ท่อนาโนคาร์บอน

(Carbon Nanotube)

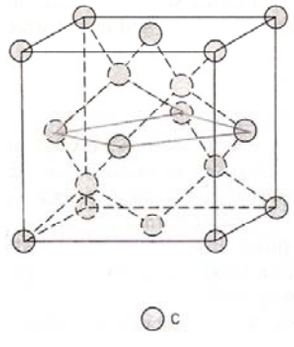
บุญทวี เลิศปัญญาพรชัย*

*สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา 1061 ถนนอิสรภาพ แขวงหิรัญรูจี เขตธนบุรี กรุงเทพฯ 10600

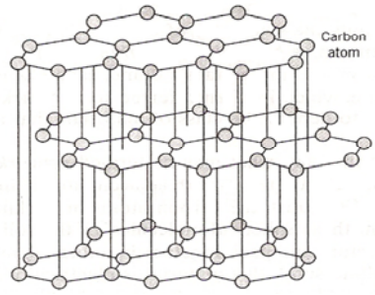
บทนำ

คาร์บอน (carbon) เป็นธาตุหลักธาตุหนึ่งของสิ่งมีชีวิต (ธาตุที่เป็นองค์ประกอบพื้นฐานของสิ่งมีชีวิตบนโลกคือ ไฮโดรเจน คาร์บอน ไนโตรเจน และ ออกซิเจน) สิ่งมีชีวิตทุกชนิดบนโลกใบนี้ถือได้ว่าเป็นสิ่งมีชีวิตในรูปแบบ ที่มีคาร์บอนเป็นธาตุพื้นฐานของชีวิต หรืออาจกล่าวได้ว่า โมเลกุลที่ได้ชื่อว่าเป็นสารอินทรีย์ทุกชนิดนั้น มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ คาร์บอนยังมีอยู่ในอาหาร เสื้อผ้า น้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้กับรถยนต์ และในสิ่งอื่น ๆ อีกมากมาย ที่กล่าวมานี้เป็นเพียงบทบาทบางส่วนของคาร์บอนเท่านั้น

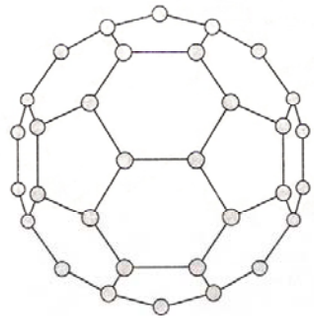
คาร์บอนมีอัญรูปในธรรมชาติสี่แบบ คือ แบบอสัณฐาน (amorphous carbon)แบบแกรไฟต์ (graphite) แบบเพชร (diamond) และแบบบัคมินสเตอรฟูลเลอรีน (buckminster fullerene) ตัวอย่างโครงสร้างแบบอสัณฐานของคาร์บอนก็คือเขม่าควันโดยทั่วไป ส่วนโครงสร้างแบบ แกรไฟต์และแบบเพชรนั้นแตกต่างกันตรงที่แกรไฟต์เป็นโครงสร้างประกอบด้วยหน่วยของคาร์บอนที่เชื่อมต่อกันเป็นรูปหกเหลี่ยมมาซ้อนกันเป็นแผ่นในระนาบเดียวกัน เรียกว่าแผ่นแกรฟีน (graphene) และเชื่อมต่อระหว่างระนาบเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นสามารถเลื่อนไปมาได้ แต่โครงสร้างแบบเพชรมีการเกาะเกี่ยวกันแน่นเป็นรูปทรงสามมิติ ส่วนโครงสร้างแบบบัคมินสเตอร์ฟูลเลอรีน หรือ บัคกีบอล (buckyball) เป็นโครงสร้างที่เพิ่งค้นพบเมื่อไม่นานมานี้ ประกอบด้วยคาร์บอนจำนวน 60 อะตอมมาต่อกันเป็นทรงกลมกลวงแบบลูกฟุตบอล (ภาพที่ 1-3)



