

# GRAPHENE: SIFAT, FABRIKASI, DAN APLIKASINYA

Eko Widiatmoko

Departmen Fisika, Institut Teknologi Bandung

## ABSTRAK

Graphene merupakan material baru yang memiliki sifat elektronik unggul, di antaranya adalah mobilitas pembawa muatan yang tinggi, yang mencapai lebih dari  $200.000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ . Sifat ini dan lainnya menyebabkan graphene banyak diteliti, baik secara teori maupun eksperimental. Dibahas berbagai cara pembuatan menghasilkan graphene yaitu eksfoliasi, penumbuhan dari silikon karbida dan pada logam, dengan hasil yang bervariasi. Dibahas pula aplikasi dalam elektronik yaitu untuk kapasitor dan transistor efek medan.

## PENDAHULUAN

Graphene adalah susunan atom karbon dalam kerangka heksagonal serupa sarang lebah yang membentuk satu lembaran setipis satu atom. Penemuan graphene secara eksperimental terjadi tahun 2004 [1] Setelah itu, banyak dilakukan penelitian baik untuk memodelkan berbagai sifat dari graphene maupun untuk membuat dan memanfaatkannya.

Hasil-hasil penelitian, seperti yang akan dibahas di bagian-bagian selanjutnya, menunjukkan bahwa graphene memiliki sifat-sifat elektronik yang unggul, di antaranya mobilitas pembawa muatan dan konduktivitas yang tinggi. Sifat lain dari graphene yaitu celah pita energi (band gap) yang bernilai nol atau kecil, yang bergantung pada berbagai hal.

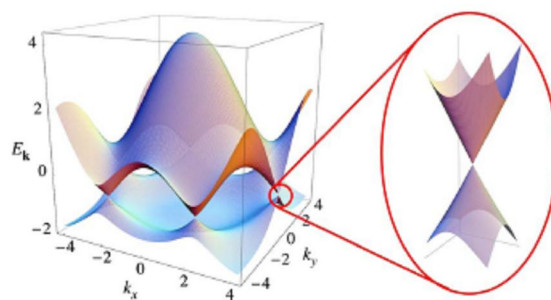
Dalam tulisan ini dibahas sifat-sifat elektronik graphene, kemudian berbagai cara pembuatan graphene. Cara-cara ini dibandingkan baik secara prosedur maupun dari hasilnya. Kemudian, dibahas beberapa aplikasi yang potensial dari graphene yaitu untuk pembuatan superkapasitor dan transistor efek medan.

## SIFAT ELEKTRONIK GRAPHENE

### Pemodelan

Untuk memahami sifat-sifat dasar graphene, orang melakukan pemodelan terhadap struktur kristal graphene. Sifat-sifat yang diteliti adalah kurva dispersi, band gap, konduktivitas, dan mobilitas pembawa muatan. Sedangkan, parameter-parameter yang ditinjau adalah dimensi lembaran graphene, jumlah lapisan, dan keberadaan pengotor (doping).

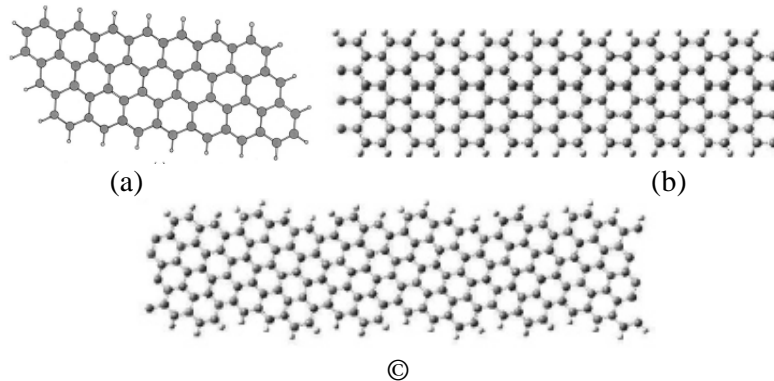
Graphene dalam bentuk lembaran (sheet) yang luasnya tidak terbatas memiliki hubungan dispersi seperti ditunjukkan dalam Gambar 1 [2]. Pada pojok-pojok zona Brillouin pertama, energi elektron pada pita konduksi tepat bertemu dengan pita valensi membentuk kerucut. Pada tempat ini, yang dinamakan titik Dirac, nilai energi berbanding lurus dengan momentum, sehingga massa efektif elektron adalah nol.



