



TUGAS AKHIR – TL184834

**REVIEW PENGARUH PENAMBAHAN CARBON NANOTUBES
(CNT) TERHADAP STRUKTUR DAN SIFAT KAPASITIF
KOMPOSIT BERBASIS CNT UNTUK APLIKASI
SUPERKAPASITOR**

**ELVIRA SULCHA NASUCHA
NRP. 0251164000017**

**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 PENAMBAHAN CARBON
NANOTUBES (CNT) TERHADAP STRUKTUR DAN SIFAT
KAPASITIF KOMPOSIT BERBASIS CNT UNTUK
APLIKASI SUPERKAPASITOR**

ELVIRA SULCHA NASUCHA
NRP. 0251164000017

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

**A REVIEW OF THE EFFECT OF ADDITION OF
CARBON NANOTUBES (CNT) ON THE STRUCTURE
AND CAPACITIVE PROPERTIES OF CNT-BASED
COMPOSITE FOR SUPERCAPACITOR APPLICATION**

ELVIRA SULCHA NASUCHA
NRP. 0251164000017

Advisor
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
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2020

(This page is intentionally left blank)

**REVIEW PENGARUH PENAMBAHAN CARBON
NANOTUBES (CNT) TERHADAP STRUKTUR DAN SIFAT
KAPASITIF KOMPOSIT BERBASIS CNT UNTUK
APLIKASI SUPERKAPASITOR**

TUGAS AKHIR

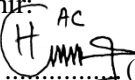

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

ELVIRA SULCHA NASUCHA

NRP 0251164000017

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

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



SURABAYA
Juli 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**REVIEW PENGARUH PENAMBAHAN CARBON
NANOTUBES (CNT) TERHADAP STRUKTUR DAN SIFAT
KAPASITIF KOMPOSIT BERBASIS CNT UNTUK
APLIKASI SUPERKAPASITOR**

Nama : Elvira Sulcha Nasucha
NRP : 0251164000017
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing 1 : Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.
Dosen Pembimbing 2 : Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D.

Abstrak

Kinerja superkapasitor dipengaruhi oleh beberapa hal salah satunya elektroda. Pada umumnya, elektroda tersusun dari bahan-bahan seperti carbon, metal oxide, metal sulfide, dan lain-lain. Material carbon memiliki kepadatan energi yang rendah serta konduktivitas yang tinggi. Sedangkan metal oxide dan metal sulfide memiliki kepadatan energi yang tinggi serta konduktivitas yang rendah. Untuk meningkatkan kinerja superkapasitor, material tersebut perlu dikompositkan dengan material lain seperti carbon nanotubes (CNT). Review ini membahas mengenai penambahan CNT terhadap komposit berbasis CNT seperti komposit CNT/metal oxide, CNT/metal sulfide, dan CNT/carbon. Untuk menganalisis struktur komposit dilakukan pengujian XRD, SEM, dan TEM. Sedangkan untuk menganalisis sifat kapasitifnya dilakukan pengujian CV, GCD, dan EIS. Penambahan CNT terhadap komposit mampu meningkatkan konduktivitas listrik. Selain itu, juga mampu meningkatkan nilai kapasitansi, power density, energy density, serta menurunkan nilai resistansi transfer muatan. Komposit berbasis CNT/metal oxide memiliki performa paling baik dengan nilai kapasitansi spesifik mencapai 1585 F.g^{-1} , power density mencapai 20700 W.kg^{-1} , energy density mencapai 344.8 Wh.kg^{-1} , dan resistansi transfer muatan mencapai 0.046Ω .

Kata Kunci: *Carbon nanotubes, Sifat kapasitif, Struktur, Superkapasitor.*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**A REVIEW OF THE EFFECT OF ADDITION OF
CARBON NANOTUBES (CNT) ON THE STRUCTURE
AND CAPACITIVE PROPERTIES OF CNT-BASED
COMPOSITE FOR SUPERCAPACITOR APPLICATION**

Student Name : Elvira Sulcha Nasucha
NRP : 0251164000017
Department : Materials and Metallurgical Engineering
Advisor 1 : Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.
Advisor 2 : Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D.

Abstract

The performance of supercapacitor can be influenced by several things, one of which is the electrode. In general, electrodes are composed of materials such as carbon, metal oxide, metal sulfide, and others. Carbon material has a low energy density and high electrical conductivity. Meanwhile, metal oxide and metal sulfide have a high energy density and low conductivity. To improve the performance of supercapacitor, these materials need to be combined with other materials such as carbon nanotubes (CNT). This review discusses about the addition of CNTs to CNT-based composites such as CNT/metal oxide, CNT/metal sulfide, and CNT/carbon composites. To analyse the composite structure, XRD, SEM, and TEM tests were performed. Meanwhile, to analyse its capacitive properties, CV, GCD, and EIS tests were performed. The addition of CNT to the composite is able to increase the electrical conductivity. In addition, it is also able to increase the specific capacitance, power density, energy density, and decrease the charge transfer resistance value. CNT/metal oxide based composites have the best performance with specific capacitance values reaching 1585 F.g^{-1} , power density reaching 20700 W.kg^{-1} , energy density reaching 344.8 Wh.kg^{-1} , and charge transfer resistance reaching 0.046Ω .

Keywords: *Capacitive properties, Carbon nanotubes, Structure, Supercapacitor.*

(This page is intentionally left blank)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir dengan judul “**Review Pengaruh Penambahan *Carbon Nanotubes* (CNT) terhadap Struktur dan Sifat Kapasitif Komposit Berbasis CNT untuk Aplikasi Supercapacitor**” dengan baik dan tepat pada waktunya.

Selama pelaksanaan dan penyusunan Laporan Tugas Akhir ini, penulis mendapat banyak sekali bantuan, bimbingan, serta dukungan dari semua pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan banyak terima kasih kepada:

1. Bapak Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing 1 Tugas Akhir.
2. Ibu Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D, selaku dosen pembimbing 2 Tugas Akhir.
3. Kedua orang tua yang selalu mendukung dan senantiasa memberikan doa selama pelaksanaan dan penyusunan Laporan Tugas Akhir.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran dari pembaca. Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi penulis maupun pembaca.

Surabaya, 4 Juli 2020
Penulis

Elvira Sulcha Nasucha

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i	
LEMBAR PENGESAHAN	v	
Abstrak	vii	
Abstract	ix	
KATA PENGANTAR	xi	
DAFTAR ISI	xiii	
DAFTAR GAMBAR	xv	
DAFTAR TABEL	xxi	
BAB I PENDAHULUAN		
1.1 Latar Belakang.....	1	
1.2 Perumusan Masalah.....	3	
1.3 Batasan Masalah.....	3	
1.4 Tujuan <i>Review</i>	3	
1.5 Manfaat <i>Review</i>	3	
BAB II TINJAUAN PUSTAKA		
2.1 Komposit.....	5	
2.2 <i>Carbon Nanotubes (CNT)</i>	6	
2.3 <i>Metal Oxide</i>	16	
2.4 <i>Metal Sulfide</i>	18	
2.5 <i>Carbon</i>	20	
2.6 Metode Sintesis Komposit.....	22	
2.7 Superkapasitor.....	25	
BAB III METODOLOGI		35
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN		
4.1 Analisis Data.....	41	
4.1.1 Komposit CNT/ <i>Metal Oxide</i>	41	
4.1.2 Komposit CNT/ <i>Metal Sulfide</i>	58	
4.1.3 Komposit CNT/ <i>Carbon</i>	68	
4.2 Pembahasan.....	78	
4.2.1 Struktur Komposit Berbasis CNT.....	78	
4.2.2 Sifat Kapasitif Komposit Berbasis CNT.....	82	
4.3 Kritik.....	92	

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	95
5.2 Saran	95
DAFTAR PUSTAKA	97
LAMPIRAN	103
UCAPAN TERIMA KASIH	109
BIODATA PENULIS	111

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema produksi <i>polymer matrix composite</i> PVDF/SWCNT (Oliveira & Beatrice, 2018).....	5
Gambar 2.2	Serbuk <i>carbon nanotubes</i> (CNT) (Sivkov, dkk.,2020).....	7
Gambar 2.3	Struktur kristalografi karbon alotropi (Cheng, dkk., 2013).....	7
Gambar 2.4	Struktur material <i>carbon nanotubes</i> (CNT) yang terbentuk menyerupai gulungan <i>graphene</i> (Ferro, 2011).....	8
Gambar 2.5	(a) Struktur material CNT dinding tunggal (SWCNT), (b) dinding ganda (DWCNT), dan (c) dinding multi (MWCNT) (Muller, 2011).....	8
Gambar 2.6	Proses dekomposisi kamper menjadi nanomaterial (Gaddam dkk, 2015).	14
Gambar 2.7	Skema reaksi sintesis CNT dengan metode hidrotermal (Krishnamurthy, dkk., 2014).....	15
Gambar 2.8	Hasil pengujian (a) SEM dan (b) TEM dari CNT yang telah disintesis (Razali, dkk., 2016).....	16
Gambar 2.9	Kelebihan dan kekurangan <i>metal sulfide</i> serta solusi kedepannya sebagai aplikasi superkapasitor (Barik & Ingole, 2020).	19
Gambar 2.10	Kurva (a) <i>cyclic voltammetry</i> (CV) dan (b) <i>galvanostatic charge-discharge</i> (GCD) dari komposit <i>activated mesocarbon microbeads</i> (AMCMBs)/CNT pada <i>scan rate</i> 10, 40, 80, and 160 $\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$ dan <i>specific current</i> pada 0.5 $\text{A}\cdot\text{g}^{-1}$	20
Gambar 2.11	Pendekatan utama sintesis nanopartikel: <i>top-down</i> dan <i>bottom-up</i> (Abdullah, dkk., 2008).....	22
Gambar 2.12	Skema peralatan metode hidrotermal (Yang & Park, 2019).	23

Gambar 2.13	Proses umum metode hidrotermal (Yang & Park, 2019).....	24
Gambar 2.14	Mekanisme pertumbuhan kristal metode hidrotermal (Li, dkk., 2016).	25
Gambar 2.15	Skema perbandingan <i>specific power</i> dan <i>specific energy</i> “Ragone plot” pada beberapa piranti penyimpanan energi (Kötz & Carlen, 2000).....	26
Gambar 2.16	Skema diagram superkapasitor EDLC (Shi, dkk., 2014).....	27
Gambar 2.17	Skema ilustrasi proses <i>charging/ discharging</i> pada superkapasitor EDLC (Chen & Dai, 2013).....	28
Gambar 2.18	Skema diagram pseudokapasitor (Shi, dkk., 2014).....	29
Gambar 2.19	Karakteristik kurva CV dari berbagai jenis superkapasitor (Choi, dkk., 2012).....	34
Gambar 3.1	Diagram alir pembahasan jurnal.	36
Gambar 4.1	Hasil pengujian XRD CNT, WO ₃ , dan komposit CNT/WO ₃ (Di, dkk., 2019).....	42
Gambar 4.2	Hasil pengujian (a) SEM dan (b) TEM komposit CNT/WO ₃ (Di, dkk., 2019).....	43
Gambar 4.3	(a) Hasil perbandingan kurva CV komposit CNT/WO ₃ , CNT, dan WO ₃ murni, (b) perbandingan kurva CV komposit CNT/WO ₃ pada <i>scan rate</i> 5 hingga 100 mV.s ⁻¹ (Di, dkk., 2019).....	44
Gambar 4.4	(a) Perbandingan kurva GCD dan (b) kurva EIS pada komposit CNT/WO ₃ , CNT, dan WO ₃ murni (Di, dkk., 2019).	45
Gambar 4.5	Hasil pengujian XRD komposit CNT/Ni foam/MnO ₂ (Li, dkk., 2019).	46
Gambar 4.6	(a) Hasil pengujian SEM MnO ₂ pada Ni foam, (b) MWCNT yang tumbuh pada substrat Ni foam, (c) komposit MWCNT/Ni foam/MnO ₂ ,	

	dan (d) serpihan nano MnO ₂ yang menempel pada permukaan MWCNT (Li, dkk., 2019).	47
Gambar 4.7	Kurva (a) CV MWCNT/Ni foam/MnO ₂ pada <i>scan rate</i> yang berbeda, (b) GCD MWCNT/Ni foam/MnO ₂ pada densitas arus yang berbeda, dan (c) EIS MnO ₂ /Ni foam dan MWCNT/Ni foam/MnO ₂ dalam larutan elektrolit KOH 6M (Li, dkk., 2019).	49
Gambar 4.8	Hasil pengujian TEM (a) h-RuO ₂ , (b) komposit CNT/h-RuO ₂ , dan (c) h-RuO ₂ dalam lubang tabung CNT (Chaitra, dkk., 2016).....	51
Gambar 4.9	Kurva CV h-RuO ₂ dan komposit CNT/RuO ₂ pada <i>scan rate</i> 2 hingga 100 mV/s (Chaitra, dkk., 2016).....	52
Gambar 4.10	Hasil pengujian XRD NiO dan komposit CNT/NiO (Roy, dkk., 2016).....	54
Gambar 4.11	Hasil pengujian (a) SEM dan (b) TEM komposit CNT/NiO. (Roy, dkk., 2016).....	54
Gambar 4.12	Hasil pengujian CV (a) NiO murni dan (b) komposit CNT/NiO (Roy, dkk., 2016).....	56
Gambar 4.13	Hasil pengujian (a) GCD dan (b) EIS komposit CNT/NiO (Roy, dkk., 2016).....	57
Gambar 4.14	Hasil pengujian XRD pada MoS ₂ murni, MoS ₂ /NC, MoS ₂ /G, dan MoS ₂ /CNT (Chen, dkk., 2018).....	58
Gambar 4.15	Hasil pengujian SEM (a) MoS ₂ yang menggumpal terdiri dari beberapa <i>nanosheet</i> 2D dan (b) MoS ₂ yang menyebar dan menempel pada permukaan CNT pada komposit CNT/MoS ₂ (Chen, dkk., 2018).....	59
Gambar 4.16	Kurva (a) CV, (b) GCD, dan (c) EIS pada MoS ₂ , MoS ₂ /NC, MoS ₂ /G, dan MoS ₂ /CNT (Chen, dkk., 2018).....	60

Gambar 4.17	Hasil pengujian XRD VS ₂ , VS ₄ /CNT 0.01, VS ₄ /CNT 0.02, dan VS ₄ /CNT 0.04 (Wang, dkk., 2019).....	62
Gambar 4.18	Hasil pengujian SEM komposit CNT/VS ₄ (Wang, dkk., 2019).....	62
Gambar 4.19	(a) Kurva CV, (b) GCD, dan (c) EIS komposit CNT/VS ₄ (Wang, dkk., 2019).....	64
Gambar 4.20	Hasil Pengujian XRD komposit CNT/CuS, CuS, dan CNT murni (Hou, dkk., 2016).....	65
Gambar 4.21	Hasil pengujian (a) SEM dan (b) TEM komposit CNT/CuS (Hou, dkk., 2016).....	66
Gambar 4.22	(a) Perbandingan hasil pengujian CV elektroda CuS, CNT, dan CNT/CuS, (b) hasil pengujian GCD komposit CNT/CuS, dan (c) hasil pengujian EIS komposit CNT/CuS (Hou, dkk., 2016).....	67
Gambar 4.23	Hasil pengujian (a) SEM dan (b) TEM pada komposit CNT/ <i>graphene</i> (Cheng, dkk., 2011).....	69
Gambar 4.24	Hasil Pengujian (a) CV, (b) GCD, dan (c) EIS CNT, <i>graphene</i> , komposit CNT/ <i>graphene</i> dalam elektrolit KCl (Cheng, dkk., 2011).	71
Gambar 4.25	Hasil pengujian SEM komposit CNT/AC (Li, dkk., 2019).....	73
Gambar 4.26	Hasil pengujian (a) GCD dan (b) EIS pada komposit CNT/AC (Li, dkk., 2019).....	74
Gambar 4.27	Hasil pengujian (a) SEM dan (b) TEM komposit CNT/GNF (Zhou, dkk., 2018).	75
Gambar 4.28	Hasil pengujian (a) CV komposit CNT/GNF, (b) CV CNT, dan (c) EIS komposit CNT/GNF dan CNT (Zhou, dkk., 2018).	77
Gambar 4.29	Grafik perbandingan nilai kapasitansi spesifik komposit sebelum dan setelah penambahan CNT	83

Gambar 4.30	Grafik perbandingan nilai (a) <i>power density</i> dan (b) <i>energy density</i> sebelum dan setelah penambahan CNT.....	85
Gambar 4.31	Grafik perbandingan nilai resistansi transfer muatan (R_{ct}) komposit sebelum dan setelah penambahan CNT.....	88
Gambar 4.32	Perbandingan nilai (a) kapasitansi spesifik, (b) <i>power density</i> , (c) <i>energy density</i> , dan (d) resistansi komposit berbasis CNT/ <i>metal oxide</i> , CNT/ <i>metal sulfide</i> , dan CNT/ <i>carbon</i>	91

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Berbagai jenis material komposit berbahan dasar material nano berdasarkan matriks penyusunnya (Camargo, dkk., 2009).....	6
Tabel 2.2	Perbedaan nanotube dinding tunggal (SWCNT) dan nanotube dinding ganda (MWCNT) (Varshney, 2014).	9
Tabel 2.3	Perbandingan beberapa sifat material (Khan, dkk., 2016).....	10
Tabel 2.4	Karakteristik dari material CNT dan karbon alotrofi lainnya (Wu dkk., 2012).	12
Tabel 2.5	Perbandingan karakteristik material elektroda superkapasitor (Zhi, dkk., 2013).....	21
Tabel 2.6	Tipe-tipe superkapasitor (Zhi, dkk., 2013).	31
Tabel 3.1	Bahan dan metode sintesis komposit berbasis CNT.	38
Tabel 4.1	Perbandingan kuantitatif sifat kapasitif komposit CNT/ <i>metal oxide</i> , CNT/ <i>metal sulfide</i> , dan CNT/ <i>carbon</i>	89
Tabel 4.2	Kelengkapan kurva hasil pengujian.....	93
Tabel 4.3	Kelengkapan data kuantitatif sifat kapasitif komposit.	94

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Superkapasitor atau juga disebut kapasitor elektrokimia merupakan sebuah perangkat penyimpanan energi yang berperan dalam memenuhi kebutuhan energi listrik saat ini. Berbeda dengan baterai dan kapasitor konvensional, superkapasitor memiliki kemampuan waktu pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*) yang sangat cepat, kepadatan daya tinggi, siklus hidup yang lebih lama, serta ramah lingkungan sehingga menjadikan superkapasitor banyak menarik perhatian saat ini (Chen & Dai, 2013) (Wang, dkk., 2012).

Superkapasitor terdiri dari beberapa jenis yaitu jenis superkapasitor *Electric Double Layer Capacitor* (EDLC), pseudokapasitor, dan superkapasitor *hybrid*. EDLC memiliki prinsip penyimpanan muatan listrik di dalam lapisan ganda elektrokimia pada *interface* antara elektroda dan elektrolit. Pseudokapasitor menyimpan muatan listriknya melalui reaksi redoks. Sedangkan superkapasitor *hybrid* merupakan gabungan antara keduanya yaitu EDLC dan pseudokapasitor yang menyimpan muatan listrik melalui lapisan ganda dan melalui reaksi redoks (Abdah, dkk., 2019). Material pengisi elektroda superkapasitor jenis EDLC yang sering digunakan secara komersial saat ini adalah karbon. Namun, ternyata material elektroda berbasis karbon masih memiliki kepadatan energi yang rendah serta penyimpanan energi yang sedikit. Begitu juga untuk material pengisi elektroda superkapasitor jenis pseudo seperti *metal oxide*, ternyata juga masih memiliki beberapa kekurangan seperti stabilitas *cycle* yang rendah, resistansi elektrik yang tinggi, serta *power density* yang rendah. Sehingga untuk menyempurnakan kekurangan-kekurangan material tersebut, maka diperlukan solusi yang efektif yaitu mengembangkan superkapasitor *hybrid* dengan mengkompositkan antara material berbasis karbon seperti *carbon nanotubes* (CNT) dengan material

lain seperti *metal oxide*, *metal sulfide*, atau dengan material berbasis karbon itu sendiri sehingga didapatkan performa superkapasitor yang lebih baik (Zhou, dkk., 2019).

Carbon nanotubes (CNT) merupakan material karbon yang sangat menjanjikan untuk perkembangan teknologi saat ini seperti nanoteknologi, elektronik, optik, serta teknologi material lainnya. CNT merupakan salah satu karbon alotropi yang memiliki bentuk seperti tabung berukuran nano 1-D dengan rasio panjang dan diameter mencapai 132.000.000:1. CNT memiliki sifat-sifat dengan kombinasi unik antara lain sifat elektronik, termal, mekanik, dan kimia (Sengupta, 2019). Adapun CNT memiliki konduktivitas yang sangat tinggi yaitu mencapai $1 \times 10^5 \text{ S.cm}^{-1}$ (Jang, dkk., 2016). Berdasarkan sifat-sifat tersebut, CNT sangat berpotensi untuk diaplikasikan sebagai bahan struktural yang dapat dikompositkan dengan material lain *carbon*, *metal oxide*, *metal sulfide*, maupun polimer untuk diaplikasikan sebagai elektroda superkapasitor (Liu, 2015). Untuk material karbon itu sendiri seperti *graphene*, *activated carbon* (AC), dan *graphite nano fibers* (GNF). Material *metal oxide* seperti WO_3 , MnO_2 , RuO_2 , NiO dan lain-lain. Serta material *metal sulfide* yang saat ini juga mengalami perkembangan yang sangat pesat untuk dapat dikompositkan dengan CNT terutama dalam pengaplikasian sebagai material pengisi elektroda superkapasitor, seperti VS_4 , MoS_2 , CuS , dan lain sebagainya.

Penambahan CNT pada material seperti *metal oxide*, *metal sulfide*, serta material *carbon* lainnya memiliki pengaruh terhadap struktur maupun sifat kapasitif suatu elektroda komposit sebagai aplikasi superkapasitor. Seperti contoh pada penelitian yang dilakukan oleh Chaitra, dkk. (2016), yang melakukan sintesis komposit CNT/ RuO_2 untuk diaplikasikan sebagai superkapasitor, dalam hasil penelitiannya menyimpulkan bahwa material RuO_2 yang dikompositkan dengan CNT memiliki nilai kapasitansi yang tinggi yaitu 1585 F.g^{-1} . Sedangkan material RuO_2 dengan tanpa penambahan CNT memiliki nilai kapasitansi yang rendah yaitu 406 F.g^{-1} . Hal ini dikarenakan adanya pengaruh penambahan

material lain berupa CNT yang dapat mempengaruhi hasil struktur serta sifat kapasitif dari material komposit tersebut, sehingga nilai kapasitansi spesifik yang dihasilkan juga akan meningkat.

1.2 Perumusan Masalah

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

1. Bagaimana pengaruh penambahan CNT terhadap struktur material komposit berbasis CNT?
2. Bagaimana pengaruh penambahan CNT terhadap sifat kapasitif material komposit berbasis CNT?

1.3 Batasan Masalah

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

1. Review ini tidak membahas mengenai perbedaan penambahan massa pada setiap jenis komposit.
2. Review ini tidak membahas mengenai perbedaan metode sintesis yang digunakan.
3. Review ini tidak membahas mengenai jenis elektrolit yang digunakan.

1.4 Tujuan Review

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

1. Menganalisis pengaruh penambahan CNT terhadap struktur material komposit berbasis CNT.
2. Menganalisis pengaruh penambahan CNT terhadap sifat kapasitif material komposit berbasis CNT.

1.5 Manfaat Review

Paper review ini memberikan manfaat sebagai referensi untuk melakukan penelitian-penelitian yang terkait dengan topik *carbon nanotubes* (CNT) serta komposit berbasis CNT yang digunakan sebagai aplikasi superkapasitor.

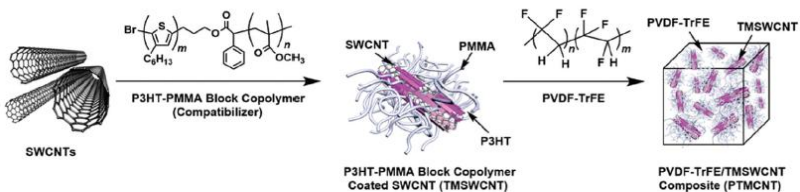
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Komposit

Komposit merupakan gabungan dari satu material atau lebih untuk menghasilkan suatu material baru dengan sifat yang lebih baik dari material penyusunnya. Sifat-sifat komposit tidak hanya tergantung pada komponen individu yang digunakan, namun juga morfologi dan karakteristik *interfacenya*. Sifat-sifat baru dari material komposit yang ditingkatkan dari material penyusunnya meliputi ketahanan abrasi, sifat hirofobik dan hidrofilik, transfer energi panas, transfer ionik dan elektronik, dan lain-lain (Sahay, dkk., 2014).

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 menunjukkan salah satu contoh komposit berbahan dasar nano dengan *filler* berupa *Single Walled Carbon Nanotubes* (SWCNT) dan matriks berupa polimer PDVF.



Gambar 2.1 Skema produksi *polymer matrix composite* PVDF/SWCNT (Oliveira & Beatrice, 2018).

Proses sintesis komposit berbahan dasar material nano dapat dilakukan dengan berbagai cara, seperti metode hidrotermal, metode sol-gel, metode polimerisasi kompleks (Proses Pechini),

metode deposisi uap kimia (CVD), dan metode *microwave* (Sahay, dkk., 2014). Berdasarkan bahan matriksnya, komposit berbahan dasar nano dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu *Ceramic Matrix Composites* (CMC), *Metal Matrix Composites* (MMC), dan *Polymer Matrix Composites* (PMC). Tabel 2.1 merupakan beberapa contoh material komposit berbahan dasar nano berdasarkan penyusunan matriksnya.

Tabel 2.1 Berbagai jenis material komposit berbahan dasar material nano berdasarkan matriks penyusunnya (Camargo, dkk., 2009).

Jenis Komposit	Contoh
Metal	Fe-Cr/Al ₂ O ₃ , Ni/Al ₂ O ₃ , Co/Cr, Fe/MgO, Al/CNT, Mg/CNT
Keramik	Al ₂ O ₃ /SiO ₂ , SiO ₂ /Ni, Al ₂ O ₃ /TiO ₂ , Al ₂ O ₃ /SiC, Al ₂ O ₃ /CNT
Polimer	Termoplastic/termoset, polimer/ <i>layered silicates</i> , poliester/TiO ₂ , polimer/CNT, polimer/ <i>layered double hydroxides</i> .

