

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karbon

Karbon adalah salah satu unsur pertama yang diketahui manusia, dan merupakan salah satu unsur kimia yang paling luar biasa. Penggunaan bahan karbon untuk banyak aplikasi berasal dari keragaman struktur dan sifat unik bahan yang membentang dari ikatan kimia antara atom karbon hingga struktur nano, penyetaraan kristal, dan struktur mikro. Intan dan grafit keduanya merupakan bentuk kristal tiga dimensi (3D) dari unsur karbon. Grafit murni terdiri dari ikatan hibridisasi sp^2 , sedangkan berlian murni terdiri dari ikatan hibridisasi sp^3 . Atom karbon dalam intan tersusun dalam kisi, yang merupakan variasi dari struktur kristal kubus berpusat muka (fcc). (M.H. Nazaré, 2000).

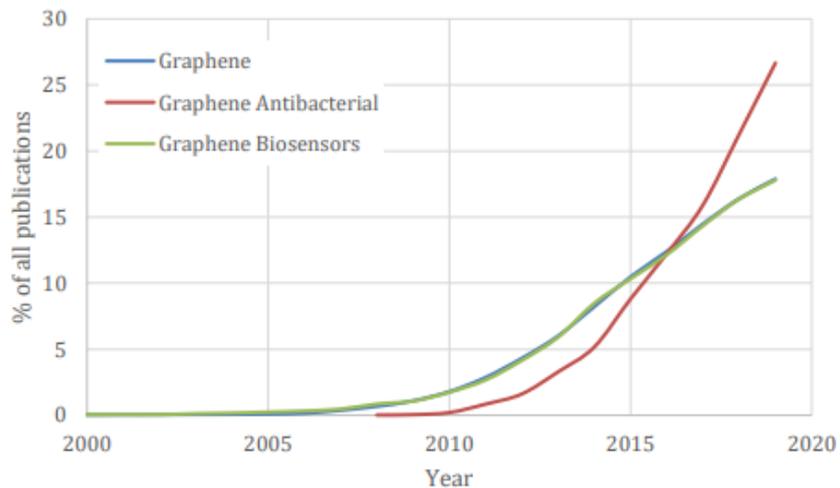
Karbon memiliki kualitas fisik superlatif, yang sebagian besar berasal dari ikatan kovalen yang kuat antara atom-atomnya (hibridisasi sp^3). Tidak seperti berlian, grafit khususnya digambarkan terdiri dari struktur pipih (berlapis, planar). Pada setiap lapisan, atom karbon tersusun dalam kisi heksagonal dengan pemisahan 0,142 nm (hibridisasi sp^2), dan jarak antar bidang (lapisan) adalah 0,335 nm. Dua bentuk grafit yang diketahui, (heksagonal) dan (rhombohedral), memiliki sifat fisik yang sangat mirip. Struktur pipih memiliki gaya yang jauh lebih kuat di dalam bidang lateral daripada di antara bidang.

2.2 Grafena

Grafena merupakan alotrop kristalin dari atom karbon yang membentuk struktur kisi heksagonal dengan hibridisasi sp^2 . Atom karbon sp^2 membentuk kisi kristal *honeycomb*. Grafena memiliki sifat yang istimewa dan sedang banyak dikembangkan beberapa tahun terakhir. Grafena dapat diaplikasikan pada berbagai bidang, seperti dalam pembuatan elektroda, superkapasitor, dan baterai lithium ion. Selain itu juga dapat digunakan sebagai bahan pembuatan layar sentuh, bola lampu, dan sel surya karena memiliki konduktivitas panas dan listrik yang baik. Grafena berikatan secara heksagonal dengan luas permukaan sebesar $0,052 \text{ mm}^2$ dan massa jenisnya adalah $0,77 \text{ mg/m}^2$ dengan konduktivitas listrik grafena sebesar $0,96 \times 10^6 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ dengan konduktivitas termal yang tinggi yaitu 5000 W/mK . Sehingga dinilai dapat menjadi solusi yang baik untuk material penyerapan gelombang yang transparan karena grafena mempunyai sifat optis lebih dari 97% dan mempunyai ketebalan yang tipis (Khalid dkk, 2017).