ภาพที่ 1 เซลล์หนึ่งหน่วย (unit cell) ของโครงสร้างผลึกแบบกล่องจัตุรัสของเพชร ที่มา (Hang and Santiago-Aviles, 2003)



ภาพที่ 2 โครงสร้างของแกรไฟต์ (graphite)
ที่มา (Hang and Santiago-Aviles, 2003)



ภาพที่ 3 โครงสร้างของโมเลกุล C_{60}
ที่มา (Hang and Santiago-Aviles, 2003)

ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes) (วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, 2549) เป็นอีกโครงสร้างหนึ่งของคาร์บอน ซึ่งเพิ่งค้นพบในปี พ.ศ. 2534 กล่าวคือ มีลักษณะคล้ายกับ ฟูลเลอรีน ต่างกันที่ฟูลเลอรีนมีโครงสร้างเป็นทรงกลม (spherical - shape) แต่ท่อนาโนคาร์บอนมีโครงสร้างเป็นทรงกระบอก (cylindrical shape) ชื่อของท่อนาโนคาร์บอน มาจากขนาดของมัน ซึ่งมีขนาดระดับนาโน (10^{-9} เมตร) หรือมีความกว้างประมาณ 1 ใน 10,000 ของความกว้างของเส้นผมมนุษย์ มีความยาวประมาณ 1 ล้านเท่าของความกว้างของมัน ท่อนาโนคาร์บอน มีด้วยกัน 2 ชนิด คือ ชนิดที่มีผนังซ้อนกัน 2 – 50 ชั้น เรียกว่า ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (multi walled carbon nanotube; MWNT) และชนิดที่มีผนังชั้นเดียวหรือเป็นท่อเดี่ยว เรียกว่า ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (single walled carbon nanotube; SWNT)

การค้นพบท่อนาโนคาร์บอน

การค้นพบท่อนาโนคาร์บอน เกิดจากความบังเอิญที่ ดร.ซูมิโอ อิจิมา (Dr. Sumio Iijima) นักวิจัยจากห้องปฏิบัติการของบริษัท NEC ในญี่ปุ่น ขณะกำลังสังเคราะห์ฟูลเลอรีน (fullerene) โดยวิธีการทำให้เป็นไอด้วยกระแสไฟฟ้า (arc-evaporation) แล้วพบว่าที่ขั้วแคโทดเกิดมีวัสดุโครงสร้างแบบแกรไฟต์ที่เป็นทั้งอนุภาคขนาดนาโนและท่อนาโน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่เคยมีผู้ใดสังเกตเห็นมาก่อน ต่อมาทีมงานของ ดร. อิจิมา สามารถสังเคราะห์วัสดุดังกล่าวในปริมาณมาก โดยปรับสภาวะของการทำให้เป็นไอด้วยกระแสไฟฟ้าของท่อนาโนที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะเป็นท่อแกรไฟต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-10 นาโนเมตร (nm) และมีความยาวในช่วง 1ไมโครเมตร (μm) และเป็นท่อซ้อนกัน 2-50 ชั้น เรียกว่า ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นมีการสร้างและทำให้บริสุทธิ์แพร่หลายไปตามห้องปฏิบัติการต่างๆ ทั่วโลก รวมถึงการพัฒนาเป็นท่อเดี่ยวที่เรียกว่าท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว ในอีกสองปีต่อมา (วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, 2549)

ภาพที่ 4 ดร.ซูมิโอ อิจิมา
ที่มา (IPE Nanotube Primer, 2011)

