

Graphene is advanced material because its strength,  
electric conductivity, flexibility, and transparency

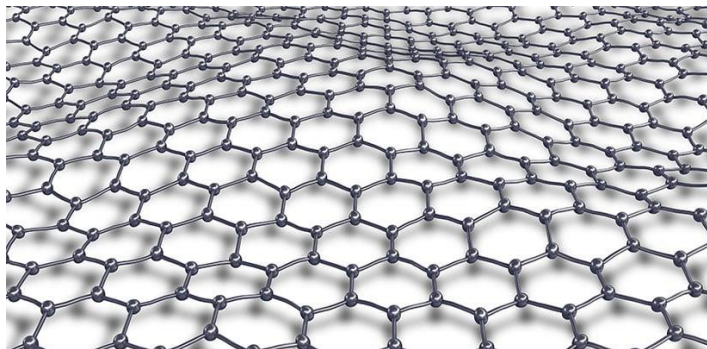
## Graphene Sebagai Material Terkuat

### ❖ Pendahuluan

Graphene adalah material maju berupa lapisan tipis karbon setebal satu atom yang tersusun dalam pola heksagonal. Graphene ditemukan pertama kali oleh Andre Geim dan Konstantin Novoselov pada tahun 2004 melalui metode yang sangat sederhana. Metode tersebut berupa menggunakan pita selotip lalu ditempelkan pada graphite dan dilakukan secara berulang kali sehingga mendapatkan lapisan yang lebih tipis. Graphene sendiri mendapatkan perhatian luas karena sifat-sifat fisiknya yang luar biasa. Bahkan, penemuan graphene juga membuat Andre Geim dan Konstantin Novoselov mendapatkan hadiah Nobel Fisika pada tahun 2010. Sifat-sifat luar biasa tersebut merupakan ketahanan mekanik sangat tinggi (200 kali ketahanan baja), konduktivitas listrik tinggi menyerupai tembaga, fleksibilitas, dan transparansi, menjadikannya kandidat ideal sebagai material paling revolusioner dalam aplikasi teknologi canggih.

### ❖ Bagaimana Graphene Bekerja?

#### Struktur Graphene



Graphene merupakan material rantai karbon dua dimensi yang setiap atom-atom karbonnya terhubung melalui ikatan kovalen dengan pola heksagonal. Rantai dua dimensi pada karbon menyebabkan material ini sangatlah tipis sehingga bersifat transparan.

#### Ketahanan Mekanik Yang Tinggi

Ketahanan mekanik suatu material dipengaruhi oleh ikatan atom-atomnya atau molekul-molekulnya dari material tersebut. Urutan ikatan antar atom atau molekul dari terkuat hingga terlemah sebagai berikut, ikatan ionik (antar atom), ikatan kovalen (antar atom), ikatan metalik (antar atom), ikatan hidrogen (antar molekul), gaya van der Waals (antar molekul). Secara logika, material dengan ikatan ionik harusnya menjadi material terkuat, tapi sebaliknya material dengan ikatan ionik justru sangatlah rapuh. Hal tersebut karena pada material ionik, atom-atomnya dalam bentuk ion-ion bebas sehingga ketika diberikan tekanan/ geseran maka dapat menyebabkan kondisi di mana ion-ionnya saling mendorong satu sama lain dan patah. Selanjutnya, material dengan ikatan kovalen sendiri terdiri dari molekul-molekul, ikatan kovalen digunakan untuk mengikat atom-atom menjadi molekul dan ikatan hidrogen atau gaya van der Waals digunakan untuk mengikat antar molekul tersebut. Sehingga, material dengan ikatan kovalen ini bersifat tidak terlalu kuat karena terdapat gaya antar molekulnya yang sangat lemah. Sehingga akhirnya, material dengan ikatan metalik lah yang merupakan material terkuat. Ikatan metalik merupakan ikatan dengan atom-atom (kation) nya diikat dengan gaya elektrostatik oleh elektron-elektron bebas. Ikatan ini mirip dengan ikatan ionik, hanya saja kunci perbedaannya berada pada elektron-elektron bebasnya yang dapat mengatur posisi sedemikian rupa (bergerak bebas) sehingga ketika diberi tekanan/geseran tidak akan patah melainkan akan melakukan deformasi, sebagai contoh material baja, aluminium dan lain-lain.

