



บทที่ 3

ทฤษฎีของคาร์บอน

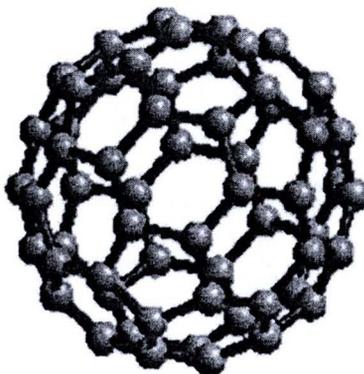
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ เริ่มตั้งแต่รูปแบบโครงสร้างของคาร์บอน การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีการต่างๆ ลักษณะการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ สมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางกลของท่อคาร์บอน ตลอดจนการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ซึ่งจะขอกกล่าวตามลำดับดังต่อไปนี้

3.1 รูปแบบโครงสร้างของคาร์บอน

คาร์บอนเป็นส่วนประกอบของสสารต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นอาหาร อากาศ เครื่องนุ่งห่ม และน้ำมันเชื้อเพลิง เป็นต้น ทั้งยังมีบทบาทอย่างมากต่อมนุษย์ เนื่องจากองค์ประกอบครึ่งหนึ่งของสสารที่เป็นของแข็งในร่างกายมนุษย์ คือ คาร์บอน ดังนั้นคาร์บอนจึงเป็นหนึ่งในธาตุสำคัญหลักๆ ของมนุษย์ คาร์บอน เป็นธาตุลำดับที่ 6 ในตารางธาตุ มีเลขอะตอมเท่ากับ 6 มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 12 และมีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในอะตอม แบบ $1s^2 2s^2 2p^3$ สำหรับโครงสร้างของคาร์บอนนั้นสามารถพบได้หลายแบบ โดยจะแบ่งออกเป็น 4 ชนิดหลักๆ ดังนี้^[14]

3.1.1 โครงสร้างแบบศูนย์มิติ

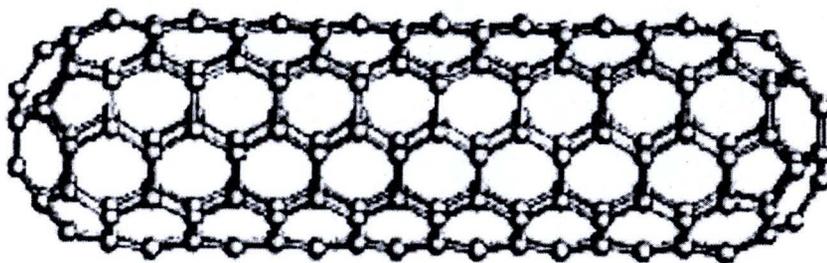
มีลักษณะเป็นก้อนเล็กมากจนอาจถือได้ว่ามันเป็นจุดที่ไม่มีมิติหรือศูนย์มิติเรียกว่าฟูลเลอร์ีนส์ (Fullerenes) หรือบัคกิ้งบอล ซึ่งส่วนใหญ่คาร์บอนที่พบจะอยู่ในรูปของคาร์บอนหกสิบ (C_{60}) โดยแต่ละโมเลกุลจะประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนจำนวนทั้งหมด 60 อะตอม มาจับตัวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ทำให้ได้รูปทรงเป็นแบบก้อนทรงกลมกลวงคล้ายลูกตะกร้อหรือลูกบอลขนาดจิ๋ว



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของคาร์บอนหกสิบ (C_{60})

3.1.2 โครงสร้างแบบหนึ่งมิติ

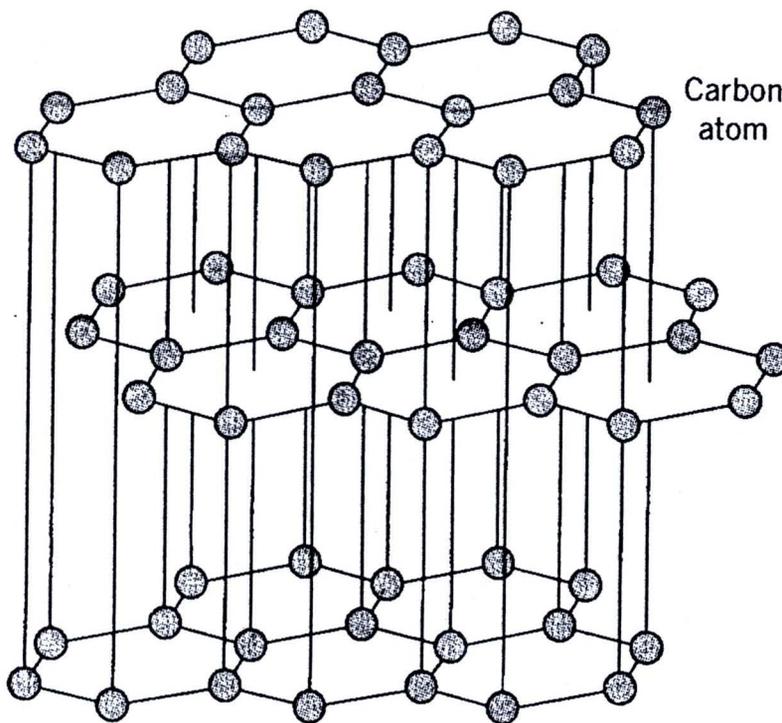
มีลักษณะเป็นแผ่นคล้ายกับแผ่นกราฟิต์ม้วนตัวเป็นท่อที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากจนทำให้ดูเหมือนเป็นเส้นยาวในแนวหนึ่งมิติ เรียกว่า คาร์บอนนาโนทิวบ์



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์

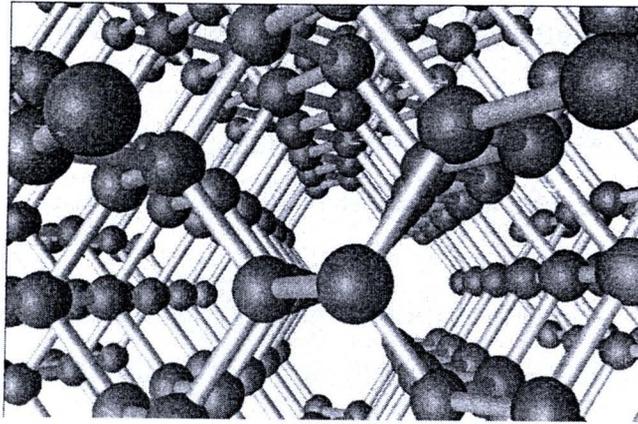
3.1.3 โครงสร้างแบบสองมิติ

มีลักษณะเป็นแผ่นที่วางซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ และยึดระหว่างชั้นเข้าด้วยกันด้วยแรงที่ต่ำกว่าพันธะโควาเลนต์ ซึ่งก็คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals force) คาร์บอนที่มีโครงสร้างแบบนี้ นิยมนำมาทำเป็นไส้ดินสอดำ เบ้าหลอมโลหะ และใช้เคลือบวัสดุเพื่อป้องกันการเกิดสนิม



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของแกรไฟต์

3.1.4 โครงสร้างแบบสามมิติ

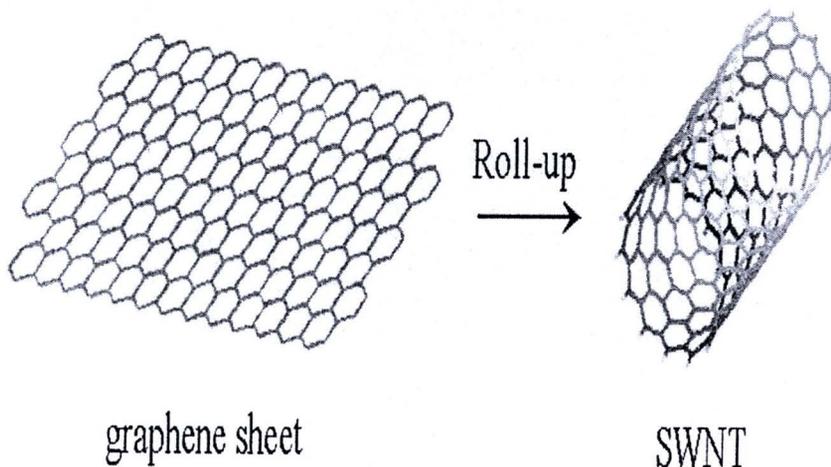


รูปที่ 3.4 โครงสร้างแบบเพชร (Diamond).

เป็นโครงสร้างที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนทั้งหมดเกาะยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งถือได้ว่าเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงที่สุด เช่นเดียวกับกับพันธะของ เพชร ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความสวยงามและแข็งแรงที่สุด นิยมนำมาใช้เป็นหัวตัดและเจาะวัสดุต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ^[17]

3.2 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes; CNTs)

ท่อนาโนคาร์บอนจะประกอบด้วยหน่วยย่อยเล็กๆ (โครงสร้างของอะตอมคาร์บอนจำนวน 6 อะตอมมาจัดเรียงตัวกันเป็นวงแหวนรูปหกเหลี่ยม) จำนวนมากมายมาจัดเรียงตัวกันเป็นผนังท่อ ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1991 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น ชื่อ สุมิโอะ อิจิมะ (Sumio Iijima)^[1] ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนนั้นมีลักษณะเหมือนกับแผ่นแกรไฟต์ที่มีวนเป็นท่อแสดงดังรูปที่ 2.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 นาโนเมตรจนถึงหลายสิบนานาเมตร^[14] โดยอะตอมคาร์บอนเหล่านี้ต่างเชื่อมต่อกันแบบ sp^2 ^[15, 18] และสามารถแบ่งท่อนาโนคาร์บอนออกเป็นสองชนิด คือ



รูป 3.5 ลักษณะพื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวบ์

3.2.1 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว (Single-walled Carbon Nanotubes; SWNTs)

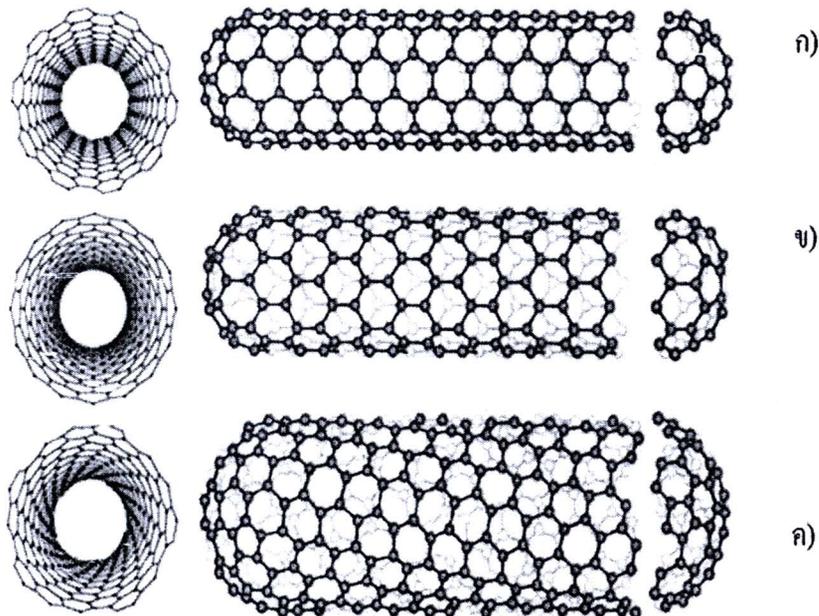
คาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังชั้นเดียวมีอยู่ด้วยกันทั้งหมด 3 รูปแบบ ซึ่งแต่ละแบบได้แสดงดังในรูปที่ 3.6

โดยมีดัชนี (n, m) เป็นตัวบ่งบอกรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนบนคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยกำหนดให้เวกเตอร์ผลลัพธ์ของผลรวมเวกเตอร์ $n + m$ คือ เส้นรอบวงของคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังแสดงในรูป 3.7

ถ้า $m = n$ จะได้ คาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีการจัดเรียงอะตอมแบบ Armchair (n, n) ซึ่งแบบจำลองเกิดจากการม้วนให้ตำแหน่ง $(0, 0)$ ไปพบกับตำแหน่ง (n, n) มีขนาดมุม θ เท่ากับ 30 องศา ดังแสดงในรูป 3.8