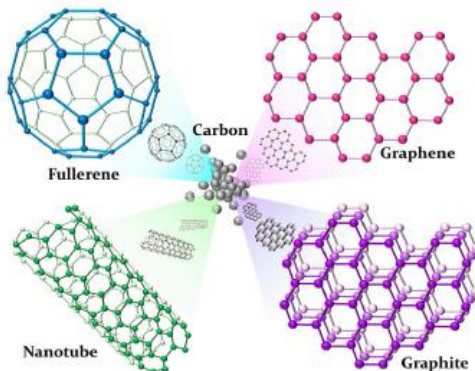
2.2 *Carbon Nanotubes* (CNT)

Carbon nanotubes (CNT) pertama kali ditemukan oleh Sumio Iijima pada tahun 1991. CNT ini berbentuk serbuk yang berwarna hitam seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. CNT merupakan material berukuran skala nano dari salah satu karbon alotrop (Gambar 2.3) yang unik dan sangat menjanjikan untuk perkembangan teknologi seperti nanoteknologi, elektronik, optik, serta bidang ilmu dan teknologi material lainnya. CNT memiliki nama IUPAC yaitu *carbon* dengan rumus linier (C). CNT merupakan karbon alotrop dengan struktur nano silinder 1-D karena memiliki rasio panjang dan diameter yang tinggi yaitu mencapai 132.000.000:1. Karena memiliki sifat mekanik, listrik, serta nilai konduktivitas termal yang tinggi, *carbon nanotubes* diaplikasikan sebagai bahan struktural seperti superkapasitor

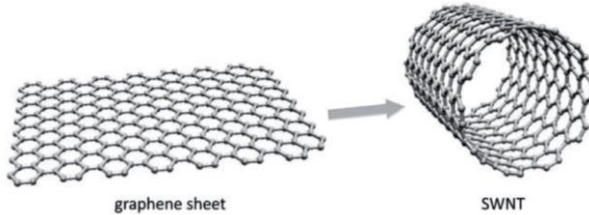
(Okwu & Onyeje, 2013) (Sengupta, 2019). CNT memiliki struktur seperti lembaran grafit yang digulung menjadi bentuk tabung seperti pada Gambar 2.4 (Callister, 2009). Lembaran grafit ini tersusun dari ikatan heksagonal atom-atom karbon sp^2 (Mashadi & Purwanto, 2012). Berdasarkan struktur gulungan lembaran grafit, CNT diklasifikasikan menjadi tiga kategori, yaitu *chiral*, *zigzag*, dan *armchair*. Vektor kiralitas (n, m), mendefinisikan sifat logam dimana jika nilainya memiliki kelipatan 3 maka CNT memiliki sifat logam, sedangkan jika nilainya tidak berkelipatan 3 maka akan bersifat semikonduktor (Dresselhaus, 1998).



Gambar 2.2 Serbuk *carbon nanotubes* (CNT) (Sivkov, dkk.,2020).

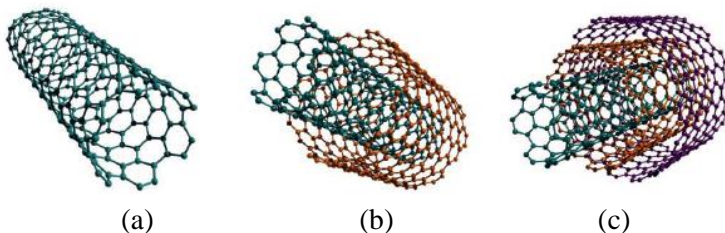


Gambar 2.3 Struktur kristalografi karbon alotropi (Cheng, dkk., 2013).



Gambar 2.4 Struktur material *carbon nanotubes* (CNT) yang terbentuk menyerupai gulungan *graphene* (Ferro, 2011).

Berdasarkan jumlah dindingnya, *carbon nanotubes* dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu dinding tunggal (SWCNT), dinding ganda (DWCNT), dan dinding multi (MWCNT). Umumnya, SWCNT memiliki diameter yang berkisar antara 0,4 hingga 10 nm, sedangkan MWCNT berkisar antara 4 hingga 100 nm (Ferro, 2011). MWCNT memiliki jarak *interlayer* yang dekat yaitu sekitar 3,3 Å (0,33 nm). Sifat mekanik dan morfologi antara DWCNT dan SWCNT sama, tetapi ketahanan kimia yang dimiliki DWCNT dapat meningkat secara signifikan dibandingkan dengan SWCNT (Varshney, 2014). Gambar 2.5 menunjukkan perbedaan struktur material CNT berdinding tunggal, ganda, dan dinding multi. Perbedaan antara SWCNT dengan MWCNT ditunjukkan pada Tabel 2.2.



Gambar 2.5 (a) Struktur material CNT dinding tunggal (SWCNT), (b) dinding ganda (DWCNT), dan (c) dinding multi (MWCNT) (Muller, 2011).

Tabel 2.2 Perbedaan nanotube dinding tunggal (SWCNT) dan nanotube dinding ganda (MWCNT) (Varshney, 2014).

SWCNT	MWCNT
Lapisan graphene tunggal	Lapisan graphene ganda
Memerlukan katalis saat sintesis	Dapat disintesis tanpa katalis
Kemurnian rendah	Kemurnian tinggi
Kemungkinan cacat lebih besar selama proses fungsionalisasi	Kemungkinan cacat lebih kecil, akan tetapi ketika sekali terjadi maka sulit untuk diperbaiki
Mudah berbelit dan lebih lentur	Mudah berbelit

Carbon nanotubes (CNT) memiliki sifat-sifat yang sangat unggul sehingga banyak dimanfaatkan dan diaplikasikan dalam bidang industri. Berikut beberapa sifat yang dimiliki oleh material *carbon nanotubes*.

1. Sifat Mekanik

Carbon nanotubes (CNT) merupakan material yang sangat kuat dan kaku, namun relatif ulet. CNT ber dinding tunggal memiliki nilai kekuatan tarik yang berkisar antara 50 – 200 GPa lebih besar dibandingkan serat karbon yang memiliki kekuatan tarik 2 – 6 GPa. Nilai modulus elastisnya sebesar 10^3 GPa, dengan regangan patah sekitar 5% – 20%. Selain itu, material ini juga memiliki nilai densitas yang rendah (Callister, 2009). Nilai kekuatan tarik diakibatkan karena ikatan sp^2 yang dimiliki oleh material CNT yang menyebabkan kekuatan tariknya lebih tinggi daripada baja dan kevlar. Ikatan sp^2 lebih kuat daripada ikatan sp^3 yang ditemukan pada diamond (Eatemadi, dkk., 2014). Sifat CNT yang sangat fleksibel disebabkan karena ukurannya yang panjang. Karena sifat-sifat inilah CNT sangat potensial digunakan sebagai penguat (*reinforcement*) untuk aplikasi material komposit (Nur,

dkk., 2007). Jika dibandingkan dengan beberapa material, CNT memiliki sifat mekanik yang sangat baik dibandingkan dengan beberapa material lainnya seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 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	
CNT	0,001 - 0,1	~1,33	~50	~1.000

2. Sifat Kelistrikan

Material CNT memiliki karakteristik listrik yang unik dan struktur yang sensitif bergantung pada geometri CNT (kiralitas), sehingga dapat bersifat seperti metal atau semikonduktor (Callister, 2009). Secara umum, material ini dapat mengalirkan arus listrik sebesar $4 \times 10^9 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ atau 1000 kali lebih besar dibandingkan dengan material tembaga. Selain itu, CNT memiliki nilai konduktivitas listrik yang sangat tinggi, yaitu mencapai $1 \times 10^5 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (Jang, dkk., 2016). Hal tersebut menjadikan material CNT seringkali diaplikasikan sebagai bahan dasar material elektronik (Mashadi & Purwanto, 2012)

3. Sifat Termal

Selain sifat mekanik dan kelistrikannya yang unggul, *carbon nanotubes* juga memiliki sifat termal yang baik karena memiliki nilai konduktivitas termal $3500 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ pada temperatur kamar atau hampir 10 kali lebih besar dibandingkan dengan konduktivitas termal tembaga sebesar $385 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Material ini juga memiliki kestabilan yang luar biasa pada pengaruh termal dimana dapat stabil hingga temperatur 2800°C pada kondisi vakum dan 750°C di udara terbuka (Khan, dkk., 2016). *Carbon nanotubes* memiliki konduktivitas termal yang sangat baik pada bagian tabungnya. MWCNT memiliki stabilitas listrik dan termal yang lebih baik dibandingkan dengan SWCNT (Mashadi & Purwanto, 2012).

Selain sifat-sifat seperti yang ditunjukkan di atas, Tabel 2.4 merupakan rangkuman karakteristik dari CNT jika dibandingkan dengan material karbon alotropi lainnya.

Tabel 2.4 Karakteristik dari material CNT dan karbon alotropi lainnya (Wu dkk., 2012).

Karbon alotrop	Grafit	Berlian	Fullerene (C ₆₀)	Carbon nanotube	Graphene
Bentuk hibridasi	sp ²	sp ³	Sebagian besar sp ²	Sebagian besar sp ²	sp ²
Sistem kristal	Heksagonal	Oktahedral	Tetragonal	Ikosahedral	Heksagonal
Dimensi	3	3	0	1	2
Luas permukaan spesifik (m ² g ⁻¹)	~10-20	20-160	80-90	~1300	~1500
Densitas (g cm ⁻³)	2.09-2.23	3.5-3.53	1.72	>1	>1
Karakteristik Optik	Uniaksial	Isotropik	Respon optikal non-linear	Tergantung strukturnya	97.7% optikal transmitan
Konduktivitas Termal (W m ⁻¹ K ⁻¹)	1500-2000 (arah-a), 5-10 (arah-c)	900-2320	0.4	3500	4840-5300
Kekerasan	Tinggi	Sangat tinggi	Tinggi	Tinggi	Paling tinggi (satu lapis)
Keuletan	Fleksibel tidak elastis	-	Elastis	Fleksibel elastis	Fleksibel elastis

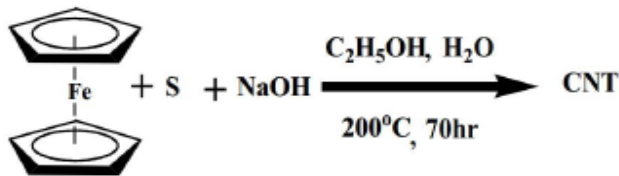
Karbon alotrop	Grafit	Berlian	Fullerene (C ₆₀)	Carbon nanotube	<i>Graphene</i>
Karakteristik Elektronik	Konduktor elektrik	Insulator, semi- konduktor	Insulator	Metalik dan semi konduktor tergantung strukturnya	Semimetal, semikonduktor zero-gap
Konduktivitas Elektrik (S cm ⁻¹)	Anisotropik 2-3x10 ⁴ (arah-a), 6 (arah-c)	-	10 ⁻¹⁰		2000

Proses sintesis CNT dapat dilakukan dengan beberapa cara, seperti *arc discharge*, *chemical vapor deposition* (CVD), hidrotermal dan lain-lain. Namun, hidrotermal memiliki beberapa kelebihan baik dalam segi temperatur maupun ekonomi. Dalam sintesis CNT dengan metode hidrotermal, secara umum senyawa hidrokarbon atau prekursor akan terdekomposisi secara sempurna atau terjadi reaksi kimia pada temperatur yang tinggi yaitu di atas 500°C , sedangkan pada proses hidrotermal temperatur pemanasannya jauh di bawah temperatur terdekomposisinya suatu senyawa hidrokarbon pada umumnya yaitu sekitar 200°C untuk proses sintesis material CNT. Pada kondisi tersebut, secara tidak langsung proses dekomposisi karbon tidak akan terjadi. Oleh karena itu, pada umumnya proses hidrotermal banyak sekali dilakukan penambahan larutan kimia seperti larutan basa kuat atau asam kuat yang berfungsi sebagai aktivasi karbon untuk membuka pori-pori karbon sehingga daya serap karbon menjadi lebih tinggi dan reaksi karbonisasi bisa terjadi lebih cepat dibandingkan tidak menggunakan senyawa kimia sebagai aktivasi karbon. Selain itu, dalam sintesis CNT menggunakan metode hidrotermal terdapat penambahan katalis logam seperti Fe/Mo/Ni yang berfungsi sebagai tempat inisiasi pertumbuhan awal dari material CNT yang kemudian terus tumbuh memanjang hingga ukuran yang bervariasi (Wang dkk, 2018) (Alfian, 2018). Proses pembentukan karbon nanomaterial dari pemanasan hidrokarbon hingga terbentuk serbuk hitam ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Proses dekomposisi kamper menjadi nanomaterial (Gaddam dkk, 2015).

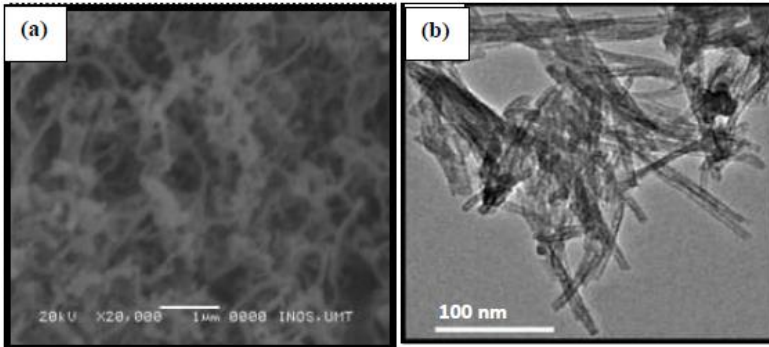
Seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Krishnamurthy, dkk. (2014) mengenai sintesis CNT menggunakan metode hidrotermal, prekursor utama yang digunakan adalah *ferrocene*. *Ferrocene* ($\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$) merupakan senyawa yang mengandung logam sekaligus sumber karbon (Mohlala, dkk., 2006). Dalam sintesisnya, *ferrocene* dan sulfur dengan perbandingan 1:2 dilarutkan dalam larutan air, etanol, dan *pellet* NaOH dan *distirring* menggunakan *magnetic stirrer* selama 30 menit. Setelah larutan tersebut homogen selanjutnya dipindahkan ke dalam *autoclave* dan dipanaskan pada temperatur 200°C selama 20 jam, dilanjutkan dengan pendinginan hingga temperatur ruangan. Hasil endapan berwarna hitam kemudian difiltrasi dan dicuci menggunakan alkohol serta *distilled water* beberapa kali dan dilanjutkan pengeringan pada temperatur 60°C . Skema reaksi sintesis CNT ditunjukkan seperti pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Skema reaksi sintesis CNT dengan metode hidrotermal (Krishnamurthy, dkk., 2014).

Begitu juga pada penelitian yang dilakukan oleh Razali, dkk. (2016) yang melakukan sintesis CNT melalui metode hidrotermal. Prekursor yang digunakan adalah *ferrocene* sebanyak 2 gram dan katalis logam berupa sulfur sebanyak 4 gram. Kedua bahan tersebut kemudian dicampurkan dengan larutan 10 M NaOH 100 ml yang mengandung 70 ml etanol dan 30 ml *distilled water*. Setelah itu dilakukan *stirring* dan diultrasonikasi. Hasil larutan tersebut kemudian dipanaskan di dalam *furnace* menggunakan wadah bejana tertutup yaitu *autoclave* pada temperatur 200°C selama 24 jam, dilanjutkan pendinginan hingga temperatur ruangan. kemudian hasil endapan berwarna hitam difiltrasi dan dicuci

menggunakan etanol dan 0.1 HCl dilanjutkan dengan *distilled water* hingga pH mencapai 7. Selanjutnya, serbuk hitam tersebut dikeringkan pada temperatur 100⁰C selama 24 jam di dalam *furnace*. Gambar 2.8 menunjukkan hasil pengujian SEM dan TEM dari CNT yang telah disintesis.



Gambar 2.8 Hasil pengujian (a) SEM dan (b) TEM dari CNT yang telah disintesis (Razali, dkk., 2016).

2.3 *Metal Oxide*

Salah satu bahan penting yang diteliti di banyak bidang fisika, kimia, dan ilmu material adalah logam oksida atau *metal oxide*. Sejumlah besar campuran senyawa oksida mampu dibentuk dari unsur logam. *Metal oxide* adalah bahan teknologi utama yang telah menemukan banyak aplikasi dengan struktur geometri dan struktur elektroniknya yang dapat memberikan karakter baik logam, semikonduktor, maupun isolator. Dalam aplikasinya, *metal oxide* digunakan dalam pembuatan sirkuit mikroelektronik, sensor, pelapis untuk pasifasi permukaan terhadap karat, dan sebagai katalis. Sedangkan khusus pada industri elektronik, *metal oxide* digunakan untuk membuat konduktor dalam film dan lain sebagainya. Selain itu, *metal oxide* juga sangat berpotensi untuk diaplikasikan sebagai superkapasitor.

Dalam pengaplikasian *metal oxide* sebagai elektroda superkapasitor, *metal oxide* ini telah menarik minat penelitian dikarenakan mampu meningkatkan kemampuan penyimpanan energi yang luar biasa dalam superkapasitor. Beberapa contoh material *metal oxide* yang dapat diaplikasikan sebagai superkapasitor, antara lain RuO_2 , MnO_2 , NiO , Co_3O_4 , V_2O_5 , dan lain-lain. Material *metal oxide* memiliki kemampuan penyimpanan energi melalui proses transfer muatan faradik atau reaksi redoks. Jenis superkapasitor dengan penyimpanan muatan redoks ini dikenal dengan pseudokapasitor (Abdah, dkk., 2019).

Metal oxide dikenal dengan sifat pseudokapasitornya yang mana dapat meningkatkan nilai kapasitansi spesifik maupun meningkatkan nilai *energy density* pada elektroda superkapasitor, yang bahkan lebih baik daripada karbon. Berbeda dengan baterai yang mana ion-ionnya terinterkalasi dalam material *lattice*, pseudokapasitansi ini berasal dari ion-ion permukaan yang berikatan lemah. Batas butir yang terdapat pada permukaan material *metal oxide* dapat berfungsi sebagai pusat redoks yang sangat baik untuk reaksi penyimpanan muatan. Namun juga terdapat faktor-faktor yang menghambat peningkatan nilai kapasitansi spesifik *metal oxide*, yaitu aglomerasi struktur *metal oxide*, siklus hidup rendah, serta konduktivitas listrik yang juga masih rendah. Maka dari itu, untuk meningkatkan kemampuan superkapasitornya, biasanya material *metal oxide* ini digabungkan atau dikompositkan dengan material lainnya yang memiliki konduktivitas listrik yang tinggi serta siklus hidup yang tinggi seperti bahan EDLC yaitu karbon (Zhi, dkk., 2013).

2.4 *Metal Sulfide*

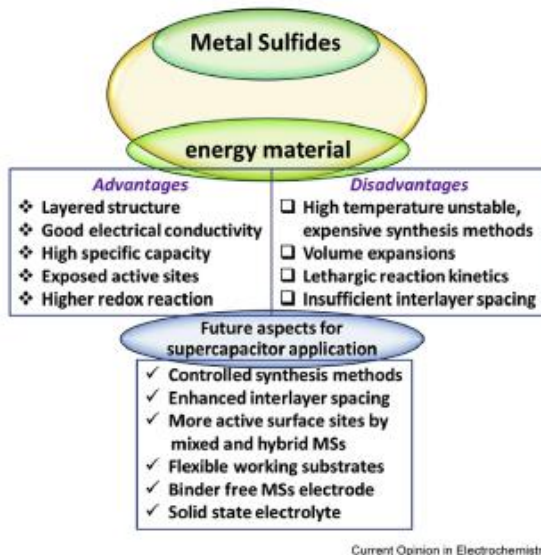
Nanokristal dari bahan logam sulfida atau *metal sulfide* telah menarik minat penelitian ilmiah dalam beberapa tahun terakhir sebagai aplikasi energi terbarukan karena sifat elektronik, optik, fisik dan kimia yang baik. *Metal sulfide* adalah senyawa semikonduktor dimana sulfur berperan sebagai anion dengan satu atau lebih ion S^{2-} yang terkait dengan kation logam; dimana ion logam tersebut dapat berbentuk mono, bi, atau multi. Kombinasi anion sulfur dan kation logam membentuk M_xS_y dari stoikiometri MS , M_2S , M_3S_4 dan MS_2 . Terdapat banyak sekali *metal sulfide* yang memiliki struktur sederhana dan tingkat simetris yang tinggi. Selain itu, *metal sulfide* dan berbagai jenis nanokomposisinya memiliki konduktivitas listrik yang baik, morfologi permukaan yang baik, serta daya tahan yang relatif lama sehingga cocok digunakan sebagai aplikasi konversi dan penyimpanan energi.

Metal sulfide memiliki celah pita (*band gap*) elektronik yang kecil. Dengan *band gap* yang kecil itulah energi yang dibutuhkan pita valensi untuk berpindah ke pita konduktor semakin kecil. Ikatan yang dimiliki oleh logam transisi sulfida adalah ikatan kovalen, yang mana akan meningkatkan sifat semikonduktornya, namun ada juga beberapa yang memiliki sifat metalik. Beberapa jenis *metal sulfide* seperti MoS_2 , WS_2 , dan CuS memiliki struktur berupa *layer*/berlapis dengan kekuatan van der Waals. Sementara *metal sulfide* seperti $CdIn_2S_4$, $LiTi_2S_4$, dan $CuCr_2S_4$ memiliki struktur kubik spinel.

Metal sulfide berbeda dengan *metal oxide*. *Metal sulfide* sangat atraktif terhadap material katalitik dan fotokatalis untuk aplikasi hidrogen elektrokatalitik, PEC *water splitting*, baterai, dan sensor. Struktur nano *metal sulfide* memiliki kualitas luar biasa termasuk fotosensitifitas tinggi, kapasitas spesifik besar, potensi redoks rendah, dan masa pakai yang panjang. Selain itu, karena ekspansi volume teoretis yang tinggi yang dihitung menggunakan rumus reaksi konversi tradisional, beberapa *metal sulfide* seperti SnS_2 dan MoS_2 memiliki struktur *layer*/berlapis yang dapat

membantu meringankan ketegangan yang disebabkan oleh ekspansi volume. *Metal sulfide* memiliki selektivitas dan sensitivitas yang tinggi terhadap kelas molekul tertentu pada *working* temperatur yang lebih rendah dari *metal oxide* umum seperti TiO_2 , Fe_2O_3 , WO_3 dan CuO . Selain itu, titik leleh yang dimiliki oleh *metal sulfide* lebih rendah dibandingkan dengan *metal oxide*. Namun, bahan tetap oksida logam mempertahankan peran yang menonjol karena sensitivitasnya yang tinggi, selektivitas, biaya rendah, dimensi kecil dan integrasi yang sederhana (Chandrasekaran, dkk., 2018).

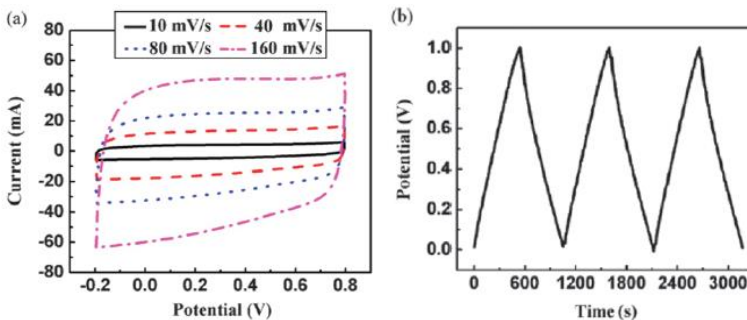
Kelebihan dan kekurangan *metal sulfide* serta solusi kedepannya untuk aplikasi superkapasitor yang lebih baik digambarkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Kelebihan dan kekurangan *metal sulfide* serta solusi kedepannya sebagai aplikasi superkapasitor (Barik & Ingole, 2020).

2.5 Carbon

Bahan karbon dianggap sebagai bahan elektroda prospektif untuk industrialisasi. Hal ini dikarenakan bahan karbon memiliki kelimpahan di alam yang tinggi, biaya lebih rendah, pemrosesan yang mudah, non-toksitas, luas permukaan spesifik yang lebih tinggi, konduktivitas elektronik yang baik, dan stabilitas kimia yang tinggi. Superkapasitor berbasis karbon erat kaitannya dengan jenis superkapasitor lapisan ganda atau *electrochemical double layer capacitor* (EDLC). Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10, kurva voltametri siklik (CV) dari bahan karbon memiliki bentuk persegi panjang yang baik, menunjukkan bahwa karbon merupakan bahan kapasitif yang sesuai untuk superkapasitor. Begitu juga dengan kurva *galvanostatic charge-discharge* (GCD), kurva tersebut memiliki bentuk distribusi segitiga yang simetris, yang mana juga menunjukkan sifat kapasitif yang baik untuk superkapasitor.



Gambar 2.10 Kurva (a) *cyclic voltammetry* (CV) dan (b) *galvanostatic charge-discharge* (GCD) dari komposit *activated mesocarbon microbeads* (AMCMBs)/CNT pada *scan rate* 10, 40, 80, and 160 $\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$ dan *specific current* pada $0.5 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$.

Bahan karbon umumnya menyimpan muatan terutama dalam lapisan ganda elektrokimia yang terbentuk pada *interface* antara elektroda dan elektrolit. Oleh karena itu, kapasitansi terutama tergantung pada luas permukaan yang dapat diakses oleh

ion elektrolit. Faktor-faktor penting yang mempengaruhi kinerja elektrokimia mereka adalah luas permukaan spesifik, distribusi ukuran pori, bentuk dan struktur pori, konduktivitas listrik, dan fungsionalitas permukaan. Di antaranya, luas permukaan spesifik dan distribusi ukuran pori adalah dua faktor terpenting yang mempengaruhi kinerja bahan karbon.

Menurut Conway (1999), karbon untuk superkapasitor tipe EDLC harus memiliki tiga sifat; (1) area spesifik tinggi, dengan nilai $1000 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, (2) konduktivitas antarpartikel yang baik dalam matriks berpori, dan (3) aksesibilitas elektrolit yang baik ke dalam ruang pori material karbon. Menurut ketiga sifat ini, dalam proses pemilihan bahan elektroda superkapasitor, aturan umumnya adalah untuk mendapatkan luas permukaan spesifik yang tinggi dan dapat diakses dengan konduktivitas listrik yang baik (Wang, dkk., 2012). Contoh bahan karbon yang digunakan sebagai bahan elektroda adalah karbon aktif, karbon *aerogel*, *carbon nanotubes*, *graphene*, dan lain-lain (Zaharaddeen, 2016).

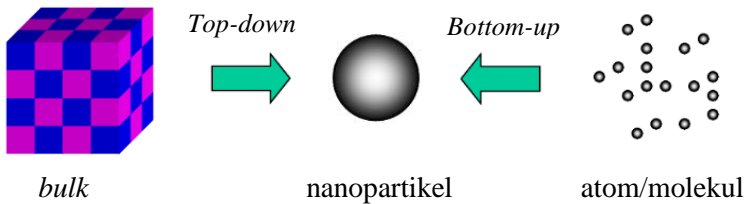
Di bawah ini merupakan Tabel 2.5 yang menjelaskan perbedaan karakteristik pada material *carbon*, *metal oxide*, dan *metal sulfide* yang digunakan sebagai material pengisi elektroda superkapasitor.

Tabel 2.5 Perbandingan karakteristik material elektroda superkapasitor (Zhi, dkk., 2013).

Material Elektroda	Luas Permukaan	Kapasitansi spesifik	Konduktivitas	Cycle	Harga
<i>Carbon</i>	Tinggi	Rendah	Tinggi	Tinggi	Rendah
<i>Metal oxide</i>	Rendah	Tinggi	Rendah	Rendah	Tinggi
<i>Carbon-metal oxide composite</i>	Tergantung material karbon	Tinggi	Tergantung material karbon	Sedang	Sedang

2.6 Metode Sintesis Komposit

Proses sintesis komposit material nano umumnya dibagi menjadi dua pendekatan yaitu pendekatan *top-down* dan pendekatan *bottom-up*. Pendekatan *top-down* merupakan proses sintesis dengan memecah partikel berukuran besar menjadi partikel berukuran nanometer. Sedangkan, pendekatan *bottom-up* adalah proses sintesis dengan pembentukan atom-atom atau molekul-molekul yang membentuk partikel berukuran nanometer. Gambaran kedua metode pendekatan tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.11.