Kapasitas produksi serpihan grafena di seluruh dunia setara dengan sekitar 7000 ton per tahun. Cina memiliki sejumlah besar sumber daya grafit di seluruh dunia dan dikenal sebagai negara dengan kapasitas produksi yang sangat besar di banyak sektor. Ini juga dapat dilihat dalam statistik paten karena sebagian besar paten yang terkait dengan manufaktur graphene diajukan di China. Grafena memiliki banyak potensi untuk bioteknologi, dan jalur pemasarannya yang berbeda secara signifikan (dalam waktu, investasi, sumber daya, persyaratan peraturan) antara berbagai jenis aplikasi (diagnostik, implan, pengiriman obat, dll.). Tingkat

publikasi artikel ilmiah yang menyebutkan pembuatan graphene meningkat pesat hingga sekitar tahun 2014 dan sejak saat itu cukup stabil, lihat gambar 2.1.



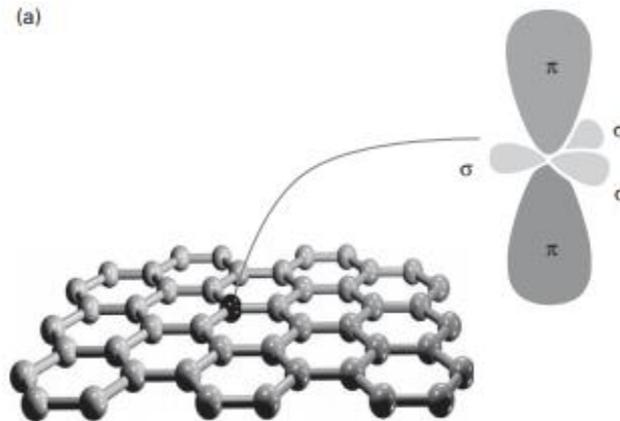
Gambar 2.1 Jumlah total publikasi ilmiah per tahun untuk pembuatan grafena (Sophie, 2020)

Hal ini sangat kontras dengan jumlah total artikel yang diterbitkan tentang grafena yang tingkat publikasinya meningkat lebih dari dua kali lipat sejak tahun 2014. Salah satu alasannya mungkin karena banyak perkembangan di bidang ini sekarang menjadi paten atau rahasia perusahaan alih-alih dipublikasikan secara terbuka dalam komunitas ilmiah. (Sophie, 2020)

2.2.1 Struktur grafena

Grafena, menurut definisi, adalah alotrop karbon dalam bentuk 2D, skala atom, kisi heksagonal heksagonal di mana satu atom membentuk setiap simpul dengan hibridisasi sp^2 . Karbon adalah satu-satunya elemen yang memiliki alotrop stabil di dimensi 0 hingga 3, yang kesemuanya memiliki banyak sifat luar biasa. Grafena adalah blok bangunan dasar dari

alotrop karbon dan merupakan *single layer* dari grafit. Dalam grafena dua dimensi, atom karbon disusun secara berkala tak terhingga dalam kisi sarang lebah (*honeycomb*) yang dapat dilihat pada Gambar 2.1. Struktur atom seperti itu ditentukan oleh dua jenis ikatan dalam hibridisasi sp^2 .



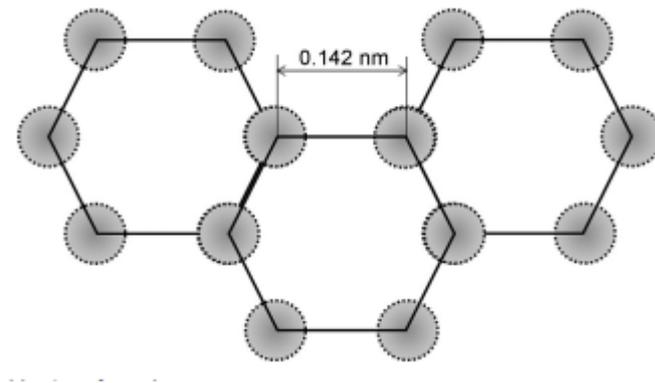
Gambar 2.2 Kisi Struktur Honeycomb Grafena (Luis. E.F. 2020)

