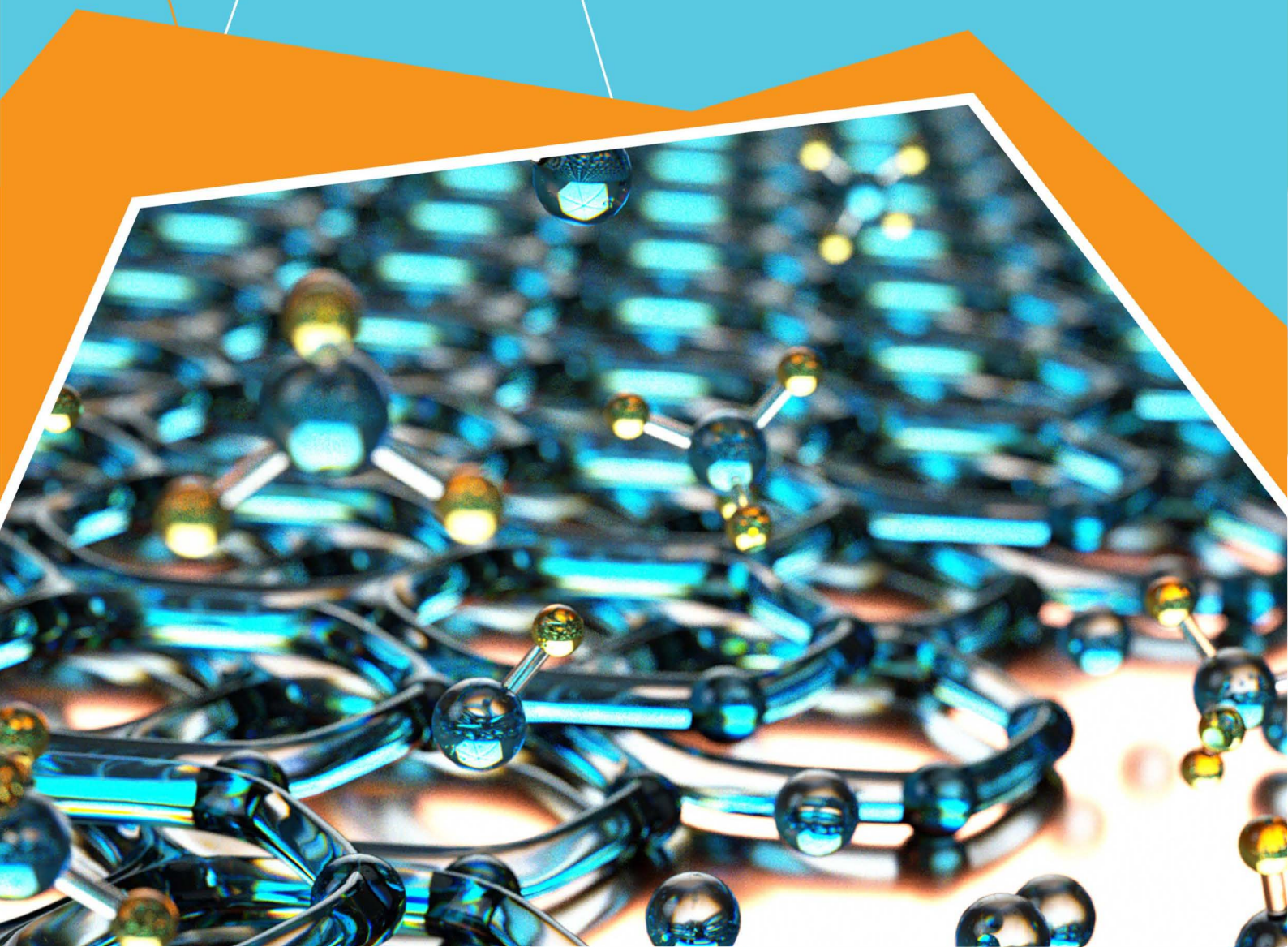


Introduction to Nanotechnology

นาโนเทคโนโลยีเบื้องต้น
เอกสารประกอบการสอน

ดร.วิรันธชา เครือฟู
DR. VIRUNTACHAR KRUEFU Ph.D.



คำนำ

ปัจจุบันวัสดุนาโนมีส่วนสำคัญต่อการพัฒนาทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมากขึ้น จะเห็นได้จากผลการศึกษาวิจัย รวมทั้งหลักสูตรการเรียนการสอนในมหาวิทยาลัยที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพื่อพัฒนาการเรียนการสอนให้นักศึกษามีความรู้พื้นฐานที่ทันต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ทั้งในส่วนของงานวิจัยที่พัฒนาขึ้น และความรู้ใหม่ๆ ที่เกิดขึ้นทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนาโน ตลอดจนสามารถนำความรู้ที่ได้รับไปประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวัน ผู้เรียบเรียงจึงเห็นว่าเอกสารประกอบการสอนเล่มนี้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการเรียนการสอน และผู้สนใจ

เอกสารประกอบการสอนเล่มนี้ได้แปล รวบรวม และเรียบเรียง ถึงความรู้เบื้องต้นทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนาโน ตั้งแต่ประวัติความเป็นมา หลักการทางวิทยาศาสตร์พื้นฐานสำหรับนาโนเทคโนโลยี นาโนเทคโนโลยีจากธรรมชาติ การสังเคราะห์วัสดุนาโน เครื่องมือและการวิเคราะห์ทางนาโนเทคโนโลยี นาโนเทคโนโลยีในด้านต่างๆ และนาโนเทคโนโลยีกับการประยุกต์ใช้ ตลอดจนจริยธรรมและความเป็นพิษของวัสดุนาโน ซึ่งเป็นการรวบรวมเนื้อหาจากแหล่งข้อมูลต่างๆ ทั้งหนังสือ วารสารวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ เอกสารรูปเล่มงานวิจัย ตลอดจนการค้นคว้าข้อมูลทางอินเทอร์เน็ตจากเว็บไซต์ทางวิชาการต่างๆ

ผู้เรียบเรียงขอขอบคุณผู้มีส่วนร่วมในการพิมพ์ข้อมูล และวาดภาพประกอบ ดร.ชนิตกานันทา และขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สุคนธ์ พานิชพันธ์ ผู้มีพระคุณที่ให้คำแนะนำ และสนับสนุนผู้เรียบเรียงตลอดมา

ผู้เรียบเรียงหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผู้อ่านจะได้รับประโยชน์จากเอกสารประกอบการสอนเล่มนี้ตามต้องการ ข้อเสนอแนะหรือข้อวิจารณ์ใดๆ ที่ช่วยให้เอกสารประกอบการสอนเล่มนี้มีประโยชน์มากยิ่งขึ้น ผู้เรียบเรียงขอน้อมรับไว้ด้วยความขอบพระคุณยิ่ง ผู้อ่านสามารถส่งข้อเสนอแนะหรือข้อวิจารณ์มาที่ v_viruntachar@hotmail.com

วิรัชชา เกื้อฟู

อาจารย์ ดร.วิรัชชา เครือฟู
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ฉบับปรับปรุง พฤษภาคม 2561

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	i
สารบัญ	iii
สารบัญภาพ	xi
สารบัญตาราง	xix
บทที่ 1 วิทยาศาสตร์และนาโนเทคโนโลยีเบื้องต้น	1
1.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยี	2
1.1.1 ความหมายของคำว่านาโนและเทคโนโลยี	2
1.1.2 ความหมายของนาโนเทคโนโลยี	4
1.2 หลักการพื้นฐานของนาโนเทคโนโลยี	5
1.2.1 เทคโนโลยีแบบหยาบ (Bulk technology)	6
1.2.2 เทคโนโลยีระดับโมเลกุล (Molecular technology)	6
1.3 แนวคิดการสร้างผลิตภัณฑ์และสิ่งของระดับนาโน	7
1.4 ประวัติความเป็นมาของนาโนเทคโนโลยี	7
1.5 การวิจัยและพัฒนานาโนเทคโนโลยีในต่างประเทศ	9
1.6 การวิจัยและพัฒนานาโนเทคโนโลยีในประเทศไทย	9
บรรณานุกรม	11
คำถามท้ายบท	14
บทที่ 2 หลักการทางวิทยาศาสตร์พื้นฐานสำหรับนาโนเทคโนโลยี	15
2.1 อะตอมและโมเลกุล	16

	หน้า
2.2 ฟิสิกส์ของอะตอม และกลศาสตร์ควอนตัม	22
2.2.1 กลศาสตร์คลาสสิก (Classical mechanics) หรือกลศาสตร์ของนิวตัน (Newtonian mechanics)	23
2.2.2 กลศาสตร์ควอนตัม (Quantum mechanics)	24
2.2.3 หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก (Heisenberg uncertainty principle)	27
2.3 หลักการทางวิทยาศาสตร์	30
2.3.1 หลักการทางแสง	30
2.3.2 หลักการเชิงกล	34
2.3.3 หลักการทางไฟฟ้า	36
2.3.4 หลักการทางแม่เหล็ก	38
2.4 ระบบชีวภาพ	38
2.5 การตรวจจับโมเลกุล	41
บรรณานุกรม	42
คำถามท้ายบท	44
บทที่ 3 นาโนเทคโนโลยีจากธรรมชาติ	45
3.1 ไบโบบัว	46
3.1.1 พื้นผิวไบโบบัว	46
3.1.2 แรงดึงผิวกับหยดน้ำบนไบโบบัว	47
3.1.3 ปฏิกิริยาการนำกลิ้งบนไบโบบัว	49
3.1.4 นวัตกรรมจากหยดน้ำบนไบโบบัว	51
3.2 เท้าตุ๊กแก	52
3.3 ปีกผีเสื้อบางชนิด	54
3.4 ไยแมงมุม	55

	หน้า
3.5 เปลือกหอยเป่าสี	55
3.6 ขาจิ๊งไจ้	56
บรรณานุกรม	58
คำถามท้ายบท	60
บทที่ 4 การสังเคราะห์วัสดุที่มีโครงสร้างระดับนาโน	61
4.1 การสร้างวัสดุและอุปกรณ์นาโนโดยใช้กระบวนการแบบบนลงล่าง (Top down)	62
4.1.1 การสลักวาดลาย (Lithography)	62
4.1.1.1 วิธีการลิโทกราฟีแบบใช้แสง (Photo lithography, PL)	63
4.1.1.2 วิธีการลิโทกราฟีแบบใช้ปลายแหลม (Dip-pen nanolithography, DPN)	65
4.1.1.3 วิธีการลิโทกราฟีการใช้แบบช่องว่าง (Nanosphere lithography, NSL)	66
4.1.1.4 วิธีการลิโทกราฟีแบบใช้ลำแสงอิเล็กตรอน (Electron beam lithography, EBL)	66
4.1.2 การตกสะสม (Deposition)	68
4.1.2.1 การหมุนเหวี่ยง (Spin coating)	68
4.1.2.2 การระเหยกลายเป็นไอ (Evaporation)	69
4.1.2.3 การเคลือบแบบสปัตเตอริง (Sputtering)	70
4.1.2.4 การตกสะสมไอสารด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical vapor deposition)	74
4.1.3 การกัดกรวด (Etching)	74
4.1.4 การปลูกผลึก (Crystal growth)	75
4.1.5 วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc discharge)	80

	หน้า
4.1.6 วิธีการระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser vaporization)	81
4.2 การสร้างวัสดุและอุปกรณ์นาโนโดยใช้กระบวนการแบบล่างสู่บน (Bottom up)	82
4.2.1 การสังเคราะห์ทางเคมี (Chemical synthesis)	82
4.2.2 การประกอบตัวเอง (Self assembly)	88
4.2.3 การใช้กล้องส่องอะตอม (Scanning probe manipulation)	89
บรรณานุกรม	90
คำถามท้ายบท	92
บทที่ 5 เครื่องมือ และการวิเคราะห์ทางนาโนเทคโนโลยี	93
5.1 กล้องจุลทรรศน์กระแสอิเล็กตรอนแบบหัวอ่านส่องกราด (Scanning tunneling microscope, STM)	94
5.2 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM)	96
5.3 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer, XRD)	99
5.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)	111
5.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM)	112
5.6 เครื่องวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (Energy dispersive spectrometer, EDS)	115
5.7 เครื่องวัดพื้นที่ผิว (Surface area analyzer, SAA)	118
5.8 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer, UV-Vis)	123
5.9 เครื่องโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (Photoluminescence spectrometer, PL)	129

	หน้า
5.10 เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Infrared spectrophotometer, IR)	131
5.11 เครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ (Raman spectrometer)	134
5.12 เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermal analyzer, TA)	136
บรรณานุกรม	140
คำถามท้ายบท	143
 บทที่ 6 วัสดุนาโน	 145
6.1 อนุภาคนาโน (Nanoparticles)	146
6.1.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	146
6.1.2 ซิงก์ออกไซด์ (ZnO)	148
6.1.3 ซิลเวอร์ (Ag)	149
6.2 วัสดุประกอบนาโน (Nanocomposite)	149
6.3 หมดควอนตัม (Quantum dot)	150
6.4 ท่อนาโนคาร์บอน (Nanotubes) เส้นลวดนาโน (Nanowire) และ โพรงนาโน (Nanopores)	153
6.4.1 ท่อนาโนคาร์บอน	153
6.4.1.1 โครงสร้างท่อนาโนคาร์บอน	153
6.4.1.2 มัดของท่อนาโนคาร์บอน	154
6.4.1.3 การเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนและการวิเคราะห์	154
6.4.1.4 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน	154
- สมบัติเชิงกล	154
- สมบัติทางความร้อนและค่าความจุความร้อนของท่อ นาโนคาร์บอน	155
- สมบัติทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอน	155

	หน้า
- สมบัติทางชีวภาพของท่อนาโนคาร์บอน	156
6.4.2 เส้นลวดนาโน	156
6.4.3 โพรงนาโน	156
6.5 บัคกี้บอล (Buckyball)	156
6.6 กราฟีน (Graphene)	158
6.7 ฟิล์มบางนาโน (Thin film nanostructure)	159
บรรณานุกรม	160
คำถามท้ายบท	162
บทที่ 7 นาโนเทคโนโลยีในด้านต่างๆ	163
7.1 นาโนเทคโนโลยีชีวภาพและนาโนเทคโนโลยีทางการแพทย์	164
7.2 นาโนอิเล็กทรอนิกส์	169
7.3 นาโนคอมพิวเตอร์	170
7.4 ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคหรือเมมส์ (Microelectromechanical systems, MEMs)	173
7.5 ระบบเครื่องกลไฟฟ้านาโนหรือนีมส์ (Nanoelectromechanical systems, NEMs)	174
7.6 นาโนเทคโนโลยีกับการเกษตร	174
7.7 นาโนเทคโนโลยีทางด้านอาหาร	177
บรรณานุกรม	180
คำถามท้ายบท	181
บทที่ 8 การประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยี	183
8.1 ประยุกต์ใช้ทางด้านสิ่งแวดล้อม	184

	หน้า
8.1.1 การบำบัดสิ่งปนเปื้อนที่เป็นสารอินทรีย์ในน้ำโดยการย่อย สลายด้วยแสง (Photocatalytic activity)	184
8.1.2 วัสดุที่สามารถทำความสะอาดหรือกำจัดสิ่งสกปรกได้ด้วย ตัวเอง (Self cleaning)	198
8.1.2.1 พื้นผิวทำความสะอาดตัวเอง	198
8.1.2.2 เลื่อนาโน	200
8.2 ประยุกต์ใช้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์	201
8.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells)	201
8.2.1.1 พารามิเตอร์ที่บอกสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ แสงอาทิตย์	202
8.2.1.2 ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์	206
8.2.2 การตรวจวัดแก๊ส (Gas sensor) ของอนุภาคนาโนของ สารประกอบออกไซด์	208
8.3 ประยุกต์ใช้ทางด้านสิ่งทอ	218
8.4 ประยุกต์ใช้ทางการแพทย์	219
บรรณานุกรม	220
คำถามท้ายบท	223
 บทที่ 9 ความเป็นพิษของวัสดุนาโน	 225
9.1 วัสดุนาโนกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	226
9.2 ความปลอดภัยของนาโนเทคโนโลยี	227
9.3 นาโนเทคโนโลยีกับความปลอดภัย	228
9.4 ฉลากผลิตภัณฑ์นาโนคิว	228
บรรณานุกรม	230
คำถามท้ายบท	232

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1.1 วัสดุระดับนาโน	3
2.1 แบบจำลองอะตอม	16
2.2 โมเลกุลของสารบางชนิด	17
2.3 ลักษณะการเกิดพันธะโคเวเลนต์ระหว่างอะตอม	20
2.4 พันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์ ระหว่าง N-H ในแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+)	21
2.5 หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก	28
2.6 วัสดุที่มีขนาดเล็กลงพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุจะเพิ่มขึ้น	30
2.7 สีของอนุภาคทองคำที่เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของอนุภาค	31
2.8 อธิบายการเกิด เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์	32
2.9 อนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเซลีไนด์ (CdSe) ที่มีสีที่แตกต่างกันตามขนาดของอนุภาค	32
2.10 เปรียบเทียบลักษณะการดูดกลืนแสงของโลหะอัลคาไลด์ ที่แตกต่างกันตามขนาดของกลุ่มก้อน (ก) อะตอมโลหะ (ข) โลหะแบบก้อนใหญ่ และ (ค) อนุภาคนาโนของโลหะ	33
2.11 (ก) อนุภาคนาโนทองคำ (จุดสีดำ) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวซิลิกอน (ข) และ (ค) ซิลิกอนเกิดการเติบโตเป็นเส้นลวดนาโนซิลิกอน	34
2.12 ขนาดเกรนของโลหะอะลูมิเนียมที่มีขนาดเล็ก	35
2.13 ลักษณะพลาสติกพิเศษของท่อนาโนคาร์บอน	36
2.14 ท่อนาโนคาร์บอนที่มี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นาโนเมตร เกิดสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างไปจากเดิม ใช้สำหรับทำหน้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรด	37

ภาพ	หน้า
2.15 โมเลกุลของกรดแอสอะมิโน	40
3.1 ลักษณะของพื้นผิวใบบัวที่เป็นปุ่ม	46
3.2 น้ำลึบบนใบบัว	47
3.3 แนวแรงที่ดึงผิวของเหลวเข้ามาภายใน	47
3.4 ความโค้งงอของผิวของเหลว	48
3.5 มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวของแข็ง หยดน้ำ และอากาศรอบๆ	49
3.6 การเปียกผิวของหยดน้ำบนพื้นผิวของแข็ง แสดงถึงความชอบน้ำที่เพิ่มขึ้น	50
3.7 เส้นขนเล็กบริเวณปลายนิ้วของเท้าตุ๊กแก	52
3.8 ผลึกโฟโตนิกสับบิงปีกผีเสื้อ และการเปลี่ยนสีบนปีกผีเสื้อ	54
3.9 ภาพ SEM แสดงลักษณะผลึกโฟโตนิกสับบิงปีกผีเสื้อ	54
3.10 จิงโจ้น้ำ	56
4.1 ใช้แสงเลเซอร์เขียนรูปแบบวงจรสำหรับไมโครชิป	63
4.2 กระบวนการลิโทกราฟีแบบใช้แสง (ก) เคลือบฟิล์มออกไซด์ (ข) วางแผ่นกั้นแสง (Photoresist) (ค) ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตส่องผ่านมาร์คไปยังชิ้นงาน (ง) สร้างรูปแบบแผ่นกั้นแสง (จ) กัดกรดชั้นออกไซด์ออก (ฉ) นำแผ่นกั้นแสงออก จะได้ชั้นของออกไซด์ตามรูปแบบที่ต้องการ	64
4.3 วิธีลิโทกราฟีในระดับมิติต่างๆ	65
4.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ในการสร้างโครงสร้างนาโนโดยวิธี EBL	67
4.5 ขั้นตอนการสร้างโครงสร้างนาโนตามวิธี EBL	68
4.6 การหมุนเหวี่ยงสาร	69
4.7 แผนภาพเครื่องระเหยกลายเป็นไอ	69
4.8 เครื่องระเหยกลายเป็นไอ	70
4.9 ระบบสปัตเตอร์ริงแบบดีซีแมกนีตรอน	72

ภาพ	หน้า
4.10 ลักษณะโครงสร้างภายในของสารของแข็งโดยพิจารณาความเป็นระเบียบในการจัดเรียงตัวของอะตอม (ก) อะมอร์ฟัส (ข) ผลึกหลายรูป (Poly crystalline) และ (ค) ผลึกรูปเดี่ยว (Single crystalline)	76
4.11 การปลูกผลึกรูปเดี่ยวของซิลิกอนโดยวิธีโซลกลาสกี	78
4.12 แผนภาพจำลองการปลูกผลึกรูปเดี่ยวโดยวิธีโซลรีไฟนิง	79
4.13 อุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกผลึกรูปเดี่ยวโดยวิธีโฟลตติง โซน	80
4.14 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube, CNTs) โดยวิธีอาร์คดิสชาร์จ	81
4.15 กระบวนการสังเคราะห์ และลักษณะเปลวไฟที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนความบริสุทธิ์สูง ด้วยกระบวนการเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส	86
4.16 การก่อตัวเป็นอนุภาคนาโนจากกระบวนการเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส	88
5.1 วงจรการทำงานของกล้อง STM	95
5.2 การเคลื่อนย้ายอะตอมโดยกล้อง STM	95
5.3 แผนภาพการทำงานของกล้อง AFM	96
5.4 ภาพฟิล์มบางของพอลิเมอร์ที่ได้จากกล้อง AFM	98
5.5 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มซิลิกอนที่เตรียมจากวิธี การตกสะสมไอสารด้วยวิธีการทางเคมี ขนาดของเกรน วิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (TEM) และความขรุขระของพื้นผิว วิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม	98
5.6 การเกิดรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว (ก) อันตรกิริยาของอะตอม (ข) การเกิดรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวที่ระดับพลังงานของชั้นวงโคจรต่างๆ	100
5.7 การเกิดรังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง (ก) อันตรกิริยาของอะตอม (ข) การกระเจิงของอิเล็กตรอนปฐมภูมิก่อนเกิดอันตรกิริยากับอะตอม	101

ภาพ	หน้า
5.8 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบ (hkl) ของผลึก (ก) ไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (ข) เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ทำมุมตกกระทบกับระนาบเป็นมุม θ (ค) การเกิดเหมือนข้อ ข โดยใช้เส้นตรงแทนคลื่น	103
5.9 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บน (ก) ผลึกของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทอง และ (ข) พิล์มบางผสมของพอลิเมอร์ (Poly (3-hexylthiophene), P3HT) กับซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทอง บนแผ่นอลูมินาที่ทำขั้วไฟฟ้าด้วยทอง	104
5.10 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของทังสเตนออกไซด์ ที่ผ่านการเตรียมที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	105
5.11 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของทังสเตนออกไซด์ ที่ผ่านการเตรียมที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	105
5.12 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของทังสเตนออกไซด์ ที่ผ่านการเตรียมที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	106
5.13 การเลี้ยวเบน ของรังสีเอ็กซ์ของทังสเตนออกไซด์ ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 เซลเซียส เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ JCPDS file หมายเลข 85-2549 ของ WO_3	107
5.14 JCPDS file หมายเลข 85-2549 ของ WO_3	108
5.15 ภาพจาก กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของแท่งนาโนทังสเตนออกไซด์	112
5.16 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (ก) CoP nanorods (ข) NiS nanoprisms (ค) $BaCO_3$ nanowires และ (ง) Cubic-shaped gold particles	113
5.17 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (ก) ทังสเตนออกไซด์ (ข-ง) อนุภาคทังสเตนออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมที่ความเข้มข้น 1.00 เปอร์เซ็นต์ โดยมวล ณ กำลังขยาย $\times 20000$, $\times 100000$ และ $\times 40000$ ตามลำดับ	114

ภาพ	หน้า
5.18 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์แบบสเปกตรัม (EDS-spectrum) (ก) อนุภาคทังสเตนออกไซด์ (ข) อนุภาคทังสเตนออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียม	115
5.19 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์แบบเส้น (EDS-line spectrum) ของฟิล์มทังสเตนออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียม	116
5.20 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์แบบแบบกลุ่มจุด (EDS-dot mapping mode) ของฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียม	117
5.21 กราฟการวัดพื้นที่ผิวโดยวิธีการดูดซับของแก๊สด้วย BET	119
5.22 กราฟที่ได้จากการคำนวณในรูปแบบเส้นตรงของสมการ BET	120
5.23 กราฟแสดงค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และขนาดของ อนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมที่ได้จากการวิเคราะห์จากทฤษฎีของบีอีที	122
5.24 แถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	124
5.25 การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนภายในโมเลกุล	124
5.26 กระบวนการการดูดกลืนแสง แสงตกกระทบ มีพลังงานเท่ากับ (P) ถูกดูดกลืนโดยสารทำให้แสงที่ผ่านออกมามีพลังงานลดลง (P ₀)	126
5.27 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอนุภาค ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) และซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียม (Nb-loaded ZnO)	127
5.28 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง	128
5.29 หลักการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ของวัสดุ	130
5.30 สเปกตรัมของเอทานอล	132
5.31 ตัวอย่างการลากเส้น Base line เพื่อการคำนวณ และการวิเคราะห์เชิงปริมาณ	133
5.32 การกระเจิงแสงที่ตกกระทบวัตถุ	134

ภาพ	หน้า
5.33 เปรียบเทียบสเปกตรัม FTIR และ Raman ของพอลิสไตรีน	135
5.34 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ การสูญเสียน้ำหนัก เมื่อได้รับความร้อนของ แคลเซียมออกไซด์	137
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานกับความหนาแน่นสถานะ	151
6.2 ช่วงว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำแบบกึ่งอนันต์ และอนุภาคขนาดนาโน ของสารกึ่งตัวนำ	152
6.3 ท่อนาโนคาร์บอน	154
6.4 โครงสร้างนาโนของบัคมิโนสเตอร์ฟูลเลอร์ หรือบัคกี้บอล	157
6.5 บัคกี้บอล ท่อนาโนคาร์บอน กราไฟต์ และกราฟีน	158
7.1 การงอของคาน เมื่อมีการจับระหว่างแอนติบอดีและแอนติเจนบนเซลล์มะเร็ง ต่อมลูกหมากทำให้เกิดการสะท้อนแสงที่เปลี่ยนไป	166
7.2 การตรวจสอบลำดับเบสบนดีเอ็นเอด้วยช่องผ่านนาโน เพื่อตรวจสอบความ ผิดปกติเบื้องต้นในการวินิจฉัยมะเร็ง	167
7.3 (ก) ท่อนาโนคาร์บอนมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอะตอม คาร์บอน เช่น ถ้าโครงสร้างของวงเบนซีนเรียงตัวตั้งฉากกับแกนตามแนวยาว ของท่อจะทำให้ท่อนาโนมีสมบัติเป็นโลหะสามารถนำไฟฟ้าได้ (ด้านบน) แต่ ถ้าวงเบนซีนเรียงตัวขนานไปกับแกนตามยาวของท่อจะทำให้ท่อนาโนมี สมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (ด้านล่าง) (ข) ลักษณะของทรานซิสเตอร์ที่มีท่อนาโน คาร์บอนทำหน้าที่เป็นเกต (Gate)	172
8.1 แถบพลังงานของโลหะ (Metal) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และฉนวน (Insulator)	187

ภาพ	หน้า
8.2 แผนภาพจำลองของช่องว่างพลังงาน แสดงระดับพลังงานตัวให้ (Acceptor levels, ΔE_A) (เหนือด้านบนของแถบวาเลนซ์) ระดับพลังงานตัวรับ (Donor levels, ΔE_D) (ด้านล่างของแถบคอนดักชัน) และตรงกลางช่องว่างแสดงระดับพลังงานการกักอิเล็กตรอน (Trap levels)	188
8.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสบนสารกึ่งตัวนำ	189
8.4 การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล	192
8.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า การนำไฟฟ้า และเวลา เมื่อนิคมทานอลที่มีจำนวนคาร์บอน 100, 300, 500, 700 และ 1,000 อะตอม ตามลำดับ ลงในโฟโตแคตาไลติกริแอกเตอร์ ที่มีซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง	193
8.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\Delta C)$ และ $\ln(\Delta K)$ เมื่อ C คือ จำนวนคาร์บอน อะตอมในรีแอกเตอร์ และ K คือ ค่าการนำไฟฟ้า	195
8.7 ปริมาณเมทานอล เอทานอล และฟีนอล ที่ ถูกย่อยสลายในช่วงเวลาต่างๆ เมื่อใช้ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทอง 0.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง	196
8.8 ความชอบน้ำบนพื้นผิวลูกศรจากซ้ายไปขวาแสดงถึงความชอบน้ำ (Hydrophilic) ที่เพิ่มขึ้นของพื้นผิว	198
8.9 กระจกทำความสะอาดตัวเอง	199
8.10 การทำความสะอาดตัวเองได้เมื่อสัมผัสกับน้ำ	200
8.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และความต่างศักย์ ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงพร้อมด้วยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ	203
8.12 ระดับพลังงาน HOMO และ LUMO ของตัวให้อิเล็กตรอน (Donor) และตัวรับอิเล็กตรอน (Acceptor) ในการคำนวณหาความต่างศักย์เปิดวงจร (V_{oc})	205
8.13 (ก) โครงสร้างของพอลิเมอร์และชั้นรูปแบบของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 2 รอยต่อ (ข) โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 2 รอยต่อ ชนิดสารอินทรีย์	206

ภาพ	หน้า
8.14 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะระหว่างความหนาแน่นกระแส (J_{sc} , mA/cm ²) และค่าความต่างศักย์ (V) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์ ที่ใช้ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทอง และ PCBM เป็นตัวเว้นช่วงแสงในตัวทำละลาย Dichlorobenzene	207
8.15 ตัวอย่างการก่อดั้วบริเวณปลดปล่อยของพื้นผิวฟิล์ม กำแพงศักย์บริเวณรอยต่อเกรนมีค่าลดลงเมื่อมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน	209
8.16 ปฏิกริยาระหว่างออกซิเจนกับอิเล็กตรอนบนพื้นผิวฟิล์มเซ็นเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียม	211
8.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต้านทานของแก๊สชนิด (ก) ออกซิไดซ์ และ (ข) รีดิวซ์	213
8.18 เวลาในการตอบสนอง และเวลาในการกลับคืนสู่สภาพเดิม	214
8.19 การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานของฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทอง ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการตอบสนองต่อไอของเอทานอล แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สอะเซทิลีน	217
9.1 ฉลากนาโนคิว	229

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 คำนำหน้าหน่วยต่างๆ	2
1.2 รายชื่อผู้ได้รับรางวัลโนเบล กับบทบาทต่อการพัฒนานาโนเทคโนโลยี	8
2.1 ความแตกต่างระหว่างอันตรกิริยาโคเวเลนต์ และนอนโคเวเลนต์	21
2.2 นักวิทยาศาสตร์กับแนวคิดทางควอนตัม	25
4.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีต่างๆ ในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์	84
6.1 สมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ในเฟสของผลึกแบบต่างๆ	147
6.2 สมบัติของซิงก์ออกไซด์ขนาดนาโนเมตร	149
8.1 ค่าการนำไฟฟ้า และจำนวนคาร์บอนที่อยู่ในโฟโตแคตาไลติกริแอกเตอร์ในช่วงเวลาต่างๆ และค่า $\ln(\Delta C)$ และ $\ln(\Delta K)$ ที่คำนวณได้	194
8.2 เวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย (Completed degradation time) เมทานอล เอทานอล และฟีนอล เมื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงต่างๆ	197

บทที่ 1

วิทยาศาสตร์และนาโนเทคโนโลยีเบื้องต้น:

- 1.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยี
 - 1.1.1 ความหมายของคำว่านาโนและเทคโนโลยี
 - 1.1.2 ความหมายของนาโนเทคโนโลยี
- 1.2 หลักการพื้นฐานของนาโนเทคโนโลยี
 - 1.2.1 เทคโนโลยีแบบหยาบ (Bulk technology)
 - 1.2.2 เทคโนโลยีระดับโมเลกุล (Molecular technology)
- 1.3 แนวคิดการสร้างผลิตภัณฑ์และสิ่งของระดับนาโน
- 1.4 ประวัติความเป็นมาของนาโนเทคโนโลยี
- 1.5 การวิจัยและพัฒนานาโนเทคโนโลยีในต่างประเทศ
- 1.6 การวิจัยและพัฒนานาโนเทคโนโลยีในประเทศไทย

1.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยี มาจากคำว่านาโน รวมกับ เทคโนโลยี ซึ่ง นาโน มาจากรากศัพท์ภาษากรีกว่า Nanos แปลว่า คนแคระ และเป็นหน่วยวัด ระดับ ขนาด หรือ ความยาวของวัตถุตามมาตราเมตริก

1.1.1 ความหมายของคำว่านาโน และเทคโนโลยี

นาโนคือ คำอุปสรรค (Prefix) หรือกำนำหน้าหน่วยซึ่งกำนำหน้าหน่วยจะถูกใช้เมื่อค่าในหน่วยฐานมากหรือน้อยเกินไป เราอาจเขียนคำนั้นเป็นตัวเลขคูณด้วยเลขสิบยกกำลังกำนำหน้าหน่วยที่ใช้แทนตัวคูณ และสัญลักษณ์ ดังแสดงในตาราง 1.1

นาโนเมตร คือ

หนึ่งในพันล้านของเมตร

หนึ่งในล้านของเซนติเมตร

หนึ่งในแสนของมิลลิเมตร หรือ

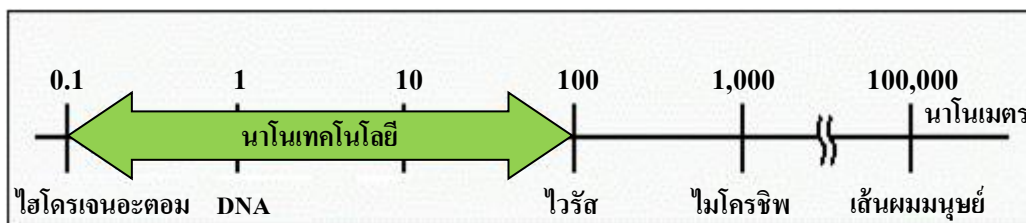
หนึ่งในพันของไมโครเมตร

ตาราง 1.1 กำนำหน้าหน่วยต่างๆ

ศัพท์บัญญัติและความหมาย	กำนำหน้าหน่วย	สัญลักษณ์	ตัวคูณ
เอ็กซ์ตะ = 1 ล้านล้านล้าน	Exta	E	10^{18}
เพตะ = 1 พันล้านล้าน	peta	P	10^{15}
เทระ = 1 ล้านล้าน	tera	T	10^{12}
กิกะ = 1,000,000,000 (อ่านว่า จิก-กะ = ร้อยล้าน)	giga	G	10^9
เมกะ = 1,000,000 (อ่านว่า เมก-กะ = ล้าน)	mega	M	10^6
กิโล = 1,000 (เช่น 1 กิโล กรัม = 1 พัน กรัม)	kilo	k	10^3
เฮกโต = 100	hecto	h	10^2

ศัพท์บัญญัติและความหมาย	คำนำหน้า หน่วย	สัญลักษณ์	ตัวคูณ
เดคา = 10	deka	da	10^1
เดซี = 1 ใน 10 = 0.1	deci	d	10^{-1}
เซนติ = 1 ใน 100 = 0.01	centi	c	10^{-2}
มิลลิ = 1 ใน 1,000 = 0.001	mili	m	10^{-3}
ไมโคร = 1 ใน 1,000,000 = (1 ใน ล้าน)	micro	μ	10^{-6}
นาโน = 1 ใน 1,000,000,000 = (1 ใน พันล้าน)	nano	n	10^{-9}
พิโก = 1 ใน ล้านล้าน	pico	p	10^{-12}
เฟมโต = 1 ใน พันล้านล้าน	femto	f	10^{-15}
อัตโต = 1 ใน ล้านล้านล้าน	atto	a	10^{-18}

วัตถุที่มีขนาด 1 นาโนเมตร (ตัวย่อ nm) หมายถึง มีขนาด 1 ในพันล้านเมตร หรือเท่ากับ 1 ต่อ 1,000,000,000 เมตร (หนึ่งในพันล้านส่วนของเมตร) โดยปกติแล้วนาโน ใช้เป็นคำอุปสรรค ซึ่งมีค่าเท่ากับหนึ่งในพันล้านส่วน เมื่อนำคำว่านาโน ไปใช้ในหน่วยใดก็ตาม จะหมายถึงพันล้านส่วนของหน่วยนั้น เช่น ขนาด 1 นาโนเมตร จะใหญ่กว่าขนาดของอะตอมประมาณสิบเท่าขึ้นไป แต่เล็กกว่าขนาดของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ในตัวไมโครชิพ (IC Microchip) ในปัจจุบันประมาณพันเท่า และถ้าเทียบกับเส้นผมซึ่งมีขนาดประมาณ 0.1 มิลลิเมตร ขนาด 1 นาโนเมตรจะเล็กกว่าเส้นผมประมาณหนึ่งแสนเท่า ดังแสดงในภาพ 1.1



ภาพ 1.1 วัตถุระดับนาโน (ยอดหทัย, 2545)

เทคโนโลยี หมายถึงสิ่งต่างๆ ที่มนุษย์เราพัฒนาขึ้นมาเพื่อช่วยในการทำงานหรือแก้ปัญหาต่างๆ เช่น อุปกรณ์ เครื่องมือ เครื่องจักร วัสดุ รวมไปถึงสิ่งของที่จับต้องไม่ได้ เช่น กระบวนการต่างๆ ดังนั้นถ้ากล่าวถึงคำว่า เทคโนโลยี จะใช้หมายถึง สิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้ความรู้ที่พ่วงค้นพบหรือพัฒนาขึ้นมา แต่อย่างไรก็ตามสิ่งประดิษฐ์โบราณ เช่น ล้อเกวียน ก็ถือว่าเป็นเทคโนโลยีเช่นเดียวกัน

ตัวอย่าง 1.1 ถ้านำอะตอมของไฮโดรเจนมาเรียงต่อกันเป็นเส้นตรงให้มีความยาว 1 นาโนเมตร จะได้กี่อะตอม

วิธีทำ เนื่องจากอะตอมของไฮโดรเจนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1 \AA

หรือ $1.1 \times 10^{-10} \text{ m}$ ซึ่งเท่ากับ $1.1 \times 10^{-1} \text{ nm}$ หรือ 0.11 nm

จาก 0.11 nm ได้จาก 1 อะตอมไฮโดรเจน

เพราะฉะนั้น 1 nm ได้จาก $\frac{1}{0.11} = 9.09$ อะตอมไฮโดรเจน

ดังนั้นต้องนำอะตอมของไฮโดรเจนมาเรียงต่อกันเป็นเส้นตรงจำนวน โดยประมาณ 9 อะตอมจึงจะมีความยาว 1 นาโนเมตร **ตอบ**

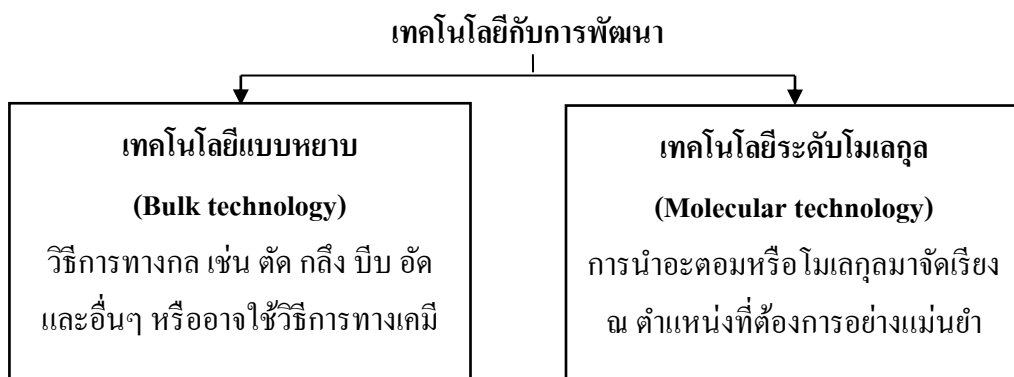
1.1.2 ความหมายของนาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยี เป็นเทคโนโลยีในการประกอบและการสร้างสิ่งต่างๆ ขึ้นจากการนำอะตอมหรือโมเลกุลมาจัดเรียงเข้าด้วยกันด้วยความแม่นยำและถูกต้องในระดับนาโน นั่นคือการจัดการวัสดุในระดับอะตอมหรือโมเลกุล เพื่อสร้างวัสดุหรืออุปกรณ์ในระดับที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่น หุ่นยนต์คอมพิวเตอร์ขนาดจิ๋ว ดังนั้นจึงเป็นเทคโนโลยีของการสร้างสิ่งของโดยการนำอะตอมมาวางต่อกันทีละตัวเพื่อให้สิ่งที่สร้างขึ้นมามีลักษณะพิเศษจากวัสดุธรรมดาทั่วไป วิชานาโนเทคโนโลยี จึงเป็นวิชาที่ได้อบรมเอาสาขาวิชาทางด้านวิทยาศาสตร์ วิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และวิทยาศาสตร์ประยุกต์เข้าไว้ด้วยกัน

จากอดีตจนถึงปัจจุบัน จะพบว่าการสร้างและการประดิษฐ์สิ่งต่างๆ ได้รับการพัฒนาขึ้นมาเรื่อยๆ ดังจะเห็นได้จากการสร้างสิ่งที่มีขนาดใหญ่ เช่น กำแพงเมืองจีน พีรามิด ปราสาทราชวังต่างๆ รวมทั้งสิ่งที่มีขนาดเล็ก เช่น โทรศัพท์ วิทยุ คอมพิวเตอร์ และโทรศัพท์ เป็นต้น ต่อมาสิ่งของเหล่านี้มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ เพื่อความสะดวกในการใช้งาน และการพกพา จนเป็นโทรศัพท์มือถืออัจฉริยะ (Smart phone) และคอมพิวเตอร์แบบกระเป๋าหิ้ว (Notebook) เป็นต้น นอกจากนี้ตัวอย่างที่เห็นได้ชัด เช่น การพัฒนาการเก็บข้อมูลที่เปลี่ยนจากการใช้แผ่นเก็บข้อมูล (Floppy disk) ซึ่งมีเนื้อที่จำกัดไม่สามารถเก็บไฟล์ขนาดใหญ่มาได้ มาเป็นการใช้แผ่นซีดี (Compact disc, CD) เพียง 1 แผ่น หรือในปัจจุบันมีแฟลชไดรฟ์ (Flash drive) ที่สามารถเก็บข้อมูลจำนวนมากๆ ได้ ด้วยเหตุนี้ นักวัสดุศาสตร์ นักวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี รวมทั้งนักวิศวกรรมศาสตร์ จึงตระหนักในความสำคัญของสิ่งที่มีขนาดเล็กแต่มีประสิทธิภาพสูง ทำให้สนใจในการศึกษาวิจัยเรื่องของนาโนเทคโนโลยีมากขึ้นในปัจจุบัน

1.2 หลักการพื้นฐานของนาโนเทคโนโลยี

สสาร ประกอบขึ้นจากอะตอมของธาตุต่างๆ ด้วยการจัดเรียงตัวของอะตอมในรูปแบบที่ต่างกัน ทำให้สามารถแยกแยะสิ่งต่างๆ ออกจากกันได้ การจัดเรียงอะตอมแบบหนึ่งอาจได้ อากาศ ดิน น้ำ หรือลม ขณะที่การจัดเรียงอะตอมอีกแบบหนึ่งอาจได้ แดง โม ฝรั่ง มัน หรือข้าว เป็นต้น จากการศึกษาการจัดเรียงอะตอมตามธรรมชาติ จึงเป็นสิ่งที่วางรากฐานของเทคโนโลยี และพบว่าเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องอาจสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ ดังนี้คือ



1.2.1 เทคโนโลยีแบบหยาบ (Bulk technology)

เป็นเทคโนโลยีที่เข้ามาตั้งแต่สมัยโบราณ ซึ่งเป็นการจัดการกับอะตอมและโมเลกุลในลักษณะที่เป็นก้อนขนาดใหญ่ด้วยวิธีการทางกล เช่น การกลึง การตัด การอัด การตัด หรือการตีขึ้นรูป และอื่นๆ ตัวอย่างเช่น การทำมิด ที่ขึ้นรูปด้วยการเผาเหล็กให้ร้อนแล้วตีขึ้นรูปจากนั้นนำไปเจียรในหรือลับให้คม ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาการจัดการกับอะตอมและโมเลกุลในระดับขนาดเล็กลง เช่น การพัฒนาให้อุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็ก แต่อุปกรณ์เหล่านี้ยังคงประกอบด้วยอะตอมนับล้านตัว และยังคงมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ถึงแม้เทคโนโลยีแบบหยาบนี้จะทำให้คอมพิวเตอร์มีขนาดเล็กลงและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น แต่การใช้เทคโนโลยีแบบหยาบในการสร้างสิ่งที่มีขนาดเล็ก จะเกิดความบกพร่องได้ง่าย ขาดความเที่ยงตรง และขาดความแม่นยำ

1.2.2 เทคโนโลยีระดับโมเลกุล (Molecular technology)

เทคโนโลยีระดับโมเลกุล หรือนาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่สามารจัดการกับอะตอมหรือโมเลกุลแต่ละตัวได้อย่างถูกต้องและเที่ยงตรง เป็นเทคโนโลยีที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ต้องใช้เครื่องมือในการจัดการกับอะตอมหรือโมเลกุล การผลิตสิ่งต่างๆ หรือจัดการกับสิ่งต่างๆ ในระดับนาโน สามารถทำได้โดยการนำอะตอมหรือโมเลกุลมาวางไว้ในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ โดยสิ่งที่ผลิตขึ้นมีขนาดเล็กหรือใหญ่ก็ได้

นาโนเทคโนโลยีมีรากฐานอยู่บนการผลิตในระดับโมเลกุล เป็นการรวมเอาหลักการทางเคมีและทางกลศาสตร์มาประยุกต์ใช้งาน ในทางเคมีโดยทั่วไปโมเลกุลเคลื่อนที่โดยการแพร่ และการชนกันของโมเลกุลในทุกตำแหน่งและในทุกทิศทาง ผลของปฏิกิริยาเคมีจึงเป็นสิ่งที่ควบคุมได้ยาก ดังนั้นการสร้างโมเลกุลสามารถใช้การสังเคราะห์ทางกล คือใช้อุปกรณ์ทางกลเพื่อช่วยในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในการทำปฏิกิริยา โดยประยุกต์ใช้หลักการทางกลศาสตร์ของการยืด และการกำหนดตำแหน่ง เข้ากับการทำปฏิกิริยาเคมี การสังเคราะห์ทางกลจึงสามารถสร้างความพิเศษที่ทำให้โมเลกุลเปลี่ยนแปลงไปและเกิดในตำแหน่งที่เที่ยงตรง และในลำดับที่เที่ยงตรง การจัดเรียงอะตอมจำนวนนับล้านถึงพันล้านอะตอมอย่างเที่ยงตรง สำหรับการสังเคราะห์ทางกลจึงเป็นสิ่งที่ต้องการ

1.3 แนวคิดการสร้างผลิตภัณฑ์ และสิ่งของระดับนาโน

ในการผลิตหรือสร้างวัตถุที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร มีวิธีการพื้นฐานอยู่ 2 วิธีคือ

1. เทคโนโลยีแบบบนลงล่าง (Top down technology)
2. เทคโนโลยีแบบล่างขึ้นบน (Bottom up technology)

เทคโนโลยีแบบบนลงล่าง หมายถึง การผลิตโครงสร้างให้มีขนาดในระดับนาโนเมตร โดยใช้เทคโนโลยีแบบหยาบ ตัวอย่างเช่น การผลิตไมโครชิพคอมพิวเตอร์

เทคโนโลยีแบบล่างขึ้นบน หมายถึง การผลิตโครงสร้างหรือผลิตสิ่งของโดยการนำอะตอมหรือโมเลกุลมาจัดเรียงหรือประกอบกันทีละอะตอมหรือทีละโมเลกุล ดังนั้นเทคโนโลยีแบบล่างขึ้นบนจึงเป็นเทคโนโลยีระดับโมเลกุลหรือนาโนเทคโนโลยี

1.4 ประวัติความเป็นมาของนาโนเทคโนโลยี

สักวันหนึ่งเราจะสามารถประกอบสิ่งต่างๆ หรือผลิตสิ่งต่างๆ ขึ้นมาจากการจัดเรียงอะตอมด้วยความแม่นยำ และเท่าที่ข้าพเจ้ารู้ไม่มีกฎทางฟิสิกส์ใดๆ แม้แต่หลักแห่งความไม่แน่นอน (Uncertainty principle) ของไฮเซนเบิร์ก ที่จะมาขัดขวางความเป็นไปได้นี้ คือคำกล่าวของ ศาสตราจารย์ริชาร์ด ฟายน์แมน (Richard Feynman) ที่ได้กล่าวไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1959 ซึ่งถือได้ว่าเป็นผู้เปิดศักราชของนาโนเทคโนโลยี และต่อมาได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์เมื่อปี ค.ศ. 1965 โดยทฤษฎีควอนตัมหลักของความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก (Werner K. Heisenberg) คือหลักการที่อธิบายถึงตำแหน่งและความเร็วของอนุภาค ที่ไม่สามารถรู้ตำแหน่งและความเร็วของอนุภาคในเวลาเดียวกันได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

ค.ศ. 1981 เกร็ด บินนิง (Gred Binning) และไฮน์ริช ร็อดเธอร์ (Heinrich Rohrer) ประสบความสำเร็จในการสร้างกล้องจุลทรรศน์กระแสน้ำอิเล็กตรอนแบบหัวอ่านส่องกราด (Scanning tunneling microscope, STM) ที่สามารถมองเห็นการจัดเรียงตัวของอะตอมของสสารต่างๆ ได้อย่างชัดเจน

เค. อีริก เดริกซ์เลอร์ (K. Eric Drexler) ถือว่าเป็นเจ้าพ่อแห่งนาโนเทคโนโลยี ผู้นิยามคำว่านาโนเทคโนโลยี โดยนาโนเทคโนโลยีในจินตนาการของเดริกซ์เลอร์ คือ ต้นไม้ที่สามารถใช้ประโยชน์จากทุกสิ่งที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต ไม่ว่าจะเป็นน้ำหรือสาร

คาร์บอนต่างๆ ที่นำไปใช้เลี้ยง ลำต้น สร้างใบ ดอก และผล โดยไม่เหลือสิ่งตกค้างใดๆ ที่เป็นพิษ ในปี ค.ศ. 1986 หนังสือชื่อ จักรกลแห่งการสร้างสรรค์ (Engines of creation) ซึ่งมีเนื้อหาทั้งหมดเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยี ที่แต่งโดย อีริก เดริกซเลอร์ ได้วางจำหน่าย และได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก

ปี ค.ศ. 2000 รัฐบาลของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ผลักดันให้เกิดโครงการริเริ่มทางนาโนเทคโนโลยีแห่งชาติขึ้นมา ทำให้ทั่วโลกเกิดกระแสตื่นตัวเกี่ยวกับการพัฒนานาโนเทคโนโลยีขึ้นอย่างมาก ดังแสดงในตาราง 1.2 ซึ่งแสดงรายชื่อนักวิทยาศาสตร์กับบทบาทต่อการพัฒนานาโนเทคโนโลยี

