TUGAS AKHIR – TL184834

REVIEW: PENGARUH METODE SINTESA KOMPOSIT CNT/RuO_2 TERHADAP MORFOLOGI DAN SIFAT KAPASITIF SUPERKAPASITOR

GATRA WIRADIKA APRILIAN
NRP. 02511640000007

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

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

TUGAS AKHIR – TL 184834

REVIEW: PENGARUH METODE SINTESA KOMPOSIT CNT/RuO_2 TERHADAP MORFOLOGI DAN SIFAT KAPASITIF SUPERKAPASITOR

GATRA WIRADIKA APRILIAN
NRP. 02511640000007

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

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

FINAL PROJECT – TL 184834

REVIEW: THE EFFECT OF CNT/RuO_2 COMPOSITE SYNTHESIS METHOD ON THE MORPHOLOGY AND SUPERCAPACITOR CAPACITIVE PROPERTIES

GATRA WIRADIKA APRILIAN
NRP. 02511640000007

Supervisor
Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.
Diah Susanti, S.T., M.T., Ph. D.

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(*This page is intentionally left blank*)

REVIEW: PENGARUH METODE SINTESA KOMPOSIT CNT/RuO_2 TERHADAP MORFOLOGI DAN SIFAT KAPASITIF SUPERKAPASITOR

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
GATRA WIRADIKA APRILIAN
NRP 02511640000007

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T. .....(Pembimbing I)
2. Diah Susanti, S.T., M.T., Ph. D. ..... (Pembimbing II)

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
DEPARTEMEN
TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI

SURABAYA
Juli 2020

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

REVIEW: PENGARUH METODE SINTESA KOMPOSIT CNT/RuO_2 TERHADAP MORFOLOGI DAN SIFAT KAPASITIF SUPERKAPASITOR

Nama : Gatra Wiradika Aprilian
NRP : 02511640000007
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing I : Haniffudin Nurdiansah, S.T.,
Pembimbing II : Diah Susanti, S.T., M.T., Ph. D.

Abstrak

Carbon nanotubes (CNT) memiliki sifat mekanik yang sangat baik dan konduktivitas listrik yang baik sehingga dapat diaplikasikan di bidang elektronik. Pada review paper ini dibahas CNT yang dikompositkan dengan ruthenium oxide (RuO_2) karena RuO_2 reversibilitasnya baik, kapasitansi spesifik bernilai tinggi dan memiliki cycle live yang sangat panjang. Tujuan review paper ini yaitu menganalisis pengaruh metode sintesa komposit CNT/RuO_2 terhadap morfologi dan sifat kapasitif superkapasitor. Dalam review paper ini metode yang dibahas adalah metode hidrotermal, microwave-assisted, catodic deposition, chemical reduction, dan atomic layer deposition. Dari semua jurna denganl metode sintesis yang berbeda menunjukkan bahwa bentuk morfologi komposit CNT/RuO_2 adalah CNT silinder yang jelas berbentuk bundel nanotube dan terlapisi oleh RuO_2 secara homogen di permukaan dan juga ada beberapa partikel RuO_2 yang terperangkap dalam struktur tubular CNT dan rata-rata diameter RuO_2 yang melapisinya yaitu sekitar 1-6 nm. Selanjutnya didapatkan nilai spesifik kapasitansi yang paling besar dari komposit CNT/RuO_2 yaitu menggunakan metode sintesis hidrotermal. Pada metode hidrotermal tersebut, rata – rata nilai spesifik kapasitansi yang didapat sebesar 900 – 1500 F/g.

Kata Kunci: ***CNT, RuO_2 , Metode Sintesis, Superkapasitor***

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

REVIEW: THE EFFECT OF CNT / RuO_2 COMPOSITE SYNTHESIS METHOD ON THE MORPHOLOGY AND SUPERCAPACITOR CAPACITIVE PROPERTIES

Student Name : Gatra Wiradika Aprilian
NRP : 02511640000007
Department : Material and Metallurgical Engineering
Supervisor : Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.
Co-Supervisor : Diah Susanti, S.T., M.T., Ph. D.

Abstract

Carbon nanotubes (CNT) have excellent mechanical properties and good electrical conductivity so that they can be applied in the electronics field. In this review paper discusses CNTs composite with ruthenium oxide (RuO_2) because RuO_2 has good reversibility, high specific capacitance and has a very long cycle life. The purpose of this paper review is to analyze the effect of CNT/RuO_2 composite synthesis methods on the morphology and capacitive properties of supercapacitors. In this paper review the methods discussed are hydrothermal, microwave-assisted, catodic deposition, chemical reduction, and atomic layer deposition methods. Of all journals with different synthesis methods, it is shown that the morphological form of CNT/RuO_2 composite is a cylindrical CNT that is clearly shaped in nanotube bundles and homogenized by RuO_2 on the surface and there are also some RuO_2 particles trapped in the CNT tubular structure and average RuO_2 diameter the layers which are around 1-6 nm. Furthermore, the highest specific capacitance value obtained from CNT/RuO_2 composites is using the hydrothermal synthesis method. In the hydrothermal method, the average specific capacitance value obtained is 900 - 1500 F/g.

Keywords: ***CNT, RuO_2 , Synthesis Methods, Supercapacitors***

(*This page is intentionally left blank*)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat limpahan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir dengan judul **" Review: Pengaruh Metode Sintesa Komposit CNT/RuO_2 terhadap Morfologi dan Sifat Kapasitif Superkapasitor "**.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, laporan ini tidak dapat diselesaikan secara optimal dan tepat waktu. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada pihak – pihak antara lain :

1. Allah S.W.T. yang merupakan Rahmatan Lil'Alamin
2. Kedua orang tua dan saudara yang terus mendoakan dan memotivasi dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
3. Bapak Haniffudin Nurdiansah S. T., M. T. selaku dosen pembimbing yang telah membimbing dan memberi banyak ilmu pengetahuan dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
4. Ibu Diah Susanti S. T., M. T., Ph. D. selaku dosen pembimbing yang telah membimbing dan memberi banyak ilmu pengetahuan dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
5. Bapak Ir. Moh. Farid, DEA. selaku dosen wali yang memberikan bimbingan dari awal perkuliahan.
6. Dosen – dosen dan Karyawan Departemen Teknik Material yang telah membantu dalam perkuliahan dari awal hingga saat ini.
7. Elvira Sulcha Nasucha selaku patner Tugas Akhir saya yang telah membantu dan berdiskusi dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
8. MT18 yang telah menjadi rumah kedua saya disaat susah maupun senang selama 4 tahun ini.
9. UKM Bridge ITS yang telah memberikan saya kesempatan untuk berkembang dalam mengatur sebuah oraganisasi dan juga berkembang dalam hal prestasi.

10. Dan seluruh pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir.

Surabaya, 26 Juli 2020
Penulis

Gatra Wiradika Aprilian

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL ..... **i**
LEMBAR PENGESAHAN ..... **v**
ABSTRAK ..... **vii**
ABSTRACT ..... **ix**
KATA PENGANTAR ..... **xi**
DAFTAR ISI ..... **xiii**
DAFTAR GAMBAR ..... **xv**
DAFTAR TABEL ..... **xix**
BAB I PENDAHULUAN
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Perumusan Masalah 3
1.3 Batasan Masalah 3
1.4 Tujuan Penelitian 3
1.5 Manfaat Penelitian 3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA
2.1 Komposit 5
2.2 Carbon Nanotubes (CNT) 6
2.3 Ruthenium Oxide (RuO_2) 13
2.4 Superkapasitor 15
BAB III METODOLOGI **21**
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN
4.1 Hasil 25
4.1.1 Metode Hidrotermal 25
4.1.2 Metode Microwave-Assisted 31
4.1.3 Metode Catodic Deposition 36
4.1.4 Metode Chemical Reduction 41
4.1.5 Metode Atomic Layer Deposition 44
4.2 Pembahasan 47
4.2.1 Morfologi Komposit CNT/RuO_2 47
4.2.2 Sifat Kapasitif CNT/RuO_2 50
4.3 Kritisasi Jurnal 53
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan 57
5.2 Saran 57
DAFTAR PUSTAKA 59
LAMPIRAN 65
UCAPAN TERIMA KASIH 71
BIODATA PENULIS 73

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Material komposit.....5
Gambar 2.2 Struktur material CNT.....6
Gambar 2.3 Single Walled Carbon Nanotubes.....7
Gambar 2.4 Multi Walled Carbon Nanotubes.....7
Gambar 2.5 Hasil XRD CNT 12
Gambar 2.6 Hasil SEM CNT 13
Gambar 2.7 Gambar Struktur Ruthenium Oxide.....14
Gambar 2.8 Konfigurasi khas dari sel kapasitor ganda (EDLC) listrik (kanan) dibandingkan dengan kapasitansi berbasis elektrostatik dan elektrolitik (kiri). V dan E masing-masing adalah tegangan dan medan listrik antara elektroda. 16
Gambar 2.9 Proses charge-discharge pada superkapasitor 17
Gambar 2.10 Tipe kurva CV dari berbagai jenis superkapasitor: (A) untuk superkapasitor ideal; (B) untuk kapasitor ideal dengan resistansi internal; (C) untuk kapasitor dengan elektroda karbon berpori; (D) pengaruh reaksi redoks. I_C adalah arus kapasitif dan ΔU adalah voltase *delay* 18
Gambar 3.1 Diagram alir pembahasan jurnal.....22
Gambar 4.1 Hasil pengujian (a, b) TEM RuO_2; (d, e) h-RuO_2/CNTs; (c) HRTEM dari RuO_2 dan (f) h-RuO_2/CNTs.....26
Gambar 4.2 Hasil pengujian (a) CV h-RuO_2 dan h-RuO_2/CNT pada 10 mV/s dan (b) variasi spesifik kapasitansi dengan berbagai scan rate. 27
Gambar 4.3 Discharge curves (a) h-RuO2 dan (b) h-RuO2/ MWCNTs pada kepadatan arus yang berbeda. 28

Gambar 4.4 Hasil pengujian (a) SEM, (b) TEM, (c) HRTEM dari komposit CNT/RuO_2. 29
Gambar 4.5 Hasil Uji CV komposit CNT/RuO_2. 30
Gambar 4.6 Hasil uji GCD komposit CNT/RuO_2. 31
Gambar 4.7 Hasil pengujian (a) SEM; (b) TEM; dan (c) FTIR dari komposit CNT/RuO_2..... 32
Gambar 4.8 Hasil uji cv komposit RuO_2/CNT. 34
Gambar 4.9 Hasil uji TEM komposit CNT/RuO_2. 35
Gambar 4.10 Hasil pengujian (a) CV komposit CNT/RuO_2 pada *scan rate* 50 mVs^{-1} dan (b) CV komposit CNT/RuO_2 pada *scan rate* 200 mVs^{-1}. 36
Gambar 4.11 Proses pembuatan untuk micro-super super kapasitor. (a) Sputtering lapisan Ti / Au pada wafer kaca; (b) Membentuk kolektor arus logam interdigitated; (c) Membuat struktur mikro SU-8 interdigitated; (d) Mengisi komposit CNT dengan elektrodeposisi..... 37
Gambar 4.12 Hasil pengujian (a) SEM dan (b) TEM dari nanopomposit CNT/RuO_2 yang dielektrodeposisi selama 2000 detik. 38
Gambar 4.13 Hasil uji XRD nanokomposit RuO_2/CNT..... 39
Gambar 4.14 (a) Hasil uji CV dan (b) hasil spesifik kapasitansi dari CNT/RuO_2..... 40
Gambar 4.15 Hasil uji GCD komposit CNT/RuO_2. 41
Gambar 4.16 Hasil pengujian TGA dari SWCNT dan nanocomposite RuO_2/SWCNT. 42
Gambar 4.17 Hasil pengujian (a) TEM SWCNT dan (b) TEM nanocomposite RuO_2/SWCNT..... 42
Gambar 4.18 Hasil pengujian (a) CV SWCNT, (b) CV RuO_2/SWCNT pada scan rate yang berbeda dan (c) GCD SWCNT dan RuO_2/SWCNT. 43
Gambar 4.19 Ilustrasi atomic layer deposition RuO_2 yang dicoating dengan CNT..... 45

Gambar 4.20 Hasil pengujian (a) SEM *cross-sectional* (b) SEM Close-up dan (c) TEM dari komposit CNT/RuO_2. 46
Gambar 4.21 Hasil uji CV dari CNT dan komposit CNT/RuO_2. 47

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbedaan Sifat Pada Alotrofi Carbon Nanomaterial 10
Tabel 2.2 Perbandingan Beberapa Sifat Material 11
Tabel 3.1 Bahan dan Metode Sintesis 23
Tabel 4.1 Nilai kapasitansi komposit CNT/RuO2 51
Tabel 4.2 Data dan penjelasan hasil pengujian.....54
Tabel 4.3 Kelebihan dan kekurangan tiap metode sintesis.....55

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini permintaan energi dari produk elektronik, kendaraan listrik dan kendaraan listrik hibrida semakin meningkat. Di masa depan pengembangan untuk penelitian perangkat penyimpanan energi berkelanjutan sangat menjanjikan. Salah satu contoh penyimpanan energi yang menjanjikan adalah baterai dan superkapasitor. Selama ini baterai dianggap mempunyai kelemahan karena proses pengisiannya yang lama, dan juga terjadinya *voltage drop* yang menyebabkan penurunan performa dari baterai. Adanya superkapasitor yang dipasang paralel pada baterai menyebabkan peningkatan performa dari baterai, dan juga meningkatkan umur pakai dari baterai.

Mekanisme penyimpanan energi superkapasitor sendiri dibagi menjadi *Electric Double-Layer Capacitors* (EDLCs) dan *pseudocapacitors* (PCs). EDLCs menyimpan muatan dengan cara membentuk lapisan ganda elektrokimia (Helmholtz *layer*) yang terbentuk pada *interface* elektroda dan elektrolit. Sedangkan prinsip kerja *pseudocapacitors* bergantung pada reaksi redoks yang cepat dan sangat reversibel yang reaksinya terjadi pada bahan elektrodanya. *EDLC* dan *pseudocapacitor* bisa digabung membentuk superkapasitor *hybrid*. Namun, kerapatan energi superkapasitor jauh lebih rendah dari baterai, yang membatasi aplikasinya lebih lanjut. (Wang, dkk., 2019).

Superkapasitor tersusun atas elektroda potensial, separator dan pengumpul muatan berupa lembaran tipis stainless steel. Selama ini penelitian mengenai material yang digunakan pada superkapasitor sangat banyak. Salah satu contoh material yang digunakan sebagai pengisi elektroda adalah karbon aktif, metal oksida, dan lain-lain. Dari berbagai jenis karbon aktif salah satu contoh yang bisa diaplikasikan untuk superkapasitor yaitu CNT.

Komposit Carbon nanotubes (CNT) merupakan bahan elektroda potensial untuk dijadikan superkapasitor. CNT memiliki

sifat mekanik yang sangat baik dan konduktivitas listrik. Pembuatan komposit CNT dapat difabrikasi menjadi sebuah elektroda superkapasitor yang merupakan material terpenting dalam kapasitor, karena elektroda merupakan elemen yang menyimpan medan listrik dalam superkapasitor, semakin tinggi konduktivitasnya, semakin baik pula kualitas kapasitor tersebut (Aswardi, 2012). Pada review paper ini, CNT yang memiliki konduktivitas listrik dan termal yang sangat baik merupakan *nanofiller* yang sangat menarik untuk dikompositkan menjadi superkapasitor dengan *Ruthenium Oxide* (RuO_2) sebagai *matriksnya*.

RuO_2 merupakan salah satu jenis *metal oxide* yang dianggap sebagai jenis *metal oxide* yang praktis karena reversibilitasnya yang unggul, kapasitansi spesifik bernilai tinggi dan memiliki *cycle live* yang sangat panjang. RuO_2 telah banyak digunakan sebagai bahan elektroda positif untuk baterai Li-ion dalam beberapa tahun terakhir karena memiliki sifat elektrokatalitik yang luar biasa dalam beberapa proses elektrokimia. Ruthenium, anggota logam kelompok platinum, yang merupakan elemen logam transisi. Data resistivitas listrik RuO_2 dilaporkan $35{,}2 \pm 0{,}5\ \mu\Omega \cdot cm$ dalam kondisi biasa yang menunjukkan konduktivitas tinggi dibandingkan dengan oksida logam transisi lainnya. Selain itu, sifat elektrokimia oksidanya juga layak dipertimbangkan. Kriteria penting seperti stabilitas elektrokimia dalam rentang potensial yang luas, tingkat oksidasi yang dapat dibalik, siklus hidup yang panjang bersama dengan konduktivitas logam yang dapat merambat membuat RuO_2 sangat cocok untuk diaplikasikan sebagai superkapasitor (Majumdara, dkk,. 2019).

