บทที่ 3
เครื่องมือวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

ในบทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับเครื่องมือที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งหลังจากที่ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ขึ้นมาแล้ว ต้องนำไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือต่างๆ เพื่อหาว่าคุณสมบัติ ขนาด และความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นมาได้เป็นอย่างไรโดยเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์มีอยู่ 3 ชนิดด้วยกันคือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopes; TEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopes; SEM)และ Raman spectroscopy ซึ่งเครื่องมือแต่ละชนิดที่นำมาทำการวิเคราะห์นั้นจะบอกคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป โดยที่เทคนิค SEM จะบอกรูปร่างของชิ้นงานในรูปของภาพสามมิติ สำหรับเทคนิค TEM จะบอกรูปร่างของชิ้นงานในรูปของภาพสองมิติซึ่งสามารถบอกขนาดและชนิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้อย่างแม่นยำ สุดท้ายสำหรับเทคนิค Raman จะบอกพันธะของชิ้นงานที่นำมาวัดโดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้หาความบริสุทธิ์ของชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้และยังสามารถบอกชนิดและขนาดของคาร์บอนนาโนทิวป์อย่างคร่าวๆได้

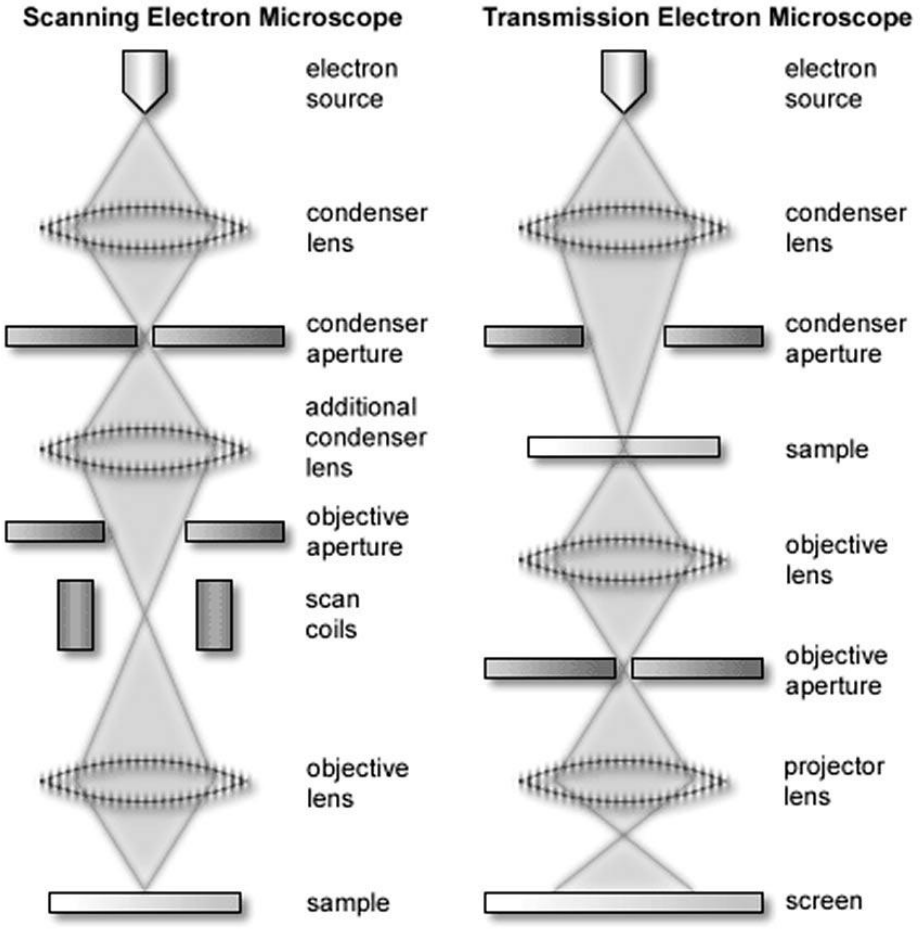
3.1 วิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่สามารถให้กำลังขยาย (Magnification) และแจกแจงรายละเอียด (resolution) ได้เหนือกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาโดยในปัจจุบันกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีกำลังขยายสูงถึง 500,000 เท่า[41] กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะใช้ลำอิเล็กตรอนแทนลำแสงในการสะท้อนวัตถุ เนื่องจากความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนนั้นสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงถึง 100,000 เท่า ทำให้มีประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูง กล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาจะแจกแจงรายละเอียดได้ประมาณ 0.2 ไมโครเมตร ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะมีประสิทธิภาพถึง 0.1 นาโนเมตร[42] โดยลำแสงอิเล็กตรอนที่มีศักย์สูงจากแคโทดที่ถูกให้ความร้อนในสุญญากาศ จะถูกเร่งและผ่านออกมาตามท่อสุญญากาศไปยังระบบคอนเดนเซอร์ (condenser system) ซึ่งประกอบด้วยขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า(electromagnetic coils) 4 ชุด โดยขดลวดแม่เหล็กชุดแรกจะทำให้อิเล็กตรอนผ่านไปยังด้านล่างของตัวอย่าง ส่วนชุดที่สองจะทำหน้าที่เสมือนเลนส์ใกล้วัตถุที่จะรวบรวมอิเล็กตรอนให้ผ่านหรือกระจายอยู่รอบๆตัวอย่าง จากนั้นอิเล็กตรอนจะผ่านไปยังขดลวดสนามแม่เหล็กชุดที่สามที่ทำหน้าที่ในการขยายภาพ โดยภาพเกิดขึ้นจากการที่อิเล็กตรอนผ่านไปยังตัวอย่างและมีการโฟกัสภาพไปยังจอรับภาพ เช่น จอรับภาพเรืองแสง หรือเซนเซอร์ไวแสง และขดลวดสนามแม่เหล็กชุดสุดท้ายจะทำหน้าที่

