



Pengaruh Tekanan *Chamber* terhadap Deposisi Carbon Nanotube (CNT) Berbasis Katalis Ni dengan Metode HWC *in plasma*-VHF-PECVD

Ajeng Eliyana^{1*}, Rustan Ruslan², Deska Lismawenning Puspitarum¹, Harlina Ardiyanti¹, Nadiisah Nurul Inaayah¹, Fatimah Arofiati Noor² dan Toto Winata²

¹Program Studi Fisika, Institut Teknologi Sumatera, Jl. Terusan Ryacudu, Lampung Selatan, Provinsi Lampung

²Departemen Fisika, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha Bandung, Provinsi Jawa Barat

* Corresponding author. E-mail: ajeng@fi.itera.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini mengkaji pengaruh tekanan *chamber* terhadap deposisi dan kualitas struktur Carbon Nanotube (CNT) yang disintesis menggunakan metode HWC *in plasma*-VHF-PECVD dengan katalis nikel (Ni). CNT dideposisi pada tekanan 300, 400, dan 500 mTorr dengan parameter tetap berupa laju alir CH₄ sebesar 80 sccm, suhu substrat 275 °C, daya RF 8 W, dan waktu deposisi 60 menit. Karakterisasi dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM), spektroskopi Raman, dan X-ray Diffraction (XRD). Citra SEM menunjukkan terbentuknya CNT pada seluruh variasi tekanan dengan morfologi yang dipengaruhi oleh distribusi kluster katalis. Spektrum Raman memperlihatkan pita RBM, D, G, dan G', dengan rasio I_D/I_G meningkat dari 1,14 menjadi 1,43 seiring kenaikan tekanan, yang mengindikasikan peningkatan densitas cacat. Diameter CNT yang dihitung dari mode RBM berada pada kisaran 2,68–3,00 nm dengan tren non-linear terhadap tekanan. Analisis XRD menunjukkan puncak lebar pada bidang (002) dan (100), yang mengindikasikan struktur grafitik yang masih didominasi fase amorf. Hasil menunjukkan bahwa tekanan 300 mTorr merupakan kondisi optimum untuk menghasilkan CNT dengan kualitas struktur yang lebih baik. Temuan ini memberikan pemahaman mengenai peran tekanan dalam mengontrol deposisi CNT, serta berpotensi mendukung pengembangan material CNT untuk aplikasi perangkat elektronik dan sel surya.

INFO ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diserahkan

5 Mei 2026

Revisi pertama

25 Mei 2026

Diterima

1 Juni 2026

Tersedia secara online

19 Juni 2026

Tanggal Publikasi

19 Juni 2026

Kata Kunci:

Evaporasi; HWC *in plasma*-VHF-PECVD; Carbon nanotube (CNT); Tekanan *Chamber*; Katalis Nikel (Ni).

ABSTRACT

This study investigates the effect of chamber pressure on the deposition and structural quality of carbon nanotubes (CNTs) synthesized using the HWC in plasma-VHF-PECVD method with a nickel (Ni) catalyst. CNTs were synthesized at pressures of 300, 400, and 500 mTorr under constant conditions, including a CH₄ flow rate of 80 sccm, substrate temperature of 275 °C, RF power of 8 W, and a growth time of 60 min. The Ni catalyst plays a crucial role in catalytically decomposing hydrocarbon precursors and facilitating carbon diffusion and precipitation, which govern CNT nucleation and growth. The synthesized samples were characterized using Scanning Electron Microscopy (SEM), Raman spectroscopy, and X-ray Diffraction (XRD). SEM results confirmed CNT formation at all pressure conditions, although agglomeration was observed. Raman spectra exhibited characteristic radial breathing mode (RBM), D-band, G-band, and G'-band features. The estimated I_D/I_G ratio increased from ~0.85–0.90 at 300 mTorr to ~1.20–1.30 at 400 mTorr and ~1.40–1.50 at 500 mTorr, indicating an increase in defect density with increasing pressure. XRD patterns showed broad diffraction peaks at ~26° and ~43°, corresponding to the (002) and (100) planes, suggesting predominantly amorphous graphitic structures. These results demonstrate that 300 mTorr is the optimum pressure for producing CNTs with lower defect density and provide insight for optimizing CNT synthesis for future electronic and solar cell applications.

ARTICLE INFO**Article History:****Submitted**

May 5, 2026

First Revised

May 25, 2026

Accepted

June 1, 2026

First Available online

June 19, 2026

Publication Date

June 19, 2026

Keyword:

Evaporation; HWC in plasma-VHF-PECVD; Carbon nanotube (CNTs); chamber pressure; nickel catalyst (Ni).

PENDAHULUAN

Sejak pertama kali dilaporkan oleh Sumio Iijima pada tahun 1991 [1], CNT telah menjadi salah satu material nanokarbon yang paling intensif diteliti. Hal ini disebabkan oleh beberapa sifat unggul yang dimilikinya, seperti konduktivitas listrik yang tinggi, kekuatan mekanik yang luar biasa, serta stabilitas termal dan kimia yang baik [1–3]. Struktur silindris berbasis grafena pada CNT memberikan karakteristik unik yang

menjadikannya kandidat material yang sangat potensial untuk berbagai aplikasi, termasuk perangkat elektronik, sensor, dan sistem optoelektronik [2–4]. Selain itu, CNT juga menunjukkan prospek yang menjanjikan dalam bidang energi, khususnya sebagai material aktif maupun sebagai lapisan konduktif transparan pada sel surya, karena kemampuannya dalam menyerap cahaya dan mentransportasikan muatan secara efisien [5–7].

Berbagai metode sintesis CNT telah dikembangkan, diantaranya metode *arc discharge*, *laser ablation*, dan *chemical vapor deposition* (CVD) [8, 9]. Di antara metode tersebut, teknik berbasis CVD lebih banyak digunakan karena menawarkan keunggulan dalam hal efisiensi biaya, kemudahan skalabilitas, serta kemampuan dalam mengontrol morfologi dan struktur CNT yang dihasilkan [10–12]. Salah satu pengembangan dari metode ini adalah *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition* (PECVD), yang memungkinkan proses deposisi CNT berlangsung pada suhu yang lebih rendah dibandingkan CVD konvensional. Selain itu, keberadaan plasma dalam metode PECVD berperan dalam meningkatkan reaktivitas spesies gas serta memfasilitasi deposisi CNT dengan orientasi yang lebih terarah [13–15]. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa densitas plasma, energi ion, dan interaksi spesies aktif selama proses PECVD sangat mempengaruhi kualitas grafitik, orientasi, serta densitas cacat CNT yang dihasilkan [16].