Sintesis komposit CNT/RuO_2 dapat dilakukan dengan berbagai macam metode. Setiap metode sintetis memiliki kelebihannya masing-masing mulai dari nilai kapasitansi, morfologi yang berbeda, antarmuka dan kinerja elektrokimia juga yang berbeda-beda. Sehingga pada review paper ini akan dibahas bagaimana pengaruh metode sintesa terhadap morfologi dan sifat kapasitif komposit CNT/RuO_2 terhadap aplikasi superkapasitor.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun perumusan masalah dalam *paper review* ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh metode sintesa terhadap morfologi komposit CNT/RuO_2?
2. Bagaimana pengaruh metode sintesa terhadap sifat kapasitif material CNT/RuO_2?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam *paper review* ini adalah sebagai berikut.

1. Review ini tidak membahas pengaruh metode pengujian elektrokimia terhadap struktur dan sifat kapasitif CNT/RuO_2.
2. Review ini tidak membahas pengaruh penambahan massa CNT terhadap struktur dan sifat kapasitif CNT/RuO_2.
3. Review ini tidak membahas pengaruh perbedaan scan rate pada pengujian elektrokimia terhadap struktur dan sifat kapasitif CNT/RuO_2.

1.4 Tujuan Review

Adapun tujuan dari *paper review* ini adalah sebagai berikut.

1. Menganalisa pengaruh metode sintesa terhadap morfologi komposit CNT/RuO_2.
2. Menganalisa pengaruh metode sintesa terhadap sifat kapasitif material CNT/RuO_2.

1.5 Manfaat Review

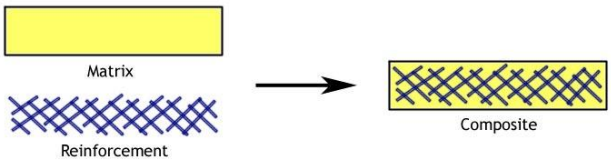
Review ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh metode sintesa komposit CNT/RuO_2 yang paling baik terhadap morfologi dan sifat kapasitif dari komposit CNT/RuO_2, sehingga kedepannya dapat dijadikan referensi untuk penelitian-penelitian.

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Komposit

Komposit merupakan suatu bahan yang tersusun atas dua atau lebih komponen yang mempunyai sifat kimia ataupun fisika yang berbeda signifikan. Kata komposit berasal dari kata “to compose” yang berarti menyusun atau menggabung, dalam kata lain komposit adalah campuran makroskopis antara komponen serat dan matrik dalam hal ini makroskopis yang dimaksud menunjukkan bahwa material pembentuk dalam matrik masih terlihat seperti sifat aslinya yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 (Hartanto, 2009). Komposit terdiri dua komponen utama yaitu *filler* atau pengisi (fasa diskontinyu) dan matriks (fasa kontinyu). Dimana bahan penyusunnya dapat berupa struktur nano atau mikro. *Carbon nanotubes* (CNT) merupakan salah satu material nano yang memiliki sifat mekanik, termal, dan kelistrikan yang sangat unik, sehingga menjadikan CNT ini sangat menarik dan cocok untuk diaplikasikan sebagai bahan komposit (Camargo, dkk., 2009).



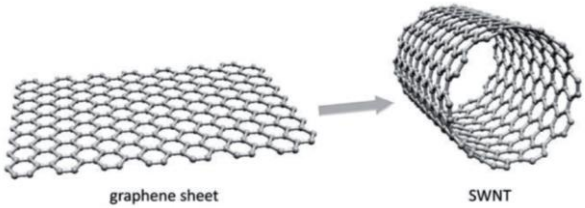
Gambar 2.1 Material komposit (Camargo, dkk., 2009).

Dibidang industri, dibutuhkan material dengan sifat-sifat yang mampu mendukung teknologi seperti *aerospace, underwater, bio engineering, transportation technologies.* Contohnya dalam bidang *aircraft* membutuhkan material dengan sifat seperti ringan, kuat, kaku, tahan terhadap impak dan abrasi, dan tak mudah terkorosi. Sifat sifat tersebut sangat susah ditemukan dalam material metal saja, atau polimer saja ataupun keramik saja karena

ketika material tersebut kuat maka akan relative berat, ketika kekakuan dinaikkan maka akan membuat ketangguhan menurun Sehingga diperlukan material komposit yang memungkinkan untuk memiliki semua sifat tersebut (Callister, 2014).

2.2 Carbon Nanotubes (CNT)

Carbon nanotubes (CNT) adalah karbon berbentuk tabung yang terbentuk dari lembaran grafit yang digulung menjadi bentuk silinder. CNT ini memiliki diameter dalam kisaran nanometer dan panjangnya hanya hingga beberapa micrometer. Setiap *nanotubes* adalah molekul karbon berikatan kovalen yang berbentuk heksagonal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 (Namitha, 2014).

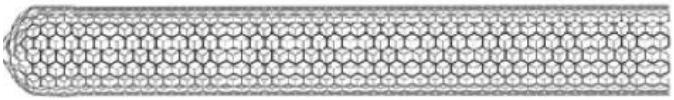


Gambar 2.2 Struktur material CNT (Saleh and Koller, M 2019)

Ada dua jenis CNT berdasarkan jumlah dindingnya yaitu *Single Walled Carbon Nanotubes* (SWCNT) dan *Multi Walled Carbon Nanotubes* (MWCNT).

1. *Single Walled Carbon Nanotubes* (SWCNT)
   Kebanyakan SWCNT memiliki diameter hampir 1 nanometer. Struktur SWCNT dapat diibaratkan dengan membungkus lapisan grafit setebal satu atom yang disebut *graphene* ke dalam sebuah silinder seperti yang digambarkan pada Gambar 2.3. Cara lembaran *graphene* dibungkus tersebut disebut vector kiral yang diwakili sepasang indeks (n,m). Bilangan bulat n dan m menunjukkan jumlah unit vector sepanjang dua arah dalam sebuah kisi kristal berbentuk *honeycomb* di dalam suatu

graphene. Jika n memiliki beberapa nilai dan m = 0, nanotubes disebut *"zigzag"*. Jika n = m nanotubes disebut *"armchair"*. Selain itu sebutan lainnya *"chiral"*. (Dresselhaus, dkk., 1998)



Gambar 2.3 Single Walled Carbon Nanotubes (Dresselhaus, dkk., 1998)

2. *Multi Walled Carbon Nanotubes* (MWCNT)
MWCNTs terdiri dari beberapa lapisan grafit yang digulung untuk membentuk tabung seperti pada Gambar 2.4. Lembaran grafit disusun dalam silinder konsentris, misalnya sebuah (0, 6) SWCNT di dalam sebuah SWCNT yang lebih besar (0, 9). Dalam model *Parachment*, sebuah lembaran *graphene* digulung di sekelilingnya menyerupai gulungan koran. Jarak interlayer dalam *multi-walled nanotubes* hampir sama dengan jarak antara lapisan *graphene* pada grafit yaitu sekitar 3,3 Å (330 pm). (Dresselhaus, dkk., 1998)

Gambar 2.4 Multi Walled Carbon Nanotubes (Dresselhaus, dkk.,1998)

Carbon nanotubes (CNT) juga memiliki beberapa karakteristik yang sangat menarik sehingga membuat material ini sering digunakan untuk aplikasi tertentu. Adapun karakteristik tersebut yaitu :

1. Struktur
   Carbon Nanotubes memiliki struktur sarang lebah silinder sehingga membentuk luas permukaan yang tinggi dan juga memiliki volume yang besar. Luas permukaan dan volume tersebut tergantung pada sintesis CNT dan juga tergantung pada *treatment* setelah sintesis. CNT dapat dianggap sebagai fullerene raksasa, dengan struktur tubular satu dimensi. CNT memiliki rasio aspek tinggi dan panjangnya bisa jutaan kali lebih besar dari diameter kecilnya. Semua atom karbon di CNT adalah hibridisasi sp^2 dan berhubungan satu sama lain dengan membentuk cincin beranggota enam yang secara seragam menutupi permukaan dinding samping CNT. Tidak seperti grafit, tidak ada ikatan karbon menggantung di CNT yang sempurna (Shanmugam, dkk., 2018).
2. Sifat Mekanik
   CNT memiliki sifat mekanik kekuatan tarik tinggi yang membuatnya sangat stabil dan juga memiliki elastisitas yang sangat bagus ketika diberikan kekuatan aksial tekan. Sifat mekanik ini muncul terkait dengan stabilitas intrinsik dan fleksibilitas strukturalnya (Herlem, dkk. 2019). Untuk jenis material CNT berdinding tunggal memiliki kekuatan tarik sekitar 13 -53 GPa lebih besar dibanding serat karbon yang memiliki kekuatan tarik 2 – 6 GPa (Callister & Rethwisch, D. G., 2014).
3. Sifat Kelistrikan
   Karena bentuk dan struktur elektronik *graphene* yang unik, struktur nanotube sangat mempengaruhi sifat listriknya. Baughman,dkk mengkategorikan CNT berdasarkan nilai (n, m) yaitu logam dan semikonduktor. Untuk naonotube yang ukurannya n=m maka termasuk

logam. Jika ukuran n-m kelipatan 3 maka termasuk semikonduktor dengan celah pita sangat kecil, jika tidak nanotube termasuk semikonduktor moderat. Dalam hal kelistrikan material CNT banyak sekali memiliki keunggulan dibanding material yang lain, material ini juga bersifat seperti metal atau semikonduktor. Secara umum material CNT memiliki nilai kerapatan arus sebesar 4 x 10^9 A/cm^2 atau 1000 kali lebih besar dibandingkan dengan material lain seperti tembaga sehingga seringkali diaplikasikan sebagai bahan dasar material elektronik (Baughman, dkk., 2002)

4. Sifat Termal

CNT telah menunjukkan superkonduktivitasnya di bawah 20 ° K (kira-kira pada −253 ° C). Material CNT selain memiliki keunggulan yang sangat jauh di bidang kelistrikan juga memiliki sifat yang sangat baik di bidang termal karena memiliki nilai konduktivitas termal 3500 $Wm^{-1}K^{-1}$ pada temperatur kamar atau hampir 10 kali lebih besar nilai konduktivitasnya dibanding tembaga yang hanya memiliki nilai konduktivitas 385 $Wm^{-1}K^{-1}$. Material ini juga memiliki kestabilan yang luar biasa pada pengaruh termal dimana material CNT sangat stabil hingga temperatur 2800 ^oC pada kondisi vakum dan 750 ^oC di udara terbuka (Khan, dkk., 2016).

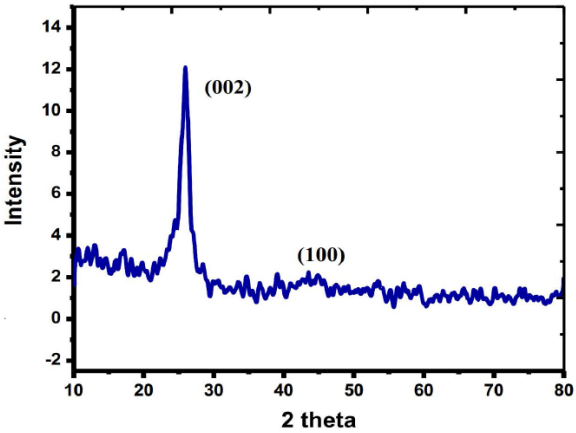
Tabel 2.1 Perbedaan Sifat Pada Alotrofi Carbon Nanomaterial (Khan, dkk., 2016)

Alotrofi karbon	**Grafit**	**Intan**	**Fullerene**	**Carbon Nanotube**	**Grafena**
Bentuk hibridasi	sp^2	sp^3	sp^2	sp^2	sp^2
Luas area spesifik (m^2 g^{-1})	10-20	20-160	80-90	1300	1500
Massa jenis (g cm^{-3})	2,09 – 2,33	3,5 – 3,53	1,72	>1	>1
Konduktivitas Termal (W m K^{-1})	1500-2000	900-2320	0,4	3500	4840-5300
Kekerasan	Tinggi	Sangat tinggi	Tinggi	Tinggi	Tertinggi
Keuletan	Fleksibel tidak elastis	-	Elastis	Fleksibel elastis	Fleksibel elastis
Sifat Kelistrikan	Konduktor	Insulator, Semikonduktor	Insulator	Metalik, Semikonduktor	Semimetalik, semikonduktor
Konduktivitas Listrik (S cm^{-1})	2-3 x 10^4	-	10^{-10}	tergantung struktur	2000

Tabel 2.2 Perbandingan Beberapa Sifat Material (Khan, dkk., 2016).

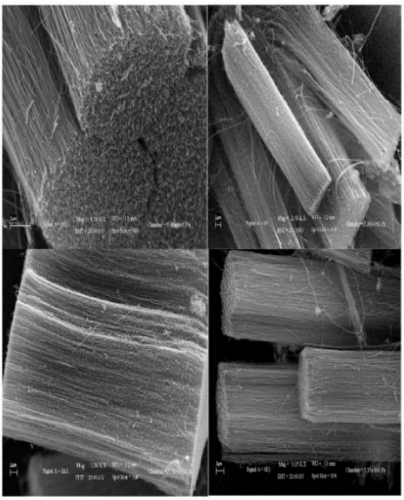
Serat	Diameter (µm)	Densitas (g/cm^3)	Kekuatan Tarik (GPa)	Modulus (GPa)
Karbon	7	1,66	2,4 - 3,1	120 – 170
Kaca	7	2,5	3,4 - 4,6	90
Aramid	12	1,44	2,8	70 -170
Boron	100 – 140	2,5	3,5	400
Quartz	9	2,2	3,4	70
Serat SiC	10 -20	2,3	2,8	190
SiC whiskers	0,002	2,3	6,9	
CNTs	0,001 - 0,1	~1,33	~50	~1.000

Terdapat beberapa pengujian yang dapat dilakukan untuk mengetahui struktur CNT. Pengujian yang dilakukan antara lain yaitu pengujian XRD dan pengujian SEM. Pada pengujian XRD (*X-Ray Diffraction*) dilakukan untuk mempelajari struktur fase dan sifat (kristal atau amorf) dari CNT yang diperoleh. Pola XRD dari CNT yang telah disintesis ditunjukkan pada gambar 2.5 terdapat puncak pada 2θ dengan nilai 26,4^o dan 45°, puncak timbul karena penumpukan interlayer dari lembaran *graphene.* Adanya puncak ini dalam pola XRD menunjukkan bahwa lembaran *graphene* berbentuk silinder (tubular) yang berdimensi nano dan memiliki dinding yang berlapis-lapis. (Namitha, 2014)



Gambar 2.5 Hasil XRD CNT (Namitha 2014)

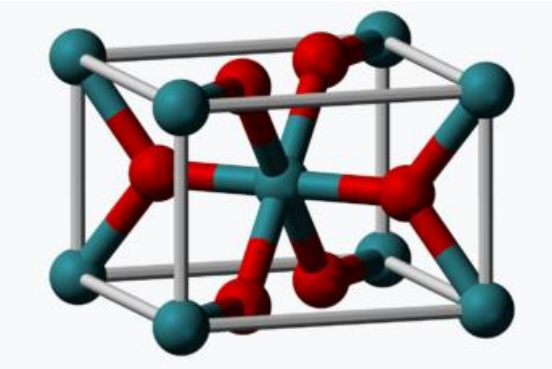
Pengamatan morfologis sampel dilakukan menggunakan alat *scanning electron microscope* (SEM). Pemindaian menggunakan SEM ini akan memberi gambaran struktur CNT seperti pada gambar 2.6 Gambar-gambar SEM tersebut menggambarkan morfologi permukaan CNT dan pandangan yang sangat jelas terhadap keseluruhan struktur dan pertumbuhan CNT yang disintesis. MWCNT ditemukan sangat banyak dan dengan reproduksibilitas yang baik dalam percobaan sintesis menggunakan metode hidrotermal. MWCNT digambarkan seperti gabungan silinder seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6 (Namitha, 2014).