Gambar 1: Hubungan dispersi graphene.

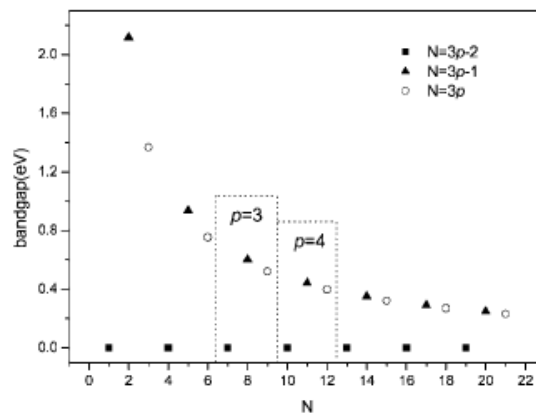
Hal ini menyebabkan graphene bersifat semilogam dengan band gap nol. Elektron-elektron graphene bersifat relativistik dan mengalami sedikit saja hamburan terhadap fonon sehingga batas atas mobilitas elektron graphene sangat tinggi yaitu  $200.000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  [3] Dalam kaitannya dengan efek medan, mobilitas elektron graphene yang didapatkan dari pemodelan mencapai  $80.000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  [4].

Berbagai penelitian juga telah dilakukan untuk memodelkan graphene yang bentuknya seperti pita, yang dikenal dengan sebutan Graphene Nanoribbon (GNR). Contoh susunan atom dalam GNR ditampilkan dalam Gambar 2. Pada Gambar 2 terlihat bahwa GNR bisa memiliki berbagai macam tepi. Tepi seperti pada Gambar 2a disebut *zigzag*, sedangkan tepi seperti pada Gambar 2b disebut *armchair*.



Gambar 2: Beberapa contoh Graphene Nanoribbon. (a) Tepi zigzag (b) Tepi armchair. (c) GNR dengan sudut kiral  $13,9^\circ$ . [5]

Hasil pemodelan menunjukkan bahwa GNR satu lapis memiliki band gap yang besarnya bergantung pada lebar pita. Untuk bentuk tepi armchair, terdapat tiga kelompok yang dibedakan oleh jumlah atom yang menyusun lebar pita, yaitu  $3n$ ,  $3n+1$ , dan  $3n+2$ . [5, 6, 7]. Hubungan besar band gap terhadap lebar pita yang didapatkan dari hasil pemodelan ditampilkan dalam Gambar 3.



Gambar 3: Hasil pemodelan band gap GNR satu lapis dengan bentuk tepi armchair dan zigzag [6].

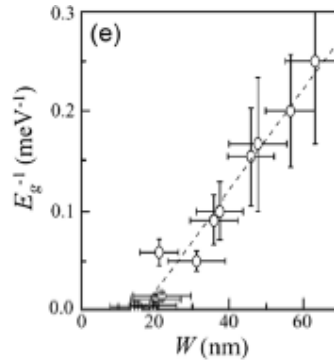
Ukuran yang sempit juga mempengaruhi mobilitas elektron graphene. Jika GNR semakin sempit maka mobilitas elektronnya berkurang. Berkurangnya mobilitas juga bisa disebabkan bentuk tepi yang tidak teratur [8].

