

PERANGKAT MEMORI BERBASIS *CARBON NANOTUBE* (CNT)

Anggraeni Kusumadewi
dewianggra@telkom.net

ABSTRAK

Carbon nanotube (CNT) adalah material yang banyak menjadi objek penelitian di bidang teknologi nano. Penelitian menunjukkan bahwa CNT dapat bersifat semikonduktor. Hal ini menjadi dasar munculnya berbagai penelitian untuk menjadikan CNT sebagai material penyusun perangkat memori. Artikel ini membahas mengenai CNT, karakteristiknya, berbagai penelitian yang berkaitan dengan pembuatan perangkat memori berbasis CNT, dan perkiraan masa depan perangkat memori ini.

Keywords: carbon nanotubes, nonvolatile memory, memory device

1. PENDAHULUAN

Teknologi nano membuka jalan bagi industri semikonduktor untuk dapat terus mengikuti Hukum Moore (*Moore's Law*) [1]. Teknologi ini dapat mewujudkan *chip* yang berukuran lebih kecil dengan biaya produksi yang lebih rendah, namun memiliki kemampuan yang lebih tinggi dibandingkan teknologi yang ada saat ini. Salah satu aplikasi teknologi nano yang menarik adalah pada teknologi pembuatan memori.

Karakteristik memori yang diinginkan saat ini antara lain berukuran kecil, kecepatan akses tinggi, dan kapasitas penyimpanan datanya besar. Sudah banyak penelitian yang dilakukan terhadap beberapa material baru yang menarik. Salah satu material baru yang cukup menjanjikan sebagai elemen perangkat memori adalah *carbon nanotube* (disingkat *CNT*).

2. *CARBON NANOTUBE* (CNT)

Pada tahun 1985, Richard E Smalley, Robert F Curl, Jr (keduanya dari Rice University, Houston, Amerika Serikat), dan Sir Harold W Kroto (dari University of Sussex, Brighton, Inggris) menemukan struktur karbon murni yang tersusun atas 60 atom karbon (C_{60}) [2]. Penemuan ini cukup menarik mengingat selama ini hanya ada dua bentuk unsur karbon murni yang dikenal: grafit dan intan.

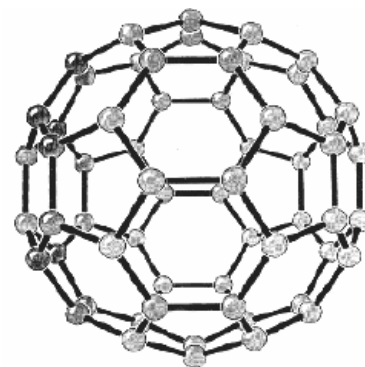
Struktur C_{60} tersebut diberi nama *buckminsterfullerene* atau disebut juga *bucky ball*. Nama ini dipilih karena strukturnya menyerupai bangunan berkubah seperti bola yang dirancang oleh seorang arsitek Amerika Serikat, R Buckminster Fuller untuk World Exhibition 1967 di Montreal, Kanada [2]. Penemuan yang dipublikasikan dalam jurnal *Nature* pada tanggal 14 November 1985 ini mengantarkan mereka memperoleh hadiah Nobel Kimia pada tahun 1996. Dalam perkembangan berikutnya, molekul C_{60} ini lebih dikenal dengan nama *fullerene* dan digunakan pula untuk untuk menamai molekul-molekul serupa yang ditemukan sesudahnya, seperti C_{70} , C_{74} , dan C_{82} [3].

