

# Studi Penumbuhan Grafena pada Temperatur Rendah Menggunakan Metode *Hotwire-Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*

Jasruddin<sup>\*</sup>, Andi Momang Yusuf, Sulistiawaty  
Program Studi Fisika Universitas Negeri Makassar

Email korespondensi : jasruddin@unm.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.20527/flux.v21i3.19279>

Submitted: 23 Mei 2024; Accepted: 16 Desember 2024

**ABSTRAK-** Dalam penelitian ini, telah dilakukan penumbuhan grafena dengan menggunakan metode *Hotwire-Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition* (HW-PECVD). Metode ini merupakan metode kombinasi antara metode PECVD konvensional dan metode CVD termal dengan menambahkan elemen *hot-wire*. Plasma dibangkitkan dengan menggunakan frekuensi radio pada spektrum Very High Frequency (VHF) sebesar 70 MHz. Sampel grafena ditumbuhkan di atas substrat kaca SiO<sub>2</sub> yang telah dilapisi lapisan katalis nikel dengan temperatur penumbuhan 300°C. Grafena yang dihasilkan dianalisis dengan menggunakan spektroskopi Raman. Spektrum Raman sampel menunjukkan bahwa sampel yang dihasilkan telah mengandung struktur grafitik yang ditunjukkan oleh keberadaan pita G yang tajam, disertai dengan pita D yang menunjukkan bahwa sampel tersebut juga mengandung sejumlah cacat pada struktur grafitiknya. Sementara itu, pita 2D yang tampak dalam spektra Raman masih relatif lemah yang memberi indikasi kualitas sampel yang buruk, mengandung banyak cacat, dan berukuran nanokristalin. Walaupun demikian, hasil ini menunjukkan adanya potensi besar untuk dapat menumbuhkan grafena pada temperatur rendah melalui metode HW-PECVD yang digunakan melalui optimasi parameter-parameter penumbuhan lebih lanjut seperti tekanan penumbuhan dan laju alir gas sumber termasuk mengoptimasi ketebalan lapisan katalis nikelnya.

**KATA KUNCI:** grafena; grafitik; HW-PECVD; spektra Raman

**ABSTRACT-** We have grown graphene using the Hot Wire-Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (HW-PECVD) method. The method combined a conventional PECVD and thermal CVD by applying a hot-wire element. Plasma was generated using radio frequencies in the Very High Frequency (VHF) spectrum of 70 MHz. Graphene samples were grown on a SiO<sub>2</sub> glass substrate coated with a layer of nickel catalyst. The temperature of growth was kept at 300 °C. The resulting graphene was analyzed using Raman spectroscopy. The Raman spectrum of the sample shows that the obtained sample contains a graphitic structure as indicated by the presence of a sharp G band, accompanied by a D band, which indicated that the sample also contained defects in the graphitic structure. Meanwhile, the 2D band visible in the Raman spectra was still relatively weak, indicating that the sample quality was poor, contained many defects, and was nanocrystalline. However, these results show that there is great potential to be able to grow graphene at low temperatures using the HW-PECVD method by further optimizing growth parameters such as growth pressure and source gas flow rate as well as the optimization of Ni-catalyst thickness.

**KEYWORDS :** graphene; graphitic; HW-PECVD; Raman spectra

## PENDAHULUAN

Grafena merupakan material dua dimensi (2D) yang pertama kali berhasil disintesis pertama kali oleh Novoselov (Novoselov et al., 2004). Material ini memiliki karakteristik yang

menarik yang berpotensi untuk dimanfaatkan dalam banyak bidang penerapan. Beberapa karakteristik grafena tersebut adalah nilai modulus Young graphene cukup tinggi yaitu sekitar 1100 GPa, memiliki kekuatan fraktur

sebesar kurang lebih 125 GPa (Lee et al., 2008), konduktivitas termal sebesar  $\sim 5.000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  (Balandin et al., 2008), mobilitas muatan pembawa yang sangat tinggi di atas  $200.000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  (J.-H. Chen et al., 2008) yang merupakan konsekuensi dari perilaku fermion Dirac muatan pembawanya (Castro Neto et al., 2009), jarak transpor balistik yang mencapai satu mikro pada temperatur ruang (Du et al., 2008), fenomena efek kuantum Hall setengah bilangan bulat, dan hanya menyerap 2,3 % cahaya pada rentang panjang gelombang cahaya tampak (Nair et al., 2008).

