.53 Hasil Pengujian GCD rGO	74
Gambar 4.54 Hasil Pengujian GCD N-rGO	75
Gambar 4.55 Hasil Pengujian GCD MnO ₂	75
Gambar 4.56 Hasil Pengujian GCD CNT	76
Gambar 4.57 Hasil Pengujian GCD K25	76
Gambar 4.58 Hasil Pengujian GCD K50	77
Gambar 4.59 Hasil Pengujian GCD K75	77
Gambar 4.60 Grafik Pengujian GCD rGO, N-rGO, MnO ₂ dan CNT pada 0.25 Ag ⁻¹	78
Gambar 4.61 Grafik Pengujian GCD Variasi Komposit pada 0.25 Ag ⁻¹	78
Gambar 3.1 Diagram Alir Sintesis reduced Graphene Oxide	23
Gambar 3.2 Diagram Alir Sintesis N-rGO	24
Gambar 3.3 Diagram Alir Sintesis Komposit MnO ₂ /N-rGO/CNT	25
Gambar 3.4 Diagram Alir Sintesis Elektroda dan Pengujian Performa Elektrokimia	26
Gambar 3.5 Prinsip Kerja XRD.....	29
Gambar 3.6 Instrumen Pengujian XRD.....	29
Gambar 3.7 Prinsip Kerja SEM.....	31
Gambar 3.8 <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	31
Gambar 3.9 Instrumen Uji FTIR	32
Gambar 3.10 Skema Prinsip Kerja FTIR	32
Gambar 3.11 Alat Potensiostat <i>Cyclic Voltammetry</i>	33
Gambar 3.12 Skema <i>set-up</i> 3 Elektroda	33
Gambar 3.13 Grafik Pengujian Uji CV	34
Gambar 3.14 Kurva Nyquist.....	35
Gambar 3.15 Contoh Grafik Hasil Pengujian <i>Charge Discharge</i>	35
Gambar 4.1 Hasil pengamatan visual sampel a) CNT, b) rGO, c) N-rGO d)	39
Gambar 4.2 Hasil Pengujian XRD Grafit, rGO, N-rGO	40
Gambar 4.3 Hasil Pengujian XRD CNT	41
Gambar 4.4 Hasil Pengujian XRD MnO ₂	42
Gambar 4.5 Hasil Pengujian XRD Variasi Komposit	43
Gambar 4.6 Hasil Pengujian FTIR Grafit, rGO dan N-rGO	45
Gambar 4.7 Hasil Pengujian FTIR CNT, MnO ₂ dan Komposit.....	46
Gambar 4.8 Hasil Pengujian FTIR K25, K50 dan K75.....	47
Gambar 4.9 Hasil uji SEM sampel rGO perbesaran 5000x.....	49
Gambar 4.10 Hasil uji Sampel NrGO a) perbesaran 7500x	49
Gambar 4.11 Hasil uji Sampel MnO ₂ perbesaran 20000x	50
Gambar 4.12 Hasil uji Sampel CNT perbesaran 20000x	50
Gambar 4.13 Hasil Uji Sampel variasi komposit a) K25, b) K50, dan c) K75 perbesaran 10000x.....	51
Gambar 4.14 Hasil Pengujian EDX rGO	52
Gambar 4.15 Hasil Pengujian EDX N-rGO	52
Gambar 4.16 Gambar Hasil Pengujian EDX CNT.....	53
Gambar 4.17 Hasil Pengujian EDX MnO ₂	54
Gambar 4.18 Hasil Pengujian EDX K25	54
Gambar 4.19 Hasil Pengujian EDX K50.....	55
Gambar 4.20 Hasil Pengujian EDX K75.....	56

Gambar 4.21	Hasil Pengujian CV <i>current vs</i> potensial rGO	57
Gambar 4.22	Hasil Pengujian CV <i>current vs</i> potensial N-rGO.....	57
Gambar 4.23	Hasil Pengujian CV <i>current vs</i> potensial MnO ₂	58
Gambar 4.24	Hasil Pengujian <i>current vs</i> potensial CNT	59
Gambar 4.25	Hasil Pengujian <i>current vs</i> potensial K25	59
Gambar 4.26	Hasil Pengujian <i>current vs</i> potensial K50	59
Gambar 4.27	Hasil Pengujian <i>current vs</i> potensial K75	60
Gambar 4.28	Hasil Pengujian Kapasitansi vs <i>Potential</i> rGO	61
Gambar 4.29	Hasil Pengujian Kapasitansi vs <i>Potential</i> N-rGO	61
Gambar 4.30	Hasil Pengujian Kapasitansi vs <i>Potential</i> MnO ₂	61
Gambar 4.31	Hasil Pengujian Kapasitansi vs <i>Potential</i> CNT	62
Gambar 4.32	Hasil Pengujian Kapasitansi vs <i>Potential</i> K25	62
Gambar 4.33	Hasil Pengujian Kapasitansi vs <i>Potential</i> K50	63
Gambar 4.34	Hasil Pengujian Kapasitansi vs <i>Potential</i> K75	63
Gambar 4.35	Grafik Hasil Uji CV Kapasitansi vs Scan Rate.....	65
Gambar 4.36	<i>Ragone Plot</i>	65
Gambar 4.37	<i>Equivalent Circuit</i>	66
Gambar 4.38	<i>Nyquist Plot</i> rGO dan N-rGO.....	67
Gambar 4.41	<i>Nyquist Plot</i> MnO ₂	67
Gambar 4.42	<i>Nyquist Plot</i> CNT	68
Gambar 4.43	<i>Nyquist Plot</i> Komposit	68
Gambar 4.44	Hasil <i>Bode Plot</i> rGO dan N-rGO	69
Gambar 4.45	Hasil <i>Bode Plot</i> MnO ₂	70
Gambar 4.46	Hasil <i>Bode Plot</i> CNT	70
Gambar 4.47	Hasil <i>Bode Plot</i> Komposit.....	71
Gambar 4.48	Hasil <i>Bode Plot</i> rGO dan N-rGO	71
Gambar 4.49	Hasil <i>Bode Plot</i> MnO ₂	72
Gambar 4.50	Hasil <i>Bode Plot</i> CNT	72
Gambar 4.51	Hasil <i>Bode Plot</i> Komposit.....	73
Gambar 4.52	Hasil Nilai <i>specific capacitance</i> dari hasil pengujian EIS.....	74
Gambar 4.53	Hasil Pengujian GCD rGO.....	74
Gambar 4.54	Hasil Pengujian GCD N-rGO.....	75
Gambar 4.55	Hasil Pengujian GCD MnO ₂	75
Gambar 4.56	Hasil Pengujian GCD CNT	76
Gambar 4.57	Hasil Pengujian GCD K25	76
Gambar 4.58	Hasil Pengujian GCD K50	77
Gambar 4.59	Hasil Pengujian GCD K75	77
Gambar 4.60	Grafik Pengujian GCD rGO, N-rGO, MnO ₂ dan CNT pada 0.25 Ag ⁻¹	78
Gambar 4.61	Grafik Pengujian GCD Variasi Komposit pada 0.25 Ag ⁻¹	78

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan jenis-jenis superkapasitor dan baterai <i>lithium ion</i>	10
Tabel 2.2 Penelitian Sebelumnya.....	18
Tabel 3.1 Rancangan penelitian.....	36
Tabel 3.2 Jadwal Penelitian	37
Tabel 4.1 Jarak antar layer (Å) dari Grafit, rGO, N-rGO, MnO CNT dan komposit.....	40
Tabel 4.2 Tabel ukuran kristal sampel Grafit, rGO, CNT dan N-rGO	41
Tabel 4.3 Tabel ukuran kristal sampel CNT.....	42
Tabel 4.4 Tabel ukuran kristal sampel MnO ₂	42
Tabel 4.5 Tabel ukuran kristal sampel Komposit.....	44
Tabel 4.6 Hasil Pengujian FTIR rGO dan N-rGO	45
Tabel 4.7 Hasil Pengujian FTIR MnO ₂ , CNT, Komposit.....	46
Tabel 4.8 Hasil Pengujian FTIR K25, K50 dan K75.....	48
Tabel 4.9 Unsur Komposisi EDX rGO	52
Tabel 4.10 Unsur Komposisi EDX N-rGO.....	53
Tabel 4.11 Unsur Komposisi EDX CNT	53
Tabel 4.12 Unsur Komposisi EDX MnO ₂	54
Tabel 4.13 Unsur Komposisi EDX K25	54
Tabel 4.14 Unsur Komposisi EDX K50	55
Tabel 4.15 Unsur Komposisi EDX K75	56
Tabel 4.16 Hasil Perhitungan nilai kapasitansi spesifik (Cs), <i>Specific Energy Density</i> (E), dan <i>Specific Power Density</i> (P)	63
Tabel 4.17 Hasil nilai perhitungan EIS θ , $ Z $, dan kapasitansi spesifik.....	73
Tabel 4.18 Hasil Perhitungan nilai kapasitansi spesifik (Cs) dari pengujian GCD.....	79

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi merupakan faktor penting dalam mendukung perubahan dunia untuk mencapai pembangunan berkelanjutan (Khan et al, 2020). Salah satunya adalah penggunaan energi fosil yang telah memberikan banyak perubahan dalam hal pembangunan pada sektor transportasi. Pada tahun 2021, tercatat jumlah transportasi berbahan bakar fosil di Indonesia telah mencapai angka yang cukup signifikan yakni mencapai 141.992.573 dengan sebaran (16.413.348 mobil penumpang), (237.566 mobil bus), (5 299 361 mobil barang) dan (120.042.298 sepeda motor) (Badan Pusat Statistik., 2021). Dari data tersebut, dapat disimpulkan bahwa pembangunan pada sektor transportasi masih menunjukkan angka penggunaan energi fosil yang tinggi. Hal ini tentu saja akan berdampak buruk pada lingkungan seperti halnya peningkatan emisi gas rumah kaca, peningkatan suhu global dan cuaca ekstrem (J Zhang et al, 2023). Oleh karena itu, untuk mengurangi dampak negatif dari tingginya penggunaan energi fosil tersebut, peneliti berusaha untuk menciptakan transportasi yang berbasis pada pemanfaatan energi alternatif (Mehtar et al, 2015) yang diimplementasikan dalam bentuk *electric vehicle*. *Electric vehicle* adalah alternatif transportasi yang tidak hanya dinilai dapat mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) tetapi juga dapat meningkatkan keamanan energi (Kang et al., 2016). Dalam penerapannya, penggunaan *electric vehicle* ini tidak dapat terlepas dari piranti pendukung yaitu sistem pengisian dan pengosongan listrik yang sering dikenal sebagai superkapasitor (Sharma et al, 2021).

Superkapasitor adalah perangkat elektrokimia yang terdiri dari dua elektroda padat dan satu pemisah (*separator*) yang mampu membuat ion-ion dalam elektrolit cair dapat berpindah dari satu elektroda ke elektroda lainnya. Komponen Elektroda dari sebuah superkapasitor harus memenuhi parameter-parameter tertentu agar dapat bekerja secara efisien. Parameter tersebut mencakup: luas permukaan elektroda, konduktivitas listrik yang tinggi, kestabilan elektrokimia, dan material elektroda yang umumnya terbuat dari karbon berpori (Seung et al, 2023).

Berdasarkan jenis material pembentuk dan tingkat kapasitansi, superkapasitor diklasifikasikan menjadi tiga jenis yaitu: *Electrochemical Double-Layer Capacitors* (EDLCs), *Pseudocapacitors*, dan *Hybrid* (González et al., 2016). Jenis superkapasitor yang pertama adalah EDLCs yang proses penyaluran energi listriknya sangat bergantung pada luas permukaan aktif dari material elektroda sehingga pengembangan terkait peningkatan daya dan efisiensi superkapasitor lebih terfokus pada pencapaian luas permukaan yang lebih tinggi. Jenis superkapasitor selanjutnya adalah *Pseudocapacitors* yang memiliki kapasitansi lebih tinggi daripada EDLCs, karakteristik yang termasuk juga pada keunggulan superkapasitor ini diperoleh dari efek reaksi redoks yang terjadi pada saat pengisian dan pengosongan energi superkapasitor (Nurdiansah et al., 2019). Selanjutnya, jenis superkapasitor yang terakhir adalah superkapasitor *hybrid*. Berbeda dengan jenis superkapasitor sebelumnya, superkapasitor jenis *hybrid* menggabungkan karakteristik dari superkapasitor jenis EDLCs dan jenis superkapasitor *pseudokapasitor*. Penggabungan kedua karakteristik tersebut bertujuan untuk mengembangkan sebuah inovasi superkapasitor yang akan menghasilkan nilai kapasitansi lebih tinggi dan ketahanan siklus yang lebih baik daripada kedua jenis kapasitor sebelumnya. Dalam perangkat superkapasitor *hybrid*, terdapat suatu sistem yang membuat komponen elektroda dari superkapasitor *hybrid* memiliki kapasitansi yang lebih optimal. Keoptimalan tersebut dapat diwujudkan dengan cara menggabungkan superkapasitor jenis EDLCs dengan superkapasitor jenis *pseudocapacitor*. Sehubungan dengan itu, untuk mendapatkan karakteristik dari kapasitor jenis *pseudocapacitor*, superkapasitor *hybrid* dapat menggunakan logam oksida sebagai

material penyusun elektroda. Selain menggunakan logam oksida sebagai elektroda, terdapat beberapa alternatif material lain yang dapat digunakan sebagai elektroda pada superkapasitor jenis *Pseudocapacitor*, yaitu golongan metal oksida dan metal sulfida seperti MnO_2 . Pemilihan kedua jenis material elektroda ini dapat dipertimbangkan atas beberapa alasan, yaitu : harga yang terjangkau, tingkat toksisitas yang rendah, kapasitas teoritis tinggi (1370 F/g), dan dapat menyesuaikan keadaan lingkungan dengan baik.(Juyin et al, 2022). Pada penelitian yang dilakukan oleh Cendrawan Santoso dkk pada tahun 2023 menunjukkan nilai kapasitansi sebesar 18.225 F/g dan 36.268 F/g, dengan nilai konduktivitas sebesar 3.565 Sm^{-1} dari superkapasitor N-rGO/ MnO_2 (Cendrawan et al., 2023)

Sementara itu, untuk mendapatkan karakteristik dari superkapasitor jenis EDLCs, superkapasitor *hybrid* dapat menggunakan material reduced Graphene Oxide (rGO) dan Carbon Nanotubes (CNT). Reduced Graphene Oxide (rGO) merupakan jenis material 2 dimensional yang memiliki luas permukaan yang cukup luas, yakni sebesar $466\text{--}758 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ dengan tingkat Konduktivitas sebesar $4.82 \times 10^2 - 10^5 \text{ Sm}^{-1}$ (T Suveksha et al, 2023). Selain itu, r-GO juga memiliki nilai stabilitas elektrokimia yang tinggi dan kemampuan menghantarkan arus yang baik (Z Hongyan, 2023). Selain material yang berasal dari rGO, terdapat material pembentuk superkapasitor lain yang berasal dari CNT , CNT adalah salah satu alotrofi dari karbon yang memiliki peran penting dalam meningkatkan kinerja berbagai perangkat dalam berbagai aplikasi, seperti halnya pada penyimpan energi, komposit biomaterial, dan fotokatalis. (CNT) dengan luas permukaan yang tinggi memiliki potensi untuk diaplikasikan sebagai Superkapasitor karena pada penelitian sebelumnya menunjukkan kapasitansi spesifik dari superkapasitor simetris CNT/rGO mencapai 107,8 F/g dan CNT/ MnO_2 253.86 F/g dengan densitas sebesar 413.7 W/kg (Ghobad et al 2023).

Untuk mendapatkan N-rGO, rGO disintesis menggunakan metode modifikasi Tour. Metode ini melibatkan proses konversi dari grafit menjadi rGO. Kelebihan mensintesis rGO dengan metode ini adalah meningkatnya kuantitas hasil rGO yang dapat diperoleh dalam jumlah yang banyak dan memiliki luas area yang tinggi. Kelebihan lain yang dimiliki dari proses sintesis ini adalah peralatan yang digunakan tergolong sederhana (Kotsyubynsky et al., 2021). *Doping Nitrogen* sendiri berfungsi untuk meningkatkan nilai kapasitansi, *binding energy*, dan *wettability* dari sebuah superkapasitor, sehingga nantinya kapasitansi untuk N-rGO yang dihasilkan akan lebih tinggi (Safitri et al., 2017).

Berdasarkan uraian permasalahan yang telah dijabarkan di atas, penelitian ini bertujuan untuk menggabungkan kelebihan dan karakteristik dari superkapasitor jenis EDLC dan *pseudocapacitor* agar produk keluaran yang dihasilkan nantinya akan menjadi superkapasitor berjenis *hybrid* dengan penggunaan material N-rGO dan CNT sebagai bagian dari kapasitor berjenis EDLC dan material MnO_2 sebagai bagian dari kapasitor berjenis *pseudocapacitor*. Variasi yang digunakan pada penelitian ini adalah jumlah penambahan massa *Carbon Nanotubes* dengan perbandingan antara MnO_2 ,N-rGO dan CNT, yaitu 25 mg, 50 mg, 75 mg untuk menganalisis pengaruh penambahan *massa Carbon Nanotubes* terhadap performa elektrokimia komposit $\text{MnO}_2/\text{N-rGO}/\text{CNT}$. Karakterisasi yang dilakukan meliputi SEM-EDX, XRD dan FTIR untuk menganalisis struktur dan morfologi komposit. Sedangkan pengujian CV, EIS, dan GCD dilakukan untuk mengetahui nilai kapasitansi dan konduktivitas dari komposit. Secara umum, penelitian ini dilakukan sebagai upaya untuk mengurangi penggunaan energi fosil yang berdampak buruk bagi lingkungan. .

1.2 Perumusan Masalah

Dari latar belakang yang disampaikan maka terdapat rumusan masalah seperti berikut :

1. Bagaimana pengaruh variasi penambahan massa CNT terhadap struktur dan morfologi material komposit $\text{MnO}_2/\text{N-rGO}/\text{CNT}$?

2. Bagaimana pengaruh variasi penambahan massa CNT terhadap sifat kapasitif material komposit MnO₂/N-rGO/CNT?

1.3 Batasan Masalah

Adapun Batasan masalah yang dibuat dalam percobaan ini agar tidak terjadi penyimpangan:

1. Ukuran serbuk grafit dianggap homogen
2. Impuritas pada bahan dianggap tidak ada
3. Fluktuasi temperatur *furnace* diabaikan
4. Materials *loss* dianggap tidak ada pada saat reaksi
5. Kecepatan *stirring* dianggap konstan
6. Temperatur pada *oven vacuum* dan *furnace* dianggap homogen
7. Tekanan *autoclave* dianggap konstan

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian yang dilakukan yaitu sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh variasi penambahan massa CNT terhadap struktur dan morfologi material komposit MnO₂/N-rGO/CNT
2. Menganalisis pengaruh variasi penambahan massa CNT terhadap sifat kapasitif material komposit MnO₂/N-rGO/CNT

1.5 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat dalam memberikan informasi mengenai pengembangan komposit MnO₂/N-rGO/CNT serta fabrikasi dari komposit dengan *menambahkan massa CNT*, serta mengetahui dampak dari penambahan massa *Carbon Nanotubes* terhadap superkapasitor *hybrid* yang dibuat apakah efektif dan efisien untuk aplikasin

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

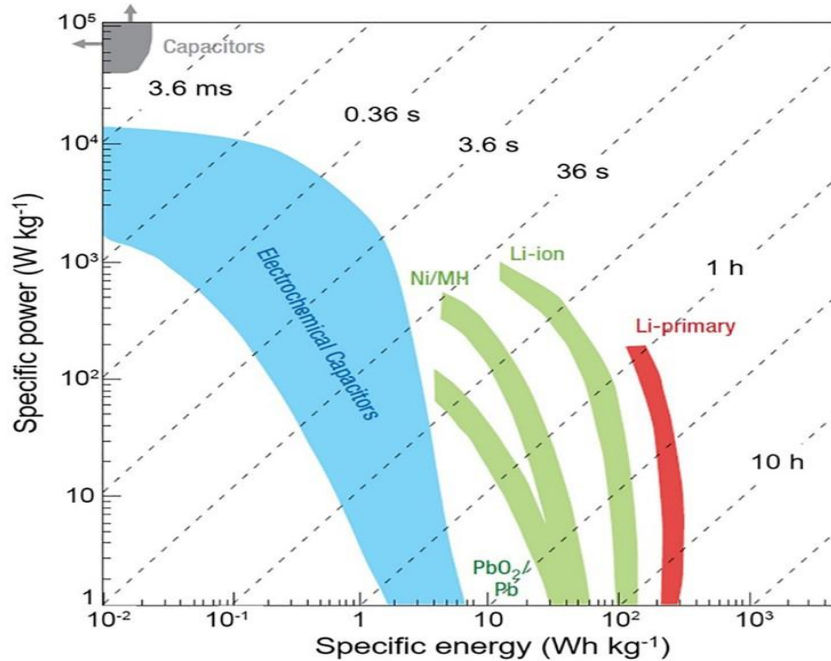
2.1 Superkapasitor

Kenaikan biaya bahan bakar, polusi udara, pemanasan global, dan masalah geotermal merupakan tantangan terpenting saat ini di dunia. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengembangkan sumber energi ramah lingkungan dan perangkat penyimpanan guna mengatasi masalah-masalah tersebut, salah satunya yaitu superkapasitor (Yasami et al., 2023). Karena superkapasitor memiliki potensi besar dalam dunia industri transportasi, maka banyak pelaku industry manufaktur mulai memproduksi piranti ini. Berikut beberapa data produsen superkapasitor dan perbandingan nilai kapasitansinya.

Manufacturer	Voltage (V)	Capacitance (F)	ESR (mΩ)
APowerCap	2.70	55	–
APowerCap	2.70	450	–
Asahi Glass	2.70	1375	2.50
BatScap	2.70	2680	0.20
Fuji	3.80	1800	1.50
Ioxus	2.70	3000	0.45
Ioxus	2.70	2000	0.54
JSR Micro	3.80	1100	1.15
JSR Micro	3.80	2300	0.77
LS Mtron	2.80	3200	0.25
Maxwell	2.70	2885	0.38
Maxwell	2.70	605	0.90
NessCap	2.70	1800	0.55
NessCap	2.70	3640	0.30
NessCap	2.70	3160	0.40
Panasonic	2.30	0.10	0.08
Panasonic	5.50	50	0.08
PowerStor	2.50	2.20	4.57
PowerStor	16.20	65	7.00
Skeleton	3.40	3200	0.47
Skeleton	3.40	850	0.80
VinaTech	2.70	336	3.50
VinaTech	3.00	342	6.60
Yunasko	2.70	510	0.90
Yunasko	2.75	480	0.25
Yunasko	2.75	1275	0.11
Yunasko	2.70	7200	1.40
Yunasko	2.70	5200	1.50

Gambar 2.1 Data Produsen dan Perbandingan nilai kapasitansi (Yassine & Fabris, 2017)

Superkapasitor merupakan kapasitor yang beroperasi berdasarkan pengisian muatan (*charge*) dan pelepasan muatan (*discharge*) pada permukaan material elektroda-elektrolit (Adhytiawan & Susanti, 2013). Superkapasitor adalah penemuan baru di dunia penyimpanan energi (Safitri et al., 2017). Seperti pada **Gambar 2.2** dapat terlihat bahwa supercapacitor memiliki kerapatan energi yang lebih rendah dibandingkan baterai dengan ukuran yang serupa, namun kerapatan daya mereka jauh melebihi baterai. (J Zhang et al., 2022), sehingga menyebabkan superkapasitor memiliki kapasitas yang rendah dari fuel cell dan baterai, superkapasitor sendiri memiliki batasan minimal 1 Farad/gram (McCloskey, 2015), tetapi dapat mentransfer energi yang lebih cepat dalam hal pengisian dan pengosongan (Liu et al., 2018).

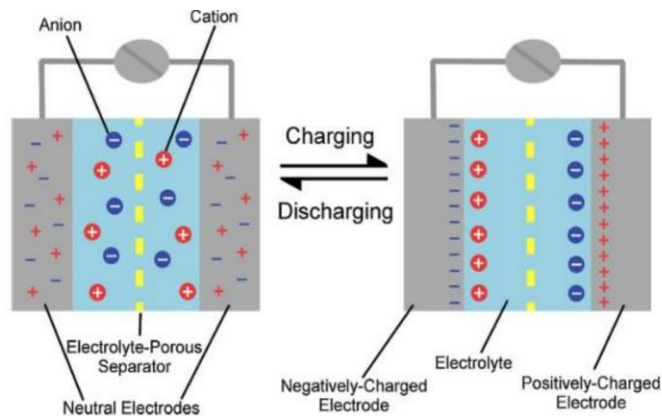


Gambar 2.2 Grafik Ragone Media Penyimpanan Energi (J Zhang et al., 2022)

Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa daerah yang ditempati oleh superkapasitor berada di antara kapasitor konvensional dan baterai. Rapat energi dari superkapasitor masih belum menyamai rapat energi dari baterai dan fuel cell namun superkapasitor mempunyai kapasitansi yang lebih besar dari kapasitor konvensional (Kötz & Carlen, 2000). Dalam proses pengisian dan pengosongan energi, superkapasitor tidak melakukan transfer muatan melalui reaksi redoks yang melewati elektroda dan elektrolit seperti pada baterai (Winter & Brodd, 2004). Berbagai jenis material yang digunakan sebagai bahan elektroda pada superkapasitor, tetapi karbon menjadi material yang paling sering digunakan sebagai bahan elektroda pada superkapasitor. Karbon memiliki luas permukaan yang tinggi, tetapi memiliki kekurangan yaitu konduktivitas yang rendah sehingga menjadi terbatas pada superkapasitor (Y. Wang et al., 2009). Superkapasitor dapat dibagi menjadi 3 berdasarkan prinsip penyimpanannya, yaitu EDLC, *Pseudocapacitor*, dan superkapasitor *hybrid* (Libich et al., 2018).

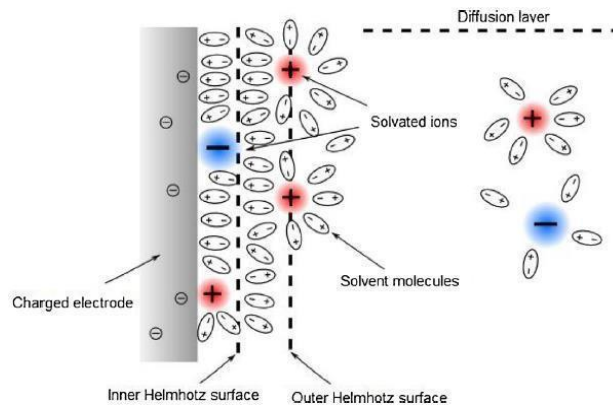
EDLC merupakan sistem penyimpanan energi listrik berdasarkan proses pengisian – pengosongan listrik dengan menggunakan lapisan ganda (*double layer*) pada elektroda berpori yang memiliki ketahanan siklus tinggi, sehingga menghasilkan daya tahan yang lebih lama dan efisien (Shiraishi & Soshi, 2016). EDLC umumnya menggunakan material karbon seperti *carbon nanotubes*, *graphene*, *carbon aerogel*, *carbide-derived carbon* dan *activated carbon* dikarenakan sifat dari material karbon yang memiliki luas permukaan yang tinggi, memiliki konduktivitas listrik baik dan stabilitas kimia yang baik sehingga cocok diaplikasikan untuk penyimpanan. Seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.3** dibawah ini, selama proses pengisian, elektron bergerak dari elektroda negatif ke elektroda positif. Di dalam elektrolit, kation bergerak menuju elektroda negatif, sedangkan anion bergerak menuju elektroda positif. Sementara saat pelepasan, proses sebaliknya yang terjadi. Menurut Conway (1999), dalam konteks superkapasitor tipe EDLC, ada tiga karakteristik utama yang harus dimiliki oleh karbon, yaitu: (1) memiliki luas permukaan yang tinggi sekitar 1000 m²/g, (2) memiliki konduktivitas yang baik antara partikel dalam matriks berpori, dan (3) memungkinkan elektrolit untuk dengan baik masuk ke dalam ruang pori material karbon. Berdasarkan ketiga sifat ini, dalam pemilihan bahan elektroda superkapasitor, aturan umumnya adalah untuk mencari

material yang memiliki luas permukaan yang tinggi dan memungkinkan konduktivitas listrik yang baik (G Wang et al., 2012).



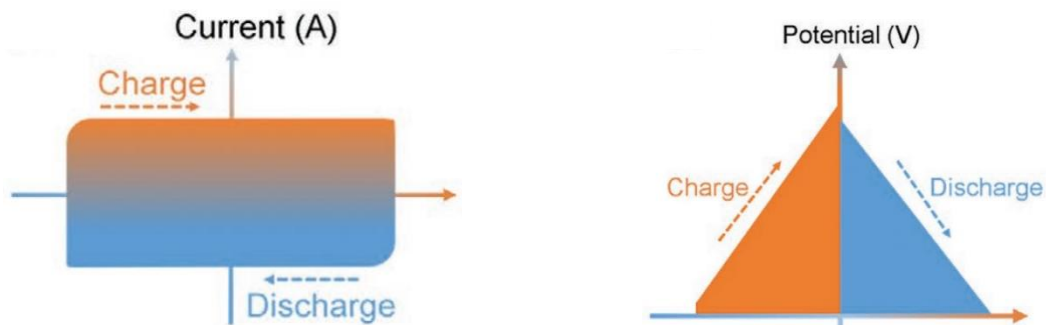
Gambar 2.3 Skema *Electronic Double Layer Supercapacitors* (Khawaja et al., 2019)

Kapasitor EDLCs menggunakan interaksi elektrostatik untuk mengakumulasi energi dalam lapisan ganda yang dikenal dengan lapisan Hemholtz seperti pada **Gambar 2.4** berikut ini. Kunci penting untuk memperoleh kapasitas yang sangat tinggi adalah permukaan elektroda yang luas dari lapisan Hemholtz. Superkapasitor EDLCs memiliki daya tahan dan kemampuan siklus yang baik hingga mencapai jutaan siklus. **Gambar 2.6** merupakan Skema *Pseudocapacitor*.



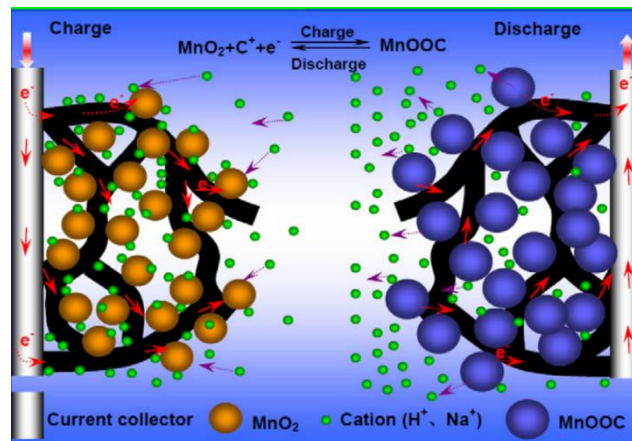
Gambar 2.4 Lapisan *Double Layer Hemholtz* (Libich et al., 2018)

EDLC memiliki karakteristik dalam perilaku elektrokimianya yang ditunjukkan pada **Gambar 2.5**, yang mana menunjukkan bentuk segiempat pada grafik pengujian CV dan memiliki bentuk linear segitiga pada grafik pengujian *charge and discharge*.



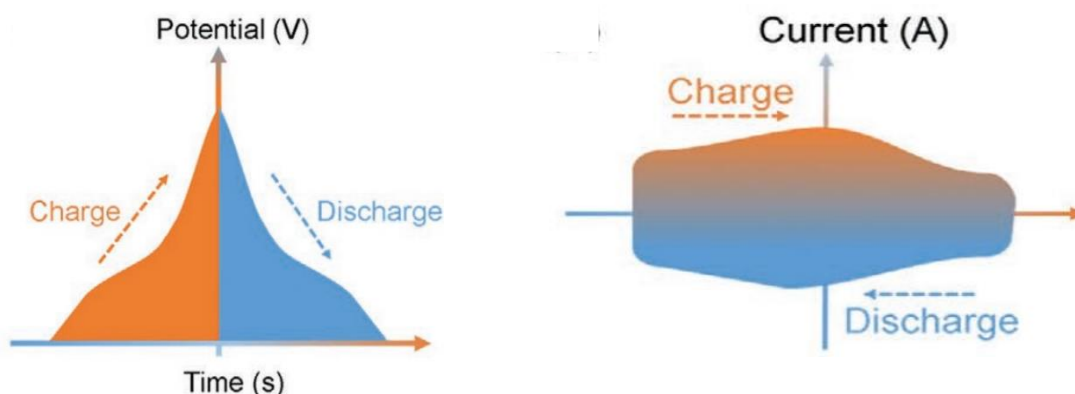
Gambar 2.5 Grafik Pengujian CV dan GCD (Huang et al., 2021)

Jenis superkapasitor selanjutnya adalah *pseudocapacitor*. Cara kerja dari *pseudocapacitor* bergantung pada material anoda dan katodanya. Secara umum material yang digunakan adalah polimer dan oksida logam transisi dengan menggunakan reaksi redoks yang berlangsung secara reversible dalam menyimpan muatan (Zhao et al., 2020). Prinsip *pseudocapacitor* yaitu transfer muatan faradik di lapisan berpori elektroda dan elektrolit yang terjadi melalui reaksi reduksi-oksidasi (redoks) elektrokimia secara elektrostatis. Saat potensial diterapkan pada reduksi *pseudocapacitor*, terjadi oksidasi pada elektroda. Proses ini melibatkan muatan yang melintasi lapisan ganda yang menghasilkan arus faradik yang melewati sel superkapasitor. Untuk skema dari *pseudocapacitor* dapat dilihat pada **Gambar 2.6** berikut ini. Proses faradik menyebabkan *pseudocapacitor* memiliki kepadatan energi yang lebih tinggi dari EDLCs. Reaksi redoks di dalam lapisan elektroda harus reversible secara elektrokimia atau semi reversible agar pengisian dan pengosongan menjadi efisien. Dalam lapisan elektroda *pseudocapacitor*, pengisian atau pelepasan akan melibatkan dua proses, yaitu pengisian dan pengosongan seperti pada EDLCs dan proses redoks elektrokimia (Şahin et al., 2020).



Gambar 2.6 Skema *Pseudocapacitor* (Yan et al., 2010)

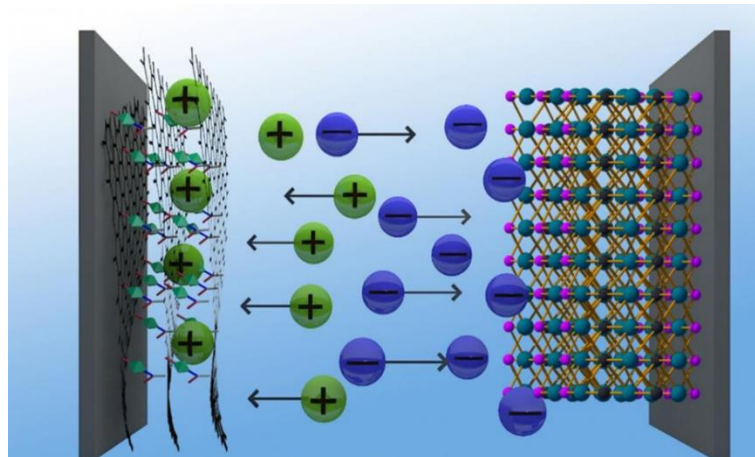
Jenis material elektroda yang digunakan pada *Pseudocapacitor* memiliki persyaratan harus mampu berinterkalasi menjadi substrat elektroda untuk membentuk lapisan elektroda hibrida. Di antara jenis logam yang biasa digunakan seperti CO_3O_4 , V_2O_5 , dan MnO_2 menjadi kandidat yang menjanjikan untuk *pseudocapacitor* (Vangari et al., 2013).



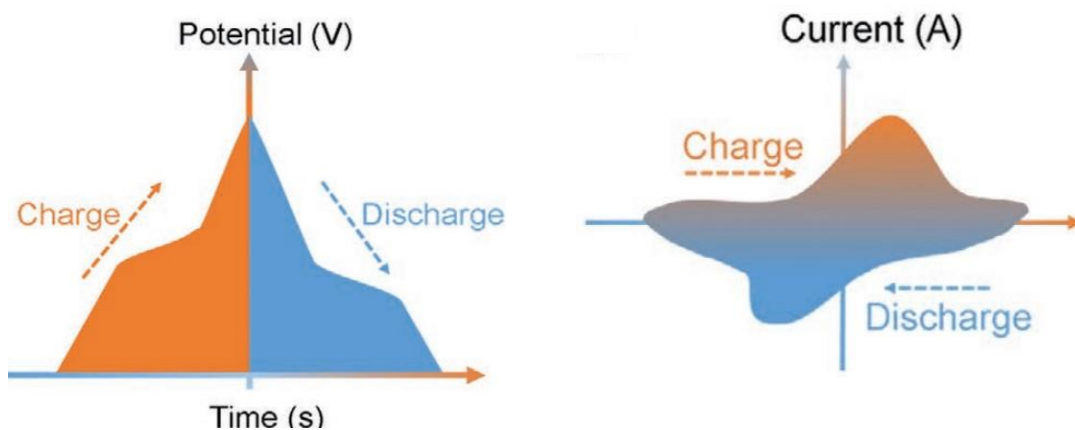
Gambar 2.7 Hasil Pengujian CV dan GCD Pseudokapasitor (Huang et al., 2021)

Jenis terakhir dari superkapasitor adalah superkapasitor *hybrid*. Superkapasitor jenis ini merupakan jenis superkapasitor kombinasi antara EDLC dan *pseudocapacitor*, sehingga jenis

superkapasitor ini memiliki nilai kapasitansi yang lebih baik dari superkapasitor Tunggal dan ketahanan siklus yang lebih tinggi (Thirumurugan et al., 2023). Proses faradik dan *non* faradik digunakan pada *supercapacitor* ini agar mendapatkan penyimpanan energi yang lebih tinggi, sehingga juga menghasilkan nilai *cycling stability* yang lebih tinggi. Selain itu, karena adanya interaksi elektrostatis antara pembawa muatan dan permukaan elektroda di sisi elektroda positif, *hybrid supercapacitor* dapat menghantarkan arus listrik yang tinggi (Libich et al., 2018) dan juga biaya yang lebih murah dari EDLCs. **Gambar 2.8** merupakan hasil ideal pengujian CV untuk *hybrid supercapacitor* yang dapat menjadi acuan di penelitian ini.



Gambar 2.8 Skema *Hybrid Supercapacitor* (Debabrata et al, 2020)



Gambar 2.9 Hasil Pengujian CV dan GCD *Hybrid Supercapacitor* (Huang et al., 2021)

Tabel 2.1 di bawah ini adalah perbandingan nilai antara EDLC, *pseudocapacitor*, dan *hybrid supercapacitor*. Untuk *hybrid supercapacitor* sendiri masih ada beberapa data yang belum lengkap, dikarenakan *hybrid supercapacitor* masih dalam tahap pengembangan di seluruh dunia.