ตาราง 1.2 รายชื่อผู้ได้รับรางวัลโนเบล กับบทบาทต่อการพัฒนานาโนเทคโนโลยี

นักวิทยาศาสตร์	สาขา / ปี ค.ศ.	บทบาททางด้านนาโนเทคโนโลยี
- Richard Feynman	ฟิสิกส์ / 1965	บิดาแห่งนาโนเทคโนโลยี
- Robert S. Mulliken	เคมี / 1965	พัฒนาความรู้เรื่องโครงสร้างเชิงอิเล็กทรอนิกส์ และพันธะเคมี ทำให้เชื่อมโยงสมบัติทางกายภาพของสสารกับสมบัติเชิงอิเล็กทรอนิกส์
- Ernst Ruska	ฟิสิกส์ / 1986	ออกแบบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นคนแรก
- Gerd Binnig - Heinrich Rohrer	ฟิสิกส์ / 1986	ออกแบบกล้อง Scanning tunneling microscope ทำให้เห็นภาพระดับอะตอมเป็นครั้งแรก
- Donald J. Cram - Jean-Marie Lehn - Charles J. Pedersen	เคมี / 1987	พัฒนาความรู้เกี่ยวกับซูพราโมเลกุล (Supramolecules) นำไปสู่การสร้างจักรกลโมเลกุล (Molecule machine) ที่สามารถประกอบตัวเองได้ (Self assembly)
- Elias James Corey	เคมี / 1990	พัฒนากระบวนการทางทฤษฎี (Retrosynthetic analysis) ทำให้เคมีสังเคราะห์เป็นเรื่องง่ายขึ้น นำไปสู่การสังเคราะห์จักรกลนาโน โดยการช่วยเหลือจากนาโนเทคโนโลยีเชิงคำนวณ

นักวิทยาศาสตร์	สาขา / ปี ค.ศ.	บทบาททางด้านนาโนเทคโนโลยี
- Robert F. Jr. Curl - Sir Harold W. Kroto - Richard E. Smalley	เคมี / 1996	ค้นพบ buckyball (Bulky ball) และพัฒนาจักรกลนาโนแบบท่อนาโน (Nanotube) ซึ่งอาจนำไปประยุกต์ใช้ในคอมพิวเตอร์นาโน (Nanocomputer) ได้ในอนาคต
- Steven Chu - Claude Cohen Tannoudji	ฟิสิกส์ / 1997	สามารถควบคุมอะตอมด้วยแสงเลเซอร์ ซึ่งในอนาคตอาจพัฒนาให้ควบคุมจักรกลนาโนได้
- Walter Kohn - John A. Pople	เคมี / 1998	พัฒนาระเบียบวิธีการคำนวณทางกลศาสตร์ควอนตัม ทำให้สามารถทำนาย และออกแบบจักรกลนาโนได้ เป็นผู้เปิดศักราชแห่งนาโนเทคโนโลยีเชิงคำนวณ

1.5 การวิจัยและพัฒนานาโนเทคโนโลยีในต่างประเทศ

ปี ค.ศ. 2000 รัฐบาลของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ผลักดันให้เกิดโครงการริเริ่มทางนาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ ซึ่งทำให้ทั่วโลกเกิดกระแสตื่นตัวเกี่ยวกับการพัฒนานาโนเทคโนโลยีขึ้นอย่างมาก

สำหรับกลุ่มประเทศในแถบเอเชีย เช่น ประเทศญี่ปุ่น ได้จัดตั้งศูนย์วิทยาศาสตร์นาโนและนาโนเทคโนโลยีขึ้น ในมหาวิทยาลัยโอซากา มีการวิจัยด้านนาโนเทคโนโลยี และให้ความสำคัญกับนาโนเทคโนโลยีอย่างมาก ทั้งการให้ทุนการศึกษาและทุนวิจัย โดยการศึกษาในระดับปริญญาตรีของมหาวิทยาลัย ได้มีการจัดการเรียนการสอนด้านนาโนเทคโนโลยีขึ้น และมีการเรียนการสอนด้านการสร้างสรรค์อุตสาหกรรมใหม่ ที่อยู่บนพื้นฐานของวิทยาศาสตร์นาโน เช่น มหาวิทยาลัยโทโฮคุ มีการเรียนการสอนด้านวิศวกรรมการแพทย์ในอนาคต ที่อยู่บนพื้นฐานของนาโนเทคโนโลยีชีวภาพ

1.6 การวิจัยและพัฒนานาโนเทคโนโลยีในประเทศไทย

ประเทศไทยเริ่มดำเนินการวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์นาโนทางด้านกระบวนการเชิงตัวเลข (Computational nanoscience) เป็นครั้งแรกโดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรเกียรติ์

เกิดเจริญ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล เมื่อปี พ.ศ. 2538 ซึ่งขณะนั้น บุคคลส่วนใหญ่ในเมืองไทยยังคิดว่า นาโนเทคโนโลยีเป็นเรื่องที่เป็นไปไม่ได้ ต่อมาได้มีการ จัดตั้ง ศูนย์นาโนเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหิดล และดร.ธีรเกียรติ์ เกิดเจริญ ได้ทำการวิจัย เกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยีเรื่อยมา มีงานวิจัยทางนาโนเทคโนโลยีที่หลากหลาย มีหัวข้องานวิจัย ทางนาโนเทคโนโลยี ที่น่าสนใจ เช่น โพลีเมอร์นำไฟฟ้า (Conductive polymers) เซ็นเซอร์ ตรวจโรค ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) ระบบรับรู้กลิ่น และอุปกรณ์แปลงแสงอินทรีย์ เป็นต้น

ต่อมาปี พ.ศ. 2544 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) อนุมัติให้ดำเนินการ วิจัยทางด้านอุปกรณ์โมเลกุล นับเป็นโครงการวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์นาโนโครงการแรกของ ประเทศไทยที่ได้รับการสนับสนุนจากหน่วยงานระดับชาติ

ปี พ.ศ. 2546 คณะรัฐมนตรีอนุมัติจัดตั้งศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ และได้จัดทำ แผนที่นำทาง (Road map) อย่างเป็นระบบแบบแผนทางด้านนาโนเทคโนโลยี โดยรวม หน่วยงานต่างๆ ทุกกระทรวงเพื่อบูรณาการสร้างความเข้มแข็งให้อุตสาหกรรมไทยโดยใช้นาโนเทคโนโลยี

ปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีในประเทศไทยได้รับความสนใจในการศึกษาวิจัยมากขึ้น เพื่อการพัฒนาทั้งในภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรม โทรคมนาคม การสื่อสาร และในทาง การแพทย์ โดยการสนับสนุนทุนวิจัยจากรัฐบาลให้กับนักวิจัย รวมทั้งอาจารย์ในมหาวิทยาลัย และนักวิชาการด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเพิ่มมากขึ้น

บรรณานุกรม

1. ชีร์เกียรติ์ เกิดเจริญ. 2551. นาโนเทคโนโลยีความเป็นไปได้และทิศทางในอนาคต. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://nanotech.sc.mahidol.ac.th/index.html> (25 ตุลาคม 2554)
2. ชีร์เกียรติ์ เกิดเจริญ. 2547. บทบาทของประเทศไทยกับโลกนาโนเทคโนโลยี. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://nanotech.sc.mahidol.ac.th/nano/Thainano.pdf> (1 พฤศจิกายน 2554)
3. ชีร์เกียรติ์ เกิดเจริญ. 2543. สถานการณ์นาโนศาสตร์ในประเทศไทย. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://nanotech.sc.mahidol.ac.th/course/> (1 พฤศจิกายน 2554)
4. ผู้จัดการออนไลน์. 2549. ขายแล้ว!! เส้นนาโนไม่ต้องซัก-ยับยั้งแบคทีเรีย. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.manager.co.th/Science/ViewNews.aspx?NewsID=9490000054757> (25 ตุลาคม 2554)
5. ผู้จัดการออนไลน์. 2548. นักวิจัยไทยเตรียมผลิตพลาสติกออร์ยาเส้นใยนาโนผสมยาปฏิชีวนะรักษาแผลเบาหวาน. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.manager.co.th/Science/ViewNews.aspx?NewsID=9480000151628&TabID=2&> (25 ตุลาคม 2554)
6. ผู้จัดการออนไลน์. 2548. มหิตลผลิตหลอดไฟนาโนทดแทนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.manager.co.th/Science/ViewNews.aspx?NewsID=9480000005899> (25 ตุลาคม 2554)
7. ผู้จัดการออนไลน์. 2548. สนข. – จุฬาฯ โชว์ “เส้นกีฟานาโน” ตัวแรกของไทย. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.manager.co.th/Science/ViewNews.aspx?NewsID=9480000100580> (25 ตุลาคม 2554)
8. ยอดททัย เทพธรานนท์, ประมวล ตั้งบริบูรณ์รัตน์. 2545. นาโนเทคโนโลยี...เทคโนโลยีซูเปอร์จิว. กรุงเทพฯ: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 102 น.

9. รอฮีม ปรามาท. 2548. **นาโนเทคโนโลยี นวัตกรรมจิวปฏิวัติโลก**. 8. กรุงเทพฯ: มติชน. 206 น.
10. วิลาส นิรันดร์สุขศิริ. 2540. **นาโนเทคโนโลยี สร้างโลกที่ดีกว่า...ที่ละอะตอม**. อัพเดท 12(134): 56–62.
11. ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2554. **ความเป็นมาของนาโนเทคโนโลยี**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.nanotec.or.th/nanotec/index.php#> (25 ตุลาคม 2554)
12. สมนึก บุญพาไสว. 2545. **นาโนเทคโนโลยี เทคโนโลยีในศตวรรษที่ 21**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://design.ipst.ac.th/docu/photo/D008.pdf> (1 พฤศจิกายน 2554)
13. สรินทร ลีมปนาท. 2547. **นาโนเทคโนโลยี**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.material.chula.ac.th/RADIO47/May/radio5-1.htm> (25 ตุลาคม 2554)
14. อติสร เตือนตรานนท์. 2548. **นาโนเทคโนโลยี จิวแต่แจ้ว**. กรุงเทพฯ: เนชั่นบุ๊คส์. 260 น.
15. Bruus, H. 2004. **Introduction to nanotechnology**. Denmark: Department of Micro and Nanotechnology. 97 pages.
16. Drexler, K.E. 2005. **Engines of Creation: The coming era of nanotechnology**. [Online]. Available <http://www.foresight.org/EOC/Engines.pdf> (1 November 2011)
17. Feynman, R.P. 2003. **Handbook of Nanoscience, Engineering, and technology: there's plenty of room at the bottom: an invitation to enter a new field of physics**, CRC Pres LLC.
18. Fujita, H., Toshiyoshi, H., Hashigushi, G., Wada, Y. 2001. Micromachined tools for nano technology, **RIKEN Review** 36: 12-15.
19. Goddard, W.A., Brenner, D., Lyshevski, S.E., Iafrate, G.J. 2003. **Handbook of nanoscience, engineering and technology**. [Online]. Available <http://books.google.co.th/books?id=dJ-jIv1Hv2EC&pg=PA3&lpg=PA3&dq=Handbook+of+Nanoscience,+Engineering,+and+Technology:+There%E2%80%99s+Plenty+of+Room+at+the+Bottom:+An+Invitation+to+Enter+a+New+Field+of+Physics&source>

[=bl&ots=-1KQn8riEj&sig=wYNjKqMLigTsDwj1OddJJReIGMc&hl=th&sa=X&ei=AOGvUsj6NsGkrQe8i4DQDA&ved=0CDcQ6AEwAQ#v=onepage&q=Handbook%20of%20Nanoscience%2C%20Engineering%2C%20and%20Technology%3A%20There%E2%80%99s%20Plenty%20of%20Room%20at%20the%20Bottom%3A%20An%20Invitation%20to%20Enter%20a%20New%20Field%20of%20Physics&f=false](http://www.21stcentury.co.uk/science/nanotechnology.asp) (1 พฤศจิกายน 2554)

20. Merkle, R.C. 2000. **Nanotechnology the manufacturing of 21st century**. [Online]. Available <http://www.21stcentury.co.uk/science/nanotechnology.asp> (1 November 2011)
21. Minsky, M. 2005. **Engines of creation: the coming era of nanotechnology**. [Online]. Available <http://www.foresight.org/EOC/Engines.pdf> (1 November 2011)
22. Smalley, R.E. 1999. **Nanotechnology: prepared written statement and supplemental material**. [Online]. Available http://www.house.gov/science/smalley_062299.htm (1 November 2011)
23. Uplaznik, M. 2002. **Introduction to nanotechnology-soft lithography**, University of Ljubljana, 23 page.

คำถามท้ายบท

- 1.1 วัสดุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโน (Nanoscale) สำคัญอย่างไร มนุษย์เริ่มใช้ประโยชน์จากวิทยาศาสตร์ระดับนาโนตั้งแต่สมัยใด และใช้ประดิษฐ์สิ่งใดบ้าง และสิ่งนั้นมีสมบัติพิเศษอย่างไร
- 1.2 บุคคลที่ได้รับการยกย่องว่าเปรียบเสมือนบิดาแห่งนาโนเทคโนโลยีคือใคร
- 1.3 กลุ่มนักวิทยาศาสตร์ที่สร้างเครื่อง STM ที่เป็นจุดเริ่มต้นความเป็นไปได้ในการจัดเรียงอะตอม ได้แก่บุคคลใดบ้าง
- 1.4 โครงสร้างนาโนใดที่ถูกนำมาใช้เป็นครั้งแรกโดยมนุษย์เป็นผู้สังเคราะห์
- 1.5 การค้นพบโครงสร้างนาโนแห่งชีวิต ซึ่งก็คือ ดีเอ็นเอ ครั้งแรกนั้น เกิดขึ้นได้ด้วยฝีมือของเหล่านักวิทยาศาสตร์ท่านใดบ้าง
- 1.6 อธิบายความแตกต่างระหว่างการวิจัยทางวิทยาศาสตร์และการวิจัยทางเทคโนโลยี
- 1.7 เทคโนโลยีแบบขยายและเทคโนโลยีระดับโมเลกุลแตกต่างกันอย่างไร
- 1.8 ประเทศไทยมีการวิจัยและพัฒนาด้านนาโนเทคโนโลยีแตกต่างอย่างไรกับต่างประเทศ
- 1.9 อนุภาคทรงกลมรัศมี 1 ไมโครเมตร หากนำมาย่อเป็นทรงกลมใหม่ให้มีรัศมี 1 นาโนเมตร จะได้กี่ลูก และจงเปรียบเทียบพื้นที่ผิวทั้งหมดก่อน และหลังย่ออนุภาคนี้ (1000 ลูก)

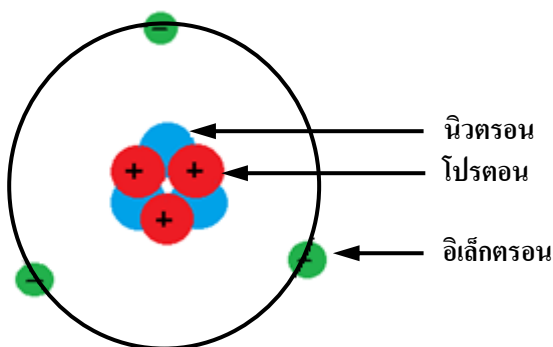
บทที่ 2

หลักการทางวิทยาศาสตร์พื้นฐานสำหรับนาโนเทคโนโลยี:

- 2.1 อะตอมและโมเลกุล
- 2.2 ฟิสิกส์ของอะตอม และกลศาสตร์ควอนตัม
 - 2.2.1 กลศาสตร์คลาสสิก (Classical mechanics) หรือ กลศาสตร์ของนิวตัน (Newtonian mechanics)
 - 2.2.2 กลศาสตร์ควอนตัม (Quantum mechanics)
 - 2.2.3 หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก (Heisenberg uncertainty principle)
- 2.3 หลักการทางวิทยาศาสตร์
 - 2.3.1 หลักการทางแสง
 - 2.3.2 หลักการเชิงกล
 - 2.3.3 หลักการทางไฟฟ้า
 - 2.3.4 หลักการทางแม่เหล็ก
- 2.4 ระบบชีวภาพ
- 2.5 การตรวจจับโมเลกุล

2.1 อะตอมและโมเลกุล

ลูซิฟุส (Leucippus) และดีโมคริตุส (Democritus) นักปราชญ์ชาวกรีกโบราณ เรียกหน่วยที่เล็กที่สุดของสสาร ที่ไม่สามารถแบ่งแยกต่อไปได้อีก ว่า อะตอม (Atom) ซึ่งเป็นคำที่มาจากภาษากรีก แปลว่าสิ่งที่เล็กที่สุด โดยทั้งคู่พยายามศึกษาเกี่ยวกับวัตถุที่มีขนาดเล็ก (ฟิสิกส์ระดับจุลภาค; Microscopic) และมีแนวความคิดเกี่ยวกับโครงสร้างของสสารว่า สสารทั้งหลายประกอบด้วยอนุภาคที่เล็กที่สุด ไม่สามารถมองเห็นได้ และไม่สามารถแบ่งแยกให้เล็กลงได้อีก อะตอมประกอบด้วย นิวตรอน (Neutron; n) โปรตอน (Proton; p) และอิเล็กตรอน (Electron, e) มารวมกัน โดยนิวตรอนเป็นกลางทางไฟฟ้า โปรตอนมีประจุบวก (+) และอิเล็กตรอนมีประจุลบ (-) ดังแสดงในภาพ 2.1



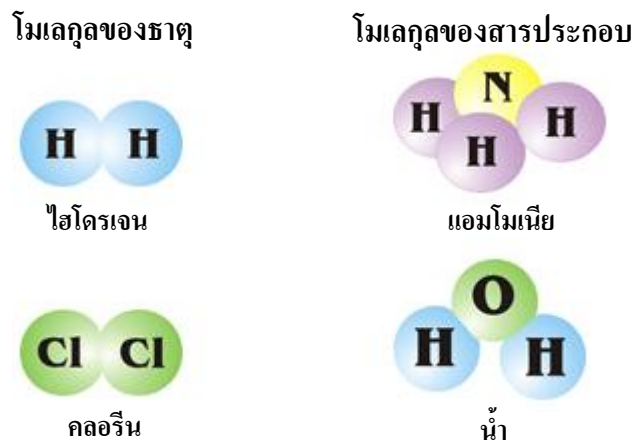
ภาพ 2.1 แบบจำลองอะตอม (บทเรียนเคมีออนไลน์. 2554)

จากภาพ 2.1 แสดงแบบจำลองอะตอม ประกอบด้วยโปรตอน และนิวตรอนอยู่ตรงกลาง เรียกว่านิวเคลียสของอะตอม และอิเล็กตรอนอยู่รอบๆ อะตอม เนื่องจากนิวเคลียสของอะตอม และอิเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้าต่างกัน แรงทางแม่เหล็กไฟฟ้าจึงดึงดูด โครงสร้างของอะตอมไว้ด้วยกัน มวลทั้งหมดของอะตอมรวมกันอยู่ในนิวเคลียสซึ่งเป็นส่วนเล็กๆ ของอะตอม ในอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า (ไม่มีประจุไฟฟ้า) จำนวนอิเล็กตรอนจะสมดุลกับประจุในนิวเคลียส แต่ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนไม่สมดุลกับประจุในนิวเคลียส เนื่องจากอิเล็กตรอนจะอยู่บริเวณรอบนิวเคลียส โดยทั่วไปอะตอมที่มีจำนวนอิเล็กตรอนมากกว่าจะมี

ขนาดใหญ่กว่าอะตอมที่มีอิเล็กตรอนน้อย ซึ่งถ้าจำนวนอิเล็กตรอนไม่เท่ากับประจุในนิวเคลียสหรือจำนวนโปรตอน อะตอมนั้นจะมีประจุไฟฟ้าหรือเรียกว่าไอออน (Ion) ถ้ามีอิเล็กตรอนมากกว่าโปรตอนอะตอมจะมีประจุไฟฟ้าลบ เรียกว่าไอออนลบ (Negative ion) ในทางกลับกันถ้าอิเล็กตรอนน้อยกว่าโปรตอนอะตอมจะมีประจุไฟฟ้าบวก (Positive ion)

อะตอมทุกชนิดมีขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 0.1 นาโนเมตร อะตอมฮีเลียม (He) มีขนาดมีขนาดประมาณ 0.1 นาโนเมตร และอะตอมยูเรเนียม (U) มีขนาดประมาณ 0.22 นาโนเมตร อะตอมเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของทุกสิ่งซึ่งเริ่มต้นขึ้นตอนแรกโดยการรวมตัวกันเป็นโมเลกุล

โมเลกุล (Molecule) คือ การประกอบกันของอะตอมหลายๆ อะตอม ยึดติดกันตามโครงสร้างของอะตอม เพื่อทำหน้าที่อย่างใดอย่างหนึ่ง โดยยังคงสมบัติของสารนั้นไว้ ภาพ 2.2 แสดงตัวอย่างของโมเลกุลของสารบางชนิด



ภาพ 2.2 โมเลกุลของสารบางชนิด (บทเรียนเคมีออนไลน์, 2554)

การยึดติดกันของอะตอมมีหลายลักษณะ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปฏิสัมพันธ์ระหว่างอิเล็กตรอนของแต่ละอะตอมหรือไอออน ไอออนบวกจะดึงดูดไอออนลบด้วยแรงทางไฟฟ้า โดยเป็นไปตามกฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law) การยึดติดกันและการสลายของอะตอมเป็นปฏิกิริยาเคมี

เนื่องจากอิเล็กตรอนทำหน้าที่ยึดอะตอมให้ติดกัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงมีส่วนสำคัญในการกำหนดสมบัติทางเคมีของอะตอมและโมเลกุล ถ้าหากอิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลงไป สมบัติทางเคมีของอะตอมและโมเลกุลจะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ยกตัวอย่างเช่น อะตอมของโซเดียมและคลอไรด์ ถ้าปรีโภกเข้าไปในลักษณะที่แยกเป็นอะตอมแต่ละชนิดจะเป็นพิษต่อร่างกาย แต่เมื่อทั้งสองรวมกันเป็นโซเดียมคลอไรด์ (เกลือแกง) จะไม่เป็นพิษต่อร่างกาย

กฎของคูลอมบ์ คือ แรงระหว่างวัตถุที่มีประจุไฟฟ้าจะแปรผันโดยตรงกับขนาดของประจุและจะแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างประจุกกำลังสอง ซึ่งเป็นได้ทั้งแรงดูดและแรงผลัก ถ้าเป็นประจุนิคมเดียวกันจะเกิดแรงผลักกัน และถ้าเป็นประจุต่างชนิดกันจะเกิดแรงดูดกัน สมการตามกฎของคูลอมบ์ มีดังนี้คือ

$$F \propto \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$F = \frac{k Q_1 Q_2}{r^2} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

เมื่อ Q_1 คือ ประจุไฟฟ้าของวัตถุที่ 1

Q_2 คือ ประจุไฟฟ้าของวัตถุที่ 2

r คือ ระยะห่างระหว่างประจุ

k คือ ค่าคงตัวของคูลอมบ์ (Coulomb constance)

มีค่าเท่ากับ $9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ ในอากาศหรือสุญญากาศ

หรือ $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ เมื่อ ϵ คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Permittivity) ของตัวกลาง

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ $8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$

ตัวอย่าง 2.1 อิเล็กตรอน 6.02×10^{23} อะตอม มีประจุ -1.6×10^{-19} คูโลมบ์ และไฮโดรเจนมีมวล 1 กรัม จะต้องเคลื่อนอิเล็กตรอนห่างจากอะตอมไฮโดรเจนเท่าใด แรงดึงดูดระหว่างประจุจึงจะเท่ากับน้ำหนักของไฮโดรเจน 1 อะตอม

วิธีทำ น้ำหนักของไฮโดรเจน 1 อะตอม เท่ากับ 1.66×10^{-26} นิวตัน

สมมติอิเล็กตรอนอยู่ห่างจากอะตอมไฮโดรเจน a เมตร แล้วเกิดแรงดึงดูด เท่ากับน้ำหนักของไฮโดรเจน 1 อะตอม แทนค่าลงในสมการ

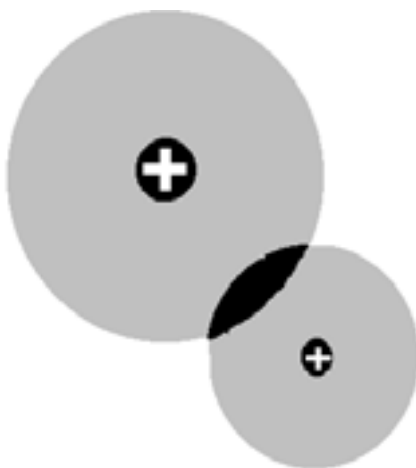


อันตรกิริยาโคเวเลนต์ (Covalent interactions) และนอนโคเวเลนต์ (Noncovalent interactions)

พันธะทางเคมี (Bond) หรือลักษณะการยึดติดกันของอะตอม เป็นหัวใจสำคัญของนาโนเทคโนโลยี โดยพันธะทางเคมีทำให้อะตอมและไอออนรวมตัวกันสร้างเป็นโมเลกุลแบบต่างๆ นอกจากนี้พันธะทางเคมียังสามารถทำหน้าที่เป็นกลไกขนาดจิ๋ว เช่น ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างสำหรับจักรกลในระดับนาโน ซึ่งโมเลกุลทำหน้าที่เป็นจักรกลระดับนาโน ดังนั้นพันธะเคมีจึงเป็นโครงสร้างสำหรับจักรกล ซึ่งเป็นกลไกส่วนหนึ่งของจักรกลนาโน

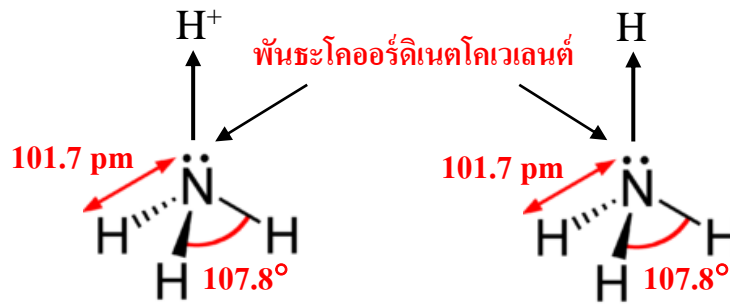
อันตรกิริยาโคเวเลนต์ (Covalent interactions) คือ อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นจากการซ้อนทับกันบางส่วนของ Occupied orbitals ของอะตอม ดังแสดงในภาพ 2.3 อันซึ่งมีการใช้คู่ของอิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างอะตอม เรียกว่า พันธะโคเวเลนต์ (Covalent bonds) ซึ่งมีความสำคัญในการศึกษาโมเลกุลขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ในทางตรงกันข้ามอันตรกิริยานอนโคเวเลนต์ (Noncovalent interactions) การซ้อนทับกันจะไม่เกิดขึ้น จัดเป็นอันตรกิริยา

ระหว่างโมเลกุล (Intermolecular interactions) หรือแรงระหว่างโมเลกุล (Intermolecular forces) โดยมากแล้วมักจะพบในโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ซึ่งเกิดจากแรงไฟฟ้าสถิต อันตรกิริยานอนโคเวเลนต์มีความสำคัญในการศึกษาโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecules) และในเคมีซูปราโมเลกูลาร์ (Supramolecular chemistry)



ภาพ 2.3 ลักษณะการเกิดพันธะโคเวเลนต์ระหว่างอะตอม (Mansoori, 2004)

จำนวนของพันธะโคเวเลนต์ที่เกิดขึ้นในอะตอมขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอนนอกสุด (Valence electrons) ของอะตอม ถ้ามีการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน 1 คู่ (Single pair) เรียกพันธะที่เกิดขึ้นว่า พันธะเดี่ยว (Single bond) ถ้ามีการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน 2 คู่ (Double pair) เรียกพันธะที่เกิดขึ้นว่า พันธะคู่ (Double bond) และถ้ามีการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน 3 คู่ (Triple pair) เรียกพันธะที่เกิดขึ้นว่า พันธะคู่ (Triple bond) ในกรณีของพันธะโคเวเลนต์ที่เกิดการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน โดยที่อิเล็กตรอนนั้นมาจากอะตอมใดอะตอมหนึ่งเรียกว่า พันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์ (Coordinate covalent bonds) ยกตัวอย่างการเกิดพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์ ระหว่าง N-H ในแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ดังแสดงในภาพ 2.4



ภาพ 2.4 พันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์ ระหว่าง N-H ในแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) (บทเรียนเคมีออนไลน์, 2554)

อันตรกิริยาโคเวเลนต์แข็งแรงกว่าอันตรกิริยานอนโคเวเลนต์ อันตรกิริยาแบบอ่อนๆ ของนอนโคเวเลนต์ได้รับการยอมรับครั้งแรก โดย J.D. Van der Waals เมื่อศตวรรษที่ 19 อันตรกิริยาโคเวเลนต์มีช่วงความยาวพันธะที่สั้น (Short range) น้อยกว่า 0.2 นาโนเมตร ในขณะที่อันตรกิริยานอนโคเวเลนต์มีช่วงความยาวพันธะที่ยาวกว่า (Long range) แต่ยังคงอยู่ในช่วงนาโนเมตร

ตาราง 2.1 ความแตกต่างระหว่างอันตรกิริยาโคเวเลนต์ และนอนโคเวเลนต์

ชนิดของอันตรกิริยา (Interaction type)	โคเวเลนต์ (Covalent)	นอนโคเวเลนต์ (Noncovalent)
ชนิดของพันธะ (Bond type)	โคเวเลนต์ (Covalent bonds)	แวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals), พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond)
พลังงาน (kcal/mol)	25-200	0.1-5
ความเสถียร (Stability)	เสถียร	เสถียรน้อย

พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) คือ พันธะที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของไฮโดรเจนอะตอมที่สร้างพันธะโคเวเลนต์กับอะตอมที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี

(En) สูงมากๆ เช่น ฟลูออรีน (F) ออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N) ซึ่งมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีประมาณ 3.98 3.44 และ 3.04 ตามลำดับ แล้วเกิดพันธะโคเวเลนต์แบบมีขั้วชนิดมีสภาพขั้วแรงมากขึ้น

แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) คือ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลแบบอ่อนๆ ที่ช่วยยึดโมเลกุลเข้าด้วยกัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้ คือ

- แรง Dipole-dipole คือ แรงที่เกิดจากการกระทำระหว่างโมเลกุลแบบมีขั้วซึ่งมีไดโพลแบบถาวร ซึ่งขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวสัมพัทธ์ของโมเลกุล และตำแหน่งที่อยู่

- แรง Dipole-induced dipole คือ แรงจากโมเลกุลที่มีขั้วที่เกิดการเหนี่ยวนำให้โมเลกุลหรืออะตอมตัวอื่นมีขั้วด้วย เกิดแรงกระทำต่อกันของอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ซึ่งแรงนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสามารถในการเกิดสภาพมีขั้ว (Polarizability) ของโมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำ โดยทั่วไปอะตอมหรือโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ จะมีความสามารถในการเกิดสภาพมีขั้วสูงกว่าอะตอมหรือโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก

- แรง London คือ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้วด้วยกัน โดยปกติโมเลกุลที่ไม่มีขั้วจะประพฤติตัวเป็นกลางในบางครั้ง เนื่องจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปรวมอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของอะตอมหรือโมเลกุลทำให้เกิดสภาพขั้วชั่วคราวขึ้น

2.2 พิสูจน์ของอะตอม และกลศาสตร์ควอนตัม

พิสูจน์ของอะตอม และกลศาสตร์ควอนตัม นับได้ว่าเป็นจุดเปลี่ยนของเทคโนโลยีแบบหยาบ ไปสู่เทคโนโลยีระดับโมเลกุล (อธิบายไว้ในบทที่ 1) กลศาสตร์ควอนตัม เกี่ยวข้องกับสาขาวิชาฟิสิกส์ และสาขาวิชาเคมี กล่าวคือหากไม่มีกลศาสตร์ควอนตัมก็ไม่มีเคมี เพราะไม่สามารถอธิบายสมบัติในระดับอะตอมและโมเลกุลได้ นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับสาขาวิชาชีววิทยา และสาขาวิชาชีววิทยาระดับโมเลกุล โดยปัจจุบันสาขาวิชานี้ทำให้เกิดความเข้าใจต่อกลไกที่จะนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพมากขึ้นซึ่งจะช่วยทำให้มนุษย์มีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น

2.2.1 กลศาสตร์คลาสสิก (Classical mechanics) หรือกลศาสตร์ของนิวตัน (Newtonian mechanics)

เซอร์ ไอแซก นิวตัน (Sir Isaac Newton) นักคณิตศาสตร์ชาวอังกฤษ สามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของวัตถุต่างๆ ได้สำเร็จ ซึ่งคำอธิบายเหล่านั้นต่อมาเรียกกันว่า ทฤษฎีกลศาสตร์คลาสสิก (Classical mechanics) หรือกลศาสตร์ของนิวตัน (Newtonian mechanics) เป็นหลักสำคัญในการอธิบายปรากฏการณ์ระดับมหภาค (Macroscopic) ของการเคลื่อนที่ของวัตถุใดๆ ทั้งที่อยู่บนโลกจนถึงวัตถุทางดาราศาสตร์ ปรากฏการณ์ส่วนใหญ่สามารถสังเกตได้โดยตรงหรือจากสถานการณ์ที่จำลองขึ้นด้วยเครื่องมืออย่างง่าย ในกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันเป็นการศึกษาและอธิบายการเคลื่อนที่ของวัตถุในเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) โดยกำหนดตำแหน่งและความเร็วของวัตถุทั้งหมดเป็นฟังก์ชันของเวลา และถือว่าปริมาณต่างๆ เช่น ตำแหน่ง มวล ความเร็ว และความเร่งของอนุภาค สามารถวัดค่าได้แน่นอน กลศาสตร์นิวตันใช้ได้จริง และอธิบายได้อย่างถูกต้องสำหรับพฤติกรรมเคลื่อนที่ของวัตถุ และค่าที่วัดได้ของปริมาณต่างๆ ที่สังเกตซึ่งตรงกับการคำนวณ

ระบบมหภาคสามารถใช้แนวความคิด และทฤษฎีทางกลศาสตร์คลาสสิกอธิบายได้เป็นอย่างดีและถูกต้อง แต่สำหรับระบบจุลภาค (Microscopic) เมื่อนำแนวความคิดและทฤษฎีทางกลศาสตร์คลาสสิกมาศึกษา และประยุกต์ใช้ ผลที่ได้ไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงหรือตรงกับความเป็นจริงเพียงบางส่วนหรือไม่สามารถอธิบายได้ ยกตัวอย่างเช่น เมื่อนำทฤษฎีทางกลศาสตร์คลาสสิกมาอธิบายแบบจำลองของอะตอม ซึ่งเกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอน ที่มีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งคลื่น และอนุภาค ปรากฏว่าไม่มีแบบจำลองใดให้ผลสอดคล้องกับความเป็นจริง ดังนั้นทฤษฎีกลศาสตร์คลาสสิกไม่สามารถใช้ได้ทุกสถานการณ์ ดังเช่นวัตถุที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเข้าใกล้ความเร็วแสง จะไม่สามารถอธิบายการเคลื่อนที่ที่มีความเร็วเข้าใกล้แสงได้ จะต้องใช้ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษของไอน์สไตน์ (Einstein's special theory of relativity) มาอธิบาย และถ้าวัตถุนั้นมีขนาดเล็กถึงระดับอะตอม (เช่น อิเล็กตรอนในอะตอม) จะต้องใช้กลศาสตร์ควอนตัมมาอธิบาย

2.2.2 กลศาสตร์ควอนตัม (Quantum mechanics)

กลศาสตร์ควอนตัมเป็นแนวคิดที่ครอบคลุมหลายสิ่งที่น่าสนใจ และท้าทาย โดยเฉพาะในระดับที่เล็กมาก พลังงานและประจุที่สสารได้รับจะเป็นก้อนพลังงานที่เรียกว่า ควอนตา (Quanta) ซึ่งเป็นพหุพจน์ของควอนตัม โดยการได้รับพลังงานจะรับทีละกลุ่มก้อนพลังงาน

กลศาสตร์ควอนตัมจึงสามารถอธิบายวัตถุในระดับจุลภาคได้ เช่นการศึกษาอะตอมและโมเลกุล กลศาสตร์ควอนตัมจึงถูกนำไปใช้เป็นหลักการพื้นฐานในการอธิบายพฤติกรรมหรือสมบัติของโครงสร้างนาโนหลายๆ ด้าน ตัวอย่างเช่น การกำหนดขนาดของสายส่งกระแสว่าจะมีขนาดเล็กสุดเท่าใด โดยที่ยังสามารถส่งประจุไฟฟ้าได้ หรือจะสามารถให้พลังงานแก่โมเลกุลได้มากเท่าใดโดยไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะของประจุ กลศาสตร์ควอนตัมมีความสำคัญต่อนาโนเทคโนโลยีหลายๆ ด้าน รวมทั้งทางด้านเชิงแสง หรือออปติกส์ (Optics) ซึ่งได้แก่ การที่แสงมีปฏิสัมพันธ์กับวัตถุ ตัวอย่างเช่น โมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีชื่อว่า ฟทาโลไซยานิน (Phthalocyanin) เป็นตัวทำให้เกิดสีน้ำเงินในกางเกงยีน เมื่อเปลี่ยนโครงสร้างเรขาคณิตหรือโครงสร้างทางเคมีจะทำให้กลายเป็นสีเขียวหรือสีม่วง การเปลี่ยนแปลงสีเกิดจากขนาดของควอนตัมแสงที่มีปฏิสัมพันธ์กับโมเลกุลที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งส่งผลต่อการรับภาพสีของสายตา เช่นเดียวกับการเปล่งสีเขียวหรือเหลืองของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งขึ้นอยู่กับโมเลกุลหรือโครงสร้างนาโนที่ตัวหลอด หรือการมองเห็นทองมีสีเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีขนาดเล็กลงในระดับนาโน เนื่องจากการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นหรือช่วงสีที่ต่างออกไป

2.2.2.1 ทฤษฎีควอนตัม (Quantum theory)

ในวิชาเคมีใช้อธิบายโครงสร้างภายในอะตอมและบทบาทของอิเล็กตรอนทำให้ทราบสมบัติของสารทั้งหมดในปฏิกิริยาเคมี เช่น

- พลังงานของอิเล็กตรอน
- การจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอน
- จำนวนอิเล็กตรอนในอะตอม

ควอนตัม (Quantum) คือ พลังงานปริมาณที่น้อยที่สุดที่เปล่งออกมา (หรือดูดกลืน) ในรูปการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave, EM) ประกอบด้วย สนามไฟฟ้า (Electric field) และสนามแม่เหล็ก (Magnetic field) ที่มีความถี่ (ν) และความยาวคลื่น (λ) เดียวกัน จึงมีอัตราเร็วเท่ากัน (c) แต่เคลื่อนที่ไปในระนาบที่ตั้งฉากกัน

2.2.2.2 ความเป็นมาของควอนตัม

ตาราง 2.2 นักวิทยาศาสตร์กับแนวคิดทางควอนตัม

ปี ค.ศ.	นักวิทยาศาสตร์	แนวคิด
1873	Maxwel	แสงในช่วงที่มองเห็นได้ (Visible light) ประกอบด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีทั้งสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตั้งฉากกัน
1900	Planck	อะตอมแลโมเลกุลสามารถเปล่ง (หรือดูดกลืน) พลังงานได้เฉพาะบางค่าเท่านั้น และพลังงานที่เปล่งออกมามีลักษณะคล้ายกลุ่มก้อนพลังงาน เรียกปริมาณของพลังงานที่น้อยที่สุดที่เปล่งออกมา (หรือดูดกลืน) ในรูปการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าว่า ควอนตัม (Quantum)
1905	Einstein	แสงที่มีความถี่จำเพาะค่าหนึ่งตกกระทบผิวโลหะทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระวิ่งเข้าหาขั้วบวก เกิดการเคลื่อนที่ของ อิเล็กตรอน ซึ่งปรากฏการณ์นี้ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีคลื่นแสง โดยกล่าวว่าแสงไม่ใช่คลื่น และเรียกอนุภาคของแสงว่าโฟตอน (Photon)
1913	Bohr	สเปกตรัมการเปล่งแสง (Emission spectrum) ของอะตอมไฮโดรเจน คือ แถบการแผ่รังสีของวัตถุเมื่อมีการกระตุ้นด้วยพลังงานโดย <ul style="list-style-type: none"> - อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นวงโคจร (Orbit) แบบไม่จำกัดจำนวน เป็นรูปทรงกลม มีรัศมีแน่นอน และพลังงานมีค่าที่แน่นอน - พลังงานอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ในวงโคจรที่ไกลขึ้นดังนั้นถ้าอิเล็กตรอนจะกลับเข้าสู่วงโคจรเดิมจะต้องแผ่รังสีออกมาในรูปโฟตอน
1924	de Broglie	อิเล็กตรอนมีสมบัติเป็นได้ทั้งคลื่น และอนุภาคซึ่งถูกต้องในกรณีของอะตอมของไฮโดรเจน แต่ไม่สามารถอธิบายกรณีอะตอมที่มีอิเล็กตรอนมากกว่า 1 ตัว
1926	Schrodinger	พิจารณาอิเล็กตรอนในเชิงกลศาสตร์ควอนตัม (Quantum mechanics) อธิบายพฤติกรรมของอนุภาค ที่มีมวล (m) และคลื่น ในรูปของฟังก์ชันคลื่น (Wave function, Ψ)

สำหรับอนุภาคมวล (m) ที่มีพลังงานศักย์ U(x) เคลื่อนที่ในหนึ่งมิติตามแกน x ด้วยพลังงาน E มีรูปแบบของสมการชโรดิงเจอร์ เป็นดังนี้

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} + U(x)\varphi(x) \right) = E\varphi(x) \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

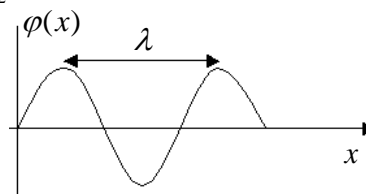
เมื่อ $U(x) = 0$

ดังนั้น $\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} \right) = E\varphi(x)$

$$\varphi(x) = \frac{-\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} \frac{1}{E}$$

$$\varphi(x) = \frac{-1}{k^2} \frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2}; k = \left(\frac{2mE}{\hbar^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\varphi(x) = \sin(kx)$$



$$\varphi(x) = \sin \frac{2\pi x}{\lambda}; k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\varphi(x) = \sin \frac{2\pi p x}{h}; \lambda = \frac{h}{p} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

- เมื่อ φ คือ ฟังก์ชันคลื่น (Wave function)
- p คือ โมเมนตัม (Momentum)
- h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} J.s
- λ คือ ความยาวคลื่น (Wavelength)

กำลังสองของฟังก์ชันคลื่น φ^2 แสดงความน่าจะเป็น (Probability) ในการพบอิเล็กตรอนในที่ว่าง (Space) ถ้ามีค่ามากแสดงว่ามีโอกาสในการพบอิเล็กตรอนมาก สมการนี้ใช้เป็นข้อสรุปว่า อิเล็กตรอนเป็นได้ทั้งอนุภาคและคลื่น และระบุได้ว่าอิเล็กตรอนมีตำแหน่งไม่

แน่นรอบนิวเคลียส (Nucleus) ดังนั้นจึงเรียกบริเวณที่พบอิเล็กตรอน ณ บริเวณหนึ่งในอะตอมว่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน (Electron density) หรือกลุ่มเมฆอิเล็กตรอน (Electron cloud) ซึ่งต่อมาเรียกว่า ออร์บิทัล (Orbital) หรือออร์บิทัลอะตอม (Atomic orbital) ซึ่งมีความน่าจะเป็นในการพบอิเล็กตรอนที่มีรูปร่างและพลังงานเฉพาะมากถึง 90 เปอร์เซ็นต์

2.2.3 หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก (Heisenberg uncertainty principle)

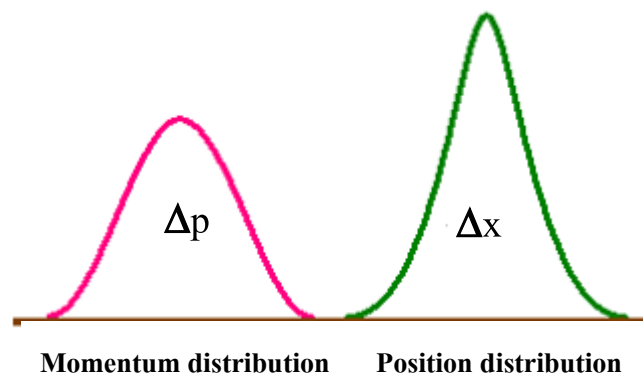
หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก (Heisenberg uncertainty principle) กล่าวว่าไว้ว่าเราไม่สามารถรู้ถึงตำแหน่ง และความเร็วของอนุภาคในเวลาเดียวกันได้อย่างแม่นยำ

ในการวัดตำแหน่งของสารที่มีขนาดใหญ่ สามารถใช้เครื่องมือปกติที่อ่านค่าได้ทันที โดยไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของสารนั้นมากนัก แต่ถ้าสารเล็กๆ จนไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่น อิเล็กตรอน จำเป็นต้องใช้วิธีอื่น เช่น ใช้ลำแสงในการค้นหาตำแหน่งของอิเล็กตรอน เมื่อผ่านลำแสงเข้าไปพบอิเล็กตรอน จะเกิดการกระจายหรือเปลี่ยนทิศทางไปของแสง และเนื่องจากอิเล็กตรอนมีขนาดเล็กมาก แสงที่ใช้ต้องมีความยาวคลื่นสั้นหรือมีความยาวคลื่นเท่ากับขนาดของอิเล็กตรอน ถ้าความยาวคลื่นมากเกินไปจะไม่สามารถสังเกตเห็นการกระจายแสงได้ และเนื่องจากแสงเป็นอนุภาค คือโฟตอนเคลื่อนที่ไปเมื่อพบอิเล็กตรอนก็เกิดการชนกัน (Collision) ซึ่งอาจมีการแลกเปลี่ยนโมเมนตัม ถ้าโฟตอนมีโมเมนตัมสูงก็อาจถ่ายเทให้อิเล็กตรอนได้มาก ดังนั้นถ้าใช้แสงที่มีความยาวคลื่นสั้น โอกาสที่จะวัดตำแหน่งของอิเล็กตรอนอย่างเที่ยงตรงก็มีมากขึ้น แต่การวัดโมเมนตัมจะผิดไปจากค่าเดิมหรือค่าที่แท้จริงของอิเล็กตรอนมากขึ้นด้วย

ตามหลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์กที่เกี่ยวกับความไม่แน่นอนของตำแหน่งและความไม่แน่นอนของโมเมนตัม มีความสัมพันธ์ดังนี้

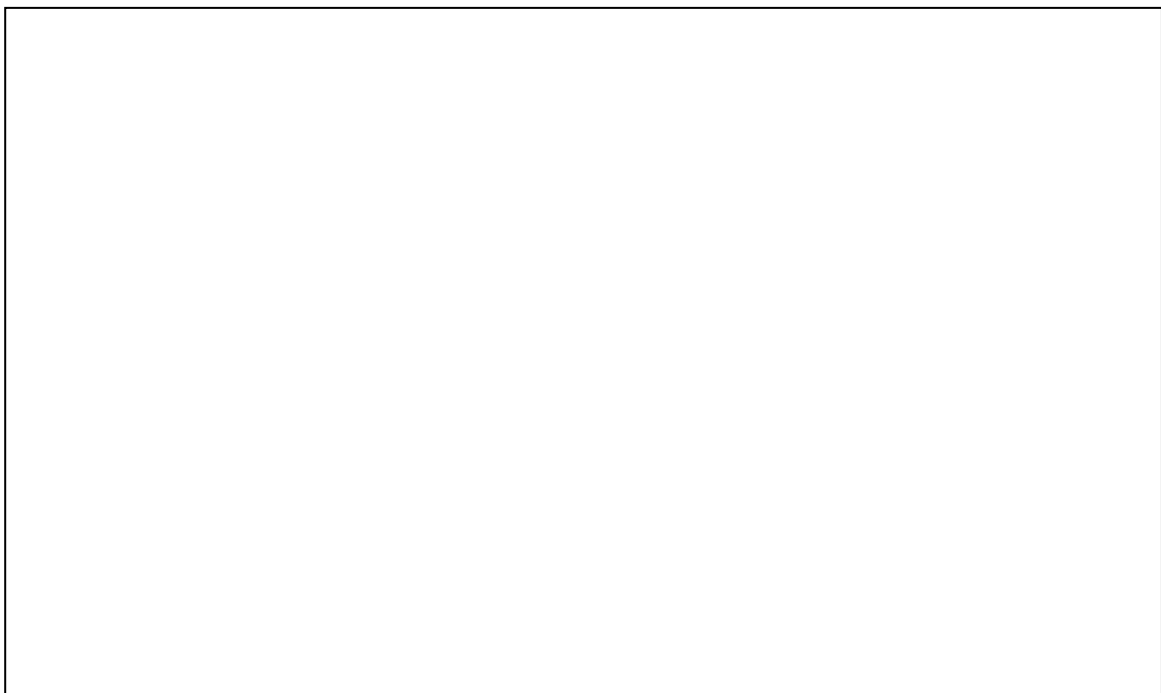
$$\langle \Delta p \rangle \langle \Delta x \rangle \geq \hbar \quad \text{เมื่อ} \quad \hbar = \frac{h}{2\pi} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

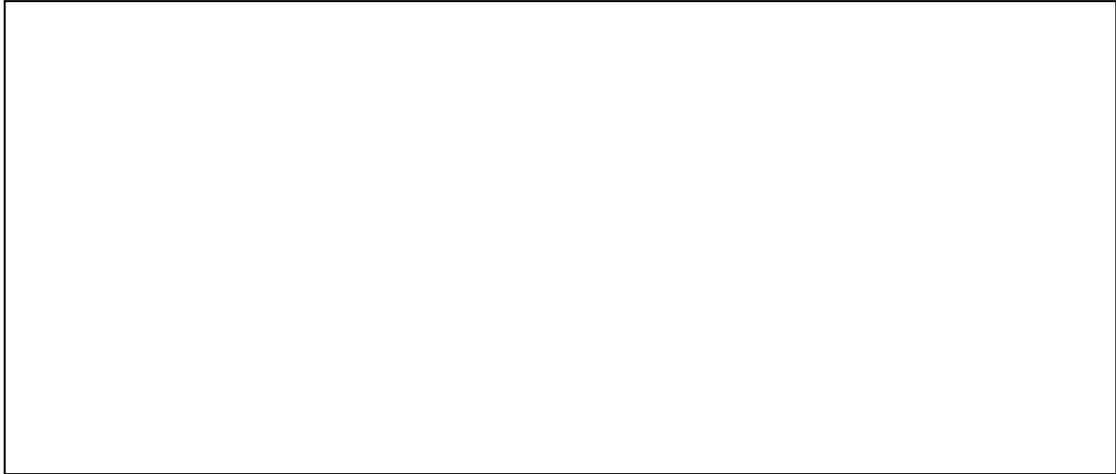
เมื่อ	Δp	คือ	ความไม่แน่นอนของโมเมนตัม
	Δx	คือ	ความไม่แน่นอนของตำแหน่ง
	h	คือ	ค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} J.s



ภาพ 2.5 หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก (Mansoori, 2004)

ตัวอย่าง 2.3 อนุภาคแอลฟามวล 6.7×10^{-27} กิโลกรัม ถูกเร่งด้วยเครื่องเร่งอนุภาคให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 6.0×10^6 เมตรต่อวินาที ถ้าความไม่แน่นอนของการวัดความเร็วเป็น 0.5×10^6 เมตรต่อวินาที ความไม่แน่นอนของตำแหน่งอนุภาคเป็นเท่าใด กำหนดให้มวลของอนุภาคแอลฟาคงตัว





จากหลักการของไฮเซนเบิร์ก ซึ่งให้เห็นว่ากลศาสตร์ควอนตัม มีขีดจำกัดสำหรับความแม่นยำของการวัด ทุกครั้งที่ทำการวัด ย่อมมีความไม่แน่นอน (Uncertainty) เกิดขึ้น ซึ่งจะมากหรือน้อย ในทางกลศาสตร์คลาสสิกถือว่าขึ้นอยู่กับเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ รวมทั้งวิธีหรือกระบวนการของการทดลองนั้น นอกจากนี้ในทางกลศาสตร์คลาสสิกจะคำนึงถึงวัตถุประสงค์มหภาคที่พบเห็นกันในชีวิตประจำวันโดยทั่วไป ซึ่งไม่ได้ให้ความสำคัญต่อความไม่แน่นอนของการวัด เช่น การกล่าวถึงตำแหน่งและความเร็วหรือโมเมนตัมของวัตถุก้อนหนึ่ง โดยไม่ได้บอกค่าความไม่แน่นอนของปริมาณเหล่านั้น และถ้าระบุความไม่แน่นอนของตำแหน่งหรือความเร็ว ก็ไม่ได้คำนึงถึงความสัมพันธ์ของความไม่แน่นอนสำหรับปริมาณทั้งสอง ซึ่งแตกต่างจากกลศาสตร์ควอนตัมที่ให้ความสำคัญต่อความแม่นยำ และความไม่แน่นอนของการวัดที่เกิดขึ้น