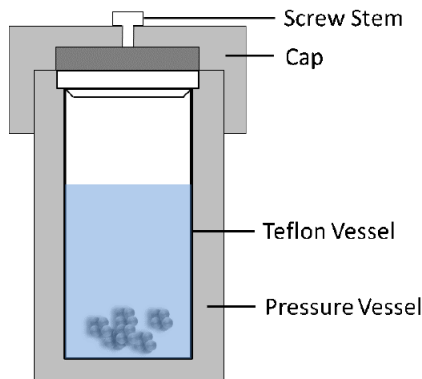


Gambar 2.11 Pendekatan utama sintesis nanopartikel: *top-down* dan *bottom-up* (Abdullah, dkk., 2008).

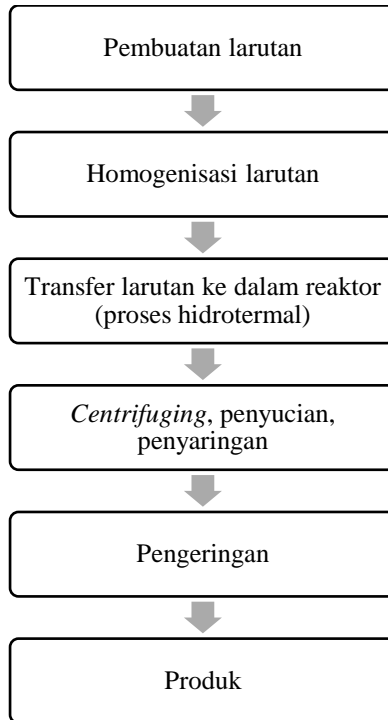
Proses sintesis komposit dengan material nano dapat dilakukan dengan berbagai cara seperti metode hidrotermal, metode sol-gel, metode polimerisasi kompleks (Proses Pechini), metode deposisi uap kimia (CVD), dan metode *microwave* (Sahay, dkk., 2014). Namun dari beberapa metode tersebut, metode hidrotermal merupakan metode sintesis yang banyak digunakan serta memiliki banyak sekali keuntungan seperti prosesnya yang mudah, bebas terhadap polusi, efektivitas biaya, penghematan energi, kontrol nukleasi yang baik, serta memerlukan temperatur yang relatif rendah dalam proses dekomposisi karbon (Yoshimura & Byrappa, 2008).

Metode hidrotermal merupakan proses reaksi kimia yang terjadi pada suatu larutan di dalam bejana tertutup seperti pada Gambar 2.12 dengan memanfaatkan temperatur tinggi dan tekanan tinggi untuk mengubah larutan menjadi kristal (Yang & Park,

2019). Produk yang dihasilkan dari metode hidrotermal ini dapat dapat berupa padatan, larutan, dan gas (Wang, dkk., 2018) (Hidayati, 2016). Metode ini bersifat tertutup karena bertujuan untuk mencegah pelarut yang hilang saat dipanaskan di atas titik didihnya (Putri, dkk., 2018). Proses ini dapat melarutkan dan mengkristalisasi suatu zat yang tidak dapat larut di bawah kondisi normal (Yoshimura & Byrappa, 2008). Selain itu, adanya penambahan katalis dalam proses hidrotermal ini berfungsi sebagai tempat inisiasi pertumbuhan awal suatu zat yang akan terus bertumbuh hingga mencapai ukuran tertentu (Alfian, 2018). Secara umum, proses metode hidrotermal dapat dilihat pada Gambar 2.13 2.13.



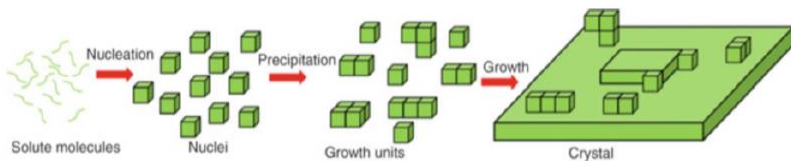
Gambar 2.12 Skema peralatan metode hidrotermal (Yang & Park, 2019).



Gambar 2.13 Proses umum metode hidrotermal (Yang & Park, 2019).

Terdapat beberapa langkah mekanisme pertumbuhan kristal dengan metode sintesis hidrotermal. Proses pertama adalah pelarutan reaktan dalam pelarut sehingga terbentuk larutan baru yang membentuk grup-grup ion atau molekul. Kedua, ion dan molekul tersebut mengalami pemisahan akibat adanya perbedaan temperatur antara *autoclave* bagian atas dan bagian bawah. Gugus ion atau molekul tersebut kemudian berpindah ke daerah yang memiliki temperatur rendah, dimana inti kristal akan tumbuh dan membentuk larutan jenuh. Ketiga, gugus ion atau molekul diabsorpsi, didekomposisi, dan diserap oleh *interface*

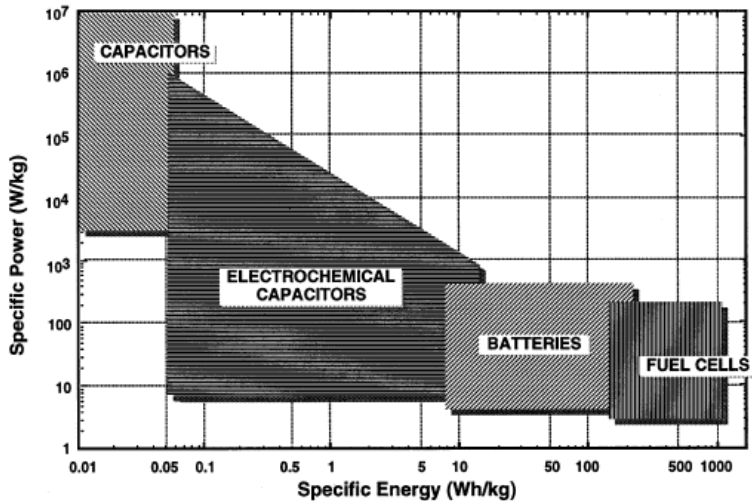
pertumbuhan. Keempat, ion atau molekul yang diabsorpsi akan bergerak pada *interface* sehingga zat tersebut mulai mengkristal. Kristal yang terbentuk pada proses hidrotermal akan menunjukkan morfologi yang berbeda pada kondisi hidrotermal yang berbeda (Yang & Park, 2019). Gambar 2.14 menunjukkan mekanisme pertumbuhan kristal yang terjadi pada metode hidrotermal.



Gambar 2.14 Mekanisme pertumbuhan kristal metode hidrotermal (Li, dkk., 2016).

2.7 Superkapasitor

Superkapasitor juga dikenal sebagai kapasitor elektrokimia atau ultrakapasitor merupakan piranti penyimpanan energi dengan kinerja elektrokimia yang sangat baik yaitu kapasitansi spesifik tinggi, laju *charging/discharging* yang cepat, *power density* tinggi dan masa pakai panjang dengan siklus hingga 10^5 kali (Abdah, dkk., 2019). Hal yang membedakan superkapasitor dengan kapasitor konvensional adalah luas permukaan elektrodanya yang sangat tinggi sehingga menghasilkan kapasitansi yang sangat besar. Alasan mengapa superkapasitor ini mampu menarik perhatian dapat divisualisasikan pada Gambar 2.15 yang menyajikan perbandingan nilai *specific power* dan *specific energy* “Ragone plot” pada beberapa piranti penyimpanan energi (Kötz & Carlen, 2000).



Gambar 2.15 Skema perbandingan *specific power* dan *specific energy* “Ragone plot” pada beberapa piranti penyimpanan energi (Kötz & Carlen, 2000).

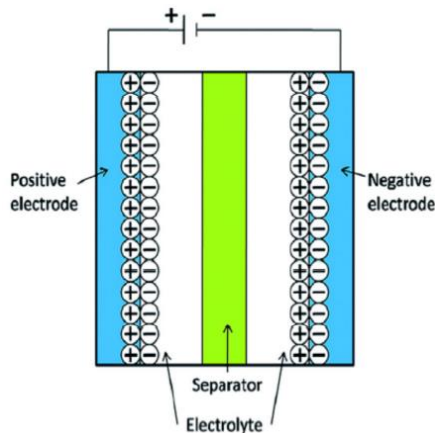
Bahan-bahan karbon seperti karbon aktif, CNT dan *graphene* seringkali diaplikasikan sebagai superkapasitor karena stabilitas kimianya yang luar biasa, luas permukaan spesifik dengan struktur berpori yang relatif besar, serta nilai konduktivitas elektrik yang sangat baik. Beberapa penelitian telah meneliti mengenai kombinasi antara bahan karbon dan transisi *metal sulfide* untuk diaplikasikan sebagai superkapasitor (Wang, dkk., 2019).

Berdasarkan mekanisme penyimpanan energi, superkapasitor diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis, yaitu sebagai berikut.

1. *Electrochemical double-layer capacitor* (EDLC)

Secara umum, EDLC menyimpan energi listrik di dalam lapisan ganda elektrokimia (Helmholtz *layer*) pada *interface* antara permukaan elektroda dan larutan elektrolit, dengan cara mengadsorpsi ion elektrolit pada permukaan elektroda. Bahan

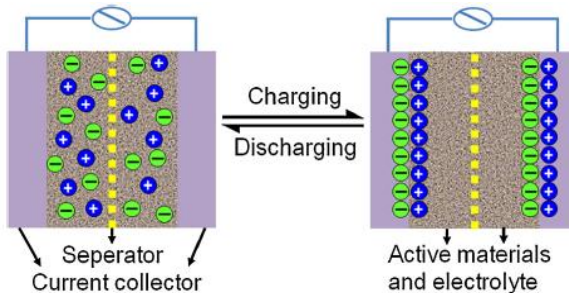
pengisi elektroda EDLC pada umumnya adalah material karbon, seperti *graphene*, karbon aktif, dan lain-lain. Proses *charging/discharging* dalam EDLC sama seperti jenis kapasitor konvensional karena tidak ada reaksi faradaik yang terjadi selama proses penyimpanan energi. Bahan EDLC memiliki konduktivitas listrik dan stabilitas mekanik yang sangat baik, akan tetapi bahan pengisi elektroda dengan jenis karbon ini masih memiliki kekurangan seperti nilai kapasitansi spesifik yang masih tergolong rendah (Abdah, dkk., 2019). Skema diagram superkapasitor EDLC ditunjukkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Skema diagram superkapasitor EDLC (Shi, dkk., 2014).

Dalam prosesnya, selama proses pengisian (*charging*), elektron bergerak dari elektroda negatif ke elektroda positif. Sementara pada elektrolit, kation bergerak menuju elektroda negatif dan anion bergerak menuju elektroda positif. Selama proses pengosongan (*discharging*) proses yang terjadi adalah sebaliknya. Dalam EDLC, tidak terjadi transfer muatan di *interface* antara elektroda dan elektrolit dan tidak ada pertukaran ion yang terjadi antara elektroda dan elektrolit, yang menandakan mekanisme

penyimpanan energinya adalah non-Faradaik dan tidak ada reaksi redoks. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi elektrolit konstan selama proses *charging* dan *discharging*. Sehingga energi disimpan dalam *interface* lapisan ganda. Gambar 2.17 menunjukkan proses *charging/discharging* pada superkapasitor EDLC (Shi, dkk., 2014 dan Wang dkk., 2012).



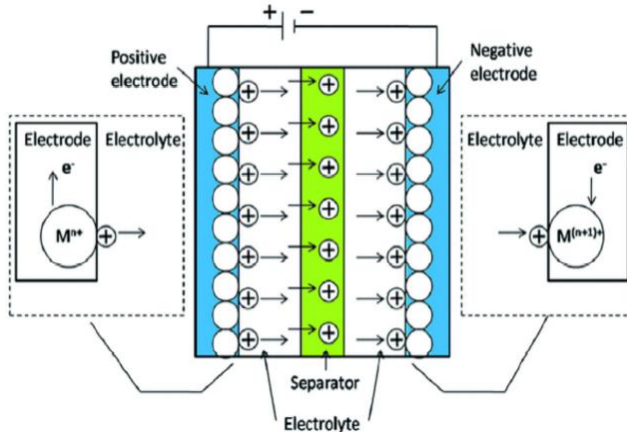
Gambar 2.17 Skema ilustrasi proses *charging/discharging* pada superkapasitor EDLC (Chen & Dai, 2013).

2. Pseudokapasitor

Pseudokapasitor (atau kapasitor redoks) menyimpan energi melalui reaksi faradaik yang cepat dan reversibel pada permukaan bahan aktif, dengan cara mengadsorpsi ion elektrolit pada permukaan elektroda serta di sebagian dalam elektroda. Bahan pengisi elektroda pseudokapasitor umumnya adalah *metal oxide*, *metal sulfide*, maupun *conducting polymer*, karena material tersebut memiliki kapasitansi spesifik yang relatif tinggi dan energi spesifik yang superior sehingga menjadikannya kandidat sebagai superkapasitor berkinerja tinggi. Namun, pseudokapasitor masih memiliki kelemahan berupa stabilitas siklik yang rendah karena adanya siklus berulang yang menyebabkan struktur oksida logam mudah rapuh. Selain itu, material seperti *metal oxide* maupun *metal sulfide*, tersebut masih memiliki konduktivitas yang rendah, yang

mana dapat menghalangi kinerjanya untuk mencapai nilai kapasitansi spesifik yang tinggi (Abdah, dkk., 2019).

Dalam proses penyimpanan muatan, pseudokapasitor melibatkan reaksi redoks Faradaik. Ketika arus diterapkan pada pseudokapasitor, reaksi Faradaik yang cepat dan reversibel terjadi pada bahan elektroda, yang mana akan menghasilkan muatan dan transfer muatan melintas pada lapisan ganda. Proses ini serupa dengan proses *charging/discharging* yang terjadi pada baterai. Umumnya, pseudokapasitor memiliki kapasitansi spesifik dan kepadatan energi (*energy density*) yang lebih tinggi daripada EDLC, karena proses Faradaik dapat terjadi tidak hanya pada permukaan elektroda pseudokapasitor tetapi juga di bagian dalam elektroda-elektroda ini. Namun, karena reaksi redoks terlibat, pseudokapasitor sering memiliki stabilitas yang rendah selama proses siklik terjadi (Shi, dkk., 2014). Gambar 2.18 menunjukkan skema diagram pseudokapasitor.



Gambar 2.18 Skema diagram pseudokapasitor (Shi, dkk., 2014).

3. Kapasitor *hybrid*

Kapasitor *hybrid* merupakan gabungan antara superkapasitor jenis EDLC dan pseudokapasitor. Dengan menggabungkan proses non-Faradik EDLC berupa material berbasis karbon (CNT, *graphene*, dan lainnya) dan Faradaik pseudokapasitor (*metal oxide*, *metal sulfide*, *conducting polymer*) untuk menyimpan muatan, kapasitor *hybrid* dapat meningkatkan sifat kapasitifnya dimana dapat mencapai kepadatan daya (*power density*) dan kepadatan energi (*energy density*) yang lebih tinggi daripada EDLC (Abdah, dkk., 2019).

Adapun ringkasan mengenai tipe-tipe superkapasitor dapat dilihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Tipe-tipe superkapasitor (Zhi, dkk., 2013).

Tipe superkapasitor	Material elektroda	Mekanisme penyimpanan muatan	Karakteristik
EDLC	Carbon	Lapisan ganda elektrokimia (non-Faradik)	Stabilitas siklik baik, kapasitansi spesifik rendah, <i>energy density</i> rendah
Pseudokapasitor	<i>Metal oxide, metal sulfide, polymer</i>	Reaksi redoks (Faradik)	Kapasitansi spesifik tinggi, <i>power density</i> relatif tinggi, <i>energy density</i> relatif tinggi, stabilitas siklik relatif rendah
Kapasitor hybrid	Anoda: material pseudokapasitansi, katoda: carbon <i>Redox metal oxide/carbon, redox polymer/carbon</i>	Anoda: reaksi redoks, katoda: EDLC	<i>power density</i> tinggi, <i>energy density</i> tinggi, stabilitas siklik baik
Symmetric	<i>Redox metal oxide/carbon, redox polymer/carbon</i>	EDLC dan reaksi redoks	<i>energy density</i> tinggi, harga moderat, stabilitas baik
Battery-like	Anoda: material Li-insertion, katoda: carbon	Anoda: <i>lithiation/delithiation</i> , katoda: EDLC	<i>energy density</i> tinggi, harga tinggi, stabilitas baik, perlu adanya kecocokan material elektroda

Superkapasitor memiliki tiga komponen penting yaitu elektroda, elektrolit, dan pemisah (separator). Superkapasitor memiliki dua elektroda yang dipisahkan oleh pemisah/separator (kertas saring, kertas kaca, selulosa atau membran poliakrilonitril), yang memiliki sifat permeabilitas ion yang baik untuk transportasi ion. Elektroda dipisahkan oleh separator berbahan dielektrik dikarenakan untuk mencegah agar tidak terjadi tumpang tindih muatan pada kedua elektroda (Syarif, 2014). Elektroda sendiri berfungsi sebagai pengadsorpsi ion elektrolit karena material pengisi elektroda berupa karbon memiliki pori yang sangat besar yang berfungsi untuk menyimpan muatan. Adsorpsi merupakan proses dimana ion-ion atau molekul-molekul fluida menyentuh dan melekat pada permukaan padatan (Nasruddin, 2005). Ketika ion elektrolit teradsorpsi pada permukaan atau ke dalam elektroda, material berpori dari elektroda akan menghisap ion elektrolit tersebut dan menempel pada permukaan atau terinterkalasi di dalam elektroda (Wang, 2018) (Liu, 2015). Sedangkan elektrolit adalah campuran ion positif dan negatif yang dilarutkan dalam pelarut polar, seperti air. Adapun elektrolit yang digunakan seperti H_2SO_4 dan KOH umumnya memiliki resistansi lebih rendah dan ukuran pori-pori lebih kecil dibandingkan dengan elektrolit organik seperti asetonitril, namun memiliki tegangan *breakdown* (nilai tegangan minimal agar dapat mengalirkan arus listrik). Sehingga pemilihan elektrolit harus didasarkan pada kapasitansi, resistansi, dan tegangan *breakdown* (Riyanto, 2014).

Untuk mengetahui kinerja dari superkapasitor, digunakan alat karakterisasi berupa voltametri siklik (CV). Dimana nilai kapasitansi (C) ditentukan dari kurva pelepasan (*discharge*) arus konstan berdasarkan persamaan 2.3 sebagai berikut:

$$C = I/(dV/dt) \dots\dots\dots(2.1)$$

dimana I adalah arus *discharge* dan dV/dt didapatkan dari perhitungan kemiringan kurva *discharge*. Sedangkan, kapasitansi

spesifik (C_{sp}) untuk setiap elektroda dalam superkapasitor dapat ditentukan dengan persamaan 2.4 sebagai berikut:

$$C_{sp} = 4C/m \dots\dots\dots(2.2)$$

dimana C ($F.g^{-1}$) adalah nilai kapasitansi kedua sel elektroda dan m adalah total massa dari material aktif di kedua elektroda. Adapun massa dapat diganti dengan volume atau luas permukaan elektroda berdasarkan aplikasi elektroda yang akan digunakan. Energi yang disimpan (E) dan densitas daya (P) dalam superkapasitor dapat ditentukan dengan persamaan 2.5 dan persamaan 2.6, yaitu:

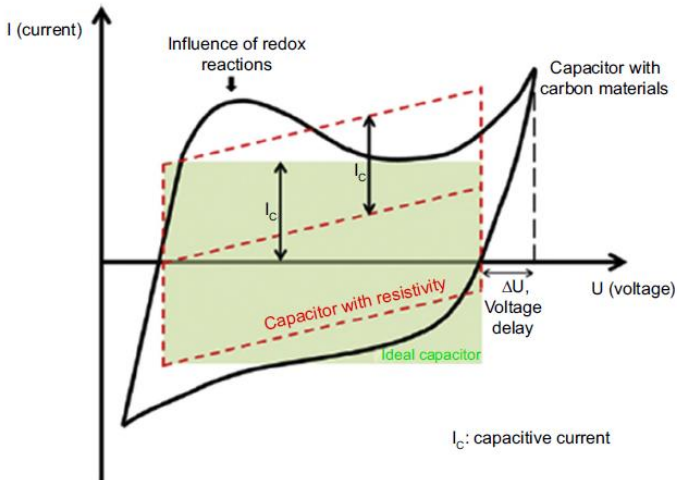
$$E = (CV)^2/2 \dots\dots\dots(2.3)$$

$$P = V^2/(4R_s) \dots\dots\dots(2.4)$$

dimana C ($F.g^{-1}$) adalah total kapasitansi dalam sel, V adalah tegangan sel, dan R_s adalah resistansi seri (Chen & Dai, 2013).

Terdapat beberapa tipe superkapasitor jika ditinjau dari jenis kurva *cyclic voltammetry* yang disajikan pada Gambar 2.19. Tipe superkapasitor pertama adalah kapasitor ideal (kurva hijau) dengan bentuk kurva persegi yang menandakan bahwa proses *charging-discharging* berlangsung dalam waktu yang sama. Tipe kedua adalah kapasitor resistif (kurva merah) dengan bentuk jajar genjang yang menunjukkan adanya peningkatan *current density* seiring dengan penambahan nilai voltase. Tipe ketiga adalah kapasitor tipe pseudokapasitor (kurva hitam) dengan adanya gundukan (*hump*) yang menandakan adanya reaksi redoks (reduksi-oksidasi). Tipe kapasitor jenis ini biasanya memiliki nilai kapasitansi lebih tinggi karena adanya reaksi redoks (Frackowiak & Beguin, 2001).

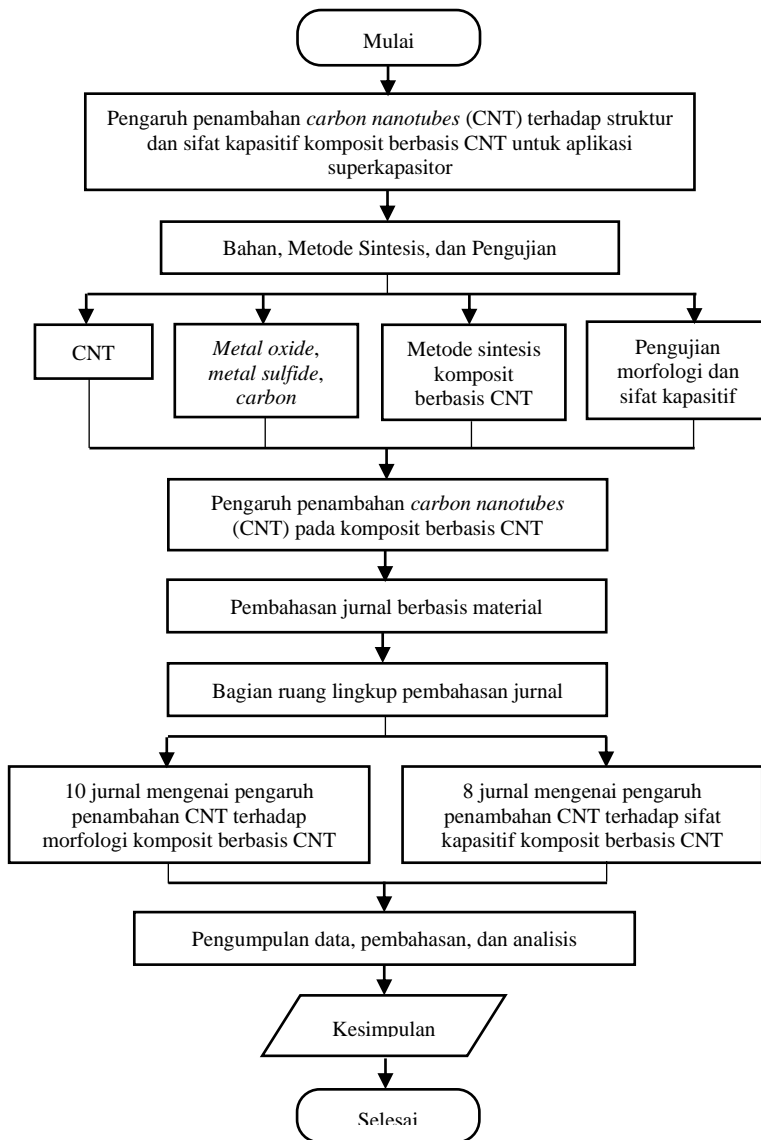
Sedangkan, jika ditinjau dari segi material pembentuknya, umumnya superkapasitor dengan material pengisi elektroda berupa karbon tergolong dalam kategori kapasitor ideal (EDLC). Namun, jika material pengisi elektroda tersebut berupa material non karbon seperti *metal oxide*, polimer, dan sebagainya, maka tergolong dalam jenis pseudokapasitor (Abdah, dkk., 2019).



Gambar 2.19 Karakteristik kurva CV dari berbagai jenis superkapasitor (Choi, dkk., 2012).

BAB III METODOLOGI

Paper review ini terdiri dari 10 jurnal yang meliputi 4 jenis komposit CNT/*metal oxide*, 3 jenis komposit CNT/*metal sulfide*, dan 3 jenis komposit CNT/*carbon*. Adapun untuk jenis komposit CNT/*metal oxide* antara lain CNT/WO₃, CNT/MnO₂, CNT/RuO₂, dan CNT/NiO. Jenis komposit CNT/*metal sulfide* antara lain CNT/MoS₂, CNT/VS₄, dan CNT/CuS. Serta jenis komposit CNT/*carbon* antara lain CNT/*graphene*, CNT/*activated carbon*, dan CNT/*graphite nano fiber*. *Review* ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan massa CNT terhadap struktur dan sifat kapasitif dari ketiga jenis komposit tersebut. Analisis struktur komposit antara lain meliputi kristalinitas dan morfologi. Sedangkan analisis sifat kapasitif meliputi kapasitansi spesifik, *power density* dan *energy density*, serta resistansi transfer muatan. Untuk menganalisis hasil struktur komposit dilakukan pengujian berupa XRD, SEM, dan TEM. Sedangkan untuk menganalisis sifat kapasitifnya dilakukan pengujian berupa CV, GCD, dan EIS. Adapun alur metodologi penulisan *paper review* ini dipaparkan pada diagram alir pada Gambar 3.1.

**Gambar 3.1** Diagram alir pembahasan jurnal.

Metodologi *paper review* ini diawali dengan penemuan tema berupa pengaruh penambahan CNT terhadap struktur morfologi dan sifat kapasitif komposit berbasis CNT untuk aplikasi superkapasitor. Setelah tema didapatkan, kemudian difokuskan pada bahan, metode sintesis, dan pengujian. Karena tema pada *paper review* ini adalah komposit berbasis CNT, maka bahan komposit yang digunakan salah satunya adalah CNT yang berperan sebagai *filler*, sedangkan material *metal oxide*, *metal sulfide*, dan *carbon* berperan sebagai matriks. Metode yang digunakan untuk mensintesis komposit antara lain metode hidrotermal, solvotermal, *chemical vapor deposition (CVD)*, *wet chemical process*, dan *blending process*. Setelah metode sintesis selesai, maka dilanjutkan dengan pengujian karakteristik dari setiap komposit yaitu berupa XRD, SEM, dan TEM untuk menganalisis struktur dan morfologi, sedangkan pengujian CV, GCD, dan EIS bertujuan untuk menganalisis sifat kapasitif komposit.