Tiga orbital σ dalam graphene, dan orbital π tegak lurus dengan lembaran. Ikatan σ dalam jaringan heksagonal karbon sangat menghubungkan atom karbon dan bertanggung jawab atas energi ikat dan sifat struktural dari atom karbon lembar graphene. Ikatan π tegak lurus dengan permukaan lembaran. Yang sesuai ikatan dan anti ikatan pita σ dipisahkan oleh celah energi yang besar sebesar ~ 12 eV; sementara (b) ikatan dan anti ikatan π terletak di sekitar tingkat Fermi (EF). Akibatnya, σ obligasi sering diabaikan untuk prediksi sifat elektronik graphene di sekita Energi fermi.

2.2.2 Sifat Grafena

Grafena memiliki banyak sifat luar biasa dalam hal transparansi optik, konduktivitas listrik, kekuatan mekanik, dan konduktivitas termal. Grafena

adalah bahan super ringan dengan kerapatan planar $0,77 \text{ mg/m}^2$. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3, struktur unit grafena adalah cincin karbon heksagonal dengan luas $0,052 \text{ nm}^2$.



Gambar 2.3 Struktur Hexagonal Grafena

panjang ikatan karbon karbon sekitar $0,142 \text{ nm}$. Ada tiga ikatan di setiap kisi dengan koneksi kuat membentuk struktur heksagonal yang stabil. Konduktivitas listrik graphene sebagian besar dikaitkan dari ikatan yang terletak secara vertikal ke bidang kisi. Stabilitas grafena adalah karena atom karbonnya yang padat dan hibridisasi orbital sp^2 kombinasi orbital s, px, dan py yang membentuk ikatan- σ . Elektron pz terakhir membentuk ikatan π . Ikatan- π berhibridisasi bersama untuk membentuk pita- π dan pita- π^* . Pita ini bertanggung jawab atas sebagian besar sifat elektronik penting graphene, melalui pita setengah terisi yang memungkinkan elektron bergerak bebas. (Zhen, 2018)

Grafena dapat dianggap sebagai struktur unit grafit, CNT, dan fullere, serta molekul aromatik dengan ukuran tak terbatas, seperti hidrokarbon aromatik

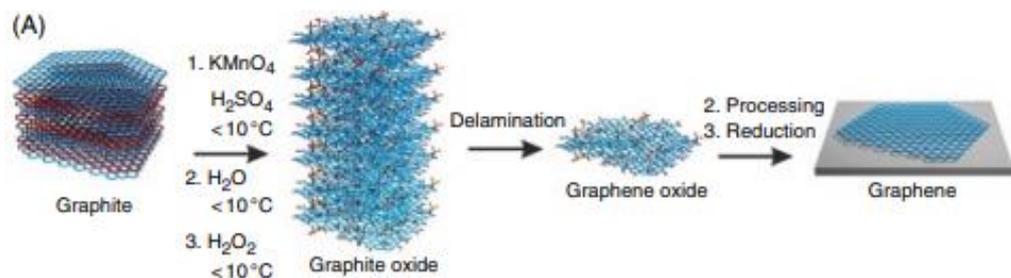
polisiklik yang sangat planar. Cincin seperti itu hanya terdiri dari dua atom karbon karena setiap atom di titik dibagi oleh tiga cincin satuan. Grafena hanya terdiri dari satu lapisan atom atom karbon yang juga berkontribusi pada keunggulannya sebagai supertipis dan ultraringan.

Properti lain yang menarik dari graphene adalah mobilitas elektron. Grafena adalah bahan yang paling konduktif sejauh ini pada suhu kamar, dengan konduktivitas 10^6 S/m dan resistansi lembaran $31\Omega /\text{sq}$ (Ks Kim,dkk 2009). Hal ini dikaitkan dengan mobilitas ultra tinggi 2×10^5 cm^2/Vs yang hampir 140 kali mobilitas dalam silikon. Seperti disebutkan sebelumnya, atom karbon dalam graphene adalah sp^2 hibridisasi, menyumbangkan satu elektron ekstra ke ikatan . Elektron , dalam hal ini, benar-benar bebas bergerak dengan sedikit gangguan pada suhu kamar, menghasilkan konduktivitas yang tinggi. Selain itu, graphene adalah semimetal yang khas di mana ada tumpang tindih kecil antara pita konduksi dan pita valensinya. Oleh karena itu, elektron di bagian atas pita valensi dapat mengalir ke bagian bawah pita konduksi dengan energi yang lebih rendah tanpa adanya rangsangan panas. Bahkan pada suhu nol mutlak, konsentrasi elektron tertentu sudah berada di pita konduksi sementara konsentrasi lubang tertentu ada di pita valensi (Y.W Son, 2006).