Penemuan *fullerene* ini kemudian memicu ditemukannya material baru bernama *carbon nanotube*

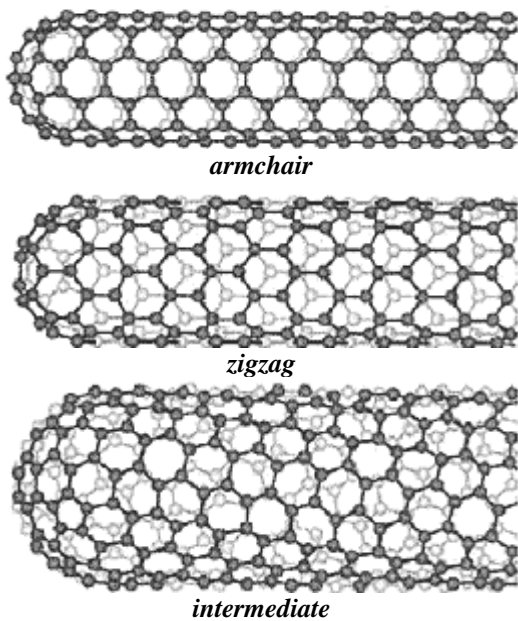
(*CNT*). Struktur *CNT* mirip dengan *fullerene*. Bedanya, atom-atom karbon pada *fullerene* membentuk struktur seperti bola, sedangkan *CNT* berbentuk silinder yang tiap ujungnya ditutup oleh atom-atom karbon yang berbentuk setengah struktur *fullerene* [3].

Struktur *CNT* pertama kali ditemukan oleh Sumio Iijima dari NEC Laboratories di Jepang [2,4,5]. Berdasarkan jumlah cangkang (*shell*) yang dibentuknya, ada dua golongan utama *CNT*: *single walled carbon nanotubes* (*SWCNT*) yang hanya membentuk satu cangkang (Gambar 2) dan *multiwalled nanotubes* (*MWCNT*) yang membentuk lebih dari satu cangkang berlapis [2,4,5,6].

Silinder *CNT* sering digambarkan sebagai lembaran-lembaran *graphene* (bagian dari struktur grafit) yang digulung [6, 10]. Silinder yang dibentuk dikarakterisasi berdasarkan diameter dan sudut kiralnya (*chiral angle*), atau oleh nilai indeks (n,m) (Gambar 3). Struktur *CNT* bernilai indeks (n,0) disebut struktur *zigzag*. Jika nilai indeksnya (n,n), strukturnya disebut struktur *armchair*. Struktur-struktur lainnya disebut struktur *intermediate* (antara *zigzag* dan *armchair*).



Gambar 1 Struktur molekul *buckminsterfullerene* (sebuah *bucky ball*) [11]



Gambar 2 Struktur CNT [5]

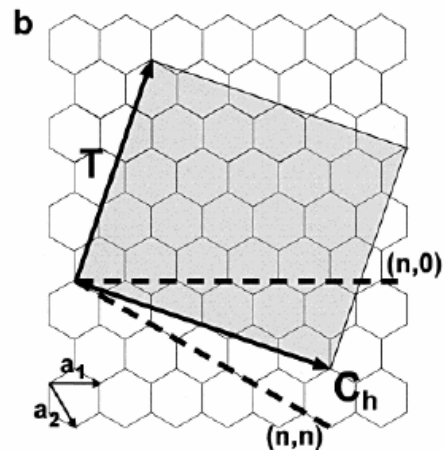
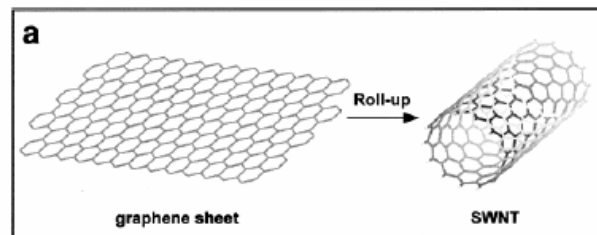
3. KARAKTERISTIK CNT

Molekul CNT sangat kuat, ulet, fleksibel, tidak mudah patah [7]. Pada tekanan tinggi, molekul-molekul CNT dapat bergabung membentuk struktur seperti tali yang disebut *nanorope*. Ada dua macam *nanorope*. Yang pertama terbentuk karena adanya gaya *van der Waals*, yang kedua terbentuk karena ikatan kovalen antar molekul CNT [8].