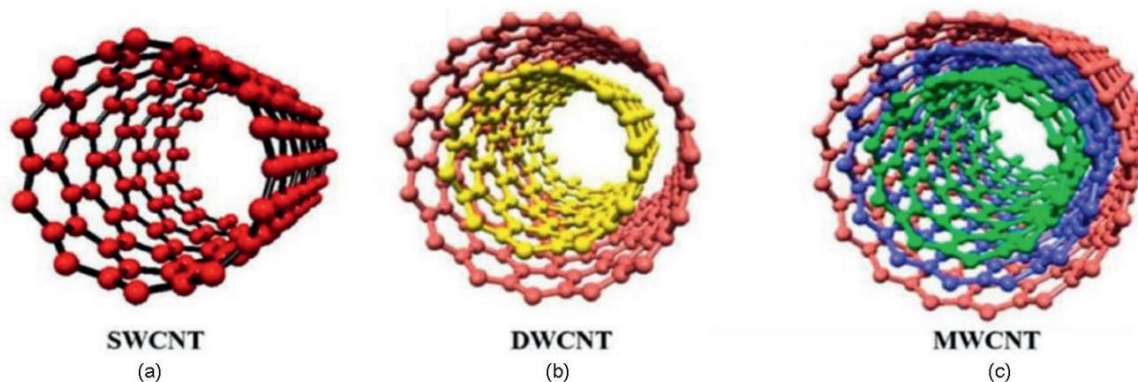
Tabel 2.1 Perbandingan jenis-jenis superkapasitor dan baterai *lithium ion* (Libich et al., 2018)

Spesifikasi	Super Kapasitor			Baterai Li-ion
	EDLC	<i>Pseudo</i>	<i>Hybrid</i>	
Waktu Pengisian (detik)	1 - 10	1 - 10	100	600
<i>Cycle Life</i>	1.000.000	100.000	500.000	500
Energi Spesifik (Wh.kg ⁻¹)	3 - 5	10	180	250
Voltase (V)	2.7	2.3-2.8	2.3 – 2.8	3.6
Biaya per kWh (USD)	~10.000	~10.000	-	~ 140
Temperatur Pemakaian (°C)	-40 ~ 65	-40 ~ 65	-40 ~65	-20 ~ 60

Pada penelitian ini yang mana menggunakan jenis superkapasitor hybrid dari kombinasi material MnO₂, CNT, dan N-rGO diharapkan memiliki sifat kapasitif yang baik, maka diperlukan adanya perhitungan kontribusi dari setiap material yang digunakan.

2.2 Carbon Nanotubes

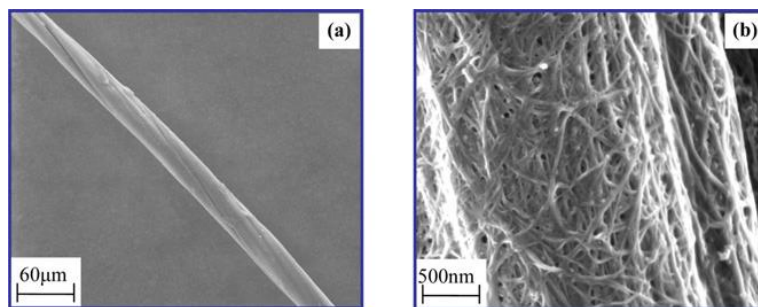
Carbon Nanotubes (CNT) telah menjadi bahan penelitian yang banyak dipelajari sejak ditemukan pada tahun 1991, dan menarik perhatian karena sifat struktural, listrik, dan mekanik yang menarik dan berpotensi di aplikasikan di berbagai bidang. CNT terbentuk ketika selembat *graphene* menggulung menjadi silinder, baik berupa CNT lapis tunggal (SWCNT) dan CNT berlapis banyak (MWCNT) (Pan et al., 2010). CNT adalah alotrop karbon yang memiliki hibridisasi sp². CNT merupakan lembaran *graphene* yang digulung menjadi struktur nano dengan rasio panjang terhadap diameter yang dapat melebihi 1.000.000. CNT dapat berbentuk tunggal, berlapis dua, dan berlapis banyak (Gupta et al, 2019), seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.7** berikut, yaitu SWCNT (*Single walled carbon nanotubes*), DWCNT (*Double walled carbon nanotubes*) dan MWCNT (*Multi walled carbon nanotubes*).



Gambar 2.10 Beberapa jenis Carbon Nanotubes (Kumar et al., 2022)

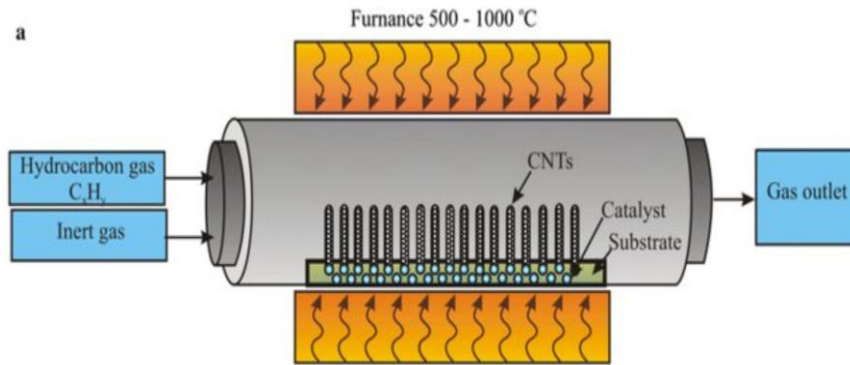
CNT memiliki banyak keunggulan sehingga dapat diaplikasikan pada perangkat elektronik termasuk transistor, pemancar medan elektron, sensor kimia/elektrokimia, biosensor, baterai lithium-ion, sel penyimpanan hidrogen, superkapasitor, dan perangkat pelindung listrik (M, Takahiro, 2021). CNT memberikan beberapa keunggulan, karena CNT adalah konduktor kapasitif yang inert secara kimiawi dengan konduktivitas listrik yang baik. Ini sangat bermanfaat untuk stimulasi listrik, sehingga mendapatkan kerapatan arus tinggi tanpa menyebabkan reaksi faradaik yang ireversibel yang mana mencegah kerusakan jaringan, selain itu CNT meningkatkan luas permukaan kontak efektif untuk mengurangi impedansi tinggi sekaligus mempertahankan diameter kontak (Foremny et al., 2021). Secara teori, CNTs dapat mengalirkan arus listrik dengan densitas sekitar 4×10^9 A/cm² yang mana lebih baik daripada tembaga dan kekuatan mekanik tensile nya lebih bagus dari besi, CNT juga memiliki nilai kapasitansi yang cukup baik, contoh kapasitansi spesifik dari superkapasitor simetris CNT/rGO mencapai 107,8 F/g dan superkapasitor asimetris CNTs/graphene/N-MnO₂ sebesar 185.1 F/g (Ghobad et al, 2023).

Dalam elektroda komposit dari MnO₂/N-rGO/CNT, karena CNT memiliki nilai densitas yang kecil, kekuatan mekanik yang baik, luas permukaan yang tinggi dan sifat elektrikal yang baik. Maka CNT dapat sebagai material *carrier* komposit yang mana dapat meningkatkan konduktivitas elektrik, kapasitansi spesifik dan kekuatan mekanik dari komposit tersebut, sebagai contoh pada komposit ini CNT berperan besar dalam meningkatkan kecepatan transfer muatan antara material dan elektrolit sehingga menghasilkan nilai kapasitansi yang meningkat (Lu et al., 2016)



Gambar 2.11 Carbon Nanotubes dan mikrostrukturnya (Zhu et al., 2010).

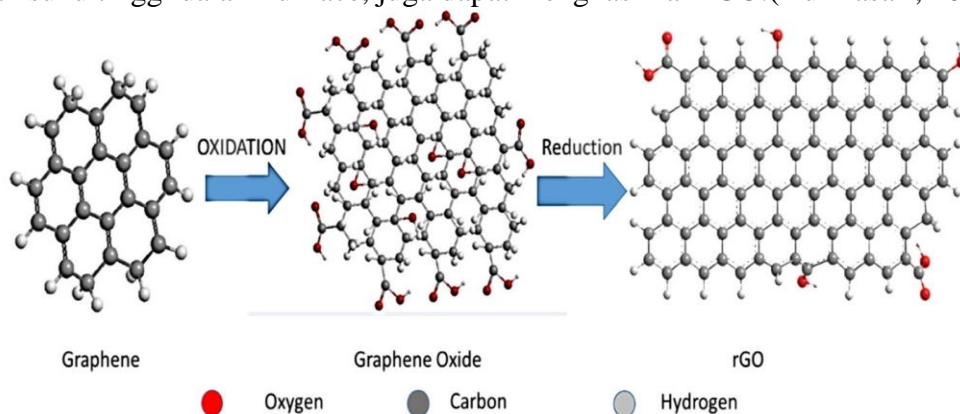
Sintesis CNT yang paling umum yaitu menggunakan metode CVD (*Chemical vapor deposition*) yang melibatkan dua tahapan, yakni persiapan katalis terlebih dahulu, diikuti oleh tahap sintesis CNT. Untuk membentuk CNT, perlu menjaga parameter yang sesuai selama proses tersebut. Proses sintesis CNT dengan metode CVD diasumsikan sebagai proses non-isotermal dan non-adiabatik. **Gambar 2.11** menunjukkan skema rangkaian CVD (Putri dan Teguh, 2020).



Gambar 2.12 Sintesis Carbon Nanotubes dengan metode CVD (Z Olga dan N Gunter., 2016).

2.3 Reduced Graphene Oxide

Reduced Graphene Oxide (rGO) merupakan material 2 dimensional yang memiliki luas permukaan yang besar, stabilitas elektrokimia yang tinggi dan kemampuan menghantarkan arus yang baik (Z Hongyan, 2023). rGO terbuat dari Graphene Oxide yang terjadi reduksi kimia atau termal. rGO diharapkan dapat meningkatkan konduktivitas listrik dari grafena sehingga transfer muatan menjadi lebih tinggi sekaligus pertumbuhan material yang seragam (Singh et al, 2020).. Sejumlah peneliti sebelumnya telah mengemukakan bahwa rGO dapat terbentuk melalui berbagai metode. Salah satu pendekatan pertama adalah dengan memutuskan ikatan grafena oksida menggunakan plasma hidrogen dalam beberapa detik. Metode lain melibatkan perlakuan grafena oksida dengan beberapa contoh *agent* hydrazine hydrate, l-ascorbic acid, dan sodium borohydride diikuti dengan pemanasan larutan tersebut pada suhu 100° C selama 24 jam untuk membentuk rGO (Pandey et al, 2023). Selain itu, pemanasan grafena oksida dalam air pada berbagai suhu dan durasi yang berbeda, serta pemanasan langsung pada grafena oksida menggunakan suhu tinggi dalam furnace, juga dapat menghasilkan rGO.(Kurniasari, 2017).



Gambar 2.13 Struktur reduced Graphene Oxide (Kashyap et al., 2020)

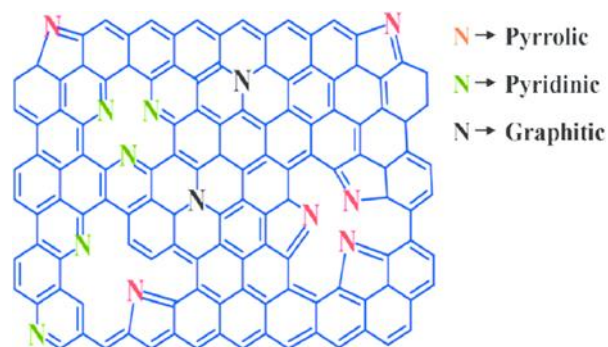
Salah satu metode sintesis rGO adalah dengan menggunakan metode Tour. Metode ini dilakukan dengan cara mencampur bubuk grafit sebanyak 4 g kedalam campuran H₂SO₄ dan H₃PO₄. Hasil larutan tersebut akan didinginkan 0° C dengan *stirring* secara kontinu selama 4 jam. KMnO₄ sebanyak 24 g ditambahkan kepada larutan disaat tempertaur dibawah 5 ° C dengan *stirring* selama 20-25 menit. Hasil larutan tersebut akan dipanaskan 35 – 40 ° C selama 2 jam. Aquades sebanyak 180 ml and H₂O₂ 30% akan ditambahkan per satu tetesan hingga larutan berubah warna menjadi kuning. Kemudian ditambahkan kembali aquades sebanyak 180 ml untuk dilanjutkan dengan ultrasonikasi selama 1 jam, dan sentrifugasi untuk memisahkan

partikel grafit. Hasil larutannya akan dilakukan pencucian dengan aquades, HCl dan etanol hingga mencapai pH 6.5 - 7.0. (Kotsyubynsky et al., 2021).

Pada pengujian elektrokimia yang dilakukan. Gadipelli dan tim pada tahun 2023 telah melakukan penelitian elektroda rGO pada *based structure* menggunakan metode *mild process*. Dihasilkan nilai kapasitansinya yaitu sebesar 190 to 340 F g⁻¹. (Gadipelli et al., 2023)

2.4 Doping Nitrogen

Pemberian doping nitrogen dengan heteroatom dapat meningkatkan sifat konduktivitas listrik rGO. Atom boron (B) dan nitrogen (N) adalah kandidat alami untuk doping dalam rGO karena ukuran atomnya yang mirip dengan atom C (Guo et al., 2011). *Doping* nitrogen dilakukan karena berfungsi sebagai katalis yang bebas logam dan ramah lingkungan, dan juga dapat menunjukkan aktivitas elektrokatalitik yang baik, biaya yang cukup murah dan tahan lama (Z. J. Lu et al., 2013).



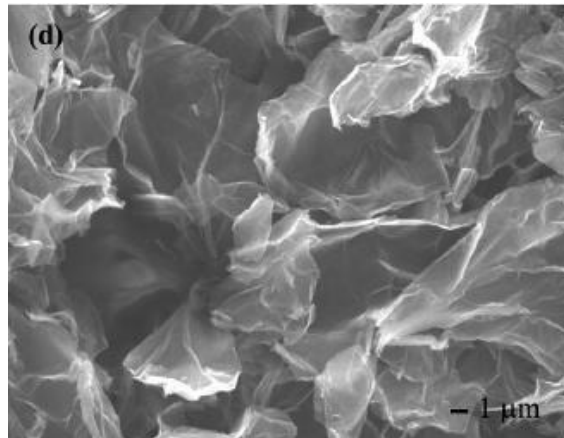
Gambar 2.14 Struktur hasil *doping Nitrogen Graphitic N, Pyridinic N, dan Pyrrolic N* (Vinayan et al., 2016)

Pada **Gambar 2.13**, terdapat tiga jenis ikatan yang mengikat atom N, yaitu *pyridinic*, *N pyrrolic* dan *graphitic* (substitusi) (Y. F. Lu et al., 2013). Secara khusus, *pyridinic* N mengikat dua karbon di tepi atau cacat graphene dan menyumbangkan elektron p ke system π . *Pyrrolic* N mengacu pada atom N yang menyumbangkan dua elektron p ke system π , meskipun tidak perlu terikat dalam cincin lima, seperti pada *pyrrolic*. Kuartir N mengacu pada atom N di tempat atom C di cincin heksagonal. Di antara jenis nitrogen ini, hibridisasi *pyridinic* N dan N *kuaterner* adalah sp^2 dan hibridisasi *pyrrolic* N adalah sp^3 (Guo et al., 2011).

Atom nitrogen memiliki tiga elektron valensi sehingga membentuk ikatan yang kuat dan dapat meningkatkan konduktivitas listrik. Atom nitrogen yang lebih besar dan memiliki keelektronegatifan yang lebih tinggi menjadi menonjol pada rGO, mengakibatkan terjadinya akumulasi muatan pada *interface* elektroda (Sahu et al., 2015). *Doping* nitrogen pada rGO dapat meningkatkan konduktivitas listrik yang berpengaruh ke penyimpanan kapasitansi yang sangat baik, stabilitas, dan tingkat reversibilitas yang sangat baik dalam siklus *charge* dan *discharge* dan mempercepat pertumbuhan nanopartikel (K. Wang et al., 2014). Aliran elektron akibat doping akan mempengaruhi struktur, dimana semakin bertambahnya atom nitrogen dalam rGO ukuran kristalnya akan semakin menurun dan kapasitansi spesifik yang dapat dilihat pada analisis pengujian CV. Sehingga penambahan doping nitrogen berperan penting dalam menentukan sifat kapasitif dari N-graphene (Safitri et al., 2017). Struktur *pyridinic* N juga dapat meningkatkan kapasitansi karena *binding energy* yang besar, sehingga dapat mengakomodasi banyak ion pada permukaan elektroda (Y. F. Lu et al., 2013).

Hu dan tim pada tahun 2014 telah melakukan penelitian elektroda karbon mesoporous dengan doping nitrogen menggunakan metode hydrothermal. Variasi yang digunakan yaitu

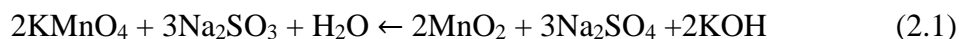
doping nitrogen sebanyak 4,5%, 6%, 9,5%, 12,1%, dan 14,5% dan diperoleh hasil bahwa penggunaan karbon yang diberi doping nitrogen sebanyak 6% sebagai bahan elektroda superkapasitor menunjukkan nilai kapasitansi spesifik tertinggi yaitu 212 F g⁻¹ pada scan rate 1 mV s⁻¹ (Hu et al., 2014).



Gambar 2.15 Hasil Pengujian SEM *N-Doped Graphene* (Sari & Ting, 2015)

2.5 Mangan Dioksida

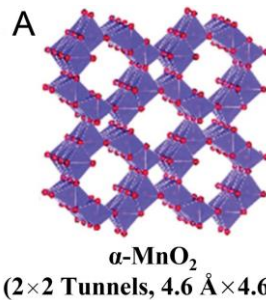
Mangan dioksida (MnO₂) adalah material yang kompleks. Berikut reaksi reduksi MnO₂ sebagai berikut,



Sebuah volumetrik flask berukuran 2 dm³ diisi dengan air hingga sekitar 3/4 dari kapasitasnya. Ditambahkan 20 cm³ larutan standar Na₂S₂O₃ (1,88 × 10⁻² mol dm⁻³). Kemudian, volume yang diperlukan dari larutan KMnO₄ (5 cm³, 20,0 × 10⁻² mol dm⁻³) ditambahkan secara perlahan, dan campuran reaksinya diencerkan hingga 2 dm³ dengan menambahkan lebih banyak air. Setiap penambahan diikuti dengan homogenisasi melalui pengocokan perlahan. Larutan merah muda awalnya berubah menjadi coklat muda (menunjukkan dimulainya evolusi nanopartikel MnO₂) dan akhirnya menjadi coklat tua. Larutan yang dihasilkan bening sempurna dan tetap stabil selama beberapa minggu (Din & Iqbal, 2009). MnO₂ yang dihasilkan melalui reaksi reduksi tersebut memiliki beberapa Karakteristik struktur polimorfik dari mangan dioksida diantaranya yaitu:

2.5.1 α-MnO₂ (Hollandite)

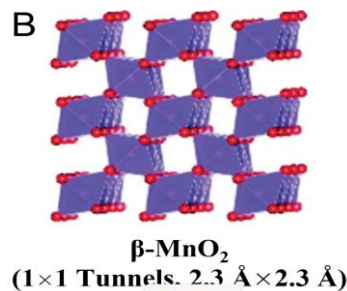
α-MnO₂ merupakan struktur MnO₂ dengan ukuran rongga yang lebih besar. Mineral yang dapat ditemukan di alam adalah *hollandite* (Ba_xMn₈O₁₆) dan *cryptomelane* (K_xMn₈O₁₆). Penyisipan kation mendistorsi struktur, maka mineral *hollandite* biasanya memiliki simetri monoklinik. Struktur *hollandite edge-sharing* MnO₆ oktahedral, membentuk *tunnels* 2x2 (0,46 nm x 0,46 nm) yang merambat sepanjang sumbu c tetragonal sel satuan (D Sonika et al, 2020). Struktur tunnels dari α-MnO₂ dapat distabilkan oleh penyisipan dari alkali metal Ba²⁺ atau K⁺, atau dengan molekul air di tengah *tunnels* 2x2, bersamaan dengan reduksi Mn⁴⁺ menjadi Mn³⁺ dan perubahan O²⁻ oleh OH⁻ (Y. Zhou et al., 2021). **Gambar 2.15** menunjukkan struktur dari *hollandite*. Jenis struktur MnO₂ ini dapat disintesis dengan metode hidrotermal menggunakan senyawa KMnO₄ di suhu 140° selama 12 jam (C Li et al, 2020).



Gambar 2.16 *Hollandite* $\alpha\text{-MnO}_2$ ref (Dai et al., 2022)

2.5.2 $\beta\text{-MnO}_2$ (Pyrolusite)

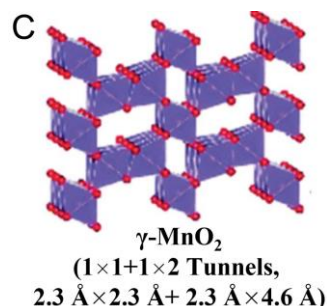
$\beta\text{-MnO}_2$ memiliki struktur paling kecil dengan ukuran *tunnels* 1x1, yang mana strukturnya ditunjukkan pada **Gambar 2.16**. Ukuran *tunnels* ini terlalu kecil untuk menampung senyawa kimia lainnya, kecuali ion Li^+ , sehingga umum digunakan untuk baterai ion lithium. $\beta\text{-MnO}_2$ juga merupakan struktur yang paling stabil dari semua struktur polimorfik MnO_2 dan memiliki struktur *rutile-type* dengan simetri tetragonal di mana rantai tunggal yang terbuat dari *edge-sharing* MnO_6 yang merambat sepanjang sumbu c (Y. Zhou et al., 2021b). Pyrolusite dapat disin



Gambar 2.17 Pyrolusite $\beta\text{-MnO}_2$ (Dai et al., 2022)

2.5.3 $\gamma\text{-MnO}_2$ (Pyrolusite)

Struktur fase $\gamma\text{-MnO}_2$ dianggap sebagai *intergrowth* dari struktur *ramsdellite* (R) dan *pyrolusite* ($\beta\text{-MnO}_2$). Struktur fase $\gamma\text{-MnO}_2$ memiliki *tunnels* yang tak terbatas yaitu 2x1 dan 1x1 sepanjang sumbu c (Y. Zhou et al., 2021a). Struktur *nsutite* terlihat pada **Gambar 2.17** (Y. Zhou et al., 2021b).



Gambar 2.18 Struktur $\gamma\text{-MnO}_2$ (Dai et al., 2022)

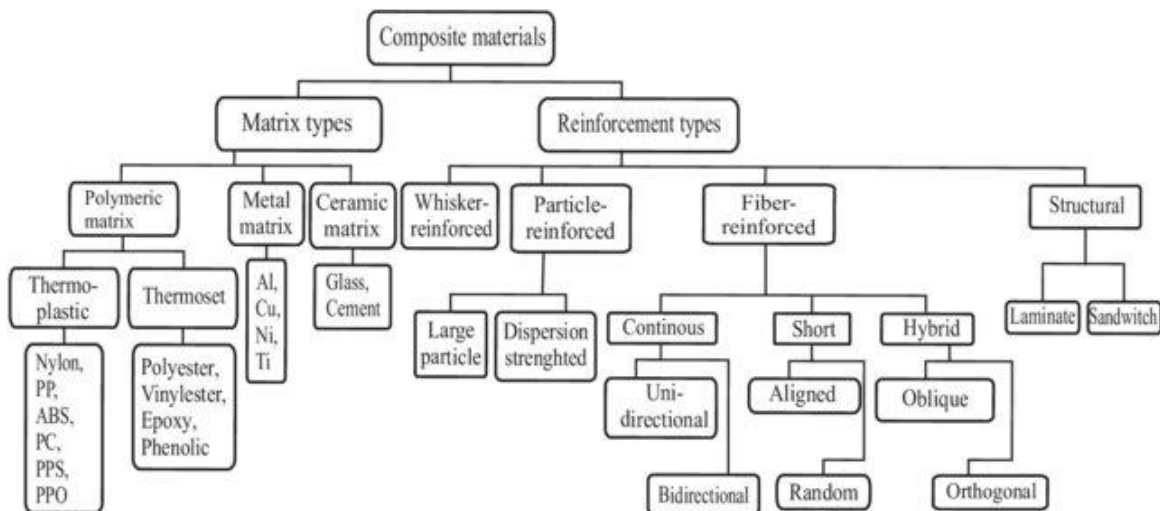
MnO_2 saat ini sedang diteliti secara ekstensif untuk sifat kapasitansinya. MnO_2 dibagi menjadi beberapa struktur kristalografi, yaitu struktur α, β, γ . Karena struktur ini masing-masing berbeda dalam bagaimana oktahedra MnO_6 saling terkait, mereka memiliki *tunnels* atau *interlayers* dengan celah dan besaran yang berbeda. Nilai *specific capacitance* dari MnO_2 mengikuti pola tersebut yaitu $\alpha > \gamma > \beta$ (Devaraj & Munichandraiah, 2008).

Pseudokapasitor biasanya menggunakan metal oksida transisi, yang mana maka menggunakan MnO_2 karena memiliki kemampuan untuk melakukan reaksi redoks faradaic serta transfer muatan yang cepat, sehingga memberikan penambahan pada *performance* nya seperti meningkatnya energy density dan meningkatnya spesifik kapasitansinya (Sahoo et al., 2022).

Liu dan tim pada tahun 2022 telah melakukan penelitian elektroda MnO_2 pada pseudokapasitor menggunakan metode hydrothermal. Dihasilkan nilai kapasitansinya yaitu sebesar 1370 F g^{-1} . (Liu et al., 2022)

2.6 Komposit

Kata komposit berarti dua bahan atau lebih yang dikombinasikan bersama dalam urutan tertentu pada tingkat makroskopis untuk membentuk material baru dengan sifat yang berbeda dan memiliki nilai lebih (Khayal., 2019). Material komposit terbentuk dengan menggabungkan dua atau lebih bahan yang memiliki sifat yang cukup berbeda, dan mereka tidak larut atau bercampur satu sama lain. (TriDungNgo, 2020). Komposit dapat diklasifikasikan jenis matriks dan *reinforcement*, seperti pada **Gambar 2.15** (Sahayaraj et al., 2021).



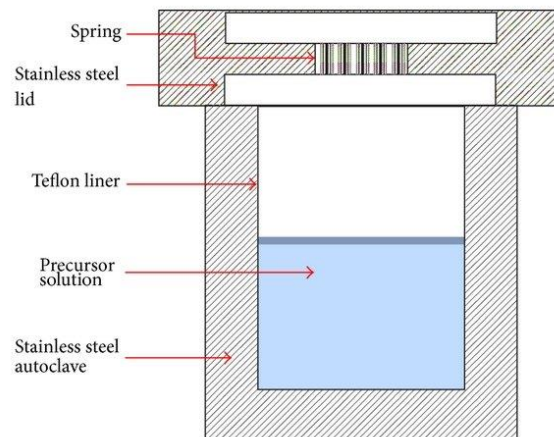
Gambar 2.19 Klasifikasi komposit berdasarkan matriks dan *reinforcement* (Priyanka et al., 2017)

Karakteristik dari metal oksida yang memiliki konduktivitas yang rendah dan karbon yang memiliki kapasitansi yang rendah, memunculkan kebutuhan untuk memenuhi kekurangan itu dengan cara mengkompositkan metal oksida tersebut dengan material karbon, sehingga dapat memberikan karakteristik yang lebih baik. Dengan $KMnO_4$ dan *Porous carbon* sebagai material bahan utamanya (Tian et al., 2023). Dengan alasan diatas, maka dilakukan pengkompositan dengan material komposit ini memberikan efek sinergis yaitu konduktivitas listrik, mencapai kapasitas spesifik yang tinggi dan daya tahan siklus yang lama sebagaimana diharapkan.

Persiapan bahan elektroda komposit MnO_2/CNT dapat dicapai melalui berbagai metode sintesis hidrotermal. MnO_2 -MWCNT melalui perlakuan hidrotermal langsung pada nikel foam untuk elektroda tanpa perekat dengan lembaran nano MnO_2 yang sangat tipis tumbuh secara merata pada MWCNT berbentuk hutan, menutupi permukaan nikel foam. Perlakuan ini menghasilkan kontak langsung antara MWCNT dan arus untuk mencapai transfer muatan dan meningkatkan sifat elektrokimia dari komposit, menunjukkan bahwa pendekatan tanpa perekat dapat secara signifikan meningkatkan konduktivitas bahan elektroda (Wu et al., 2020)

2.7 Proses Hidrotermal Oven

Proses hidrotermal menjadi salah satu metode sintesis yang paling umum dan sering digunakan dalam beberapa penelitian sintesis nanomaterial (Y Gon et al, 2020). *Hydrothermal* terbentuk dari kata *hydro* yang berarti air dan *thermal* yang berarti panas (Piao et al., 2018). Jadi, metode hidrotermal adalah metode yang menggunakan air dan panas yang sifatnya mengubah larutan menjadi kristal (Jung et al., 2018). Metode hidrotermal harus dilakukan pada sistem tertutup untuk mencegah hilangnya pelarut saat dipanaskan diatas titik didihnya(Ou et al., 2018). Pada praktiknya, metode ini melibatkan pemanasan reaktan dalam wadah tertutup (*autoclave*) menggunakan air dalam wadah tertutup, tekanan meningkat dan air tetap sebagai cairan, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.19** dan **Gambar 2.20**



Gambar 2.20 Skema *autoclave* untuk metode hidrotermal (Nilofar et al., 2014)

Prinsip teknik hidrotermal yaitu pemanasan reaktan dalam wadah tertutup dengan menggunakan medium air dimana sistem yang tertutup ini memungkinkan tekanan dan temperatur yang meningkat dengan cepat. Sintesis hidrotermal secara umum dapat diartikan sebagai sintesis kristal atau pertumbuhan kristal pada temperatur dan tekanan tinggi. Sintesis hidrotermal dilakukan pada temperatur dibawah 300°C (Putri et al., 2018)



Gambar 2.21 Contoh *autoclave* yang digunakan proses hidrotermal (Dokumen Pribadi)

Proses hidrotermal memiliki beberapa keuntungan, antara lain seperti temperatur sintesis yang tidak terlalu tinggi (< 240°C), reaksi yang terjadi secara homogen, kemurnian yang tinggi,

dan ukuran serta morfologi yang dapat dikontrol sehingga dapat mempengaruhi sifat fisik material. Sampel berkualitas tinggi dapat diperoleh dengan menggunakan pelarut dibawah tekanan tinggi dan temperatur guna meningkatkan kelarutan padatan sehingga akan meningkatkan laju reaksi (Feng & Li, 2017).

2.8 Penelitian Sebelumnya

Banyak Riset yang telah dilakukan sebelumnya untuk mengkaji pembuatan superkapasitor *hybrid* berbahan komposit MnO₂/ N-rGO/CNT yang dapat dilihat pada **Tabel 2.2**.

Tabel 2.2 Penelitian Sebelumnya

No	Judul	Metode	Hasil	Pustaka
1	Pengembangan dan evaluasi superkapasitor <i>hybrid</i> ion Zn ²⁺ berbahan Zn _x MnO ₂ -CNTs katoda	Melakukan doping <i>Carbon Nano Tubes</i> pada Zn _x MnO ₂	Katoda mendapatkan hasil <i>tunnel</i> yang memiliki <i>ultra-high stability</i> dan konduktivitas yang tinggi juga.	(Ren et al., 2022)
2	<i>High performance</i> dari elektroda MnO ₂ /CNT untuk supercapacitor multifungsi	Melakukan analisis pada sintesis MnO ₂ /CNT sebagai elektroda supercapacitor	Didapatkan superkapasitor berbahan MnO ₂ /CNT dengan ultra-high areal capacitance 2579mF/cm ² dan high tensile strength and Young's modulus t132 MPa dan 6.1 GPa	(Z. Yang et al., 2022)
3	Superkapasitor berbahan material <i>carbon nanotubes</i> , grafena, nanopartikel grafit	Membuat superkapasitor berbahan 3 struktur material grafit yang berbeda-beda.	Superkapasitor berbahan <i>carbon nanotubes</i> memiliki kapasitansi yang lebih tinggi yaitu 411 F g ⁻¹ . Untuk resistansi nanopartikel grafit, grafena, dan <i>carbon nanotube</i> adalah 210 Ω, 96 Ω and 101 Ω.	(Aval et al., 2018)
4	Superkapasitor <i>hybrid</i> berbahan <i>Nitrogen-doped activated Carbon</i>	Karbon diberi doping nitrogen melalui proses satu langkah menggunakan <i>corncobs</i> .	Hasilnya mendapatkan <i>surface area</i> hingga 29000 m ² g ⁻¹ dengan N hingga 4 wt%. Hasil kapasitansi spesifiknya adalah 185 F g ⁻¹ . Setelah 8000 <i>cycle</i> , didapatkan 76.3% kapasitansi awal.	(B. Li et al., 2016)
5	Peningkatan reaksi Kinetics of N-MnO ₂ Nanosheets menggunakan Oksigen melalui Mild NH ₃ ·H ₂ O	penggunaan nanosheet MnO ₂ yang didoping N dengan oksigen yang melimpah untuk difusi ion	Superkapasitor asimetris yang dihasilkan memiliki kepadatan energi dan daya maksimum sebesar 75,3 Wh kg ⁻¹ dan 18,1 × 10 ³ W kg ⁻¹ dan kapasitansi	(Gong et al., 2022)

	Bath Treatment untuk Superkapasitor	cepat dalam superkapasitor berbasis MnO ₂ .	185.1 f/g	
6	Komposit <i>microsphere</i> rGO/MnO ₂ sebagai material elektroda superkapasitor <i>hybrid</i> yang disintesis melalui reaksi refluks	Komposit disintesis melalui sistem <i>water-reflux condenser</i> dengan variasi (60, 80, dan 100 °C)	Untuk komposit variasi 80°C memiliki kapasitansi sebesar 630 F g ⁻¹ dan memiliki efisiensi 98.7% setelah melalui 5000 <i>cycle test</i>	(Vimuna et al., 2022)
7	Peningkatan Superkapasitor MnO ₂ /carbon nanotube berasal dari penggunaan baterai MnO ₂ untuk high-performance supercapacitor material.	Membuat superkapasitor MnO ₂ /CNT dan tambahan <i>activated carbon</i>	Hasil MnO ₂ /CNT memiliki sifat kapasitansi 253.86 F g ⁻¹ sedangkan MnO ₂ /CNT dengan tambahan <i>activated carbon</i> memiliki kepadatan energi (32.00 Wh kg ⁻¹ at 413.70 W kg ⁻¹) with 78.26% sisa setelah 6000 cycles	(Li et al., 2022)
8	Analisis Pengaruh Doping Nitrogen Terhadap Sifat Kapasitif Superkapasitor Hybrid Berbahan Komposit N-rGO/MnO ₂	Penambahan variasi massa NH ₄ OH (2 ml, 4 ml, 6 ml) pada superkapasitor hybrid berbahan komposit N-rGO/MnO ₂	hasil pengujian CV, nilai kapasitansi yang terbesar dan stabil diperoleh variasi komposit dengan 4 ml sebesar 36.268 Fg ⁻¹ . Didukung juga dengan pengujian EIS dan GCD, nilai kapasitansi terbesar diperoleh variasi 4 ml dengan kapasitansi sebesar 18.225 Fg ⁻¹ dan 36.268 Fg ⁻¹ , dengan nilai konduktivitas sebesar 3.565 Sm ⁻¹ .	(Cendrawan et al., 2023)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Alat dan Bahan Penelitian

3.1.1 Alat Penelitian

Alat yang digunakan untuk penelitian ini yaitu:

1. Gelas kimia
Penggunaan gelas kimia pada penelitian ini digunakan sebagai wadah larutan pembuatan rGO
2. *Magnetic stirrer*
Penggunaan *magnetic stirrer* pada penelitian ini untuk mengaduk larutan secara otomatis agar menjadi homogen
3. *Oven*
Penggunaan *oven* pada penelitian ini untuk memanaskan dan mengeringkan hasil dari pembuatan rGO
4. Pipet tetes
Penggunaan pipet tetes pada penelitian ini untuk pengambilan zat kimia dari wadah gelas ukur
5. *Crucible*
Penggunaan *crucible* pada penelitian ini untuk tempat penampungan hasil saringan dari larutan rGO yang akan dimasukkan ke dalam *vacuum furnace*
6. Spatula
Penggunaan spatula pada penelitian ini untuk pengambilan bahan padat
7. Neraca Analitik
Penggunaan neraca analitik pada penelitian ini untuk dilakukannya penimbangan berat padatan
8. Gelas ukur
Penggunaan gelas ukur pada penelitian ini untuk dilakukannya pengukuran volume larutan
9. *Ultrasonic Cleaner*
Penggunaan *Ultrasonic Cleaner* adalah untuk proses ultrasonifikasi larutan rGO dari pengotor-pengotor yang terkandung
10. Kertas *Filter*
Penggunaan kertas *filter* adalah untuk filtrasi larutan rGO dari kandungan air yang tersisa setelah pencucian dengan air.
11. *Autoclave Stainless Steel*
Penggunaan *Autoclave Stainless Steel* adalah sebagai wadah sintesis N-Doped rGO di dalam *furnace*
12. Instrumen Karakterisasi Material
 - a. X-Ray Diffraction (XRD)
Penggunaan *X-Ray Diffraction* adalah untuk mengetahui senyawa yang terkandung dalam sampel serta struktur dan ukuran kristalnya.
 - b. Scanning Electron Microscope (SEM)
Penggunaan *Scanning Electron Microscope* adalah untuk menganalisis morfologi yaitu permukaan sampel dan komposisi penyusun objek
 - c. Fourier Transform Infra Red (FTIR)
Penggunaan *Fourier Transform Infra Red* adalah untuk mengetahui gugus fungsi yang terkandung dalam sampel.
 - d. *Cyclic Voltammetry* (CV)

Penggunaan *Cyclic Voltammetry* adalah untuk mengetahui nilai kapasitansi dari hasil superkapasitor *hybrid*.

e. *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS)

Penggunaan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* adalah untuk mengetahui nilai konduktivitas dari hasil superkapasitor *hybrid*.

f. *Galvanostatic Charge Discharge* (GCD)

Penggunaan *Galvanostatic Charge Discharge* adalah untuk menganalisa performa elektrokimia superkapasitor *hybrid*

3.1.2 Bahan Penelitian

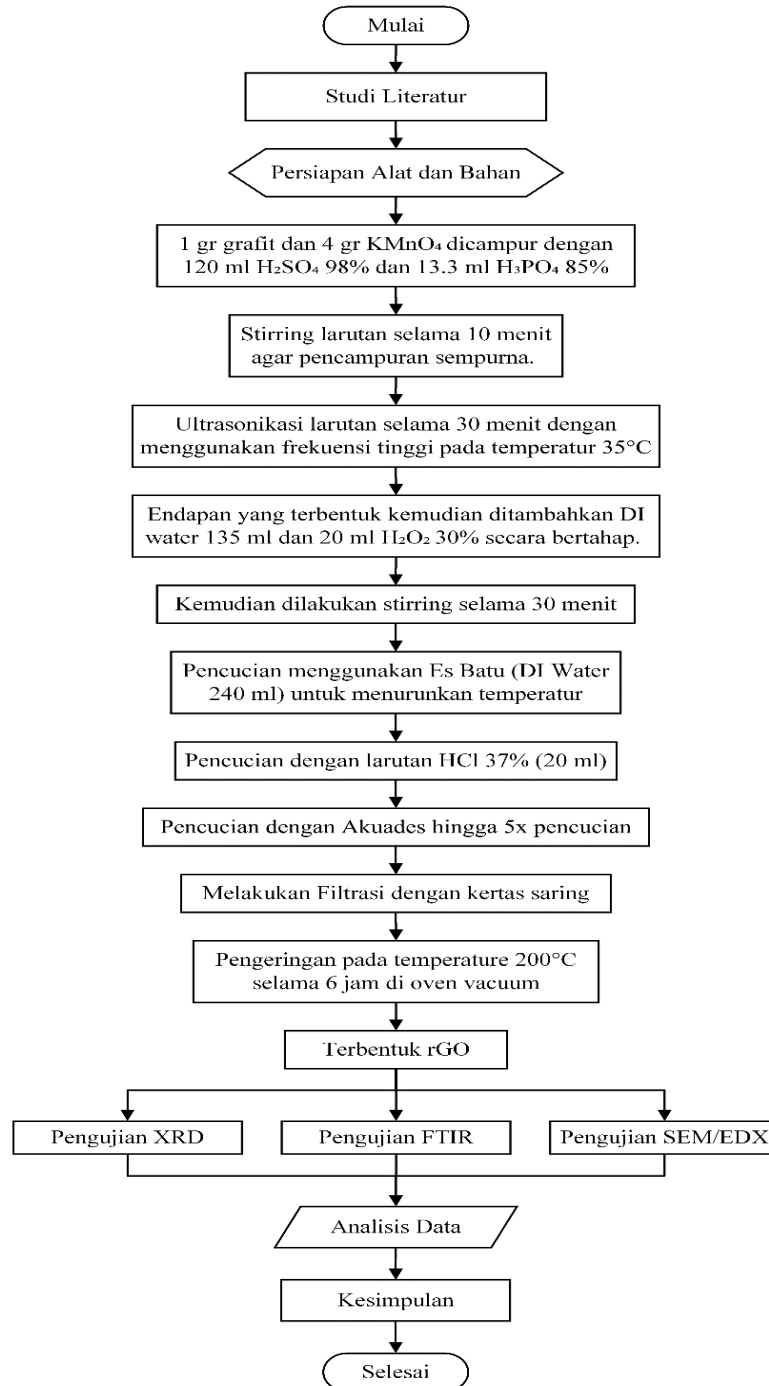
Bahan yang digunakan untuk penelitian ini yaitu :