ท่อขนาดนาโนของแกรไฟต์นี้สามารถเป็นได้ทั้งแบบท่อปลายเปิดหรือปลายปิด (cap) ถ้าเป็นแบบปลายปิดจะครอบด้วยครึ่งทรงกลมของ ฟูลเลอรีนC_{60} ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสำหรับ ท่อนาโนคาร์บอนผนังเดียวมีขนาดระหว่าง 0.7 ถึง 2 นาโนเมตร ส่วนท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น มีขนาดระหว่าง 10 ถึง 300 นาโนเมตร โดยมีช่องว่างระหว่างชั้นของแต่ละท่อมีขนาดอยู่ในระหว่าง 0.34 ถึง 0.36 นาโนเมตร สามารถทำให้ยาวได้ถึง 20 เซนติเมตร และมีรายงานว่าสามารถทำให้ยาวได้ถึง 100 เมตร ล่าสุดสามารถทำท่อนาโนคาร์บอน ขนาดเล็กสุดได้ถึง 0.3 นาโนเมตร ค่าความต้านทานต่อการยืดหยุ่น (Young's modulus of elasticity) ของท่อนาโน-คาร์บอน มีค่าสูงถึง 1 เทราปาสคาล (Tpa) หรือ 1000 กิกะปาสคาล (Gpa) ท่อนาโนคาร์บอน มีพื้นที่ผิวได้ถึง 1500 ตารางเมตรต่อกรัม (m^2/g) โดยมีความหนาแน่น 1.33 ถึง 1.40 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมที่มีความหนาแน่นสูงถึง 2.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ท่อนาโนคาร์บอน มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดี ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนนั้นสามารถนำไฟฟ้าได้ถึง 109 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (A/cm^2) สมบัติเชิงไฟฟ้าอีกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจของท่อนาโนคาร์บอน คือ สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของท่อนาโนคาร์บอนสภาวะสุญญากาศได้ เมื่อวางอยู่ในสนามไฟฟ้าที่ใช้ค่าศักย์ไฟฟ้า (potential) ต่ำกว่า สำหรับปลายที่เป็นขั้วโมลิบดินัม ท่อนาโนคาร์บอน มีความสามารถนำความร้อนได้ดีมากตามแนวยาวของท่อนาโนคาร์บอน แต่เป็นฉนวนความร้อนได้ดีมากเช่นกันตามแนวขวางของท่อนาโนคาร์บอน ยังทนต่ออุณหภูมิได้ถึง 2,800 องศาเซลเซียส ภายใต้สุญญากาศ และ 750 องศาเซลเซียส ในสภาวะปกติ สมบัติเหล่านี้เป็นที่น่าสนใจอย่างมากในเชิงกายภาพ นอกจากนี้ยังมีการค้นพบสมบัติอีกหลายประการเพิ่มขึ้นและยังมีการประยุกต์ใช้เพื่อประโยชน์ในด้านต่างๆ อีกมาก

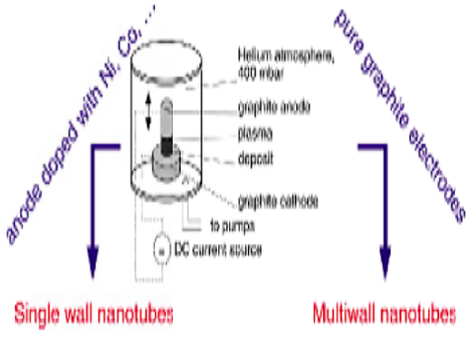
การสังเคราะห์และการผลิต

เทคนิคในการผลิตท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีวิธีที่สำคัญ (Valentin, 2004) ได้แก่

1. อาร์คดิสชาร์จ (Arc discharge)

วิธีนี้ใช้กระแสไฟตรงขนาด 100 แอมแปร์ และศักย์ไฟฟ้าประมาณ 20 โวลต์ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ประมาณ 2,000 ถึง 3,000 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้เกิดไอพลาสมาร้อนระหว่างขั้วคาร์บอน 2 ขั้ว (วางห่างกัน 2 - 3