Graphene sendiri merupakan material berbasis karbon dengan ikatan kovalen. Kunci dari kekuatan pada graphene adalah karena graphene merupakan material berantai tak hingga yang setiap ikatannya merupakan ikatan kovalen. Normalnya, ikatan kovalen hanyalah mengikat atom-atom menjadi molekul dan untuk menjadi suatu material, molekul molekul tersebut diikat dengan ikatan hidrogen atau gaya van der Waals yang kekuatannya jauh lebih lemah dari ikatan kovalen. Namun, pada graphene seluruh atom-atom karbonnya saling mengikat satu sama lain tanpa adanya molekul atau ikatan molekul (atau bisa kita bilang pelat graphene sendiri merupakan hanya 1 molekul dengan rantai tak terbatas). Bahkan hanya dengan seluruh ikatan kovalen ini telah membuat suatu material menjadi jauh lebih kuat dari baja dengan seluruh ikatan metaliknya, contoh lainnya material diamond. Namun, bahkan graphene sendiri jauh lebih kuat dari sekedar material dengan seluruh ikatannya merupakan ikatan kovalen, karena graphene memiliki ikatan kovalen dengan hibridisasi  $sp^2$ . Alasan peningkatan kekuatan mekanik akibat hibridisasi ini akan dijelaskan dalam sektor pertanyaan. Ikatan kovalen dan hibridisasi tersebut membuat graphene menjadi material terkuat dengan kekuatan 200 kali material baja dalam aspek ketahanan tensile (tarikan dari arah sejajar dengan pelat graphene). Kemudian, memiliki kekuatan 10 kali lebih kuat dari material baja dalam aspek ketahanan tembusan (ketika ditumbuk partikel dengan arah tegak lurus pelat graphene [arah normal permukaan]).

## Konduktivitas Listrik dan Panas Yang Baik

Karbon sendiri memiliki elektron konfigurasi  $1s^2 2s^2 2p^2$ , sehingga pada graphene dengan orbital hibrida  $sp^2$  akan menyisakan 1 orbital  $p$  tanpa ikatan dan menyebabkan terdapat 1 elektron bebas untuk setiap 1 atom karbon. Elektron bebas ini membuat graphene menjadi konduktivitas listrik yang sangat baik seperti tembaga. Berbeda dengan diamond yang memiliki orbital hibrida  $sp^3$  sehingga tidak memiliki elektron bebas dan akhirnya memiliki sifat isolator. Elektron bebas ini juga membuat graphene memiliki konduktivitas panas yang tinggi. Hal tersebut karena panas langsung diantarkan oleh elektron bebas sehingga cepat berpindah dari suatu atom ke atom lain.

## Transparansi dan Fleksibilitas

Graphene sendiri memiliki sifat transparan karena lebar diameternya hanyalah 1 atom. Namun, mengejutkannya walaupun hanya berdiameter 1 atom dan sangat transparan, kita tetap dapat membedakan graphene dengan lingkungan sekitarnya. Hal tersebut karena graphite/ unsur karbon penyusun graphene sendiri memiliki sifat menyerap cahaya yang sangat tinggi, setiap 1 atom graphitenya dapat menyerap cahaya hingga 2%. Kemudian, tentunya karena diameternya ini juga graphene menjadi sangat fleksible tanpa kehilangan sifat mekaniknya.

### ❖ Sintesis Graphene

#### Eksfoliasi Mekanis

Eksfoliasi Mekanis adalah metode paling sederhana dan merupakan metode yang pertama kali diperkenalkan oleh Andre Geim dan Konstantin Novoselov. Metode ini dilakukan dengan cara mengekstrak graphene dari grafit menggunakan pita perekat. Metode ini dapat menghasilkan graphene 1 lapis, tapi hanya sebatas dalam fraksi-fraksi kecil sehingga tidak cocok dapat digunakan untuk produksi masal.