Hal ini mendorong minat peneliti untuk mengkaji lebih mendalam tentang karakteristik material tersebut. Untuk keperluan aplikasi dalam banyak bidang, penumbuhan grafena harus dapat ditumbuhkan pada temperatur yang relatif rendah agar cocok dengan beragam substrat. Grafena yang pertama kali dibuat oleh Novoselov *et. al.* disintesis dengan menggunakan metode pengelupasan mekanik material HOPG (*highly oriented pyrolytic graphite*) (Novoselov, 2004). Meskipun metode ini menghasilkan grafena dengan kualitas yang sangat baik, ukuran sampel yang dihasilkan relatif kecil dan tidak dapat digunakan untuk skala aplikasi. Dengan demikian, perlu dikembangkan metode sintesis lain yang dapat menghasilkan lapisan grafena yang lebih luas sesuai dengan kebutuhan.

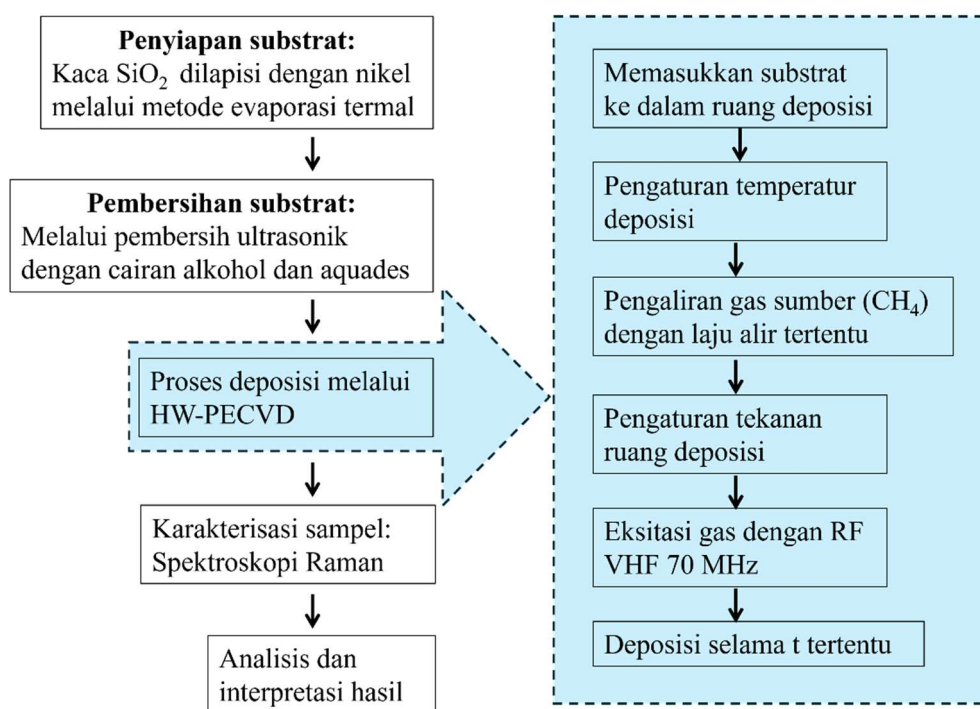
Penumbuhan grafena secara garis besar dapat dikelompokkan menjadi dua pendekatan, yaitu pendekatan dari atas-ke-dasar (*top-down*) dan pendekatan dari dasar-ke-atas (*bottom-up*) (Coroş et al., 2019). Pendekatan atas-ke-dasar dimulai dari bahan yang kompleks kemudian diurai ke dalam

bentuk lapisan-lapisan yang lebih sederhana. Dalam hal sintesis grafena, pendekatan atas-ke-dasar dimulai dari bahan grafit yang tersedia secara komersial kemudian dilakukan eksfoliasi (pengelupasan) baik secara mekanis, kimiawi, atau elektrokimiawi sehingga diperoleh lapisan grafena yang umumnya dalam bentuk serpihan (*flake*) (J. Chen et al., 2016; Coroş et al., 2016; Ding et al., 2018). Sedangkan pendekatan dasar-ke-atas dimulai dari molekul yang lebih sederhana kemudian dideposisi hingga menghasilkan material yang diharapkan (Tan et al., 2018). Dalam hal ini, molekul-molekul karbon yang berasal dari sebuah sumber karbon (misalnya dari gas hidrokarbon) dideposisi di atas substrat hingga dihasilkan lapisan tipis grafena.

