



Review

Sintesis Carbon Nanofoam dan Karakteristiknya

(Synthesis of Carbon Nanofoam and Its Characteristics)

Nuryah Muchlisha, Dian M. Widjonarko, Teguh Endah Saraswati*

Program Studi Magister Kimia, FMIPA, Universitas Sebelas Maret
Jalan Ir. Sutami 36 A, Kentingan, Surakarta, 57126, Indonesia

*Corresponding author: teguh@mipa.uns.ac.id

DOI: 10.20961/alchemy.19.1.64499.108-122

Received 14 August 2022, Accepted 23 September 2022, Published 22 March 2023

Kata kunci:

karbon nanofoam;
sintesis;
modifikasi;
karakterisasi.

ABSTRAK. Karbon memiliki kemampuan untuk membuat jaringan ikatan hibridisasi sp , $sp-sp^2$, sp^2 , sp^3 , dan sp^2-sp^3 , sehingga karbon terdapat dalam banyak bentuk alotrop seperti grafit, *diamond*, *graphene*, *nanofiber*, *nanofoam*, dan *nanotube*. *Carbon nanofoam* (CNF) terbentuk dari atom karbon yang terikat secara sp^2 dan sp^3 . CNF memiliki struktur sel terbuka yang saling berhubungan, densitas yang sangat rendah, stabilitas termal yang tinggi, dan porositas yang tinggi. CNF dapat diperoleh dengan menggunakan berbagai metode seperti *chemical vapor deposition*, laser ablasi, *arc-discharge*, dan pirolisis. Sintesis dengan berbagai jenis sumber karbon dan keadaan eksperimen menghasilkan material yang memiliki berbagai ukuran, luas permukaan, dan strukturnya. Struktur CNF terdiri dari dua jenis berdasarkan pola tepi strukturnya yaitu *zigzag* dan *armchair*. Hasil karakterisasinya menunjukkan bahwa CNF lebih banyak mengandung karbon dengan hibridisasi sp^2 dengan struktur yang berinterkoneksi satu sama lain dan memiliki densitas yang sangat rendah. Selain itu, material ini juga memiliki pori dalam ukuran mesopori dan luas permukaan yang tinggi. Sifat unik yang dimiliki oleh CNF berpotensi diaplikasikan dalam berbagai bidang seperti filter, superkapasitor, dan *energy storage*.

Keywords:

carbon nanofoam;
synthesis;
modification;
characterization.

ABSTRACT. Carbon can create sp , $sp-sp^2$, sp^2 , sp^3 , and sp^2-sp^3 hybridized bond networks, which make carbon in many allotropes forms such as graphite, diamond, graphene, nanofiber, nanofoam, and nanotubes. Carbon nanofoam (CNF) is formed by sp^2 and sp^3 bonded carbon atoms. CNF has an interconnected open-cell structure, very low density, high thermal stability, and high porosity. CNF is obtained using several methods, such as laser ablation, arc-discharge, chemical vapor deposition, and pyrolysis. Synthesis with various types of carbon sources and experimental conditions resulted in materials having various sizes, surface areas, and structures. The structure of CNF consists of two edge pattern types, including zigzag and armchair. The characterization results show that CNF contains more interconnected carbon with sp^2 hybridization and has a very low density. In addition, this material also has pores in the mesoporous size and high surface area. The unique properties of CNF provide potential applications in various fields, such as filters, supercapacitors, and energy storage.

ISI

PENDAHULUAN.....	109
METODE SINTESIS KARBON NANOFOAM (CNF).....	109
Metode Chemical Vapor Deposition (CVD).....	109
Metode Laser Ablasi.....	111
Metode Pirolisis.....	112
STRUKTUR CARBON NANOFOAM (CNF).....	113
KARAKTERISASI CARBON NANOFOAM (CNF).....	116
KESIMPULAN.....	118
UCAPAN TERIMAKASIH.....	118
DAFTAR PUSTAKA.....	118

Cite this as: Destiani, S., Maksum, I., & Hartati, Y. 2023. Biosensor Elektrokimia untuk Memonitor Level Hemoglobin Terглиkasi (HbA1c) pada Penyakit Diabetes Melitus. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 19(1), 94-107. <http://dx.doi.org/10.20961/alchemy.19.1.58439.94-107>

PENDAHULUAN

Material karbon dapat ditemukan dalam bentuk dimensi yaitu 0D, 1D, 2D, dan 3D (Zhang *et al.*, 2020), yang memiliki kemampuan untuk membuat jaringan ikatan hibridisasi sp , $sp-sp^2$, sp^2 , sp^3 , dan sp^2-sp^3 , sehingga karbon memiliki dalam banyak bentuk alotrop (Ram and Mizuseki, 2020). Alotrop karbon yaitu *diamond* (Garg *et al.*, 2019), *graphite* (Lin *et al.*, 2019), *fibers* (Cisquella-Serra *et al.*, 2022), *graphene* (Liu *et al.*, 2022), *foams* (Maffini *et al.*, 2022), *graphyne*, *graphdiyne*, *tetrahexcarbon*, *graphenylene*, *radialenes*, *pentaheptite*, *haeckelites*, *T-graphene* dan banyak bentuk alotrop lainnya (Ram and Mizuseki, 2020). Pada tahun 1997, alotrop baru dari karbon telah berhasil ditemukan yaitu *foam* melalui sintesis menggunakan metode laser ablasi di Australian National University, Canberra. Karbon dalam bentuk 3D seperti *carbon nanofoam* (CNF) menunjukkan stabilitas struktur yang tinggi pada densitas yang sangat rendah.

CNF merupakan material nano dengan ukuran 3D dengan struktur sel terbuka yang saling berhubungan. Material ini memiliki densitas yang ringan dengan karakteristik termal dan *electrical* yang khusus. Sifat-sifat CNF bergantung pada parameter strukturalnya, seperti densitas, ukuran pori, ketebalan dinding dan derajat grafitisasi (Rodríguez *et al.*, 2021). Di antara berbagai morfologi material karbon, seperti *fibrous*, *tubular*, *spherical*, *platelet* dan *granular*, CNF memiliki struktur pori yang spesifik, di mana sebagian besar pori makro (sel) saling berhubungan, yaitu struktur sel terbuka (Inagaki *et al.*, 2015). Adanya struktur sel ini menyebabkan luas permukaan geometris yang besar (Letellier *et al.*, 2017).

CNF memiliki struktur sel terbuka yang saling berhubungan, bobot yang ringan, stabilitas termal yang tinggi, sifat permukaan hidrofilik, konduktivitas termal dan listrik yang tinggi. Struktur dan morfologi dari CNF bergantung pada bahan pemodifikasinya serta prekursor yang digunakan (Lin *et al.*, 2013; Rodríguez *et al.*, 2021; Zhou and Chen, 2016). Banyak metode yang dapat digunakan untuk sintesis material CNF namun teknik paling umum dan efektif untuk sintesis material karbon adalah laser ablasi, *arc-discharge*, dan *chemical vapor deposition* (CVD) (Goswami *et al.*, 2021). Konfirmasi struktur serta sifat dari material karbon dapat dilakukan dengan karakterisasi menggunakan teknik mikroskopi, teknik spektroskopi dan difraksi sinar X.

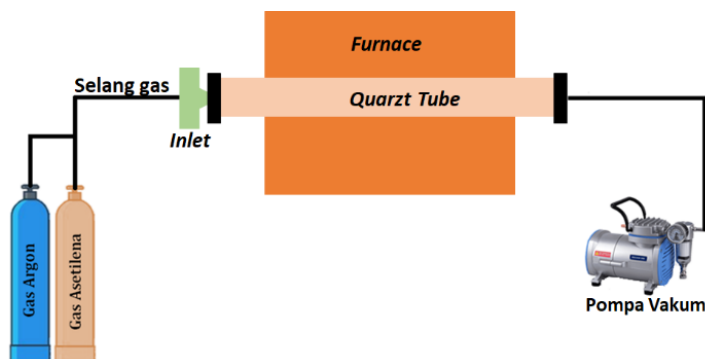
CNF memiliki atom karbon yang terikat secara sp^2 dan sp^3 yang terdiri dari dua jenis, yaitu CNF grafit dan CNF non-grafit (Mitchell *et al.*, 2015; Narasimman and Prabhakaran, 2012). Material CNF diketahui memiliki lembaran seperti grafit dengan kelengkungan hiperbolik yang mirip dengan struktur *schwarzite* (Mitchell *et al.*, 2015). Nagel *et al.* (2014) menyatakan CNF merupakan material berpori yang mengandung sel-sel yang berbentuk teratur dan sebagian besar cekung yang tersebar secara homogen yang berinteraksi untuk membentuk susunan 3D di semua material karbon, terutama dalam keadaan non grafit dan menghasilkan material sel terbuka atau tertutup (Nagel *et al.*, 2014). Struktur CNF dengan atom karbon sp^2 dalam lapisan tunggal diubah menjadi atom sp^3 akan menghasilkan interkoneksi yang kaku antara lapisan grafit sehingga CNF memiliki sifat luar biasa (Zhou *et al.*, 2017). Material CNF yang mudah untuk dimodifikasi membuat material ini banyak diaplikasikan dalam berbagai bidang. Sifat-sifat atau *properties* CNF yang banyak dan unik membuatnya memiliki potensi yang besar dalam pengaplikasiannya. CNF telah banyak diaplikasikan sebagai superkapasitor dan *energy storage*. Selain itu, CNF juga digunakan sebagai filter air dan udara, katalis dan penghilangan polutan (Quay and Chung, 2021; Zhang *et al.*, 2019b; Li *et al.*, 2020; Maffini *et al.*, 2022). Porositas yang dimiliki CNF membuat peneliti telah menggunakan CNF sebagai hidrogen *storage*, energi *storage*, dan filter molekuler. Karena sifatnya yang ringan dan luas permukaan yang besar maka CNF digunakan sebagai superkapasitor dan nanopartikel metal oksida yang dienkapsulasi dalam pori-pori CNF 3D digunakan untuk elektroda baterai lithium. Selain itu, konduktivitas CNF pada suhu kamar dapat mencapai $1,3 \times 10^5$ S/m, dan konduktansi termal dengan rentang yang luas membuat CNF berpotensi diaplikasikan dalam perangkat termoelektrik (Chen *et al.*, 2018).

