



Program Studi Farmasi
 Fakultas MIPA - Universitas Islam Bandung
 Gedung Fakultas MIPA - Universitas Islam Bandung
 Jalan Rangka Gading No. 8, Taman Sari, Bandung Wetan, Bandung (40116), Jawa Barat
 Telp. (+6222) 4203368 (Ext. 408) | Surel: bungarampai.farmasi.unisba@gmail.com
 Website: <https://farmasi.unisba.ac.id/>

ISSN 2809-9567

1443/2021

Bunga 
Rampai **Book**
Chapter
 Program Studi Farmasi

Volume 2, No. 2 (Juni 2022)

“Menggali Kandidat Bahan Alam sebagai Obat Modern Asli Indonesia dan Metode Potensial dalam Pengembangan Sediaan Farmasi”

Sivitas Akademika Program Studi Farmasi

Bunga Rampai
Book Chapter
 Volume 2, No. 2 (Juni 2022)

Menggali Kandidat Bahan Alam sebagai Obat Modern Asli Indonesia dan Metode Potensial dalam Pengembangan Sediaan Farmasi

Copyright © 2022 CV. Sadari
 Hak cipta dilindungi undang-undang
 Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa ijin tertulis dari penerbit
 All right reserved



**Bunga Rampai (Book Chapter) Program Studi Farmasi
Fakultas MIPA - Universitas Islam Bandung
"Menggali Kandidat Bahan Alam sebagai Obat Modern Asli Indonesia dan
Metode Potensial dalam Pengembangan Sediaan Farmasi"**

@ TIM DOSEN FARMASI UNISBA

Cetakan Pertama, Juni 2021

Hak Cipta pada:

Penulis

Diterbitkan oleh:

CV. Sadari

Anggota IKAPI JABAR No. 340/JBA/2019

Jl. Cikutra No. 276 D, Bandung

Telp. (022) 7206964, Fax (022) 7208592

Email: *sadaripress@gmail.com*

Berkerjasama dengan Program Studi Farmasi
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Islam Bandung
2022

Copyright © 2022 CV. Sadari

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk
apapun tanpa ijin tertulis dari penerbit

All right reserved

Editor

Tim Bunga Rampai Prodi Farmasi FMIPA Unisba

Gedung FMIPA Universitas Islam Bandung

Jl. Rangka Gading No.8, Taman Sari, Badung Wetan, Bandung 40116

Sampul Buku dan Tata Letak

Gita Cahya Eka Darma

ISSN 2809-9567 (media cetak)

Mulai edisi Volume 2 Nomor 1, Januari 2022



BUNGA RAMPAI (BOOK CHAPTER) PROGRAM STUDI FARMASI

PENGARAH

Dekan Fakultas MIPA Universitas Islam Bandung

PENANGGUNG JAWAB

(Ketua Program Studi Farmasi)

apt. Sani Ega Priani, M.Si.

KETUA REDAKSI

(Dosen Program Studi Farmasi)

apt. Gita Cahya Eka Darma, S.Farm., M.Si.

ANGGOTA REDAKSI

(Dosen Program Studi Farmasi)

apt. Vinda Maharani Patricia, M.Si.

apt. Hanifa Rahma, M.Si.

apt. Farendina Suarantika, M.S.Farm.

Alamat Redaksi

Tim Bunga Rampai (Book Chapter) Program Studi Farmasi

Gedung Fakultas MIPA - Universitas Islam Bandung

Jalan Rangka Gading No. 8, Taman Sari, Bandung Wetan, Bandung - Jawa Barat (40116)

Surel: bungarampai.farmasi.unisba@gmail.com Website: <https://farmasi.unisba.ac.id/>

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmannirrahim

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Alhamdulillah rabbil 'alamin, segala puja puji adalah Hak Allah *Subhanahu Wa Ta'ala* yang telah melimpahkan Rahmat, Hidayah dan Bimbingan-Nya sehingga ikhtiar penyusunan buku **Bunga Rampai (Book Chapter) Program Studi Farmasi Fakultas MIPA Universitas Islam Bandung** ini dapat berjalan dengan baik. Shalawat serta salam senantiasa tercurah kepada Baginda Rasulullah, **Muhammad Shollahu'alaihi wa Salam**, keluarga, sahabat dan segenap umat yang dicintai beliau hingga akhirul zaman. *Insyaa Allah* kita termasuk dalam barisan Baginda saat *Yamul Hisab* kelak. *Aamiin aamiin yaa mujibas saailiin*

Bunga Rampai bertemakan “**MENGGALI KANDIDAT BAHAN ALAM SEBAGAI OBAT MODERN ASLI INDONESIA DAN METODE POTENSIAL DALAM PENGEMBANGAN SEDIAAN FARMASI**” ini merupakan langkah konkret kami berperan aktif dalam mencerdaskan kehidupan bangsa. Buku ini disampaikan dalam bentuk karya ilmiah berbasis pada bidang farmasi yang terdiri dari 4 (empat) kelompok bidang keilmuan, yaitu: (1) Farmakologi Toksikologi; (2) Farmasetika (Teknologi Farmasi); (3) Farmakokimia; dan (4) Farmasi Bahan Alam.

Buku ini bertujuan memberikan informasi dan pemahaman edukatif kepada Ummat baik khalayak maupun rekan-rekan tenaga kesehatan, tentang kandidat bahan alam dan metode potensial dalam pengembangan sediaan farmasi. *Insyaa Allah* kami juga mencoba untuk menyajikan perspektif Islami berlandaskan pada kaedah Islam yang berorientasi pada pemanfaatan bahan alam sebagai pengejawantahan salah satu visi misi Program Studi Farmasi FMIPA Universitas Islam Bandung.

Akhirul kalam, ucapan terima kasih kami sampaikan kepada seluruh pihak yang telah berperan dalam terbitnya buku ini. Juga kami mohon dibukakan pintu maaf yang sebesar-besarnya, sebab pasti ada salah atau khilaf yang murni itu datangnya dari kami. Sedang yang Baik dan Benar itu mutlak milik **Sang Maha Guru Allah subhanhu wa ta'ala**, sehingga kritik dan saran sangat kami harapkan untuk meningkatkan kualitas penulisan di masa mendatang. *Jazakumullahu khoir*, “Semoga kebaikan dari **Allah subhanhu wa ta'ala** senantiasa tercurah untuk kita semuanya”.