เสมือนเลนส์ใกล้ตา ซึ่งภาพที่ได้สามารถบันทึกลงบนเพลท แผ่นฟิล์ม หรือทำการแปลงสัญญาณภาพลงสู่จอคอมพิวเตอร์ได้ ซึ่งภาพที่ได้นี้จะเรียกว่า Electron Micrograph (EM)

3.1.1 หลักการทำงาน

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบางซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอิเล็กตรอนผ่านได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนั่นเอง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านเหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ ผนังเซลล์ เป็นต้น ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก



รูปที่ 3.1 แผนภาพการทำงานของ TEM และ SEM[41]

การทำงานของ TEM จะประกอบด้วยระบบที่สำคัญ 4 ระบบคือ

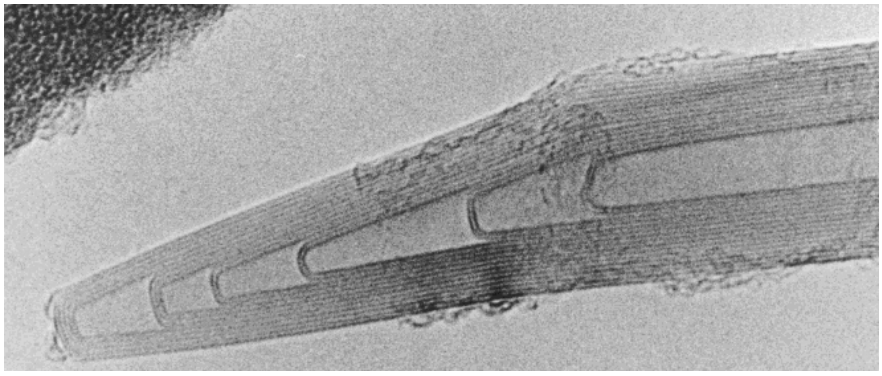
ระบบสุญญากาศ (Vacuum system) ประกอบด้วยเครื่องดูดอากาศ 2 แบบ ได้แก่ เครื่องดูดอากาศแบบ mechanical pump และเครื่องดูดอากาศที่ใช้น้ำมันแบบ diffusion pump หรืออาจเป็นแบบ ion getter pump ซึ่งจะทำงานร่วมกัน โดยเริ่มจากการทำให้ภายในคอลัมน์เป็นสุญญากาศที่มีความดันประมาณ 10-3-10-8 torr และต้องกำจัดโมเลกุลของก๊าซต่างๆ ออกให้หมด เนื่องจากโมเลกุลเหล่านี้จะเกิดการดูดกลืนอิเล็กตรอนและทำให้ลำอิเล็กตรอนเกิดการกระเจิง ประจุอิเล็กตรอนกระจัดกระจายไม่เป็นระเบียบ ส่งผลให้ภาพที่ได้ไม่ค่อยคมชัด นอกจากนี้โมเลกุลของก๊าซอาจเกิดปฏิกิริยาการแผ่รังสี (ionization) ซึ่งจะทำให้ลำอิเล็กตรอนไม่คงที่หรือเคลื่อนออกไปจากทิศทางเดิม โมเลกุลของก๊าซอาจจะไปรวมตัวกับไส้หลอดที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจนเกิดการเผาไหม้และขาดในที่สุด หรืออาจไปจับกับตัวอย่าง ทำให้ตัวอย่างเกิดการปนเปื้อนจนไม่สามารถนำไปศึกษาหรือวิเคราะห์ต่อไปได้