Saat ini, metode sintesis yang banyak digunakan adalah metode deposisi uap kimiawi (*chemical vapor deposition, CVD*). Dengan menggunakan metode CVD ini, sejumlah peneliti telah berhasil menyintesis grafena dengan kualitas yang sangat baik mendekati kualitas grafena murni (Deokar et al., 2015; Liu et al., 2011; Weatherup et al., 2012). Namun demikian, salah satu kelemahan metode CVD ini adalah temperatur penumbuhannya yang cukup tinggi, yang berada dalam rentang  $600^\circ\text{C} - 1000^\circ\text{C}$  (Bae et al., 2010; Choi et al., 2022; Hong et al., 2022; Li et al., 2009; Seo et al., 2016). Dengan temperatur penumbuhan setinggi ini, jenis substrat yang dapat digunakan akan terbatas sehingga secara tidak langsung juga membatasi potensi penerapan grafena yang dihasilkan. Misalnya, dengan temperatur penumbuhan sebesar tersebut, grafena tidak dapat digunakan pada aplikasi sel-surya lapisan tipis yang biasanya membutuhkan temperatur yang lebih rendah.

**Tabel 1 Parameter penumbuhan sampel dalam penelitian**

Sampel	Massa evaporan (mg)	Laju aliran gas (sccm)	Temperatur ( $^\circ\text{C}$ )	Tekanan (mTorr)	Daya RF (watt)	Lama waktu penumbuhan (menit)
1	10	50	300	200	5	10
2	20	50	300	200	5	10
3	20	20	300	200	5	10



Gambar 1 Bagan proses penelitian

Namun demikian, dengan menggunakan bantuan plasma dalam proses CVD, yang dikenal sebagai metode PECVD, temperatur penumbuhan grafena diharapkan dapat diturunkan menjadi lebih rendah. Hal ini dapat terjadi karena plasma dapat membantu penguraian gas sumber menjadi elemen-elemen atomnya yang dibutuhkan untuk dideposisi pada substrat pada temperatur yang rendah. Selain itu, penggunaan plasma dapat meningkatkan laju deposisi lapisan dan berpeluang untuk menumbuhkan grafena secara langsung di atas berbagai substrat seperti silikon, kuarsa, safir, dan sebagainya tanpa memerlukan lapisan logam sebagai katalis penumbuhan (Muñoz & Gómez-Aleixandre, 2013; Sun et al., 2015; Yang et al., 2013). Berdasarkan potensi yang dimiliki oleh metode PECVD ini, kami mencoba melakukan eksperimen penumbuhan grafena yang dilakukan pada temperatur rendah dengan menggunakan metode PECVD yang dimodifikasi dengan menambahkan elemen *hotwire*. Dalam artikel ini, kami menunjukkan bahwa sejumlah sampel hasil eksperimen yang kami lakukan memperlihatkan spektrum karakteristik Raman yang mengindikasikan tumbuhnya lapisan grafena.

## METODE PENELITIAN

Sampel grafena yang dihasilkan dalam penelitian ini ditumbuhkan dengan menggunakan metode PECVD dengan eksitasi plasma menggunakan frekuensi radio dalam spektrum VHF sebesar 70 MHz. Berbeda dengan sistem PECVD yang lazim, sistem PECVD yang kami gunakan dalam penelitian ini dimodifikasi dengan penambahan elemen *hotwire* sehingga kami menyebut sistem PECVD ini sebagai HW-PECVD (Yusuf et al., 2022).

Sampel grafena ditumbuhkan di atas substrat kaca SiO<sub>2</sub> yang telah dilapisi dengan lapisan logam katalis nikel yang dievaporasi dengan massa evaporasi yang bervariasi. Evaporasi katalis dilakukan dengan menggunakan metode evaporasi termal. Sebelum grafena dideposisi di atas substrat yang telah dilapisi dengan lapisan katalis, terlebih dahulu substrat tersebut dibersihkan dengan menggunakan pembersih ultrasonik menggunakan cairan pembersih alkohol dan aquades. Selanjutnya substrat dimasukkan ke dalam ruang deposisi untuk memulai proses deposisi.