Billahi fii sabililhaq, Wassalamu'alaikum warahamtullahi wabarakatuh

Bandung, 09 Dzulqaidah 1443H
09 Juni 2022M

Ketua Redaksi
Bunga Rampai (Book Chapter) Program Studi Farmasi,
Ttd.
apt. Gita Cahya Eka Darma, S.Farm., M.Si.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
1 Obat Kumur Alami Berbahan Aktif Daun Jambu Air: Solusi Untuk Mengatasi Infeksi Rongga Mulut yang Efektif, Aman dan Halal Dr. apt. Suwendar, M.Si.	1
2 Khasiat Saffron (<i>Crocus sativus</i>) untuk Kesehatan dan Kecantikan apt. Fetri Lestari, M.Si.	7
3 Pemanfaatan Tanaman Prebiotik dalam Penanggulangan Penyakit Diabetes Melitus Dr. apt. Umi Yuniarni, M.Si.; apt. Bertha Rusdi, M.Si., Ph.D.	12
4 Fungsionalisasi Carbon Nanotube dalam Pemanfaatannya sebagai Penghantar Obat Aulia Fikri Hidayat, M.Si.	18
5 Kajian Sediaan Kosmetika Topikal Yang mengandung Bakuchiol Pada Penanganan <i>Photoaging</i> apt. Ratih Aryani, M.Farm.; Siti Hazar, M.Si.	28
6 Potensi <i>Oenothera biennis</i> L. untuk Terapi Penyakit Kulit serta Meningkatkan Fungsi Kulit apt. Farendina Suarantika, M.Si.	34
7 Potensi Pengembangan Sediaan Mengandung Minyak Argan (<i>Argania spinosa</i> L.) sebagai Antipenuaan apt. Hanifa Rahma, M.Si.	39
8 Aktivitas Antifungi Fraksi Ekstrak Daun Ceremai (<i>Phyllanthus acidus</i> (L.) Skeels) terhadap <i>Aspergillus niger</i>, <i>Candida albicans</i>, dan <i>Microsporum gypseum</i> apt. Lanny Mulqie, M.Si.; Dr. apt. Kusnandar Anggadiredja, M.Si.	46
9 Mengenal Potensi Senyawa Betalain dalam Menghasilkan Aktivitas Farmakologi apt. Kiki Mulkiya Y., M.Si.; apt. Vinda Maharani P., M.Si.; apt. Yani Lukmayani, M.Si.	52
10 Pemanfaatan Eco-enzyme dalam Produk Kesehatan apt. Vinda Maharani Patricia, M.Si.	60
11 Farmasi Plasma sebagai Teknologi Pengobatan Kanker apt. Gita Cahya Eka Darma, S.Farm., M.Si.	65
12 Aspek Kehalalan Polimer Farmasi apt. Fitrianti Darusman, M.Si.	75
13 Analisis Residu Parasetamol pada Daging apt. Diar Herawati E., M.Si.; apt. Ani Mulatsih, S.Farm.; apt. Syarif Hamdani, M.Si.	83
14 <i>The Astonishing Psychological Eminence of Fasting</i> Ummu Rosyidah, M.Pd.B.I.	91
15 Efektivitas Daun Sungkai (<i>Peronema Canescens</i>) Dalam Meningkatkan Imun Dalam Mengatasi Covid-19 Milla Putri Rizky Rahmadilla	98
PENUTUP	105





1443/2021

Bunga
Rampe
pai Chapter

Book

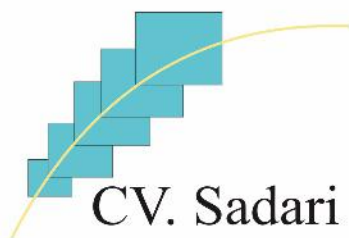
Program Studi Farmasi



Volume 2, No. 2 (Juni 2022)

“Menggali Kandidat Bahan Alam sebagai Obat Modern Asli Indonesia dan Metode Potensial dalam Pengembangan Sediaan Farmasi”

Sivitas Akademika Program Studi Farmasi



Dzulqaidah 1443H / Juni 2022

Fungsionalisasi Carbon Nanotube dalam Pemanfaatannya sebagai Penghantar Obat

Aulia Fikri Hidayat

Program Studi Farmasi, Fakultas MIPA, Universitas Islam Bandung, Bandung, Jawa Barat, Indonesia
aulia.fikri.h@gmail.com

Abstrak

Sebagai salah satu unsur dengan kelimpahan yang tinggi, karbon memainkan peran yang esensial dalam pembentukan beragam struktur material. Berbagai variasi alotrop karbon muncul sebagai konsekuensi kemampuan atom-atom karbon untuk membentuk ikatan kovalen pada hibridisasi sp , sp^2 , dan sp^3 . Dengan rasio aspek yang tinggi, struktur 1-dimensi carbon nanotube memberikan berbagai karakteristik unggul dari sudut pandang mekanik, elektronik, fisik, maupun kimia. Keunggulan tersebut membuatnya potensial untuk diaplikasikan dalam berbagai, salah satunya dalam sistem penghantaran obat. Dalam pemanfaatannya sebagai pembawa obat, fungsionalisasi terhadap struktur dasar carbon nanotube diperlukan untuk meningkatkan sifat kelarutan, menjaga kestabilan struktur, meningkatkan biokompatibilitas, dan meminimalkan potensi toksisitas. Fungsionalisasi carbon nanotube dapat dilakukan secara kovalen dan secara non-kovalen. Secara mendasar, fungsionalisasi kovalen dilakukan melalui mekanisme penyambungan gugus fungsi molekul tertentu ke dalam struktur dasar carbon nanotube. Sedangkan fungsionalisasi non-kovalen dapat dicapai melalui interaksi fisika dengan memanfaatkan gaya van der Waals, gaya elektrostatik, ataupun interaksi- π .

Kata kunci: alotrop karbon, carbon nanotube, fungsionalisasi, sistem penghantaran obat

Abstract

As one of the most abundant element on earth, carbon plays an essential role as building block for various material structures. Several carbon allotropes arise as a consequence of carbon atoms ability to form covalent bonds in sp , sp^2 , and sp^3 hybridization. Due to its high aspect ratio, 1-dimensional structure of carbon nanotubes offers distinguished mechanical, electronic, physical and chemical properties. These advantages allow it to be applied in many fields, one of which is in drug delivery systems. When used as drug carrier, functionalization toward the basic structure of carbon nanotubes is needed to improve solubility, maintain structural stability, increase biocompatibility, and minimize toxicity. Functionalization of carbon nanotubes could be performed covalently and non-covalently. Basically, covalent functionalization is carried out by attaching functional groups of certain molecules into the basic structure of carbon nanotube. Meanwhile, non-covalent functionalization can be achieved through physical interactions using van der Waals force, electrostatic forces, as well as π -interaction.

