การผลิตและสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน

FABRICATION AND PROPERTIES OF CARBON NANOTUBES

ศิริกาญจนา ทองมี

Sirikanjana Thongmee

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Department of Physics, Faculty of Science, Kasetsart University, Thailand.

Corresponding author, E-mail: *fscisjn@ku.ac.th*

บทคัดย่อ

ท่อนาโนคาร์บอนมีการศึกษาอย่างแพร่หลาย เป็นเพราะว่าท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุนาโน โดยปกติแล้วสมบัติของวัสดุนาโนจะแตกต่างจากวัสดุขนาดใหญ่ ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 0.4 – 4 นาโนเมตร และมีความยาวได้ถึง 10 ไมโครเมตร นอกจากนี้ ท่อนาโนคาร์บอนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ ท่อนาโนคาร์บอนแบบที่มีผนังเดี่ยว และท่อนาโนคาร์บอนแบบที่เป็นผนังหลายชั้นการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจึงมีได้หลายวิธีและแต่ละวิธีก็ให้สมบัติของท่อนาโนคาร์บอนที่แตกต่างกัน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการนำท่อนาโนคาร์บอนมาประยุกต์ใช้ในอนาคต

คำสำคัญ: ท่อนาโนคาร์บอน ท่อนาโนคาร์บอนแบบมีผนังชั้นเดียว ท่อนาโนคาร์บอนแบบที่เป็นผนังหลายชั้น ตัวทำปฏิกิริยา

Abstract

Carbon nanotubes (CNTs) have been widely studied. This is because CNTs is the nanomaterials. Normally, the properties of nanomaterials are different from bulk materials. The diameter of CNTs is between 0.4 – 4 nm. and the length can be as long as 10 μm. In addition, there are two types of CNTs. They are single wall carbon nanotubes and multiwall carbon nanotubes, respectively. CNTs have been synthesized by variety methods and each method will provide the different properties of CNTs. These will be useful for future applications.

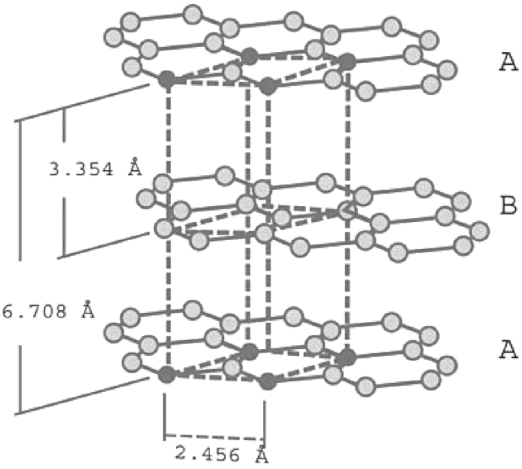
Keywords: Carbon nanotubes, singlewall carbon nanotubes, multi wall carbon nanotubes, catalyst

บทนำ

ปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีเริ่มเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายและเข้ามามีบทบาทสำคัญทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมากขึ้น การพัฒนาเทคโนโลยีในระดับนาโนจึงเป็นสิ่งจำเป็นและกำลังได้รับความสนใจโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเตรียมวัสดุระดับนาโนหรือการเตรียมอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กลงจนอยู่ในระดับโมเลกุล ซึ่งนาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้าง การสังเคราะห์วัสดุ อุปกรณ์เครื่องจักรหรือผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตรเทียบเท่ากับระดับอนุภาคของโมเลกุลหรืออะตอม (0.1 นาโนเมตร ถึง 100 นาโนเมตร)

นอกจากนี้นาโนเทคโนโลยียังรวมถึงการออกแบบหรือการใช้เครื่องมือสร้างวัสดุให้อยู่ในระดับที่เล็กมาก หรือการเรียงอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างแม่นยำและถูกต้อง ทำให้โครงสร้างของวัสดุหรือสสารมีคุณสมบัติพิเศษไม่ว่าทางด้านฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพ ส่งผลให้มีประโยชน์ต่อผู้ใช้สอย ซึ่งวัสดุชนิดหนึ่งที่กำลังเป็นที่สนใจอย่างมากในปัจจุบัน คือ ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) [1]

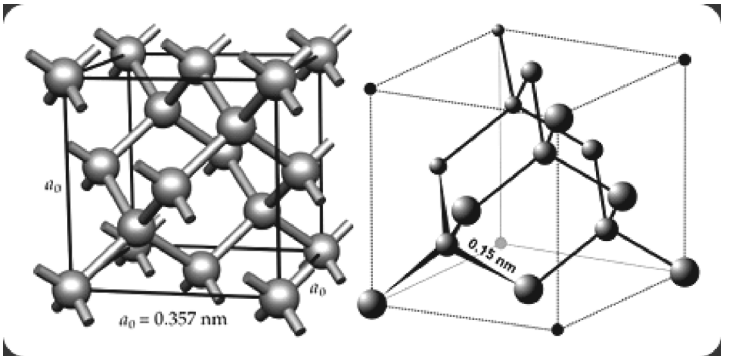
ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube, CNT) [2] เป็นโครงสร้างนาโนที่เป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มีลักษณะโครงสร้างพิเศษที่แตกต่างไปจากอัญรูปทั้ง 3 แบบของธาตุคาร์บอน ธาตุคาร์บอนจัดเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของสิ่งมีชีวิต ธาตุคาร์บอนมีหลายอัญรูปแต่อัญรูปหลักๆ ที่คนส่วนใหญ่รู้จักกันเป็นอย่างดี และถูกนำมาใช้ในชีวิตเป็นเรื่องปกติ คือถ่าน หรือ แกรไฟต์ และเพชร แม้จะประกอบขึ้นจากอะตอมของธาตุคาร์บอนเหมือนกัน แต่เมื่อมีการจัดเรียงตัวที่ต่างกันก็ส่งผลให้คุณสมบัติของอัญรูปทั้งสองแตกต่างกันด้วย เช่น แกรไฟต์มีโครงสร้างดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างของแกรไฟต์
ที่มา: http://s3.electronics-cooling.com/legacy_images/2001/08/2001_August_techbrief_f1.jpg [3]