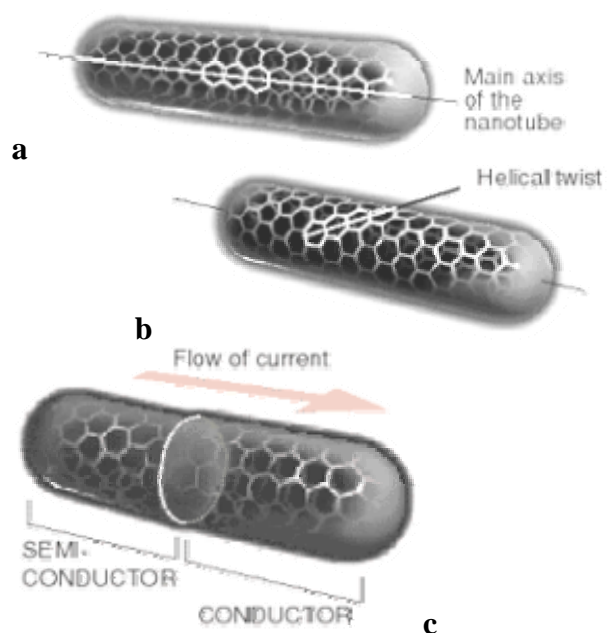
Dr. Alex Zettl rekan-rekannya dari University of California, Berkeley, berhasil membuktikan bahwa jika dua molekul CNT dengan struktur yang berbeda digabungkan, *junction* (titik pertemuan) antara keduanya dapat berfungsi sebagai dioda (Gambar 4) [9].

Nilai indeks (n,m) SWCNT menentukan sifat listriknya [6, 9]. Struktur *armchair* bersifat seperti logam, struktur *zigzag* dapat bersifat semilogam atau semiconducting, bergantung pada ukuran diameter spesifiknya, sedangkan struktur *intermediate* berifat semilogam dan semikonduktor. Pada MWCNT, meskipun terjadi interaksi antar cangkang yang mempengaruhi sifat listriknya, biasanya pengaruhnya dapat diabaikan.

MWCNT lebih mudah diproduksi dan biaya produksinya lebih rendah. Biaya produksi SWCNT lebih tinggi karena diperlukan biaya tambahan untuk pemurniannya. SWCNT dan MWCNT akan memiliki kegunaan yang berbeda sesuai dengan sifat-sifatnya. Di masa yang akan datang, MWCNT mungkin akan menjadi material yang dipilih untuk membangun struktur yang kuat (*structural reinforcement*), karena harganya murah dan kemurniannya tidak menjadi masalah. SWCNT mungkin akan lebih banyak digunakan untuk membangun sirkuit komputer [4].



Gambar 3 Lembaran graphene digulung membentuk CNT (a). Pada Gambar 3b, a_1 dan a_2 menyatakan vektor kisi (*lattice vector*), sedangkan $C_h = na_1 + ma_2$ adalah vektor penggulungan (*roll-up vector*). Garis putus-putus menandai susunan atom-atom karbon pada CNT yang mewakili indeks $(n,0)$ atau struktur *zigzag*, dan indeks (n,n) atau struktur *armchair*. T menyatakan vektor translasi (*translation vector*). Bagian yang diberi warna menyatakan bagian yang akan digulung membentuk CNT dengan nilai indeks $(4,2)$ [6]



Gambar 4 Dua jenis CNT yang berbeda sifatnya (a dan b) digabungkan membentuk struktur c [9].