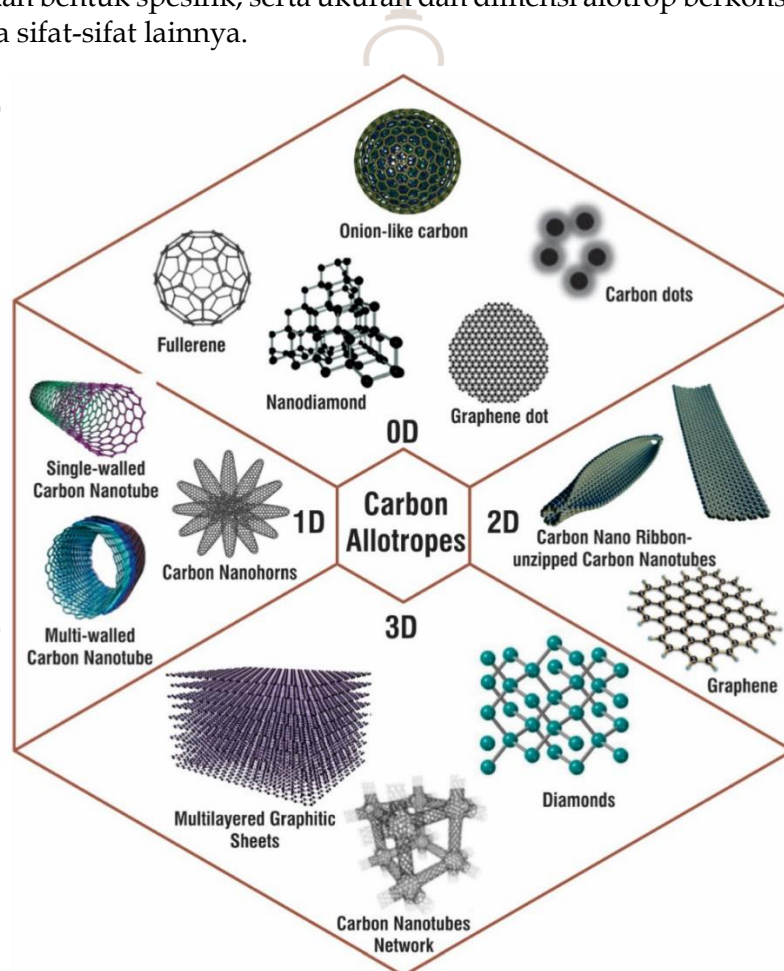
Keywords: carbon allotropes, carbon nanotube, functionalization, drug delivery system

Pendahuluan

Dalam konstruksi dunia fisik yang berpusat pada karakteristik bendawi, invensi, rancangan, serta modifikasi material memainkan peranan yang sangat penting, terutama dalam tujuan paripurna menjaga keberlangsungan hidup spesies manusia. Rekayasa material – bahan, oleh karenanya menjadi sebuah ilmu yang esensial dalam pemenuhan tujuan tersebut.

Karbon, dengan kelimpahan alamiahnya yang tinggi, menjadi salah satu unsur yang fundamental untuk ditelaah secara mendalam (1). Kemampuan karbon yang dapat membangun berbagai variasi alotrop membuatnya penting sebagai pondasi dasar dalam pembentukan beragam struktur material. Penelitian mengenai fungsionalisasi dan manipulasi struktur, disertai dengan penemuan alotrop-alotrop baru memungkinkan munculnya potensi-potensi pengaplikasian yang baru dari material berbasis karbon.

Berdasarkan dimensinya, alotrop karbon diklasifikasikan menjadi struktur berdimensi-0 (misal: carbon quantum dot, fullerene), berdimensi-1 (misal: carbon nanotube, carbon nanohorn), berdimensi-2 (misal: grafena, carbon nanoribbon), dan berdimensi-3 (misal: grafit, intan) (2). Variasi susunan yang membentuk berbagai alotrop ini merupakan konsekuensi kapabilitas atom-atom karbon untuk berikatan secara kovalen pada tipe-tipe hibridisasi yang beragam (sp , sp^2 , sp^3). Secara umum, seluruh alotrop karbon berangkat dari struktur dasar berupa jaringan heksagonal atom-atom karbon. Kemiripan struktur dasar ini berimplikasi pada kemiripan pada sifat konduktivitas listrik, kekuatan mekanik, reaktivitas kimia, dan sifat optik dari alotrop-alotrop karbon tersebut (3). Namun demikian, adanya struktur turunan yang memberikan bentuk spesifik, serta ukuran dan dimensi alotrop berkonsekuensi terhadap perbedaan pada sifat-sifat lainnya.



Gambar 1. Beberapa nanomaterial alotrop karbon berdasarkan dimensinya (3).

Dengan rasio aspek (dimensi panjang dibagi dimensi lebar) yang tinggi, struktur 1-dimensi carbon nanotube (CNT) menawarkan potensi aplikasi yang khas dalam berbagai bidang; elektronik, optik, serta biomedis. Pemanfaatan CNT sebagai alternatif sistem penghantaran obat baru juga dieksplorasi secara komprehensif melalui berbagai penelitian antar disiplin