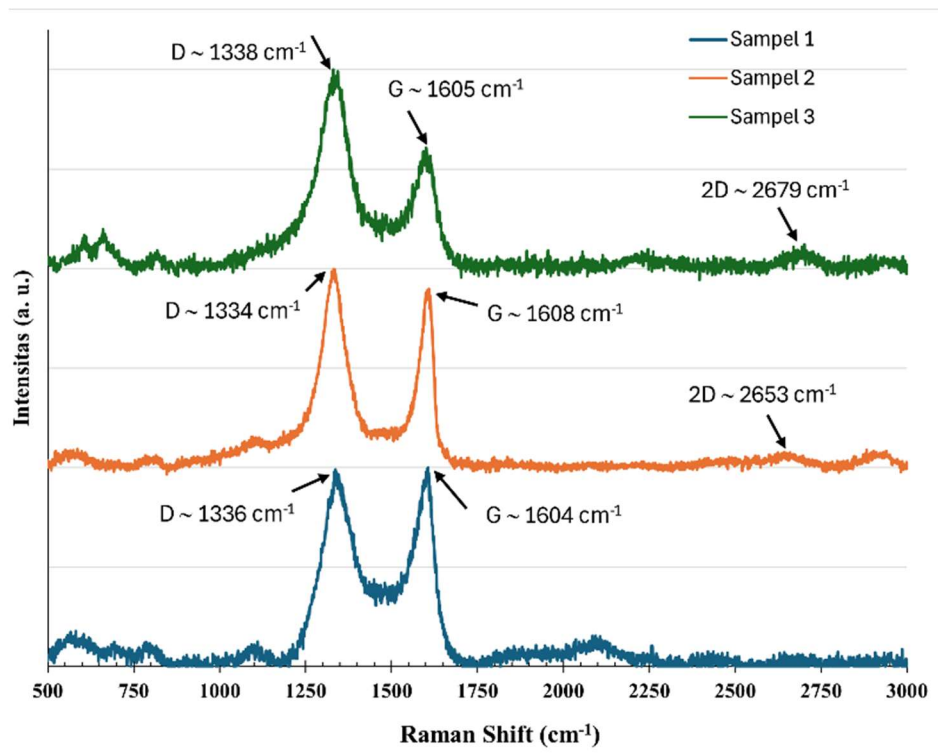
Proses deposisi dimulai dengan mengatur temperatur seperti yang diberikan dalam Tabel

1. Setelah temperatur tersebut tercapai, gas metana ( $\text{CH}_4$ ) sebagai sumber karbon dialirkan ke dalam ruang deposisi dengan laju alir seperti dalam Tabel 1. Tekanan dalam ruang deposisi kemudian diatur melalui katup yang terdapat dalam sistem HW-PECVD agar sesuai dengan tekanan yang telah ditentukan. Setelah semua parameter deposisi sesuai, selanjutnya menyalakan generator frekuensi RF untuk menyalurkan gelombang radio spektrum VHF 70 MHz ke dalam ruang deposisi. Lama waktu proses deposisi dihitung sejak penghalang antara substrat dengan area plasma dibuka. Sampel hasil deposisi selanjutnya dianalisis dengan menggunakan spektrometer Raman Horiba tipe iHR320 dengan panjang gelombang sinar laser 532 nm. Prosedur penelitian ini dapat dilihat dalam bagan yang diberikan dalam Gambar 1.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Spektrum hasil spektroskopi Raman sampel yang diperoleh untuk sampel 1, sampel 2, dan sampel 3, ditunjukkan oleh Gambar 2. Sampel 1 merupakan sampel yang ditumbuhkan di atas substrat kaca  $\text{SiO}_2$  yang

telah dilapisi 10 mg Ni, sampel 2 ditumbuhkan di atas substrat kaca yang telah dilapisi 20 mg Ni, sedangkan sampel 3 juga ditumbuhkan di atas substrat kaca yang telah dilapisi 20 mg Ni tetapi dengan laju alir 20 sccm. Berdasarkan ketiga spektrum Raman sampel yang ditampilkan dalam Gambar 2 terlihat keberadaan puncak yang terletak di sekitar pergeseran Raman  $1604 - 1608 \text{ cm}^{-1}$ . Puncak ini, yang disebut pita G, biasanya berada pada pergeseran Raman  $1582 \text{ cm}^{-1}$  pada grafena, dan murni dihasilkan oleh generasi ganda mode fonon di pusat zona Brillouin (Dervishi et al., 2019; Ferrari et al., 2006). Pita G ini merupakan indikasi terbentuknya ikatan karbon grafitik  $\text{sp}^2$  dalam sampel. Pergeseran posisi puncak pita G dalam sampel yang diperoleh dalam penelitian ini menunjukkan adanya kecenderungan perubahan fase sampel dari karbon grafitik menuju karbon amorf (Ferrari & Robertson, 2000). Perubahan fase ini menunjukkan terjadinya transisi konfigurasi karbon dari  $\text{sp}^2$  menjadi  $\text{sp}^3$  yang terjadi karena temperatur yang rendah (Zhang et al., 2024).