Selain bentuk tepi, hal lain yang mempengaruhi parameter GNR adalah keberadaan atom lain. Jika atom-atom karbon di tepi pita dibiarkan saja, artinya ada valensi karbon yang tidak mendapat pasangan (*dangling bond*). Supaya stabil, atom-atom ini cenderung menangkap, atau sengaja dipasang, atom lain seperti hidrogen. Dalam hal ini tepi pita disebut *hydrogen passivated* [5]. Pemasangan atom seperti boron dan nitrogen pada tepi pita baik bentuk armchair maupun zigzag mungkin menjadikan GNR bersifat feromagnetik [9]

## Hasil Eksperimen

Pengukuran terhadap konduktivitas dan mobilitas pembawa muatan pada graphene menghasilkan nilai di bawah nilai teoretis. Ini disebabkan karena dalam eksperimen, graphene diletakkan atau ditumbuhkan pada suatu substrat. Keberadaan substrat menambah fonon yang bisa menghamburkan elektron graphene sehingga mobilitasnya berkurang. Penelitian awal mendapatkan hasil pengukuran mobilitas elektron  $10.000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  [1]. Hasil-hasil lainnya menunjukkan nilai yang berkisar dari  $3000 - 27000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  [4].

Untuk GNR, hasil pengukuran band gap menunjukkan bahwa memang band gap berbanding terbalik dengan lebar pita. Contoh hasil eksperimen ditampilkan pada Gambar 4. Pada eksperimen ini, bentuk tepi GNR tidak jelas, karena pembuatan yang belum sempurna. Kemungkinan bentuk tepi adalah campuran.



Gambar 4: Hasil pengukuran band gap pada GNR, berdasarkan [10].

## PEMBUATAN DAN PEMROSESAN GRAPHENE

Berbagai metode telah dikembangkan untuk membuat graphene secara terkendali dalam hal jumlah lapisan, luas, dan bentuknya. Metode-metode ini terbagi menjadi dua, yaitu pembelahan grafit menjadi lapisan-lapisan graphene (top down) dan penumbuhan graphene secara langsung dari atom-atom karbon (bottom up).

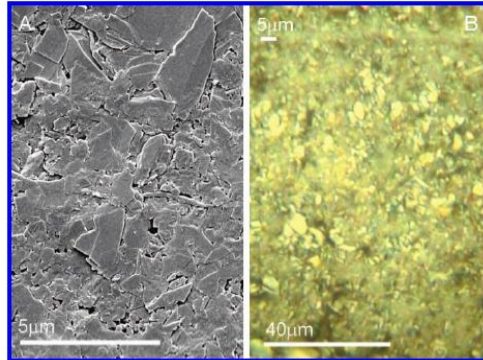
### Pengelupasan

Dalam metode pengelupasan (exfoliation), kristal grafit dibelah-belah menjadi lapisan-lapisan graphene. Cara yang paling awal adalah dengan selotip, yang dilakukan oleh [1]. Selotip ditempelkan pada grafit lalu dikelupas. Sebagian material yang terambil kemudian ditempel selotip lagi dan dikelupas, demikian seterusnya sampai didapatkan lapisan yang sangat tipis yang mungkin hanya terdiri dari satu lapisan graphene.

Metode ini dikembangkan lebih lanjut menjadi apa yang disebut *drawing method* (menggambar) [11]. Dalam metode ini, kristal grafit dipasang pada ujung Atomic Force Microscope (AFM) kemudian digoreskan seperti pensil pada substrat  $\text{SiO}_2$ . Lapisan-lapisan graphene terpisah dan menempel pada substrat.

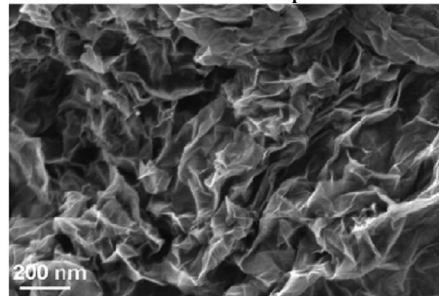
Cara lain untuk membelah grafit adalah dengan pelarutan atau dispersi dalam cairan. Salah satu metode adalah pelarutan dalam larutan surfaktan SDBS (sodium dodecylbenzene sulfonate) [12]. Dalam larutan ini, grafit yang hidrofobik menjadi dibasahi oleh air dan lapisan-lapisan graphene terlepas dengan sendirinya. Setelah itu dilakukan pengendapan dan pengeringan sehingga graphene dapat dikumpulkan. Eksperimen ini menghasilkan film graphene yang terlihat pada Gambar 5. Terlihat bahwa film ini merupakan gabungan dari banyak serpih-serpih graphene yang lebarnya sekitar  $1 \mu\text{m}$  dan jumlah lapisannya beberapa. Film ini memiliki tebal sekitar  $150 \text{ nm}$ , dan memiliki konduktivitas  $1500 \text{ S/m}$ . Nilai konduktivitas yang rendah ini disebutkan berasal dari adanya molekul surfaktan yang menempel pada film sehingga mengganggu jalannya elektron dan