2.3 Grafena Oksida

Grafena oksida merupakan senyawa turunan grafit dengan karakteristik yang serupa serta struktur yang mirip dengan grafena. Perbedaan tersebut yaitu pada struktur grafena yang berbentuk planar, sedangkan pada struktur grafena oksida

terdapat adanya gugus oksigen di dalamnya sehingga membuat strukturnya terdapat lekungan. Perbedaan grafena dengan grafena oksida secara umum terlihat grafena oksida yang ditandai hadirnya gugus hidroksil dan karbonil. GO, Grafena oksida dapat disintesis dari grafit yang terjadi secara alami, maupun dari grafit sintetis. Tiga bentuk grafit alam ditambang: grafit vena, grafit serpihan dan grafit amorf/mikrokristalin. Grafit vena adalah bijih yang paling murni, dengan yang tertinggi kandungan karbon sebelum perlakuan ($> 90\%$). Namun, grafit vena saat ini hanya diproduksi oleh dua tambang di Sri Lanka dengan kapasitas terbatas, yang hanya menghasilkan 1% dari total produksi grafit alam dunia. (Wiley, 2017)



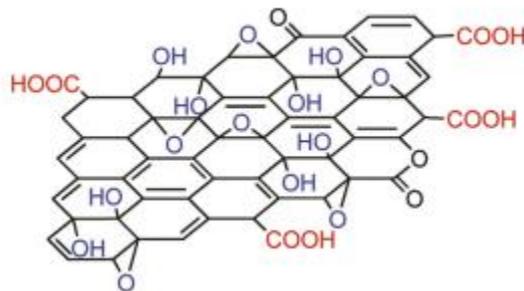
Gambar 2.4 Sintesis Grafit Menjadi Grafena (John. E 2016)

Grafit serpihan telah menjadi sumber utama grafit alam yang digunakan dalam penelitian GO dan pengembangan. Salah satu prekursor utama untuk sintesis grafena, biasanya dibuat dengan metode *hummers* terutama menggunakan grafit, asam sulfat pekat, natrium nitrat, kalium permanganat, dan hidrogen peroksida sebagai reagen. Setelah oksidasi, banyak oksigen- gugus yang mengandung, seperti gugus hidroksil, karboksil, dan epoksi, yang mengisi ke dalam struktur grafit.

2.3.1 Struktur Grafena Oksida

Untuk grafit oksida, terdapat puncak D yang lebar pada 1350 cm^{-1}

yang mewakili cacat struktural dan puncak G pada sekitar 1594 cm^{-1} yang sesuai dengan getaran domain grafit dalam spektrum Raman. Rasio D/G mendekati 0,95, menunjukkan sejumlah besar cacat dalam kisi kristal (Kudin, 2008). Dalam spektrum UV-vis, grafit oksida menunjukkan puncak serapan sekitar 233 nm karena transisi p ke p* ikatan C=C, dan lebar bahu antara 290 dan 300 nm menyumbang transisi p ke p* ikatan C=O. Grafit oksida tidak stabil secara termal seperti yang ditentukan oleh analisis gravimetri termal, dan mulai terurai saat suhu naik di atas 60-80 C, dan kehilangan hingga 60% dari total beratnya saat dipanaskan hingga 950 C.