ทุกครั้งที่เราทำการวัดย่อมมีความไม่แน่นอน (Uncertainty)



กลศาสตร์คลาสสิก
 ความไม่แน่นอนมักเกิดจาก

- เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้
- กระบวนการของการทดลองนั้นเกิดขึ้น

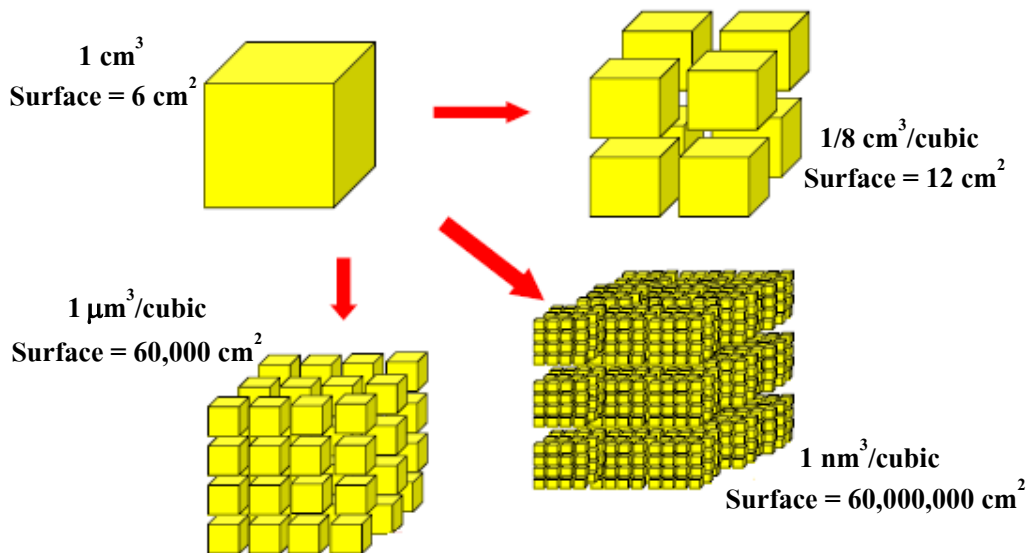
กลศาสตร์ควอนตัม
 เช่น ใช้ลำแสงเป็นตัวค้นหาอิเล็กตรอน ซึ่งโอกาสที่จะวัดตำแหน่งของอิเล็กตรอนอย่างเที่ยงตรงนั้นจะขึ้นกับความยาวคลื่น

2.3 หลักการทางวิทยาศาสตร์

หลักการทางวิทยาศาสตร์พื้นฐานจะทำให้เข้าใจนาโนเทคโนโลยีเพิ่มมากขึ้น กล่าวคือ ทำให้เข้าใจสมบัติของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีขนาดเล็กถึงระดับนาโนได้ นั่นคือผลของขนาดระดับนาโนต่อสมบัติของวัสดุ การที่อนุภาคมีขนาดเล็กถึงระดับนาโน ทำให้บริเวณพื้นผิวมีค่ามากขึ้น การจัดเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลที่ผิวไม่เป็นระเบียบเหมือนกับในเนื้อของวัสดุ ทำให้มีสมบัติแตกต่างกัน และสมบัติของวัสดุที่มีขนาดเล็กแตกต่างจากวัสดุที่พบในระดับที่ใหญ่กว่า ตัวอย่างเช่น สมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติเชิงกล การกระเจิงแสง และการจับตัวกับแก๊ส เป็นต้น

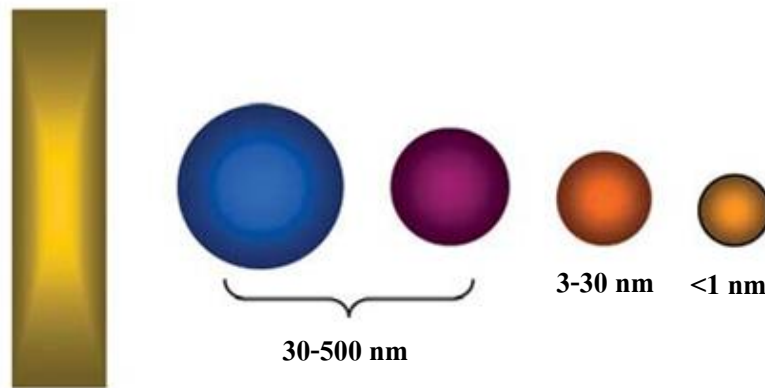
2.3.1 หลักการทางแสง

วัสดุที่มีขนาดเล็กลง สัดส่วนของจำนวนอะตอมที่อยู่บริเวณผิวหน้าจะเปลี่ยนแปลงไป และพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุจะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพ 2.6 ซึ่งการเพิ่มขึ้นของจำนวนอะตอมที่บริเวณผิวสัมผัสของวัสดุ จะส่งผลให้วัสดุที่มีขนาดระดับนาโนเมตรมีสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติทางแสงแตกต่างไปจากวัสดุที่มีขนาดใหญ่อย่างสิ้นเชิง ทำให้ได้เป็นวัสดุที่มีสมบัติต่างๆ แตกต่างไปจากเดิม และพิเศษแปลกใหม่



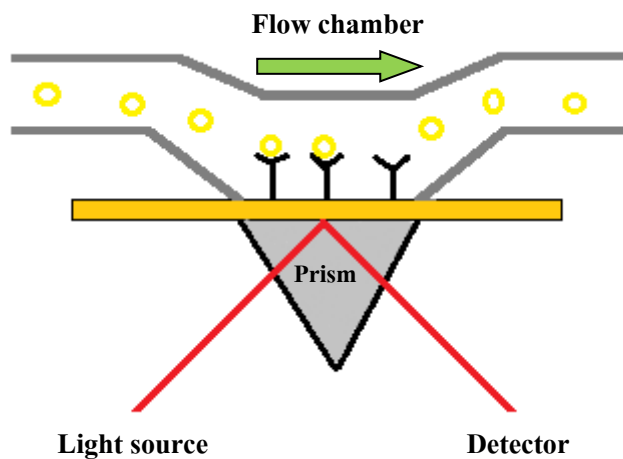
ภาพ 2.6 วัสดุที่มีขนาดเล็กลงพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุจะเพิ่มขึ้น (Ostrikov, 2008)

ทองคำแบบก้อนปกติมีสีเหลือง แต่ถ้าขนาดของทองคำเล็กลงจนกระทั่งมีขนาดอนุภาคเล็กมากในระดับนาโนเมตร อนุภาคของทองคำจะมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นแสงที่มาตกกระทบ ทำให้เกิดปรากฏการณ์เชิงแสงที่เรียกว่า เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ (Surface plasmon resonance) ซึ่งจะส่งผลให้อนุภาคนาโนของทองคำดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงสีเขียว (ความยาวคลื่นประมาณ 520 นาโนเมตร) ทำให้อนุภาคนาโนของทองคำปรากฏเป็นสีแดงทับทิม แทนที่จะเป็นสีเหลืองเช่นเดียวกับเมื่อมีขนาดก้อนใหญ่ ดังแสดงในภาพ 2.7



ภาพ 2.7 สีของอนุภาคทองคำที่เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของอนุภาค (Ostrikov, 2008)

เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ เป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวกับคลื่นความหนาแน่นของประจุที่เกิดจากการสั่นของอิเล็กตรอนอิสระ ที่มีลักษณะการสั่นแบบพร้อมเพรียงกัน เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวรอยต่อของโลหะ (Metal) กับสารไดอิเล็กทริก (Dielectric) เช่น ระหว่างทองหรือเงิน กับอากาศหรือสารละลาย การกระตุ้นให้เกิด เรโซแนนซ์แบบนี้สามารถทำได้ โดยใช้แสงที่มีระนาบของทิศทางของสนามไฟฟ้าอยู่ในแนวเดียวกับระนาบของการตกกระทบ โดยใช้แสงบริเวณที่เกิดการสะท้อนกลับหมด เมื่อวัดความเข้มแสงที่สะท้อนจากผิวโลหะจะพบว่ามีความลดลงเมื่อเทียบกับความเข้มแสงเดิม การเกิดเซอร์เฟซ พลาสมอน-เรโซแนนซ์ จะขึ้นอยู่กับดัชนีหักเหของสารไดอิเล็กทริก ซึ่งในที่นี้คือของเหลว การเกิดเซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ ดังแสดงในภาพ 2.8



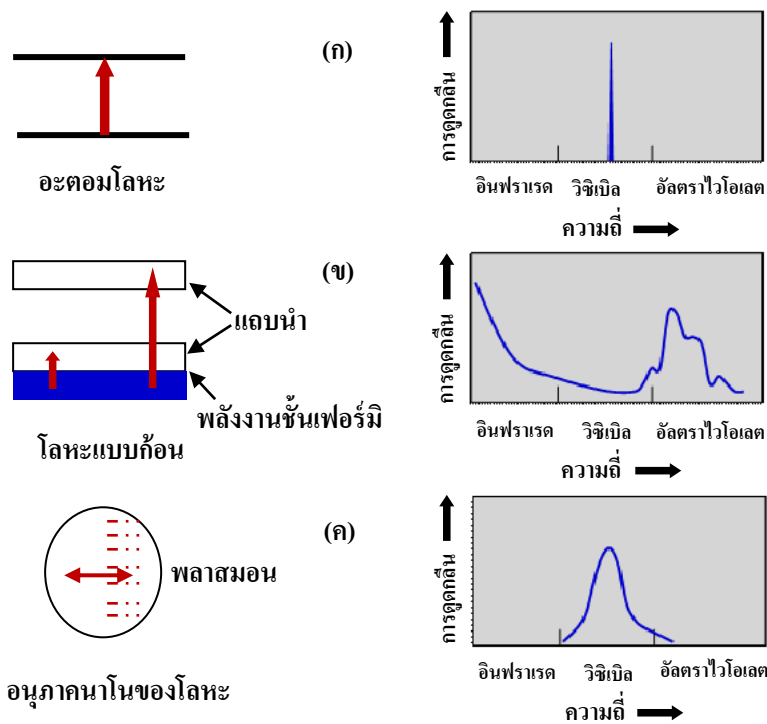
ภาพ 2.8 อธิบายการเกิด เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2554)

ดังนั้นเมื่อวัสดุมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร สมบัติอย่างหนึ่งที่เปลี่ยนไปจากเดิม คือ ช่วงความยาวคลื่นที่วัสดุนาโนสามารถดูดกลืน โดยช่วงความยาวคลื่นที่ถูกดูดกลืนของวัสดุนาโนจะเป็นช่วงความยาวคลื่นที่สั้นลงกว่าเดิม (คือ มีแนวโน้มไปสู่ช่วงแถบสเปกตรัมสีน้ำเงิน) และพบว่าช่วงความยาวคลื่นที่ถูกดูดกลืนนี้แปรผันตรงกับขนาดของวัสดุนาโน ตัวอย่างเช่น อนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเซลิไนด์ (CdSe) จะมีช่วงสเปกตรัมที่ถูกดูดกลืนที่สั้นลงไปเรื่อยๆ ตามขนาดรัศมีของอนุภาค เป็นต้น กล่าวคือยิ่งมีขนาดเล็กมากขึ้นก็ยังมีช่วงความยาวคลื่นของสเปกตรัมที่ถูกดูดกลืนสั้นลงมากขึ้น ดังแสดงในภาพ 2.9



ภาพ 2.9 อนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเซลิไนด์ที่มีสีที่ต่างกันตามขนาดของอนุภาค (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2554)

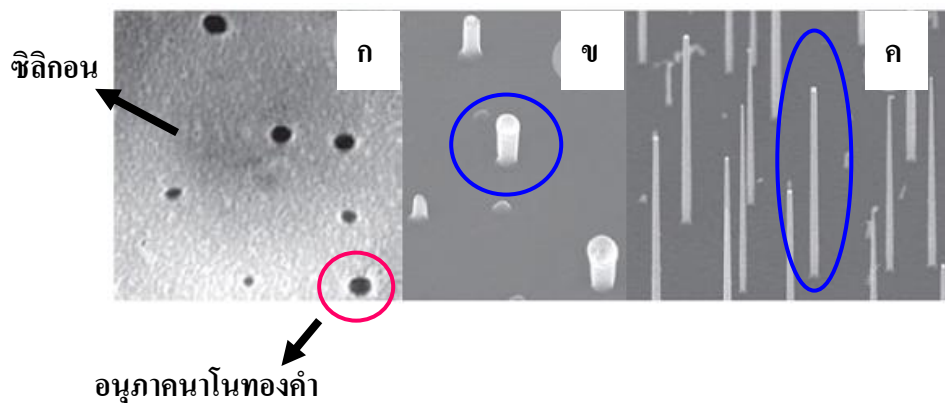
อนุภาคนาโนของเงิน สามารถแสดงปรากฏการณ์เชิงแสงในลักษณะเดียวกันนี้ได้ โดยจะมีสีเหลืองเข้มแทนที่จะเป็นสีเงินวาว อย่างไรก็ตามอนุภาคนาโนของโลหะส่วนใหญ่จะไม่เกิดปรากฏการณ์นี้ เนื่องจากความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งอยู่ในช่วงใกล้อินฟราเรดไวโอเล็ตอยู่นอกสเปกตรัมของช่วงแสงที่สามารถมองเห็น และอนุภาคนาโนของโลหะเกือบทุกชนิดไม่สามารถคงตัวอยู่ในรูปอนุภาคนาโนได้นานในสภาวะแวดล้อมปกติ จึงไม่พบปรากฏการณ์นี้ในโลหะชนิดอื่นๆ มากนัก



ภาพ 2.10 เปรียบเทียบลักษณะการดูดกลืนแสงของโลหะอัลคาไลน์ ที่แตกต่างกันตามขนาดของกลุ่มก้อน (ก) อะตอมโลหะ (ข) โลหะแบบก้อนใหญ่ และ (ค) อนุภาคนาโนของโลหะ (Mansoori, 2004)

2.3.2 หลักการทางกล

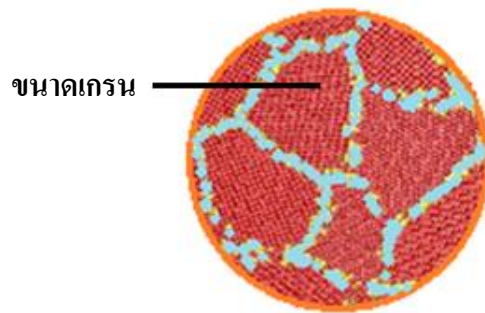
วัสดุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรจะมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่กว่า ตัวอย่างเช่น อนุภาคนาโนของธาตุทองคำที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นาโนเมตร จะมีพื้นที่ผิวของอนุภาคสูงถึง 150 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งวัสดุที่มีขนาดระดับนาโนเมตรจะมีจำนวนอะตอมที่อยู่บริเวณผิวหน้าสูง เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวหน้าวัสดุได้ง่าย และทำให้ง่ายต่อการเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ อันเนื่องมาจากความเร็วต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีบริเวณผิวหน้าของวัสดุ ตัวอย่างเช่น ธาตุทองคำที่ปกติจะเฉื่อยชาต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี แต่เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร จะมีสมบัติเปลี่ยนไปเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีที่ดีขึ้น ดังแสดงในภาพ 2.11



ภาพ 2.11 (ก) อนุภาคนาโนทองคำ (จุดสีดำ) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวซิลิกอน (ข) และ (ค) ซิลิกอนเกิดการเติบโตเป็นเส้นลวดนาโนซิลิกอน (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2554)

สำหรับวัสดุจำพวก โลหะและเซรามิกส์ที่มีขนาดเกรน (Grain size) ในระดับนาโนเมตร จะมีความแข็งแรงและความทนทานต่อการแตกหักสูงมากกว่าวัสดุชนิดเดียวกัน ที่มีขนาดเกรนในระดับไมโครเมตรหรือในระดับที่ใหญ่กว่า เช่นเดียวกับโลหะที่มีโครงสร้างผลึกในระดับนาโนจะมีความแข็งแรงและความแข็งสูงกว่าโลหะที่มีขนาดผลึกใหญ่ และมี

สมบัติในการต้านทานกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้นด้วย มีความจุความร้อนจำเพาะมากขึ้น และสามารถขยายตัวได้ดีมากขึ้นกว่าเดิม ตัวอย่างเช่น โลหะทองแดง (Copper) ที่มีขนาดเกรนในระดับนาโนเมตรจะมีความแข็ง (Hardness) สูงกว่าทองแดงปกติมากถึง 5 เท่า หรืออะลูมิเนียม (Aluminium) ที่มีอนุภาคระดับนาโนเมตรจะทำให้โครงสร้างของอะลูมิเนียมมีความเหนียวและแข็งแรงมากขึ้นกว่าอะลูมิเนียมในขนาดปกติ ดังแสดงในภาพ 2.12

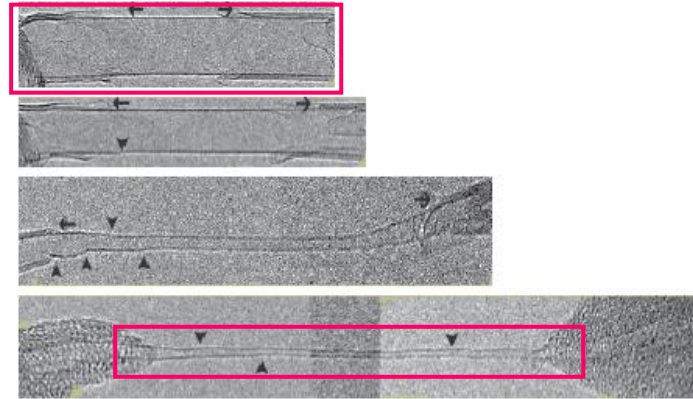


ภาพ 2.12 ขนาดเกรนของโลหะอะลูมิเนียมที่มีขนาดเล็ก (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2554)

วัสดุที่มีขนาดเกรนในระดับนาโนเมตรจะมีลักษณะพิเศษอย่างหนึ่ง คือ สามารถถูกยืดหรือทำให้ผิดรูปได้มากขึ้นกว่าเดิมอย่างมาก เช่น จาก 100 เปอร์เซ็นต์ ขยายไปจนถึง 1000 เปอร์เซ็นต์ มากกว่าวัสดุที่มีขนาดเกรนใหญ่ เรียกลักษณะพิเศษนี้ว่า สภาพพลาสติกพิเศษ (Superplastics) โดยบริเวณพื้นผิวของวัสดุที่ถูกยืดหรือทำให้ผิดรูปจะมีอุณหภูมิต่ำลง แต่มีความเครียดเพิ่มขึ้น โครงสร้างของวัสดุที่มีขนาดเกรนระดับนาโนเมตรจะสามารถมีสภาพเป็นพลาสติกพิเศษได้เมื่ออยู่ในช่วงอุณหภูมิสูงประมาณ 400-500 องศาเซลเซียส ตัวอย่างเช่น นิกเกิล (Nickel) และอะลูมิเนียมอัลลอยด์ (Aluminium alloy) ที่มีขนาดเกรนเล็กในระดับนาโนเมตร เป็นต้น

ภาพ 2.13 แสดงตัวอย่างสมบัติความเป็นพลาสติกพิเศษของท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) ภายใต้อุณหภูมิสูงๆ โดยที่มีความยาวเริ่มต้น 24 นาโนเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นาโนเมตร และสามารถมีความเครียดที่เพิ่มขึ้นได้ จนกระทั่งยืดยาวได้เรื่อยๆ จนถึง 91

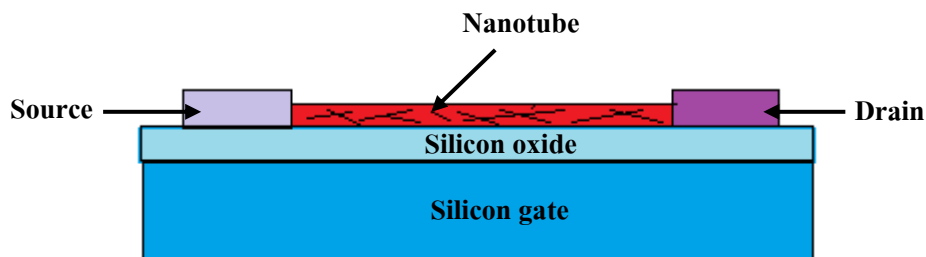
นาโนเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางลดลงเหลือ 0.8 นาโนเมตร ซึ่งสามารถยืดขยายได้มากถึง 280 เปอร์เซ็นต์



ภาพ 2.13 ลักษณะพลาสติกพิเศษของท่อนาโนคาร์บอน (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2554)

2.3.3 หลักการทางไฟฟ้า

เมื่อโครงสร้างของวัสดุถูกทำให้เล็กลงจนอยู่ในระดับนาโนเมตร จะส่งผลทำให้สมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้าของวัสดุนั้นแตกต่างออกไปจากเดิม ตัวอย่างเช่น เมื่อวัสดุมีโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตร วงจรไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจะไม่เป็นไปตามกฎของโอห์ม (Ohm's law) ซึ่งกฎของโอห์มเกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้า (Current, I) ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage, V) และความต้านทานไฟฟ้า (Resistance, R) แต่หัวใจสำคัญของกฎของโอห์มมีพื้นฐานมาจากแนวคิดที่ว่า อิเล็กตรอนไหลผ่านไปตามสายไฟฟ้าในลักษณะที่เป็นกระแส แต่ในโครงสร้างระดับนาโน อิเล็กตรอนไม่ได้เคลื่อนที่โดยไหลเป็นกระแส เพราะสายไฟฟ้าที่มีขนาดความกว้างอยู่ในระดับนาโนเมตร อิเล็กตรอนจะไหลจากอะตอมหนึ่งไปอีกอะตอมหนึ่งในปริมาณที่ถูกจำกัดของสายไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างออกไปจากเดิม ตัวอย่างดังแสดงในภาพ 2.14



ภาพ 2.14 ท่อนาโนคาร์บอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นาโนเมตร เกิดสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างไปจากเดิม ใช้สำหรับทำหน้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (รอฮัมปรัมมาท, 2547)

สมบัติในการเป็นตัวนำ เป็นสารกึ่งตัวนำ หรือเป็นฉนวนของวัสดุที่ใช้เป็นโครงสร้างทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอะตอมที่อยู่ภายในวัสดุ และลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอม โดยที่วัสดุระดับนาโนเมตรทุกประเภทจะมีมิติทางกายภาพอย่างน้อยหนึ่งมิติที่ถูกจำกัดขนาดเอาไว้ จึงทำให้เป็นการบีบบังคับให้อิเล็กตรอนในวัสดุนาโนสามารถเคลื่อนที่ได้ในปริมาณที่จำกัดเท่านั้น จึงทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เป็นการจำกัดบริเวณของอิเล็กตรอนไว้ (Quantum confinement) ปรากฏออกมาให้เห็นอย่างชัดเจน โดยที่ปรากฏการณ์ดังกล่าวไม่เคยเกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยมากในวัสดุขนาดปกติ

ขนาดและการจัดเรียงตัวของอนุภาคในโครงสร้าง มีผลต่อสภาพการนำไฟฟ้าของโลหะ เช่น โลหะที่มีขนาดใหญ่จะมีแถบการนำ (Conduction band) ที่เกิดจากการจัดเรียงระดับชั้นพลังงานที่มาประกอบกันอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อโลหะมีขนาดอนุภาคเล็กลงจะทำให้ฟังก์ชันคลื่น (Wave function) ของอิเล็กตรอนวงนอกสุด เริ่มถูกกักขังอยู่ในบริเวณที่จำกัด ซึ่งจะส่งผลให้ระดับชั้นพลังงานต่างๆ ถูกแยกออกเป็นชั้นเดี่ยวๆ อย่างชัดเจน คล้ายกับระดับชั้นพลังงานของอะตอมเดี่ยว จึงส่งผลให้สมบัติทางไฟฟ้าของโลหะมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเป็นโลหะกับฉนวน ซึ่งสมบัติจะเป็นแบบใดขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค เช่น กลุ่มอะตอมโลหะที่ประกอบด้วยตัวกันจำนวน 13 อะตอม จะไม่มีสมบัติในการเป็นโลหะ คือนำไฟฟ้าได้น้อยลง มีความเป็น

ฉนวนมากขึ้น แต่เมื่อกลุ่มอะตอมโลหะรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้น เช่น มีอะตอมมากกว่า 309 อะตอมขึ้นไป จะทำให้กลุ่มอะตอมโลหะนั้นมีสมบัติเหมือนกับโลหะขนาดใหญ่ปกติ

2.3.4 หลักการทางแม่เหล็ก

สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวัสดุ และลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมของธาตุที่ประกอบกันขึ้นเป็นวัสดุ สารที่มีสภาพเป็นแม่เหล็กเป็นผลมาจากการสปินภายนอก (โมเมนตัมเชิงมุม, Angular momentum) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่รอบนิวเคลียสของอิเล็กตรอน และสปินภายใน ที่เกิดจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน โดยที่อิเล็กตรอนจะมีการสปินเป็นแบบขึ้น หรือลงเท่านั้น จึงทำให้อิเล็กตรอนมีสมบัติเป็นขั้วแม่เหล็กคู่ (Magnetic dipole moment) ขนาดเล็ก โดยสารที่มีสภาพเป็นแม่เหล็กเกิดจากการที่อะตอมของสารมีจำนวนอิเล็กตรอนกลุ่มที่มีสปินขึ้น (Spin up) ไม่เท่ากับกลุ่มที่มีสปินลง (Spin down) ทำให้ค่าโมเมนตัมเชิงมุมหรือโมเมนต์แม่เหล็ก (Magnetic moment) มีค่าไม่เป็นศูนย์ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้เฉพาะในกรณีที่อะตอมมีจำนวนอิเล็กตรอนไม่เต็มชั้นพลังงานย่อยเท่านั้น และเมื่อสสารและวัสดุต่างๆ มีขนาดโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตร จะมีสมบัติทางแม่เหล็กแตกต่างออกไปจากวัสดุขนาดใหญ่ซึ่งเป็นผลมาจากสมบัติทางควอนตัมที่เกิดขึ้น

ยกตัวอย่างสมบัติทางแม่เหล็กที่เปลี่ยนไปของอะลูมิเนียม (Aluminium) เมื่อมีโครงสร้างขนาดเล็กลงในระดับนาโนเมตร โดยปกติในสภาพขนาดใหญ่จะไม่มีสมบัติทางแม่เหล็ก แต่เมื่อมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร พบว่ากลุ่มอะตอมของอะลูมิเนียมจำนวน 13 อะตอมที่มีขนาดประมาณ 1 นาโนเมตร จะมีการจัดเรียงตัวของอะตอม และการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนภายในอะตอมที่ทำให้เกิดสภาพความเป็นสารแม่เหล็กขึ้น

2.4 ระบบชีวภาพ

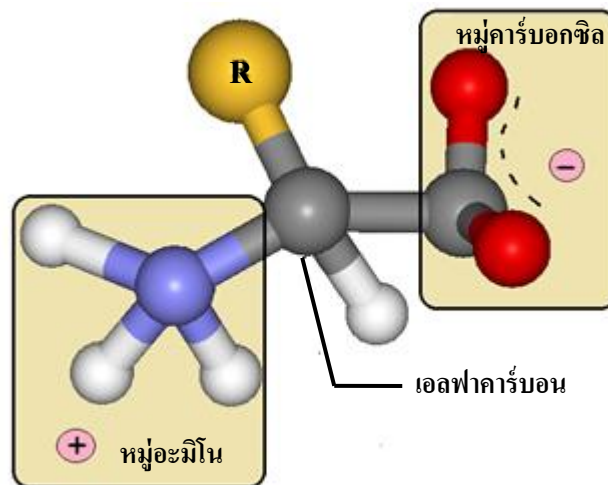
มนุษย์ สัตว์ และพืช ต่างประกอบขึ้นจากธาตุบางอย่าง มนุษย์มีธาตุสังกะสี เหล็ก วานาเดียม แมงกานีส ทองแดง และวิตามินชนิดต่างๆ ซึ่งมีส่วนสำคัญต่อกระบวนการทางชีวภาพเฉพาะด้าน ในสัตว์ และพืชทุกชนิดมากกว่าร้อยละ 95 ของน้ำหนัก เป็นโครงสร้างที่ประกอบขึ้นจากอะตอม 4 ชนิด ได้แก่ ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และคาร์บอน อะตอมเหล่านี้สามารถสร้างพันธะทางเคมีในรูปแบบที่หลากหลาย สำหรับระบบต่างๆ ในร่างกาย

มนุษย์ เช่น ระบบการหายใจ ระบบย่อยอาหาร ระบบควบคุมอุณหภูมิของร่างกาย ระบบภูมิคุ้มกันโรค ระบบสร้างและซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอ การทำงานของระบบเหล่านี้ต้องอาศัยโครงสร้างระดับนาโนที่มีความซับซ้อนสูงมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการทำงานของระบบประสาทและสมอง

โมเลกุลชีวภาพมีสี่ตระกูล สามตระกูลแรกมีโครงสร้างแบบโพลิเมอร์ ได้แก่กรดนิวคลีอิก (Nucleic acid) โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต ตระกูลที่สี่ เป็นโมเลกุลขนาดจิ๋วที่ทำหน้าที่พิเศษ โมเลกุลชีวภาพตระกูลที่หนึ่ง คือ กรดนิวคลีอิก แบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ดีเอ็นเอ (Deoxyribonucleic acid, DNA) และอาร์เอ็นเอ (Ribonucleic acid, RNA) ทั้งสองมีบทบาทสำคัญในการสร้างโปรตีน สำหรับในโครงสร้างระดับนาโนจะให้ความสนใจ กับดีเอ็นเอ มากกว่าอาร์เอ็นเอ ดีเอ็นเอ เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีลักษณะเฉพาะตัว มีโครงสร้างเป็นเส้นยาวสองเส้นคู่พันกันในรูปแบบบันไดเวียน แต่ละเส้นประกอบด้วยนิวคลีโอไทด์ (Nucleotide) ต่อกันเป็นสายยาว นิวคลีโอไทด์ประกอบด้วยเบสอินทรีย์ (สารประกอบไนโตรเจน) ชนิดหนึ่งใน 4 ชนิด เบสของแต่ละนิวคลีโอไทด์จะเชื่อมกันอยู่เป็นคู่ๆ ในลักษณะของขั้นบันไดแต่ละขั้นเบส 4 ชนิด ได้แก่ อะดีนีน (Adenine, A) ไทมิน (Thymine, T) กรานีน (Guanine, G) และไซโตซีน (Cytosine, C) การจับคู่ขั้นบันไดของเบสจำกัดเฉพาะคู่ โดย A จะจับคู่กับ T เท่านั้น และ G จะจับคู่กับ C เท่านั้น การจำกัดเช่นนี้ทำให้คู่เบสมีการเรียงตัวเป็น AT และ TA กับ GC และ CG เท่านั้น การเรียงลำดับของกลุ่มเบสจำนวนมหาศาลสลับไปมาบนสายบันไดเวียนนิวคลีโอไทด์ เป็นรหัสพันธุกรรมที่สลับซับซ้อนเพื่อสร้างโครงสร้างชีวภาพ ดีเอ็นเอเป็นโมเลกุลพอลิเมอร์ทางชีวภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน 4 ชนิด (อาร์เอ็นเอก็เช่นเดียวกัน) ดีเอ็นเอที่พบในธรรมชาติโดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นโครงสร้างเกลียวคู่ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรที่สุด โดยเกลียวคู่ของดีเอ็นเอที่พบมากที่สุดในธรรมชาติจะเป็นโครงสร้างระดับนาโนเมตร ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 นาโนเมตร ระยะห่างระหว่างคู่เบสอยู่ห่างกัน 0.34 นาโนเมตร หนึ่งรอบของเกลียวคู่ที่มีลำดับเบสอยู่ 10 คู่ จะมีระยะทางประมาณ 3.4 นาโนเมตร

โมเลกุลชีวภาพตระกูลที่สอง โปรตีน เป็นองค์ประกอบที่สำคัญมากในระบบชีวภาพ ที่ถูกใช้ในการสร้างโครงสร้างนาโน (Nanostructure) และจักรกลนาโน (Nanomachine) ที่มีสมบัติที่หลากหลายมากที่สุด โปรตีนเป็นโมเลกุลพื้นฐานที่มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ที่ซับซ้อน

สร้างขึ้นมาจากการรวมตัวของมอนอเมอร์โมเลกุลของกรดแอสอะมิโน (L-amino) ซึ่งมอนอเมอร์โมเลกุลของกรดแอสอะมิโนแต่ละมอนอเมอร์มีขนาดประมาณ 0.8 นาโนเมตร โดยมอนอเมอร์เหล่านี้ก็จะถูกเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะเปปไทด์ และหลังจากนั้นจะเกิดการม้วนตัว (Fold) เข้าหากันเป็น โครงสร้างหนึ่งของโปรตีนที่มีความเสถียร ภาพ 2.15 แสดงโมเลกุลของกรดแอสอะมิโน



ภาพ 2.15 โมเลกุลของกรดแอสอะมิโน (Fujita et al., 2001)

การสร้างโครงสร้างของโปรตีน เป็นการสร้างโครงสร้างในระดับอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ในช่วงระดับนาโนเมตร เริ่มจากการที่แต่ละมอนอเมอร์โมเลกุลของกรดอะมิโนเชื่อมต่อกันโดยอาศัยพันธะเปปไทด์ ซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงและมีความเสถียรสูงกว่าพันธะอื่นๆ เนื่องจากแต่ละอะตอมของพันธะเปปไทด์ทำปฏิกิริยาต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงมากที่สุด เนื่องจากเป็นพันธะที่มีการแบ่งปันอิเล็กตรอนกัน ทำให้การเชื่อมต่อแบบพอลิเมอร์ของมอนอเมอร์โมเลกุลกรดอะมิโนได้โครงสร้างที่มีความเสถียรสูง นอกจากนั้นยังมีการจัดตัวเอง โดยการม้วนตัวจากโครงสร้างสายตรงเข้าเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อม โดยอาศัยพันธะไฮโดรเจนของกลุ่มอะตอมในโครงสร้าง จากนั้นจะประกอบ

กันเป็นโครงสร้างคล้ายทรงกลม และด้วยความสามารถในการประกอบตัวเองได้ของโปรตีน ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างที่เสถียร มีความสมมาตร และซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งหากพิจารณากระบวนการทั้งหลายที่เกิดขึ้น โปรตีนจึงเปรียบเสมือนผู้ประกอบจักรกลนาโนของธรรมชาติ

โมเลกุลชีวภาพตระกูลที่สาม คาร์โบไฮเดรตธรรมชาติ โมเลกุลนี้เกิดจากการควบแน่นของโมเลกุลน้ำตาลจำนวนมากและหลายชนิด มีความสำคัญต่อการทำงานของเซลล์ พบในโครงสร้างชีวภาพหลายชนิด แต่ยังไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์ในการสังเคราะห์ทางนาโนเทคโนโลยี

โมเลกุลชีวภาพตระกูลที่สี่ โมเลกุลขนาดจิ๋วที่ทำหน้าที่พิเศษ ประกอบด้วยโมเลกุลที่มีขนาดเล็กมาก ได้แก่ น้ำ ซึ่งมีบทบาทสำคัญเกี่ยวข้องกับกระบวนการเกือบทุกชนิดในทางชีวภาพ ออกซิเจน เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญ คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นวัตถุดิบของพืช และไนโตรเจนไดออกไซด์ ซึ่งประกอบด้วยไนโตรเจนและออกซิเจน ทำหน้าที่เป็นผู้นำสารตัวที่สองในกระบวนการสื่อสารภายในเซลล์

2.5 การตรวจจับโมเลกุล

ตรวจจับโมเลกุล (Molecular recognition) หรือความสามารถของโมเลกุลในการดึงดูดและยึดติดกับโมเลกุลตัวอื่นๆ มีลักษณะที่เฉพาะเจาะจง กระบวนการนี้ช่วยอธิบายการเกิดอาการแพ้สิ่งของบางสิ่งบางอย่างของร่างกาย โดยโมเลกุลขนาดใหญ่ในร่างกายอาจเกิดการยึดติดกับโมเลกุลแปลกปลอมจากภายนอกที่เรียกว่าสารภูมิแพ้ (Allergen) ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ระบบตรวจจับโมเลกุลกับกลไกในระดับนาโนได้ เช่น ระบบประสาทสัมผัสในด้านกลิ่นของมนุษย์ต้องพึ่งพา ระบบตรวจจับโมเลกุลเป็นหลัก โดยมีกลไกตรวจจับโมเลกุลอยู่ภายในโพรงจมูก เป็นต้น

บรรณานุกรม

1. บทเรียนเคมีออนไลน์. 2554. มวลโมเลกุล. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.ponglearning.com/?p=150> (5 พฤศจิกายน 2554)
2. พัชรี เจริญเดช. 2546. นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology). [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://library.uru.ac.th/webdb/images/NanoArticle1.htm> (5 พฤศจิกายน 2554)
3. พิสิทธ์ราชมงคล. 2554. ไชยปริศนา...นาโนเทคโนโลยี. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.neutron.rmutphysics.com/science_news/index.php?option=com_content&task=view&id=470&Itemid=0&limit=1&limitstart=7 (5 พฤศจิกายน 2554)
4. รอสีม ปรามาท. 2547. นาโนเทคโนโลยี นวัตกรรมชีวปฏิวัติโลก. กรุงเทพฯ: มติชน. 208 น.
5. โรงเรียนมหิดลวิทยานุสร. 2553. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยี บทสรุปสำหรับผู้บริหาร. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.mwit.ac.th/~ponchai/Nano/basicnano.doc> (5 พฤศจิกายน 2554)
6. สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2554. ทำความรู้จักกับนาโนเทคโนโลยี. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit1-6.html> (5 พฤศจิกายน 2554)
7. สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2554. ประวัติวิทยาศาสตร์ระดับนาโน. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit1-6.html> (5 พฤศจิกายน 2554)
8. สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2554. มหัศจรรย์นาโนเทคโนโลยี. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/scibook/nanotech/Page/main.html> (5 พฤศจิกายน 2554)
9. Dahl, J.E., Liu, S.G., Carlson, R.M.K. 2003. Isolation and structure of higher diamondoids, nanometer- sized diamond molecules. *Science*. 299: 96-99.

10. Eiger, D.M., Schweizer, E.K. 1990. Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope. **Nature**. 344: 524-526.
11. Fujita, H., Toshiyoshi, H., Hashigushi, G., Wada, Yasuo. 2001. Micromachined tools for nano technology, **RIKEN Review**. 36: 12-15.
12. Mansoori, G.A. 2004. **Principles of Nanotechnology**. 351 page
13. Ostrikov, K. 2008. **Plasma Nanoscience**. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 565 page.

คำถามท้ายบท

- 2.1 จงยกตัวอย่างสิ่งต่างๆ ที่อยู่ในระดับนาโนมีอะไรบ้าง และต้องเล็กเท่าใดจึงจะเรียกว่าเป็นโครงสร้างนาโนได้
- 2.2 จะเกิดอะไรขึ้นเมื่อวัตถุมีขนาดโครงสร้างที่เล็กลงมากๆ จนถึงระดับนาโนเมตร (หรืออาจเล็กลงมากกว่านั้น)
- 2.3 โมเลกุลชีวภาพและโครงสร้างที่ได้จากการสังเคราะห์ที่มีกระบวนการสร้างโครงสร้างตามแนวทางของนาโนเทคโนโลยี ได้แก่โมเลกุลใดบ้าง
- 2.4 จงอธิบายหลักการพื้นฐานของนาโนเทคโนโลยี และแนวคิดในการสร้างผลิตภัณฑ์ และสิ่งของระดับนาโน
- 2.5 จงอธิบายความแตกต่างระหว่างกลศาสตร์คลาสสิกและกลศาสตร์ควอนตัม และอธิบายด้วยว่ามีความสำคัญต่อนาโนเทคโนโลยีอย่างไรบ้าง
- 2.6 จงยกตัวอย่างหลักการทางวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโน พร้อมทั้งอธิบายว่าหลักการต่างๆ เหล่านั้นเกี่ยวข้องกับวัสดุนาโนอย่างไร
- 2.7 กล่าวกันว่าโมเลกุลชีวภาพตระกูลโปรตีน เปรียบเสมือนผู้ประกอบจักรกลนาโนทางธรรมชาติโดยแท้จริง จงช่วยอธิบายเพิ่มเติมให้เข้าใจมากขึ้น
- 2.8 จงอธิบายความแตกต่างของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนการนำในกรณีอนุภาคที่มีขนาดเล็ก และขนาดใหญ่
- 2.9 อิเล็กตรอนตัวหนึ่งวิ่งด้วยความเร็ว 300 เมตรต่อวินาที วัดความแม่นยำได้ 0.01 เปอร์เซ็นต์ จงหาความไม่แน่นอนในการบอกตำแหน่งของอิเล็กตรอนตัวนี้ (มวลของอิเล็กตรอนเท่ากับ 9.1×10^{-31} กิโลกรัม) (3.9×10^{-7} เมตร)

บทที่ 3

นาโนเทคโนโลยีจากธรรมชาติ:

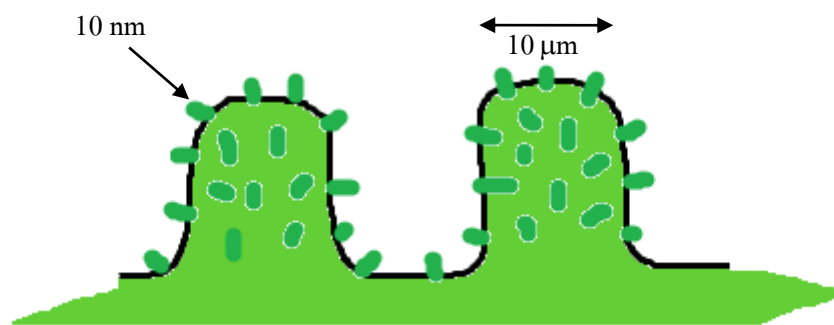
- 3.1 ไบโบบัว
 - 3.1.1 พื้นผิวไบโบบัว
 - 3.1.2 แรงดึงดูดผิวกับหยดน้ำบนไบโบบัว
 - 3.1.3 นวัตกรรมจากหยดน้ำบนไบโบบัว
- 3.2 แท้ตุ๊กแก
- 3.3 ปีกผีเสื้อบางชนิด
- 3.4 ไชแมงมุม
- 3.5 เปลือกหอยเป่าฮือ
- 3.6 ขาจิ้งจิกน้ำ

โครงสร้างนาโนเมตรทางธรรมชาติหลายชนิดมีโครงสร้างที่หน้าห้อง และทำให้นักวิทยาศาสตร์พยายามหาคำตอบถึงความพิเศษ และความน่าทึ่งนั้น และเนื่องจากความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ปัจจุบันสามารถศึกษาได้ถึงขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร (นาโนเทคโนโลยี) ทำให้สามารถหาคำตอบที่มีความซับซ้อนทางธรรมชาติได้มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้จากการศึกษาโครงสร้างระดับนาโนเมตรทางธรรมชาติที่พบในสิ่งมีชีวิตสามารถเป็นแนวทางให้นักวิทยาศาสตร์สร้างสิ่งของหรืออุปกรณ์เลียนแบบธรรมชาติ ที่มีความสามารถพิเศษมากกว่าอุปกรณ์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

3.1 ไบบัว

3.1.1 พื้นผิวไบบัว

พื้นผิวของไบบัวมีลักษณะคล้ายกับปุ่มขนาดเล็กจำนวนมากเรียงตัวกระจายอย่างเป็นระเบียบ ดังแสดงในภาพ 3.1 โดยที่ปุ่มขนาดเล็กเหล่านี้มีเส้นขนเล็กๆ ที่มีขนาดในช่วงระดับนาโนเมตร และมีสารที่มีสมบัติคล้ายขี้ผึ้งเคลือบอยู่ภายนอก จึงทำให้น้ำที่ตกลงมาบนไบบัวมีพื้นที่สัมผัสน้อยมาก และไม่สามารถซึมผ่านหรือกระจายตัวแผ่ขยายออกในแนวกว้างบนไบบัวได้ ดังนั้นน้ำจึงมีแนวโน้มตัวเป็นหยดน้ำขนาดเล็กถึงไปรวมอยู่ที่บริเวณต่ำสุดบนไบบัว ดังแสดงในภาพ 3.2 สิ่งสกปรกต่างๆ ทั้งฝุ่น แบคทีเรีย และเชื้อรา จึงไม่สามารถเกาะติดอยู่บนไบบัวได้ เพราะเมื่อเวลาที่มีน้ำตกลงมา สิ่งสกปรกที่เกาะอยู่บนไบบัวก็จะหลุดติดไปกับหยดน้ำ ทำให้ไบบัวสะอาดอยู่ตลอดเวลา



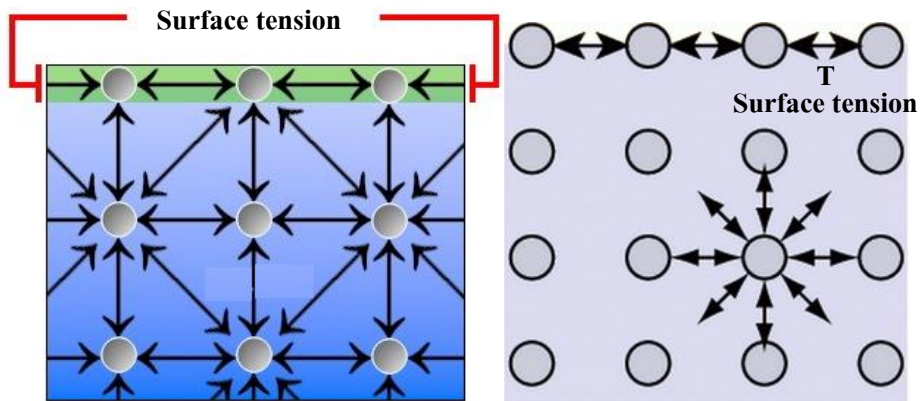
ภาพ 3.1 ลักษณะของพื้นผิวไบบัวที่เป็นปุ่ม (พัชรี, 2552)



ภาพ 3.2 น้ำกลิ้งบนใบบัว

3.1.2 แรงตึงผิวกับหยดน้ำบนใบบัว

แรงตึงผิว (Surface force) เป็นแรงที่ดึงผิวของของเหลวเข้ามาภายในเพื่อทำให้พื้นที่ของของเหลวเหลือน้อยที่สุด ดังแสดงในภาพ 3.3 ของเหลวประกอบด้วยอนุภาคจำนวนมาก และอนุภาคเหล่านั้นมีแรงยึดเหนี่ยวซึ่งกันและกัน โมเลกุลของของเหลวที่อยู่ตรงกลางจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลข้างเคียงและดึงดูดกันทุกทิศทาง แต่โมเลกุลที่ผิวหน้าจะดึงดูดกับโมเลกุลข้างเคียงที่อยู่ด้านข้างและด้านล่างเท่านั้น ผลรวมของแรงจึงมีทิศทางลงสู่ด้านล่างเท่านั้น เรียกว่า แรงตึงผิว (Tension forces)



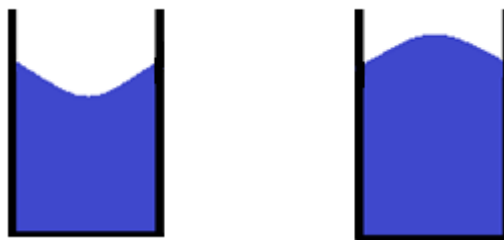
ภาพ 3.3 แนวแรงที่ดึงผิวของเหลวเข้ามาภายใน (Bhushan, 2007)

ประเภทของแรงตึงผิว แบ่งออกเป็น

- แรงเชื่อมแน่น (Cohesive force) เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลชนิดเดียวกัน เช่น น้ำกับน้ำ แอลกอฮอล์กับแอลกอฮอล์ เป็นต้น
- แรงยึดติด (Adhesive force) เป็นแรงตึงผิวที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่างชนิดกันเช่น น้ำกับแก้ว น้ำกับใบบัว เป็นต้น

สภาพการเปียกน้ำ หรือไม่เปียกน้ำของสิ่งต่างๆ ขึ้นอยู่กับแรงยึดติด และแรงเชื่อมแน่น ดังแสดงในภาพ 3.4 ซึ่งแบ่งออกได้เป็นสองลักษณะ ดังนี้คือ

- ถ้าแรงเชื่อมแน่นมากกว่าแรงยึดติด แสดงว่าสารจับตัวกันเองได้ดีกว่าจับกับวัสดุ ดังนั้นสารจะไม่เปียกน้ำ กล่าวคือ ถ้าหยดน้ำลงบนผิวที่เรียบมัน เช่น พลาสติกหรือวัสดุที่เคลือบเงาบางชนิด หยดน้ำจะมีลักษณะเป็นรูปทรงกลมเกาะที่ผิววัสดุนั้น เพราะว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำมีค่ามากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำกับวัสดุ
- ถ้าแรงยึดติดมากกว่าแรงเชื่อมแน่น แสดงว่าสารจับกับวัสดุดีกว่าจับตัวกันเอง ดังนั้นสารจะเปียกน้ำ กล่าวคือ เมื่อหยดน้ำลงบนแผ่นไม้หรือกระดาษ แล้วสังเกตได้ว่าแผ่นไม้หรือกระดาษนั้นเปียก อธิบายได้ว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำมีค่าน้อยกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำกับไม้หรือกระดาษ ทำให้น้ำไม่สามารถรวมตัวอยู่ในลักษณะที่เป็นหยดได้ จึงแผ่กระจายออกไป



แรงยึดติด > แรงเชื่อมแน่น

แรงเชื่อมแน่น > แรงยึดติด

ภาพ 3.4 ความโค้งของผิวของเหลว (บุญรอด, 2552)

3.1.3 ปรางูการณน้ำกลิ้งบนใบบัว (Lotus effect)

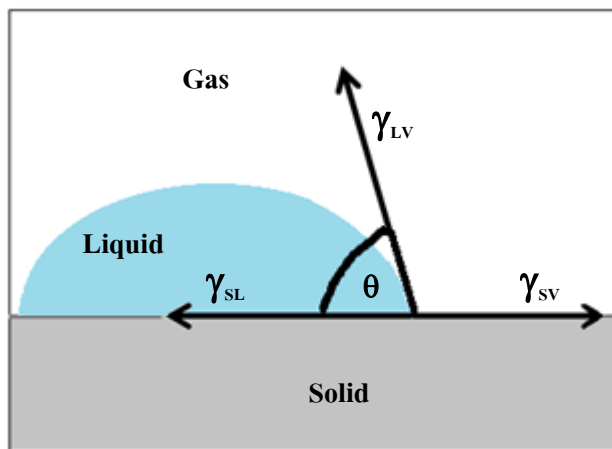
ปรางูการณน้ำกลิ้งบนใบบัว (Lotus effect) เกิดขึ้นจากแรงระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิว รูปร่างของหยดน้ำจะขึ้นอยู่กับพื้นผิวที่รองรับ ซึ่งแรงที่เกี่ยวข้องมี อยู่ 3 แรงคือ

- แรงตึงผิวระหว่างพื้นผิว กับ หยดน้ำ (γ_{SL})
- แรงตึงผิวระหว่างพื้นผิว กับ อากาศ (γ_{SV})
- แรงตึงผิวระหว่างหยดน้ำ กับ อากาศ (γ_{LV})