4. PERKEMBANGAN PENELITIAN PEMBUATAN PERANGKAT MEMORI BERBASIS CNT

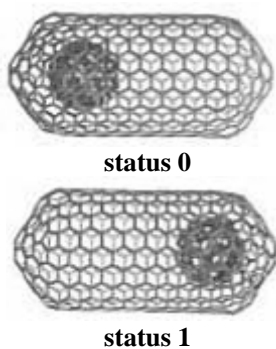
Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mewujudkan perangkat memori berbasis CNT. Beberapa di antaranya akan diuraikan secara ringkas sebagai berikut.

4.1 Perangkat Memori Bucky Shuttle

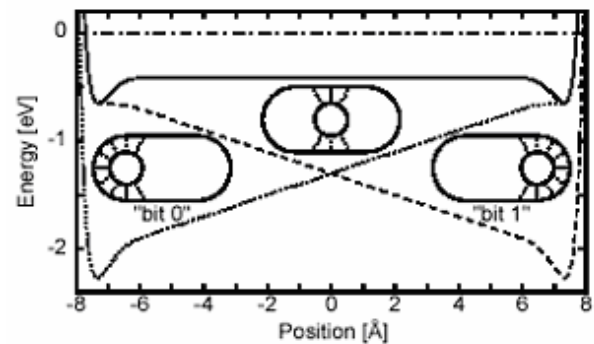
Perangkat memori *bucky shuttle* adalah perangkat memori berukuran nano (*nanomemory device (NMD)*) yang terdiri atas sebuah *buckyball* yang “dikurung” dalam CNT seperti contoh yang ditunjukkan pada Gambar 5 [11,12]. CNT yang dijadikan contoh pada Gambar 5 tersebut adalah C₂₄₀. Diameter bagian luar CNT tersebut kira-kira 1,4 nm dan panjangnya 2,0 nm. *Buckyball* yang digunakan berisi sebuah ion kalium (K⁺), sehingga menjadikannya bermuatan (ion K⁺ ini tidak ditunjukkan dalam gambar).

Struktur yang dibentuk oleh ion K⁺ dalam C₆₀ dalam C₂₄₀ ini (secara singkat dinyatakan sebagai K⁺@C₆₀@C₂₄₀) ini dianggap sebagai perangkat terkecil yang dapat dibuat. Di samping penggunaan struktur tersebut, ada beberapa alternatif lain yang juga pertimbangan, misalnya penggunaan CNT dengan ukuran yang lebih panjang, atau penggunaan satu atau lebih CNT lain untuk menggantikan *buckyball*.

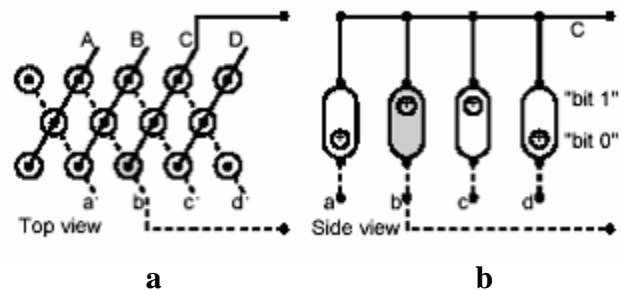
Status perangkat memori ditentukan oleh lokasi *buckyball*. Saat berada pada satu sisi CNT, ia dianggap menyatakan bit 0, dan pada sisi lain menyatakan 1. Stabilitasnya posisi *buckyball* pada kedua ujung CNT disebabkan oleh adanya gaya *van der Waals* antara *buckyball* dengan bagian ujung CNT tersebut.



Gambar 5 Status 0 dan 1 pada perangkat memori *bucky shuttle*. Gambar ini diambil dari simulasi komputer yang menggambarkan sebuah elemen memori berbasis CNT [14].