METODE SINTESIS KARBON NANOFOAM (CNF)

Metode Chemical Vapor Deposition (CVD)

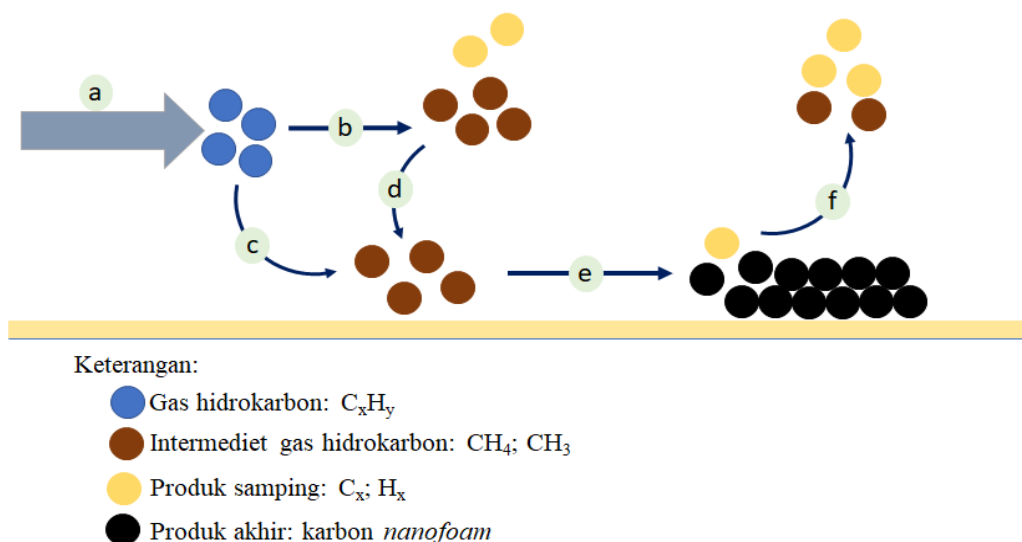
Teknik CVD adalah teknik deposisi *thin-film* yang paling umum digunakan untuk mensintesis nanomaterial, yang melibatkan reaksi kimia di dalam campuran gas berenergi dari sumber karbon serta deposisi ke permukaan substrat (Baran *et al.*, 2013; Karami and Janghorban, 2019). Metode ini memiliki keuntungan dalam menyesuaikan diameter dan kristalinitas melalui kontrol yang tepat dari kondisi sintesis. Metode CVD dianggap sebagai metode yang paling menjanjikan untuk sintesis CNF dalam jumlah besar. Dibandingkan dengan metode lainnya, metode CVD juga lebih murah (Bhaduri, 2021). Material CNF dapat disintesis dengan metode CVD menggunakan gas hidrokarbon atau karbon monoksida di atas permukaan logam (Manawi *et al.*, 2018). Sintesis material CNF telah

dilakukan dengan menggunakan katalis Cu, Li₂CO₃, K₂CO₃, dan CsCO₃ (Qi *et al.*, 2010). Katalis dapat diumpangkan dengan fase gas atau disimpan pada substrat. Reaksi berlangsung pada kisaran suhu 500 – 1500 °C. Proses metode CVD dapat dilihat pada Gambar 1. Gas dikirim ke ruang reaksi yang dioperasikan pada suhu tinggi yang ditentukan dengan tepat. Gas melewati reaktor yang bersentuhan dengan substrat yang dipanaskan. Kemudian terjadi reaksi sehingga membentuk lapisan padat yang diendapkan ke permukaan substrat. Sistem suhu dan tekanan adalah parameter operasi kritis dari proses ini (Charitidis *et al.*, 2014). Zhang dan Sun (2007) telah melakukan sintesis CNF menggunakan gas C₂H₂ sebagai sumber karbon dan K₂CO₃ sebagai katalis (Zhang and Sun, 2007).



Gambar 1. Rangkaian sistem *Chemical Vapor Deposition*.

Metode CVD saat ini dianggap sebagai metode yang paling menjanjikan untuk mensintesis CNF dalam jumlah besar (Bhaduri, 2021). Sintesis nanomaterial dengan *catalytic chemical vapor deposition* (CCVD) memiliki keuntungan yaitu produksi material karbon skala nano dalam jumlah besar dapat dilakukan dengan biaya yang rendah. Faktor penting untuk produksi nanomaterial karbon dengan metode CCVD adalah sistem katalis dan molekul sumber karbon. Nanopartikel logam Fe, Co, dan Ni paling sering digunakan sebagai katalis dalam CCVD. Namun, katalis ini membutuhkan basa atau asam kuat yang sangat pekat untuk menghilangkannya dari material karbon yang dihasilkan. Selain itu, reagen ini cukup mahal dan dapat menimbulkan masalah lingkungan (Zhang and Sun, 2007). Mekanisme pembentukan CNF menggunakan metode CVD diilustrasikan pada Gambar 2. Mekanisme pembentukan CNF menggunakan metode CVD secara umum terdiri dari 6 langkah. Dalam sintesis dengan CVD terjadi dua cara pembentukan yaitu ketika gas hidrokarbon masuk maka akan diangkut ke dalam *quartz* (reaktor) (langkah a) kemudian langsung berdifusi dan mengadsorpsi ke substrat (langkah c) lalu terjadi difusi permukaan dan reaksi heterogen (langkah e) kemudian terjadi pembentukan karbon. Produk sampingan dan spesies yang tidak bereaksi didesorpsi dari permukaan dan dipaksa keluar dari reaktor sebagai gas buang (langkah f) (cara pertama) (Sun *et al.*, 2021).



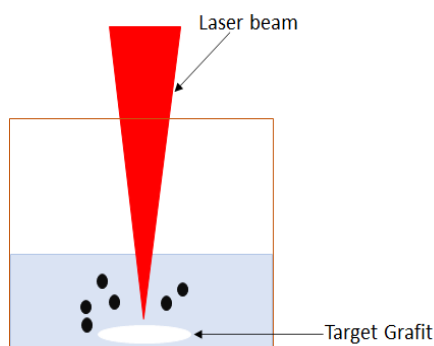
Gambar 2. Mekanisme pembentukan CNF menggunakan metode *Chemical Vapor Deposition*.

Proses pembentukan untuk cara kedua, gas hidrokarbon diangkut ke dalam *quartz* (reaktor) (langkah a) lalu terjadi reaksi fase gas sehingga membentuk intermediet gas hidrokarbon dan produk samping dan diendapkan ke substrat melalui difusi dan adsorpsi (langkah d). Selanjutnya terjadi difusi permukaan dan reaksi heterogen (langkah e) sehingga terjadi pembentukan karbon. Produk sampingan dan spesies yang tidak bereaksi didesorpsi dari permukaan dan keluar dari reaktor sebagai gas buang (langkah f) (Sun *et al.*, 2021).

Metode Laser Ablasi

Teknik laser ablasi melibatkan penggunaan sinar laser terfokus atau *pulsed* laser untuk menghilangkan sejumlah kecil material padat langsung dari prekursor yang menghasilkan fabrikasi struktur. Teknik *pulsed* ablasi laser dengan target padat dalam media cair - *pulsed laser ablation liquid* (PLAL) dianggap sebagai cara mudah untuk menghasilkan berbagai jenis material dalam skala nano (Goswami *et al.*, 2021). Dalam proses PLAL, nanopartikel dikeluarkan dalam bentuk larutan koloid selama pemfokusan *pulse* laser ekstrem pada target padat pelat padat (target grafit) yang direndam dalam media cair (ditunjukkan pada Gambar 3). Proses ini menyebabkan pembentukan gumpalan plasma yang dibatasi oleh liquid sekitar pada suhu yang sangat tinggi (sekitar 4,727 °C) dan tekanan (sekitar 10 GPa). Gelombang kejut dihasilkan oleh *liquid confinement* dari gumpalan plasma yang berkontribusi dalam *quick cooling* dan kondensasi nanopartikel. Material nano dengan distribusi ukuran kecil dapat disesuaikan dengan optimasi dan regulasi parameter, seperti panjang *pulse* laser, energi *pulse* laser, target ablasi dan komposisi larutan (Elfaham *et al.*, 2020; Altowyan *et al.*, 2021; Mostafa *et al.*, 2021). Metode laser ablasi dalam media cair ditunjukkan pada Gambar 3.