Adapun untuk penjelasan lebih rinci mengenai bahan dan metode sintesis komposit telah dirangkum pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Bahan dan metode sintesis komposit berbasis CNT.

Komposit	Prekursor	Metode Sintesis	Referensi
CNT/WO ₃	WCl ₆	Solvothermal	Di, dkk. (2019)
CNT/MnO ₂	KMnO ₄	Hidrotermal	Li, dkk. (2019)
CNT/RuO ₂	RuCl ₃ .H ₂ O	Hidrotermal	Chaitra, dkk. (2016)
CNT/NiO	Ni(NO ₃) ₂ .2H ₂ O	<i>Wet chemical process</i>	Roy, dkk. (2018)
CNT/MoS ₂	Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O	Hidrotermal	Chen, dkk. (2018)
CNT/VS ₄	Na ₃ VO ₄	Hidrotermal	Wang, dkk. (2019)
CNT/CuS	Cu(NO ₃) ₂ .3H ₂ O	Hidrotermal	Hou, dkk. (2016)
CNT/graphene	<i>Graphite</i>	<i>Blending process</i>	Cheng, dkk. (2011)
CNT/activated carbon	<i>Carbon black</i>	<i>Wet chemical process</i>	Li, dkk. (2019)
CNT/graphite nano fiber	C ₂ H ₄	<i>Chemical vapor deposition (CVD)</i>	Zhou, dkk. (2018)

Setelah data bahan, metode sintesis, dan pengujian diperoleh, selanjutnya adalah penentuan variabel pada *review* ini. Variabel yang ditentukan dalam *paper review* ini yaitu analisis material sebelum dan setelah dikompositkan dengan CNT. Kemudian dari ke 10 jurnal tersebut dibagi menjadi 2 ruang lingkup pembahasan jurnal yakni 10 jurnal mengenai pengaruh penambahan CNT terhadap struktur komposit berbasis CNT, dan 8 jurnal mengenai pengaruh penambahan CNT terhadap sifat kapasitif komposit berbasis CNT. Setelah semua data terkumpul, tahap selanjutnya adalah melakukan analisis data dan pembahasan dan dilanjutkan pada penarikan kesimpulan dan saran mengenai *paper review* ini.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data

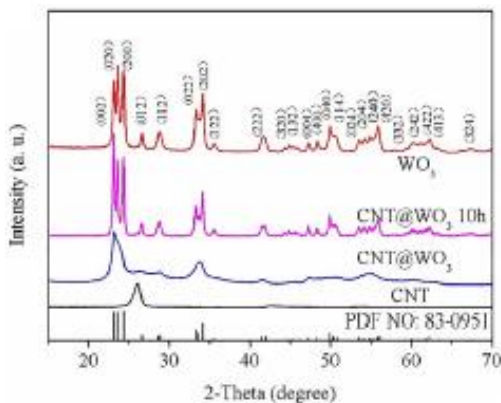
Pada *paper review* ini dilakukan analisis data mengenai jenis-jenis material komposit berbasis *carbon nanotubes* (CNT) seperti berikut.

4.1.1 Komposit CNT/*Metal Oxide*

4.1.1.1 Komposit CNT/WO₃

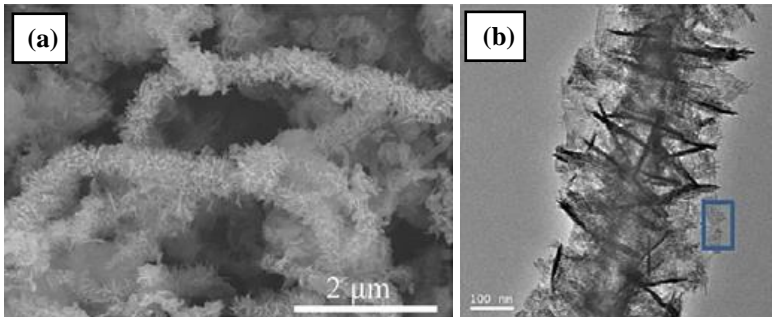
Di, dkk. (2019) telah melakukan penelitian mengenai sintesis komposit CNT/WO₃ menggunakan metode solvotermal. Dalam sintesis komposit CNT/WO₃ ini digunakan prekursor berupa WCl₆. Pertama, CNT di-*pretreatment* dalam asam nitrat pekat pada 120⁰C selama 6 jam dan dicuci dengan air deionisasi. Kemudian, CNT didispersikan dalam 60 ml alkohol terdehidrasi dan diultrasonikasi selama 30 menit. Setelah itu, 1 g WCl₆ ditambahkan ke dalam larutan dan diaduk selama 15 menit dan dimasukkan ke dalam *autoclave* 100 ml dan dipanaskan dalam *furnace* pada 180⁰C selama 24 jam, setelah itu didinginkan hingga mencapai suhu kamar. Kemudian produk dicuci dengan etanol beberapa kali untuk menghilangkan ion dan sisa-sisa hasil reaksi, dilanjutkan pengeringan pada 60⁰C dan dikalsinasi pada 450⁰C di udara selama 2 jam.

Pengujian XRD dilakukan untuk mengetahui fasa serta kristalinitas komposit CNT/WO₃. Berdasarkan hasil pengujian XRD yang ditunjukkan pada Gambar 4.1, terlihat bahwa puncak difraksi WO₃ murni memiliki pola monoklinik serta tidak terdapat puncak ekstra yang menunjukkan kemurnian tinggi dari WO₃. Sedangkan puncak CNT berada pada 25,9⁰ (0 0 2) dan 42,8⁰ (1 0 0). Pada komposit CNT/WO₃ memiliki pola dengan puncak yang mirip dengan WO₃ murni yaitu pada 23.1⁰, 23.5⁰, dan 24.3⁰. Pola difraksi komposit di sekitar 26⁰ yang tumpang tindih dengan puncak WO₃ merupakan kombinasi antara CNT dan WO₃ murni.



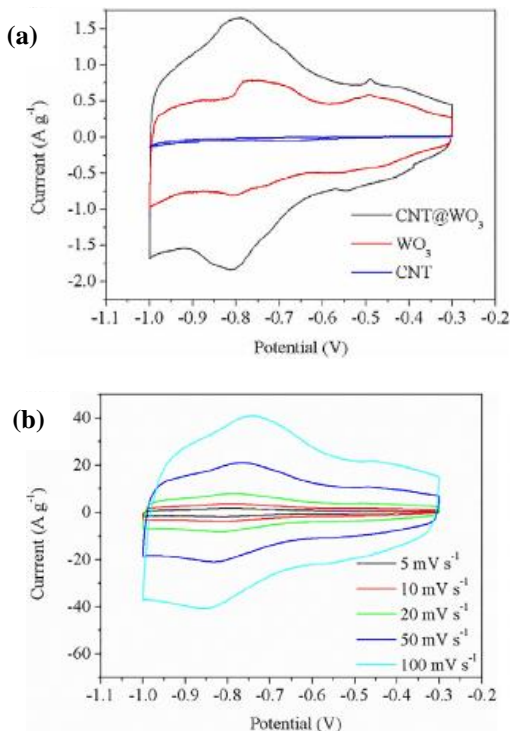
Gambar 4.1 Hasil pengujian XRD CNT, WO₃, dan komposit CNT/WO₃ (Di, dkk., 2019).

Pengujian SEM dan TEM dilakukan untuk mengetahui morfologi komposit CNT/WO₃. Pada Gambar 4.2 (a) menunjukkan morfologi dan struktur komposit CNT/WO₃ satu dimensi (1D) yang terlihat seperti bentuk bulu. Pada saat reaksi solvotermal, permukaan CNT ditutupi dengan susunan *nanosheet* WO₃ yang seragam, menunjukkan bahwa proses nukleasi dan pertumbuhan terjadi pada permukaan CNT. Diameter komposit adalah sekitar 200 – 400 nm, yang secara signifikan lebih besar daripada CNT murni yang memiliki diameter 40 – 60 nm. Gambar 4.2 (b) menunjukkan morfologi komposit dilihat dari pengujian TEM, dimana partikel *nanosheets* WO₃ dengan ketinggian 120 – 140 nm tumbuh secara vertikal pada permukaan CNT dengan kontak yang kuat sehingga dapat memfasilitasi transfer muatan dan mengurangi penggumpalan pada WO₃.



Gambar 4.2 Hasil pengujian (a) SEM dan (b) TEM komposit CNT/WO₃ (Di, dkk., 2019).

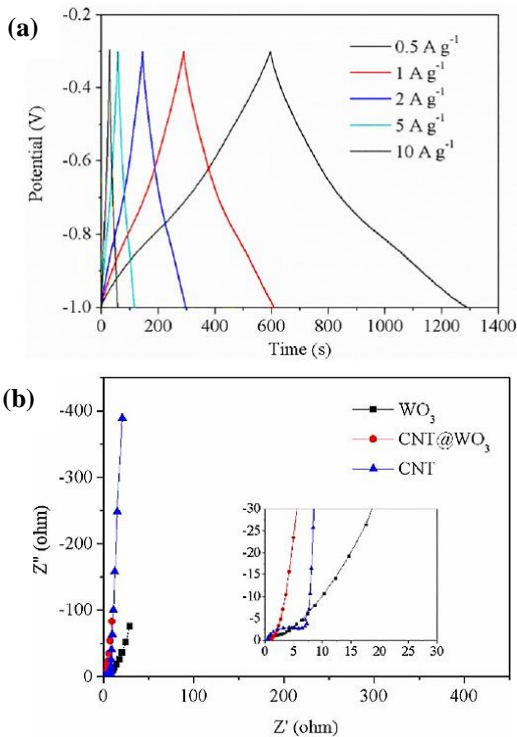
Selanjutnya adalah pengujian CV yang ditunjukkan pada kurva Gambar 4.3. Gambar 4.3 (a) menunjukkan perbandingan kurva antara komposit CNT/WO₃, CNT, dan WO₃ murni. Kurva CV komposit CNT/WO₃ dan WO₃ murni memiliki bentuk yang serupa dan terdiri dari dua pasang puncak redoks yang berbeda, yang menunjukkan perilaku pseudokapasitansi dari WO₃ murni. Diantara ketiga kurva tersebut, kurva komposit CNT/WO₃ memiliki luasan area yang paling tinggi dimana menunjukkan nilai kapasitansi yang tinggi. Gambar 4.3 (b) menunjukkan kurva CV komposit CNT/WO₃ dengan *scan rate* yang berbeda yaitu 5, 10, 20, 50, dan 100 mV.s⁻¹.



Gambar 4.3 (a) Hasil perbandingan kurva CV komposit CNT/WO₃, CNT, dan WO₃ murni, (b) perbandingan kurva CV komposit CNT/WO₃ pada *scan rate* 5 hingga 100 mV.s⁻¹ (Di, dkk., 2019).

Kurva GCD dari komposit dengan kerapatan arus dalam kisaran 0,5 – 10 A.g⁻¹ juga ditunjukkan pada Gambar 4.4 (a). Nilai kapasitansi spesifik tertinggi yang dihitung dari komposit CNT/WO₃ 496 F.g⁻¹ pada 0,5 A.g⁻¹. Stabilitas siklus ditentukan dengan pengujian CV pada *scan rate* 100 mV.s⁻¹ selama 8000 *cycles*, yang menunjukkan retensi sekitar 96,3% dari kapasitansi awal. Gambar 4.4 (b) menunjukkan kurva EIS dari komposit CNT/WO₃, CNT, dan WO₃ murni. Berdasarkan hasil kurva tersebut didapatkan nilai resistansi transfer muatan (R_{ct}) terendah

dimiliki oleh komposit CNT/ WO_3 , yang menunjukkan bahwa superkapasitor tersebut memiliki konduktivitas yang baik dan reaksi redoks yang cepat dibandingkan dengan WO_3 murni. Hasilnya menunjukkan struktur menyerupai bulu-bulu unik yang menyediakan situs reaksi redoks sehingga lebih aktif dan proses transfer muatan yang lebih mudah.

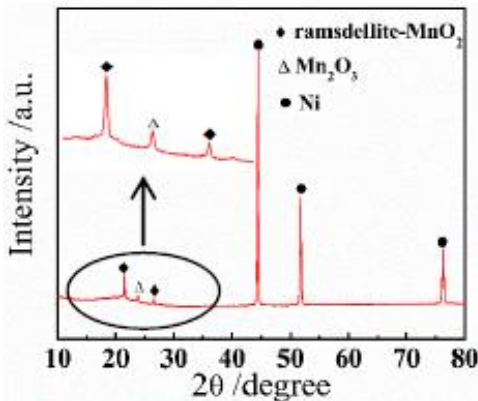


Gambar 4.4 (a) Perbandingan kurva GCD dan (b) kurva EIS pada komposit CNT/ WO_3 , CNT, dan WO_3 murni (Di, dkk., 2019).

4.1.1.2 Komposit CNT/MnO₂

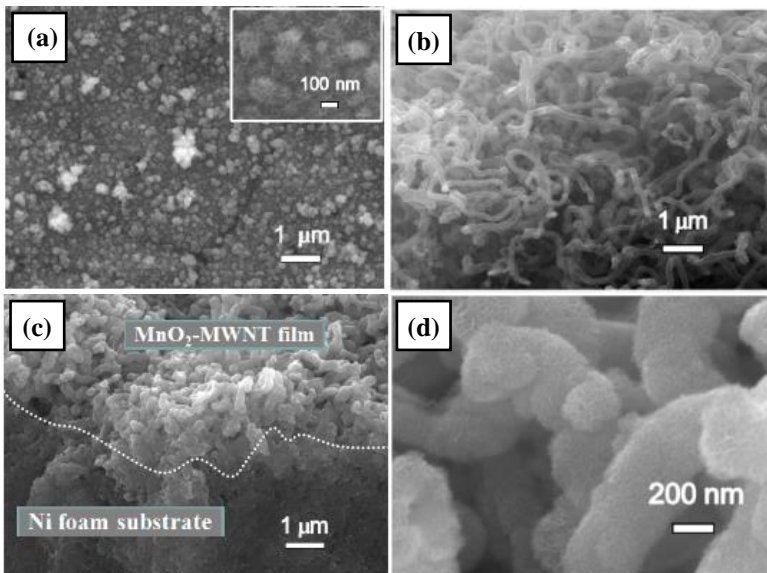
Li, dkk. (2019) telah melakukan penelitian mengenai sintesis komposit CNT/MnO₂ menggunakan metode hidrotermal. Dalam sintesis komposit ini menggunakan elektroda berupa *nickel foam* (Ni *foam*) dan KMnO₄ sebagai prekursor. Pertama, CNT disintesis dengan Ni *foam* pada temperatur 680^oC. Kemudian, sebanyak 0.004 g KMnO₄ ditambahkan dengan 0.002 g *sodium dodecyl sulfate* (SDS) lalu dipindahkan ke dalam *autoclave* dan dimasukkan ke dalam *furnace* pada temperatur 120^oC selama 10 jam, kemudian dikeringkan pada temperatur 50^oC. Setelah itu, komposit diberi penguat dengan *polytetrafluoroethylene* (PTFE) dan dikeringkan pada temperatur 50^oC selama 1 jam.

Berdasarkan hasil pengujian XRD yang ditunjukkan pada Gambar 4.5, spektrum XRD dari komposit MWCNT/Ni-*foam*/MnO₂ menunjukkan puncak difraksi MnO₂ pada 21,4^o dan 26,6^o, serta puncak lemah pada 23,7^o yang merupakan puncak karakteristik untuk Mn₂O₃. Keberadaan Mn₂O₃ mungkin dikaitkan dengan adanya reaksi sampel dengan etanol. Permukaan spesifik tinggi dan stabilitas elektrokimia yang dimiliki oleh Mn₂O₃ dapat meningkatkan nilai kapasitansi spesifik.



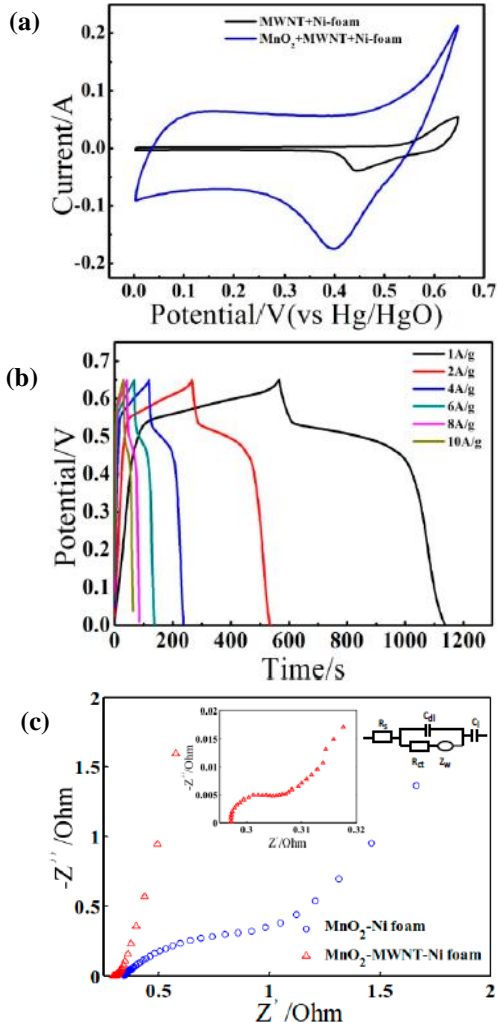
Gambar 4.5 Hasil pengujian XRD komposit CNT/Ni *foam*/MnO₂ (Li, dkk., 2019).

Berdasarkan hasil pengujian SEM, Gambar 4.6 (a) menunjukkan struktur morfologi serpihan nano MnO_2 yang terdeposit pada Ni *foam* sebelum dikompositkan dengan CNT. Sedangkan Gambar 4.6 (c) menunjukkan struktur morfologi komposit MWCNT/Ni *foam*/ MnO_2 . Pada struktur tersebut tidak terdapat batas yang jelas antara substrat dan MnO_2 /Ni *foam*, yang menandakan adanya ikatan yang kuat diantara keduanya yang dihasilkan oleh sintesis MWCNT dengan Ni *foam* secara langsung. Struktur unik MWCNT pada Gambar 4.6 (b) memiliki jaringan konduktif yang sangat baik dan dapat meningkatkan konduktivitas listrik pada komposit MWCNT/Ni *foam*/ MnO_2 . Serpihan nano MnO_2 tumbuh serasi dan menempel pada permukaan MWCNT yang ditunjukkan pada Gambar 4.6 (d) dengan radius rata-rata sekitar 150 nm dan ketebalan nanoflake sekitar 100 nm.



Gambar 4.6 (a) Hasil pengujian SEM MnO_2 pada Ni *foam*, (b) MWCNT yang tumbuh pada substrat Ni *foam*, (c) komposit MWCNT/Ni *foam*/ MnO_2 , dan (d) serpihan nano MnO_2 yang menempel pada permukaan MWCNT (Li, dkk., 2019).

Untuk mengetahui kemampuan elektrokimianya dilakukan pengujian CV, GCD, dan EIS. Gambar 4.7 (a) menunjukkan kurva hasil pengujian CV komposit MWCNT/Ni foam/MnO₂ pada *scan rate* 20 – 100 mV/s dengan voltase 0 – 0.65 V. Kurva menunjukkan *peak* redoks dan secara bertahap membentuk bentuk persegi panjang seiring dengan naiknya *scan rate*. Kurva komposit MWCNT/Ni foam/MnO₂ merupakan gabungan antara kurva EDLC dan kurva pseudokapasitansi. Kurva EDLC yang berbentuk persegi panjang dihasilkan oleh material MnO₂ dalam larutan elektrolit KOH. Sedangkan kurva pseudokapasitansi diakibatkan oleh Ni foam yang menghasilkan sepasang *peak* yang menandakan adanya reaksi faradik pseudokapasitansi oleh NiO. Gambar 4.7 (b) menunjukkan kurva GCD komposit MWCNT/Ni foam/MnO₂. Dan Gambar 4.7 (c) menunjukkan kurva EIS antara MnO₂/Ni foam dan MWCNT/Ni foam/MnO₂, dimana nilai resistansi transfer muatan (R_{ct}) MnO₂/Ni foam adalah 0.411 Ω dan MWCNT/Ni foam/MnO₂ adalah 0.046 Ω . Penurunan nilai R_{ct} yang secara signifikan diakibatkan oleh adanya penambahan MWCNT sehingga meningkatkan nilai konduktivitas listrik.



Gambar 4.7 Kurva (a) CV MWCNT/Ni foam/MnO₂ pada *scan rate* yang berbeda, (b) GCD MWCNT/Ni foam/MnO₂ pada densitas arus yang berbeda, dan (c) EIS MnO₂/Ni foam dan MWCNT/Ni foam/MnO₂ dalam larutan elektrolit KOH 6M (Li, dkk., 2019).

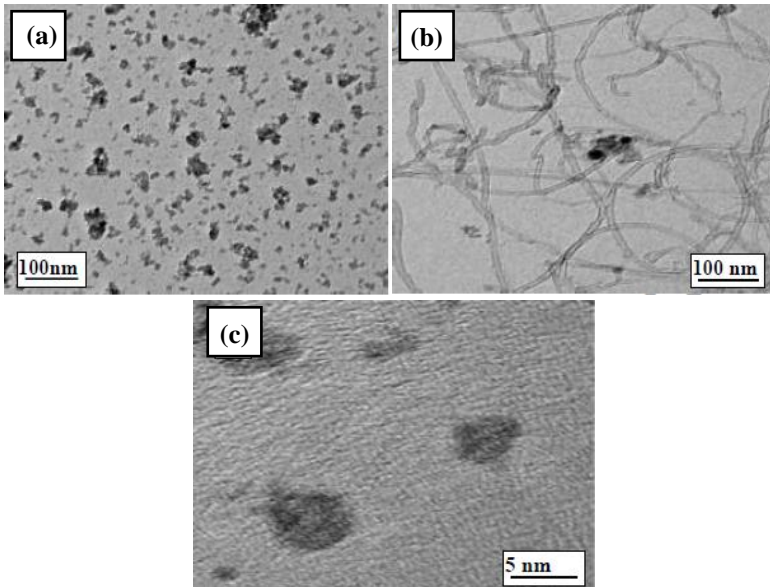
4.1.1.3 Komposit CNT/RuO₂

Chaitra, dkk. (2016) telah melakukan sintesis terhadap komposit CNT/h-RuO₂ melalui metode hidrotermal. CNT disintesis terlebih dahulu menggunakan metode *chemical vapor deposition* (CVD). Sementara sintesis RuO₂ dilakukan menggunakan metode hidrotermal dengan prekursor berupa RuCl₃.H₂O. Langkah pertama yang dilakukan adalah mencampurkan 30 mL 0.15 M RuCl₃.H₂O dengan larutan 10 mL 0.1% SDS (*sodium dodecyl sulphate*). Lalu 2.5 wt% larutan amonia ditambahkan ke dalam campuran dan diaduk hingga pH 9, dilanjutkan dengan menambahkan 0.3 mL H₂O₂ (30 wt%). Campuran tersebut selanjutnya dipindahkan ke dalam 100 mL teflon *autoclave* dan dipanaskan pada temperatur 160⁰C selama 5 jam. Setelah *autoclave* didinginkan, produk hasil sintesis disaring dan dicuci menggunakan DI *water* dan dikeringkan pada temperatur 120⁰C. Untuk sintesis komposit h-RuO₂ dengan MWCNT, sebanyak 100 mg MWCNT diultrasonikasi dalam 20 mL DI *water* selama 2 jam dan dicampurkan dengan 30 mL larutan RuCl₃.H₂O yang mengandung 0.1 % SDS. Lalu untuk langkah selanjutnya mengikuti proses sintesis h-RuO₂ melalui metode hidrotermal dan akan menghasilkan produk akhir berupa komposit CNT/h-RuO₂.

Pada pengujian XRD, MWCNT menunjukkan puncak difraksi pada $2\theta = 26^{\circ}$ sesuai dengan (002) bidang hkl dari struktur grafik MWCNT. Puncak difraksi komposit h-RuO₂ dan MWCNT/h-RuO₂ pada 2θ dengan nilai 24,5⁰, 33,3⁰, 35,7⁰, 41⁰, 54,2⁰ sesuai dengan bidang hkl (110), (101), (009), (200) dan (211). Puncak grafik MWCNTs pada 26⁰ tidak terlihat pada komposit MWCNT/h-RuO₂ dikarenakan adanya interaksi preferensi yang mungkin terjadi antara partikel RuO₂ dengan MWCNT.

Gambar 4.8 menunjukkan morfologi struktur h-RuO₂ dan komposit CNT/h-RuO₂. Pada Gambar 4.8 (a) terlihat partikel h-RuO₂ sebelum dikompositkan dengan CNT yang membentuk gumpalan-gumpalan dengan ukuran sekitar 5 hingga 6 nm.

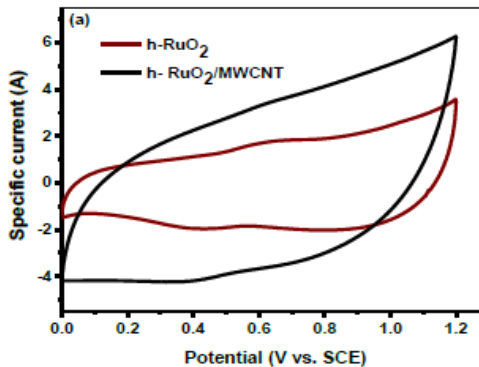
Sedangkan Gambar 4.8 (b) merupakan morfologi komposit CNT/ RuO_2 dan terlihat h-RuO_2 menyebar pada permukaan CNT dan terjebak dalam lubang tabung CNT seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8 (c). Hal ini kemungkinan terjadi probabilitas partikel-partikel RuO_2 untuk masuk ke dalam lubang tabung CNT dan terjebak di dalamnya selama proses sintesis berlangsung.



Gambar 4.8 Hasil pegujian TEM (a) h-RuO_2 , (b) komposit CNT/ h-RuO_2 , dan (c) h-RuO_2 dalam lubang tabung CNT (Chaitra, dkk., 2016).

Untuk mengetahui kemampuan elektrokimianya dilakukan pengujian CV seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9. Pengujian CV dilakukan menggunakan *scan rate* pada rentang 2 hingga $100 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ dengan *potential window* 0–1.2 V. Hasil kurva membentuk persegi panjang yang mengindikasikan kemampuan kapasitifnya serta terdapat gundukan (*hump*) yang mana merupakan sifat pseudokapasitif yang dimiliki oleh RuO_2 . Adanya

penambahan MWCNT mengakibatkan peningkatan nilai kapasitansi spesifik komposit CNT/RuO₂. Nilai kapasitansi spesifik yang dihasilkan oleh h-RuO₂ adalah 604 F.g⁻¹ dan komposit CNT/RuO₂ adalah 1585 F.g⁻¹ pada *scan rate* 2 mV.s⁻¹. Hal ini dikarenakan struktur mesopori berongga pada MWCNT yang berperan sebagai saluran konduktif yang memudahkan proses pergerakan ion.



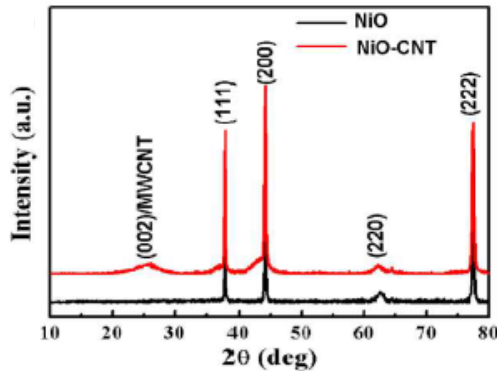
Gambar 4.9 Kurva CV h-RuO₂ dan komposit CNT/RuO₂ pada *scan rate* 2 hingga 100 mV/s (Chaitra, dkk., 2016).