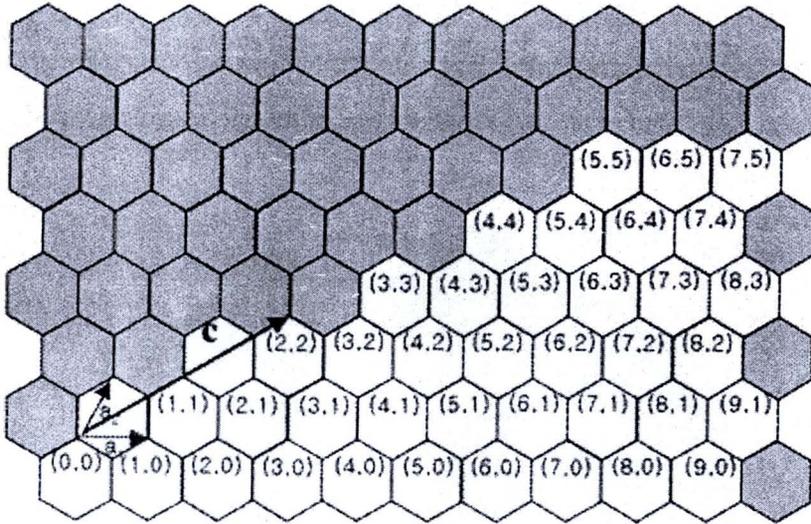
ถ้า $m = 0$ จะได้ คาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีการจัดเรียงอะตอมแบบ Zig-zag $(n, 0)$ ซึ่งแบบจำลองเกิดจากการม้วนให้ตำแหน่ง $(0, 0)$ ไปพบกับตำแหน่ง $(n, 0)$ มีขนาดมุม θ เท่ากับ 0 องศา ดังแสดงในรูป 3.8

ถ้า $m \neq n$ จะได้ คาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีการจัดเรียงอะตอมแบบ Chiral (n, m) ซึ่งแบบจำลองเกิดจากการม้วนให้ตำแหน่ง $(0, 0)$ ไปพบกับตำแหน่ง (n, m) มีขนาดมุม θ เท่ากับ 0-30 องศา ดังแสดงในรูป 3.8

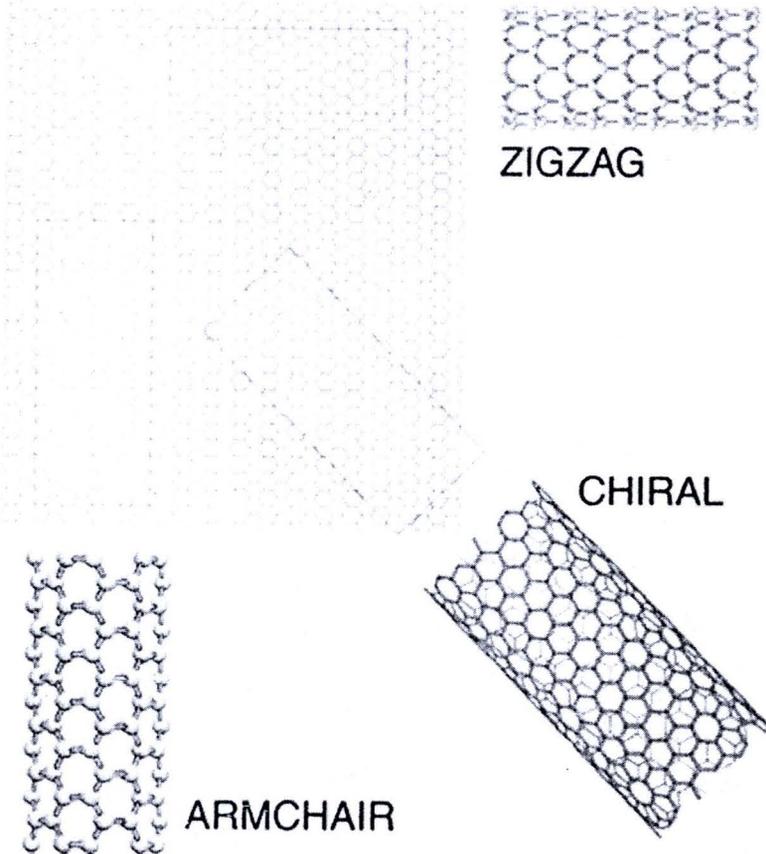


รูปที่ 3.6 แบบโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์

(ก) Armchair structure (n, n) , (ข) Zig-zag structure $(n, 0)$ และ (ค) Chiral structure (n, m)



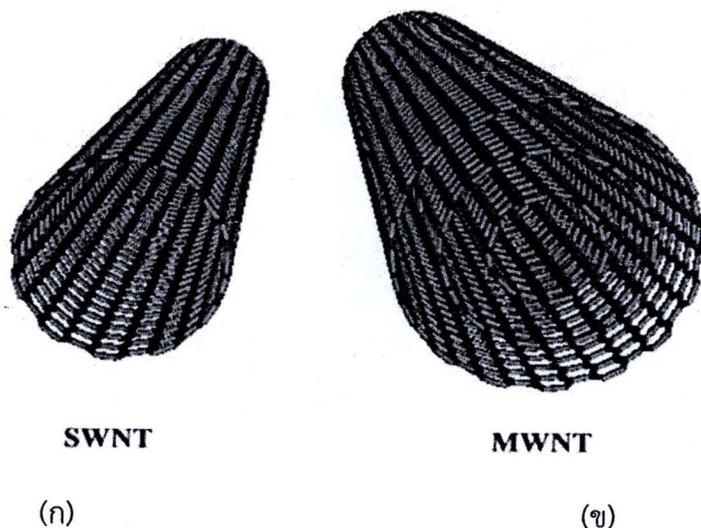
รูปที่ 3.7 ดัชนีบ่งบอกรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมบนท่อนาโนคาร์บอน



รูปที่ 3.8 ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวในรูปแบบต่างๆ

3.2.2 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น (Multi-walled Carbon Nanotubes; MWNTs)

ลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้นจะมีลักษณะคล้ายกับแบบผนังชั้นเดียวแต่จะมีจำนวนชั้นในการเกิดที่มากกว่าซ้อนทับกันหลายๆชั้น รูปที่ 3.9 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังเดียวกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้น



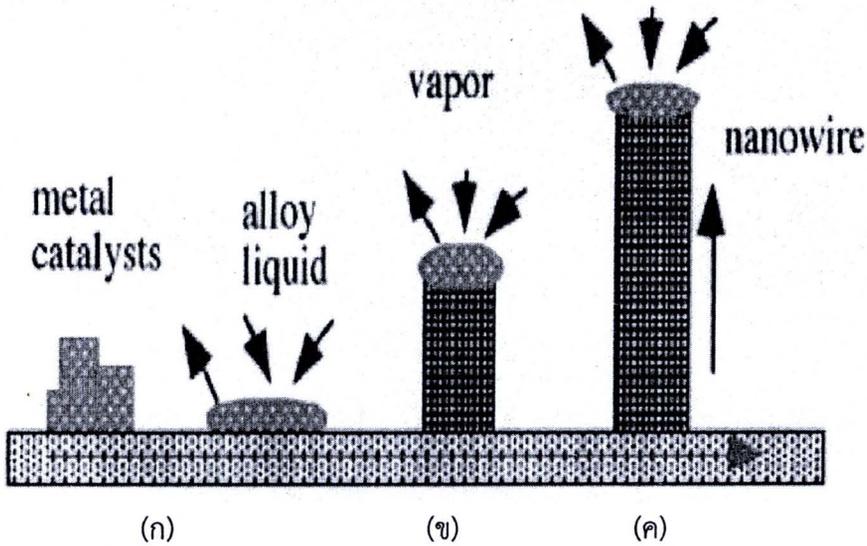
รูปที่ 3.9 ภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์

(ก) คาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังชั้นเดียว, (ข) คาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้น

3.3 ทฤษฎีการเติบโตของคาร์บอนนาโนทิวบ์

การเติบโตของวัสดุนาโนโครงสร้าง 1 มิติ (one-dimensional nanostructures) ได้แก่ ท่อนาโน (nanotubes) เส้นใยนาโน (nanofibers) และเส้นนาโน (nanowires) นั้นมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างผลึกของวัสดุนาโนนั้นๆ ซึ่งเกิดจากกระบวนการนิวคลีเอชัน (nucleation) และการเจริญเติบโตของสารจากสถานะก๊าซ (Vapor) ของเหลว (Liquid) หรือ ของแข็ง (Solid) เมื่อความเข้มข้นของอะตอม ไอออน หรือนิวเคลียสของสารมีมากพอ จะเกิดการไหลไปรวมกันที่นิวคลีโอ (Nuclei) และเกิดกระบวนการนิวคลีเอชันเจริญเติบโตเป็นวัสดุนาโนโครงสร้าง 1 มิติขึ้นนั่นเอง โดยจะเรียกกลไกการเติบโตนี้ว่า กลไก VLS (Vapor-Liquid-Solid mechanism; VLS Mechanism) สำหรับการเติบโตของคาร์บอนนาโนทิวบ์โดยอาศัยกลไก VLS นี้ อธิบายได้โดย เมื่อโลหะคตะไลต์ (metal catalyst) ที่อยู่ในสถานะของแข็ง เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นของเหลว และเมื่อให้แหล่งกำเนิดคาร์บอนที่อยู่ในสถานะก๊าซไหลเข้ามา โลหะคตะไลต์ซึ่งอยู่ในสถานะของเหลวจะเป็นตัวกักจับอะตอมคาร์บอน โดยอะตอมคาร์บอนจะตกสะสมและแพร่ (diffuse) เข้าไปในผิวโลหะคตะไลต์ ทำให้เกิดโลหะผสมระหว่างคาร์บอนและโลหะคตะไลต์ที่อยู่ในสถานะของเหลว (alloy liquid) ขึ้น และเมื่ออะตอมคาร์บอนตกสะสมและแพร่มากขึ้นจนอิ่มตัวอย่างสุดขีด จะทำให้เกิดการตกตะกอนของอะตอมคาร์บอนที่ผิวนอกบริเวณรอยต่อพื้นผิว

ของแข็งและโลหะผสมที่เป็นของเหลว (solid-alloy liquid interface) เป็นโดมของฟูลเลอร์รีนส์ (fullerene dome) และสร้างตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ในที่สุด ดังแสดงในรูป 3.10

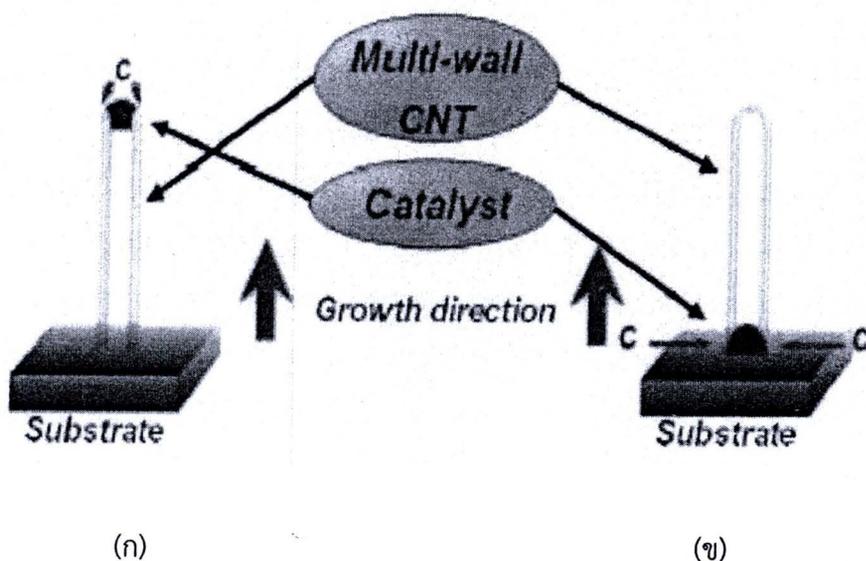


รูปที่ 3.10 การสร้างตัวของท่อนาโนคาร์บอนแบบ VLS mechanism^[22] แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ

- (ก) Alloying เป็นขั้นตอนที่โลหะคะตะลิสต์ได้รับความร้อนและมีไอของอะตอมคาร์บอนมาตกสะสมกลายเป็นโลหะผสมที่อยู่ในสถานะของเหลว
- (ข) Nucleation เป็นขั้นตอนที่ไอของอะตอมคาร์บอนเกิดการตกสะสมที่บริเวณผิวรอยต่อ ระหว่างของแข็งและโลหะผสมที่เป็นของเหลว
- (ค) Axial growth เป็นขั้นตอนการเจริญเติบโตเป็นท่อนาโน

โดยรูปแบบการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ แบบ Base growth และ Tip growth^[23] ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างโลหะคะตะไลต์กับแผ่นฐานรอง (substrate) ถ้าอันตรกิริยาระหว่างโลหะคะตะไลต์กับฐานรองอ่อน (Weak substrate-catalyst interaction) การของท่อนาโนคาร์บอนจะเป็นแบบ Tip growth โดยโลหะคะตะไลต์จะอยู่ด้านบนของปลายท่อ ดังแสดงในรูป 3.11 (ก) แต่ถ้าอันตรกิริยาระหว่างโลหะคะตะไลต์กับฐานรองแข็งแรง (Strong substrate-catalyst interaction) การเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนจะเป็นแบบ Base growth โดยโลหะคะตะไลต์จะอยู่ด้านล่างของท่อ ดังแสดงในรูป 3.11 (ข)

โดยความสมบูรณ์ผลึกของท่อนาโนคาร์บอนนั้นขึ้นอยู่กับธรรมชาติทางเคมีของอนุภาคโลหะคะตะไลต์ อุณหภูมิ และองค์ประกอบของก๊าซที่ใช้ระหว่างการสร้างตัวของท่อ ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อคาร์บอนนั้นสามารถควบคุมได้จากขนาดของโลหะคะตะไลต์



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.11 แสดงการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอน

(ก) แบบ Tip growth และ (ข) แบบ Base growth

3.4 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

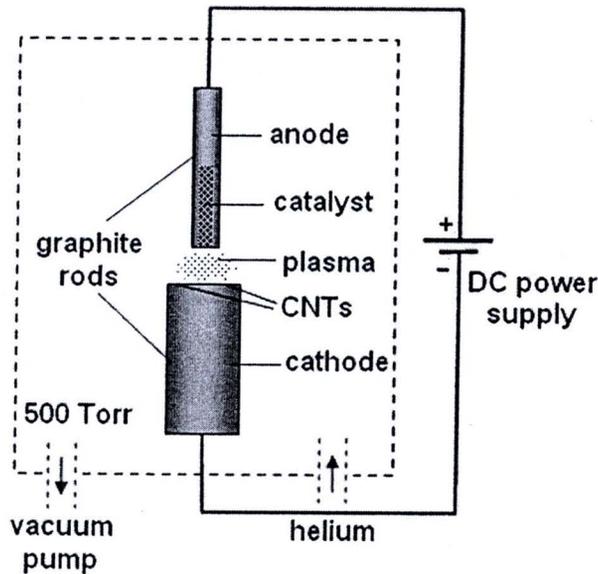
การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนนั้นสามารถทำได้มีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีต่างก็มีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันไป ทั้งในด้านขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว ปริมาณ และความบริสุทธิ์ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ โดยสามารถแบ่งวิธีการสังเคราะห์หลักๆ ได้ดังนี้

3.4.1 วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc Discharge)

วิธีอาร์คดิสชาร์จนั้นในช่วงแรกจะเป็นวิธีที่ใช้สังเคราะห์ฟูลเลอร์รีนส์ หรือ C_{60} ซึ่งต่อมาก็ได้มีการนำมาสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมและรู้จักกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์เท่าที่มีการรับรองผลมาการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีนี้ จะทำได้ด้วยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 50-120 แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ประมาณ 18-40 โวลต์ ตกคร่อมระหว่างแท่งแกรไฟต์สองแท่งที่มีระยะห่างระหว่างแท่งประมาณ 1 มิลลิเมตร ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ฮีเลียม และอาร์กอน เป็นต้น ที่ความดันต่ำระหว่าง 50-700 มิลลิเมตรปรอท ความร้อนสูงที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองจะทำให้เกิดสถานะพลาสมาขึ้น ทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ขึ้นตรงบริเวณกลางขั้วของแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วลบ

คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีนี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่แตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้นั้นขึ้นอยู่กับของผสมระหว่างก๊าซฮีเลียมและอาร์กอน เนื่องจากก๊าซฮีเลียมและอาร์กอนมีสัมประสิทธิ์ของการแพร่

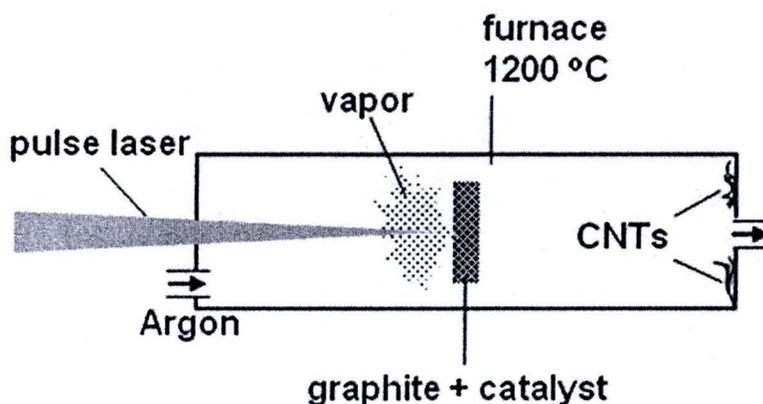
(diffusion coefficient) และ สมบัติการนำความร้อน (thermal conductivity) ที่แตกต่างกัน ทำให้มีผลต่อความเร็วในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ ส่งผลให้ขนาดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้นั้นมีขนาดที่แตกต่างกันไป ซึ่งการควบคุมขนาด ความยาว และปริมาณของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้นั้น อาจทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิและความสม่ำเสมอของการเกิดสถานะพลาสมาและยังสามารถกำหนดชนิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้โดยผสมโลหะบางชนิดเข้าไปในแท่งแกรไฟต์เช่น เหล็ก นิกเกิล และโคบอลต์ เป็นโลหะคะตะไลต์เพื่อช่วยให้เกิดการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังชั้นเดียว อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเขม่าที่ประกอบด้วยคาร์บอนนาโนทิวบ์และโลหะคะตะไลต์ที่ผสมอยู่ในแท่งแกรไฟต์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ ซึ่งอาจมีความจำเป็นต้องทำการแยกโลหะคะตะไลต์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ออกจากกันก่อนนำไปใช้ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับประเภทของการนำไปใช้งาน



รูปที่ 3.12 แสดงชนิดของท่อคาร์บอนนาโนที่เกิดจากการเติมและไม่เติมโลหะคะตะไลต์ในกระบวนการสังเคราะห์ท่อคาร์บอนนาโนโดยวิธีอาร์คดิสชาร์จ

3.4.2 วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Ablation)

การสังเคราะห์ท่อคาร์บอนนาโนด้วยวิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์นี้ ถูกค้นพบในปี ค.ศ.1995 โดยกลุ่มของ Smalley ที่ Rice University วิธีนี้จะใช้แสงเลเซอร์ที่มีความเข้มแสงสูง (อาจเป็นพัลส์ (Pulse)) หรือ ความยาวคลื่นต่อเนื่อง (Continuous)) ยิงไปยังเป้าซึ่งเป็นแกรไฟต์ ภายใต้สภาวะบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ฮีเลียม และอาร์กอน เป็นต้น ที่ความดันต่ำประมาณ 500 มิลลิเมตรปรอท ในเตาเผาอุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ไร้อนจะขยายตัวและเย็นลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเทคนิคนี้จะคล้ายกับวิธีอาร์คดิสชาร์จตรงที่จะผสมโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก นิกเกิล และโคบอลต์ เป็นโลหะคะตะไลต์เพื่อช่วยให้เกิดการสังเคราะห์ท่อคาร์บอนนาโนชนิดผนังชั้นเดียว



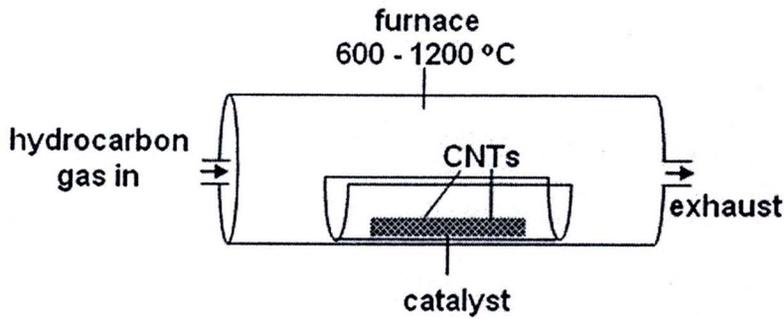
รูปที่ 3.13 แผนภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์

3.4.3 วิธีการตกสะสมไอเคมี (Chemical Vapor Deposition; CVD)

เป็นวิธีที่ให้ความร้อนแก่ก๊าซไฮโดรคาร์บอน ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน โดยก๊าซที่นิยมใช้คือ มีเทน (CH_4) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และอะเซทิลีน (C_2H_2) หรือใช้แอลกอฮอล์ที่ระเหยได้ง่าย เช่น เมทานอล (methanol) และเอทานอล (ethanol) เป็นต้น โดยความร้อนที่นิยมใช้ในการแยกโมเลกุลของก๊าซให้แตกตัวเป็นอะตอมคาร์บอนคือ พลาสมาหรือขดลวดความร้อน ซึ่งวิธีนี้ต้องอาศัยโลหะคตะไลต์ เช่น นิเกิล เหล็ก และโคบอลต์ เป็นตัวช่วยในการสร้างท่อนาโนคาร์บอน และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนอยู่ที่ประมาณ 650-900 องศาเซลเซียส ซึ่งวิธีนี้สามารถควบคุมขนาดและความยาวของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้นได้โดยการควบคุมขนาดของโลหะคตะไลต์และอัตราการไหลของก๊าซ ข้อดีของวิธีนี้ คือ สามารถทำได้ทั้งในบรรยากาศปกติและบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ฮีเลียม และอาร์กอน เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถผลิตท่อนาโนคาร์บอนได้ในปริมาณมากและมีความบริสุทธิ์สูงอีกด้วย ซึ่งวิธีการตกสะสมไอเคมีมีหลายเทคนิคด้วยกัน คือ

(1) กระบวนการตกสะสมไอเคมีด้วยความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition; Thermal CVD) ^[3]

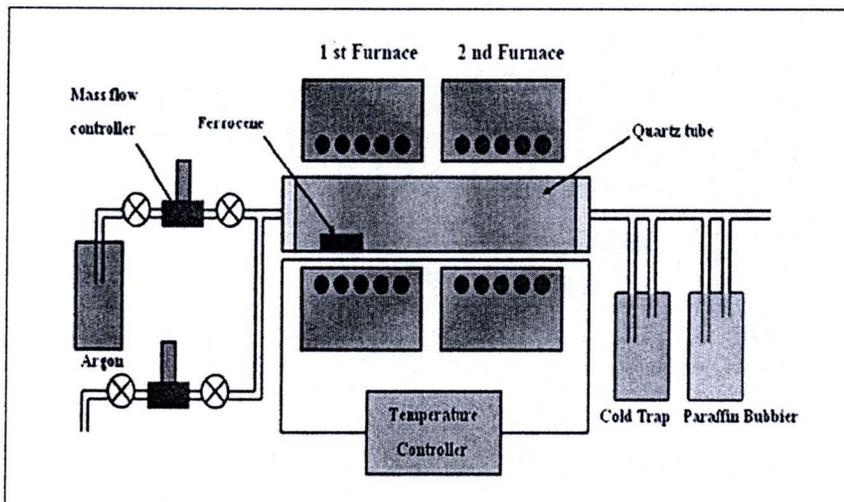
วิธีนี้จะใช้ เหล็ก นิเกิล โคบอลต์ หรือโลหะผสมของทั้งสามชนิดนี้ เป็นตัวคตะไลต์เคลือบบนแผ่นฐานรอง ทำการเตรียมโลหะคตะไลต์ให้มีขนาดเล็กลงด้วยการนำไปกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูอริก (HF) จากนั้นนำโลหะคตะไลต์ที่ผ่านการเตรียมให้มีขนาดเล็กลงแล้วมาใส่ในเตาเผาที่มีอุณหภูมิประมาณ 600-1200 องศาเซลเซียส โดยมีก๊าซไฮโดรคาร์บอน (C_2H_2) เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนและแอมโมเนีย ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แผนภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยกระบวนการตกสะสมไอเคมีด้วยความร้อน