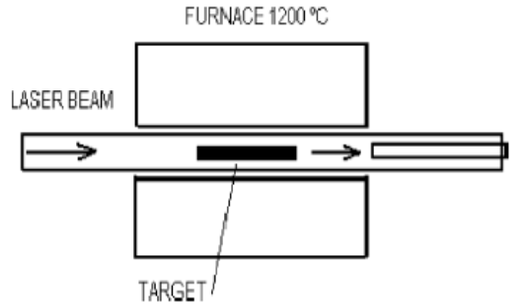
มิลลิเมตร) จะเกิดการควบแน่นที่ขั้วแคโทด ได้ผลิตผลเป็นท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น ประมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-20 นาโนเมตร ด้วยความยาวน้อยกว่า 50 มิลลิเมตร ถ้ามีการใช้โลหะคะตะลิสต์ (catalyst) ร่วมด้วยจะได้เป็นท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว



ภาพที่ 5 เครื่องอาร์คดิสชาร์จที่ใช้ในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน
ที่มา (Popov, 2004)

2. การใช้แสงเลเซอร์ (Pulsed-Laser Vaporization)

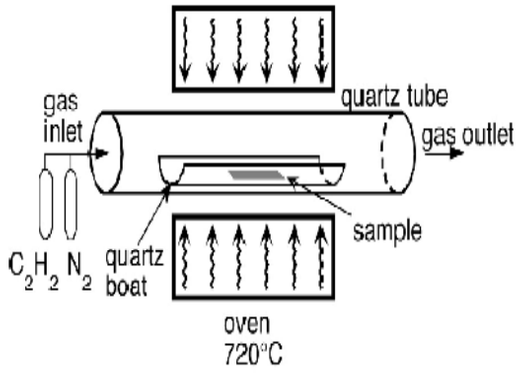
วิธีใช้การยิงแสงเลเซอร์ ไปทำให้คาร์บอนที่ผสมกับโลหะกลายเป็นไอในเตาเผาที่อุณหภูมิ 1,100 - 1,200 องศาเซลเซียส และใช้แก๊สเฉื่อยเช่น อาร์กอนหรือแก๊สไนโตรเจนไปกวาดท่อนาโนที่ได้ออกจากเตาเผาไปหล่อเย็นที่ตัวเก็บกัก (collector) ทองแดงด้านนอกเตาเผา โดยเทคนิคนี้หากใช้โคบอลต์และนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ท่อนาโนคาร์บอนผนังเดียวที่เป็นระเบียบมากกว่าวิธีแรกแต่มีข้อเสียคือต้นทุนการผลิตสูงทั้งสองเทคนิคและมีปัญหาในเรื่องของการสังเคราะห์ให้ได้ปริมาณมาก และทำให้ได้ท่อนาโนคาร์บอนที่เป็นระเบียบยาก



ภาพที่ 6 เครื่อง Pulsed-Laser Vaporization ที่ใช้ในการสังเคราะห์ท่อคาร์บอน
ที่มา (Popov, 2004)

3. การตกสะสมไอเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD)

วิธีนี้มีต้นทุนการผลิตต่ำ โดยอาศัยการก่อรูปของท่อนาโนคาร์บอนบนวัสดุรองรับ (substrate) เมื่อทำปฏิกิริยากับแก๊สผสมพวกไฮโดรคาร์บอน (เช่น แอเซทิลีน มีเทน หรือเอทิลีน)และแก๊สไนโตรเจนภายในห้องที่มีอุณหภูมิ 600 - 800 องศาเซลเซียส สำหรับการผลิตท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น มีอุณหภูมิ 900 -1,200 องศาเซลเซียส สำหรับการผลิตท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวในบรรยากาศปกติ การเร่งปฏิกิริยาทำได้โดยใช้วัสดุรองรับพวกโลหะหรือโลหะออกไซด์ หรือป้อนแก๊สดังกล่าวร่วมกับโลหะคะตะลิสต์เข้าไปในห้อง ซึ่งทำให้สามารถผลิตท่อนาโนคาร์บอนได้ปริมาณมาก และสามารถควบคุมขนาดและความยาวของท่อนาโนคาร์บอนได้ง่ายโดยควบคุมอัตราการไหลของก๊าซและระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา



ภาพที่ 7 เครื่อง Chemical Vapor Deposition ที่ใช้ในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน
ที่มา (Danafar et al., 2009)

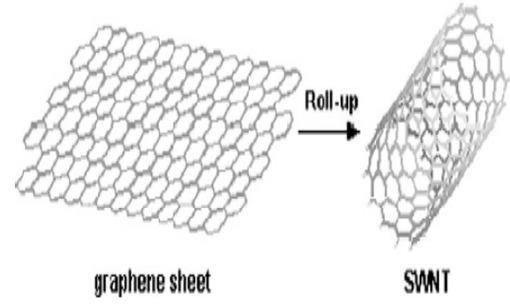
ปัจจุบันสามารถผลิตท่อนาโนคาร์บอนได้ 10 เมตริกตันต่อปี โดยบริษัทในญี่ปุ่นด้วยเทคนิคที่เรียกว่า Vapor-Grown Carbon Fiber

โครงสร้างและสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอนแบ่งเป็น 2 ชนิด ตามจำนวนชั้นของผนังท่อ (Aqela et al.,2010) มีรายละเอียดดังนี้

1. ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว

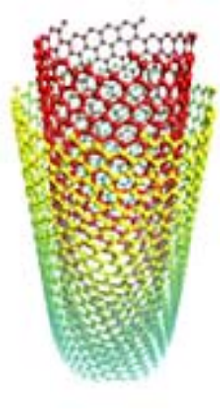
โครงสร้างของ ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว เกิดจากการม้วนโดยแผ่นแกรไฟต์บางๆ เพียงแผ่นเดียว ให้เป็นทรงกระบอก ซึ่งการม้วนของแผ่นแกรไฟต์จะอยู่ในรูปของคู่อันดับเวคเตอร์ (n,m) เรียกว่า ไครอลเวกเตอร์(chiral vector) โดยจำนวน n และ m หมายถึงจำนวนของ unit vector สองทิศทางในโครงสร้างผลึกที่เป็นรังผึ้งของแกรฟีน ถ้า m = 0 ท่อนาโนจะเรียกว่า แบบซิกแซก (zigzag) ถ้า n = m ท่อนาโน จะเรียกว่า แบบเก้าอี้ (armchair) และถ้าเป็นกรณีอื่น จะเรียกว่า ไครอล (chiral) สมบัติที่โดดเด่นของ ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว คือความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีมาก



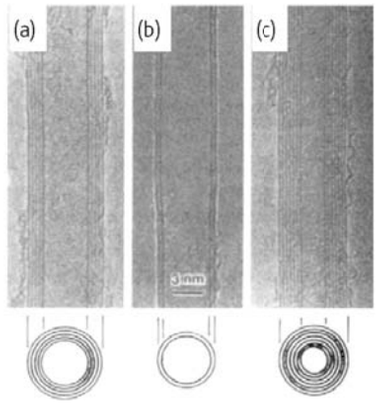
ภาพที่ 8 ท่อนาโนคาร์บอนผนังเดียว
ที่มา (Aqela et al., 2010)

2. ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น

ส่วนใหญ่ขนาดของท่อที่สังเคราะห์ได้พบว่ามีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณตั้งแต่ 2 นาโนเมตรไปจนถึงระดับไมโครเมตร ประกอบด้วยแผ่นแกรไฟต์หลายๆ แผ่นม้วนกันเป็นทรงกระบอกคล้ายกระดาษที่ม้วนอยู่ โดยมี 2 โมเดลที่ใช้ในการอธิบาย ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น คือ โมเดลตุ๊กตารัสเซีย (russian doll model) อธิบายว่า แผ่นแกรไฟต์ม้วนตัวเป็นทรงกระบอก โดยมี n,m = (0,8) ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวซ้อนอยู่ใน (0,10) ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว และ โมเดลกระดาษหนัง (parchment model) เกิดจากแผ่นแกรไฟต์เดี่ยวม้วนรอบๆ ตัวเอง และ ระยะห่างระหว่างแต่ละชั้นจะเท่ากับ 0.33 – 0.34 นาโนเมตร ซึ่งระยะนี้มีค่าประมาณระยะห่างระหว่างชั้นของแกรไฟต์