1. Serbuk Grafit dengan ukuran 5 μm (*purity* 99%)
2. Air suling / aquades (H_2O)
3. Es
4. Potassium Permanganat (KMnO_4)
5. Hidrogen Peroksida 30% (H_2O_2)
6. Asam Klorida 37% (HCl)
7. Amonia Hidroksida 25% (NH_4OH)
8. Asam Sulfat 98% (H_2SO_4)
9. Asam Fosfat 85% (H_3PO_4)
10. Nikel Foam
11. Natrium Sulfat (Na_2SO_4)
12. PVA
13. Acetylene Black
14. MWCNT HQNANO-CNTs

3.2 Diagram Alir

3.2.1 Diagram Alir Sintesis reduced Graphite Oxide

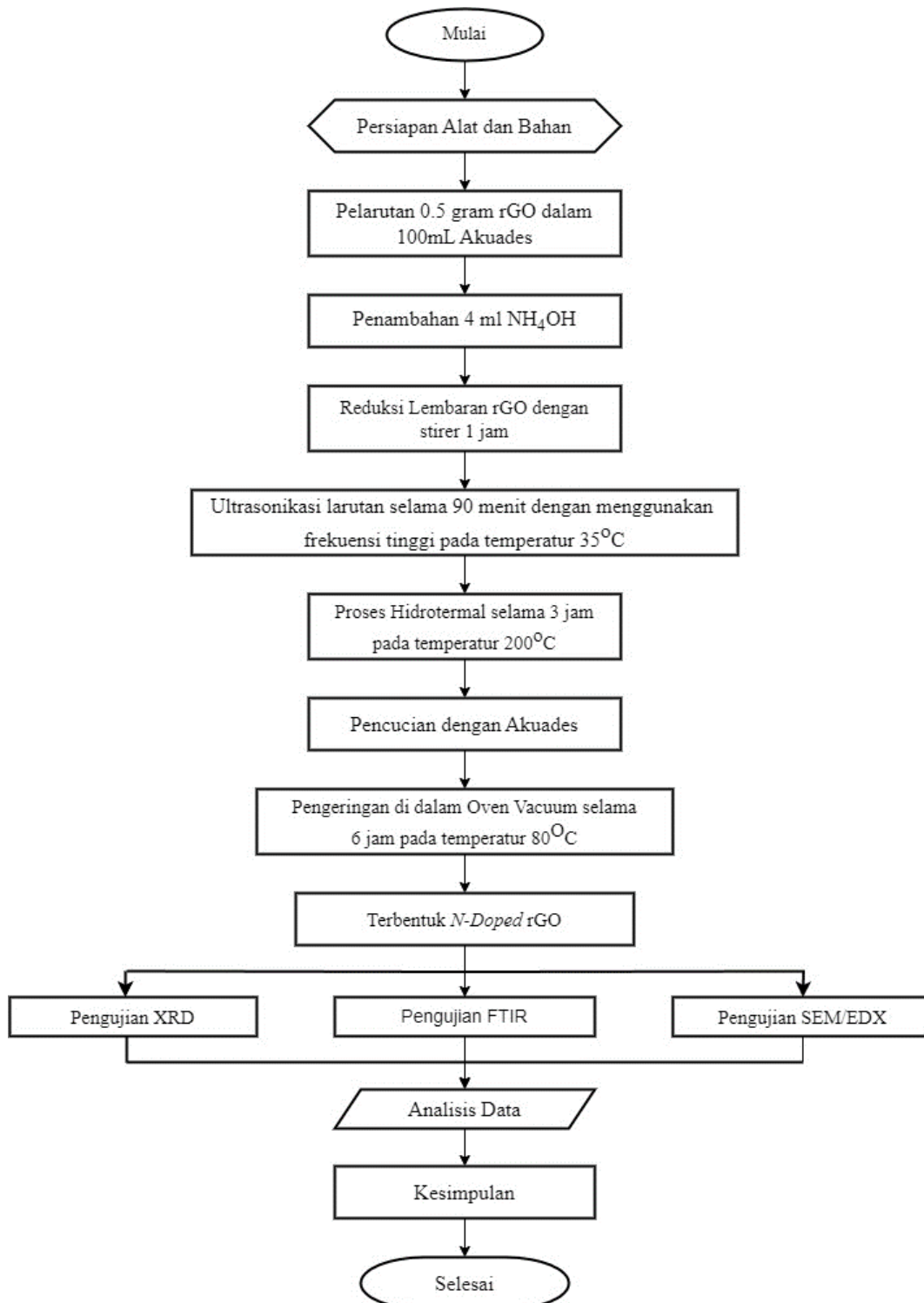
Berikut **Gambar 3.1** yang merupakan diagram alir dari proses sintesis *reduced Graphene Oxide*



Gambar 3.1 Diagram Alir Sintesis reduced Graphene Oxide

3.2.2 Diagram Alir Sintesis N-rGO

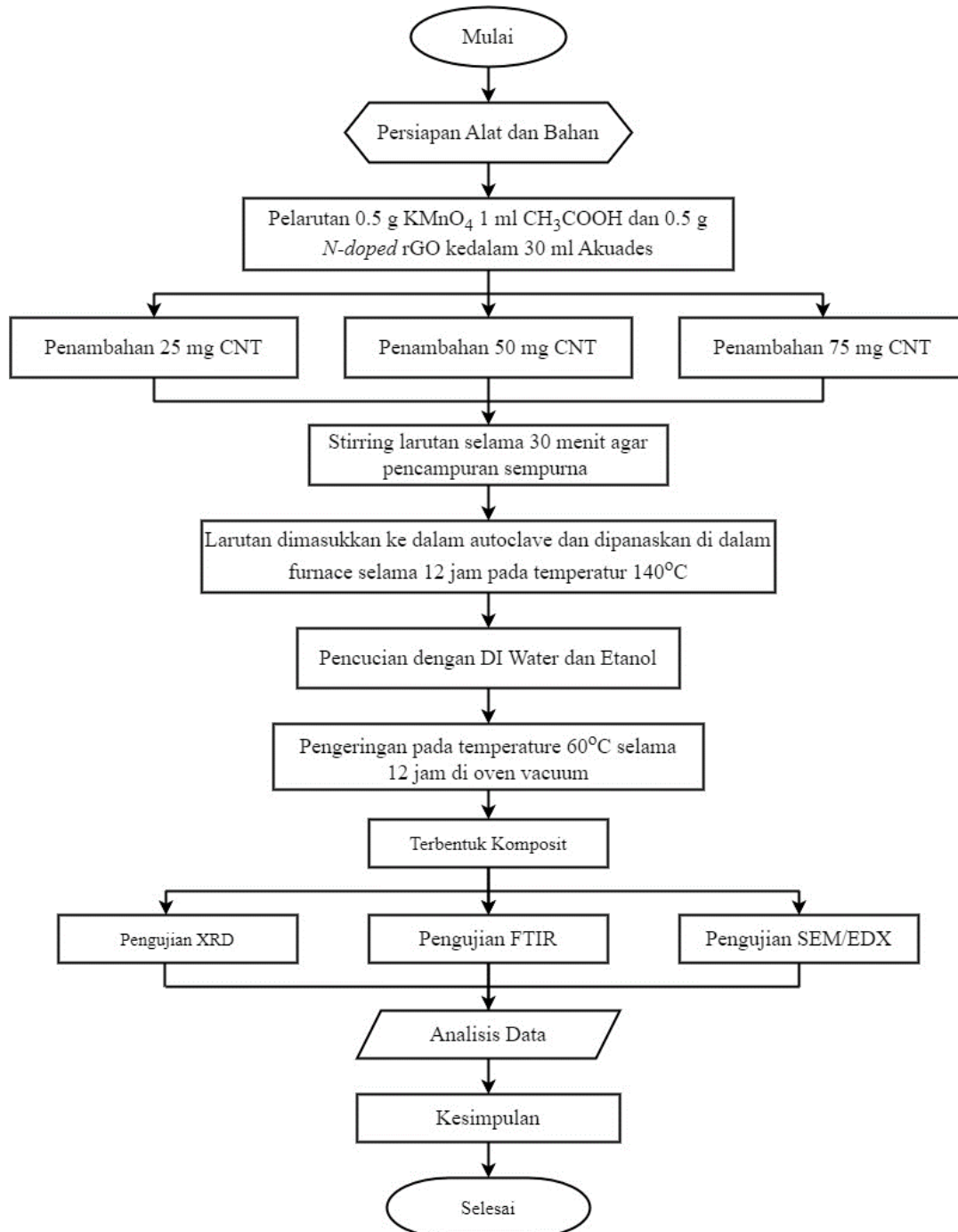
Berikut **Gambar 3.2** yang merupakan diagram alir dari proses sintesis *Nitrogen-doped reduced Graphite Oxide*.



Gambar 3.2 Diagram Alir Sintesis N-rGO

3.2.2 Diagram Alir Sintesis Komposit MnO₂/N-rGO/CNT

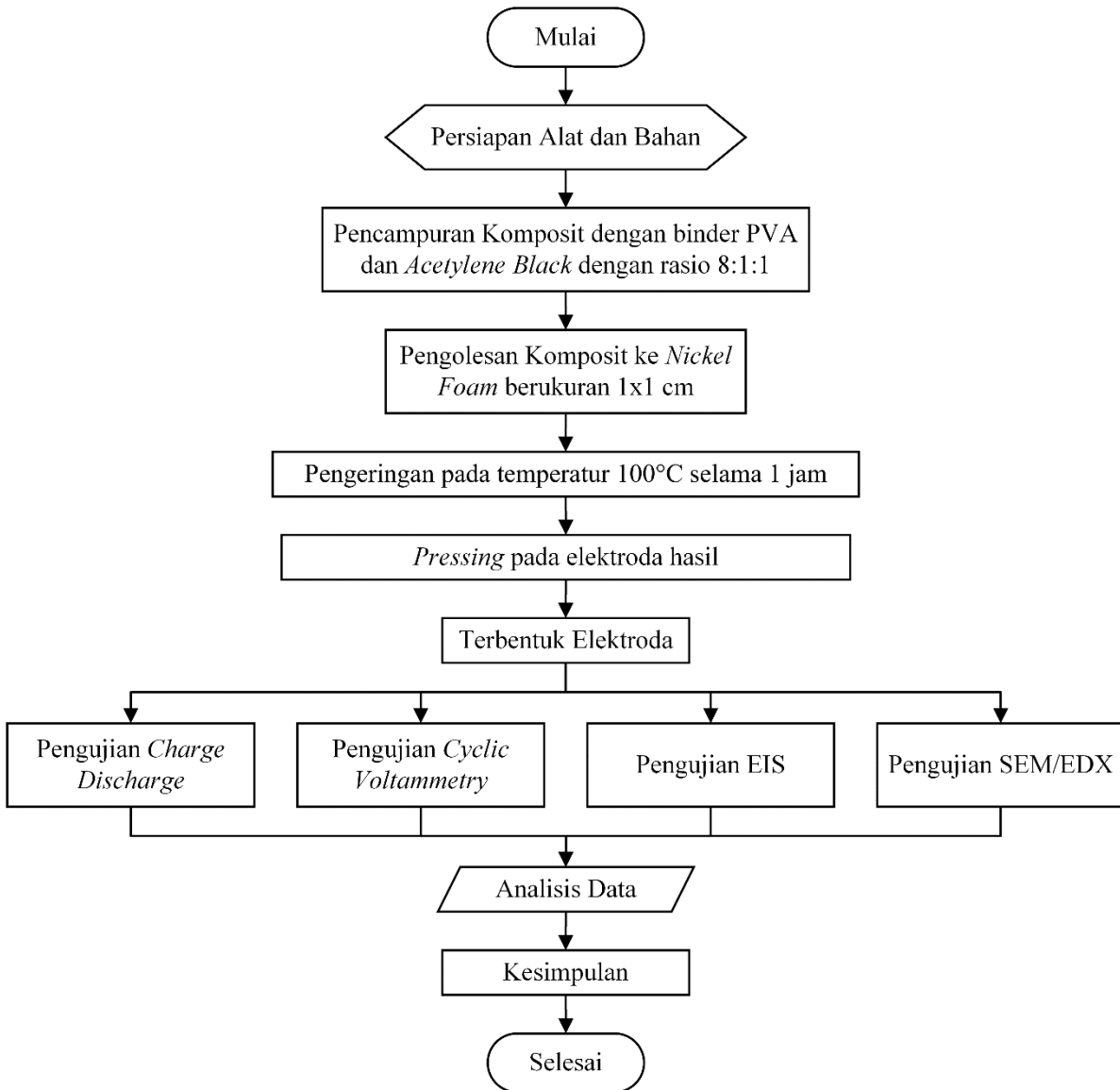
Berikut **Gambar 3.3** yang merupakan diagram alir dari proses sintesis komposit *Nitrogen-doped reduced Graphene Oxide*, CNT dan MnO₂.



Gambar 3.3 Diagram Alir Sintesis Komposit MnO₂/N-rGO/CNT

3.2.4 Diagram Alir Sintesis Elektroda dan Pengujian Performa Elektrokimia

Berikut **Gambar 3.4** yang merupakan diagram alir dari proses sintesis elektroda superkapasitor *hybrid* dan pengujian performa elektrokimia.



Gambar 3.4 Diagram Alir Sintesis Elektroda dan Pengujian Performa Elektrokimia

3.2 Metode Penelitian

Metode yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur

Pada tahapan ini, pencarian tinjauan dilakukan melalui buku, jurnal, paten, maupun penelitian serupa mengenai pembuatan superkapasitor *hybrid* berbahan *N-Doped reduced Graphene Oxide* atau Mangan Dioksida MnO_2 . Kemudian, meninjau untuk menentukan metodologi penelitian.

2. Diskusi

Pada tahapan ini, permasalahan akan diperliat dan dilakukan pencarian solusi pada penelitian yang akan dirancang. Keberlangsungan diskusi dilakukan bersama dengan pihak yang bersangkutan dalam penelitian ini.

3. Eksperimental

Penelitian diawali dengan pembuatan bubuk rGO dari bubuk grafit yang halus, serta pembuatan MnO₂ dan pembuatan komposit dari N-rGO, CNT dan MnO₂. Kemudian hasilnya akan dibuat menjadi elektroda untuk menguji kapasitansinya. Selama keberjalanan penelitian juga akan dilakukan pengujian karakteriasasi yang bertujuan untuk memastikan setiap langkah berhasil dan memang terbentuk zat-zat yang diinginkan.

3.2.3 Preparasi *reduced Graphite Oxide*

Preparasi rGO menggunakan metode *Tour* yang dimodifikasi. Pencampuran 1 gr grafit dan 4 gr KMnO₄ dengan 120 ml H₂SO₄ dan 13.3 ml H₃PO₄ 85% ke dalam gelas beker, yang kemudian dilakukan *stirring* selama 10 menit agar larutanya bersifat homogen. Kemudian, dilakukan proses ultrasonifikasi larutan selama 30 menit dengan menggunakan frekuensi tinggi pada temperatur 35°C. Endapan yang terbentuk kemudian ditambahkan aquades sebanyak 135 ml dan 20 ml H₂O₂ 30% kedalam larutan. Agar larutan tetap homogen, dilakukan *stirring* selama 30 menit. Ketika proses *stirring*, akan terjadi reaksi eksoterm sehingga perlu dilakukan pencucian dengan es batu untuk menurunkan temperatur dari larutan tersebut. Kemudian, akan dilakukan pencucian dengan larutan HCl 37% sebanyak 20 ml serta pencucian dengan aquades sebanyak lima kali. Setelah 5x pencucian, akan dilanjutkan dengan filtrasi menggunakan kertas filter whatman 42, agar tersisa endapanya saja. Endapan yang didapat dilanjutkan dengan pengeringan di dalam *oven* pada temperatur 200°C selama 6 jam. Hasil rGO tersebut akan dilakukan pengujian XRD, FTIR, dan SEM/EDX untuk dianalisis lebih lanjut data hasilnya.

3.2.4 Preparasi *Nitrogen-Doped rGO*

Proses *doping nitrogen* pada rGO dilakukan menggunakan NH₄OH 25%. Prosedurnya diawali pengukuran massa 0.5 g rGO menggunakan neraca digital dan 100 ml akuades ke dalam baker glass. Selanjutnya dilakukan penambahan 4 ml NH₄OH ke dalam larutan kemudian dilakukan pelarutan dan reduksi dengan *stirrer* selama 1 jam. Kemudian akan dilakukan ultrasonikasi larutan selama 90 menit dengan frekuensi tinggi pada temperatur 35°C. Kemudian dilanjutkan dengan proses hidrotermal selama 3 jam pada temperatur 200°C. Selanjutnya adalah pencucian dengan aquades dan pengeringan di dalam *oven* selama 6 jam pada temperatur 80°C. Hasil N-rGO tersebut akan dilakukan pengujian XRD, FTIR, dan SEM/EDX untuk dianalisis lebih lanjut data hasilnya.

3.2.5 Preparasi Komposit MnO₂/ N-rGO/CNT

Proses pembuatan komposit dimulai dengan pelarutan 0.5 g N-rGO dengan 1 gr KMnO₄ dan 1 ml CH₃COOH dalam 30 ml akuades. Selanjutnya dilakukan penambahan dengan variasi massa 25 mg, 50 mg, 75 mg CNT. Kemudian dilakukan *stirring* larutan selama 30 menit agar larutan tercampur secara homogen. Hasil larutanya kemudian dimasukkan ke dalam *autoclave* dan dipanaskan di dalam *oven* selama 12 jam pada temperatur 60°C, agar terbentuk komposit MnO₂/N-rGO/CNT Hasil tersebut akan dilakukan pengujian XRD, FTIR dan SEM/EDX untuk dilakukan analisa lebih lanjut.

3.2.6 Preparasi Elektroda Superkapasitor *Hybrid*

Proses pembuatan elektroda superkapasitor *hybrid* dilakukan menggunakan metode pengolesan kepada *nickel foam* untuk menghindari kompositnya rontok ketika menggunakan

metode yang menggunakan larutan *nickel foam*. Diawali dengan pencampuran komposit dengan *binder* PVA dan *Acetylene Black* dengan rasio 8:1:1. Kemudian pengolesan komposit tersebut ke *nickel foam* yang berukuran 1x1 cm. Pengeringan dilakukan pada temperatur 100°C selama 1 jam. Hasil elektroda nya tersebut akan dilakukan pengujian *Charge Discharge, Cyclic Voltammetry, EIS* untuk dilakukan analisis lebih lanjut data hasilnya.

3.3 Pengujian

Hasil penelitian yang didapat perlu dilakukan pengujian agar data yang didapat dapat tervalidasi dan bisa menjadi indikator suksesnya suatu penelitian. Berikut adalah penjelasan jenis-jenis pengujian yang digunakan dalam penelitian ini.

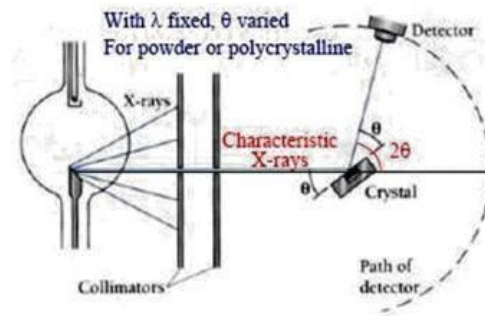
3.3.3 Pengujian XRD

XRD (*X-Ray Diffraction*) adalah alat yang digunakan untuk mengkarakterisasi struktur kristal dan ukuran kristal dari suatu bahan padat. Metode difraksi umumnya digunakan untuk mengidentifikasi senyawa yang belum diketahui yang terkandung dalam suatu padatan dengan cara membandingkan dengan data difraksi dengan database yang dikeluarkan oleh ICDD (International Central of Diffraction Data). Semua bahan yang mengandung kristal tertentu ketika dianalisa menggunakan XRD akan memunculkan puncak-puncak yang spesifik.

Prinsip kerja XRD terdiri dari 4 tahap yang dapat dilihat pada skema **Gambar 3.5**. Tahapan meliputi produksi, difraksi, deteksi dan interpretasi. Untuk dapat melakukan fungsinya, XRD dilengkapi oleh komponen-komponen penting seperti tabung sinar X, monochromator, detector dan lain-lain. Pada tahap produksi, elektron yang dihasilkan ketika filamen (katoda) dipanaskan akan dipercepat akibat perbedaan tegangan antara filamen (katoda) dengan spesimen target (anoda) sehingga terjadi tumbukan dengan spesimen target yang akan menghasilkan radiasi sinar-X yang keluar dari tabung sehingga berinteraksi dengan struktur kristal yang diuji. Selanjutnya, pada tahap difraksi material akan dianalisis struktur kristalnya harus berada dalam fasa padat karena dalam kondisi tersebut kedudukan atom-atomnya berada dalam susunan yang sangat teratur sehingga membentuk bidang kristal. Ketika sinar-X diarahkan pada bidang kristal tersebut, maka akan timbul pola-pola difraksi ketika sinar-X melewati celah-celah kecil di antara bidang-bidang kristal.

Pada tahap selanjutnya, interferensi konstruktif radiasi sinar-X hasil difraksi struktur kristal material yang diuji akan dideteksi oleh detektor. Agar detektor dapat mendeteksi interferensi konstruktif radiasi sinar-X hasil difraksi struktur kristal, maka posisinya harus berada tepat pada arah sudut pantul radiasi sinar-X tersebut. Tahap terakhir, interferensi konstruktif radiasi sinar-X yang telah dideteksi oleh detektor kemudian akan diperkuat oleh gelombang dengan menggunakan amplifier. Lalu interferensi konstruktif radiasi sinar-X tersebut akan terbaca secara spektroskopi sebagai puncak-puncak grafik yang akan ditampilkan oleh display. Dengan menganalisis puncak-puncak grafik tersebut maka struktur kristal suatu material dapat diketahui (Locci-Lopez et al., 2018)

Pada penelitian ini. untuk mengetahui fasa yang terbentuk pada sampel maka dilakukan pengujian XRD menggunakan instrumen PANAnalytical dengan range sudut $10^{\circ} - 90^{\circ}$ dan menggunakan panjang gelombang $\text{CuK}\alpha$ sebesar 1.54056 Å yang dilakukan di Divisi Karakterisasi Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS. **Gambar 3.6** adalah gambar dari alat uji.



Gambar 3.5 Prinsip Kerja XRD

Secara umum prinsip kerja XRD dapat dilihat pada **Gambar 3.5**



Gambar 3.6 Instrumen Pengujian XRD (Angelika., 2022)

Sampel ditempatkan pada titik fokus hamburan sinar-X yaitu tepat di tengah-tengah *plate* Berikut merupakan tahapan dalam pengujian XRD:

1. Sampel diletakkan di tengah-tengah tatakan (*plate*), tatakan disini berupa sebuah plat tipis yang berlubang di tengah menggunakan perekat pada sisi baliknya agar *plate* tidak jatuh ketika *plate* diputar. Jika spesimen berupa serbuk, maka digunakan *plate* yang di atasnya ditutup dengan menggunakan plastik.
2. Berkas sinar-X didifraksikan oleh sampel dan difokuskan melewati celah, kemudian masuk ke alat pencacah. Apabila sampel berputar sebesar 2θ maka alat berputar sebesar θ .
3. Pola difraksi sinar-X direkam dalam bentuk kurva intensitas terhadap sudut difraksi (Christyaningsih & Diponegoro, 2020).

Untuk menentukan fasa yang terbentuk dapat dilakukan dengan metode pencocokan terhadap difraksi acuan. Hasil XRD dapat digunakan untuk menghitung ukura kristal (*crystallite size*) menggunakan persamaan *Debye Scherrer* sesuai dengan Persamaan 3.1 sebagai berikut:

$$D = \frac{0.9 \lambda}{B \cos \theta} \quad (3.1)$$

Dimana :

D : Ukuran kristal (Å)

λ : Panjang gelombang (Cu α = 1.54056 Å)

B : FWHM (*Full Width at Half Maximum*) (rad)

θ : Sudut difraksi (°)

untuk menggambarkan kondisi konstruktif dari difraksi sinar-X pada suatu kisi kristal. Persamaan Bragg menjelaskan kondisi di mana gelombang sinar-X dapat mengalami interferensi konstruktif ketika berinteraksi dengan kisi kristal.

$$n\lambda = 2d \sin(\theta) \quad (3.1)$$

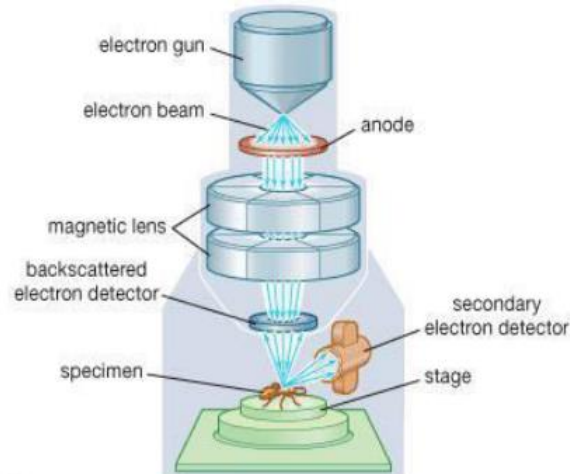
Dimana :
n : orde difraksi (bilangan bulat),
 λ : panjang gelombang sinar-X (Cu α = 1.54056 Å)
d : jarak antar bidang kisi kristal (Å)
 θ : sudut difraksi (°)

3.3.4 Pengujian SEM/EDX

Scanning Electron Microscope (SEM) merupakan jenis mikroskop elektron yang memanfaatkan sinar elektron berenergi tinggi untuk menggambarkan permukaan sampel yang berbeda, pada resolusi yang jauh lebih tinggi dari mikroskop optik. Dimana menampilkan gambar morfologi sampel dengan perbesaran 2000-50.000X. Adapun cara kerja dari SEM adalah *electron gun* memproduksi *electron beam*, anoda menangkap *electron beam* untuk kemudian diarahkan kesampel kemudian serangkaian lensa *magnetic* memfokuskan *beam* ini dan menembakkan ke sampel, *scanner* membaca struktur permukaan sampel selanjutnya menangkap sinyal dari *secondary* dan *back scattered electron* untuk dikirim ke sistem kontrol sehingga dapat dilihat gambarnya pada monitor dan dapat dicetak bila diperlukan.

Prinsip kerja SEM seperti pada **Gambar 3.7** yaitu berkas elektron yang dihasilkan oleh *electron gun* menyapu permukaan sampel. Pada saat *electron* berinteraksi dengan sampel, maka akan dihasilkan *secondary electron* (SE). *electron* ini masuk ke dalam *detector* dan diubah menjadi sinyal listrik yang menghasilkan gambar pada layar monitor. Sinyal keluaran dari *detector* ini berpengaruh terhadap intensitas cahaya di dalam tabung monitor, karena jumlah cahaya yang dipancarkan oleh monitor sebanding dengan jumlah *electron* yang berinteraksi dengan sampel. Hasil yang ditampilkan dengan *secondary electron* ini adalah topografi permukaan sampel. Sedangkan untuk mengamati fasa-fasa, dilakukan dengan *backscattered electron* (BE). BE memberikan perbedaan kehitaman gambar berdasarkan nomor atom (Z) dari unsur-unsur fasa yang ada pada sampel. Bahkan dengan nomor atom yang besar, akan tampak lebih terang dibandingkan bahan dengan nomor atom yang lebih kecil. (Di Gianfrancesco, 2017)

Pengujian SEM dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Material Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS. Sampel yang digunakan berupa komposit MnO₂/N-rGO/CNT Sampel diamati dengan beberapa perbesaran mikroskop agar didapatkan data mengenai morfologi dan struktur dari komposit MnO₂/ N-rGO/CNT yang terbentuk. Rangkaian kerja pengujian tergambar pada **Gambar 3.8** berikut.



Gambar 3.7 Prinsip Kerja SEM (Abbas, 2018)

Sampel yang digunakan berupa hasil komposit $\text{MnO}_2/\text{N-rGO}/\text{CNT}$. Sampel diamati dengan beberapa perbesaran mikroskop agar didapatkan data mengenai morfologi dan struktur dari komposit yang terbentuk. **Gambar 3.9** menunjukkan alat pengujian.



Gambar 3.8 Scanning Electron Microscope (SEM) (Hoten, 2020)

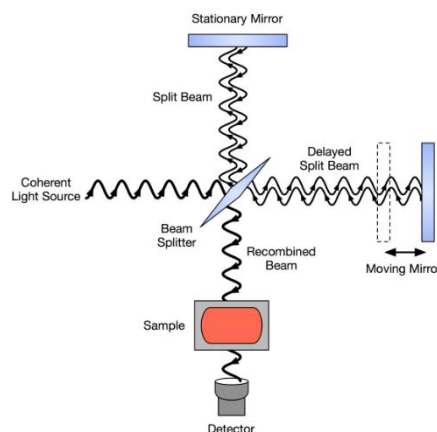
3.3.5 Pengujian FTIR

FTIR (Fourier Transform Infra Red) merupakan salah satu alat analisis yang menggunakan radiasi infra merah, Pancaran radiasi infra merah berfungsi untuk mendeteksi ikatan kimia dan gugus fungsi penyusun material uji. Penyerapan molekul dan transmisi merupakan hasil dari penyerapan infrared. Setiap molekul yang digambarkan FTIR akan memiliki pola vibrasi yang berbeda serta pola ikatan antar atom yang berbeda. Infra merah yang dipancarkan berasal dari interferometer, yang mana radiasi ini akan dipancarkan melalui sampel dan diserap oleh sampel. Sinar yang melalui dan diserap sampel ini akan dideteksi oleh detektor, yang mana akan diubah menjadi spektrum oleh interferogram. FTIR dapat memberikan informasi mengenai material yang belum diketahui (teridentifikasi), mengenai kualitas sampel, dan mengetahui jumlah komponen dalam suatu campuran. **Gambar 3.9** memperlihatkan instrumen uji FTIR.



Gambar 3.9 Instrumen Uji FTIR (Angelika., 2022)

Prinsip kerja FTIR adalah berdasarkan penyerapan radiasi infra merah. Infra merah dipancarkan melalui interferometer kemudian dipancarkan melalui sampel, sebagian radiasi infra merah diserap sampel dan sebagian lain dipancarkan kembali dan tertangkap oleh detektor. Besarnya radiasi infra merah yang tertangkap oleh detektor kemudian diubah menjadi spektrum oleh interferogram. Mekanisme kerja FTIR ini diperlihatkan pada **Gambar 3.10**.



Gambar 3.10 Skema Prinsip Kerja FTIR (Nurdiansah et al., 2019)

3.3.6 Pengujian *Cyclic Voltammetry*

Pengujian *Cyclic Voltammetry* digunakan untuk mengetahui nilai kapasitansi dari elektroda $\text{MnO}_2/\text{N-rGO}/\text{CNT}$. CV merupakan suatu metode elektroanalisis yang didasarkan pada prinsip elektrolisis dari suatu larutan yang mengandung analit elektroaktif dan reaksi terjadi pada elektroda logam dengan larutan elektrolitnya. Elektroda pada sel elektrokimia terdiri dari elektroda kerja, elektroda pembanding dan elektroda bantu. Pengujian ini akan menunjukkan plot respons arus terhadap tegangan yang diberikan pada elektroda kerja.

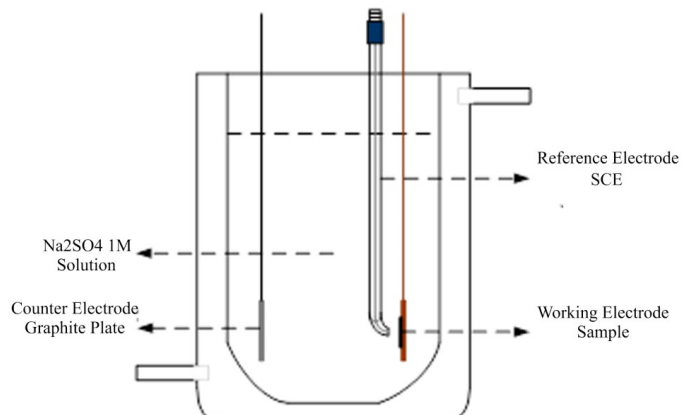
Untuk mengukur properti kapasitif, potensiostat akan digunakan untuk melakukan analisa CV. Pengukuran akan menggunakan rangkaian 3 elektroda yang terdiri dari elektroda kerja ($\text{MnO}_2/\text{N-rGO}/\text{CNT}$), elektroda referensi *saturated calomel electrode* (SCE) dan elektroda counter (Grafit) di dalam larutan Na_2SO_4 1 M. Variasi yang digunakan adalah rentang potential,.

. **Gambar 3.11** menunjukkan gambar alat potensiostat yang akan diperlukan untuk pengujian



Gambar 3.11 Alat Potensiostat *Cyclic Voltammetry*

Pada **Gambar 3.11** menunjukkan skema penyusunan set up 3 elektroda. Penyusunan sampel seperti ini disebut konfigurasi bidang parallel, Sampel berupa $MnO_2/N-rGO/CNT$ digunakan sebagai elektroda kerja yang dihadapkan pada elektroda referens SCE. Sedangkan kan untuk elektroda counter yang digunakan adalah grafit. Semua elektroda dicelupkan didalam larutan 1 M Na_2SO_4 . Alat potensiostat CS350 Electrochemical Workstation pada **Gambar 3.12** akan menghasilkan data dari respon material terhadap rentang tegangan yang diberikan berupa nilai arus terhadap tegangan.



Gambar 3.12 Skema *set-up* 3 Elektroda

Pada pengujian tersebut akan diperoleh hasil grafik cyclic voltammetry dan untuk mendapatkan nilai kapasitansi spesifik digunakan persamaan 3.5. Di samping itu, data dari CV menggambarkan sifat kapasitif elektrokimia dari elektroda kerjanya

$$C = \frac{\int Idv}{2\Delta E m v} \quad (3.2)$$

Dimana,

C = Kapasitansi Spesifik (F/gram)

$\int Idv$ = Luas area dibawah kurva CV

m = Massa Elektroda (gram)

v = Scan Rate (mV/s)

ΔE = Potential Window (Volt)

Dari hasil pengujian CV juga dapat diperoleh nilai Densitas Energi Spesifik (E) dan Densitas Daya Spesifik (P) dengan menggunakan Persamaan 3.6 dan Persamaan 3.7

$$E = \frac{(0.5)CV^2}{3.6} \quad (3.3)$$

$$P = \frac{E \times 3600}{t} \quad (3.4)$$

Dimana,

E = Densitas Energi (Wh/kg)

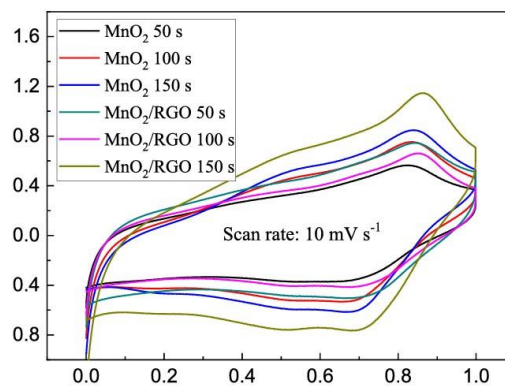
C = Kapasitansi (Farad/gram)

V = Potential Window (Volt)

P = Densitas Power (W/kg)

t = Waktu discharge (sekon)

Jika diplotkan antara nilai arus dan nilai tegangan maka akan dihasilkan kurva *cyclic voltammogram* seperti pada **Gambar 3.13** berikut.



Gambar 3.13 Grafik Pengujian Uji CV (Zhang et al., 2020)

3.3.7 Pengujian *Electrochemical Impedance Spectroscopy*

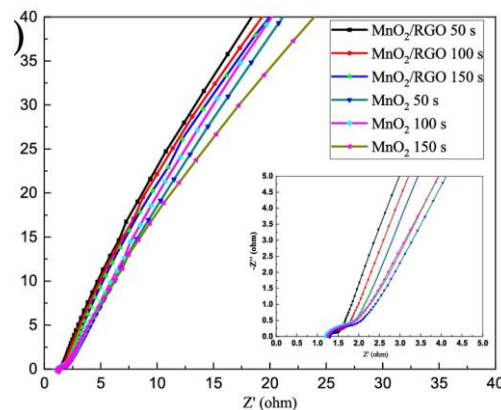
Pengujian EIS digunakan dalam mengamati interaksi elektron maupun ion yang berpindah pada komponen sel selama reaksi elektrokimia. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan arus *alternating current* (AC) untuk menemukan impedansi pada elektroda. Impedansi dianalisa untuk mendapatkan reaksi elektrokimia yang terjadi.

Metode ini berfungsi untuk menentukan parameter kinetik proses yang terjadi di elektroda, elektrolit, lapisan pasif, *charge transfer*. Salah satu parameter yang paling penting untuk melakukan pengujian ini pada reaksi elektroda adalah *charge transfer resistance* (R_{ct}). Jika R_{ct} besar, maka mengindikasikan sebuah reaksi elektrokimia yang lambat.

Pengujian EIS dilakukan menggunakan instrumen CS350 Potentiostat/Galvanostat dengan mengaplikasikan gelombang sinus dengan 10 mV dan pada *range* frekuensi 100 kHz – 0.01 Hz. Dengan langkah-langkah sebagai berikut

1. Seluruh rangkaian material berupa rangkaian tiga elektroda seperti halnya pengujian CV.
2. Kemudian dijepit dengan menggunakan mesin kompaksi, dan di tunggu selama ± 1 jam sebelum dilakukan uji EIS.
3. Rentang frekuensi yang digunakan dalam proses pengukuran diatur pada rentang (0.01 Hz - 100 kHz).
4. Alat potensiostat CS350 *Electrochemical Workstation* akan menghasilkan data dari respon material terhadap rentang frekuensi yang diberikan berupa nilai impedansi riil dan impedansi imajiner.

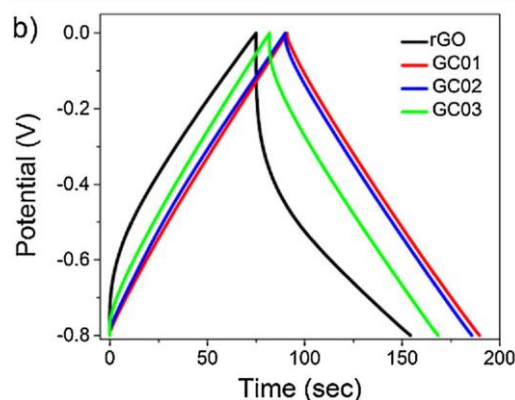
5. Jika diplotkan antara Z' dan Z'' maka akan dihasilkan kurva Nyquist seperti pada **Gambar 3.14** berikut.



Gambar 3.14 Kurva Nyquist (Zhang et al., 2020)

3.3.8 Pengujian Galvanostatic Charge/Discharge

Pengujian *Charge Discharge* digunakan untuk mengetahui kemampuan suatu material untuk menyimpan energi. Grafik *Charge Discharge* menampilkan hubungan potensial dan waktu seperti yang terlihat pada **Gambar 3.15** di bawah ini.