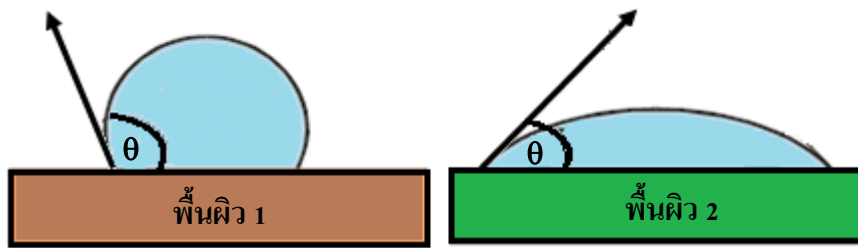
การที่น้ำอยู่บนพื้นผิวใดๆ สามารถใช้สมการของยัง (Young's equation) ดังแสดงในสมการ 3.1 ในการอธิบายหยดน้ำที่อยู่บนพื้นผิวของแข็งได้

$$\gamma_{SL} - \gamma_{SV} + \gamma_{LV} \cos\theta = 0 \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

เมื่อ θ คือ มุมสัมผัส (Contact angle) ที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวของแข็ง หยดน้ำ และอากาศรอบๆ ดังแสดงในภาพ 3.5



ภาพ 3.5 มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวของแข็ง หยดน้ำ และอากาศรอบๆ (บุญรอด, 2552)



ภาพ 3.6 การเปียกผิวของหยดน้ำบนพื้นผิวของแข็ง แสดงถึงความชอบน้ำที่เพิ่มขึ้น (บุญรอด, 2552)

มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิวมีผลต่อแรงทั้งสาม ถ้ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิวเข้าใกล้ 180 องศา หยดน้ำจะมีลักษณะกลม ไม่สามารถกระจายตัวออกได้ จากความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับมุมสัมผัส (Contact angle, θ) ดังแสดงในภาพ 3.6 เมื่อมุมสัมผัสน้อยกว่า 90 องศา จะทำให้น้ำแผ่กระจายเปียกทั่วพื้นผิว (Hydrophilic) เมื่อมุมสัมผัสมากกว่า 90 องศา น้ำจะคงอยู่เป็นหยดไม่เปียกพื้นผิว (Hydrophobic) แต่จะกลิ้งพาลิ่งสกปรกออกไป เป็นการทำความสะอาดตัวเอง นอกจากนี้ผิวด้านบนของใบบัวยังเคลือบด้วยสารที่มีลักษณะคล้ายขี้ผึ้ง ซึ่งมีสมบัติเกลียดน้ำ (Hydrophobic) ทำให้น้ำไม่กระจายตัวออก

จากสมบัติทั้งสองประการนี้ส่งผลให้ใบบัวแสดงสมบัติเป็น Super hydrophobic surface หากมีฝุ่นผงและสิ่งสกปรกต่างๆ ติดอยู่ที่ใบบัวเมื่อหยดน้ำตกลงมา หยดน้ำจะกลิ้งพาให้สิ่งสกปรกติดไปกับหยดน้ำ เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างหยดน้ำกับสิ่งสกปรกมีค่าสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสิ่งสกปรกกับใบบัว จึงทำให้ใบบัวสะอาดอยู่เสมอ (Self-cleaning surface) นักวิทยาศาสตร์จึงได้นำหลักการของน้ำกลิ้งบนใบบัว (Lotus effect) มาใช้ในการสังเคราะห์วัสดุชนิดใหม่เลียนแบบคุณลักษณะของใบบัว หรือการนำไปประยุกต์ใช้เป็นสีทาบ้านที่ไม่เปียกน้ำ และสามารถทำความสะอาดตัวเองได้ การพัฒนาพื้นผิวที่สะอาดได้ด้วยตัวเองสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การเคลือบผิวด้วยสารบางชนิดหรือการปรับแต่งโครงสร้างขนาดเล็กให้เหมาะสม

ตัวอย่าง 3.1 น้ำหยดลงบนวัตถุชิ้นหนึ่ง สัมผัสจากหยดน้ำพบว่า แรงตึงผิวระหว่างพื้นผิววัตถุกับหยดน้ำเท่ากับ 90 นิวตัน แรงตึงผิวระหว่างพื้นผิววัตถุกับอากาศเท่ากับ 180 นิวตัน และแรงตึงผิวระหว่างหยดน้ำกับอากาศเท่ากับ 120 นิวตัน จงหามุมสัมผัสระหว่างของแข็งและหยดน้ำเป็นเท่าใด และวัตถุนี้เปียกน้ำหรือไม่

วิธีทำ

$$\gamma_{SL} - \gamma_{SV} + \gamma_{LV} \cos\theta = 0$$

$$90 - 180 + 120\cos\theta = 0$$

$$-90 + 120\cos\theta = 0$$

$$120 \cos\theta = 90$$

$$\cos\theta = \frac{90}{120}$$

$$\cos\theta = 0.75$$

$$\theta = \cos^{-1} 0.75$$

$$\theta = 41.41 \text{ องศา}$$

มุมสัมผัสระหว่างของแข็งและหยดน้ำเป็น 41.41 องศา ซึ่งน้อยกว่า 90 องศา ดังนั้นวัตถุนี้จึงเปียกน้ำ

ตอบ

3.1.4 นวัตกรรมจากหยดน้ำบนใบบัว

สีทาบ้าน สีทาบ้านที่มีสมบัติเกลียดน้ำ เนื่องจากมีการผสมสารที่มีสมบัติเกลียดน้ำลงไปเพื่อช่วยป้องกันคราบสกปรก เพราะน้ำที่กลิ้งไปมาโดยไม่เปียกพื้นผิวจะเป็นตัวช่วยในการนำพาสิ่งสกปรกออกไปโดยไม่ต้องเปลืองแรงขัดในการทำความสะดวก

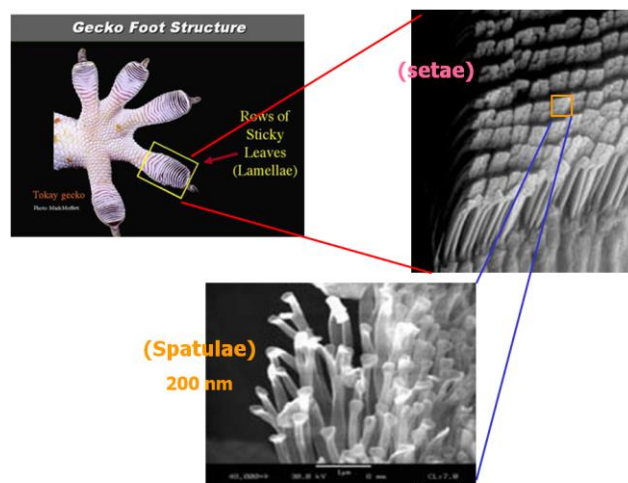
เสื้อผ้าที่กันน้ำ คือ เสื้อผ้าที่ผลิตจากเส้นใยที่เคลือบด้วยสารที่เกลียดน้ำ ทำให้น้ำและของเหลวต่างๆ ไม่ซึมลงบนเสื้อผ้าที่สวมใส่ ทำให้เสื้อผ้าสะอาดอยู่ได้นาน

ฟิล์มกันน้ำ มีสมบัติโปร่งแสง และมีอายุการใช้งานยาวนาน สามารถทำความสะอาดตัวเองได้จากการเคลือบสารที่มีสมบัติทำความสะอาดตนเองได้

วัสดุเคลือบผิว วัสดุเคลือบผิวเพื่อป้องกันการสึกกร่อนเป็นวัสดุเคลือบผิวที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Ultrahydrophobic) ซึ่งสามารถเกิดพันธะโควาเลนต์ (อธิบายไว้ในบทที่ 2) กับวัสดุที่ต้องการเคลือบได้ เพื่อป้องกันการสึกกร่อน วัสดุเคลือบผิวนี้จะช่วยป้องกันพื้นผิวของโลหะด้านนอก เช่น อะลูมิเนียมอัลลอยด์ ที่ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน ไม่ให้สึกกร่อนเมื่อเจอกับสภาพอากาศด้านนอก เมื่อน้ำสัมผัสกับผิวด้านนอกของเครื่องบิน หยดน้ำจะม้วนตัวเป็นก้อนกลมแล้วลื่นออกไป นอกจากนี้ยังทนต่อการสึกกร่อนจากละอองน้ำเกลือเป็นเวลานานถึง 1,100 ชั่วโมงได้ และทนได้แม้ว่าจะอยู่ในอุณหภูมิสูงถึง 700 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามสารเคลือบนี้มีข้อเสีย คือ ไม่สามารถป้องกันการเกิดน้ำแข็งเกาะที่พื้นผิวได้

3.2 เท้าตุ๊กแก

เท้าทั้ง 4 ของตุ๊กแกมีโครงสร้างขนาดเล็กระดับนาโนเมตร ซึ่งมีลักษณะเป็นชั้นๆ มองดูเหมือนเกล็ด เรียกชั้นเหล่านี้ว่า ลามเล่ (Lamellae) ดังแสดงในภาพ 3.7 แต่ละลามเล่เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน จะพบเส้นขนเล็กๆ จำนวนมากมายนับล้านเส้น เรียกว่า ซีเต้ (Setae) แต่ละซีเต้จะมีบริเวณปลายซึ่งแตกแขนงออกเป็นเส้นขนเล็กๆ อีกจำนวนนับร้อยเรียกว่า สปาตุเล่ (Spatulae) ซึ่งมีขนาดเล็กมากประมาณ 200 นาโนเมตร



ภาพ 3.7 เส้นขนเล็กบริเวณปลายนิ้วของเท้าตุ๊กแก (เวฟุริย์, 2550)

การที่ตุ๊กแกสามารถเกาะติดวัสดุต่างๆ ทั้งวัสดุที่ราบเรียบ หรือขรุขระ ในแนวนอน หรือแนวตั้ง แม้กระทั่งกลับหัว ทั้งยังคงเกาะติดได้แม้แต่น้ำหรือในสภาวะสุญญากาศ เป็นเพราะแรงดึงดูดของขนเส้นเล็กๆ จำนวนมหาศาล โดยแรงดึงดูดของซีเต้หนึ่งเส้นจากเท้าตุ๊กแกสามารถยกมัดที่มีน้ำหนัก 20 มิลลิกรัมได้หนึ่งตัว ถ้ามีซีเต้จำนวนหนึ่งล้านเส้น สามารถยกเด็กที่มีน้ำหนัก 20 กิโลกรัมได้หนึ่งคน นอกจากนี้ซีเต้จำนวนหนึ่งล้านเส้น สามารถบรรจุลงบนพื้นที่เท่ากับเหรียญ 50 สตางค์ ได้อย่างพอดี แรงดึงดูดทั้งหมดของสปาดูเล่จำนวนพันล้านเส้น มากกว่าแรงที่ตุ๊กแกต้องการในการไต่บนเพดานถึงพันเท่า ซึ่งแรงดึงดูดของซีเต้รวมจำนวนสองล้านเส้นจากเท้าทั้งสองของตุ๊กแกมีค่าประมาณ 40 กิโลกรัม แต่น้ำหนักของตุ๊กแกโดยเฉลี่ยประมาณ 50 ถึง 150 กรัม เท่านั้น

เนื่องจากแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าน้ำหนักตัวหลายเท่า ตุ๊กแกจึงสามารถเกาะติดเพดานได้แม้ว่าจะใช้นิ้วยึดเพดานเพียงแค่นิ้วเดียว ในทางตรงกันข้ามตุ๊กแกดึงเท้าออกจากวัสดุต่างๆ โดยจะค่อยๆ ดึงเท้าออกคล้ายกับการดึงเทปกาว การดึงเท้าออกของตุ๊กแกให้หลุดเกิดจากการเพิ่มมุมสัมผัสระหว่างขนซีเต้กับพื้นผิวที่เกาะ โดยตุ๊กแกจะยกเท้าขึ้นทีละนิดโดยการงอเท้า ซึ่งจะส่งผลต่อมุมและการกดที่ถูกต้อง ถ้าหากว่ามุมสัมผัสระหว่างซีเต้กับพื้นเพิ่มขึ้นเป็น 30 องศา จะทำให้เกิดการหลุดออกของซีเต้ทันที ขนาดนาโนเมตรของเส้นขน หรือสปาดูเล่ที่แต่ละปลายของซีเต้ จะมีแรงดึงดูดที่เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างแต่ละปลายสปาดูเล่กับผนัง แม้แรงแวนเดอร์วาลส์จะเป็นแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (อธิบายไว้ในบทที่ 2) ที่มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแรงดึงดูดอื่นๆ แต่เนื่องจากสปาดูเล่จำนวนมาก ทำให้เกิดแรงดึงดูดที่เหนียวแน่น

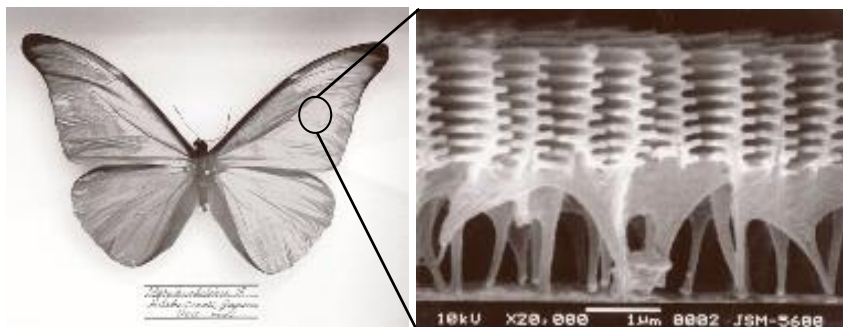
จากการศึกษาโครงสร้างของเท้าตุ๊กแก นักวิทยาศาสตร์สามารถสร้างเส้นขนที่มีลักษณะคล้ายกับสปาดูเล่ที่เท้าตุ๊กแก เรียกว่า แถบยึดตุ๊กแก (Gecko tape) เส้นขนขนาดเล็กที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายด้าน เช่น การผลิตเทปที่มีความเหนียวมาก ให้แก่นักบินอวกาศเพื่อนำไปใช้ในสภาวะสุญญากาศ เทปติดแผลที่ใช้ในการผ่าตัด หุ่นยนต์ที่สามารถไต่ขึ้นลงในแนวตั้งและวิ่งบนเพดานได้ เป็นต้น

3.3 ปีกผีเสื้อบางชนิด

ผีเสื้อ (Polyommatus sp.) สามารถดึงดูดแสงตรงข้ามหรือหลบหนีศัตรูได้ โดยการเปลี่ยนสีปีก เช่น จากสีน้ำเงินไปเป็นสีน้ำตาล เมื่อมีแสงมาตกกระทบบนปีกผีเสื้อชนิดนี้ จะเกิดการหักเหและการสะท้อน โดยถ้ามุมที่แสงตกกระทบบมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย สีที่ปรากฏบนปีกผีเสื้อก็จะแตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ถ้าแสงแดดมาตกกระทบบกับโครงสร้างที่อยู่ในปีกผีเสื้อในมุมใดมุมหนึ่ง จะสะท้อนแสงสีน้ำเงินออกมา แต่ในขณะที่เดียวกันก็ดูดซับแสงสีอื่นๆ ไว้ทั้งหมดทำให้ปีกผีเสื้อมีสีน้ำเงิน ดังแสดงในภาพ 3.8 แสดงถึงสีต้นบนปีกของผีเสื้อ



ภาพ 3.8 ผลึกโฟโตนิกสับบนปีกผีเสื้อ และการเปลี่ยนสีบนปีกผีเสื้อ (Bhushan, B. 2007.)



ภาพ 3.9 ภาพ SEM แสดงลักษณะผลึกโฟโตนิกสับบนปีกผีเสื้อ (Bhushan, B. 2007.)

เนื่องจากปีกผีเสื้อชนิดนี้มีรูพรุนที่มีขนาดนาโนเมตรจำนวนมากเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ดังแสดงในภาพ 3.9 ทำหน้าที่เป็นเสมือนเป็นผลึกโฟโตนิกส์ในธรรมชาติ นอกจากนี้การเปลี่ยนสีของปีกผีเสื้อชนิดนี้ยังสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิได้ จากการค้นพบนี้ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างผลึกโฟโตนิกส์สังเคราะห์ที่ยืดหยุ่นได้ดี และเปลี่ยนสมบัติไปตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ซึ่งสามารถนำไปใช้ผลิตเสื้อผ้าป้องกันความร้อนที่ใช้ในทะเลทรายหรือห้วงอวกาศ

3.4 ไยแมงมุม

แมงมุมมีต่อมพิเศษที่สามารถหลั่งโปรตีนที่ละลายในน้ำได้ เรียกว่า ไฟโบรอิน (Fibroin) เมื่อแมงมุมหลั่งโปรตีนชนิดนี้ออกมาจากต่อม โปรตีนจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็ง หลังจากนั้นแมงมุมก็จะใช้ขาในการถักทอโปรตีนเหล่านี้เป็นเส้นใยที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งก็คือใยแมงมุม ใยแมงมุมเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงและเหนียวมาก ใยแมงมุมสามารถหยุดแมลงที่บินด้วยความเร็วสูงได้โดยที่ใยแมงมุมไม่ขาด

ปัจจุบันสามารถสร้างใยแมงมุมเลียนแบบแมงมุมได้ โดยการตัดต่อยีนที่ควบคุมการสร้างโปรตีนไฟโบรอินจากแมงมุม แล้วนำไปใส่ไว้ในโครโมโซมของแพะ เพื่อให้แพะมีโปรตีนใยแมงมุม แล้วแยกโปรตีนนั้นออกมาปั่นทอเป็นเส้นใย เพื่อใช้ในการผลิตเสื้อผ้ากันกระสุนที่แข็งแรง แต่มีน้ำหนักเบา โดยเส้นใยที่สร้างขึ้นนี้มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กถึงห้าเท่าเมื่อมีน้ำหนักเท่ากัน นอกจากนี้ยังสามารถนำใยแมงมุมไปใช้เป็นเส้นใยสำหรับพลาสติกได้ เป็นต้น

3.5 เปลือกหอยเป่าสี้อ

เปลือกหอยเป่าสี้อมีแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นองค์ประกอบ มีลักษณะมันวาวและมีความแข็งแรงสูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากการจัดเรียงตัวในระดับโมเลกุลของแคลเซียมคาร์บอเนตของเปลือกหอยเป่าสี้อ มีลักษณะคล้ายเป็นกำแพงอิฐก่อที่เรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ โดยที่ก้อนอิฐขนาดนาโนแต่ละก้อนจะเชื่อมติดกันด้วยกาวที่เป็นโปรตีนโพลีแซคคาไรด์ จากโครงสร้างที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบ ทำให้เปลือกหอยเป่าสี้อทนทาน

ต่อแรงกระแทกมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเปลือกหอยเป่าอ้อกับชอล์คเขียนกระดาน พบว่ามีลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางเคมีแตกต่างกัน โดยชอล์คจะเปราะ หักง่าย แต่เปลือกหอยมีความแข็งแรงสูงมาก

3.6 ขาจิ้งจิกน้ำ

จิ้งจิกน้ำ (Water strider) สามารถแบกน้ำหนักได้มากกว่าน้ำหนักตัวถึงสิบห้าเท่าโดยไม่จมน้ำ



ภาพ 3.10 จิ้งจิกน้ำ (Bhushan, B. 2007.)

ทั้งนี้เนื่องจากการทำงานร่วมกันระหว่างขาของจิ้งจิกน้ำกับแรงตึงผิวของน้ำ ขาทั้งสี่ของจิ้งจิกน้ำมีความยาวมากกว่าลำตัวหลายเท่า ช่วยให้เกิดการกระจายน้ำหนัก นอกจากนี้ขาของจิ้งจิกน้ำยังปกคลุมไปด้วยเส้นขนขนาดเล็กๆ ที่เคลือบด้วยสารที่มีสมบัติเกลียดน้ำ เช่นเดียวกับแวกซ์ ทำให้โมเลกุลของน้ำหนีออกจากเส้นขน ทำให้เกิดลักษณะเป็นแอ่งนูนบนผิวน้ำ และเส้นขนจะวางอยู่บนแอ่งนูนนั้นไม่จมน้ำไป ในทางกลับกันถ้าขนมีลักษณะชอบน้ำ โมเลกุลของน้ำจะเข้าไปเกาะกับขนทำให้เกิดการจมน้ำ ขนขนาดเล็กที่ขาจิ้งจิกน้ำ เรียกว่า ไมโครซีเต้ (Microsetae) ซึ่งจะซ้อนกันอยู่หลายชั้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 300 นาโนเมตร อากาศจะถูกกักไว้ในบริเวณระหว่างไมโครซีเต้ และช่องว่างเล็กๆ ระดับนาโนเมตรของไมโครซีเต้แต่ละเส้น กลายเป็นฟิล์มอากาศบางๆ ป้องกันไม่ให้จมน้ำ และช่วยให้เคลื่อนที่

บนผิวหนังได้อย่างรวดเร็ว จากหลักการนี้ทำให้มีการสร้างหุ่นยนต์เลียนแบบจิ้งจิกน้ำที่สามารถลอยบนผิวหนังและเคลื่อนที่บนผิวหนังได้ แต่ยังไม่สามารถเคลื่อนที่ได้รวดเร็วเท่ากับจิ้งจิกน้ำ หุ่นยนต์จิ้งจิกน้ำที่ปลายขาทั้งหกข้างมีขนจำนวนมากที่ไม่ชอบน้ำซึ่งเลียนแบบจิ้งจิกน้ำในธรรมชาติ ขนเล็กๆ ที่ไม่ชอบน้ำนี้มีพื้นผิวจำนวนมากที่จะเกิดแรงผลักดันนาโนระหว่างขนกับน้ำ ซึ่งแรงเล็กๆ เหล่านี้เมื่อสะสมรวมกันเพียงพอ ทำให้สามารถยกตัวแมลงขึ้นเหนือผิวหนังได้

บรรณานุกรม

1. ฉัฐพันธุ์ ศุภกา. 2550. วัสดุโครงสร้างนาโน / อนุภาคนาโน / การละลาย. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.stkc.go.th/taxonomy/term/144?page=4> (10 พฤศจิกายน 2554)
2. บุญรอด วงษ์สวาท. 2552. แรงเชื่อมแน่นและแรงยึดติด. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.promma.ac.th/main/chemistry/solid_liquid_gas/Surface_tension.htm (10 พฤศจิกายน 2554)
3. พัชรี ลิ้มสุวรรณ. 2552. นาโนกับชีวิตประจำวัน (ตอนที่2) ตอนใบบัว. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.sahavicha.com/?name=knowledge&file=readknowledge&id=503> (10 พฤศจิกายน 2554)
4. ภัทร์ สุขแสน. 2554. พื้นผิวอัจฉริยะด้วยนาโนเทคโนโลยี. วิทยาศาสตร์บูรพา. 16 (1): 124-130
5. โรงเรียนพรหมานุสรณ์จังหวัดเพชรบุรี. 2553. ความตึงผิว. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.promma.ac.th/main/chemistry/solid_liquid_gas/Surface_tension.htm (10 พฤศจิกายน 2554)
6. วิชาการคอตคอม. วัสดุเคลือบผิวเครื่องบินป้องกันการสึกกร่อน. 2551. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.vcharkarn.com/vnews/136518> (10 พฤศจิกายน 2554)
7. เวฬุรีย์ ทองคำ. 2550. นาโนในธรรมชาติตอน ดินตึกแกลแสนหนึบ. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.oknation.net/blog/limjira/2007/07/31/entry-6> (10 พฤศจิกายน 2554)
8. ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ. 2547. ปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัว (Lotus effect). [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.neutron.rmutphysics.com/news/index.php?option=com_content&task=view&id=1933&Itemid=3 (10 พฤศจิกายน 2554)

9. สถาบันนวัตกรรมและและพัฒนารเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. **ทำความรู้จักกับนาโนเทคโนโลยีในธรรมชาติ.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit2-1.html> (10 พฤศจิกายน 2554)
10. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. **ส่อง “นาโนเทคโนโลยี” ในธรรมชาติ.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://nstda.or.th/rural/public/100%20articles-stkc/97.pdf> (10 พฤศจิกายน 2554)
11. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์แห่งชาติ. **เสือนาโน.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.myfirstbrain.com/student_view.aspx?ID=75430 (10 พฤศจิกายน 2554)
12. Bhushan, B. 2007. **Springer Handbook of Nanotechnology.** Springer Berlin Heidelberg New York. 1,917 page.
13. Lai, S. 2003. **Mimicking nature: Physical basis and artificial synthesis of the Lotus Effect.** [Online]. Available <http://home.wanadoo.nl/scslai/lotus.pdf> (10 November 2011)

คำถามท้ายบท

- 3.1 โครงสร้างนาโนที่มีอยู่ในธรรมชาติ และที่ได้จากการสังเคราะห์ มีความเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไรบ้าง
- 3.2 โครงสร้างนาโนในระบบธรรมชาติเกิดขึ้นมาได้อย่างไร
- 3.3 ไบโบบีโอมิมิตีกลียค่น้ำเพราะเหตุใด อธิบาย พร้อมทั้งระบุด้วยว่าเราสามารถนำหลักการของน้ำกลิ้งบนใบบัวไปประยุกต์ใช้ในด้านใดได้บ้าง
- 3.4 ส่วนไหนของตีนตุ๊กแกที่สามารถทำให้ยึดเกาะติดกับผ้าเปดานได้อย่างแน่น อธิบาย พร้อมทั้งระบุด้วยว่าเราสามารถนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้ในด้านใดได้บ้าง
- 3.5 Lotus effect คืออะไร และสอดคล้องกับสมการของ Young's อย่างไร เขียนสมการ อธิบาย
- 3.6 แรงดึงดูดกับหยดน้ำบนใบบัวเกี่ยวข้องกับอย่างไรบ้าง อธิบาย
- 3.7 DC magnetron sputtering system และ RF magnetron sputtering system แตกต่างกันอย่างไร
- 3.8 จงอธิบายนาโนเทคโนโลยีในธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับความเป็นผลึกโฟโตนิกส์ของปีกผีเสื้อบางชนิด และนาโนเซรามิกส์ของเปลือกหอยเป่าสี้อ รวมทั้งบอกถึงการนำไปประยุกต์ใช้
- 3.9 น้ำหยดลงบนวัตถุชิ้นหนึ่ง สังเกตจากหยดน้ำพบว่า แรงตึงผิวระหว่างพื้นผิววัตถุกับอากาศเท่ากับ 180 นิวตัน และแรงตึงผิวระหว่างหยดน้ำกับอากาศเท่ากับ 120 นิวตัน มุมสัมผัสระหว่างของแข็งและอากาศเป็น 138.59 องศา จงหาแรงตึงผิวระหว่างพื้นผิววัตถุกับหยดน้ำ และวัตถุนี้เปียกน้ำหรือไม่ (90 นิวตัน)

บทที่ 4

การสังเคราะห์วัสดุที่มีโครงสร้างระดับนาโน:

- 4.1 การสร้างวัสดุและอุปกรณ์นาโนโดยใช้กระบวนการแบบบนลงล่าง (Top down)
 - 4.1.1 การสลักกลวง (Lithography)
 - 4.1.1.1 วิธีการลิโทกราฟีแบบใช้แสง (Photo lithography, PL)
 - 4.1.1.2 วิธีการลิโทกราฟีแบบใช้ปลายแหลม (Dip-pen nanolithography, DPN)
 - 4.1.1.3 วิธีการลิโทกราฟีแบบใช้ช่องว่าง (Nanosphere lithography, NSL)
 - 4.1.1.4 วิธีการลิโทกราฟีแบบใช้ลำแสงอิเล็กตรอน (Electron beam lithography, EBL)
 - 4.1.2 การตกสะสม (Deposition)
 - 4.1.2.1 การหมุนเหวี่ยง (Spin coating)
 - 4.1.2.2 การระเหยกลายเป็นไอ (Evaporation)
 - 4.1.2.3 การเคลือบแบบสปัตเตอร์ริง (Sputtering)
 - 4.1.2.4 การตกสะสมไอสารด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical vapor deposition)
 - 4.1.3 การกัดกรวด (Etching)
 - 4.1.4 การปลูกผลึก (Crystal growth)
 - 4.1.5 วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc discharge)
 - 4.1.6 วิธีใช้เลเซอร์ หรือการระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser vaporization)
- 4.2 การสร้างวัสดุและอุปกรณ์นาโนโดยใช้กระบวนการแบบล่างสู่บน (Bottom up)
 - 4.2.1 การสังเคราะห์ทางเคมี (Chemical synthesis)
 - 4.2.2 การประกอบตัวเอง (Self assembly)
 - 4.2.3 การใช้กล้องส่องอะตอมเคลื่อนย้ายอะตอม (Scanning probe manipulation)

การสังเคราะห์วัสดุนาโน แบ่งได้เป็น 2 แบบ ได้แก่ การนำอนุภาคนาโนขนาดเล็กมาจัดเรียงตัวกันใหม่ และการย่อยอนุภาคนาโนใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง ทั้งนี้แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน แต่ต่างก็มีเป้าหมายเพื่อมุ่งเน้นให้วัสดุหรืออุปกรณ์ที่สังเคราะห์หรือผลิตขึ้นมีความสามารถและมีสมบัติที่ดีขึ้น เช่น มีความแข็งแรง และมีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิสูง มีความต้านทานต่อการกัดกร่อน ด้านทานการสึกกร่อน และด้านทานต่อการสึกหรอเพิ่มขึ้น รวมทั้งมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาเคมีได้ดีขึ้น

4.1 การสร้างวัสดุและอุปกรณ์นาโนโดยใช้กระบวนการแบบบนลงล่าง (Top down)

4.1.1 การสลักลวดลาย (Lithography)

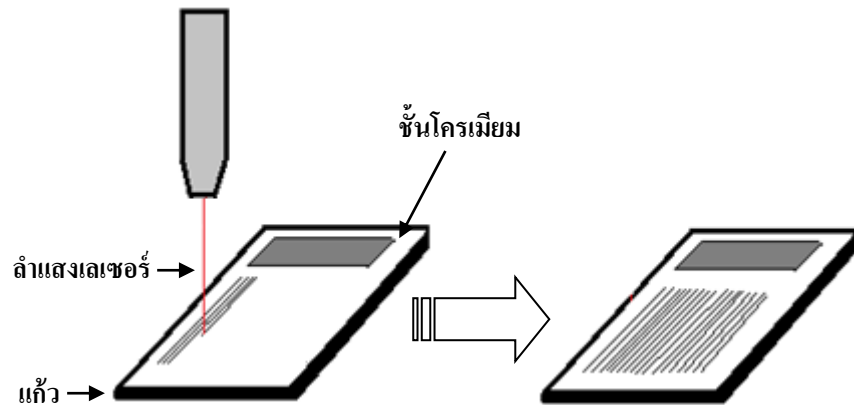
ลิโทกราฟี มีลักษณะคล้ายกับการแกะสลักหรือการวาดแบบบนพื้นผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นการจัดการกับวัสดุชิ้นใหญ่ โดยการนำมาแกะสลักให้เป็นชิ้นเล็กลงโดยใช้ลำแสง ซึ่งสามารถใช้ลำแสงได้ทั้งแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) และแสงขาว หรือแสงที่มองเห็นได้ (Visible) โดยรายละเอียดเกี่ยวกับสเปกตรัมของแสงจะกล่าวถึงในบทถัดไป ลิโทกราฟี เป็นวิธีการที่สำคัญสำหรับประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

นาโนลิโทกราฟี (Nanolithography) เป็นวิธีการลิโทกราฟีในระดับนาโนเมตรที่ไม่สามารถใช้แสงขาว (ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 นาโนเมตร) ในการจัดการกับวัสดุได้ เนื่องจากใหญ่กว่าโครงสร้างระดับนาโนเมตร จึงไม่สามารถสร้างลวดลายบนวัสดุระดับนาโนได้ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเพื่อให้วิธีการลิโทกราฟีสามารถที่จะใช้ผลิตโครงสร้างนาโนได้ โดยมากแล้ววิธีการนี้จะใช้ในกระบวนการของการผลิตสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เพื่อประกอบสำหรับสร้างเป็นแผงวงจรรวมหรือไอซี (IC) ของชิปคอมพิวเตอร์ รวมทั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ และมีแนวโน้มในการที่จะนำมาใช้สำหรับระบบเครื่องกลไฟฟ้าระดับนาโน (Nanoelectromechanical systems, NEMS) ซึ่งในปัจจุบันวิธีการนาโนลิโทกราฟีที่นำมาใช้งานเพื่อสร้างโครงสร้างระดับนาโน มีดังนี้

4.1.1.1 วิธีการลิโทกราฟีแบบใช้แสง (Photo lithography, PL)

โฟโตลิโทกราฟี เป็นวิธีการสร้างโครงสร้างนาโนที่มีขั้นตอนดังนี้

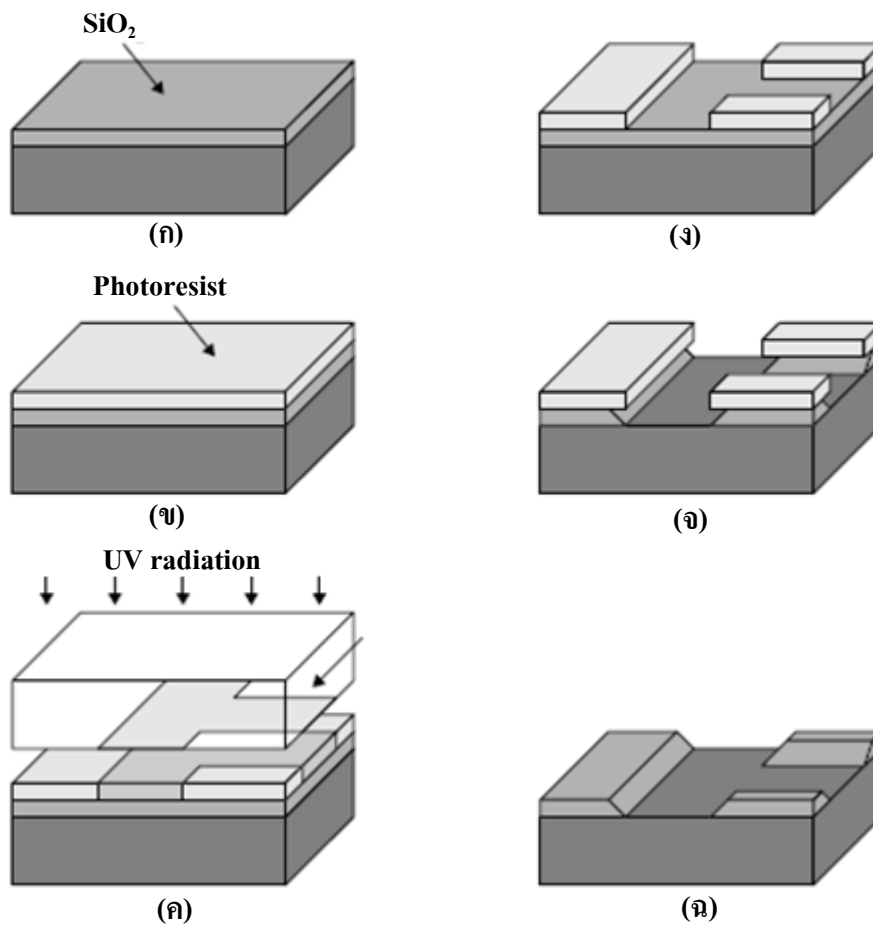
1. ใช้แสงเลเซอร์เขียนหรือวาดรูปแบบวงจรบนชั้นของโครเมียมที่เคลือบอยู่บนแก้ว ดังแสดงในภาพ 4.1



ภาพ 4.1 ใช้แสงเลเซอร์เขียนรูปแบบวงจรสำหรับ ไมโครชิป (Franssila, 2004)

2. นำรูปแบบวงจรที่สร้างในขั้นตอนที่หนึ่ง มาใช้เป็นมาร์ค (Mask) เพื่อผลิตรูปแบบวงจรบนแผ่นซิลิกอน โดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตกล่าวคือ ผ่านลำแสงอัลตราไวโอเล็ตให้ทะลุผ่านรูปแบบวงจรที่สร้างขึ้นในขั้นตอนที่หนึ่ง โดยแสงจะผ่านทะลุลงไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีชั้นของโครเมียม ที่ได้สลายตัวไปในขั้นตอนที่หนึ่ง ผ่านไปยังแผ่นซิลิกอน และเกิดรูปแบบวงจรบนแผ่นซิลิกอนนั้น เทคโนโลยีโฟโตลิโทกราฟี สามารถใช้ในการผลิตชิปคอมพิวเตอร์ และระบบไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กในระดับนาโน แต่มีข้อจำกัดบางอย่างจากการใช้ลำแสงอัลตราไวโอเล็ตกล่าวคือราคาแพงและไม่สะดวก ดังนั้นเพื่อให้สามารถสร้าง โครงสร้างที่มีขนาดเล็กลง ทำงานได้เร็วขึ้น และราคาถูก จึงมีการนำลำอิเล็กตรอน และรังสีเอกซ์มาใช้ในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีแทนลำแสงอัลตราไวโอเล็ต

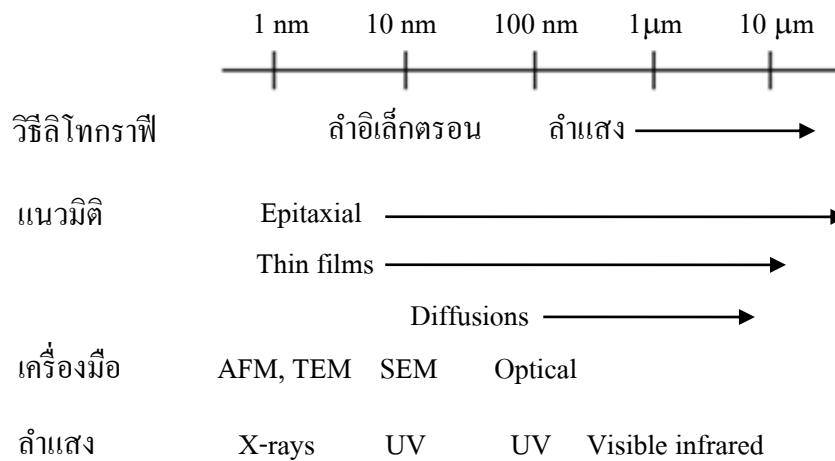
ภาพ 4.2 แสดงกระบวนการลิโทกราฟีแบบใช้แสงในการเตรียมฟิล์มออกไซด์



ภาพ 4.2 กระบวนการลิโทกราฟีแบบใช้แสง (ก) เคลือบฟิล์มออกไซด์ (ข) วางแผ่นกั้นแสง (Photoresist) (ค) ลำแสงอัลตราไวโอเล็ตส่องผ่านมาร์คไปยังชิ้นงาน (ง) สร้างรูปแบบแผ่นกั้นแสง (จ) กัดครดชั้นออกไซด์ออก (ฉ) นำแผ่นกั้นแสงออก จะได้ชั้นของออกไซด์ตามรูปแบบที่ต้องการ (Franssila, 2004)

ความหนาของชั้นออกไซด์ที่ต้องการสำหรับการประยุกต์ใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์มีความสำคัญเป็นอย่างมาก ยกตัวอย่างเช่น การใช้ในวงจรรที่ออกแบบเป็นพิเศษเพื่อการประหยัดกระแสไฟฟ้า หรือซีมอส (Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS) ซึ่งมีวิธีการหลากหลายวิธีในการเตรียมชั้นของฟิล์มออกไซด์ เช่น เทคนิคการตกตะกอน

ไอสารด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical vapor deposition, CVD) ที่สามารถเตรียมฟิล์มได้ความบางในระดับ นาโนเมตรจนถึงไมโครเมตร วิธีการสปัตเตอร์ริง (Sputtering) สามารถเตรียมฟิล์มได้บางในระดับ 0.5 นาโนเมตร ถึง 5 ไมโครเมตร ในขณะที่วิธีการหมุนเหวี่ยง (Spin coating) สามารถเตรียมฟิล์มในระดับความบาง 10 นาโนเมตร ถึงความหนา 100 ไมโครเมตร ภาพ 4.3 แสดงวิธีลิโทกราฟีในระดับมิติต่างๆ



ภาพ 4.3 วิธีลิโทกราฟีในระดับมิติต่างๆ

4.1.1.2 วิธีการลิโทกราฟีแบบใช้ปลายแหลม (Dip-pen nanolithography, DPN)

Dip-pen nanolithography (DPN) เป็นการสร้างโครงสร้างระดับนาโนเมตรที่ต้องการบนพื้นผิวต่างๆ โดยการเขียนลงบนพื้นผิวโดยตรง โดยใช้ปลายแหลมของเครื่อง AFM ซึ่งตรงปลายแหลมจะมีที่เก็บหมึก เมื่อใช้ปลายแหลมลากผ่านพื้นผิวของวัตถุ อะตอมของหมึกจะทำปฏิกิริยากับพื้นผิวดังนั้น เกิดเป็นโครงสร้างนาโนที่มีความเสถียรบนผิววัตถุนั้น ซึ่งหมึกที่ใช้เป็นได้ทั้งสารประกอบทางชีวภาพ เช่น โพลิเมอร์ หรือสารประกอบทางเคมี เช่น กำมะถัน หรือโมเลกุลทางชีวภาพ เช่น ดีเอ็นเอ หรือโปรตีน เป็นต้น

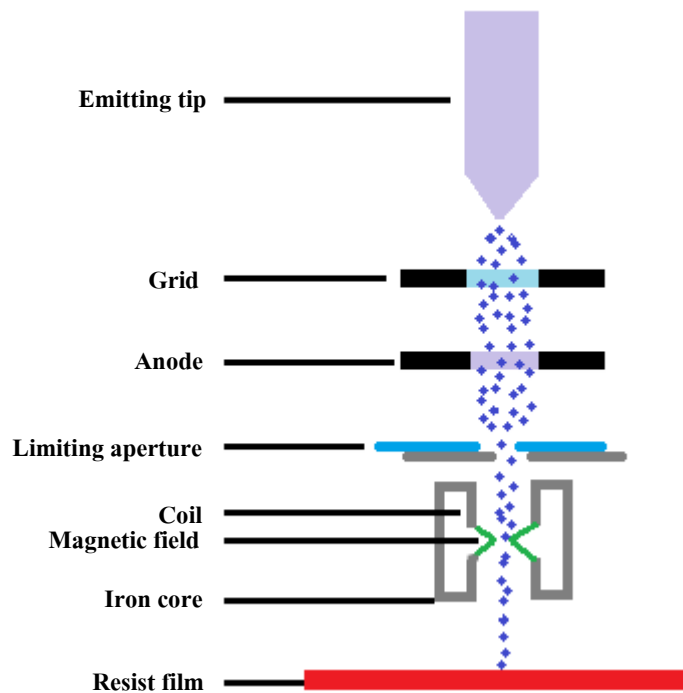
4.1.1.3 วิธีการลิโทกราฟีการใช้แบบช่องว่าง (Nanosphere lithography, NSL)

Nanosphere lithography (NSL) เป็นการสร้างโครงสร้างที่มีหลักการง่ายๆ จากการวางแบบ (Pattern) ที่ต้องการที่จะสร้างบนพื้นผิว โดยแบบที่วางจะมีช่องว่างหรือรูอยู่ จากนั้นใช้เนื้อวัสดุที่ต้องการสร้างจริงทำการเคลือบปกคลุมแบบที่วางเอาไว้ให้ทั่ว หลังจากนั้นเอาแบบที่วางไว้ตอนแรกออก ก็จะได้เป็นโครงสร้างในระดับนาโน ที่เกิดขึ้นบริเวณที่เป็นช่องหรือรูจากแบบที่วาง ยกตัวอย่างเช่น ถ้าหากนำลูกแก้วมาเรียงบนแผ่นกระดาษจนเต็มพื้นผิวดั้งเดิมโดยจัดให้ชิดที่สุดเท่าที่จะชิดได้ จากนั้นใช้สีกัดฟันไปบนลูกแก้วจนทั่วทั้งหมด จะพบว่าเมื่อนำลูกแก้วออกจากแผ่นกระดาษ สีสเปรย์ที่ฉีดพ่นลงไปจะปรากฏอยู่บนพื้นกระดาษเป็นจุดๆ โดยทุกจุดมีรูปทรงคล้ายสามเหลี่ยม แต่มีด้านที่เว้าข้างใน ซึ่งจุดที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากสีที่พ่นผ่านช่องว่างเล็กระดับนาโนที่อยู่ระหว่างลูกแก้วที่วางติดกัน ทำให้ได้โครงสร้างระดับนาโนของสีที่พ่นลงไป

ข้อดีของวิธีการนี้คือ สามารถใช้กับพื้นผิวได้หลายชนิด สามารถเลือกโมเลกุลที่พ่นลงไปได้หลากหลาย สามารถพ่น โมเลกุลทับได้หลายชั้น และสามารถสร้างจุดนาโนได้เป็นจำนวนมากในครั้งเดียว

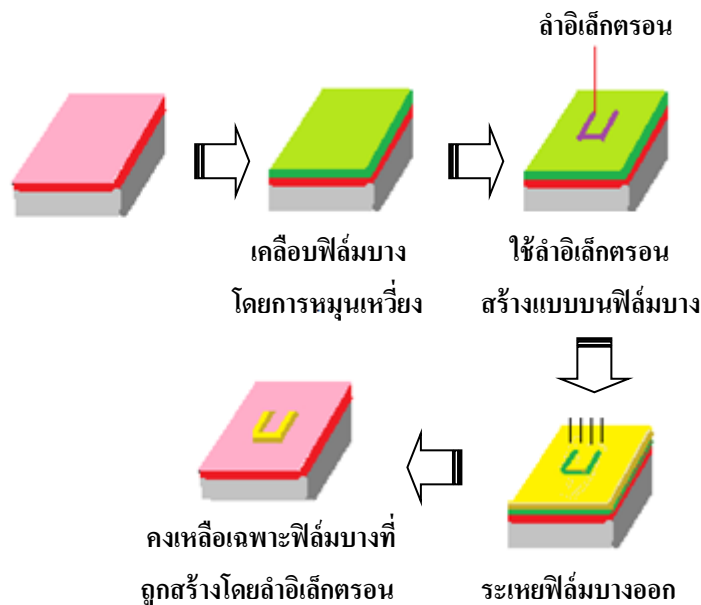
4.1.1.4 วิธีการลิโทกราฟีแบบใช้ลำแสงอิเล็กตรอน (Electron beam lithography, EBL)

Electron beam lithography (EBL) เป็นวิธีการสร้างโครงสร้างระดับนาโนเมตร โดยการใช้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ดังแสดงในภาพ 4.4 เพื่อสร้างรูปแบบของโครงสร้างบนพื้นผิววัสดุ โดยการใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมการปล่อยลำอิเล็กตรอน ให้แคบลงในระดับนาโนเมตรลงสู่พื้นผิวของวัตถุ ซึ่งเป็นพื้นผิวที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบางของสารบางชนิด เช่น โพลีเมอร์จากการหมุนเหวี่ยง (Spin coating) หลังจากใช้ลำแสงอิเล็กตรอนสร้างรูปแบบบนฟิล์มบางแล้ว ทำการระเหยฟิล์มบางนั้นออก ซึ่งฟิล์มบางตรงส่วนที่ถูกลำแสงอิเล็กตรอนสร้างรูปแบบไว้ จะไม่ถูกระเหยไป และจะปรากฏอยู่บนพื้นผิวของวัตถุนั้น



ภาพ 4.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ในการสร้างโครงสร้างนาโนโดยวิธี EBL (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2554)

วิธีการนี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการสร้างแผงวงจรไฟฟ้า ซึ่งเป็นวิธีการสร้างโครงสร้างนาโนที่มีความแม่นยำสูง และสามารถใช้ได้กับพื้นผิววัสดุหลากหลายชนิด ภาพ 4.5 แสดงขั้นตอนการสร้างโครงสร้างนาโนตามวิธี EBL



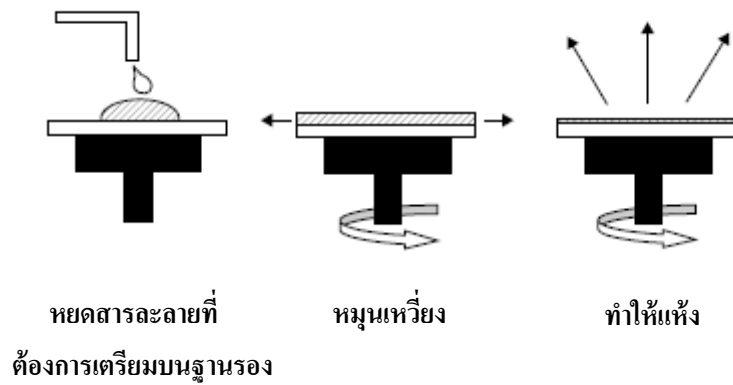
ภาพ 4.5 ขั้นตอนการสร้างโครงสร้างนาโนตามวิธี EBL (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนารเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2554)

4.1.2 การตกสะสม (Deposition)

4.1.2.1 การหมุนเหวี่ยง (Spin coating)

เป็นการสร้างโครงสร้างระดับนาโนในลักษณะเป็นฟิล์มบาง เริ่มจากการวางฐานรอง (Substrate) ลงบนฐานของเครื่องหมุนเหวี่ยง หยดสารละลายตั้งต้นลงบนฐานรอง (Substrate) ซึ่งจะมีปั๊มสุญญากาศในการทำให้ฐานรองยึดติดกับฐานของเครื่อง จากนั้นหมุนเหวี่ยงให้สารละลายแผ่กระจายอย่างสม่ำเสมอบนฐานรองแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องหรืออบในเตาอบเพื่อให้สารแห้งติดบนฐานรอง ดังแสดงในภาพ 4.6

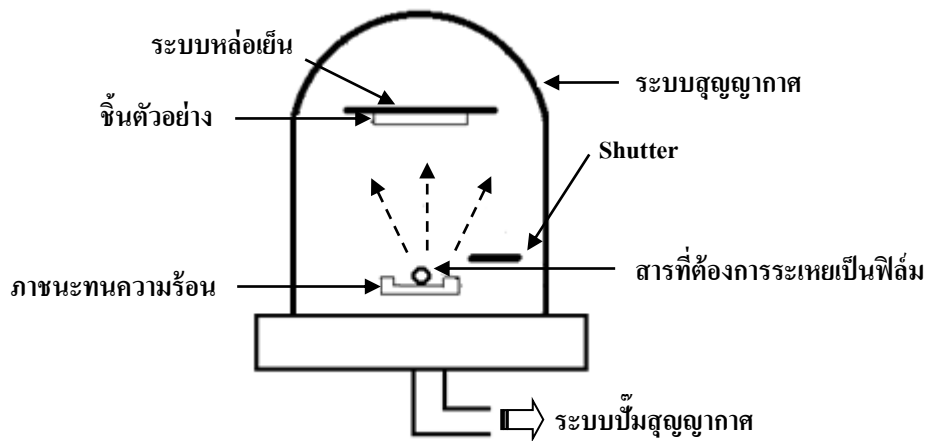
วิธีนี้สามารถเตรียมฟิล์มที่ความเร็วในการหมุนเหวี่ยงสูงได้ และสามารถเตรียมฟิล์มบางตั้งแต่ 0.1 ถึง 5 ไมโครเมตรได้ แต่วิธีนี้มีข้อเสียตรงลักษณะของฟิล์มที่ได้มักจะมีการหดตัว (Film shrinkage) ทำให้ได้ฟิล์มที่ไม่สม่ำเสมอ