Perkembangan lebih lanjut dari metode PECVD menghasilkan beberapa konfigurasi lanjutan, seperti *very high frequency* PECVD (VHF-PECVD) dan *hot*

wire-assisted PECVD (HWC-PECVD). Dimana metode VHF-PECVD mampu meningkatkan densitas plasma sehingga mempercepat laju deposisi, sedangkan HWC-PECVD berperan dalam meningkatkan efisiensi dekomposisi gas prekursor melalui pemanasan filamen [14, 16–18]. Integrasi kedua teknik tersebut dalam konfigurasi HWC *in plasma*-VHF-PECVD memberikan pendekatan yang lebih efektif untuk menghasilkan CNT dengan kualitas dan orientasi yang lebih terkontrol. Beberapa penelitian terkini juga melaporkan bahwa konfigurasi PECVD berbasis *very high frequency* (VHF) mampu meningkatkan densitas plasma dan efisiensi dekomposisi gas prekursor, sehingga mendukung pertumbuhan CNT dengan kualitas struktur yang lebih baik dan laju deposisi yang lebih tinggi [18].

Dibandingkan dengan metode sintesis lainnya, PECVD memiliki sejumlah keunggulan yang signifikan. Metode *arc discharge* cenderung menghasilkan *multi-walled* CNT (MWCNT) dengan kualitas struktur yang relatif rendah akibat proses penguapan yang tidak terkontrol, sedangkan metode *laser ablation* memerlukan biaya operasional yang tinggi serta berpotensi menghasilkan

impuritas dalam jumlah besar. Sebaliknya, metode PECVD, terutama dalam konfigurasi termodifikasi, mampu menghasilkan CNT dengan kontrol struktur yang lebih baik, baik dari segi orientasi, densitas, maupun kualitas kristalnya [17].

Deposisi CNT sangat dipengaruhi oleh berbagai parameter proses, seperti jenis katalis, morfologi katalis, jenis prekursor karbon, serta kondisi deposisi [9]. Katalis logam transisi seperti nikel (Ni), kobalt (Co), dan besi (Fe) memainkan peran penting dalam proses dekomposisi gas hidrokarbon serta pembentukan inti (nukleasi) CNT [19–23]. Mekanisme pertumbuhan CNT secara katalitik diawali dengan adsorpsi dan dekomposisi gas hidrokarbon pada permukaan katalis, diikuti difusi atom karbon ke dalam partikel logam dan presipitasi karbon membentuk struktur tubular [18, 19]. Diantara katalis tersebut, Ni banyak digunakan karena memiliki aktivitas katalitik yang tinggi serta kemampuan difusi karbon yang baik. Morfologi dan distribusi ukuran nanopartikel katalis merupakan faktor kunci yang menentukan diameter, densitas, dan kualitas CNT yang dihasilkan [24, 25].

Proses *annealing* merupakan salah satu tahapan penting dalam preparasi katalis, karena berperan dalam pembentukan nanopartikel melalui mekanisme seperti koalesensi dan Ostwald ripening [11, 12, 25]. Parameter *annealing*, khususnya suhu dan waktu, mempengaruhi ukuran serta distribusi partikel katalis, yang pada akhirnya berdampak langsung terhadap karakteristik CNT yang tumbuh. Metode evaporasi termal yang diikuti dengan proses *annealing* merupakan pendekatan yang sederhana dan ekonomis untuk menghasilkan lapisan tipis katalis dengan sifat yang terkontrol [12].

Selain parameter katalis, laju alir gas memiliki peran yang tidak kalah penting. Laju alir gas hidrokarbon, seperti metana (CH₄), menentukan ketersediaan radikal karbon dalam plasma yang berperan dalam proses deposisi CNT [12–15]. Laju alir yang terlalu rendah dapat menghambat proses deposisi, sedangkan laju yang terlalu tinggi dapat menyebabkan pembentukan karbon amorf yang menurunkan kualitas CNT.

Karakterisasi material menjadi aspek penting dalam mengevaluasi kualitas CNT yang dihasilkan. Spektroskopi Raman merupakan teknik

yang umum digunakan untuk mengidentifikasi struktur grafitik dan tingkat cacat melalui analisis pita D, G, dan *radial breathing mode* (RBM) [26–30], sedangkan difraksi sinar-X (XRD) digunakan untuk menentukan tingkat kristalinitas dan struktur fasa CNT [20, 22]. Selain itu, karakterisasi optik menunjukkan bahwa CNT memiliki potensi besar dalam aplikasi optoelektronik, seperti lapisan konduktif transparan pada perangkat sel surya [24]. Penelitian terbaru menegaskan peran penting material berbasis CNT dalam pengembangan teknologi energi masa depan [27].

Hasil penelitian ini juga menunjukkan kecenderungan yang sejalan dengan beberapa penelitian terdahulu mengenai sintesis CNT berbasis PECVD, dimana peningkatan tekanan *chamber* umumnya menyebabkan penurunan kualitas grafitik dan peningkatan densitas cacat akibat meningkatnya tumbukan partikel plasma dan penurunan energi ion efektif [13–16]. Penelitian oleh Pant et al. [10] dan Tan et al. [12] melaporkan bahwa parameter plasma memiliki pengaruh signifikan terhadap pembentukan karbon amorf dan kualitas kristal CNT. Selain itu,

Robertson [14, 20] menjelaskan bahwa perubahan energi ion selama proses PECVD mempengaruhi mekanisme difusi karbon dan pertumbuhan CNT pada katalis logam transisi. Namun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya lebih berfokus pada parameter suhu deposisi, jenis katalis, atau laju alir gas prekursor, sedangkan kajian mengenai optimasi tekanan *chamber* pada konfigurasi HWC *in plasma*-VHF-PECVD berbasis katalis Ni masih relatif terbatas, khususnya pada kondisi deposisi suhu rendah. Oleh karena itu, penelitian ini memberikan kontribusi tambahan dalam memahami hubungan antara tekanan plasma dan kualitas struktur CNT melalui pendekatan karakterisasi terintegrasi menggunakan SEM, Raman, dan XRD.

Meskipun berbagai parameter sintesis CNT telah banyak dikaji, sebagian besar penelitian sebelumnya lebih berfokus pada pengaruh suhu deposisi, jenis katalis, dan laju alir gas prekursor. Studi mengenai optimasi tekanan *chamber* pada sistem HWC *in plasma*-VHF-PECVD masih relatif terbatas, khususnya dalam kaitannya dengan hubungan antara tekanan plasma, kualitas grafitik, densitas cacat, dan mekanisme pertumbuhan CNT berbasis katalis Ni.

Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada kajian sistematis pengaruh tekanan *chamber* terhadap kualitas struktur CNT menggunakan pendekatan karakterisasi terintegrasi melalui SEM, Raman, dan XRD [29]. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai mekanisme pengaruh tekanan plasma terhadap pertumbuhan dan kualitas struktur CNT pada proses deposisi suhu rendah menggunakan metode HWC *in plasma*-VHF-PECVD.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan optimasi tekanan *chamber* secara sistematis pada proses deposisi CNT menggunakan konfigurasi HWC *in plasma*-VHF-PECVD berbasis katalis Ni pada suhu deposisi rendah. Penelitian ini tidak hanya mengevaluasi pengaruh tekanan terhadap morfologi CNT, tetapi juga mengkorelasikan perubahan tekanan dengan kualitas struktur grafitik, densitas cacat, dan karakteristik kristalinitas CNT melalui analisis terintegrasi menggunakan SEM, spektroskopi Raman, dan XRD. Selain itu, hubungan kuantitatif antara tekanan *chamber* dan rasio I_D/I_G serta mode RBM dianalisis untuk memahami mekanisme pertumbuhan CNT dan pembentukan

cacat struktural selama proses deposisi plasma. Pendekatan ini memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai peran tekanan dalam mengontrol kinetika deposisi dan kualitas struktur CNT, yang masih relatif terbatas dilaporkan pada kondisi deposisi serupa.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi tekanan *chamber* terhadap deposisi CNT menggunakan metode HWC *in plasma*-VHF-PECVD. Melalui optimasi parameter tekanan, diharapkan diperoleh kondisi deposisi yang mampu menghasilkan CNT dengan kualitas struktur grafitik yang lebih baik dan densitas cacat yang lebih rendah. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan strategi optimasi parameter plasma untuk menghasilkan CNT dengan kualitas struktur yang lebih terkontrol pada proses deposisi suhu rendah, sehingga mendukung pengembangan aplikasi CNT di bidang energi dan perangkat elektronik, khususnya pada teknologi sel surya.

METODE PENELITIAN

Bahan dan Instrumen

Logam katalis yang digunakan dalam penelitian ini adalah nikel (Ni),

yang dideposisikan menggunakan metode evaporasi termal. Parameter deposisi meliputi waktu deposisi 50 s, suhu *annealing* 500 °C, dan waktu *annealing* 4,5 jam untuk menghasilkan kluster katalis dengan morfologi yang optimal. Kluster tersebut selanjutnya dimanfaatkan sebagai prekursor katalis dalam deposisi CNT menggunakan metode HWC *in plasma*-VHF-PECVD. Optimasi parameter deposisi CNT merupakan aspek krusial dalam memperoleh struktur CNT dengan kualitas tinggi dan reproduktibilitas yang baik [10–12]. Dalam penelitian ini, parameter yang dioptimasi yaitu tekanan *chamber* dengan Variasi tekanan *chamber* 300, 400, dan 500 mTorr dipilih berdasarkan rentang tekanan umum yang digunakan pada proses deposisi CNT berbasis PECVD pada penelitian sebelumnya [17]. Rentang tekanan ini dipilih untuk mengevaluasi pengaruh densitas plasma dan energi ion terhadap mekanisme dekomposisi CH_4 , difusi karbon dalam katalis Ni, serta kualitas struktur grafitik CNT yang dihasilkan. Laju alir gas CH_4 sebesar 80 sccm, waktu deposisi 60 menit, suhu substrat 275 °C, dan daya *radio frequency* (RF) sebesar 8 W. Proses sintesis dilakukan

menggunakan frekuensi plasma sebesar 70 MHz dan suhu hot wire cell (HWC) sebesar 800 °C, dengan gas metana (CH_4 , 99,999%) sebagai sumber karbon. Gas hidrogen (H_2) dialirkan selama tahap pra-deposisi untuk mereduksi dan menghilangkan lapisan oksida pada permukaan katalis, sehingga meningkatkan aktivitas katalitik selama deposisi CNT [20, 21].

CNT yang dihasilkan kemudian dikarakterisasi menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) tipe JEOL JSM-6510LV untuk analisis morfologi. Selanjutnya, spektroskopi Raman menggunakan Horiba iHR320 digunakan untuk mengevaluasi kualitas dan tingkat cacat, serta mengkaji karakteristik struktur nanotube yang terbentuk melalui analisis pita D, G, G', dan RBM [28–30]. Analisis struktur kristal dilakukan menggunakan difraktometer sinar-X, yaitu Bruker D8 Advance X-ray Diffractometer untuk mengidentifikasi struktur grafitik dan tingkat kristalinitas CNT [30].

Metode Dan Prosedur

Tahap awal deposisi katalis logam Ni dengan proses pembersihan substrat SiO_2 menggunakan *sonication bath*

selama 10 menit dengan pelarut aseton, kemudian dibilas menggunakan air deionisasi (DI). Pembersihan selanjutnya dilakukan menggunakan metanol dan substrat dikeringkan dengan semprotan gas nitrogen. Setelah itu, substrat dimasukkan ke dalam ruang vakum yang dilengkapi dengan elemen pemanas (heater) untuk proses evaporasi.

Pada tahap berikutnya, logam Ni yang berasal dari kawat Ni sebanyak 2,2 mg dideposisikan pada permukaan substrat SiO_2 menggunakan metode evaporasi termal dengan waktu deposisi (t_{eva}) selama 50 detik. Ketebalan lapisan katalis bergantung pada lamanya waktu evaporasi. Proses evaporasi dilakukan pada arus sekitar 51–54 A dan tekanan sekitar 10^{-6} mbar [22–25], dengan jarak antara sumber pemanas dan dudukan substrat sebesar 7 cm. Selanjutnya, lapisan katalis Ni yang telah dideposisikan mengalami proses *annealing* pada suhu 500°C (T_{ann}) dengan waktu *annealing* konstan selama 4,5 jam (t_{ann}).

Tahap akhir deposisi lapisan CNT pada kluster katalis Ni menggunakan metode HWC *in plasma*-VHF-PECVD. Sebelum proses deposisi, gas hidrogen dialirkan pada tahap pra-deposisi untuk menghilangkan lapisan oksida yang

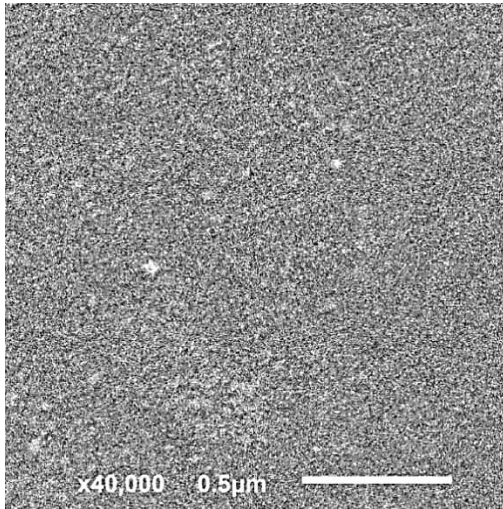
terbentuk pada permukaan katalis [20, 21]. Selama proses PECVD, plasma berperan dalam meningkatkan dekomposisi gas hidrokarbon dan menghasilkan spesies aktif karbon yang mendukung pertumbuhan CNT [31, 32]. Variasi tekanan *chamber* mempengaruhi densitas plasma, mean free path, frekuensi tumbukan partikel, dan energi ion efektif yang berperan penting dalam menentukan kualitas grafitik [33] dan densitas cacat CNT [31]. CNT yang dihasilkan kemudian dikarakterisasi menggunakan SEM untuk analisis morfologi, serta spektroskopi Raman untuk mengevaluasi kualitas struktur grafitik dan tingkat cacat melalui rasio I_D/I_G dan identifikasi mode RBM [34, 35]. Selain itu, analisis struktur kristal dilakukan menggunakan difraksi sinar-X (XRD) [30].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Deposisi Katalis Ni