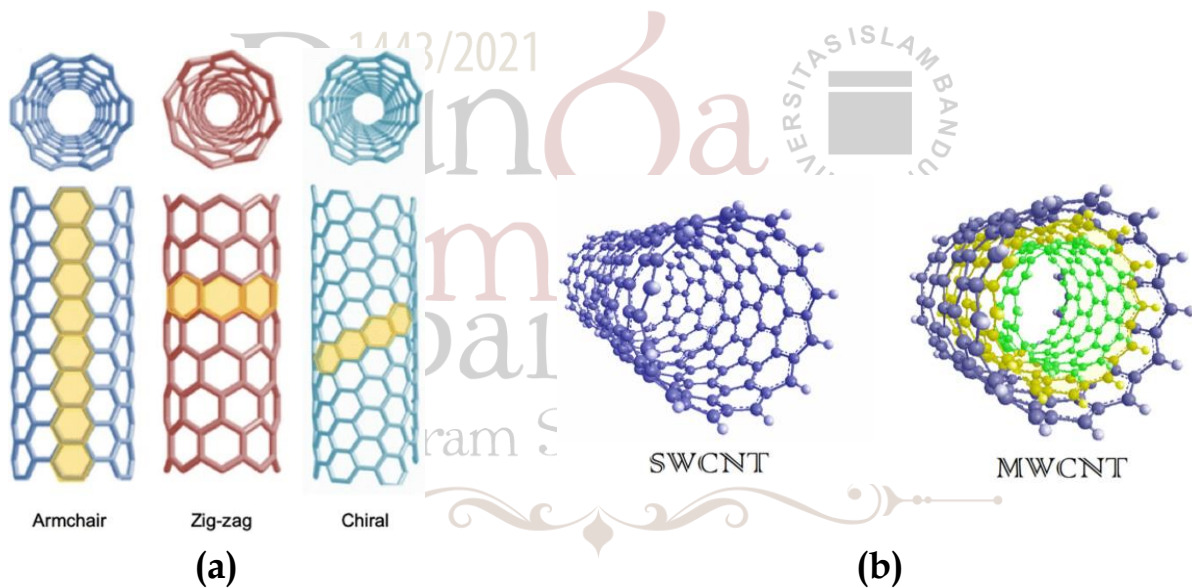
ilmu. Kajian dalam tulisan ini berperan sebagai sebuah intisari mengenai struktur-karakteristik dan metode sintesis CNT sebagai salah satu nanomaterial berbasis karbon, serta tinjauan secara umum mengenai fungsionalisasinya ketika dimanfaatkan sebagai penghantar obat.

Hasil dan Pembahasan

Struktur dan Karakteristik Carbon Nanotube

Carbon nanotube (CNT) disintesis pertama kalinya oleh fisikawan Sumio Iijima pada tahun 1991 sebagai bagian dari modifikasi struktur lembaran grafit karbon (4). Secara mendasar, CNT berbentuk layaknya “gulungan” dari lembaran grafit, sehingga menghasilkan struktur serupa tabung berongga dengan diameter berorde nanometer. Susunan heksagonal pada konstruksi dasar CNT timbul akibat hibridisasi sp^2 dari atom-atom karbon penyusunnya.

Berdasarkan cara penyusunan gulungannya, CNT dikategorikan menjadi tiga jenis: *armchair*, *zig-zag*, dan *chiral* (5). Sedangkan berdasarkan jumlah dinding lembaran pada strukturnya, CNT diklasifikasikan ke dalam dua tipe: CNT berdinding tunggal (*single-walled carbon nanotubes*, SWCNT) dengan kisaran diameter 0,4 - 40 nm dan CNT berdinding jamak (*multi-walled carbon nanotubes*, MWCNT) dengan kisaran diameter total 2 - 100 nm (5,6). Dimensi panjang CNT yang berada pada orde mikrometer menjadikannya material 1-dimensi dengan rasio aspek yang tinggi, yaitu pada kisaran 100 - 1000.

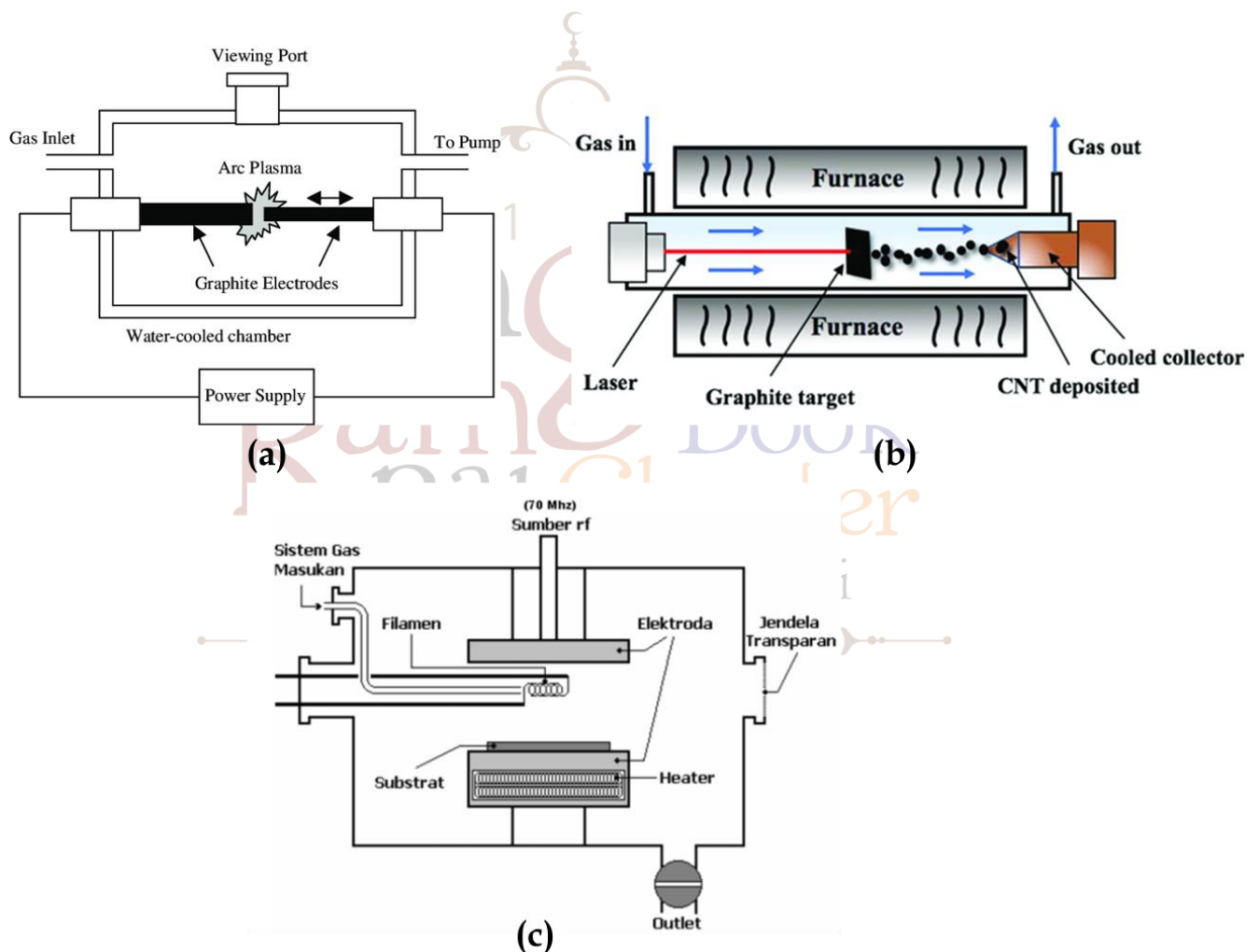


Gambar 2. Tipe CNT berdasarkan: (a) cara penyusunan gulungannya (5) dan (b) berdasarkan jumlah dindingnya (6).