ภาพที่ 9โครงสร้างท่อนาโนคาร์บอน ผนังหลายชั้น
ที่มา (Aqela et al., 2010)



ภาพที่ 10 ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นที่มีจำนวนชั้นของแกรไฟต์ 5(a) 3(b) และ 7(c) ตามลำดับ
ที่มา (Aqela et al., 2010)

สมบัติทั้งทางกลและอิเล็กทรอนิกส์ของท่อนาโนคาร์บอนนั้น จะสามารถควบคุมได้ด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อและทิศทางการเรียงตัวของวงแหวนหกเหลี่ยม (helicity or chirality) ที่ทำมุมเทียบกับแกนของท่อด้วยเหตุนี้เอง จึงสามารถสร้างให้มีสมบัติที่เป็นได้ทั้งโลหะและสารกึ่งตัวนำ หรือแม้กระทั่งแสดงสมบัติตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยการเติมสารเจือ (doping) ลงไป

การประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอน

การที่จะก้าวเข้าสู่ยุคนาโนอิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องมีการลดขนาดชิ้นส่วนอุปกรณ์ลงตั้งแต่ 10 ถึง 1,000 เท่าจากเดิมที่เป็นไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (ขนาดของชิ้นส่วนเป็นไมโครเมตร) ดังนั้นต้องมีการลดขนาดของชิ้นส่วนอุปกรณ์ของอิเล็กทรอนิกส์ให้ก้าวสู่ระดับนาโน ทั้งแทรนซิสเตอร์ ไดโอด รีเลย์ และลอจิกเกทต้องเปลี่ยนใหม่ เช่น แทรนซิสเตอร์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าซิลิคอน

ปัจจุบันมีการผลิตวัสดุคอมโพสิตของท่อนาโนคาร์บอนได้ปริมาณ อาทิเช่น พลาสติกเสริมท่อนาโนคาร์บอนเช่น เสริมใน พอลิเอทิลีน (polyethtlene) พอลิเททระฟูลออโรเอทิลีน (polytetrafluoroethylene) หรือ พอลิไวนิลไอดีนฟูลออไรด์ (Poly(vinylidene fluoride)) เพื่อนำมาใช้ในรถยนต์ ใช้เป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้า ด้วยสมบัติที่ทนต่อสารเคมี ทนต่อการหลุดลอก รวมถึงป้องกันไฟฟ้าสถิตได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังนำไปใช้ประโยชน์สำหรับการสร้างจอภาพอย่างแบน และเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cells) ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนจะไปแทนที่คะตะลิสต์เดิมคือแพลทินัม พบว่าในสภาวะเดียวกันเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวเป็นส่วนผสมของขั้วอิเล็กโทรดให้กระแสไฟฟ้าสูงถึง 8 มิลลิแอมแปร์ ขณะที่ขั้วแบบเดิม (platinum-impregnated carbon black) ให้

กระแสไฟฟ้าได้เพียง 350 มิลลิแอมแปร์ ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์

ในทางการแพทย์แนวคิดสำคัญที่จะใช้ประโยชน์จากท่อนาโนคาร์บอน โดยนำท่อนาโนคาร์บอนนี้เข้าถึงโครงสร้างในระดับเซลล์ได้ และสามารถใช้เป็นหัววัด (probe) ตรวจวัด หรือใช้เป็นปิเปตต์ขนาดเล็กสำหรับปลดปล่อยสารหรือโมเลกุล (ultrasmall pipette) เข้าสู่เซลล์เป้าหมายได้ และสามารถปลดปล่อยยาหรือสารออกฤทธิ์เข้าสู่อวัยวะเป้าหมาย (targeted drug delivery)