Sintesis CNF telah dilakukan dalam media nitrogen, target ditempatkan dalam media dan menggunakan laser dari Nd:YAG *pulsed laser* (1064 nm *wavelength*) berdaya 700 mJ dan durasi sebesar 7 ns, atau menggunakan *fourth harmonic* (266 nm *wavelength*) berdaya 120 mJ yang digunakan untuk ablasi. Target grafit digunakan untuk fabrikasi CNF. Target yang digunakan adalah Pt@CNF dalam bentuk pelet dari campuran bubuk grafit, bubuk platinum, dan asam *hexadecanoic*, di mana asam *hexadecanoic* bekerja sebagai pengikat serbuk tersebut. Grafit yang digunakan untuk target tidak mengandung CNF. Gelembung nitrogen cair terjadi di sepanjang balok jalur karena penyerapan sinar oleh nitrogen cair. Produk dikumpulkan pada microgrid karbon, yang ditempatkan dalam nitrogen cair di dekat target (Kohno *et al.*, 2012). Metode PLAL telah terbukti menjadi *green method* kuat yang mampu menghasilkan nanomaterial dengan berbagai ukuran dan fungsi hanya dengan mengubah parameter laser dan sifat media cair. Media cair yang dapat digunakan dalam metode ini adalah air deionisasi (DI), etanol, dan larutan berbasis magnesium. Titik didih yang rendah dimiliki etanol membuat etanol mudah menguap setelah proses pencetakan dan menggunakan etanol cenderung menghasilkan partikel yang lebih besar dengan distribusi ukuran yang lebih sempit daripada PLAL dalam air deionisasi (Bagga *et al.*, 2015; Nyabadza *et al.*, 2022).



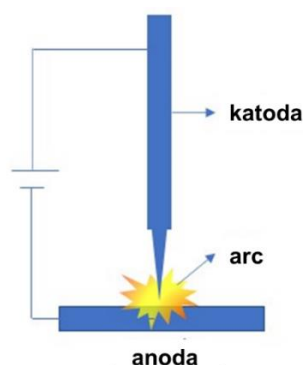
Gambar 3. Rangkaian eksperimen menggunakan metode laser ablasi

Metode Arc-discharge

Metode *arc-discharge* pada umumnya dapat menghasilkan material karbon dalam skala besar dengan kemurnian tinggi dan hemat biaya (Goswami *et al.*, 2021; Maffini *et al.*, 2022). Metode *arc-discharge* merupakan salah satu metode yang efektif untuk menghasilkan nanomaterial karbon tanpa *defect*. Berbagai jenis struktur nano karbon seperti *graphene nanoplatelet* (GNP), *multi-walled carbon nanotube* (MWCNT), *single-walled carbon nanotube* (SWCNT), *carbon nanohorn* (CNH), dan *spherical carbon nanoparticle* (SCN) dapat dikumpulkan dari berbagai *sites* dari *direct current* rektor *arc-discharge*. Berbagai faktor seperti *collection site* dan sifat gas *buffer*

akan mempengaruhi pembentukan struktur dari nanomaterial (Borand *et al.*, 2021). Metode *arc-discharge* dalam media cair merupakan metode yang sederhana dengan biaya yang rendah dan menghindari pemurnian *multistep* (Karami, 2016; Sari *et al.*, 2018). Material karbon yang dihasilkan dengan metode ini memiliki kristalinitas yang tinggi dan memiliki lebih sedikit *defect* dari metode lain. Meskipun suhu nitrogen cair sangat rendah tetapi penguapan yang intens selama *arc-discharge* mencegah pertukaran panas yang tepat antara zat yang dihasilkan dan sekitarnya, sehingga efisiensi pendinginannya kurang dibandingkan dengan air deionisasi (Sari *et al.*, 2018). Biasanya, dalam metode *arc-discharge*, anoda dan katoda pada elektroda yang digunakan terbuat dari batang grafit (Soni *et al.*, 2020). Mekanisme pertumbuhan yang berbeda untuk struktur material karbon pada situs anoda dan katoda berlaku pada reaktor *arc* (Borand *et al.*, 2021).

Rancangan *growth chamber* untuk CNF menggunakan metode *arc-discharge* dengan *pulsed electric* yang dilakukan oleh Saucedo-Jimenez *et al.* (2018) ditunjukkan pada Gambar 4. Sintesis CNF dengan *pulsed electric arc discharge* dengan anoda *spinning* terletak di dalam ruang ruang terbuat dari baja tahan karat, yang dapat dengan mudah modifikasi, dan dapat dilepas dari alasnya serta penutup yang dapat dilepas juga. Untuk melakukan sintesis dengan metode ini, dua elektroda dengan perbedaan potensial antara keduanya dipertimbangkan; elektroda ini memiliki celah minimum 3 mm untuk menghasilkan *electric arc discharge*. Alat dibuat sedemikian rupa sehingga celah ini bervariasi dalam waktu, sehingga *electric arc* tidak dapat dibuat terus menerus. Gambar 4 menunjukkan komponen di dalam *chamber*. Jarak dan pemisahan elektroda telah dibuat dengan cara mekanis, dengan menggunakan anoda melingkar terputus, dibentuk oleh blok campuran katalitik dan blok kosong. katoda terletak pada posisi yang relatif tidak bergerak, sehingga mempertahankan celah yang ditentukan, dan hanya dapat bergerak beberapa milimeter secara vertikal. Anoda berdiameter 10 cm dengan gerakan melingkar konstan, dan di atas cakram ini, ada saluran dengan jari-jari 3,5 cm, kedalaman 5 mm, dan lebar 1,5 cm. Di dalam *channel*, campuran katalitik diendapkan, membentuk blok campuran katalitik padat dengan 16 sektor dengan dimensi yang sama, 8 sektor campuran katalitik dan 8 sektor tanpa pencampuran. Kecepatan sudut konstan diatur dengan kecepatan 600 rpm, arah putaran diatur berlawanan arah jarum jam. Campuran katalis yang digunakan adalah C:Ni:Fe:Co:S dengan perbandingan fraksi mol 93,84:2,56:1,43:0,69:1,48 (Saucedo-Jimenez *et al.*, 2018).



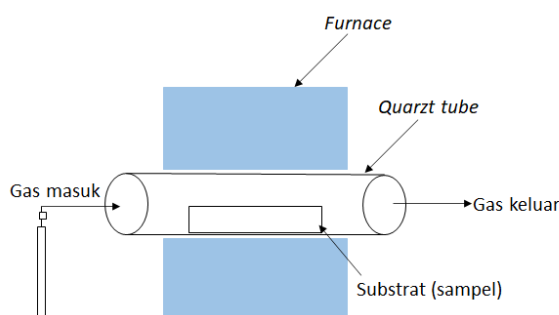
Gambar 4. Rangkaian eksperimen metode *arc-discharge* dengan *pulsed electric*

Metode Pirolisis

Metode pirolisis merupakan metode dimana terjadinya dekomposisi kimia dari bahan atau material organik tanpa atau sedikit oksigen. Sintesis CNF dengan metode ini biasanya menggunakan bahan organik sebagai sumber karbonnya. Pada penelitian Li *et al.* (2020) sintesis CNF dilakukan menggunakan agar *powder* sebagai sumber karbon dan NaCl sebagai katalisnya. Dalam proses sintesisnya, agar *powder* dan NaCl dilarutkan dalam air deionisasi (DI) dan dilakukan pengadukan pada suhu 90 °C hingga membentuk hidrosol lalu didinginkan kemudian di *freeze-drying* pada -75 °C dalam kondisi vakum. Agar/NaCl yang diperoleh dipanaskan di bawah atmosfer argon pada 700 °C selama 2 jam. Desain rangkaian eksperimen dengan metode pirolisis ditunjukkan pada Gambar 5. Material yang diperoleh berupa material CNF dengan struktur yang sangat berpori dengan *framework* 3D yang *cross-linked*. CNF yang terinterkoneksi secara 3D memiliki dengan pori sekunder 200 nm dan densitas sebesar 7,5 mg/cm serta luas permukaan sebesar 365 m²/g (Li *et al.*, 2020).

Selain itu, sintesis CNF dengan metode ini juga telah dilakukan oleh Rayskaya *et al.* (2018) menggunakan propana dan butana. Metode sintesis yang diusulkan terdiri atas dua langkah yaitu konversi gas hidrokarbon *light* menjadi produk cair (langkah pertama) kemudian kapsul yang diisi dengan *glass cutting* ditempatkan dalam

reaktor horizontal, dan dipanaskan dalam media gas inert dengan suhu 850 – 950 °C (langkah kedua). Campuran gas hidrokarbon (Propana:butana (1:2 v/v)) dan nitrogen dengan perbandingan 1:1 v/v dimasukkan ke dalam reaktor. Produk yang diperoleh ditempatkan dalam tungku dengan suhu tinggi (850 °C), proses *foaming* terjadi dengan adanya oksigen sehingga terbentuk material karbon dengan struktur seluler (Rayskaya *et al.*, 2018). Menurut Kordas dan Pitkänen (2019), CNF dapat diperoleh dari melamin *foam* pada suhu 800 °C selama 60 menit dalam aliran gas N₂ (150 mL/menit). Laju pemanasan 15 °C/menit hingga 300 °C, dan 2 °C/menit dari 300 hingga 800 °C diterapkan. Material yang diperoleh dibilas dan disonikasi dalam air deionisasi dan dikeringkan pada 70 °C semalaman untuk menghilangkan pengotor Na⁺ (Kordas and Pitkänen, 2019). Tabel 1 menunjukkan ringkasan terkait dengan sintesis dan karakterisasi dari CNF dalam berbagai metode.