menurunkan konduktivitas. Walaupun demikian, cara ini memiliki keunggulan bahwa memerlukan sedikit biaya.



Gambar 5: Film graphene yang dihasilkan dari pengelupasan dengan surfaktan.

Metode yang mirip dengan metode terakhir adalah pengelupasan dari graphene oksida (GO) [13]. Graphene oksida merupakan senyawa turunan dari graphene yang mengandung tidak hanya karbon, tetapi juga oksigen dan hidrogen. Dalam metode ini, GO dilarutkan dalam air. Karena GO tidak menolak air, lembaran-lembaran GO langsung terpisah dari kristal asalnya. Kemudian, untuk mendapatkan graphene, GO diendapkan dan direduksi dengan hidrazin. Graphene yang dihasilkan ternyata tidak rata dan karenanya memiliki konduktivitas yang rendah, yaitu  $0,05 - 2 \text{ S/cm}$  [14]. Contoh graphene yang dihasilkan dari metode ini ditampilkan dalam Gambar 6.



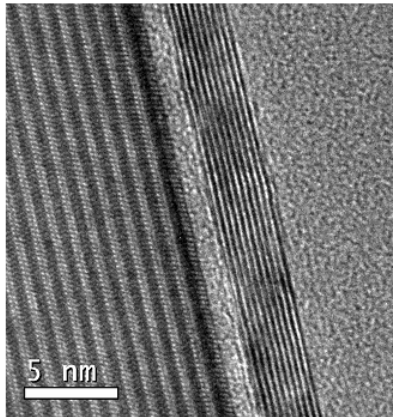
Gambar 6: Graphene yang dihasilkan dari graphene oksida.

### Penumbuhan dari Silikon Karbida

Graphene telah berhasil ditumbuhkan dari silikon karbida (SiC). Dalam metode ini, substrat SiC dipoles sampai sangat rata lalu dipanaskan dalam vakum tingkat ultra (Ultra High Vacuum,  $10^{-10}$  torr) sehingga atom-atom Si menyublim. Atom-atom karbon yang tertinggal di permukaan membentuk graphene [15]. Kristal SiC yang digunakan bisa merupakan polytype 4H, 6H, atau 3C [16, 17]. Dapat digunakan kristal SiC dengan muka silikon atau muka karbon. Cara lain adalah dengan membiarkan sedikit gas ( $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ) tersisa dalam vakum tingkat sedang ( $10^{-5}$  torr). Ternyata sedikit gas ini bereaksi dengan SiC menyisakan atom karbon yang membentuk graphene [18]. Hasil-hasil penumbuhan tersebut biasanya menghasilkan beberapa lapisan graphene. Graphene yang ditumbuhkan dari SiC memiliki mobilitas pembawa muatan mencapai  $1120 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  jika ditumbuhkan pada muka silikon dan  $18100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  jika ditumbuhkan pada muka karbon [19]. Contoh hasil penumbuhan terlihat dalam Gambar 7.

Keunggulan dari metode ini adalah bahwa substrat SiC dapat langsung digunakan sebagai substrat untuk membuat rangkaian elektronik dengan graphene. Untuk membuat pola pada graphene SiC dapat dilakukan dua cara. Pertama, dilakukan penumbuhan berpola, artinya graphene yang tumbuh langsung membentuk pola. Dalam metode ini, SiC ditutupi dengan aluminium nitrida pada bagian yang diinginkan [20]. Ketika penumbuhan dilakukan, bagian yang tertutup tidak tumbuh. Lapisan AlN kemudian dibuang. Dalam metode kedua, graphene yang telah ditumbuhkan tanpa

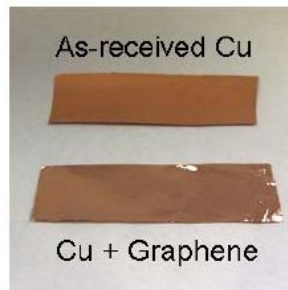
pola di etsa dengan plasma, misalnya oksigen atau helium [21, 22]. Untuk membuat jendela etsa digunakan HSQ yang dibuat berpola dengan electron beam.