ปกติอะตอมของคาร์บอนสามารถเกิดพันธะได้ถึง 4 พันธะ หรือ 4 แขน สำหรับแกรไฟต์นั้นพันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมในชั้นเดียวกันนั้นจะเกิดพันธะแบบโควาเลนต์ซึ่งมีความแข็งแรงสูงและมีระยะสั้น คือ 2.46 อังสตรอม แต่ระหว่างชั้นเชื่อมกันด้วยพันธะวันเดอร์วาลส์ ซึ่งมีความอ่อนแอและมีความยาวถึง 3.354 อังสตรอม ซึ่งทำให้แกรไฟต์นั้นมีความเปราะมากเพราะพันธะระหว่างชั้นไม่แข็งแรง รูปทรงการสร้างพันธะในชั้นเดียวกันเป็นแบบ Hexagonal

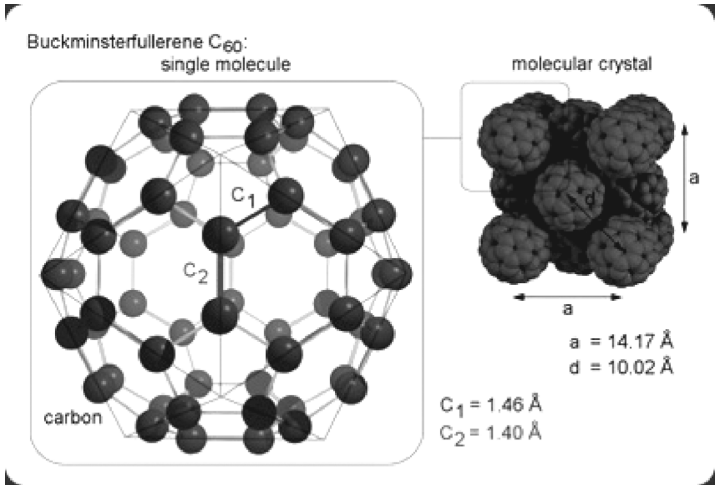
ต่อมาเป็นโครงสร้างของเพชร ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 2 โครงสร้างของเพชร เกิดจากการที่พันธะทั้งสี่ของคาร์บอนจับกันด้วยพันธะโควาเลนต์ จึงทำให้โครงสร้างของเพชรมีความแข็งแรงมาก โดยความยาวพันธะมีค่าเท่ากับ 0.15 นาโนเมตร และรูปทรงของเพชรเป็นแบบ Tetrahedral



ภาพที่ 2 โครงสร้างของเพชร

ที่มา: http://www.stevesque.com/diamond/structure/diamond-conventional-unit-cell.gif [4]

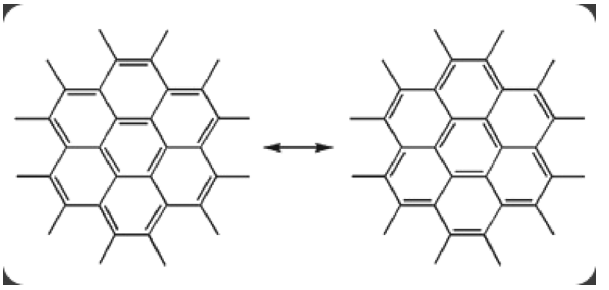
นอกจากโครงสร้างทั้ง 2 นี้แล้ว นักวิทยาศาสตร์ (Robert Curl, Harold Kroto and Richard Smalley) [5] ยังพบโครงสร้างคาร์บอนอีก 2 แบบที่กำลังมีบทบาทสำคัญในอนาคต โดยจะถูกนำมาเป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์เครื่องใช้ในชีวิตประจำวัน โครงสร้างทั้งสองที่กล่าวมานี้ คือ บัคมินิสเตอร์ฟลูเลอรีน หรือ บัคกี้บอล กับ ท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งโครงสร้างของบัคกี้บอลหรือบัคมินิสเตอร์ฟลูเลอรีนแสดงได้ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 โครงสร้างของบัคมินิสเตอร์ฟลูเลอรีน

ที่มา: http://202.28.94.55/web/322103/2551/work1/g35/17-03-2008-03.jpg [6]

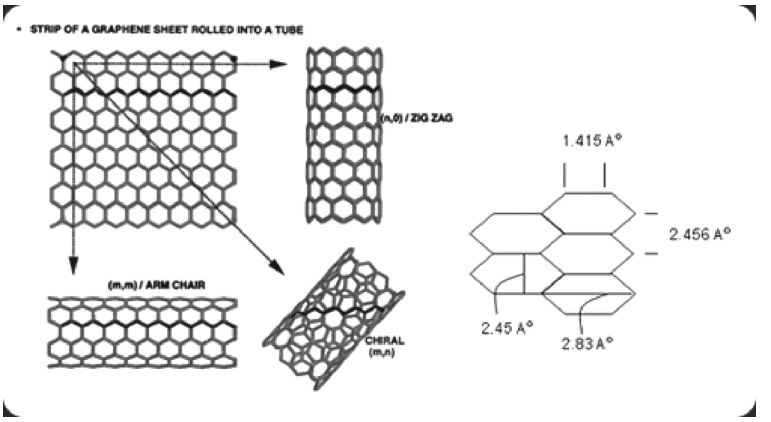
โครงสร้างของบัคกี้บอล 1 โมเลกุล ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน 60 อะตอม เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์และเกิดพันธะคู่วนไปตามแขนทั้งสามที่เรียกว่า resonance ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมาก รูปร่างโมเลกุลเหมือนกับลูกฟุตบอลประกอบด้วยวงห้าเหลี่ยม (pentagons) 12 วง และวงหกเหลี่ยม 20 วง (hexagons) เพนตากอน หรือรูปห้าเหลี่ยมแต่ละวงจะถูกห้อมล้อมด้วยเฮกซากอนหรือวงหกเหลี่ยมจำนวน 5 วง เป็นโครงสร้างที่เรียกว่า Truncated icosahedron



ภาพที่ 4 ภาพตัวอย่างแสดงโครงสร้าง resonance
ที่มา: http://202.28.94.55/web/322103/2551/work1/g35/17-03-2008-04.jpg [7]