Gambar 2.6 Hasil SEM CNT (Namitha 2014)

2.3 Ruthenium Oxide (RuO_2)

Ruthenium oksida adalah senyawa anorganik dengan rumus RuO_2 dan juga merupakan salah satu jenis metal oksida RuO_2 memiliki struktur kristal rutil seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7. Senyawa logam oksida ini adalah anhidrida dasar dan karenanya dapat bereaksi dengan asam dan dengan zat pereduksi kuat dalam reaksi redoks. Bentuk paling umum dari Ruthenium oksida yaitu memiliki bentuk seperti padatan hitam dengan kapasitas besar untuk menyimpan muatan dalam larutan berair. Ruthenium oksida banyak digunakan sebagai elektrokatalis untuk memproduksi klorin, klor oksida, dan katalis O_2 (Mills, 1989).



Gambar 2.7 Gambar Struktur Ruthenium Oxide (Baur and Khan, A., A 1971)

Baru-baru ini telah dilakukan penelitian yang menyatakan bahwa Ruthenium oksida bisa digunakan sebagai bahan kimia elektroda pada baterai karena kebutuhan energi yang minimalis dan stabilitas oksida selama difusi proton ke dalam struktur kristalnya. Ruthenium oksida biasanya dibuat dengan oksidasi ruthenium triklorida. Hampir satu kristal stoikiometrik RuO_2 dapat diperoleh dengan transportasi uap kimia, menggunakan O_2 sebagai agen transportnya. Selain itu film RuO_2 dapat dibuat dengan deposisi uap kimia (CVD) dari senyawa Ruthenium yang mudah menguap. RuO_2 juga dapat dibuat melalui pelapisan baja dari larutan ruthenium triklorida (Lee, 2003).

RuO_2 banyak digunakan untuk pelapisan anoda titanium untuk produksi klorin secara elektrolitik dan untuk persiapan resistor atau sirkuit terpadu. Resistor Ruthenium oksida dapat digunakan sebagai termometer sensitif dalam kisaran suhu $2 < T < 4$ K. Ruthenium oksida juga dapat digunakan sebagai bahan aktif dalam superkapasitor karena memiliki kemampuan transfer muatan yang sangat tinggi. Ruthenium oxide adalah senyawa anorganik dengan rumus RuO_2 dan juga merupakan salah satu jenis metal oksida yang dianggap sebagai jenis *metal oxide* yang praktis karena reversibilitasnya yang unggul, kapasitansi spesifik bernilai

tinggi dan memiliki *cycle live* yang sangat panjang. RuO_2 telah banyak digunakan sebagai bahan elektroda positif untuk baterai Li-ion dalam beberapa tahun terakhir karena memiliki sifat elektrokatalitik yang luar biasa dalam beberapa proses elektrokimia. Ruthenium oksida memiliki kapasitas besar untuk menyimpan muatan bila digunakan dalam larutan berair. Nilai kapasitansi rata-rata Ruthenium (IV) oksida telah mencapai 650 F / g ketika dalam larutan H_2SO_4 dan dianil pada suhu lebih rendah dari 200 ° C. Dalam upaya untuk mengoptimalkan sifat kapasitifnya, penelitian sebelumnya telah melihat Ruthenium oksida dari hidrasi Ruthenium oksida, kristalinitas dan ukuran partikelnya (Kim & Kim, 2001).

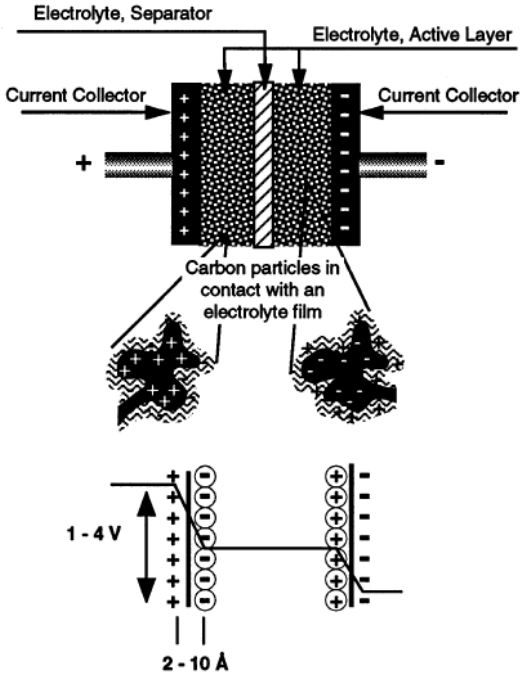
2.4 Superkapasitor

Superkapasitor dibagi menjadi 3 jenis sesuai mekanisme kerjanya yaitu lapisan ganda kapasitor elektrokimia (EDLC) yang menggunakan muatan listrik murni yang menumpuk pada permukaan elektroda, pseudo-kapasitor (PC) berkembang dari rekasi redoks permukaan yang cepat dan dapat dibalik, dan kapasitor hibrid yang mengambil mekanisme keduanya . Pada penelitian ini bertujuan mensintesis komposit CNT untuk dapat dijadikan superkapasitor yang jenis mekanisme kerjanya termasuk dalam jenis *Electrochemical double-layer capacitor* (EDLC) karena EDLC tersusun atas dua elektroda berbasis karbon, elektrolit, dan pemisah.

Superkapasitor atau *Electric Double-Layer Capacitors* (EDLCs) terdiri dari dua elektroda yang memiliki perbedaan potensial dalam satu sel (Gambar 2.8). Sebuah *ion-permeable separator* biasanya ditempatkan di antara elektroda-elektroda tersebut, untuk menghindari kontak listrik langsung di antara mereka. Dibandingkan dengan kapasitor pada umumnya, EDLC menyimpan muatan listrik pada antarmuka antara permukaan konduktor dan larutan elektrolit. Oleh karena itu muatan yang terakumulasi membentuk lapisan ganda elektrik di mana jarak

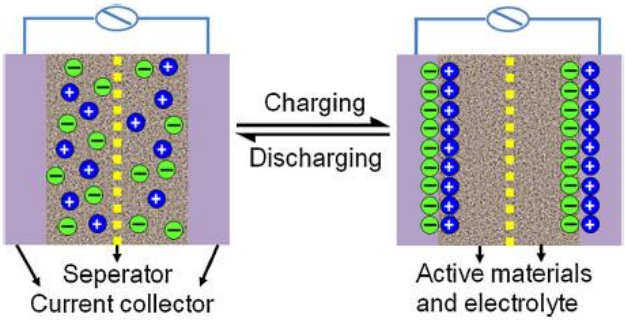
antara lapisan bermuatan, bernilai sekitar beberapa Angstrom (Conway, 1999).

Prinsip penyimpanan energi dari superkapasitor (EDLC) ini adalah menyimpan energi listrik dalam lapisan ganda elektrokimia (Helmholtz *layer*) yang terbentuk pada *interface* elektroda dan elektrolit. Muatan ion positif dan negatif dalam elektrolit menumpuk di permukaan elektroda dan mengimbangi muatan elektronik di permukaan elektroda. Gambar 2.8 menunjukkan skema diagram EDLC yang terdiri dari sel tunggal dengan luas permukaan elektroda yang tinggi, yang dimuat di dalam elektrolit. Elektroda dipisahkan oleh permisah berpori (*porous separator*).



Gambar 2.8 Prinsip EDLC *single cell* dan ilustrasi muatan yang menempel pada *interface* antara elektroda dan elektrolit (Kötz & Carlen, 2000)

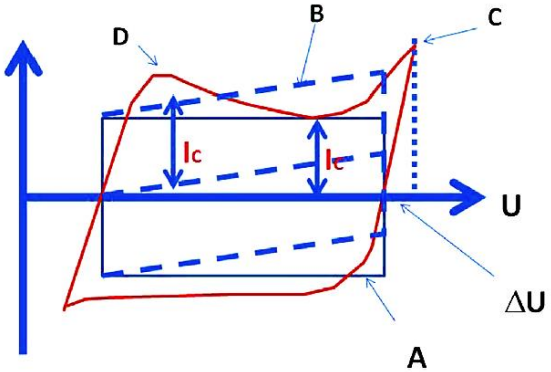
EDLC didasari pada prinsip kerja dari lapisan listrik ganda yang terbentuk pada antar permukaan lapisan antara karbon aktif dan elektrolit sebagai dielektrik. Adanya mekanisme absorpsi dan desorpsi ion pada kedua layer elektroda karbon aktif berperan dalam *charge-discharge* EDLC. Pada Gambar 2.9 ditunjukkan proses *charge* (pengisian) dalam pembentukan lapisan ganda listrik dan *discharge* (pengosongan). EDLC umumnya beroperasi dengan performa yang stabil dengan banyak siklus *charge-discharge*, kadang-kadang sebanyak 10^6 siklus. Di sisi lain, baterai elektrokimia umumnya terbatas hanya sekitar 10^3 siklus.



Gambar 2.9 Proses charge-discharge pada superkapasitor (Chen and Dai, L. M. 2013)

Saat terjadi *charge* (pengisian), elektron berpindah dari elektroda negatif ke elektroda positif dan dalam elektrolit, lalu kation bergerak menuju elektroda negatif sementara anion bergerak menuju elektroda positif. Selama *discharge* (pengosongan) proses sebaliknya terjadi. Dalam kapasitor elektrokimia tidak ada transfer muatan di antarmuka elektroda/elektrolit dan tidak ada pertukaran ion yang terjadi antara elektroda dan elektrolit. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi elektrolit tetap konstan selama proses *charge-discharge*. Dengan cara ini, energi tersimpan dalam antarmuka lapisan ganda (Wang, dkk., 2012).

Berbagai jenis superkapasitor dilihat dari jenis kurva cyclic voltammogram(CV) nya. Gambar 2.10 menunjukkan berbagai tipe kurva CV dari berbagai jenis superkapasitor.



Gambar 2.10 Tipe kurva CV dari berbagai jenis superkapasitor: (A) untuk superkapasitor ideal; (B) untuk kapasitor ideal dengan resistansi internal; (C) untuk kapasitor dengan elektroda karbon berpori; (D) pengaruh reaksi redoks. I_C adalah arus kapasitif dan ΔU adalah voltase *delay* (Jayalakhsmi, dkk., 2007).

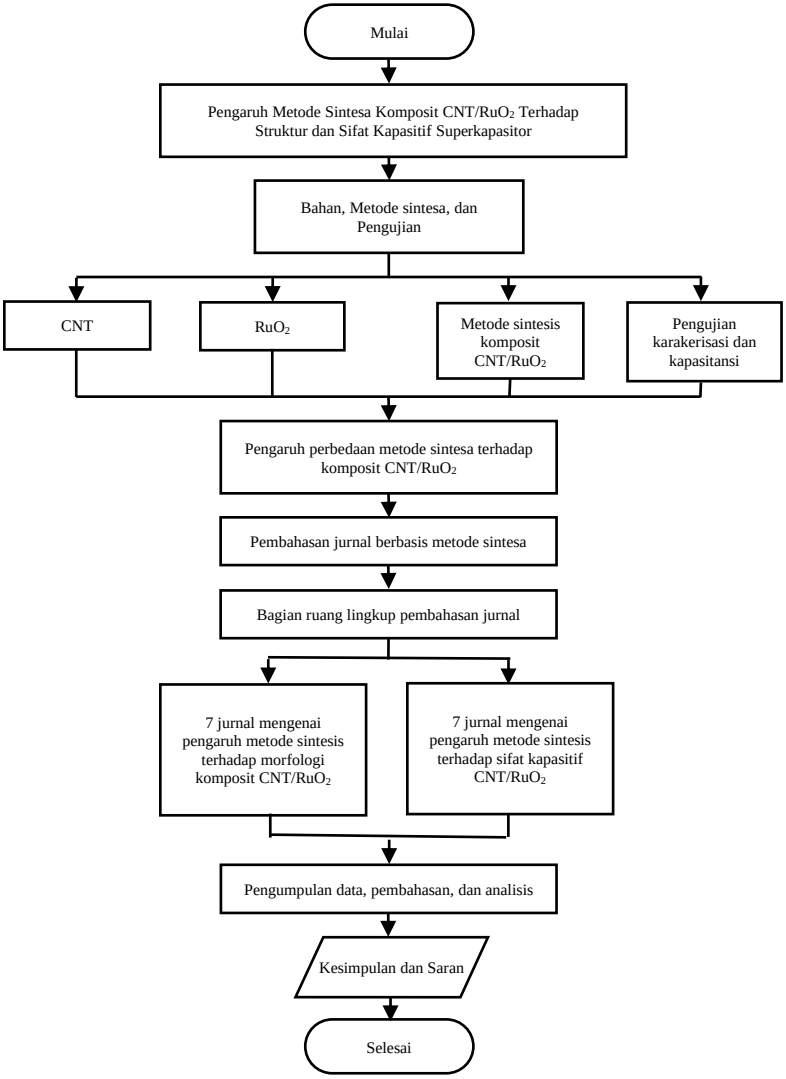
Yang ditunjukkan oleh panah A adalah superkapasitor ideal, ciri-cirinya yaitu pola charging discharging yang sama, sehingga mempunyai bentuk yang rectangular atau persegi, artinya bahwa charging discharging berlangsung dalam waktu yang sama. Lalu yang ditunjukkan oleh panah B adalah superkapasitor ideal dengan resistansi internal, jenis ini ditandai oleh bentuk kurva CV yang rectangular namun miring keatas, artinya adanya peningkatan *current density* seiring dengan pertambahan nilai voltase. Terakhir kurva berwarna merah yaitu *pseudo-capacitor* yaitu kapasitor yang mempunyai nilai kapasitansi lebih tinggi, karena adanya efek reaksi redoks, seperti yang ditunjukkan oleh panah C. Ciri khas kapasitor ini adalah adanya hump (gundukan)

pada kurva, yang berarti adanya reaksi baik oksidasi maupun reduksi (Elzbieta, 2001).

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB III
METODOLOGI

Pada review jurnal ini dikumpulkan sebanyak 7 jurnal yang meliputi beberapa metode sintesa komposit CNT/RuO_2 seperti metode hidrotermal, *microwave-assisted, catodic deposition, chemical reduction, dan atomic layer deposition* yang akan direview untuk menganalisis morfologi dan sifat kapasitifnya.



Gambar 3.1 Diagram alir pembahasan jurnal

Untuk membantu memberikan manfaat dalam pengembangan aplikasi superkapasitor sebagai alat penyimpanan energi dengan menggunakan komposit carbon nanotube maka review ini mengambil tema pengaruh metode sintesa komposit CNT/RuO_2 terhadap morfologi dan sifat kapasitif superkapasitor. Setelah tema didapatkan, kemudian difokuskan pada bahan, metode sintesa, dan pengujian. Dimana pada pengujian, pengujian yang dilakukan berupa pengujian TEM untuk melihat morfologi dari komposit CNT/RuO_2, pengujian CV untuk melihat sifat kapasitif dari superkapasitor komposit CNT/RuO_2. Lalu metode sintesa dijelaskan melalui Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Bahan dan Metode Sintesis

Komposit	Prekursor Komposit	Sintesis Komposit	Referensi
CNT/RuO_2	$RuCl_3.H_2O$	Hydrothermal	Chaitra,dkk (2016) dan Bi,dkk (2010)
CNT/RuO_2	$RuCl_3.H_2O$	Chemical Reductiom	Jha,dkk (2016)
CNT/RuO_2	$RuCl_3.H_2O$	Microwave-Assisted	Kim,dkk. (2010) dan Yan,dkk (2010)
CNT/RuO_2	$RuCl_3.H_2O$	Catodic Deposition	Yin, dkk (2017)
CNT/RuO_2	$RuCl_3.H_2O$	Atomic Layer Deposition	Warren,dkk (2014)

Langkah selanjutnya setelah data dari jurnal seperti bahan, metode sintesa, dan pengujian diperoleh, lalu dilanjutkan dengan penentuan variabel pada review ini, dimana variabel pada paper review ini yaitu metode sintesa komposit CNT/RuO_2 untuk aplikasi superkapasitor. Kemudian dari ke 7 jurnal tersebut ruang lingkup pembahasan yang dihasilkan yaitu mengenai morfologi dan sifat kapasitif komposit CNT/RuO_2 dengan perbedaan metode

sintesisnya. Selanjutnya dikumpulkan datanya dan dilalukan analisis data dan pembahasan. Selanjutnya ditarik kesimpulan dan saran dari review jurnal ini

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

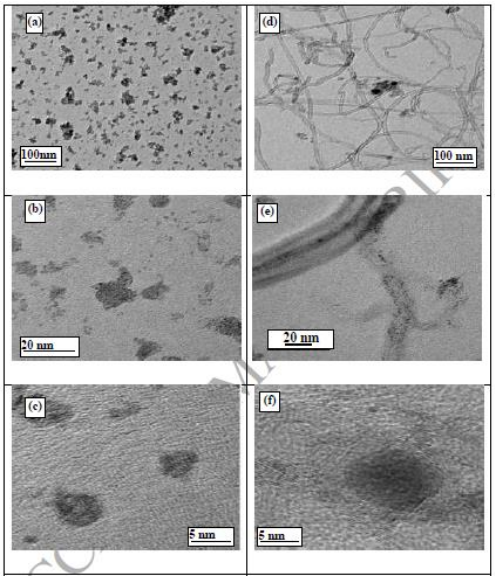
Pada review jurnal ini dilakukan analisis data berbasis metode sintesa seperti berikut

4.1.1 Metode Hidrotermal

1. (Chaitra,dkk. 2016)

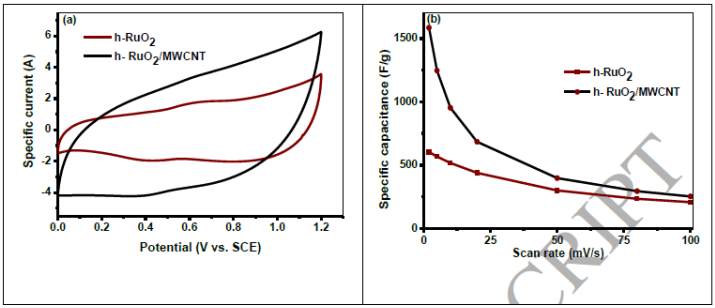
Peneliti telah melakukan sintesis komposit *carbon nanotube* (CNT) dengan *ruthenium oxide* (RuO_2) untuk aplikasi superkapasitor dengan metode hidrotermal. Pada penelitian ini komposit CNT/RuO_2 dilakukan pengujian superkapasitor dan karakterisasi komposit CNT/RuO_2.