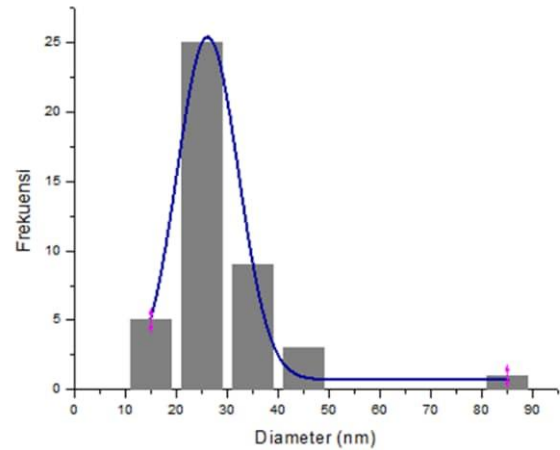
Katalis logam nikel (Ni) dideposisikan di atas substrat SiO_2 dengan metode evaporasi termal selama 50 detik, menghasilkan morfologi permukaan kasar yang membentuk kluster nanopartikel akibat dominasi interaksi Ni–Ni dibandingkan Ni–substrat,

sehingga memicu mekanisme *island growth* [22, 23].



Gambar 1. Citra SEM permukaan kluster Ni pada substrat SiO_2 setelah *annealing*.

Citra SEM pada Gambar 1 menunjukkan distribusi kluster yang tersebar acak pada permukaan substrat. Analisis kuantitatif menunjukkan ukuran diameter rata-rata 26,18 nm dengan standar deviasi 6,005 nm dan *coefficient of variation* (CV) sebesar 22,94%, yang mengindikasikan distribusi ukuran yang masih *polydispers*. Histogram distribusi diameter pada Gambar 2 menunjukkan rentang ukuran 15–90 nm dengan puncak pada 25–30 nm dan kecenderungan distribusi log-normal, yang mencerminkan mekanisme difusi dan koalesensi selama *annealing* [24, 25].



Gambar 2. Histogram distribusi diameter kluster katalis Ni yang dideposisikan selama 50 s dan dianil pada suhu 500 °C selama 4,5 jam.

Kehadiran partikel berukuran besar (~80–90 nm) menunjukkan adanya aglomerasi atau *Ostwald ripening*, yang menyebabkan ketidakseragaman ukuran kluster. Kondisi ini berpotensi mempengaruhi nukleasi dan deposisi CNT, khususnya dalam menentukan diameter dan densitas, sehingga diperlukan optimasi parameter *annealing* untuk memperoleh distribusi katalis yang lebih homogen dan mendukung deposisi CNT yang lebih terkontrol [24, 25].

Optimasi Deposisi CNT

Tekanan deposisi atau tekanan *chamber* merupakan salah satu parameter penting yang mempengaruhi kualitas lapisan tipis CNT yang dihasilkan, karena berperan dalam menentukan

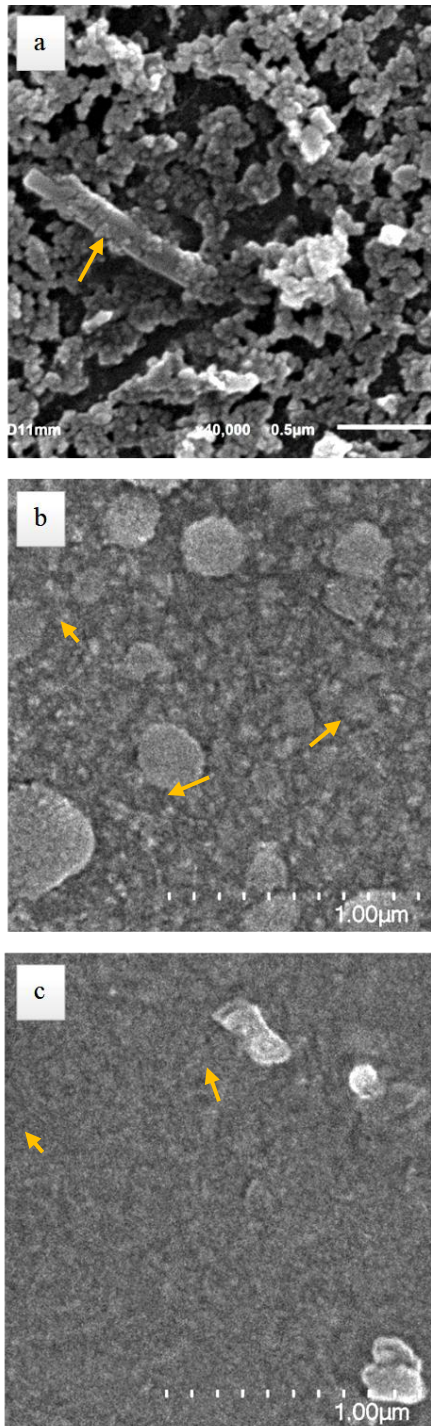
densitas plasma, energi tumbukan partikel, serta kinetika deposisi CNT [13–16]. Pada penelitian ini, deposisi CNT dioptimasi dengan memvariasikan tekanan *chamber* pada 300, 400, dan 500 mTorr.

Citra SEM pada Gambar 3 menunjukkan morfologi CNT yang tumbuh pada permukaan substrat dengan variasi struktur yang cukup signifikan. Pada Gambar 3a, terlihat jaringan CNT yang saling terjatrat (*entangled network*) dengan densitas tinggi. Struktur ini mengindikasikan deposisi CNT yang relatif masif, namun dengan orientasi acak dan adanya indikasi aglomerasi, yang umum terjadi pada deposisi CNT berbasis PECVD tanpa kontrol orientasi yang optimal [31]. Beberapa struktur berbentuk memanjang yang ditunjukkan oleh panah mengindikasikan keberadaan CNT dengan panjang yang cukup besar, namun tidak terdistribusi secara seragam.

Pada Gambar 3b dan 3c, permukaan didominasi oleh partikel halus yang relatif homogen, dengan beberapa klaster berukuran lebih besar yang tersebar sporadis. Area yang ditunjukkan oleh panah mengindikasikan lokasi

kemungkinan nukleasi CNT atau partikel katalis yang mengalami aglomerasi. Dibandingkan dengan Gambar 3a, densitas CNT pada area ini terlihat lebih rendah, yang menunjukkan bahwa deposisi CNT tidak merata di seluruh permukaan substrat. Variasi densitas ini berkaitan dengan perbedaan kondisi lokal selama proses deposisi, khususnya yang dipengaruhi oleh tekanan dan distribusi plasma [32].