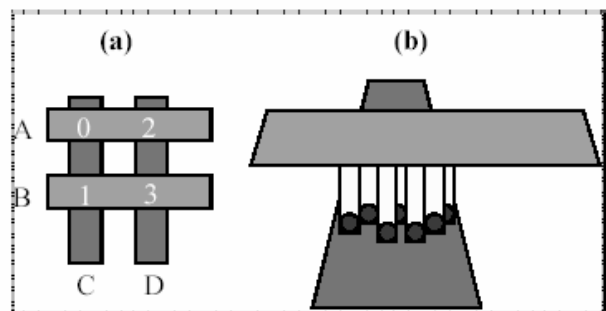


Gambar 6 Potensial energi ion K@C₆₀⁺ pada posisi yang berbeda dalam CNT. Garis tegas menyatakan kondisi tanpa medan listrik. Garis putus-putus menyatakan kondisi di bawah pengaruh medan listrik [11].



Gambar 7 Skema *high-density memory board* yang tersusun atas molekul-molekul CNT dilihat dari atas (a) dan samping (b). Saat tegangan listrik dialirkan antara konduktor b dan C, informasi bit disimpan pada elemen memori bC (ditandai dengan warna abu-abu) [11].

Untuk menyusun sel RAM yang besar, CNT dapat disusun membentuk kumpulan yang rapat, dan ditempatkan di antara dua lapisan kawat penghantar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8. Kawat penghantar yang digunakan dapat berupa logam, atau *nanowire* yang dibuat dari CNT. Jika kawat penghantar yang digunakan juga dibuat dari CNT, hanya dibutuhkan satu CNT untuk ditempatkan di antara kawat-kawat tersebut.



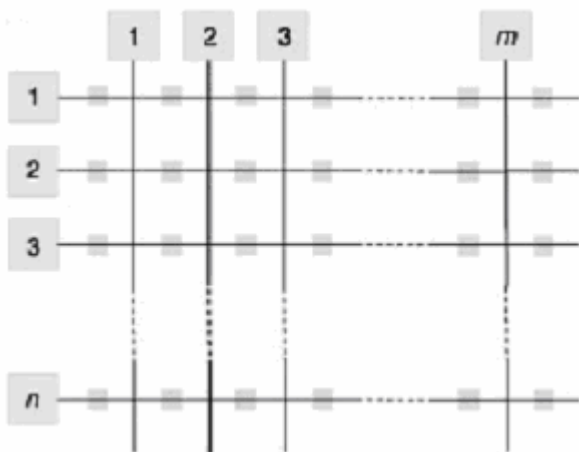
Gambar 8 (a) NMD 4-bit. (b) 1 bit digambar secara rinci [12].

4.2 Perangkat Memori Berarsitektur *Suspended Nanotube* (*Suspended Nanotube Device Architecture*)

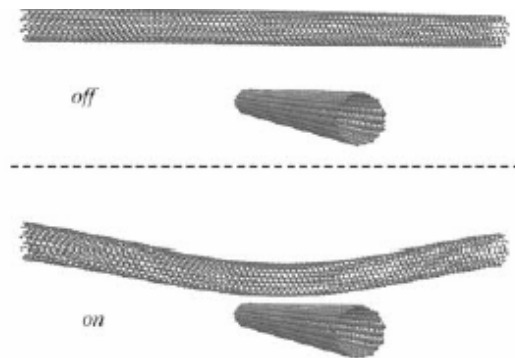
CNT dapat digunakan sebagai kawat molekuler (*molecular wires*) untuk menyusun *nonvolatile RAM* [13]. Sebagai elemen perangkat memori berarsitektur *suspended nanotube*, CNT dipasang menggantung (*suspended*) serta disusun saling bersilang (*crossed*) dan bertumpuk di atas substrat. Substrat yang digunakan terdiri atas lapisan penghantar (*conducting layer*), seperti silikon dengan kadar ketidakmurnian yang tinggi (*highly doped silicon*) yang diberi lapisan dielektrik tipis (*thin dielectric layer*), seperti silikon dioksida (SiO_2) (Gambar 9). Posisi *on* dan *off* pada perangkat memori ini ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 9 Gambaran tiga-dimensi *suspended nanotube device architecture* yang menunjukkan empat *junction* pada perangkat memori. Dua elemen pada keadaan *ON* (saling bersentuhan) dan dua elemen lagi pada keadaan *OFF* (terpisah) [13].