บัคกี้บอลมีความแข็งเทียบเท่าเพชร แต่ภายในเป็นช่องว่างสามารถบรรจุสารอื่นๆ ไว้ภายในได้ มีจุดหลอมเหลวที่ 800 องศาเซลเซียส สามารถทนต่อแรงดันสูงได้ ความหนาแน่น 1.65 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ

ส่วนท่อนาโนคาร์บอนจะมีโครงสร้างเป็นรูปหกเหลี่ยมเช่นเดียวกับแกรไฟต์ แต่ท่อนาโนคาร์บอนเปรียบเสมือนการม้วนแผ่นแกรไฟต์เพียง 1 แผ่น เข้ามาเป็นท่อซึ่งการม้วนตัวของแผ่นแกรไฟต์จะม้วนได้ 3 แบบโดยจะได้ท่อนาโนคาร์บอนที่มีลักษณะที่ต่างกัน ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนอาจมีผนังซ้อนกันได้มากกว่า 1 ชั้น [8] ภาพที่ 5 แสดงโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน



ภาพที่ 5 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน
ที่มา: http://202.28.94.55/web/322103/2551/work1/g35/web4.htm [9]

โดยปกติท่อนาโนคาร์บอนเป็นท่อที่สังเคราะห์ขึ้นมาและเป็นท่อขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออยู่ในช่วง 0.4- 4.0 นาโนเมตรเท่านั้น และมีความยาวได้ถึง 10 ไมโครเมตร

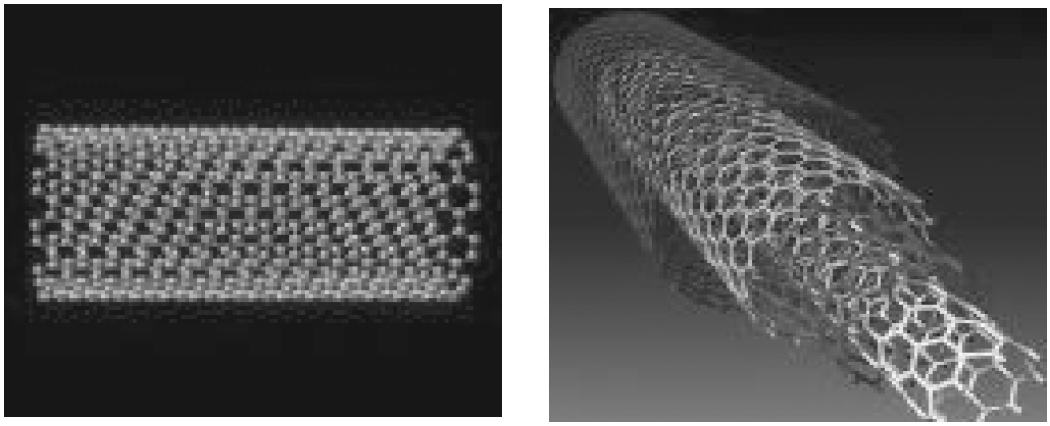
นอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอนเกิดจากอะตอมของคาร์บอนที่จัดเรียงตัวกันเป็นแผ่นซึ่งมีความลื่นไหลสูง และอะตอมของคาร์บอนเชื่อมโยงกันเป็นตาข่ายที่มีรูรูปหกเหลี่ยม แต่มีลักษณะที่ม้วนตัวเข้าหากันเป็นท่อ จึงทำให้โครงสร้างนาโนนี้

มีคุณสมบัติที่พิเศษหลายประการ เช่น แข็งแกร่งกว่าเหล็กกล้าถึง 100 เท่า และในขณะเดียวกันก็มีความยืดหยุ่นและน้ำหนักเบา สมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญอย่างมากของท่อนาโนคาร์บอน คือความสามารถในการเป็นตัวนำหรือกึ่งตัวนำไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถนำความร้อนได้ดีอีกด้วย

โครงสร้างนาโนของท่อนาโนคาร์บอนนี้ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1991 ภายหลังจากการค้นพบฟูลเลอรีน 6 ปี โดยนักวิจัยของบริษัทเอ็นอีซี (NEC) ในห้องทดลองที่เมืองสึคุบา (Tsukuba) ประเทศญี่ปุ่น ชื่อ ซูมิโอะ อิจิมา (Sumio Iijima) [10] ขณะที่เขาใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงมากตรวจสอบเขม่าสีดำที่ได้จากการเตรียมฟูลเลอรีนจากกระบวนการยิงด้วยอิเล็กตรอน (electron arc discharge) แล้วเขาสังเกตเห็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายกับรากไม้ เป็นเส้นยาว บาง และจับตัวกันเป็นกลุ่ม เขาพบว่าวัสดุนี้มีโครงสร้างของอะตอมที่เป็นระเบียบและสมมาตร ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนที่ค้นพบครั้งแรก คือท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น ต่อมาในปี ค.ศ. 1993 อิจิมาและนักวิจัยของบริษัทไอบีเอ็ม (IBM) ชื่อ ดอน เบทูน (Don Bethune) [11] ได้เสนอผลการวิจัยว่า สามารถสร้างท่อนาโนผนังชั้นเดียวได้ โดยการเติมโลหะเร่งปฏิกิริยาปริมาณเล็กน้อยในระหว่างการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนเพื่อป้องกันการม้วนตัวด้วยตัวเองของแผ่นแกรไฟต์ และป้องกันการเกิดเป็นฟูลเลอรีนขนาดเล็ก จากนั้นท่อนาโนคาร์บอนก็ได้รับความสนใจศึกษามากยิ่งขึ้นโดยเฉพาะการสร้างท่อนาโนคาร์บอนให้มีขนาดต่างๆ และคุณสมบัติตามที่ต้องการได้ รวมทั้งการนำท่อนาโนไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ อีกด้วย

โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอนสามารถสังเคราะห์ได้ 2 แบบ คือ แบบมีผนังชั้นเดียวหรือผนังเดี่ยว (Single wall carbon nanotube: SWCNT) และแบบที่เป็นผนังหลายชั้น (Multi-wall carbon nanotube : MWCNT) [8] ซึ่งคล้ายกับการเอาท่อเล็กซ้อนกันในท่อใหญ่หลายๆ ชั้น แสดงได้ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังเดี่ยวและผนังหลายชั้น