ระบบแสงสว่าง (Illuminating) ประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอนและคอนเดนเซอร์เลนส์ โดยปืนอิเล็กตรอนจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน และคอนเดนเซอร์เลนส์จะทำหน้าที่รวบรวมประจุอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดยใช้สนามแม่เหล็กเพื่อส่องไปยังตัวอย่าง ค่าความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้า ถ้าให้กระแสไฟฟ้าแรงสูงมากขึ้น ค่าความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนจะสั้นลง ทำให้การแจกแจงรายละเอียดดีขึ้น ดังนั้นการปรับเปลี่ยนความยาวโฟกัสจึงทำได้โดยการควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้านั่นเอง ทั้งนี้คอนเดนเซอร์อาจมีได้มากกว่าหนึ่งชุด เพื่อควบคุมให้ลำอิเล็กตรอนมีความเข้มและขนาดเล็กลง ทำให้ภาพที่ได้มีความสว่างมากขึ้น และยังเป็นการป้องกันตัวอย่างไม่ให้ถูกทำลายด้วยความร้อนที่เกิดจากอิเล็กตรอนด้วย

ระบบคอนเดนเซอร์เลนส์นี้จะมีแผ่นโมลิบดินัมอยู่ในช่องว่างซึ่งจะมีรูกลมๆ ขนาดเล็กที่เรียกว่า Aperture เพื่อควบคุมลำอิเล็กตรอนให้เป็นจุดกลมที่สมบูรณ์ รวมทั้งป้องกันการกระจายตัวของอิเล็กตรอนซึ่งจะส่งผลต่อความคมชัดของภาพ สำหรับขนาดของช่อง aperture นี้ ยิ่งมีขนาดเล็กจะยิ่งทำให้การแจกแจงรายละเอียดของภาพดีขึ้น แต่ความคมชัดจะลดลง

ระบบภาพ (Imaging system) ประกอบด้วยเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า 3 ตัว คือ objective lens, intermediate lens และ projector lens เมื่อทำการฉายลำอิเล็กตรอนบนตัวอย่าง ลำอิเล็กตรอนจะผ่านตัวอย่างไปยัง objective lens ที่อยู่ใต้ช่องใส่ตัวอย่างและคอนเดนเซอร์เลนส์ objective lens จะทำหน้าที่ขยายภาพ จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะผ่านไปยัง intermediate lens เพื่อทำการขยายภาพเพิ่มขึ้นอีก จากนั้นผ่านไปยัง projector lens ที่ทำหน้าที่นำภาพที่ขยายไปปรากฏบนจอซึ่งเราสามารถมองเห็นได้จากหน้าต่างสำหรับมองภาพ (viewing window)

ระบบบันทึกภาพ (Photographic system) ประกอบด้วยชัตเตอร์และเครื่องวัดแสง โดยระบบนี้จะอยู่ใต้ Projectors lens ชัตเตอร์จะทำหน้าที่ปิดหรือเปิดให้ลำแสงอิเล็กตรอนไปตกกระทบบนแผ่นรับภาพเรืองแสง



รูปที่ 3.2 ภาพจาก TEM แสดงรูปร่างของ MWNTs

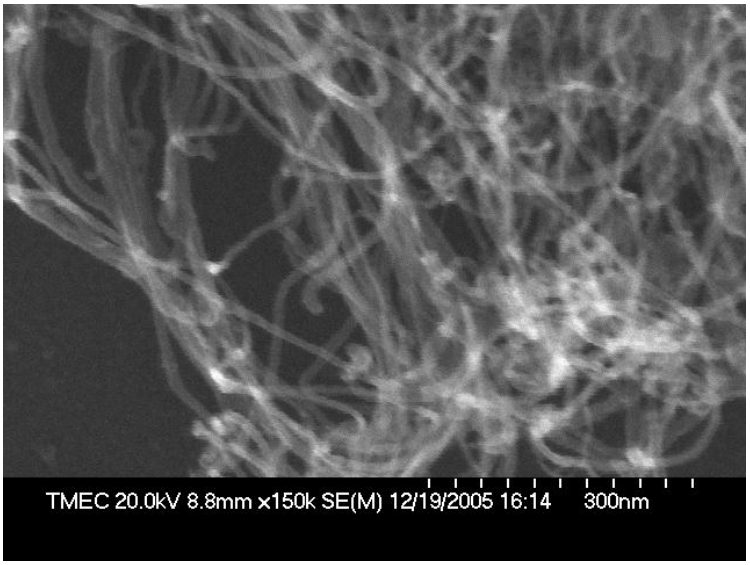
3.2 วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษารายละเอียดของพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น การสร้างภาพทำโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากผิวหน้าของตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้จะเป็นภาพสามมิติ นอกจากนี้ยังอาจดัดแปลงโดยต่อเติมอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อให้มีการแสดงผลในรูปแบบต่างๆ ได้ เช่น การวิเคราะห์ธาตุ การคำนวณหามวลและปริมาตร ซึ่งกล้องจุลทรรศน์แบบนี้เหมาะสำหรับการเรียนการสอนและการวิจัยพื้นฐาน