Pada penelitian ini untuk persiapan komposit RuO_2/CNT, 100 mg CNT disonikasi dalam 20 mL air suling selama 2 jam dan dicampur dengan 30 mL larutan $RuCl_3 \cdot H_2O$. Selanjutnya campuran dipindahkan ke wadah teflon, ditempatkan di stainless steel autoclave dengan kapasitas 100 mL dan dipanaskan pada 160°C selama 5 jam, di bawah tekanan autogen. Kemudian autoclave didinginkan sampai suhu kamar, padatan dari campuran reaksi dipisahkan dengan penyaringan, dicuci dengan air deionisasi dan dikeringkan pada 120 ^{o}C. Setelah sintesis selesai dilakukan selanjutnya hasil sintesis dilakukan uji karakterisasi dan uji sifat kapasitif untuk aplikasi superkapasitor.



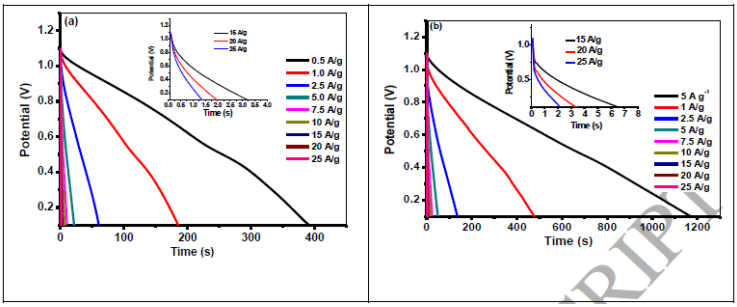
Gambar 4.1 Hasil pengujian (a, b) TEM RuO_2; (d, e) h-RuO_2/CNTs; (c) HRTEM dari RuO_2 dan (f) h-RuO_2/CNTs (Chaitra,dkk. 2016).

Gambar TEM h-RuO_2 dan h-RuO_2/CNTs di berbagai perbesaran masing-masing diwakili oleh gambar 4.1 (a-c) dan (d-f). Partikel h-RuO_2 ditemukan hadir dengan ukuran partikel individu berada di kisaran 5 hingga 6 nm (Gambar 4.1c). Ukuran Panjang CNT sekitar puluhan sampai ratusan mikrometer. Nanopartikel h-RuO_2 dalam bahan komposit tampaknya tersebar secara merata di atas permukaan CNTs. Seragamnya h-RuO_2 dalam komposit tersebut mungkin disebabkan oleh efek dari oksigen yang dikembangkan selama fungsionalisasi CNT. (Kim, Y.T.,dkk.2005) telah mengamati bahwa, h-RuO_2 partikel terperangkap dalam struktur tubular CNT seperti pada Gambar 4.1 (f). Partikel-partikel ini mungkin masuk ke dalam tabung melalui ujung terbuka yang dibuat selama fungsionalisasi.



Gambar 4.2 Hasil pengujian (a) CV h-RuO_2 dan h-RuO_2/CNT pada 10 mV/s dan (b) variasi spesifik kapasitansi dengan berbagai scan rate (Chaitra,dkk. 2016).

Uji CV h-RuO_2 dan h-RuO_2/CNT dilakukan pada 10 mV/s pada nilai potensial 0–1.2 V diwakili dalam Gambar 4.2 (a). Patut dicatat bahwa adanya CNT di komposit meningkatkan kapasitansi spesifik h-RuO_2. Perkiraan kapasitansi spesifik h-RuO_2 dan h-RuO_2/MWCNT masing-masing yaitu 604 dan 1585 F/g ditingkat potensial *scan rate* rendah 2 mV/s. Nilai kapasitansi spesifik yang diperoleh untuk h-RuO_2 dan h-RuO_2 / MWCNTs pada *sweep rates* yang berbeda 2, 5, 10, 20, 50, 80, 100 mV/s masing-masing yaitu 604, 568, 517, 439, 300, 234, 207 dan 1585, 1246, 953, 684, 688, 398, 294, 252 F/g (Gambar 4.2b).



Gambar 4.3 Discharge curves (a) h-RuO_2 dan (b) h-RuO_2/ MWCNTs pada kepadatan arus yang berbeda (Chaitra,dkk. 2016).

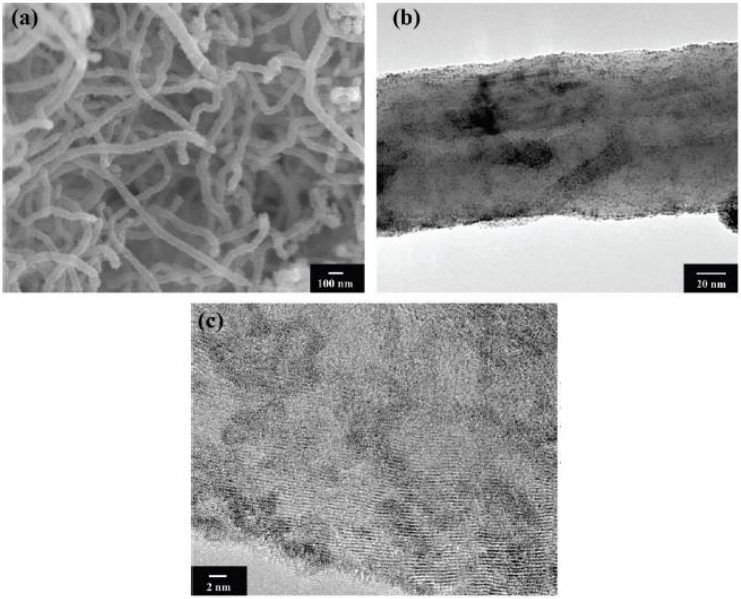
Selanjutnya material tersebut dilakukan uji galvanostatik (GCD). Gambar 4.3(a) dan (b) menunjukkan *discharge curve* h-RuO_2 dan h-RuO_2/CNT di potensial 0.1-1.1V pada kepadatan arus yang berbeda mulai dari 0,5 hingga 25 A/g. Kapasitansi spesifik dari h-RuO_2 dan h-RuO_2/MWCNT masing-masing adalah 323 dan 974 F/g pada arus yang lebih rendah kepadatan 0,5 A/g. Nilai kapasitansi yang tinggi pada komposit tersebut disebabkan karena gabungan RuO_2 dan CNT sehingga meningkatkan nilai Cs dan jelas membuktikan bahwa komposit adalah kandidat yang lebih baik untuk superkapasitor.

2. (Bi, dkk. 2010)

Peneliti telah melakukan sintesis komposit *carbon nanotube* (CNT) dengan *ruthenium oxide* (RuO_2) untuk aplikasi superkapasitor dengan metode hidrotermal. Pada penelitian ini komposit CNT/RuO_2 dilakukan pengujian superkapasitor dan karakterisasi komposit CNT/RuO_2.

Pada penelitian ini untuk mempersiapkan komposit RuO_2/CNT, 10 mg CNT dilarutkan menjadi 30 mL dengan menambahkan air suling dan diultrasonikasi selama 3 jam, lalu tambahkan 10mg $RuCl_3 \cdot 3H_2O$ dan tambahkan ke solusi CNT. Selanjutnya tambahkan NaOH hingga nilai pH larutan di atas

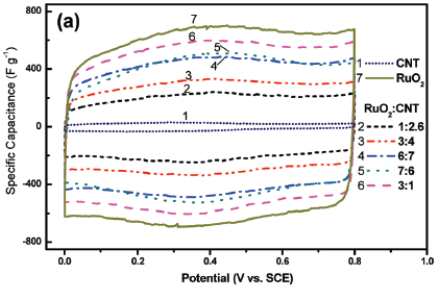
menjadi 7. Lalu campuran ditempatkan pada stainless steel autoclave dan dipanaskan pada suhu 120 ° C selama 6 jam. Setelah reaksi, itu suspensi dan endapan dipisahkan, dikeringkan, dan kemudian dipanaskan lagi dengan autoclave pada suhu 150 ° C selama 6 jam. Setelah itu hasil sintesis akan diuji karakterisasinya dan diuji sifat kapasitifnya sebagai superkapasitor.



Gambar 4.4 Hasil pengujian (a) SEM, (b) TEM, (c) HRTEM dari komposit CNT/RuO_2 (Bi, dkk. 2010).

Gambar 4.4 (a) menunjukkan gambar SEM dari nanokomposit RuO_2/CNT yang telah disintesis. Dapat dilihat bahwa struktur CNT masih dipertahankan setelah adanya RuO_2. Namun demikian permukaan nanotube menjadi lebih kasar dari yang CNT murni, menunjukkan pertumbuhan partikel nano RuO_2 pada permukaan. Pengamatan TEM digunakan untuk memberikan lebih detail struktur informasi dari nanocomposites. Gambar 4.4

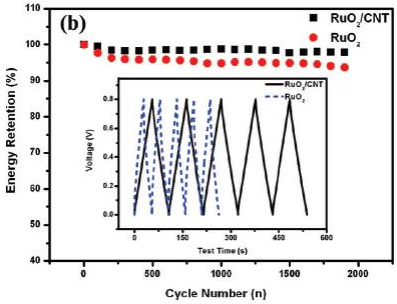
(b) dengan jelas menunjukkan bahwa CNT dilapisi dengan partikel nano RuO_2, dan partikel-partikel ini sangat kecil dan sangat tersebar secara keseluruhan di permukaan CNT. Gambar 4.4 (c) adalah gambar TEM resolusi tinggi dari komposit RuO_2/CNT, yang jelas menunjukkan kisi pinggiran CNT serta RuO_2 yang tersebar rata, partikel nano tersebut berukuran diameter rata-ratanya sekitar 2 nm dan juga ukuran panjang CNT yaitu sekitar puluhan sampai ratusan mikrometer; tidak ada pinggiran kisi kristal RuO_2 yang dapat diamati karena kristalinitas yang buruk dari partikel nano RuO_2 yang tumbuh.



Gambar 4.5 Hasil Uji CV komposit CNT/RuO_2 (Bi, dkk. 2010).

Gambar 4.5 menunjukkan kurva CV CNT murni, RuO_2 murni, dan nanokomposit RuO_2/CNT dengan massa RuO_2/CNT yang berbeda rasio massa 1:2.6, 3:4, 6:7, 7:6, dan 3:1. Jelas semua bahan yang diuji CV menunjukkan bentuk hampir persegi panjang, yang menunjukkan perilaku khas seperti superkapasitor. Kapasitansi spesifik meningkat dengan adanya kandungan RuO_2 dalam komposit, fakta menunjukkan bahwa RuO_2 murni memiliki nilai kapasitansi spesifik yang jauh lebih besar (kira-kira 648 F/g) dibandingkan dengan CNT murni (43 F/g). Dalam nanokomposit RuO_2/CNT dengan rasio massa RuO_2/CNT 3:1, kapasitansi spesifiknya 592 F/g. Nilai kapasitansi spesifik maksimum tertinggi

yaitu 953 F/g dicapai dalam komposit dengan rasio massa RuO_2/CNT 6:7.



Gambar 4.6 Hasil uji GCD komposit CNT/RuO_2 (Bi, dkk. 2010).

Komposit RuO_2/CNT selanjutnya diuji GCD, hasil uji GCD bisa diliat seperti gambar 4.6 yang menunjukkan kurva yang simetris, linier dan waktu pengisian dan pemakaian yang lama. Setelah diamati dan dilakukan uji GCD sebesar 2000 *cycle* dan pada kerapatan arus 5A/g, hampir tidak ada kehilangan energi yang ditemukan pada komposit (yaitu, kapasitansi masih sekitar 98% dari kapasitansi awalnya). Sebagai perbandingan, energi RuO_2 murni hanya 93% setelah diberikan 2000 cycle di bawah kerapatan arus yang sama.

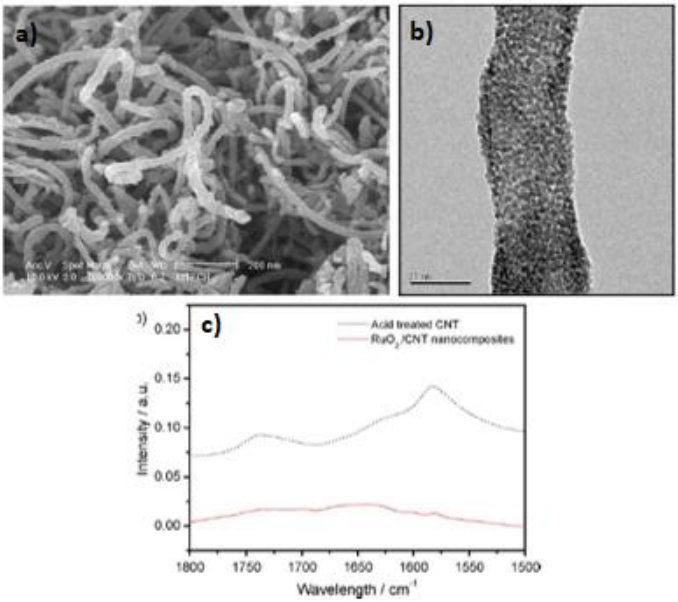
4.1.2 Metode *Microwave-Assisted*

1. (Kim, dkk. 2010)

Peneliti telah melakukan sintesis komposit *carbon nanotube* (CNT) dengan *ruthenium oxide* (RuO_2) untuk aplikasi superkapasitor dengan metode microwave-assisted. Pada penelitian ini komposit CNT/RuO_2 dilakukan pengujian superkapasitor dan karakterisasi komposit CNT/RuO_2.

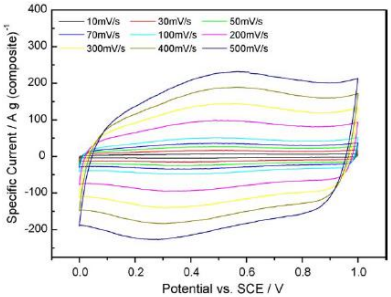
Untuk mesintesis CNT/RuO_2 pertama, 30mM $RuCl_3 \cdot nH_2O$ dan 0,3M natrium asetat (NaAc> 99%) ditambahkan ke dalam CNT 0,02%wt. Ditambahkan beberapa air suling ke dalam campuran setelah *salt dissolution* untuk menghidrolisis paksa

ruthenium dalam larutan. Larutan tersebut kemudian di masukkan ke dalam teflon 100 ml yang kemudian disegel dan ditempatkan dalam *microwave digestion system*, MARS-5 (CEM Corporation). Campuran reaksi dipanaskan hingga 200 ◦C dalam waktu kurang dari 2 menit (daya gelombang mikro 1600W) dan dipertahankan pada suhu tersebut selama 10 menit. Setelah reaksi selesai, teflon diambil dari microwave dan didinginkan dengan aquades. Setelah itu hasilnya disaring dan dicuci dengan etanol, terakhir dikeringkan pada suhu 70 ^{o}C selama semalaman di oven vakum. Selanjutnya setelah didapatkan hasil sintesinya, dilakukan uji karakterisasi dan uji sifat kapasitifnya sebagai superkapasitor.