Ikatan kovalen atom-atom karbon pada CNT secara dominan tersusun atas hibridisasi sp^2 , yang lebih kuat dibandingkan hibridisasi sp^3 pada intan. Hal ini memunculkan beberapa karakteristik yang menjadi keunggulan CNT. Dalam sudut pandang mekanik, CNT memiliki modulus elastisitas Young hingga 3,6 TPa (7) dan kekuatan tarik (*tensile strength*) hingga 63 GPa (8), yang membuatnya menjadi material yang kuat dan fleksibel. CNT memiliki keleluasaan dari aspek elektroniknya, dapat berperan sebagai konduktor maupun semikonduktor berdasarkan kiralitasnya (9). Kemudian dimensionalitas CNT yang secara natural berimplikasi pada tingginya luas permukaan CNT membuatnya potensial diaplikasikan pada bidang farmasetika, khususnya sebagai pembawa obat (10).

Metode Sintesis Carbon Nanotube

Untuk menghasilkan CNT berkualitas tinggi, beragam teknik sintesis CNT telah dikaji dan dikembangkan dalam berbagai penelitian. Metode *arc discharge* merupakan metode paling awal yang digunakan dalam sintesis CNT (4). Pada metode ini, dua buah elektroda (masing-masing berperan sebagai anoda dan katoda) grafit ditempatkan saling berhadapan dalam reaktor beratmosfer gas helium atau argon dengan tekanan parsial ~ 600 mbar. Medan listrik yang terbangkitkan di antara dua elektroda tersebut menghasilkan panas hingga 6000 °C. Gas dalam reaktor juga terionisasi menjadi elektron dan ion bermuatan positif, serta membentuk plasma. Elektron-elektron berkecepatan tinggi tersebut menumbuk anoda, sehingga atom-atom karbon dalam anoda terlepas dan berpindah menuju daerah katoda yang bersuhu lebih rendah. Atom-atom karbon tersebut kemudian terakumulasi dan terdeposisi pada katoda, dan mengalami transisi fasa dari karbon cair, hingga akhirnya memadat membentuk struktur nanotube (11).



Gambar 3. Skema reaktor metode: (a) *arc discharge* (12), (b) ablasi laser (13), dan CVD (14).

Penggunaan laser dalam pembuatan CNT, melalui metode ablasi laser, memanfaatkan mekanisme yang serupa dengan metode *arc discharge*. Grafit sebagai material dasar karbon ditempatkan dalam tungku (*furnace*) bersuhu tinggi (~ 1200 °C) yang dialiri gas argon. Alih-alih medan listrik, sinar laser digunakan untuk memicu pelepasan atom-atom karbon dari

grafit. Atom-atom karbon tersebut kemudian terdeposisi pada bagian kolektor yang bersuhu lebih rendah dibandingkan sekelilingnya. Dibandingkan metode *arc discharge*, ablasi laser dapat menghasilkan CNT dengan kemurnian yang lebih baik. Penggunaan suhu tinggi pada metode *arc discharge* dan ablasi laser merupakan faktor yang esensial, dimana penggunaan suhu yang lebih rendah mengurangi kemurnian dan menimbulkan banyaknya cacat pada struktur CNT yang dihasilkan (15).

Pemakaian suhu tinggi pada metode *arc discharge* dan ablasi laser dianggap sebagai kekurangan dari kedua metode tersebut ketika pembuatan CNT diterapkan pada skala industri, karena berkorelasi dengan tingginya penggunaan daya dan biaya yang diperlukan. Oleh karenanya, metode sintesis CNT berbasis *chemical vapor deposition* (CVD) ditawarkan sebagai alternatif solusi untuk permasalahan tersebut. Metode CVD dapat menghasilkan CNT berkualitas tinggi dengan suhu pemrosesan yang relatif lebih rendah (16). Secara mendasar CVD bekerja berdasarkan mekanisme perubahan fasa uap-cair-padat (*vapor-liquid-solid*, VLS). Gas hidrokarbon, seperti asetilena, etilena, ataupun metana digunakan sebagai prekursor karbon. Dengan diiringi gas pembawa (biasanya berupa gas hidrogen), gas prekursor tersebut dialirkan ke dalam reaktor vakum. Adanya medan listrik di dalam reaktor tersebut memungkinkan terjadinya disosiasi molekul-molekul hidrokarbon menjadi atom-atom karbon dan beberapa spesies radikal. Atom-atom karbon tersebut lalu akan terdeposisi pada substrat berkatalis nanopartikel logam yang telah ditempatkan sedemikian rupa dalam reaktor, sebagai fasa cair, dan kemudian akhirnya berubah menjadi fasa padat. Pemilihan logam yang digunakan sebagai nanopartikel katalis menjadi hal yang esensial pada sintesis CNT dengan metode CVD, karena perannya sebagai "pemandu" dalam pembentukan struktur 1-dimensi nanotube. Diameter nanopartikel katalis tersebut juga sekaligus menjadi penentu diameter CNT yang terbentuk. Besi, emas, tembaga, dan nikel merupakan beberapa logam yang biasa digunakan sebagai katalis dalam sintesis CNT dengan metode CVD. Tekanan dan durasi aliran gas prekursor serta suhu substrat juga menjadi parameter yang memengaruhi kualitas dan homogenitas struktur CNT yang terbentuk. Oleh karenanya, modifikasi terhadap reaktor CVD seringkali dilakukan, menghasilkan metode turunan seperti *hot filament CVD* (HFCVD) (17), *plasma-enhanced CVD* (PECVD), *radio frequency PECVD* (RF-PECVD) (14), dan beberapa turunan lainnya, dalam upaya mengoptimalkan keseluruhan proses sintesis.

Fungsionalisasi Carbon Nanotube

Struktur dasar CNT memiliki sifat yang sukar larut dan sulit didispersikan pada banyak jenis pelarut. Selain itu, CNT juga menimbulkan permasalahan pada beberapa rute pemberian obat. Ketika diberikan melalui injeksi intravena, diketahui bahwa CNT terakumulasi pada sistem retikuloendotelial, khususnya di hati dan paru-paru. Pada rute pemberian subkutan, CNT dapat mengakibatkan stimulasi sel dendritik pada kulit yang menyebabkan meningkatnya respon imun (18).