Gambar 5. Rangkaian eksperimen dengan metode pirolisis.

STRUKTUR CARBON NANOFOAM (CNF)

Atom-atom karbon dalam CNF memiliki hibridisasi sp² dan sp³. Atom karbon sp² dalam CNF memiliki struktur seperti grafit yang saling terhubung oleh atom karbon sp³ sehingga menghasilkan struktur berpori. CNF dianggap sebagai struktur grafit dengan meningkatnya jarak *interlayer* Van der Waals secara signifikan. Hibridisasi atom karbon sp² yang diubah menjadi sp³ membuat lapisan grafit yang interkoneksi menjadi kaku sehingga struktur yang dihasilkan memiliki pori yang banyak dan stabil pada densitas yang sangat rendah (Kuc and Seifert, 2006; Zhang *et al.*, 2019b). Struktur *band electronic* dan densitas *electronic* dari alotrop *foam* bergantung pada ukurannya seperti pada karbon *nanotube*. CNF dalam bentuk *bulky* memiliki modulus dalam kisaran antara grafit 5,5 GPa dan *diamond* 514 GPa sehingga memiliki struktur hibridisasi sp²–sp³ yang stabil. Sifat khas dari CNF yang memiliki densitas yang rendah dengan porositas tinggi membuat CNF menarik untuk dijadikan sebagai material hidrogen *storage* (Kuc and Seifert, 2006). Perbedaan densitas dari berbagai material karbon dapat dilihat pada Tabel 2.

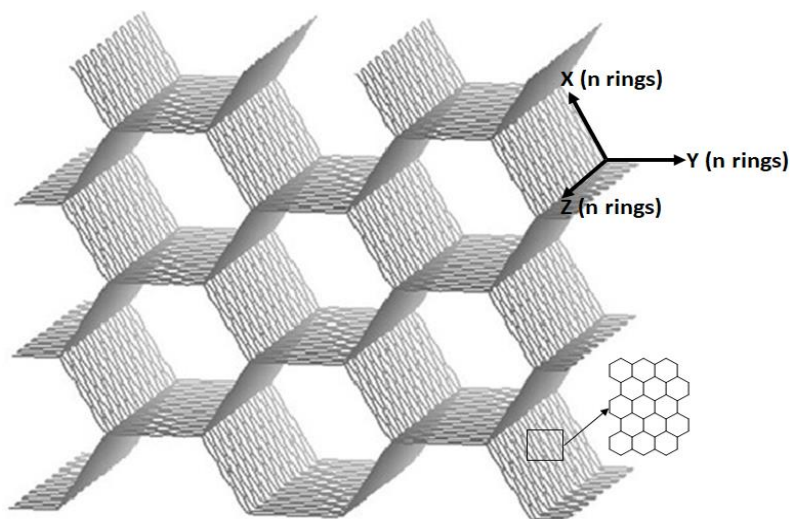
Tabel 2. Ukuran densitas dari berbagai material karbon dengan variasi metode sintesisnya

Material Karbon	Densitas (g/cm ³)	Referensi
Carbon nanotube	1,60	(Mitchell <i>et al.</i> , 2015)
Nanodiamond	3,515	
Grafit	2,267	(Mitchell <i>et al.</i> , 2015)
Carbon nanofoam (CNF)	0,007	(Ola <i>et al.</i> , 2019)
Karbon amorf	1,8 – 2,1	(Altowyan <i>et al.</i> , 2021)

Material 3D CNF disebut juga sebagai karbon *honeycombs* dapat dianggap sebagai struktur grafit dengan peningkatan jarak *interlayer* yang besar (Zhang *et al.*, 2019a). Pola tepi yang terbuka pada membuat material ini memiliki 2 jenis struktur yang dapat terbentuk yaitu struktur *foam zigzag* dan *armchair*, dalam analogi dengan nomenklatur karbon *nanotube* (Seifert *et al.*, 2011). Kuc dan Seifert (2006), menyatakan bahwa jenis CNF sebagai *zigzag* (n,m) dan *armchair* (n,m). Contoh struktur CNF dengan jumlah unit tiga cincin ditunjukkan pada Gambar 6. Nilai modulus Young ditentukan berdasarkan densitas interkoneksi, dan konduktivitas listrik *armchair honeycombs* yang besarnya berdasarkan 3n *dependency* sedangkan *zigzag honeycombs* ditentukan berdasarkan logam. Sifat transport elektron dan fonon dari CNF adalah anisotropi kuat yang mencerminkan anisotropi geometrisnya. Transport fonon di sepanjang sumbu CNF sangat rendah dibandingkan dengan grafit (Zhang *et al.*, 2019a).

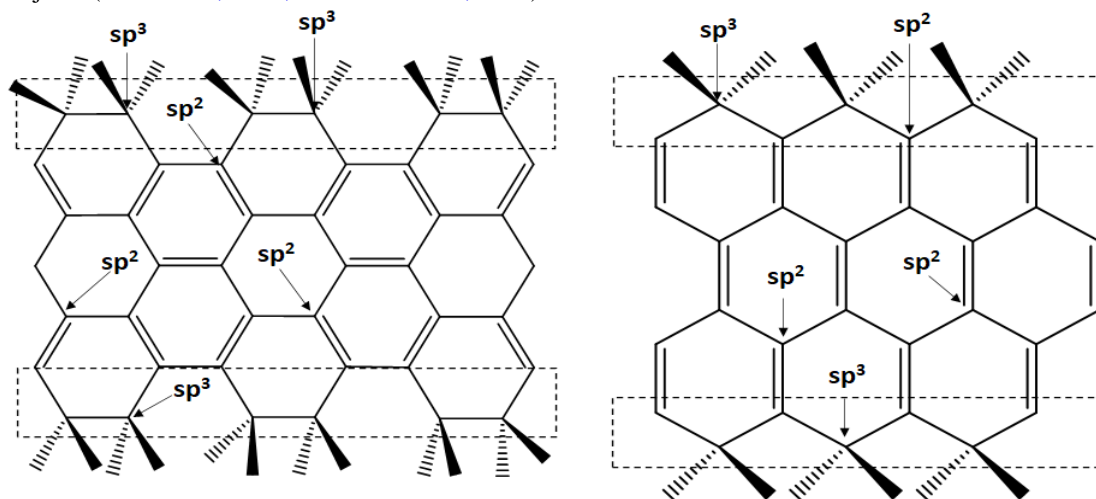
Tabel 1. Sintesis CNF menggunakan beberapa metode dan hasil karakterisasinya.

Metode	Sumber karbon	Kondisi eksperimen	Struktur/dimensi/ukuran	Referensi
<i>Chemical Vapor Deposition (CVD)</i>	Gas C ₂ H ₂	Laju alir gas 30 cm ³ /menit; suhu 300 °C; tekanan 0,3 – 1,0 Torr; waktu reaksi 30 menit	Spherical 3D ukuran 80 – 100 nm	(Zhang <i>et al.</i> , 2019b)
	Gas C ₂ H ₂	Katalis K ₂ CO ₃ ; suhu 700 °C; laju alir gas 50 cm ³ /min; waktu reaksi 60 menit	Padatan yang <i>highly porous</i> dengan <i>interconnected</i> pori berukuran 150 nm	(Zhang and Sun, 2007)
	Gas C ₂ H ₂	Laju alir gas 50 cm ³ /menit; suhu 800 °C; waktu reaksi 30 menit	Struktur sel terbuka dengan ukuran sel 500 µm	(Xiao <i>et al.</i> , 2013)
<i>Laser ablation</i>	<i>Glassy carbon</i>	Laju <i>highrepetition</i> laser 2 – 25 kHz; <i>base</i> vakum ~5 × 10 ⁻⁷ Torr yang diisi dengan gas Ar; suhu 1 – 10 eV	Struktur <i>web-like</i> ukuran 6 nm dan struktur <i>schwarzsites</i> hiperbolik dengan skala <i>space</i> sekitar 5,6 ± 0,4 Å	(Rode <i>et al.</i> , 2004)
	-	Substrat <i>ceramic tile</i> ; tekanan atmosfer; Baasel Lasertech Nd:YAG laser (λ= 1.064 µm, 57 W) <i>scan rate</i> 100 mm/s (<i>spot size</i> 60 µm)	CNF diameter 5 – 30 nm	(Muñoz <i>et al.</i> , 2010)
	<i>Glassy carbon</i>	Laser ablasi dengan <i>high-repetition-rate</i> pada Ar	Lembaran <i>graphite-like</i> dengan <i>hyperbolic curvature</i> berukuran 6 nm	(Rode <i>et al.</i> , 2005)
	-	laser ablasi <i>pulsed</i> grafit pada nitrogen cair (λ = 1064 nm, daya 700 mJ, dan durasi <i>pulse</i> 7 ns)	CNF membentuk nanopartikel berukuran 100 nm	(Kohno <i>et al.</i> , 2012)
<i>pulsed electric Arc-discharge</i>	-	Anoda = <i>spinning carbon disc</i> berdiameter 10 cm; katoda=batang grafit murni berdiameter 6 mm; katalis campuran C/Ni/Fe/Co/S; suhu 60 °C; 200 torr tekanan H ₂	Konsentrasi CNF di atas permukaan anoda dan katoda masing-masing adalah 11,94%, dan 81,82%. CNF berukuran 2,7 – 30 nm	(Saucedo-Jimenez <i>et al.</i> , 2018)
	Agar powder	Katalis NaCl; suhu 700 °C; tekanan atmosfer Ar; waktu reaksi 2 jam; laju pemanasan 10 °C/menit.	Terinterkoneksi secara 3D dengan pori sekunder 200 nm dan densitas sebesar 7,5 mg/cm serta luas permukaan sebesar 365 m ² /g	(Li <i>et al.</i> , 2020)
Pirolisis	Propana dan butana	propana-butana (2:1 v/v); suhu 850 °C; laju aliran total reagen gas 200 – 250 dm ³ /jam	CNF dengan <i>single</i> fase dengan struktur heksagonal dan luas permukaan <30 m ² /g serta densitas 0,02 g/cm ³	(Raiskaya <i>et al.</i> , 2021; Rayskaya <i>et al.</i> , 2018)
	Sukrosa	Penambahan EDGE, PEI, PVA; pemanasan pada suhu 500 – 1200 °C; dibawah tekanan Ar.	CNF berpori hierarkis dengan <i>strong</i> 3D <i>network skeleton</i> dan ukuran pori 8 – 10 nm, densitas 0,089 – 0,195 g/cm ³ serta porositas 86,5 – 94,9%.	(Wu <i>et al.</i> , 2022)
	Melanin foam	Suhu 800 °C; laju pemanasan 2 dan 15 °C/menit waktu reaksi 60 menit; dalam aliran gas N ₂ (150 mL/menit).	Melanin <i>foam</i> mengalami penyusutan volume (~90%) dan massa yang signifikan (~90%); struktur pori terbuka tetap tidak berubah; <i>Carbon foam</i> memiliki modulus Young sebesar 1 – 65 kPa.	(Mitchell <i>et al.</i> , 2015)