Gambar 2.5 Skematik struktur Grafena Oksida

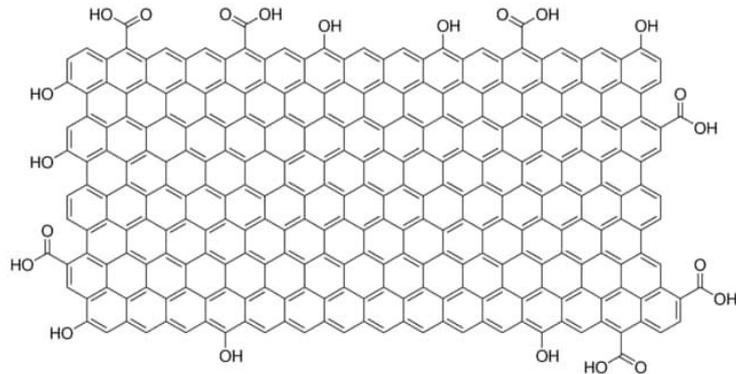
Salah satu keunggulan GO adalah mudah terdispersi dalam air dan pelarut organik lainnya, serta dalam matriks yang berbeda, karena adanya fungsi oksigen. Ini tetap menjadi properti yang sangat penting ketika mencampur bahan dengan matriks keramik atau polimer ketika mencoba meningkatkan sifat listrik dan mekaniknya. Namun, dalam hal konduktivitas listrik, GO sering digambarkan sebagai isolator

listrik karena terganggunya jaringan ikatan sp^2 nya. Untuk memulihkan kisi heksagonal sarang lebah, dan dengan itu konduktivitas listrik, pengurangan GO harus dicapai. Harus diperhitungkan bahwa setelah sebagian besar gugus oksigen dihilangkan, rGO yang diperoleh lebih sulit untuk didispersikan karena kecenderungannya untuk membuat agregat. Fungsionalisasi GO secara mendasar dapat mengubah properti GO. (S.Ray. 2014)

2.4 Grafena Oksida Tereduksi

Gangguan jaringan dua dimensi (2D) murni dari ikatan hibridisasi sp^2 biasanya dieksploitasi sebagai sarana pembukaan celah energi. Hal ini terjadi karena adanya modulasi kisi periodik, pembentukan pita nano atau anti-titik dan adsorpsi permukaan yang berpola. Fungsionalisasi grafena dengan adsorpsi permukaan oksigen atom, fluorin, dan hidrogen telah ditunjukkan secara eksperimental untuk mempengaruhi modifikasi elektronik semacam itu. Sampai saat ini, hidrogenasi graphene telah menjadi pendekatan eksperimental yang paling umum terhadap pembentukan celah energi. Dalam kasus ini, satu elektron 1s hidrogen memutus ikatan rangkap C–C hibridisasi sp^2 untuk membentuk ikatan hibridisasi sp^3 , mengganggu jaringan p-elektron. Metode *hummers* yang dimodifikasi menggabungkan oksidasi dan sonifikasi untuk mengubah grafit menjadi grafena oksida (GO) dan kemudian GO terkena bahan kimia pereduksi seperti hidrazin. Karena grafena yang dihasilkan hanya berkurang sebagian, konduktivitasnya jauh lebih rendah dibandingkan dengan sampel berkualitas tinggi

yang diperoleh melalui pengelupasan grafit secara mekanis.



Gambar 2.6 Skematik grafena oksida tereduksi

Meskipun masih tidak cocok untuk aplikasi dalam nano-elektronik kinerja tinggi, oksida graphene (rGO) tereduksi diharapkan dapat dimanfaatkan dalam superkapasitor untuk penyimpanan energi, elektroda dalam baterai *Li-ion* atau untuk transparan elektroda dalam sel surya.

2.5 Sintesis Grafena

Sintesis grafena dapat dibagi menjadi dua jenis pembuatan yaitu *top-down* dan *bottom-up* (Edwards dan Coleman, 2013):

Top Down

2.5.1 *Micromechanical cleavage, scotch tape* atau *peel-off* melibatkan pengelupasan grafit menggunakan pita perekat untuk membelah lapisan, dan merupakan metode pertama yang digunakan untuk secara eksperimental mengisolasi grafena.