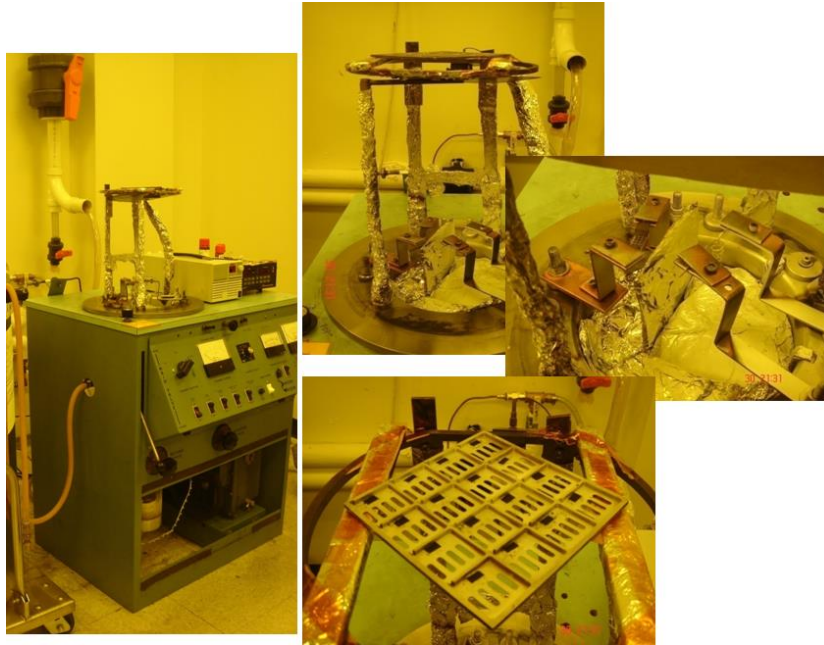
ภาพ 4.6 การหมุนเหวี่ยงสาร (Kruefu, 2011)

4.1.2.2 การระเหยกลายเป็นไอ (Evaporation)

เป็นการสร้างโครงสร้างระดับนาโนจากการระเหยสารให้กลายเป็นไอแล้วก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มบนพื้นผิวที่ต้องการ ดังแสดงในภาพ 4.7 สารที่ถูกระเหยจะถูกทำให้ร้อนในระบบสุญญากาศ จากนั้นก็จะระเหยกลายเป็นไอแล้วก่อตัวเป็นฟิล์มบนชิ้นตัวอย่าง สารที่ใช้ในการเตรียมโครงสร้างในระดับนาโนเมตร โดยวิธีการนี้ส่วนใหญ่เป็นวัสดุโลหะ ข้อเสียของฟิล์มที่ได้จากวิธีการนี้ คือ ความเครียด (Stress) ที่อาจเกิดขึ้นบนฟิล์ม ภาพ 4.8 แสดงภาพเครื่องระเหยกลายเป็นไอ



ภาพ 4.7 แผนภาพเครื่องระเหยกลายเป็นไอ (Kruefu, 2011)



ภาพ 4.8 เครื่องระเหยกลายเป็นไอ (Kruefi, 2011)

4.1.2.3 การเคลือบแบบสปัตเตอร์ริง (Sputtering)

การเคลือบแบบสปัตเตอร์ริง (Sputtering) เป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุ กระบวนการนี้อนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นในกระบวนการสปัตเตอร์ริง คือ

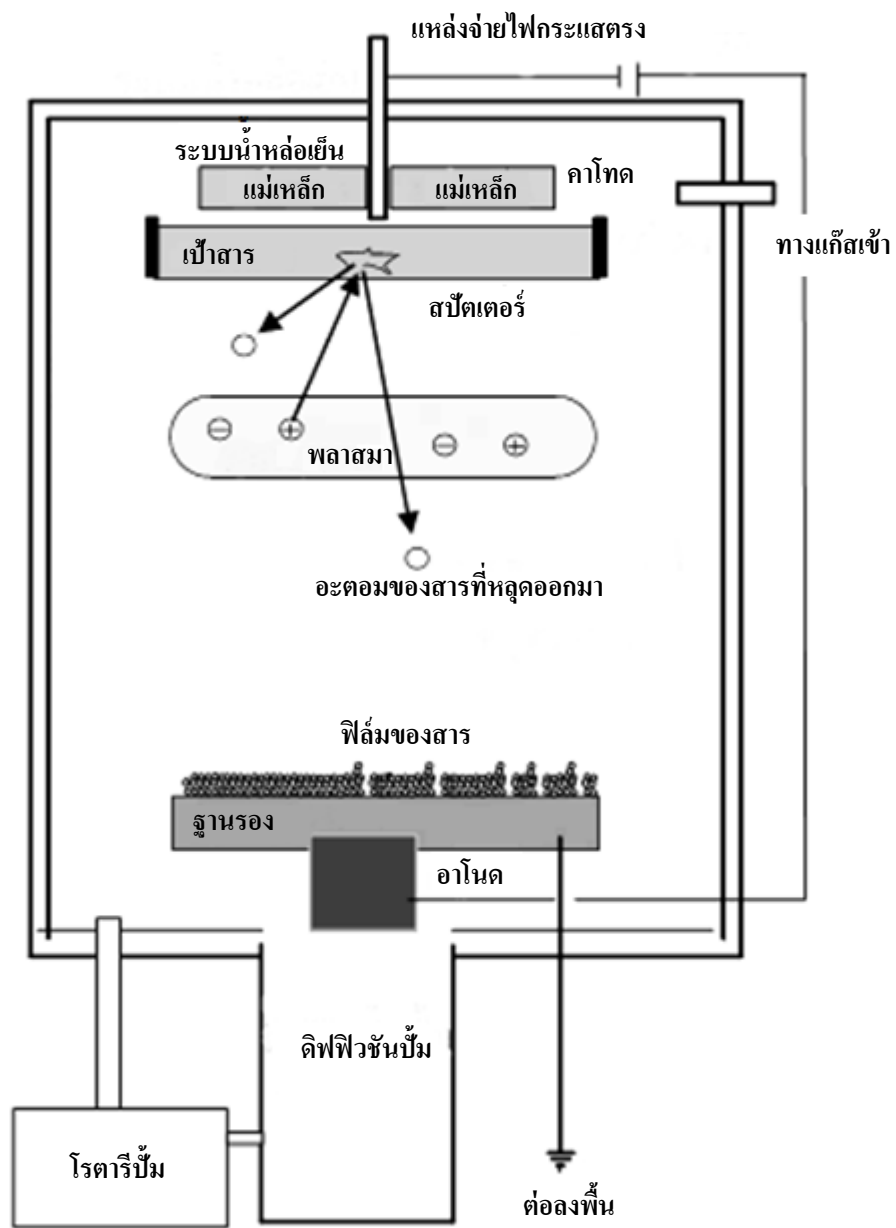
- สารที่ต้องการเคลือบ สำหรับเป็นเป้า (Target) ให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมสารเคลือบลงเคลือบบนแผ่นรองรับ

- อนุภาคพลังงานสูงวิ่งชนเป้าสารเคลือบ โดยปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอนหรืออะตอมของธาตุต่างๆ แต่การทำให้อนุภาคที่เป็นกลางมีพลังงานสูงเกิน 10 อิเล็กตรอน โวลต์ เพื่อใช้ในกระบวนการสปัตเตอร์ริง ทำได้ค่อนข้างยาก วิธีการหนึ่งที่นิยม คือ การเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคประจุที่ง่ายต่อการผลิตและเร่งให้มี

พลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้ แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของสารเคลือบมาก ทำให้การถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมต่ออะตอมสารเคลือบเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ และไม่สามารถทำให้กระบวนการสเปคโตรริงเกิดขึ้นได้ตามทฤษฎีทางฟิสิกส์การชนระหว่างสองอนุภาคที่ให้การส่งถ่ายพลังงานและโมเมนตัมดีที่สุดเมื่อมวลของอนุภาคทั้งสองมีค่าเท่ากัน ดังนั้นการเร่งไอออนของแก๊สในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งชนเป้าสารเคลือบจึงเป็นที่นิยมมากกว่า ซึ่งให้อัตราการปลดปล่อยเป้าสารเคลือบสูงเพียงพอกับความต้องการ

- อนุภาคพลังงานสูงจำเป็นต้องผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้ต่อเนื่องจนได้ความหนาของฟิล์มเคลือบตามต้องการ ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออน (Ion gun) ที่มีปริมาณการผลิตไอออนในอัตราสูงหรือผลิตได้จากกระบวนการโกลว์ดีสชาร์จ (Glow discharge) เนื่องจากปืนไอออนมีราคาค่อนข้างสูงและให้ไอออนในพื้นที่แคบ กระบวนการสเปคโตรริงต่างๆ ไปในระดับอุตสาหกรรมจึงใช้กระบวนการโกลว์ดีสชาร์จ

การเคลือบสารแบบสเปคโตรริงอาศัยกระบวนการทางฟิสิกส์ และให้ความคงทนในการเกาะยึดของฟิล์มสูงกว่าวิธีการระเหยสาร โดยทั่วไปกระบวนการเคลือบเกิดขึ้นภายใต้บรรยากาศความดันต่ำในช่วง 10^{-3} ถึง 10^{-1} ทอร์ (1 ทอร์ = ความดัน 1 มิลลิเมตรปรอท) และอาศัยการดีสชาร์จไฟฟ้าของแก๊สทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน จากนั้นไอออนจะถูกเร่งเข้าชนแผ่นสารเคลือบ (Target) ซึ่งต่ออยู่กับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง คือ 500 - 10,000 โวลต์ สารเคลือบที่ถูกชนด้วยไอออนของแก๊สจะหลุดออกและวิ่งด้วยความเร็วสูงลงเคลือบบนแผ่นรองรับในทุกทิศทาง พลังงานของอนุภาคสารเคลือบที่หลุดออกมาจากขบวนการสเปคโตรริงนี้สูงกว่าอนุภาคที่หลุดออกด้วยวิธีการระเหยสารมาก ดังนั้นเมื่อตกกระทบลงบนแผ่นรองรับจะเกิดการฝังตัวลงในเนื้อแผ่นรองรับ และทำให้การยึดเกาะของฟิล์มเคลือบดีขึ้นมาก วัสดุที่ต้องการเคลือบด้วยวิธีสเปคโตรริงอาจเป็น โลหะหรือโลหะ และสารที่เคลือบอาจเป็น โลหะหรือโลหะก็ได้ ซึ่งเป็นข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับเคลือบด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี ซึ่งแผ่นรองรับต้องเป็นตัวนำไฟฟ้าเท่านั้น ภาพ 4.9 แสดงระบบการสเปคโตรริงแบบดีซีแมกนีตรอน



ภาพ 4.9 ระบบสปัตเตอร์ริงแบบดีซีแมกนีตรอน (วิรัชชา, 2550)

อุตสาหกรรมหลายด้านใช้การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์ริงในอุปกรณ์ทางไฟฟ้า
ตัวอย่างเช่น

- การเคลือบฟิล์มตัวต้านทาน
- การเคลือบฟิล์มตัวเก็บประจุ
- การเคลือบในการทำวงจรรวม (Integrated circuit)
- การเคลือบฟิล์มแม่เหล็ก
- การเคลือบฟิล์มเรืองแสง
- การเคลือบผิวโฟโตคอนดักเตอร์ (Photoconductor)
- การเคลือบอุปกรณ์ตรวจสอบฟิล์มบาง
- การเคลือบฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด
- การทำขั้วไฟฟ้าฟิล์มบาง

นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในอุปกรณ์อื่นๆ ได้อีกมากมาย เช่น อุปกรณ์ทางแสง อุปกรณ์ทางด้านเครื่องกล อุปกรณ์ทางเคมี และเครื่องประดับ เป็นต้น ภาพ 4.7 แสดงระบบการสปัตเตอร์ริงแบบดีซีแมกนีตรอน (DC magnetron sputtering)

ระบบการสปัตเตอร์ริงแบบดีซีแมกนีตรอน (DC magnetron sputtering system) แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้กับระบบ ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงและใช้สนามแม่เหล็กช่วยเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากคาโทดสู่อานอด โดยทำให้อิเล็กตรอนเบนทิศทางให้อยู่ในแนวโค้งเพื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคไอออน เนื่องจากอิเล็กตรอนจะชนกับอะตอมของแก๊สมากขึ้นซึ่งทำให้อัตราการสปัตเตอร์ริงเพิ่มขึ้นหลายเท่าตัว การสปัตเตอร์ริงแบบดีซีแมกนีตรอนมีข้อจำกัดตรงที่สามารถใช้กับการสปัตเตอร์สารที่มีสมบัตินำไฟฟ้าหรือเป็นสารกึ่งตัวนำเท่านั้น ซึ่งต่างกับระบบการสปัตเตอร์ริงแบบอาร์เอฟแมกนีตรอน (RF magnetron sputtering system) ที่สามารถใช้กับการสปัตเตอร์สารไดอิเล็กตริกหรือฉนวนไฟฟ้าได้ เนื่องจากไอออนที่วิ่งชนสารในระบบดีซีจะสะสมศักย์ไฟฟ้าบวกที่ผิวหน้าของฉนวนจนมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับอานอด และทำให้กระบวนการสปัตเตอร์สิ้นสุดลง ส่วนระบบอาร์เอฟจะพาอิเล็กตรอนเข้าสู่ผิวไดอิเล็กตริกทำให้ผิวหน้าเป็นกลางหรือเป็นลบในช่วงบวกเพื่อพร้อมที่จะเกิดขบวนการสปัตเตอร์ได้อีกในช่วงลบถัดไป

4.1.2.4 การตกสะสมไอสารด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical vapor deposition; CVD)

การตกสะสมไอสารด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical vapor deposition; CVD) เป็นการปลูกฟิล์มจากสถานะของไอหรือแก๊ส ด้วยปฏิกิริยาเคมีในแก๊สและบนแผ่นฐาน CVD ใช้กับการปลูกฟิล์มของโพลี-ซิลิกอน (Poly-Si) ซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และโลหะ สามารถควบคุมความเครียด (Stress) ภายในฟิล์มได้จากสภาวะการตกสะสม (Deposition condition) และการอบอ่อน (Annealing)

การตกสะสมไอสารด้วยวิธีการทางฟิสิกส์ (Physical vapour deposition; PVD) คือ การตกตะกอนของไอสารที่ได้มาโดยวิธีการทางฟิสิกส์ เป็นเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมผิววัสดุ เพื่อเตรียมฟิล์มบางสำหรับการใช้งานต่างๆ เช่น งานด้านการลึกรหรือ แรงเสียดทาน และการหล่อลื่น งานด้านวัสดุเชิงแสง (Optics) และเทคโนโลยีไมโครชิพ (Microchips) เป็นต้น วิธีการนี้สารตั้งต้นจะถูกทำให้เป็นไอในระบบสุญญากาศโดยวิธีต่างๆ ทางฟิสิกส์ แล้วไอสารซึ่งมีทั้งอะตอมและไอออน จะตกตะกอนลงบนพื้นผิวที่ต้องการทั้งในแบบเกิดปฏิกิริยา (Reactive deposition) และไม่เกิดปฏิกิริยา (Non reactive deposition) เพื่อสร้างสารเคลือบต่างๆ ตามความต้องการ PVD มีหลายแบบแตกต่างกันตามวิธีการที่ทำให้ได้มาซึ่งไอสาร แต่ละแบบต่างก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป

4.1.3 การกัดกรด (Etching)

4.1.3.1 ประเภทของการกัดกรด แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้ คือ

1. การกัดกรดแบบเปียก (Wet etching)

เป็นการใช้สารเคมีจำพวกกรดกัดแก้ว หรือเรียกว่ากรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid, HF) เป็นกรดกัดซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) โดยส่วนมากจะเป็นการกัดแบบ Isotropic ซึ่งการกัดแบบนี้ อาจทำให้เกิดปัญหาที่จะมีผลทำให้โครงสร้างที่กัดแคบลงหรืออาจหายไป

2. การกัดกรดแบบแห้ง (Dry etching)

เป็นการใช้สารในสถานะแก๊สเป็นตัวกัด โดยส่วนมากเป็นการกัดแบบ Anisotropic ทำให้ได้ผนังด้านข้างเป็นแนวตั้ง (Vertical side wall)

4.1.3.2 ขั้นตอนการกัดกรด (Etching)

1. นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดล้างผิวหน้าด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ให้สะอาด
2. จุ่มผิวด้านหน้าของชิ้นงานลงในกรดกัดผิว โดยจับชิ้นงานให้ผิวหน้าของชิ้นงานสัมผัสกับกรด โดยแกว่งไปมาในกรดกัดผิวประมาณ 8-15 วินาที
3. ล้างผิวหน้าชิ้นงานด้วยน้ำสะอาดทันที
4. ล้างด้วยแอลกอฮอล์ทันทีหลังล้างด้วยน้ำ
5. เป่าผิวหน้าด้วยลมร้อนให้แห้งทันทีเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation)

4.1.3.3 ข้อควรระวังในการกัดกรด

1. อย่าสัมผัสผิวหน้าชิ้นงานภายหลังจากกัดผิวหน้าด้วยกรด
2. ระวังอย่าให้น้ำผสมกับกรด
3. ถ้ากรดที่ใช้ในการกัดผิวชิ้นงานเริ่มเปลี่ยนสีเป็นสีเหลือง ไม่ควรนำมาใช้ต่อ ควรเปลี่ยนใหม่ก่อนใช้งานครั้งต่อไป

4.1.4 การปลูกผลึก (Crystal growth)

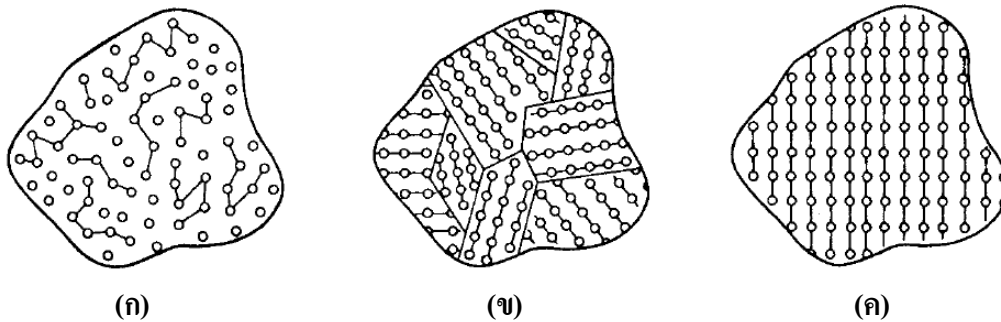
4.1.4.1 ผลึกอัญรูป (Crystalline)

ผลึก หมายถึง สารของแข็งที่มีลักษณะ โครงสร้างภายในที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นไปอย่างมีระเบียบ มีรูปแบบที่แน่นอน โดยอะตอมต่างๆ จะมีตำแหน่งที่อยู่ที่แน่นอน ในทางปฏิบัติจะหาผลึกที่สมบูรณ์ร้อยเปอร์เซ็นต์ได้ยาก เพราะอย่างไรก็ตาม มักจะเกิดจุดบกพร่อง (Defect) หรือจุดตำหนิเกิดขึ้น ทำให้ความเป็นระเบียบของอะตอมสูญเสียไป จุดบกพร่องมีหลายลักษณะ และมีสาเหตุการเกิดที่แตกต่างกัน ตัวอย่างง่ายๆ ของจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นก็คือ การขาดหายไปของอะตอมในบางจุด บางตำแหน่งซึ่งควรจะมียอะตอมอยู่ หรือการ

มีอะตอมเข้ามาอยู่ในตำแหน่งที่ไม่ควรจะมีอยู่ เป็นต้น ดังนั้นในทางปฏิบัติ จึงจัดแบ่งวัสดุของแข็งที่เป็นผลึกออกเป็น 2 ชนิด คือ

ผลึกที่สมบูรณ์ หมายถึง สารของแข็งที่มีจุดบกพร่อง หรือตำหนิมีจำนวนน้อย อะตอมส่วนใหญ่มีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และมีรูปแบบที่แน่นอนเหมือนกันทั้งหมด ผลึกชนิดนี้นิยมเรียกกันว่า ผลึกรูปเดี่ยว (Single crystalline) ดังแสดงในภาพ 4.10 (ก)

ผลึกที่ไม่สมบูรณ์ หมายถึง สารของแข็งที่มีจุดบกพร่องเป็นจำนวนมาก หรือมีลักษณะการจัดเรียงตัวของผลึกที่ไม่ต่อเนื่อง หรือมีความเป็นระเบียบน้อย ดังแสดงในภาพ 4.10 (ข) วัสดุดังกล่าวนิยมเรียกกันว่า ผลึกโพลีคริสตัล (Polycrystalline) อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำส่วนมากที่ใช้งานในปัจจุบันสร้างมาจากผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอน และอาจมีการใช้ผลึกหลายรูปอยู่บ้าง เพื่อการสร้างส่วนหนึ่งส่วนใดของสิ่งประดิษฐ์ เช่น การเอาผลึกหลายรูปของซิลิคอน หรือเรียกง่ายๆ ว่าโพลีซิลิคอน สร้างเป็นส่วนเกต (Gate) ของทรานซิสเตอร์ประเภทมอส (MOS Transistor) เป็นต้น



ภาพ 4.10 ลักษณะโครงสร้างภายในของสารของแข็งโดยพิจารณาความเป็นระเบียบในการจัดเรียงตัวของอะตอม (ก) อะมอร์ฟัส (ข) ผลึกหลายรูป (Poly crystalline) และ (ค) ผลึกรูปเดี่ยว (Single crystalline) (สมเกียรติ, 2554)

4.1.4.2 การปลูกผลึก (Crystal growth)

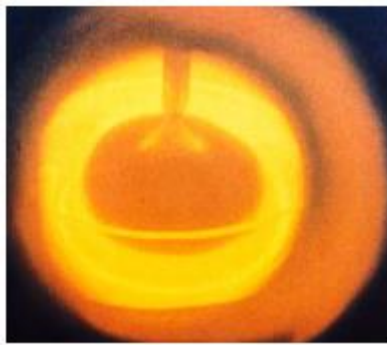
การปลูกผลึก (Crystal growth) เป็นกระบวนการในการนำแร่ซิลิกอนบริสุทธิ์ที่มีผลึกหลายรูป มาสร้างให้เป็นผลึกรูปเดี่ยวที่สมบูรณ์ การปลูกผลึกจะใช้ชั้นผลึกชั้นเล็กๆ ของซิลิกอนเป็นส่วนเริ่มต้น เพื่อการเหนี่ยวนำให้เกิดเป็นผลึกที่มีขนาดใหญ่ โดยเรียกชั้นผลึกเล็กๆ นี้ว่า เมล็ดผลึก (Crystal seed) ผลึกที่ปลูกได้จะมีลักษณะเหมือนกับเมล็ดผลึกทุกประการ การปลูกผลึกรูปเดี่ยว สามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมกันได้แก่ วิธีโซคราลสกี (Czochralski) วิธีโซนรีไฟนิง (Zone refining) และวิธีฟลอยด์ดิ้งโซน (Floating zone)

(ก) วิธีโซคราลสกี (Czochralski method)

วิธีโซคราลสกี (Czochralski method) หรือเรียกว่าวิธีดึง (Pulling method) โดยลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ แสดงดังในภาพ 4.11 เริ่มจากการนำแร่บริสุทธิ์ที่ต้องการปลูกใส่ลงในเบ้าหลอมที่อยู่ในเตาชนิดพิเศษ เพื่อหลอมให้เป็นของเหลว ควบคุมภายในเตาให้เป็นบรรยากาศของแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สอาร์กอน (Ar) หรือแก๊สฮีเลียม (He) เพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ของซิลิกอน นอกจากนี้ต้องควบคุมไม่ให้มีสิ่งแปลกปลอมหรือสารเจือปนอื่นๆ เพื่อให้ได้ผลึกสารกึ่งตัวนำที่มีความบริสุทธิ์สูง ระบบกำเนิดความร้อนของเตาเป็นขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ (R.F. induction heating coils) ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเบ้าหลอมถูกทำให้ร้อนเท่ากับจุดหลอมเหลวของซิลิกอนที่ 1,420 องศาเซลเซียส แร่ซิลิกอนจะหลอมเป็นของเหลว

จากนั้นเริ่มการปลูกผลึกด้วยการหย่อนเมล็ดผลึกให้ปลายด้านหนึ่งแตะกับผิวหน้าของสารละลายของแร่ซิลิกอนที่หลอมเหลว ปลายของเมล็ดผลึกด้านนี้จะหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกับของเหลวในเบ้าหลอม เมล็ดผลึกจะถูกดึงขึ้นอย่างช้าๆ และในเวลาเดียวกันก็จะหมุนรอบตัวเองไปด้วย ของเหลวในเบ้าหลอมจะติดกับเมล็ดผลึกขึ้นมา และเย็นตัวลง มีสภาพกลายเป็นผลึกมีขนาดเหมือนกับเมล็ดผลึก ขณะที่เมล็ดผลึกถูกดึงขึ้นมาอย่างต่อเนื่องของเหลวซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำ ก็จะถูกดึงขึ้นมาอย่างต่อเนื่องด้วยเช่นกัน ทำให้ได้แท่งผลึกรูปทรงกระบอกโดยมีขนาดต่างๆ กันซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการหมุนและอัตราการดึงเมล็ดผลึก รวมทั้งขนาดของเมล็ดผลึกด้วย กรณีที่ไม่มีการเติมอะตอมสารเจือปนใดๆ แท่งผลึกรูปเดี่ยว (Single crystal) ที่ได้จะเป็นผลึกสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ หรือสารอินทรินซิก (Intrinsic) อย่างไรก็ตาม

ที่ดีในทางปฏิบัติ มักมีการเติมอะตอมสารเจือของธาตุบางชนิดลงไปด้วยเพื่อช่วยทำให้ผลึกสารกึ่งตัวนำที่ได้มีความนำไฟฟ้าที่สูงตามที่ต้องการ สารเจือเหล่านี้ได้แก่อะตอมของธาตุในหมู่ที่ 3 ของตารางพีริออดิก เช่น โบรอน (B) อะลูมิเนียม (Al) และอินเดียม (In) ซึ่งเรียกว่าสารเจือชนิดพี (P-type impurity) หรือธาตุในหมู่ที่ 5 เช่น ฟอสฟอรัส (P) สารหนู (As) และ พลวง (Sb) ซึ่งเรียกว่าสารเจือชนิดเอ็น (N-type impurity) กรณีนี้จะทำให้ได้ผลึกที่ไม่บริสุทธิ์ หรือสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก (Extrinsic semiconductor) ซึ่งเป็นชนิดพี หรือชนิดเอ็น ตามลำดับ



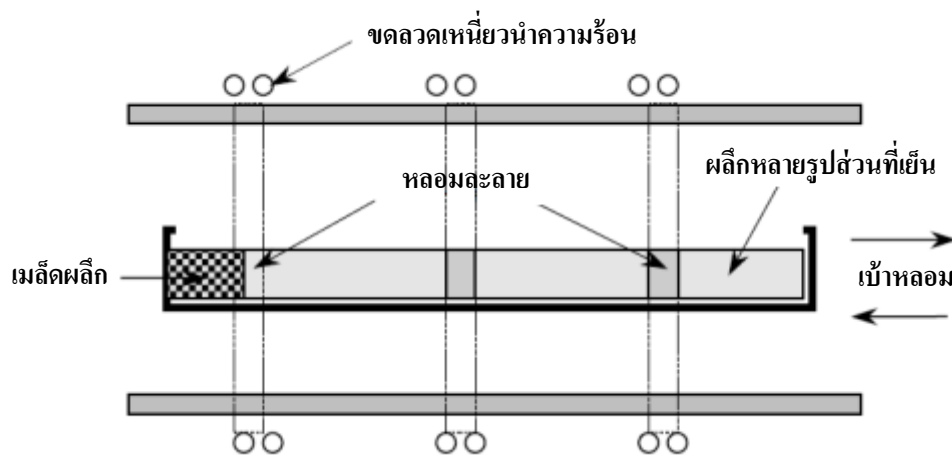
ภาพ 4.11 การปลูกผลึกรูปเดี่ยวของซิลิกอนโดยวิธี โซนรีไฟนิง (สมเกียรติ, 2554)

ปัจจุบันวิธีนี้สามารถปลูกผลึกที่มีขนาดใหญ่มากได้ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 8 นิ้ว ขนาดความยาวของแท่งผลึกประมาณ 1 เมตร ซึ่งนับว่ามีขนาดใหญ่มาก และมีส่วนสำคัญในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในวงจรรวมขนาดใหญ่

(จ) วิธีโซนรีไฟนิง (Zone refining method)

การปลูกผลึกโดยวิธี โซนรีไฟนิง (Zone refining method) เริ่มจากการนำแท่งผลึกหลายรูปที่เตรียมไว้ใส่ลงในถาดเบ้าหลอม ดังแสดงในภาพ 4.12 แล้วนำเข้าเตาอุณหภูมิสูง โดยภายในเตาจะถูกจัดแบ่งเป็นส่วนๆ ทำให้แท่งผลึกหลอมละลายเฉพาะบางส่วนที่มีขนาดเล็กๆ แท่งสารจะยังคงรูปได้ด้วยแรงตึงผิว บริเวณหลอมเหลวของแท่งสารจะเลื่อนตามการเลื่อนตำแหน่งของขดลวดความร้อน เริ่มจากด้านหนึ่งเลื่อนไปยังปลายอีกด้านหนึ่งสารแปลกปลอมหรือสิ่งเจือปนที่อยู่ในแท่งสารจะถูกขับออกไปอยู่ที่ปลายด้านหนึ่ง เนื่องจากความ

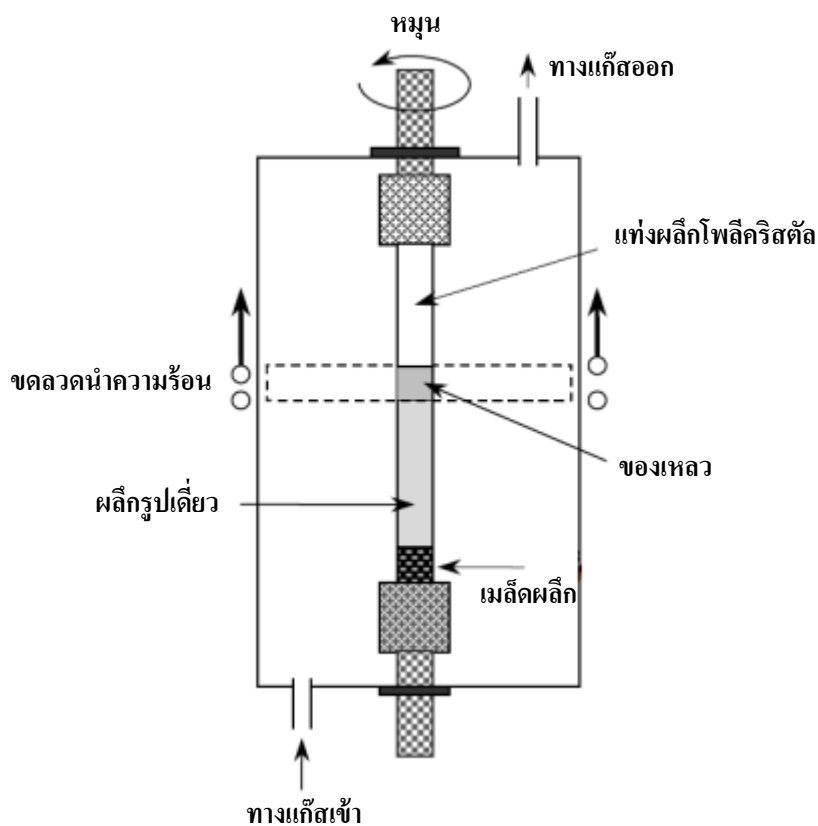
หนาแน่นอะตอมของสารเจือปนใดๆ ในสารที่เป็นของเหลวมีค่ามากกว่าการกระจายในสารที่เป็นของแข็ง เมื่อส่วนที่หลอมเหลวเลื่อนมาสุดที่ปลายด้านหนึ่ง อะตอมแปลกปลอมต่างๆ จะถูกพามาด้วย แล้วหลังจากนั้นจึงตัดทิ้งก่อนนำแท่งผลึกไปใช้งาน แท่งผลึกที่ได้จากวิธีนี้จะมีควมบริสุทธิ์สูง และจากเมล็ดผลึกที่ติดตรงปลายด้านหนึ่งของแท่งสาร จะทำให้แท่งผลึกรูปเดี่ยวที่ได้มีระนาบของผลึกเหมือนกับเมล็ดผลึกทุกประการ แต่วิธีนี้ไม่สามารถสร้างแท่งผลึกรูปเดี่ยวที่มีขนาดใหญ่ได้ เพราะการกระจายความร้อนเข้าไปในแท่งสารขนาดใหญ่ทำได้ยาก และต้องใช้เวลานาน



ภาพ 4.12 แผนภาพจำลองการปลูกผลึกรูปเดี่ยวโดยวิธี โซนรี ฟิง (สมเกียรติ, 2554)

(ค) วิธีโฟลตติ้งโซน (Floating zone)

การปลูกผลึกรูปเดี่ยวด้วยวิธี โฟลตติ้ง โซน (Floating zone) ผลึกที่ได้มักไม่สมบูรณ์ ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากแท่งผลึกที่สัมผัสกับเบ้าหลอมที่เป็นซิลิกา (SiO_2) ทำให้มีออกซิเจนเกิดขึ้นในเตาผลึกที่ปลูก ทำให้ได้ผลึกที่ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงมีการเปลี่ยนแปลงให้แท่งสารถูกวางไว้ในแนวตั้งโดยไม่สัมผัสกับสิ่งใดๆ ดังแสดงในภาพ 4.13 วิธีนี้จะทำให้ได้แท่งผลึกรูปเดี่ยวที่มีความสมบูรณ์มาก แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถสร้างแท่งผลึกที่มีขนาดใหญ่ๆ ได้เพราะมีน้ำหนักมาก แท่งผลึกไม่สามารถทรงตัวอยู่ได้บนส่วนที่หลอมเหลว



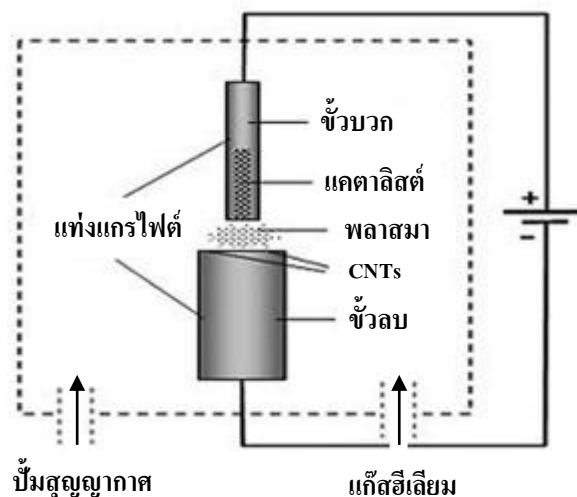
ภาพ 4.13 อุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกผลึกรูปเดี่ยวโดยวิธีฟิลาตังโซน (สมเกียรติ, 2554)

การนำแท่งผลึกไปใช้งานทำได้โดยการตัดแท่งผลึกออกเป็นแผ่นบางๆ เรียกว่า แผ่นผลึก หรือ เวเฟอร์ (Wafer) เพื่อนำไปใช้ในการสร้างเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำต่อไป

4.1.5 วิธีอาร์คดิซชาร์จ (Arc discharge)

วิธีอาร์คดิซชาร์จ (Arc discharge) เป็นเทคนิคในการเตรียมท่อนาโนคาร์บอน ดังแสดงในภาพ 4.14 จากการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 20-200 แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์

ประมาณ 20-40 โวลต์ ตกคร่อมระหว่างแท่งกราฟไฟต์สองแท่งที่วางใกล้ๆกัน โดยเลือกใช้ขนาดของแท่งแกรไฟต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน วางไว้ใกล้ๆกันในระยะห่างประมาณ 1-3 มิลลิเมตร ภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย เช่นแก๊สฮีเลียม (He) ที่ความดันต่ำประมาณ 100-500 มิลลิเมตรปรอท จะทำให้เกิดประกายไฟหรือเกิดสถานะพลาสมาขึ้นระหว่างแท่งแกรไฟต์ และมีอุณหภูมิสูงบริเวณระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ส่งผลให้แท่งแกรไฟต์ระเหยกกลายเป็นไอแล้วมีการควบแน่นกลายเป็นท่อนาโนคาร์บอนบริเวณปลายแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วลบ (Cathode) การควบคุมขนาด ความยาว หรือจำนวนชั้นของท่อนาโนคาร์บอน สามารถทำโดยการควบคุมความดัน อุณหภูมิ และการเติมผงโลหะแคตะลิสต์ (Catalyst) ปริมาณเล็กน้อย เช่น เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) หรือ โคบอลต์ (Co) อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือผสมกันลงในแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วบวก (Anode)



ภาพ 4.14 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube, CNTs) โดยวิธีอาร์คดิสชาร์จ (สมเกียรติ, 2554)

4.1.6 การระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser vaporization)

การระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser vaporization) เป็นเทคนิคในการเตรียมท่อนาโนคาร์บอนซึ่งคล้ายกับวิธีอาร์คดิสชาร์จ แต่ปริมาณและคุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่เตรียมได้

จะดีกว่า วิธีนี้จะใช้พัลส์แสงเลเซอร์ที่มีความเข้มแสงสูงยิงไปยังเป้าซึ่งเป็นแกรไฟต์ผสมกับผงโลหะคอลลอยด์ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย ที่ความดันต่ำประมาณ 500 มิลลิเมตรปรอท และอุณหภูมิประมาณ 1200 องศาเซลเซียส ก็จะได้ท่อนาโนคาร์บอน วิธีนี้มีข้อเสีย คือราคาแพงมาก และต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์กำลังสูง

4.2 การสร้างวัสดุและอุปกรณ์นาโนโดยใช้กระบวนการแบบล่างสู่บน (Bottom up)

4.2.1 การสังเคราะห์ทางเคมี (Chemical synthesis)

4.2.1.1 ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal)

ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในการสังเคราะห์อนุภาคเซรามิกสัณฐานนาโนเมตร เนื่องจากอนุภาคที่สังเคราะห์ได้มีความสม่ำเสมอทั้งองค์ประกอบทางเคมี และขนาดของอนุภาค สามารถสังเคราะห์ได้ในขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ และความดันสูงปานกลาง โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการเผาอบอ่อน (Calcination) และมีอุณหภูมิของการเผาผนึก (Sintering temperature) ต่ำ เมื่อเทียบกับอนุภาคที่สังเคราะห์ได้จากวิธีการสังเคราะห์ทางเคมีอื่นๆ เพราะอนุภาคมีขนาดเล็กกว่า แต่วิธีการสังเคราะห์แบบนี้จะต้องมีการควบคุมค่าความเป็นกรดด่าง (pH) อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา

ยกตัวอย่างการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล เริ่มจากการเกิดปฏิกิริยาโดยตรงระหว่างของเหลว คือ การเติมสารละลายไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ ($\text{Ti}(\text{OCH}(\text{CH}_3)_2)_4$) ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ภายใต้อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ปรับค่า pH ประมาณ 1 จากนั้นจะเกิดกระบวนการของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ นำสารละลายที่ได้เข้าเครื่องไฮโดรเทอร์มอล โดยควบคุมความร้อน และเวลา ขณะเกิดปฏิกิริยาจะได้ตะกอนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอนุภาคนาโนเมตร

4.2.1.2 ตกตะกอนร่วม (Coprecipitation)

วิธีการตกตะกอนร่วม (Coprecipitation) เป็นวิธีของการแยกไอออน หรือโมเลกุลของสาร ซึ่งอยู่ในเฟสของสารละลายทำให้กระจายอยู่ในเฟสของของแข็งหรือที่เรียกว่า

ตะกอน โดยเพิ่มสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอน เช่น ค่าพีเอช (pH) ความเข้มข้นบรรยากาศ และอัตราการผสมสารละลาย เป็นต้น วิธีการตกตะกอนเป็นวิธีที่มีกระบวนการที่ไม่ยุ่งยาก ได้ผลผลิตที่สูงและการเรียกชื่อวิธีการสังเคราะห์จะเรียกตามชนิดของตัวกลางหลักที่ใช้ ยกตัวอย่างเช่น การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการตกตะกอนร่วม เริ่มจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างโพแทสเซียมไททานิลออกซาลेटไดไฮเดรต ($K_2[TiO(C_2O_4)_2] \cdot 2H_2O$) กับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) ด้วยอัตราส่วน 1:1 โดยโมล ซึ่งจะตกตะกอนสมบูรณ์ที่ค่า pH ประมาณ 1 โดยใช้แอมโมเนียเป็นสารตกตะกอน นำตะกอนที่ได้เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และภายหลังจากที่เผาแคลไซน์แล้วจะได้สารไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด และมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร

4.2.1.3 ซอลเจล (Sol-gel)

ซอลเจล (Sol-gel) เป็นวิธีการที่ใช้สารตั้งต้นที่อยู่ในสภาพของสารละลายที่ผสมเข้ากันได้เป็นอย่างดีและสามารถทำปฏิกิริยากันในระดับโมเลกุล ทำให้เกิดโมเลกุลที่เป็นสายโซ่ยาว หรือเกิดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ในของเหลวที่เรียกว่า ซอล (Sol) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ความหนืดของสารละลายจะสูงขึ้นจนกระทั่งกลายเป็นสารกึ่งของเหลวที่เรียกว่า เจล (Gel) จากนั้นจึงนำเจลที่ได้ทำให้แห้งสนิท แล้วอบให้เป็นผงละเอียดก่อนจะเผาแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสม วิธีการเตรียมอนุภาคแบบซอลเจล จะทำให้ได้อนุภาคที่มีขนาดเล็ก และมีความบริสุทธิ์สูงมาก

ยกตัวอย่างการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีซอลเจล เริ่มจากการนำสารละลายอะซิเตตของโลหะที่ต้องการ คือ อะซิลอะซิโตน (Acetylacetone) มาละลายด้วยเอทานอล โดยให้ความร้อนหลังจากเย็นแล้วเติมเตตระบิวทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Tetrabutylammonium bromide) จากนั้นใช้เวลาไม่เกิน 24 ชั่วโมง จะเกิดเจล โดยขึ้นอยู่กับปริมาณกรดที่ใช้ ภายหลังจากการเผาแคลไซน์จะได้อนุภาคนาโนขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร

ตาราง 4.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีต่างๆ ในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์

วิธีการสังเคราะห์	ข้อดี	ข้อเสีย
1. ไฮโดรเทอร์มอล	<ul style="list-style-type: none"> - ได้ผงละเอียด - สามารถควบคุมขนาดของอนุภาคได้ - ไม่ต้องทำการบดและเผาแคลไซน์ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องควบคุม pH อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาในเครื่องไฮโดรเทอร์มอล
2. การตกตะกอนร่วม	<ul style="list-style-type: none"> - ได้ผงละเอียด (ถ้าอัตราการตกตะกอนต่ำ ในสารละลายที่มีความเข้มข้นเจือจาง) 	<ul style="list-style-type: none"> - วิธีการทำให้แห้งและการแคลไซน์มักทำให้อนุภาคเกาะกันเกิดการรวมตัวเป็นก้อน จึงต้องบด เพื่อให้ได้ผงที่ละเอียดและขนาดอนุภาคสม่ำเสมอ - จำเป็นต้องแยกตะกอนออกจากสารละลาย
3. ซอล-เจล	<ul style="list-style-type: none"> - ได้ผงละเอียดสม่ำเสมอความบริสุทธิ์สูง - สามารถควบคุมคุณลักษณะทางสัณฐานวิทยา และการแจกแจงขนาดอนุภาค 	<ul style="list-style-type: none"> - สารตั้งต้นมีราคาสูง

4.2.1.4 การสังเคราะห์อนุภาคด้วยเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส (Flame spray pyrolysis)

เทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส (Flame Spray Pyrolysis: FSP) เป็นเทคนิคที่สามารถผลิตอนุภาคระดับนาโนที่มีความบริสุทธิ์สูง และสามารถที่จะควบคุมขนาดอนุภาคได้ภายในขั้นตอนเดียว เนื่องจากองค์ประกอบของเงื่อนไขที่เหมาะสมและสภาวะต่างกันในระบบการสังเคราะห์ ปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์ เช่น การเลือกใช้ชนิดของสารเคมีตั้งต้น การใช้แก๊สที่มีความเหมาะสมในการเผาไหม้ตัวทำละลายที่มีค่าเอนโทรปีของการเผาไหม้ที่ดี (Combustion entropy) การควบคุมสนามไฟฟ้าระหว่างการสังเคราะห์ รวมไปถึงการเลือกเงื่อนไขของความเร็วในการไหลของสารละลาย ซึ่งจะมีผลต่อขนาดความสูงของเปลวไฟ โดยแต่ละปัจจัยต่างก็มีผลทำให้ได้ขนาด และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคที่ต่างกันออกไป

การสังเคราะห์ให้ได้อนุภาคที่มีความบริสุทธิ์สูง และขนาดของอนุภาคมีความสม่ำเสมอ

การสังเคราะห์ให้ได้อนุภาคที่มีความบริสุทธิ์สูง และมีการกระจายตัวของอนุภาคอยู่ในช่วงที่แคบนั้น สามารถเตรียมได้โดยขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของระบบเครื่องรีแอกเตอร์ (Reactor) ซึ่งระบบรีแอกเตอร์นี้ถูกใช้มากในระดับอุตสาหกรรมเพื่อเป็นตัวควบคุมการสังเคราะห์ผงละเอียดนาโนที่สามารถสังเคราะห์สารได้หลากหลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น การเผาไหม้ของสารประกอบเฮไลด์ (Halide) และไอของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon compounds) เป็นต้น

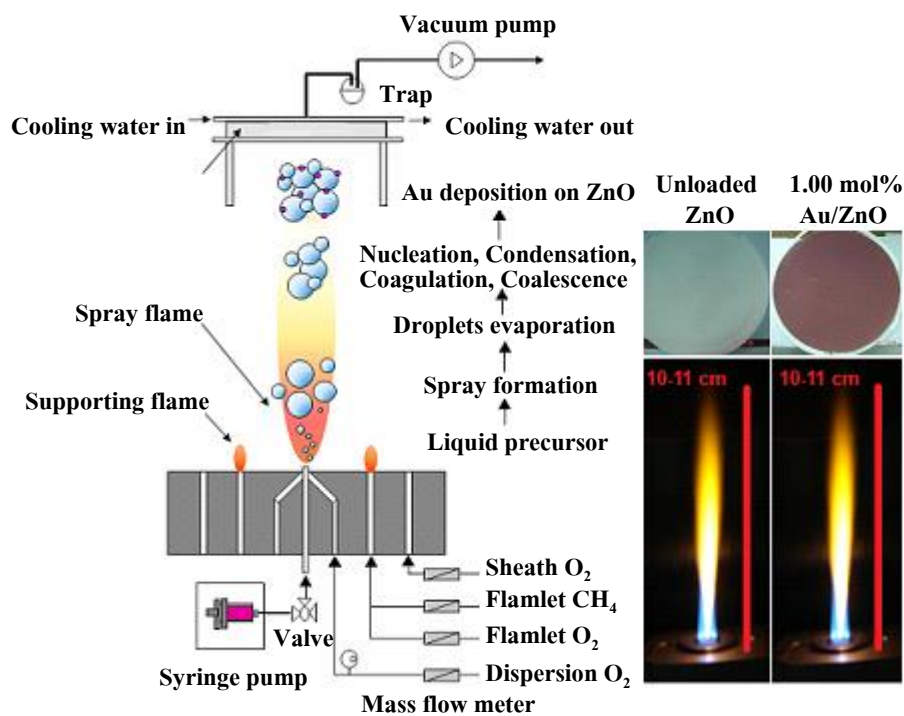
กระบวนการเผาไหม้ของสารละลายตั้งต้นเป็นแบบละอองหยด

กระบวนการเผาไหม้ของสารละลายตั้งต้นเป็นแบบละอองหยด (Liquid precursor droplets) ใช้เป็นหลักการพื้นฐานในการเตรียมผงละเอียดนาโนของสารประกอบออกไซด์ในกระบวนการเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิสที่สามารถที่จะผลิตผงละเอียดนาโนของสารประกอบออกไซด์ได้ในระดับ 1-200 นาโนเมตร โดยสามารถใช้สารตั้งต้นที่มีราคาถูกและแพงตามความเหมาะสม ทั้งยังสามารถควบคุมอัตราการผลิตได้สูงถึง 250 กรัมต่อชั่วโมง ทั้งนี้ปริมาณและอัตราของการผลิต หรือประสิทธิภาพที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับสถานะเงื่อนไขในการสังเคราะห์โดยตรงในแง่ของกลไกในการสังเคราะห์เพื่อเปลี่ยนสภาพจากสถานะไอ หรือแก๊สไปเป็นอนุภาค (Gas-to-Particle conversion) หรือจากสารละลายละอองหยดไปเป็นผงอนุภาค (Droplet-to-Particle conversion) เป็นกระบวนการพื้นฐานในการสังเคราะห์อนุภาคโดยเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส

ขั้นตอนของการก่อตัวเป็นอนุภาคนาโน

สารละลายตั้งต้นถูกทำให้เป็นละออง ภายในผนังที่มีความร้อนของรีแอกเตอร์ ซึ่งละอองหยดเหล่านี้จะผ่านระบบการระเหยให้กลายเป็นไอ (Evaporation) และมีกระบวนการที่เกี่ยวข้องหลายขั้นตอน ดังแสดงในภาพ 4.15 โดยมีขั้นตอนหลักๆ คือ การเกิดนิวเคลียสผลึก (Nucleation) การควบแน่น (Condensation) โดยระบบภายในของรีแอกเตอร์ ระดับพลังงานของเปลวไฟจะถูกใช้ในการขับเคลื่อนการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของสารละลายตั้งต้นเป็นผลให้เกิดลักษณะกลุ่มก้อนและสามารถเติบโตเป็นอนุภาคระดับนาโนได้ที่บริเวณพื้นผิว หรือเกิด

กระบวนการแข็งลักษณะที่เป็นก้อน (Coagulation) และเกิดในลักษณะเกาะรวมตัวกันเป็นก้อนหยาบ (Coalescence) ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำให้วัสดุนาโนเริ่มเกิดจากการก่อตัวจากแกนกลางหรือเกิดนิวเคลียสผลึก จากนั้นจึงค่อยๆ เกาะกลุ่มและรวมตัวกันเกิดเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ขึ้นเพื่อที่จะก่อตัวเป็นอนุภาค และในที่สุดก็จะเกิดการเติบโต (Growth) และมีความแน่นตัวสูงขึ้นตามลำดับ โดยผ่านกระบวนการซินเตอร์ (Sintering) ซึ่งการซินเตอร์ คือ กระบวนการที่อนุภาครวมตัวเข้าด้วยกัน หรือเกิดการเชื่อมต่อกันของแต่ละอนุภาคบริเวณขอบเกรนหรือรอยต่อ (Grain) ระหว่างที่มีการให้ความร้อนแก่ระบบ ซึ่งมีผลทำให้เกิดการหดและแน่นตัวมากขึ้น ดังนั้นจึงเป็นกระบวนการที่สามารถเพิ่มเสถียรภาพทางอุณหพลศาสตร์ให้กับพื้นผิวได้เป็นอย่างดี



ภาพ 4.15 กระบวนการสังเคราะห์ และลักษณะเปลวไฟที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนความบริสุทธิ์สูง ด้วยกระบวนการเฟลมสเปรย์ไฟโรลิซิส (Kruefu et al., 2014)

ภายหลังจากการสังเคราะห์ อนุภาคจะถูกเก็บไว้บนกระดาษกรองชนิดพิเศษ มีสมบัติทนความร้อนได้ ทำการติดตั้งไว้ในส่วนของคอลเล็กเตอร์ (Collector zone) ในการใช้เปลวไฟเป็นแหล่งให้ความร้อน เนื่องจากในกระบวนการเฟลมสเปร์ย์ไฟโรลิซิสนั้นการพ่นของละอองฝอยจากสารละลายตั้งต้นจะมีการก่อตัวของเปลวไฟจากการใช้แก๊สที่ช่วยในการติดไฟอย่างดี คือ มีเทน (Methane) และออกซิเจน (Oxygen) ซึ่งจะทำให้เกิดกระบวนการระเหยและเกิดการเผาไหม้ของละอองฝอย และยังมีการใช้แก๊สออกซิเจนเพื่อใช้ในการกระจายตัวของละอองพ่นฝอย (O_2 dispersion) และควบคุมให้เกิดสภาวะออกซิเดชัน (O_2 sheath gas) อย่างสมบูรณ์ที่สุด เชื้อเพลิงที่ใช้รองรับและแก๊สออกซิเจนทั้งหมดในระบบจะมีการแยกการควบคุมการไหลอย่างชัดเจนออกจากช่องส่งละอองฝอยของสารละลายตั้งต้นละอองฝอย โดยแก๊สทุกชนิดจะถูกควบคุมอัตราการไหลโดยตัวควบคุมการไหลของมวลสาร (Mass flow controller) ในภายหลังละอองฝอยจะถูกทำให้เปลี่ยนสถานะไปอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการปล่อยสารละลายตั้งต้นเข้าไปในระบบจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้โดยตรงกับแก๊สออกซิเดนต์ชนิดออกซิเจน

ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดอนุภาคที่สังเคราะห์ได้

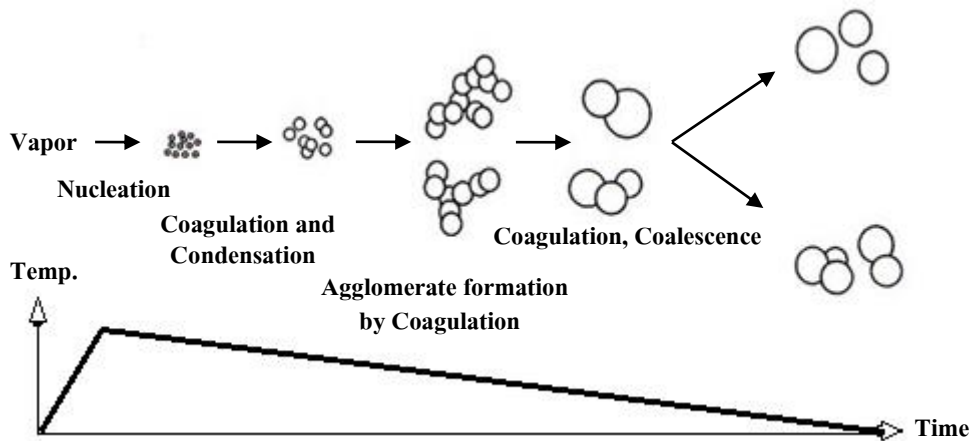
- ผลขององค์ประกอบของสารตั้งต้น
- อัตราการไหลของตัวออกซิเดนต์
- ผลของอัตราเร็วในการฉีดสารละลายตั้งต้น
- ผลของความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น
- ผลขององค์ประกอบของเชื้อเพลิง
- ผลของสารเจือที่เติมลงไป
- ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่ไ้ระหว่างการสังเคราะห์

ข้อดีของเทคนิคเฟลมสเปร์ย์ไฟโรลิซิส

เทคนิคเฟลมสเปร์ย์ไฟโรลิซิสเป็นเทคนิคที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการละลายของสารตั้งต้นที่ถูกพ่นเข้าไปในระบบได้เป็นอย่างดี และมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงได้โดยตรงง่ายต่อเกิดปฏิกิริยาภายในเปลวไฟ และสามารถควบคุมอัตราการพ่นสารให้เป็นไปตามความเหมาะสมได้ ทำให้ได้อนุภาคระดับนาโน

ข้อเสียของเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส

เทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิสเป็นเทคนิคที่ต้องใช้ต้นทุนสูง เนื่องจากแก๊สที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้สารละลาย หรือเร่งให้เกิดเปลวไฟภายในระบบ เช่น แก๊สออกซิเจน และมีเทน มีราคาที่สูงขึ้น นอกจากนี้ อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ก็มีราคาสูงกว่าอุปกรณ์ในเทคนิคอื่นๆ ภาพ 4.16 แสดงการก่อตัวเป็นอนุภาคนาโนจากกระบวนการเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส โดยแสดงอุณหภูมิของเปลวไฟขณะอนุภาคเกิดการก่อตัว



ภาพ 4.16 การก่อตัวเป็นอนุภาคนาโนจากกระบวนการเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส (สุคนธ์, 2550)

4.2.2 การประกอบตัวเอง (Self-assembly)

การประกอบตัวเอง (Self-assembly) เป็นการประกอบตัวของโมเลกุลหน่วยย่อยให้วางตัวอย่างเป็นระเบียบได้เอง เพื่อก่อสร้างเป็น โครงสร้างนาโนที่มีความเสถียร โดยไม่เกิดการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างกัน หรือกล่าวได้ว่าเป็นลักษณะการก่อตัวขึ้นมาของโครงสร้างโมเลกุล โดยการจับตัวกันของแต่ละหน่วยย่อย โดยไม่ต้องอาศัยการสร้างพันธะโควาเลนต์เพื่อเชื่อมต่อกัน แต่อาศัยพลังงานเป็นสิ่งที่ช่วยในการสังเคราะห์ และเมื่อประกอบตัวกันเสร็จแล้ว ผนังนั้นก็จะถูกถอดออกได้เอง ซึ่งกระบวนการของการประกอบตัวเองได้ในธรรมชาติ นำไปสู่โครงสร้างที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวที่เป็นไปได้หลากหลายรูปแบบ ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่สามารถกำหนดรูปร่างเรขาคณิตของโครงสร้างโมเลกุลสุดท้ายขึ้นมาได้ ลักษณะโครงสร้างที่

เกิดจากการประกอบตัวเองได้ในธรรมชาตินั้นมีมากมายหลายรูปแบบตัวอย่างเช่น การม้วนตัวของโปรตีนซึ่งต้องอาศัยนั่งร้าน เป็นต้น

4.2.3 การใช้กล้องส่องอะตอม (Scanning probe manipulation)

เป็นวิธีการที่ใช้กล้อง Scanning probe microscopy (SPM) ในการจัดการกับอะตอม กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโดยทั่วไปที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน สามารถช่วยให้มนุษย์มองเห็นรายละเอียดได้สูงสุดอยู่ในระดับช่วงแสงที่มนุษย์มองเห็นได้ คือ 400-700 นาโนเมตรเท่านั้นหรือที่ดีที่สุดในช่วงระดับความละเอียด 200-400 นาโนเมตร ซึ่งความละเอียดในระดับนี้ไม่สามารถที่จะทำให้มองเห็นอนุภาคระดับนาโนได้ แต่เครื่อง Scanning probe microscope เป็นเครื่องมือที่ไม่ใช้แสงที่มองเห็นได้ แต่ใช้ปลายแหลมที่มีขนาดเล็กระดับอะตอมและใช้แรงระหว่างอะตอมหรือโมเลกุล ดังนั้นจึงทำให้สามารถที่จะจัดการได้อย่างละเอียดในระดับอะตอมหรือโมเลกุล ทำให้สามารถที่จะศึกษาสิ่งที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรได้ โดยมีความละเอียดอยู่ในระดับมากกว่า 0.1 นาโนเมตร

บรรณานุกรม

1. การกัดกรด. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/lms/filemanager/...33/47211578.doc>
2. สมเกียรติ ศุกเดช. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำ. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.kmitl.ac.th/~ksomkia/semi1/6.pdf> (2 มกราคม 2555)
3. ชัยกานต์ เลียวหิรัญ. 2555. การผลิตวัสดุนาโนด้วยเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/tn220B_p33_35.pdf (2 มกราคม 2555)
4. พิเชษฐ อนุรักษ์อุดม. 2555. นาโนเทคโนโลยี เทคโนโลยีในศตวรรษที่ 21. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.ipst.ac.th/design/document/photoshop/cp01.pdf> (2 มกราคม 2555)
5. พิธิษฐ์ ลิงห์ใจ. 2548. เงื่อนไขที่เหมาะสมในการควบคุมการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีอาร์คดิซาร์จ. รายงานวิจัย สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
6. วิรัชชา เครือฟู. 2550. การเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ โดยเทคนิคการสเป็คเตอร์ริงแบบดีซี แมกเนตรอน. งานวิจัยคณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยแม่โจ้
7. สถาบันนวัตกรรมและพัฒนารการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2554. เทคโนโลยีการสร้างระดับนาโน. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/scibook/nanotech/Page/Unit4-4.html>
8. (2 มกราคม 2555)
9. สุคนธ์ พานิชพันธ์. 2550. อนุภาคนาโนที่สังเคราะห์โดยเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิสและการใช้งาน. สถาบันบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 200 น.
10. Franssila, S. 2004. **Introduction to Microfabrication**. John Wiley & Sons Ltd. 422 page.

11. Kammler, H.K., Mädler, L., Pratsinis, S.E. 2001. Flame Synthesis of Nanoparticles. **Chem. Eng Technol.** 24(6): 583-596.
12. Kruefu, V., Wisitsoraat, A., Phanichphant, S. 2014. Selectivity of hybridized P3HT: Au/ZnO NPs films towards NH₃ gas at room temperature, **submitted in Sens. Actuators B: Chem.**
13. Kruefu, V. 2011. **Syntheses of niobium-doped zinc oxide nanoparticles by flame spray pyrolysis and their applications.** Ph.D thesis. Chiang Mai University.
14. Pratsinis, S.E. 1996. Flame Synthesis of Nano size Particles: Precise Control of Particlesize, **Aerosol Sci, Technol.** 27; S153-S154.
15. Stark, W.J, Pratsinis, S.E. 2002. Aerosol Flame Reactors for Manufacture of Nanoparticles. **Powder Technol.** 126: 103-108.
16. Uplaznik, M. 2002. **Introduction to nanotechnology-soft lithography.** University of Ljubljana.
17. Yin, H., Wada, Y., Kitamura, T., Kambe, S., Murasawa, S., Mori, H., Sakata T. and Yanagida, S., 2001. Hydrothermal synthesis of nanosized anatase and rutile TiO₂ using amorphous phase TiO₂, **J. Mater. Chem.** 11: 1694-1703.
18. Zhou, X.F., Chu, D.B. Wang, S.W., Lin, C.J. and Tian, Z.Q. 2002. New route to prepare nano-crystalline nanocrystalline TiO₂ and its reaction mechanism. **J. Mater. Chem.** 37: 1851-1857.

คำถามท้ายบท

- 4.1 สิ่งที่สร้างขึ้นจากนาโนเทคโนโลยีนั้นสร้างขึ้นได้อย่างไร
- 4.2 วิธีการที่โมเลกุลชีวภาพใช้ในการสร้างโครงสร้างระดับนาโนขึ้นมาคือแบบใด และมีแนวทางในการดำเนินการอย่างไร
- 4.3 เทคนิค Lithography ที่มีการนำมาใช้ทางด้านนาโนเทคโนโลยีมีอะไรบ้าง และแต่ละเทคนิคมีหลักการสร้างโครงสร้างนาโนอย่างไร
- 4.4 หากพิจารณากระบวนการสร้างในระบบธรรมชาติ และโดยการสังเคราะห์แล้ว กระบวนการใดบ้างที่เป็นเทคโนโลยีการผลิตแบบบนลงล่าง และแบบล่างขึ้นบน
- 4.5 จงอธิบายกระบวนการของ Self assembly ในงานด้านนาโนเทคโนโลยี
- 4.6 ในกระบวนการนาโนลิโทกราฟี ถ้าต้องการสร้างรูปแบบของชิ้นส่วนของวงจรมิโครชิพบนแก้วที่เคลือบด้วยชั้นของโครเมียม จะเลือกใช้กระบวนการนาโนลิโทกราฟีแบบใด อธิบายวิธีการ
- 4.7 จงอธิบายวิธีการเตรียมฟิล์มบางระดับนาโนโดยวิธีการ Evaporation และ Spin coating ว่ามีวิธีการอย่างไร พร้อมทั้งบอกข้อดี และข้อเสียของแต่ละวิธี
- 4.8 ถ้าต้องการเคลือบฟิล์มตัวเก็บประจุ จะเลือกใช้วิธีการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีใด เพราะอะไร พร้อมทั้งอธิบายวิธีการเตรียมฟิล์มดังกล่าว
- 4.9 ถ้าต้องการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโดยใช้กระบวนการแบบล่างสู่บน (Bottom up) ที่ไม่ต้องการควบคุม pH และประหัยต์ค่าใช้จ่ายในการซื้อสารตั้งต้น จะเลือกใช้วิธีการใด อธิบายวิธีการสังเคราะห์ดังกล่าว

บทที่ 5

เครื่องมือ และการวิเคราะห์ทางนาโนเทคโนโลยี:

- 5.1 กล้องจุลทรรศน์กระแสอิเล็กตรอนแบบหัวอ่านส่องกราด
(Scanning tunneling microscope, STM)
- 5.2 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM)
- 5.3 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer, XRD)
- 5.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
(Scanning electron microscope, SEM)
- 5.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน
(Transmission electron microscope, TEM)
- 5.6 เครื่องวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์
(Energy dispersive spectrometer, EDS)
- 5.7 เครื่องวัดพื้นที่ผิว (Surface area analyzer, SAA)
- 5.8 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
(UV-Vis spectrophotometer, UV-Vis)
- 5.9 เครื่องโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์
(Photoluminescence spectrometer, PL)
- 5.10 เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
(Infrared spectrophotometer, IR)
- 5.11 เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman spectrometer)
- 5.12 เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermal analyzer, TA)

5.1 กล้องจุลทรรศน์กระแสอิเล็กตรอนแบบหัวอ่านส่องกราด (Scanning tunneling microscope, STM)

กล้องจุลทรรศน์กระแสอิเล็กตรอนแบบหัวอ่านส่องกราด (Scanning tunneling microscope) หรือเรียกโดยย่อว่า STM เป็นเครื่องมือที่สามารถมองเห็นภาพในระดับอะตอมได้จากภาพ 5.1 แสดงวงจรการทำงานของ STM โดยทำงานจากการใช้ความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าบังคับปลายเข็มที่แหลมมาก หัวเข็มเป็นหัวอ่านขนาดเล็กมากที่ใช้ส่องกราด (สแกน) บนพื้นผิวของวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้า และวัดกระแสไฟฟ้า แล้วส่งสัญญาณไฟฟ้าเพื่อสร้างเป็นภาพของพื้นผิว STM สามารถเคลื่อนย้าย และจัดเรียงอะตอม ให้อยู่บนพื้นผิวตามตำแหน่งที่ต้องการได้ ในปี ค.ศ. 1989 ดร.ดอน ไอเกลอร์ (Don Eigler) นักฟิสิกส์จากบริษัทไอบีเอ็มจำกัด เป็นคนแรกที่สาธิตการนำอะตอม 35 อะตอม ของแก๊สซีนอน (Xenon) มาเรียงบนผิวของโลหะนิเกิล (Nickel) เป็นตัวอักษร IBM ที่เล็กที่สุดในโลก ภาพ 5.2 แสดงการเคลื่อนย้ายอะตอมโดยใช้กล้อง STM

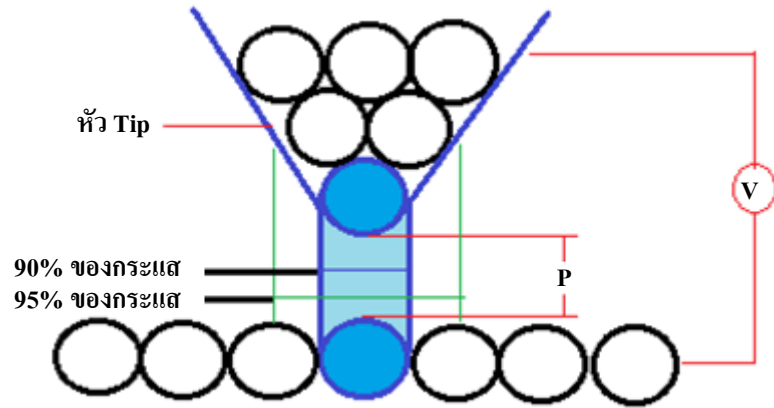
5.1.1 การสร้างภาพและการเคลื่อนย้ายอะตอมของกล้อง STM

การสร้างภาพอะตอม (Atom imaging mode)

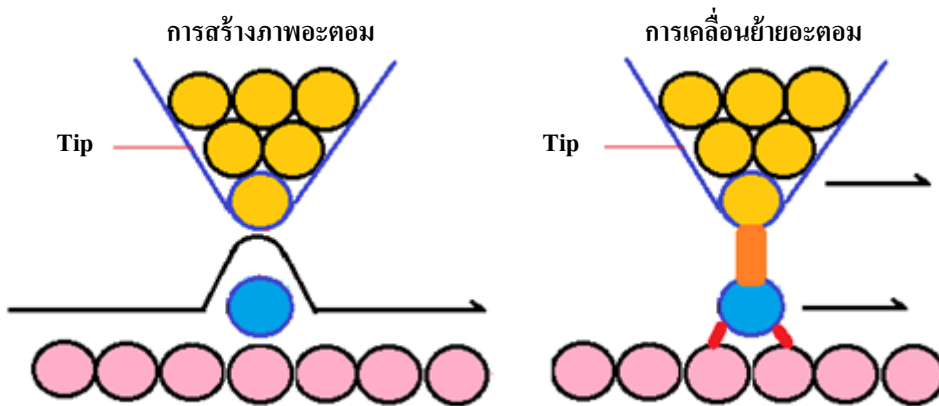
เป็นการใช้หัวเข็ม STM ที่แหลมมากในการส่องกราดไปบนพื้นผิวของโลหะที่มีอะตอมวางอยู่ การบังคับปลายเข็มทำได้โดยใช้ความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้าในการกระตุ้นผลึกเซรามิกส์ที่ยึดติดกับหัวเข็มให้หดหรือคลายตัว โปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถนำมาใช้ในการใส่ข้อมูลหรือตัวแปรที่ต้องการควบคุม ตัวอย่างเช่น พื้นที่ในการสแกน ค่าความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า เป็นต้น ในขณะที่การส่องกราดสัญญาณไฟฟ้าจะถูกนำมาสร้างเป็นภาพจำลองของพื้นผิว

การเคลื่อนย้ายอะตอม (Atom manipulation mode)

เป็นการใช้หัวเข็มในการหยิบอะตอมและเคลื่อนย้ายไปวาง ณ จุดที่ต้องการเคลื่อนย้ายอะตอม ทำได้โดยควบคุมความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า เพื่อควบคุมปลายหัวเข็มของ STM เพื่อผลัก และเคลื่อนย้ายอะตอมไปวาง ณ ตำแหน่งที่ต้องการ



ภาพ 5.1 วงจรการทำงานของกล้อง STM (จตุพร, 2554)



ภาพ 5.2 การเคลื่อนย้ายอะตอมโดยกล้องSTM (Atkins and Jones)

ยกตัวอย่างการใช้นาโนเทคโนโลยีในการจัดเรียงคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จำนวน 50 โมเลกุลเขียนลงบนผิวของโลหะทองแดง (Cu) เป็นพระภุมมาภิไทยย่อ ภ.ป.ร. เพื่อเทิดพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ ในฐานะที่เป็นพระบิดาแห่งเทคโนโลยีไทย มีขนาดความยาว 14 นาโนเมตร และความสูง 7 นาโนเมตร ตัวอักษร ภ เขียนด้วย

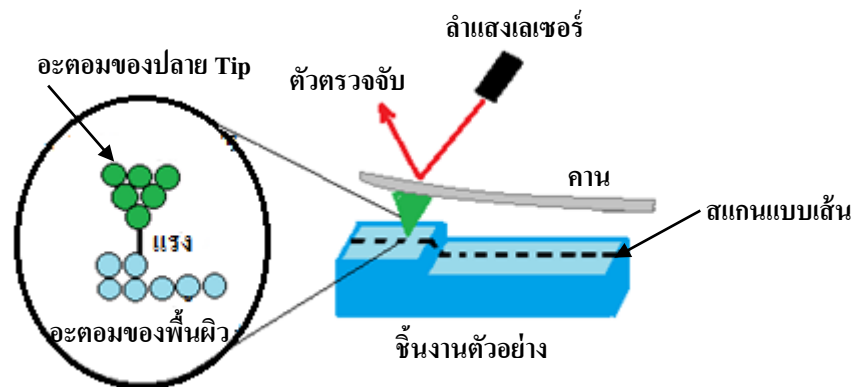
คาร์บอนมอนอกไซด์ 17 โมเลกุล ตัวอักษร ป เขียนด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ 18 โมเลกุล และตัวอักษร ร เขียนด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ 15 โมเลกุล

5.1.2 ปัจจัยที่มีผลในการเคลื่อนย้ายอะตอม

ปัจจัยที่มีผลในการเคลื่อนย้ายอะตอม เช่น ปลายหัวเข็ม อุปกรณ์ที่ใช้ต้องมีความแหลมอย่างยิ่งวด ผิวโลหะที่วางอะตอมต้องมีความสะอาดสูงปราศจากสิ่งปนเปื้อน เป็นต้น

5.2 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM)

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม หรือเอเอฟเอ็ม (Atomic force microscope, AFM) หลักการทำงานของเครื่องมือชนิดนี้คือ การใช้อุปกรณ์ตรวจหรือโพรบ (Probe) ที่มีปลายแหลมเล็กซึ่งติดอยู่กับคานที่มีการโค้งงอตัวได้ด้วยแรงกระทำที่ปลายคาน เมื่อลากปลายแหลมนี้ไปบนพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการศึกษา แรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวที่เกิดขึ้นกับปลายแหลมจะทำให้คาน โค้งงอตัว และสามารถระบุให้ทราบถึงลักษณะพื้นผิวของวัสดุนั้นๆ ได้ว่ามี ความสูงต่ำในบริเวณใดบ้าง เมื่อนำเอาแรงที่เกิดขึ้นที่จุดต่างๆ นี้มาประกอบกันก็จะได้เป็นภาพของพื้นผิวของวัสดุที่ศึกษา จากภาพ 5.3 แสดงแผนภาพการทำงานของกล้อง AFM



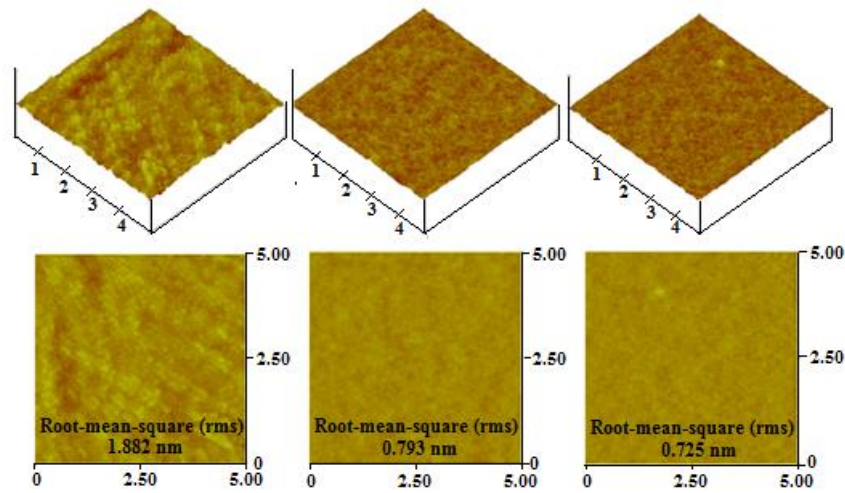
ภาพ 5.3 แผนภาพการทำงานของกล้อง AFM (วิรุฬ, 2535)

วิธีการทำงานของกล้อง AFM แบ่งเป็น 2 วิธี คือการสัมผัสแบบต่อเนื่อง ได้แก่ การสัมผัสพื้นผิวพร้อมกับการลากปลายแหลมไปบนพื้นผิวนั้นๆ ข้อเสียของวิธีนี้คือ ทำให้เกิดแรงต้านขึ้นในแนวของการเคลื่อนที่ซึ่งขนานกับพื้นผิว ทำให้คานเกิดการโก่งงอตัวโดยที่ไม่ได้เกิดจากแรงกระทำที่ปลายเนื่องจากแรงในแนวตั้งจากเพียงอย่างเดียว จึงทำให้ข้อมูลความสูงของพื้นผิวที่วัดได้ผิดไปจากความสูงที่แท้จริง อีกวิธีหนึ่งเป็นการสัมผัสแบบไม่ต่อเนื่อง โดยให้สัมผัสกับพื้นผิวเป็นระยะเวลาสั้นๆ ในแนวตั้งจากกับพื้นผิว คล้ายกับการใช้ปลายนิ้วเคาะโต๊ะเป็นจังหวะๆ ด้วยลักษณะการสัมผัสแบบนี้แรงต้านในแนวตั้งจากจะไม่เกิดขึ้น แต่เนื่องจากปลายแหลมสัมผัสพื้นผิวเป็นระยะสั้นๆ จึงทำให้เกิดการสั่นของคานซึ่งส่งผลให้ค่าสัญญาณวัดที่ได้ไม่คงที่

AFM เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สังเกต และจัดการเคลื่อนย้ายอะตอมของวัสดุขนาดนาโนเมตร ได้ทั้งวัสดุที่เป็นตัวนำและฉนวน สามารถใช้งานได้ในสิ่งแวดล้อมที่เป็นสุญญากาศ อากาศ แก๊ส และของเหลว ส่วนประกอบที่สำคัญของ AFM คือ คานที่ทำจากวัสดุที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าประจุได้เมื่อถูกแรงกระทำที่ปลายคาน จะมีปลายเข็มที่ประกอบด้วยอะตอม 1 ตัว เมื่อเลื่อนคานให้ปลายเข็มอยู่ห่างจากผิววัสดุระหว่าง 0-100 นาโนเมตร แรงกระทำระหว่างอะตอมจะดึงคานและสามารถวัดระยะหรือใช้เคลื่อนย้ายอะตอมทีละตัว

ตัวอย่างภาพฟิล์มบางของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง poly(3-hexylthiophene) (P3HT) และ [6,6]-phenyl-C61-butyric acid methyl ester (PCBM) ที่ได้จากกล้อง AFM ดังภาพ 5.4 จากภาพจะสังเกตเห็นว่ามีระดับความเข้มของสีไม่เท่ากันอยู่ 2 สี ซึ่งบ่งบอกได้ถึงระดับความสูงต่ำ (Roughness) ของพื้นผิว โดย AFM มีสมบัติพิเศษที่สามารถใช้วัดระดับความสูงต่ำ (Roughness) ของพื้นผิวที่หลากหลาย ที่มีระดับความสูงต่ำไม่เกิน 4 ไมโครเมตร และขนาดภาพสแกนใหญ่ที่สุดไม่เกิน 100 ไมโครเมตร

ภาพ 5.5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มซิลิกอนที่เตรียมจากวิธีการตกสะสมไอสารด้วยวิธีการทางเคมี ขนาดของเกรนวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (TEM) และความขรุขระของพื้นผิววิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ซึ่งขนาดเกรนของที่เล็กลงก็จะเป็นผลให้ความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มมีค่าน้อยลง



ภาพ 5.4 ภาพฟิล์มบางของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง Poly(3-hexylthiophene) (P3HT) และ [6,6]-phenyl-C61-butyric acid methyl ester (PCBM) ที่ได้จากกล้อง AFM (Kruefu, 2011)

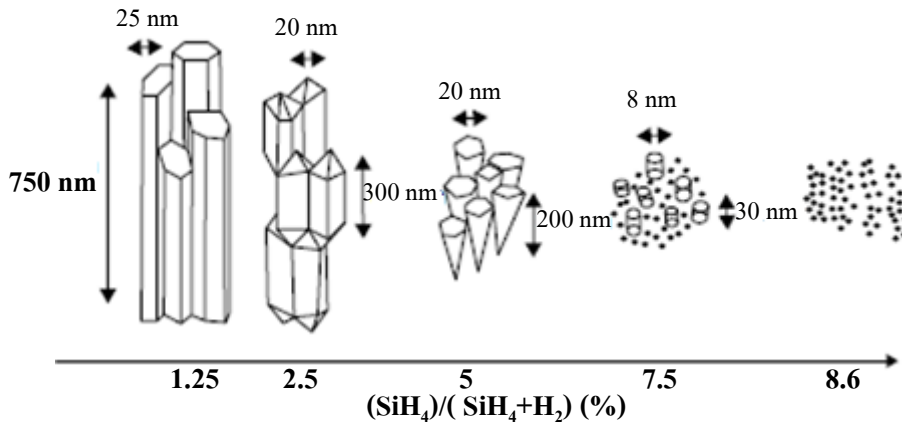
AFM:

Surface roughness (S_q)

$S_q = 40 \text{ nm}$ $S_q = 18 \text{ nm}$ $S_q = 17 \text{ nm}$ $S_q = 16 \text{ nm}$ $S_q = 4 \text{ nm}$

TEM:

Size and shape of the grains



ภาพ 5.5 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มซิลิกอนที่เตรียมจากวิธีการตกสะสมไอสารด้วยวิธีการทางเคมี ขนาดของเกรนวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (TEM) และความขรุขระของพื้นผิววิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) (Franssila, 2004)

5.3 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer, XRD)

เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีโดยไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-destructive analysis) สามารถวิเคราะห์ธาตุเดี่ยวๆ ทีละธาตุ (Sequential) หรือวิเคราะห์หลายธาตุพร้อมกัน (Simultaneous) โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

5.3.1 สมบัติของรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์ถูกค้นพบโดยเรินแกน (Röntgen) เมื่อปี พ.ศ. 2438 จึงเรียกรังสีนี้ว่า รังสีเรินแกน (Röntgen ray) รังสีเอ็กซ์เป็นรังสีที่มีสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) เกิดขึ้นจากการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินภายหลังการเกิดอันตรกิริยาทางนิวเคลียร์ของอะตอมของธาตุที่บริเวณชั้นโคจรของอิเล็กตรอน (Electron shell) มีความยาวคลื่นในช่วงประมาณ 0.0001-100 อังสตรอม ในแถบสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

5.3.2 กระบวนการเกิดรังสีเอ็กซ์

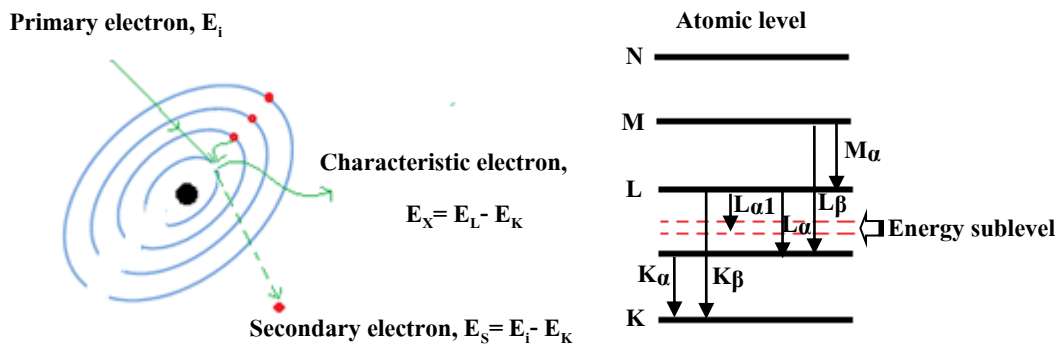
รังสีเอ็กซ์เกิดได้จากสภาวะการเปลี่ยนระดับพลังงานของอะตอม ทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ จากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี และที่มนุษย์ผลิตขึ้น กล่าวคือเมื่ออะตอมได้รับการกระตุ้น (Excite) ให้เปลี่ยนระดับพลังงาน การลดระดับพลังงานสู่สภาวะปกติโดยมวลของอะตอมไม่เปลี่ยนแปลง เป็นการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอนออกมา คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมานี้ เรียกว่า รังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามกระบวนการของการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินจากอะตอมบริเวณชั้นโคจรอิเล็กตรอนคือ

- รังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-ray)

รังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวมีลักษณะเป็นรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานเดี่ยว (Monochromatic) เพราะเกิดจากการลดระดับพลังงานที่แน่นอน เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนหรืออนุภาคที่มีประจุอื่นๆ หรือโฟตอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอม เช่น ชั้น K หรือ L แล้วถ่ายโอนพลังงานให้อิเล็กตรอน อิเล็กตรอนในชั้นโคจรที่ได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของชั้นโคจร (Binding energy) จะหลุดจากวงโคจรเกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรนั้น ทำให้อะตอมอยู่ในสภาวะที่ถูกกระตุ้น และจะลด

ระดับพลังงานลงสู่สภาวะปกติในช่วงระยะเวลาสั้น โดยอิเล็กตรอนของวงโคจรชั้นถัดออกไป จะลดระดับพลังงานลงมาให้เท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของวงโคจรชั้นใน ด้วยการปล่อยพลังงานส่วนเกินในรูปของรังสีเอ็กซ์ออกไป แล้วเข้ามาแทนที่วงโคจรชั้นใน พลังงานส่วนเกินนี้จะมีพลังงานเท่ากับความต่างระดับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจรของอิเล็กตรอน และเฉพาะชนิดของธาตุนั้นๆ จึงมีพลังงานเฉพาะค่า ดังนั้น จึงเรียกรังสีเอ็กซ์ชนิดนี้ว่า รังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว จากภาพ 5.6 แสดงการเกิดรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว

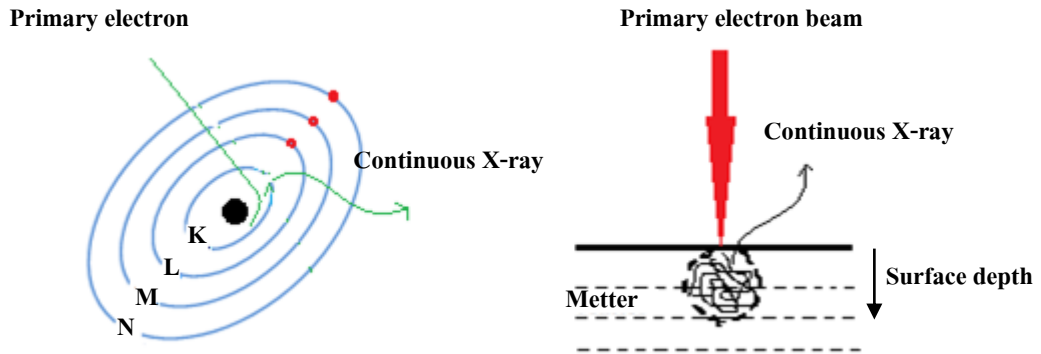


ภาพ 5.6 การเกิดรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว (ก) อันตรกิริยาของอะตอม (ข) การเกิดรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวที่ระดับพลังงานของชั้นวงโคจรต่างๆ (ศรีโฉล และ ศรีนทร, 2543)

- รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง (Continuous X-ray)

รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่องมีลักษณะเป็นรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานต่อเนื่อง เกิดจากอิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนเข้าสู่สนามคูลอมบ์ (Coulomb field) บริเวณใกล้นิวเคลียส ความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าสถิตทำให้อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วและปล่อยรังสีเอ็กซ์ออกมา เรียกว่า Bremsstrahlung หรือ Braking radiation ก่อนที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะทำอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้นิวเคลียสที่เกิดจากประจุของอะตอม อิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานบางส่วนให้กับพื้นผิวของวัตถุในชั้นความลึกต่างๆ อันเนื่องจากการกระเจิงของอิเล็กตรอน พลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นจึงมีค่ากระจายต่อเนื่อง จากพลังงานต่ำสุดถึงสูงสุดของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ ถ้าอิเล็กตรอนปฐมภูมิมีพลังงานสูงพอที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในวง

โคจรชั้นในของอะตอมหลุดออกได้ ก็จะเกิดรังสีเอ็กซ์เฉพาะค่าขึ้นอยู่กับสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์ต่อเนื่องเสมอ จากภาพ 5.7 แสดงการเกิดรังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง



ภาพ 5.7 การเกิดรังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง (ก) อันตรกิริยาของอะตอม (ข) การกระเจิงของอิเล็กตรอนปฐมภูมิก่อนเกิดอันตรกิริยากับอะตอม (ศรีไจล และ สรินทร, 2543)

5.3.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เมื่อให้ลำแสงของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากหลอดผลิตรังสีเอ็กซ์ ผ่านเข้าไปในผลึกของแข็ง รังสีเอ็กซ์จะชนเข้ากับอะตอมที่เป็นองค์ประกอบของผลึก แล้วทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเลี้ยวเบนขึ้น โดยมีความเข้มต่างๆ กัน และมีมุมต่างๆ กัน ซึ่งสามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกได้

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เกิดขึ้นเมื่อรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic) ผ่านเข้าไปในผลึกดังแสดงในภาพ 5.8 ลำแสงรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบเส้นที่ขนานกันตามแนวราบ ซึ่งแสดงถึงชุดของระนาบผลึกที่ขนานกันด้วย Miller indices (h k l) เมื่อลำแสงรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นเดียว ซึ่งมีความยาวคลื่น λ ตกกระทบกับระนาบ แล้วลำแสงที่สะท้อนออกมาไม่อยู่ในเฟส หรือไม่เสริมกัน ดังแสดงในภาพ 5.8 (ก) จะเกิดการรบกวนกันและหักล้างกันแสดงว่ารังสีเอ็กซ์จะไม่เกิดการเลี้ยวเบน แต่ถ้ารังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาอยู่ในเฟสเดียวกันจะก่อให้เกิดการเสริมกัน ดังแสดงในภาพ 5.8 (ข)

จากภาพ 5.8 (ค) ลำแสงรังสีเอ็กซ์ที่ 1 และ 2 ตกกระทบกับระนาบของอะตอม เมื่อเกิดการเลี้ยวเบนและอยู่ในเฟสเดียวกัน ลำแสงที่ต้องเดินทางเพิ่มขึ้นจะเท่ากับ MP+PN ซึ่งจะมีค่าเท่ากับจำนวนเต็มคูณด้วยความยาวคลื่น นั่นคือ

$$n\lambda = MP + PN \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

เมื่อ $n = 1, 2, 3, \dots$ เรียกว่า อันดับของการเลี้ยวเบน

$$MP = PN = d_{hkl} \sin\theta \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

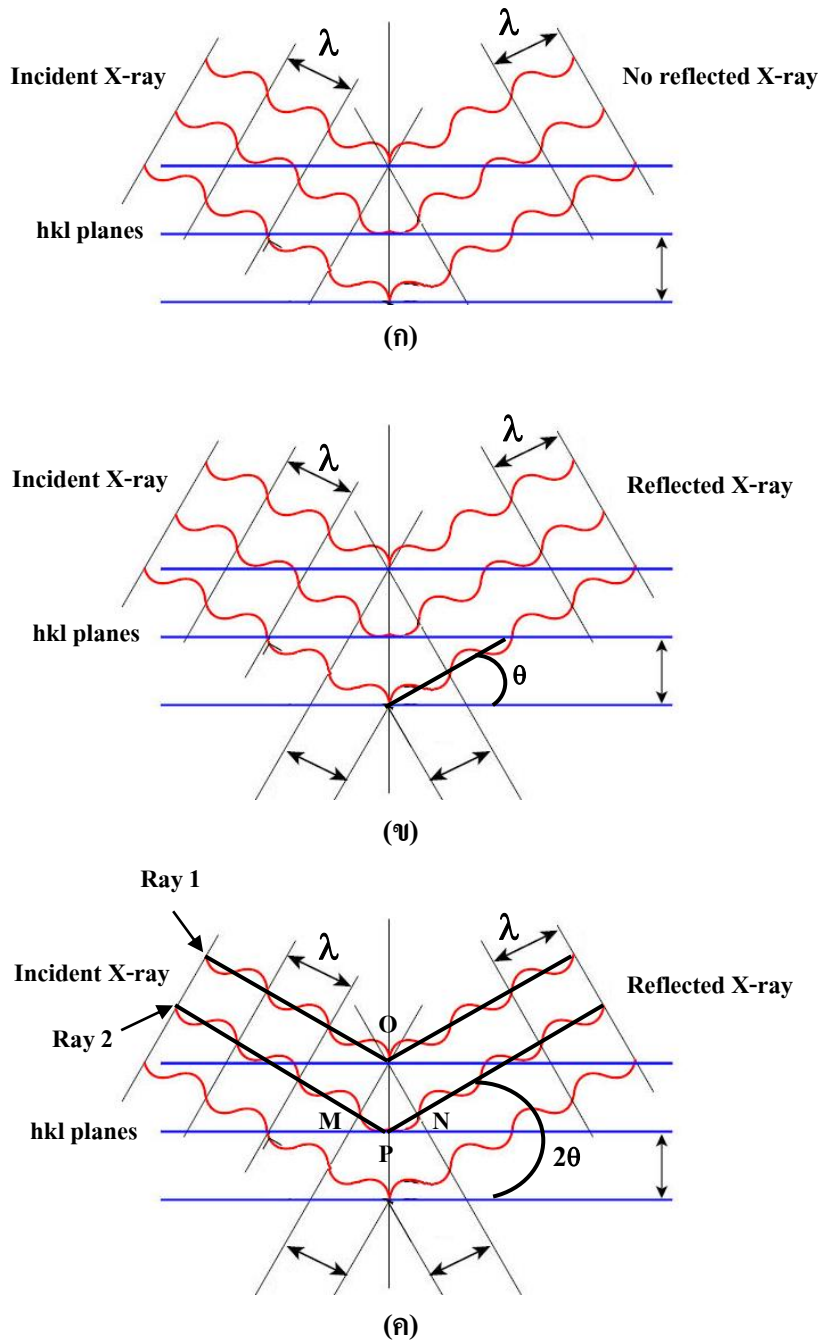
เมื่อ d_{hkl} = Interplanar spacing ของ Crystal planes ซึ่งมีค่า Indices เป็น hkl สภาวะที่เกิด Constructive interference

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin\theta \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

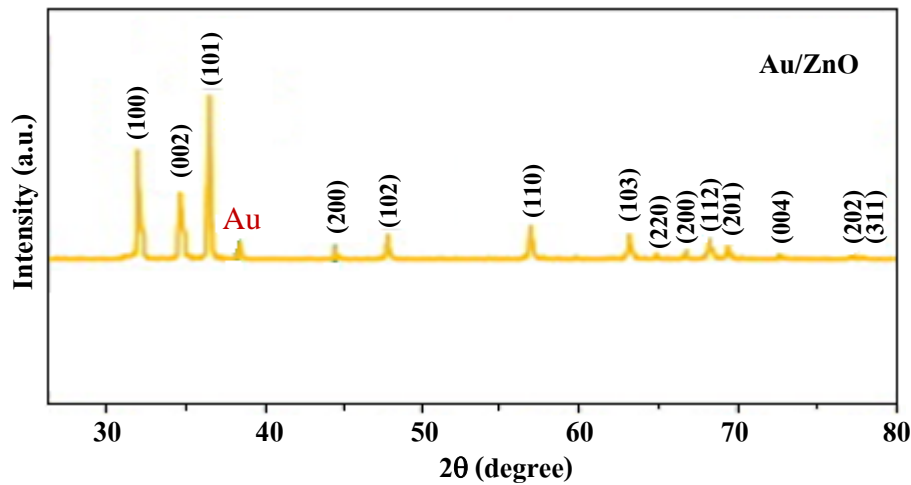
สมการ 5.3 เรียกว่า Bragg's law ซึ่งให้ความสัมพันธ์ระหว่าง Diffracted beam ของ X-rays ที่มีความยาวคลื่น λ กับ Interplanar spacing d_{hkl} ของระนาบผลึก (Crystal planes) โดยทั่วไป $n = 1$ ดังนั้นสมการของ Bragg's law จึงสามารถเขียนได้เป็น

$$\lambda = 2d_{hkl} \sin\theta \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

ภาพ 5.9 แสดงกราฟตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนผลึกของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทอง และฟิล์มบางผสมของพอลิเมอร์ (Poly (3-hexylthiophene), P3HT) กับอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทอง บนแผ่นอนุภาคนาโนที่ทำขั้วไฟฟ้าด้วยทอง



ภาพ 5.8 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบ (hkl) ของผลึก (ก) ไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (ข) เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ทำมุมตกกระทบกับระนาบเป็นมุม θ (ค) การเกิดคล้ายกับ (ข) โดยใช้เส้นตรงแทนคลื่น (ศรีใจ และ สรินทร, 2543)



ภาพ 5.9 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนผลึกของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทอง (Kruefu, 2014)

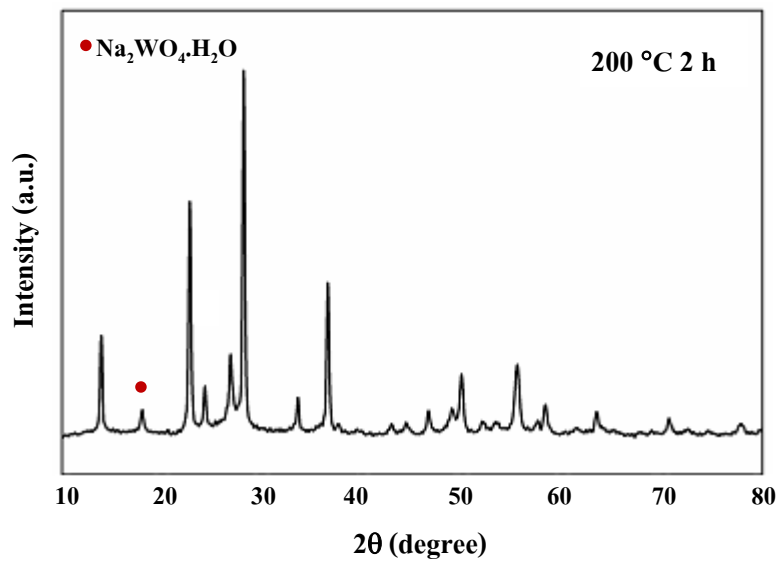
5.3.4 การวิเคราะห์ผลจากกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ผลจากการวิเคราะห์กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ทำให้ทราบเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก (Crystal structure) ความเป็นผลึกมากหรือน้อย ขนาดของผลึก องค์ประกอบของสารทั้งในเชิงคุณภาพวิเคราะห์ (Qualitative analysis) และเชิงปริมาณวิเคราะห์ (Quantitative analysis)

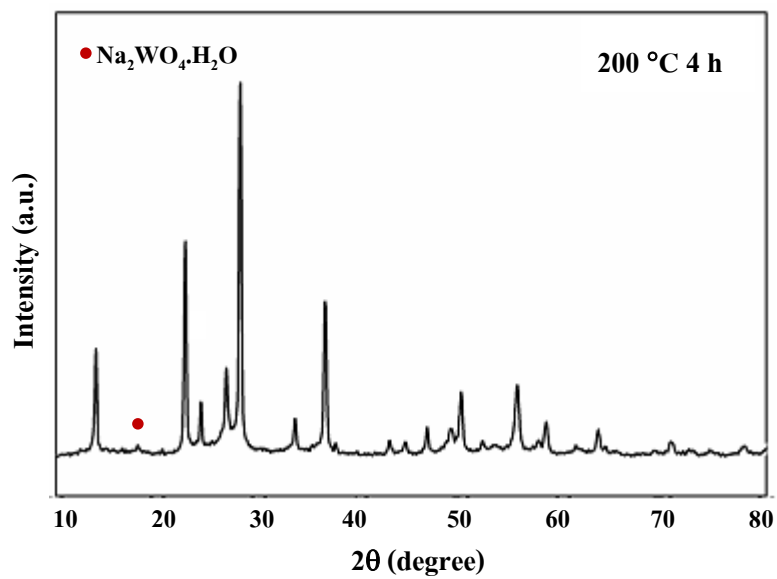
- การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (Crystal structure)

อาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งมีความแตกต่าง และมีลักษณะเฉพาะของแต่ละโครงสร้างผลึกของสารนั้นๆ ซึ่งขึ้นกับการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึก ดังนั้นรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จึงใช้เป็นตัวบ่งบอกได้ว่าสารตัวอย่างนั้นมีโครงสร้างผลึกแบบใด ซึ่งจากกราฟที่ได้เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของรังสีเอ็กซ์กับมุม 2θ ซึ่งจากข้อมูลที่ได้สามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบโครงสร้างผลึกของสารได้ โดยเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน Joint Committee Powder Diffraction Standards (JCPDS)

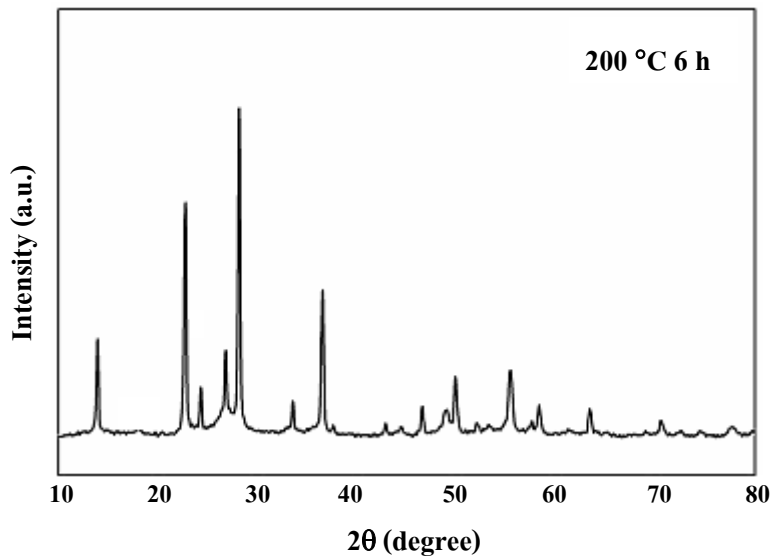
ตัวอย่างการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของผงทังสเตนออกไซด์บริสุทธิ์ (WO_3) ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 6 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพ 5.10-5.12



ภาพ 5.10 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของทังสเตนออกไซด์ ที่ผ่านการเตรียมที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ปิ่นทิตา, 2556)

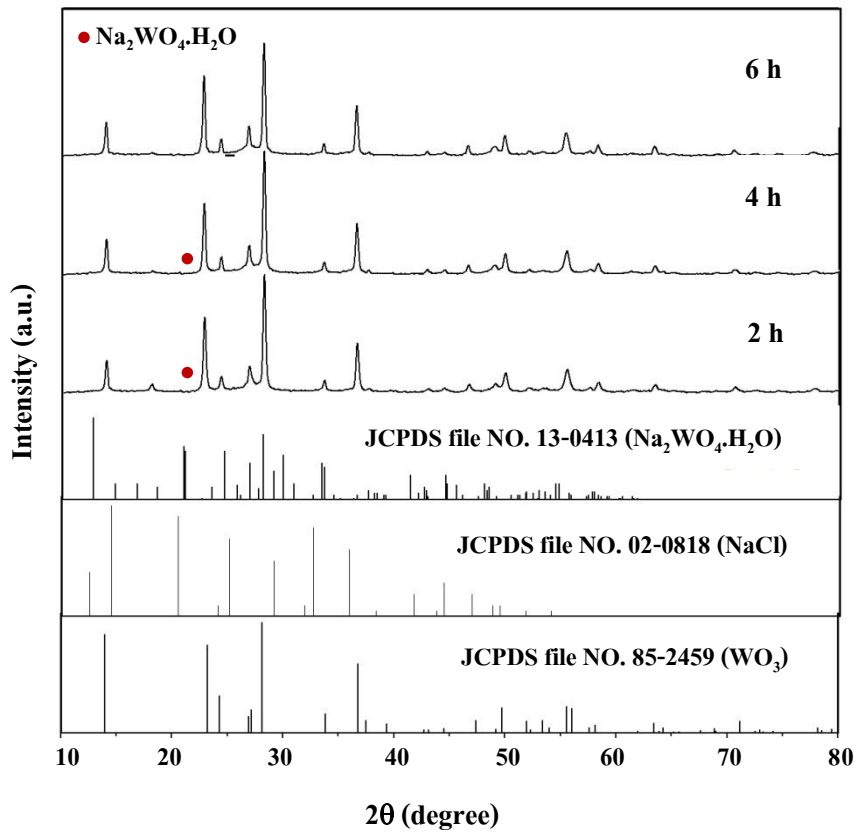


ภาพ 5.11 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของทังสเตนออกไซด์ ที่ผ่านการเตรียมที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ปิ่นทิตา, 2556)