Gambar 7: Hasil TEM dari graphene yang ditumbuhkan pada SiC dengan metode vakum tingkat rendah, diambil dari [18].

### Penumbuhan dengan Chemical Vapor Deposition (CVD) pada logam

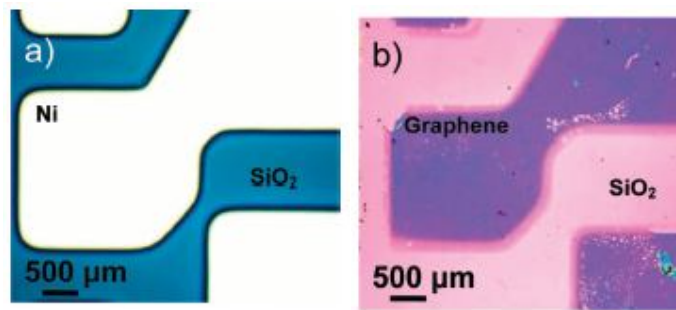
Penumbuhan dengan CVD telah dilakukan pada substrat logam seperti Ni dan Cu [23, 24, 25]. Logam-logam ini dipilih karena dapat dikikis dengan etsa sehingga graphene yang dihasilkan tidak terikat pada substrat logam. Gas yang bisa digunakan adalah metana + hidrogen. Telah dapat ditumbuhkan graphene pada nikel yang mencapai lebar beberapa sentimeter yang seluruhnya bersambungan [23]. Jika menggunakan substrat Cu, dihasilkan graphene yang jumlah lapisannya lebih sedikit dan sebagian besar merupakan lapisan tunggal [25]. Contoh graphene yang ditumbuhkan dengan cara ini ditampilkan pada Gambar 8.



Gambar 8: Contoh graphene yang ditumbuhkan dengan pada Cu [25].

Mekanisme penumbuhan graphene pada logam adalah sebagai berikut. Atom karbon yang berasal dari gas larut ke dalam substrat logam pada suhu  $1000^{\circ}\text{C}$ . Ketika suhu diturunkan, kelarutan karbon berkurang sehingga atom-atom karbon “mengendap” di permukaan logam menjadi graphene, sama seperti garam yang keluar dari es saat air asin membeku. Pertumbuhan graphene di sini bersifat membatasi diri pada satu lapisan saja. Graphene berlapis lebih dari satu ditemukan pada perbatasan kristal (grain boundary) logam [23].

Graphene yang telah ditumbuhkan pada logam dapat dipindahkan ke substrat lain seperti  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ . Pertama, graphene di atas logam diberi lapisan PMMA, lalu logam di etsa hingga habis. Selanjutnya, graphene yang menempel pada PMMA ditimpelkan pada substrat tujuan, lalu PMMA dikikis habis dengan aseton [26]. Dapat pula dilakukan penumbuhan berpola pada logam yang sudah dibuat berpola sebelumnya. Contoh hasilnya ditampilkan pada Gambar 9.



Gambar 9: Hasil penumbuhan berpola pada nikel [23].

Graphene yang ditumbuhkan pada logam memiliki mobilitas pembawa muatan mencapai  $100\text{-}2000\text{ cm}^2/\text{Vs}$  [23] yang rendah jika dibandingkan dengan nilai teoretis. Tetapi, metode ini memiliki keunggulan bahwa graphene dapat ditumbuhkan dengan luas dan jumlah lapisan yang dihasilkan adalah tunggal atau sedikit.