Oleh karena itu, ketika akan dimanfaatkan sebagai penghantar obat fungsionalisasi terhadap struktur dasar CNT perlu dilakukan dengan tujuan agar kelarutan dapat disesuaikan, kestabilan struktur CNT tetap terjaga, biokompatibilitas dapat ditingkatkan, dan potensi toksisitas dapat terminimalkan. Sehingga kapabilitas CNT sebagai pembawa obat dapat dioptimalkan. Metode fungsionalisasi CNT dapat dilakukan melalui dua pendekatan, yaitu secara kovalen dan secara non-kovalen (19).

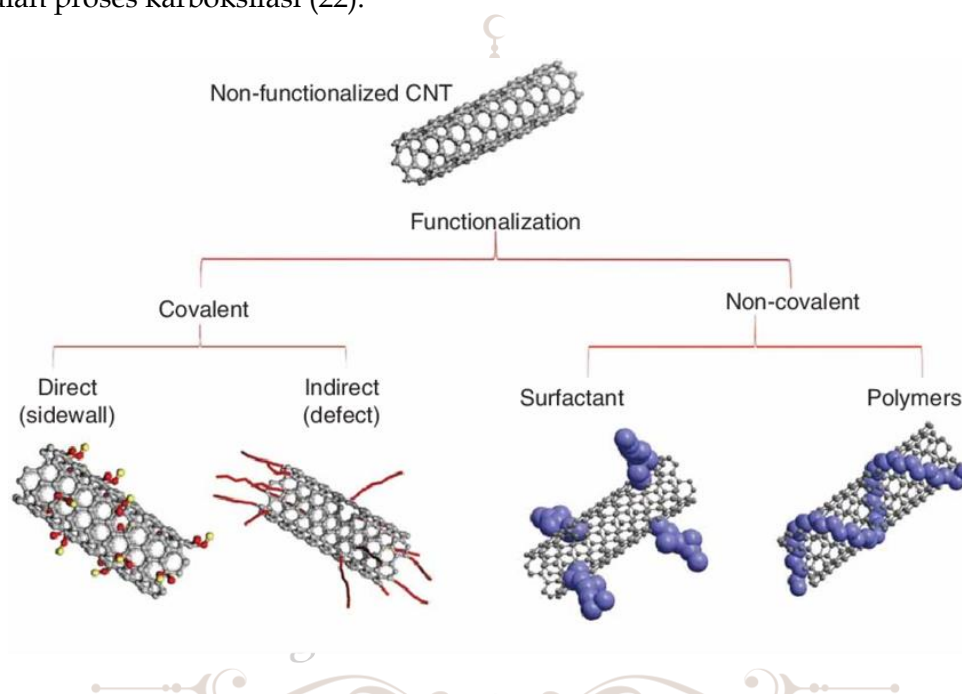
Fungsionalisasi Kovalen

Secara mendasar, fungsionalisasi kovalen dapat dilakukan dengan penyambungan gugus fungsi molekul tertentu ke dalam struktur dasar CNT. Metode fungsionalisasi kovalen dapat dikategorikan menjadi fungsionalisasi kovalen langsung dan fungsionalisasi kovalen tak

langsung, beserta beberapa turunan metodenya (18). Variasi metode-metode tersebut digunakan untuk memodifikasi CNT agar dapat dimanfaatkan sesuai kebutuhannya.

Jenis fungsionalisasi kovalen paling umum yaitu melalui reaksi adisi. Perubahan hibridisasi dari sp^2 ke sp^3 serta hilangnya ikatan terkonjugasi menjadi konsekuensi dari proses ini (20). Favvas et al. (2014) mengkonjugasikan gugus fenol pada permukaan luar MWCNT, yang meningkatkan sifat dispersi MWCNT terfungsionalisasi fenol tersebut pada pelarut N-metilpirolidon (21).

Metode fungsionalisasi kovalen lain yang juga sering digunakan yaitu melalui reaksi karboksilasi. Dengan metode ini, fungsionalisasi SWCNT dapat dilakukan dengan lebih efisien. Madani et al. (2012) menginvestigasi pengaruh penambahan lapisan berupa asam ke dinding SWCNT. Gugus karboksil ($-COOH$) yang tertempel tersebut terbukti dapat meningkatkan hidrofilitas pada struktur SWCNT. Kemampuan gugus $COOH$ untuk berikatan dengan gugus-gugus lain seperti amina dan tiol juga dipandang menjadi keunggulan proses karboksilasi (22).



Gambar 4. Metode Fungsionalisasi CNT (18).

Senyawa-senyawa amina juga dapat dikombinasikan pada CNT melalui prosedur yang sederhana. Atom nitrogen dari gugus amina ($-NH_2$) memiliki sebuah pasangan elektron bebas, yang membuatnya mudah berikatan dengan molekul-molekul lain. Karakteristik ini memungkinkannya untuk berperan sebagai agen taut silang (*cross-linker*) untuk penempelan senyawa-senyawa lain ke struktur dasar CNT. Amiri et al. (2011) menempelkan tiga senyawa amina (etilendiamina, heksametilendiamina, dan 3,3'-diaminobenzidine) pada permukaan MWCNT, dimana dihasilkan peningkatan kelarutan dalam etanol (23).

Fungsionalisasi Non-kovalen

Penempelan molekul-molekul lain ke struktur dasar CNT melalui interaksi fisika merupakan mekanisme umum dari fungsionalisasi non-kovalen. Proses adsorpsi yang melibatkan gaya van der Waals, gaya elektrostatik, interaksi- π , dan ikatan hidrogen menjadi pondasi pembentukan kompleks supramolekul yang menjadi dasar fungsionalisasi non-kovalen (24). Metode fungsionalisasi non-kovalen memiliki kelebihan dibandingkan metode kovalen dari

sudut pandang kemurnian CNT yang tetap terjaga dan kesederhanaan prosedur. Fungsionalisasi non-kovalen secara umum melibatkan prosedur dispersi melalui ultrasonikasi, sentrifugasi, ataupun filtrasi. Molekul-molekul yang sering digunakan dalam proses dispersi CNT diantaranya yaitu surfaktan, biomolekul, serta polimer.

Moore et al. (2003) menginvestigasi penggunaan natrium dodesil sulfat (SDS) yang didispersikan dengan CNT. Hasil citra *transmission electron microscope* (TEM) terhadap sistem dispersi CNT/SDS ini mengindikasikan bahwa struktur CNT terfungsionalisasi SDS secara homogen terlapisi surfaktan dengan bentuk yang tetap terjaga seperti struktur dasarnya (25). Pada penelitian lain, Granite et al. (2010) memanfaatkan surfaktan non-ionik Pluronic F127 dan F108 dalam untuk mendispersikan CNT. Hasil studi yang dilakukan mengindikasikan kemampuan senyawa tersebut dalam pendispersian CNT karena sifat alamiah amfifilik yang dimiliki pluronic (26). Pluronic F108 juga memiliki peran tambahan sebagai pelapis CNT agar tidak menimbulkan kerusakan pada membran lisosom dan mencegah terjadinya fibrosis paru (27).