ภาพ 5.12 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของทังสเตนออกไซด์ ที่ผ่านการเตรียมที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (ปัตติตา, 2556)

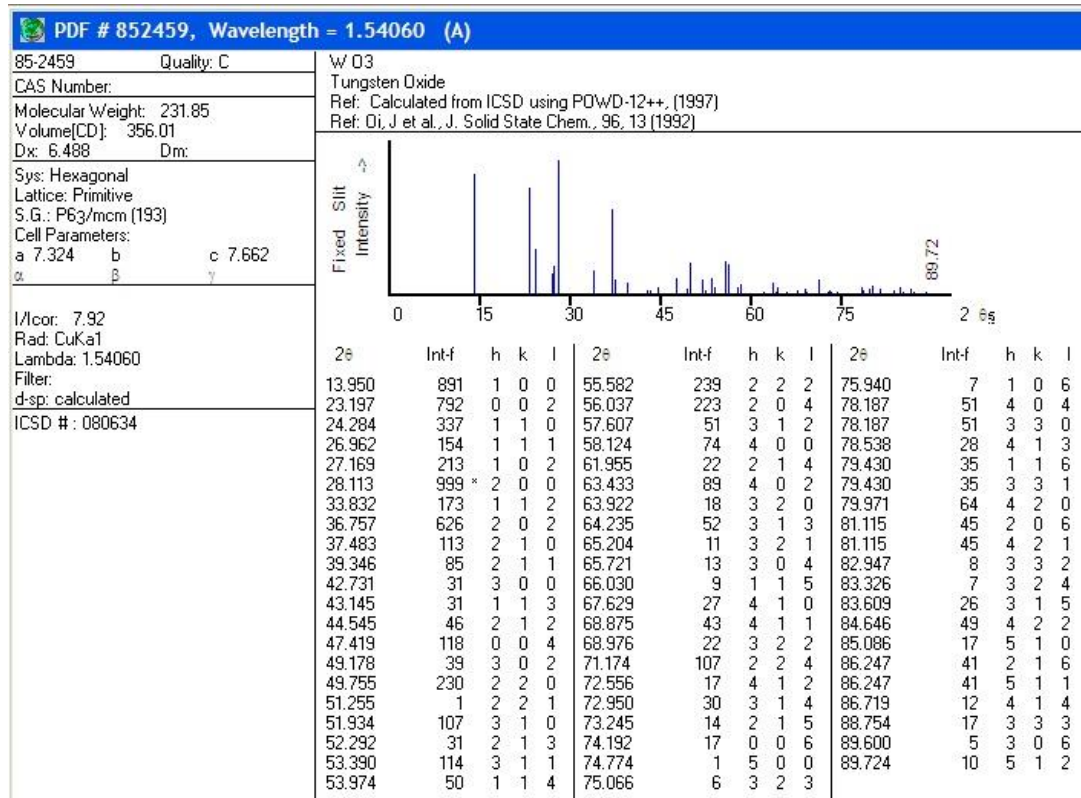
จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้ พบว่าที่เวลา 2 และ 4 ชั่วโมง ยังไม่เกิดอนุภาคทังสเตนออกไซด์ที่บริสุทธิ์ เนื่องจากพบฟีกแบลคปลอมที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 18.145 องศา ในขณะที่เวลา 6 ชั่วโมง อนุภาคผงนาโนทังสเตนออกไซด์มีความบริสุทธิ์มากขึ้น เนื่องจากฟีกแบลคปลอมนั้นหายไป ทั้งนี้ฟีกแบลคปลอมที่เกิดขึ้นอาจเป็นสารตั้งต้นที่เหลืออยู่หรือเกิดสารใหม่ขึ้น โดยสามารถตรวจสอบได้โดยการเทียบตำแหน่งมุม 2θ ของฟีกที่เกิดขึ้นกับตำแหน่งมุม 2θ ที่ความเข้มแสงสูงสุดของสารที่คาดว่าจะเป็นในฐานข้อมูลมาตรฐาน



ภาพ 5.13 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของทังสเตนออกไซด์ ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 เซลเซียส เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ (ปิ่นทิตา, 2556)

จากภาพ 5.13 เมื่อนำข้อมูลรูปแบบการเลี้ยวเบนของทังสเตนออกไซด์ที่เตรียมโดยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล ที่ผ่านการเตรียมที่อุณหภูมิ 200 เซลเซียส เป็นเวลานาน 6 ชั่วโมง เทียบกับฐานข้อมูล JCPDS (ภาพ 5.14) พบว่าตำแหน่งการเลี้ยวเบนหลักข้างต้นใกล้เคียงกับการเลี้ยวเบนหลักใน JCPDS file หมายเลข 85-2459 ซึ่งมีตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 13.95, 23.197, 24.284, 27.169, 28.133, 33.832, 36.756, 47.419, 49.755 และ 55.582 ทำให้ทราบว่าเป็นสาร

ตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ เป็นทั้งสแตนออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal structure)



ภาพ 5.14 JCPDS file หมายเลข 85-2459 ของ WO₃ (ปีฉัตรดา, 2556)

- การวิเคราะห์ความเป็นผลึก (Crystalline)

การวิเคราะห์ความเป็นผลึก พิจารณาจากความแหลมสูงของ และฐานแคบของพีค สารตัวอย่างมีลักษณะเป็นพีคแหลมสูงและฐานแคบจะมีความเป็นผลึกสูงกว่าสารตัวอย่างมีลักษณะเป็นพีคเตี้ยและฐานกว้าง

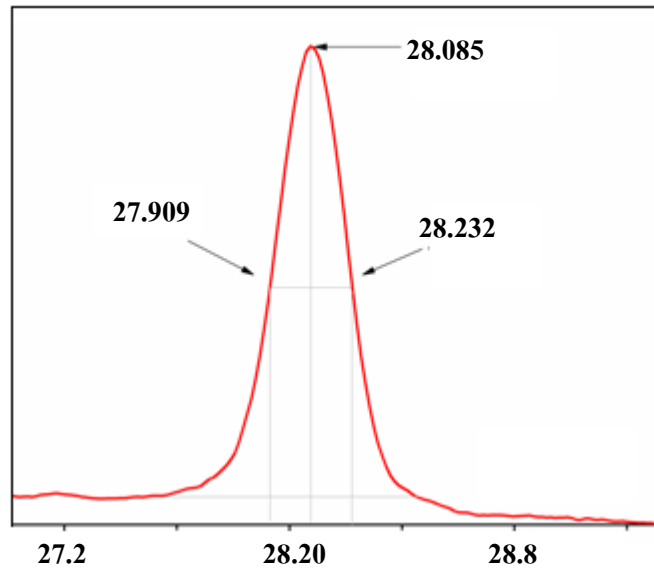
- การคำนวณหาขนาดของอนุภาค

การคำนวณขนาดของอนุภาคจากสมการของเชียร์เรอร์ (Sherrer's equation) ซึ่งอาศัยข้อมูลที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิลาที่สูงสุด ทั้งมุมการเลี้ยวเบน (θ) และความกว้างของกราฟการเลี้ยวเบนสำหรับการคำนวณ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ (5.5)

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \dots\dots\dots (5.5)$$

เมื่อ	D คือ	ขนาดของอนุภาค (nm)
	K คือ	ค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค ในทางทฤษฎีพิสูจน์ได้ว่า $0.89 \leq k \leq 1.39$
	λ คือ	ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่ใช้ (กรณี CuK มีค่าเท่ากับ 0.154065 nm)
	β คือ	ความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่งของฟิลาที่สูงที่สุด (Full Width at Half Maximum; FWHM)
	θ คือ	มุมการเลี้ยวเบน

ตัวอย่างที่ 5.1 จงคำนวณหาขนาดของอนุภาคของสารต่อไปนี้ เมื่อปรากฏว่ามีพีคหลักที่สูงที่สุด ดังแสดงในภาพ



วิธีทำ

จากสมการ
$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta}$$

เมื่อ
$$\beta = 2\theta_{high} - 2\theta_{low}$$

$$\beta = 28.232 - 27.909$$

$$\beta = 0.323 \text{ องศา}$$

เปลี่ยนหน่วยเป็นเรเดียน
$$= \frac{0.323\pi}{180} = 5.655 \times 10^{-3} \text{ เรเดียน}$$

จากค่า $2\theta = 28.085$ เพราะฉะนั้น
$$\theta = \frac{28.085}{2} = 14.0425$$

แทนค่าลงในสมการ
$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta}$$

$$D = \frac{(0.89)(0.1541)}{(5.655 \times 10^{-3}) \cos(14.0425)}$$

$$D = 24.97 \text{ nm}$$

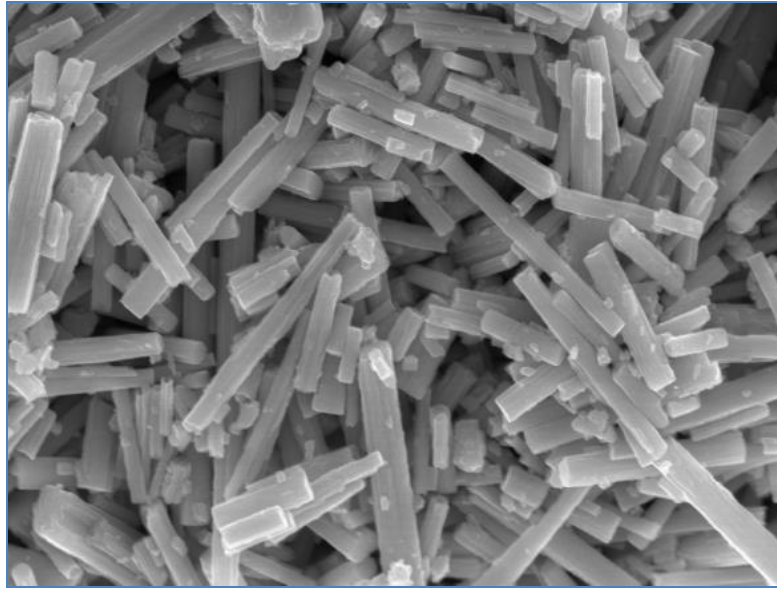
ตอบ

5.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ใช้ศึกษาลักษณะโครงสร้างของพื้นผิวของตัวอย่าง โดยจะให้ภาพแบบสามมิติ (Stereographic image) โดยทั่วไปกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา (Optical microscope) มีความสามารถในการแจกแจงรายละเอียด (Resolution) 0.2 ไมโครเมตร และมีกำลังขยายสูงสุดน้อยกว่า 2,000 เท่า ด้วยขีดจำกัดของความสามารถในการแจกแจงและกำลังขยาย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscope) จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญ ซึ่งมีอยู่ 2 ชนิดคือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยเฉพาะ SEM สามารถใช้ศึกษาตัวอย่างได้กว้างกว่า ครอบคลุมตัวอย่างที่มีขนาดได้ตั้งแต่ 1 เซนติเมตร จนถึง 100 นาโนเมตร

โครงสร้างพื้นฐานและองค์ประกอบที่ทำให้เกิดภาพจาก SEM จะคล้ายกับกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา (Microscope) แต่กลไกการทำงานจะแตกต่างกัน กล้อง SEM มีแหล่งกำเนิดแสงเป็นอิเล็กตรอน (Electron gun) ที่ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าในสุญญากาศ เพื่อให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงและมีพฤติกรรมคล้ายคลื่นแสง สามารถบังคับให้คลื่นอิเล็กตรอนมีขนาดความยาวคลื่นที่สั้นมากๆ ได้ เช่น ถ้าใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอน 20 กิโลโวลต์ จะได้ลำแสงอิเล็กตรอนที่มีความยาวคลื่นประมาณ 0.08 อังสตรอม เป็นต้น เลนส์รวมแสง (Condenser lens) และเลนส์ใกล้วัตถุ เป็นระบบเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) ซึ่งควบคุมโดยระบบไฟฟ้า ทำหน้าที่ในการบีบลำแสงอิเล็กตรอนให้เป็นรูปกรวย (Electron probe) ที่เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ให้โฟกัสลงบนผิวตัวอย่าง จากนั้นลำแสงรูปกรวยจะถูกบังคับด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าชุดควบคุมการส่องกราด (Scanning coil) ให้เคลื่อนไปบนผิวชิ้นตัวอย่าง ในแนวแกนนอนและแนวแกนตั้ง เมื่อลำแสงรูปกรวยเคลื่อนไปบนผิวตัวอย่าง จะถูกตรวจจับโดยอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณ (Collector and scintillator) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วผ่านไปตามท่อนำแสง (Light pipe) ไปยังเครื่องขยายแสง (Photomultiplier tube) ส่งต่อไปยังหลอดภาพ ปรากฏเป็นสัญญาณภาพขึ้นบนจอรับภาพ (Cathode ray tube, CRT) ลำแสงที่กราดเป็นเส้นบนจอรับภาพจะเคลื่อนไปในทิศทาง และเวลาเดียวกับลำแสงอิเล็กตรอนที่ส่องกราดไปบนผิวตัวอย่าง ซึ่งถูกควบคุมด้วย

ระบบไฟฟ้า โดยกำลังขยายของ SEM ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างขนาดความกว้างของเส้นส่องกราดบนจอรับภาพ (L) กับขนาดความกว้างของเส้นส่องกราดบนพื้นผิวตัวอย่าง (I) ภาพ 5.15 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของทังสเตนออกไซด์ (WO_3) ที่มีลักษณะเป็นรูปแท่งขนาดนาโน (nanorod)

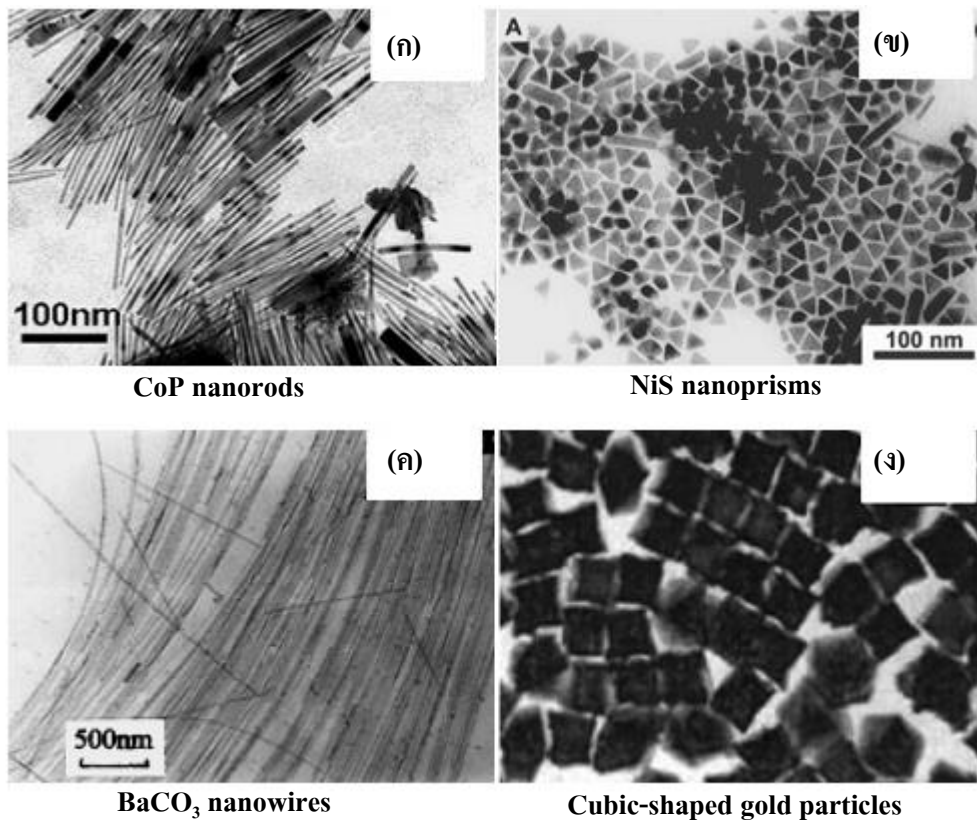


ภาพ 5.15 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของแท่งนาโนทังสเตนออกไซด์ (ปีณทิตา, 2556)

5.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscopes, TEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างบางชนิดซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอิเล็กตรอนผ่านได้ การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านใช้สำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ เป็นต้น ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก

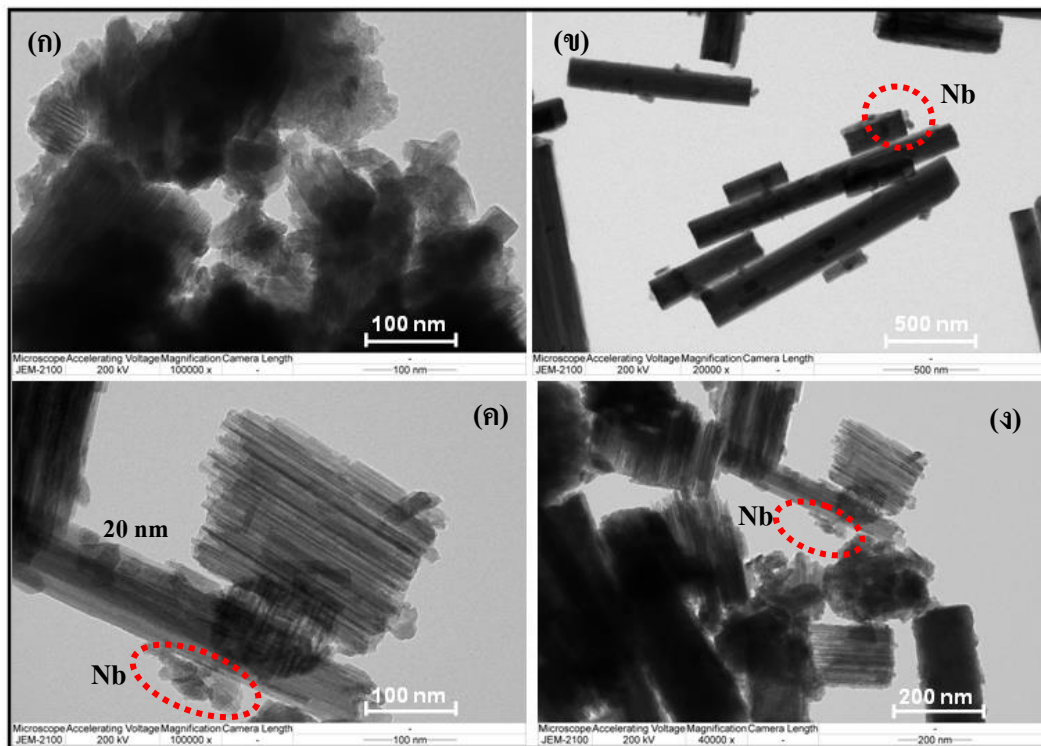
การเกิดภาพเกิดจากการใช้ลำแสงอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งจากขั้วแคโทดที่ได้รับความร้อนในสถานะสุญญากาศ ผ่านไปยังระบบคอนเดนเซอร์ (Condenser system) ซึ่งประกอบด้วยขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic coils) 4 ชุด โดยขดลวดชุดแรกทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนผ่านไปยังด้านล่างของชิ้นตัวอย่าง ชุดที่สองทำหน้าที่เสมือนเลนส์ใกล้วัตถุเพื่อรวบรวมอิเล็กตรอนให้ผ่านหรือกระจายอยู่รอบๆ ชิ้นตัวอย่าง จากนั้นอิเล็กตรอนจะผ่านไปยังขดลวดชุดที่สามทำหน้าที่ในการขยายภาพ โดยภาพเกิดขึ้นจากการที่อิเล็กตรอนผ่านไปยังชิ้นตัวอย่างและมีการโฟกัสภาพไปยังจอร์รับภาพ และขดลวดชุดสุดท้ายจะทำหน้าที่เสมือนเลนส์ใกล้ตา ซึ่งภาพที่ได้สามารถบันทึกลงบนแผ่นฟิล์ม หรือทำการแปลงสัญญาณภาพลงสู่จอคอมพิวเตอร์ได้ ซึ่งภาพที่ได้เรียกว่า Electron micrograph (EM)



ภาพ 5.16 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (ก) CoP nanorods (ข) NiS nanoprisms (ค) BaCO₃ nanowires และ (ง) Cubic-shaped gold particles (Franssila, 2004)

ภาพที่ได้จากกล้อง TEM จะให้ภาพลักษณะ 2 มิติ ซึ่งสามารถระบุลักษณะรูปร่างได้ว่าเป็นแบบใด ดังแสดงตัวอย่างในภาพ 5.16

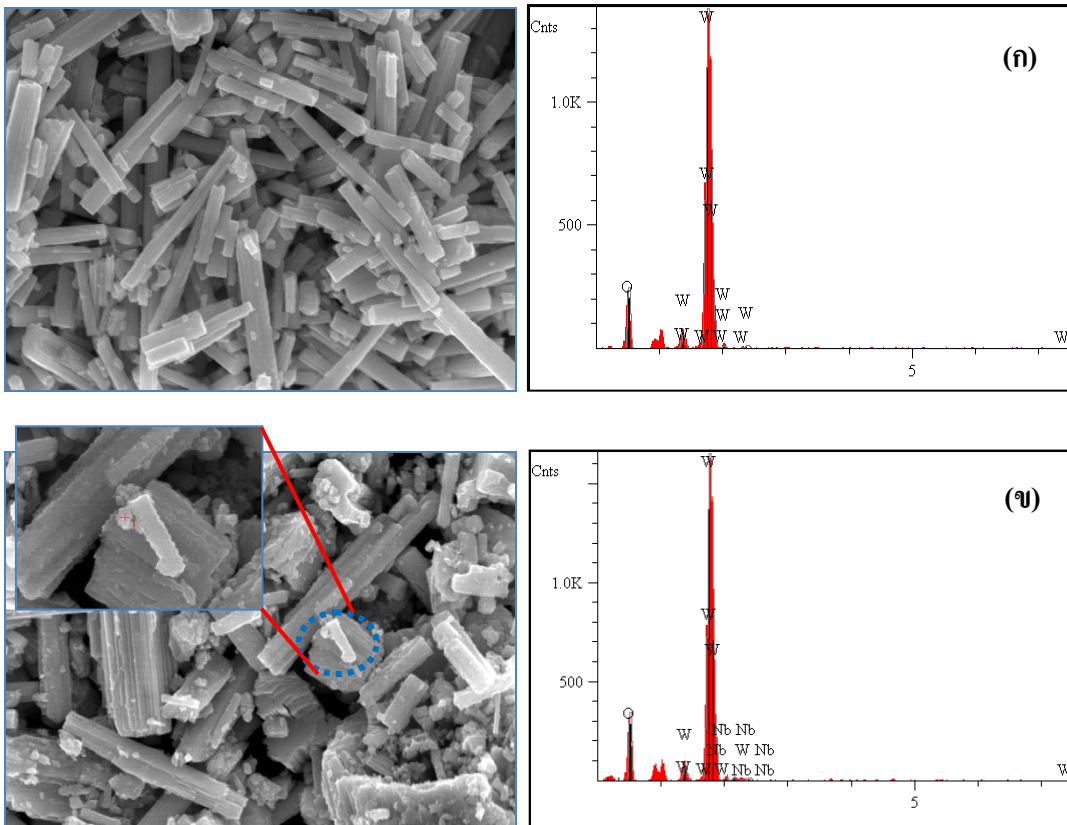
นอกจากนี้ภาพที่ได้จาก TEM ยังสามารถบอกลักษณะการเกาะตัวของอนุภาคของสารที่เจือลงไปในอนุภาคหลัก ดังภาพ 5.17 แสดงอนุภาคทังสเตนออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมที่ความเข้มข้น 1.00 เปอร์เซ็นต์ โดยมวล ณ กำลังขยาย $\times 20000$, $\times 100000$ และ $\times 40000$ ตามลำดับ จะเห็นได้ชัดเจนว่ามีลักษณะของอนุภาคที่แตกต่างกัน คือ เป็นรูปแท่ง และอนุภาคที่เกาะอยู่ที่ผิว ซึ่งสามารถคาดได้ว่าอนุภาคที่เป็นรูปแท่งน่าจะเป็นอนุภาคทังสเตนออกไซด์ และอนุภาคที่เกาะอยู่ที่ผิวน่าจะเป็นไนโอเบียมที่เจือลงไป ทั้งนี้ควรใช้เทคนิค EDS เพื่อยืนยันผลที่แน่ชัด



ภาพ 5.17 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (ก) ทังสเตนออกไซด์ (ข-ง) อนุภาคทังสเตนออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมที่ความเข้มข้น 1.00 เปอร์เซ็นต์ โดยมวล ณ กำลังขยาย $\times 20000$, $\times 100000$ และ $\times 40000$ ตามลำดับ (Franssila, 2004)

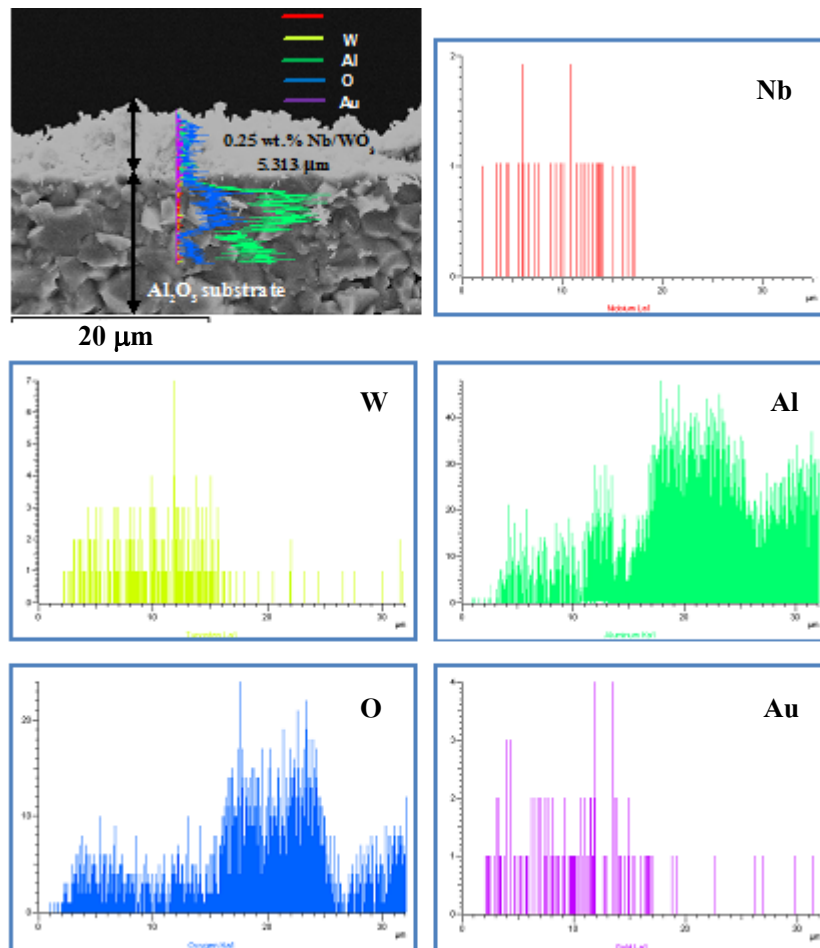
5.6 เครื่องวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (Energy dispersive spectrometer, EDS)

เครื่องวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ ใช้ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุในของแข็งและของเหลว โดยการฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ ซึ่งสามารถแสดงผลได้หลายลักษณะ ดังนี้ คือ การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์แบบสเปกตรัม (EDS-spectrum mode) การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์แบบเส้น (EDS-line spectrum mode) และการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์แบบกลุ่มจุด (EDS-dot mapping mode)



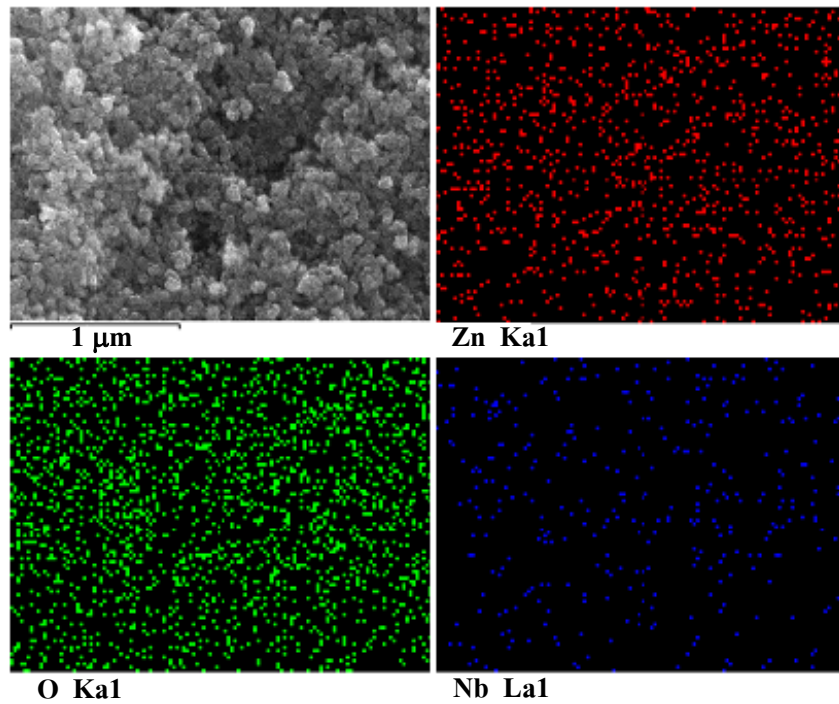
ภาพ 5.18 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์แบบสเปกตรัม (EDS-spectrum) (ก) อนุภาคทังสเตนออกไซด์ (ข) อนุภาคทังสเตนออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียม (ปัทมา, 2556)

ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ภาพ (ก) และ(ข) แสดงสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ จากเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ เพื่อยืนยันการมีอยู่จริงของไนโอเบียม เมื่อเจือไนโอเบียมลงในทังสเตนออกไซด์ แสดงในภาพ 5.18



ภาพ 5.19 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์แบบเส้น (EDS-line spectrum) ของฟิล์มทังสเตนออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียม (ปัทมาธิตา, 2556)

ภาพ 5.19 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์แบบเส้น เพื่อวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของชั้นฟิล์มทังสเตนออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียม ภายหลังจากการเตรียมด้วยวิธีการหมุนเหวี่ยงบนชั้นอลูมินาที่ทำขี้ไฟฟ้าด้วยทอง (Au) ตามภาคตัดขวาง



ภาพ 5.20 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์แบบแบบกลุ่มจุด (EDS-dot mapping mode) ของฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียม (มณฑิรา, 2555)

ภาพ 5.20 แสดงกลุ่มจุดอิเล็กตรอนที่ได้จากเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์แบบกลุ่มจุดเพื่อวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียม ซึ่งงานที่ต้องการตรวจสอบเมื่อถูกฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ จะทำให้ชิ้นงานปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ ที่มีลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละธาตุออกมา จากนั้นตัวรับพลังงาน (Energy-dispersive

detector) จะตรวจสอบสเปกตรัมของรังสีที่ถูกปล่อยออกมา ซึ่งธาตุแต่ละธาตุในสารตัวอย่างจะมีลักษณะเฉพาะตัวของพลังงานของรังสีที่ปล่อยออกมา เมื่อรังสีเอ็กซ์กระทบชิ้นงานจะเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนชั้นใน เนื่องจากรังสีเอ็กซ์มีพลังงานมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะถูกคลื่นพลังงาน และหลุดออกไปจากอะตอม ทำให้เกิดที่ว่างในวงโคจร จากนั้นอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าจะเข้ามาแทนที่ การเข้ามาแทนที่ของอิเล็กตรอนวงนอกนี้ เรียกว่า Relaxation โดยจะปล่อยพลังงานที่มีลักษณะเฉพาะออกมา เมื่อพลังงานที่ถูกปล่อยออกมาจากการลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าหลุดออกไปได้อีก เรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้ว่า Auger electron

5.7 เครื่องวัดพื้นที่ผิว (Surface area analyzer, SAA)

5.7.1 หลักการเบื้องต้นของวิธีบีอีที

พื้นที่ผิวของสาร (Surface area) เป็นสมบัติทางกายภาพที่มีความสำคัญเพื่อใช้ประกอบการพิจารณาสำหรับการนำสารนั้นไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีคุณภาพตามที่ต้องการ การวัดพื้นที่ผิวของสารที่มีความพรุนทำได้โดยการศึกษาการดูดซับแก๊สไนโตรเจน (N_2) หรือแก๊สอื่นที่มีขนาดเล็ก เช่น แก๊สอาร์กอน โดยใช้ประโยชน์จากการดูดซับทางกายภาพ หรือเรียกว่า บรูน่าวัวร์ เอ็มเมทท์ และเทลเลอร์; บีอีที (Brunauer, S., Emmett, P.H., and Teller, E.; BET) ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวหรืออาร์กอนเหลว ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับ โดยจำนวนโมเลกุลที่ใช้เพื่อเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว จะทำให้สามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวภายในได้ การดูดซับแก๊สไนโตรเจน ดังแสดงในภาพ 5.21 จะเกิดได้เร็วในช่วงแรกโดยจะเพิ่มตามความดัน จนกระทั่งถึงจุดเปลี่ยนแปลง (ตำแหน่ง B) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เส้นกราฟเริ่มจะคงที่ในแนวราบ อันแสดงถึงปรากฏการณ์ที่การดูดซับบนพื้นผิวเป็นแบบชั้นเดียว จะเกิดการควบแน่นของไนโตรเจนเหลวในรูพรุน ทำให้ปริมาตรของการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

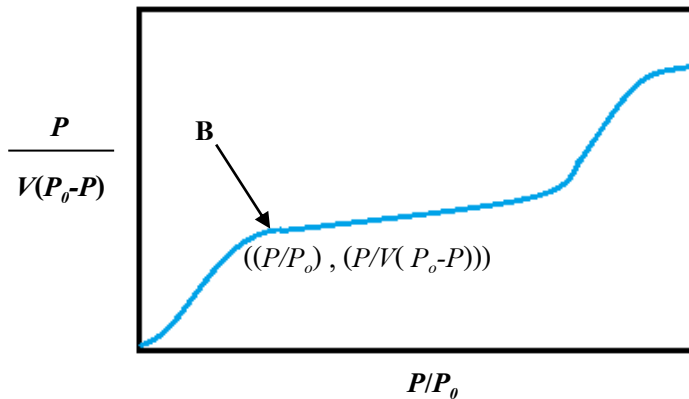
สมการที่แสดงความสัมพันธ์ของปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดันย่อยต่างๆ และปริมาตรที่ถูกดูดซับแล้วเกิดเป็นการดูดซับชั้นเดียว คือสมการของบีอีที ดังแสดงในสมการ 5.6

$$\frac{P}{V(P_o - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C P_o} \dots\dots\dots (5.6)$$

เมื่อ	P	คือ	ความดันย่อยของแก๊สในโตรเจน
	P_o	คือ	ความดันอิ่มตัวของแก๊สในโตรเจน ณ อุณหภูมิที่ศึกษา
	V	คือ	ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดัน P
	V_m	คือ	ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ทำให้เกิดการปกคลุมชั้นเดียว
	C	คือ	ค่าคงที่

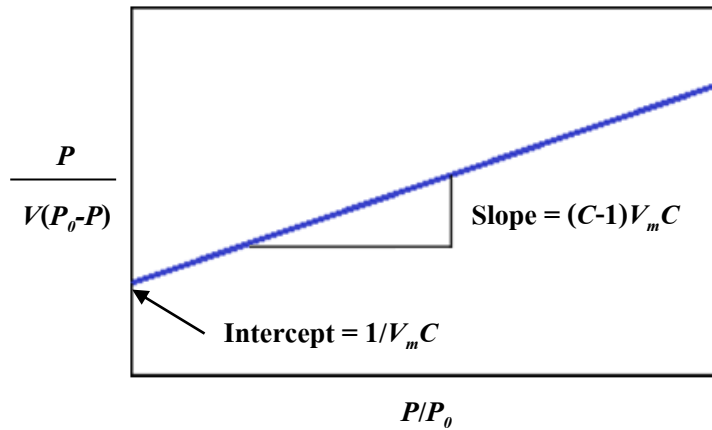
ในรูปของกราฟเส้นตรง $Y = a + bX$ จะพบว่าเมื่อให้

X	คือ	P/P_o
Y	คือ	$P/V(P_o - P)$
a	คือ	$1/V_m C$
b	คือ	$(C-1)/V_m C$



ภาพ 5.21 กราฟการวัดพื้นที่ผิวโดยวิธีการดูดซับของแก๊สด้วย BET (ศรีโฉล, 2543)

จากนั้นเขียนกราฟที่ได้จากการคำนวณในรูปเส้นตรงของสมการบีอีที จะได้กราฟดังแสดงในภาพ 5.22



ภาพ 5.22 กราฟที่ได้จากการคำนวณในรูปแบบเส้นตรงของสมการ BET (ศรีโฉล, 2543)

5.7.2 การคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะของสาร

จากสมการของบีอีที่สามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะของสาร (Specific surface area, SSA_{BET}) ได้ โดยนำค่าปริมาตรของแก๊สใน โตรเจนที่ใช้ในการคลุมผิวของสาร หรือค่า V_m ที่ได้ จากสมการ 5.5 สำหรับคำนวณหาจำนวนโมเลกุลของแก๊สใน โตรเจนที่ถูกดูดซับในสภาพ 1 ชั้นโมเลกุล แล้วคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะโดยใช้สมการ 5.7

$$SSA_{BET} = \frac{NA \cdot a_{max} \cdot S_0}{W} \dots\dots\dots (5.7)$$

โดยที่	SSA_{BET}	คือ	พื้นที่ผิวจำเพาะของสาร (m^2/g)
	NA	คือ	เลขอาโวกาโดร (Avogadro's number) มีค่าเท่ากับ 6.02×10^{23}
	a_{max}	คือ	จำนวน โมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับใน สภาพ 1 ชั้นโมเลกุล มีเท่ากับ $V_m/22414$
	S_0	คือ	พื้นที่ผิวหน้าตัดของ โมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ มีค่าเท่ากับ $1.62 \times 10^{-20} m^2$
	W	คือ	น้ำหนักของสารหรือตัวดูดซับ (g)

5.7.3 การคำนวณหาขนาดของอนุภาค

จากค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของสารที่คำนวณได้ สามารถนำค่าที่ได้คำนวณหาขนาดของอนุภาค (Diameter particles, d_{BET}) จากสมการ 5.8

$$d_{BET} = \frac{6}{(\rho_{Support} \times SSA_{BET} \times wt.\% Support) + (\rho_{Dope} \times SSA_{BET} \times wt.\% Dope)} \dots\dots\dots (5.8)$$

เมื่อ	d_{BET}	คือ	ขนาดอนุภาค (d_{BET} , nm)
	$\rho_{Support}$	คือ	ความหนาแน่นของสารตัวหลักที่เตรียม (g/cm^3)
	ρ_{Dope}	คือ	ความหนาแน่นของสารที่เจือ (g/cm^3)
	SSA_{BET}	คือ	ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)
	wt.%	คือ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตัวอย่างที่ 5.2 จงคำนวณหาขนาดของอนุภาคทังสเตนออกไซด์ (WO_3) ที่เจือด้วยไนโอเบียม (Nb) 1.00 wt.% ใช้วิธีบีอีที เมื่อความหนาแน่นของทังสเตนออกไซด์ (WO_3) เท่ากับ $7.16 g/cm^3$ ความหนาแน่นของไนโอเบียม (Nb) เท่ากับ $8.57 g/cm^3$ และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าเท่ากับ $12.38 m^2/g$

วิธีทำ

$$d_{BET} = \frac{6}{(\rho_{Support} \times SSA_{BET} \times wt.\% Support) + (\rho_{Dope} \times SSA_{BET} \times wt.\% Dope)}$$

$$d_{BET} = \frac{6}{[(7.16 \frac{g}{cm^3}) \times (12.38 \frac{m^2}{g}) \times (\frac{99}{100})] + [(8.57 \frac{g}{cm^3}) \times (12.38 \frac{m^2}{g}) \times (\frac{1}{100})]}$$

$$d_{BET} = \frac{6}{[(7.16 \frac{g}{cm^3}) \times (12.38 \frac{m^2}{g}) \times (0.99)] + [(8.57 \frac{g}{cm^3}) \times (12.38 \frac{m^2}{g}) \times (0.01)]}$$

$$d_{BET} = 0.06772 \frac{cm^3}{m^2} \times \frac{10^{-6} m^3}{cm^3}$$

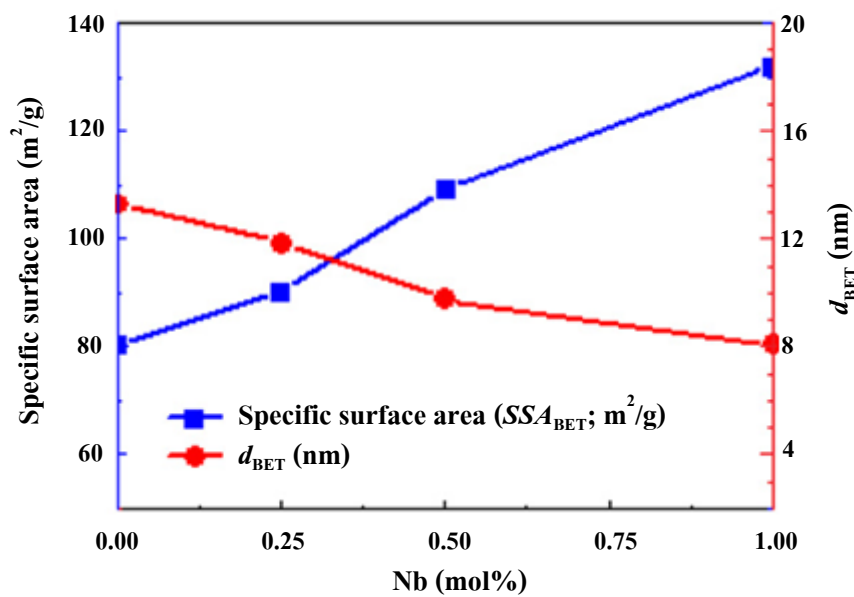
$$d_{BET} = 0.06772 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$d_{BET} = 0.06772 \times 10^{-6} \times 10^{-3} \text{ nm}$$

$$d_{BET} = 67.72 \text{ nm}$$

ตอบ

ตัวอย่างค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (SSA_{BET}) และขนาดของอนุภาค (d_{BET}) ของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียม ที่ความเข้มข้นของการเจือไนโอเบียม 0-1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล แสดงในภาพ 5.23 จากภาพพบว่าเมื่อเจือไนโอเบียมลงในซิงก์ออกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจาก 0.25-1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ทำให้ค่าพื้นที่ผิวของอนุภาคที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเจือไนโอเบียมที่มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าขนาดของอนุภาคที่เล็กลง



ภาพ 5.23 กราฟแสดงค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และขนาดของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมที่ได้จากการวิเคราะห์จากทฤษฎีของบีอีที (Kruefu et al., 2011)

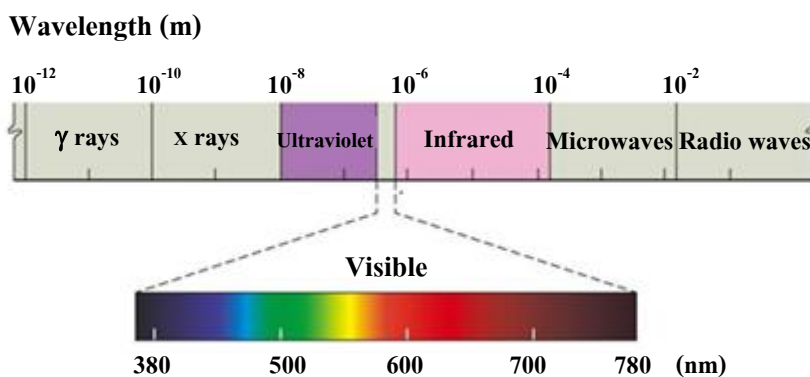
5.8 เครื่องมือ วิสียูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer, UV-Vis)

UV-Vis เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์สารได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยการศึกษาศามารถของสารในการดูดกลืนแสงหรือรังสีในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet, UV) และช่วงแสงที่มองเห็นได้หรือแสงขาว (Visible light) เทคนิคนี้สามารถใช้ทดสอบตัวอย่างได้ทั้งสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ ที่ให้ผลได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ และมีความไวสูง

UV-Vis spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต และช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืน ความยาวคลื่นแสงที่ตัวอย่างดูดกลืน จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณ และชนิดของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ในปัจจุบันเครื่องมือนี้ได้รับการพัฒนาให้มีขนาดที่เล็กลง มีความไวมากขึ้น ให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง แม่นยำมากยิ่งขึ้น รวมไปถึงมีการพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ควบคุมกับเครื่องมือในการวิเคราะห์ และการเชื่อมต่อกับเทคนิคอื่นๆ ทำให้สามารถใช้งานได้กว้างขึ้น

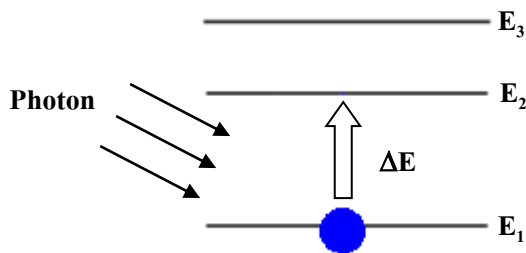
UV-Vis Spectrum เป็นแถบสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีค่าตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่นสั้น รังสีแกมมาและรังสีเอ็กซ์ ไปจนถึงช่วงความยาวคลื่นยาว คลื่นไมโครเวฟและคลื่นวิทยุ สำหรับรังสีอัลตราไวโอเล็ตและแสงขาว เป็นเพียงช่วงความยาวคลื่นหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีความยาวคลื่นประมาณ 190-800 นาโนเมตร ภาพ 5.24 แสดงแถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เทคนิค UV- Vis spectroscopy เป็นเทคนิคในการวัดสมบัติในการดูดกลืนแสงของสาร เมื่อ โมเลกุลของสารตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสม จะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ส่องผ่านหรือสะท้อนออกมาจากตัวอย่าง เทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสงตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert) ดังนั้นจึงสามารถระบุชนิดและปริมาณของสารที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้



ภาพ 5.24 แถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (พรณทิพย์, 2551)

การดูดกลืนแสงของโมเลกุลหรือสารประกอบเชิงซ้อนในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต ความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงสูงสุดจะมีค่าจำเพาะซึ่งนำมาประยุกต์ใช้สำหรับงานด้าน ปริมาณวิเคราะห์ได้ โดยปกติอะตอมหรือโมเลกุลหรือสารประกอบเชิงซ้อนที่อยู่ ณ สถานะพื้น (Ground state) จะเป็นสถานะที่เสถียรที่สุดเมื่อได้รับแสงที่มีความยาวคลื่นที่เหมาะสม อะตอม หรือ โมเลกุลหรือสารประกอบเชิงซ้อนจะดูดกลืนแสงแล้วมีพลังงานสูงขึ้น เกิดการ เปลี่ยนแปลงระดับพลังงาน (ΔE) ดังแสดงในสมการ 5.9 จากสถานะพื้นไปสู่ระดับพลังงานที่ สูงกว่าที่เรียกว่า สถานะกระตุ้น (Excited state) แสดงในภาพ 5.25



ภาพ 5.25 การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนภายใน โมเลกุล (ศรีโฉล, 2543)

$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda} = h\nu \dots\dots\dots (5.9)$$

- โดยที่ ΔE คือ ผลต่างของระดับพลังงานของสถานะกระตุ้นกับสถานะพื้น
 h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant) มีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} J.s
 c คือ ความเร็วของแสง มีค่าเท่ากับ 3.00×10^8 m/s
 λ คือ ความยาวคลื่นของแสง (m)
 ν คือ ความถี่ของแสง (Hz)

ตัวอย่าง 5.3 พลังงานโฟตอนกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในวัสดุกึ่งตัวนำทินออกไซด์ (SnO₂) กระโดดจากสถานะพื้นซึ่งมีค่าพลังงาน เท่ากับ 1.38 อิเล็กตรอน โวลต์ ขึ้นไปยังแถบคอนดักชันที่มีค่าพลังงาน เท่ากับ 3.54 อิเล็กตรอน โวลต์ จงคำนวณหาความยาวคลื่นของโฟตอนนี้ พร้อมทั้งบอกว่าเป็นแสงสีอะไร

วิธีทำ

$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E}$$

$$\lambda = \frac{(6.626 \times 10^{-34})(3 \times 10^8)}{\Delta E}$$

เมื่อ $\Delta E = E_2 - E_1$

$$\Delta E = 3.54 - 1.38 = 2.16 \text{ eV}$$

แทนค่า

$$\lambda = \frac{(6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s})(3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})}{2.16 \text{ eV}}$$

$$\lambda = \frac{(6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s})(3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})}{(2.16)(1.6 \times 10^{-19}) \text{ J}}$$

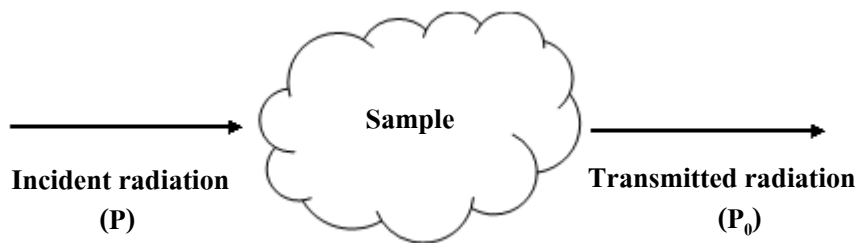
$$\lambda = 5.752 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$\lambda = 575.2 \text{ nm}$$

ความยาวคลื่น 575.2 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ ซึ่งตรงกับแสงสีเหลืองในสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ตอบ

แสงที่ได้จากแหล่งกำเนิดแสงมีความยาวคลื่น ดังนั้นจึงต้องเลือกคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นเหมาะสมที่มีค่าเฉพาะ (Monochromatic light) เพื่อฉายแสงที่มีความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic) นี้ ผ่านเข้าไปในสารละลาย แสงบางส่วนจะถูกดูดกลืนไว้ และบางส่วนทะลุผ่านออกมา ซึ่งสามารถตรวจวัดได้โดยใช้ตัวตรวจวัด (Detector) ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาปริมาณของแสงที่ถูกดูดกลืนได้ ดังแสดงในภาพ 5.26



ภาพ 5.26 กระบวนการการดูดกลืนแสง แสงตกกระทบ มีพลังงานเท่ากับ (P) ถูกดูดกลืนโดยสารทำให้แสงที่ผ่านออกมามีพลังงานลดลง (P₀) (พรหมทิพย์, 2551)

ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต ดังนี้

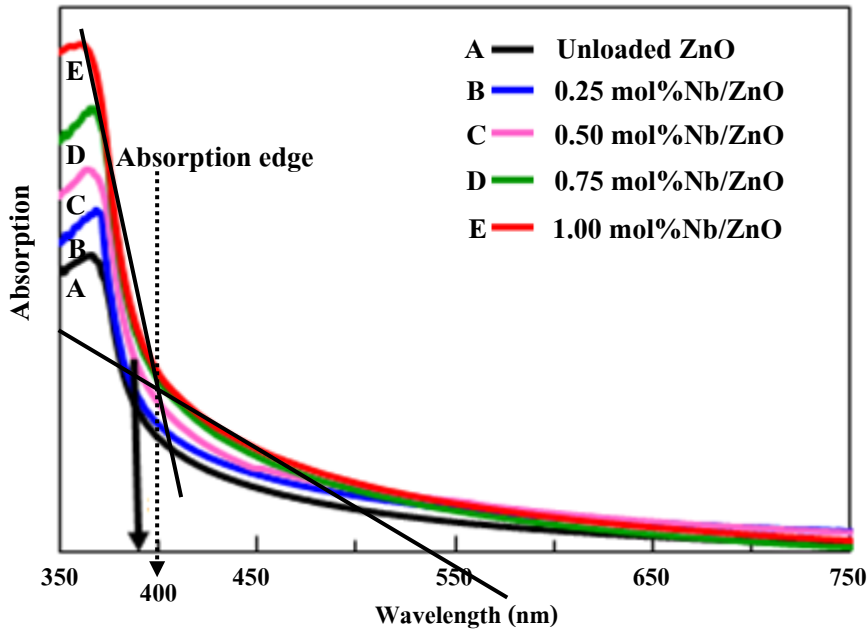
$$A = \log(P_0 / P) \dots\dots\dots (5.10)$$