3.2.1 หลักการทำงาน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) มีระบบการทำงานเหมือนกับแบบส่องผ่าน แต่มีสิ่งที่แตกต่างคือระบบภาพและแสดงผล โดยภาพที่ได้จะถูกส่งสัญญาณเพื่อไปขยายแล้วจึงแปลภาพบนจอ CRT (Cathode Ray Tube) คอลัมน์ของ SEM จะประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอนและคอนเดนเซอร์เลนส์เช่นเดียวกับ TEM ลำอิเล็กตรอนที่ผ่าน objective lens ไปตกลงบนตัวอย่างนั้นสามารถที่จะบังคับทิศทางการเคลื่อนที่ไปบนผิวตัวอย่างได้ด้วย และมี scanning generator อยู่ระหว่างคอนเดนเซอร์เลนส์ตัวสุดท้ายกับ objective lens ลำอิเล็กตรอนนี้เป็น Primary electron โดยจะถูกโฟกัสลงบนตัวอย่างทำให้เกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่นกับอะตอมของตัวอย่างส่งผลให้เกิดอิเล็กตรอนชุดที่สองที่เรียกว่า Secondary electron และถูกรวบรวมโดย

electron collector ซึ่งจะถูกนำไปขยายและแปลสัญญาณให้เกิดเป็นภาพบนจอ CRT ซึ่งสามารถดูได้ด้วยตาเปล่าหรือบันทึกไว้บนฟิล์ม ความสว่างของภาพขึ้นอยู่กับพื้นผิวของตัวอย่าง ถ้าพื้นผิวของตัวอย่างมีความราบเรียบภาพที่ได้จะสว่างน้อยกว่าพื้นผิวที่นูนขึ้น นอกจากนี้ ที่ Objective lens จะมีช่อง Aperture เช่นกันเพื่อช่วยเพิ่มความลึกของภาพ SEM นี้อาจติดตั้งและต่อเติมอุปกรณ์พิเศษเพื่อตรวจสอบตัวอย่างได้หลายรูปแบบ เช่น Backscattered electron detector อิเล็กตรอนที่เกิดการสะท้อนกลับหมดนี้จะช่วยในการบอกรายละเอียดของรูปร่างและ
องค์ประกอบของตัวอย่างในส่วนที่ลึกเกินกว่าที่ Secondary electron ทำการตรวจสอบได้ หรือทำการติดตั้งระบบ EDS เพื่อหาปริมาณและคุณภาพของโมเลกุลของธาตุ หรือติดตั้ง Transmitted electron detector เพื่อศึกษาลักษณะภายในของตัวอย่างที่ทำให้บาง เป็นต้น[41]



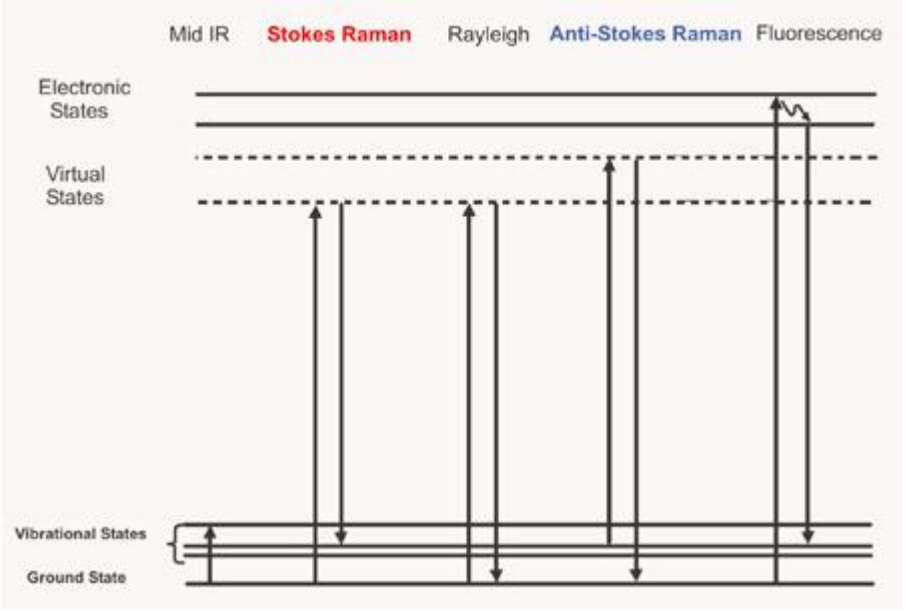
รูปที่ 3.3 ภาพ SEM แสดงคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้