Perbedaan morfologi ini dapat dikaitkan dengan distribusi ukuran dan homogenitas klaster katalis Ni. Klaster dengan ukuran yang lebih besar cenderung menghasilkan CNT dengan diameter lebih besar atau bahkan menghambat deposisi CNT, sedangkan klaster yang lebih kecil dan homogen mendukung deposisi CNT yang lebih seragam [20–22]. Keberadaan partikel besar pada beberapa area menunjukkan kemungkinan terjadinya aglomerasi selama proses *annealing*, yang berimplikasi pada distribusi CNT yang tidak merata. Fenomena ini sejalan dengan mekanisme deposisi katalitik CNT yang dikontrol oleh difusi karbon dalam partikel logam serta evolusi morfologi katalis selama proses termal [23, 35].



Gambar 3. Citra SEM CNT dengan tekanan chamber a) 300 [32], b) 400, c) 500 mTorr.

Selain itu, struktur CNT yang terlihat belum menunjukkan orientasi vertikal yang jelas, yang mengindikasikan

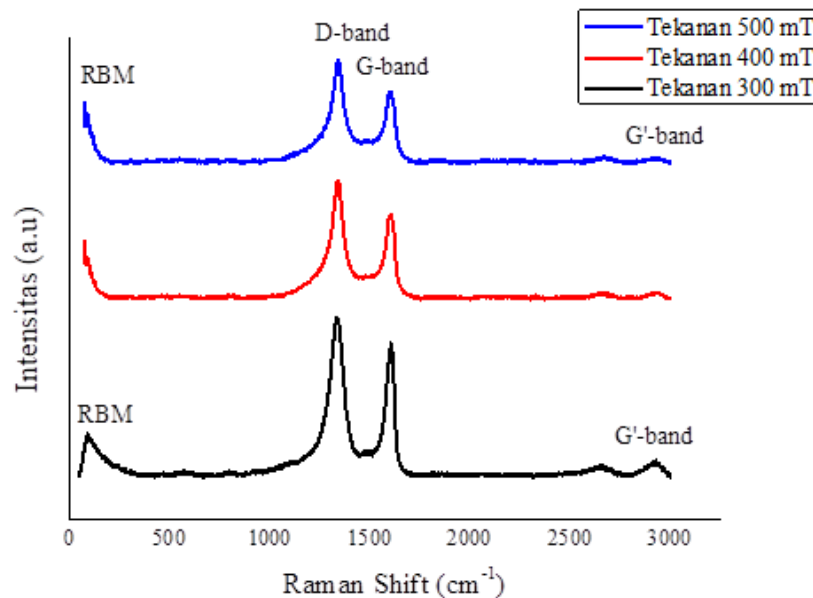
bahwa kondisi plasma dan parameter deposisi belum sepenuhnya mendukung deposisi terarah (*aligned growth*) [31–33].

Secara fisika material, variasi tekanan *chamber* berpengaruh langsung terhadap karakteristik plasma dan kinetika pertumbuhan CNT selama proses deposisi HWC *in plasma*-VHF-PECVD. Peningkatan tekanan *chamber* menyebabkan frekuensi tumbukan antarspesies aktif di dalam plasma meningkat sehingga menurunkan *mean free path* dan energi ion yang mencapai permukaan substrat [31–33]. Kondisi ini mempengaruhi efisiensi dekomposisi gas CH_4 serta proses difusi karbon ke dalam katalis Ni, yang berperan penting dalam mekanisme nukleasi dan pertumbuhan CNT [20–23]. Pada tekanan yang lebih tinggi, suplai karbon menjadi kurang terkontrol dan cenderung meningkatkan pembentukan karbon amorf serta disorder struktural. Fenomena tersebut ditunjukkan oleh peningkatan rasio I_D/I_G pada hasil Raman, pelebaran puncak grafitik (002) pada pola XRD, serta morfologi CNT yang kurang homogen pada citra SEM [29, 30]. Sebaliknya, tekanan rendah menghasilkan kondisi deposisi yang lebih stabil sehingga mendukung pembentukan struktur

grafitik CNT yang lebih baik dengan densitas cacat yang lebih rendah. Hasil ini menunjukkan bahwa optimasi tekanan plasma merupakan parameter penting dalam mengontrol kualitas struktur CNT dan memberikan kontribusi pada pengembangan material nanokarbon untuk aplikasi perangkat elektronik dan energi [26].

Dalam penelitian ini, karakterisasi menggunakan Spektroskopi Raman

dilakukan untuk mengevaluasi struktur grafitik, tingkat cacat, serta tipe CNT yang dihasilkan pada variasi tekanan *chamber*, ditunjukkan pada gambar 4. Spektrum Raman menunjukkan pita khas CNT, yaitu RBM ($\sim 82\text{--}92\text{ cm}^{-1}$), D ($\sim 1323\text{--}1341\text{ cm}^{-1}$), G ($\sim 1601\text{--}1606\text{ cm}^{-1}$), dan G' ($\sim 2601\text{--}2921\text{ cm}^{-1}$) yang ditunjukkan pada tabel 1, yang mengonfirmasi terbentuknya material karbon berstruktur grafitik [30, 35].



Gambar 4. Hasil karakterisasi spektroskopi raman dengan optimasi tekanan

Tabel 1. Posisi puncak pita (Raman shift) hasil karakterisasi Raman untuk optimasi tekanan *chamber*

P (mTorr)	Raman shift (cm^{-1})				I_D/I_G
	RBM	D-Band	G-Band	G'-Band	
300	88	1323,53	1606,17	2921,3	1,14
400	92,41	1341,08	1605,94	2665,33	1,41
500	82,69	1340,06	1601,1	2601,72	1,43