Gambar 4.7 Hasil pengujian (a) SEM; (b) TEM; dan (c) FTIR dari komposit CNT/RuO_2 (Kim, dkk. 2010).

Gambar 4.7 (a) menunjukkan gambar SEM nanocomposite ruthenium oxide/CNT dengan kandungan 70% Ruthenium oksida, di mana Ruthenium oksida terlihat diendapkan secara seragam pada permukaan CNT dengan proses microwave-assisted. Jelas, ada sedikit pembentukan nanopartikel ruthenium oksida atau agregasi mereka yang terpisah dari CNT. CNT yang dilapisi dengan ruthenium oksida saling berhubungan untuk membentuk jaringan yang seragam dengan struktur tiga dimensi pada skala nanometer. Gambar 4.7 (b) adalah gambar TEM dari nanocomposites ruthenium oksida/CNTyang mengandung 70 wt.% ruthenium oksida, menunjukkan morfologi sangat seragam dan nanopartikel ruthenium oxide yang tersebar di permukaan CNT sangat merata. Jelas bahwa Ruthenium yang tersebar dengan baik. Partikel nano oksida dimuat pada setiap CNT pada Gambar 4.7 (b) dan rata-rata diameter nanopartikel ruthenium oksida diperkirakan 2 nm. Hasil uji FT-IR dari CNT yang diberi perlakuan asam dan dilapisi Ruthenium oksida CNT pada Gambar 4.7 (c) menunjukkan puncak sekitar 1570 dan 1630cm^{-1} masing-masing merupakan puncak dari gugus fungsi C=C, C=O dan CNT. Selanjutnya pada puncak 1734cm^{-1} merupakan puncak dari gugus fungsi C=O yang termasuk dalam grup karboksil gugus asam (–COOH). Penurunan intensitas puncak tersebut setelah pembentukan nanopartikel oksida menunjukkan interaksi yang kuat antara nanopartikel Ruthenium oksida dan kelompok permukaan karboksil.



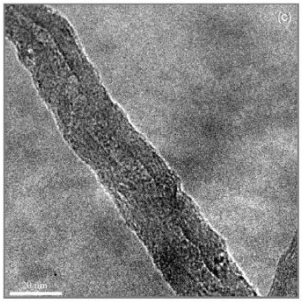
Gambar 4.8 Hasil uji cv komposit RuO_2/CNT (Kim, dkk. 2010).

Gambar 4.8 menunjukkan hasil uji CV dari elektroda komposit ruthenium oksida / CNT yang mengandung 70 wt.% ruthenium oksida dan disiapkan pada palet komposit ESD sebagai isolator dan diuji pada substrat *Si wafer Pt-coated*, diukur sebagai potensi *scan rate* dalam solusi 1M H_2SO_4. Tingkat pemindaian potensial bervariasi dari 10 hingga 500mVs^{-1} untuk menguji nilai kapasitansi komposit ruthenium oksida/CNT dalam *potensial window* 0,0-1,0V SCE. Pada Gambar 4.8 , elektroda komposit Ruthenium oksida /CNT menunjukkan sifat khusus yaitu bentuk persegi panjang pada kurva CV di semua tingkat pemindaian potensial dengan adanya lekukan curam sekitar aliran arus pada setiap *potensial window*. Ini menunjukkan perilaku pseudocapacitive yang sangat reversible dari komposit Ruthenium oksida/CNT. Kapasitansi spesifik komposit elektroda ruthenium oksida/CNT yang memiliki kandungan 70% Ruthenium oksida (CS, RuO_2/CNT) adalah 450 F/g, pada tingkat pemindaian potensial 10mVs^{-1}.

2. (Yan, dkk. 2010)

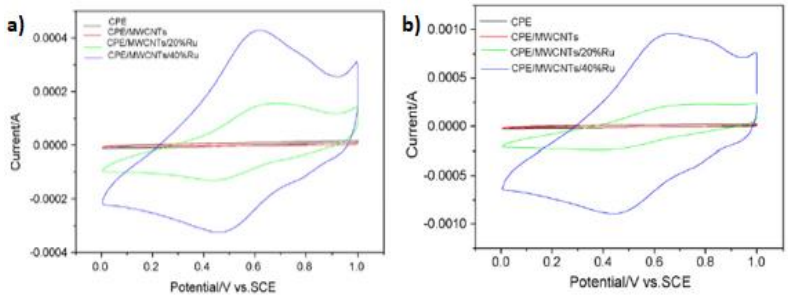
Peneliti telah melakukan sintesis komposit *carbon nanotube* (CNT) dengan *ruthenium oxide* (RuO_2) untuk aplikasi superkapasitor. Pada penelitian ini komposit CNT/RuO_2 dilakukan pengujian superkapasitor dan karakterisasi komposit CNT/RuO_2.

Pada penelitian ini sintesis komposit CNT/RuO_2 dibuat dengan cara pertama, campurkan $RuCl_3$ dengan MWCNT lalu larutkan dalam larutan air dan selanjutnya diultrasonikasi. Larutan NH_3 dimasukkan ke dalam campuran yang telah di ultrasonikasi. Kemudian larutan tersebut dimasukkan ke dalam Teflon 100ml dan masukkan ke dalam oven microwave (LG-MG-5304MV) dengan kekuatan tertinggi (~700W) selama 30 detik. Setelah reaksi selesai, teflon diambil dari microwave dan didinginkan dengan aquades. Setelah itu hasilnya disaring dan dicuci dengan etanol, terakhir dikeringkan pada suhu 70 ^{o}C selama semalaman di oven vakum. Selanjutnya hasil sintesis akan dilakukan uji karakterisasi dan uji sifat kapasitifnya sebagai superkapasitor.



Gambar 4.9 Hasil uji TEM komposit CNT/RuO_2 Yan, dkk. 2010).

Gambar 4.9 menunjukkan hasil TEM di mana MWCNT yang digunakan di sini memiliki rentang panjang hingga puluhan mikrometer dengan diameter dalam berkisar 2–10 nm dan diameter luar sekitar 10–50 nm. Distribusi ukuran partikel-partikel nano RuO_2 sangat merata. Banyak nanopartikel RuO_2 yang terdapat pada permukaan luar MWCNTs. Terdapat beberapa partikel nano RuO_2 yang tampaknya mengisi di dalam rongga dalam MWCNTs. Diameter rata-rata partikel nano RuO_2 adalah 1–2 nm.



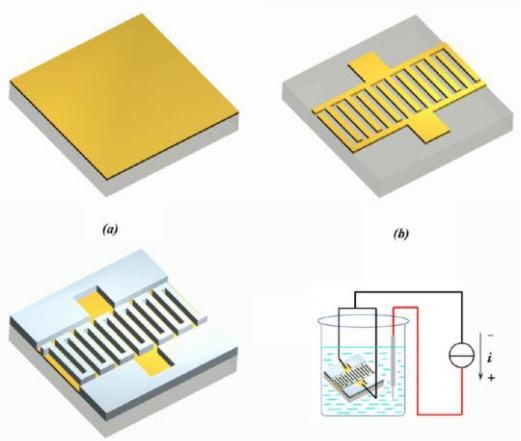
Gambar 4.10 Hasil pengujian CV (a) komposit CNT/RuO_2 pada *scan rate* 50 mVs^{-1} dan (b) komposit CNT/RuO_2 pada *scan rate* 200 mVs^{-1} (Yan, dkk. 2010).

Pada gambar 4.10 menunjukkan hasil uji CV pada (a) *scan rate* terendah yang diteliti yaitu 50mVs^{-1}, kapasitansi spesifik dari keempat jenis elektroda yang telah dihitung masing-masing yaitu 9.4, 73.3, 232.5 dan 493.9 F/g dan (b) pada *scan rate* tertinggi 200mVs^{-1}, nilai kapasitansi masing-masing adalah 7,6, 59,4, 188,4 dan 400,2 F/g. Jelas, kapasitansi elektroda komposit CPE / MWCNTs / RuO2 jauh lebih tinggi daripada elektroda CPE dan CPE / MWCNTs. Peningkatan dalam kapasitansi elektroda komposit CNT/RuO_2 akibat adanya tambahan dari RuO_2.

4.1.3 Metode *Catodic Deposition*

(Yin, dkk., 2017) telah melakukan sintesis komposit *carbon nanotube* (CNT) dengan *ruthenium oxide* (RuO_2) untuk aplikasi superkapasitor. Pada penelitian ini di lakukan eksperimen berupa sintesis CNT/RuO_2, pengujian superkapasitor dan karakterisasi komposit CNT/RuO_2.

Pertama-tama pada penelitian ini membuat sebuah *micro-supercapsitor.*

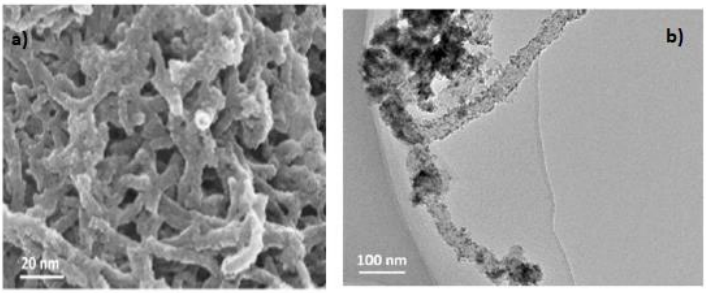


Gambar 4.11 Proses pembuatan untuk micro-super super kapasitor. (a) Sputtering lapisan Ti / Au pada *wafer glass*; (b) Membentuk kolektor arus logam interdigitated; (c) Membuat struktur mikro SU-8 interdigitated; (d) Mengisi komposit CNT dengan elektrodeposisi (Yin, dkk., 2017).

Secara singkat, proses pembuatan melibatkan langkah-langkah berikut: Langkah 1 yaitu *sputtering* lapisan Ti / Au 40 nm / 120 nm pada *wafer glass*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.11 (a). Langkah 2 melakukan litografi dan etsa untuk membentuk kolektor arus interdigitated seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.11 (b). Langkah 3 melakukan pelapisan lapisan SU-8 pada Ti / Au, yang kemudian terkena oleh sinar UV; kemudian, SU-8 yang tidak terbuka dihilangkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.11 (c). Langkah 4 melakukan penempatan nanokomposit CNT ke jari-jari yang dibentuk oleh SU-8, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.11 (d). Prototipe ini kemudian dimasukkan dalam gelas beker dan elektrolit Na_2SO_4 netral disuntikkan di area efektif.

Tahap pembuatan nanocomposite RuO_2/CNT dijelaskan seperti berikut ini. CNT murni (1 g), Ruthenium klorida ($RuCl_3$, 0,05 g) dan natrium nitrit ($NaNO_3$, 0,85 g) dilarutkan dalam 50 mL

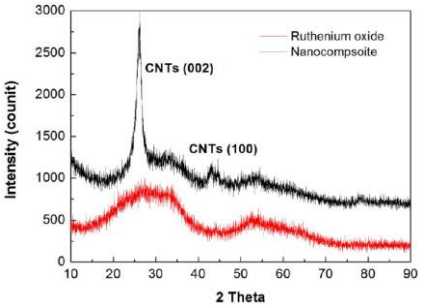
air deionisasi dan disonikasi selama 30 menit sehingga Ru^{3+} diadsorpsi secara seragam pada CNT . nanokomposit CNT ditambahkan ke struktur mikro interdigitated dengan cara elektrodeposisi. Dua elektroda dari masing-masing perangkat terhubung, dan kemudian perangkat tersebut digunakan sebagai elektroda yang berfungsi dalam sel elektrokimia seperti (gambar 4.11 (d)). Kabel platinum digunakan sebagai elektroda referensi dan konter. Nanokomposit CNT dibuat pada kolektor arus MEMS (*microelectromechanical systems*) menggunakan larutan elektrolit yang disebutkan di atas pada 500 $mA.cm^{-2}$ selama 2000 detik. Lapisan yang telah disiapkan dibilas dan dikeringkan pada 80 °C selama sekitar 10 menit. Semua sampel dikenakan siklus voltammetrik pengisian / pengosongan (> 1500 cycle) pada kecepatan pemindaian 80 $mV.s^{-1}$ sebelum penyelidikan eksperimental lain untuk melihat apakah ada efek arus bocor pada perhitungan kapasitansi untuk elektroda tunggal. Selanjutnya hasil sintesis diuji karakterisasi dan sifat kapasitifnya sebagai superkapasitor.



Gambar 4.12 Hasil pengujian (a) SEM dan (b) TEM dari nanopomposit CNT/RuO_2 yang dielektrodeposisi selama 2000 detik (Yin, dkk., 2017).

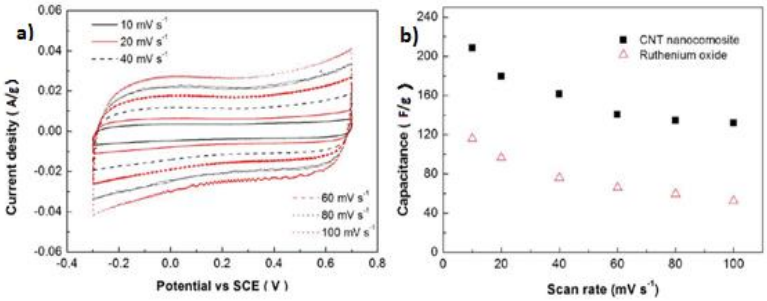
Gambar 4.12 (a) memperlihatkan ketebalan nanokomposit sekitar 40 μm dan memiliki panjang sekitar puluhan sampai ratusan mikrometer . Gambar pembesaran tinggi dari nanokomposite

menunjukkan bahwa jaringan CNT tersebar secara homogen ditutupi dengan nanopartikel RuO_2. Gambar 4.12 (b) menunjukkan gambar TEM khas nanokomposit RuO_2/CNT. Dapat dilihat bahwa ada banyak sekali nanopartikel ruthenium oksida yang sangat seragam. Partikel nano Ruthenium oksida yang terdispersi dengan baik bergabung kedalam masing-masing CNT yang mengikatnya ke dalam tabung sehingga melapisi ke dalam jaringan berpori dari CNT. CNT yang telah disintesis dengan RuO_2 ini tidak hanya secara langsung digunakan sebagai elektroda tetapi juga digunakan sebagai nanotemplates untuk bahan RuO_2 pseudocapacitive. CNT ini membuat nilai efisiensi meningkat dan masalah nilai cyclenya juga dapat ditingkatkan.



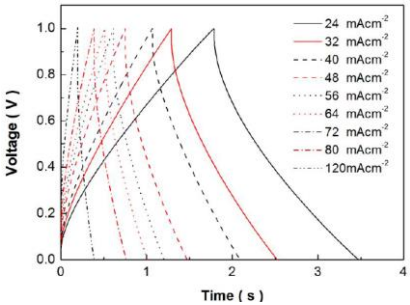
Gambar 4.13 Hasil uji XRD nanokomposit RuO_2/CNT (Yin, dkk., 2017).

Struktur kristal Ruthenium oksida yang diendapkan secara elektrokimia dikarakterisasi XRD. Untuk nanokomposite, dua puncak utama di 26,5 ° dan 42,3 ° merupakan difraksi dari (002) dan (100) bentuk CNTs, masing-masing. RuO_2 dalam nanokomposit juga ditemukan amorf, yang ditunjukkan oleh tidak adanya puncak difraksi (kecuali yang dari CNT).



Gambar 4.14 (a) Hasil uji CV dan (b) hasil spesifik kapasitansi dari CNT/RuO_2 (Yin, dkk., 2017).

Hasil uji CV pada tingkat pemindaian potensial bervariasi dari 10 hingga 100 mV.s^{-1} untuk mengukur nilai kapasitansi dari komposit RuO_2/CNT dalam *potensial window* antara -0,3 V dan 0,7 V vs SCE. Arus dalam kurva CV pada Gambar 4.14 (a) dinormalisasi ke area elektroda. Ketika dipindai pada kecepatan yang jauh lebih tinggi dari 100 mV.s^{-1}, kurva CV untuk elektroda terlihat tetap simetris dan berbentuk segi empat . Voltammogram anodik dan katodik hampir berbentuk bayangan cermin satu sama lain. Bentuk ini menunjukkan perilaku kapasitif yang ideal dan hal tersebut diakibatkan oleh sifat transport dari proton dan elektron nanokomposit yang sangat baik. Pada gambar 4.14(b) meskipun pelapisan nanokomposit setebal 40 µm, kapasitansi spesifik komposit adalah 208,5 F/g pada 10 mV.s^{-1}. Lalu menurun menjadi 132 F/g (sebesar 36,6%) pada 100 Mv.s^{-1}.