- 2.5.2** *Electrochemical exfoliation*, dalam studi awal untuk pengelupasan elektrokimia grafit melibatkan penggunaan grafit sebagai elektroda korban dan mengumpulkan bahan terkelupas dari larutan elektrolit. Elektrolit yang digunakan sampai saat ini termasuk larutan surfaktan dan H₂SO₄-KOH.
- 2.5.3** *Exfoliation graphite oxide*, metode untuk mendapatkan grafena yang paling umum adalah eksfoliasi dan reduksi oksida grafit. Secara historis grafit oksida telah disintesis melalui oksidasi grafit menggunakan asam pekat dan oksidan kuat, dalam metode telah dicetuskan oleh Straudenmaier, Brodie, atau Hummers. Menjelaskan grafit oksida memiliki struktur berlapis dengan gugus hidroksil dan karboksil pada tepi lembaran grafena.
- 2.5.4** *Arc discharge*, pencabutan busur dimana arus searah melewati antara elektroda grafit dengan kemurnian tinggi, telah banyak digunakan dalam sintesis bahan nano karbon termasuk *fullerene* dan *carbon nanotube*. Metode ini telah digunakan untuk mensintesis grafit menjadi *few-layer graphene*.
- 2.5.5** *Unzipping carbon nanotubes*, grafena dapat disintesis dengan membuka carbon nanotube tunggal atau multi-walled menggunakan metode kimia basah seperti agen

pengoksidasi kuat, atau dengan metode fisik seperti iradiasi laser 120 dan etsa plasma *nano ribbon* yang ditentukan dari diameter tabung.

Bottom-Up

2.5.6 *Epitaxial growth on silicon carbide*, pembentukan grafena pada silikon karbida (SiC) menghasilkan sublimasi silikon dari permukaan SiC dan selanjutnya grafitisasi atom karbon. Proses ini terjadi pada temperatur tinggi (>1000°C) dan umumnya dilakukan dalam kondisi *ultra-high vakum* (UHV), meskipun pertumbuhan dalam atmosfer argon atau dengan adanya sejumlah kecil disilan telah terbukti mengurangi tingkat sublimasi silikon, temperature yang lebih tinggi akan menghasilkan kualitas grafena semakin baik.

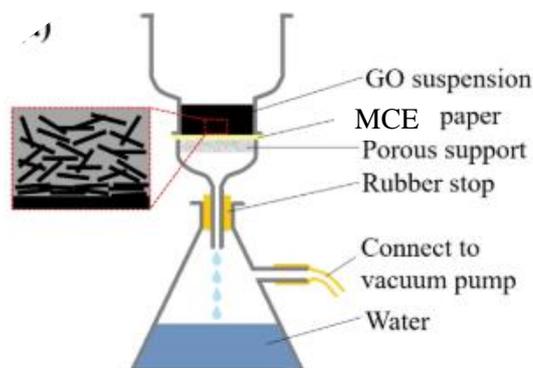
2.5.7 *Chemical vapour deposition* (CVD), dimana grafena dibentuk oleh hasil pirolisis karbon yang mengandung gas bertemperatur tinggi, telah banyak digunakan untuk menumbuhkan lapisan grafena pada substrat transisi logam dan merepresentasikan area yang sangat aktif dari grafena. Pertumbuhan grafena CVD dapat dikategorikan sebagai proses melalui metode katalisis permukaan atau pemisahan berdasarkan logamnya.

2.5.8 *Miscellaneous methods*, metode sintesis grafena hasil

pirolisis *solvothermal* natrium dan etanol yang menghasilkan beberapa lapisan grafena melalui pengurangan senyawa selain karbon menggunakan asinasi magnesium dalam *dry ice*, mengkalsinasi kalsium karbonat dengan bubuk magnesium, dan mengkalsinasi aluminium sulfida (Al_2S_3) dalam karbon monoksida.

2.6 Vakum Filtrasi

Filtrasi vakum adalah teknik untuk memisahkan produk yang solid dari campuran reaksi pelarut atau cair. Campuran padat dan cair dituangkan melalui kertas filter dalam corong Buchner. Dalam vakum filtrasi, teknik laboratorium kimia yang memungkinkan laju filtrasi yang lebih besar. Sedangkan dalam filtrasi normal, gravitasi memberikan gaya yang menarik cairan melalui kertas saring, dalam filtrasi hisap, gradien tekanan melakukan fungsi ini. Dapat dilihat untuk sekematik vakum filtrasi dalam Gambar 2.7. Adapun dalam vakum filtrasi memiliki keuntungan seperti tingkat variabel tergantung pada kekuatan pompa yang digunakan untuk mengekstrak udara dari labu Büchner.