Gambar 2 Spektrum Raman sampel 1, 2, dan 3. Nilai intensitas pada sampel 2 dan 3 telah digeser ke atas agar karakteristik Raman ketiga sampel tidak saling menumpuk.

Selain keberadaan pita G yang jelas, dalam spektrum Raman ketiga sampel penelitian ini juga menunjukkan keberadaan puncak pada pergeseran Raman sekitar  $1334\text{ cm}^{-1}$  –  $1338\text{ cm}^{-1}$ . Keberadaan pita ini, yang disebut pita D, merupakan indikasi sampel yang berstruktur nanokristal dengan kandungan cacat yang besar (Ferrari & Basko, 2013). Pita D ini ditimbulkan oleh aktifnya mode *breathing* simetri  $A_{1g}$  dalam cincin aromatik  $sp^2$  yang menunjukkan ketidakberaturan kisi. Intensitas pita D pada struktur sampel nanokristalin ini sebenarnya menunjukkan probabilitas menemukan cincin karbon dalam kluster nanokristalin, yang sebanding dengan ukuran klasternya (Zhang et al., 2024).

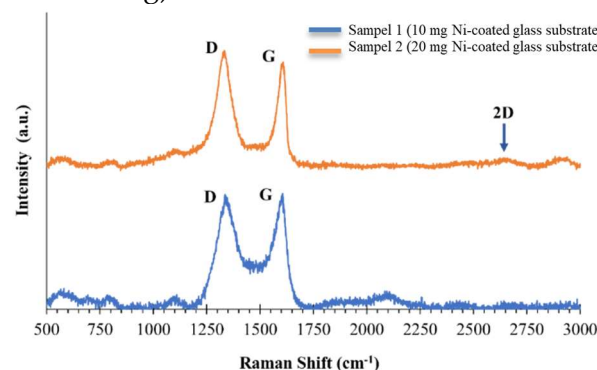
Pita G dan D keduanya merupakan pita-pita khas yang dimiliki oleh karbon berstruktur grafitik yang memiliki kandungan cacat yang cukup besar. Untuk mengidentifikasi terbentuknya sampel grafena, perlu diidentifikasi terbentuknya puncak pada pergeseran panjang gelombang Raman di sekitar  $2700\text{ cm}^{-1}$  yang disebut dengan pita 2D atau  $G'$ . Pita 2D ini berasal dari *overtone* fonon TO di sekitar titik K dan diaktifkan oleh *triple resonance Raman scattering* (TRSS). Efek ini bersifat sangat dispersif terhadap energi eksitasi karena adanya anomali Kohn di titik K (Wu et al., 2018).

Berdasarkan spektra Raman sampel, keberadaan pita 2D ini hanya tampak pada spektrum Raman sampel 2 dan Sampel 3. Pada sampel 2 puncak 2D ini muncul pada pergeseran Raman  $2653\text{ cm}^{-1}$  dan pada sampel 3 puncak ini muncul di  $2679\text{ cm}^{-1}$ . Lemahnya pita 2D pada kedua sampel ini menunjukkan kualitas lapisan grafena yang dihasilkan masih sangat rendah, kecenderungan transformasi ikatan karbon dari struktur grafitik menjadi struktur amorf sehingga jumlah fase karbon amorf meningkat lebih besar dibandingkan dengan fase karbon grafitik.

Merujuk pada Tabel 1 dan analisis prosedur pelaksanaan penelitian, secara spekulatif diduga bahwa kemunculan pita 2D pada sampel 2 dan 3 merupakan pengaruh

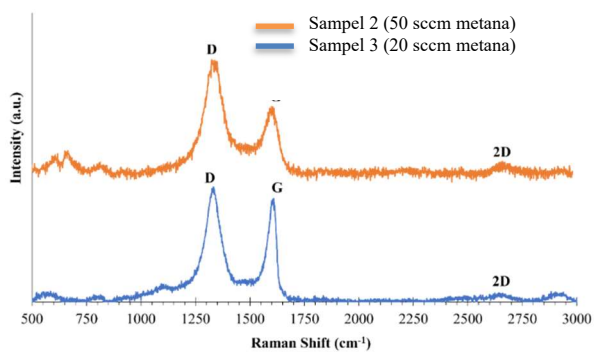
dari lapisan katalis nikel yang digunakan pada substrat sampel. Pada sampel 1, ketebalan lapisan katalis diperkirakan lebih tipis dibandingkan dengan sampel 2 dan 3 karena massa yang dievaporasi lebih kecil. Akibat lapisan katalis yang tipis, pembentukan ikatan karbon menjadi lebih dominan dalam bentuk struktur amorf.