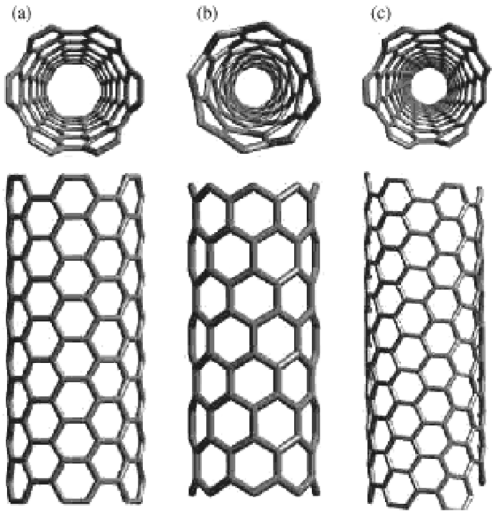
ที่มา: http://www.google.co.th/search?q=single+wallcarbon+nanotube&um=1&hl=th&gbv=2&tbm=isch&ei=XzNgT9jMGsGTiQevseBL&start=40&sa=N [12]

โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนที่คล้ายกับแผ่นแกรไฟต์ที่ม้วนตัวเกิดเป็นท่อทรงกระบอกกลวง ท่อนาโนคาร์บอนจึงมีผนังของอะตอมคาร์บอนที่จัดเรียงโดยพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมท่อนาโนคาร์บอนประเภทนี้เรียกว่าท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (Single wall nanotube, SWNT) ลวดลายตามผนังของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียวนั้นอาจมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันได้ 3 แบบตามการม้วนแผ่นแกรไฟต์ด้วยมุมบิดที่ต่างกัน [13] คือ

1. โครงสร้างท่อแบบ armchair ที่เกิดจากการม้วนตัวของแผ่นแกรไฟต์ตามแนวสมมาตรแกนตั้ง

2. โครงสร้างท่อแบบ zigzag ที่เกิดจากการม้วนตัวของแผ่นแกรไฟต์ตามแนวสมมาตรแกนนอน

3. โครงสร้างท่อแบบ chiral ที่เกิดจากการม้วนตัวของแผ่นแกรไฟต์ด้วยมุมบิดอื่นๆ ต่างจาก 2 แบบแรก ซึ่งโครงสร้างท่อนาโนทั้ง 3 แบบแสดงได้ดังภาพที่ 7

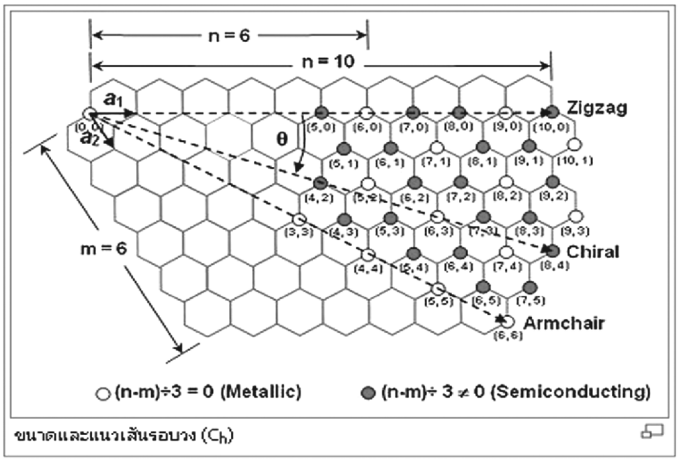


ภาพที่ 7 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียวโดยการม้วนตัวในลักษณะต่างๆ
ที่มา: http://mrsec.wisc.edu/Edetc/nanoquest/carbon/images/3nanotubes.gif [14]

โดยทั่วไปการนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนขึ้นอยู่กับการม้วนตัวของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว ดังนั้นท่อนาโนคาร์บอนมีโครงสร้างเป็นแบบแผ่นแกรไฟต์ม้วนเป็นท่อไร้ตะเข็บ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้หลายขนาด มีรูปแบบการเรียงตัวของหกเหลี่ยมเทียบกับแนวเส้นรอบวงของท่อได้ 3 แบบ ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดเวกเตอร์ Ch (Chiral vector) ที่มีทิศตั้งฉากกับแกนท่อและมีขนาดเท่ากับเส้นรอบวงพอดีเพื่อกำหนดแทนโครงสร้างของท่อเวกเตอร์ a_1 และ a_2 มีขนาดเท่ากันคือ 0.246 นาโนเมตร ทำมุมต่อกัน 60 องศา ส่วน $Ch = na_1 + ma_2$ หรือเขียนอย่างย่อคือ (n,m) เมื่อ n และ m คือจำนวนเต็ม มีทิศตามแนวเส้นประ (แสดงดังภาพที่ 8) และมีขนาดเท่ากับ 0.246 x $(n^2 + nm + m)$ x 0.5 นาโนเมตร การม้วน Ch เป็นเส้นรอบวงโดยให้ตำแหน่งปลายลูกศร (n,m) ซ้อนทับกับตำแหน่งเริ่มต้น (0,0) พอดี จะได้ลักษณะท่อ 3 แบบ คือ

1. Armchair (n,n) และมี $\theta = 30$
2. Chiral (n,m) โดยที่ $0 > \theta < 30$
3. Zigzag (n,0) มี $\theta = 0$

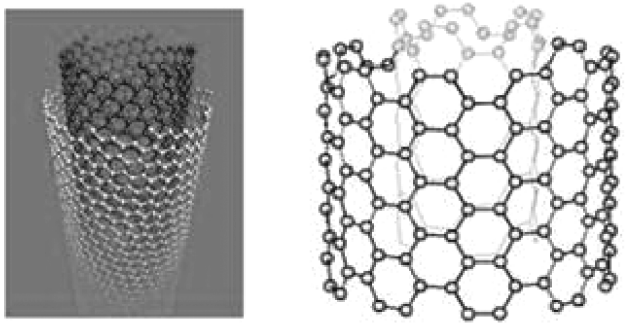
ถ้าหาก (n-m) หารด้วย 3 ลงตัว ได้ท่อที่นำไฟฟ้าแบบโลหะ (Metallic type) แต่ถ้าเหลือเศษ 1 หรือ 2 ได้ท่อที่นำไฟฟ้าแบบกึ่งตัวนำ (Semiconducting type) ดังนั้นในจำนวน 1/3 ของโครงสร้างที่เป็นไปได้ทั้งหมดจะนำไฟฟ้าได้ดีแบบโลหะและที่เหลืออีก 2/3 นำไฟฟ้าแบบกึ่งตัวนำ หากพิจารณาเฉพาะโครงสร้างแบบ Armchair หรือเฉพาะกรณีที่ n = m จะได้ท่อทุกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนำไฟฟ้าแบบโลหะ [15]