Gambar 2.7 Skematik Vakum Filtrasi (S. Liu. 2019)

2.7 Karakterisasi Grafena

Parameter keberhasilan dalam penelitian ini yaitu dengan mengkarakterisasi material menggunakan *X-ray Diffraction* (XRD), *Raman Spectroscopy*, *Spectroscopy Electron Microscopy* (SEM), *Four Point Probe* (FPP).

2.7.1 *X-ray Diffraction* (XRD)

X-ray diffraction disingkat XRD adalah instrument untuk menyelidiki struktur kristal material. Teknik ini berawal dari penemuan von Laue pada tahun 1912 ialah kristal difraksi sinar, cara difraksi mengungkapkan penentuan struktur kristal. Namun telah dikembangkan saat ini tidak hanya untuk penentuan struktur, tetapi juga untuk Analisa senyawa kimia, pengukuran tegangan, kesetimbangan fasa, pengukuran ukuran kristal, hingga penentuan orientasi satu kristal (Cullity, 1978).

Data dari XRD berupa intensitas dari difraksi sinar X dari radiasi gelombang elektromagnetik hasil penembakan logam berelektron tinggi dengan panjang gelombang $0,5\text{\AA} - 2,5\text{\AA}$ yang disimbolkan dengan sudut difraksi 2θ . Intensitas merupakan pantulan sinar X yang terdeteksi oleh *detector* bergantung pada susunan orientasi kristal tiga dimensi dari atom- atom yang berulang. Kondisi ini ditulis dengan persamaan Bragg:

$$n\lambda = 2d \sin\theta \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan:

n = bilangan bulat 1, 2, 3

λ = panjang gelombang

d = jarak antar bidang

θ = sudut difraksi

Pola difraksi yang dipengaruhi oleh sinar X dapat membentuk grafik kurva, sehingga ukuran kristal pada material dapat dihitung menggunakan persamaan Scherrer-Warren constant (Stobinski dkk, 2014):

$$L = \frac{1,84 \lambda}{\beta \cos\theta} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana:

L = ukuran kristal

λ = panjang gelombang

β = FWHM (*Full Width Half Maximum*)

θ = sudut difraksi

2.7.2 Raman Spectroscopy

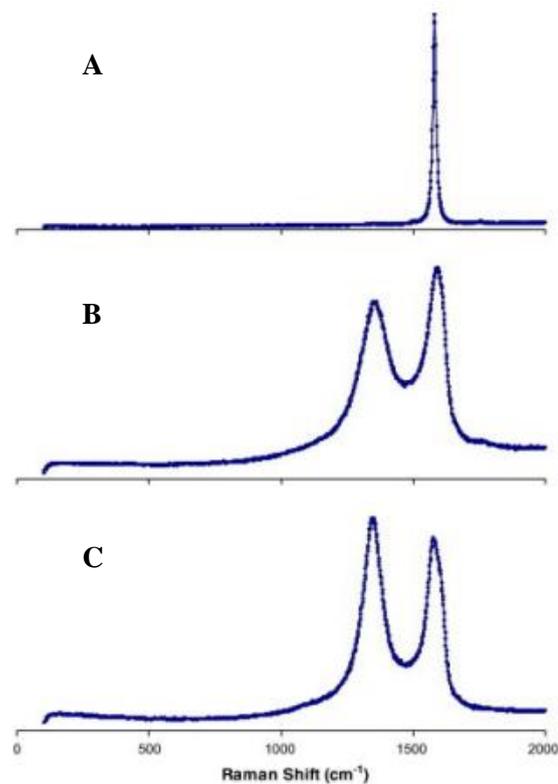
Spektroskopi Raman adalah teknik populer untuk analisis struktur molekul dan sekarang dianggap melengkapi spektroskopi inframerah. Spektroskopi Raman didasarkan pada efek Raman, yang pertama kali ditemukan oleh fisikawan India Chandrasekhara Venkata Raman pada tahun 1928. Menurut mekanika kuantum, ketika foton

berinteraksi dengan molekul, molekul dapat maju ke keadaan virtual energi yang lebih tinggi. Dari keadaan energi yang lebih tinggi ini, ada beberapa kemungkinan hasil. Salah satu hasil seperti itu adalah molekul turun ke tingkat energi vibrasi yang berbeda dari tingkat energi awalnya, dengan menghasilkan foton dengan energi berbeda. Selisih antara energi foton yang dihamburkan dan energi foton yang datang disebut Pergeseran Raman 1.