4.1.1.4 Komposit CNT/NiO

Roy, dkk. (2018) telah melakukan sintesis komposit CNT/NiO melalui metode *wet chemical process*. Prekursor yang digunakan berupa Ni(NO₃)₂. Pertama, 150 mg CNT didispersikan ke dalam 150 ml *distilled water* dan diultrasonikasi selama 2 jam. Setelah CNT terdispersi, sebanyak 0,4362 g Ni (NO₃)₂, 6H₂O (0,025 M), dan 1,5 g urea (0,5 M) ditambahkan ke dalamnya. Larutan kembali diultrasonikasi selama 10 menit dan dipanaskan di dalam *oil bath* pada temperatur 80°C selama 2 jam sambil diaduk menggunakan *magnetic stirrer*, dilanjutkan pendinginan selama 12 jam. Kemudian, produk CNT/Ni(OH)₂ dicuci beberapa kali menggunakan *distilled water* dan etanol, dilanjutkan pengeringan pada temperatur 600°C di dalam keadaan vakum. Produk yang telah dikeringkan tersebut kemudian di *annealing*

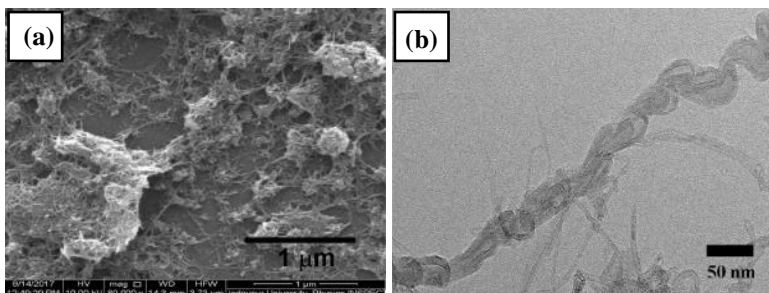
pada temperatur 300°C selama 2 jam dengan laju pemanasan lambat 1°C per menit untuk mengoksidasi NiO dari $\text{Ni}(\text{OH})_2$. Selanjutnya, NiO murni juga disintesis dengan mengikuti prosedur yang sama tanpa penambahan CNT. Sedangkan untuk pengujian kemampuan elektrokimianya, pertama pembuatan bahan elektroda aktif 20 mg yang dibuat dengan mencampurkan 85% berat komposit CNT/NiO, 10% berat bubuk grafit dan 5% berat polivinilidena fluorida (PVDF). Campuran ini kemudian ditambahkan ke dalam 500 ml larutan *N-Methyl Pyrrolidine* (NMP) dan diultrasonikasi selama 30 menit hingga terbentuk gel. Gel yang terbentuk kemudian ditempelkan ke permukaan batang teflon yang dilapisi grafit yang berfungsi sebagai elektroda kerja. Elektroda ini kemudian dikeringkan dalam vakum pada temperatur 60°C selama 6 jam.

Gambar 4.10 menunjukkan hasil pengujian XRD yang berfungsi untuk mengetahui struktur kristal dan fasa komposit CNT/NiO. Bidang grafitik (002) CNT muncul pada $2\theta = 26.10^{\circ}$ di dalam grafik CNT/NiO. Sedangkan puncak NiO yaitu di $2\theta = 37.10^{\circ}$, 43.10° , 62.60° , dan 78.50° yang sesuai dengan struktur bidang NiO (111), (200), (220) dan (222), secara berturut-turut. Keempat puncak tersebut juga muncul pada puncak difraksi NiO murni. Pola XRD NiO menunjukkan puncak yang tajam akan tetapi kurang intens dan rata-rata ukuran partikelnya yang diperoleh dari formula Scherrer adalah ~ 60 nm. Pola XRD komposit CNT/NiO terlihat seperti tumpang tindih, dimana puncak luas yang berasal dari partikel nano (~ 10 - 15 nm) dan puncak tajam lainnya berasal dari partikel NiO yang lebih besar (~ 50 nm). Selama proses pembentukan komposit CNT/NiO, NiO mulai mengalami nukleasi pada permukaan CNT dan tumbuh seiring bertambahnya waktu. Namun dikarenakan tingkat pertumbuhan yang tidak seragam dan durasi nukleasi yang lama, hal tersebut mengakibatkan beberapa partikel NiO tumbuh lebih besar dan CNT terjebak di dalam nanopartikel NiO.



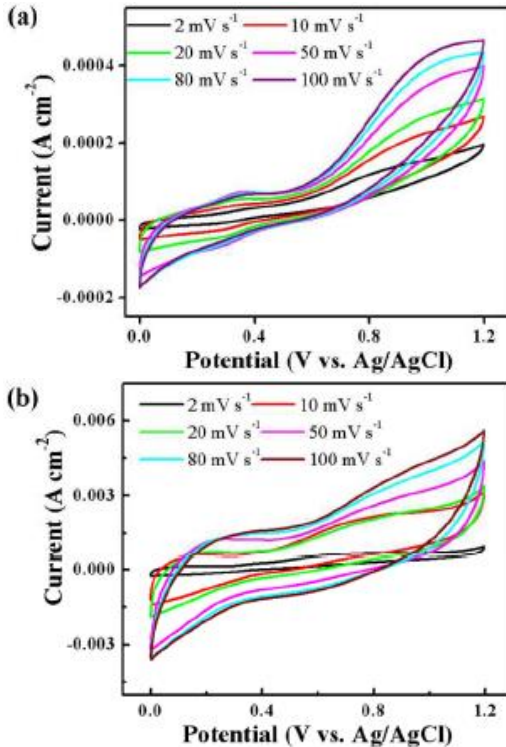
Gambar 4.10 Hasil pengujian XRD NiO dan komposit CNT/NiO (Roy, dkk., 2016).

Sedangkan untuk mengetahui morfologi komposit CNT/NiO dilakukan pengujian SEM dan TEM seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.11. Pada Gambar 4.11 (a) morfologi CNT seperti terbungkus oleh partikel NiO. Diameter rata-rata CNT berkisar antara 10 – 30 nm, sedangkan diameter rata-rata komposit CNT/NiO adalah ~50 nm. Hal ini berkaitan dengan adanya ikatan antara CNT dan pembungkusnya NiO. Jenis struktur yang saling berikatan ini menandakan nilai konduktivitas listrik yang baik yang sangat berguna untuk aplikasi penyimpanan energi.



Gambar 4.11 Hasil pengujian (a) SEM dan (b) TEM komposit CNT/NiO. (Roy, dkk., 2016)

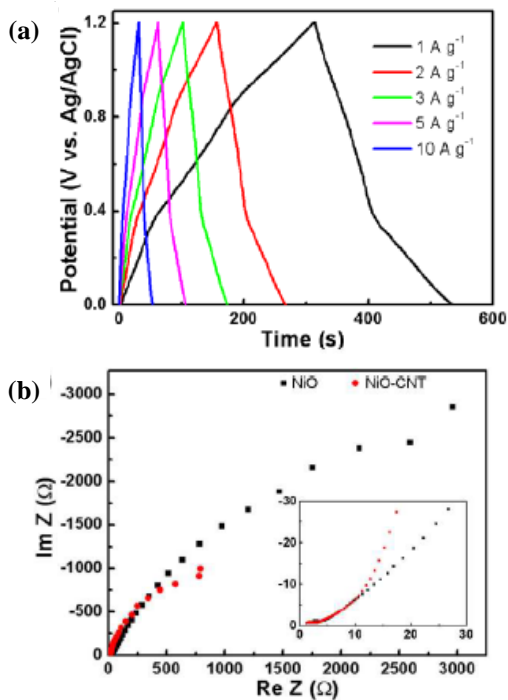
Gambar 4.12 merupakan kurva hasil pengujian CV komposit CNT/NiO dan NiO murni. Pengujian ini menggunakan elektrolit berupa Na_2SO_4 1M pada *potential window* antara 0 – 1,2 V (Ag/AgCl) dengan *scan rate* dari 2 – 100 $\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$. Pada kedua kurva tersebut, daerah yang berada di bawah kurva meningkat seiring dengan peningkatan *scan rate*, dikarenakan oleh peningkatan mobilitas muatan pada *scan rate* yang lebih tinggi. Bentuk kurva NiO (Gambar 4.12 (a)) menyimpang dari bentuk kurva ideal yang menandakan sifat pseudokapasitif. Sedangkan pada Gambar 4.12 (b) kurva cenderung mendatar dan luas dikarenakan adanya penambahan CNT yang meningkatkan kontribusi lapisan ganda. Selain itu, dengan penambahan CNT dapat meningkatkan konduktivitas material, menurunkan IR, efek pertukaran ion berkurang, dan kualitas penyimpanan muatan juga meningkat. Dengan kelebihan yang dimiliki CNT tersebut juga berpengaruh pada nilai kapasitansi spesifik komposit CNT/NiO yaitu sebesar $879,19 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ pada *scan rate* $2 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$.



Gambar 4.12 Hasil pengujian CV (a) NiO murni dan (b) komposit CNT/NiO (Roy, dkk., 2016).

Hasil pengujian GCD dari CNT murni dan komposit CNT/NiO ditunjukkan pada Gambar 4.13 (a). Kurva tersebut menunjukkan sedikit penyimpangan dari bentuk segitiga. Pada kurva *discharging* komposit CNT/NiO terdapat 3 bagian berbeda, yaitu (i) penurunan IR yang kecil dan cepat karena penambahan CNT yang menegaskan kontak yang baik antara bahan aktif dan kolektor, (ii) bagian yang hampir linier karena adanya penambahan CNT yang mempunyai karakteristik EDLC, dan (iii) daerah yang melengkung karena aktivitas redoks. Selain itu, penggabungan CNT dalam NiO menyebabkan jumlah pori semakin banyak yang

dapat memberikan sejumlah besar situs aktif secara elektrokimia untuk difusi ion elektrolit. Dengan demikian ion dapat dengan mudah menembus NiO dan juga dapat berinteraksi dengan CNT, yang menghasilkan pemanfaatan maksimum bahan elektroda aktif. Gambar 4.13 (b) menunjukkan kurva EIS dan didapatkan nilai R_{ct} komposit CNT/NiO adalah sebesar $\sim 5\Omega$ yang nilainya lebih kecil dibandingkan dengan NiO dengan nilai R_{ct} $\sim 8\Omega$. Hal ini menunjukkan peningkatan konduktivitas material.



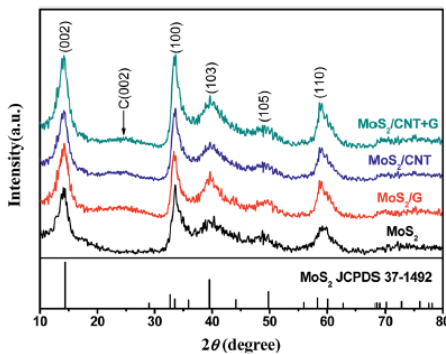
Gambar 4.13 Hasil pengujian (a) GCD dan (b) EIS komposit CNT/NiO (Roy, dkk., 2016).

4.1.2 Komposit CNT/Metal Sulfide

4.1.2.1 Komposit CNT/MoS₂

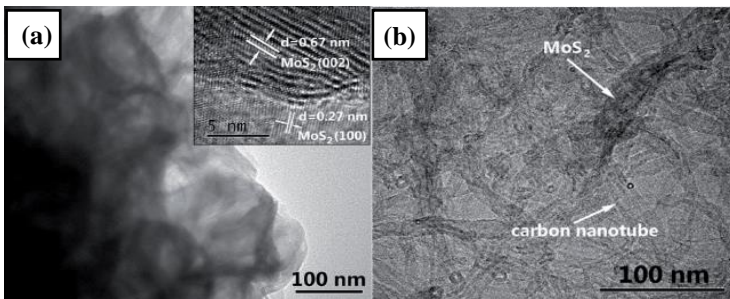
Chen, dkk. (2018) telah melakukan penelitian mengenai sintesis komposit MoS₂ dengan material berbasis karbon, seperti *carbon nanotubes* (CNT), *graphene* (G), dan *nano carbon black* (NCB) menggunakan metode hidrotermal. Masing-masing karbon sebanyak 30 mg dicampurkan dengan 20 mL etanol dan diultrasonikasi selama 1 jam. 1 mmol prekursor Na₂MoO₄·2H₂O dan 5 mmol *thiourea* dilarutkan ke dalam 60 mL DI *water* dan dimasukkan ke dalam larutan karbon yang terdispersi dan diaduk selama 1 jam. Campuran tersebut kemudian dipanaskan dalam *furnace* pada temperatur 210⁰C selama 24 jam. Produk yang telah jadi selanjutnya disaring dan dicuci menggunakan DI *water* sebanyak tiga kali, dilanjutkan dengan etanol, lalu dikeringkan di dalam *furnace*. Sebagai perbandingan, MoS₂ juga disintesis menggunakan metode yang sama tanpa penambahan karbon.

Berdasarkan hasil pengujian XRD yang ditunjukkan pada Gambar 4.14, pola *nanosheet* MoS₂ murni berada pada puncak 14.4⁰, 32.7⁰, 39.5⁰, dan 58.3⁰. Sedangkan untuk komposit salah satunya CNT/MoS₂ memiliki *hump* difraksi yang luas antara 21⁰ dan 27⁰ yang dikaitkan dengan adanya bahan berbasis karbon (CNT) dengan struktur bidang grafit (002).



Gambar 4.14 Hasil pengujian XRD pada MoS₂ murni, MoS₂/NC, MoS₂/G, dan MoS₂/CNT (Chen, dkk., 2018).

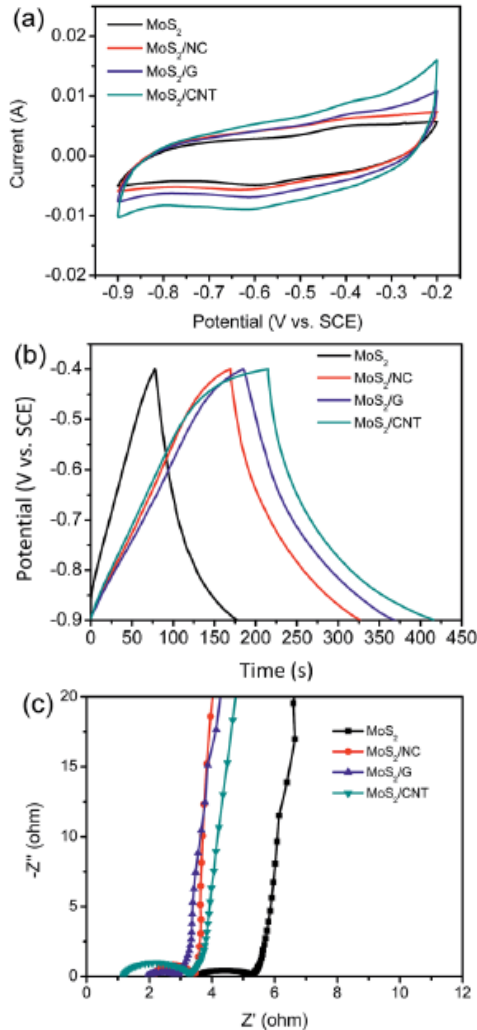
Gambar 4.15 (a) hasil pengujian SEM MoS₂ sebelum dikompositkan dengan CNT dengan struktur *nanosheets* 2D yang membentuk gumpalan–gumpalan. Sedangkan Gambar 4.15 (b) menunjukkan morfologi komposit CNT/MoS₂, dimana CNT berperan untuk memisahkan gumpalan pada MoS₂. Bentuk CNT yang memanjang dapat memfasilitasi transfer elektron yang cepat serta struktur komposit CNT/MoS₂ tersebut dapat meningkatkan konduktivitas elektron dan kinerja superkapasitor.



Gambar 4.15 Hasil pengujian SEM (a) MoS₂ yang menggumpal terdiri dari beberapa *nanosheet* 2D dan (b) MoS₂ yang menyebar dan menempel pada permukaan CNT pada komposit CNT/MoS₂ (Chen, dkk., 2018).

Pada kurva CV yang ditunjukkan pada Gambar 4.16 (a) terdapat gundukan kecil (*hump*) pada voltase 0.6 V dan 0.4 V yang menandakan adanya interkalasi ion Na⁺ di antara *layer* MoS₂. Komposit CNT/MoS₂ memiliki nilai output arus paling tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa nilai konduktivitas MoS₂ dapat meningkat dengan adanya penambahan CNT sehingga juga dapat meningkatkan nilai kapasitansi spesifiknya. Gambar 4.16 (b) menunjukkan kurva GCD MoS₂, MoS₂/NCB, MoS₂/G, dan MoS₂/CNT pada densitas arus 1 A.g⁻¹ dan voltase antara -9 V dan -4 V. Pada kurva tersebut terlihat bahwa MoS₂/CNT memiliki waktu *discharge* lebih lama dibandingkan dengan MoS₂ dan komposit lainnya. Selain itu, nilai resistansi komposit MoS₂/CNT

memiliki nilai lebih kecil dibandingkan yang lainnya yaitu 1.19Ω seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.16 (c).

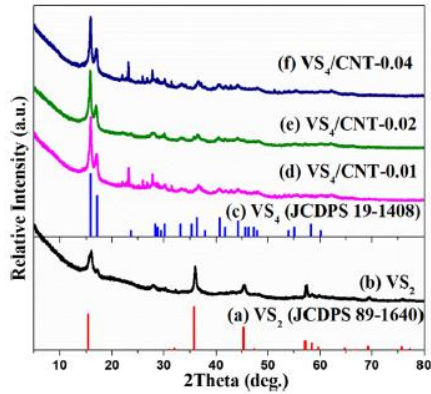


Gambar 4.16 Kurva (a) CV, (b) GCD, dan (c) EIS pada MoS_2 , MoS_2/NC , MoS_2/G , dan MoS_2/CNT (Chen, dkk., 2018).

4.1.2.2 Komposit CNT/VS₄

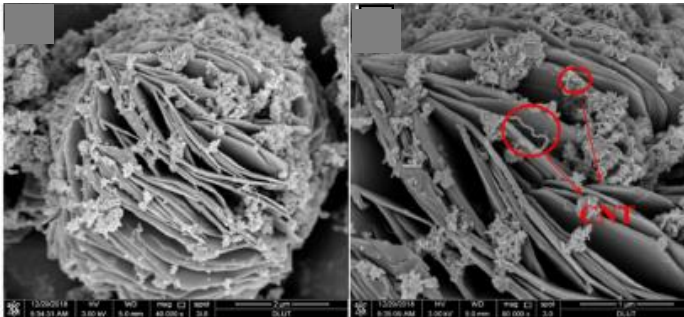
Wang, dkk. (2019) telah melakukan penelitian mengenai sintesis komposit CNT/VS₄ untuk diaplikasikan sebagai material elektroda superkapasitor menggunakan metode hidrotermal. Material komposit CNT/VS₄ ini dibandingkan dengan material VS₂ untuk mengetahui hasil yang paling maksimal diantara keduanya. Dalam proses sintesis CNT, pertama CNT dengan massa 0.01, 0.02, dan 0,04 dilarutkan ke dalam *distilled water* (DI) secara terpisah untuk mengetahui efek dari perbedaan massa tersebut. Setelah larutan CNT diultrasonikasi selama 30 menit, selanjutnya ditambahkan serbuk Na₃VO₄ (5 mM) sebanyak 0.92 g dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer*. Lalu *thioacetamide* (TAA) sebanyak 1.88 g (25 mM) dilarutkan dalam larutan tersebut dan diaduk hingga homogen selama 2 jam pada temperatur ruangan. Larutan yang telah homogen selanjutnya memasuki tahap sintesis menggunakan metode hidrotermal dimana larutan dimasukkan ke dalam *autoclave* teflon *stainless steel* dan dimasukkan ke dalam *furnace* pada temperatur 160⁰C selama 24 jam. Setelah *autoclave* mendingin, hasil sintesis disaring dan dicuci menggunakan *distilled water* (DI) dan etanol (C₂H₅OH) beberapa kali dan dikeringkan pada temperatur 60⁰C selama 12 jam. Sebagai perbandingan, VS₂ disintesis menggunakan Na₃VO₄ dan TAA dengan prosedur yang sama, akan tetapi tanpa penambahan material CNT.

Gambar 4.17 menunjukkan pola XRD antara VS₂ dan komposit CNT/VS₄. Hasil difraksi puncak VS₂ terjadi pada $2\theta = 15.65^{\circ}$, 35.15° , 45.14° , dan 55.8° . Sedangkan puncak difraksi komposit CNT/VS₄ muncul pada $2\theta = 15.78^{\circ}$ dan 17° yang menandakan karakteristik VS₄. Dan puncak difraksi yang muncul pada sekitar 26° merupakan karakteristik dari CNT. Ketika jumlah CNT yang dikompositkan pada VS₄ meningkat, maka puncak pada 26° juga menguat dan intensitas difraksi VS₄ menurun.



Gambar 4.17 Hasil pengujian XRD VS₂, VS₄/CNT 0.01, VS₄/CNT 0.02, dan VS₄/CNT 0.04 (Wang, dkk., 2019).

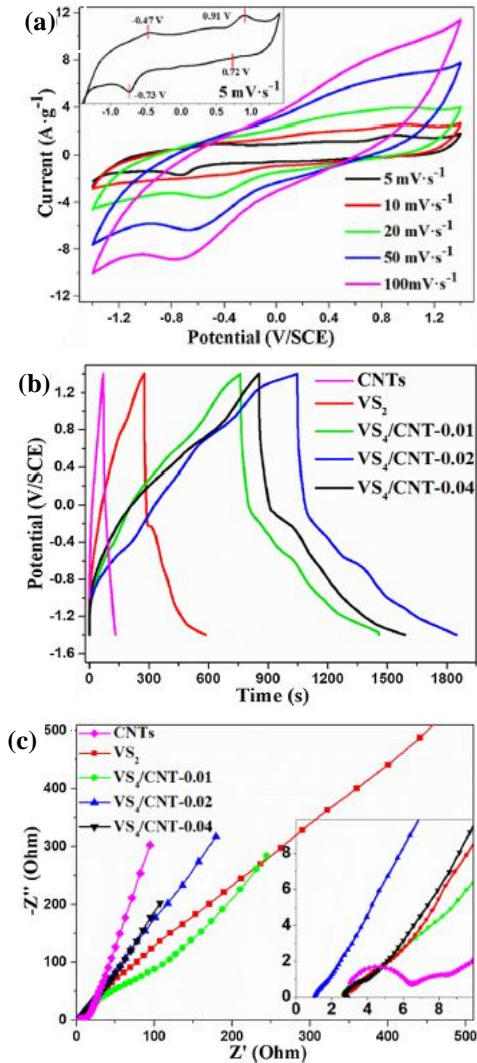
Gambar 4.18 menunjukkan hasil pengujian SEM komposit CNT/VS₄ dengan morfologi menyerupai kelopak bunga yang terdiri dari kumpulan *nanosheets*. *Nanosheets* VS₄ tumbuh secara seragam pada CNT, yang mana kombinasi antara VS₄ dan CNT dapat meningkatkan konduktivitas listrik pada material elektroda.



Gambar 4.18 Hasil pengujian SEM komposit CNT/VS₄ (Wang, dkk., 2019).

Pengujian CV, GCD, dan EIS juga digunakan untuk mengetahui kemampuan elektrokimianya. Gambar 4.19 (a)

menunjukkan kurva CV CNT/VS₄ dengan rentang voltase -1.4 V hingga 4 V dan variasi *scan rate* 5 mV/s hingga 100 mVs. Pada kurva tersebut terdapat sepasang *peak* redoks yang mengartikan adanya mekanisme penyimpanan muatan seperti pada mekanisme faradik tipe baterai. Sedangkan material CNT dan material karbon lainnya umumnya adalah superkapasitor tipe EDLC. Oleh karena itu, dalam penelitiannya mekanisme penyimpanan komposit CNT/VS₄ ini merupakan gabungan antara mekanisme faradik dan EDLC. Adapun pengujian GCD ditunjukkan pada kurva Gambar 4.19 (b) dengan rentang densitas arus dari 1 A.g⁻¹ hingga 10 A.g⁻¹. Nilai kapasitansi spesifik yang dihasilkan dari komposit ini adalah 330 F.g⁻¹ yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan material VS₂. Gambar 4.19 (c) menunjukkan hasil pengujian EIS pada rentang 100 kHz hingga 0.01 Hz. Komposit CNT/VS₄ dengan komposisi CNT 0.02 g memiliki diameter semi lingkaran yang paling kecil, menandakan resistansi transfer muatan juga kecil yang disebabkan oleh struktur morfologinya yang menyerupai rantai serta banyaknya kandungan sulfur yang sangat berpengaruh pada reaksi faradik. Penambahan CNT meningkatkan konduktivitas material.

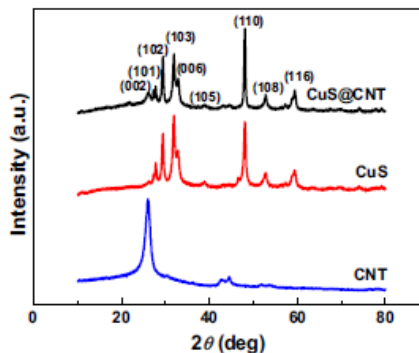


Gambar 4.19 (a) Kurva CV, (b) GCD, dan (c) EIS komposit CNT/ VS_4 (Wang, dkk., 2019).

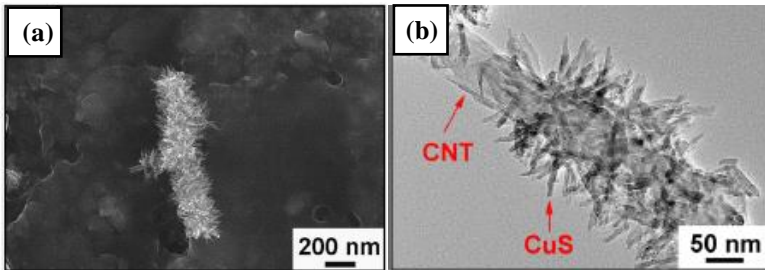
4.1.2.3 Komposit CNT/CuS

Hou, dkk. (2016) telah melakukan penelitian mengenai sintesis komposit CNT/CuS untuk aplikasi superkapasitor melalui metode hidrotermal. Proses sintesis komposit CNT/CuS ini pertama adalah mensintesis CNT/SiO₂ melalui metode hidrotermal. Kemudian hasil CNT/SiO₂ direaksikan dengan urea dan 1.5 ml Cu(NO₃)₂·3H₂O (0,1 M) melalui metode hidrotermal hingga terbentuk SiO₂/CuSilicate/CNT. Setelah itu, SiO₂/CuSilicate/CNT direaksikan dengan Na₂S·9H₂O melalui metode hidrotermal dan terbentuk komposit CNT/CuS.