### Pemrosesan

Graphene yang sudah terbentuk dapat diproses lebih lanjut sehingga memiliki sifat-sifat tambahan. Pemrosesan ini misalnya doping dan pembuatan pola. Doping dilakukan untuk mengubah konsentrasi pembawa muatan, sedangkan pembuatan pola diperlukan untuk mencapai ukuran tertentu seperti yang telah disebutkan tentang GNR, atau untuk membuat rangkaian elektronik berbasis graphene.

Doping terhadap graphene dapat dilakukan dengan beberapa cara. Salah satu cara adalah dengan mencampur gas selama penumbuhan dengan gas sumber atom doping. Gas yang digunakan misalnya  $\text{B}_2\text{H}_6$  yang merupakan sumber boron, pyridine (sumber nitrogen), atau amoniak (sumber N) [27]. Cara lain adalah dengan menambahkan unsur doping setelah graphene dibuat. Ini dicapai misalnya dengan melapiskan HSQ (hydrogen silsesquioxane) pada graphene kemudian melakukan penyinaran dengan electron beam [28]. Dalam metode ini, penyinaran dengan intensitas tinggi menjadikan doping tipe-p sedangkan intensitas rendah menjadikan doping tipe-n.

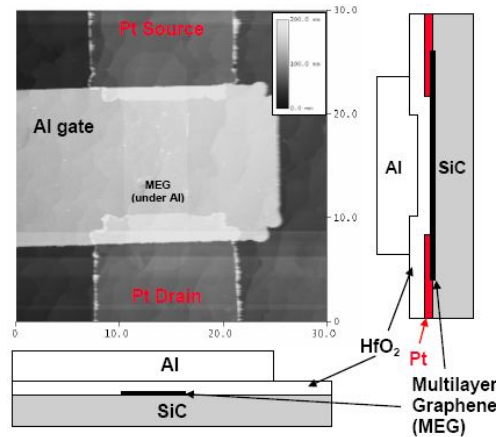
Beberapa cara pembuatan pola pada graphene telah dibahas sebelumnya, yang merupakan bagian dari proses pembuatan itu sendiri. Beberapa cara lain adalah membuat pola pada graphene lembaran yang sudah jadi. Cara yang banyak digunakan adalah etsa dengan plasma oksigen [21] atau helium [22]. Metode lain menggunakan AFM bertegangan untuk mengoksidasi graphene di tempat yang diinginkan [29] atau disebut juga LAO (*local anodic oxidation*).

### APLIKASI GRAPHENE

Berdasarkan sifat-sifat yang dimiliki graphene yaitu ukurannya yang tipis dan kemampuan transport elektronnya maka graphene cocok untuk dibuat menjadi beberapa alat seperti kapasitor dan transistor. Kapasitor yang dibuat dari graphene memiliki keunggulan berupa perbandingan luas permukaan terhadap massa yang besar, sehingga menghasilkan nilai kapasitansi per satuan massa mencapai  $205\text{ F/gram}$  dan rapat energi  $28,5\text{ Wh/kg}$ . Dihubungkan dengan kecepatan mengalirkan muatan listrik, kapasitor graphene mencapai nilai rapat daya  $10\text{ kW/kg}$  [30]. Jenis kapasitor graphene yang telah dibuat adalah kapasitor elektrolit dengan graphene dari reduksi graphene oksida sebagai kedua elektrodanya.

Aplikasi graphene menjadi transistor efek medan telah dilakukan oleh berbagai peneliti misalnya dalam [31]. Di sini, graphene berlapis beberapa ditumbuhkan dengan metode sublimasi SiC pada vakum tingkat tinggi, lalu elektroda Au dilapiskan dengan evaporasi. Untuk lapisan dielektrik gate digunakan polystyrene. Cara ini dipilih karena substrat SiC yang bersifat isolator dapat langsung dipakai sebagai substrat transistor.

Telah juga dilakukan percobaan pembuatan banyak transistor graphene sekaligus dalam satu chip, misalnya pada [32]. Citra AFM satu transistor yang dihasilkan ditampilkan dalam Gambar 10. Kualitas transistor yang dihasilkan diukur melalui mobilitas elektron yang dimiliki, yang pada hasil ini mencapai  $5000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ . Untuk transistor yang ditumbuhkan dari SiC, nilainya masih di bawah transistor graphene dari eksfoliasi. Walaupun demikian, graphene eksfoliasi sulit dibuat dengan massal.