(2) วิธีการเติบโตแบบแบ่งเฟส (Vapor Phase Growth)

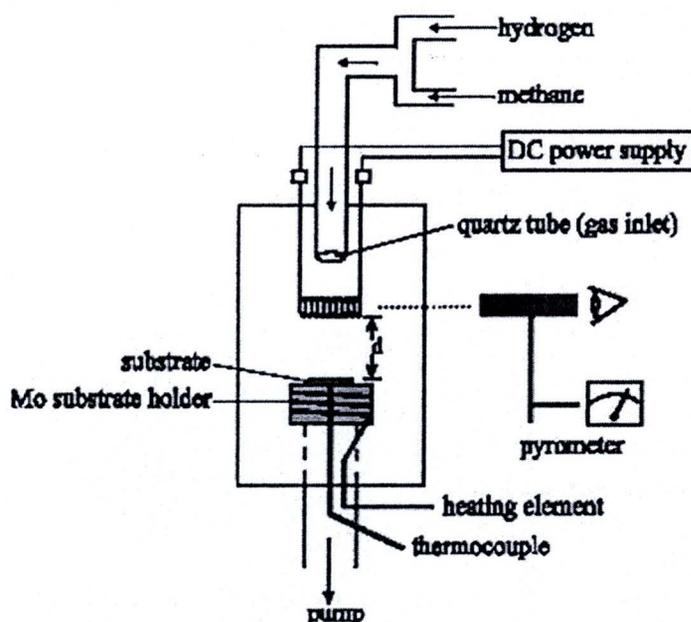
วิธีนี้มีเตาเผา 2 เตา โดยที่เตาเผาแรกจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าเตาเผาที่สอง และมีโลหะคะตะลิสต์วางอยู่ เมื่อปล่อยก๊าซไฮโดรคาร์บอนเข้าเตา ก็จะพาไอของโลหะคะตะลิสต์ที่ระเหยออกมาแล้วไปรวมตัวกันที่เตาเผาที่สอง และจัดเรียงตัวกันเป็นท่อนาโนคาร์บอนขึ้น ซึ่งกระบวนการทั้งหมดนั้นจะทำภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน และท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้นมีทั้งชนิดผนังชั้นเดียว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-4 นาโนเมตร และชนิดผนังหลายชั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70-100 นาโนเมตร ดังรูป 3.15



รูปที่ 3.15 แผนภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีการเติบโตแบบแบ่งเฟส

(3) แบบขดลวดความร้อน Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HF-CVD)

วิธีชีวิตแบบขดลวดความร้อน (Hot filament CVD) นี้ ซึ่งจะมีหลักการคล้ายกับวิธีเทอร์มอลชีวิต เพียงแต่จะใช้ขดลวดความร้อน (filament) ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกับแก๊ส วิธีชีวิตแบบขดลวดความร้อนนี้เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในห้องปฏิบัติการและ ในเชิงพาณิชย์ หลักการคือใช้ไฟฟ้ากระแสสูงจ่ายให้ขดลวดความร้อน เพื่อให้เกิดความร้อนขึ้นที่ขดลวดภายในห้องปฏิบัติการ (Chamber) โดยในห้องปฏิบัติการจะมีแก๊สที่มีส่วนประกอบของคาร์บอน เช่นไฮโดรเจนของแอลกอฮอล์ อะซีโตน หรือมีเทน เป็นต้น ไหลผ่านเข้ามาภายในห้องปฏิบัติการ ลวดความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 1600–2000°C ทำให้อะตอมคาร์บอนขนาดเล็กๆ แตกตัวออกจากโมเลกุลของแก๊สและไปจับตัวกันที่โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้เตรียมไว้บนแผ่นฐานรอง โดยแผ่นฐานรองจะอุณหภูมิอยู่ในช่วงประมาณ 550 – 900°C ทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นของเหลวและจับตัวกับคาร์บอนที่ตกลงมา เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็น เหล็ก (Fe) โคบอล (Co) หรือ นิกเกิล (Ni) ซึ่งหาได้ง่าย



รูปที่ 3.16 วิธีชีวิตแบบขดลวดความร้อน (Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HF-CVD))

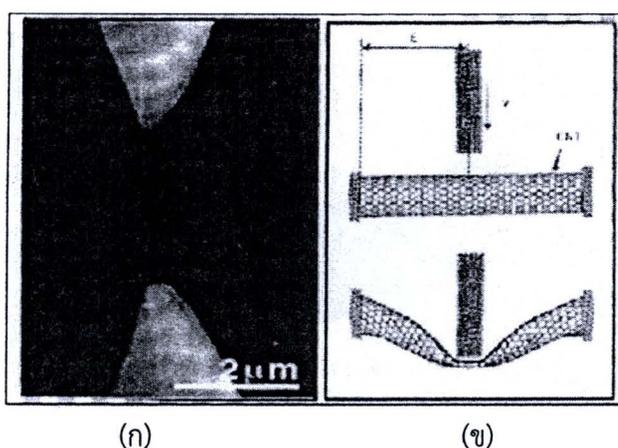
3.5 คุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน

3.5.1 สมบัติเชิงกล

เพชรซึ่งรู้กันดีว่ามีความแข็งแรงมากด้วยโครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อระหว่างพันธะของอะตอมคาร์บอนที่มีสี่ตำแหน่งอย่างลงตัว ขณะที่โครงสร้างของกราฟิไต้นั้น

คาร์บอนหนึ่งอะตอมเชื่อมพันธะกับคาร์บอนอีกสามอะตอมในระนาบเดียวกันและอีกหนึ่งพันธะที่เหลือจะยึดกับระนาบถัดไป พันธะในระนาบเดียวกันของกราฟิตมีความแข็งแรงมาก แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ ด้วยลักษณะโครงสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์ ดังกล่าว รวมถึงพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 นาโนเมตร (สั้นกว่าเพชร) จึงทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์แข็งแรงเพชรและกราฟิต

ค่าความยืดหยุ่น (Young's modulus of elasticity) ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีค่าสูงถึง 1 เทอราปาสคาล(TPa) หรือ 1000กิกะปาสคาล (GPa) คงเป็นที่สงสัยว่า คาร์บอนนาโนทิวบ์เล็กจิ๋วขนาดนั้นจะวัดได้อย่างไร วิธีการประเมินค่าความยืดหยุ่นนี้ทำได้หลายวิธีเช่น โดยอาศัย Thermal vibration หรือใช้ scanning force microscopy ไปงอคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยยึดปลายหนึ่งไว้แล้ว วัดการสั่นสะเทือนในสนามไฟฟ้าและมีการใช้ atomic force microscopy (AFM) จับคาร์บอนนาโนทิวบ์ ทั้งสองข้างแล้วดึงจนขาดเพื่อหาความต้านทานแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 3.17(ก) ความแข็งแรงของ คาร์บอนนาโนทิวบ์ มีค่าอยู่ระหว่าง 11-63 Gpa ขณะที่ความแข็งแรงของเหล็กกล้าอัลลอยมีเพียง 2Gpa นอกจากนี้ SWCNTs สามารถยืดตัวได้ถึง 10 ถึง 13 เปอร์เซ็นต์ก่อนที่จะขาดออกจากกัน SWCNTs มีพื้นที่ผิวได้ถึง $1500 \text{ m}^2/\text{g}$ โดยมีความหนาแน่น 1.33 ถึง 1.40 g/cm^3 รูปที่ 3.17(ข) ภาพแสดงการยืดหยุ่นที่ดีของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ขณะที่มียัดถูกมาชนด้วยความเร็วค่าหนึ่ง



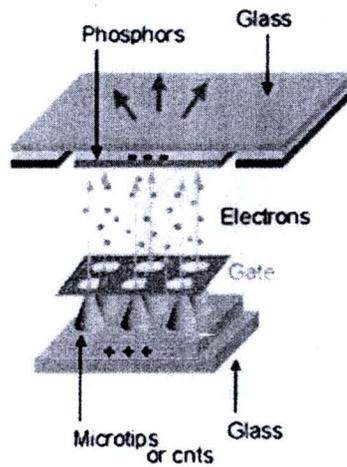
รูปที่ 3.17 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของคาร์บอนนาโนทิวบ์

(ก) ภาพถ่าย SEM ของ CNT ที่อยู่ระหว่างปลายสองด้านของ AFM เพื่อวัดค่าความต้านทานแรงดึง

(ข) ภาพแสดงการยืดหยุ่นที่ดีของ CNT ขณะที่มียัดถูกมาชนด้วยความเร็วค่าหนึ่ง

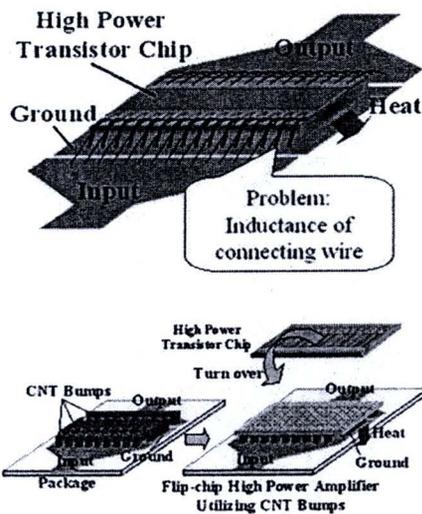
3.5.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

คาร์บอนนาโนทิวบ์มีความสามารถด้านการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง มัดหนึ่งของคาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถนำไฟฟ้าได้ถึง 10^9 A/cm^2 ขณะที่ทองแดงได้สูงสุดเพียง 10^6 A/cm^2 นอกจากนี้แล้ว คุณสมบัติทางไฟฟ้าอีกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจของคาร์บอนนาโนทิวบ์ คือ สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ในสภาวะสุญญากาศได้ เมื่อวางอยู่ในสนามไฟฟ้าที่ใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า เช่นจะกระตุ้น Phosphors ที่วางไว้ห่าง 1 mm จะใช้ศักย์ไฟฟ้าเพียง 1-3 V ขณะที่ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 50-100 V สำหรับปลายที่เป็นขั้ว molybdenum ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของ CNTs ในสภาวะสุญญากาศ

3.5.3 คุณสมบัติทางความร้อน

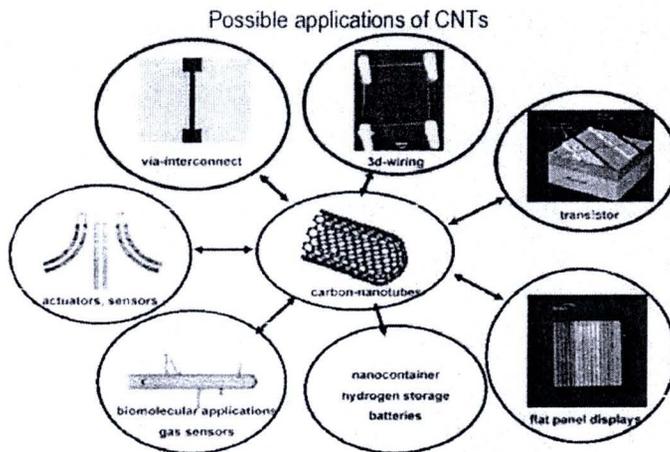


รูปที่ 3.19 ใช้ท่อนาโนคาร์บอนมาเป็นตัวระบายความร้อนให้กับชิพ

ค่าความนำความร้อนของคาร์บอนนาโนทิวบ์สูงถึง 2000 W/mK โดยมีบางรายงานกล่าวว่า คาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าการนำความร้อนได้ถึง 6000 W/mK เมื่อเปรียบเทียบกับเพชรที่มีค่าความนำไฟฟ้าเพียง 3320 W/mK นอกจากนี้ คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังทนต่ออุณหภูมิได้ถึง $2800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ภายใต้สุญญากาศ และ $750 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ในสภาวะปกติ คุณสมบัติเหล่านี้เป็นที่น่าสนใจอย่างมากในเชิงกายภาพ ดังรูปที่ 3.19 เป็นการนำคุณสมบัติการนำความร้อนที่ดีของท่อนาโนคาร์บอนมาเป็นตัวระบายความร้อนให้กับชิปที่ใช้งานกำลังสูง