Perbandingan spektra Raman sampel yang ditumbuhkan di atas substrat kaca yang telah dilapisi lapisan katalis nikel yang dievaporasi dengan massa nikel yang bervariasi ditunjukkan dalam Gambar 3. Tampak bahwa pada sampel yang ditumbuhkan di atas substrat dengan lapisan katalis yang lebih tebal (dengan massa evaporasi nikel 20 mg), keberadaan pita 2D lebih jelas dibandingkan sampel yang ditumbuhkan pada substrat dengan lapisan katalis yang tipis (dengan massa evaporasi nikel 10 mg).



**Gambar 3** Perbandingan spektra Raman sampel yang ditumbuhkan di atas substrat kaca yang dilapisi dengan lapisan nikel yang dievaporasi dengan massa yang bervariasi.

Selain perbandingan pita 2D Sampel 2 dan Sampel 3, dari perbandingan spektra Raman kedua sampel tersebut juga teramati hal lain yaitu nilai intensitas puncak D yang lebih tinggi dibandingkan intensitas puncak G baik pada Sampel 2 maupun sampel 3. Perbandingan intensitas kedua puncak ini dapat memberikan gambaran tingginya tingkat cacat yang dimiliki oleh sampel. Perubahan rasio intensitas puncak D terhadap intensitas puncak G ( $I[D]/I[G]$ ) Sampel 2 dibandingkan dengan  $I(D)/I(G)$  Sampel 3 diberikan dalam Gambar 4.



**Gambar 4** Perbandingan spektra Raman sampel yang ditumbuhkan dengan laju aliran gas metana yang bervariasi.

Berdasarkan Gambar 4, terlihat bahwa penggunaan laju alir metana yang cukup tinggi menyebabkan kandungan cacat dalam sampel menjadi lebih besar dibandingkan dengan penggunaan laju alir metana yang lebih rendah. Hal ini mengindikasikan pengaruh parameter laju alir gas metana cukup penting dalam menghasilkan kualitas grafena yang baik sehingga perlu dioptimasi dengan baik.

Secara keseluruhan temuan hasil penelitian kami ini menunjukkan adanya potensi yang menjanjikan untuk dapat menumbuhkan grafena pada temperatur rendah dengan menggunakan metode HW-PECVD yang kami gunakan. Namun demikian, keberhasilan pembentukan struktur grafena sangat dipengaruhi oleh ketebalan katalis logam nikel yang dilapiskan pada substrat, sehingga perlu terlebih dahulu diketahui ketebalan katalis logam nikel yang optimal untuk dapat menumbuhkan struktur grafena.

## KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, kami telah menunjukkan karakteristik spektra Raman sampel grafena yang kami tumbuhkan pada temperatur yang relatif rendah yaitu 300° C dengan menggunakan metode HW-PECVD dan bantuan katalis logam nikel. Temperatur yang rendah dalam penumbuhan ini diduga sebagai akibat dari penggunaan *Hotwire*. Keberadaan *Hotwire* ini berperan sebagai sumber energi tambahan selain energi plasma

yang menyebabkan penguraian gas metana dapat terjadi pada temperatur yang lebih rendah.

Berdasarkan hasil yang kami peroleh, sampel yang kami buat mengandung puncak-puncak D dan G, yang menunjukkan bahwa dalam sampel tersebut telah terbentuk struktur ikatan grafitik karbon yang merupakan struktur utama yang terdapat dalam grafena. Namun demikian, kualitas grafena yang dihasilkan masih sangat rendah yang ditandai dengan lemahnya puncak 2D dan intensitas puncak D yang cukup tinggi. Hal ini menunjukkan masih perlunya optimasi parameter-parameter penumbuhan yang digunakan terutama pada laju alir gas metana dan optimasi ketebalan katalis logam nikel.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini terlaksana atas dukungan dana PNBPU Universitas Negeri Makassar dan bantuan fasilitas penggunaan laboratorium PECVD di Kelompok Keahlian Fisika dan Teknologi Material Maju (KK FTMM) ITB Bandung.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bae, S., Kim, H., Lee, Y., Xu, X., Park, J.-S., Zheng, Y., Balakrishnan, J., Lei, T., Ri Kim, H., Song, Y. Il, Kim, Y.-J., Kim, K. S., Özyilmaz, B., Ahn, J.-H., Hong, B. H., & Iijima, S. (2010). Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes. *Nature Nanotechnology*, 5(8), 574–578.  
<https://doi.org/10.1038/nnano.2010.132>
- Balandin, A. A., Ghosh, S., Bao, W., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Miao, F., & Lau, C. N. (2008). Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene. *Nano Lett.*, 8(3), 902–907.  
<https://doi.org/10.1021/nl0731872>
- Castro Neto, A. H., Guinea, F., Peres, N. M. R., Novoselov, K. S., & Geim, A. K. (2009). The electronic properties of graphene. *Reviews of Modern Physics*, 81(1), 109–162.  
<https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.109>