Gambar 10: Citra AFM transistor yang dibuat oleh [32].

Transistor graphene juga bisa dibuat dari penumbuhan pada logam yaitu Cu [33]. Digunakan film Cu yang tipis sebagai substrat untuk penumbuhan graphene, kemudian graphene dan Cu dietsa membentuk kanal transistor. Pada bagian kanal yang tipis, Cu di bawah graphene dietsa sampai habis menyisakan graphene saja. Mobilitas elektron dalam transistor ini mencapai  $700 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ .

## KESIMPULAN

Telah dibahas beberapa sifat elektronik yang unggul dari graphene, yaitu konduktivitas dan mobilitas elektronnya yang tinggi. Sifat lain yaitu band gap bergantung pada bentuk graphene. Jika graphene dibuat berbentuk pita (GNR) maka band gap berbanding terbalik dengan lebar pita. Bentuk tepi juga menentukan band gap.

Graphene dapat dibuat dengan berbagai cara yang dapat dibagi menjadi dua kelompok. Kelompok pertama adalah pembelahan atau pengelupasan dari kristal yang lebih besar, yang dapat dilakukan secara mekanik atau dengan cairan. Kelompok kedua adalah pembuatan graphene pada alas material lain, yaitu SiC atau logam. Penumbuhan pada SiC menghasilkan graphene berlapis beberapa sedangkan graphene pada logam bisa berlapis tunggal saja.

Kualitas graphene, yang diukur dari mobilitas elektronnya, bervariasi berdasarkan cara-cara pembuatannya. Kualitas tertinggi dimiliki graphene hasil eksfoliasi mekanik, sedangkan kualitas terendah adalah graphene hasil reduksi graphene oksida. Graphene dari SiC dan graphene pada logam memiliki kualitas sedang.

Aplikasi yang potensial dari graphene adalah kapasitor. Kapasitor graphene memiliki kapasitansi per satuan massa yang besar sehingga bisa disebut superkapasitor. Aplikasi lain adalah transistor efek medan, yang telah dibuat baik dengan substrat SiC atau logam.

## REFERENSI

- [1] Novoselov, K. S. dkk. (2004) Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science* 306: 666.
- [2] Castro Neto, A. H. dkk. (2009) The electronic properties of graphene. *Rev. Mod. Phys.* 81, 109-162.
- [3] Morozov, S. V. dkk. (2008) Giant Intrinsic Carrier Mobilities in Graphene and Its Bilayer. *Phys. Rev. Lett.* 100, 016602.
- [4] Akturk, A., Goldsman, N. (2008) Electron transport and full-band electron-phonon interactions in graphene. *J. Appl. Phys.* 103, 053702