ภาพที่ 8 การม้วนตัวในลักษณะต่างๆ ของท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยว

ที่มา: http://2.bp.blogspot.com/_4n0IlyMgC5I/TGgphOq35XI/AAAAAAAAAFo/w97JwAw2JOg/s1600/3.jpg [16]

นอกจากท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวแล้ว ยังมีท่อที่มีผนังหลายชั้น (Multi-wall nanotube, MWNT) ซึ่งผนังท่อมีลักษณะซ้อนกันคล้ายกับการซ้อนท่อเล็กในท่อใหญ่โดยมีจุดศูนย์กลางภาคตัดขวางของท่อเป็นจุดเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (MWNT)

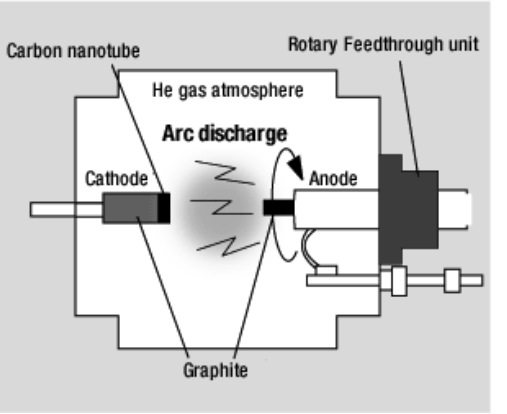
ที่มา: http://www.mindspring.com/~kimall/Fuller/nanotubes.html และ http://www.photon.t.u/tokyo.ac.jp/~maruyama/fticr/ft/icr_files [17]

การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

เทคนิคในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนนั้นมีหลายวิธีด้วยกันและแต่ละวิธีก็จะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไปทั้งในด้านคุณสมบัติ ขนาด รูปทรงทางเรขาคณิต ความยาว ปริมาณ และความบริสุทธิ์ของท่อนาโนคาร์บอน ดังนั้นวิธีที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนมีดังนี้

1. วิธีการยิงด้วยอิเล็กตรอน (electron arc discharge)

วิธีนี้เป็นวิธีเริ่มแรกที่ใช้สังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน [10, 18] ซึ่งแต่เดิมนั้นใช้ในการสังเคราะห์ฟูลเลอรีน โดยการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 100 แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ประมาณ 20-40 โวลต์ระหว่างแท่งแกรไฟต์ที่วางจ่อไว้ใกล้ๆ กัน โดยระยะระหว่างปลายแท่งประมาณ 2-5 มิลลิเมตร ภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อย เช่น ฮีเลียม (He) หรืออาร์กอน (Ar) ที่ความดันต่ำ ประมาณ 100-500 ทอร์ (Torr) และควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ประมาณ 2000 ถึง 3000 องศาเซลเซียส ทำให้แท่งแกรไฟต์เกิดการแตกตัวกลายเป็นพลาสมา จากนั้นแท่งแกรไฟต์ที่แตกตัวจะเกิดการควบแน่นและก่อตัวใหม่เป็นท่อนาโนที่ขั้วแคโทด ท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้นี้เป็นท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นประมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 – 20 nm แสดงได้ดังภาพที่ 10 ซึ่งถ้าต้องการท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว สามารถควบคุมความดัน อุณหภูมิ และการเติมผงโลหะเร่งปฏิกิริยา (ถ้าใช้โลหะเร่งปฏิกิริยาจะได้ท่อชนิดผนังชั้นเดียว) วิธีการสังเคราะห์ท่อนาโนวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและค่าใช้จ่ายถูก แต่ท่อนาโนที่ได้จะมีขนาดไม่สม่ำเสมอและมีสิ่งเจือปน เช่นอสัณฐานของคาร์บอน และขี้เถ้า ค่อนข้างมาก

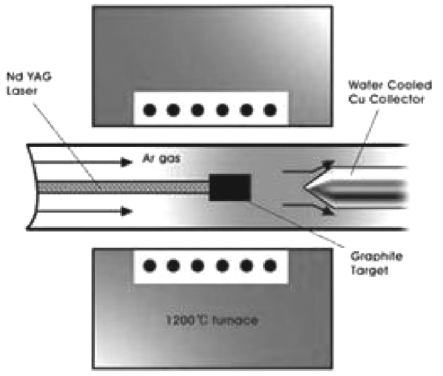


ภาพที่ 10 เทคนิคการยิงด้วยอิเล็กตรอน (electron arc discharge)

ที่มา: http://en.rigaku-mechatronics.com/case/img/pic_case02_05.gif [19]

2. วิธีการใช้แสงเลเซอร์ (laser ablation) [20-21]

วิธีนี้ใช้การยิงแสงเลเซอร์ไปทำให้แท่งคาร์บอนที่ผสมกับโลหะในเตาเผากลายเป็นไอที่อุณหภูมิประมาณ 1200 - 1400 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนและอะตอมคาร์บอนที่ร้อนขึ้น และใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน หรือไนโตรเจน ไปกวาดเอาท่อนาโนที่เกิดขึ้นออกจากเตาเผาแล้วนำไปหล่อเย็นที่ตัวกักเก็บ (collector) ที่ทำจากทองแดงด้านนอกเตาเผาแสดงดังภาพที่ 11 สำหรับเทคนิคนี้หากใช้โคบอลต์ หรือนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ท่อนาโนคาร์บอนผนังเดียวที่เป็นระเบียบมากกว่าวิธีการยิงด้วยอิเล็กตรอนแต่มีข้อเสียคือต้นทุนการผลิตสูงและมีปัญหาในเรื่องของการสังเคราะห์ให้ได้ปริมาณมากและทำให้ได้ท่อนาโนคาร์บอนที่เป็นระเบียบยาก