Gambar 6. Contoh struktur *carbon nanfoam* (3,3) (Zhang *et al.*, 2019a)

Ukuran pori dari CNF ditentukan oleh dua angka (n,m) atau dua bilangan bulat, yang menunjukkan jumlah unit heksagonal antara *junctions* pada struktur CNF. *Junctions* terdiri atas rantai *boundary-atom* sp^3 . Dua angka ini akan membedakan antara kemungkinan CNF membentuk struktur asimetris dengan ukuran $n \neq m$ dan struktur simetris dengan ukuran $n = m$. *Boundary-atom* pada struktur *zigzag* dan *armchair* dari CNF ditunjukkan pada Gambar 7. Rantai sambungan yang tak terbatas yang terdapat pada setiap *junctions* menghasilkan jaringan 3D berpori, yang menyerupai struktur *foam*. Karena bentuk tepi dan lebar yang berbeda membuat CNF memiliki banyak jenis (Chen *et al.*, 2018; Umemoto *et al.*, 2001).



Gambar 7. *Boundary-atom carbon nanfoam* (A) *armchair* dan (B) *zigzag* (Kuc and Seifert, 2006)

Seperti yang diketahui bahwa CNF mengandung atom hibridisasi sp^2 dan sp^3 sehingga dapat dianggap sebagai material yang dibangun dari bidang *graphene* yang saling *interconnected* secara kaku satu sama lain pada sudut 120° dan membentuk rantai linier atom yang terikat secara sp^3 di sepanjang persimpangan atau *junctions*, yang memiliki tiga lapisan *graphene* yang bertemu menghasilkan penampang berbentuk sarang lebah dari *nanfoam* dan membentuk struktur yang heksagonal dan akan menghasilkan struktur yang non-heksagonal apabila lapisan bidang tersebut tidak terhubung satu sama lain pada sudut 120° . CNF sendiri juga dapat dianggap sebagai struktur *AA-stacked graphite*, dengan jarak antar lapisan yang meningkat secara signifikan sehingga angka n menggambarkan panjang fragmen *graphene* yang dihubungkan bersama oleh m-*graphene* atau n-*stripes* difungsikan oleh fragmen m. Oleh karena itu, m akan menentukan jarak antar lapisan sebagai $d = \sqrt{3}M$ (Seifert *et al.*, 2011; Umemoto *et al.*, 2001). Parameter geometri CNF ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter geometri struktur simetris *zigzag* dan *armchair* CNF.

Struktur	Jenis ikatan	Panjang ikatan (Å)	Angle	Angle value (°)	Referensi
<i>Zigzag</i> CNF	(1,1)	sp ² -sp ²	C-C-C	113,78	(Kuc and Seifert, 2006)
		sp ² -sp ³	C-sp ² -C	120,00	
		sp ³ -sp ³	C-sp ³ -C	109,11	
	(2,2)	sp ² -sp ²	C-C-C	116,67	
		sp ² -sp ³	C-sp ² -C	120,00	
		sp ³ -sp ³	C-sp ³ -C	109,16	
	(3,3)	sp ² -sp ²	C-C-C	117,72	
		sp ² -sp ³	C-sp ² -C	120,00	
		sp ³ -sp ³	C-sp ³ -C	109,17	
	(4,4)	sp ² -sp ²	C-C-C	118,26	
		sp ² -sp ³	C-sp ² -C	120,00	
		sp ³ -sp ³	C-sp ³ -C	109,16	
	(5,5)	sp ² -sp ²	C-C-C	118,60	
		sp ² -sp ³	C-sp ² -C	120,00	
		sp ³ -sp ³	C-sp ³ -C	109,17	
<i>Armchair</i> CNF	(5,5)	sp ² -sp ³	sp ³ -sp ² -sp ³	108,81	(Seifert <i>et al.</i> , 2011)
		sp ² -sp ²	sp ² -sp ² -sp ²	120,27	
	(4,4)	sp ² -sp ³	sp ³ -sp ² -sp ³	109,23	
		sp ² -sp ²	sp ² -sp ² -sp ²	120,41	
	(3,3)	sp ² -sp ³	sp ³ -sp ² -sp ³	110,07	
		sp ² -sp ²	sp ² -sp ² -sp ²	120,63	
	(2,2)	sp ² -sp ³	sp ³ -sp ² -sp ³	110,46	
		sp ² -sp ²	sp ² -sp ² -sp ²	120,87	

KARAKTERISASI CARBON NANOFOAM (CNF)

Karakterisasi dengan menggunakan teknik *X-Ray diffraction* (XRD) dapat memberikan informasi mengenai kristalografi dari material dan teknik spektroskopi dapat digunakan untuk menentukan urutan keseluruhan karbon dan rasio sp²/sp³. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Rao *et al.* (2020), Pola XRD dari CNF menunjukkan bahwa CNF memiliki sifat amorf yang ditandai dengan adanya dua puncak difraksi yang luas diamati pada sekitar 22° dan 42° masing-masing sesuai dengan bidang kristal (002) dan (100). Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan Bragg ($n\lambda = 2d \times \sin \theta$), diperoleh jarak antarlapisan pada bidang (d_{002}) sebesar 0,406 nm (Rao *et al.*, 2020). Struktur mikro dari material karbon telah banyak diketahui dengan penerapan *transmission electron microscopy* (TEM).

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa karbon memiliki berbagai macam bentuk yang berbeda, seperti grafit, *diamond*, *graphene*, *nanof foam*, *nanofiber*, *nanotube*, *glass carbon*, *coke*, dan *char*. Karakterisasi dengan TEM memiliki kemampuan yang lebih baik untuk mengungkapkan struktur mikroskopis karbon hingga ke tingkat atomnya. Karbon hitam (*black carbon*) merupakan salah satu material karbon pertama yang dipelajari menggunakan TEM, yang menetapkan bahwa karbon hitam (*black carbon*) terdiri dari partikel *spheroidal* agregat dengan partikel berukuran 50 – 100 nm (Harris, 2018). *High-resolution transmission electron microscopy* (HR-TEM) dari *nanof foam* mengungkapkan karakteristik pola dari lembaran-lembaran grafik yang melengkung secara hiperbolik. CNF memiliki *spin density* tertinggi yang dilaporkan untuk solid karbon murni tiga dimensi, meskipun telah diketahui bahwa *spin density* yang sama tinggi telah dilaporkan untuk karbon amorf *rich-sp³* sebagai film tipis (Rode *et al.*, 2004).

Karakterisasi menggunakan TEM, material CNF yang telah disintesis oleh Rode *et al.* (2004) menggunakan metode laser ablasi menunjukkan struktur internal dari CNF adalah *spherical*, dengan nanopartikel karbon terikat satu sama lain. Kerangka CNF seperti *continuous sponge* dengan pori-pori makro yang saling berhubungan mulai dari 0,5 – 1 µm. Mikrograf HR-TEM menunjukkan bahwa kerangka karbon mengandung pori-pori meso dan makro yang saling bersambung. Selain itu, pori-pori mikro dengan diameter di bawah 2 nm juga dapat ditemukan pada gambar HR-TEM. Mikrograf TEM resolusi rendah menunjukkan CNF dengan struktur *web-like* memiliki diameter 4 – 9 nm dan ukuran rata-rata 6 nm. Pola difraksi pada *inset* menunjukkan cincin yang sangat lebar yang menunjukkan tidak adanya *long-range* 3D yang beraturan pada CNF. *Fourier transforms* dan *electron diffraction patterns* dari mikrograf HR-TEM menunjukkan adanya struktur *schwarzites* hiperbolik dengan skala *space* sekitar

$5,6 \pm 0,4 \text{ \AA}$. Jumlah atom karbon per *cluster* diperkirakan $\sim 1,2 \times 10^4$ (BM $1,38 \times 10^5$) dan densitas *cluster* sebesar $1,95 \text{ g/cm}^3$ (Rode *et al.*, 2004).