- Chen, J., Shi, W., Chen, Y., Yang, Q., Wang, M., Liu, B., Tang, Z., Jiang, M., Fang, D., & Xiong, C. (2016). Eco-friendly exfoliation of graphite into pristine graphene with little defect by a facile physical treatment. *Applied Physics Letters*, 108(7).  
<https://doi.org/10.1063/1.4942192/31213>
- Chen, J.-H., Jang, C., Xiao, S., Ishigami, M., & Fuhrer, M. S. (2008). Intrinsic and extrinsic performance limits of graphene devices on SiO<sub>2</sub>. *Nature Nanotech*, 3(4), 206–209.  
<https://doi.org/10.1038/nnano.2008.58>
- Choi, S. H., Yun, S. J., Won, Y. S., Oh, C. S., Kim, S. M., Kim, K. K., & Lee, Y. H. (2022). Large-scale synthesis of graphene and other 2D materials towards industrialization. *Nature Communications* 2022 13:1, 13(1), 1–5.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-022-29182-y>
- Coroş, M., Pogăcean, F., Măgeruşan, L., Socaci, C., & Pruneanu, S. (2019). A brief overview on synthesis and applications of graphene and graphene-based nanomaterials. In *Frontiers of Materials Science* (Vol. 13, Issue 1, pp. 23–32). Higher Education Press.  
<https://doi.org/10.1007/s11706-019-0452-5>
- Coroş, M., Pogăcean, F., Roşu, M. C., Socaci, C., Borodi, G., Mageruşan, L., Biriş, A. R., & Pruneanu, S. (2016). Simple and cost-effective synthesis of graphene by electrochemical exfoliation of graphite rods. *RSC Advances*, 6(4), 2651–2661.  
<https://doi.org/10.1039/C5RA19277C>
- Deokar, G., Avila, J., Razado-Colambo, I., Codron, J. L., Boyaval, C., Galopin, E., Asensio, M. C., & Vignaud, D. (2015). Towards high quality CVD graphene growth and transfer. *Carbon*, 89, 82–92.  
<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.03.017>
- Dervishi, E., Ji, Z., Htoon, H., Sykora, M., & Doorn, S. K. (2019). Raman spectroscopy of bottom-up synthesized graphene quantum dots: size and structure dependence. *Nanoscale*, 11(35), 16571–16581.  
<https://doi.org/10.1039/C9NR05345J>
- Ding, J. H., Zhao, H. R., & Yu, H. Bin. (2018). A water-based green approach to large-scale production of aqueous compatible graphene nanoplatelets. *Scientific Reports* 2018 8:1, 8(1), 1–8.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-23859-5>
- Du, X., Skachko, I., Barker, A., & Andrei, E. Y. (2008). Approaching ballistic transport in suspended graphene. *Nature Nanotechnology* 2008 3:8, 3(8), 491–495.  
<https://doi.org/10.1038/nnano.2008.199>
- Ferrari, A. C., & Basko, D. M. (2013). Raman spectroscopy as a versatile tool for studying the properties of graphene. *Nature Nanotech*, 8(4), 235–246.  
<https://doi.org/10.1038/nnano.2013.46>
- Ferrari, A. C., Meyer, J. C., Scardaci, V., Casiraghi, C., Lazzeri, M., Mauri, F., Piscanec, S., Jiang, D., Novoselov, K. S., Roth, S., & Geim, A. K. (2006). Raman Spectrum of Graphene and Graphene Layers. *Physical Review Letters*, 97(18).  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.187401>
- Ferrari, A. C., & Robertson, J. (2000). Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Phys. Rev. B*, 61(20), 14095–14107.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.61.14095>
- Hong, N., Kireev, D., Zhao, Q., Chen, D., Akinwande, D., & Li, W. (2022). Roll-to-Roll Dry Transfer of Large-Scale Graphene. *Advanced Materials*, 34(3), 2106615.  
<https://doi.org/10.1002/ADMA.202106615>
- Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., & Hone, J. (2008). Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene. *Science*, 321(5887), 385–388.  
<https://doi.org/10.1126/science.1157996>
- Li, X., Cai, W., An, J., Kim, S., Nah, J., Yang, D., Piner, R., Velamakanni, A., Jung, I.,