Berdasarkan hasil pengujian XRD yang ditunjukkan pada Gambar 4.20, puncak difraksi CNT muncul pada $2\theta = 26,06^\circ$ dengan bidang (002). Semua indeks puncak hasil XRD menunjukkan bahwa *nanoneedles* CuS melekat kuat pada CNT. Gambar 4.21 menunjukkan hasil pengujian SEM dan TEM komposit CNT/CuS. *Nanoneedles* CuS melekat dengan kuat pada permukaan CNT yang memiliki diameter ~5-7 nm. Kristalografi komposit CNT/CuS diuji menggunakan HRTEM dengan *d spacing* yang diukur dari pinggiran kisi sebesar 0,305 dan 0,335 nm. Hal ini sesuai dengan bidang CuS (102) dan bidang CNT (002).

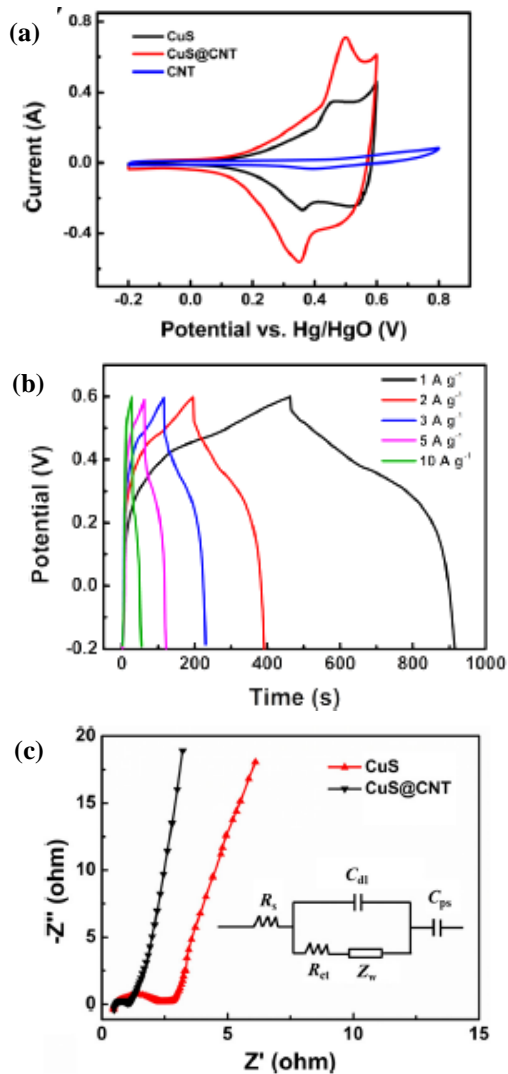


Gambar 4.20 Hasil Pengujian XRD komposit CNT/CuS, CuS, dan CNT murni (Hou, dkk., 2016).



Gambar 4.21 Hasil pengujian (a) SEM dan (b) TEM komposit CNT/CuS (Hou, dkk., 2016).

Gambar 4.22 menunjukkan hasil pengujian CV, GCD, dan EIS komposit CNT/CuS. Gambar 4.22 (a) menunjukkan perbandingan kurva CV antara CNT, CuS, dan komposit CNT/CuS. Kurva elektroda CNT cenderung datar dan tidak memiliki pengaruh besar terhadap kapasitansi. Sedangkan bentuk kurva elektroda CuS dan komposit CNT/CuS hampir sama, namun luasan kurva komposit CNT/CuS jauh lebih besar dibanding CuS. Elektroda CuS dan CNT/CuS menunjukkan reaksi redoks yang ditandai dengan adanya *hump* pada grafik CV, dimana penyimpanan energi listriknya melalui reaksi redoks. Elektroda CNT/CuS memiliki arus yang sangat tinggi dibandingkan dengan CuS dan CNT. CNT memiliki beberapa pengaruh dalam komposit ini yaitu konduktivitas listriknya yang baik, sifat listrik dan mekanisnya yang unik, dan stabilitas kimia yang baik, dimana dapat memberikan transfer elektron yang baik sehingga menghasilkan siklus dan kinerja laju yang lebih baik. Berdasarkan perhitungan didapatkan nilai kapasitansi spesifik sebesar $566,4 \text{ F.g}^{-1}$ dan stabilitas siklik 94,5% dari kapasitansi awal setelah 5000 siklus pada kepadatan arus 1 A.g^{-1} . Gambar 4.22 (c) menunjukkan hasil pengujian EIS elektroda CuS dan CNT/CuS, didapatkan nilai resistansi R_{ct} sebesar $2,53 \Omega$ dan $1,12 \Omega$ untuk masing-masing elektroda CuS dan CNT/CuS.



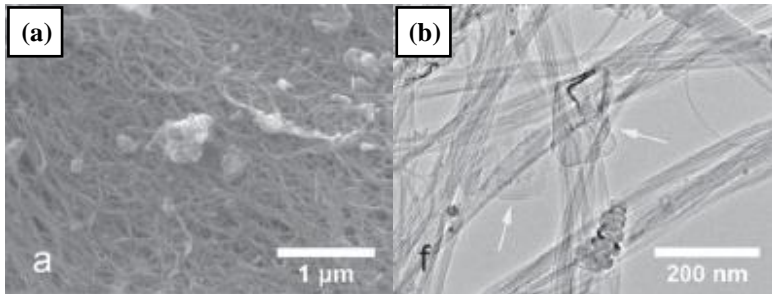
Gambar 4.22 (a) Perbandingan hasil pengujian CV elektroda CuS, CNT, dan CNT/CuS, (b) hasil pengujian GCD komposit CNT/CuS, dan (c) hasil pengujian EIS komposit CNT/CuS (Hou, dkk., 2016).

4.1.3 Komposit CNT/*Carbon*

4.1.3.1 Komposit CNT/*Graphene*

Cheng, dkk. (2011) telah melakukan penelitian mengenai sintesis komposit film CNT/*graphene* melalui metode *blending process*. Pertama, *graphene oxide* disintesis dari grafit melalui metode Hummer hingga terbentuk serbuk *graphene*. Sedangkan untuk produk CNT dibeli secara komersial. Kemudian kedua bahan elektroda tersebut kemudian dikompositkan menjadi komposit CNT/*graphene*. Proses sintesis komposit tersebut pertama didispersi secara terpisah dalam etanol 0,2 M. Kemudian suspensi disaring pada kertas saring mikro dan difiltrasi. Komposit film CNT/*graphene* dibuat dengan mencampurkan *graphene* dan CNT dengan diultrasonikasi dalam etanol dan dilanjutkan dengan penyaringan. Film yang terbuat dari CNT, *graphene*, dan komposit CNT/*graphene* melekat pada kolektor arus titanium dalam elektroda uji. Kedua elektroda dipisahkan oleh film polipropilen tipis dalam larutan elektrolit KCl 1 M, elektrolit organik TEABF₄/PC 1 M dan 1-etil-3-metil imidazolium bis (*trifluorometana sulfon*) imida (EMI-TFSI).

Berdasarkan hasil pengujian SEM dan TEM komposit CNT/*graphene* yang ditunjukkan pada Gambar 4.23, bentuk CNT yang sangat panjang saling terjerat satu sama seperti sarang laba-laba. Struktur CNT seperti ini dapat menjebak lembaran nano *graphene* atau struktur lain jika bereaksi dengannya. Dalam komposit ini, CNT berperan sebagai jalur pergerakan muatan ion dan elektron, dikarenakan CNT memiliki konduktivitas yang tinggi sehingga dapat mengurangi hambatan listrik dari elektroda. Selain itu, CNT juga dapat berperan sebagai pemisah dari lembaran nano *graphene*, yang kemudian akan meningkatkan aksesibilitas ion.



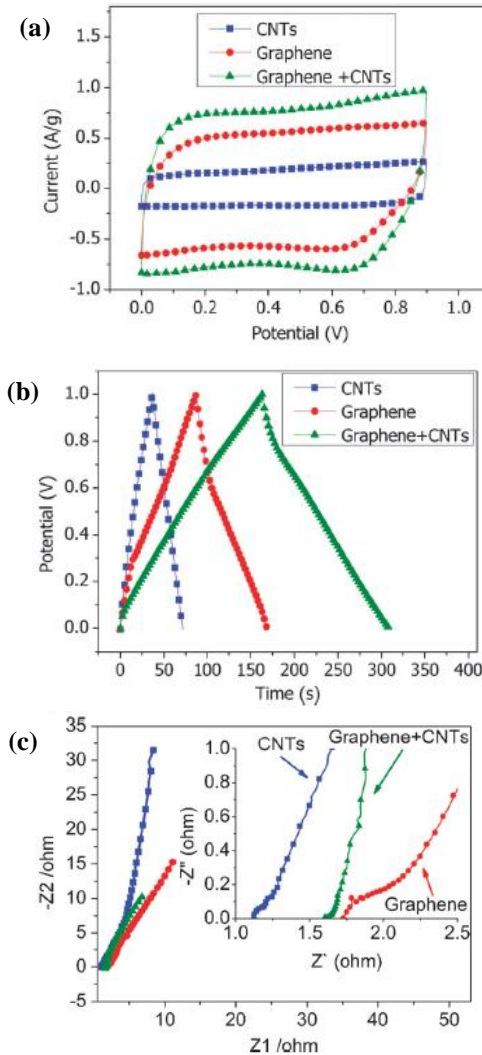
Gambar 4.23 Hasil pengujian (a) SEM dan (b) TEM pada komposit CNT/*graphene* (Cheng, dkk., 2011).

Gambar 4.24 menunjukkan hasil pengujian CV, GCD, dan EIS pada komposit CNT/*graphene*. Gambar 4.24 (a) merupakan hasil pengujian CV CNT, *graphene*, dan komposit CNT/*graphene* dalam larutan elektrolit KCl 1M dengan *scan rate* 10 mV.s^{-1} . Dari ketiga elektroda tersebut, komposit CNT/*graphene* menunjukkan arus paling besar dengan nilai kapasitansi spesifik terbesar. Kurva CV yang memiliki geometri mendekati bentuk persegi, menunjukkan perambatan muatan yang sangat baik dalam elektroda. Bentuk *loop* CV dari superkapasitor harus persegi panjang diikuti dengan nilai resistansi kontak yang rendah. Resistansi yang lebih besar akan mendistorsi *loop*, sehingga menghasilkan *loop* yang lebih sempit dengan sudut miring. Adanya kandungan air dan gugus redoks seperti gugus hidroksida dan karboksil juga dapat menyebabkan bentuk kurva CV yang tidak teratur.

Gambar 4.24 (b) adalah kurva GCD CNT, *graphene*, dan komposit CNT/*graphene* dalam elektrolit KCl 1M. Dapat kita lihat bahwa CNT menghasilkan kurva GCD paling simetris, yang menunjukkan resistansi terkecil. Tetapi CNT memiliki kapasitansi spesifik terkecil jika dihitung dari kurva GCD. Sementara itu, elektroda komposit CNT/*graphene* memiliki kapasitansi spesifik terbesar yakni 290.4 F.g^{-1} dan resistansi yang lebih kecil daripada *graphene* murni. Hal ini menunjukkan bahwa komposit

CNT/*graphene* dapat meningkatkan kinerja energi (terkait dengan kapasitansi spesifik) dan daya (terkait dengan resistansi). Sifat elektrokimia yang luar biasa dari komposit CNT/*graphene* dikaitkan dengan struktur skala nano dari *graphene* dan CNT. Sifat CNT yang sangat konduktif dapat menyediakan jalur pengangkutan ion dan elektron, sehingga dapat mengurangi hambatan internal; kedua, CNT dengan panjang sekitar 30 nm cenderung saling terkait yang berfungsi sebagai pengikat konduktif yang efektif untuk menahan lembaran nano *graphene*; ketiga, CNT yang terjerat pada permukaan lembaran-nano *graphene* juga dapat bertindak sebagai pemisah yang mencegah lembaran-lembaran nano *graphene* dari aglomerasi, sehingga meningkatkan pergerakan ion.

Gambar 4.24 (c) menunjukkan diagram EIS CNT, *graphene*, dan komposit CNT/*graphene* dalam elektrolit KCl 1M. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa daerah setengah lingkaran komposit CNT/*graphene* lebih kecil daripada daerah setengah lingkaran *graphene* murni, hal ini menunjukkan bahwa penambahan CNT dapat mengurangi resistensi *interlayer* dari lembaran *graphene* dan resistansi kontak dengan kolektor arus. Kurva Warburg yang dikenal sebagai garis lurus yang berada pada sudut 45° dari kiri bawah ke kanan atas dalam plot Nyquist pada Gambar 4.24 (c) sangat pendek, menunjukkan peningkatan pergerakan ion elektrolitik ke permukaan *graphene*. Nilai resistansi seri ekuivalen (ESR) yang diperoleh dari grafik tersebut adalah $1,1 \Omega$ (CNT), $1,68 \Omega$ (*graphene*), dan $1,6 \Omega$ (CNT/*graphene*). Data ESR menentukan tingkat dimana superkapasitor dapat diisi dan dikosongkan, dan merupakan faktor yang sangat penting untuk menentukan kerapatan daya superkapasitor karena kerapatan daya berbanding terbalik dengan ESR. Sehingga dapat disimpulkan bahwa komposit CNT/*graphene* memiliki daya dan kinerja energi paling tinggi.

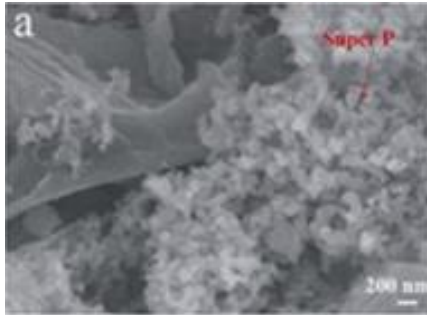


Gambar 4.24 Hasil Pengujian (a) CV, (b) GCD, dan (c) EIS CNT, *graphene*, komposit CNT/*graphene* dalam elektrolit KCl (Cheng, dkk., 2011).

4.1.3.2 Komposit CNT/*Activated Carbon*

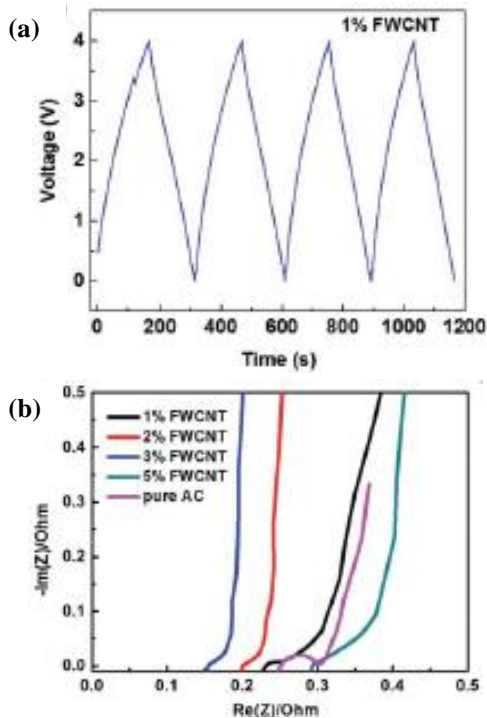
Li, dkk. (2019) telah melakukan penelitian mengenai sintesis komposit CNT/*activated carbon* untuk aplikasi superkapasitor. Dalam proses sintesisnya, pertama serbuk CNT dan karbon hitam dicampur bersama dalam air deionisasi pada temperatur 70⁰C dan *distirring* pada 300 rpm selama 4 jam. Kemudian sebagai pengikat, *polymerized styrene butadiene rubber* (SBR) dan natrium karboksimetil selulosa (CMC) dicampur bersama pada suhu 50⁰C dan *distirring* pada 500 rpm selama 12 jam. Lalu campuran seperti bubur dipindahkan dan ditempelkan ke Al *foil*. Setelah *dirolling* dan dikompresi, lembaran elektroda melekat erat pada Al *foil*, dan setelah pengeringan pada temperatur 100⁰C selama 24 jam, ketebalan dikontrol hingga 200 μ m. Lembaran elektroda kemudian dipotong dengan ukuran panjang 5 cm dan lebar 3 cm, dilanjutkan pengeringan pada temperatur 120⁰C dalam ruang hampa 500 Pa selama 24 jam. Kemudian elektrolit organik (1 M MeEt₃NBF₄/*propene* karbonat (PC), dengan massa 3,5 kali dari elektroda) dimasukkan dalam kondisi vakum. Setelah menambahkan elektrolit, hasil kemudian ditutup dan dimasukkan ke dalam kotak pada 40⁰C selama 24 jam.

Berdasarkan hasil pengujian SEM komposit CNT/AC yang ditunjukkan pada Gambar 4.25, sebagian besar FWCNT sangat panjang dan membentuk bundel dengan diameter 10–80 nm. Kecuali untuk beberapa CNT individual dengan diameter 1,2 nm, sebagian besar tabung dalam bundel memiliki diameter 2–3,5 nm, karena interaksi van der Waals yang kuat di sepanjang arah aksial. Berdasarkan gambar tersebut, sebagian besar CNT menempel pada permukaan partikel AC yang besar.



Gambar 4.25 Hasil pengujian SEM komposit CNT/AC (Li, dkk., 2019).

Gambar 4.26 menunjukkan hasil pengujian sifat kapasitif komposit CNT/AC berupa GCD dan EIS. Gambar 4.26 (a) menunjukkan kurva GCD komposit CNT/AC dan didapatkan nilai spesifik kapasitansi sebesar 78 F.g^{-1} . Dengan penambahan FWCNT dapat memberikan jalur pergerakan ion, sehingga meningkatkan efisiensi kontak antara AC dan elektrolit. Sedangkan pada data EIS yang ditunjukkan pada Gambar 4.26 (b) juga memperlihatkan bahwa dengan adanya penambahan FWCNT dapat mengurangi resistensi komposit CNT/AC. Selain itu, terdapat setengah lingkaran yang sangat jelas untuk AC murni tetapi tidak untuk penambahan FWCNT, hal ini juga menyatakan bahwa AC murni tanpa penambahan CNT memiliki resistensi yang sangat tinggi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan FWCNT efektif dalam meningkatkan konduktivitas listrik dari material elektroda.



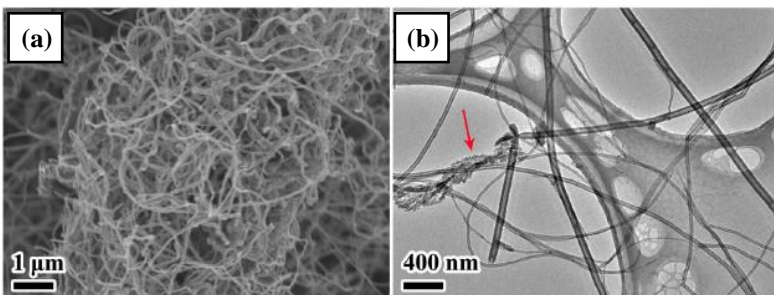
Gambar 4.26 Hasil pengujian (a) GCD dan (b) EIS pada komposit CNT/AC (Li, dkk., 2019).

4.1.3.3 Komposit CNT/*Graphite Nano Fiber*

Zhou, dkk. (2018) telah melakukan penelitian mengenai sintesis komposit CNT/GNF untuk aplikasi superkapasitor melalui metode CVD. Pertama, GNF disintesis terlebih dahulu menggunakan prekursor berupa C_2H_4 yang kemudian direaksikan dengan katalis Co/MgO. Setelah terbentuk GNF kemudian dikompositkan dengan CNT melalui metode CVD. Dalam proses sintesis komposit CNT/GCD, pertama 50% berat CNT murni ditambahkan ke sampel GNF yang didispersikan dalam 100 ml air deionisasi dan diultrasonikasi selama 1 jam. Campuran tersebut selanjutnya diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 10 jam.

Produk kemudian dibilas dengan air deionisasi dan dikeringkan pada 60⁰C sehingga menjadi serbuk komposit CNT/GNF.

Berdasarkan hasil pengujian SEM dan TEM komposit CNT/GNF pada Gambar 4.27, menunjukkan struktur jaringan karbon yang panjang, *continuous*, dan *cross-linked*. Gambar SEM menunjukkan bahwa komposit CNT/GNF saling terkait yang terlihat seperti sarang burung. Struktur tersebut dibentuk oleh CNT dan GNF yang dipilin menjadi satu kesatuan. Struktur GNF sendiri memiliki bentuk seperti gandum seperti yang ditunjukkan oleh panah warna merah. Hibridisasi GNF dengan CNT yang diilustrasikan pada Gambar 4.27 memungkinkan CNT untuk membentuk jaringan di permukaan GNF. Keterjeratan CNT pada substrat GNF membentuk 'jaring' yang menangkap dan memberikan ruang difusi ion ke situs aktif GNF, sehingga meningkatkan nilai kapasitansi komposit CNT/GNF. Gambar TEM menampilkan struktur CNT yang menyerupai tabung dengan interior berongga seperti pipa, sedangkan GNF memiliki bentuk gandum dengan interior padat dan banyak pori sehingga dapat menambah area permukaan GNF. Selain itu, dengan penambahan CNT memberikan permukaan yang lebih besar untuk terjadinya reaksi elektrokimia. Karena diameter rata-rata GNF lebih besar dari CNT, maka akan lebih mudah bagi CNT untuk menempel pada permukaan GNF.

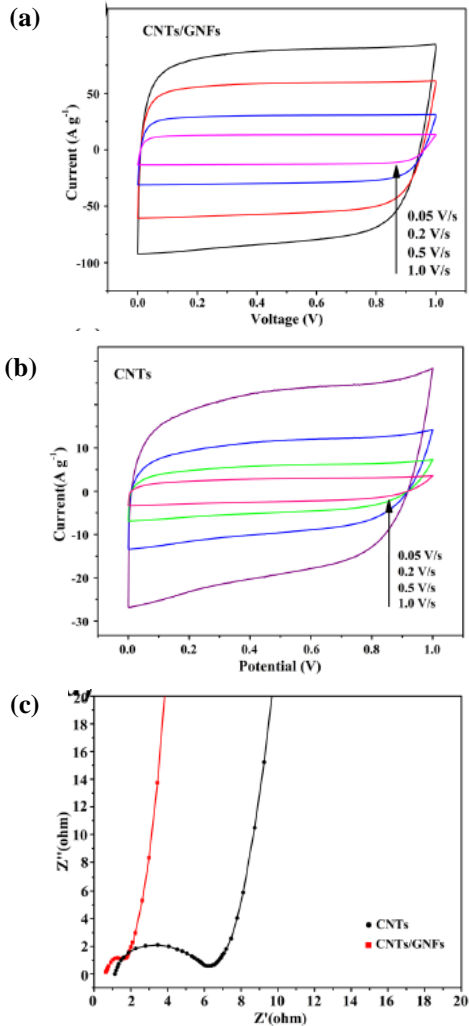


Gambar 4.27 Hasil pengujian (a) SEM dan (b) TEM komposit CNT/GNF (Zhou, dkk., 2018).

Gambar 4.28 (a) menunjukkan kurva CV CNT/GNF yang dibandingkan dengan CNT (Gambar 4.28 (b)) pada *scan rate* $0,05 - 1,0 \text{ V.s}^{-1}$. Kedua kurva CV tersebut tampak hampir persegi panjang, yang menunjukkan perilaku kapasitif yang hampir ideal. Luasan area kurva komposit CNT/GNF lebih besar dibandingkan dengan CNT murni yang memiliki bentuk EDLC relatif kecil.

Pada pengujian GCD menunjukkan bahwa elektroda CNT/GNF dan CNT memiliki bentuk segitiga simetris, yang mana menunjukkan perilaku kapasitif yang hampir ideal. Kapasitansi spesifik superkapasitor dihitung dari kurva *discharging* dimana nilai kapasitansi spesifik menurun seiring dengan meningkatnya kepadatan arus. Ketika kepadatannya 1 A.g^{-1} , kapasitansinya adalah 270 F.g^{-1} , namun ketika kepadatannya 10 A.g^{-1} , nilai kapasitansinya menjadi 221 F.g^{-1} . Sedangkan untuk CNT murni, ketika kepadatannya 1 A.g^{-1} kapasitansinya 131 F.g^{-1} , dan ketika kepadatannya 10 A.g^{-1} nilai kapasitansinya turun menjadi 72 F.g^{-1} . Hal ini dikarenakan hasil penggabungan CNT dan GNF untuk meningkatkan penyimpanan muatan.

Pengujian EIS ditunjukkan pada Gambar 4.28 (c) dimana superkapasitor berbasis CNT/GNF dan CNT murni memiliki *semicircle* di daerah frekuensi tinggi dan garis lurus di daerah frekuensi rendah. X-intersep yang berada di ujung kiri *semicircle* merupakan ESR dari superkapasitor yang menunjukkan resistensi kontak pada bahan aktif dan *interface* kolektor arus, resistensi ionik dari elektrolit, dan resistensi dari bahan elektroda. Nilai resistensi komposit CNT/GNF lebih kecil dibandingkan dengan CNT, masing-masing adalah $0,71 \Omega$ dan $1,09 \Omega$, yang berarti superkapasitor berbasis CNT/GNF memiliki proses *charging/discharging* lebih cepat. Diameter busur yang menghubungkan dengan transfer muatan (R_t) pada *interface* elektroda dan elektrolit menyatakan bahwa nilai R_t untuk superkapasitor berbasis CNT/GNF jauh lebih rendah daripada superkapasitor berbasis CNT. Diameter *semicircle* CNT/GNF yang lebih kecil menunjukkan impedansi rendah, sehingga mudah untuk proses difusi ion elektrolit dan transfer muatan.



Gambar 4.28 Hasil pengujian (a) CV komposit CNT/GNF, (b) CV CNT, dan (c) EIS komposit CNT/GNF dan CNT (Zhou, dkk., 2018).

4.2 Pembahasan

4.2.1 Struktur Komposit Berbasis CNT

4.2.1.1 Kristalinitas

Struktur kristal dan fasa kristalinitas dari komposit berbasis CNT ini diperoleh dari hasil pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD). Berdasarkan hasil analisis data *review* jurnal di atas, grafik XRD komposit CNT rata-rata menunjukkan fasa kristalin hingga semikristalin. Grafik XRD komposit berbasis CNT tersebut menunjukkan berbagai macam puncak difraksi 2θ yang merupakan gabungan puncak dari bahan-bahan pembentuknya seperti CNT, *metal oxide*, *metal sulfide*, serta material *carbon* lainnya.

Pada penelitian Roy, dkk. (2018) mengenai komposit CNT/NiO, bidang grafitik (002) yang merupakan karakteristik CNT muncul pada $2\theta = 26.10^{\circ}$ di dalam grafik CNT/NiO. Sedangkan puncak NiO berada pada $2\theta = 37.10^{\circ}$, 43.10° , 62.60° , dan 78.50° yang sesuai dengan struktur bidang NiO (111), (200), (220) dan (222), secara berturut-turut. Pola XRD NiO sebelum ditambahkan CNT menunjukkan puncak yang tajam dengan intensitas yang rendah. Sedangkan pola XRD NiO setelah ditambahkan CNT menjadi komposit CNT/NiO menghasilkan puncak yang tajam dengan intensitas yang tinggi, lebih tinggi daripada NiO murni. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan CNT meningkatkan intensitas puncak XRD (Roy, dkk., 2018).

Selain itu, berdasarkan penelitian Wang, dkk. (2019) mengenai komposit CNT/VS₄, hasil XRD menunjukkan puncak difraksi komposit CNT/VS₄ yang muncul pada $2\theta = 15.78^{\circ}$ dan 17° yang menandakan karakteristik dari VS₄. Sedangkan puncak difraksi yang muncul pada 2θ sekitar 26° merupakan karakteristik dari CNT. Berdasarkan hasil perbandingan penambahan massa CNT terhadap komposit CNT/VS₄, menunjukkan bahwa seiring dengan penambahan massa CNT yang semakin meningkat, maka intensitas puncak CNT pada $2\theta = 26^{\circ}$ juga meningkat dan menurunkan intensitas difraksi VS₄ (Wang, dkk., 2019).