#### CVD (Chemical Vapor Deposition)

CVD adalah metode sintesis dengan mendekomposisi bahan kimia dalam fasa gas ke suatu permukaan logam (misalnya tembaga, nikel, dll). Dalam proses pembuatan graphene, fasa gas tersebut biasanya berupa metana ( $CH_4$ ) yang kemudian dialirkan melalui sebuah tabung panjang dengan panas tertentu ( $600 - 1000^\circ C$ ) untuk memecah atom karbon dengan hidrogen ( $CH_4 \rightarrow C + 2H_2$ ). Dalam tabung panjang tersebut terdapat juga lapisan substrat logam yang bergerak dengan kecepatan konstan. Nantinya atom-

atom karbon tersebut akan mengendap pada substrat logam dan membentuk pola heksagonal dengan sendirinya untuk meminimalkan energi potensial elektron. Setelahnya, substrat didinginkan dan graphene biasanya dipindahkan pada substrat lain seperti kaca, silikon, dan plastik. Memang metode ini tidak sepenuhnya menciptakan lapisan graphene sempurna, tapi dapat digunakan untuk produksi graphene dalam skala besar.

## Aplikasi Graphene

Graphene memiliki sifat unggul dalam banyak aspek seperti kekuatan luar biasa, konduktivitas listrik dan termal tinggi, transparansi dan fleksibilitas. Sifat ketahanan mekanik pada graphene, membuatnya dapat digunakan dalam banyak sekali aspek. Sebagai contoh, dapat digunakan sebagai bahan komposit (misalkan dengan polimer) sehingga dapat membuat material-material dengan sifat tertentu menjadi sangat kuat bahkan lebih kuat dari logam. Material ini juga dapat dijadikan sebagai alloy untuk membuat logam yang jauh lebih kuat lagi. Material kuat tersebut memiliki banyak sekali aplikasi seperti dalam industri otomotif, dirgantara, konstruksi bangunan, peralatan tempur, peralatan elektronik, dan lain-lain. Selain itu, sifat konduktivitas elektrik dan fleksibilitas dalam graphene, membuatnya dapat digunakan sebagai transistor, sirkuit fleksibel, layar sentuh, sensor, dan bahkan superkapasitor berkapasitas tinggi. Sebagai contoh, dapat digunakan untuk menciptakan kain pintar penghantar listrik, biosensor, kapasitor pada baterai, biosensor, dan masih banyak lagi aplikasinya.

## Pertanyaan

### Kenapa Ikatan Kovalen Hibrida $sp^2$ Pada Graphene Meningkatkan Kekuatan Mekaniknya?

Hibridisasi sendiri merupakan kondisi ketika orbital-orbital pada suatu atom (contoh  $s, p_x, p_y, d_z, etc$ ) bersatu menciptakan domain probabilitas baru. Hibridisasi orbital-orbital pada suatu atom bermacam-macam (contoh  $sp^2, sp^3, dp^3d, etc$ ) tergantung dari atom-atom lingkungan yang mengelilinginya. Hibridisasi sendiri terjadi karena elektron-elektron di suatu atom ingin berada pada posisi paling jauh antar elektronnya (VSEPR theory). Sebagai contoh, masing-masing 4 elektron pada kulit  $2s, 2s, 2p_x, 2p_y$  tidak akan berada pada posisi terjauhnya satu sama lain (buktinya terdapat daerah yang kosong  $2p_z$ ). Akan tetapi, apabila ke 4 orbit tersebut membentuk orbital hibrida  $sp^3$ , maka setiap elektron-elektronnya akan berada pada posisi terjauhnya dengan bentuk orbital tetrahedral. Selain perubahan orientasi orbital, apabila orbital hibridisasi tersebut membentuk ikatan kovalen

dengan orbital pada atom lain, maka ikatan yang terbentuk akan jadi lebih kuat (*ikatan  $\sigma$* ) dari ikatan kovalen biasa (*ikatan  $\pi$* ). Hal tersebut karena pada ikatan hibrida, elektron akan berada lebih dekat dengan inti atom akibat gabungan dua domain probabilitas (orbital tempat elektron valensi tersebut berada, misal  $p_x$ , dengan orbital lain yang biasanya berada satu lapisan lebih dalam [lebih dekat dengan inti atom], misal  $s$ ).