Gambar 4.15 Hasil uji GCD komposit CNT/RuO_2 (Yin, dkk., 2017).

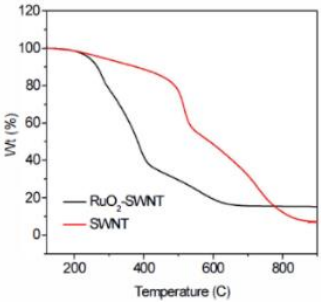
Untuk kapasitor yang terdiri dari nanokomposit CNT/RuO_2, kurva menunjukkan bentuk segitiga yang sangat linier , Gambar 4.15 tersebut dapat diartikan sebagai perilaku khas dari superkapasitor. Data muatan/pelepasan galvanostatik digunakan untuk memperkirakan nilai efisiensi dari perbandingan nilai kapasitansi antara proses pelepasan dan pengisian. Setelah dihitung ditemukan bahwa nilai efisiensinya sekitar lebih dari 93,7%.

4.1.4 Metode *Chemical Reduction*

(Jha, dkk. 2013) telah melakukan sintesis komposit *carbon nanotube* (CNT) dengan *ruthenium oxide* (RuO_2) untuk aplikasi superkapasitor. Pada penelitian ini di lakukan eksperimen berupa sintesis CNT/RuO_2, pengujian superkapasitor dan karakterisasi komposit CNT/RuO_2.

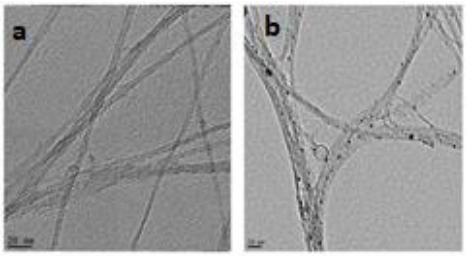
Pada penelitian ini di lakukan eksperimen berupa sintesis CNT/RuO_2 dengan metode *chemical reduction*. Pertama RuO_2 nanopartikel ditempelkan pada SWNT oleh larutan *phase reduction of the metal salts*. SWNT (10^{-4}kg) diultrasonikasi dalam 0,02 liter etilen glikol satu malam, diaduk selama 2 jam dan kemudian prekursor logam $RuCl_3$ ditambahkan. Suspensi diaduk selama 3 jam dan kemudian larutan pereduksi (yang terdiri dari campuran 0,1 M $NaBH_4$ dan I M NaOH) ditambahkan tetes demi tetes. Hasil suspensinya dipanaskan hingga 343,15 K selama 2 jam

lalu campuran disaring dan padatan dicuci dengan air sampai pH filtrat netral. Nantinya nanocomposite diperoleh dalam *wet cake*, yang kemudian disebarkan kembali dalam air untuk digunakan sebagai *stock solution.* Selanjutnya hasil sintesis diuji karakterisasi dan sifat kapasitifnya sebagai superkapasitor.



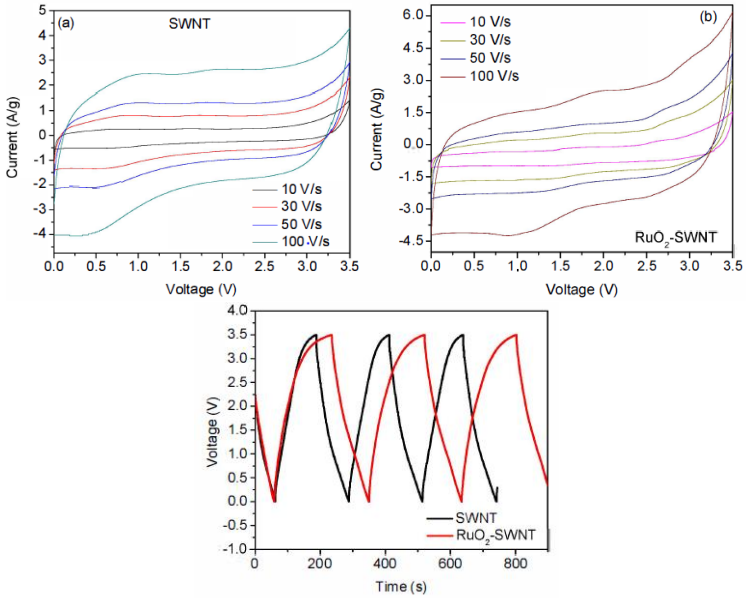
Gambar 4.16 Hasil pengujian TGA dari SWCNT dan nanocomposite RuO_2/SWCNT (Jha, dkk. 2013).

Gambar 4.16 menunjukkan kurva yang diperoleh dengan memanaskan kedua material yaitu SWCNT dan komposit RuO_2/SWCNT yang dipanaskan mulai dari suhu kamar hingga 1173.15 K, dengan tingkat kecepatan pemanasan sekitar 278 K/menit. Perbedaan residual antara SWCNT dengan RuO_2 yang diperoleh yaitu pada suhu 173,15 K. Hal tersebut menunjukkan berat RuO_2 dalam komposit yaitu 8% berat.



Gambar 4.17 Hasil pengujian (a) TEM SWCNT dan (b) TEM nanocomposite RuO_2/SWCNT (Jha, dkk. 2013).

Gambar 4.17 (a) menunjukkan gambar morfologi silinder yang jelas bebentuk bundel nanotube dan ukuran panjangnya sekitar puluhan hingga ratusan mikrometer. Gambar 4.17 (b) menunjukkan dispersi seragam dan homogen berbentuk bola dari partikel nano RuO_2 yang menempel di dinding samping SWNT. Gugus karboksilat hadir pada permukaan SWNT untuk membantu menyebarkan nanopartikel secara homogen dan seragam, dan juga mereka juga mengurangi aglomerasi partikel nano RuO_2.



Gambar 4.18 Hasil pengujian (a) CV SWCNT, (b) CV RuO_2/SWCNT pada scan rate yang berbeda dan (c) GCD SWCNT dan RuO_2/SWCNT (Jha, dkk. 2013).

Gambar 4.18 (a) dan (b) menunjukan hasil uji CV dari SWCNT dan hasil uji CV komposit RuO_2/SWCNT. Kurva diperoleh pada berbagai laju pemindaian (10-100 mV/s) direntang

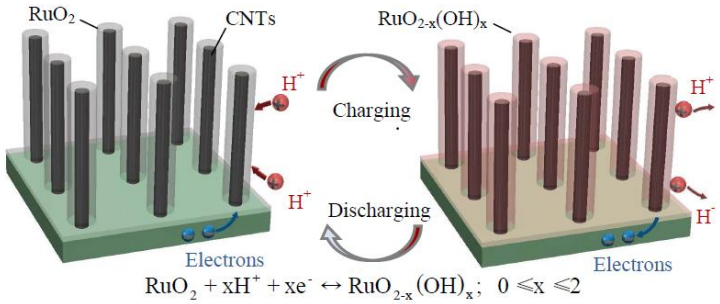
potensial dari 0 V hingga 3,5 V untuk kedua elektroda yaitu superkapasitor berbasis elektroda SWCNT dan elektroda berbasis komposit RuO_2/SWCNT. Bentuk kurva CV dari setiap sampel hampir berbentuk persegi panjang yang menunjukkan sifat dari superkapasitor pseudocapacitance, hal tersebut terjadi akibat adanya reaksi redoks SWCNT dan RuO_2. Bentuk kurva CV dipertahankan bahkan pada kecepatan pemindaian tinggi 100 mV yang berarti menunjukkan perilaku kapasitif yang baik dan difusi yang cepat sehingga transportasi ion elektrolit dari larutan ke pori-pori elektroda bahan sangat baik.

Kurva *charge-discharge* galvanostatik SWCNT dan Elektroda komposit RuO_2/SWCNT diuji dalam larutan ionik elektrolit pada kerapatan arus 1 A/g ditunjukkan pada gambar 4.18 (c). Kapasitansi spesifik diperoleh pada arus konstan 1 A/g adalah 121 dan 174 F/g untuk SWNT dan Bahan elektroda RuO_2/SWCNT, masing-masing. Nilai ini dari penyimpanan lebih tinggi dari 138 f/g, yang sebelumnya pernah diteliti oleh Reddy,dkk (2007) yaitu 25% berat RuO_2 dikompositkan dengan nanotube karbon multi-dinding (MWCNT).

4.1.5 Metode *Atomic Layer Deposition*

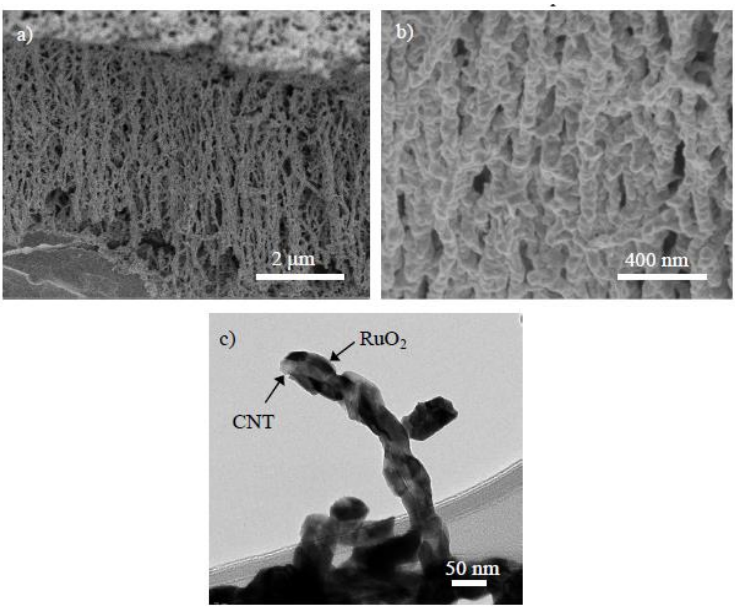
(Warren, dkk. 2014) telah melakukan sintesis komposit *carbon nanotube* (CNT) dengan *ruthenium oxide* (RuO_2) untuk aplikasi superkapasitor dengan metode *atomic layer deposition*. Selanjutnya pada penelitian ini di lakukan pengujian superkapasitor dan karakterisasi komposit CNT/RuO_2.

Warren,dkk (2014) telah melakukan sintesis komposit *carbon nanotube* (CNT) dengan *ruthenium oxide* (RuO_2) untuk aplikasi superkapasitor dengan metode *Atomic Layer Deposition* (ALD). ALD adalah salah satu bentuk dari proses sintesis CVD dimana memungkinkan film untuk disimpan disubstrat satu monolayer pada satu waktu. Proses ALD memungkinkan kontrol tingkat angstrom atas ketebalan film dan dapat mencapai cakupan film yang seragam sesuai yang diinginkan oleh peneliti.



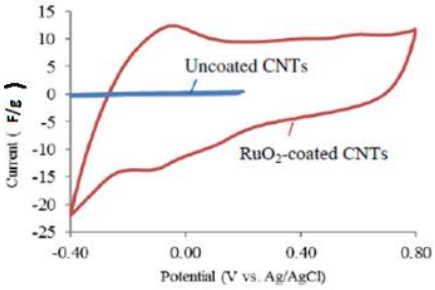
Gambar 4.19 Ilustrasi atomic layer deposition RuO_2 yang dicoating dengan CNT (Warren, dkk. 2014).

Gambar 4.19 menunjukkan proses atomic layer deposition, dimana CNT yang selaras vertikal dilapisi dengan RuO_2 tebal beberapa nanometer yang diendapkan oleh ALD. Konsep ALD ini yaitu saat perangkat mengisi daya, lapisan RuO_2 aktif menyerap proton dari elektrolit dan elektron mengalir ke dalam perangkat dari sirkuit eksternal seperti lapisan RuO_2 lalu dikonversi menjadi $Ru(OH)_2$ oleh reaksi redoks permukaan. Ketika *discharging*, elektron yang disimpan mengalir keluar dari perangkat ke sirkuit eksternal dan proton dilepaskan ke elektrolit karena $Ru(OH)_2$ dikonversi kembali ke RuO_2 dalam reaksi reverse redox . Di perangkat pada jurnal ini, kekuatan tinggi dan mekanik kelenturan CNT penting untuk mengurangi tekanan mekanis pada lapisan RuO_2 yang muncul dari *cycle* berulang-ulang ketika kondisi redoks. Langkah sintesis selanjutnya yaitu CNT ditumbuhkan pada molibdenum dan *silicon wafer* berlapis oksida, menggunakan aluminium dan besi sebagai lapisan katalis . Ketika CNT bertumbuh, RuO_2 terdeposisi pada CNT menggunakan sebuah alat bernama Cambridge Fiji F200 Plasma ALD dengan ruthenium bis (ethylcyclopentadienyl) ($Ru(EtCp)_2$) dan oksigen sebagai prekursornya. Dalam percobaan pada jurnal ini, suhu deposisi ALD bervariasi dari 300°C hingga 400°C. Selajutnya hasil sintesis akan diuji karakterisasi dan sifat kapasitifnya sebagai superkapasitor.



Gambar 4.20 Hasil pengujian (a) SEM *cross-sectional* (b) SEM Close-up dan (c) TEM dari komposit CNT/RuO_2 (Warren, dkk. 2014).

Gambar 4.20 (a) menunjukkan gambar SEM *cross-sectional* CNT yang dilapisi RuO_2 yang memperlihatkan bahwa CNT yang panjangnya sekitar 50 µm memiliki ruang pori besar tersedia untuk RuO_2 dapat menembus ke dalam matriks padat CNT. Lalu gambar 4.20 (b) menunjukkan gambar SEM close-up yang memperlihatkan bahwa CNT secara seragam dilapisi RuO_2 oleh proses ALD. Gambar 4.20 (c) menunjukkan gambar TEM yang memperlihatkan bahwa lapisan ALD sekitar 20 nm tebalnya dan memiliki adhesi yang baik ke permukaan CNT.



Gambar 4.21 Hasil uji CV dari CNT dan komposit CNT/RuO_2 (Warren, dkk. 2014).

Gambar 4.21 menunjukkan hasil uji CV pengukuran CNT yang dilapisi dibandingkan dengan yang tidak dilapisi. Arus kapasitif untuk CNT berlapis RuO_2 pada kecepatan pindai 100 mV/s memiliki nilai kapasitansi spesifik 100 F/g. Tingginya nilai kapasitansi spesifik dari CNT berlapis RuO_2 disebabkan oleh kualitas lapisan ALD. Studi sebelumnya telah menunjukkan pentingnya hydrous RuO_2 ($RuO_2 \cdot nH2O$) pada permukaan CNT untuk mencapai kinerja nilai kapasitif yang tinggi pada superkapitor . Dari kurva CV pengukuran CNT berlapis RuO_2, kami menyimpulkan proses ALD sangat cocok untuk membuat permukaan yang dilapisi RuO_2. Selain kualitas ALD RuO_2, area permukaan yang tinggi dan banyaknya CNT juga berkontribusi pada tingginya kapasitansi spesifik perangkat tersebut.

4.2 Pembahasan

Pada review jurnal ini dilakukan pembahasan data berupa morfologi dan sifat kapasitif CNT/RuO_2 seperti berikut.

4.2.1 Morfologi Komposit CNT/RuO_2

Dari beberapa hasil review jurnal di atas, dapat diketahui bahwa tiap metode menghasilkan komposit CNT/RuO_2 dengan ukuran yang bervariasi dikarenakan tiap metode memiliki peralatan dan cara sintesis yang berbeda-beda, namun untuk dari segi morfologi komposit CNT/RuO_2 semua jurnal menunjukkan

hasil TEM nya dan mengatakan bahwa gambar morfologi komposit CNT/RuO_2 adalah CNT silinder yang jelas bebentuk bundel nanotube dan terlapisi oleh RuO_2 secara homogen di permukaan dan juga ada beberapa partikel RuO_2 yang terperangkap dalam struktur tubular CNT. Partikel-partikel yang masuk tersebut mungkin masuk ke dalam tabung melalui ujung terbuka yang dibuat selama fungsionalisasi. Pada jurnal-jurnal tersebut kebanyakan tidak menampilkan hasil XRD karena *peak* CNT pada hasil komposit tidak terlihat dikarenakan adanya perbedaan selisih massa bahan pembentuknya yang terlalu tinggi, sehingga mempengaruhi interaksi antara keduanya saat proses pembentukan. Pada komposit CNT/RuO_2, hasil XRD menunjukkan *peak* pada CNT tidak dapat terlihat sedangkan RuO_2 terlihat sangat jelas. Hal ini disebabkan karena ketika kedua material tersebut dikompositkan terjadi interkalasi preferensi antara CNT dengan RuO_2, sehingga *peak* komposit CNT/RuO_2 didominasi oleh RuO_2.