Gambar 3.15 Contoh Grafik Hasil Pengujian *Charge Discharge* (Zhou et al., 2021)

Alat yang digunakan untuk pengujian *Charge Discharge* adalah CS350 Potentiostat/Galvanostat, seperti yang digunakan pada pengujian CV. Nilai kapasitansi juga dapat diketahui dari hasil pengujian *Charge Discharge* dengan menggunakan rumus sebagai berikut.

$$C = \frac{I \times t}{m \times \Delta E} \quad (3.5)$$

Dimana :

- C : Kapasitansi (F/g)
- I : Arus (A)
- t : Waktu *discharge* (sekon)
- m : Massa aktif dari material elektroda (gram)
- ΔE : *Potential Window* (volt)

3.4 Rancangan Penelitian

Terdapat rancangan pengujian yang dibuat agar penelitian ini dapat mudah untuk dilakukan. Rancangan penelitian dibuat dalam tabel yang mendaftarkan tentang komposit yang

difabrikasi sendiri dan dilakukan pengujian. Rancangan penelitian dapat dilihat pada **Tabel 3.1** sebagai berikut

Tabel 3.1 Rancangan penelitian

No	Sampel	Pengujian XRD	Pengujian FTIR	Pengujian SEM	Pengujian CV	Pengujian EIS	Pengujian GCD
		Sesudah Sintesis	Sesudah Sintesis	Sesudah Sintesis	Sesudah Fabrikasi	Sesudah Fabrikasi	Sesudah Fabrikasi
1	rGO	√	√	√			
2	N-rGO	√	√	√			
3	K25	√	√	√			
4	K50	√	√	√			
5	K75	√	√	√			
6	EK25				√	√	√
7	EK50				√	√	√
8	EK75				√	√	√
9	EN-rGO				√	√	√
10	CNT				√	√	√
11	EMnO ₂				√	√	√

Keterangan:

rGO = *reduced Graphene Oxide*

N-rGO = *Nitrogen-doped rGO*

K25 = Komposit MnO₂/N-rGO/CNT dengan variasi CNT 25 mg

K50 = Komposit MnO₂/N-rGO/CNT dengan variasi CNT 50 mg

K75 = Komposit MnO₂/N-rGO/CNT dengan variasi CNT 75 mg

EK25 = Elektroda Superkapasitor *Hybrid* berbahan Komposit dengan variasi CNT 25 mg

EK50 = Elektroda Superkapasitor *Hybrid* berbahan Komposit dengan variasi CNT 50 mg

EK75 = Elektroda Superkapasitor *Hybrid* berbahan Komposit dengan variasi CNT 75 mg

EN-rGO = Elektroda Superkapasitor EDLC berbahan N-rGO

CNT = Elektroda Superkapasitor EDLC berbahan CNT

EMnO₂ = Elektroda Superkapasitor *Pseudo* berbahan MnO₂

3.5 Jadwal Penelitian

Penelitian dilakukan selama 9 minggu dengan pembagian waktu yang ditunjukkan pada Tabel 3.2.

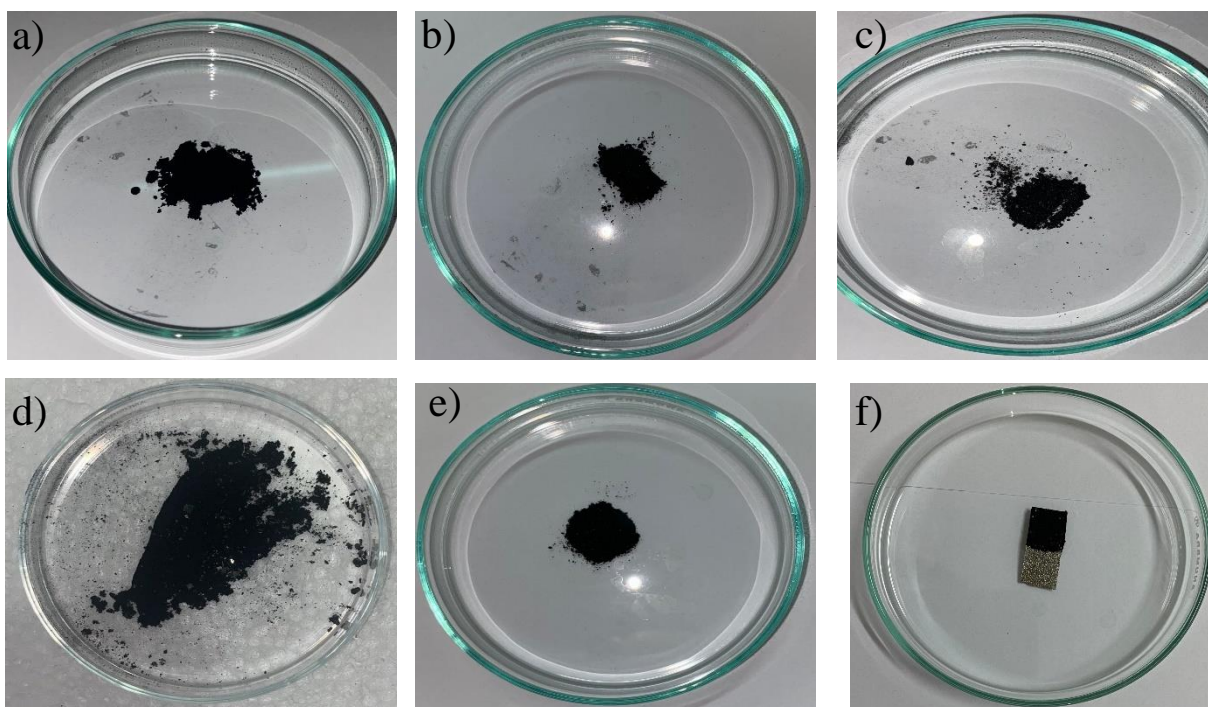
Tabel 3.2 Jadwal Penelitian

No	Kegiatan	November				Desember				Januari				Februari				Maret				April				Mei																			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4																
1	Studi literatur																																												
2	Asistensi kepada dosen pembimbing																																												
3	Penyusunan laporan																																												
4	Persiapan alat dan bahan																																												
5	Preparasi Komposit																																												
6	Pengujian SEM - EDX																																												
7	Pengujian XRD																																												
8	Pengujian FTIR																																												
9	Preparasi																																												

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengamatan Visual

Pada penelitian ini dilakukan pengamatan visual pada sampel untuk mengetahui bentuk pada masing-masing sampel. Pada **Gambar 4.1** berikut ini disajikan hasil pengamatan visual dari hasil sampel rGO, N-Doped rGO, CNT, komposit N-rGO/MnO₂/CNT, dan elektroda komposit yang tertera pada **Gambar 4.1**.

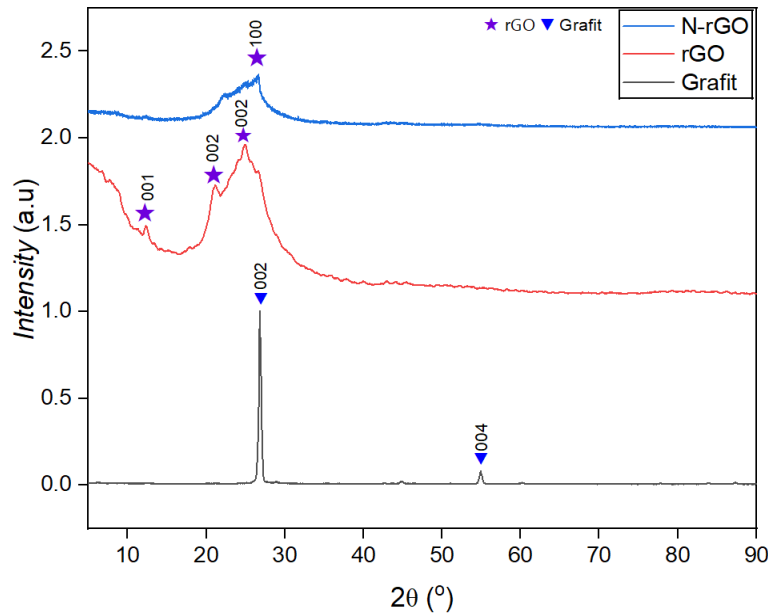


Gambar 4.1 Hasil pengamatan visual sampel a) CNT, b) rGO, c) N-rGO d) MnO₂ e) komposit N-rGO/MnO₂/CNT, f) elektroda

Hasil sintesis dari pembuatan sampel berupa serbuk, dikarenakan akan dilanjutkan dengan pengujian karakterisasi antara lain adalah XRD, FTIR dan SEM/EDX. Sementara untuk pengujian elektrokimia yaitu CV, EIS dan GCD, serbuk komposit akan dilarutkan dengan binder yang akan dioleskan pada batangan *nickel foam* yang memiliki porositas yang tinggi, sehingga larutan *slurry* akan dengan mudah memasuki pori-pori dari nikel.

4.2 Hasil Pengujian X-Ray Diffractometry (XRD)

Pengujian XRD bertujuan untuk menganalisis suatu unsur atau senyawa yang terkandung pada sampel hasil sintesis. **Gambar 4.2** berikut adalah hasil sintesis rGO yang berbahan dasar grafit menggunakan metode modifikasi Tour. Kemudian diuji dengan menggunakan alat XRD PANanalytical dengan range sudut 10° - 90°.



Gambar 4.2 Hasil Pengujian XRD Grafit, rGO, N-rGO

Pada **Gambar 4.2** bahwa terdapat perbedaan bentuk struktur kristal dari hasil XRD tersebut. Grafit merupakan material awal untuk pembuatan komposit memiliki puncak pada $2\theta=26.79^\circ$ dengan intensitas mencapai 33313 cts. Setelah melalui proses reduksi untuk pembuatan rGO, terdapat pergeseran dan perbedaan puncak yaitu pada puncak $2\theta=24.94^\circ$ dengan intensitas mencapai 149 cts. Puncak pada 2θ sekitar 21° dan 27° menunjukkan refleksi dari bidang (002) dalam struktur graphene, mencerminkan susunan lapisan karbon yang tersusun dalam bentuk heksagonal. Dari hasil tersebut dapat terlihat bahwa dengan puncak yang bergeser sedikit dan reduksinya menurunkan intensitas dari lebih dari 30.000 hingga mencapai hanya 149 cts. Pada material N-rGO terdapat puncak pada posisi $2\theta=26.66^\circ$ dengan intensitas 953 cts.

Pada hasil XRD juga didapatkan nilai dspacing yang menunjukkan jarak antar layer suatu material. Analisis terhadap dspacing dapat menggunakan Persamaan 4.1 berdasarkan hukum sebagai berikut

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

Dimana

d : dspacing (Å)

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

Berikut merupakan **Tabel 4.1** yang merupakan jarak antar layer (Å) dari Grafit, rGO, NrGO, CNT dan komposit.

Tabel 4.1 Jarak antar layer (Å) dari Grafit, rGO, N-rGO, MnO CNT dan komposit

No	Material	Puncak (°)	d _{spacing} (Å)
1	Grafit	26.79	3.326
2	rGO	24.94	3.56
3	N-rGO	26.66	3.345
4	MnO ₂	26.58	3.35
5	CNT	26.15	3.35
6	Komposit	36.27	2.47

Analisis terhadap ukuran kristal juga dapat dilakukan dengan menghitung menggunakan persamaan Scherrer seperti pada Persamaan 4.2 berikut

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

Dimana

D : Ukuran Kristal

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

β : FWHM (rad)

K : konstanta *Scherrer* dengan nilai 0.9

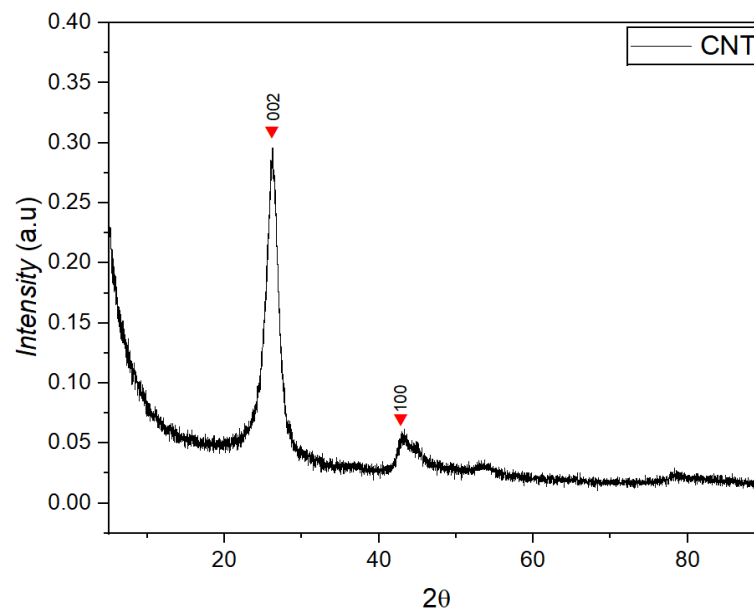
Berikut juga **Tabel 4.2** yang merupakan hasil perhitungan ukuran kristal dari sampel grafit, rGO, N-rGO dan komposit.

Tabel 4.2 Tabel ukuran kristal sampel Grafit, rGO, CNT dan N-rGO

No	Material	Puncak (°)	Ukuran Kristal (nm)
1	Grafit	26.79	54.2269
2	rGO	24.94	15.1996
3	N-rGO	26.66	48.8009

Nilai ukuran kristal tertinggi terdapat pada grafit yang memiliki ukuran 54.22 nm, sementara ukuran kristal terkecil terdapat pada rGO

Pada proses pembuatan *hybrid* superkapasitor, MnO₂ digunakan sebagai oksida logam yang akan digunakan sebagai *pseudocapacitor*, N-rGO sebagai EDLC nya dan CNT sebagai material tambahan untuk meningkatkan nilai kapasitansinya. Berikut adalah hasil pengujian XRD material CNT pada **Gambar 4.3**.

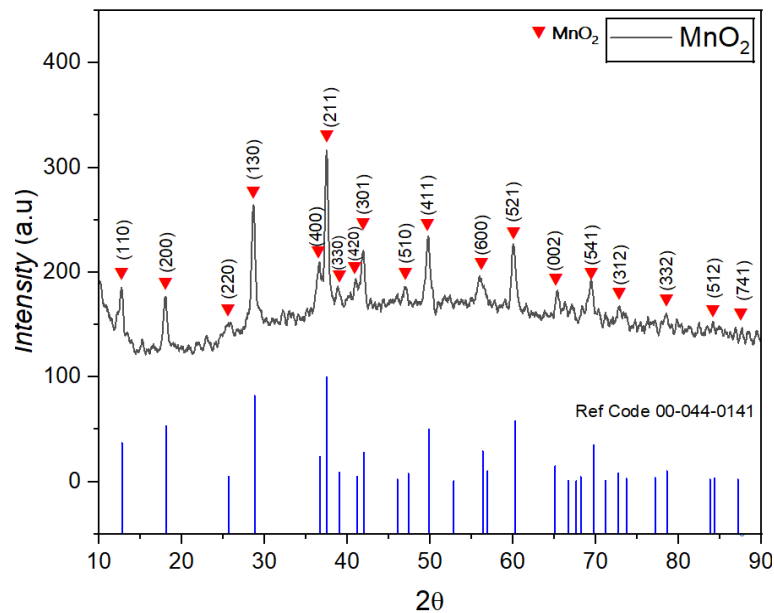


Gambar 4.3 Hasil Pengujian XRD CNT

Terdapat penambahan material pada pembuatan komposit ini, yaitu CNT dengan puncak difraksi pada posisi 2θ , 26.15° ; 26.55° ; 42.86° , untuk mengetahui pola dari difraksi MWCNT adalah pada puncak $2\theta = 26^\circ$ dan puncak lain 43° . Pada puncak 26° menunjukkan refleksi dari struktur grafit *hexagonal* (0 0 2), sedangkan pada puncak 43° menunjukkan refleksi dari grafit planar (1 0 0) (Xin He, 2020). Adanya pergeseran diakibatkan karena munculnya pengotor dalam CNT. Dari terbentuknya XRD digunakan untuk mengetahui pola difraksi dari sintesis CNT, terbentuk Kristal atau amorf. Dengan intensitas 1004 cts dapat disimpulkan bahwa fasa dari CNT adalah kristalin, selanjutnya di **Tabel 4.5** adalah sebaran puncak dan hasil perhitungan ukuran kristal dari material CNT.

Tabel 4.3 Tabel ukuran kristal sampel CNT

No	Material	Puncak ($^\circ$)	Ukuran Kristal (nm)
1	CNT	26.15	12.189
2		26.55	20.329
3		42.86	7.0859



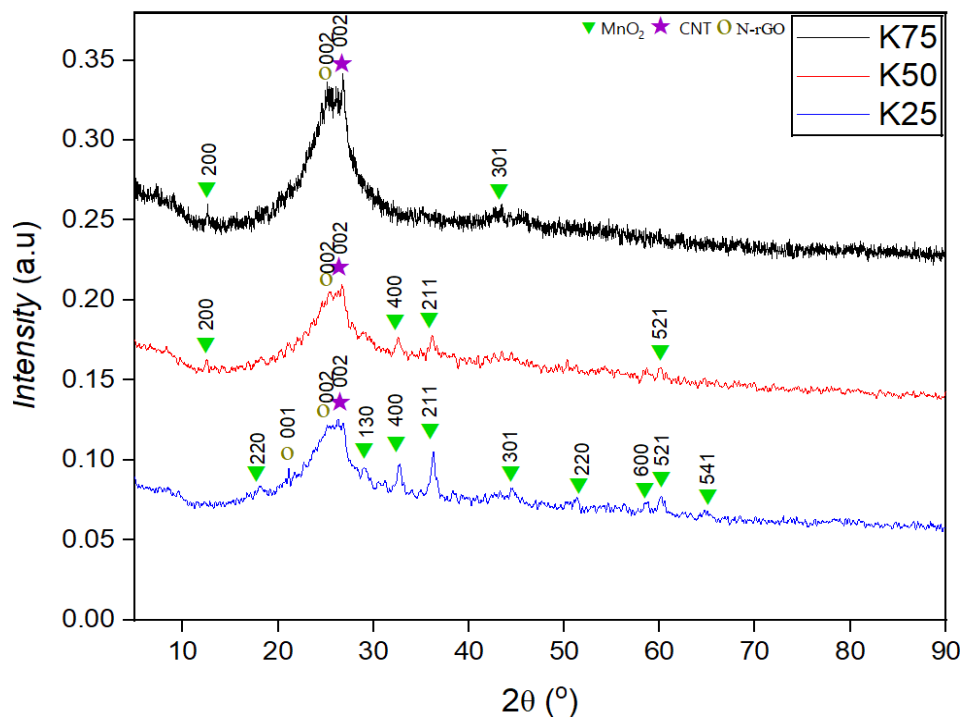
Gambar 4.4 Hasil Pengujian XRD MnO_2

Seperti yang terlihat dalam **Gambar 4.4**, sampel logam oksida MnO_2 memiliki puncak yang merupakan puncak dari hollandite dan didapatkan kesesuaian dengan (ICDD No 00-044-0141) dengan fasa yang terbentuk, hollandite (α - MnO_2). Pada **Tabel 4.4** berikut disajikan data hasil XRD dari sampel MnO_2 .

Tabel 4.4 Tabel ukuran kristal sampel MnO_2

No	Material	Peaks ($^\circ$)	Ukuran Kristal
1	MnO_2	12.784	29.873
2		18.108	20.033
3		25.712	10.146
4		28.842	20.422
5		36.697	31.277
6		37.523	41.804

7		38.855	17.205
8		41.025	21.162
9		41.846	138.972
10		47.008	13.270
11		49.708	32.717
12		55.982	55.126
13		60.086	18.744
14		69.443	39.482
15		72.872	161.349
16		78.472	62.847
17		84.163	65.587
18		87.683	89.987



Gambar 4.5 Hasil Pengujian XRD Variasi Komposit

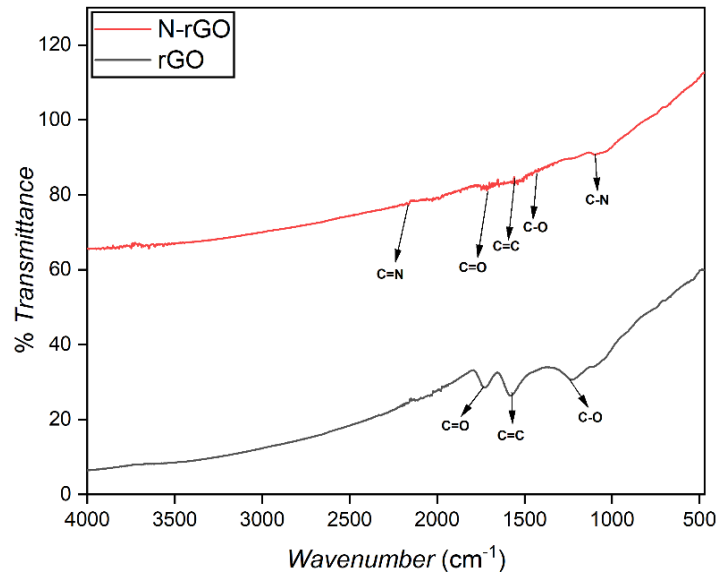
Hasil pengujian XRD dari ketiga sampel komposit pada **Gambar 4.4** menunjukkan kemiripan dengan XRD dari oksida metal MnO_2 sehingga dapat disimpulkan bahwa ketiga komposit tersebut memiliki MnO_2 dan berhasil tersintesis. Tiga sampel tersebut juga memiliki puncak yang mirip N-rGO seperti yang terlihat pada puncak bertanda lingkaran di sekitar puncak $2\theta=24^\circ-25^\circ$. Serta adanya *peak* dari material CNT yang bertanda bintang. Dengan ini dapat disimpulkan komposit yang terbentuk sebagai suatu kesatuan $MnO_2/N-rGO/CNT$. Kemudian untuk hasil komposit berikut dapat dianalisa dalam bentuk masing-masing fasa yang ada pada komposit tersebut. Terdapat *trend* dimana semakin semakin bertambahnya penambahan massa CNT, maka puncak fasa MnO_2 semakin tidak terlihat. Hal ini disebabkan karena ukuran kristal dari CNT dan N-rGO lebih besar dari MnO_2 . Hasil fasa dan perhitungan ukuran kristal pada **Tabel 4.6** berikut.

Tabel 4.5 Tabel ukuran kristal sampel Komposit

Material	Fasa	Puncak (°)	Ukuran Kristal (nm)
K25	N-rGO	21.12	48.304
		25.18	10.138
	MnO ₂	18.15	12.02
		29.08	20.441
		32.73	24.57
		36.27	31.239
		38.43	20.59
		44.56	16.03
		51.29	21.94
		58.59	21.94
		60.10	17.017
CNT	17.14	17.14	
K50	N-rGO	24.98	7.600
	MnO ₂	12.54	39.821
		32.593	15.462
		36.111	15.609
		40.943	42.251
		58.648	17.021
		60.041	22.852
	CNT	26.719	30.512
K75	N-rGO	25.19	20.2744
	MnO ₂	12.5438	19.9056
		43.0497	7.9767
CNT	26.858	30.521	

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

Pengujian *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) dilakukan untuk menganalisis gugus fungsi yang terbentuk selama proses sintesis dengan menggunakan alat Nicolet I S10, dengan menggunakan panjang gelombang antara 500-4000 cm⁻¹. Pengujian ini dilakukan pada sampel rGO, N-rGO, MnO₂, CNT dan komposit. Berikut pada **Gambar 4.5** merupakan hasil uji dari sampel rGO dan N-rGO.



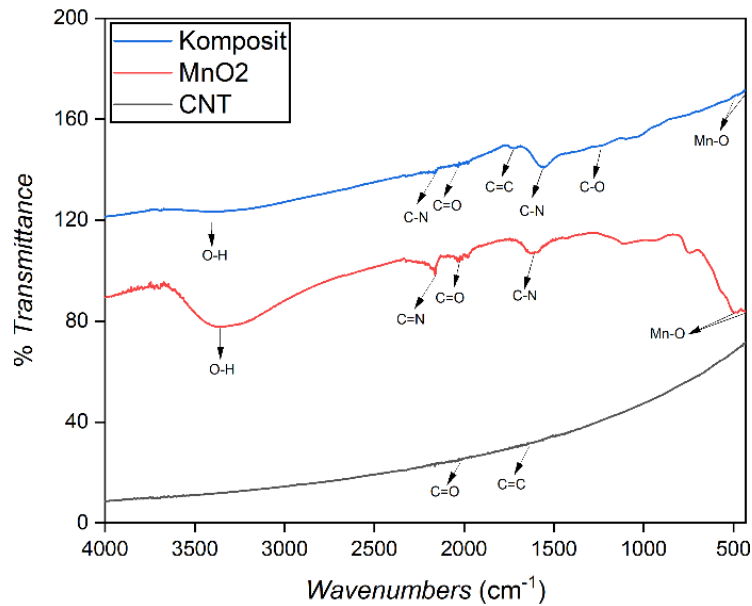
Gambar 4.6 Hasil Pengujian FTIR Grafit, rGO dan N-rGO

Pada hasil FTIR dari sampel rGO ditunjukkan adanya puncak *wavenumber* 1224.98cm^{-1} , yang merupakan gugus fungsi milik C-O, pada puncak *wavenumbers* 1575.35cm^{-1} dan juga munculnya peak pada *wavenumbers* 1731.15cm^{-1} yang merupakan gugus fungsi C=O. Puncak-puncak tersebut dapat disimpulkan bahwa sintesis rGO berhasil (Emiru *et al.*, 2017). Gugus fungsi C-O, C=O merupakan hasil dari proses oksidasi pada saat proses pembentukan grafit oksida, sehingga adanya ikatan tersebut menunjukkan proses reduksi grafit oksida belum terjadi secara seluruhnya. beberapa puncak tambahan setelah melalui proses doping NH_4OH masing-masing sebesar 4 ml, menggunakan proses hidrotermal di dalam oven pada temperatur 200°C selama 3 jam, selain itu hasil pengujian FTIR dari N-rGO dapat ditunjukkan dari munculnya *peak* pada *wavenumbers* 1091.66cm^{-1} yaitu C-N, gugus fungsi C-O, *wavenumbers* 1425.75cm^{-1} , gugus fungsi C=C, *wavenumbers* 1558.30cm^{-1} , gugus fungsi C=O, *wavenumbers* 1711.77cm^{-1} , dan gugus fungsi C=N, *wavenumbers* 2170.6cm^{-1} . Adanya ikatan antara C-N, C=N menunjukkan pendopingan menggunakan nitrogen berhasil dilakukan. Berikut pada **Tabel 4.7** ini disajikan hasil dari pengujian FTIR rGO dan N-rGO.

Tabel 4.6 Hasil Pengujian FTIR rGO dan N-rGO

Material	<i>Wavenumbers</i> (cm^{-1})	Gugus Fungsi
rGO	1224.98	C-O
	1575.35	C=C
	1731.15	C=O
N-rGO	1091.66	C-N
	1425.75	C-O
	1558.30	C=C
	1711.77	C=O
	2170.66	C=N

Pengujian FTIR selanjutnya adalah untuk *metal oxide* MnO_2 . Pada **Gambar 4.6** dibawah ini merupakan hasil sintesis MnO_2 dengan menggunakan proses hidrotermal dari KMnO_4 dan asam asetat, CH_3COOH , selama 12 jam pada temperatur 60°C dan juga material tambahan yaitu CNT yang digunakan untuk pembuatan komposit.



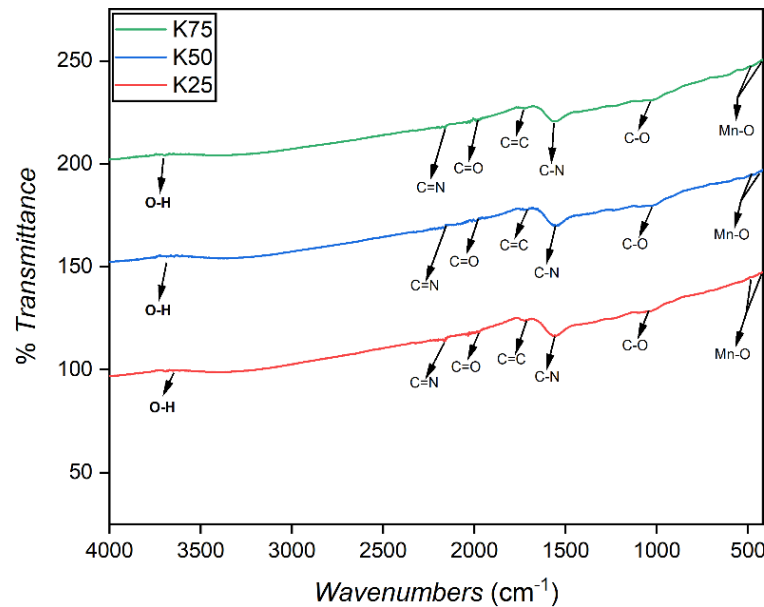
Gambar 4.7 Hasil Pengujian FTIR CNT, MnO₂ dan Komposit

Pada hasil pengujian FTIR CNT yang terlihat pada **Gambar 4.7** terdapat 2 gugus fungsi di *wavenumbers* 1703.88 cm⁻¹ dan 2020.58 cm⁻¹ yaitu gugus fungsi C=C *stretching* dan juga C=O *stretching vibrations* yang mana adanya ikatan karboknil pada struktur grafit CNT. Selain itu pada material MnO₂ dari hasil pengujian tersebut dapat dilihat bahwa ada 2 puncak yang menunjukkan gugus fungsi Mn-O pada 430 cm⁻¹, dan 498,98 cm⁻¹. Dengan ini dapat disimpulkan bahwa proses sintesis dari MnO₂ berhasil, namun terdapat beberapa gugus pengotor yaitu gugus O-H yang tersisa karena proses sintesis yang tidak sempurna antara *potassium permanganate* (KMnO₄) dan asam asetat (CH₃COOH). Ada juga C-N, C=N pada 1592.05 cm⁻¹ dan 2158.55 cm⁻¹ diidentifikasi terkandungnya nitrogen di dalam material. Munculnya peak pada rentang tersebut dan juga gugus fungsinya sangat umum terjadi di ikatan antara metal dengan oksigen. (Manikandan, 2022)

Tabel 4.7 Hasil Pengujian FTIR MnO₂, CNT, Komposit

Material	Wavenumbers (cm ⁻¹)	Gugus Fungsi
CNT	1703.88	C=C
	2020.58	C=O
MnO ₂	430	Mn-O
	498,98	
	1592.05	C-N
	2032.34	C=O
	2158.55	C=N
Komposit	3303.08	O-H
	433.14	Mn-O
	477.03	
	1229.6	C-O
	1561.2	C-N
	1717.2	C=C
2029.29	C=O	
	2164.82	C=N

Selanjutnya juga dilakukan pengujian FTIR pada sampel komposit MnO₂/N-rGO/CNT. Pada **Gambar 4.8** berikut hasil pengujian FTIR pada sampel K25, K50, dan K75. Terdapat juga **Tabel 4.8** menyajikan *wavenumbers* pada hasil FTIR komposit dan juga gugus fungsinya yang terdapat gugus fungsi dari MnO₂, N-rGO dan CNT.



Gambar 4.8 Hasil Pengujian FTIR K25, K50 dan K75

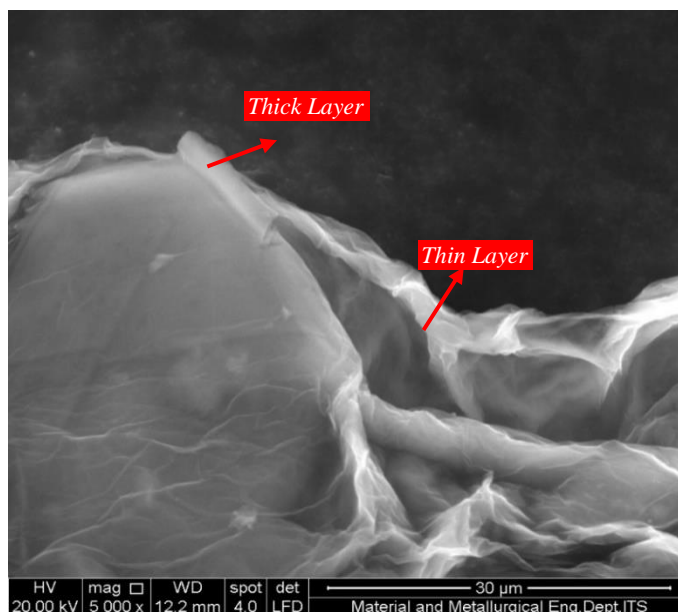
Dari hasil pengujian FTIR variasi komposit dapat dilihat bahwa ada dua puncak yang menunjukkan gugus fungsi Mn-O pada 427.075 cm⁻¹, dan 482.13 cm⁻¹. Dengan ini dapat disimpulkan bahwa terdapat MnO₂ pada komposit. Kemudian terdapat gugus C-N dan C=N pada puncak 1554.37 cm⁻¹, dan 2161.26 cm⁻¹ dengan ini menunjukkan terdapat N-rGO pada komposit. Kemudian untuk gugus lainnya yang menunjukkan C-O, C=O, dan C=C terdapat pada *range* 1000-2000 cm⁻¹. Namun terdapat beberapa gugus pengotor yaitu gugus O-H pada puncak 2919,69 cm⁻¹ yang tersisa karena selama proses sintesis yang tidak sempurna. Hal yang serupa juga dapat dianalisa pada variasi komposit yang lain.

Tabel 4.8 Hasil Pengujian FTIR K25, K50 dan K75

Material	Wavenumbers (cm ⁻¹)	Gugus Fungsi
K25	427.075	Mn-O
	482.13	
	1016.66	C-O
	1554.37	C-N
	1727.32	C=C
	1982.81	C=O
	2161.26	C=N
3694.98	O-H	
K50	442.79	Mn-O
	489.17	
	1027.67	C-O
	1548.87	C-N
	1706.88	C=C
	1985.95	C=O
	2156.54	C=N
3690.26	O-H	
K75	420.78	Mn-O
	484	
	1031.60	C-O
	1559.09	C-N
	1724.96	C=C
	1979.66	C=O
	2160.47	C=N
3695.77	O-H	

4.4 Hasil Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)

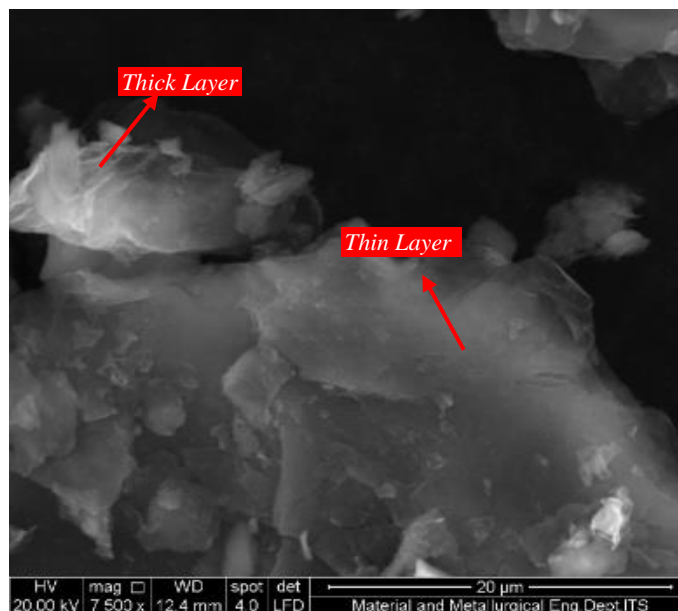
Pengujian *Scanning Electron Microscope* dilakukan pada sampel CNT, rGO, N-rGO, MnO₂, Komposit, dan Elektroda. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui bentuk morfologi dari permukaan sampel. **Gambar 4.9** berikut ini merupakan hasil pengujian SEM dari sampel rGO.



Gambar 4.9 Hasil uji SEM sampel rGO perbesaran 5000x

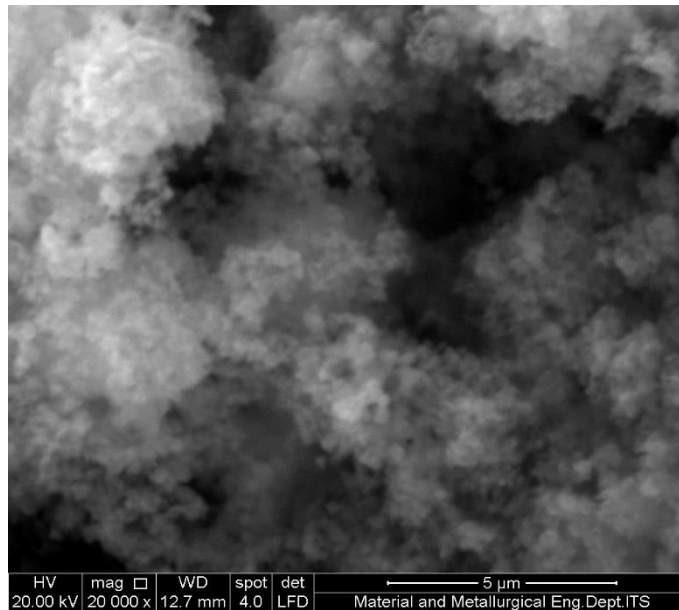
Pada **Gambar 4.9** Pada sampel rGO memiliki struktur morfologi berupa lembaran-lembaran. Lembaran-lembaran ini menunjukkan adanya oksidasi dari material grafit menjadi GO, yang mana renggangan tersebut membentuk lembaran-lembaran tipis, lalu GO direduksi menjadi rGO yang mana hal tersebut juga direnggangkan kembali dari hasil lembaran GO.

Pada **Gambar 4.9** tersebut terlihat ada *thick layer* dan *thin layer* yang menandakan bahwa ada sedikit rGO yang tertumpuk maupun ada beberapa yang masih berupa GO. Hal ini dapat terjadi ketika ada proses reduksi yang tidak sempurna pada proses sintesis, dikarenakan rendahnya energi karena temperatur yang rendah maupun prekursor reduktor yang telah terpakai secara tidak efisien (Sari & Ting, 2015). Namun proses sintesis selanjutnya dapat mereduksi kembali lapisan rGO sehingga didapatkan lapisan yang lebih tipis lagi atau menjadi seperti *thin layer* secara homogen pada gambar tersebut. Selanjutnya yaitu hasil pengujian SEM dari sampel N-rGO seperti pada **Gambar 4.10** berikut.



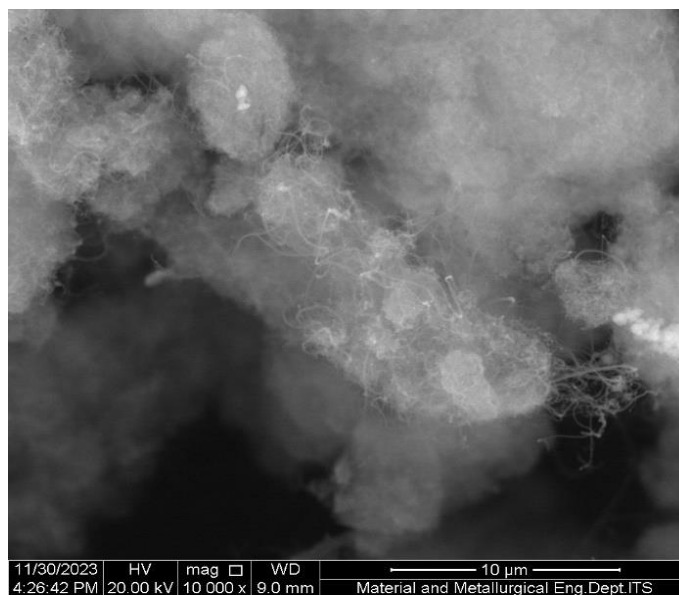
Gambar 4.10 Hasil uji Sampel NrGO a) perbesaran 7500x

Pada hasil uji SEM dari N-rGO setelah dilakukan proses doping nitrogen sebanyak 4ml NH_4OH dengan perbesaran 7500x, dapat terlihat bahwa tidak terdapat perubahan yang signifikan dan memiliki hasil uji SEM yang hampir sama antara rGO dan N-rGO. pada gambar tersebut menunjukkan adanya lembaran-lembaran tipis yang terlihat lebih transparan jika dibandingkan dengan lembaran tipis sampel rGO, hal itu disebabkan metode yang digunakan dalam melakukan doping yaitu dengan hidrotermal yang mana juga menjadi reduktor untuk mereduksi rGO. dan menjelaskan bahwa proses doping nitrogen pada rGO telah berhasil dilakukan.