3.3 วิเคราะห์ด้วยรามานสเปคโตรสโคปี

รามานสเปคโตรสโคปี(Raman spectroscopy) เป็นเครื่องมือที่ใช้หาโครงสร้างของวัสดุสสารจากการวัดสเปคตรัมที่เลื่อนไปของ Raman shift และตำแหน่งของสเปคตรัม ซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะพันธะของชิ้นงานที่นำมาวัด โดยสารแต่ละชนิดจะมีสเปคตรัมเฉพาะของแต่ละสารที่แตกต่างกัน เทคนิคของ Raman spectroscopy มีหลักการที่สำคัญ คือ การใช้การกระเจิงไม่ยืดหยุ่น (Raman scattering) และการสั่นของโครงสร้าง[43-49]

3.3.1 หลักการทำงาน

เมื่อลำแสงที่มีความเข้มสูงผ่านเข้าไปยังตัวกลางโปร่งใส แสงส่วนใหญ่จะผ่านทะลุไปได้ แต่จะมีแสงส่วนน้อยเกิดการกระเจิงไปทุกทิศทางและเกิดการชนแบบยืดหยุ่น(elastic collision) หรือแบบไม่ยืดหยุ่น(inelastic collision)กับโมเลกุลของสาร เมื่อโฟตอนผ่านเข้าไปในโมเลกุลสารจะมีการดูดกลืนพลังงานเข้าไปซึ่งพลังงานที่เหลือจะให้สเปกตรัมออกมา ลักษณะสเปกตรัมจะเป็น peak แหลม โดยส่วนใหญ่โฟตอนที่กระเจิงออกมาจะมีความยาวคลื่นเดียวกันกับความความยาวคลื่นที่ตกกระทบ เรียกส่วนนี้ว่า Rayleigh scatter ซึ่งอิเล็กตรอนจะกลับสู่ระดับพลังงานเดิม ก่อนที่จะได้รับการกระตุ้นจากโฟตอน แต่มีโฟตอนบางส่วน(ประมาณ 1 ใน 10^7) ที่กระเจิงออกมามีความยาวคลื่นเปลี่ยนไป โฟตอนที่มีความยาวคลื่นเปลี่ยนไปนี้ เรียกว่า Raman scatter โฟตอนที่เป็น Raman scatter นี้ส่วนใหญ่จะมีความยาวคลื่นมากกว่า ความยาวคลื่นของโฟตอนที่ตกกระทบ (Stoke shift) แต่ก็มีส่วนน้อยที่ความยาวคลื่นน้อยกว่าความยาวคลื่นของโฟตอนที่ตกกระทบ (anti-Stokes shift) ซึ่ง Raman scattering ทั้งสองแบบ อิเล็กตรอนจะไม่ได้กลับมาสู่ระดับพลังงานเดิม Stokes Raman scattering ระดับพลังงานสุดท้ายของอิเล็กตรอนจะสูงกว่าระดับพลังงานเริ่มต้น ส่วน anti-Stokes Raman scattering ระดับพลังงานสุดท้ายของอิเล็กตรอนจะมีพลังงานต่ำกว่าระดับพลังงานเริ่มต้น และ Stokes scattering จะมีปริมาณมากกว่า anti-Stokes scattering



รูปที่ 3.4 แสดงระดับพลังงานของ Rayleigh Scattering, Stokes Raman scattering และ anti-Stokes scattering

จากรูปที่ 3.4 แสดงระดับพลังงานของ Rayleigh Scattering, Stokes Raman scattering และ anti-Stokes scattering แต่ละกรณี โฟตอนที่ตกกระทบจะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่า(virtual state)และเมื่ออิเล็กตรอนกลับสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า ก็จะปล่อยโฟตอนออกมา

3.3.2 การประยุกต์ใช้วัดคาร์บอนนาโนทิวป์

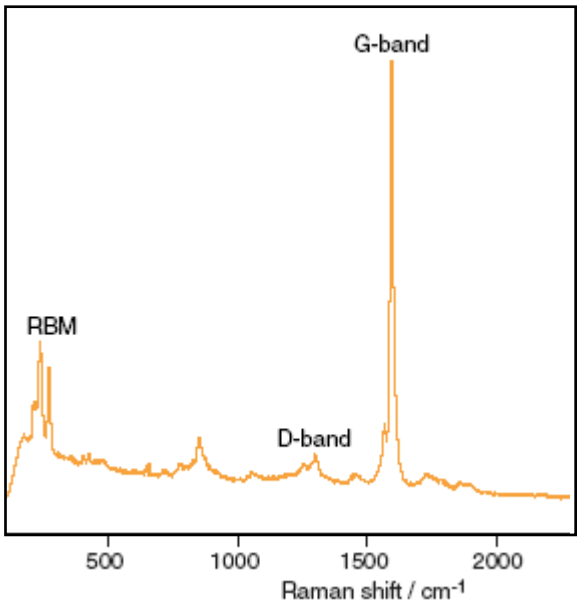
รามานสเปคโตรสโคปี เป็นเครื่องมือที่สำคัญชนิดหนึ่งที่ทำการวัดลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องเสียเวลาในการเตรียมตัวอย่างชิ้นงาน และชิ้นงานที่ทำการวัดแล้วก็ไม่เกิดการเสียหาย ซึ่งพันธะของฟูเรอเรนซ์ คาร์บอนนาโนทิวป์ อะมอฟัสคาร์บอนและโพลีคริสตรอนไลน์คาร์บอน จะอยู่ในรูปแบบของคาร์บอน สามารถสังเกตได้จากความถี่รามานที่วัดได้ในกราฟรามาน