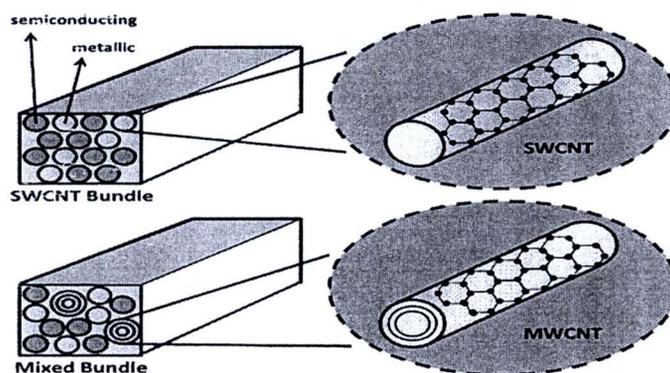
3.6 การประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอน

คุณสมบัติพิเศษของท่อนาโนคาร์บอนดังได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ จึงมีการนำท่อนาโนคาร์บอนมาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ คือ



รูปที่ 3.20 แสดงภาพรวมการนำท่อนาโนคาร์บอนไปประยุกต์ใช้

3.6.1 ตัวเก็บพลังงาน (energy storage)

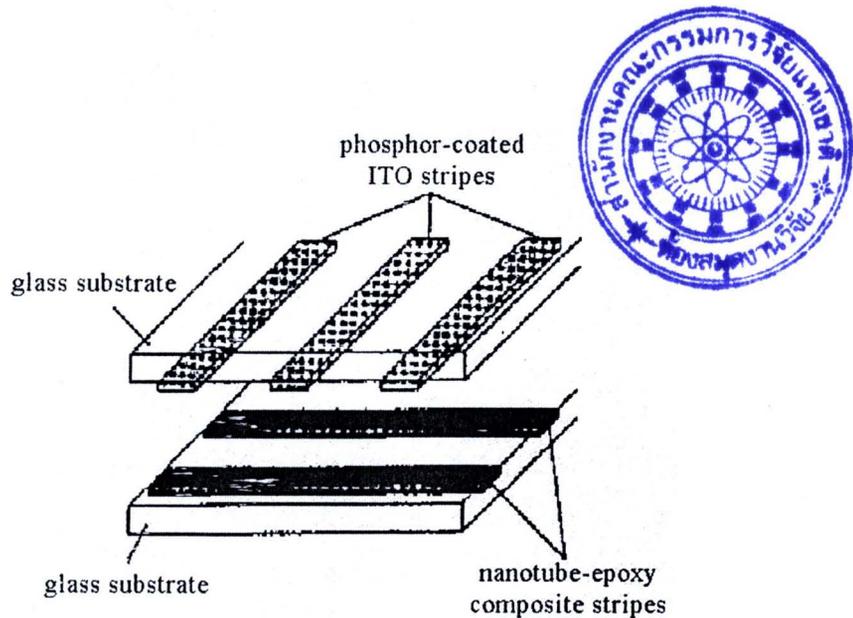


รูปที่ 3.21 แสดงภาพการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาสร้างเป็นตัวเก็บพลังงาน

ขั้วไฟฟ้า (electrode) ที่ทำจาก แกรไฟต์ วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ และเส้นใยคาร์บอน นิยมนำมาใช้ในแบตเตอรี่ เซลล์เชื้อเพลิง (fuel cells) และการประยุกต์ทางขั้วไฟฟ้าเคมี ซึ่งประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้า โดยจาก ideal Nernstian behavior ^[3] พบว่า ท่อนาโนคาร์บอนมีอัตราการถ่ายเทอิเล็กตรอนมากที่สุด ดังนั้นจึงมีการนำท่อนาโนคาร์บอนมาใช้เป็นตัวเก็บพลังงาน เช่น เป็นตัวเก็บไฮโดรเจน (Hydrogen storage) เป็นตัวสอดแทรกของแบตเตอรี่ชนิดประจุลิเทียม (Lithium intercalation) และเป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดขั้วไฟฟ้าเคมี (Electrochemical super capacitors) เป็นต้น

3.6.2 อุปกรณ์ปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชัน (field emission devices)

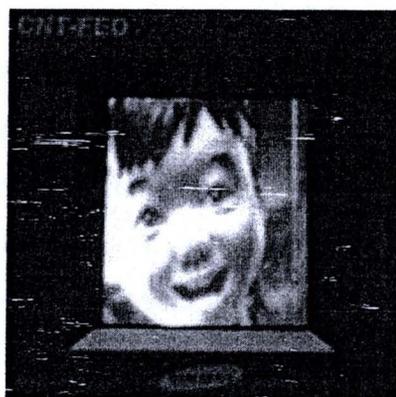
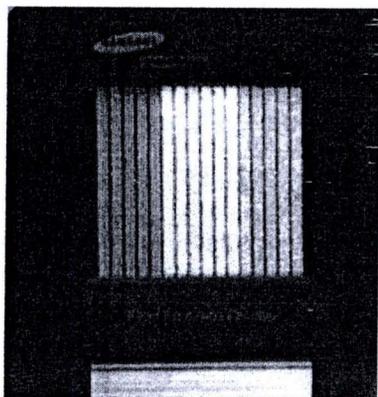
อาศัยหลักการที่ว่าถ้าของแข็งถูกวางไว้ในสนามไฟฟ้าที่สูงมากพอ จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้ระดับเฟอร์มิ (Fermi level) หลุดจากของแข็ง โดยจะทะลุผ่าน (tunneling) กำแพงศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของแข็ง (surface potential barrier) โดยกระแสไฟฟ้าที่แผ่ออกมา (emission current) นั้นขึ้นอยู่กับความแรงของสนามไฟฟ้าที่บริเวณผิวของของแข็งและค่าฟังก์ชันงาน (work function) โดยค่าของฟังก์ชันงานนั้นจะบอกถึงพลังงานที่ใช้ดึงอิเล็กตรอนจากสถานะสูงสุดที่อิเล็กตรอนถูกยึดไว้ (highest bounded state) เข้าไปในระดับสุญญากาศ (vacuum level) โดยความแรงของสนามไฟฟ้าที่ให้ต้องสูงมากพอที่จะดึงอิเล็กตรอนออกมา



รูปที่ 3.22 แสดงต้นแบบเครื่องให้อิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชันที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนในจอแสดงผลภาพแบบแบนของ Northwestern University

ท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกนำมาใช้งานในด้านนี้ เนื่องจากมีรูปร่างที่สามารถขยายออกได้ (Elongated shape) จึงทำให้สนามไฟฟ้าที่ได้มีค่ามากขึ้นไปด้วย (large field amplification) อีกทั้งยังสามารถนำไฟฟ้าได้ดี ขนาดเล็ก พลังงานที่แผ่ออกมาจึงมีค่าน้อย และสารอื่นๆ ทำปฏิกิริยาด้วยได้ยาก แต่ปัญหาของการใช้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นอุปกรณ์ปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชันก็ยังคงมีอยู่ โดยจะขึ้นอยู่กับเสถียรภาพของการนำไฟฟ้าและการปลดปล่อยอิเล็กตรอน (conductivity and emission stability)

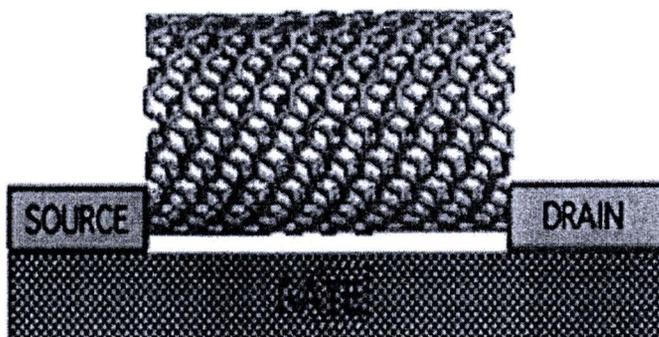
ตัวอย่างการใช้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นอุปกรณ์ปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชันเช่น จอแสดงผลแบบแบน (flat panel displays) ท่อสำหรับการดิสชาร์จก๊าซ (gas-discharge tubes) ในเครื่องฉายโทรคมนาคม ปืนยิงอิเล็กตรอน (electron guns) ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน หัววัดในกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM) และเครื่องขยายไมโครเวฟ (microwave amplifiers) เป็นต้น



รูปที่ 3.23 (ก) แสดงต้นแบบเครื่องให้อิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชันที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนของบริษัท Samsung ขนาด 4.5 นิ้ว และ (ข) 5 นิ้ว

3.6.3 ทรานซิสเตอร์ (transistors)

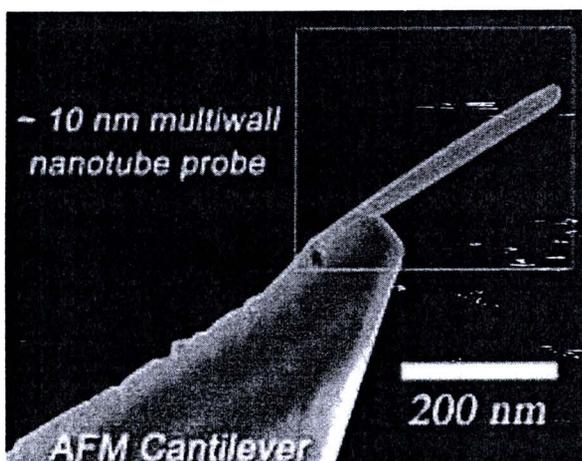
ทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนาม (field-effect transistor; FET) คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์สามขา สามารถสร้างขึ้นจากท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำเพียงหนึ่งเส้นมาวางบนขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว โดยเมื่อใส่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าไปยังขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นเกต (Gate electrode) จะทำให้ท่อนาโนคาร์บอนถูกสวิตช์จากสถานะที่นำไฟฟ้า (Conducting state) ไปยังสถานะที่ไม่นำไฟฟ้า (insulating state) ได้ โดยสามารถนำทรานซิสเตอร์ดังกล่าวมาใช้งานพร้อมๆ กันได้ โดยจะทำหน้าที่คล้ายกับสวิตช์ลอจิก (logical switch) ในคอมพิวเตอร์นั่นเอง



รูปที่ 3.24 แสดงแผนภาพอย่างง่ายของการประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวในทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนาม

3.6.4 โพรบวัดนาโนและนาโนเซนเซอร์ (Nanoprobes and Nanosensors)

โพรบวัดของกล้องจุลทรรศน์แบบเข็มกวาด (Scanning Probe Microscopes, SPMs) เช่น กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM) และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดทันเนลลิง (scanning tunneling microscopy, STM) ต้องการโพรบวัดที่มีขนาดเล็ก มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นสูง ทำให้มีการนำเอาท่อนาโนคาร์บอนมาใช้เป็นโพรบวัด ทั้งนี้เพราะท่อนาโนคาร์บอนมีค่าโมดูลัสของของยังและความยืดหยุ่นสูง ทำให้มีข้อได้เปรียบกว่าโพรบวัดที่ทำจากซิลิคอนซิลิคอนไนไตรด์ และโลหะชนิดอื่นๆ ในแง่ของควมมีเสถียรภาพและความคงทน เนื่องจากไม่ได้รับกระเทือนอย่างรุนแรงจากพื้นผิว และที่สำคัญท่อนาโนคาร์บอนยังมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงมาถึง 1.2 นาโนเมตร จึงเป็นการลดปัญหาในเรื่องขีดจำกัดมุมโคจรและรัศมีความโค้งของปลายโพรบวัด เช่น การวัดดีเอ็นเอ เป็นต้น ดังนั้นท่อนาโนคาร์บอนจึงเหมาะสำหรับทำโพรบวัดเพื่อเพิ่มความสามารถแยกแยะ (resolution) ให้กับกล้องจุลทรรศน์ประเภทนี้



รูปที่ 3.25 แสดงโพรบวัดท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของ NASA Ames Research Center

3.6.5 เป้าขนาดนาโน (Nanotemplates)

เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมีช่องว่างภายในท่อที่เล็กมากและมีแรงในการดึงดูดภายในท่อสูง (capillary forces) ทำให้สามารถบรรจุก๊าซและของเหลวภายในท่อนาโนคาร์บอนได้ เช่น มีการเติมสารลงไปภายในท่อนาโนคาร์บอนเพื่อสร้างเส้นนาโน (nanowires) ทำให้สามารถศึกษาสมบัติแบบเปียก (wetting characteristic) ของท่อนาโนคาร์บอนได้ โดยการเติมก๊าซหรือของเหลวลงในท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวนั้นจะมีความยากมากกว่าท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น เพราะว่ามีขนาดที่เล็กกว่านั่นเอง แต่ปัญหาที่พบโดยทั่วไป คือ ท่อนาโนคาร์บอนส่วนใหญ่จะเป็นแบบปลายปิด จึงต้องทำการเปิดปลายท่อนำไปใช้ ซึ่งสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีอย่างง่าย ๆ เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) ซึ่งสร้างแหดห้าเหลี่ยม (pentagons) ที่อยู่บริเวณยอดปลายปิดของท่อ จะเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าบริเวณด้านข้าง ดังนั้นตรงส่วนที่เป็นบริเวณยอดของท่อจะถูกเอาออกไป ในขณะที่ด้านข้างของท่อยังคงอยู่

3.6.6 วัสดุผสม (composite materials)

ท่อนาโนคาร์บอนมีความแข็ง (stiffness) และมีความยืดหยุ่นสูงมาก ดังนั้นจึงถูกนำไปใช้กับการปรับปรุงโครงสร้างในวัสดุต่างๆ เช่น การเสริมแรง (reinforcements) ในวัสดุผสมที่ต้องการความแข็งแรงสูง ทนทาน และน้ำหนักเบา แต่การทดลองที่บอกว่าการเติมท่อนาโนคาร์บอนในวัสดุผสมดีกว่าการเติมเส้นใยคาร์บอนยังมีไม่มากนัก เนื่องจากปัญหาที่พบในการนำท่อนาโนคาร์บอนไปทำเป็นวัสดุผสมมีหลายอย่าง เช่น ปัญหาของการสร้างรอยต่อ (interface) ระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์ เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนนั้นมีพื้นผิวที่เรียบและมีขนาดที่ใกล้เคียงกับห่วงโซ่ของพอลิเมอร์ (polymer chain) ปัญหาต่อมาคือ การที่ท่อนาโนคาร์บอนส่วนมากมักจะอยู่กันเป็นกลุ่มก้อนทำให้เกิดการเลื่อนไปมาได้ง่าย เนื่องจากการที่ท่อนาโนคาร์บอนมาอยู่ใกล้กันจะมีแรงกระทำต่อกันเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเป็นแรงที่อ่อนมาก ทำให้การรับแรงทำได้น้อยกว่าการอยู่แบบเส้นเดี่ยวจากเหตุผลดังกล่าว ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวมีความแข็งแรงกว่าท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น โดยการแก้การอยู่เป็นกลุ่มของท่อนาโนคาร์บอนสามารถทำได้โดยการทำให้แตกและการทำให้กระจุกกระจาย (disperse) เป็นต้น แต่ข้อดีของการใช้ท่อนาโนคาร์บอนการปรับปรุงโครงสร้างของพอลิเมอร์ในวัสดุผสมนั้น คือ เพิ่มความเหนียว (toughness) ของวัสดุผสม โดยท่อนาโนคาร์บอนจะดูดกลืนพลังงานเอาไว้ขณะมีการยืดหยุ่นเกิดขึ้นขึ้น และจากการที่ท่อนาโนคาร์บอนมีความหนาแน่นน้อย ทำให้เพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าและยังทนทานต่อแรงกดต่างๆ อีกด้วย

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆ เช่น การเติมพอลิเมอร์ที่สามารถตอบสนองต่อแสงได้ (Photoactive polymers) เช่น PPV (poly-p-phenylenevinylene) ด้วยท่อนาโนคาร์บอนพบว่าการเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าอย่างมาก - แต่มีสูญเสียผลของการตอบสนองต่อแสง (photoluminescence) และผลของการตอบสนองทางไฟฟ้า (electro-luminescence) เพียงเล็กน้อยเท่านั้น อีกทั้งวัสดุผสมที่ได้ยังมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย สำหรับวัสดุผสมระหว่างท่อ

นาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์นั้นถูกนำไปใช้ในหลายสาขา เช่น งานด้านชีวเคมี คือใช้เป็นเยื่อเลือกผ่านของโมเลกุลหรือใช้เป็นทีปลูกเซลล์กระดูก (osteointegration) เป็นต้น

ปัจจุบันบริษัท Babolat ของฝรั่งเศสได้นำเร็กเก็ต VS Nanotube Power ออกจำหน่ายเป็นครั้งแรกในปี 2002 โดยทำจากวัสดุผสมระหว่างแกรไฟต์กับท่อนาโนคาร์บอน ทำให้เร็กเก็ตมีความทนทานสูงมาก ในขณะที่น้ำหนักเบาลง การตีลูกมีพลังเพิ่มมากขึ้น และลดอาการเกร็งของกล้ามเนื้อของนักเทนนิสได้เป็นอย่างดี



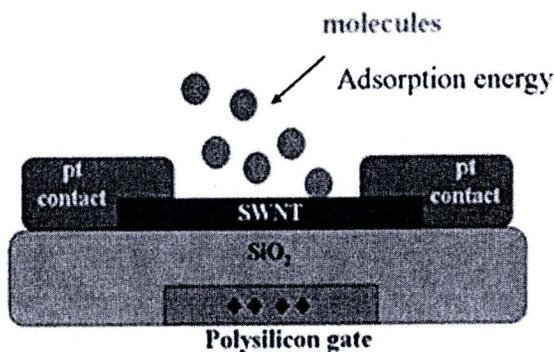
รูปที่ 3.26 เร็กเก็ต VS Nanotube Power ของ Babolat

ในอนาคตท่อนาโนคาร์บอนจะเข้ามามีบทบาทเพิ่มขึ้น ในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องมือในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ วัสดุผสม เซนเซอร์ ยานพาหนะ ตลอดจนถึงยานขนส่งอวกาศ ซึ่งจะประกอบไปด้วยวัสดุ อุปกรณ์ ที่มีเทคโนโลยีขั้นสูงบรรจุอยู่ ทำให้สามารถอำนวยความสะดวกและตอบสนองความต้องการของมนุษย์ได้มากขึ้น

3.6.7 งานทางด้านเซนเซอร์ (Sensors)

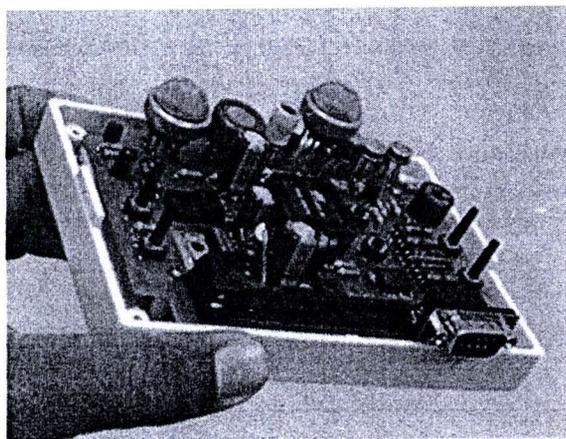
การที่คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถทำให้อยู่ในรูปของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) โดยที่สารกึ่งตัวนำนี้สามารถตอบสนองต่อสารพวกอัลคาไลน์ ฮาโลเจนและแก๊สต่างๆ ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นสารกึ่งตัวนำ Semiconducting Carbon Nanotube จะสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงความต้านทานได้ดีขึ้นอย่างมาก ทำให้เซนเซอร์ที่ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ นี้มีความไวมากขึ้น ซึ่งก็มีการพัฒนาเป็นเซนเซอร์ตรวจวัด Cytochrome C, Methane, Krypton และ โมเลกุลของ Alkyl amine แบบสารกึ่งตัวนำ เป็นต้น แต่การประยุกต์ใช้ Semiconducting Carbon Nanotube เป็นเซนเซอร์แบบนี้มีปัญหา คือ

ไม่สามารถแยกชนิดของแก๊สที่ความเข้มข้นต่ำได้และยังไวต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะแวดล้อม ได้แก่ ความชื้น อุณหภูมิและความเร็วแก๊สที่ไหลผ่าน ทำให้ขาดความสามารถเชิงจำเพาะหรือคัดเลือก เฉพาะที่เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของเซนเซอร์



รูปที่ 3.27 แสดงการประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นเซนเซอร์เคมี

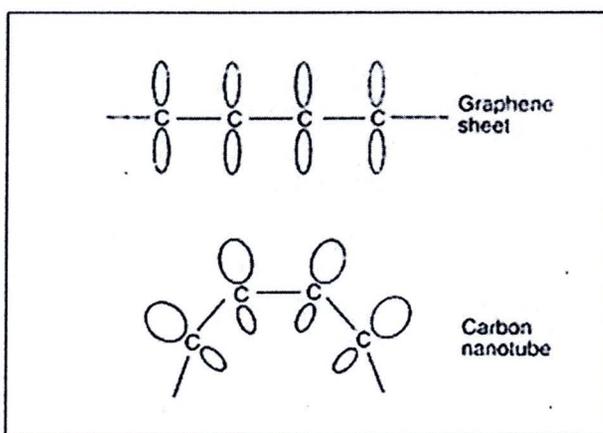
คาร์บอนนาโนทิวบ์ในรูปของเซนเซอร์ส่วนมากจะอยู่ในรูปของงานวิจัยขั้นนี้มุ่งเน้นที่จะใช้ประโยชน์จากนาโนเทคโนโลยี ในการสร้างเซนเซอร์ตรวจวัดก๊าซขนาดเล็กที่มีความไวในการรับรู้สูง ท่อคาร์บอนขนาดนาโนจะถูกสังเคราะห์ขึ้นในรูปแบบต่างๆ ด้วยกระบวนการทางเคมี โดยท่อคาร์บอนขนาดนาโนที่ได้มานั้นจะถูกนำไปใช้ร่วมกับสารประกอบอื่นๆ เช่น ฟิล์มบางโลหะ, โพลีเมอร์ ฯลฯ ในการสร้างเซนเซอร์ตรวจวัดก๊าซ เซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นได้รับการวิเคราะห์คุณสมบัติการรับรู้กับก๊าซต่างๆ หลายชนิด เช่น ก๊าซมีเทน (methane) แอลกอฮอล์ (alcohol) เป็นต้น คุณสมบัติเด่นของเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้น คือ มีความไวในการรับรู้สูง และมีอุณหภูมิในการทำงานต่ำ ทำให้สามารถประยุกต์ใช้ในงานตรวจวัดก๊าซได้หลากหลายรูปแบบ อีกทั้งมีต้นทุนต่ำเมื่อมีการนำไปผลิตเชิงพาณิชย์



รูปที่ 3.28 หัววัดแก๊สที่สร้างจากคาร์บอนนาโนทิวบ์และวงจรการใช้งาน

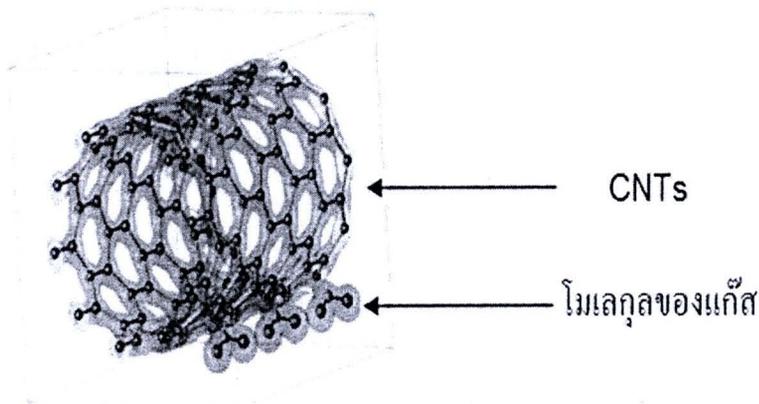
3.7 หลักการพื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวบ์สำหรับเซนเซอร์

ไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry) เกิดจากการถ่ายประจุจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง เซลล์ไฟฟ้าเคมีอันหนึ่งจึงต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้วจึงเกิดเป็นวงจรปิดได้ ประจุที่ถ่ายเทในขั้วตัวอย่างอาจเป็นทั้งอิเล็กตรอนหรือโฮลหรือทั้งสองอย่าง แผ่นกราฟีนที่ประกอบกันเป็นผนังท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีลักษณะโค้ง อิเล็กตรอนจึงสามารถเปลี่ยนรูป จากที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่รอบๆ C-C backbone เป็นการกระจายตัวอย่างไม่สมดุลทั้งด้านในท่อและนอกท่อ คาร์บอนนาโนทิวบ์ทรงกระบอก (cylindrical sheet) ดังแสดงในรูปที่ 3.27