Karbon sendiri merupakan unsur yang dapat membentuk hibridisasi  $sp^2$  dan  $sp^3$  (*kristal diamond*). Sehingga, apabila kita menyusun karbon dalam bentuk heksagonal maka atom-atom karbonnya akan memiliki orbital hibrida  $sp^2$  dengan masing-masing sudut antar elektronnya  $120^\circ$ . Secara umum, orbital hibrida suatu atom membentuk ikatan kovalen dengan orbital “biasa” (seperti  $s$ ,  $p$ ,  $d$ ,  $f$ ) pada atom lain dan memiliki ikatan kovalen yang kuat (*disebut ikatan  $\sigma$* ). Namun, pada kasus graphene setiap orbital valensinya merupakan orbital hibrida  $sp^2$  sehingga ikatan kovalen yang terbentuk merupakan ikatan kovalen antara orbital hibrida. Hal tersebut membuat ikatan kovalen jadi semakin kuat lagi karena masing-masing elektronnya sangat dekat dengan masing-masing inti atomnya.

### **Apa Yang Menjadi Tantangan Terbesar Dalam Pengembangan Graphene?**

Masalah terbesar dalam pengembangan Graphene adalah sulitnya mensintesis graphene. Sampai sekarang, telah banyak metode-metode yang dapat digunakan untuk mensintesis graphene baik metode *Bottom-up approach* dan *Top-down approach*. Metode-metode *Top-down* meliputi *oxidation exfoliation reduction*, *ball milling*, *mechanical exfoliation*, *Un-Zipping CNTs*, dan *liquid exfoliation*. Sedangkan, metode *bottom-up* terdiri dari *Chemical vapour deposition*, *pyrolysis*, *SEGP*, *Epitaxial Growth on SiC*, dan lain-lain. Permasalahannya, tidak ada satu pun metode di atas berhasil menciptakan graphene sempurna dengan luasan graphene dan waktu produksi yang cocok untuk produksi dalam skala industri. Metode-metode konvensional seperti *mechanical exfoliation* dapat dengan mudah dilakukan dan menciptakan graphene 1 layer, tapi hanya dalam fraksi yang sangat kecil. Sedangkan, mudah lainnya seperti *oxidation exfoliation reduction* dapat menciptakan graphene tidak sempurna, terdiri dari beberapa layer dan terdapat atom oksigen di dalamnya sehingga membuat sifat-sifatnya sangat berubah dari graphene 1 layer. Saat ini, metode CVP (*Chemical Vapor Deposition*) adalah metode terbaik untuk menciptakan graphene dengan kualitas tinggi dengan luasan graphene cocok untuk berbagai aplikasi. Akan tetapi, metode CVP ini juga memiliki masalah lainnya, yaitu mahal harga dan lamanya waktu produksi dari graphene tersebut. Instrument CVP, senyawa dibutuhkan dalam CVP, energi untuk menjalankan instrument CVP tersebut sangatlah mahal sehingga tidak dapat dilakukan *mass production*. Selain itu, untuk memindahkan graphene dari substrat logam ke substrat silikon, kaca, polimer juga

memerlukan metode khusus yang sulit dan mahal untuk dilakukan. Oleh karena itu, untuk memenuhi kriteria komersial para ilmuwan terus melakukan pengembangan pada metode CVP ini untuk mengurangi biaya dan waktu produksi. Sebagai contoh, terdapat metode terkini yaitu mengkombinasikan CVP dengan *plasma-enhanced* para ilmuwan berhasil mengurangi suhu produksi graphene menjadi  $450^{\circ}\text{C}$  juga mereduksi waktu produksi sebanyak 5 menit.

## Kesimpulan

Graphene adalah salah satu material paling menjanjikan di abad ke-21 ini. Sifat-sifat luar biasa pada graphene, seperti kekuatan mekanik tinggi, konduktivitas listrik dan termal tinggi, fleksibilitas, dan transparansi, memiliki potensi untuk merevolusi berbagai bidang industri dalam banyak sekali aspek. Akan tetapi, terdapat tantangan besar terkait metode untuk mensintesis graphene dalam bentuk pelat luas yang dapat digunakan secara komersial. Untuk saat ini, aplikasi nyata dalam graphene sendiri masih belum terlihat banyak. Walaupun begitu, para ilmuwan tetap meneliti untuk menemukan metode sintesis yang jauh lebih efisien dengan biaya produksi lebih murah. Dengan berkembangnya penelitian ini, graphene mungkin saja menjadi kunci dari banyaknya inovasi teknologi di masa depan.

## Referensi

[1] Aafreen., Priyanka, Verma., Haris, Saeed. (2024). 1. Recent Advances in the Synthesis of Graphene and Its Derivative Materials. doi: 10.5772/intechopen.114280