โดยทั่วไปแล้วข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องรามานมีอยู่ความถี่ที่สนใจอยู่ 3 ความถี่ คือ

1) ความถี่ที่อยู่ในช่วง <200cm^{-1} จะเรียกว่าย่าน RBM(radial breathing mode) หากมีความถี่ในช่วงนี้เกิดขึ้นจะมี SWNTs เกิดขึ้น

2) ความถี่ประมาณ 1340cm^{-1} เรียกว่า D-bnad(D:disorder) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกันกับพันธะของกราไฟต์ที่ไม่เป็นระเบียบหรือมี Defect

3) ช่วงความถี่ที่อยู่ระหว่าง 1500-1600cm^{-1} เรียกว่า G-band จะตอบสนองกับพันธะของคาร์บอนนาโนทิวป์



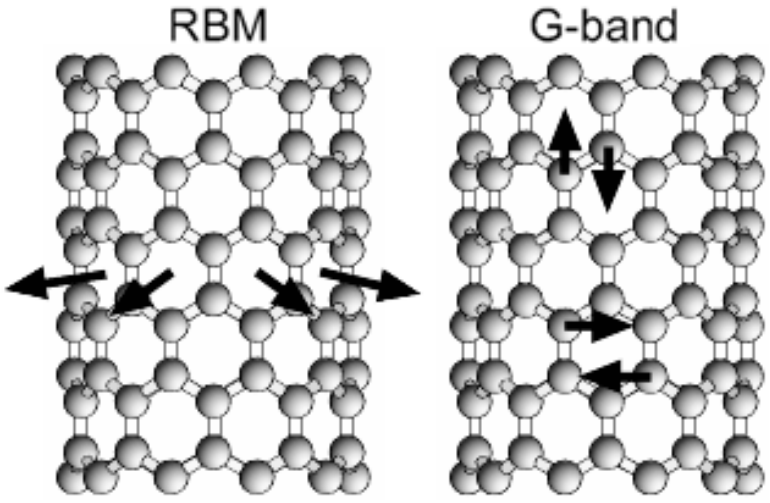
รูปที่ 3.5 กราฟความถี่รามานแสดงโหมดต่างๆ

3.3.2.1 Radial Breathing Mode

ความถี่ในโหมด RBM เป็นการตอบสนองของการสั่นของอะตอมคาร์บอนในทิศทางที่แผ่ออกมาในทิศทางของรัศมีดังแสดงในรูปที่ 3.6(ก) จึงทำให้สามารถนำการตอบสนองความถี่รามานในโหมดนี้มาหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ โดยทำการหาค่าผ่านสมการความสัมพันธ์

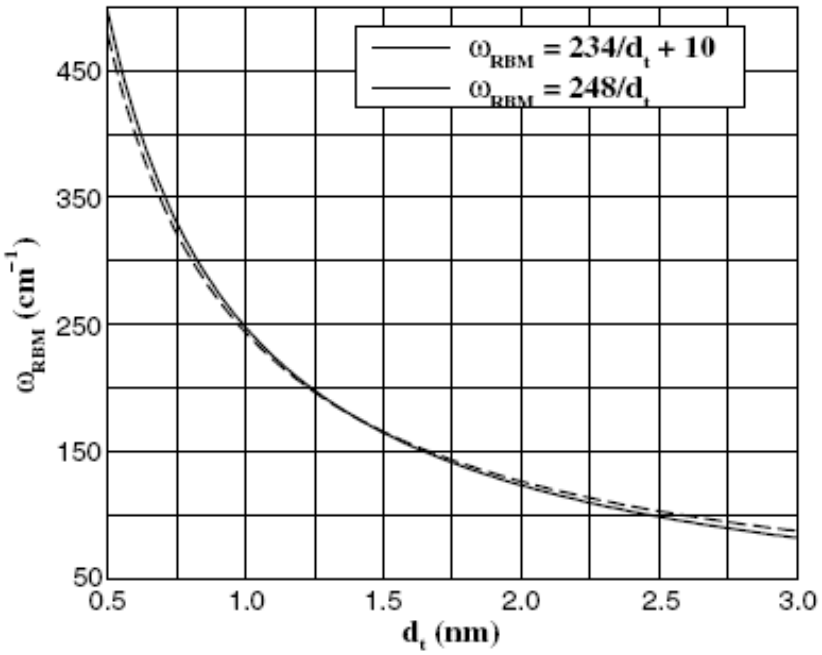
$$\omega_{RBM} = \frac{A}{d} + B \tag{3.1}$$