- Tutuc, E., Banerjee, S. K., Colombo, L., & Ruoff, R. S. (2009). Large-area synthesis of high-quality and uniform graphene films on copper foils. *Science*, 324(5932), 1312–1314.  
<https://doi.org/10.1126/science.1171245>
- Liu, H., Liu, Y., & Zhu, D. (2011). Chemical doping of graphene. *J. Mater. Chem.*, 21(10), 3335–3345.  
<https://doi.org/10.1039/C0JM02922J>
- Muñoz, R., & Gómez-Aleixandre, C. (2013). Review of CVD Synthesis of Graphene: Review of CVD Synthesis of Graphene. *Chem. Vap. Deposition*, 19(10-11-12), 297–322.  
<https://doi.org/10.1002/cvde.201300051>
- Nair, R. R., Blake, P., Grigorenko, A. N., Novoselov, K. S., Booth, T. J., Stauber, T., Peres, N. M. R., & Geim, A. K. (2008). Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene. *Science*, 320(5881), 1308.  
<https://doi.org/10.1126/science.1156965>
- Novoselov, K. S. (2004). Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*, 306(5696), 666–669.  
<https://doi.org/10.1126/science.1102896>
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., & Firsov, A. A. (2004). Electric field in atomically thin carbon films. *Science*, 306(5696), 666–669.  
<https://doi.org/10.1126/science.1102896>
- Seo, M., Pineda, S., Fang, J., Gozukara, Y., Yick, S., Bendavid, A., Lam, S., Murphy, T., s, Z., & Ostrikov, K. (Ken). (2016). *Single-Step, Ambient-Air Synthesis of Graphene from Renewable Precursors and its Application as an Electrochemical Genosensor*.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1038/ncomms14217>
- Sun, J., Chen, Y., Cai, X., Ma, B., Chen, Z., Priyadarshi, M. Kr., Chen, K., Gao, T., Song, X., Ji, Q., Guo, X., Zou, D., Zhang, Y., & Liu, Z. (2015). Direct low-temperature synthesis of graphene on various glasses by plasma-enhanced chemical vapor deposition for versatile, cost-effective electrodes. *Nano Res.*, 8(11), 3496–3504.  
<https://doi.org/10.1007/s12274-015-0849-0>
- Tan, H., Wang, D., & Guo, Y. (2018). Thermal Growth of Graphene: A Review. *Coatings* 2018, Vol. 8, Page 40, 8(1), 40.  
<https://doi.org/10.3390/COATINGS8010040>
- Weatherup, R. S., Dlubak, B., & Hofmann, S. (2012). Kinetic Control of Catalytic CVD for High-Quality Graphene at Low Temperatures. *ACS Nano*, 6(11), 9996–10003. <https://doi.org/10.1021/nn303674g>
- Wu, J.-B., Lin, M.-L., Cong, X., Liu, H.-N., & Tan, P.-H. (2018). Raman spectroscopy of graphene-based materials and its applications in related devices. *Chemical Society Reviews*, 47(5), 1822–1873.  
<https://doi.org/10.1039/C6CS00915H>
- Yang, C., Bi, H., Wan, D., Huang, F., Xie, X., & Jiang, M. (2013). Direct PECVD growth of vertically erected graphene walls on dielectric substrates as excellent multifunctional electrodes. *J. Mater. Chem. A*, 1(3), 770–775.  
<https://doi.org/10.1039/C2TA00234E>
- Yusuf, A. M., Abidin, K., Eliyana, A., Usman, I., Malago, J. D., Noor, F. A., & Winata, T. (2022). Effect of precursor gas inlet position relative to hot wire cells in HWC-IP-PECVD systems for low-temperature graphene growth. *Materials Research Innovations*, 1–7.  
<https://doi.org/10.1080/14328917.2022.2091353>
- Zhang, C., Jiang, J. T., Guan, Z., Zhang, Y., Li, Y., Song, B., Shao, W., & Zhen, L. (2024). Unveiling the sp<sup>2</sup>–sp<sup>3</sup> C–C Polar Bond Induced Electromagnetic Responding Behaviors by a 2D N-doped Carbon Nanosheet Absorber. *Advanced Science*, 11(4), 2306159.  
<https://doi.org/10.1002/ADVS.202306159>



---