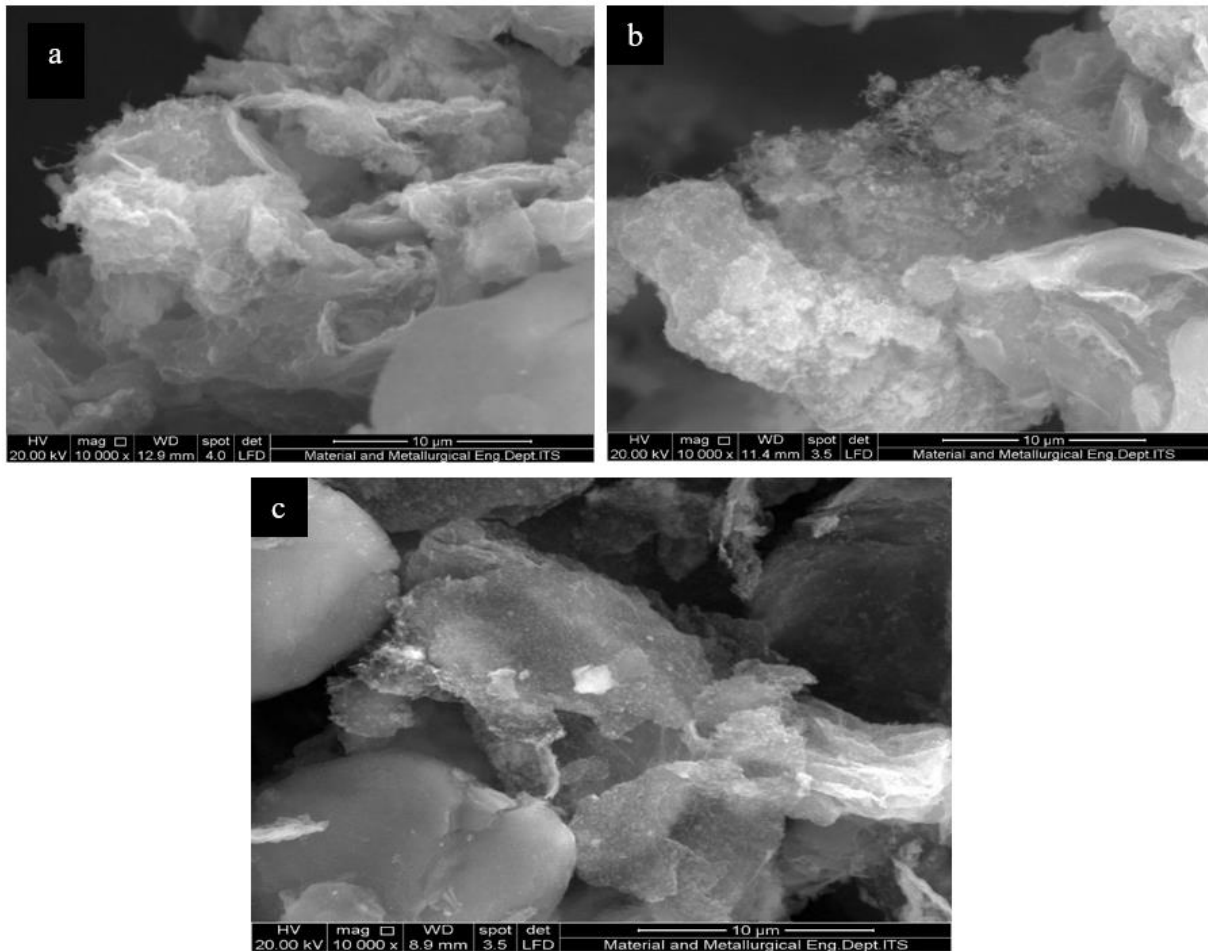
Gambar 4.11 Hasil uji Sampel MnO₂ perbesaran 20000x

Hasil uji SEM sampel MnO₂ menunjukkan morfologi berbentuk gumpalan pada perbesaran 20000x dari MnO₂ yang terbentuk pada proses sintesis. Hal ini terbentuk pada saat proses reduksi yang tidak terkontrol, seperti kecepatan pengadukan atau suhu, dapat menyebabkan partikel MnO₂ berkumpul dan membentuk gumpalan, selain itu juga pengeringan dilakukan terlalu cepat atau tidak merata, partikel dapat terjebak dalam posisi yang menyebabkan pembentukan gumpalan. Selanjutnya yaitu sintesis sampel CNT, dan hasil morfologi yang telah diuji SEM seperti pada **Gambar 4.12** berikut.



Gambar 4.12 Hasil uji Sampel CNT perbesaran 20000x

Dari gambar tersebut dapat terlihat bahwa morfologi dari material CNT merupakan kumpulan dari *nanowires* yang sangat panjang, hal ini disebabkan pada saat proses sintesis menggunakan temperatur yang sangat tinggi dan waktu reaksi yang cukup panjang, sehingga membentuk *nanowires* yang tidak teratur dan sangat panjang.

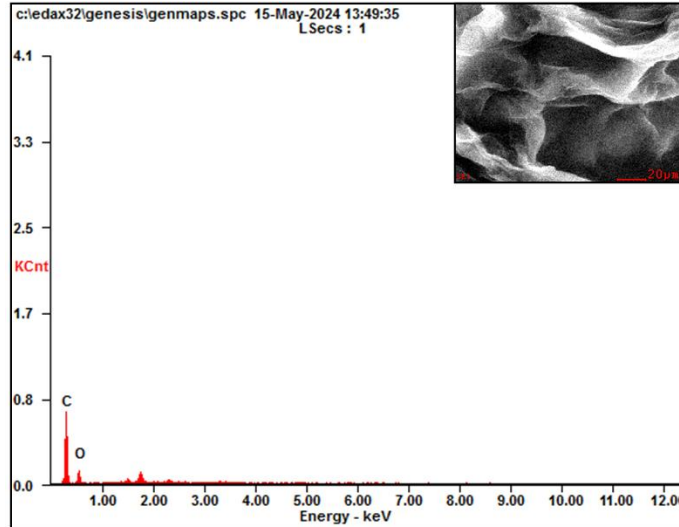


Gambar 4.13 Hasil Uji Sampel variasi komposit a) K75, b) K50, dan c) K25 perbesaran 10000x

Pada ketiga gambar tersebut dapat terlihat morfologi masing-masing material yang menunjukkan benar terbentuknya N-rGO yang ditunjukkan dengan thin layer serta MnO_2 yang ditunjukkan dengan gumpalan, serta morfologi *nanowires* dari material CNT yang terlihat jelas pada gambar. Terdapat tren dimana dari variasi penambahan massa CNT terkecil hingga terbesar, semakin banyak penambahan massa CNT, maka semakin banyak morfologi CNT yang muncul pada gambar hasil pengujian. Dan dapat disimpulkan bahwa, variasi sampel komposit menunjukkan pengkompositan berhasil dengan komposisi dari N-rGO/ MnO_2 /CNT.

4.5 Hasil Pengujian *Energy Dispersive X-ray* (EDX)

Pengujian EDX dilakukan agar dapat mengetahui jenis dan seberapa besar jumlah unsur penyusun dari suatu sampel. Pada Gambar 4.16 berikut adalah merupakan hasil uji EDX dari rGO, dan Tabel 4.11 merupakan tabel persentasi unsur hasil pengujian sampel

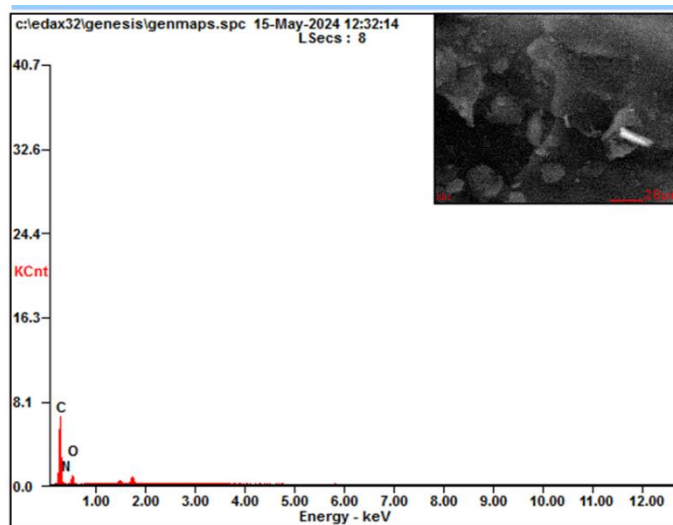


Gambar 4.14 Hasil Pengujian EDX rGO

Tabel 4.9 Unsur Komposisi EDX rGO

Material	Elemen	Wt %	At %
rGO	CK	63.05	69.45
	OK	36.95	30.55

Dari hasil pengujian EDX rGO dapat diketahui bahwa terdapat kandungan C sebesar 63.05% dan kandungan O sebesar 36.95%. Dan selanjutnya adalah hasil EDX dari N-rGO pada gambar dan tabel berikut.

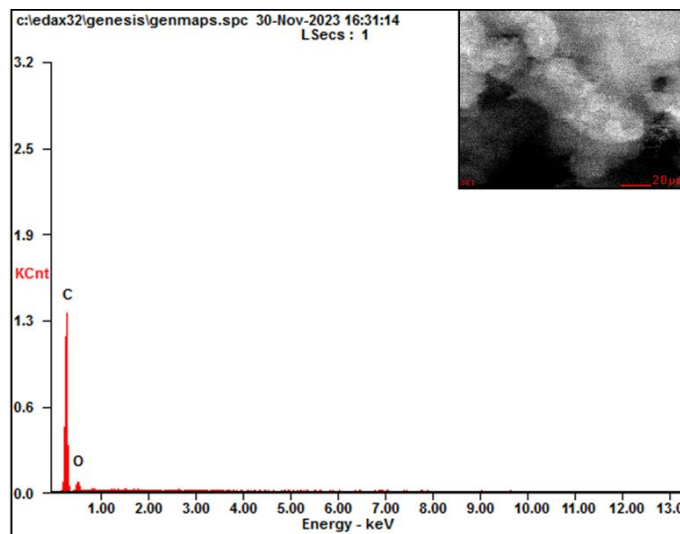


Gambar 4.15 Hasil Pengujian EDX N-rGO

Tabel 4.10 Unsur Komposisi EDX N-rGO

Material	Elemen	Wt %	At %
N-rGO	CK	62.73	68.88
	NK	03.42	03.22
	OK	33.85	27.90

Dari **Gambar 4.17** dan **Tabel 4.10** hasil pengujian EDX N-rGO dapat diketahui bahwa terdapat kandungan C sebesar 62.73%, kandungan O sebesar 33.85% dan kandungan N sebesar 3.42%. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa proses doping terjadi dengan sukses dengan adanya keberadaan nitrogen pada komposisi sampel. Selanjutnya adalah hasil EDX dari CNT pada gambar dan tabel berikut.

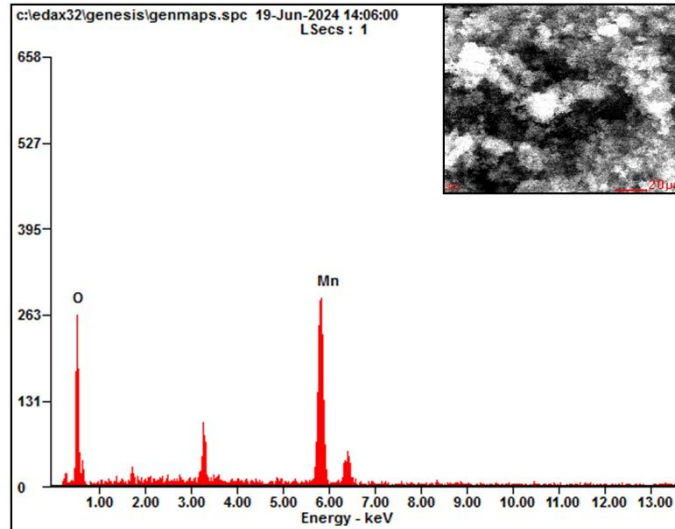


Gambar 4.16 Gambar Hasil Pengujian EDX CNT

Tabel 4.11 Unsur Komposisi EDX CNT

Material	Elemen	Wt %	At %
CNT	CK	75.83	80.69
	OK	24.17	19.31

Dari hasil pengujian EDX CNT dapat diketahui bahwa terdapat kandungan C sebesar 75.83% dan kandungan O sebesar 24.17%. Dan selanjutnya adalah hasil EDX dari MnO₂ pada gambar dan tabel berikut.

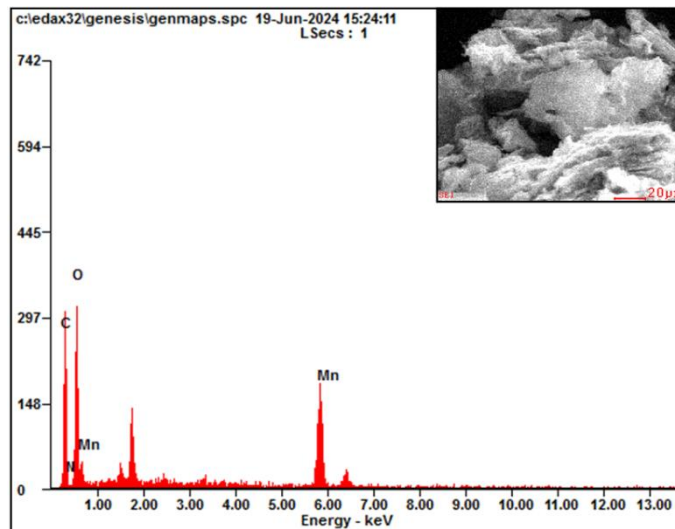


Gambar 4.17 Hasil Pengujian EDX MnO₂

Tabel 4.12 Unsur Komposisi EDX MnO₂

Material	Elemen	Wt%	At%
MnO ₂	OK	21.50	48.46
	MnK	78.50	51.54

Dari **Gambar 4.19** dan **Tabel 4.12** hasil pengujian EDX MnO₂ dapat diketahui bahwa terdapat kandungan O sebesar 21.5% dan kandungan Mn sebesar 78.5%. selain itu pada hasil pengujian EDX terdapat puncak tambahan yang menandakan adanya impurities dari unsur K, *impurity* tersebut muncul dikarenakan pada saat proses sintesis menggunakan KMnO₄, selama proses hidrotermal, kalium tidak dapat sepenuhnya terlarut atau terintegrasi ke dalam struktur MnO₂. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa proses sintesis terjadi dengan sukses dengan adanya keberadaan mangan dan oksigen pada komposisi sampel.

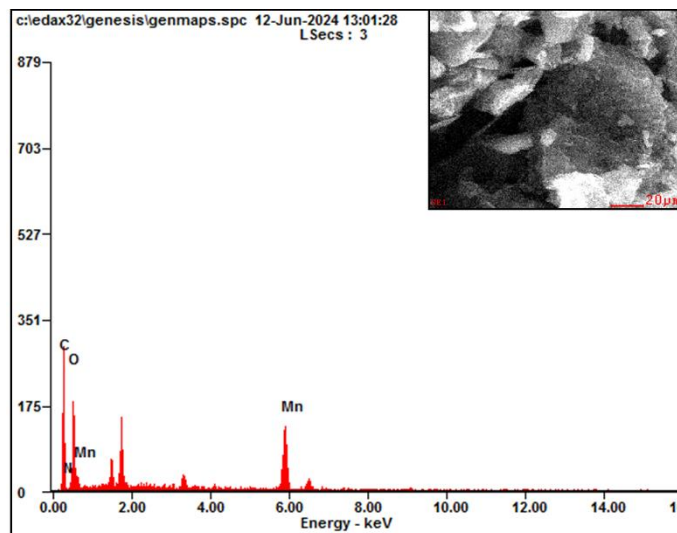


Gambar 4.18 Hasil Pengujian EDX K₂₅

Tabel 4.13 Unsur Komposisi EDX K₂₅

Material	Elemen	Wt %	At %
K25	CK	28.18	44.15
	NK	00.93	01.25
	OK	36.37	42.77
	MnK	34.52	11.83

Dari **Gambar 4.20** dan **Tabel 4.13** hasil pengujian EDX K25 dapat diketahui bahwa terdapat kandungan C sebesar 28.18%, kandungan N sebesar 0.93%, kandungan O sebesar 36.37% dan kandungan Mn sebesar 34.52%. selain itu pada hasil pengujian EDX terdapat puncak tambahan yang menandakan adanya impurities dari unsur K, *impurity* tersebut muncul dikarenakan pada saat proses sintesis menggunakan KMnO_4 , selama proses hidrotermal, kalium tidak dapat sepenuhnya terlarut atau terintegrasi ke dalam struktur MnO_2 . Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa proses sintesis terjadi dengan sukses dengan adanya keberadaan semua unsur yang membentuk NrGO , MnO_2 , dan CNT.

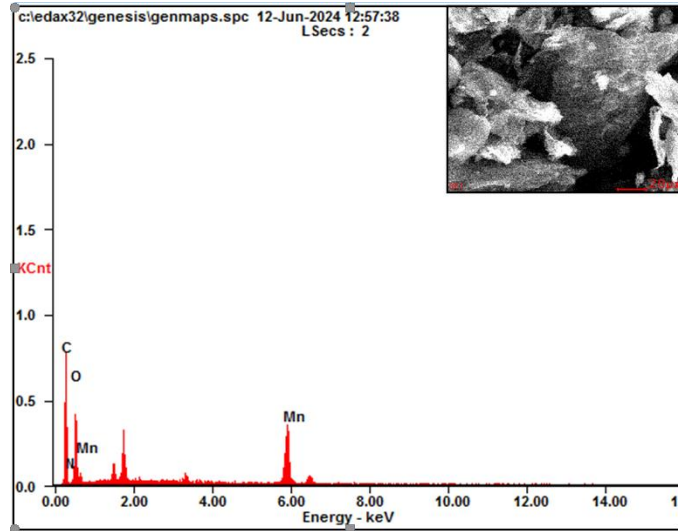


Gambar 4.19 Hasil Pengujian EDX K50

Tabel 4.14 Unsur Komposisi EDX K50

Material	Elemen	Wt %	At %
K50	CK	31.18	48.71
	NK	01.92	02.58
	OK	31.12	36.49
	MnK	35.78	12.22

Dari **Gambar 4.21** dan **Tabel 4.14** hasil pengujian EDX K50 dapat diketahui bahwa terdapat kandungan C sebesar 31.18%, kandungan N sebesar 1.92%, kandungan O sebesar 31.12%, dan kandungan Mn sebesar 35.78%. selain itu pada hasil pengujian EDX terdapat puncak tambahan yang menandakan adanya impurities dari unsur K, *impurity* tersebut muncul dikarenakan pada saat proses sintesis menggunakan KMnO_4 , selama proses hidrotermal, kalium tidak dapat sepenuhnya terlarut atau terintegrasi ke dalam struktur MnO_2 . Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa proses sintesis terjadi dengan sukses dengan adanya keberadaan semua unsur yang membentuk NrGO , MnO_2 , dan CNT.



Gambar 4.20 Hasil Pengujian EDX K75

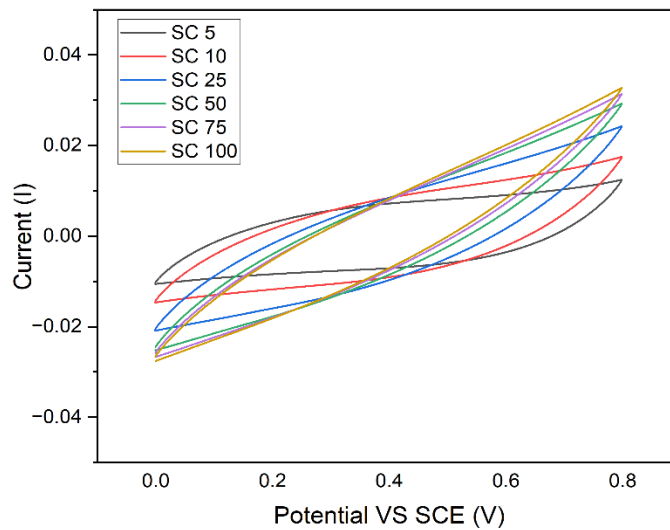
Tabel 4.15 Unsur Komposisi EDX K75

Material	Elemen	Wt %	At %
K75	CK	34.39	52.59
	NK	01.25	01.64
	OK	29.79	34.20
	MnK	34.58	11.56

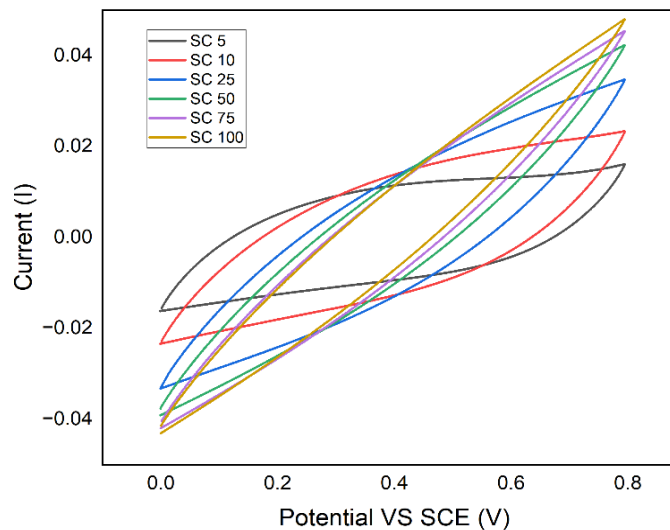
Dari **Gambar 4.22** dan **Tabel 4.15** hasil pengujian EDX K75 dapat diketahui bahwa terdapat kandungan C sebesar 34.39%, kandungan N sebesar 1.25%, kandungan O sebesar 29.79%, dan kandungan Mn sebesar 34.58%. selain itu pada hasil pengujian EDX terdapat puncak tambahan yang menandakan adanya impurities dari unsur K, *impurity* tersebut muncul dikarenakan pada saat proses sintesis menggunakan KMnO_4 , selama proses hidrotermal, kalium tidak dapat sepenuhnya terlarut atau terintegrasi ke dalam struktur MnO_2 . Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa proses sintesis terjadi dengan sukses dengan adanya keberadaan semua unsur yang membentuk NrGO , MnO_2 , dan CNT. Dan hasil pengujian EDX. Secara keseluruhan terdapat sebuah *trend* kenaikan pada setiap variasi penambahan massa CNT yang dilakukan selama proses sintesis.

4.6 Hasil Pengujian *Cyclic Voltammetry*

Pengujian yang selanjutnya adalah *Cyclic Voltammetry* (CV). Pengujian ini bertujuan untuk mengukur nilai kapasitansi spesifik dari hasil elektroda yang telah dibuat pada penelitian ini. Pada pengujian CV ini menggunakan metode tiga elektroda, yaitu counter electrode berupa grafit, elektroda referensinya menggunakan SCE, dan untuk working electrode menggunakan sampel elektroda rGO, N-rGO, MnO_2 , CNT, dan variasi komposit berupa penambahan CNT dengan variasi 25 mg, 50 mg, dan 75 mg yang mana di depositkan pada *nickel foam*. Parameter rentang potensialnya menggunakan 0-0.8 V, dan scan rate yang diperlukan adalah 5 mV/s, 10 mV/s, 25 mV/s, 50 mV/s, 75 mV/s, dan 100 mV/s, untuk larutan elektrolitnya menggunakan Na_2SO_4 1 M. Pada grafik ada bentuk bukit atau hump yang merupakan indicator terjadinya reaksi redoks atau efek dari pseudocapacitance. Kemudian dari bentuk yang menyerupai persegi menunjukkan pembentukan double layer capacitor. Berikut adalah hasil pengujian dari material penelitian.

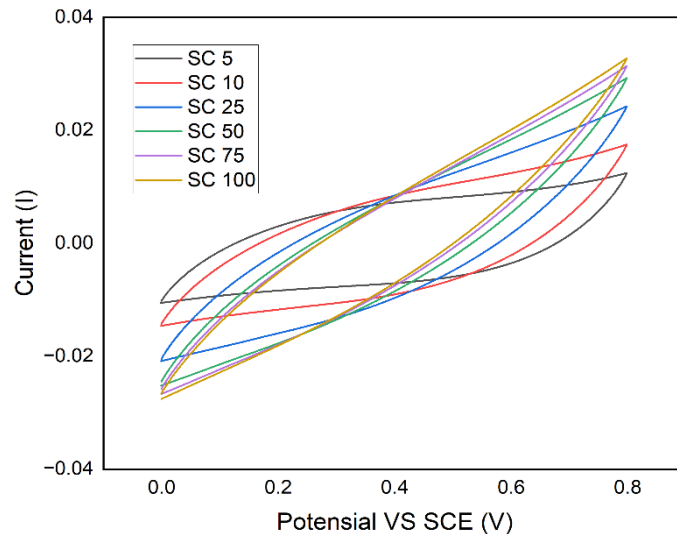


Gambar 4.21 Hasil Pengujian CV *current vs potensial* rGO



Gambar 4.22 Hasil Pengujian CV *current vs potensial* N-rGO

Berikut ditunjukkan pada **Gambar 4.23** merupakan hasil pengujian CV *current vs potensial* dari elektroda rGO, dari hasil tersebut menunjukkan kurva CV yang berbentuk menyerupai persegi panjang, hal tersebut sesuai dengan karakteristik kurva CV EDLC (*electric double layer capacitor*), beberapa dari sejumlah variasi *scan rate* terdapat yang berbentuk menyerupai daun, hal itu dikarenakan *scan rate* yang tinggi menyebabkan ion-ion tidak memiliki cukup waktu untuk tertarik keluar elektroda dan membentuk *double layer*.

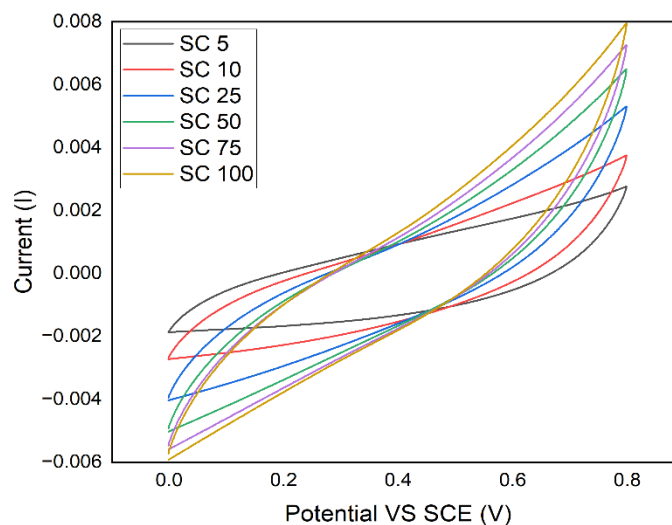


Gambar 4.23 Hasil Pengujian CV *current vs potensial* MnO₂

Berikut **Gambar 4.25** adalah hasil pengujian CV dari material oksida logam MnO₂. Pada reaksi Oksidasi dalam MnO₂ berfungsi sebagai agen oksidasi. Mangan (Mn) dalam MnO₂ memiliki bilangan oksidasi +4. Dalam kondisi tertentu, MnO₂ dapat tereduksi menjadi Mn²⁺, yang memiliki bilangan oksidasi +2. Sedangkan pada reaksi Reduksi Ion sulfat (SO₄²⁻) dari Na₂SO₄ tidak mengalami perubahan bilangan oksidasi dalam reaksi ini, tetapi dapat berpartisipasi dalam reaksi jika ada ion lain yang terlibat.

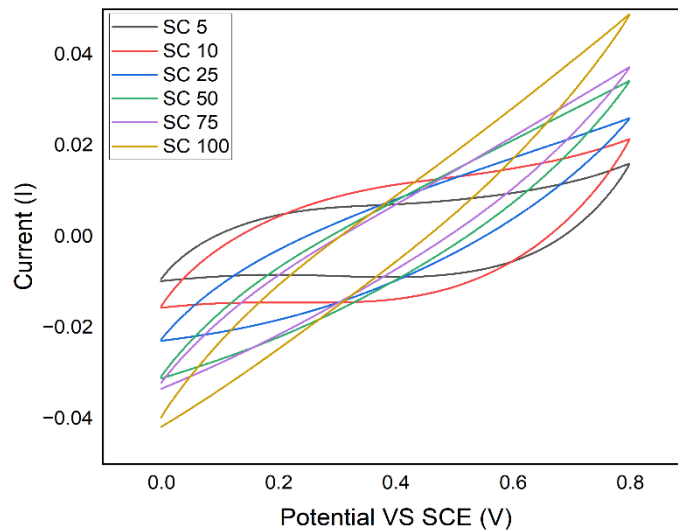


Terlihat bahwa luas area dari MnO₂ tampak lebih kecil dibanding dari rGO dan N-rGO, dikarenakan massa yang terdeposit ke dalam *nickel foam* memiliki bentuk menggumpal dan *nickel foam* tidak tertutup sempurna, sehingga elektroda tidak teraliri arus dengan sempurna. Akibatnya luas areal dari pengujian CV material MnO₂ juga kecil dibandingkan rGO dan N-rGO. Selain itu kurangnya visibilitas reaksi redoks pada hasil pengujian CV MnO₂, dapat dikaitkan dengan Na₂SO₄ sebagai elektrolit tidak memberikan lingkungan yang optimal untuk reaksi redoks pada MnO₂. Serta Konsentrasi pada elektrolit yang rendah, sehingga ion yang diperlukan untuk melakukan reaksi redoks tidak cukup untuk mendukung proses elektrokimia.

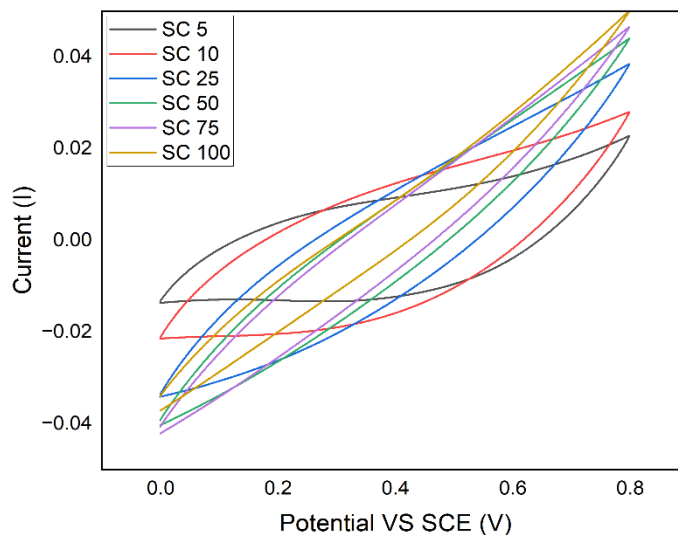


Gambar 4.24 Hasil Pengujian *current vs potential* CNT

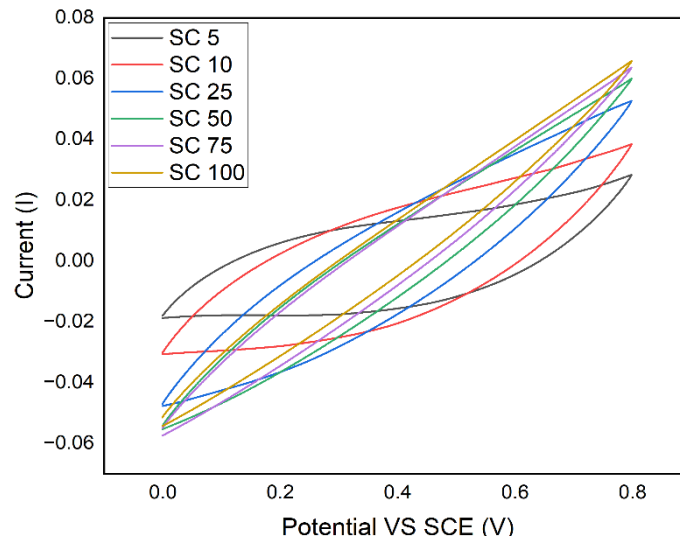
Pada **Gambar 4.26** adalah hasil pengujian CV dari material CNT yang sekilas memiliki bentuk menyerupai persegi empat dan pada *scan rate* tertentu memiliki bentuk seperti daun, hal itu sesuai dengan karakteristik superkapasitor EDLC, hal itu dikarenakan *scan rate* yang tinggi menyebabkan ion-ion tidak memiliki cukup waktu untuk tertarik keluar elektroda dan membentuk *double layer*. Selain itu luas areal hasil pengujian CV material CNT memiliki luas areal yang kecil, hal ini dipengaruhi dari massa CNT yang terdeposit *nickel foam* menggumpal di permukaan sehingga terdapat bagian elektroda yang tidak terlapisi dengan sempurna.



Gambar 4.25 Hasil Pengujian *current vs potential* K25

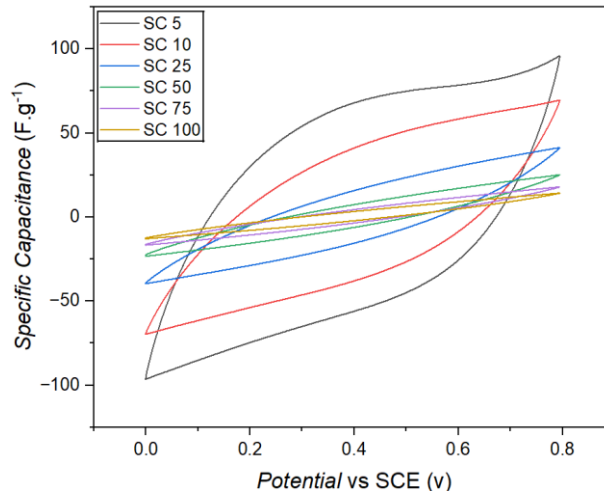


Gambar 4.26 Hasil Pengujian *current vs potential* K50

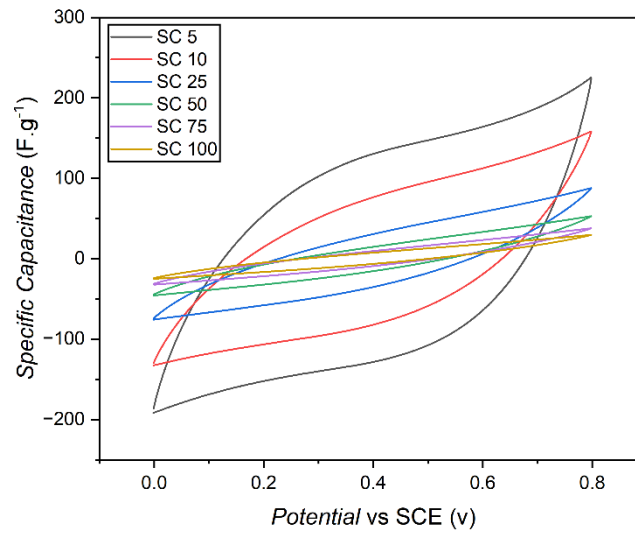


Gambar 4.27 Hasil Pengujian *current vs potential* K75

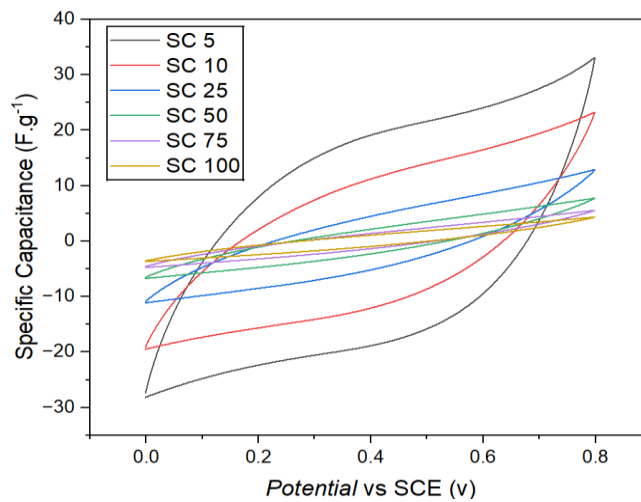
pengujian CV *current vs potential* dari elektroda komposit $\text{MnO}_2/\text{N-rGO}/\text{CNT}$ dengan variasi penambahan massa CNT yang telah ditentukan. Terdapat 3 gambar yang menandakan bahwa kurva komposisi $\text{MnO}_2/\text{N-rGO}/\text{CNT}$ memiliki bentuk seperti gabungan dari kurva CV N-rGO dan CNT yang berbentuk mirip daun dan persegi panjang dengan kurva MnO_2 yang memiliki sedikit hump atau puncak redoks yang menunjukkan sifat pseudocapacitive. Hasil CV dari elektroda komposit $\text{MnO}_2/\text{N-rGO}/\text{CNT}$ menunjukkan luasan kurva yang lebih besar dari kurva CV N-rGO, CNT dan CV MnO_2 dengan scan rate yang sama sehingga dapat disimpulkan bahwa elektroda komposit memiliki kapasitas untuk menyimpan energi yang lebih tinggi dari N-rGO, CNT dan MnO_2 murni. Pada hal lainnya, semakin besar penambahan massa CNT dari variasi yang ada menandakan bahwa seiring bertambahnya massa CNT maka puncak redoks juga semakin samar terutama pada *scan rate* yang tinggi. Selain itu, luasan dari kurva CV komposit juga semakin besar ketika massa CNT yang diberikan semakin bertambah. Pada kurva hasil pengujian CV komposit menunjukkan bahwa semakin besar penambahan massa CNT maka *current rate* yang dihasilkan juga semakin besar. Kurva CV dari komposit juga memiliki pola yang sama dengan kurva CV N-rGO, CNT dan MnO_2 yaitu ketika *scan rate* yang digunakan semakin tinggi maka luasan kurva juga akan semakin tinggi karena arus yang dihasilkan juga semakin tinggi sehingga waktu yang dibutuhkan untuk mencapai satu siklus menjadi lebih singkat, sebaliknya ketika *scan rate* yang digunakan semakin kecil, maka luasan kurva juga akan semakin kecil karena arus yang dihasilkan semakin rendah sehingga waktu yang dibutuhkan untuk mencapai satu siklus menjadi lebih lama.