Gambar 10 Gambaran perangkat memori *suspended nanotube* dipandang dari atas. CNT digambarkan sebagai garis-garis hitam menyilang, dan blok pendukung (*the support blocks*) CNT digambarkan sebagai kotak-kotak kecil, sedangkan elektroda yang digunakan digambarkan sebagai kotak-kotak berlabel 1,2,3,...m dan 1,2,3, ... n [13].

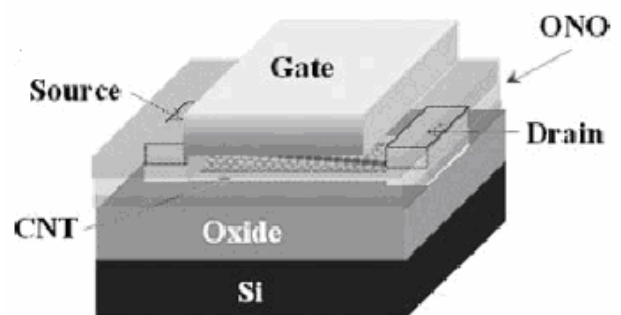


Gambar 11 Gambaran struktur elemen perangkat memori *suspended nanotube* pada keadaan *OFF* (atas) dan *ON* (bawah) [13].

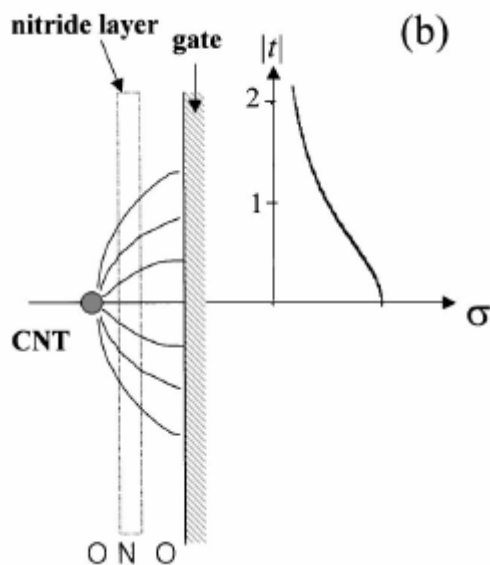
4.3 Memori *Nonvolatile* Berbasis CNT dengan Lapisan Oksida–Nitrida–Oksida sebagai *Charge Trap*

CNT-field-effect transistor (CNTFET) dapat digunakan untuk membuat memori *nonvolatile* dengan kerapatan sangat tinggi [14]. CNT digunakan sebagai *channel* berukuran nano, sedangkan lapisan $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ (ONO) digunakan sebagai *node* penyimpanan muatan (*charge node*). Struktur perangkat memori ini ditampilkan pada Gambar 12.

Muatan disimpan pada lapisan ONO. Muatan yang disimpan akan meningkatkan *threshold voltage* sebesar 60 mV (*a quantized increment of 60 mV*). Hal ini menunjukkan bahwa ONO memiliki *trap* dengan keadaan energi terkuantisasi (*quasi-quantized energy state*). Keadaan ini berhubungan dengan medan listrik kuat terlokalisasi (*localized high electric field*) pada CNT channel.



Gambar 12 Memori *nonvolatile* berbasis CNT dengan ONO *charge trap* [14].



Gambar 13 Medan listrik antara CNT dan gate [14]

5. MASA DEPAN PERANGKAT MEMORI BERBASIS CNT

Berbagai upaya untuk mewujudkan memori *nonvolatile* dari CNT dan memproduksinya secara komersial terus diusahakan. Salah satu perusahaan yang sudah berhasil mencapai perkembangan yang cukup baik adalah Nantero, Inc. [16].