- [5] Barone, V., dkk. Electronic Structure and Stability of Semiconducting Graphene Nanoribbons. (2006) *Nano Lett.*, 6 (12), 2748 – 2754.
- [6] Zhang, X. W., Yang, G. W. (2009). Novel Band Structures and Transport Properties from Graphene Nanoribbons with Armchair Edges. *J. Phys. Chem. C* 113, 4662–4668.
- [7] Yu, S. S. dkk. Q.(2008) 'Electronic properties of graphene nanoribbons with armchair-shaped edges', *Molecular Simulation*, 34: 10, 1085-1090
- [8] Yang, Y. X., Murali, R. (2010) Impact of Size Effect on Graphene Nanoribbon Transport. arXiv:1001.2318v1 [cond-mat.mes-hall]
- [9] Owens, F. J. (2008) Electronic and magnetic properties of armchair and zigzag graphite nanoribbons. *J. Chem. Phys.* 128, 194701.
- [10] Han, M. Y. dkk. (2007) Energy Band-Gap Engineering of Graphene Nanoribbons. *Phys. Rev. Lett.* 98, 206805.
- [11] Zhang, Y. B. dkk. (2004) Fabrication and Electric Field Dependent Transport Measurements of Mesoscopic Graphite Devices. arXiv:cond-mat/0410314v1 [cond-mat.mes-hall]
- [12] Lotya, M. dkk. (2009) Liquid Phase Production of Graphene by Exfoliation of Graphite in Surfactant/Water Solutions. *J. Am. Chem. Soc.* 131, 3611–3620.
- [13] Stankovich, S. dkk. (2007) Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide. *Carbon* 45, 1558–1565
- [14] Gomez-Navarro, C. dkk. (2007) Electronic Transport Properties of Individual Chemically Reduced Graphene Oxide Sheets. *Nano Lett.* 7 (11), 3499–3503
- [15] de Heer, W. A. dkk. (2007). Epitaxial Graphene. *Solid State Comm.* 143, 92.
- [16] Aristov, V. Y. dkk. (2009). Graphene Synthesis on Cubic SiC/Si Wafers. Perspectives for Mass Production of Graphene-Based Electronic Devices. *Nano Lett.* 10 (3), 992–995.
- [17] Suemitsu, M. dkk. (2009) Graphene Formation on a 3C-SiC(111) Thin Film Grown on Si(110) Substrate. *e-J. Surf. Sci. Nanotech.* 7, 311-313.
- [18] Song, Z. M. (2006) *Fabrication and Characterization of Nanopatterned Epitaxial Graphene Films for Carbon Based Electronics*, Thesis, Georgia Institute of Technology.
- [19] Gaskill, D. K. (2009) Epitaxial Graphene Growth on SiC Wafers. arXiv:0907.5031v1 [cond-mat.mtrl-sci].
- [20] Rubio-Roy, M. (2010) Structured epitaxial graphene growth on SiC by selective graphitization using a patterned AlN cap. *Appl. Phys. Lett.* 96, 082112.
- [21] Lu, X. K. dkk. (1999) Patterning of highly oriented pyrolytic graphite by oxygen plasma etching. *Appl. Phys. Lett.* 75 (2), 193-195.
- [22] Bell, D. C. dkk. (2009). Precision Cutting and Patterning of Graphene with Helium Ions. *Nanotechnology* 20, 455301.
- [23] Reina, A. dkk. (2009) Large Area, Few-Layer Graphene Films on Arbitrary Substrates by Chemical Vapor Deposition. *Nano Lett.* 9 (1), 30-35.
- [24] Grüneis, A. (2009) Dynamics of graphene growth on a metal surface: a time-dependent photoemission study. *New J. Phys.* 11, 073050.
- [25] Li, X. S. dkk. (2009) Large-Area Synthesis of High-Quality and Uniform Graphene Films on Copper Foils. *Science* 324: 5932, 1312 – 1314.
- [26] Li, X. S. dkk (2009) Transfer of Large-Area Graphene Films for High-Performance Transparent Conductive Electrodes. *Nano Lett.*, 9 (12), 4359-4363.
- [27] Panchakarla, L. S. dkk. (2009) Synthesis, Structure and Properties of Boron and Nitrogen Doped Graphene. *Adv. Materials* 21 (46) , 4726-4730.
- [28] Brenner, K., Murali, M. (2010) Single step, complementary doping of graphene. *Appl. Phys. Lett.* 96, 063104.
- [29] Giesbers, A. J. M. dkk, (2008) Nanolithography and manipulation of graphene using an atomic force microscope. *Solid State Comm.* 147 (9-10), 366-369.
- [30] Wang, Y. dkk. (2009) *Supercapacitor Devices Based on Graphene Materials*, *J. Phys. Chem C* 113, 13103-13107.
- [31] Gong Gu, dkk. (2007) Field effect in epitaxial graphene on a silicon carbide substrate. *Appl. Phys. Lett.* 90, 253507.
- [32] Kedzierski, J. dkk. (2008) Epitaxial graphene transistors on SiC substrates. *IEEE Transactions on Electron Devices* 55, 2078.
- [33] Levendorf, M. P. dkk (2009) Transfer-Free Batch Fabrication of Single Layer Graphene Transistors. *Nano Lett.*, 9 (12), 4479-4483.