Schwarzites adalah struktur *network* berbasis karbon 3D dengan *zero mean curvature* dan *curvature* Gaussian negatif yang diidealkan. Adanya cincin karbon lebih dari enam atom dalam heksagonal *grafit-like* akan menghasilkan struktur yang stabil dengan *curvature* yang analog dengan zeolit. *Schwarzites* memiliki sifat mekanik yang sangat baik dan sifat elektronik yang beragam dengan ukuran dan bentuk sel yang dapat diatur. Struktur garis kristal ini dapat memiliki sel unit besar (ratusan atom) dan berpori yang membentuk bahan seperti *rigid foam* dengan sifat magnet dan listrik yang tidak biasa (Sajadi *et al.*, 2017; Sajadi *et al.*, 2021).

Wawasan mengenai ikatan atom pada CNF dapat diketahui dengan analisis menggunakan XPS. Karakterisasi dengan XPS sangat baik untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang ada di permukaan material Berdasarkan penelitian Zhang *et al.* (2019b), spektra XPS O1s menunjukkan adanya puncak kecil O1s yang dapat dihasilkan dari pengotor selama sintesis dan *pasca treatment*. Spektrum C1s dari CNF yang didekonvolusi menjadi tiga sub-puncak pada 284,6, 286,3, dan 288,8 eV, yang masing-masing menunjukkan adanya ikatan C=C/C-C, C-O, dan C(O)O. Selama proses dengan adanya perlakuan termal yang diterapkan membuat sudut ikatan mungkin telah terlepas dari struktur, dan ikatan tetrahedral mungkin telah rusak dan diubah menjadi ikatan trigonal, yang dikaitkan dengan penurunan persentase ikatan sp^3 dan peningkatan komposisi grafit dalam material. Efek grafitisasi dan oksigen tereduksi dapat menguntungkan konduktivitas CNF (Zhang *et al.*, 2019b).

Pada penelitian lainnya, spektra XPS dari CNF yang terdiri dari spektrum karbon C1s dan oksigen O1s. Pada spektra C1s terdapat empat puncak. Puncak pertama C1s pada 284,5 eV diamati sebagai karbon (C-C) dalam *grafit-like*, puncak kedua C1s ditemukan pada 286,0 eV diamati sebagai karbon yang terikat tunggal dengan oksigen (C-O) dalam fenol dan eter, puncak ketiga C1s ditemukan pada 286,6 eV menunjukkan ikatan C=O dalam keton dan kuinon, dan puncak keempat C1s pada 289,2 eV menunjukkan karbon terikat pada dua oksigen (-COO) sebagai inkarboksil, anhidrida karboksilat dan ester. Selain itu, spektra O1s memiliki dua puncak yang menunjukkan ikatan O=C pada 533,2 eV dalam bentuk kuinon, keton dan aldehida dan ikatan O-C pada 536.6 eV dalam bentuk eter dan fenol (Agrawal *et al.*, 2016).

Analisis FTIR pada CNF menunjukkan adanya puncak pada bilangan gelombang 3408, 2885 dan 1613 cm^{-1} masing-masing menunjukkan adanya gugus hidroksil, C-H alifatik dan C=C *stretching*. Pada bilangan gelombang 1356 dan 1074 cm^{-1} masing-masing dikaitkan dengan gugus C-H dan C=C serta puncak dengan intensitas rendah pada *wavenumber* 633 cm^{-1} dikaitkan dengan vibrasi gugus C-H (Rao *et al.*, 2020). Analisis FTIR pada penelitian Zhang *et al.* (2019b), pada hasil spektra FTIR menunjukkan adanya beberapa puncak pada bilangan gelombang $2931 - 2872 \text{ cm}^{-1}$ yang merupakan serapan gugus C-H. Pada bilangan gelombang 1713, $1031 - 891$, $1713 - 1618$, dan $1452 - 1377 \text{ cm}^{-1}$ masing-masing menunjukkan adanya serapan dari gugus fungsi C=O, C=C-H, C=C, dan C-H (Zhang *et al.*, 2019b).

Karakterisasi CNF menggunakan analisis Raman CNF pada penelitian Mitchell *et al.* (2015) menunjukkan bahwa dengan menentukan rasio antara dua pita (I_D/I_G), ukuran *defect density* dapat diketahui. Selain itu, rasio intensitas antara pita D dan G dapat digunakan untuk menentukan derajat grafitisasi suatu sampel dan untuk membedakan struktur atom teratur dan tidak teratur dari material. Spektrum Raman mengindikasikan adanya dua puncak khas untuk pita G pada *Raman shift* 1589 cm^{-1} dan pita D pada 1371 cm^{-1} (Mitchell *et al.*, 2015). Hasil analisis Raman ini juga mirip dengan hasil yang diperoleh Seral-Ascaso *et al.* (2013), adanya pita D dan G yang berpusat pada sekitar 1360 cm^{-1} (D-band) dan sekitar 1590 cm^{-1} (G-band) yang melebar dengan intensitas yang setara, menunjukkan ciri khas dari karbon terikat sp^2 jarak pendek. Pita melebar ini menunjukkan tingginya *defect* pada material CNF yang dihasilkan (Seral-Ascaso *et al.*, 2013). Pita G memiliki intensitas yang jauh lebih tinggi daripada pita D, yang menunjukkan adanya struktur dinding grafit yang signifikan, mungkin dengan ketebalan lapisan tunggal atau sedikit. Intensitas pada D-band yang relatif rendah menunjukkan bahwa CNF mengandung sedikit karbon dalam hibridisasi selain sp^2 (Mitchell *et al.*, 2015). Intensitas pita D biasanya 100 kali lebih kecil dari pada pita G. Puncak D-band yang besar dibandingkan dengan intensitas puncak G-band biasanya menunjukkan adanya karbon amorf (Saucedo-Jimenez *et al.*, 2018).

Sifat fisik dari CNF seperti luas permukaan, ukuran pori, dan volume pori dapat dianalisis menggunakan *surface area analyzer* (SAA). Hattori *et al.* (2016) melaporkan bahwa CNF merupakan material berpori (mikropori) dengan ukuran pori 1,1 – 1,7 nm dan luas permukaan $388 - 1120 \text{ m}^2/\text{g}$ (Hattori *et al.*, 2016). Hasil penelitian yang diperoleh Seral-Ascaso *et al.* (2013) mengungkapkan bahwa CNF yang dihasilkan dari PPh₃ dan naftalena menggunakan metode ablasi laser menunjukkan material mesopori dengan luas permukaan sebesar 33 dan $63 \text{ m}^2/\text{g}$ dan volume mesopori sebesar 0,046 hingga $0,168 \text{ cm}^3/\text{g}$, masing-masing. Sedangkan untuk CNF yang

dihasilkan dari metode pulsed laser ablatasi dari HOPG memiliki luas permukaan sebesar 300 – 400 m²/ g dan densitas 1,66 g/cm³. Nilai densitas dari CNF ini lebih besar dari yang dilaporkan untuk CNF yang disintesis menggunakan laser *ultrafast* yakni sebesar 0,02 – 0,20 g/cm³ (Seral-Ascaso *et al.*, 2013). Metode sintesis dan karakterisasi CNF menggunakan analisis spektroskopi dan mikroskopi dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Karakterisasi CNF dari beberapa metode sintesisnya.

Metode Sintesis	Analisis				Referensi
	Raman	SEM/TEM	XRD	FTIR	
Chemical vapor deposition	-	Memiliki sel terbuka dengan ukuran 500 μm dan ukuran window berkisar 50 – 400 μm; permukaan yang kasar; CNF berinding tabung dengan diameter 20 – 100 nm.	-	C=O (1713 cm ⁻¹), C=C-H (1031 – 891 cm ⁻¹), C=C (1713 – 1618 cm ⁻¹), dan C-H (1452 – 1377 cm ⁻¹)	(Xiao <i>et al.</i> , 2013; Zhang <i>et al.</i> , 2019b)
Laser ablatasi	D-band (1355 cm ⁻¹) dan G-band (1588 cm ⁻¹)	Layer CNF mirip dengan graphene; berdiameter 3 – 10 nm; terdiri dari 1 – 4 lapisan graphene; jarak antar lapisan 0,037±0,003 nm; partikelnya berukuran 100 nm	-	-	(Muñoz <i>et al.</i> , 2010; Kohno <i>et al.</i> , 2012)
Arc-discharge	D-band (1338 cm ⁻¹) dan G-band (1549 cm ⁻¹); I _D /I _G = 0,49	Struktur CNF mirip dengan nanotube dengan diameter 2,7 nm dan panjang 100 nm	-	-	(Saucedo-Jimenez <i>et al.</i> , 2018)
Pirolisis dan pembakaran	D-band (1320 cm ⁻¹) dan G-band (1600 cm ⁻¹)	Karbon 3D yang <i>interconnected</i> dengan pori-pori makro dan mesopori; diameter 1 – 2 μm; ukuran pori 2 – 5 nm	25° C(002) dan 45° C(100)	C=O (1709 cm ⁻¹), C=O/C=C/OH (1660 cm ⁻¹), dan C–O (1200 – 1000 cm ⁻¹)	(Zhou and Chen, 2016; Li <i>et al.</i> , 2020; Mitchell <i>et al.</i> , 2015)