Nantero, Inc. ingin membuat *chip* memori *universal* yang dapat digunakan untuk berbagai keperluan. *Chip* memori ini diharapkan dapat menggantikan DRAM (*dynamic RAM*), SRAM (*static RAM*), *flash memory*, dan *hard disk*. Produknya diberi nama NRAM™ (*Nanotube-based/ Nonvolatile RAM*) [17].

Rancangan memori ini menggunakan arsitektur *suspended nanotube* (Lihat bagian 4.2) CNT *junctions* dipasang menggantung (*suspended*) pada *wafer* silikon (*silicon wafer*). *Wafer* silikon ini dibuat dengan proses standar untuk semikonduktor. Hal ini membuat teknologi ini *compatible* dengan teknologi semikonduktor yang sudah ada saat ini.

Memori ini lebih cepat dan memiliki kerapatan yang lebih tinggi dibandingkan DRAM. Daya yang digunakan juga lebih rendah dibandingkan DRAM atau *flash memory*. Sifatnya juga *portable* seperti *flash memory*, dan sangat tahan terhadap pengaruh lingkungan (panas, dingin, dan pengaruh magnet).

Sebagai *nonvolatile chip*, memori ini dapat menyimpan data secara permanen, bahkan tanpa daya listrik. Dengan memori semacam ini, dapat dibuat *instant-on computer* (yang dapat di-*boot* dan di-*reboot* secara instan), memori *portable* dengan kerapatan tinggi (misalnya MP3 *player* yang dapat menyimpan ribuan lagu), PDA dengan memori 10 GB, *server* jaringan berkecepatan tinggi, dan masih banyak lagi.

6. KESIMPULAN

CNT memiliki sifat-sifat yang, menjadikannya material yang potensial untuk digunakan sebagai elemen penyusun perangkat memori. Salah satu keuntungan utama penggunaan CNT adalah memungkinkan dibuatnya *nonvolatile RAM*. Pemilihan teknologi yang digunakan perlu mempertimbangkan upaya untuk mengintegrasikan teknologi CNT yang relatif baru dengan teknologi semikonduktor yang sudah ada. Hal ini dapat mempercepat upaya untuk mewujudkan perangkat memori dari CNT.

7. REFERENSI

- [1] Arnall, A. H. (2003, Juli). *Future Technologies, Today's Choices: Nanotechnology, Artificial Intelligence and Robotics; A technical, political and institutional map of emerging technologies*. London: Greenpeace Environmental Trust. Diambil tanggal 29 Desember 2004 dari www.greenpeace.org.uk/MultimediaFiles/Live/FullReport/5886.pdf
- [2] Yardley, J. (1997). *The Discovery of Buckminsterfullerene, the Fullerenes and Their Potential Applications*. Diambil tanggal 15 Januari 2005 dari <http://endor.hsutx.edu/~chemist/FullerLecture/fuller.htm>
- [3] Hill, J.W. & Petrucci, R.H. (2002). *General chemistry: An integrated approach*. 3rd edition. New Jersey: Prentice Hall, Inc.
- [4] Ouellette, J. (2002, Desember./2003, Januari). Building the Nanofuture with Carbon Tubes. *The Industrial Physicist*, 8 (6), 18-21. Diambil tanggal 6 Januari 2005 dari <http://www.aip.org/tip/INPHFA/vol-8/iss-6/p18.pdf>
- [5] Weisman, R. B. (2004, Februari/Maret). Simplifying carbon nanotube identification. *The Industrial Physicist*, 10 (1), 24-27. Diambil tanggal 9 Januari 2005 dari <http://www.aip.org/tip/INPHFA/vol-10/iss-1/p24.pdf>
- [6] Odom, T.W., Huang, J., Kim, P., & Lieber, C.M.. (2000). Structure and Electronic Properties of Carbon Nanotubes. *Journal of Physical Chemistry B*, 104, 2794-2809. Diambil tanggal 6 Januari 2005 dari http://cmliris.harvard.edu/publications/2000/jPCB104_2794.pdf
- [7] Falvo, M.R., Clary, G.J., Taylor II, R.M., Chi, V., Brooks Jr, F.P., Washburn, S., & Superfine, R. (1997, 9 Oktober). Bending and buckling of carbon nanotubes under large strain. *Nature*, 389, 582-584. Diambil tanggal 31 Desember 2004 dari www.physics.unc.edu/~falvo/papers/buckling.pdf
- [8] Yildirim, T., Gülseren, O., Kılıç, Ç., & Ciraci, S. (2000). Pressure-induced interlinking of carbon nanotubes. *Physical Review B*, 62 (19), 648-651. Diambil tanggal 6 Januari 2005 dari <http://www.ncnr.nist.gov/staff/taner/nanotube/interlink.pdf>