4.2.1.2 Morfologi

Morfologi struktur komposit berbasis CNT diperoleh melalui hasil pengujian SEM maupun TEM. Pengujian ini dilakukan karena berdasarkan penelitian, ternyata dengan adanya penambahan CNT mampu mempengaruhi hasil morfologi komposit. Hal ini nantinya berkaitan dengan peningkatan nilai konduktivitas komposit. Dikarenakan CNT yang memiliki nilai konduktivitas listrik sangat tinggi. Seperti penelitian yang dilakukan oleh Di, dkk. (2019) mengenai komposit CNT/ WO_3 , dimana bentuk CNT yang sangat panjang dengan dengan diameter mencapai 40 – 60 nm menjadi tempat tumbuhnya *nanosheets* WO_3 pada permukaan CNT dengan kontak yang sangat kuat. Bentuk morfologi inilah yang menyebabkan peningkatan konduktivitas listrik komposit dikarenakan adanya penambahan CNT yang dapat memfasilitasi transfer muatan maupun ion serta dapat mengurangi penggumpalan pada WO_3 .

Li, dkk. (2019) telah melakukan penelitian mengenai sintesis komposit MWCNT/ MnO_2 yang didepositkan pada Ni *foam*. Berdasarkan hasil pengujian SEM, struktur morfologi MnO_2 berbentuk serpihan nano yang terdeposit pada Ni *foam* sebelum dikompositkan dengan MWCNT. Setelah dikompositkan dengan CNT, serpihan nano MnO_2 tumbuh serasi dan menempel pada permukaan MWCNT dengan radius rata-rata sekitar 150 nm dan ketebalan *nanoflake* sekitar 100 nm. Struktur antara keduanya tidak terdapat batas yang jelas antara substrat dan $\text{MnO}_2/\text{Ni foam}$, yang menandakan adanya ikatan yang kuat diantara keduanya yang dihasilkan oleh sintesis MWCNT dengan Ni *foam* secara langsung. Struktur unik MWCNT memiliki jaringan konduktif yang sangat baik dan dapat meningkatkan konduktivitas listrik pada komposit MWCNT/Ni *foam*/ MnO_2 .

Pada penelitian Chaitra, dkk. (2016) mengenai komposit CNT/h-RuO, berdasaraka hasil pengujian TEM terlihat bahwa partikel h-RuO₂ sebelum dikompositkan dengan CNT membentuk gumpalan-gumpalan dengan ukuran sekitar 5 hingga 6 nm. Namun setelah dikompositkan dengan CNT, terlihat h-RuO₂ menyebar

pada permukaan CNT dan terjebak dalam lubang tabung CNT. Hal tersebut memungkinkan terjadinya probabilitas partikel-partikel RuO_2 untuk masuk ke dalam lubang tabung CNT dan terjebak di dalamnya selama proses sintesis berlangsung.

Roy, dkk. (2018) melakukan penelitian mengenai komposit CNT/NiO. Berdasarkan hasil pengujian SEM dan TEM, morfologi CNT seperti terbungkus oleh partikel NiO. Diameter rata-rata CNT berkisar antara 10 – 30 nm, sedangkan diameter rata-rata komposit CNT/NiO adalah ~50 nm. Hal ini berkaitan dengan adanya ikatan antara CNT dan NiO. Jenis struktur yang saling berikatan ini menandakan nilai konduktivitas listrik yang baik yang sangat berguna untuk aplikasi penyimpanan energi.

Seperti pada penelitian Chaitra, dkk. (2016) mengenai komposit CNT/h-RuO, penelitian morfologi SEM menurut Chen, dkk. (2018) mengenai komposit CNT/MoS₂ juga memperlihatkan bentuk morfologi *nanosheets* 2D MoS₂ sebelum dikompositkan dengan CNT membentuk struktur seperti gumpalan-gumpalan. Sedangkan ketika ditambahkan dengan CNT, CNT berperan untuk memisahkan gumpalan pada MoS₂. Bentuk CNT yang memanjang dapat memfasilitasi transfer elektron yang cepat serta struktur komposit CNT/MoS₂ tersebut dapat meningkatkan konduktivitas elektron dan kinerja superkapasitor.

Penelitian Wang, dkk. (2019) mengenai komposit CNT/VS₄ memperlihatkan struktur morfologi hasil SEM *nanosheets* VS₄ yang menyerupai kelopak bunga tumbuh secara seragam pada CNT, yang mana kombinasi antara VS₄ dan CNT dapat meningkatkan konduktivitas listrik pada material elektroda.

Hou, dkk. (2016) melakukan penelitian mengenai komposit CNT/CuS. *Nanoneedles* CuS melekat dengan kuat pada permukaan CNT yang memiliki diameter ~5-7 nm. Kristalografi komposit CNT/CuS diuji menggunakan HRTEM dengan *d spacing* yang diukur dari pinggir kisi sebesar 0,305 dan 0,335 nm. Hal ini sesuai dengan bidang CuS (102) dan bidang CNT (002).

Cheng, dkk. (2011) melakukan penelitian mengenai komposit CNT/graphene, dimana berdasarkan hasil pengujian

SEM dan TEM bentuk CNT yang sangat panjang saling terjat satu sama seperti sarang laba-laba. Struktur CNT seperti ini dapat menjebak lembaran nano *graphene* atau struktur lain jika bereaksi dengannya. Dalam komposit ini, CNT berperan sebagai jalur pergerakan muatan ion dan elektron, dikarenakan CNT memiliki konduktivitas yang tinggi sehingga dapat mengurangi hambatan listrik dari elektroda. Selain itu, CNT juga dapat berperan sebagai pemisah dari lembaran nano *graphene*, yang kemudian akan meningkatkan aksesibilitas ion.

Menurut penelitian Li, dkk. (2019) mengenai komposit CNT/AC, dari hasil pengujian SEM sebagian besar FWCNT sangat panjang dan membentuk bundel dengan diameter 10 – 80 nm. Hasil morfologi komposit CNT/AC menunjukkan bahwa sebagian besar CNT menempel pada permukaan partikel AC yang besar.

Zhou, dkk. (2018) telah melakukan penelitian mengenai komposit CNT/GNF. Dari hasil pengujian SEM dan TEM menunjukkan bahwa struktur jaringan karbon memiliki bentuk yang panjang seperti pipa, *continuous*, dan *cross-linked*. Gambar SEM menunjukkan bahwa komposit CNT/GNF saling terkait yang terlihat seperti sarang burung. Struktur tersebut dibentuk oleh CNT dan GNF yang dipilin menjadi satu kesatuan. Struktur GNF sendiri memiliki bentuk seperti gandum dengan interior padat dan banyak pori sehingga dapat menambah area permukaan GNF. CNT terjat pada substrat GNF membentuk 'jaring' yang menangkap dan memberikan ruang difusi ion ke situs aktif GNF, sehingga meningkatkan nilai kapasitansi komposit CNT/GNF. Selain itu, penambahan CNT dapat memberikan permukaan yang lebih besar untuk terjadinya reaksi elektrokimia. Karena diameter rata-rata GNF lebih besar dari CNT, maka akan lebih mudah bagi CNT untuk menempel pada permukaan GNF.

Berdasarkan hasil penelitian-penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa dengan adanya penambahan CNT dapat mencegah aglomerasi partikel-partikel atau lembaran struktur matriksnya yang dapat menghambat aksesibilitas ion. Morfologi CNT yang memanjang dan berongga dapat memfasilitasi jalur

transfer muatan ion dan elektron yang cepat sehingga dapat dapat mengurangi hambatan listrik pada elektroda dan dapat meningkatkan konduktivitas elektron dan kinerja superkapasitor (Cheng, dkk., 2011 dan Chen, dkk., 2018).

4.2.2 Sifat Kapasitif Komposit Berbasis CNT

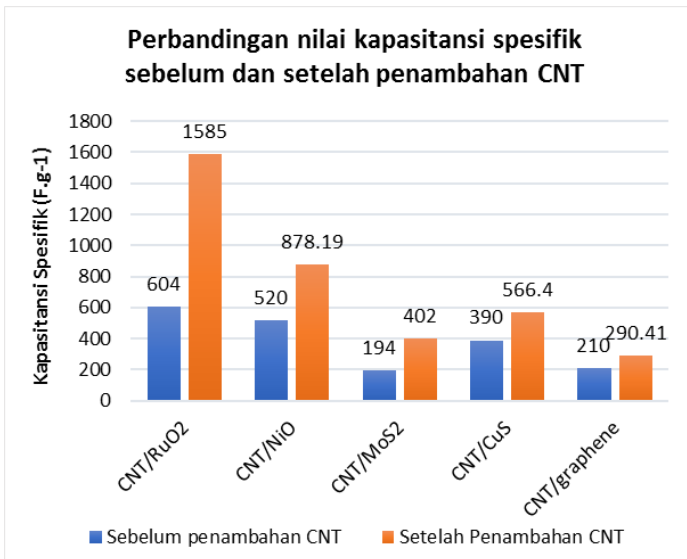
4.2.2.1 Kapasitansi Spesifik

Sifat kapasitif merupakan salah satu indikator yang paling penting untuk menilai kinerja superkapasitor. Pada komposit berbasis CNT ini, CNT memiliki peran terhadap peningkatan konduktivitas komposit dikarenakan dengan struktur tabungnya yang sangat panjang dan diameter yang sangat kecil dapat memfasilitasi transfer muatan elektron yang cepat melalui tabung CNT. Sehingga dengan meningkatnya konduktivitas listrik komposit akibat transfer muatan secara cepat maka akan meningkatkan nilai kapasitansi spesifik pada suatu superkapasitor.

Dilihat dari penilaian secara kuantitatif, grafik pada Gambar 4.29 merupakan perbandingan nilai kapasitansi spesifik antara komposit CNT/RuO₂, CNT/NiO, CNT/MoS₂, CNT/CuS, dan CNT/*graphene*. Dari grafik tersebut terlihat bahwa nilai kapasitansi spesifik sebelum ditambahkan CNT memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan setelah penambahan CNT. Chaitra, dkk. (2018) melakukan sintesis komposit CNT/RuO₂ dan melakukan pengamatan terhadap penambahan CNT pada komposit. Ketika dilakukan pengujian, nilai spesifik kapasitansi RuO₂ sebelum ditambahkan CNT adalah sebesar 604 F.g⁻¹. Namun setelah ditambahkan CNT, nilai kapasitansi spesifiknya menjadi 1585 F.g⁻¹. Roy, dkk. (2018) melakukan penelitian mengenai komposit CNT/NiO. Dalam penelitiannya tersebut dilakukan pengujian CV dan didapatkan nilai kapasitansi spesifik NiO sekitar 520 F.g⁻¹, namun untuk komposit CNT/NiO nilai kapasitansi spesifiknya naik menjadi 878.19 F.g⁻¹.

Penelitian mengenai pengaruh penambahan CNT terhadap komposit berbasis CNT juga dilakukan oleh Chen, dkk. (2018) yang melakukan sintesis komposit CNT/MoS₂. Nilai kapasitansi

spesifik MoS_2 sebelum ditambahkan CNT adalah sebesar 194 F.g^{-1} dan nilai kapasitansi spesifik setelah ditambahkan CNT menjadi komposit CNT/MoS_2 menjadi 402 F.g^{-1} . CuS disintesis dengan CNT menjadi komposit CNT/CuS oleh Hou, dkk. (2016) untuk mengetahui performa elektroda superkapasitor. setelah dilakukan pengujian CV didapatkan nilai kapasitansi spesifik CuS murni sekitar 391 F.g^{-1} dan nilai spesifik kapasitansi komposit CNT/CuS sebesar 566.4 F.g^{-1} . Cheng, dkk. (2011) melakukan penelitian terhadap komposit $\text{CNT}/\text{graphene}$. Dalam penelitiannya didapatkan nilai kapasitansi spesifik graphene sekitar 210.9 F.g^{-1} dan nilai kapasitansi spesifik komposit $\text{CNT}/\text{graphene}$ sebesar 290.41 F.g^{-1} .



Gambar 4.29 Grafik perbandingan nilai kapasitansi spesifik komposit sebelum dan setelah penambahan CNT

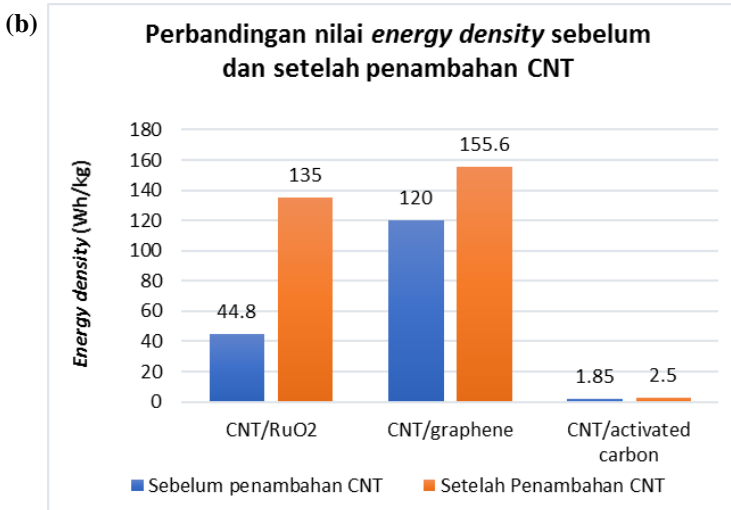
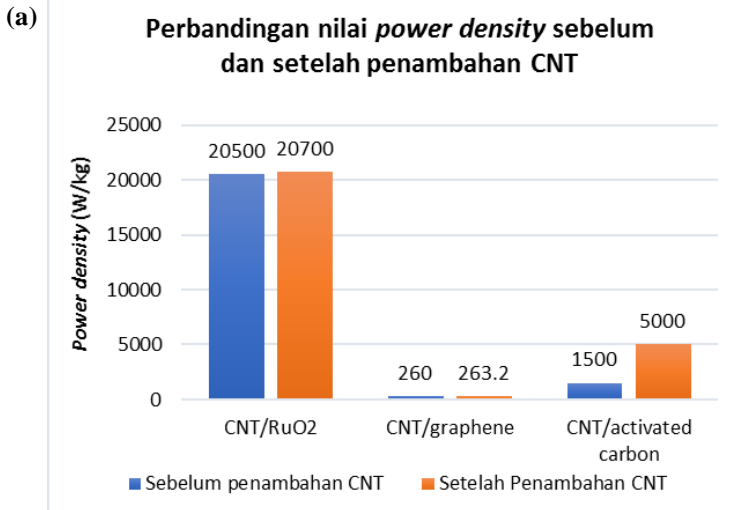
Nilai kapasitansi spesifik elektroda komposit dihasilkan pada pengujian CV dan GCD. Secara keseluruhan, elektroda komposit $\text{CNT}/\text{metal oxide}$ dan elektroda komposit CNT/metal

sulfide memiliki bentuk kurva CV berupa *hybrid* (gabungan antara EDLC dan pseudokapasitor). Sedangkan elektroda komposit CNT/*carbon* memiliki kurva CV ideal atau kurva EDLC. Dilihat dari bentuk kurvanya, kurva EDLC memiliki bentuk persegi panjang yang presisi. Sedangkan kurva pseudokapasitor memiliki bentuk yang tidak presisi dan ditandai dengan adanya *hump* atau gundukan yang mengindikasikan adanya reaksi redoks sebagai tempat penyimpanan muatan. Secara umum, kurva EDLC diperoleh dari material karbon yang menyimpan muatannya melalui *interface* antara permukaan sel elektroda dan elektrolit. Sedangkan kurva pseudokapasitor dihasilkan dari material yang dapat mengalami reaksi reduksi-oksidasi seperti material *metal oxide*, *conducting polymer*, dan lain-lain (Abdah, dkk., 2019).

Peningkatan nilai kapasitansi spesifik pada komposit dikarenakan dengan adanya material CNT yang memiliki struktur berongga yang menyebabkan banyaknya ion atau elektron yang dapat ditampung pada elektroda sehingga kapasitansi penyimpanan muatannya juga akan meningkat (Cheng, dkk., 2011). Selain itu, adanya CNT juga dapat meningkatkan konduktivitas listriknya yang dapat melakukan transfer muatan ion dan elektron dengan cepat sehingga juga dapat meningkatkan nilai kapasitansi spesifiknya (Chen, dkk., 2018).

4.2.2.2 Power Density dan Energy Density

Power density dan *energy density* merupakan salah satu indikator penting untuk menilai kemampuan atau kinerja superkapasitor. *Power density* adalah laju energi yang dikonversi tiap unit massa. Hal ini sangat dipengaruhi oleh struktur material elektroaktif yang mengatur kecepatan transfer muatan ion elektrolit. Sedangkan *energy density* adalah jumlah energi yang disimpan tiap unit massa (Liu, 2015).



Gambar 4.30 Grafik perbandingan nilai (a) *power density* dan (b) *energy density* sebelum dan setelah penambahan CNT.

Gambar 4.30 (a) menunjukkan perbandingan nilai *power density* komposit sebelum dan setelah ditambahkan CNT. Sementara Gambar 4.30 (b) menunjukkan perbandingan nilai *energy density* sebelum dan setelah penambahan CNT. Dari kedua gambar tersebut, terlihat bahwa pada penelitian Chaitra, dkk. (2016) mengenai komposit CNT/RuO₂ nilai *power density* sebelum ditambahkan CNT memiliki nilai sebesar 20500 W.kg⁻¹, sementara setelah ditambahkan CNT nilainya menjadi 20700 W.kg⁻¹. Begitu juga untuk nilai *energy density*, RuO₂ setelah dikompositkan dengan CNT mengalami peningkatan dari 44.8 Wh.kg⁻¹ menjadi 135 Wh.kg⁻¹. Penelitian komposit berbasis CNT untuk aplikasi superkapasitor juga dilakukan oleh Cheng, dkk. (2011) yang mengkompositkan CNT dengan *graphene*. Nilai *power density* sebelum ditambahkan CNT adalah 260 W.kg⁻¹, sedangkan setelah ditambahkan CNT menjadi 263.2 W.kg⁻¹. Untuk nilai *energy density*-nya juga mengalami peningkatan setelah ditambahkan CNT, yaitu dari 120 Wh.kg⁻¹ menjadi 155.6 W.kg⁻¹. Penelitian mengenai komposit CNT/*activated carbon* (AC) oleh Li, dkk. (2019), nilai *power density* AC sebelum dikompositkan dengan CNT adalah 1500 W.kg⁻¹, sedangkan setelah dikompositkan dengan CNT menjadi 5000 W.kg⁻¹. Begitu juga untuk nilai *energy density*, peningkatan sebelum dan setelah dikompositkan dengan CNT yaitu dari 1.85 Wh.kg⁻¹ menjadi 2.5 Wh.kg⁻¹.

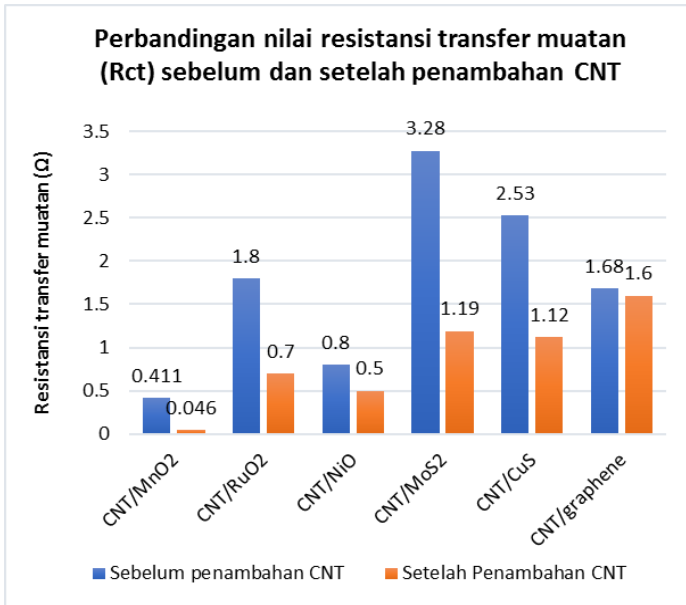
Dengan adanya CNT yang memiliki konduktivitas listrik yang sangat tinggi, akan meningkatkan nilai *power density*nya dikarenakan resistansi transfer muatan yang rendah sehingga ketika transfer muatan elektron dan ion berjalan cepat maka laju energi (*power density*) yang diberikan juga akan meningkat. Begitu juga pada *energy density*, yang akan meningkat seiring dengan peningkatan kapasitansi yang dihasilkan (Wang, dkk., 2012).

4.2.2.3 Resistansi Transfer Muatan

Untuk meningkatkan performa superkapasitor dalam melakukan penyimpanan muatan tentunya harus memiliki nilai kapasitas penyimpanan yang baik serta tidak adanya hambatan

dalam melakukan transfer muatan. Superkapasitor yang baik diharapkan memiliki nilai transfer muatan yang kecil, karena semakin kecil nilai resistansi transfer muatan, maka laju transfer muatan ion elektrolit dapat bekerja dengan maksimal dan akan meningkatkan nilai kapasitansi maupun *power density* sehingga dapat menurunkan performa superkapasitor.

CNT memiliki karakteristik kelistrikkannya yang luar biasa karena memiliki nilai resistansi yang kecil dibandingkan dengan material *metal oxide* maupun *metal sulfide*. Oleh karena itu, untuk pengaplikasian elektroda superkapasitor, *metal oxide* dan *metal sulfide* dikompositkan dengan CNT untuk mengimbangi kekurangan sifat kelistrikkannya. Gambar 4.31 menunjukkan grafik perbandingan nilai resistansi transfer muatan sebelum dan setelah penambahan CNT. Pada penelitian Li, dkk. (2019) mengenai komposit CNT/MnO₂ terlihat bahwa nilai R_{ct} sebelum penambahan CNT adalah 0.411 Ω, sedangkan setelah dikompositkan dengan CNT menjadi 0.046 Ω. Chaitra, dkk. (2016) melakukan sintesis komposit CNT/RuO₂, didapatkan penurunan nilai R_{ct} RuO₂ setelah ditambahkan dengan CNT yaitu dari 1.8 Ω menjadi 0.7 Ω. Komposit CNT/NiO pada penelitian Roy, dkk. (2018) memiliki nilai R_{ct} dari 0.8 Ω menjadi 0.5 Ω. Selain itu, pada penelitian Chen, dkk. (2018) mengenai komposit CNT/MoS₂, terlihat penurunan nilai R_{ct} dari 3.28 Ω menjadi 1.19 Ω. Hou, dkk. (2016) juga mengamati penelitian dari komposit CNT/CuS dan menganalisis perbedaan nilai R_{ct} sebelum ditambahkan CNT dan setelah ditambahkan CNT. Pada grafik tersebut terlihat penurunan nilai R_{ct} komposit CNT/CuS dari 2.53 Ω menjadi 1.12 Ω. Begitu pula dengan komposit CNT/*graphene* pada penelitian Cheng, dkk. (2011). Dari grafik tersebut terlihat penurunan nilai R_{ct} dari 1.68 Ω menjadi 1.6 Ω setelah dikompositkan dengan CNT.



Gambar 4.31 Grafik perbandingan nilai resistansi transfer muatan (Rct) komposit sebelum dan setelah penambahan CNT.

Nilai resistansi transfer muatan (Rct) dihasilkan dari pengujian EIS. Dari kurva EIS jenis-jenis komposit di atas rata-rata memiliki kurva daerah setengah lingkaran yang lebih kecil daripada material pembentuknya sendiri. Hal ini menunjukkan bahwa nilai resistansinya sangat kecil. Dengan adanya penambahan CNT pada komposit tersebut dapat mengecilkan daerah setengah lingkaran (*semicircle*) serta menggeser garis lurus (kurva Warburg) mendekati sumbu *Z imaginary* (Z''), dimana semakin tegak lurus (mendekati 90^0) maka nilai resistansi semakin rendah sehingga dapat mempermudah proses difusi ion elektrolit dan transfer muatan (Cheng, dkk., 2011).

Selain analisis pembahasan mengenai pengaruh penambahan CNT terhadap komposit berbahan dasar CNT tersebut, Tabel 4.1 menunjukkan data penilaian sifat kapasitif keseluruhan komposit CNT/*metal oxide*, CNT/*metal sulfide*, dan CNT/*carbon* yang berupa kapasitansi spesifik, *power density*, *energy density*, dan resistansi transfer muatan.

Tabel 4.1 Perbandingan kuantitatif sifat kapasitif komposit CNT/*metal oxide*, CNT/*metal sulfide*, dan CNT/*carbon*.

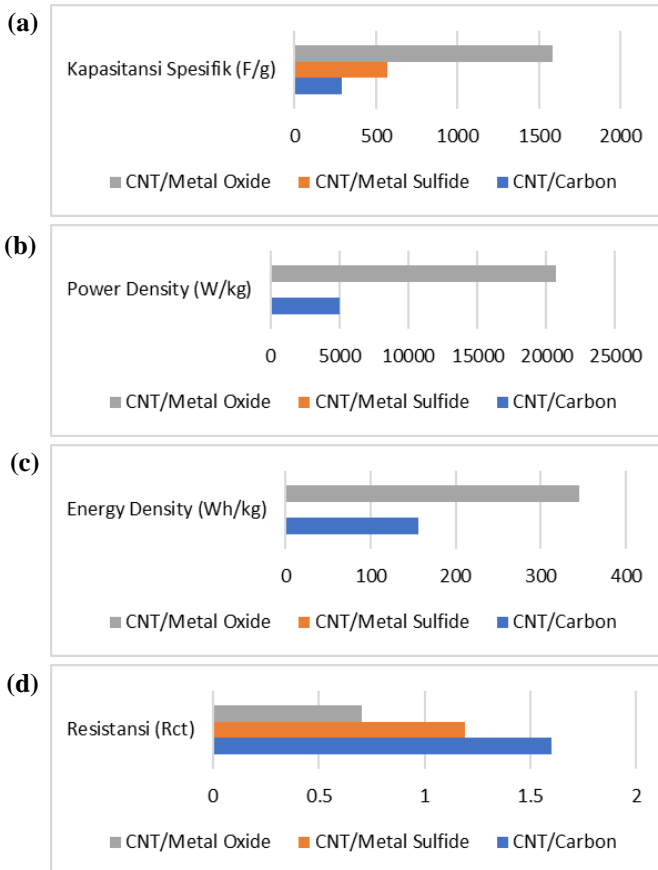
Jenis Komposit	Kapasitansi Spesifik (F.g ⁻¹)	Power Density (W.kg ⁻¹)	Energy Density (Wh.kg ⁻¹)	Resistansi transfer muatan (Ω)
CNT/Metal Oxide				
CNT/WO ₃	496	-	-	-
CNT/MnO ₂	1350.42	6398.5	344.8	0.046
CNT/RuO ₂	1585	20700	135	0.7
CNT/NiO	878.19	11200	85.7	0.5
CNT/Metal Sulfide				
CNT/MoS ₂	402	-	-	1.19
CNT/VS ₄	330	-	-	1
CNT/CuS	566.4	29900	1100	1.12
CNT/Carbon				
CNT/graphene	290.41	263.2	155.6	1.6
CNT/AC	78	5000	2.5	0.3
CNT/GNF	270	686	72.2	-

Dari data Tabel 4.1 di atas, diketahui bahwa komposit berbasis CNT/*metal oxide* memiliki nilai kapasitansi spesifik

dengan rentang 496 – 1585 F.g⁻¹. Sedangkan komposit berbasis CNT/*metal sulfide* memiliki nilai kapasitansi spesifik dengan rentang 330 – 566.4 F.g⁻¹. Serta komposit berbasis CNT/*carbon* dengan rentang nilai kapasitansi spesifik 78 – 290.41 F.g⁻¹. Dari ketiga jenis material komposit tersebut, dapat disimpulkan bahwa komposit berbasis CNT/*metal oxide* memiliki nilai kapasitansi spesifik tertinggi sementara CNT/*carbon* memiliki nilai kapasitansi terendah. Begitu juga dengan *power density* (kerapatan daya) dan *energy density* (kerapatan energi) juga menentukan kemampuan superkapasitor yang didasarkan pada diagram *Ragone plot*. Dari ketiga jenis komposit tersebut, nilai *power density* dan *energy density* tertinggi dimiliki oleh komposit CNT/*metal oxide* dengan nilai 6398.5 – 20700 W.kg⁻¹ dan 85.7 – 344.8 Wh.kg⁻¹ secara berturut-turut. Sementara nilai *power density* dan *energy density* komposit CNT/*metal sulfide* sebesar 29900 W.kg⁻¹ dan 1100 Wh.kg⁻¹, secara berturut-turut. Dan nilai *power density* serta *energy density* terendah dimiliki oleh CNT/*carbon* dengan rentang nilai 263.2 – 5000 W.kg⁻¹ dan 2.5 – 155.6 Wh.kg⁻¹, secara berturut-turut.