Karena memiliki luas permukaan yang besar, CNT dapat berinteraksi dengan asam nukleat melalui interaksi- π (28). Pembentukan kompleks supramolekul CNT dengan DNA dapat dicapai melalui interaksi gugus-gugus anion pada DNA dengan gugus-gugus kation CNT, yang dapat meningkatkan biostabilitas sistem tersebut. Penelitian yang dilakukan oleh Taghdisi et al. (2011) menginvestigasi fungsionalisasi CNT dengan aptamer *sgc8c* untuk penargetan biomarker leukimia, protein tirosin kinase-7. Hasil penelitian tersebut juga mengindikasikan peningkatan penghantaran daunorubisin ke dalam sel-T leukimia limfoblastik akut (29).

Keberadaan gugus hidroksil pada turunan karbohidrat juga menjadikannya potensial untuk difungsionalisasikan dengan CNT, dimana akan dimungkinkan penempelan gugus-gugus lainnya. β -siklodekstrin, sebuah senyawa turunan oligosakarida yang memiliki diameter rongga dalam 0,75 - 0,83 nm diketahui memiliki kemampuan untuk mengakomodasi pembentukan kompleks inklusi dengan CNT (30).

Beberapa jenis polimer juga dapat digunakan dalam fungsionalisasi CNT secara non kovalen. Struktur, sifat-sifat kimia, dan sifat-sifat-sifat kelistrikan menjadi beberapa faktor yang memengaruhi kemampuan polimer untuk mendispersikan CNT. Popp et al. (2015) memanfaatkan sifat amfifilik, nontoksik, dan biokompatibel dari polivinil pirolidon (PVP) untuk memodifikasi struktur dasar SWCNT sehingga meningkatkan pemanfaatannya secara fisiologis dalam lingkungan air (31). Pada penelitian lain, Moradian et al. (2014) menginvestigasi fungsionalisasi CNT menggunakan polietilenimina (PEI). Keberadaan PEI pada permukaan CNT memperpanjang rantai hidrofobik hingga ~40 nm, meningkatkan efisiensi pengikatan DNA, serta menghasilkan dispersi yang homogen (32). Sistem terkonjugasi PEI dan DSPE-PEG yang diikat pada CNT juga dapat mereduksi potensi toksisitas dan meningkatkan efisiensi pemuatan siRNA (33).

Kesimpulan dan Saran

Dengan beberapa karakteristik yang unggul, struktur 1-dimensi carbon nanotube menawarkan berbagai potensi aplikasi. Dalam pemanfaatannya sebagai penghantar obat, fungsionalisasi terhadap struktur dasar carbon nanotube perlu dilakukan dengan tujuan memperbaiki sifat kelarutan, menjaga kestabilan struktur, meningkatkan biokompatibilitas, dan meminimalkan potensi toksisitas. Fungsionalisasi kovalen dapat dilakukan melalui mekanisme umum penyambungan gugus-gugus fungsi molekul tertentu pada struktur dasar carbon nanotube, sedangkan fungsionalisasi non-kovalen dapat dicapai melalui interaksi

fisika yang memanfaatkan gaya van der Waals, gaya elektrostatik, interaksi- π , ataupun ikatan hidrogen. Dengan demikian, fungsionalisasi carbon nanotube merupakan langkah yang esensial dalam pengoptimalan potensi penggunaannya dalam sistem penghantaran obat, dan kajian investigatif mengenyainya perlu dilakukan dengan lebih komprehensif.

Referensi

1. Romano D, Franchini M, Grisoni V, Spitoni E, Matteucci F, Morossi C. The variation of carbon abundance in galaxies and its implications. *Astron Astrophys* 2020;639:1–10. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037972>.
2. Feng L, Liu Z. Biomedical Applications of Carbon Nanomaterials. *Biomed Appl Toxicol Carbon Nanomater* 2016;131–62. <https://doi.org/10.1002/9783527692866.ch5>.
3. Georgakilas V, Perman JA, Tucek J, Zboril R. Broad Family of Carbon Nanoallotropes: Classification, Chemistry, and Applications of Fullerenes, Carbon Dots, Nanotubes, Graphene, Nanodiamonds, and Combined Superstructures. *Chem Rev* 2015;115:4744–822. <https://doi.org/10.1021/cr500304f>.
4. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature* 1991;354:56–8.
5. Negri V, Pacheco-Torres J, Calle D, López-Larrubia P. Carbon Nanotubes in Biomedicine. vol. 378. Springer International Publishing; 2020. <https://doi.org/10.1007/s41061-019-0278-8>.
6. Abazari S, Shamsipur A, Bakhsheshi-Rad HR, Ismail AF, Sharif S, Razzaghi M, et al. Carbon nanotubes (CNTs)-reinforced magnesium-based matrix composites: A comprehensive review. *Materials (Basel)* 2020;13:1–38. <https://doi.org/10.3390/ma13194421>.
7. Lourie O, Wagner HD. Evaluation of Young's Modulus of Carbon Nanotubes by Micro-Raman Spectroscopy. *J Mater Res* 1998;13:2418–22. <https://doi.org/10.1557/JMR.1998.0336>.
8. Saito R, Dresselhaus G, Dresselhaus MS. Physical Properties of Carbon Nanotubes. *Phys Prop Carbon Nanotub* 1998. <https://doi.org/10.1142/P080>.
9. Hahm MG, Hashim DP, Vajtai R, Ajayan PM, Info A. A review: controlled synthesis of vertically aligned carbon nanotubes. *Carbon Lett* 2011;12:185–93. <https://doi.org/10.5714/CL.2011.12.4.185>.
10. Mishra V, Singh M, Nayak P, Sriram P, Sutte A. Carbon nanotubes as emerging nanocarriers in drug delivery: An overview. *Int J Pharm Qual Assur* 2020;11:373–8. <https://doi.org/10.25258/ijpqa.11.3.11>.
11. Beg S, Rizwan M, Sheikh AM, Hasnain MS, Anwer K, Kohli K. Advancement in carbon nanotubes: basics, biomedical applications and toxicity. *J Pharm Pharmacol* 2011;63:141–63. <https://doi.org/10.1111/J.2042-7158.2010.01167.X>.
12. Kingston CT, Simard B. Fabrication of Carbon Nanotubes. *Anal Lett* 2003;36:3119–45. <https://doi.org/10.1081/AL-120026564>.
13. Lu Z, Raad R, Safaei F, Xi J, Liu Z, Foroughi J. Carbon nanotube based fiber supercapacitor as wearable energy storage. *Front Mater* 2019;6:1–14. <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00138>.
14. Hidayat AF, Winata T. Investigasi Pengaruh Daya RF terhadap Morfologi Silicon Nanowire berbantuan Katalis Nikel pada Penumbuhan dengan Metode PECVD. *J Fis* 2019;9:1–8.
15. DeRosa AM, Greco K, Rajamani S, Sitharaman B. Recent patents on single-walled carbon nanotubes for biomedical imaging, drug delivery and tissue regeneration. *Recent Pat Biomed Eng* 2010;3:86–94. <https://doi.org/10.2174/1874764711003020086>.
16. He ZB, Lee CS, Maurice J-L, Cojocaru CS. Nickel catalyst faceting in plasma-enhanced