KESIMPULAN

Material CNF memiliki ukuran 3D yang strukturnya terbuka dan saling berhubungan dapat disintesis melalui metode CVD, laser ablatasi, pirolisis dan *arc-discharge* menghasilkan CNF dalam berbagai ukuran. Pola tepi yang terbuka pada CNF membuatnya memiliki 2 jenis struktur yang dapat terbentuk yaitu struktur *foam zigzag* (n,m) dan *armchair* (n,m). Ukuran pori pada CNF bergantung pada nilai dari nilai n dan m. Karakterisasi dengan menggunakan TEM mengungkapkan struktur mikro dari material karbon sebesar 2 – 10 nm. Berdasarkan karakterisasi dengan FTIR dan XPS menunjukkan CNF memiliki gugus C=C/C–C, C–O/C=O, C–H, fungsi C=C–H, dan C(O)O. Intensitas pada D-band yang relatif rendah menunjukkan CNF lebih banyak mengandung karbon dalam hibridisasi sp². Material CNF memiliki luas permukaan sebesar 300-1100 m²/g dan ukuran pori sebesar 1 – 2 nm. Karakterisasi dengan analisis spektroskopi dan mikroskopi mengungkapkan karakteristik CNF hingga ke tingkat atom serta pola dari layer yang terdapat pada CNF.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini didukung oleh program Penelitian Dana Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi Nomor kontrak 673.1/UN27.22/PT.01.03/2022 pada Penelitian Tesis Master oleh Kementerian Riset dan Teknologi/Badan Riset dan Inovasi Nasional.

DAFTAR PUSTAKA

Agrawal, P., Kumar, R., Uppal, H., Singh, N., Kumari, S. and Dhakate, S. 2016. Novel 3D Lightweight Carbon Foam as an Effective Adsorbent for Arsenic (V) Removal from Contaminated Water. *RSC Advances*, 6 (36),

- 29899–29908. <https://doi.org/10.1039/C6RA02208A>.
- Altowyan, A. S., Mostafa, A. M. and Ahmed, H. A. 2021. Effect of Liquid Media and Laser Energy on The Preparation of Ag Nanoparticles and Their Nanocomposites with Au Nanoparticles Via Laser Ablation for Optoelectronic Applications. *Optik*, 241, 167217. <https://doi.org/10.3390/nano11082142>.
- Bagga, K., Mccann, R., Wang, M., Stalcup, A., Vázquez, M. and Brabazon, D. 2015. Laser Assisted Synthesis of Carbon Nanoparticles with Controlled Viscosities for Printing Applications. *Journal of Colloid and Interface Science*, 447, 263–268. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2014.10.046>.
- Baran, D., Yardim, M. F., Atakül, H. and Ekinçi, E. 2013. Synthesis of carbon foam with high compressive strength from an asphaltene pitch. *New Carbon Materials*, 28(2), 127–132. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(13\)60071-2](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(13)60071-2).
- Bhaduri, B. 2021. Synthesis of Cu Catalyzed Chemical Vapor Deposition Grown Cu-Cnfs on Less Porous Graphite Powder. *Materials Letters*, 305. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130828>.
- Borand, G., Akçamlı, N. and Uzunsoy, D. 2021. Structural Characterization of Graphene Nanostructures Produced Via Arc Discharge Method. *Ceramics International*, 47(6), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.11.158>.
- Charitidis, C. A., Georgiou, P., Koklioti, M. A., Trompeta, A.-F. and Markakis, V. 2014. Manufacturing Nanomaterials: from Research to Industry. *Manufacturing Review*, 1(1), 1–19. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2014009>.
- Chen, S.Z., Zhou, W.X., Yu, J.-F. and Chen, K.Q. 2018. Nanoporous Carbon Foam Structures with Excellent Electronic Properties Predicted by First-Principles Studies. *Carbon*, 129, 809–818. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.12.102>.
- Cisquella-Serra, A., Magnani, M., Madou, M. and Gamero-Castaño, M. 2022. Conformal CVD of WO_{3-x} on Electrospun Carbon Nanofiber Mats Assisted by Joule Heating. *Carbon*, 195, 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.04.014>.
- Elfaham, M., Abdel-Wahab, M. and Mostafa, A. 2020. Effects of Post-Laser Irradiation on the Optical and Structure Properties of Al₂O₃ Nanoparticles Produced by Laser Ablation. *Journal of Applied Physics*, 128(15). <https://doi.org/10.1063/5.0022554>.
- Garg, S., Garg, A., Sahu, N. K. and Yadav, A. K. 2019. Synthesis and Characterization of Nanodiamond-Anticancer Drug Conjugates for Tumor Targeting. *Diamond and Related Materials*, 1(94), 172–185. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2019.03.008>.
- Goswami, A. D., Trivedi, D. H., Jadhav, N. L. and Pinjari, D. V. 2021. Sustainable and Green Synthesis of Carbon Nanomaterials: A Review. *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, 9(106118), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106118>.
- Harris, P. 2018. Transmission Electron Microscopy of Carbon: A Brief History. *Journal of Carbon Research*, 4(1), 1–17. <https://doi.org/10.3390/c4010004>.
- Hattori, Y., Shuhara, A., Kondo, A., Utsumi, S., Tanaka, H., Ohba, T., Kanoh, H., Takahashi, K., Vallejos-Burgos, F. and Kaneko, K. 2016. Fabrication of Highly Ultramicroporous Carbon Nanofoams by SF₆-Catalyzed Laser-Induced Chemical Vapor Deposition. *Chemical Physics Letters*, 652, 199–202. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2016.04.050>.
- Inagaki, M., Qiu, J. and Guo, Q. 2015. Carbon foam: Preparation and Application. *Carbon*, 1(87), 128–152. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.02.021>.
- Karami, B. and Janghorban, M. 2019. On the Dynamics of Porous Nanotubes with Variable Material Properties and Variable Thickness. *International Journal of Engineering Science*, 1(136), 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2019.01.002>.
- Karami, H. 2016. Synthesis of Magnetite/ Hematite/ Iron Nanocomposites by the Low Voltage Arc Discharge in Water in the Presence of External Magnetic Field. *International Journal of Electrochemical Science*, 11(4), 3074–3085. <https://doi.org/10.20964/110403074>.
- Kohno, H., Tatsutani, K. and Ichikawa, S. 2012. Carbon Nanofoam Formed by Laser Ablation. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 12(3), 2844–2848. <https://doi.org/10.1166/jnn.2012.5811>.
- Kordas, K. and Pitkänen, O. 2019. Piezoresistive Carbon Foams in Sensing Applications. *Frontiers in Materials*, 6(93), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00093>.
- Kuc, A. and Seifert, G. 2006. Hexagon-Preserving Carbon Foams: Properties of Hypothetical Carbon Allotropes. *Physical Review B*, 74(214104), 1–10. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.74.214104>.
- Letellier, M., Szczurek, A., Basso, M.-C., Pizzi, A., Fierro, V., Ferry, O. and Celzard, A. 2017. Preparation and Structural Characterisation of Model Cellular Vitreous Carbon Foams. *Carbon*, 1(112), 208–218.