Sehingga dapat disimpulkan dari ketiga jenis komposit tersebut, bahwa komposit berbasis CNT/*metal oxide* memiliki nilai kapasitansi spesifik, *power density*, *energy density* tertinggi serta nilai resistansi terendah dari kedua jenis komposit lainnya. Hal ini dikarenakan material *metal oxide* memiliki sifat pseudokapasitansi yang sangat baik, yang dicirikan dengan adanya reaksi redoks dengan ikatan ion lemah yang sangat baik untuk reaksi penyimpanan muatan. Selain itu, *metal oxide* memiliki area spesifik (*surface area*) yang lebih tinggi dari logam transisi jenis sulfida, selenida, dan fosfida yang mana hanya sekitar beberapa m².g⁻¹ hingga puluhan m².g⁻¹, yang sangat rendah dibandingkan dengan oksida. Karena dengan luasnya area permukaan spesifik, maka dapat menyediakan situs aktif elektrokimia yang sangat banyak dan melimpah untuk proses penyimpanan muatan elektrokimia (Wang, dkk., 2018). Perbandingan nilai kapasitansi spesifik, *power density*, *energy density*, serta nilai resistansi dari

ketiga jenis komposit tersebut ditabulasikan dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 4.32.



Gambar 4.32 Perbandingan nilai (a) kapasitansi spesifik, (b) *power density*, (c) *energy density*, dan (d) resistansi komposit berbasis CNT/*metal oxide*, CNT/*metal sulfide*, dan CNT/*carbon*.

4.3 Kritik

Dari beberapa jurnal yang telah di-*review*, ternyata masih ditemukan beberapa kekurangan berupa data maupun pembahasan yang tidak dicantumkan dan dijelaskan secara rinci oleh peneliti. Hal tersebut tentu saja menyebabkan para pembaca kesulitan dalam melakukan proses *review* jurnal atau sebagai pedoman referensi untuk melakukan proses penelitian.

Berdasarkan jurnal-jurnal tersebut, secara keseluruhan sudah mencantumkan hasil pengujian SEM, TEM, dan EIS. Namun, untuk pengujian XRD, CV, dan GCD belum semuanya dicantumkan. Ada yang memang sudah menjelaskan hasil karakterisasinya namun tidak mencantumkan hasil kurvanya, dan ada juga yang sudah mencantumkan hasil kurva namun penjelasannya kurang begitu lengkap. Ada pula yang tidak mencantumkan kedua-duanya baik kurva hasil pengujian maupun pembahasannya. Adapun untuk lebih jelasnya, hasil kritisasi jurnal berupa kelengkapan data telah dirangkum dalam Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Kelengkapan kurva hasil pengujian.

Komposit	Peneliti	XRD	SEM/ TEM	CV	GCD	EIS
CNT/WO ₃	Di, dkk. 2019	√	√	√	√	√
CNT/MnO ₂	Li, dkk. 2019	√	√	√	√	√
CNT/RuO ₂	Chaitra, dkk. 2016	-	√	√	√	√
CNT/NiO	Roy, dkk. 2018	√	√	√	√	√
CNT/MoS ₂	Chen, dkk. 2018	√	√	√	√	√
CNT/VS ₄	Wang, dkk. 2019	√	√	√	√	√
CNT/CuS	Hou, dkk. 2016	√	√	√	√	√
CNT/ <i>graphene</i>	Cheng, dkk. 2011	-	√	√	√	√
CNT/AC	Li, dkk. 2019	-	√	-	√	√
CNT/GNF	Zhou, dkk. 2018	-	√	√	-	√

Selain kelengkapan data berupa kurva hasil pengujian, data kuantitatif jurnal juga penting untuk dicantumkan agar memudahkan pembaca dalam melakukan proses *review jurnal*. Tabel 4.3 menunjukkan hasil rangkuman kelengkapan jurnal mengenai data kuantitatif pada sifat kapasitif komposit berbasis CNT.

Tabel 4.3 Kelengkapan data kuantitatif sifat kapasitif komposit.

Komposit	Peneliti	Csp (F.g ⁻¹)	Rct (Ω)	Power Density (W.kg ⁻¹)	Energy Density (Wh.kg ⁻¹)
CNT/WO ₃	Di, dkk. 2019	√	-	-	-
CNT/MnO ₂	Li, dkk. 2019	√	√	√	√
CNT/RuO ₂	Chaitra, dkk. 2016	√	√	√	√
CNT/NiO	Roy, dkk. 2018	√	√	√	√
CNT/MoS ₂	Chen, dkk. 2018	√	√	-	-
CNT/VS ₄	Wang, dkk. 2019	√	√	√	√
CNT/CuS	Hou, dkk. 2016	√	√	√	√
CNT/ <i>graphene</i>	Cheng, dkk. 2011	√	√	√	√
CNT/AC	Li, dkk. 2019	√	√	√	√
CNT/GNF	Zhou, dkk. 2018	√	-	√	√

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat ditarik dari *paper review* ini adalah sebagai berikut.

1. Penambahan CNT mampu mempengaruhi struktur komposit berbasis CNT yang mana dapat mencegah aglomerasi partikel-partikel atau lembaran struktur matriksnya yang dapat menghambat aksesibilitas ion. Dengan adanya CNT dapat meningkatkan konduktivitas listrik, dikarenakan CNT memiliki jaringan yang sangat konduktif serta struktur yang panjang dan berongga menjadi jalur pergerakan ion untuk proses transfer ion serta muatan elektron. Sehingga dengan meningkatnya konduktivitas listrik maka akan menurunkan nilai resistansi muatan pada elektroda serta meningkatkan daya dan kinerja superkapasitor.
2. Penambahan CNT juga berpengaruh terhadap sifat kapasitif komposit dimana mampu meningkatkan nilai kapasitansi elektroda superkapasitor, *power density*, *energy density*, serta menurunkan nilai resistansi transfer muatan. Dari ketiga jenis komposit di atas, bahwa komposit berbasis CNT/metal oxide memiliki performa paling baik dengan nilai kapasitansi spesifik mencapai 1585 F.g^{-1} , *power density* mencapai 20700 W.kg^{-1} , *energy density* mencapai 344.8 Wh.kg^{-1} , dan resistansi transfer muatan mencapai 0.046Ω .

5.2 Saran

Adapun saran dari dan bagi penulis dalam penulisan *paper review* untuk kedepannya adalah memperbanyak pengumpulan data jurnal lagi sehingga mempermudah proses penulisan dalam membandingkan dan menarik kesimpulan akhir agar menghasilkan analisa data yang akurat dan sesuai dengan teori yang ada.

Selain itu, saran bagi penelitian kedepannya mengenai pemilihan material komposit berbasis CNT untuk aplikasi superkapasitor yaitu, dari ketiga jenis material komposit

CNT/*metal oxide*, CNT/*metal sulfide*, dan CNT/*carbon* bahwa kategori komposit yang paling cocok diaplikasikan sebagai superkapsitor adalah komposit CNT/*metal oxide*. Karena komposit CNT/*metal oxide* rata-rata memiliki nilai kapasitansi spesifik yang tinggi, *power density* dan *energy density* yang tinggi, serta nilai resistansi transfer muatan yang relatif rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdah, M. A., Nabilah, N. H., Kulandaivalu, S., & Sulaiman, Y., 2019. "Review of the use of transition-metal-oxide and conducting polymer-based fibres for high-performance supercapacitors". **Journal Pre-proof**, 11.
- Abdullah, M., Virgus, Y., Nirmin, & Khairurrijal, 2008. "Review: Sintesis Nanomaterial". **Jurnal Nanosains & Nanoteknologi**, 1(2), 34.
- Alfian, 2018. "Sintesis dan Karakterisasi Carbon Nanotube (CNT) dari Kulit Durian dengan Menggunakan Metode Chemical Vapour Deposition (CVD)". **Skripsi**, Makassar: Universitas Islam Negeri Alauddin.
- Barik, R., & Ingole, P., 2020. "Challenges and prospects of metal sulfide materials for supercapacitors". **Electrochemistry**, 2-3.
- Callister, W. D., 2009. "Materials Science and Engineering an Introduction Eight Edition". **Book**, United States of America: 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**, 5-13.
- Chandrasekaran, S., Yao, L., Deng, L., Bowen, C., Zhang, Y., Chen, S., Zhang, P., 2018. "Recent advances in metal sulfides: from controlled fabrication to electrocatalytic, photocatalytic and photoelectrochemical water splitting and beyond". **The Royal Society of Chemistry 2019**, 1-4.
- Chen, L., Liu, Y., Zhao, Y., Chen, N., & Qu, L., 2016. "Graphene-based fibers for supercapacitor applications". **Nanotechnology**, 1.
- Chen, T., & Dai, L., 2013. "Carbon nanomaterials for high-performance supercapacitors". **Materials Today**, 16, 273.

-
- Chen, X., Ding, J., Jiang, J., Zhuang, G., Zhang, Z., & Yang, P., 2018. "Preparation of a MoS₂/carbon nanotube composite as an electrode material for high-performance supercapacitors". **Royal Society of Chemistry**, 29489-29493.
- Cheng, L.-C., Jiang, X., Wang, J., Chen, C., & Liu, R. S., 2013. "Nano-bio effects: interaction of nanomaterials with cells". **Nanoscale**, 40.
- Cheng, Q., Tang, J., Ma, J., Zhang, H., Shinya, N., & Qin, L. C., 2011. "Graphene and carbon nanotube composite electrodes for supercapacitors with ultra-high energy density". **Chem. Phys.**, 17617-17622.
- Conway, B. E., 1999. "Electrochemical Supercapacitors. Scientific Fundamentals and Technological Applications". US: Springer, ISBN: 978-1-4757-3058-6.
- Di, J., Xu, H., Gai, X., Yang, R., & Zheng, H., 2019. "One-step solvothermal synthesis of feather duster-like CNT@WO₃ as high-performance electrode for supercapacitor". **Materials Letters**, 129-132.
- Dresselhaus, M. S., 1998. "Nanotechnology - New tricks with nanotubes". **Nature**, 391, 19.
- Eatemadi, A., Daraee, H., Karimkhanloo, H., Kouhi, M., Zarghami, N., Akbarzadeh, A., Joo, S., 2014. "Carbon nanotubes: properties, synthesis, purification, and medical applications". **Nanoscale Research Letters**, 9, 2.
- Ferro, G., 2011. "Carbon nanotubes cement composites". 49.
- Frackowiak, E., & Beguin, F., 2001. "Carbon materials for the electrochemical storage of energy in capacitors". **Carbon** 39, 939-940.
- Gaddam, R. R., Kantheti, S., Narayan, R., dan Raju, K. V. S. N. 2015. "Recent Developments of Camphor Based Carbon Nanomaterial: Their Latent Applications and Future Prospects". **Nano-Structures & Nano-Objects**, 3, 1-8.
- Hidayati, E., 2016. "Efek Temperatur Terhadap Morfologi Carbon Nanotube (CNT) Hasil Sintesis dari Bahan Alam
-

- Tempurung Kelapa dan Potensi Penggunaannya Bagi Penanganan Air Limbah Laundry”. **Skripsi**, Yogyakarta: Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga.
- Hou, X., Liu, X., Lu, Y., Cheng, J., Luo, R., Yu, Q., Luo, Y., 2016. “Copper sulfide nanoneedles on CNT backbone composite electrodes for high-performance supercapacitors and Li-S batteries”. **Journal Solid State Electrochem.**
- Jang, S. H., Kawashima, S., & Yin, H., 2016. “Influence of Carbon Nanotube Clustering on Mechanical and Electrical Properties of Cement Pastes”. K. Hernadi, Ed., **Materials**, 9(220), 3.
- Khan, W., Sharma, R., & Saini, P., 2016. “Carbon Nanotube-Based Polymer Composites: Synthesis, Properties and Applications”. **Current Progress of their Polymer Composites.**
- Kötz, R., & Carlen, M., 2000. “Principles and applications of electrochemical capacitors”. **Electrochimica Acta**, 45, 2483-2484.
- Krishnamurty, G., Namitha, R., 2014. “A Novel Method of Synthesis of Carbon Nanotube by Hydrothermal Process”. **International Journal of Science Research**, 1(4), 359.
- Li, J., Zhou , & Xu, Z., 2019. “Few-walled carbon nanotube-enhanced activated carbon supercapacitor performance in organic electrolyte at 4 V”. **Royal Society of Chemistry**, 9, 18864-18866.
- Li, J., Wu, Q., & Wu, J., 2016. “Handbook of Nanoparticles”. In M. Aliofkhazraei (Ed.), **Synthesis of Nanoparticles via Solvothermal and Hydrothermal Methods**, Switzerland: Springer International Publishing Switzerland, 300.
- Li, L., Chen, L., Qian, W., Xie, F., & Dong, C., 2019. “Directly Grown Multiwall Carbon Nanotube and Hydrothermal MnO₂ Composite for High-Performance Supercapacitor Electrodes”. **Nanomaterials**, 2-6.

-
- Liu, C. P., 2015. "First-Principles Studies of Transition Metal Oxides and Sulfides in Electrochemical Energy Storage Applications". **UCLA Electronic Theses and Dissertations**, Los Angeles: University of California, Department of Materials Science and Engineering.
- Mashadi, & Purwanto, S., 2012. "Pengaruh Penambahan Multiwalled Karbon Nanotube pada Sifat Magnet Bahan Komposit Fe 0,8 – C 0,2". 176.
- Muller, A., 2011. "A Spectroscopic Study of Polymer - Carbon Nanotube Composites". **Thesis**, Sweden: Universitetstryckeriet, Lulea University of Technology, Department of Engineering Science & Mathematics.
- Nur, A., Paryanto, Jumari, A., & Dyartanti, E. R., 2007. "Sintesis Karbon Nanotube dari Etanol dengan Metode Chemical Vapor Deposition". **Gema Teknik**, 42.
- Okwu, P., & Onyeje, I., 2013. "Carbon Nanotubes: The Hub Of Nanoelectronics". **International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)**, 4(10), 4346.
- Putri, D. F., Ritonga, H. M., Murdiati, V., & Zainul, R., 2018. "What is Hydrothermal? A Review". **Paper review**, Padang: Universitas Negeri Padang.
- Razali, M. H., Ahmad, A., Azaman, M. A., dan Amin, K. A. M. 2016. "Physicochemical Properties of Carbon Nanotubes (CNT's) Synthesized at Low Temperatur using Simple Hydrothermal Method". **International Journal of Applied Chemistry**, 12(3), 275.
- Riyanto, A., 2014. "Superkapasitor Sebagai Piranti Penyimpanan Energi Listrik Masa Depan".
- Roy, A., Ray, A., Saha, S., Ghosh, M., Das, T., Satpati, B., Das, S., 2018. "NiO-CNT composite for high performance supercapacitor electrode and oxygen evolution reaction". **Electrochimica Acta**, 6-21.
- Sengupta, J., 2019. "Carbon Nanotube Fabrication at Industrial Scale: Opportunities and Challenges". 1.
-

-
- Shi, F., Li, L., Wang, X. I., Gu, C. d., & Tu, J. P., 2014. "Metal oxide/hydroxide based materials for supercapacitors". **Royal Society of Chemistry**, 1.
- Sivkov, D., Petrova, O., Mingaleva, A., Ob'edkov, A., Kaverin, B., Gusev, S., Vilkov, I., Isaenko, S., Bogachuk, D., Skandakov, R., Sivkov, V., dan Nekipelov, S., 2020. "The Structure and Chemical Composition of the Cr and Fe Pyrolytic Coatings on the MWCNTs' Surface According to NEXAFS and XPS Spectroscopy". **Nanomaterials**, 10(2).
- Syarif, N., 2014. "Performance of Biocarbon based electrodes for electrochemical capacitor". **Energy Procedia**, 18-25.
- Varshney, K., 2014. "Carbon Nanotubes: A Review on Synthesis, Properties and Application". **International Journal of Engineering Research and General Science**, 2(4), 661-662.
- Wang, G., Zhang, L., & Zhang, J., 2012. "A review of electrode materials for electrochemical supercapacitors". **Chem Soc Rev**, 41, 799.
- Wang, T., Chen, H. C., Yu, F., Zhao, X. S., & Wang, H., 2018. "Boosting the cycling stability of transition metal compounds-based supercapacitors". **Energy Storage Materials**, 38.
- Wang, W., Huang, J., Wang, D., & Ren, Z., 2004. "Low-temperature hydrothermal synthesis of multiwall carbon nanotubes". 1328.
- Wang, X. Z., 2019. "Hydrothermal synthesis of VS₄/CNTs composite with petal-shape structures performing a high specific capacity in a large potential range for high-performance symmetric supercapacitors". **Colloid and Interface Science**, 554, 192-198.
- Yang, G., & Park, S.J., 2019. "Conventional and Microwave Hydrothermal Synthesis and Application of Functional Materials: A Review". **Journal Materials**, 12(1177), 3.
-

-
- Yoshimura, M., & Byrappa, K., 2008. “Hydrothermal processing of materials: past, present and future”. **Journal of Material Science**, 43, 2086.
- Zhi, M., Xiang, C., Li, J., Li, M., & Wu, N., 2013. “Nanostructured carbon–metal oxide composite electrodes for supercapacitors: a review”. **Nanoscale**, 5, 74.
- Zhou, Y., Jin, P., Zhou, Y., & Zhu, Y., 2018. “High-performance symmetric supercapacitors based on carbon nanotube/graphite nanofiber nanocomposites”. **Scientific Reports**, 8(9005), 1-5.

LAMPIRAN

Lampiran 1

Data JCPDS

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

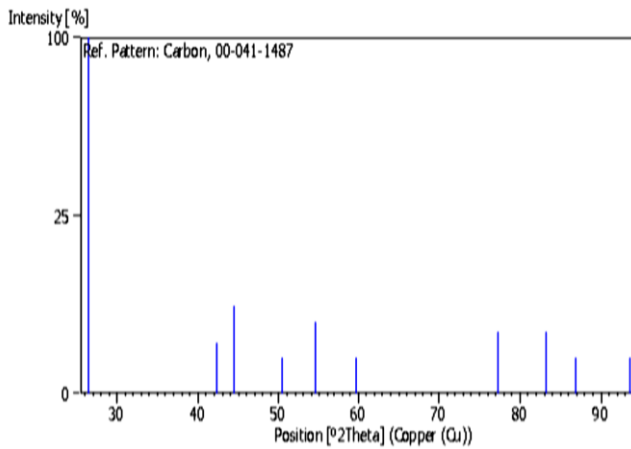
Subfiles and quality

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

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	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

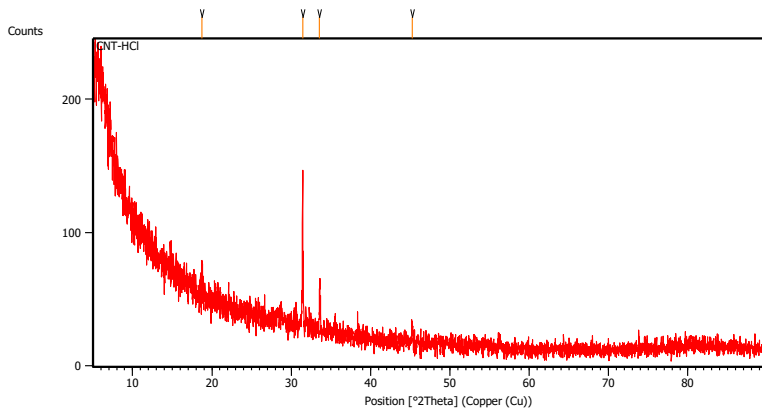
Stick Pattern



Lampiran 2

Hasil Pengujian XRD

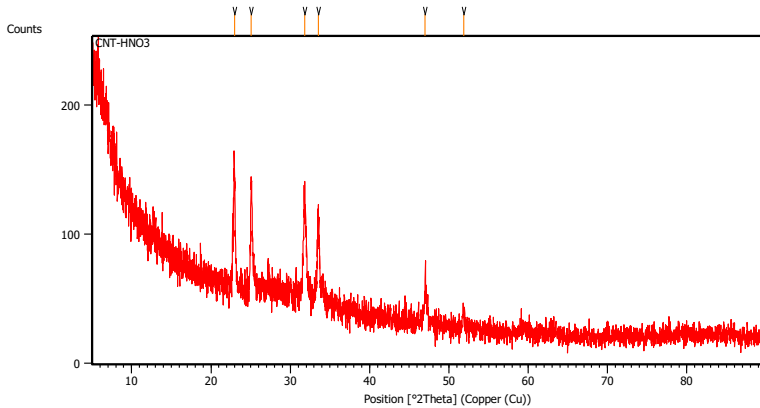
1. Sintesis CNT dengan prekursor *ferrocene*, pencucian dengan HCl.



Peak List:

Pos. [$^{\circ}2\theta$.]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}2\theta$.]	d-spacing [\AA]	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

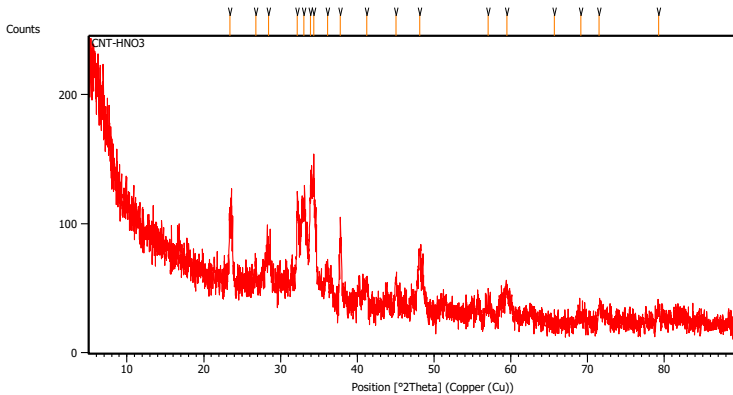
2. Sintesis CNT dengan prekursor *ferrocene*, pencucian dengan HNO_3 pertama.



Peak List:

Pos. [$^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [\AA]	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. Sintesis CNT dengan prekursor *ferrocene*, pencucian dengan HNO_3 kedua.



Peak List:

Pos. [$^{\circ}2\theta$.]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}2\theta$.]	d-spacing [\AA]	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)

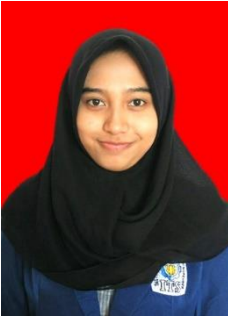
UCAPAN TERIMA KASIH

Sebagai penutup penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah membimbing, membantu, mendoakan, serta memberikan dukungan baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, ijin penulis mengucapkan untaian terima kasih kepada:

1. Ibu dan Ayah yang selalu memberikan doa, dukungan, semangat, serta bantuan finansial setiap saat.
2. Bapak Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T. dan Ibu Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D, selaku dosen pembimbing Tugas Akhir atas bimbingannya selama pelaksanaan dan penyusunan Laporan Tugas Akhir.
3. Bapak Ir. Moh. Farid, DEA., sebagai dosen wali.
4. Seluruh Dosen dan Karyawan Departemen Teknik Material dan Metalurgi yang telah membantu dan memberikan ilmu selama perkuliahan.
5. Gatra Wiradika Aprilian sebagai *partner* tugas akhir.
6. Teman-teman Laboratorium Kimia Material; Alif, Kevin, Dayyan, Triska, Fadel, dan Adit yang telah membantu, menghibur, dan memberi semangat selama mengerjakan Tugas Akhir.
7. Salma, Ica, Nurul, Anggi, Laras, Hardina, Oneng, Alvia, dan Tetty yang menjadi teman dekat penulis serta tempat berkeluh kesah selama masa-masa perkuliahan.
8. Teman geng Bori-Bori; Diela, Titi, Dwita, Nyus, Salma, dan Nitta yang selalu menghibur, mendengarkan curhatan dan segala keluh kesah, serta menjadi teman main penulis selama berada di Cepu sejak berada di bangku SMA hingga saat ini.
9. Seluruh teman angkatan MT18 yang penulis sayangi.
10. Serta semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung memberikan dukungan dan membantu kelancaran proses pengerjaan Tugas Akhir ini.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Elvira Sulcha Nasucha. Lahir di Bojonegoro, pada tanggal 3 November 1998. Penulis merupakan anak tunggal dari pasangan bernama Amir Shaubari dan Aidatus Sulhah. Penulis pernah menempuh pendidikan di TK PGRI Batokan (2003 – 2004), SDN Batokan 3 (2004 – 2010), SMPN 1 Padangan (2010 – 2013), dan SMAN 1 Cepu (2013 – 2016). Kemudian, penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang yang lebih tinggi yaitu di Perguruan Tinggi Negeri Institut Teknologi Sepuluh Nopember tepatnya di Departemen Teknik Material dan Metalurgi angkatan 2016 melalui jalur SNMPTN. Selama di perkuliahan, penulis aktif di berbagai kegiatan maupun organisasi kemahasiswaan. Penulis pernah menjadi staff Departemen Sosial Masyarakat di BEM FTI – ITS. Selain itu, penulis juga pernah menjabat sebagai sekretaris umum di BSO Kewirausahaan HMMT FTI – ITS. Penulis juga aktif mengikuti organisasi *student chapter* yaitu sebagai staff departemen Professionalism di NACE SC – ITS, dan melanjutkan jabatannya sebagai Wakil Kepala departemen Professionalism NACE SC – ITS. Penulis juga memiliki pengalaman *internship* di PT. Toyota Motor Manufacturing Indonesia selama kurang lebih dua bulan. Penulis mengambil bidang Material Inovatif dengan topik material terbarukan, yaitu *carbon nanotubes* (CNT) dalam penelitian Tugas Akhirnya. Penulis dapat dihubungi melalui alamat *e-mail*: nasuchaelvira98@gmail.com atau melalui nomor telepon: 0895416625858.