โดยที่ ตัวแปร A และ B เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง โดยข้อสำคัญข้อหนึ่งคือความถี่รามานของย่าน RBM จะไม่เกี่ยวข้องกับ มุมของคาร์บอนนาโนทิวป์(chiral angle θ) โดยสำหรับ SWNT ที่อยู่รวมกันเป็นกลุ่ม(SWNT-bundle) ค่าตัวแปร A=234cm^{-1} และ B=10cm^{-1}(ที่ตัวแปรB จะทำให้เกิดการเลื่อนของ d_t เนื่องมีแรงกระทำกันระหว่าง SWNT) และสำหรับ SWNT ที่อยู่โดดเดี่ยวอิสระ(Isolated SWNT) ค่าตัวแปร A= 248cm^{-1} และ B = 0 จึงทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ มีค่าอยู่ระหว่าง 1nm < d_t < 2nm และความถี่รามานจะอยู่ในช่วง 120cm^{-1} < ω_{RBM} < 250cm^{-1} และสำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางของทิวป์ที่มีขนาดใหญ่(d_t > 2nm) หรือ MWNTs ความเข้มของพีคในโหมด RBM จะน้อยจนถึงไม่มีพีคเกิดขึ้นเลย



(ก) (ข)

รูปที่ 3.6 การสั่นของอะตอมคาร์บอนสำหรับ (ก) โหมดRBM และ (ข) โหมดG-band



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่รามานในโหมด RBM ที่แสดงด้วย ω_{RBM} กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์

(ก) A=234cm^{-1} และ B=10cm^{-1} ในกรณีของของ SWNT-bumdle(เส้นประ) และ

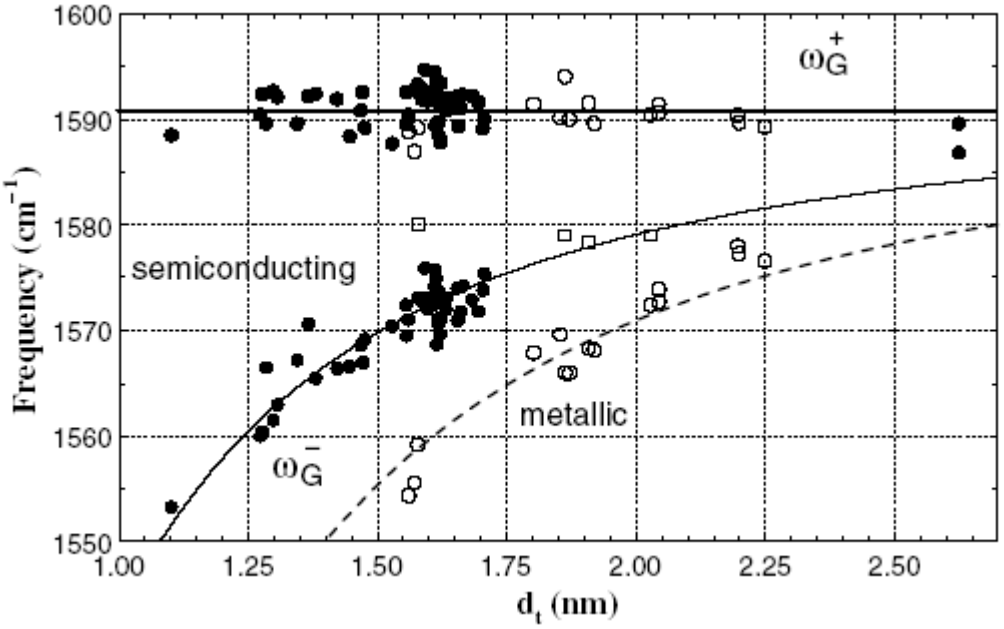
(ข) A=248cm^{-1} และ B=0 ในกรณีของของ Isolated SWNT (เส้นทึบ)