- direct current chemical vapor deposition of carbon nanofibers. *Arab J Sci Eng* 2010;3:86–94.
17. Bouanis FZ, Baraton L, Huc V, Cojocar S, Pribat D, Sorin C, et al. High-quality Single-walled carbon nanotubes synthesis by hot filament CVD on Ru nanoparticle catalyst. *Thin Solid Films* 2011;519:4594–7. <https://doi.org/10.1016/J.TSF.2011.01.326>.
 18. Marchesan S, Kostarelou K, Bianco A, Prato M. The winding road for carbon nanotubes in nanomedicine. *Mater Today* 2015;18:12–9. <https://doi.org/10.1016/J.MATTOD.2014.07.009>.
 19. Karimi M, Solati N, Amiri M, Mirshekari H, Mohamed E, Taheri M, et al. Carbon nanotubes part I: Preparation of a novel and versatile drug-delivery vehicle. *Expert Opin Drug Deliv* 2015;12:1071–87. <https://doi.org/10.1517/17425247.2015.1003806>.
 20. Choi T, Kim SH, Lee CW, Kim H, Choi SK, Kim SH, et al. Synthesis of carbon nanotube-nickel nanocomposites using atomic layer deposition for high-performance non-enzymatic glucose sensing. *Biosens Bioelectron* 2015;63:325–30. <https://doi.org/10.1016/J.BIOS.2014.07.059>.
 21. Favvas EP, Nitodas SF, Stefopoulos AA, Papageorgiou SK, Stefanopoulos KL, Mitropoulos AC. High purity multi-walled carbon nanotubes: Preparation, characterization and performance as filler materials in co-polyimide hollow fiber membranes. *Sep Purif Technol* 2014;122:262–9. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2013.11.015>.
 22. Madani SY, Tan A, Dwek M, Seifalian AM. Functionalization of single-walled carbon nanotubes and their binding to cancer cells. *Int J Nanomedicine* 2012;7:905–14. <https://doi.org/10.2147/IJN.S25035>.
 23. Amiri A, Maghrebi M, Baniadam M, Zeinali Heris S. One-pot, efficient functionalization of multi-walled carbon nanotubes with diamines by microwave method. *Appl Surf Sci* 2011;257:10261–6. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2011.07.039>.
 24. Wong BS, Yoong SL, Jagusiak A, Panczyk T, Ho HK, Ang WH, et al. Carbon nanotubes for delivery of small molecule drugs. *Adv Drug Deliv Rev* 2013;65:1964–2015. <https://doi.org/10.1016/J.ADDR.2013.08.005>.
 25. Moore VC, Strano MS, Haroz EH, Hauge RH, Smalley RE, Schmidt J, et al. Individually Suspended Single-Walled Carbon Nanotubes in Various Surfactants. *Nano Lett* 2003;3:1379–82. https://doi.org/10.1021/NL034524J/SUPPL_FILE/NL034524JSI20030821_024512.PDF.
 26. Granite M, Radulescu A, Pyckhout-Hintzen W, Cohen Y. Interactions between block copolymers and single-walled carbon nanotubes in aqueous solutions: A small-angle neutron scattering study. *Langmuir* 2011;27:751–9. https://doi.org/10.1021/LA103096N/SUPPL_FILE/LA103096N_SI_001.PDF.
 27. Wang X, Xia T, Duch MC, Ji Z, Zhang H, Li R, et al. Pluronic F108 coating decreases the lung fibrosis potential of multiwall carbon nanotubes by reducing lysosomal injury. *Nano Lett* 2012;12:3050–61. https://doi.org/10.1021/NL300895Y/SUPPL_FILE/NL300895Y_SI_001.PDF.
 28. Mehra NK, Mishra V, Jain NK. A review of ligand tethered surface engineered carbon nanotubes. *Biomaterials* 2014;35:1267–83. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMATERIALS.2013.10.032>.
 29. Taghdisi SM, Lavaee P, Ramezani M, Abnous K. Reversible targeting and controlled release delivery of daunorubicin to cancer cells by aptamer-wrapped carbon nanotubes. *Eur J Pharm Biopharm* 2011;77:200–6. <https://doi.org/10.1016/J.EJPB.2010.12.005>.
 30. Bhoi VI, Imae T, Ujihara M, Murthy CN. Surface immobilization of carbon nanotubes by

- beta-cyclodextrins and their inclusion ability. *J Nanosci Nanotechnol* 2013;13:2604-12. <https://doi.org/10.1166/JNN.2013.7358>.
31. Popp B V., Miles DH, Smith JA, Fong IM, Pasquali M, Ball ZT. Stabilization and functionalization of single-walled carbon nanotubes with polyvinylpyrrolidone copolymers for applications in aqueous media. *J Polym Sci Part A Polym Chem* 2015;53:337-43. <https://doi.org/10.1002/POLA.27365>.
 32. Moradian H, Fasehee H, Keshvari H, Faghihi S. Poly(ethyleneimine) functionalized carbon nanotubes as efficient nano-vector for transfecting mesenchymal stem cells. *Colloids Surf B Biointerfaces* 2014;122:115-25. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFB.2014.06.056>.
 33. Liu Z, Cai W, He L, Nakayama N, Chen K, Sun X, et al. In vivo biodistribution and highly efficient tumour targeting of carbon nanotubes in mice. *Nat Nanotechnol* 2007 21 2006;2:47-52. <https://doi.org/10.1038/nnano.2006.170>.