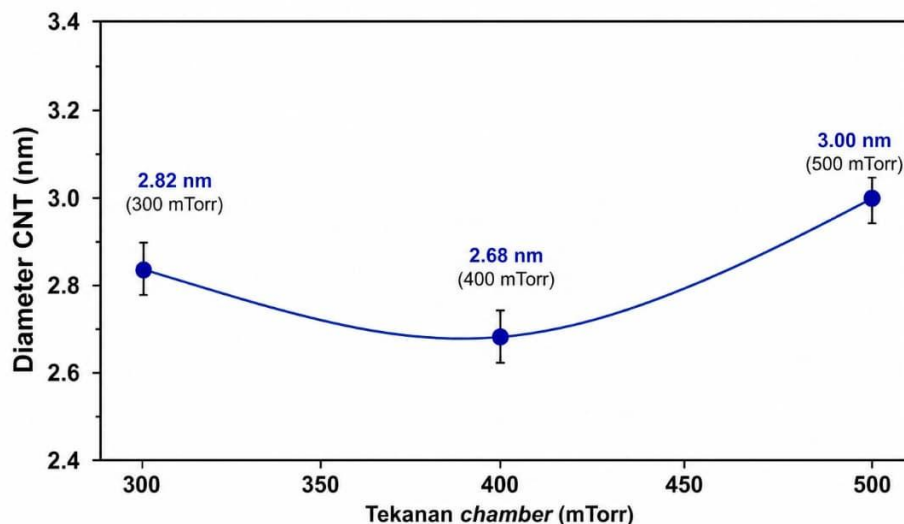
Keberadaan mode RBM mengindikasikan pembentukan CNT berdinding tunggal atau berdinding sedikit, karena frekuensi RBM berbanding terbalik dengan diameter tabung [35]. Diameter CNT yang dihitung berada pada kisaran 2,68–3,00 nm, yang menunjukkan kecenderungan struktur *double-walled* atau *multi-walled* CNT (DWCNT/MWCNT) [30]. Nilai rasio I_D/I_G yang relatif tinggi, yaitu 1,14 (300 mTorr), 1,41 (400 mTorr), dan 1,43 (500 mTorr), mengindikasikan peningkatan densitas cacat seiring kenaikan tekanan, yang umumnya dikaitkan dengan meningkatnya disorder dan keberadaan karbon amorf [29]. Pergeseran pita G dan G' ke bilangan gelombang yang lebih rendah pada tekanan tinggi menunjukkan penurunan keteraturan kristal grafitik dan meningkatnya interaksi antar lapisan grafena [35]. Secara mekanistik, peningkatan tekanan *chamber* menyebabkan frekuensi tumbukan partikel dalam plasma meningkat, sehingga menurunkan energi efektif ion dan efisiensi dekomposisi gas hidrokarbon, yang pada akhirnya menghasilkan deposisi CNT yang kurang terkontrol dan lebih cacat [31–33].

Peningkatan tekanan *chamber* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap mekanisme deposisi CNT selama proses HWC *in plasma*-VHF-PECVD. Pada tekanan yang lebih tinggi, frekuensi tumbukan antarspesies aktif di dalam plasma meningkat sehingga *mean free path* ion menjadi lebih pendek dan energi kinetik ion yang mencapai permukaan substrat menurun. Kondisi ini menyebabkan efisiensi dekomposisi gas CH_4 menjadi kurang optimal dan meningkatkan kemungkinan terbentuknya karbon amorf selama proses deposisi. Fenomena tersebut tercermin pada hasil spektroskopi Raman yang menunjukkan peningkatan rasio I_D/I_G seiring kenaikan tekanan *chamber*, yang mengindikasikan meningkatnya densitas cacat dan *disorder* struktural pada CNT [29, 35]. Hasil ini juga didukung oleh pola XRD yang memperlihatkan pelebaran puncak grafitik (002) dan penurunan intensitas puncak pada tekanan tinggi, yang menunjukkan menurunnya tingkat kristalinitas material [3, 30]. Selain itu, citra SEM menunjukkan bahwa peningkatan tekanan menyebabkan morfologi CNT menjadi kurang homogen dan cenderung mengalami aglomerasi akibat distribusi

deposisi karbon yang tidak merata. Integrasi hasil SEM, Raman, dan XRD menunjukkan bahwa tekanan rendah, khususnya pada 300 mTorr, menghasilkan CNT dengan kualitas struktur grafitik yang lebih baik dan densitas cacat yang lebih rendah dibandingkan tekanan yang lebih tinggi [29, 30].

Berdasarkan kombinasi keberadaan RBM, diameter CNT yang

relatif besar, serta nilai I_D/I_G yang tinggi, CNT yang dihasilkan dalam penelitian ini lebih tepat diklasifikasikan sebagai DWCNT/ MWCNT dengan tingkat cacat yang masih signifikan [30, 35]. Hasil ini menunjukkan bahwa tekanan 300 mTorr merupakan kondisi yang lebih optimal untuk menghasilkan CNT dengan kualitas struktur yang lebih baik dan densitas cacat yang lebih rendah.



Gambar 5. Hubungan antara tekanan *chamber* dan diameter CNT yang dihitung dari mode RBM

Perhitungan diameter CNT berdasarkan mode RBM menggunakan persamaan $d=248/\omega_{RBM}$ menunjukkan bahwa diameter CNT berada pada kisaran 2,68–3,00 nm [3, 30, 35]. Seperti ditunjukkan pada Gambar 5, diameter CNT memperlihatkan tren non-linear terhadap tekanan *chamber*, dengan nilai

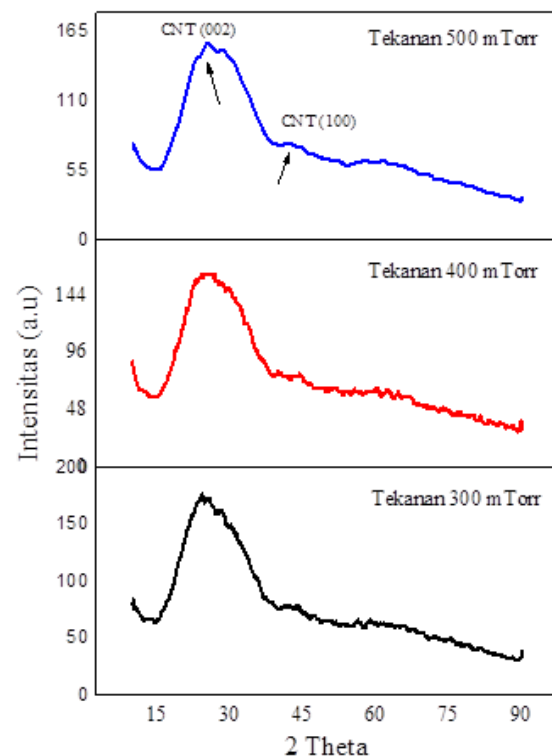
minimum pada 400 mTorr (~2,68 nm) dan meningkat hingga ~3,00 nm pada 500 mTorr. Peningkatan diameter pada tekanan tinggi mengindikasikan meningkatnya suplai karbon serta difusi karbon dalam katalis Ni, yang mendorong deposisi radial CNT [20–22].

Hasil ini konsisten dengan peningkatan rasio I_D/I_G yang menunjukkan penurunan kualitas struktur pada CNT dengan diameter yang lebih besar [29,35]. Hubungan non-linear antara tekanan dan diameter CNT menunjukkan adanya kompetisi antara kinetika difusi karbon dan laju deposisi, dimana tekanan tinggi mendorong deposisi radial yang menghasilkan CNT berdiameter lebih besar.