3.3.2.2 Tangential mode- G-band

ในโหมดของ G-band แทนพันธะของคาร์บอนนาโนทิวป์ จะมีความถี่รามานอยู่รอบๆ 1580cm^{-1} และจะมีพีคหลายพีครวมกันอยู่ โดยปรกติแล้วความถี่รามาน tangential mode ของกราไฟต์ สังเกตได้ที่ความถี่รามานรอบๆ 1582cm^{-1} และเรียกว่า G mode(จากกราไฟต์) สำหรับ tangential mode ของคาร์บอนนาโนทิวป์จะไม่เหมือนของกราไฟต์เนื่องจากความถี่รามานที่เกิดขึ้นมาจากผลรวมของพีคหลายพีค แต่ก็จะเรียกว่า G-band เหมือนกันโดยมีพีคของความถี่รามานมากกว่า 6 พีคใน อย่างไรก็ตามจะนำมาพิจารณาอย่างง่ายๆเพียง 2 พีคที่มีความเข้มที่สุดเท่านั้น ซึ่งมีต้นกำเนิดพื้นฐานจากการทำลายความสมมาตรของการสั่นในแนวขนานสัมผัสเมื่อแผ่นกราฟีนม้วนตัวกลายเป็นท่อทรงกระบอก(แสดงในรูปที่ 3.6(ข)) ซึ่งความเข้มสูงสุดของพีค G จำนวน 2 พีค จะมีสัญลักษณ์เป็น G^+ สำหรับการเลื่อนตำแหน่งในระดับอะตอมในแนวของแกนของทิวป์ และ G^- สำหรับการเลื่อนตำแหน่งในระดับอะตอมในทิศทางของเส้นรอบวงของทิวป์ ความถี่รามาน G^- จะมีความถี่ต่ำกว่า เนื่องจากบริเวณส่วนโค้งของทิวป์ทำให้การสั่นในทิศทางเส้นรอบวงของทิวป์อ่อนลง

การบ่งบอกว่าคาร์นบอนนาโนทิวป์มีคุณสมบัติเป็นโลหะหรือเซมิคอนดัคเตอร์ สามารถดูได้จากพีคของ G^- (แสดงในรูปที่ 3.8) ความกว้างของ G-band จะกว้างมากขึ้นเมื่อมีคุณสมบัติเป็นโลหะเมื่อทำการเปรียบเทียบกับของเซมิคอนดัคเตอร์ที่มีพีคแบบ Lorentzian และความกว้างนี้เกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนอิสระของคาร์บอนนาทิวป์ที่มีคุณสมบัติเป็นโลหะ พีคที่เกิดจาก G^- ทำการฟิทได้ด้วยเส้น BWF พีคที่มีลักษณะเป็น BWF นี้จะคล้ายกับวัสดุการไฟต์ (graphite-like material) ที่มีคุณสมบัติเป็นโลหะ เช่น n-dope กราไฟต์ และ n-dope ฟูเลอร์เรนซ์ และคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เป็นโลหะ

ในรูปที่ 3.8 แสดงถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์สัมพันธ์กับความถี่ $G^+(\omega_{G+})$ และความถี่ G^- (ω_{G-}) สำหรับโลหะและเซมิคอนดัคเตอร์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยค่า ω_{G+} จะไม่ขึ้นกับเส้นผ่านศูนย์กลางของทิวป์ในขณะที่ค่า ω_{G-} ขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยค่าของ ω_{G-} จะลดลงเมื่อขนาดของท่อ(d_t) มีขนาดลดลง



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง d_t กับ ω_{G+} และ ω_{G-} ของ SWNTs หลายๆท่อ ที่มีคุณสมบัติของโลหะและสารกึ่งนำ โดยที่จุดที่มีการระบายสีดำมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำและจุดที่ไม่มีการระบายมีคุณสมบัติเป็นโลหะ

3.3.2.3 D-band

โดยทั้ง D-band คือ Disorder-inducedc จะแสดงถึง อะมอฟัสคาร์บอน หรือ ความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างผลึกคาร์บอนโดยจะมีความถี่รามานอยู่ที่ประมาณ 1330cm^{-1} ในโหมดนี้จะมีความสูงของพีคที่ไม่มากนักเพราะในย่านนี้แสดงถึงสิ่งที่เป็นสิ่งเจือปนหรือรูปแบบของผลึกที่เราไม่ต้องการให้เกิดขึ้น

3.3.2.4 อัตราส่วน I(G)/I(D)

อัตราส่วนระหว่างความเข้มของพีค G กับความเข้มของพีค D หรือ I(G)/I(D) ซึ่งแสดงถึงความสมบูรณ์และความบริสุทธิ์ของผลึก โดยที่ค่า I(G) หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของพีค G และ I(D) หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของพีค D แล้วนำมาหารกันจะได้ค่าของอัตราส่วน I(G)/I(D) ซึ่งเมื่อมีค่ามากจะแสดงถึงมีความบริสุทธ์หรือมีความสมบูรณ์ของผลึกที่สูง