- <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.11.017>.
- Li, Z., Xu, J., Sun, D., Lin, T. and Huang, F. 2020. Nanoporous Carbon Foam for Water and Air Purification. *ACS Applied Nano Materials*, 3(2), 1564–1570. <https://doi.org/10.1021/acsnm.9b02347>.
- Lin, K., Fang, H., Wen, F., Wang, L., Jiang, W. and Li, J. 2019. Ultra-Strong Nanographite Bulks Based on A Unique Carbon Nanotube Linked Graphite Onions Structure. *Carbon*, 1(149), 436–444. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.04.054>.
- Lin, Q., Luo, B., Qu, L., Fang, C. and Chen, Z. 2013. Direct Preparation of Carbon Foam by Pyrolysis of Cyanate Ester Resin at Ambient Pressure. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 1(104), 714–717. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.05.007>.
- Liu, J., Li, X., Zhang, L., Liu, X. and Wang, X. 2022. Direct Fluorination Of Nanographene Molecules With Fluorine Gas. *Carbon*, 1(188), 453–460. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.12.043>.
- Maffini, A., Orecchia, D., Pazzaglia, A., Zavelani-Rossi, M. and Passoni, M. 2022. Pulsed Laser Deposition of Carbon Nanofoam. *Applied Surface Science*, 599(153859), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.153859>.
- Manawi, Y. M., Samara, A., Al-Ansari, T. and Atieh, M. A. 2018. A Review of Carbon Nanomaterials' Synthesis Via the Chemical Vapor Deposition (CVD) Method. *Materials*, 11(5), 1–36. <https://doi.org/10.3390/ma11050822>.
- Mitchell, S. T., Frese, N., Götzhäuser, A., Bowers, A. and Sattler, K. 2015. Ultralight Carbon Nanofoam from Naphthalene-Mediated Hydrothermal Sucrose Carbonization. *Carbon*, 1(95), 434–441. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.08.001>.
- Mostafa, A. M., Mwafy, E. A., Awwad, N. S. and Ibrahim, H. A. 2021. Synthesis of Multi-Walled Carbon Nanotubes Decorated with Silver Metallic Nanoparticles as A Catalytic Degradable Material Via Pulsed Laser Ablation in Liquid Media. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 626. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126992>.
- Muñoz, E., Ruiz-González, M. L., Seral-Ascaso, A., Sanjuán, M. L., González-Calbet, J. M., Laguna, M. and De La Fuente, G. F. 2010. Tailored Production of Nanostructured Metal/Carbon Foam by Laser Ablation of Selected Organometallic Precursors. *Carbon*, 48(6), 1807–1814. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.01.025>.
- Nagel, B., Pusz, S. and Trzebicka, B. 2014. Tailoring the Properties of Macroporous Carbon Foams. *Journal of Materials Science*, 49, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7678-x>.
- Narasimman, R. and Prabhakaran, K. 2012. Preparation of Low Density Carbon Foams by Foaming Molten Sucrose Using an Aluminium Nitrate Blowing Agent. *Carbon*, 50(5), 1999–2009. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.12.058>.
- Nyabadza, A., Vázquez, M., Fitzpatrick, B. and Brabazon, D. 2022. Effect of Liquid Medium and Laser Processing Parameters on the Fabrication of Carbon Nanoparticles Via Pulsed Laser Ablation in Liquid Towards Paper Electronics. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 636(128151), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.128151>.
- Ola, O., Niu, Q., Chen, Y., Xia, Y. and Zhu, Y. 2019. Carbon Nanotube Reinforced Nanocomposites for Energy Conversion and Storage. *Journal of Power Sources*, 443. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227277>.
- Qi, X., Qin, C., Zhong, W., Au, C., Ye, X. and Du, Y. 2010. Large-Scale Synthesis of Carbon Nanomaterials by Catalytic Chemical Vapor Deposition: A Review Of The Effects Of Synthesis Parameters And Magnetic Properties. *Materials Letters*, 3(8), 4142–4174. <https://doi.org/10.3390/ma3084142>.
- Quay, Y.J. and Chung, S.H. 2021. Structural and Surface Modification of Carbon Nanofoam As an Interlayer for Electrochemically Stable Lithium-Sulfur Cells. *Nanomaterials*, 11(3342), 1–16. <https://doi.org/10.3390/nano11123342>.
- Raiskaya, E. A., Krivonos, O. I., Babenko, A. V. and Belskaya, O. B. 2021. A Study of the Liquid Pyrolysis Products of A Propane-Butane Mixture As A Precursor In the Synthesis of Cellular Carbon Foam. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105328>.
- Ram, B. and Mizuseki, H. 2020. C568: A New Two-Dimensional Sp²-Sp³ Hybridized Allotrope of Carbon. *Carbon*, 158, 827–835. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.11.062>.
- Rao, G.-S., Nabipour, H., Zhang, P., Wang, X., Xing, W., Song, L. and Hu, Y. 2020. Lightweight, Hydrophobic and Recyclable Carbon Foam Derived from Lignin-Resorcinol-Glyoxal Resin for Oil and Solvent Spill Capture. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 4655–4664. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.092>.
- Rayskaya, E. A., Belskaya, O. B. and Likholobov, V. A. 2018. Synthesis of Carbon Foam with Cellular Structure

- by Pyrolysis of Light Alkanes. *Materials Today: Proceedings*, 5(12), 25962–25965. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.08.012>.
- Rode, A. V., Gamaly, E. G., Christy, A., Gerald, J. F., Hyde, S., Elliman, R., Luther-Davies, B., Veinger, A., Androulakis, J. and Giapintzakis, J. 2004. Unconventional Magnetism in All-Carbon Nanofoam. *Physical Review B*, 70(054407), 1–9. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.70.054407>.
- Rode, A. V., Gamaly, E. G., Christy, A. G., Fitz Gerald, J., Hyde, S. T., Elliman, R. G., Luther-Davies, B., Veinger, A. I., Androulakis, J., and Giapintzakis, J. 2005. Strong Paramagnetism and Possible Ferromagnetism in Pure Carbon Nanofoam Produced by Laser Ablation. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 290(291), 298–301. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2004.11.213>.
- Rodríguez, E., Diez, M., Antuña-Nieto, C., López-Antón, M. A., García, R. and Martínez-Tarazona, M. R. 2021. An Insight Into the Role of Biomass, Biocompounds And Synthetic Polymers As Additives to Coal for the Synthesis of Carbon Foams. *Journal of Analytical Applied Pyrolysis*, 160. <https://doi.org/10.106/j.jaao.2021.105359>.
- Sajadi, S. M., Owuor, P., Schara, S., Woellner, C., Rodrigues, V., Vajtai, R., Lou, J., Galvao, D., Tiwary, C. and Ajayan, P. 2017. Multi-scale Geometric Design Principles Applied to 3D Printed Schwarzites. *Advanced Materials*, 30(1), 1–8.
- Sajadi, S. M., Vársárhelyi, L., Mousavi, R., Rahmati, A. H., Kónya, Z., Kukovecz, Á., Arif, T., Filleter, T., Vajtai, R., Boul, P., Pang, Z., Li, T., Tiwary, C. S., Rahman, M. M. and Ajayan, P. M. 2021. Damage-Tolerant 3D-Printed Ceramics via Conformal Coating. *Science Advances*, 7(28).
- Sari, A. H., Khazali, A. and Parhizgar, S. S. 2018. Synthesis and Characterization Of Long-Cnts by Electrical Arc Discharge in Deionized Water and NaCl Solution. *International Nano Letters*, 8(3), 19–23. <https://doi.org/10.1007/s40089-018-0227-5>.
- Saucedo-Jimenez, D., Medina-Sanchez, I. and Couder Castañeda, C. 2018. Carbon Nanofoam by Pulsed Electric Arc-Discharges. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2018/7608543>.
- Seifert, G., Kuc, A. and Heine, T. 2011. Hexagon Preserving Carbon Nanofoams. *Computer-Based Modeling of Novel Carbon Systems and Their Properties: Beyond Nanotubes*, 2010, 57–77. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9718-8_3.
- Seral-Ascaso, A., Garriga, R., Sanjuán, M. L., Razal, J. M., Lahoz, R., Laguna, M., De La Fuente, G. F. and Muñoz, E. 2013. ‘Laser Chemistry’ Synthesis, Physicochemical Properties, and Chemical Processing of Nanostructured Carbon Foams. *Nanoscale Research Letters*, 8(233), 1–6. <https://doi.org/10.1186/1556-276x-8-233>.
- Soni, G., Jain, K., Soni, P., Jangir, R. K. and Vijay, Y. K. 2020. Synthesis of Multiwall Carbon Nanotubes in Presence of Magnetic Field Using Underwater Arc Discharge System. *Materials Today: Proceedings*, 30, 225–228. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.256>.
- Sun, L., Yuan, G., Gao, L., Yang, J., Chhowalla, M., Heydari Gharahcheshmeh, M., Gleason, K., Choi, Y., Hong, B. and Liu, Z. 2021. Chemical Vapour Deposition. *Nature Reviews Methods Primers*, 1(5), 1–20. <https://doi.org/10.1038/s43586-020-00005-y>.
- Umamoto, K., Saito, S., Berber, S. and Tomanek, D. 2001. Carbon Foam: Spanning the Phase Space Between Graphite and Diamond. *Physical Review B*, 64(19). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.64.193409>.
- Wu, S., Chen, D., Zhao, G., Cheng, Y., Sun, B., Yan, X., Han, W., Chen, G. and Zhang, X. 2022. Controllable Synthesis of A Robust Sucrose-Derived Bio-Carbon Foam with 3D Hierarchical Porous Structure for Thermal Insulation, Flame Retardancy And Oil Absorption. *Chemical Engineering Journal*, 434. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.134514>.
- Xiao, N., Zhou, Y., Ling, Z. and Qiu, J. 2013. Synthesis of A Carbon Nanofiber/Carbon Foam Composite from Coal Liquefaction Residue for the Separation of Oil and Water. *Carbon*, 59, 530–536. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.03.051>.
- Zhang, H., Hu, S., Wang, H., Chen, Y., Wang, H. and Ni, Y. 2019a. Thermal Transport in Three-Dimensional Carbon Honeycombs. *Chinese Journal of Physics*, 59(1), 567–571. <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2019.04.017>.
- Zhang, T. F., Xia, Q. X., Wan, Z., Yun, J. M., Wang, Q. M. and Kim, K. H. 2019b. Highly Porous Carbon Nanofoams Synthesized from Gas-Phase Plasma for Symmetric Supercapacitors. *Chemical Engineering Journal*, 360(15), 1310–1319. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.220>.
- Zhang, Y. and Sun, X. 2007. Synthesis of Carbon Nanofibers and Foam by Catalytic Chemical Vapor Deposition Using a Water-Soluble Alkali Salt Catalyst. *Advanced Materials*, 19(7), 961–964. <https://doi.org/10.1002/adma.200602084>.

- Zhang, Y., Zhang, Q. and Chen, G. 2020. Carbon and Carbon Composites for Thermoelectric Applications. *Carbon Energy*, 2(3), 408–436. <https://doi.org/10.1002/cey2.68>.
- Zhou, P. and Chen, Q.L. 2016. Preparation and Characterization of Carbon Foam Derived from Coal Pitch. *Journal of Analytical Applied Pyrolysis*, 122(1), 370–376. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.09.001>.
- Zhou, Z., Hua, Z., Zhou, Y., Qiao, H., Gurung, A., Naderi, R., Elbohy, H., Smirnova, A., Lu, H., Hua, Z. and Qiao, Q. 2017. Binder Free Hierarchical Mesoporous Carbon Foam for High Performance Lithium Ion Battery. *Scientific Reports*, 7(1440), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01638-y>.