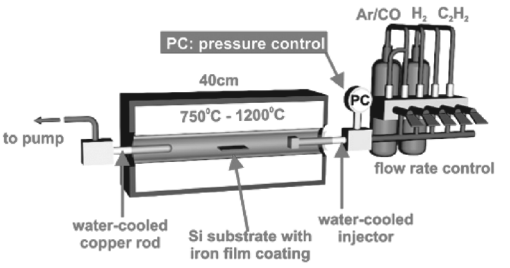


ภาพที่ 11 เทคนิคการใช้แสงเลเซอร์ (laser ablation)
ที่มา: http://students.chem.tue.nl/ifp03/images/image015.jpg [22]

3. วิธีดีโพสิชันทางเคมี (Chemical vapor deposition, CVD) [23-24]

วิธีนี้มีต้นทุนการผลิตต่ำอาศัยการก่อรูปของท่อนาโนคาร์บอนบนวัสดุรองรับ (substrate) เมื่อมีการผ่านไอหรือก๊าซของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งใช้ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เช่น มีเทน (CH_4) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) อะเซทิลีน (C_2H_2) และเอทานอล (C_2H_5OH) เป็นต้น เข้าไปในเตาเผาที่มีอุณหภูมิประมาณตั้งแต่ 600-1200 องศาเซลเซียส สำหรับการผลิตท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นจะเผาที่อุณหภูมิประมาณตั้งแต่ 900 -1200 องศาเซลเซียส แต่สำหรับการผลิตท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวในบรรยากาศปกติจะต้องมีอนุภาคนาโนของโลหะคะตะลิสต์อยู่บริเวณนั้นด้วย ทำให้โมเลกุลของก๊าซแตกตัว (Decomposed) ออกเป็นอะตอมของคาร์บอน โดยการควบคุมอุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหลของก๊าซ สัดส่วนอะตอมของธาตุ C:O:H ในระบบการควบคุมขนาดของอนุภาคคะตะลิสต์และระยะเวลาในการสังเคราะห์ สามารถกำหนดขนาด ความยาว ทิศทางการเติบโต และตำแหน่งที่ต้องการปลูกท่อนาโนคาร์บอนได้

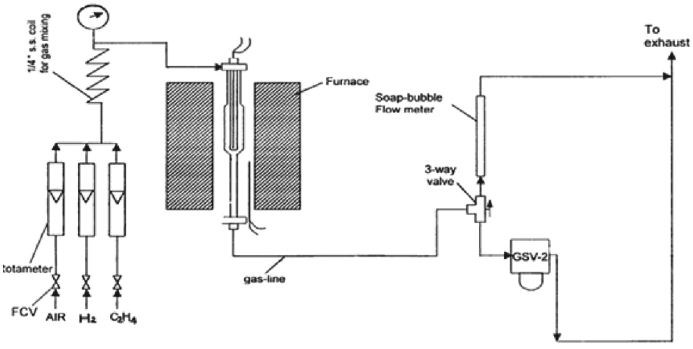
ข้อดีของกระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน คือ สามารถควบคุมขนาดและความยาวของท่อได้ง่าย สามารถสังเคราะห์ท่อนาโนให้เกิดตรงตำแหน่งที่ต้องการได้และที่สำคัญที่สุดคือสามารถพัฒนากระบวนการนี้ให้ผลิตท่อนาโนเชิงพาณิชย์ได้ แต่อาจมีข้อเสียคือมีความไร้ระเบียบของโครงสร้างสูง ทำให้ท่อที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีนี้มักเป็นท่อโค้งงอ



ภาพที่ 12 เทคนิคการใช้วิธีดีโพสิชันทางเคมี
ที่มา: http://www.fy.chalmers.se/atom/research/nanotubes/images/thermal.jpg [25]

4. วิธีไพโรไลซิส (pyrolysis) [26]

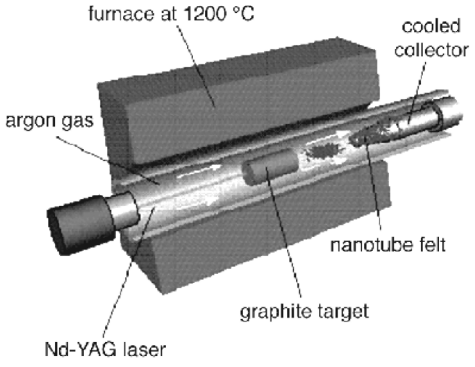
เป็นวิธีการสร้างท่อนาโนคาร์บอนด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงอย่างต่ำ 600 องศาเซลเซียส ไปยังโมเลกุลของสารประกอบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น เบนซิน ขณะที่โมเลกุลมีการจับคู่กับไอออนหรืออะตอมของโลหะ (metallocenes) ซึ่งใช้เป็นตัวช่วย ในกรณีนี้เรียกว่าเป็นตัวโลหะคะตะลิสต์ (metal catalyst) เช่น เหล็ก (Fe) นิเกิล (Ni) และโคบอลต์ (Co) เป็นต้น วิธีนี้บางครั้งจะเรียกว่าวิธีคะตะลิสติกซึ่งเป็นวิธีที่สามารถผลิตท่อนาโนคาร์บอนได้ครั้งละปริมาณมากๆ และเหมาะสำหรับการผลิตเพื่อจำหน่ายและการนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์



ภาพที่ 13 เทคนิคการใช้วิธีไพโรไลซิส
ที่มา: http://www.scielo.org.za/img/revistas/sajs/v105n7-8/a20fig01.gif [27]

5. วิธีระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser vaporization) [28]