Dari hasil data TEM diatas juga dapat diketahui ukuran rata–rata panjang dari struktur CNT, diameter CNT, dan diameter RuO_2 ditiap metode sintesis. Pada metode hidrotermal, rata–rata panjang CNT yang didapat yaitu sekitar puluhan hingga ratusan mikrometer, namun untuk diameternya tidak disebutkan, sedangkan untuk diameter RuO_2 rata-rata sekitar 2-6 nm. Pada metode *microwave-assisted* rata-rata panjang CNT yang didapat yaitu sekitar puluhan hingga ratusan mikrometer dan ukuran diameter dalamnya sekitar 2-10 nm, ukuran diameter luarnya sekitar 10-50 nm, sedangkan diameter RuO_2 nya yaitu sekitar 1-2 nm. Sedangkan pada metode *catodic deposition* dan *chemical reduction* hanya rata-rata panjang CNT saja yang didapat yaitu sama-sama sekitar puluhan hingga ratusan meter. Pada metode *atomic layer deposition* didapatkan panjang CNT sekitar 50 mikrometer dan memiliki tebal sekitar 20 nm.

Selanjutnya pada sub bab ini juga akan membahas hasil karakterisasi komposit CNT/RuO_2 berupa uji FTIR dan XRD namun dari 7 jurnal yang dibahas hanya ada 2 jurnal yang

membahas hal tersebut yaitu Kim,dkk (2010) pada metode *microwave-assisted* membahas hasil uji FTIR dan Yin,dkk (2017) pada metode *catodic deposition* membahas hasil uji XRD. Pada jurnal Kim,dkk menjelaskan hasil dari uji FTIR yaitu puncak sekitar 1570 dan 1630cm^{-1} yang merupakan puncak dari gugus C=C, C=O dan CNT, masing-masing. Selanjutnya pada puncak 1734cm^{-1} merupakan gugus C=O yang dikelompokkan pada kelompok karboksil gugus asam (–COOH). Penurunan intensitas puncak kelompok fungsional setelah pembentukan nanopartikel oksida menunjukkan interaksi yang kuat antara nanopartikel Ruthenium oksida dan kelompok permukaan karboksil. Lalu pada jurnal Yin,dkk menjelaskan hasil uji XRD yaitu dua puncak utama di 26,5 ° dan 42,3 ° merupakan difraksi dari (002) dan (100) bentuk CNTs, masing-masing. Puncak RuO_2 dalam nanokomposit juga ditemukan amorf, yang ditunjukkan oleh tidak adanya puncak difraksi. Selanjutnya terdapat tabel hasil morfologi dari tiap-tiap metode sintesis yang berbeda-beda.

Tabel 4.1 Hasil morfologi di tiap metode sintesis

Metode Sintesis	Diameter CNT	Panjang CNT	Diameter RuO_2
Hidrotermal	-	Puluhan hingga ratusan mikrometer	2-6 nm
Microwave-Assisted	2-50 nm	Puluhan hingga ratusan mikrometer	1-2 nm
Catodic Deposition	-	Puluhan hingga ratusan mikrometer	-
Chemical Reduction	-	Puluhan hingga ratusan mikrometer	-
Atomic Layer Deposition	20 mikrometer	50 mikrometer	-

Material untuk penyimpanan energi umumnya memiliki morfologi yaitu surface area yang tinggi dan konduktivitas yang tinggi pula. Pada review paper ini pengaruh morfologi terhadap sifat kapasitif yaitu semakin besar diameter dari komposit CNT/RuO_2 maka semakin cepat juga laju transfer elektronnya sehingga membuat nilai kapasitansinya tinggi. Namun selain dibutuhkan diameter yang tinggi juga material tersebut harus memiliki surface area yang tinggi agar dapat menampung electron yang masuk kedalam komposit. Jika diameter dari material komposit tersebut terlalu besar juga tidak baik karena bisa membuat cepat kehilangan energi sehingga material kompositnya tidak bekerja optimal.

4.2.2 Sifat Kapasitif CNT/RuO_2

Dari hasil beberapa jurnal yang sudah di *review* di atas, dapat diketahui bahwa tiap metode menghasilkan nilai spesifik kapasitansi yang bervariasi. Hasil data yang di dapat dari nilai spesifik kapasitansi yang paling besar komposit CNT/RuO_2 yaitu menggunakan metode sintesis hidrotermal. Pada metode hidrotermal tersebut, rata – rata nilai spesifik kapasitansi yang didapat sebesar 900 – 1500 F/g. Nilai rata-rata spesifik kapasitansi dari semua metode tersebut yaitu sekitar 100-1500 F/g, sehingga dengan rata-rata nilai kapasitansi tersebut dapat dikatakan komposit CNT/RuO_2 sangat bagus dijadikan sebagai aplikasi superkapasitor. Metode hidrotermal juga sangat cocok untuk sintesis komposit CNT/RuO_2 karerna metode ini mebuat pertumbuhan kristal besar berkualitas baik sambil mempertahankan kontrol yang baik atas komposisi mereka. Berikut datanya ditunjukkan pada table 4.2.

Tabel 4.2 Nilai kapasitansi komposit CNT/RuO2

Komposit	Metode Sintesis	Nilai Kapasitansi	Referensi
CNT/RuO_2	Hidrotermal pada suhu 160ºC selama 5 jam	Nilai spesifik kapasitansi tertinggi pada *scan rate* 2mV/s yaitu 1585 F/g	Chaitra,dkk (2016)
CNT/RuO_2	Hidrotermal pada suhu 120ºC selama 6 jam	Nilai spesifik kapasitansi tertinggi yaitu 953 F/g	Bi,dkk (2010)
CNT/RuO_2	Microwave-assisted dengan daya 1600W selama 2 menit	Nilai spesifik kapasitansi tertinggi pada *scan rate* 10mV/s yaitu 450 F/g	Kim,dkk (2010)
CNT/RuO_2	Microwave-assisted dengan daya 700W selama 30 detik	Nilai spesifik kapasitansi tertinggi pada *scan rate* 50mV/s yaitu 493,9 F/g	Yan,dkk (2010)
CNT/RuO_2	Catodic deposition dengan kolektor arus MEMS menggunakan larutan elektrolit Na_2SO_4 pada 500 $mA.cm^{-2}$ selama 2000 detik	Nilai spesifik kapasitansi tertinggi pada *scan rate* 10mV/s yaitu 208,5 F/g	Yin,dkk (2017)
CNT/RuO_2	Chemical reduction dengan larutan pereduksi campuran 0,1 M $NaBH_4$ dan 1 M NaOH	Nilai spesifik kapasitansi tertinggi pada *scan rate* 10mV/s yaitu 174 F/g	Jha,dkk (2013)
CNT/RuO_2	Atomic layer deposition dengan suhu deposisi 300ºC- 400ºC	Nilai spesifik kapasitansi tertinggi pada *scan rate* 100mV/s yaitu 100 F/g	Warren,dkk (2014)

Selain dilihat dari nilai spesifik kapasitansinya, sifat kapasitif dari metode-metode sintesis CNT/RuO_2 ini juga bisa dilihat dari bentuk kurva uji CV nya. Setelah melakukan review beberapa metode sintesis CNT/RuO_2 terlihat bahwa hampir seluruh bentuk dari kurva CV nya tidak sepenuhnya rectangular atau persegi. Bentuk tersebut menandakan adanya hump (gundukan) yang berarti adanya efek reaksi redoks pada superkapasitor baik oksidasi maupun reduksi ciri khas kapasitor tersebut menurut (Elzbieta, 2001) merupakan ciri dari *pseudo-capacitor*. Dari 5 metode yang telah saya review terdapat sebuah metode yaitu *atomic layer deposition* yang bentuk kurvanya tidak terlalu simetris, hal tersebut menunjukkan metode tersebut kemampuan charging dan dischargingnya tidak sama dan lebih cocok untuk aplikasi baterai daripada diaplikasikan untuk superkapasitor.

Proses hidrotermal dianggap ramah lingkungan. Selain itu, metode ini juga dapat mengontrol difusivitas dalam sistem tertutup. Proses ini memiliki keunggulan dibandingkan teknik lain karena dapat menghasilkan partikel dengan kemurnian tinggi, kristalinitas yang baik, dapat mengendalikan karakteristik kimia dan fisik. Metode ini juga merupakan proses sintering suhu rendah dengan kebutuhan energi kecil yang mudah diimplementasikan. Namun, proses ini memiliki kontrol yang kurang baik terhadap agregasi partikel nano. Sifat dari pelarutnya berubah secara drastis dalam fase superkritis. Jadi, fase superkritis memberikan kondisi yang menguntungkan untuk pembentukan partikel karena peningkatan laju reaksi dan kejenuhan yang sangat baik. Metode hidrotermal memiliki nilai kapasitif yang paling tinggi karena pada metode hidrotermal hasil sintesis yang dihasilkan memiliki struktur kristal yang sangat baik sehingga menghasilkan konduktivitas ion yang sangat baik (Poonam,dkk, 2019). Selain itu metode hidrotermal menghasilkan nilai kapasitif yang tinggi juga disebabkan oleh hasil sintesis RuO_2 nya berupa RuO_2 hydrous, dimana RuO_2 hydrous ini merupakan material yang bagus nilai kapasitansinya dibandingkan dengan RuO_2 yang anhydrous. Pada superkapasitor diperlukan konduktivitas ion, konduktivitas proton dan konduktivitas

elektrolit yang baik maka dari itu kenapa pada hasil review diatas hasil sintesis dengan metode hidrotermal sangat baik karena metode hidrotermal memiliki konduktivitas proton dan ion yang sangat baik dibandingkan dengan metode sintesis lainnya.

4.3 Kritisasi Jurnal

Dalam beberapa jurnal yang telah dikumpulkan, terdapat beberapa data hasil pengujian/karakterisasi dan juga data hasil uji sifat kapasitif yang tidak dicantumkan dan dijelaskan secara rinci oleh peneliti, sehingga menimbulkan beberapa kesulitan dalam proses me*review*. Oleh karena itu, diperlukan data tambahan dari jurnal lainnya, sehingga kekurangan dan kelebihan dari masing-masing data pengujian dapat saling melengkapi. Kebanyakan jurnal yang di review hanya mencantukmkan hasil TEM saja untuk karakterisasinya dan hasil uji CV untuk sifat kapasitifnya, Sedangkan hasil karakterisasi lainnya seperti pengujian XRD, FTIR, dan SEM hanya terdapat pada beberapa jurnal saja dan hasil uji sifat kapasitifnya juga hanya terdapat pada beberapa jurnal saja. Namun terdapat penjelasan singkat dari masing-masing pengujian tersebut, seperti yang telah disajikan pada Tabel 4.3 berikut ini.

Tabel 4.3 Data dan penjelasan hasil pengujian

Metode (Peneliti)	**Pengujian**					
	XRD	FTIR	SEM /FE-SEM	TEM /HR-TEM	CV	GCD
Metode Hidrotermal (Chaitra,dkk.,2016)	-	-	-	√	√	√
Metode Hidrotermal (Bi,dkk.,2010)	-	-	√	√	√	√
Metode Microwave-Assisted (Kim,dkk.,2010)	-	√	√	√	√	-
Metode Microwave-Assisted (Yan,dkk.,2010)	-	-	-	√	√	-
Metode Catodic Deposition (Yin,dkk.,2017)	√	-	√	√	√	√
Metode Chemical Reduction (Jha,dkk.,2013)	-	-	-	√	√	√
Atomic Layer Deposition (Warren,dkk.2014)	-	-	√	√	√	-

Selanjutnya pada kritisasi jurnal ini juga membahas tentang kelebihan dan kekurangan dari tiap-tiap metode dalam mensintesis komposit CNT/RuO_2. Berikut merupakan tabel kelebihan dan kekurangan yang dimiliki pada tiap metode tersebut.

Tabel 4.4 Kelebihan dan kekurangan tiap metode sintesis

Metode	Kelebihan	Kekurangan
Hidrotermal	• Terbentuk *powder* secara langsung dari larutan. • Menghasilkan partikel dengan kemurnian tinggi dan kristalinitas yang baik. • Temperatur yang digunakan rendah dan membutuhkan energi yang kecil.	• Solubilitas material awal harus diketahui. • *Slurry* hidrotermal bersifat korosif. • Penggunaan bejana tekanan tinggi akan berbahaya jika terjadi kecelakaan.
Microwave-Assisted	• Metode yang digunakan sederhana • Membutuhkan waktu sintesis yang sangat cepat. • Menghasilkan partikel kecil dengan ukuran dan bentuk yang seragam.	• Membutuhkan daya listrik yang besar selama proses sintesis. • Pemanasan secara konduktif sehingga prosesnya sangat lambat dan terjadi kehilangan energi di dinding wadah sehingga tidak efisien.
Catodic Deposition	• Mengurangi keausan dan gesekan. • Material yang dihasilkan bersifat kristalin. • Meningkatkan tingkat ketahanan korosi.	• Metode sintesisnya terlalu rumit karena harus membuat elektroda terlebih dahulu. • Menggunakan pelarut yang bersifat toksik dan berbahaya.
Chemical Reduction	• Dapat menggunakan berbagai macam substrat sesuai yang diinginkan. • Pengendapan lapisan aktif substrat biasanya dilakukan tanpa membuat substrat larut dalam bahan kimia.	• Menggunakan larutan kimia yang bersifat toksik dan berbahaya. • Susah dalam mengontrol reaksi kimianya.
Atomic Layer Deposition	• Homogenitas produknya tinggi. • Memungkinkan kontrol tingkat angstrom terhadap ketebalan lapisannya.	• Alat yang digunakan sangat mahal. • Proses sintesisnya rumit.

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan berdasarkan *paper review* yang telah dilakukan, yaitu sebagai berikut.

1. Dari semua jurnal metode sintesis menunjukkan hasil TEM nya bahwa bentuk morfologi komposit CNT/RuO_2 adalah CNT silinder yang jelas bebentuk bundel nanotube dan terlapisi oleh RuO_2 secara homogen di permukaan dan juga ada beberapa partikel RuO_2 yang terperangkap dalam struktur tubular CNT dan rata-rata diameter RuO_2 yang melapisinya yaitu sekitar 1-6 nm.
2. Pada sintesis komposit CNT/RuO_2 dengan variasi metode hidrotermal, microwave-assisted, catodic deposition, chemical reduction, dan atomic layer deposition didapatkan kesimpulan bahwa nilai spesifik kapasitansi yang paling besar dari komposit CNT/RuO_2 menggunakan metode sintesis hidrotermal. Pada metode hidrotermal tersebut, rata – rata nilai spesifik kapasitansi yang didapat sebesar 900 – 1500 F/g.

5.2 Saran

Adapun saran dari dan bagi penulisan *paper review* ini adalah sebagai berikut.

1. Dari beberapa jurnal penelitian yang telah di review, dihasilkan bahwa nilai kapasitif dan morfologi yang paling baik menggunakan metode hidrotermal. Sehingga saya memberikan saran untuk penelitian sintesis komposit CNT/RuO_2 yang akan dilakukan untuk mendapatkan hasil sintesis yang optimal maka lebih menggunakan metode sintesis hidrotermal.

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

DAFTAR PUSTAKA

Aswardi. (2012). **Pengaruh Variasi Ph Pada Proses Modifikasi Komposit CN-MnO2 Untuk Optimalisasi Karakter Superkapasitor 546 ASW p.** Perpustakaan Fakultas Sains dan Matematika Universitas Diponegoro.

Baughman, R. H., Zakhidov, A. A., & De Heer, W. A. (2002). Science. In **Carbon Nanotubes-the route toward applications** (p. 297). United States.

Baur, W. H., & Khan, A., A. (1971). Rutile-type compounds. IV. SiO2, GeO2 and a comparison with other rutile-type structures. **Acta Crystallographica**.

Bi, R.-R., Wu, X.-L., Cao, F.-F., Jiang, L.-Y., Guo, Y.-G., & Wan, L.-J. (2010). Highly Dispersed RuO2 Nanoparticles on Carbon Nanotubes: Facile Synthesis and Enhanced Supercapacitance Performance. **J. Phys. Chem**.

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). **Material Science and Engineering: An Introduction (9th ed.)**. United States: John Wiley & Sons, Inc.