การที่ท่อนาโนคาร์บอนสามารถทำให้อยู่ในรูปของสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) โดยที่สารกึ่งตัวนำนี้สามารถตอบสนองต่อสารพวกแอลคาไล แฮโลเจน และแก๊สต่าง ๆ ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อเป็น ท่อนาโนคาร์บอน กึ่งตัวนำไฟฟ้า (semiconducting carbon nanotube) จะสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงความต้านทานได้ดีขึ้นอย่างมาก ทำให้เซนเซอร์ที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนนี้มีความไวมากขึ้น ซึ่งก็มีการพัฒนาเป็นตัวรับรู้ตรวจวัด ไซโทโซม ซี (cytochrome C), มีเทน (methane), และแอลคิลแอไมด์ (alkylamide) แบบสารกึ่งตัวนำ เป็นต้น

แนวทางสำหรับประยุกต์เชิงตัวรับรู้ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นสามารถทำได้ด้วยการนำท่อนาโนคาร์บอนไปเพิ่มหมู่ทำหน้าที่ทางเคมี (functonalizaion) (Krystyna Pyrzynska , 2009) เช่น หมู่ไฮดรอกซิล และ หมู่คาร์บอกซิลิก เป็นต้น ทำให้สามารถตรึงด้วยสารทางชีวภาพ ได้แก่ โปรตีน เอนไซม์ หรือ ดีเอ็นเอ วิธีนี้สามารถนำท่อนาโนคาร์บอนไปประยุกต์ใช้กับงานด้านตัวรับรู้ทางชีวภาพ เพื่อประโยชน์ในการวินิจฉัยทางการแพทย์ หรือใช้ในการตรวจวิเคราะห์สารต่างๆ ได้ โดยท่อนาโนคาร์บอนมีพื้นผิวสำหรับการตรึงสารทางชีวภาพสูง ทำให้สามารถเพิ่มขนาดสัญญาณได้มากขึ้น เมื่อเทียบกับวิธีของตัวรับรู้ทางชีวภาพเดิม การตรึงสารทางชีวภาพบนท่อนาโนคาร์บอนนั้น มีหลายวิธี ได้แก่ การดูดซับสารตัวอย่าง (simple adsorption) ที่ช่องของปลายเปิดหรือผนังด้านนอกของท่อนาโนคาร์บอน (วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกแต่มีข้อเสียคือ มีปริมาณสารทางชีวโมเลกุลที่ติดอยู่น้อย) การทำอันตรกิริยาไฟฟ้าสถิต (electrostatic interaction) ระหว่างสารชีวโมเลกุลกับท่อนาโนคาร์บอน การทำให้เกิดพันธะโควาเลนซ์ที่ปลายเปิดของท่อนาโนคาร์บอนหรืออาจติดหมู่ทำหน้าที่ ด้านข้างของท่อนาโนคาร์บอนโดยการเคลือบด้วยชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ ได้มีการพัฒนาใช้ท่อนาโนคาร์บอนสร้างเป็นหัววัดรับรู้ทางชีวภาพ (biosensor probe) สำหรับตรวจวัดน้ำตาลกลูโคส (Glucose),ดีเอ็นเอ (DNA), และเอ็นเอดีเอช (NADH) เป็นต้น

การตรึงสารชีวโมเลกุลที่ปลายเปิดของท่อนาโนคาร์บอนนั้น ต้องเปิดปลายหรือนำส่วนของครึ่งทรงกลม C_{60} ออกโดยสองวิธีหลัก ๆ คือ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับท่อนาโนคาร์บอนด้วยกรด (acid oxidation) วิธีนี้ทำให้เกิดหมู่คาร์บอกซิลที่ปลายเปิด และสามารถตรึงเอนไซม์หรือพันธะเพปไทด์ของกรดนิวคลิอิก (peptide nucleic acid) ลงบนท่อนาโนคาร์บอนได้