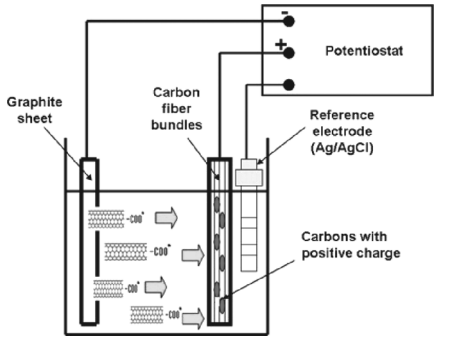
วิธีนี้จะใช้พัลส์แสงเลเซอร์ที่มีความเข้มแสงสูงยิงไปยังเป้าซึ่งเป็นแกรไฟต์ผสมกับผงโลหะคะตะลิสต์ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อยที่ความดันต่ำประมาณ 500 ทอร์ (Torr) และอุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เทคนิคนี้คล้ายกับวิธีอาร์คดิสชาร์จ ซึ่งจะได้ปริมาณและคุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนดีกว่า แต่มีข้อเสียที่จำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์กำลังสูงและมีราคาแพงมาก



ภาพที่ 14 เทคนิคการใช้วิธีระเหยด้วยเลเซอร์
ที่มา: http://ipn2.epfl.ch/CHBU/images/laservap.gif [29]

6. วิธีอิเล็กโตรไลซิส (electrolysis) [30]

วิธีนี้จะใช้การผ่านกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วแกรไฟต์ขณะจุ่มอยู่ในของเหลวที่เรียกว่าอิเล็กโทรไลท์ (electrolyte) เช่น ลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยการผสมหรือเจือสารอิเล็กโทรไลท์ด้วยธาตุหรือสารประกอบอื่นๆ เช่นผสมด้วยเกลือที่มีบิสมัสและปรอทจะสามารถควบคุมขนาดและรูปร่างของท่อนาโนได้



ภาพที่ 15 เทคนิคการใช้วิธีอิเล็กโตรไลซิส
ที่มา: http://ars.sciencedirect.com/content/image/1-s2.0-S0008622311000455-gr1.jpg [31]

คุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอนเป็นโครงสร้างนาโนที่นักวิทยาศาสตร์ได้ทำการศึกษา และพบว่าเป็นโครงสร้างที่มีคุณสมบัติพิเศษหลายด้าน [32] ซึ่งสามารถที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมายในอนาคต

1. คุณสมบัติเชิงกล

เป็นโครงสร้างนาโนที่มีความแข็งแกร่ง น้ำหนักเบา และมีความยืดหยุ่นมาก จากการศึกษาพบว่า ท่อนาโนคาร์บอนนี้เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแกร่งมากกว่าเหล็กเกินกว่า 60 เท่า และมีน้ำหนักเบา อีกทั้งเป็นโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่น นอกจากนี้ยังพบว่าท่อนาโนคาร์บอนสามารถทนต่อแรงดึงได้มากกว่าเหล็กถึง 20 เท่า จึงได้มีการนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น อุปกรณ์กีฬา ลูกกอล์ฟ และลูกเทนนิสเป็นต้น และมีแนวโน้มในการใช้ผลิตเป็นโครงสร้างของเครื่องบินอีกด้วย

2. คุณสมบัติเชิงไฟฟ้า

ท่อนาโนคาร์บอนสามารถเป็นได้ทั้งสารกึ่งตัวนำ (เซมิคอนดัคเตอร์) และเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (ซูเปอร์คอนดัคเตอร์) โดยขึ้นอยู่กับกระบวนการสังเคราะห์การจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนตามผนังของท่อ สัดส่วนองค์ประกอบ และวัตถุชนิดอื่นที่ผสมลงไปในโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน

3. คุณสมบัติควอนตัม

เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนเป็นโครงสร้างที่เล็กมากในระดับนาโนจึงมีคุณสมบัติควอนตัม คือสามารถควบคุมการไหลของอิเล็กตรอนแบบไม่ต่อเนื่อง โดยอาจจะสามารถควบคุมการไหลทีละกลุ่มของอิเล็กตรอน หรือควบคุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทีละตัวได้ จึงได้มีการนำมาใช้งานในการผลิตเป็นทรานซิสเตอร์ที่มีความเร็วสูงและมีความต้านทานต่ำมาก นอกจากนี้มีการพัฒนาที่จะนำท่อนาโนคาร์บอนไปใช้แทนโลหะในส่วนที่เป็นขั้วในตัวหลอดสำหรับจ่ายลำอิเล็กตรอนในการประดิษฐ์จอภาพแบบรังสีแคโทดที่ใช้ในจอทีวีหรือจอคอมพิวเตอร์ด้วย เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมีคุณสมบัติที่เหนือกว่าคือสามารถให้ความสม่ำเสมอให้ปริมาณที่เพียงพอและมีอายุการใช้งานของการจ่ายอิเล็กตรอนนานกว่า นอกจากนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ในสุญญากาศและเป็นการประหยัดพลังงาน เนื่องจากสามารถจ่ายอิเล็กตรอนได้ที่อุณหภูมิห้องโดยไม่จำเป็นต้องเผาไส้หลอดให้แดงอย่างกรณีการใช้โลหะ

4. สมบัติเชิงการแพทย์ [33]

มีรายงานผลการวิจัยเกี่ยวกับท่อนาโนคาร์บอนในด้านนาโนเทคโนโลยีชีวภาพเพื่อใช้เป็นพาหะในการทำยีนหรือพันธุกรรมบำบัด (gene therapy) การทำยีนบำบัด คือ การนำส่งยีนที่ขาดหายไปหรือต้องการใช้ในการรักษาโรคเข้าสู่ร่างกายของผู้ป่วยเพื่อใช้ในการสร้างโปรตีนที่เหมาะสมซึ่งเคยมีการนำวิธีการนี้มาใช้ในการรักษาโรคได้หลายชนิด เช่น โรคมะเร็ง โรคเอดส์ โรคติดเชื้อ และในวัคซีน