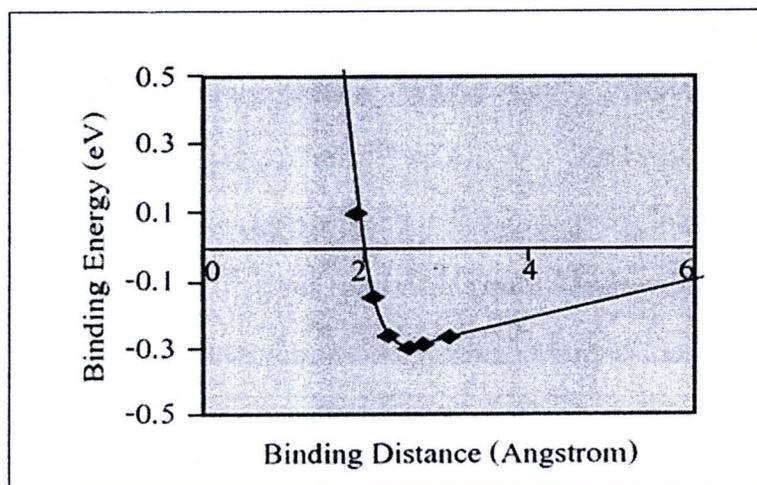
รูปที่ 3.29 แสดงการกระจายของอิเล็กตรอนบนระนาบแผ่นกราฟีนที่ผนังท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์

เนื่องจากอิเล็กตรอนมีการผิดรูปด้านนอกท่อ จึงมีเฉพาะ π - Electron ส่งผลให้เกิดไฟฟ้าเคมี คาร์บอนนาโนทิวบ์ขึ้นกับโมเลกุลของแก๊ส CO_2 , NO_2 , NH_3 , O_2 , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ เป็นต้น โดยมีโมเลกุลของการยึดเกาะโมเลกุลของแก๊สกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.30 แสดงโมเดลการยึดเกาะโมเลกุลของแก๊สจำนวน 3 โมเลกุล กับ SWCNT

หลังการยึดเกาะ (Binding Energy) ของโมเลกุลแก๊สกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว จะเป็นฟังก์ชันกับระยะทางจากโมเลกุลของแก๊สถึงคาร์บอนนาโนทิวบ์ซึ่งจากการคำนวณกับโมเลกุลแก๊สของ NO_2 ที่มีโครงสร้างการยึดเหนี่ยวกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว ตามโมเดลรูปที่ 3.30 จะมี adsorption Energy ประมาณ 0.3 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.31 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานการยึดเหนี่ยวกับระยะทางการยึดเหนี่ยวของ NO_2 กับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว

จากกราฟพบว่าโมเลกุลของแก๊สที่กล่าวข้างต้นมีการแพร่ที่สูงบนพื้นผิวคาร์บอนนาโนทิวบ์ จากการวิเคราะห์ด้วยความหนาแน่นอิเล็กตรอนแสดงให้เห็นว่า ประจุอิเล็กตรอนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจากอะตอมคาร์บอนกับโมเลกุลของแก๊ส จะถูกจ่ายหรือดึงจากคาร์บอนนาโนทิวบ์ ทำให้มีประจุพาหะ (Carrier) มากขึ้นหรือลดลง ทำให้การนำไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวและชนิดหลายผนัง เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามลำดับ ปฏิริยาไฟฟ้าเคมีทั่วไปเขียนได้ดังนี้

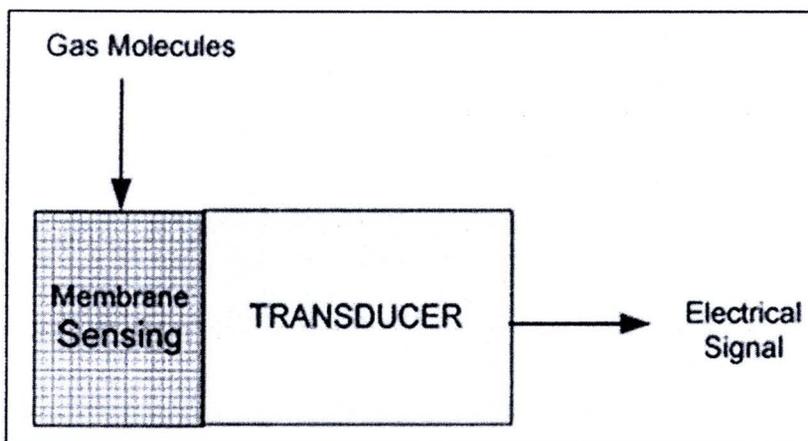


เมื่อ δ คือ ตัวเลขแสดงจำนวนประจุที่ถูกจ่ายระหว่างเกิดปฏิริยา

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ขึ้นอยู่กับโครงสร้างอะตอมและกลไกการผิดรูป (Mechanical deformation) คุณสมบัติทั้งสองทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์เหมาะที่จะนำมาเป็นเซนเซอร์แก๊ส

3.8 แก๊สเซนเซอร์ (Gas sensor)

หลายประเทศได้พยายามหาวิธีการต่างๆ เพื่อจัดการกับปัญหามลพิษทางอากาศ อาทิ สนับสนุนการใช้เทคโนโลยีสะอาด บางประเทศหันไปใช้พลังงานทดแทนอย่างพลังงานนิวเคลียร์เพราะเป็นพลังงานที่สะอาดและมีความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐกิจ ขณะเดียวกันก็มีแผนการติดตามคุณภาพอากาศอยู่เป็นระยะๆ และรายงานคุณภาพอากาศจากสถานีตรวจวัดที่ติดตั้งกระจายตามพื้นที่ต่างๆ และสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศแบบเคลื่อนที่ (Mobile unit) แต่ในสถานการณ์ปัจจุบันราคาค่าใช้จ่ายของสถานีเคลื่อนที่นี้สูงขึ้น และการใช้เครื่อง Gas Chromatography Infrared Spectroscopy ค่อนข้างจะยุ่งยาก เพราะเครื่องมีขนาดใหญ่และต้องมีผู้เชี่ยวชาญในการใช้งาน จึงมีการคิดค้นและพัฒนาหัวตรวจวัดที่มีขนาดเล็กสะดวกในการพกพาใช้พลังงานต่ำ ราคาถูก และติดตั้งในบริเวณที่ต้องการได้สะดวก เรียกว่า หัวตรวจวัดแก๊ส หรือแก๊สเซนเซอร์ (Gas Sensor)



รูปที่ 3.32 อุปกรณ์แก๊สเซนเซอร์จำพวกทรานสดิวเซอร์

แก๊สเซนเซอร์เป็นอุปกรณ์จำพวกทรานสดิวเซอร์ชนิดหนึ่ง ใช้สำหรับตรวจจับแก๊สพิษ และการตรวจจับแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ในยานยนต์ โรงงานอุตสาหกรรม บ้านเรือน ตลอดจนพื้นที่ต่างๆ แล้วทำการแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าตามคุณสมบัติที่ต้องการตรวจสอบ ซึ่งแก๊สเซนเซอร์ก็ทำงานเช่นเดียวกันคือ ทำหน้าที่ตรวจจับหรือทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแก๊สที่ต้องการวัด แล้วเปลี่ยนแปลงปริมาณของแก๊สที่ตรวจจับได้เป็นสัญญาณไฟฟ้า

3.8.1 คุณสมบัติทั่วไปของแก๊สเซ็นเซอร์

1. ความไวในการตอบสนอง หมายถึงความไวในการตอบสนองอย่างรวดเร็วในทันทีทันใดเมื่อแก๊สที่ทำการวัดมาสัมผัสกับเซ็นเซอร์ ยิ่งถ้าแก๊สที่ทำการวัดนั้นเป็นแก๊สพิษเซ็นเซอร์ที่ดีควรจะทำงานได้อย่างรวดเร็วในการตอบสนอง
2. ความไวในการวัด หมายถึงความแตกต่างของปริมาณแก๊ส คุณสมบัติข้อนี้จะสำคัญเฉพาะกรณีแก๊สที่เราวัดมีปริมาณน้อยๆ หรือต้องการความถูกต้องในการวัดสูงเท่านั้น
3. ความจำเพาะ หมายถึงสามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างแก๊สที่ต้องการวัดกับแก๊สที่ไม่ต้องการวัด เช่น เซ็นเซอร์สำหรับวัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ จะจำเพาะเฉพาะแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เท่านั้น
4. ความเสถียร หมายถึงผลในการวัดแก๊สคงที่ไม่เสื่อมสภาพเร็ว เพื่อให้เซ็นเซอร์สามารถใช้อย่างต่อเนื่อง
5. พิสัยการวัด หมายถึงช่วงกว้างของการวัดของเซ็นเซอร์บางตัวสามารถวัดแก๊สปริมาณตั้งแต่ 100 -1,000 ppm (part per millions: ppm)

3.8.2 แก๊สที่มีความสำคัญต่อมนุษย์

ก่อนจะทำการวัดหรือตรวจจับแก๊ส ต้องมีความเข้าใจคุณสมบัติและความสำคัญของแก๊สที่จะตรวจวัดก่อน ต่อไปจะเป็นตัวอย่างแก๊สที่มีความสำคัญ ซึ่งมีผลต่อมนุษย์

3.8.2.1 แก๊สตระกูลคาร์บอน (Carbon Species)

คาร์บอน มีอยู่ด้วยกัน 2 รูปที่เป็นแก๊สออกไซด์ซึ่งมีความเสถียรคือ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

1. คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide) คาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นแก๊สที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส นอกจากนั้นมันยังมีพิษอีกด้วย เพราะว่ามันจะเข้าไปแทนที่ออกซิเจนในฮีโมโกลบิน (Hb) ในเส้นเลือดของมนุษย์ คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นผลมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนเป็นฐานประมาณ 80% ของ CO ในบรรยากาศมาจากรถยนต์ ส่วนการใช้ในงานอุตสาหกรรม เช่น การใช้ออกซิเจนในการถลุงเหล็กจากแร่ เป็นต้น

2. คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide) คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สที่ไม่มีสี ไม่ช่วยให้ติดไฟ CO₂ เป็นแก๊สเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 78°C และที่ความดัน 1 atm CO₂ จะเป็นของแข็ง

มากกว่าจะเป็นของเหลว CO_2 เป็นผลมาจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของถ่านหิน น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ หรือเชื้อเพลิงที่มีฐานของคาร์บอน CO_2 เป็นแก๊สที่ช่วยในการดำรงชีพของมนุษย์ ใช้ในอุตสาหกรรม การผลิตเครื่องดื่มและในเครื่องดับเพลิง ขณะที่สารอาหารในร่างกายมนุษย์ไม่ทำงานผลผลิตของ CO_2 บางส่วนจะช่วยให้ความเป็นกรดของเลือดเหมาะสม ความผิดพลาดหนึ่งของกลไกการหายใจของมนุษย์คือ การสะอึก วิธีการรักษาคือ ให้หายใจเข้าออกถูกระดาดเพื่อสร้างระดับ CO_2 เข้าไปในปอด CO_2 จะเข้าไปเป็นตัวกระตุ้นให้หยุดการสะอึก แต่หากมีระดับของ CO_2 ในร่างกายสูงเกินไปก็ไม่มีประโยชน์ โดยหากหายใจ CO_2 ในอากาศที่เกินกว่า 10% อาจทำให้คนหมดสติ และหากรับ CO_2 ที่ระดับสูงต่อเนื่องไปอีก อาจทำให้การหายใจล้มเหลวและตายในที่สุด

3.8.2.2 มีเทน (Methane)

เป็นรูปแบบหนึ่งของสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนไฮโดรเจน (ไฮโดรคาร์บอน) เป็นส่วนประกอบ มีสูตรทางเคมีเป็น CH_4 เกิดจากธรรมชาติจากการเน่าเปื่อยทับถมในหนองบึง หรือการสลายตัวของ โปรตีน มีเทนเป็นแก๊สไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษ แต่ติดไฟได้และให้คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ ใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เช่นเดียวกับ อีเทน โพรเพน และบิวเทน

3.8.4.3 เบนซีน (Benzene)

มีสูตรเคมี C_6H_6 เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีกลิ่นและติดไฟง่าย เป็นพวงริงคอมปาวด์ ใช้ละลาย น้ำมันและสารอินทรีย์ต่างๆ และใช้สังเคราะห์สารเคมีมากมายหลายชนิด