Gambar 4.28 Hasil Pengujian Kapasitansi vs *Potential* rGO



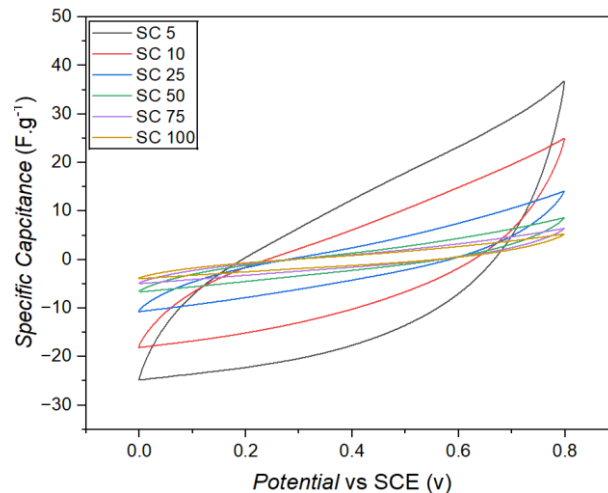
Gambar 4.29 Hasil Pengujian Kapasitansi vs *Potential* N-rGO



Gambar 4.30 Hasil Pengujian Kapasitansi vs *Potential* MnO₂

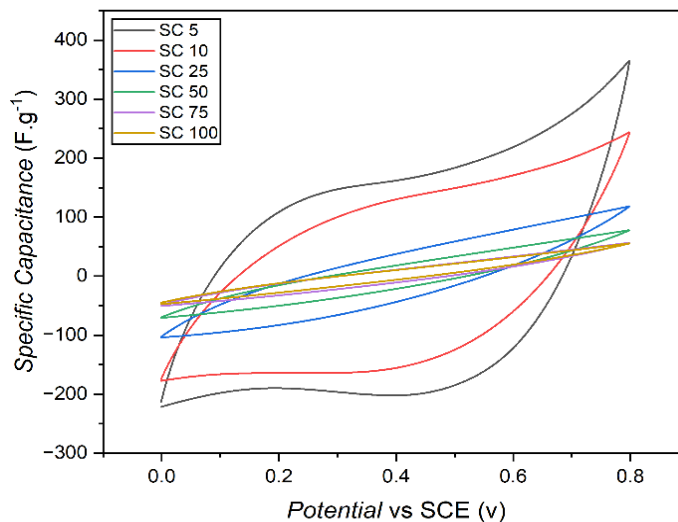
Dari hasil **Gambar 4.30**, **Gambar 4.31**, dan **Gambar 4.32** tersebut dapat terlihat bahwa

kapasitansi spesifik dari MnO_2 lebih kecil daripada material rGO dan N-rGO, dikarenakan masa yang terdeposisi disaat pembuatan elektroda tidak selalu homogen dan sifat mekanik dari MnO_2 lebih mudah terdeposisi secara jumlah besar karena sifatnya yang menggumpal. Berdasarkan kurva tersebut diketahui kapasitansi spesifik rGO sebesar 111.7527 F/g, kapasitansi spesifik N-rGO sebesar 195.3858 F/g, dan kapasitansi spesifik material MnO_2 sebesar 30.5670 F/g.



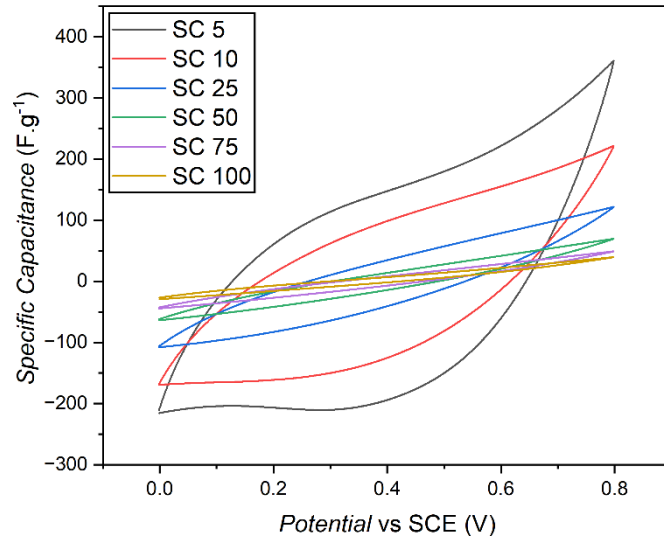
Gambar 4.31 Hasil Pengujian Kapasitansi vs *Potential* CNT

Pada **Gambar 4.33** dapat diketahui nilai kapasitansi spesifik dari elektroda CNT pada *scan rate* 5 mV/s, 10 mV/s, 25 mV/s, 50 mV/s, 75 mV/s, dan 100 mV/s berturut-turut adalah 27.6699 F/g, 15.5595 F/g, 6.7066 F/g, 3.6146 F/g, 2.593 F/g, dan 2.0763 F/g.



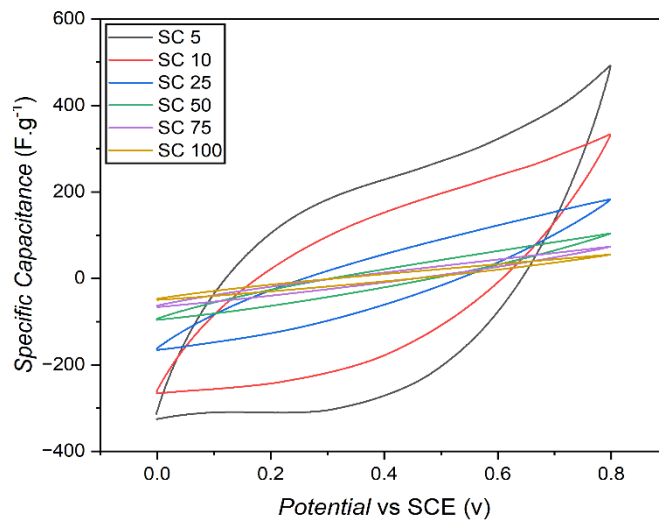
Gambar 4.32 Hasil Pengujian Kapasitansi vs *Potential* K25

Pada **Gambar 4.34** dapat diketahui nilai kapasitansi spesifik dari elektroda K25 pada *scan rate* 5 mV/s, 10 mV/s, 25 mV/s, 50 mV/s, 75 mV/s, dan 100 mV/s berturut-turut adalah 210.08 F/g, 158.77 F/g, 71.383 F/g, 45.229 F/g, 31.567 F/g, dan 29.992 F/g.



Gambar 4.33 Hasil Pengujian Kapasitansi vs *Potential* K50

Pada **Gambar 4.35** dapat diketahui nilai kapasitansi spesifik dari elektroda K50 pada *scan rate* 5 mV/s, 10 mV/s, 25 mV/s, 50 mV/s, 75 mV/s, dan 100 mV/s berturut-turut adalah 263.56 F/g, 182.08 F/g, 94.131 F/g, 51.939 F/g, 35.995 F/g, dan 27.6162 F/g.



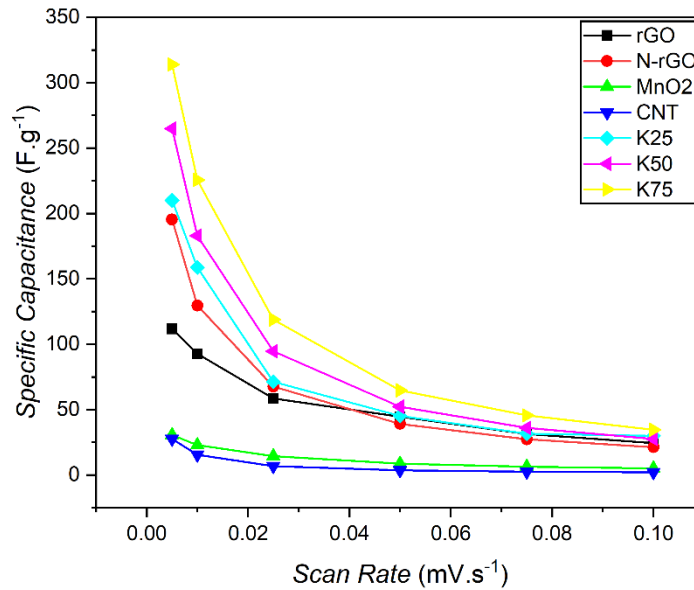
Gambar 4.34 Hasil Pengujian Kapasitansi vs *Potential* K75

Pada **Gambar 4.36** dapat diketahui nilai kapasitansi spesifik dari elektroda K75 pada *scan rate* 5 mV/s, 10 mV/s, 25 mV/s, 50 mV/s, 75 mV/s, dan 100 mV/s berturut-turut adalah 313.78 F/g, 225.59 F/g, 94.131 F/g, 64.764 F/g, 45.521 F/g, dan 34.589 F/g.

Berdasarkan ketiga gambar hasil pengujian dari elektroda variasi komposit, dapat diketahui bahwa nilai kapasitansi spesifik terbesar hingga terkecil pada *scan rate* 5 mV/s secara berturut-turut yaitu dari K75, dengan penambahan massa CNT sebanyak 75 mg didapatkan kapasitansi spesifik sebesar 313.78 F/g, K50 penambahan massa CNT sebanyak 50 mg didapatkan 263.56 F/g, dan K25 dengan penambahan massa CNT sebesar 25 mg menghasilkan kapasitansi spesifik sebesar 210.08 F/g.

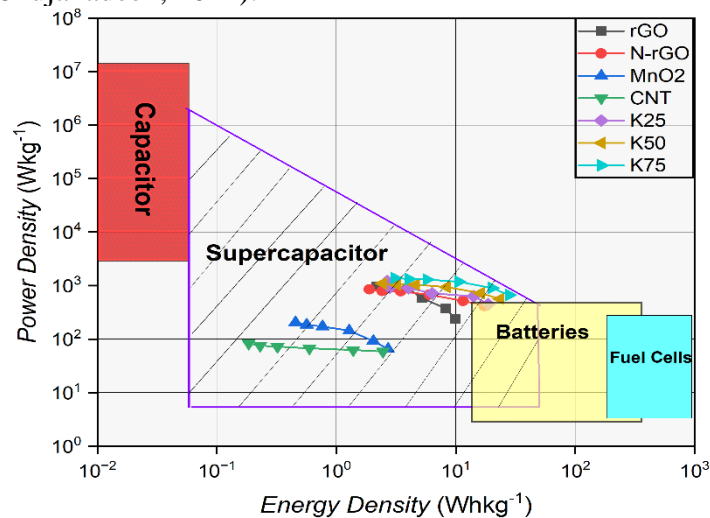
Tabel 4.16 Hasil Perhitungan nilai kapasitansi spesifik (C_s), *Specific Energy Density* (E), dan *Specific Power Density* (P)

Material	Scan Rate (V/m)	Area (I vs E)	Massa (gr)	Cs (F/g)	E (Wh/kg)	P (W/kg)
rGO	0.005	0.008225	0.0092	111.7527	9.9335749	238.4058
	0.01	0.013638		92.64946	8.2355072	370.5978
	0.025	0.0215677		58.60788	5.2095894	586.0788
	0.05	0.032731		44.47147	3.9530193	889.4293
	0.075	0.0346591		31.39411	2.7905878	913.2833
	0.1	0.0359242		24.40503	2.1693357	976.2011
N-rGO	0.005	0.0107853	0.0069	195.3858	17.367633	416.8232
	0.01	0.014312		129.6376	11.523349	518.5507
	0.025	0.018677		67.67029	6.0151369	676.7029
	0.05	0.0215548		39.04855	3.4709823	780.971
	0.075	0.0226134		27.31087	2.4276329	794.498
	0.1	0.023474		21.26268	1.8900161	850.5072
MnO ₂	0.005	0.0014183	0.0058	30.567	2.717069	65.20966
	0.01	0.0021298		22.95	2.0400096	91.80043
	0.025	0.0033455		14.42	1.2818084	144.2034
	0.05	0.0039968		8.6137	0.7656628	172.2741
	0.075	0.0044227		6.3545	0.5648442	184.8581
	0.1	0.0047466		5.1148	0.4546504	204.5927
CNT	0.005	0.0014167	0.0064	27.67	2.4595486	59.02917
	0.01	0.0015933		15.56	1.3830729	62.23828
	0.025	0.0017169		6.7066	0.5961458	67.06641
	0.05	0.0018507		3.6146	0.3213021	72.29297
	0.075	0.001992		2.5938	0.2305556	75.45455
	0.1	0.0021262		2.0764	0.184566	83.05469
K25	0.005	0.0120838	0.0072	210.08	18.673775	448.1706
	0.01	0.0182649		158.77	14.112888	635.08
	0.025	0.0205297		71.383	6.3451399	713.8282
	0.05	0.026016		45.229	4.0203987	904.5897
	0.075	0.0272357		31.567	2.8059239	918.3024
	0.1	0.0345031		29.992	2.665979	1199.691
K50	0.005	0.0167437	0.0079	263.56	23.42792	562.2701
	0.01	0.0231338		182.08	16.1845	728.3025
	0.025	0.0298997		94.131	8.3671802	941.3078
	0.05	0.0329957		51.939	4.6167849	1038.777
	0.075	0.0341241		35.81	3.1831144	1041.747
	0.1	0.0349069		27.474	2.4421008	1098.945
K75	0.005	0.0221628	0.0088	313.78	27.891418	669.394
	0.01	0.0318684		225.59	20.052856	902.3785
	0.025	0.0419759		118.86	10.565158	1188.58
	0.05	0.0457443		64.764	5.7568241	1295.285
	0.075	0.0482284		45.521	4.0462952	1324.242
	0.1	0.0488612		34.589	3.0745397	1383.543



Gambar 4.35 Grafik Hasil Uji CV Kapasitansi vs Scan Rate

Pada **Gambar 4.37** terdapat grafik hasil pengujian CV *scan rate vs specific capacitance*. Dari grafik tersebut dapat diamati bahwa nilai kapasitansi spesifik semakin rendah ketika scan rate yang digunakan semakin tinggi. Hal tersebut terjadi karena *scan rate* berpengaruh terhadap kemampuan ion elektrolit untuk masuk ke dalam pori-pori elektroda (Paul et al., 2017). Ketika scan rate yang digunakan semakin tinggi maka nilai kapasitansi elektroda yang didapat akan semakin rendah, hal tersebut disebabkan ion hanya memiliki waktu yang relatif singkat untuk berdifusi ke dalam elektroda sehingga tidak mempunyai waktu yang cukup untuk membentuk lapisan ganda, sehingga luas permukaan aktif yang dihasilkan kecil. Hal tersebut berlaku sebaliknya, ketika nilai scan rate kecil maka akan semakin besar nilai kapasitansi yang didapat karena memiliki waktu yang lebih banyak untuk ion elektrolit berdifusi dan dapat terbentuk lapisan ganda sehingga luas permukaan aktif yang dihasilkan lebih banyak (ziz Shujahadeen, 2022).

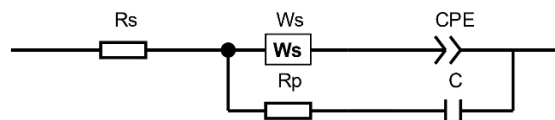


Gambar 4.36 Ragone Plot

Pada **Gambar 4.38** terdapat *ragone plot* yang menunjukkan hubungan antara *energy density* dengan *power density* pada semua sampel elektroda yang telah dibuat. Pada plot tersebut ditunjukkan bahwa hasil dari semua elektroda pada penelitian ini termasuk pada bagian superkapasitor dalam *ragone plot*, sehingga nilai kapasitansi yang didapatkan sudah sesuai dengan nilai kapasitansi superkapasitor pada umumnya.

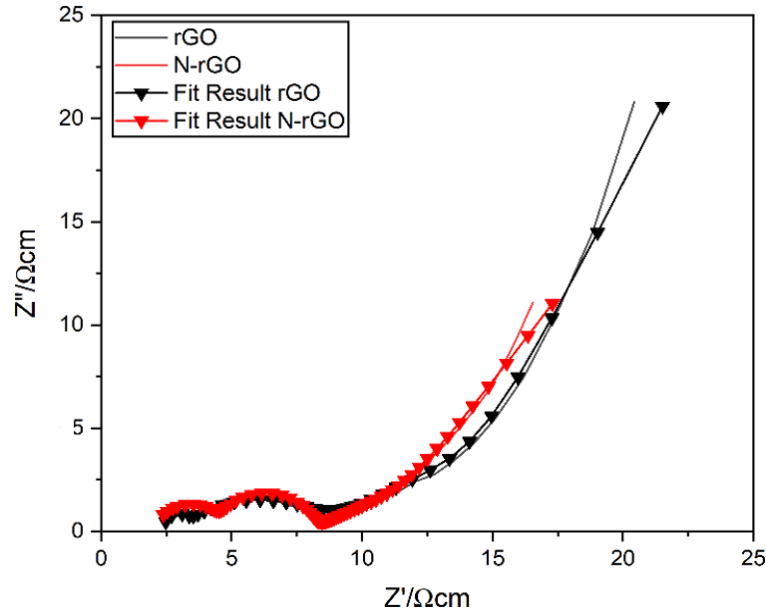
4.7 Hasil Pengujian *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS)

Fungsi pengujian *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) menganalisis resistansi yang digunakan untuk menentukan sifat elektrokimia, model sirkuit setara, dan mengetahui informasi tentang proses fisik dan kimia dalam bahan (Jann *et al.*, 2024). berdasarkan *Bode Plot* $|Z|$. Pada kurva *Nyquist* terdapat nilai Z' riil (Z') pada sumbu x dan Z'' imajiner (Z'') pada sumbu y. Nilai Z' menunjukkan nilai dari impedansi dan Z'' menunjukkan elemen non resistif. Pada *Nyquist Plot* terdapat dua daerah, yaitu daerah dengan frekuensi tinggi dan daerah dengan frekuensi rendah. Daerah frekuensi tinggi memiliki bentuk kurva setengah lingkaran yang disebut dengan daerah *Warburg*. Daerah tersebut menunjukkan proses redoks faradik yang terjadi pada sistem, dan pada daerah frekuensi rendah berbentuk garis lurus yang tegak dengan sumbu Y. Jika kurva semakin mendekati tegak lurus, maka sifat kapasitif dari material semakin baik (Nurdiansah *et al.*, 2019). Untuk memperoleh nilai konduktivitas dari elektroda dapat menggunakan *equivalent circuit* pada **Gambar 4.39** dibawah ini.



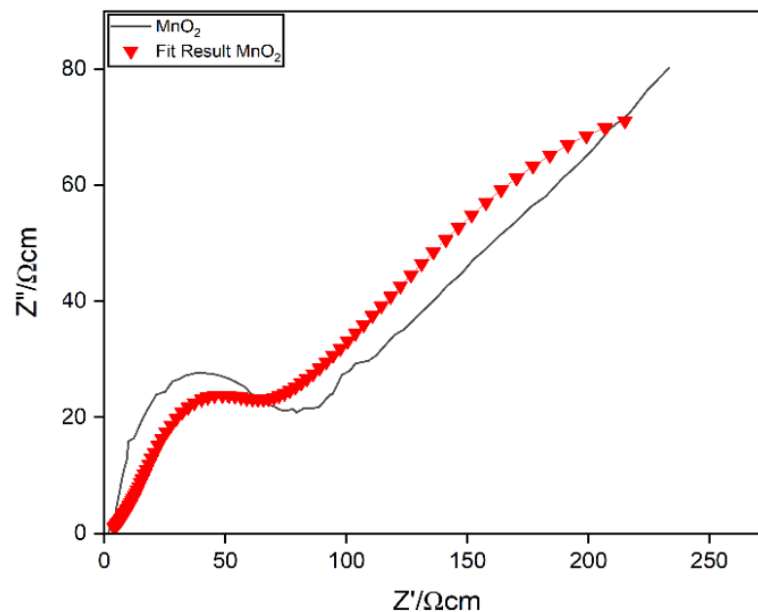
Gambar 4.37 *Equivalent Circuit*

Selanjutnya adalah sebuah rangkaian *equivalent* dibuat agar sesuai dengan data impedansi dan untuk menganalisis hubungan antara struktur dan sifat kapasitif. Rangkaian *equivalent* adalah kombinasi paralel dari rangkaian Randles dan elemen fase konstan. Sirkuit Randles bertujuan untuk memasang data frekuensi menengah dan tinggi, dimana R_s adalah resistansi dari larutan elektrolit, C merupakan kapasitansi luar yang dapat diakses. W merupakan elemen Warburg untuk mengetahui proses difusi. Selanjutnya adalah R_p yang merupakan resistansi transfer muatan yang berkaitan dengan transfer ion dari elektrolit ke elektroda. Sebagian besar kapasitansi *double layer* diwakili oleh C yang diambil pada frekuensi sedang dan tinggi. Sirkuit CPE merupakan elemen fase konstan yang mewakili kapasitansi yang bergantung pada frekuensi. Serta pada **Gambar 4.40** ditampilkan hasil *Nyquist Plot* dari material rGO dan N-rGO.

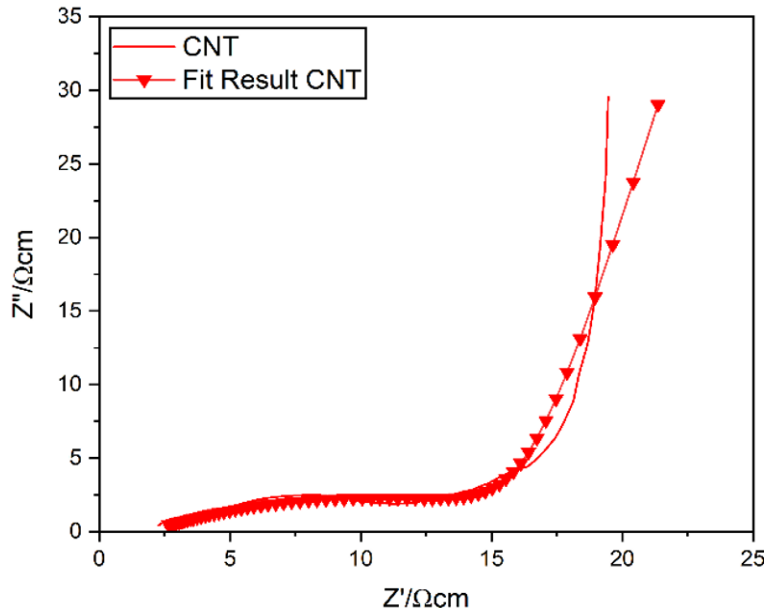


Gambar 4.38 Nyquist Plot rGO dan N-rGO

Pada **Gambar 4.39** Grafik diawali dengan setengah lingkaran pada daerah frekuensi tinggi yang menandakan adanya proses redoks yang terjadi yang menunjukkan terdapat resistensi transfer muatan. Selanjutnya terbentuk garis lurus yang mengarah ke atas pada rentang frekuensi rendah, yang menunjukkan resistensi difusi. Dimana jika garis semakin mendekati 90° maka secara kualitatif sifat kapasitifnya bagus. Seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 4.40** plot yang paling mendekati sudut 90° adalah elektroda N-rGO yang menandakan bahwa elektroda N-rGO mempunyai sifat kapasitif yang lebih bagus dibandingkan sampel yang lainnya. Hal ini juga didukung dari hasil pengujian CV dimana nilai kapasitansi sampel N-rGO paling tinggi dari pada sampel yang lainnya.

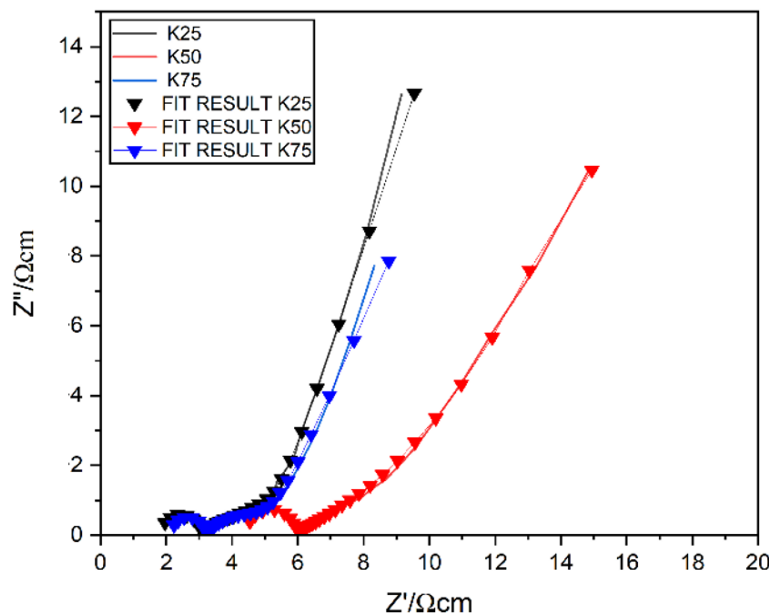


Gambar 4.41 Nyquist Plot MnO₂



Gambar 4.42 Nyquist Plot CNT

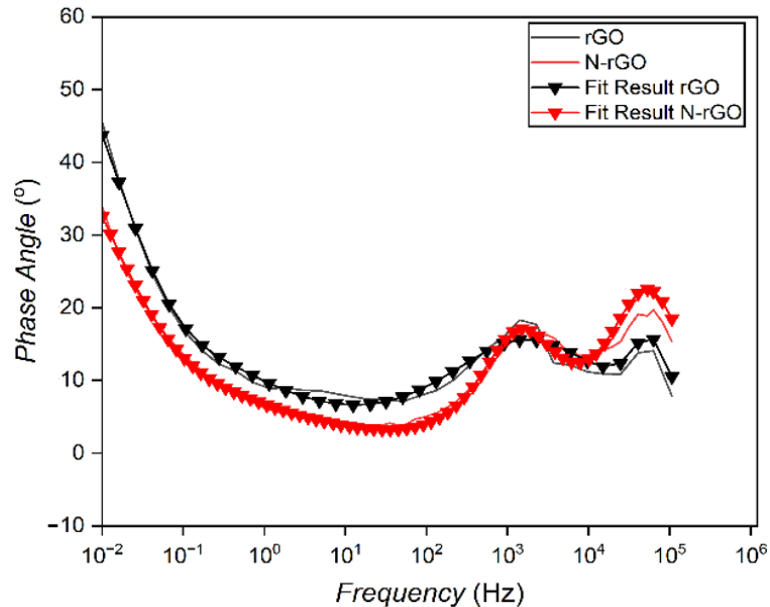
Dari **Gambar 4.41** dan **Gambar 4.42** grafik plot *Nyquist* tersebut bentuk geometri menandakan hasil *fitting* dengan *equivalent circuit* dan garis menunjukkan hasil pengujian EIS material pada instrumen. Hasil *Nyquist Plot* yang paling mendekati sudut 90° adalah material CNT, hal tersebut mengindikasikan bahwa material CNT memiliki sifat kapasitif yang lebih bagus jika dibandingkan dengan MnO_2 . Kemudian selanjutnya adalah grafik pengujian EIS dari hasil komposit dengan masing-masing variasi.



Gambar 4.43 Nyquist Plot Komposit

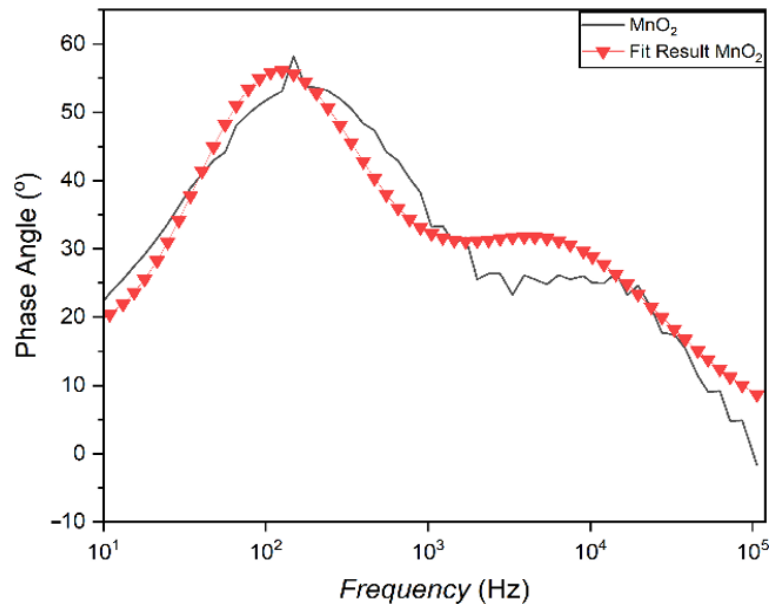
Dari **Gambar 4.43** grafik plot *Nyquist* tersebut bentuk geometri menandakan hasil *fitting* dengan *equivalent circuit* dan garis menunjukkan hasil pengujian EIS material pada instrumen. Hasil *Nyquist Plot* yang paling mendekati sudut 90° adalah material K75, hal

tersebut mengindikasikan bahwa material K75 memiliki sifat kapasitif yang lebih bagus jika dibandingkan dengan K50 maupun K25. Tampak pada grafik yang mendekati 90° adalah material K25 tetapi karena masing-masing material memulai pada titik yang berbeda sehingga nilai yang mendekati 90° adalah material K75.

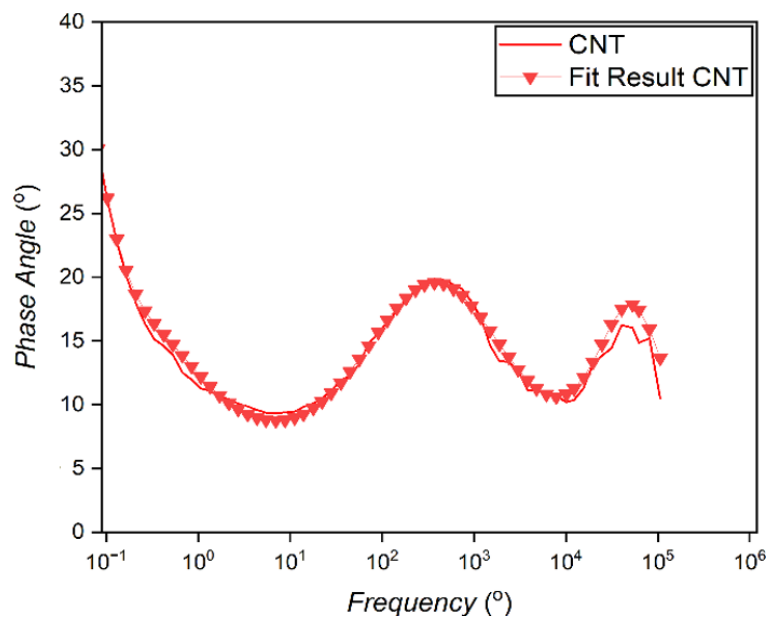


Gambar 4.44 Hasil *Bode Plot* rGO dan N-rGO

Gambar 4.44 menunjukkan grafik perbandingan antara frekuensi dengan θ° . Ketika frekuensi lebih tinggi hal tersebut menunjukkan kemampuan laju yang lebih tinggi pada daerah frekuensi tinggi hal ini menunjukkan proses pengisian daya yang cepat dapat dilakukan oleh material tersebut (Sarkar et al., 2020). Pada **Gambar 4.44** diatas menunjukkan hasil *plot* antara *phase angle* dan frekuensi, dimana bentuk geometri menandakan hasil *fitting* menggunakan *equivalent circuit* dan garis lurus menandakan hasil pengujian EIS dengan instrumen. Dari data ini didapatkan bahwa material rGO memiliki daerah kemiringan mendekati 45° , maka dapat dikatakan bahwa laju difusi yang dimiliki termasuk lebih tinggi jika dibandingkan dengan material N-rGO. Untuk material N-rGO memiliki daerah kemiringan sekitar 35° .

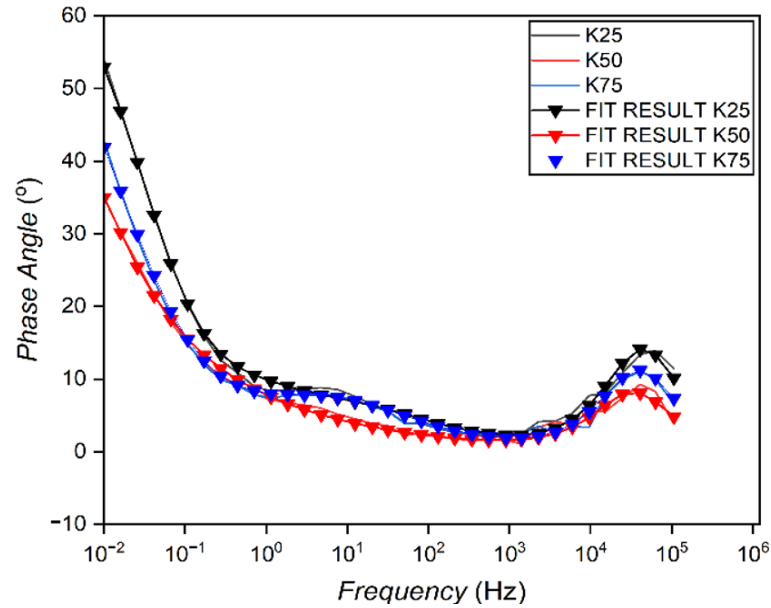


Gambar 4.45 Hasil *Bode Plot* MnO₂



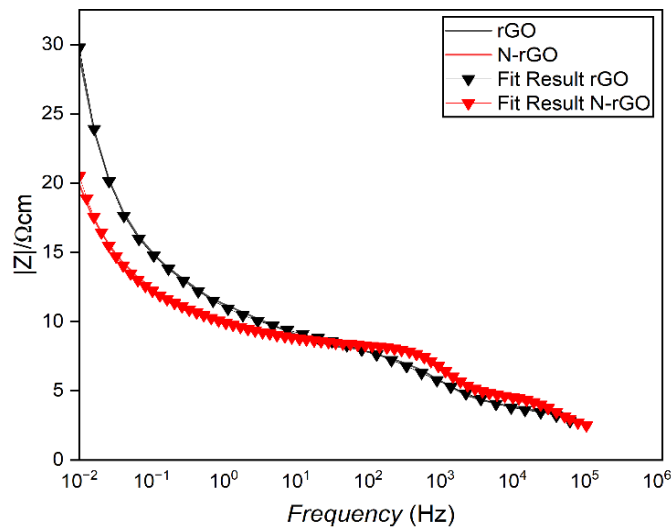
Gambar 4.46 Hasil *Bode Plot* CNT

Pada **Gambar 4.45** dan **Gambar 4.46** diatas menunjukkan hasil *plot* antara *phase angle* dan frekuensi, dimana bentuk geometri menandakan hasil *fitting* menggunakan *equivalent circuit* dan garis lurus menandakan hasil pengujian EIS dengan instrumen. Dari data ini didapatkan bahwa material CNT memiliki daerah kemiringan mendekati 57°, maka dapat dikatakan bahwa laju difusi yang dimiliki termasuk lebih tinggi jika dibandingkan dengan material MnO₂. Untuk material MnO₂ memiliki daerah kemiringan sekitar 18°.



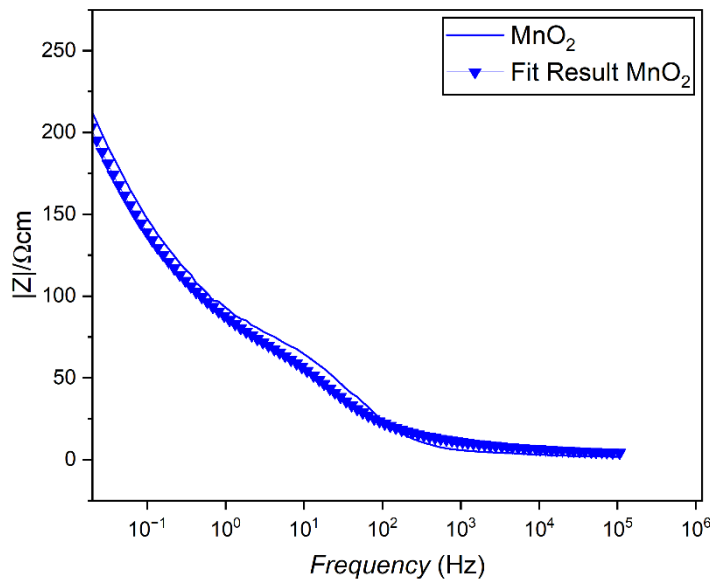
Gambar 4.47 Hasil *Bode Plot* Komposit

Pada **Gambar 4.47** diatas menunjukkan hasil *plot* antara *phase angle* dan frekuensi, dimana bentuk geometri menandakan hasil *fitting* menggunakan *equivalent circuit* dan garis lurus menandakan hasil pengujian EIS dengan instrumen. Dari data ini didapatkan bahwa material K25 memiliki daerah kemiringan mendekati 54°, maka dapat dikatakan bahwa laju difusi yang dimiliki termasuk lebih tinggi jika dibandingkan dengan material K50 dan K75. Untuk material K50 memiliki daerah kemiringan sekitar 42°, sedangkan material K75 memiliki daerah kemiringan sekitar 35°. Selanjutnya merupakan Bode plot $|Z|$ pada Gambar 4.29 yang menandakan tingkat ketahanan material.

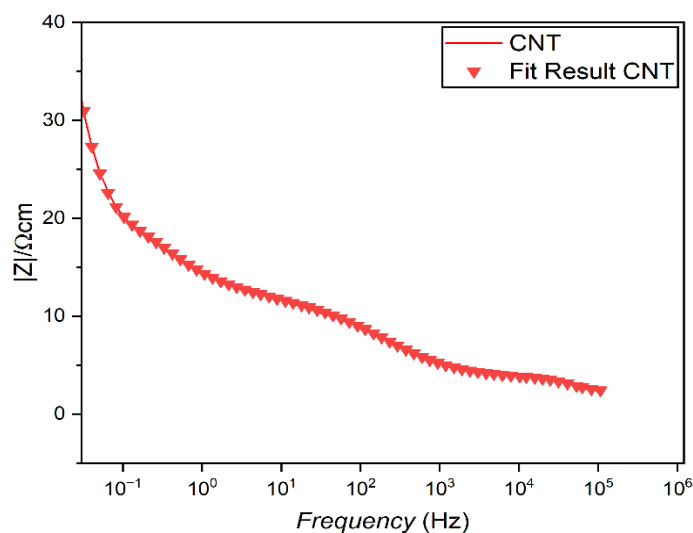


Gambar 4.48 Hasil *Bode Plot* rGO dan N-rGO

Berdasarkan **Gambar 4.48** dapat diketahui nilai $|Z|$ dari sampel. Seperti yang terlihat pada sampel elektroda rGO mempunyai nilai $|Z|$ paling tinggi, sedangkan sampel elektroda N-rGO mempunyai nilai $|Z|$ yang lebih rendah. Sehingga dapat diketahui sifat konduktivitas tertinggi yaitu elektroda N-rGO kemudian elektroda rGO. Dari pengujian EIS juga diperoleh nilai spesifik kapasitansi yang dapat dilihat pada **Gambar 4.48**. dapat diketahui bahwa nilai kapasitansi spesifik dari sampel elektroda rGO yaitu 100.682 F/g dan sampel elektroda N-rGO yaitu 191.446 F/g. Hasil kapasitansi spesifik tertinggi pada sampel N-rGO, hal ini juga sejalan dengan hasil pengujian CV. **Tabel 4.10** ini berikut ini terdapat nilai dari $|Z|$, resistansi, konduktivitas, dan Cs.