Spektrum Raman diukur dengan menarik sampel menggunakan sinar laser intensitas tinggi, dan melewatkan cahaya yang tersebar melalui spektrometer. Perbedaan energi antara cahaya datang dan cahaya yang dihamburkan disebut Pergeseran Raman. Dalam spektrum yang diperoleh, sumbu horizontal adalah bilangan gelombang dari pergeseran Raman (cm^{-1}) dan sumbu vertikal adalah intensitas cahaya yang dihamburkan. Bahan yang berbeda memiliki mode getaran yang berbeda, dan karena itu karakteristik spektrum Raman mereka sendiri. Hal ini membuat spektroskopi Raman menjadi teknik yang berguna untuk identifikasi material.

Ada satu perbedaan penting yang harus dibuat antara spektrum Raman gas dan cairan, dan yang diambil dari padatan (seperti kristal). Untuk gas dan cairan, memiliki tingkat energi vibrasi yang berbeda dari masing-masing molekul yang membentuk materi. Tapi, kristal terdiri dari molekul dengan tingkat energi vibrasi tertentu. Jadi, seluruh kisi kristal mengalami getaran pada tingkat makroskopik. Mode vibrasi

makroskopik ini disebut fonon. Berikut dapat dilihat pada Gambar 2.8 bentuk grafik raman spectroscopy oleh grafit, grafena oksida dan grafena oksida tereduksi



Gambar 2.8 Skematik *Raman Spectroscopy* a) Grafit, b) GO
c) rGO (Isaac, 2013)

2.7.3 *Four Point Probe (FPP)*

Four-point probe measurer (FPP) adalah alat yang biasa digunakan untuk mengukur nilai resistivitas suatu lapisan suatu bahan elektronik, yaitu bahan semi konduktor seperti silikon (Si), Germanium (Ge), Gallium Arsenide (GaAs). serta material logam dalam film tipis

(*thin layer*) yang digunakan pada perangkat elektronik. Seperti namanya, pengukur ini mengandalkan 4 *probe*; 2 *probe* untuk arus listrik dan 2 *probe* lainnya untuk mengukur tegangan ketika diterapkan pada material (sampel). Untuk menentukan dan mengkaji karakteristik material, perlu dilakukan pengukuran nilai resistivitas untuk luas dan ketebalan tertentu.

Beberapa parameter lain yang dapat diperoleh dari pengukuran material menggunakan alat ini adalah untuk mengetahui jenis doping suatu bahan semi konduktor (positif dan negatif) dan mobilitas elektronik suatu bahan. Dalam praktikum ini sampel atau bahan yang digunakan adalah kapur dan arang. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui resistivitas dan konduktivitas suatu material pada sampel berupa lembaran curah dan lembaran tebal.

Untuk memantau karakteristik listrik suatu bahan, sering digunakan metode *probe* empat titik (*probe* dengan empat titik). Disebut *probe* empat titik karena ada empat titik yang bersentuhan pada permukaan sampel. Keempat titik (*probe*) tersebut dibuat berjajar dalam satu garis lurus dengan jarak antar *probe* diatur sedemikian rupa, sehingga masing-masing *probe* memiliki jarak yang sama. Arus listrik konstan dialirkan sepanjang sampel melalui dua *probe* terluar. Jika sampel memiliki hambatan, maka akan terjadi penurunan tegangan ketika arus mengalir di sepanjang sampel. Perubahan tegangan diukur melalui dua *probe* bagian dalam. Besaran listrik yang menunjukkan kualitas konduktivitas material, seperti tegangan keluaran dan arus

keluaran, dapat ditentukan dengan cermat menggunakan metode *probe* empat titik.