สรุปผล

จะเห็นได้ว่าวิธีการในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนนั้นมีหลายวิธี แต่ละวิธีสามารถสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนได้ 2 แบบ คือ แบบมีผนังชั้นเดียวหรือผนังเดี่ยว (Single wall carbon nanotube, SWCNT) และแบบที่เป็นผนังหลายชั้น (Multi-wall carbon nanotube, MWCNT) นอกจากนี้การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นสามารถทำได้ง่ายกว่าท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังเดี่ยว แต่ถ้าหากต้องการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังเดี่ยวนั้นจะต้องเติมผงโลหะเร่งปฏิกิริยาเข้าไปเพื่อช่วยให้โมเลกุลของแก๊สแตกตัวออกเป็นอะตอมของคาร์บอนและจะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหลของแก๊ส สัดส่วนอะตอมของธาตุ C:O:H ในระบบ นอกจากนี้การควบคุมขนาดของอนุภาคคะตะลิสต์และระยะเวลาในการสังเคราะห์สามารถกำหนดขนาด ความยาว

ทิศทางการเติบโต และตำแหน่งที่ต้องการปลูกท่อนาโนคาร์บอนด้วย

ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จะมีสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงไฟฟ้าซึ่งการนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนนั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างแต่ละชนิดของท่อนาโนคาร์บอนแบบมีผนังชั้นเดียวหรือผนังเดี่ยว ดังนั้นท่อนาโนคาร์บอนที่มีทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงไฟฟ้า สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตวัสดุต่างๆ ได้ในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

[1] Paul Holister, Tim E. Harper and Cristina Román Vas. (2003). from http://www.cmp-cientifica.com

[2] วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล. (2549). *นาโนเทคโนโลยี คลื่นลูกใหม่แห่งศตวรรษที่ 21*. กรุงเทพฯ: ฐานมีเดียเน็ตเวิร์ค.

[3] http://s3.electronics-cooling.com/legacy_images/2001/08/2001_August_techbrief_f1.jpg

[4] http://www.stevesque.com/diamond/structure/diamond-conventional-unit-cell.gif

[5] Kroto H.W., Heath J.R., ÓBrien, S.C., Curl R.F., Smalley, R.E. (1985). C_{60}: Buckminsterfullerene. *Nature*. 318: 162–163.

[6] http://202.28.94.55/web/322103/2551/work1/g35/17-03-2008-03.jpg

[7] http://202.28.94.55/web/322103/2551/work1/g35/17-03-2008-04.jpg

[8] Dresselhaus M.S., Dresselhaus G. and Eklund P.C. (2000). Fullerenes and Carbon Nanotubes, 2nd ed. Academic Press.

[9] http://202.28.94.55/web/322103/2551/work1/g35/web4.htm

[10] Iijima S. (1991, November). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*. 354: 56-58.

[11] Bethune D.S., Kiang C.H., Gorman G., Savoy R., Vazquez J. and Beyers R. (1993, June). Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls. *Nature*. 363: 605-607. [12] http://www.google.co.th/search?q=single+wallcarbon+nanotube&um=1&hl=th&gbv=2&tbm=isch&ei=XzNgT9jMGsGTiQevseBL&start=40&sa=N

[13] Ray H.B., Anvar A.Z. and Walt A. de Heer, (2002, August). Carbon nanotubes-the route toward applications. *Science*. 297: 787-792.

[14] http://mrsec.wisc.edu/Edetc/nanoquest/carbon/images/3nanotubes.gif

[15] http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_nanotube

[16] http://2.bp.blogspot.com/_4n0IlyMgC5I/TGgphOq35XI/AAAAAAAAAFo/w97JwAw2JOg/s1600/3.jpg

[17] http://www.mindspring.com/~kimall/Fuller/nanotubes.html และ http://www.photon.t.u/tokyo.ac.jp/~maruyama/fticr/ft/icr_files

[18] Ebbesen T.W. and Ajayan P.M. (1992, July). Large-scale synthesis of carbon nanotubes. *Nature*. 358: 220-222.

[19] http://en.rigaku-mechatronics.com/case/img/pic_case02_05.gif

[20] Andreas T., Roland L., Pavel N., Hongjie D., Pierre P. and Richard E.S. (1996, July). Crystalline ropes of metallic carbon nanotubes. *Science*. 273: 483-487.

[21] Rinzler A.G., Liu J., Dai H., Nikolaev P., Huffman C.B., Eklund P.C. and Smalley R.E. (1998, July) Large-scale purification of single-wall carbon nanotubes: process, product, and characterization. Appl. Phys. A 67(1): 29-34.

[22] http://students.chem.tue.nl/ifp03/images/image015.jpg

[23] José-Yacaman M., Miki-Yoshida M. and Rendón. (1993, January). Catalytic growth of carbon microtubules with fullerene structure. *Appl. Phys. Lett.* 62: 657-659.

[24] Ren Z.N., Huang Z.P., Xu J.W. Wang J.H., Bush P., Siegal m.P. and Provencio P.N. (1998, November). Synthesis of large arrays of well-aligned carbon nanotubes on glass. *Science*. 282: 1105-1107.

[25] http://www.fy.chalmers.se/atom/research/nanotubes/images/thermal.jpg

[26] Shaijumon M.M., Ramaprabhu S., (2003, March). Synthesis of carbon nanotubes by pyrolysis of acetylene using alloy hydride materials as catalysts and their hydrogen adsorption studies. *Chem. Phys. Lett.* 374: 513-520.

[27] http://www.scielo.org.za/img/revistas/sajs/v105n7-8/a20fig01.gif

[28] Puretzky A.A, Geohegan D.B, Fan X. and Pennycook S.J. (2000, November). In situ imaging and spectroscopy of single-wall carbon nanotube synthesis by laser vaporization. *Appl. Phys. Lett.* 76(2): 182-184.

[29] http://ipn2.epfl.ch/CHBU/images/laservap.gif

[30] George Z.C., Xudong F., Angela L., Milo S.P., Derek J.F. and Alan H.W. (1998, October). Electrolytic conversion of graphite to carbon nanotubes in fused salts. *J. Electroanaly Chem.* 446: 1–6.

[31] http://ars.sciencedirect.com/content/image/1-s2.0-S0008622311000455-gr1.jpg

[32] Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., and Charlier J.C. (2004, August). Electronic, thermal and mechanical properties of carbon nanotubes. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* A 362: 2065–2098

[33] *Nanotube - Laser กับเซลล์มะเร็ง.* (2005). Retrieved October 15, 2005, from http://www.thaiadmin.org/board/index.php?topic=41738.0