Meskipun mode RBM teramati pada kisaran $82\text{--}92\text{ cm}^{-1}$, yang umumnya terkait dengan CNT berdinding tunggal, diameter CNT yang dihitung berada pada rentang $2,68\text{--}3,00\text{ nm}$, yang lebih konsisten dengan struktur *double-walled* atau *multi-walled* CNT [3, 30]. Selain itu, nilai rasio I_D/I_G yang relatif tinggi (>1) serta pelebaran pita G' mengindikasikan tingkat cacat yang signifikan dan adanya interaksi antar lapisan grafitik [29, 35]. Oleh karena itu, CNT yang dihasilkan dalam penelitian ini lebih tepat diklasifikasikan sebagai MWCNT atau DWCNT, bukan SWCNT murni.

Karakterisasi selanjutnya yaitu karakterisasi XRD untuk melihat kekristalan dari sampel. Pola difraksi sinar-X (XRD) pada gambar 6 menunjukkan karakteristik struktur

karbon dari CNT yang disintesis pada tekanan 300, 400, dan 500 mTorr. Pada semua variasi tekanan, teramati puncak lebar (broad peak) di sekitar $2\theta \approx 26^\circ$ yang berkaitan dengan bidang kristal (002) grafit, serta puncak lemah di sekitar $2\theta \approx 43^\circ$ yang diasosiasikan dengan bidang (100). Keberadaan kedua puncak ini mengonfirmasi terbentuknya struktur karbon berbasis grafitik pada material CNT [30].



Gambar 6. Hasil XRD dengan tekanan *chamber* 300, 400 dan 500 mTorr.

Namun demikian, bentuk puncak yang melebar (peak broadening) dan intensitas yang relatif rendah

menunjukkan bahwa struktur CNT yang terbentuk masih bersifat semi-kristalin atau dominan amorf, yang mengindikasikan tingkat keteraturan lapisan grafena yang terbatas [30]. Fenomena ini umum terjadi pada CNT yang disintesis menggunakan metode CVD/PECVD dengan kondisi deposisi yang belum sepenuhnya optimal [5].

Peningkatan tekanan *chamber* dari 300 hingga 500 mTorr menunjukkan kecenderungan pelebaran puncak (002) dan penurunan intensitasnya, yang mengindikasikan penurunan derajat kristalinitas serta peningkatan disorder struktural. Secara mekanistik, peningkatan tekanan menyebabkan meningkatnya frekuensi tumbukan partikel dalam plasma dan menurunkan energi efektif spesies aktif, sehingga mengurangi keteraturan deposisi lapisan grafitik CNT [16]. Kondisi ini juga dapat memicu pembentukan karbon amorf yang lebih dominan pada tekanan tinggi.

Hasil ini konsisten dengan analisis spektroskopi Raman yang menunjukkan peningkatan rasio I_D/I_G pada tekanan yang lebih tinggi, yang mengindikasikan peningkatan densitas cacat dalam struktur CNT [29]. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa tekanan

rendah (300 mTorr) menghasilkan CNT dengan kualitas struktur yang relatif lebih baik dibandingkan tekanan yang lebih tinggi.

Hasil SEM, Raman, dan XRD menunjukkan kecenderungan yang saling konsisten terhadap pengaruh tekanan *chamber*. Morfologi CNT pada SEM memperlihatkan peningkatan aglomerasi dan ketidakteraturan struktur pada tekanan tinggi. Kondisi ini sejalan dengan peningkatan rasio I_D/I_G pada spektrum Raman yang menunjukkan meningkatnya densitas cacat struktural [29]. Selain itu, pola XRD memperlihatkan pelebaran puncak grafitik (002) pada tekanan tinggi yang mengindikasikan penurunan kristalinitas CNT [20,30]. Integrasi ketiga hasil karakterisasi tersebut mengonfirmasi bahwa peningkatan tekanan *chamber* menyebabkan kualitas grafitik CNT menurun akibat meningkatnya pembentukan karbon amorf dan disorder struktural selama proses deposisi [16, 29].

Struktur CNT yang dihasilkan dalam penelitian ini menunjukkan karakteristik grafitik dengan kombinasi konduktivitas listrik yang baik dan luas permukaan yang tinggi, sehingga berpotensi untuk diaplikasikan pada

perangkat sel surya. Sebagaimana teramati pada citra SEM memungkinkan terbentuknya jalur transport muatan yang efisien, yang penting untuk meningkatkan mobilitas elektron dan hole dalam lapisan aktif [26]. Selain itu, meskipun hasil XRD dan Raman menunjukkan adanya cacat struktural ($I_D/I_G > 1$), cacat ini justru dapat berperan sebagai pusat penjerap (trapping sites) atau meningkatkan interaksi antarmuka dengan material semikonduktor lain, yang dapat memperbaiki proses pemisahan muatan pada sel surya [4, 10, 26].

SIMPULAN

Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa tekanan *chamber* merupakan parameter kunci dalam mengontrol deposisi dan kualitas struktur CNT yang disintesis menggunakan metode HWC *in plasma*-VHF-PECVD berbasis katalis Ni. Hasil SEM menginformasikan terbentuknya CNT pada semua variasi tekanan, sementara analisis Raman menunjukkan peningkatan rasio I_D/I_G seiring kenaikan tekanan *chamber* yang mengindikasikan bertambahnya densitas cacat. Perhitungan diameter dari mode RBM

menunjukkan rentang 2,68–3,00 nm dengan tren non-linear terhadap tekanan, sedangkan hasil XRD mengungkapkan struktur grafitik yang masih didominasi fase amorf. Secara mekanistik, peningkatan tekanan menyebabkan perubahan kinetika plasma dan difusi karbon dalam katalis Ni, yang berdampak pada deposisi CNT yang kurang terkontrol dan lebih cacat. Berdasarkan seluruh hasil karakterisasi, tekanan 300 mTorr diidentifikasi sebagai kondisi optimum untuk menghasilkan CNT dengan kualitas struktur yang lebih baik dan densitas cacat yang lebih rendah. Temuan ini memberikan dasar yang kuat untuk optimasi proses sintesis CNT serta membuka peluang pemanfaatannya dalam aplikasi perangkat elektronik dan sel surya berefisiensi tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung oleh Hibah Institut Teknologi Sumatera, Tahun Anggaran 2025 Skema Penguatan Kelompok Keilmuan berdasarkan Kontrak Nomor 2658f/IT9.2.1/PT.01.03/2025.