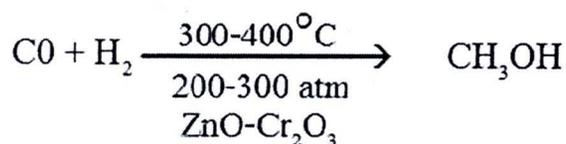
3.8.4.4 ไฮโดรเจน (Hydrogen)

ส่วนประกอบที่เห็นส่วนใหญ่ของไฮโดรเจนคือ น้ำ พบอยู่ในน้ำมัน แก๊สธรรมชาติ ในอนาคต จะถูกนำมาใช้ทำเป็นเซลล์เชื้อเพลิง ไฮโดรเจนมีอยู่ที่อุณหภูมิต่ำแต่สามารถจะเปลี่ยนไปเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำและความดันสูง ปฏิกริยาระหว่างออกซิเจนและไฮโดรเจนสามารถนำมาทำเป็นเซลล์เชื้อเพลิงได้ ไฮโดรเจนนั้นสามารถถูกติดไฟได้ง่ายและได้รับความเชื่อใจให้ถูกเลือกเป็นเชื้อเพลิง ในอนาคตสำหรับรถยนต์และอากาศยาน ปฏิกริยาของมันจะทำให้ผลิตน้ำออกมา เป็นผลให้ไม่เกิดมลภาวะ ไฮโดรเจนมีสูตรเคมีคือ H_2

3.8.4.5 แอลกอฮอล์ต่างๆ

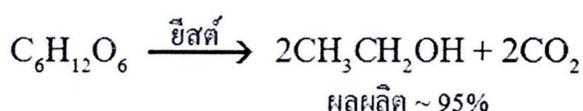
1. เมทานอล หรือเมทิลแอลกอฮอล์มีสูตรเคมีคือ CH_3OH ได้จากการสลายตัวของไม้ โดยให้ความร้อนกับไม้ที่อุณหภูมิสูงและปราศจากอากาศ จากการเตรียมเมทิลแอลกอฮอล์ดังกล่าวให้เรียก

อีกชื่อหนึ่งว่า “Wood alcohol” ในปัจจุบันเมทิลแอลกอฮอล์ผลิตได้จากกระบวนการไฮโดรจีเนชันของคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้คะตะลิสต์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิและความดันสูง



เมทิลแอลกอฮอล์เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีพิษอย่างรุนแรง (highly toxic) การบริโภคเมทิลแอลกอฮอล์จำนวนมากทำให้ตายได้ ถ้าร่างกายได้รับในปริมาณที่ไม่มากพอก็อาจทำให้ตาบอดได้ พิษของเมทิลแอลกอฮอล์จะได้รับจากการสูดดมไอระเหยหรือได้รับการสัมผัสกับผิวหนัง ดังนั้นการใช้เมทิลแอลกอฮอล์จึงต้องระมัดระวังอย่าง

2. เอทานอล หรือเอทิลแอลกอฮอล์ มีสูตรเคมี $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ เป็นของเหลวที่ไม่มีสี ไม่ติดไฟ ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย เอทิลแอลกอฮอล์ผลิตได้จากการหมักแป้งและน้ำตาล เอทิลแอลกอฮอล์เป็นแอลกอฮอล์ชนิดเดียวที่ใช้ผสมในเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ เช่น สุรา ไวน์ เบียร์ สาเก สาโท และกระแช่ การสังเคราะห์เอทิลแอลกอฮอล์จากไวน์โดยกระบวนการหมักผลองุ่น เป็นวิธีการสังเคราะห์เอทิลแอลกอฮอล์วิธีแรกที่มนุษย์ทราบในการสังเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ น้ำตาลที่ได้จากแหล่งต่างๆ สามารถใช้ในการผลิตแอลกอฮอล์สำหรับใช้เป็นเครื่องดื่ม กระบวนการหมักเกิดขึ้นโดยยีสต์ เอ็นไซม์จะเป็นตัวการที่สำคัญทำให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเอทิลแอลกอฮอล์



กระบวนการหมักจะไม่สามารถผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ที่มีปริมาณแอลกอฮอล์มากกว่า 12 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ เพราะว่ายีสต์จะตายก่อนที่ความเข้มข้นของแอลกอฮอล์จะสูงถึงค่าดังกล่าว ดังนั้นการที่จะผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นของเอทิลแอลกอฮอล์สูงจะต้องใช้กระบวนการกลั่น เช่น บรันตี วิสกี้ เอทิลแอลกอฮอล์นอกจากใช้ทำเครื่องดื่มแล้วยังสามารถใช้เป็นตัวทำละลายและเป็นตัวทำปฏิกิริยาในการเตรียมสารอินทรีย์ ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเอทิลแอลกอฮอล์ได้แก่ การเจือจางในหรือเป็นส่วนผสมของยา การทำพลาสติก แลกเกอร์และเครื่องสำอาง นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงรถยนต์ได้อีกด้วย โดยในแก๊สโซลีนจะผสมเอทิลแอลกอฮอล์ประมาณ 10% แอลกอฮอล์ที่บริสุทธิ์ 100 % จะถูกเรียกว่า “แอลกอฮอล์สัมบูรณ์” (absolute alcohol)

3. ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (isopropyl alcohol) มีสูตรเคมีคือ $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$ เป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่ง มีราคาถูก มีคุณสมบัติฆ่าเชื้อโรคได้ (disinfectant) จึงถูกใช้ในการทำความสะอาด บางครั้งอาจเรียกว่า แอลกอฮอล์เช็ดทำความสะอาด (rubbing alcohol) ก็ได้สามารถพบไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ในน้ำยาทำความสะอาด น้ำยาฆ่าเชื้อ สูตรต่างๆ ทั้งที่ใช้ในโรงพยาบาล ตามบ้าน และตามโรงงานต่างๆ โดยมักจะใช้ที่ความเข้มข้นประมาณ 70 % นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวทำละลาย (solvent) ในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ อีกด้วย พิษของแอลกอฮอล์ชนิดนี้จะทำให้เกิดอาการเมาได้เหมือนพิษของเอทิลแอลกอฮอล์ สามารถกดสมองและกดการหายใจได้อย่างรุนแรง แต่มักไม่ก่อภาวะเลือดเป็นกรดอย่างรุนแรง (high gap metabolic acidosis) แบบเมทิลแอลกอฮอล์

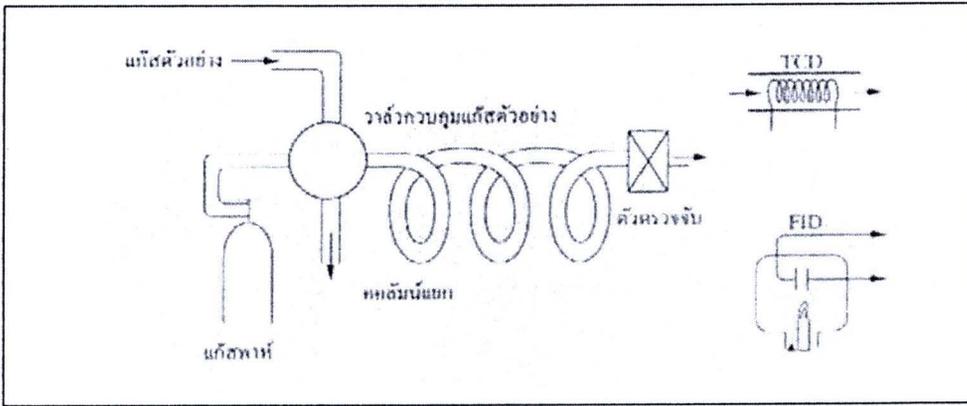
4. Phenylethane มีจุดหลอมเหลว ที่ -95°C มีจุดเดือด ณ 136.2°C เป็นของเหลวที่ใส ไม่มีสี สามารถละลายได้ ด้วย ethanol, benzene, diethyl ether เป็นส่วนผสมใช้ในการผลิต styrene ผลิตภัณฑ์ใช้ในกระบวนการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม และในอุตสาหกรรม ปิโตรเคมี และเอทิลเบนซิน มีโอกาสถูกปลดปล่อยออกมาในกระบวนการเผาไหม้ เช่น จากควันท่อไอเสีย รถยนต์ และควันบุหรี่ (Keith and Walker, 1995; เกรียงศักดิ์, 2546)

3.9 หลักการวัดแก๊สในกระบวนการแบบโครมาโตกราฟี (Process Gas Chromatography: PGC)

หลักการวัดแก๊สแบบนี้ใช้หลักการโครมาโตกราฟีที่แสดงได้ดังรูปที่ 3.43 ส่วนประกอบของแก๊สต่างๆ สามารถแสดงได้โดยโครมาโตแกรม ดังรูป 3.43 เมื่อแก๊สต่างๆ ถูกฉีกเข้าไป ด้านในแก๊สพาห์ ก็จะถูกพาเข้าสู่คอลัมน์เพื่อแยกแก๊ส หลังจากนั้นก็จะใช้ TCD หรือ FID หรือตัวตรวจจับอื่นๆ เพื่อตรวจจับแก๊สต่างๆ ตามแต่ลักษณะงาน

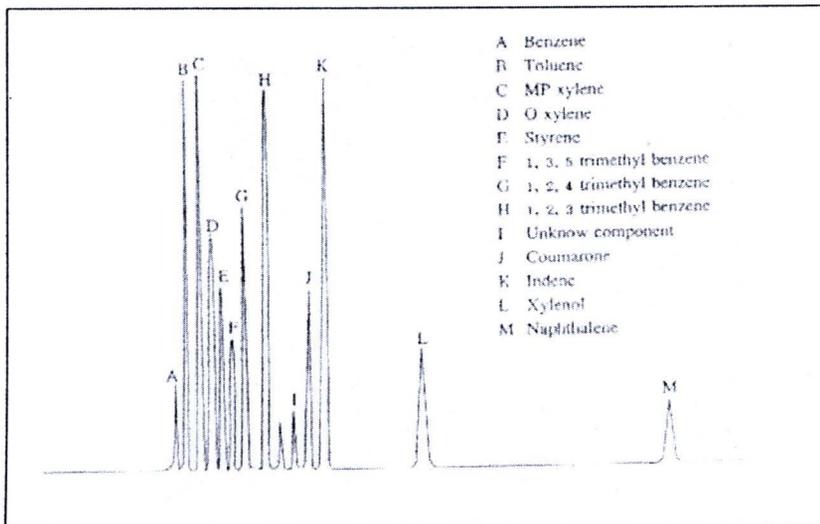
ข้อควรจำในการวัดแก๊สด้วยวิธีนี้คือ

1. หลักการวัดแบบ TCD จะใช้ในการวัดแก๊สที่เป็นอนินทรีย์ ส่วนหลักการ FID จะใช้สำหรับวัดไฮโดรคาร์บอน
2. การเลือกคอลัมน์แยกแก๊สต้องใช้เทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูง ๆ
3. ต้องรักษาอุณหภูมิของคอลัมน์ให้คงที่อย่างมาก



รูปที่ 3.33 การวัดแก๊สในกระบวนการแบบโครมาโตกราฟ

จากหลักการที่ผ่านมามีทั้งหมด จะเห็นว่าในการจะวัดแก๊สหรือตัวแปรใดๆ ต้องศึกษาคุณสมบัติที่เป็นไปได้ทางเคมีและฟิสิกส์ของมัน เพื่อให้สามารถนำหลักการดังกล่าวมาดัดแปลงให้เป็นตัวแปรทางไฟฟ้า ยังมีเซนเซอร์หลายประเภทที่ยังไม่ได้พัฒนาไปมากมาย เช่นการเซนเซอร์รสชาติอาหาร กลิ่นและรส หรือการค้นหาวัดที่จะนำมาใช้เป็นเซนเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงซึ่งนับเป็นสิ่งสำคัญ เพราะประเทศไทยมีอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นจำนวนมาก จึงน่าจะมีความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์ หรือวิศวกรรม หรือองค์กรใดๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งมีศักยภาพ ได้ประดิษฐ์หรือพัฒนาในส่วนดังกล่าวเพื่อจะให้ออกให้เกิดผลประโยชน์ต่อไป



รูปที่ 3.34 การแยกส่วนประกอบของแก๊สในกระบวนการโครมาโตแกรม