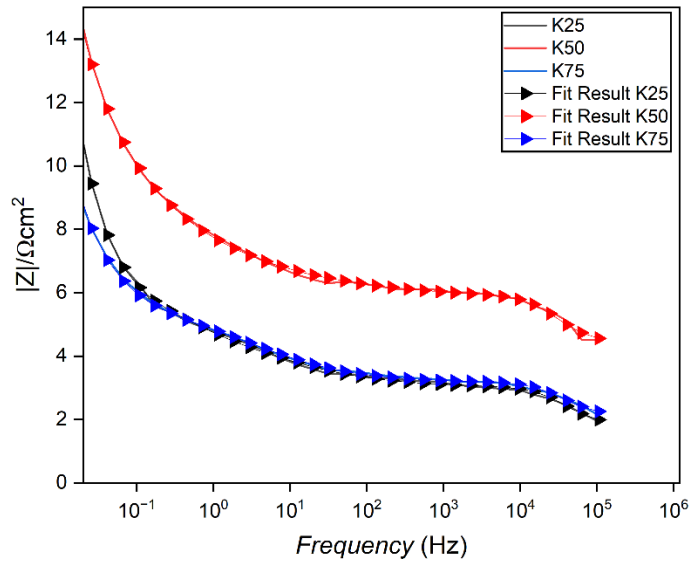
Gambar 4.49 Hasil *Bode Plot* MnO₂



Gambar 4.50 Hasil *Bode Plot* CNT

Dari kedua grafik tersebut dapat menunjukkan hasil *plot* antara frekuensi dan $|Z|$, pada **Gambar 4.49** menunjukkan bahwa MnO₂ $|Z|$ yang paling tinggi di banding dan **Gambar 4.50** juga menunjukkan bahwa elektroda dengan variasi CNT memiliki nilai $|Z|$ rendah, sedangkan sampel elektroda lainnya memiliki nilai $|Z|$ yang lebih tinggi, analisa ini dilihat dari

hasil $|Z|$ pada frekuensi 0.01 Hz. Hasil kapasitansi spesifik tertinggi pada sampel CNT yaitu 31.83 F/g, sedangkan kapasitansi MnO_2 , yaitu



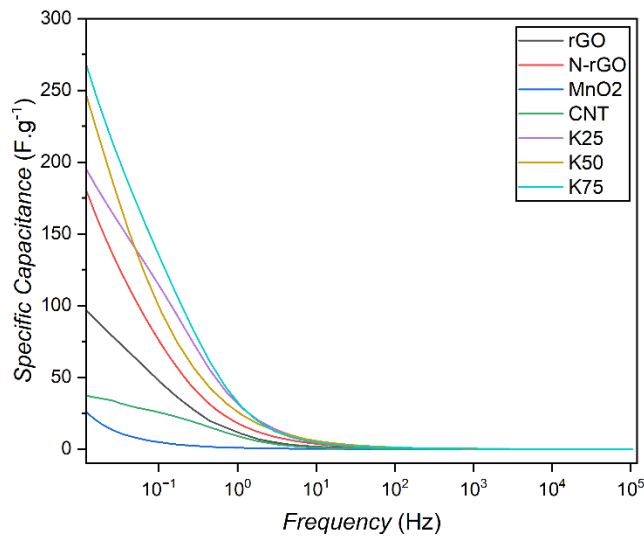
Gambar 4.51 Hasil *Bode Plot* Komposit

Pada **Gambar 4.51** menunjukkan grafik antara frekuensi dan $|Z|$ dari K25, K50, dan K75. Hasil *fitting* dengan *equivalent circuit* ditunjukkan bentuk geometri dan garis merupakan hasil pengujian EIS pada instrument. Dari bode plot diatas dapat diketahui nilai $|Z|$ dari elektroda K75 mempunyai nilai $|Z|$ yang paling rendah dari variasi elektroda lainnya sehingga K75 memiliki sifat konduktivitas yang lebih tinggi dibandingkan K50, dan K25. Dari plot ketiga sampel tersebut menunjukkan bahwa semakin lama waktu iradiasi dapat mempengaruhi nilai impedansi mutlak dari elektroda yang akan semakin besar

Tabel 4.17 Hasil nilai perhitungan EIS θ , $|Z|$, dan kapasitansi spesifik

Material	Frekuensi	θ ($^\circ$)	$ Z $ (Ω/cm^2)	Konduktivitas (Sm^{-1})	Resistansi (Ω)	Cs (F/g).f (0.1 Hz)
Elektroda rGO	0.01	45.5223	29.1645	1.037344	20.81	100.6826607
Elektroda N-rGO	0.01	33.847	19.914	0.75323892	11.09	191.446551
Elektroda MnO_2	0.01	18.279	246.7	0.060802594	80.164	26.48498391
Elektroda CNT	0.01	56.667	75.237	0.199369991	29.042	31.8340189
Elektroda K25	0.01	54.072	15.593	0.961970115	12.6	203.8347015
Elektroda K50	0.01	42.849	18.148	2.686728	10.45	261.1906589
Elektroda K75	0.01	35.158	11.363	1.977327	7.448	297.0716816

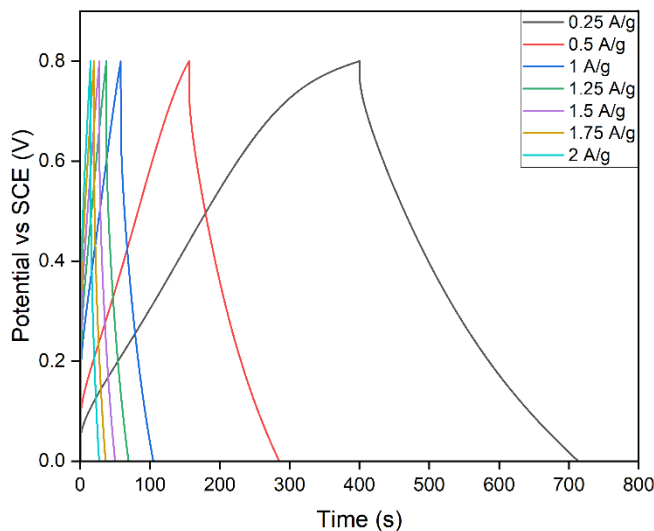
Hasil dari kapasitansi spesifik berdasarkan frekuensi disajikan pada data grafik antara kapasitansi dan frekuensi pada **Gambar 4.52** berikut.



Gambar 4.52 Hasil Nilai specific capacitance dari hasil pengujian EIS

4.8 Hasil Pengujian Galvanostatic Charge/Discharge (GCD)

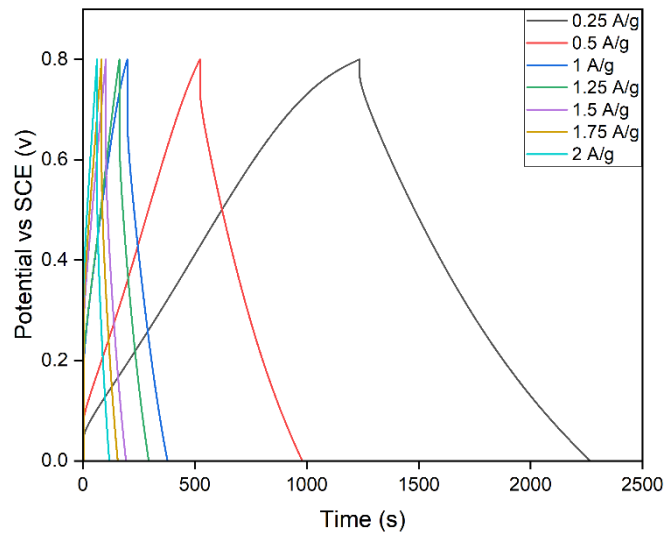
Pengujian GCD memiliki fungsi penting dalam mengevaluasi kinerja superkapasitor. Dengan memberikan arus konstan selama proses pengisian (adsorpsi) dan pengosongan (desorpsi), Pengujian ini untuk mendapatkan nilai dari kemampuan penyimpanan energi perangkat (Liang *et al.*, 2021). efisiensi Grafik GCD umumnya berbentuk segitiga yang hampir simetri, segitiga simetri menunjukkan bahwa kurva GCD yang memiliki reversibilitas yang baik, dari perilaku kapasitif material. Terdapat pola dimana semakin rendah *current density* yang digunakan maka waktu discharge akan semakin lama, hal tersebut terjadi karena pada kerapatan arus yang lebih rendah ion elektrolit memiliki cukup waktu untuk mengakses bagian dalam elektroda



Gambar 4.53 Hasil Pengujian GCD rGO

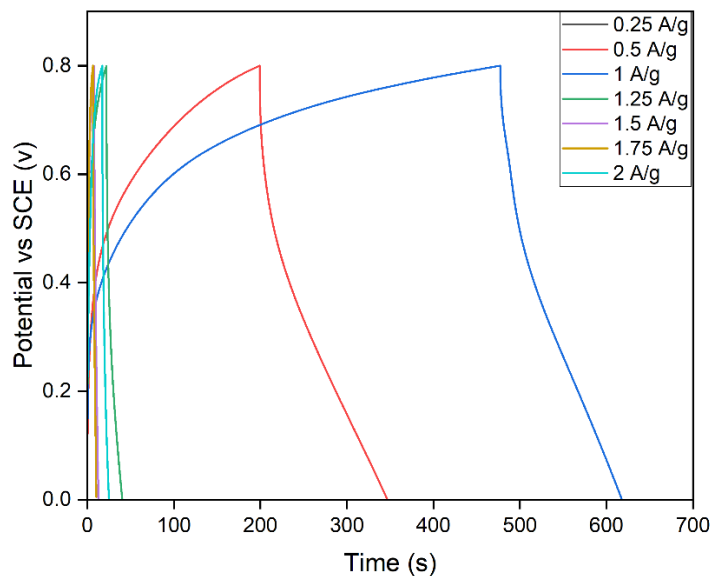
Dari **Gambar 4.53** hasil pengujian grafik ini dapat terlihat bahwa waktu *discharge* yang diperlukan oleh rGO pada pengujian 0.25 A.g^{-1} adalah sekitar 316.73 sekon. Terdapat pola dimana semakin kecil rasio A.g^{-1} yang digunakan maka waktu *discharge* akan semakin lama. Pada rGO didapatkan massa yang terdesposisi sebesar 7.6 mg sehingga variasi pengujian mA

menyesuaikan dengan massa tersebut menjadi 1.9 mA; 3.8 mA; 7.6 mA; 9.5 mA; 11.4 mA; 13.3 dan 15.2 mA. Selanjutnya adalah hasil GCD dari N-rGO.



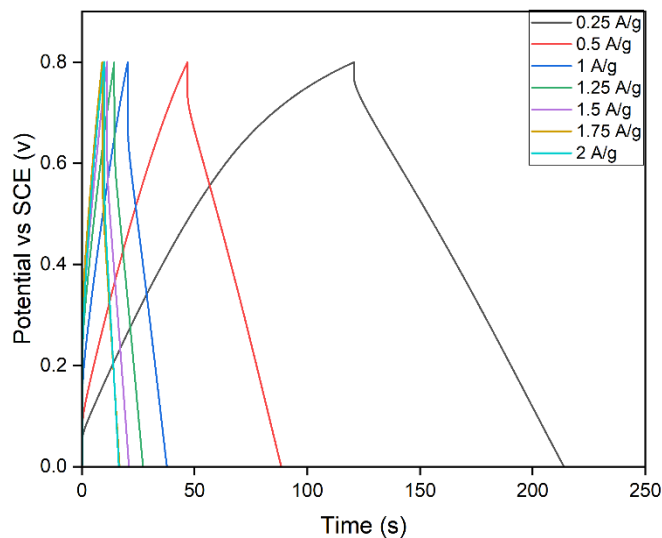
Gambar 4.54 Hasil Pengujian GCD N-rGO

Dari **Gambar 4.54** hasil pengujian grafik ini dapat terlihat bahwa waktu *discharge* yang diperlukan oleh N-rGO pada pengujian 0.25 Ag^{-1} adalah sekitar 1030.1 sekon. Waktu yang diperoleh dari pengujian GCD N-rGO lebih besar dibanding rGO dikarenakan terdapat pengaruh doping atom N yang meningkatkan sifat kapasitifnya. Pada N-rGO didapatkan massa yang terdeposisi sebesar 9.5 mg sehingga variasi pengujian mA menyesuaikan dengan massa tersebut menjadi 2.375 mA; 4.75 mA; 9.5 mA; 11.875 mA; 14.25 mA; 16.625 mA dan 19 mA. Selanjutnya adalah hasil GCD dari MnO_2 .



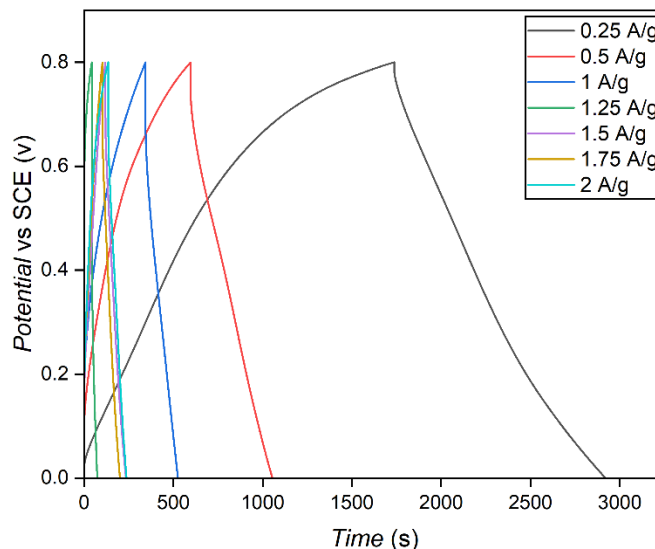
Gambar 4.55 Hasil Pengujian GCD MnO_2

Dari **Gambar 4.55** hasil pengujian grafik ini dapat terlihat bahwa waktu *discharge* yang diperlukan oleh MnO_2 pada pengujian 0.25 Ag^{-1} adalah sekitar 349.7 sekon. Pada pengujian GCD MnO_2 nilai *charge* dan *discharge* terbilang cukup kecil hal ini dikarenakan keadaan material yang menggumpal sehingga mempengaruhi kepadatan arusnya. Pada MnO_2 didapatkan massa yang terdeposisi sebesar 5.5 mg sehingga variasi pengujian mA menyesuaikan dengan massa tersebut menjadi 1.125 mA; 2.25 mA; 5.5 mA; 6.875 mA; 8.25 mA dan 11 mA. Selanjutnya adalah hasil GCD dari CNT.



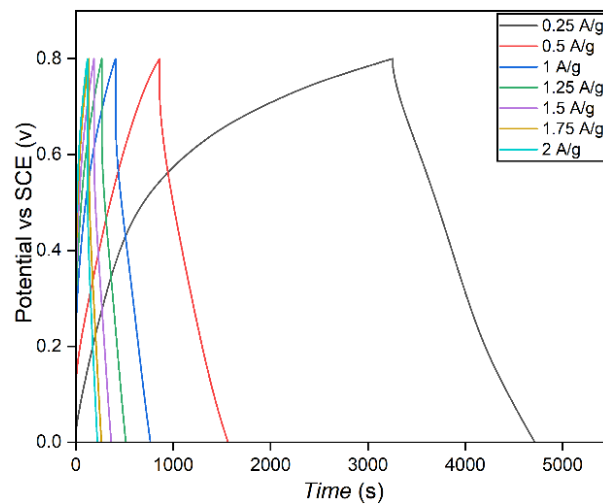
Gambar 4.56 Hasil Pengujian GCD CNT

Dari **Gambar 4.56** hasil pengujian grafik ini dapat terlihat bahwa waktu *discharge* yang diperlukan oleh CNT pada pengujian 0.25 Ag^{-1} adalah sekitar 93.17 sekon. Pada CNT didapatkan massa yang terdeposisi sebesar 6.4 mg sehingga variasi pengujian mA menyesuaikan dengan massa tersebut menjadi 1.6 mA; 3.2 mA; 6.4 mA; 8 mA; 9.6 mA; 11.2 mA dan 12.8 mA. Selanjutnya adalah hasil GCD dari K25.



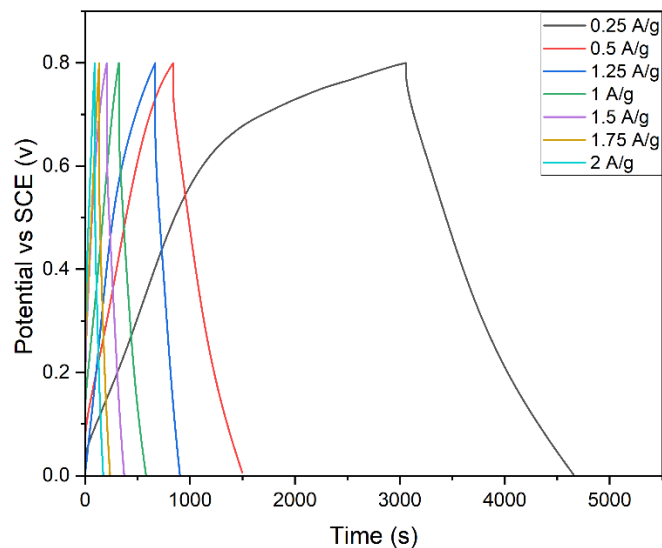
Gambar 4.57 Hasil Pengujian GCD K25

Dari **Gambar 4.57** hasil pengujian grafik ini dapat terlihat bahwa waktu *discharge* yang diperlukan oleh K25 pada pengujian 0.25 Ag^{-1} adalah sekitar 1187 sekon. Terdapat pola dimana semakin kecil rasio Ag^{-1} yang digunakan maka waktu *discharge* akan semakin lama. Terbentuk gabungan GCD dari material *porous carbon* dan GCD material metal oksida MnO_2 . Pada K25 didapatkan massa yang terdeposisi sebesar 6.8 mg sehingga variasi pengujian mA menyesuaikan dengan massa tersebut menjadi 1.7 mA; 3.4 mA; 6.8 mA; 8.5 mA; 10.2 mA dan 13.6 mA. Selanjutnya adalah hasil GCD dari K50.



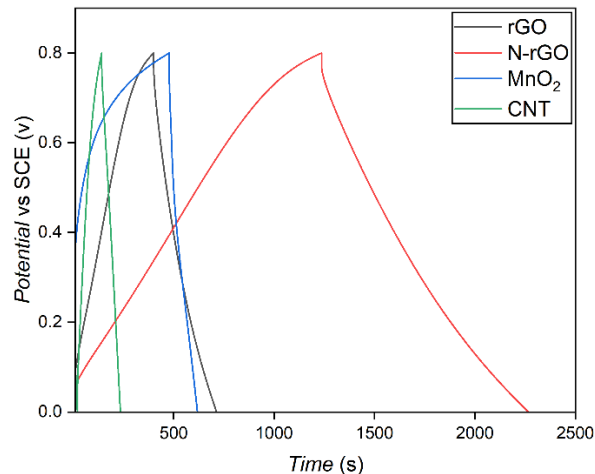
Gambar 4.58 Hasil Pengujian GCD K50

Dari **Gambar 4.58** hasil pengujian grafik ini dapat terlihat bahwa waktu *discharge* yang diperlukan oleh K50 pada pengujian 0.25 Ag^{-1} adalah sekitar 1464.3 sekon.. Pada K50 didapatkan massa yang terdeposisi sebesar 7.9 mg sehingga variasi pengujian mA menyesuaikan dengan massa tersebut menjadi 1.725 mA; 3.45 mA; 7.9 mA; 9.625 mA; 11.35 dan 15.8 mA dan seterusnya. Selanjutnya adalah hasil GCD dari K75.



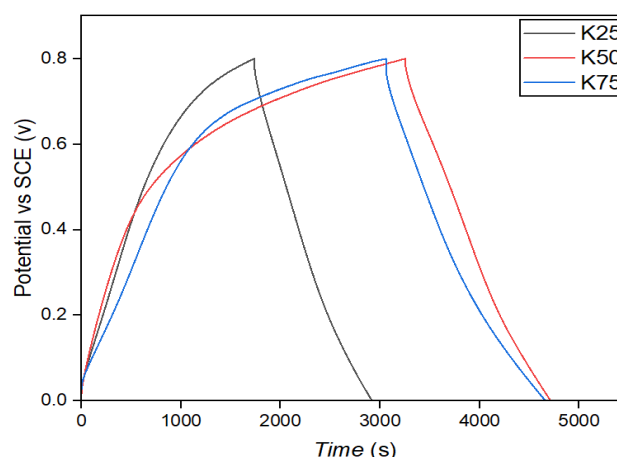
Gambar 4.59 Hasil Pengujian GCD K75

Dari **Gambar 4.59** hasil pengujian grafik ini dapat terlihat bahwa waktu *discharge* yang diperlukan oleh K75 pada pengujian 0.25 Ag^{-1} adalah sekitar 1607 sekon. Terdapat pola dimana semakin kecil rasio Ag^{-1} yang digunakan maka waktu *discharge* akan semakin lama. Pada K75 diperoleh nilai discharge terbesar daripada variasi komposit lainnya, didapatkan massa yang terdeposisi sebesar 7.2 mg sehingga variasi pengujian mA menyesuaikan dengan massa tersebut menjadi 1.8 mA; 3.6 mA; 7.2 mA; 9 mA; 10.8 mA; 12.6 mA dan 14.4 mA. Selanjutnya adalah hasil GCD pada *current density* 0.25 Ag^{-1} dari material rGO, N-rGO, MnO_2 dan CNT.



Gambar 4.60 Grafik Pengujian GCD rGO, N-rGO, MnO_2 dan CNT pada 0.25 Ag^{-1}

Dari **Gambar 4.60** hasil pengujian grafik ini dapat terlihat bahwa waktu *discharge* yang paling singkat adalah pada material CNT, dilanjut dengan material MnO_2 , rGO dan N-rGO. Sehingga dapat disimpulkan bahwa hasil kapasitansi yang bagus adalah pada N-rGO dikarenakan semakin lama waktu *discharge* maka semakin bagus juga nilai kapasitansi dari material tersebut.



Gambar 4.61 Grafik Pengujian GCD Variasi Komposit pada 0.25 Ag^{-1}

Dari **Gambar 4.61** hasil pengujian grafik ini dapat terlihat bahwa waktu *discharge* yang paling singkat adalah pada material K75, dilanjut dengan material K50 dan K25. Sehingga dapat disimpulkan bahwa hasil kapasitansi yang bagus adalah pada K75 dikarenakan semakin

lama waktu *discharge* maka semakin bagus juga nilai kapasitansi dari material tersebut. Perhitungan kapasitansi dari hasil *charge discharge* adalah sebagai berikut pada **Tabel 4.18**.

Tabel 4.18 Hasil Perhitungan nilai kapasitansi spesifik (Cs) dari pengujian GCD

Material	Current Density (Ag ⁻¹)	Massa (gr)	Waktu Charge (s)	Cs (F/g) charge	Waktu Discharge (s)	Cs (F/g) discharge
rGO	0.25	0.0076	476.36	148.8625	316.73	98.978
	0.5		155.8	97.375	129.23	80.768
	1		58.1	72.625	46.6	58.25
	1.25		37.7	58.90625	32.3	50.468
	1.5		27.73	51.99375	22.397	41.994
	1.75		20.13	44.03438	16.5	36.093
	2		15.1	37.75	12.4	31
N-rGO	0.25	0.0095	1233.6	385.5	1030.1	321.906
	0.5		523.3	327.0625	457.07	285.668
	1		198.44	248.05	198.44	248.05
	1.25		162.47	253.8594	130.9	204.531
	1.5		103.33	193.7438	88.77	166.443
	1.75		83.93	183.5969	71.7	156.843
	2		63.2	158	55	137.5
MnO ₂	0.25	0.0055	476.87	149.0219	349.7	109.281
	0.5		199.06	124.4125	147.7	92.312
	1		127.1	158.875	36.53	45.662
	1.25		21.83	34.10938	18.88	29.5
	1.5		17.3	32.4375	7.6	14.25
	1.75		7.9	17.28125	4.83	10.565
	2		6.43	16.075	3.86	9.65
CNT	0.25	0.0064	120.76	37.737	93.17	29.115
	0.5		46.76	29.225	41.47	25.918
	1		20.3	25.375	17.63	22.037
	1.25		14.3	22.343	12.6	19.687
	1.5		11.16	20.925	9.67	18.131
	1.75		9	19.687	7.7	16.843
	2		8.6	21.5	6.53	16.325
K25	0.25	0.0068	1725.1	539.093	1187	370.937
	0.5		709.7	443.562	456.7	285.437
	1		342.63	428.287	183.07	228.837
	1.25		135.2	211.25	114.37	178.703
	1.5		119.6	224.25	102.2	191.625
	1.75		102.8	224.875	97.86	214.068
	2		93.1	232.75	44.03	110.075
K50	0.25	0.0079	3250.43	947.084	1464.3	457.593
	0.5		857.7	636.25	703.7	439.812
	1		407	542.5	358.1	447.625
	1.25		264.76	498.437	247.27	386.359
	1.5		185	378	176.87	331.631
	1.75		133.6	290.5	128.36	280.787
	2		118.2	227.75	102.23	255.575

LAPORAN TUGAS AKHIR
TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI

	0.25		3030.67	1015.759	1607	502.187
	0.5		1018	536.062	665.7	416.062
	1		434	508.75	259.59	324.487
K75	1.25	0.0072	319	413.687	236	368.75
	1.5		201.6	346.875	165.47	310.256
	1.75		132.8	292.25	104.23	228.003
	2		91.1	295.5	80.43	201.075

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pada proses penambahan massa CNT kedalam material komposit MnO₂/N-rGO/CNT dengan variasi masing-masing sebanyak 25 mg, 50 mg, dan 75 mg CNT, diperoleh kesimpulan bahwa variasi penambahan yang paling baik adalah 75 mg CNT menghasilkan susunan elektroda paling efisien, dapat dilihat dari jumlah wt% C yang terdeposisi yaitu 34.39% C pada material, dimana variasi 25 mg dan 50 mg masing-masing mendeposisikan 28.18 wt% 31.18 wt% C. Secara morfologi, struktur komposit pada sampe K75 lebih baik terlihat pada ukuran kristal dari masing-masing fasa penyusun K75, berturut-turut N-rGO, MnO₂, CNT, yaitu 10.138 nm, 31.238 nm, 20.343 nm sehingga fungsi setiap komponen material penyusun terhadap sifat mekanis dan sifat kapasitif komposit dapat lebih baik.
2. Pada proses penambahan massa CNT kedalam material komposit MnO₂/N-rGO/CNT dapat meningkatkan nilai kapasitifnya, kesimpulan bahwa nilai kapasitansi dari material komposit MnO₂/N-rGO/CNT dengan variasi 75 mg CNT memiliki nilai kapasitansi yang paling baik berdasarkan hasil pengujian CV sebesar 313.78 F/g, berdasarkan hasil pengujian EIS sebesar 297.071 F/g dengan nilai konduktivitas 1.977 Sm⁻¹, dan berdasarkan hasil pengujian GCD, sebesar 502.187 F/g, Kesimpulan yang dapat ditarik adalah jumlah yang paling baik penambahan adalah 75 mg CNT dikarenakan hasil kapasitansi yang diperoleh lebih baik dan stabil.
3. Dari nilai hasil pengujian yang telah dilakukan dapat dikomparasi kan dengan hasil yang didapatkan pada jurnal lain, nilai kapasitansi dan konduktivitas dari penelitian memiliki hasil lebih baik dari penelitian yang dilakukan Cendrawan dkk, Z. Yang dkk, B. Li dkk, Gong dkk, dan Li dkk , tetapi tidak lebih baik dibanding penelitian yang dilakukan Vimuna dkk dan Aval dkk. Hal ini menandakan perlu adanya modifikasi pada proses sintesisnya.

5.2 Saran

Adapun saran dari dan bagi penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menambahkan kontrol tekanan dan temperatur pada *autoclave* untuk menghindari proses hidrotermal yang berlebih sehingga material hasil kering.
2. Meninjau lebih lanjut mengenai proses penempelan pada elektroda, apakah lebih optimal menggunakan binder atau menggunakan metode konvensional terhadap pengaruh pada pengujian elektrokimia.
3. Meninjau lebih lanjut untuk proses pengujian CV, EIS, dan GCD terkait dengan preparasi elektroda dan parameter pengujian agar didapat hasil yang maksimal secara efektif
4. Kebersihan dan keselamatan pada saat sintesis perlu diperhatikan agar hasil yang didapatkan lebih maksimal dan terbebas dari *impurities* material lain.
5. Kurangnya visibilitas reaksi redoks pada bahan pseudokapasitif MnO₂ selama pengujian (CV) dengan elektrolit Na₂SO₄ dapat dikaitkan dengan elektrolit spesifik yang digunakan. menunjukkan bahwa pemilihan elektrolit secara signifikan mempengaruhi perilaku redoks MnO₂. Hal ini menekankan peran penting terkait pemilihan elektrolit.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, J. (2018). In vitro antimalarial activity of *Calophyllum bicolor* and hemozoin crystals observed by Transmission Electron Microscope (TEM). MATEC Web of Conferences, 154, 04004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815404004>
- Adhytiawan, A. A., & Susanti, D. (2013). Pengaruh Variasi Waktu Tahan Hidrotermal terhadap Sifat Kapasitif Superkapasitor Material Graphene. *Jurnal Teknik POMITS ITS*, 2, F45–F50.
- Aval, L. F., Ghoranneviss, M., & Pour, G. B. (2018). High-performance Supercapacitors based on the carbon nanotubes, graphene and graphite nanoparticles electrodes. *Heliyon*, 4(11), e00862. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00862>
- BAPPENAS. (n.d.). *tujuan-7* /. 2022. Retrieved September 20, 2022, from <https://sdgs.bappenas.go.id/tujuan-7/>
- Bokhari, S. W., Hao, Y., Siddique, A. H., Ma, Y., Imtiaz, M., Butt, R., Hui, P., Li, Y., & Zhu, S. (2019). Assembly of hybrid electrode rGO–CNC–MnO₂ for a high performance Supercapacitor. *Results in Materials*, 1. <https://doi.org/10.1016/J.RINMA.2019.100007>
- Chen, D., Feng, H., & Li, J. (2012). Graphene oxide: Preparation, functionalization, and electrochemical applications. *Chemical Reviews*, 112(11), 6027–6053. https://doi.org/10.1021/CR300115G/ASSET/IMAGES/CR300115G.SOCIAL.JPEG_V03
- Chen, K., & Xue, D. (2014). Water-soluble inorganic salt with ultrahigh specific capacitance: Ce(NO₃)₃ can be designed as excellent pseudocapacitor electrode. *Journal of Colloid and Interface Science*, 416, 172–176. <https://doi.org/10.1016/J.JCIS.2013.10.044>
- Christyaningsih, R. Y., & Diponegoro, U. (2020). *Aplikasi Fisika Kuantum-Hamburan Pada "X-Ray Diffraction (XRD)."*
- Cinzia Silvestri, a Michele Riccio, b René H. Poelma, a Bruno Morana, a Sten Vollebregt, a. (2020). Thermal Characterization of Carbon Nanotube Foam using MEMS Microhotplates
- Corpuz, R. D., de Juan-Corpuz, L. M., Nguyen, M. T., Yonezawa, T., Wu, H. L., Somwangthanoj, A., & Kheawhom, S. (2020). Binder-Free α -MnO₂ Nanowires on Carbon Cloth as Cathode Material for Zinc-Ion Batteries. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(9). <https://doi.org/10.3390/IJMS21093113>
- Dai, H., Zhou, R., Zhang, Z., Zhou, J., & Sun, G. (2022). Design of manganese dioxide for supercapacitors and zinc-ion batteries: similarities and differences. *Energy Materials*, 2(6), 200040. <https://doi.org/10.20517/energymater.2022.56>
- Dai, Z., Wang, K., Li, L., & Zhang, T. (2013). Synthesis of Nitrogen-Doped Graphene with Microwave. *Int. J. Electrochem. Sci*, 8, 9384–9389. www.electrochemsci.org
- Devaraj, S., & Munichandraiah, N. (2008). Effect of crystallographic structure of MnO₂ on its electrochemical capacitance properties. *Journal of Physical Chemistry C*, 112(11), 4406–4417. <https://doi.org/10.1021/jp7108785>
- Din, K. T. I. N. L. N. P. M. B. U. O., & Iqbal, S. M. S. (2009). Nanosized MnO₂: Preparation, characterisation and its redox activity. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/289472519_Nanosized_MnO2_Preparation_characterisation_and_its_redox_activity
- Fan, X., Li, Z., Wang, S., Liu, L., Liu, P., Chen, F., & Zheng, X. (2019). Electrochemical Impedance Biosensor for the Determination of Lipopolysaccharide Using Peptide as the Recognition Molecule. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 30(8), 1762–1768. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20190081>

- Feng, S.-H., & Li, G.-H. (2017). Hydrothermal and Solvothermal Syntheses. In *Modern Inorganic Synthetic Chemistry* (pp. 73–104). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63591-4.00004-5>
- Foremny, K., Konerding, W., Behrens, A., Baumhoff, P., Froriep, U. P., Kral, A., & Doll, T. (2021). Carbon-Nanotube-Coated Surface Electrodes for Cortical Recordings In Vivo. *Nanomaterials*, 11(4), 1029. <https://doi.org/10.3390/nano11041029>
- Gadipelli, S., Guo, J., Li, Z., Howard, C. A., Liang, Y., Zhang, H., Shearing, P. R., & Brett, D. J. L. (2023). Understanding and optimizing capacitance performance in reduced Graphene-Oxide based supercapacitors. *Small Methods*, 7(6). <https://doi.org/10.1002/smt.202201557>
- Ghobad Behzadi Pour, Hassan Ashourifar, Leila Fekri Aval and Shahram Solaymani (2023). CNTs-Supercapacitors: A Review of Electrode Nanocomposites Based on CNTs, Graphene, Metals, and Polymers
- González, A., Goikolea, E., Barrena, J. A., & Mysyk, R. (2016). Review on *Supercapacitors: Technologies and materials*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1189–1206. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.249>
- Guo, B., Fang, L., Zhang, B., & Gong, J. R. (2011). Graphene Doping: A Review. *Insciences Journal*, 80–89. <https://doi.org/10.5640/INSC.010280>
- Handbook of Carbon-Based Nanomaterials. (n.d.). ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/book/9780128219966/handbook-of-carbon-based-nanomaterials>
- Huang, J., Yuan, K., & Chen, Y. (2021). Wide Voltage Aqueous Asymmetric Supercapacitors: Advances, strategies, and challenges. *Advanced Functional Materials*, 32(4). <https://doi.org/10.1002/adfm.202108107>
- Jann, Odrobina., W., Strunz., Carl-Albrecht, Schiller. (2024). Methods, instruments and techniques | Electrochemical impedance spectroscopy. doi: 10.1016/b978-0-323-96022-9.00263-2
- Jung, K.-W., Lee, S. Y., & Lee, Y. J. (2018). Hydrothermal synthesis of hierarchically structured birnessite-type MnO₂/biochar composites for the adsorptive removal of Cu(II) from aqueous media. *Bioresource Technology*, 260, 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.125>
- Kamel, S., El-Sakhawy, M., Anis, B., & Tohamy, H. A. S. (2019). Graphene's Structure, Synthesis, and Characterization; a brief review. *Egyptian Journal of Chemistry*, 62(Special Issue (Part 2) Innovation in Chemistry), 593–608. <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2019.15173.1919>
- Kang, S., Kang, T. H., Kim, B. S., Oh, J., Park, S., Choi, I. S., Lee, J., & Son, J. G. (2019). 2D reentrant micro-honeycomb structure of graphene-CNT in polyurethane: High stretchability, superior electrical/thermal conductivity, and improved shape memory properties. *Composites Part B: Engineering*, 162, 580–588. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2019.01.004>
- Kang, N., Ren, Y., Feinberg, F.M., & Papalambros, P.Y. (2016). Public Investment and Electric Vehicle Design: A Model-Based Market Analysis Framework With Application to a USA-China Comparison Study, *Design Science*, 2(e6), 1–42. <https://doi.org/10.1017/dsj.2016.7>
- Khan, H., Khan, I., & Binh, T. T. (2020). The heterogeneity of renewable energy consumption, carbon emission and financial development in the globe: A panel quantile regression approach. *Energy Reports*, 859-867.