ส่วนวิธีที่สองคือการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของท่อนาโนคาร์บอนกับอากาศ (Chensha Li et al.,2004) ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ประมาณ 5 นาที แต่การเปิดปลายวิธีที่สองนั้นจะตรึงเอนไซม์ได้ในปริมาณน้อยกว่าวิธีแรก เพราะไม่สามารถเพิ่มหมู่ทำหน้าที่ ของท่อนาโนคาร์บอนได้ และยังส่งผลถึงความคงตัว (stability) ของเอนไซม์ด้วย ดังนั้นวิธีการเปิดปลายท่อนาโนคาร์บอนจึงมีผลต่อการเข้าจับของเอนไซม์ภายในท่อนาโนคาร์บอน บางแห่งอาจใช้กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid) เข้มข้น เพื่อทำให้ปลายเปิดของท่อนาโนคาร์บอน มีหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้สามารถใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้า โดยให้ศักย์ไฟฟ้าที่ 1.5 โวลต์กับท่อนาโนคาร์บอนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หมู่แอมีนที่มีอยู่ในสารชีวโมเลกุลจะสามารถจับกับหมู่คาร์บอกซิลบนท่อนาโนคาร์บอนได้ (Aqela et al., 2010)

บทสรุป

เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างอันน่าอัศจรรย์ในระดับนาโน เทคนิคในการสังเคราะห์ที่สามารถผลิตได้ในระดับอุตสาหกรรม และสมบัติเด่นอันหลากหลายของท่อนาโนคาร์บอน ทั้งในด้านสมบัติเชิงกล ค่าการนำไฟฟ้า และความเข้ากันได้เมื่อใช้ในสิ่งมีชีวิต (bio-compactable) จึงพบว่าในปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยและประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอนอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ ทางการแพทย์ทางด้านวิทยาศาสตร์ และทางด้านอากาศยาน จึงทำให้ท่อนาโนคาร์บอนก้าวเข้ามามีบทบาทมากยิ่งขึ้นต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ในโลกแห่งนาโนเทคโนโลยี

เอกสารอ้างอิง

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

Aqela, A., Abou El-Nourb, K.M.M., Ammar, R.A.A., and Al-Warthan, A. (2010). Carbon nanotubes, science and technology part (I) structure, synthesis and characterization. **Arabian Journal of Chemistry,** doi:10.1016/j.arabjc.2010.08.022

Danafar, F., Fakhru'l-Razi, A., Salleh, M. A., and Biak, D. R. (2009). Fluidized bed catalytic chemical vapor deposition synthesis of carbonnanotubes. **Chemical Engineering Journal**, 155: 37-48.

Hang Y. and Santiago-Aviles, J.J. (2003). Large negative magnetoresistance and two-dimensional weak localization in carbon nanofiber fabricated using electrospinning. **Journal of Applied Physics**, 94: 1721-1727.

IPE Nanotube Primer, (2011). **Nanotube Production**. Retrieved March 3, 2011, from Website: http://ipn2.epfl.ch/CHBU/NTproduction1.htm

Kuzmany, H., Kukovecz, A. Simona, F. Holzweber, M., Kramberger, C. Pichler, T. (2004). Oxidation of multi-walled carbon nanotubes by air:benefits for electric double layer capacitors. **Powder Technology**, 142: 175-179.

Popov V.N. (2004). Carbon nanotubes: properties and application. **Materials Scienceand Engineering: R: Reports**, 43: 61–102.

Pyrzynska, K. (2011). Carbon nanotubes as sorbents in the analysis of pesticides. **Chemosphere**, 83: 1407–1413.