REFERENSI

- [1] Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature* 1991; 354: 56–58.
- [2] Avouris P, Appenzeller J, Martel R, et al. Carbon nanotube electronics. *Proceedings of the IEEE* 2003; 9: 1772–1784.
- [3] Sibiński M, Jakubowska M, Znajdek K, et al. Carbon nanotube transparent conductive layers for solar cells applications Function: project manager and contractor. View project Alkaloids View project, <https://www.researchgate.net/publication/259681332>.
- [4] Cao Q, Rogers JA. Ultrathin Films of Single-Walled Carbon Nanotubes for Electronics and Sensors: A Review of Fundamental and Applied Aspects. *Advanced Materials* 2009; 21: 29–53.
- [5] Chen S, Chen Y, Xu H, et al. Single-walled carbon nanotubes synthesized by laser ablation from coal for field-effect transistors. *Mater Horiz* 2023; 10: 5185–5191.
- [6] Hu L, Hecht DS, Grüner G. Percolation in Transparent and Conducting Carbon Nanotube Networks. *Nano Lett* 2004; 4: 2513–2517.
- [7] Cao Q, Han S, Tulevski GS, et al. Arrays of single-walled carbon nanotubes with full surface coverage for high-performance electronics. *Nat Nanotechnol* 2013; 8: 180–186.
- [8] Kumar M, Ando Y. Chemical Vapor Deposition of Carbon Nanotubes: A Review on Growth Mechanism and Mass Production. *J Nanosci Nanotechnol* 2010; 10: 3739–3758.
- [9] Krätschmer W, Lamb LD, Fostiropoulos K, et al. Solid C60: a new form of carbon. *Nature* 1990; 347: 354–358.
- [10] Sharma HK, Singh BP, Sharma SK. CNT-TiO₂ nanocomposite thin films enhanced photocatalytic degradation of methylene blue. *Hybrid Advances* 2024; 5: 100152.
- [11] Kong J, Cassell AM, Dai H. Chemical vapor deposition of methane for single-walled carbon nanotubes. *Chem Phys Lett* 1998; 292: 567–574.
- [12] Tanemura M, Iwata K, Takahashi K, et al. Growth of aligned carbon nanotubes by plasma-enhanced chemical vapor deposition: Optimization of growth parameters. *J Appl Phys* 2001; 90: 1529–1533.
- [13] Teo KBK, Chhowalla M, Amaratunga GAJ, et al. Uniform patterned growth of carbon nanotubes without surface carbon. *Appl Phys Lett* 2001; 79: 1534–1536.
- [14] Robertson J. Growth of nanotubes for electronics. *Materials Today* 2007; 10: 36–43.
- [15] Ren ZF, Huang ZP, Xu JW, et al. Synthesis of Large Arrays of Well-Aligned Carbon Nanotubes on Glass. *Science* (1979) 1998; 282: 1105–1107.

- [16] Mendoza F, Limbu TB, Weiner BR, et al. Hot Filament Chemical Vapor Deposition: Enabling the Scalable Synthesis of Bilayer Graphene and Other Carbon Materials. In: *Chemical Vapor Deposition - Recent Advances and Applications in Optical, Solar Cells and Solid State Devices*. InTech, 2016. Epub ahead of print 31 August 2016. DOI: 10.5772/63921.
- [17] Madikere Raghunatha Reddy AK, Darwiche A, Reddy MV, et al. Review on Advancements in Carbon Nanotubes: Synthesis, Purification, and Multifaceted Applications. *Batteries* 2025; 11: 71.
- [18] Baker RTK. Catalytic growth of carbon filaments. *Carbon N Y* 1989; 27: 315–323.
- [19] Hart AJ, Slocum AH. Rapid Growth and Flow-Mediated Nucleation of Millimeter-Scale Aligned Carbon Nanotube Structures from a Thin-Film Catalyst. *J Phys Chem B* 2006; 110: 8250–8257.
- [20] Rodriguez NM. A review of catalytically grown carbon nanofibers. *J Mater Res* 1993; 8: 3233–3250.
- [21] Park YS, Choi EC, Hong B. Growth of carbon nanotubes using nanocrystalline carbon catalyst. *Appl Surf Sci* 2009; 255: 6028–6032.
- [22] Cassell AM, Raymakers JA, Kong J, et al. Large Scale CVD Synthesis of Single-Walled Carbon Nanotubes. *J Phys Chem B* 1999; 103: 6484–6492.
- [23] Altman EI, Colton RJ. Nucleation, growth, and structure of fullerene films on Au(111). *Surf Sci* 1992; 279: 49–67.
- [24] Ismatov AA, Romanitan C, Ashurov KhB, et al. ANNEALING-INDUCED MORPHOLOGICAL EVOLUTION OF IRON NANOCATALYSTS FOR CARBON NANOTUBE GROWTH. *Eurasian Physical Technical Journal* 2025; 22: 5–13.
- [25] Eliyana A, Ruslan R, Keintjem AC, et al. The Effect of Substrate Temperature on CNT Deposition with Ni Catalyst as Precursor. *J Phys Conf Ser* 2025; 2980: 012007.
- [26] Qamar MA, Aroosh K, Nawaz A, et al. Carbon nanotubes in perovskite solar cells: A comprehensive review of recent developments and future directions. *Synth Met* 2024; 307: 117651.
- [27] Sasikumar R, Babu BR, Subramanian V, et al. Multifunctionality of MWCNT modified carbon fiber reinforced thermoplastic composite, and reclaiming composite in the pursuit of sustainable energy storage applications: An experimental and numerical analysis. *Compos Sci Technol* 2024; 248: 110468.
- [28] Singh AK, Panda BP, Mohanty S, et al. Gas Phase Synthesis of Carbon Nanotubes by Vapour Deposition Method: Evaluation of Morphological Behaviour. *Materials Focus* 2016; 5: 529–536.
- [29] Zhang P, Fan J, Wang Y, et al. Insights into the role of defects on the Raman spectroscopy of carbon nanotube and biomass-derived

- carbon. *Carbon N Y* 2024; 222: 118998.
- [30] Harris PJF, Hernández E, Yakobson BI. Carbon Nanotubes and Related Structures: New Materials for the Twenty-First Century. *Am J Phys* 2004; 72: 415–415.
 - [31] Andalouci A, Hinkov I, Brinza O, et al. Role of Oxygen in PECVD Carbon Nanotubes Growth: Experiments and Modeling. *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 2023; 43: 757–786.
 - [32] Nánai L, Németh Z, Kaptay G, et al. Experimental and theoretical aspects of the growth of vertically aligned CNTs by CCVD on AZO substrate. *Sci Rep* 2024; 14: 7307.
 - [33] Sehrawat M, Rani M, Sharma S, et al. Floating catalyst chemical vapour deposition (FCCVD) for direct spinning of CNT aerogel: A review. *Carbon N Y* 2024; 219: 118747.
 - [34] Hembram KPSS, Kim J-G, Lee S-G, et al. Radial-tangential mode of single-wall carbon nanotubes manifested by Landau regulation: reinterpretation of low- and intermediate-frequency Raman signals. *Sci Rep* 2023; 13: 5012.
 - [35] Iordache S-M, Iordache A-M, Florea (Raduta) A-M, et al. Raman Spectroscopy of Graphene/CNT Layers Deposited on Interdigit Sensors for Application in Gas Detection. *C (Basel)* 2025; 11: 9.