- Kashyap, S., Kabra, S., & Kandasubramanian, B. (2020). Graphene aerogel-based phase changing composites for thermal energy storage systems. *Journal of Materials Science*, 55(10), 4127–4156. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-04325-7>
- Kotsyubynsky, V. O., Boychuk, V. M., Budzulyak, I. M., Rachiy, B. I., Hodlevska, M. A., Kachmar, A. I., & Hodlevsky, M. A. (2021). Graphene oxide synthesis using modified Tour method. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 12(3). <https://doi.org/10.1088/2043-6262/ac204f>
- Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., & Hone, J. (2008). Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science (New York, N.Y.)*, 321(5887), 385–388. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1157996>
- Liang, Zeng., Taizheng, Wu., Ting, Ye., Tangming, Mo., Rui, Qiao., Guang, Feng. (2021). Modeling galvanostatic charge–discharge of nanoporous supercapacitors. doi: 10.21203/RS.3.RS-488710/V1
- Li, B., Dai, F., Xiao, Q., Yang, L., Shen, J., Zhang, C., & Cai, M. (2016). Nitrogen-doped activated carbon for a high energy hybrid *Supercapacitor*. *Energy & Environmental Science*, 9(1), 102–106. <https://doi.org/10.1039/C5EE03149D>
- Li, K., Li, J., Wang, L., Li, X., Yang, X., & Lü, W. (2022). Flexible Zn-ion hybrid *Supercapacitor* enabled by N-Doped MnO₂ cathode with high energy density and ultra-long cycle life. *Journal of Alloys and Compounds*, 928, 167153. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167153>
- Libich, J., Máca, J., Vondrák, J., Čech, O., & Sedlářiková, M. (2018). *Supercapacitors: Properties and applications*. *Journal of Energy Storage*, 17, 224–227. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2018.03.012>
- 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>
- Liu, J., Zhao, Y., Li, X., Wang, C., Zeng, Y., Yue, G., & Chen, Q. (2018). CuCr₂O₄@rGO Nanocomposites as High-Performance Cathode Catalyst for Rechargeable Lithium–Oxygen Batteries. *Nano-Micro Letters*, 10(2), 22. <https://doi.org/10.1007/s40820-017-0175-z>
- Lu, Y. F., Lo, S. T., Lin, J. C., Zhang, W., Lu, J. Y., Liu, F. H., Tseng, C. M., Lee, Y. H., Liang, C. te, & Li, L. J. (2013). Nitrogen-doped graphene sheets grown by chemical vapor deposition: Synthesis and influence of nitrogen impurities on carrier transport. *ACS Nano*, 7(8), 6522–6532. <https://doi.org/10.1021/NN402102Y>
- Lu, Z. J., Bao, S. J., Gou, Y. T., Cai, C. J., Ji, C. C., Xu, M. W., Song, J., & Wang, R. (2013). Nitrogen-doped reduced-graphene oxide as an efficient metal-free electrocatalyst for oxygen reduction in fuel cells. *RSC Advances*, 3(12), 3990–3995. <https://doi.org/10.1039/C3RA22161J>
- Lu, L., Xu, S., An, J., & Yan, S. (2016). Electrochemical performance of CNTs/RGO/MnO₂ composite material for supercapacitor. *Nanomaterials and Nanotechnology*, 6, 184798041666368. <https://doi.org/10.1177/1847980416663687>
- Locci-Lopez, D., Zhang, R., Oyem, A., & Castagna, J. P. (2018). The multiscale Fourier transform. *The Multi-Scale Fourier Transform*. <https://doi.org/10.1190/segam2018-2994723.1>
- Ma, S.-S., Xu, P., Cai, Z.-L., Li, Q., Ye, Z.-L., & Zhou, Y.-M. (2018). Template-Assisted Hydrothermal Growth of One-Dimensional Zinc Oxide Nanowires for Photocatalytic Application. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 18(7), 5113–5118. <https://doi.org/10.1166/jnn.2018.15312>
- Manikandan, S. Bifunctional activities of phosphorus doped MnO₂ with activated

- Maqbool, M., Asif, M., Yousaf, M., Zhang, Y. F., Aftab, W., Ali, I., Guo, H., Abid, A. Y., & Bai, S. (2020). Microwaves heating strategy to synthesize few layer graphene for polymer composites towards thermal and electrical applications. *Composites Science and Technology*, 200, 108402. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2020.108402>
- McCloskey, B. D. (2015). Expanding the Ragone Plot: Pushing the Limits of Energy Storage. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 6(18), 3592–3593. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.5b01813>
- Muzaffar, A., Ahamed, M. B., Deshmukh, K., & Thirumalai, J. (2019). A review on recent advances in hybrid *Supercapacitors*: Design, fabrication and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 123–145. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.026>
- Mehar, S., Rémy, G., Zeadally, S., & Senouci, S.M. (2015). Smart Management System for a Fleet of Electric Vehicles. *IEEE Transaction Intelligent Transportation Systems* 16(3), 1401–1414
- Nurdiansah, H., Susanti, D., Purwaningsih, H., Tsai, D. S., & Noerochiem, L. (2019). Pengaruh Waktu Ultrasonikasi terhadap Sifat Kapasitif Material Reduced Graphene Oxide sebagai Elektroda Superkapasitor. *Jurnal IPTEK*, 23(1), 9–16. <https://doi.org/10.31284/J.IPTEK.2019.V23I1.425>
- Ou, X., Lei, S., Zhang, X., Wan, K., Wang, Y., Zhou, W., Xiao, Y., & Cheng, B. (2018). Hydrothermal growth of ferrous hydroxide terephthalate as a new positive electrode material for *Supercapacitors*. *Dalton Transactions*, 47(35), 12056–12060. <https://doi.org/10.1039/C8DT02377H>
- Papageorgiou, D. G., Kinloch, I. A., & Young, R. J. (2015). Graphene/elastomer nanocomposites. *Carbon*, 95, 460–484. <https://doi.org/10.1016/J.CARBON.2015.08.055>
- Piao, M., Chu, J., Wang, X., Chi, Y., Zhang, H., Li, C., Shi, H., & Joo, M. K. (2017). Hydrothermal synthesis of stable metallic 1T phase WS₂ nanosheets for thermoelectric application. *Nanotechnology*, 29(2), 025705. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/AA9BFE>
- Pokharel, J., Gurung, A., Baniya, A., He, W., Chen, K., Pathak, R., Lamsal, B. S., Ghimire, N., & Zhou, Y. (2021b). MOF-derived hierarchical carbon network as an extremely-high-performance supercapacitor electrode. *Electrochimica Acta*, 394, 139058. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.139058>
- Priyanka, P., Dixit, A., & Mali, H. S. (2017). High-Strength Hybrid Textile Composites with Carbon, Kevlar, and E-Glass Fibers for Impact-Resistant Structures. *A Review. Mechanics of Composite Materials*, 53(5), 685–704. <https://doi.org/10.1007/s11029-017-9696-2>
- Purwaningsih, H., Suari, N. M. I. P., Widiyastuti, W., & Setyawan, H. (2022). Preparation of rGO/MnO₂ Composites through Simultaneous Graphene Oxide Reduction by Electrophoretic Deposition. *ACS Omega*, 7(8), 6760–6767. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c06297>
- Putri, D. F., Ritonga, H. M., Murdiati, V., & Zainul, R. (n.d.). *A REVIEW WHAT IS HYDROTHERMAL ?* <https://doi.org/10.31227/OSF.IO/DM56C>
- Ren, D., Li, X., Zhao, X., Liu, B., Yang, Z., He, J., Li, T., & Pan, P. (2022). Development and evaluation of Zn²⁺ ions hybrid *Supercapacitor* based on Zn_xMnO₂-CNTs cathode. *Applied Energy*, 324, 119730. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119730>
- Safitri, D. A., Susanti, D., & Nurdiansah, H. (2017). Analisis Pengaruh Doping Nitrogen Terhadap Sifat Kapasitif Superkapasitor Berbahan Graphene. *Jurnal Teknik ITS*, 6(1). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v6i1.21409>
- Sagadevan, S., Marlinda, A. R., Chowdhury, Z. Z., Wahab, Y. B. A., Hamizi, N. A., Shahid, M. M., Mohammad, F., Podder, J., & Johan, M. R. (2021). Fundamental electrochemical

- energy storage systems. In *Advances in Supercapacitor and Supercapattery* (pp. 27–43). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819897-1.00001-X>
- Şahin, M., Blaabjerg, F., & Sangwongwanich, A. (2020). *A review on Supercapacitor materials and developments (Turkish Journal of Materials)*. 5, 10–24.
- Sahayaraj, A. F., Muthukrishnan, M., Kumar, R. P., Ramesh, M., & Kannan, M. R. (2021). PLA based Bio Composite reinforced with natural fibers – Review. *IOP Conference Series*, 1145(1), 012069. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1145/1/012069>
- Sahu, V., Grover, S., Tulachan, B., Sharma, M., Srivastava, G., Roy, M., Saxena, M., Sethy, N., Bhargava, K., Philip, D., Kim, H., Singh, G., Singh, S. K., Das, M., & Sharma, R. K. (2015). Heavily nitrogen doped, graphene *Supercapacitor* from silk cocoon. *Electrochimica Acta*, 160, 244–253. <https://doi.org/10.1016/J.ELECTACTA.2015.02.019>
- Sahoo, D., Shakya, J., Choudhury, S., Roy, S. S., Devi, L., Singh, B., Srivastava, P. K., & Kaviraj, B. (2022). High-Performance MnO₂ Nanowire/MoS₂ Nanosheet Composite for a Symmetrical Solid-State Supercapacitor. *ACS Omega*, 7(20), 16895–16905. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c06852>
- Saini, S., Chand, P., & Joshi, A. (2022). Enhanced electrochemical behavior of Mg-doped MnO₂ for *Supercapacitor* application. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.041>
- Sari, F. N. I., & Ting, J. M. (2015). One step microwaved-assisted hydrothermal synthesis of nitrogen doped graphene for high performance of *Supercapacitor*. *Applied Surface Science*, 355, 419–428. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2015.07.123>
- 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, 135368. <https://doi.org/10.1016/J.ELECTACTA.2019.135368>
- Sharma, H., Khan, I., Kumari, A., & Prakash, P. (2021). Super-Capacitor based Electric Vehicle Electric Vehicle Charging. ResearchGate.
- Shiraishi, & Soshi. (2016). *Encyclopedia of Nanotechnology Electric Double layer Capacitor* (Vol. 2).
- Sokolnikov, A. U. (2017). Graphene for defense and security. *Graphene for Defense and Security*, 1–270. <https://doi.org/10.1201/9781315120379/GRAPHENE-DEFENSE-SECURITY-ANDRE-SOKOLNIKOV>
- Tam, D., Ruan, S., Gao, P., & Yu, T. (2012). High-performance ballistic protection using polymer nanocomposites. In Elsevier eBooks (pp. 213–237). <https://doi.org/10.1533/9780857095572.2.213>
- Tamang, S., Rai, S., Bhujel, R., Bhattacharyya, N. K., Swain, B. P., & Biswas, J. (2023). A concise review on GO, rGO and metal oxide/rGO composites: Fabrication and their supercapacitor and catalytic applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 947, 169588.
- Tehrani, Z., Thomas, D. J., Korochkina, T., Phillips, C. O., Lupo, D., Lehtimäki, S., O'Mahony, J., & Gethin, D. T. (2017). Large-area printed *Supercapacitor* technology for low-cost domestic green energy storage. *Energy*, 118, 1313–1321. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.019>
- Takahiro Maruyama, in *Handbook of Carbon-Based Nanomaterials*, 2021
- Tao, T., Zhang, L., Jiang, H., & Li, C. (2014). Functional Carbon Nanotube/Mesoporous Carbon/MnO₂Hybrid Network for High-Performance Supercapacitors. *Journal of Nanomaterials*, 2014, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2014/568561>

- Tian, Z., Li, H., Yang, W., Jian, S., Zhang, C., & Jiang, S. (2023). Fabrication of manganese oxides/carbon composites for high energy density asymmetric supercapacitor. *Diamond and Related Materials*, 131, 109582. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109582>
- Thirumurugan, A., Dhanabalan, S. S., Shanavas, S., Udayabhaskar, R., Morel, M. J., Dineshbabu, N., Ravichandran, K., Schmidt-Mende, L., & Ramadoss, A. (2023). Hybrid supercapacitors, formation, and new advances with different electrochemical electrodes based on layered double hydroxides (LDHs), metal–organic framework (MOF) materials, smart supercapacitors.
- TriDung(T.-D.) NgoTriDung(T.-D.) Ngo (2020). Introduction to Composite Materials DOI: 10.5772/intechopen.91285 In book: Fiber Composites [Working Title] LicenseCC BY 3.0
- Vangari, M., Pryor, T., & Jiang, L. (2013). Supercapacitors: Review of Materials and Fabrication Methods. *Journal of Energy Engineering*, 139(2), 72–79. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000102](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000102)
- 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, 109508. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.109508>
- Von, W., Berutu, A., Pembimbing, D., Susanti, D., Hariyati, M. T., Si, S., & Jurusan, M. S. (2016). *ANALISIS PENGARUH TEMPERATUR HIDROTERMAL TERHADAP SIFAT KAPASITIF SUPERKAPASITOR BERBAHAN GRAPHENE*.
- Wang, G., Zhang, L., & Zhang, J. (2012). A review of electrode materials for electrochemical *Supercapacitors*. *Chemical Society Reviews*, 41(2), 797–828. <https://doi.org/10.1039/C1CS15060J>
- Wang, K., Li, L., Zhang, T., & Liu, Z. (2014). Nitrogen-doped graphene for *Supercapacitor* with long-term electrochemical stability. *Energy*, 70, 612–617. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2014.04.034>
- Wang, Y., Shi, Z., Huang, Y., Ma, Y., Wang, C., Chen, M., & Chen, Y. (2009). *Supercapacitor* Devices Based on Graphene Materials. *The Journal of Physical Chemistry C*, 113(30), 13103–13107. <https://doi.org/10.1021/jp902214f>
- Winter, M., & Brodd, R. J. (2004). What Are Batteries, Fuel Cells, and *Supercapacitors*? *Chemical Reviews*, 104(10), 4245–4270. <https://doi.org/10.1021/cr020730k>
- Wu, D., Xie, X., Zhang, Y., Zhang, D., Du, W., Zhang, X., & Wang, B. (2020). MnO₂/Carbon composites for supercapacitor: Synthesis and electrochemical performance. *Frontiers in Materials*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00002>
- Xin He, Xiaoling Xu, Guangxu Bo and Yunjun Yan. (2020). Studies on the effects of different multiwalled carbon nanotube functionalization techniques on the properties of bio-based hybrid non-isocyanate polyurethane
- Yan, J., Fan, Z., Wei, T., Qian, W., Zhang, M., & Wei, F. (2010). Fast and reversible surface redox reaction of graphene-MnO₂ composites as *Supercapacitor* electrodes. *Carbon*, 48(13), 3825–3833. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.06.047>
- Yang, G., & Park, S. J. (2019). Conventional and microwave hydrothermal synthesis and application of functional materials: A review. In *Materials* (Vol. 12, Issue 7). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma12071177>
- Yang, J., Duan, X., Guo, W., Li, D., Zhang, H., & Zheng, W. (2014). Electrochemical performances investigation of NiS/rGO composite as electrode material for *Supercapacitors*. *Nano Energy*, 5, 74–81. <https://doi.org/10.1016/J.NANOEN.2014.02.006>

- Yassine, M., & Fabris, D. (2017). Performance of commercially available supercapacitors. ResearchGate.https://www.researchgate.net/publication/331999150_Performance_of_Commercially_Available_Supercapacitors
- Yoon, B. J., Jeong, S. H., Lee, K. H., Seok Kim, H., Gyung Park, C., & Hun Han, J. (2004). Electrical properties of electrical double layer capacitors with integrated carbon nanotube electrodes. *Chemical Physics Letters*, 388(1–3), 170–174. <https://doi.org/10.1016/J.CPLETT.2004.02.071>
- Zhang, M., Yang, D., & Li, J. (2020). Supercapacitor performances of MnO₂ and MnO₂/reduced graphene oxide prepared with various electrodeposition time. *Vacuum*, 178, 109455. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109455>
- Zhao, X., Mao, L., Cheng, Q., Li, J., Liao, F., Yang, G., Xie, L., Zhao, C., & Chen, L. (2020). Two-dimensional Spinel Structured Co-based Materials for High Performance Supercapacitors: A Critical Review. *Chemical Engineering Journal*, 387, 124081. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124081>
- Zhou, L., Li, C., Liu, X., Zhu, Y., Wu, Y., & van Ree, T. (2018). Metal oxides in Supercapacitors. *Metal Oxides in Energy Technologies*, 169–203. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811167-3.00007-9>
- Zhou, Y., Cheng, X., Tynan, B., Sha, Z., Huang, F., Islam, M. S., Zhang, J., Rider, A. N., Dai, L., Chu, D., Wang, D., Han, Z., & Wang, C. (2021). High-performance hierarchical MnO₂/CNT electrode for multifunctional supercapacitors. *Carbon*, 184, 504–513. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.08.051>
- Zhou, Y., Chen, F., Arandiyani, H., Guan, P., Liu, Y., Wang, Y., Zhao, C., Wang, D., & Chu, D. (2021a). Oxide-based cathode materials for rechargeable zinc ion batteries: Progresses and challenges. *Journal of Energy Chemistry*, 57(May 2018), 516–542. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.08.038>
- Zhou, Y., Chen, F., Arandiyani, H., Guan, P., Liu, Y., Wang, Y., Zhao, C., Wang, D., & Chu, D. (2021b). Oxide-based cathode materials for rechargeable zinc ion batteries: Progresses and challenges. *Undefined*, 57, 516–542. <https://doi.org/10.1016/J.JECHEM.2020.08.038>
- Zhu, Y., Murali, S., Cai, W., Li, X., Suk, J. W., Potts, J. R., & Ruoff, R. S. (2010). Graphene and Graphene Oxide: Synthesis, Properties, and Applications. *Advanced Materials*, 22(35), 3906–3924. <https://doi.org/10.1002/adma.201001068>
- ziz Shujahadeen, B. Dannoun, Elham M.A. Murad, Ary R. Mahmoud, Khaled H. Brza, M.A. Nofal, Muaffaq M. Elsayed, Khaled A. Abdullah, Sozan N. Hadi, Jihad M. Kadir, M.F.Z. Influence of scan rate on CV Pattern: Electrical and electrochemical properties of plasticized Methylcellulose: Dextran (MC:Dex) proton conducting polymer electrolytes

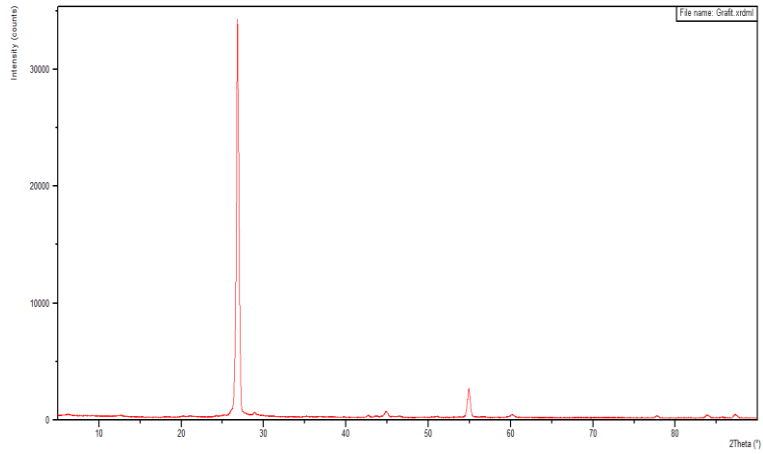
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

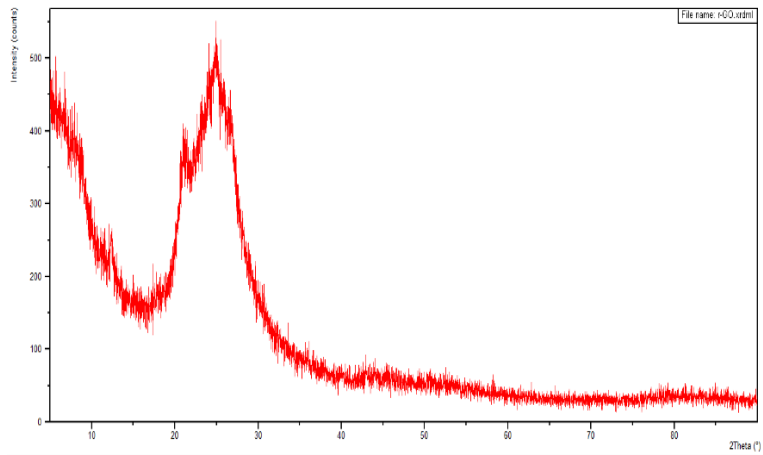
Lampiran 1

Hasil Pengujian XRD

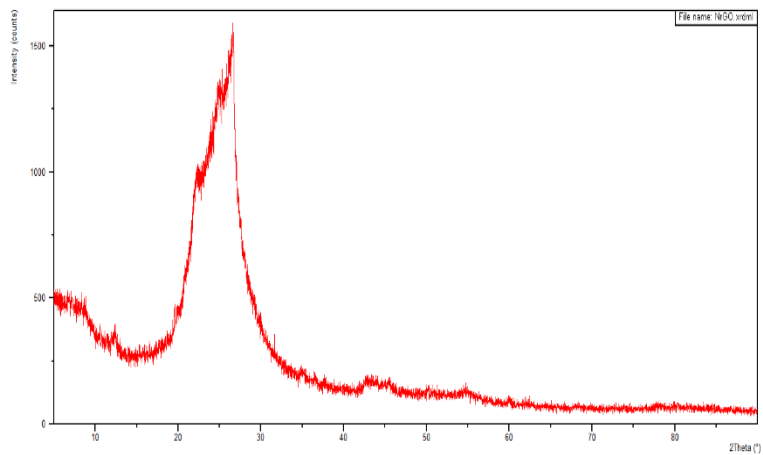
a. Grafit



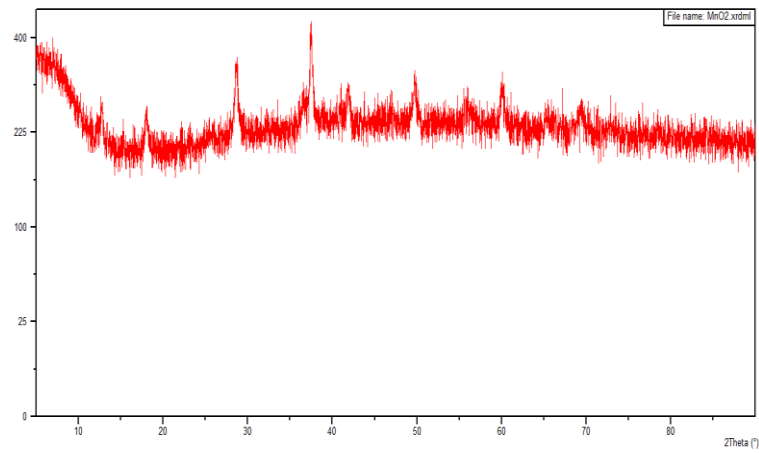
b. rGO



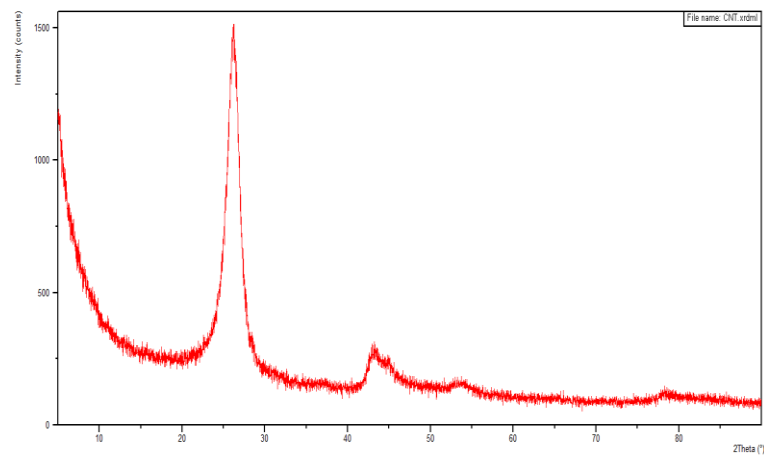
c. N-rGO



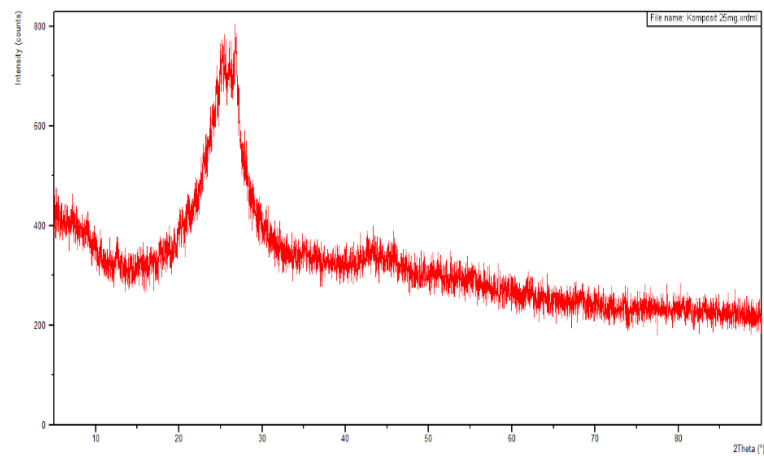
d. MnO_2



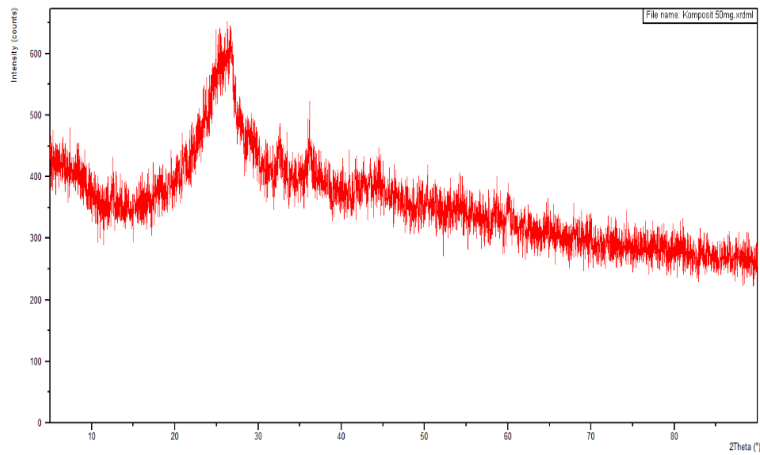
e. CNT



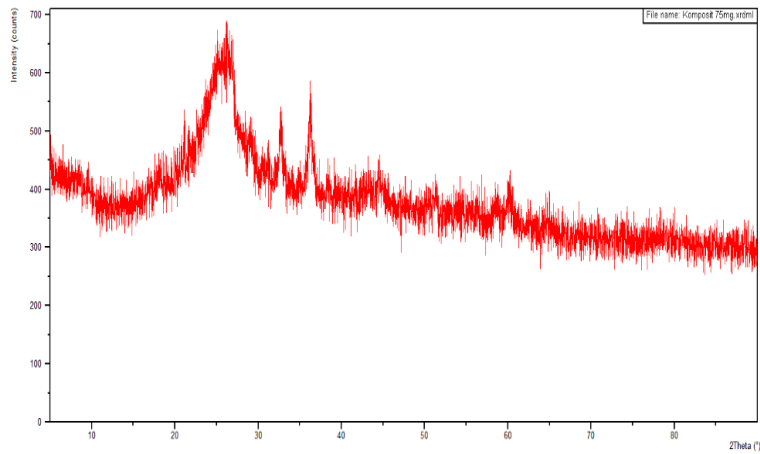
F. K25



g. K50



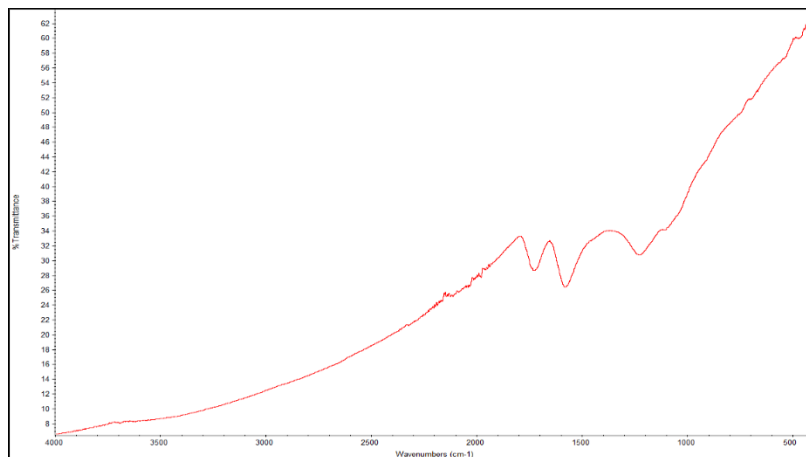
H. K75



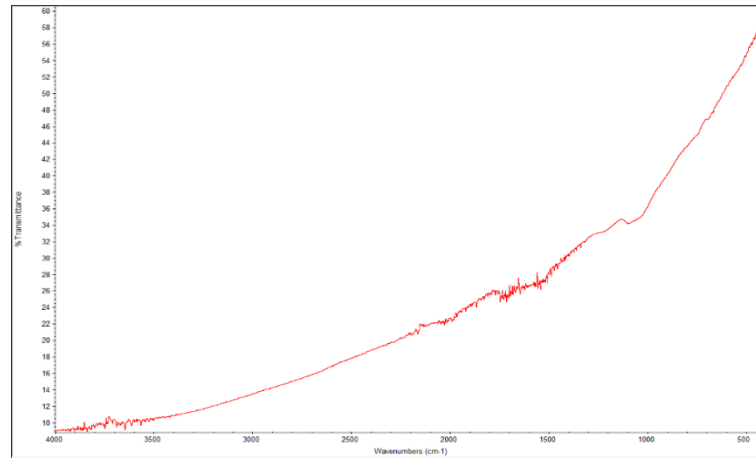
Lampiran 2

Hasil Pengujian FTIR

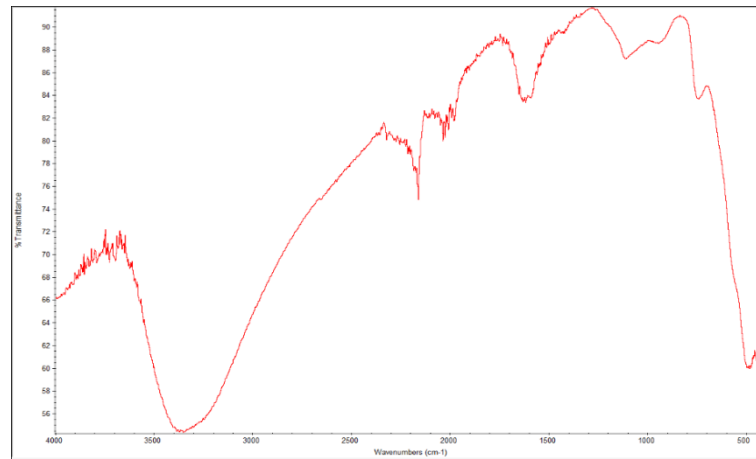
a. rGO



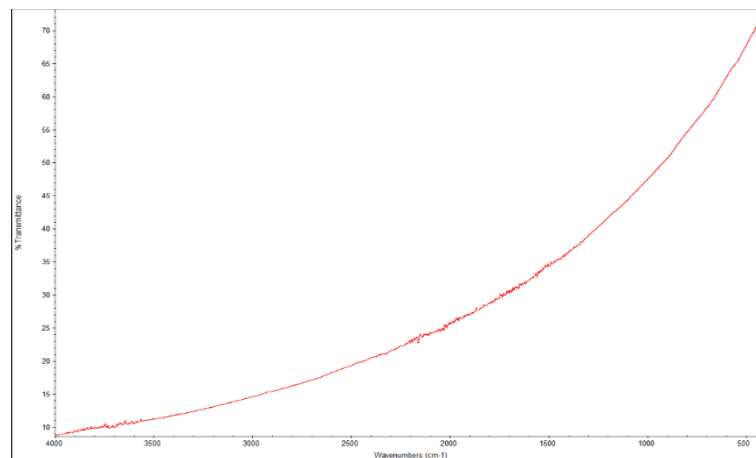
b. N-rGO



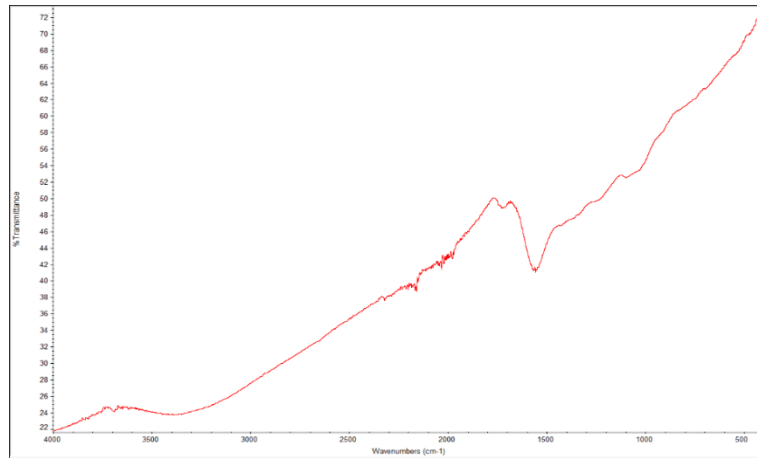
c. MnO₂



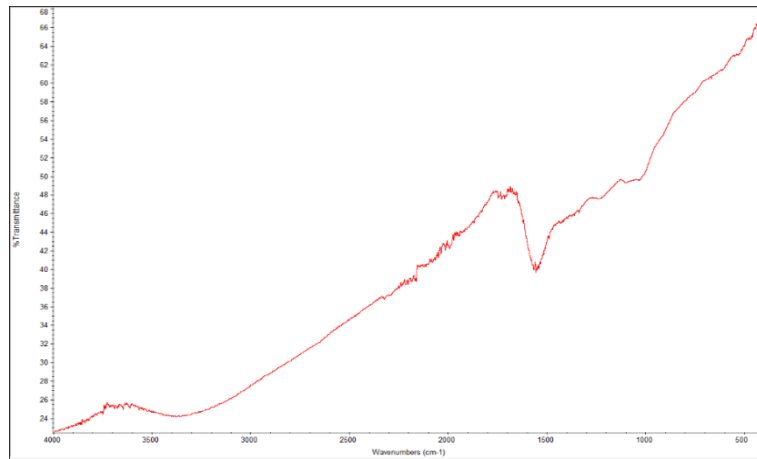
d. CNT



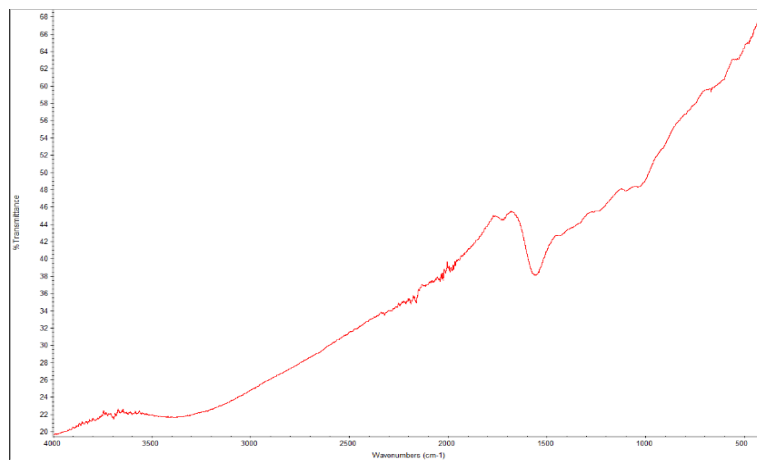
e. K25



f. K50

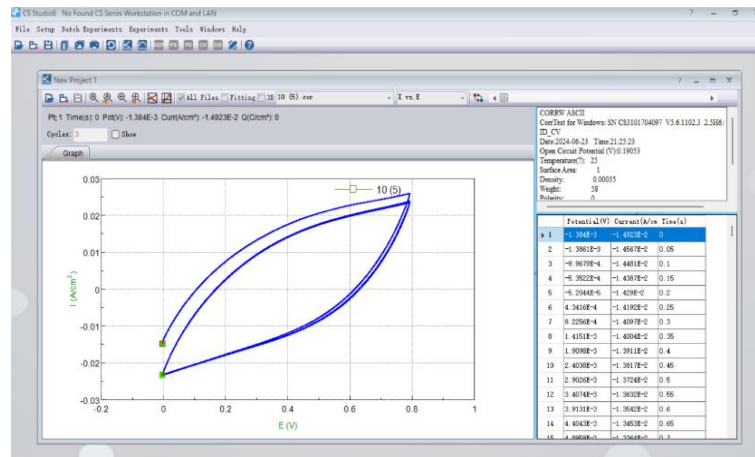


g. K75



Lampiran 3
Hasil Pengujian CV

Hasil Pengujian CV material K50 0.005 V/s



Contoh hasil perhitungan pengujian kapasitansi, diperoleh data sebagai berikut

Scan Rate: 5 mv/s = 0.005 V/s

Luasan Area: 0.0167437

Massa yang terdeposisi: 0.00794

Potential Window: 0.8 V

Dengan menggunakan rumus tersebut diperoleh perhitungan sebagai berikut

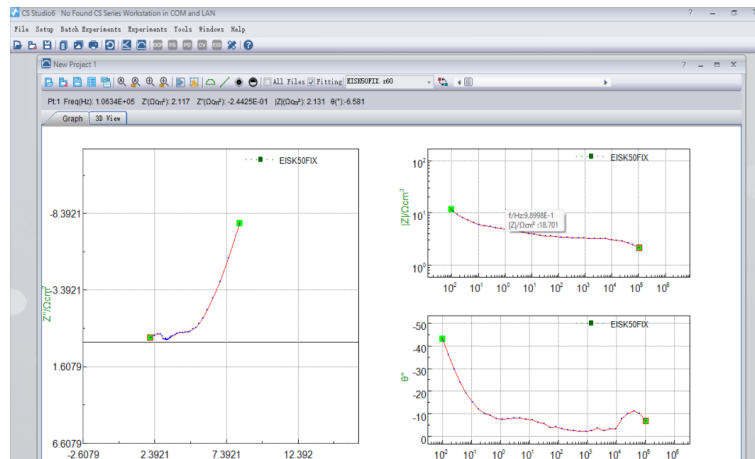
$$C = \frac{0.016743}{2 \times 0.8 \times 0.00794 \times 0.005}$$

$$C = \frac{0.016743}{0.00006352}$$

$$C = 263.564 \text{ F/g}$$

Hal yang sama dapat dilakukan untuk pengujian CV dengan *scan rate* masing-masing pengujian material.

Lampiran 4
Hasil Pengujian EIS
Hasil Pengujian EIS material K50



Contoh Perhitungan Kapasitansi

Diperoleh data sebagai berikut :

f (frekuensi) = 0.01 Hz

Z'' (impedansi imajiner) = 10.45 Ω/cm^2

M (massa material aktif) = 0.00794 g

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

Dengan menggunakan rumus tersebut, dapat dihitung nilai kapasitansi sebagai berikut:

$$C = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 0.01 \times (10.45) \times 0.00794}$$

$$C = 261.190 \text{ F/g}$$

Hal yang sama dapat dilakukan pada variasi material yang lain dengan menggunakan metode yang sama.

Contoh Perhitungan Konduktivitas

Diperoleh data sebagai berikut

L (ketebalan elektroda) = 1.5 mm = 0.0015 m

$|Z|$ (impedansi) = 18.933 Ωcm^2

A (luas penampang) = 1 $\text{cm}^2 = 0.0001 \text{ m}^2$

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

Dengan menggunakan rumus tersebut, dapat dihitung nilai konduktivitas sebagai berikut:

$$K = \frac{0.0015}{18.933 \times 0.0001}$$

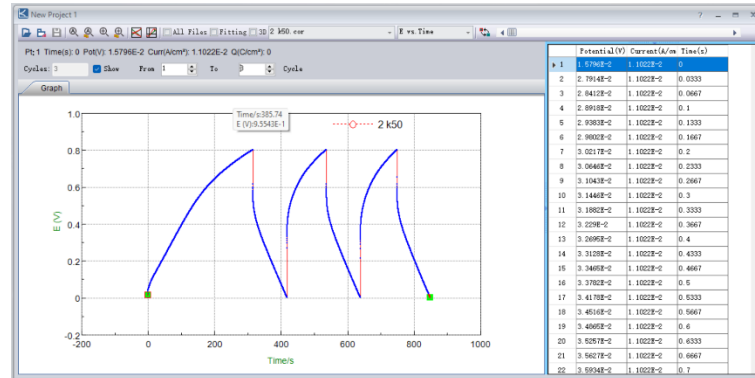
$$K = 0.96197 \text{ Sm}^{-1}$$

Hal yang sama dapat dilakukan pada variasi material yang lain dengan menggunakan metode yang sama

Lampiran 5

Hasil Pengujian GCD

Hasil Pengujian GCD K50 pada 2 A/g



Contoh Perhitungan Kapasitansi

Diperoleh data sebagai berikut:

I (current density) = 2 A/g

t (waktu discharge) = 102.23 s

V (potential window) = 0.8 V

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

Dengan menggunakan rumus tersebut, dapat dihitung nilai konduktivitas sebagai berikut:

$$C = \frac{0.25 \times 102.23}{0.8}$$

$$C = 255.575 \text{ F/g}$$

Hal yang sama dapat dilakukan pada variasi material yang lain dengan menggunakan metode yang sama

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam penulisan laporan tugas akhir. Penulis mendapatkan dukungan dari berbagai pihak, hal ini membuat penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada para pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan, diantaranya :

1. Kedua orang tua saya yang telah memberikan dukungan secara moral, serta kepada saudara saya yang telah memberikan saran dan dukungan selama proses ini.
2. Kepada Bapak Haniffudin Nurdiansah dan Ibu Diah Susanti sebagai dosen pembimbing dan ko-pembimbing yang telah memberikan banyak bimbingan dan ilmu selama proses ini.
3. Kepada Ibu Vania Pramita sebagai dosen wali penulis selama 4 tahun masa perkuliahan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS ITS.
4. Rekan-rekan TA Pak Hanif dan TA Superkapasitor, yaitu Alamanda, Yusuf Bayu (Ybay), Reza Maulana (Bocil), Fathan Haryo (Obik), Josua Budiman yang telah berjuang bersama saat penelitian dan penulisan Tugas Akhir ini.
5. Kepada Mba Yenny, Mas Syafri, Mas Taras, Mas Lamda dan anggota-anggota laboratorium Kimia Material yang telah menemani penulis selama penelitian Tugas Akhir.
6. Kepada teman-teman jagung, Pakde (Cak So), Ucup, Bejo, Kiki, Bagus, yang telah menemani penulis disaat masa jenuh dan memberikan dukungan selama penelitian dan penulisan ini.
7. Serta teman-teman basket SMA, kuliah dan komunitas yang memberikan Kesehatan fisik dan rohani penulis.
8. Serta kepada semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu.
9. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Institut Teknologi Sepuluh Nopember atas pendanaan dari Hibah Dana Lokal ITS Skema Penelitian Kerjasama Antar Perguruan Tinggi tahun 2024 yang mendukung penelitian ini.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Thierry Rayhan Wisnu Putra. Merupakan anak kedua dari dua bersaudara yang lahir pada tanggal 29 Maret 2002 di Kota Semarang Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN Tambakaji 04 Semarang pada tahun 2008 – 2012 dan SDN Menanggal 601 Surabaya pada tahun 2012-2014 Kemudian penulis melanjutkan jenjang pendidikannya ke SMP Negeri 22 Surabaya pada tahun 2014–2017. Setelah itu penulis menempuh pendidikan atas di SMA Negeri 15 Surabaya pada tahun 2017 – 2020. Setelah itu, penulis melanjutkan studi sarjananya di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS ITS mulai tahun 2020. Selama menempuh perkuliahan penulis pernah mengikuti beberapa pelatihan diantaranya LKMM Pra TD. Penulis pernah mengikuti beberapa organisasi seperti Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi sebagai Staff

Kewirausahaan pada periode 2022/2023 dan Kepala Divisi Kewirausahaan 2023/2024. Selain itu beberapa kepanitiaan lain. Selain pengalaman dikampus, penulis juga pernah mengikuti kegiatan keprofesian seperti melakukan kerja praktek di PT Industri Kereta Api (Persero) di bagian Pengendalian Kualitas Produksi dan pengalaman Magang pada perusahaan PT API (Aneka Patra Integritas). Untuk menyelesaikan pendidikan S-1, penulis melakukan penelitian dalam bidang studi Material Inovatif dengan tugas Akhir berjudul “ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN MASSA CNT TERHADAP SIFAT KAPASITIF SUPERKAPASITOR HYBRID BERBAHAN KOMPOSIT $MnO_2/N-rGO/CNT$ ” Penulis dapat dihubungi di email Thierryrayhanwisnu@gmail.com dan nomor handphone +6281235119083