Chaitra, K., Sivaraman, P., Vinny, R.T., Bhatta, U. M., Nagaraju, N., & Kathyayini, H. (2016). High energy density performance of hydrothermally produced hydrous Ruthenium oxide/ multiwalled carbon nanotubes composite: Design of an asymmetric supercapacitor with excellent cycle life. **Journal of Energy Chemistry**.

Chen, T., & Dai, L. M. (2013). **Carbon Nanomaterials for High-Performances Supercapacitors**. Mater.

Conway, B. E. (1999). **Electrochemical Supercapacitors: Sciencetific Fundamentals and Technological Applications.** United States: Springer.

Dresselhaus, M. S., Drasselhaus, G, & Saito, R. (1998). **Physical Properties of Carbon Nanotubes.** London: Imperial College Press.

Elzbieta, F. (2001). Carbon Materials for The Electrochemical Storage of Energy in Capacitors. **Carbon**, 937-950.

Endo, M., Takeda, T., Kim, Y., Koshiba, K., & Ishii, K. (2001). High Power Electric Double Layer Capacitor (EDLC's); from Operating Principle to Pore Size Control in Advanced Activated Carbons. **Carbon Letters**, *I*, 117-128.

Hartanto, L. (2009). Study Perlakuan Alkali dan Fraksi Volume Serat Terhadap Kekuatan Bending, Tarik, dan Impak Komposit Berpenguat Serat Rami Bermatrik Polyester BQTN 157. **Skripsi Thesis**.

He, X., Jiang, L., Yan, S., Lei, J., Zheng, M., & Shui, H. (2008). Direct synthesis of porous carbon nanotubes and its performance as conducting material of supercapacitor electrode. **Diamond and Related Materials(17)**, 993-998.

Herlem, G., Picaud, F., Girardet, C., & Micheau, O. (2019). **Carbon Nanotubes: Synthesis, Characterization, and Applications in Drug-Delivery Systems**. Dijon, France.

Jayalakhsmi, M., Palaniappa, M., & Balasubramanian, K. (2007). **Single Step Solution Combustion Synthesis of ZnO/carbon Composite and its Electrochemical Characterization for Supercapacitor Application**. Int. J. Electrochem. Sci.

Jha, N., Bekyarova, E., Ramesh, P., Itkis, M. E., & Haddon, R. C. (2013). Ruthenium Oxide - Single Walled Carbon Nanotube Composite Based High Energy Supercapacitor. **International Conference on Advanced Nanomaterials & Emerging Engineering Technologies**, 436-439.

Kalubarme, R. S., Kim, Y.-H., & Park, J.-C. (2013). One step hydrothermal synthesis of a carbon nanotube/cerium oxide nanocomposite and its electrochemical properties. **Nanotechnology**(24).

Khan, W., Sharma, R, & Saini, P. (2016). **Carbon Nanotube-Based Polymer Composites: Synthesis, Properties and Applications.** India: Intechopen.

Kim, I.-H., & Kim, K.-B. (2001). Ruthenium Oxide Thin Film Electrodes for Supercapacitors. **Electrochemical and Solid-State Letters.**

Kim, J.-Y., Kim, K.-H., Park, S.-H., & Kim , K.-B. (2010). Microwave-polyol synthesis of nanocrystalline ruthenium oxide nanoparticles on carbon nanotubes for electrochemical capacitors. **Electrochimica Acta**.

Kim, Y.T., Tadai, K., & Mitani, T. (2005). Highly dispersed ruthenium oxide nanoparticles on carboxylated carbon nanotubes for supercapacitor electrode materials. **Journal of Materials Chemistry**, 4914-4921.

Kroto, H. W., Heath, J. R., O'Brien, S. C., Curl, R. F., & Smalley, R. E. (1985). C60 Buckminsterfullerene. Dalam **Nature** (Vol. 318, hal. 162-163).

Lee, S. (2003). Electrochromism of amorphous ruthenium oxide thin films. **Solid State Ionic**, 217-221.

Majumdara, D., Thandavarayan, M., & Jiang, Z. (2019). A Review on Recent Progress in Ruthenium Oxide-based Composites for Supercapacitor Applications. **ChemElectroChem.**

Mills, A. (1989). Heterogeneous Redox Catalysts for Oxygen and Chlorine Evolution. **Chemical Society Reviews**, 285-316.

Murali, S., & Perumal, S. (2018). Synthesis of Nanotubes Under Carbon Environment at Low Temperature Using Hydrothermal Method. **Optik**.

Namitha. (2014). **Solvothermal hydrothermal synthesis of carbon nanotubes and carbon anospheres and studying their properties.** Bangalore University.

Neves, V., Heister, E., Costa, S., & Tilmaciu, C. (2012). Design of Double-Walled Carbon Nanotubes for Biomedical Applications. **Nanotechnology**.

Ningsih, S. K. (2016). **Sintesis Anorganik**. Padang: UNP Press.

Öhrström, L. (2013). **Chemistry World**. Dipetik 02 08, 2020, dari https://www.chemistryworld.com/podcasts/ferrocene/6134.article

Saleh, H. M., & Koller, M. (2019). Introductory Chapter: Carbon Nanotubes. Dalam **Carbon Nanotubes**. Egypt: Intechopen.

Shanmugam, K., J. Manivannan, & M. Manjuladevi. (2018). Stupendous Nanomaterials: Carbon Nanotubes Synthesis, Characterization, and Applications. **Nanomaterials**.

Singsang, W., Panapoy, M., & Ksapabutr, B. (2014). Facile one-pot synthesis of freestanding carbon nanotubes on cellulose-derived carbon films for supercapacitor applications: effect of the synthesis temperature. **Energy Procedia(56)**, 439-447.

Somiya, S. (1989). **Hydrothermal Reactions For Materials Science and Engineering.** London: Elsevier Applied Science.

Wang, T., Zhai, Y., Zhu, Y., Li, C., & Zheng, G. (2018). Review of The Hydrothermal Carbonization of Biomass Waste for Hydrochar Formation: Process Conditions, Fundamentals, and Physicochemical Properties. **Renewable and Suistanable Energy Reviews.**

Wang, X., Sumboja, A., Lin, M., Yan, J., & Lee, P. S. (2012). Enhancing electro-chemical reaction sites in nickel-cobalt layered double hydroxides on zinc tinoxide nanowires: a hybrid material for an asymmetric supercapacitor device. **Nanoscale**.

Warren, R., Sammoura, F., Kozinda, A., & Lin, L. (2014). **ALD Ruthenium Oxide-Carbon Nanotube Electrodes for Supercapacitor Applications.** 167-170.

Yan, S., Wang, H., Qu, P., Zhang, Y., & Xiao, Z. (2010). RuO2/carbon nanotubes composites synthesized by microwave-assisted method for electrochemical supercapacitor. ***Synthetic Metals*.**

Yin, Y., Wang, X., & You, Z. (2017). Integration of Ruthenium oxide-Carbon Nanotube Composites with Three-Dimensional Interdigitated Microelectrodes for the

Creation of On-Chip Supercapacitors. **Int. J. Electrochem. Sci**, 3883-3906.

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

LAMPIRAN

A. Data JCPDS

1. Carbon (JCPDS 00-041-1487)

Name and formula

Reference code:	00-041-1487
Mineral name:	Graphite-2H
Compound name:	Carbon
Common name:	C.I. Pigment Black 10, plumbago, cliftonite
Empirical formula:	C
Chemical formula:	C

Crystallographic parameters

Crystal system:	Hexagonal
Space group:	P63/mmc
Space group number:	194
a (Å):	2.4704
b (Å):	2.4704
c (Å):	6.7244
Alpha (°):	90.0000
Beta (°):	90.0000
Gamma (°):	120.0000
Calculated density (g/cm^3):	2.24
Measured density (g/cm^3):	2.16
Volume of cell (10^6 pm^3):	35.54
Z:	4.00
RIR:	7.78

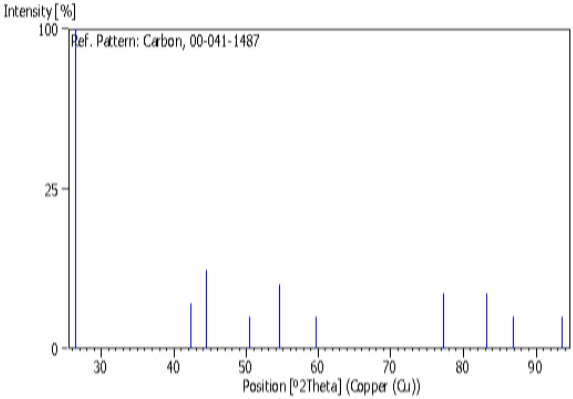
Subfiles and quality

Subfiles:	Alloy, metal or intermetalic Common Phase Educational pattern Forensic Inorganic Mineral Pigment/Dye

Peak list

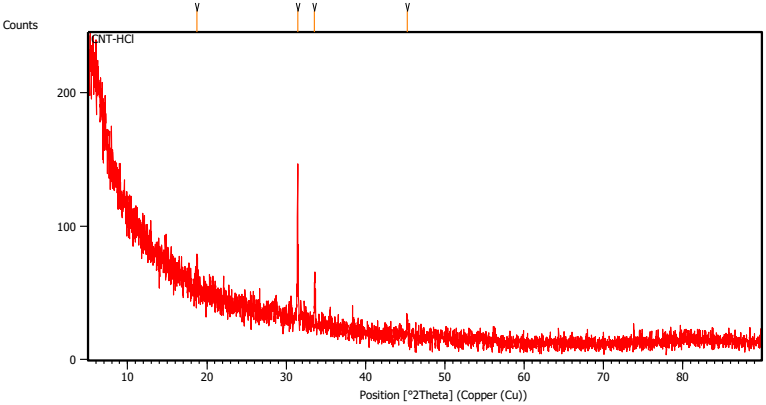
No.	h	k	l	d [A]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	0	2	3.37560	26.382	100.0
2	1	0	0	2.13860	42.224	2.0
3	1	0	1	2.03900	44.393	6.0
4	1	0	2	1.80740	50.452	1.0
5	0	0	4	1.68110	54.544	4.0
6	1	0	3	1.54780	59.692	1.0
7	1	1	0	1.23410	77.244	3.0
8	1	1	2	1.16040	83.184	3.0
9	0	0	6	1.12080	86.830	1.0
10	2	0	1	1.05670	93.600	1.0

Stick Pattern



B. Hasil Pengujian XRD

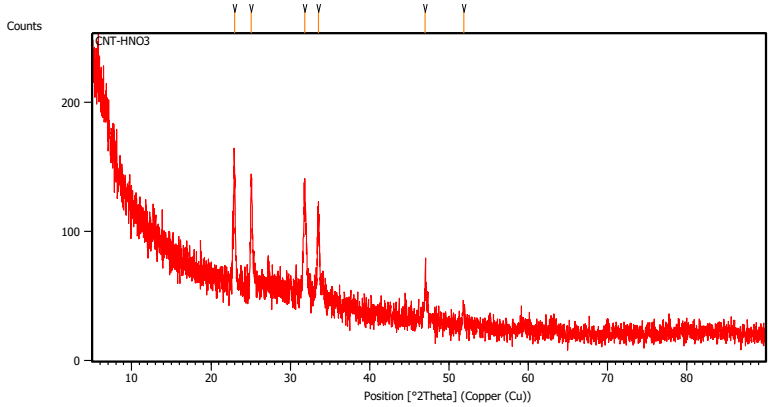
1. Ferrocene dicuci dengan HCl



Peak List: ***(Bookmark 3)***

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
18.7501	11.40	0.4015	4.73268	10.18
31.4293	112.07	0.0502	2.84639	100.00
33.5770	29.57	0.1338	2.66908	26.38
45.2386	13.24	0.2007	2.00448	11.81

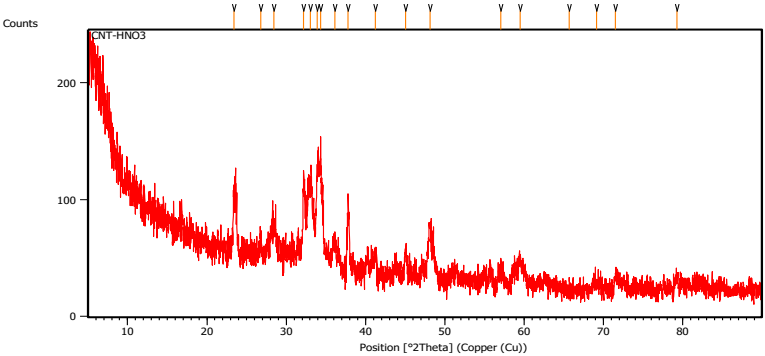
2. Ferrocene dicuci dengan HNO_3 pertama



Peak List: ***(Bookmark 3)***

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
22.9478	86.88	0.1673	3.87558	100.00
25.0869	84.18	0.1673	3.54977	96.90
31.7866	74.05	0.2342	2.81521	85.23
33.5539	63.58	0.2342	2.67087	73.19
47.0027	29.13	0.2007	1.93328	33.53
51.8697	9.88	0.4015	1.76275	11.37

3. Ferrocene dicuci dengan HNO_3 kedua



Peak List: ***(Bookmark 3)***

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
23.4190	53.38	0.1171	3.79866	63.05
26.7848	11.25	0.3346	3.32847	13.28
28.4088	24.06	0.5353	3.14179	28.41
32.1847	62.45	0.1338	2.78129	73.76
33.0309	65.71	0.4015	2.71195	77.61
33.9371	81.10	0.3346	2.64158	95.79
34.3545	84.67	0.2676	2.61044	100.00
36.1650	24.57	0.4015	2.48380	29.02
37.7921	52.21	0.3346	2.38052	61.66
41.2551	17.76	0.2676	2.18835	20.98
45.0232	22.63	0.2676	2.01357	26.73
48.1234	45.24	0.4015	1.89085	53.43
57.0205	8.89	0.6691	1.61515	10.50
59.5076	21.94	0.5353	1.55345	25.91
65.6949	8.74	0.1020	1.42016	10.32
69.1327	5.95	0.8029	1.35881	7.03
71.5019	13.93	0.3346	1.31950	16.45
79.2631	6.26	0.4015	1.20865	7.40

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan bimbingan kepada penulis sehingga Tugas Akhir dan studi dapat di selesaikan. Oleh sebab itu, ijinkan penulis mengucapkan untaian terima kasih kepada :

1. Allah S.W.T. yang merupakan Rahmatan Lil'Alamin
2. Ibu, Bapak dan seluruh keluarga tercinta atas segala doa, dukungan berupa moril dan materiil yang telah diberikan selama ini.
3. Seluruh Dosen Departemen Teknik Material yang telah memberikan ilmu yang dapat menjadi bekal untuk masa yang akan datang.
4. Seluruh Karyawan Departemen Teknik Material.
5. Seluruh teman saya MT18 yang saya banggakan.
6. Elvira Sulcha Nasucha selaku patner Tugas Akhir saya yang telah membantu dan berdiskusi dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
7. UKM Bridge ITS yang telah memberikan saya kesempatan untuk berkembang dalam mengatur sebuah oraganisasi dan juga berkembang dalam hal prestasi.
8. Serta seluruh pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BIODATA PENULIS

Penulis lahir di Jember, April 1998 dengan orang tua bernama Sugiarto dan Husnul Hotimah. Penulis merupakan anak tunggal. Hobi penulis adalah bermain bridge dan sekarang juga seorang atlet bridge. Penulis pernah menuntut ilmu di TK Dharma Wanita Tisnogambar (2002 – 2004), SD Negeri Rambipuji 2 (2004 – 2010), SMP Negeri 1 Rambipuji (2010 – 2013), SMA Negeri 1 Jember (2013 – 2016) dan Perguruan Tinggi di Departemen Teknik Material Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya (2016 – Sekarang). Selama perkuliahan penulis aktif dalam kegiatan kemahasiswaan di Badan Semi Otonom Minat Bakat HMMT FTI – ITS dan di Departemen Internal UKM Bridge ITS kepengurusan 2017/2018 sebagai staff. Penulis juga pernah menjabat sebagai Ketua UKM Bridge ITS kepengurusan 2018/2019. Penulis juga memiliki pengalaman industri dalam melaksanakan kerja praktik di Divisi Rekayasa Manufaktur PT. Dirgantara Indonesia (Persero) Bandung, Jawa Barat. Saat ini, penulis tinggal di Dusun Krajan RT 002/ RW 003 Tisnogambar, Kec. Bangsalsari, Kab. Jember, Jawa Timur. Penulis bisa dihubungi melalui email gatrawiradika86@gmail.com atau nomor *handphone* 082245806998.

BIODATA PENULIS