- [9] *History*. (tanpa tanggal). Diambil tanggal 31 Desember 2004 dari <http://www.geocities.com/fikrethasmer/physics/electronic/electronic.html>
- [10] Ouyang, M., Huang, J., & Lieber, C. M.. (2002). Fundamental Electronic Properties and Applications of Single-Walled Carbon Nanotubes. *Accounts of Chemical Research*, 35 (12), 1018-1025. Diambil tanggal 6 Januari 2005 dari http://cmliris.harvard.edu/publications/2002/accChemRes35_1018.pdf
- [11] Kwon, Y., Tomanek, D., & S. Iijima. (1999). "Bucky Shuttle" Memory Device: Synthetic Approach and Molecular Dynamics Simulations *Physical Review Letters*, 82, 1470 -1473. Diambil tanggal 2 Januari 2005 dari <http://www.pa.msu.edu/cmp/csc/eprint/ykkwon/prlxntm/prlxntm.pdf>
- [12] Brehob, M., & Enbody, R. (1999). The Potential of Carbon-Based Memory Systems. dalam *1999 IEEE International Workshop on Memory Technology, Design, and Testing. August 09 - 10, 1999. San Jose, California*. Diambil tanggal 31 Desember 2004 dari http://www.cswitch.com/Nanotech%20Documents/nano_memories/charge_trap_mem/pot_cmemb_systems.pdf
- [13] Rueckes, T., Kim, K., Joselevich, E., Tseng, G. Y., Cheung, C., & Lieber, C. M. (2000, 7 Juli). Carbon Nanotube-Based Nonvolatile Random Access Memory for Molecular Computing. *Science*, 289, 94-97. Diambil tanggal 31 Desember 2004 dari http://www.cswitch.com/Nanotech%20Documents/nano_memories/electro_mech_mem/Science2000.pdf
- [14] Choi, W. B., Chae, S., Bae, E., Lee, J., Cheong, B., Kim, J., & Kim, J. (2003, 13 Januari). Carbon-nanotube-based nonvolatile memory with oxide-nitride-oxide film and nanoscale channel. *Applied Physics Letters*, 82 (2), 275-277. Diambil tanggal 31 Desember 2004 dari http://www.cswitch.com/Nanotech%20Documents/nano_memories/charge_trap_mem/cnt_nvram_ono.pdf
- [15] Kwon, Y. (tanpa tanggal). *Simulation of a nanotube-based memory element*. Diambil tanggal 6 Januari 2005 dari <http://www.pa.msu.edu/cmp/csc/memory.html>
- [16] Lawton, S. (2002, 1 Mei). *Back to the future*. Diambil tanggal 6 Januari 2005 dari Reed Business Information, <http://www.reed-electronics.com/eb-mag/index.asp?layout=articlePrint&articleID=CA211749>
- [17] Nantero, Inc. (2004). *NRAMTM*. Diambil tanggal 16 Januari 2005 dari <http://www.nantero.com/mission.html>