หรือ $A = \epsilon bc \dots\dots\dots (5.11)$

- โดยที่
- ϵ คือ ค่าสภาพการดูดกลืนแสง (Molar absorptivity)
 - b คือ ความหนาของตัวอย่าง (cm)
 - c คือ ความเข้มข้นของสาร (mol/L)
 - A คือ ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)

จากสมการ 5.11 พบว่า ค่าการดูดกลืนแสง (A) เป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร ทั้งนี้เพราะว่าค่าสภาพการดูดกลืนแสง (ϵ) เป็นค่าคงที่ของสารแต่ละชนิด ดังนั้นจึงสามารถใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณของสารได้ โดยการเตรียมสารละลายมาตรฐานที่มีความ

เข้มข้นต่างๆ กัน นำไปทดสอบการดูดกลืนแสง (Absorbance) แล้วเขียนกราฟ ดังแสดงในภาพ 5.27



ภาพ 5.27 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ (ZnO) และซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียม (Nb-loaded ZnO) (Kruefu et al., 2011)

ตัวอย่าง 5.4 จากภาพ 5.27 พิจารณาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียม 1.00 เปอร์เซ็นต์ โดยโมล โดยการลากเส้นตัดเพื่อหาค่าแอบซอร์บชันเอดจ์ (Absorption edge) สำหรับพิจารณาความยาวคลื่นขณะเริ่มเกิดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง ซึ่งพบว่ามีค่าความยาวคลื่นอยู่ที่ประมาณ 400 นาโนเมตร จากข้อมูลนี้จึงคำนวณว่าสารตัวอย่างนี้ควรจะได้รับพลังงานแสงเท่าใดจึงจะสามารถเกิดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงนี้ได้ ในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ (eV)

วิธีทำ

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

$$E = \frac{(6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})}{400\text{nm}}$$

$$E = \frac{19.878 \times 10^{-26} \text{ J}\cdot\text{m}}{400\text{nm}}$$

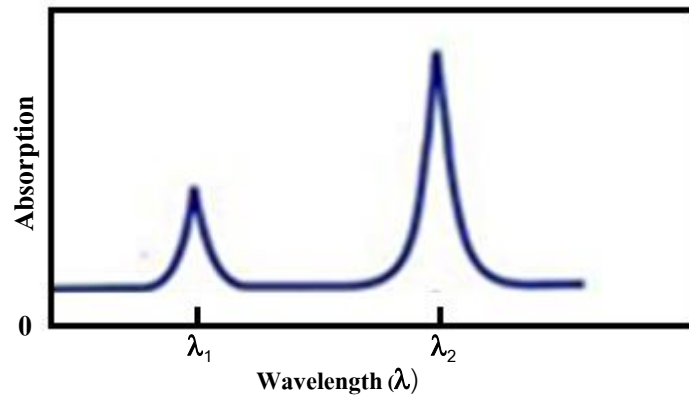
$$E = 4.9695 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$E = \frac{4.9695 \times 10^{-19}}{1.6 \times 10^{-19}} \text{ J}$$

$$E = 3.106 \text{ eV}$$

ตอบ

สเปกตรัมที่เกิดจากการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างด้วยเทคนิคนี้ จะแสดงสมบัติเฉพาะของสารนั้นๆ ดังแสดงในภาพ 5.28 ทำให้สามารถนำไปใช้วิเคราะห์สารชนิดต่างๆ ได้ สำหรับการวิเคราะห์สารในเชิงปริมาณด้วยเทคนิคนี้ ทำได้โดยใช้วิธีการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง และค่าความเข้มแสง ซึ่งจะสามารถหาปริมาณของสารที่จะวิเคราะห์ได้จากกราฟ



ภาพ 5.28 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง (พรหมทิพย์, 2551)

5.9 เครื่องโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์ (Photoluminescence spectrometer, PL)

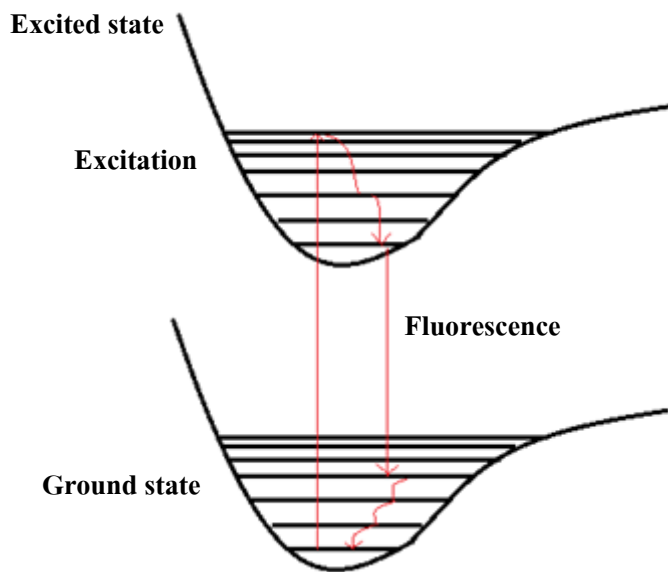
การเปล่งแสง (Luminescence) แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การวาวแสง หรือฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) และการเรืองแสง หรือฟอสฟอเรสเซนซ์ (Phosphorescence) การเปล่งแสงของสารบางชนิด สามารถใช้ในการตรวจสอบชนิดของสารนั้นๆ ได้ โฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (Luminescence spectroscopy, PL) เป็นเทคนิคที่สำคัญและใช้งานอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ทางเคมี เนื่องจากมีข้อดีดังนี้ คือ

- มีความจำเพาะสูง (High specificity) เนื่องจากสารประกอบฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence compound) แต่ละชนิดที่เปล่งแสงออกมามีลักษณะคงที่ ที่แต่ละความยาวคลื่นของแสงตกกระทบ แม้ว่าสารบางชนิดที่อาจรบกวนการเปล่งแสงของสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์สามารถเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ได้ แต่สารนั้นจะเปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่นอื่นที่ไม่ตรงกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้รูปแบบการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่มีลักษณะจำเพาะของสาร สารตัวอย่างแต่ละชนิดเพื่อการจำแนกชนิด (Identify) ของสารตัวอย่างได้

- การวิเคราะห์มีความไวสูง (High sensitivity) สามารถวิเคราะห์สารปริมาณน้อยได้ดีกว่าการวิเคราะห์ด้วยการวัดการดูดกลืนแสงได้มากกว่าถึง 1,000-500,000 เท่า โดยเครื่องวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์ขนาดเล็ก (Microfluorometer) สามารถวิเคราะห์สารได้น้อยถึง เฟมโตโมล (fmol หรือ 10^{-15})

- การวิเคราะห์ส่วนใหญ่ทำได้ง่าย รวดเร็ว และค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ต่ำ
- สามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง ทั้งในด้านการแพทย์ ในด้านอุตสาหกรรม ในด้านสิ่งแวดล้อม และในด้านเทคโนโลยีชีวภาพ เนื่องจากมีช่วงของการวิเคราะห์ที่กว้าง

การเกิดฟลูออเรสเซนซ์ของโมเลกุล แสดงดังภาพ 5.29



ภาพ 5.29 หลักการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ของวัสดุ (Ribes et al., 2000)

เมื่ออิเล็กตรอนภายในโมเลกุลมีการรับและปล่อยพลังงานออกมาจะเกิดฟลูออเรสเซนซ์ขึ้น เมื่อโมเลกุลที่มีพลังงานคงที่หรืออยู่ในสถานะพื้น ดูดกลืนรังสีจากการแผ่รังสีแล้วขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงานที่สูงขึ้นหรืออยู่ในสถานะกระตุ้น โมเลกุลจะสูญเสียพลังงานโดยการคายพลังงานในรูปของความร้อนที่เกิดจากการชนกันของโมเลกุล หลังจากสูญเสียพลังงานจากการชนกันแล้ว อิเล็กตรอนจะกลับคืนสู่สถานะพื้น โดยการคายพลังงานออกมาในรูปของแสง ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ฟลูออเรสเซนซ์ โดยปกติการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ของโมเลกุล จะเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นที่ยาวกว่าความยาวคลื่นในการดูดกลืนแสง การเลื่อนไปที่ความยาวคลื่นที่ยาวขึ้นนี้ เรียกว่า Stokes shift ดังนั้นพลังงานที่คายออกมาจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นใดจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารนั้นๆ

5.10 เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Infrared spectrophotometer, IR)

5.10.1 การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคทางอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared Spectroscopy, IR)

สเปกโทรสโกปี (Spectroscopy) หมายถึงเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นแถบพลังงาน (Spectrum) โดยมีความยาวคลื่นตั้งแต่ในช่วงของคลื่นวิทยุ คลื่นไมโครเวฟ คลื่นอินฟราเรด คลื่นในช่วงที่ตามองเห็น (Visible) ไปจนถึงคลื่นอัลตราไวโอเล็ต สำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงอินฟราเรด จะมีเลขคลื่นในช่วง $650-4,000$ เซนติเมตร⁻¹ (cm⁻¹) หรือมีความยาวคลื่นในช่วง 15.4-2.5 นาโนเมตร

อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared Spectroscopy, IR) เป็นหนึ่งใน Spectroscopic ทั่วๆ ไป ที่ใช้ในทางเคมีอินทรีย์ และเคมีอนินทรีย์ ซึ่งเมื่อแสงอินฟราเรดตกกระทบโมเลกุล สารจะเกิดแรงกระทำ (Interaction) ระหว่างแสงกับโมเลกุลสาร โดยที่แสงอินฟราเรดในบางช่วงที่มีความถี่ตรงกันกับความถี่ของการสั่นของพันธะในโมเลกุลของสารจะถูกดูดกลืนไป เรียกว่า เกิดเรโซแนนซ์ (Resonance) ดังนั้นความเข้มของแสงอินฟราเรดที่ทะลุผ่านสารตัวอย่าง (Transmitted Infrared) จึงมีความเข้มแสงลดลงในบางช่วงของความถี่ทั้งหมดของอินฟราเรด

อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี สามารถแยกเป็น 2 ประเภท คือ Dispersive Infrared Spectroscopy (DIS) และ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) โดยในบทนี้จะกล่าวถึงเฉพาะ FTIR เพราะเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพมากกว่า

5.10.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy

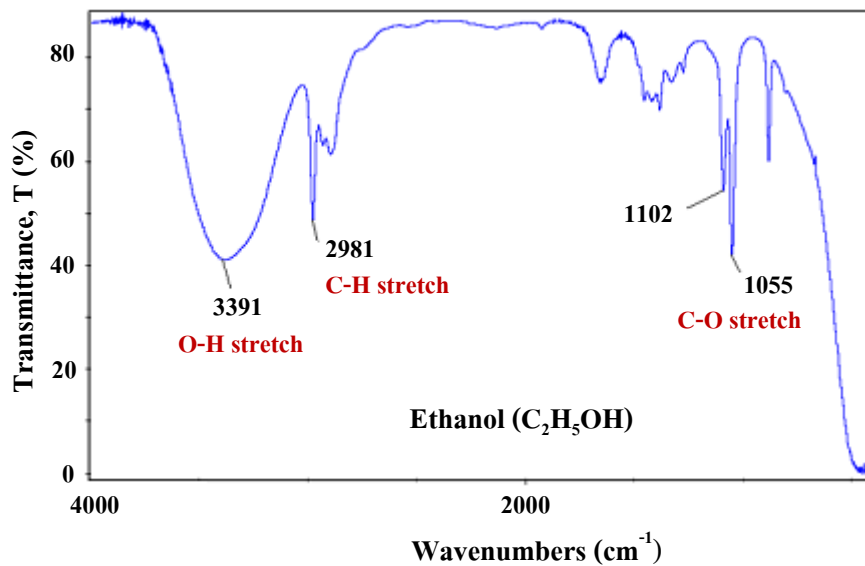
Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เป็นเทคนิคสำหรับการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส FTIR ได้เข้ามาแทนที่ Dispersive Infrared Spectrometer เพื่อใช้ในงานที่ต้องการความรวดเร็ว และความไวสูง นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์สารในช่วงที่ Dispersive Infrared Spectrometer ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ หรือวิเคราะห์ได้ยาก

IR และ FTIR ใช้ในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ทุกประเภท และสารประกอบอนินทรีย์บางประเภท รวมถึงหมู่ฟังก์ชันในสารตัวอย่าง เช่น อินทรีย์วัตถุ สี โลหะ โพลีเมอร์ พลาสติก เรซิน สารเคลือบ ยา ยาฆ่าแมลง หรือสารปนเปื้อน เป็นต้น โดยทำการจับคู่สเปกตรัม

ของสารประกอบที่ต้องการเข้ากับสเปกตรัมอ้างอิง IR และ FTIR ยังใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างและลักษณะทางสัณฐานของไอโซเมอร์ ใช้ในการบ่งบอกองค์ประกอบของสารที่เกิดปฏิกิริยา หรือใช้ในการศึกษาการเคลื่อนไหวของปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังใช้ในการตรวจสอบปริมาณของสารผสม สารที่ไม่บริสุทธิ์ หรือสารที่เติมเข้าไปในปริมาณ 0.001-1 เปอร์เซ็นต์

5.10.3 ตัวอย่างสเปกตรัมอินฟราเรด

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงอินฟราเรดที่ทะลุผ่านสารตัวอย่างกับความถี่หรือเลขคลื่น (Wavenumber) ซึ่งเลขคลื่นมีค่าเท่ากับส่วนกลับของความถี่ของแสง ยกตัวอย่างสเปกตรัมอินฟราเรดของเอทานอล ดังแสดงในภาพ 5.30

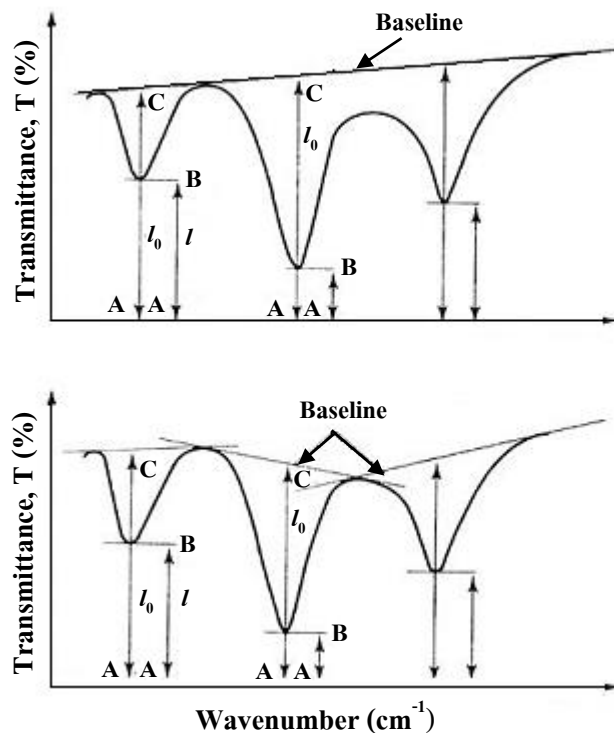


ภาพ 5.30 สเปกตรัมของเอทานอล (University of Colorado at Boulder, 2009)

จากภาพ 5.30 ปรากฏพีกที่แสดงถึงการดูดกลืนแสงในช่วงความถี่ต่างๆ ที่มีความสูงของพีก หรือปริมาณแสงที่ทะลุผ่านสารตัวอย่างที่หลากหลาย และเป็นจำนวนหลายพีก ทั้งนี้เนื่องจากในโมเลกุลของสารอินทรีย์จะมีพันธะมากกว่า 1 พันธะ และแต่ละพันธะจะมีการสั่น (Vibration) ในความถี่ที่แตกต่างกัน และมีรูปแบบของการสั่นได้หลากหลายรูปแบบ

5.10.4 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative analysis)

เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี นอกจากจะใช้ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพเพื่อตรวจสอบ หมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของสาร และวิเคราะห์โครงสร้างเคมีของสารในเบื้องต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการวิเคราะห์สารในเชิงปริมาณได้ เช่น การหาปริมาณหมู่แทนที่ การหาสัดส่วนหรือองค์ประกอบของสาร และการหาปริมาณความเป็นผลึก เป็นต้น



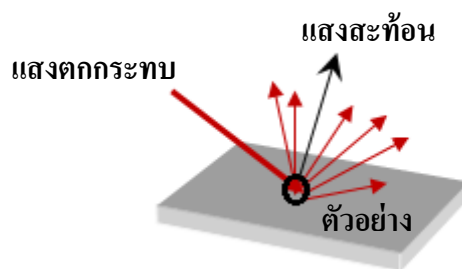
ภาพ 5.31 ตัวอย่างการลากเส้น Base line เพื่อการคำนวณ และการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (University of Colorado at Boulder, 2009)

หลักการพื้นฐานของการวิเคราะห์เชิงปริมาณคือการอาศัยความสูงของพีค ซึ่งจะสัมพันธ์กับปริมาณหมู่ฟังก์ชันในสารที่สนใจ โดยอธิบายได้จากสมการตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต ดังแสดงในสมการที่ 5.8 และ 5.9

ข้อสำคัญในการใช้ข้อมูลจากสเปกตรัมอินฟราเรด เพื่อวิเคราะห์พอลิเมอร์ในเชิงปริมาณนั้นคือการลากเส้น Base line เพื่อกำหนดระยะความสูงของพีคที่จะวัดและนำไปคำนวณ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการลากเส้นดังกล่าวสามารถกำหนดได้หลายรูปแบบ (ถูกต้องทุกวิธี ข้อสำคัญคือต้องใช้มาตรฐานเดียวกันตลอดในการลากเส้น สำหรับงานเดียวกัน) ดังตัวอย่างที่แสดงในภาพ 5.31

5.11 เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman spectrometer)

รามาน (Raman) เป็นปรากฏการณ์ในการกระเจิงของแสงรูปแบบหนึ่ง ที่เกิดจากการที่แสงตกกระทบวัตถุ และส่งผลทำให้โมเลกุลของสารถูกกระตุ้นให้อยู่ในสถานะกระตุ้น (ถ้าพิจารณาในระดับโมเลกุล คือ การที่พันธะระหว่างอะตอมในโมเลกุลถูกทำให้มีสภาพขั้วหรือ Polarizability เปลี่ยนแปลงไป) และเมื่อ โมเลกุลที่ถูกกระตุ้นพยายามที่จะกลับคืนสู่สถานะปกติ ซึ่งมีพลังงานต่ำกว่า โดยไม่มีโมเมนต์แม่เหล็ก (Dipole moment) ในพันธะเคมี ก็จะทำให้เกิดการกระเจิงแสง (Scattered light) ออกมา ดังแสดงในภาพ 5.32

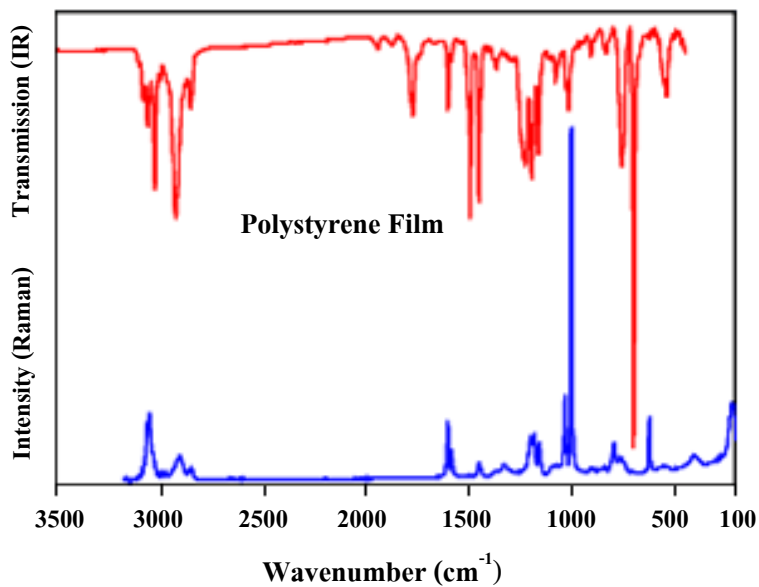


ภาพ 5.32 การกระเจิงแสงที่ตกกระทบวัตถุ (แมน, 2539)

ซึ่งการกระเจิงแสงดังกล่าวข้างต้น มีได้ทั้งกระบวนการกระเจิงแสงแบบพลังงานแสงคงที่ (Elastic process) และกระบวนการกระเจิงแสงแบบแสงที่กระเจิงออกมามีพลังงานหรือความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นเริ่มต้นของแสงที่ตกกระทบ (Inelastic process) ข้อมูลที่ได้จากการกระเจิงในแบบรามาน มีประโยชน์มากในการนำไปประยุกต์ใช้ใน

การวิเคราะห์วัสดุจำพวกพอลิเมอร์ และนิยมใช้คู่กับเทคนิคอินฟราเรด ในการกระเจิงแบบรามาน ผลต่างของพลังงานหรือความถี่ของแสงที่ตกกระทบ กับพลังงานแสงที่กระเจิง เรียกว่า Raman shift จะมีค่าตรงกันกับพลังงานหรือความถี่ของพันธะในการสั่นของโมเลกุลที่วัดได้จากเทคนิคอินฟราเรด ดังนั้นสเปกตรัมที่ได้จากเครื่องรามาน จึงมีลักษณะคล้ายกันกับสเปกตรัมที่ได้จากเครื่องอินฟราเรด ยกตัวอย่างสเปกตรัมของพอลิสไตรีน ดังแสดงในภาพ 5.33

อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้จากเทคนิคทั้ง 2 อาจแตกต่างกันในบางประเด็น กล่าวคือพิกบางพิกอาจไม่สามารถสังเกตพบได้จากสเปกตรัมอินฟราเรด แต่สามารถสังเกตพบได้ในสเปกตรัมรามาน เป็นต้น



ภาพ 5.33 เปรียบเทียบสเปกตรัม FTIR และ Raman ของพอลิสไตรีน (University of Colorado at Boulder, Department of Chemistry and Biochemistry, 2009)

ข้อดีของเทคนิครามาน

1. เนื่องจากปรากฏการณ์รามานเป็นกระบวนการกระเจิงของแสง ดังนั้นสารตัวอย่างที่ใช้อาจจะมีรูปทรงหรือขนาดใดๆ ก็ได้
2. สามารถใช้วัดสารตัวอย่างที่มีความเข้มข้น หรือปริมาณน้อยได้
3. สามารถใช้วิเคราะห์สารตัวอย่างที่ละลายในน้ำได้ เนื่องจากโมเลกุลน้ำซึ่งมีสภาพขั้วสูงจะไม่เกิดสัญญาณรบกวนสเปกตรัมรามาน
4. ที่บรรจุสารตัวอย่าง (Sample holder) เป็นวัสดุประเภทแก้ว ซึ่งมีราคาไม่แพง เมื่อเทียบกับ IR window บางชนิด
5. สามารถใช้วิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ

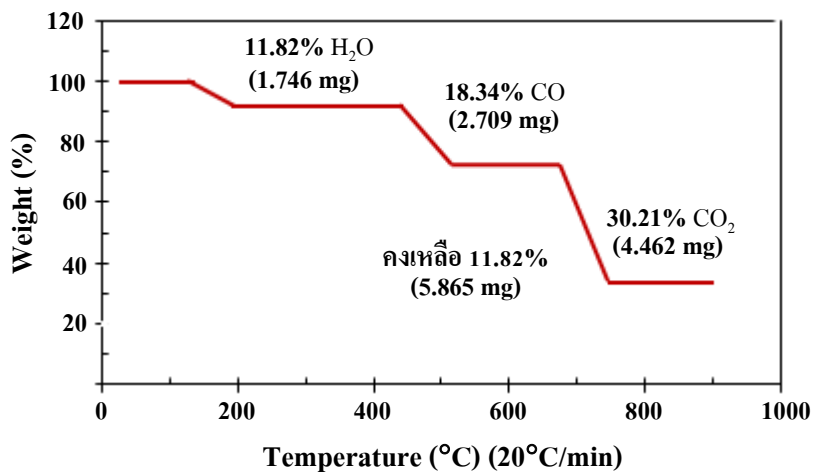
5.12 เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermal analyzer, TA)

การวิเคราะห์เชิงความร้อน โดยใช้เทคนิคทีจีเอ (Thermogravimetric analysis, TGA) เป็นการวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน โดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊สหรือระเหยของน้ำ การตกผลึก (Crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ (Decomposition) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน หรือปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry) ในขั้นตอนของการวิเคราะห์ ชั่งตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็ก ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นบรรยากาศของแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สไนโตรเจน หรือแก๊สที่มีความว่องไว เช่น อากาศ หรือแก๊สออกซิเจน โดยน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ

เทคนิค TGA สามารถทดสอบได้ทั้งตัวอย่างที่เป็นผง หรือเป็นก้อน หรือตัวอย่างที่เป็นแผ่น เช่น

- พอลิเมอร์
- ยา และเครื่องสำอาง
- ตัวอย่างทางเคมี
- สี และพิกเมนต์
- ตัวอย่างทางปิโตรเคมี และสารอินทรีย์ต่างๆ
- ส่วนประกอบในอาหาร เป็นต้น

กรณีตัวอย่างเป็น ก้อน หรือแผ่น ต้องตัดให้มีขนาดพอที่สามารถใส่ลงในครุชชีเบิล (Crucible) ได้ (เส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 5 มิลลิเมตร และสูงไม่เกิน 2-3 มิลลิเมตร) กรณีตัวอย่างเป็นผง จะใช้ในปริมาณ 3-5 มิลลิกรัม จนถึง 20 มิลลิกรัม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตัวอย่าง



ภาพ 5.34 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ การสูญเสียน้ำหนัก เมื่อได้รับความร้อน ของแคลเซียมออกซาเลต (จตุพร, 2554)

ยกตัวอย่างการทดสอบการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคทีจีเอของแคลเซียมออกซาเลต (Calcium Oxalate, CaC₂O₄·H₂O) เพื่อวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน พบว่ามี

การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโดยการสูญเสียน้ำ (H_2O) ที่อุณหภูมิในช่วง 200-400 องศาเซลเซียส คิดเป็น 11.82 เปอร์เซ็นต์ มีการสูญเสียคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่อุณหภูมิในช่วง 500-700 องศาเซลเซียส คิดเป็น 18.34 เปอร์เซ็นต์ และมีการสูญเสียคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่อุณหภูมิในช่วง 750-900 องศาเซลเซียส คิดเป็น 30.21 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพ 5.34 โดยการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน ระบบจะแสดงผลการสูญเสียน้ำหนักเท่าใด คิดเป็นร้อยละเท่าใด ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ และกรณีที่ไม่ทราบว่าจะสารตัวอย่างคืออะไร สามารถใช้การคำนวณร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียไปจากการทดสอบ เปรียบเทียบกับร้อยละของน้ำหนักที่สามารถสูญเสียไปได้ของสารประกอบที่คาดว่าจะเป็

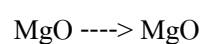
ตัวอย่าง 5.5 หลังการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนของสารชนิดหนึ่ง ซึ่งคาดว่าจะเป็สารประกอบของแมกนีเซียม ซึ่งอาจจะเป็ได้ทั้ง MgO หรือ $MgCO_3$ หรือ MgC_2O_4 โดยผลการวิเคราะห์ พบว่ามีการสูญเสียน้ำหนัก 91.0 มิลลิกรัมจากน้ำหนักสารตัวอย่างทั้งหมด 175.0 มิลลิกรัม จากข้อมูลจงคำนวณหาจำนวนหาร้อยละของน้ำหนักสารตัวอย่างที่สูญเสีย และจงระบุว่าสารตัวอย่างนี้คือสารประกอบของแมกนีเซียมชนิดใด

วิธีทำ

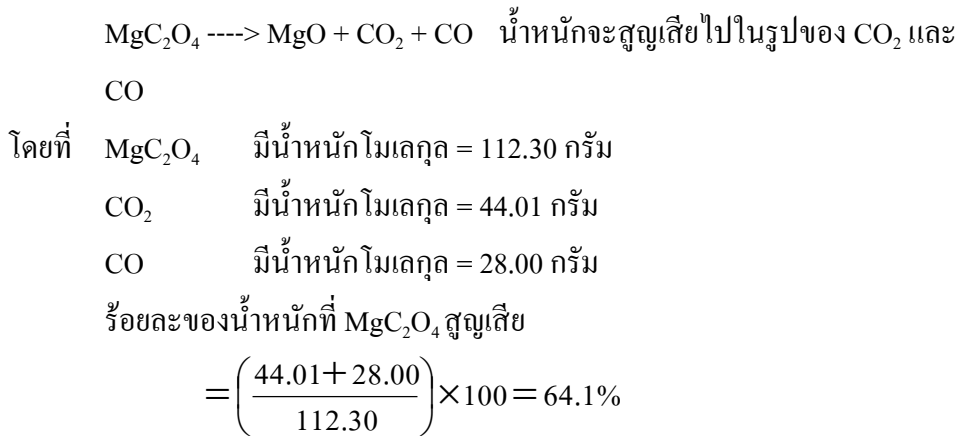
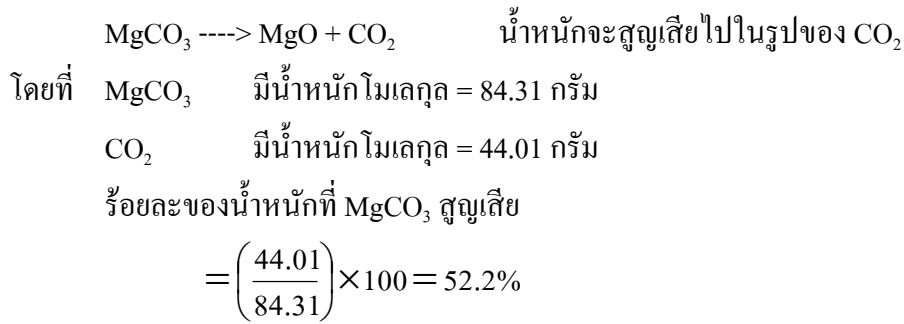
ร้อยละของน้ำหนักสารตัวอย่างที่สูญเสีย

$$= \left(\frac{91.0}{175.0} \right) \times 100 = 52.0\%$$

จากนั้นคำนวณหาร้อยละของน้ำหนักของสารประกอบของแมกนีเซียมแต่ละชนิดที่จะสูญเสียไป จากผลของการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยคำนวณจากน้ำหนักโมเลกุล ดังนี้คือ



ไม่มีการสูญเสียน้ำหนัก



สารตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ คือ MgCO₃ เนื่องจากมีร้อยละของ น้ำหนักรที่ สูญเสียบหลังจากได้รับความร้อนใกล้เคียงมากที่สุดกับค่าที่ทดสอบได้ **ตอบ**

นอกจากผลการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักรเมื่อได้รับความร้อน สามารถทำให้ทราบได้ว่าสารตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาเคมี และสูญเสียบองค์ประกอบใน โครงสร้างทางเคมีที่อุณหภูมิเท่าใด มากหรือน้อย รวมทั้งใช้ทดสอบ และคำนวณเปรียบเทียบ เพื่อให้ทราบชนิดของสารตัวอย่างแล้ว การนำสารตัวอย่างซึ่งอาจเป็นได้ทั้งวัตถุดิบจนถึงองค์ประกอบของน้ำเคลือบ และเนื้อดินปั้นมาทดสอบเผาที่บรรยากาศแตกต่างกันจะช่วยให้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการนำไปใช้งานได้ เช่น สามารถเลือกช่วงอุณหภูมิได้เหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น

บรรณานุกรม

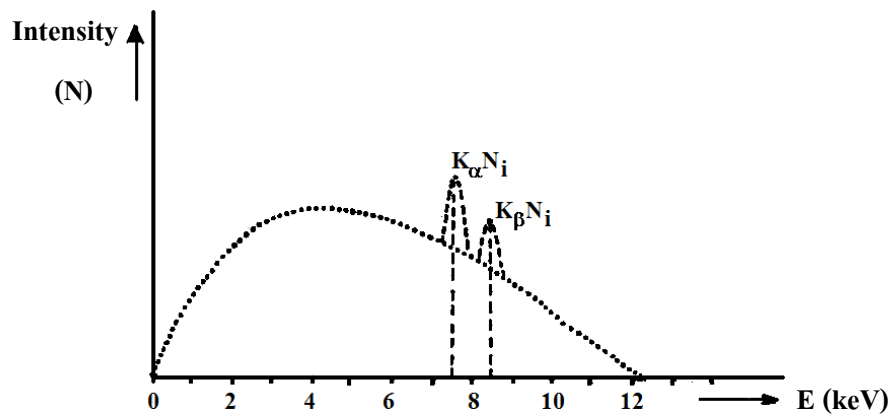
1. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยีบทสรุปสำหรับผู้บริหาร. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.mwit.ac.th/~ponchai/Nano/basicnano.doc> (5 มีนาคม 2555)
2. จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. 2554. การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลพอลิเมอร์. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/download/MTT-656%20%20Chapter%203%20Molecular%20weight%20analysis.pdf> (5 มีนาคม 2555)
3. ชีระชัย พรสินศิริรักษ์. การเรียงอะตอมเป็นพระปรมาภิไธยย่อเพื่อเทิดพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.nanotec.or.th/th/?p=1137> (5 มีนาคม 2555)
4. ปณิตตา แจ่มประดิษฐ์. 2556. การสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของทั้งสแตนออกไซด์บริสุทธิ์ และทั้งสแตนออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล สำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับแก๊ส. รายงานการศึกษาระยะ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 107 น.
5. พรรณทิพย์ ตั้งปริยรักษ์. 2551. เทคนิคปฏิบัติการใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ในการวิเคราะห์ทางเคมี. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.mwit.ac.th/~sarawoot/chem40235.htm> (5 มีนาคม 2555)
6. ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. การทดสอบการสูญเสียน้ำหนัก เมื่อได้รับความร้อน. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.mne.eng.psu.ac.th/staff/lek_files/ceramic/u910-4.htm. (5 มีนาคม 2555)
7. มณฑิรา พารินทร์. 2555. การสังเคราะห์และหาลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองและไนโอเบียมสำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับแก๊ส. รายงานการศึกษาระยะ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 120 น.
8. แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. 2539. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ, ชวนพิมพ์. หน้า 33-107.

9. รุจิพร ประทีปเสน. 2538. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด, วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัย วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 1(5): 49-55.
10. วิรุฬ มังคะวิไลซ์ และ สุวิทย์ปุ่นณชัยยะ. 2535. กล้องจุลทรรศน์รังสีเอ็กซ์แบบฉายภาพ. วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2(2): 107-113.
11. ศรีไฉล ขุนทน. 2543. เครื่องรีด. เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์: ทฤษฎีและหลักการดำเนินงานเบื้องต้น. สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. หน้า 27-46.
12. ศรีไฉล ขุนทน และ สรินทร ลิ่มปนาท. 2543. เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffractometer), เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์: ทฤษฎีและหลักการดำเนินงานเบื้องต้น. สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. หน้า 309-322.
13. ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542. จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนสำหรับงานด้านวัสดุศาสตร์. กรุงเทพฯ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
14. ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ. นาโนเทคโนโลยี คืออะไร. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.nanotec.or.th/th/?p=1137> (5 มีนาคม 2555)
15. สมนึก บุญพาไสว. นาโนเทคโนโลยี เทคโนโลยีในศตวรรษที่ 21. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://design.ipst.ac.th/docu/photo/D008.pdf> (5 มีนาคม 2555)
16. อูรชา รักษัตานนท์ชัย. นาโนเทคโนโลยีเพื่อสุขภาพ. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา www.nanotec.or.th (5 มีนาคม 2555)
17. Atkins and Jones. **Atoms molecules and ions**. [Online]. Available <http://employees.csbsju.edu/hjakubowski/classes/ch123/ch123ch2mcmfay5th.htm>. (5 March 2012)
18. Cleaves, K.S., 2003. **Spectrophotometry on the rise**, Today's Chemist at Work. 2 page
19. Franssila, S. 2004. **Introduction to Microfabrication**. John Wiley & Sons Ltd, 422 page

20. Kruefu, V., Khantha, C., Pookmaneeand, P., Phanichphant, S. 2011. Improvement of the solar efficiency of polymer solar cells by using 1, 3, 5 trichlorobenzene (TCB) as co-solvent, **Mol. Cryst. Liq. Cryst. Sci.** 566(1): 170-174.
21. Kruefu, V., Liewhiran, C., Wisitsoraat, A., Phanichphant, S. 2011. Selectivity of flame-spray-made Nb/ZnO thick films towards NO₂ gas, **Sens. Actuators B: Chem.** 156: 360-367.
22. Kruefu, V., Ninsonti, H., Wetchakun, N., Inceesungvorn, B., Pookmanee, P., Phanichphant, S. 2011. Photocatalytic degradation of phenol using Nb-doped ZnO nanoparticles, **Engineering Journal.** 16(3): 91-99.
23. **Nanotechnology the Manufacturing of 21st Century.** [Online]. Available <http://www.engin.swarthmore.edu/~manzivino/Nanotechnology1.htm>. (5 March 2012)
24. Ribes, A.C., Lundberg, J., Waldron, D.J., Vesely, M., Damaskinos, S., Guthrie, S.I., Dixon, A.E. 2000. Photoluminescence imaging of speleothem microbanding with a high resolution confocal scanning laser microscope. **Quat. Int.** 68-71: 253-259.
25. Smalley, R.E. 1999. **Nanotechnology, prepared written statement and supplemental material.** Rice University.
26. University of Colorado at Boulder, Department of Chemistry and Biochemistry. 2009. **IR Spectroscopy Tutorial: Alcohols.** [Online]. Available <http://orgchem.colorado.edu/Spectroscopy/irtutor/alcoholsir.html> (5 March 2012)
27. Whiston, C. 1991. **X-ray method.** John Wiley & Sons. Singapore. 9 page

คำถามท้ายบท

- 5.1 จงอธิบายให้เข้าใจถึงคำว่าอนุภาคนาโน
- 5.2 ลักษณะการทำงานของเครื่องมือกลุ่ม STM เป็นอย่างไร แต่ละเครื่องมือมีความเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไรบ้าง และมีแนวทางในการนำไปใช้ได้อย่างไรบ้าง
- 5.3 เราจะทราบได้อย่างไรว่าวัสดุชิ้นเป็นวัสดุนาโน ยกตัวอย่างประกอบ
- 5.4 UV-Vis spectroscopy และ Luminescence spectroscopy มีหลักการวิเคราะห์สารแตกต่างกันอย่างไรอธิบาย
- 5.5 จะเลือกใช้เทคนิคใดในการวิเคราะห์หาขนาดของอนุภาค จงอธิบายหลักการวิเคราะห์เพื่อให้ได้มาซึ่งผลดังกล่าว
- 5.6 ถ้าต้องการทราบความหนาของชั้นฟิล์มที่เคลือบบนกระจกตัวนำ ท่านจะเลือกใช้เทคนิคใดในการวิเคราะห์ เพราะเหตุใด อธิบายหลักการวิเคราะห์
- 5.7 จากรูป จงอธิบายรายละเอียดที่เกี่ยวข้อง



- 5.8 จากแต่ละโหมมคการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ท่านคิดว่าลักษณะของชิ้นงานที่เหมาะสมกับแต่ละโหมมคควรเป็นอย่างไร
- 5.9 จงอธิบายถึง Single plus technique และ Sputter deposition คืออะไร

บทที่ 6

วัสดุนาโน (Nanomaterials):

- อนุภาคนาโน (Nanoparticles)
 - ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)
 - สังกะสีออกไซด์ (ZnO)
 - ซิลเวอร์ (Ag)
- วัสดุประกอบนาโน (Nanocomposite)
- หมุดควอนตัม (Quantum dot)
- ท่อนาโนคาร์บอน (Nanotubes) เส้นลวดนาโน (Nanowire) และโพรงนาโน (Nanopores)
 - โครงสร้างท่อนาโนคาร์บอน
 - มัดของท่อนาโนคาร์บอน
 - การเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนและการวิเคราะห์
 - สมบัติทางความร้อนของท่อนาโนคาร์บอน
 - ความจุความร้อนของท่อนาโนคาร์บอน
- บัคกี้บอล (Bucky ball)
- แกรไฟต์ (Graphite) และกราฟีน (Graphene)
- ฟิล์มบางนาโน (Thin film nanostructure)

วัสดุนาโน (Nanomaterials) เป็นวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์หรือการบดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ให้มีขนาดที่เล็กมากในระดับนาโนเมตร หรือวัสดุที่เกิดขึ้นจากการจัดเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลเข้าด้วยกันอย่างแน่นหนาในระดับ 1-100 นาโนเมตร วัสดุนาโนจัดเป็นวัสดุที่มีโครงสร้าง และมีสมบัติที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด สมบัติและพฤติกรรมต่างๆ ของวัสดุนาโน เช่น สมบัติทางแม่เหล็ก สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน จะแตกต่างไปจากวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่ โดยที่วัสดุเหล่านี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท ซึ่งปัจจุบันได้นำไปมาใช้เป็นส่วนผสมในสินค้าหลายประเภท

6.1 อนุภาคนาโน (Nanoparticles)

มีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องในการสังเคราะห์อนุภาคนาโน ทั้งในเชิงอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงมีการศึกษาวิจัยที่พยายามสร้างมูลค่าเพิ่มจากอนุภาคนาโน โดยการนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ต่างๆ ตัวอย่างเช่น ตัวตรวจจับแก๊ส (Gas sensor) อุปกรณ์ตรวจวินิจฉัย วัสดุดูดซับกลิ่น และสารพิษ วัสดุเสริมแรง เป็นต้น ยกตัวอย่างอนุภาคนาโน เช่น ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ทังสเตนออกไซด์ (WO₃) ทินออกไซด์ (SnO₂) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) และเหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) เป็นต้น

6.1.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO₂)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ประกอบด้วยไทเทเนียมหนึ่งอะตอม และออกซิเจนสองอะตอม มีลักษณะโปร่งใส สะท้อนแสงได้ และมีสมบัติในการกำจัดสิ่งสกปรก ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดผง เรียกว่าไทเทเนียมขาว เป็นสารที่มีสีขาวบริสุทธิ์ ใช้เป็นตัวเติมในการผลิตสีทาบ้าน เป็นสีขาวที่ดีกว่าสารสีขาวอื่นๆ นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังไม่มีพิษ สีที่มีไทเทเนียมขาวผสมอยู่ด้วยเมื่อนำไปทาบ้าน สีดังกล่าวจะมีสมบัติติดทนนาน ไม่เกิดรอยดำดำ เพราะเมื่อสัมผัสกับสารประกอบของกำมะถันก็จะไม่เกิดเป็นสีดำ ซึ่งสีทาบ้านที่มีตะกั่วปนจะเป็นรอยดำได้ง่าย เพราะว่าจะทำปฏิกิริยารวมกับสารประกอบของกำมะถันในอากาศเป็นตะกั่วซัลไฟด์ซึ่งมีสีดำ และนอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีสมบัติทึบแสง ช่วยสะท้อนรังสียูวีในแสงแดดซึ่งสลายตัวที่อุณหภูมิสูง 1,560 องศาเซลเซียส ไทเทเนียมไดออกไซด์นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ยาสีฟัน และเครื่องสำอาง ทั้งนี้จากสมบัติที่เป็นผงสีขาวและ

สะท้อนแสงได้ดี สามารถนำมาเป็นส่วนผสมในแป้งทาผิวหน้าจะทำให้ผิวหน้าดูสว่างและขาวขึ้น

ไทเทเนียมไดออกไซด์มีเฟสของผลึกอยู่ 3 แบบคือ รูไทล์ (Rutile) อนาเทส (Anatase) และบรูไคท์ (Brookite) สีนแร่ที่สำคัญที่สุดของไทเทเนียมคือ แร่รูไทล์ ซึ่งมีความสามารถในการเลี้ยวเบนลำแสงให้เกิดประกายได้ดียิ่งกว่าเพชร แต่ไม่แข็งเท่าเพชร เป็นรอยได้ง่าย ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีเฟสรูไทล์จะเป็นเฟสที่เสถียรในทางเทอร์โมไดนามิกส์และที่อุณหภูมิสูง โดยทั่วไปเฟสอนาเทสและบรูไคท์จะพบในธรรมชาติ และมีขนาดเล็ก แต่เฟสอนาเทสมีบทบาทที่สำคัญสำหรับการเร่งปฏิกิริยาค้ำด้วยแสง

ตาราง 6.1 สมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ในเฟสของผลึกแบบต่างๆ

สมบัติ \ โครงสร้าง	รูไทล์	อนาเทส	บรูไคท์
น้ำหนักโมเลกุล	79.890	79.890	79.890
ความหนาแน่น (g/cm ³)	4.2743	3.895	4.123
ความถ่วงจำเพาะ	3.90-4.10	3.90-4.10	3.90-4.10
จุดหลอมเหลว (°C)	1,800-1,900	1,835	1,800-1,900
จุดเดือด (°C)	2,500-3,000	2,500-3,000	2,500-3,000
โครงสร้างผลึก	เตตระโกนอล	เตตระโกนอล	ออร์โธโรมบิก

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารที่ไม่มีพิษ มีความปลอดภัยเมื่อใช้กับอาหาร ยา สีทาบ้าน และเครื่องสำอาง แต่ในรูปแบบของอนุภาคนาโนขนาดเล็กหรืออนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีทำให้สามารถสังเคราะห์อนุภาคในระดับนาโนได้อนุภาคนาโนเล็กกว่า 0.1 ไมโครเมตร ของไทเทเนียมไดออกไซด์ในเฟสอนาเทส ทำให้เกิดโรคได้หรือมีผลต่อเซลล์ ยิ่งขนาดอนุภาคนาโนเล็กมากความเป็นพิษก็ยิ่งมากขึ้น

โดยขนาด 70 นาโนเมตร สามารถแทรกผ่านถุงลมในปอดได้ ขนาด 50 นาโนเมตร สามารถแทรกผ่านเซลล์ได้ และขนาด 30 นาโนเมตร สามารถแทรกเข้าสู่ระบบประสาทส่วนกลางได้

อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เป็นสารกันแดดมีขนาดเล็กอาจจะสามารถแทรกผ่านเซลล์ และนำไปสู่การเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส หรือปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยแสง (Photocatalysis) ภายในเซลล์ได้ และก่อให้เกิดความเสียหายแก่ DNA เมื่อได้รับแสง และอาจก่อให้เกิดมะเร็งผิวหนัง ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการใช้ผลิตภัณฑ์ที่อนุภาคของสารมีขนาดเล็กไม่ว่าจะเป็นสารกันแดดหรือเครื่องสำอาง

6.1.2 ซิงก์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO)

อนุภาคนาโนของซิงก์ออกไซด์เป็นอนุภาคที่มีขนาดประมาณ 20 นาโนเมตร มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว เมื่อนำมาผ่านกระบวนการจัดการกับโครงสร้างของวัสดุนั้นๆจะทำให้มีสมบัติพิเศษสามารถลดกลิ่นอับชื้น และยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย ป้องกันรังสี UV-A และรังสี UV-B ได้ ซิงก์ออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง (Wide band gap semiconductor) ซึ่งมีค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap) ที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ 3.2 อิเล็กตรอน โวลต์ มีโครงสร้างเป็นแบบ Wurtzite hexagonal structure โดยมีค่าตัวแปรของแลตทิซ (Lattice parameters) $a = b = 3.24$ อังสตรอม (Å) และ $c = 5.19$ อังสตรอม มีค่าความหนาแน่นเป็น 5.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่อุณหภูมิ 1,975 องศาเซลเซียส

ซิงก์ออกไซด์เป็นวัสดุในกลุ่มโลหะออกไซด์ที่มีการนำมาใช้งานในรูปแบบของวัสดุนาโน ตัวอย่างการใช้วัสดุนาโนซิงก์ออกไซด์ ได้แก่การใช้งานในกลุ่มของอิเล็กทรอนิกส์ หรืออุปกรณ์ตรวจจับแก๊ส ใช้สำหรับการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ใช้ในการบำบัดสิ่งแวดล้อม เนื่องจากมีสมบัติที่ดีในด้านการดูดซับแสงและสมบัติด้านการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง นอกจากนี้ยังใช้ในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง และ โลชันกันแดด ทั้งนี้เนื่องจากซิงก์ออกไซด์ขนาดนาโนสามารถป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ในระดับเดียวกับอนุภาคซิงก์ออกไซด์ขนาดใหญ่ แต่การส่งผ่านแสงดีกว่าทำให้ไม่ทิ้งร่องรอยที่เป็นสีขาวอย่างชัดเจนบนผิวหนังเมื่อเทียบกับโลชันกันแดดที่ใช้อนุภาคใหญ่

ตาราง 6.2 สมบัติของซิงก์ออกไซด์ขนาดนาโนเมตร

สมบัติ	อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์	
สูตรโมเลกุล	ZnO	-
น้ำหนักโมเลกุล	81.39	กรัม/โมล
ลักษณะที่ปรากฏ	ผงสีขาว	-
โครงสร้างผลึก	Hexagonal	-
ความหนาแน่น	5.6	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
pH	7-8	-
จุดหลอมเหลว	1975	องศาเซลเซียส
จุดเดือด	-	องศาเซลเซียส

6.1.3 ซิลเวอร์ (Silver, Ag)

อนุภาคนาโนของซิลเวอร์หรือโลหะเงิน ใช้ในผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภคต่างๆ เช่น การบรรจุหีบห่ออาหาร สิ่งทอที่ต้านทานการเกิดกลิ่น อุปกรณ์เครื่องใช้ในบ้าน และ อุปกรณ์ทางการแพทย์ รวมถึงผ้าปิดแผล ทั้งนี้เนื่องจากซิลเวอร์นาโนมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้เป็นอย่างดี และจากสมบัตินี้ซิลเวอร์นาโนอาจทำลายแบคทีเรียที่มีประโยชน์ที่อยู่ในระบบนิเวศน์ เช่น แบคทีเรียในดินที่มีบทบาทสำคัญในการตรึงไนโตรเจนและย่อยสลายสารอินทรีย์ เป็นต้น ซิลเวอร์สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ด้วยระดับความเข้มข้นที่ต่ำกว่าโลหะหนักชนิดอื่นๆ และความเป็นพิษของซิลเวอร์นาโนมากกว่าซิลเวอร์ในรูปแบบก้อน ซิลเวอร์มีความเป็นพิษสูงกว่าโลหะอื่นที่อยู่ในรูปของอนุภาคนาโน

6.2 วัสดุประกอบนาโน (Nanocomposite)

วัสดุประกอบนาโน หรือวัสดุผสม (Nanocomposite) เช่นคอนกรีต เกิดขึ้นจาก ทราย หิน ปูน และเหล็ก ที่ระดับใหญ่มาก แต่วัสดุผสมนาโนเป็นการผสมผสานในระดับเล็กมาก ทำให้แสดงคุณสมบัติพิเศษในระดับอะตอมออกมา ตัวอย่างเช่น แผ่นฟิล์มและบรรจุภัณฑ์ที่

ด้านทานการซึมผ่านของแก๊สและความชื้น วัสดุเสริมแรงเพื่อใช้ทางการแพทย์ วัสดุสำหรับเครื่องสำอาง ตัวตรวจจับแก๊ส เป็นต้น

วัสดุผสมระดับนาโน เป็นวัสดุผสมสังเคราะห์ที่มีเนื้อวัสดุหลายอย่างผสมกัน (Multiphase material) โดยที่มีเนื้อวัสดุหนึ่งใดหรือหลายๆ เนื้อวัสดุ เป็นโครงสร้างที่มีขนาดอยู่ในช่วงประมาณ 1-100 นาโนเมตร สามารถจำแนกวัสดุผสมระดับนาโนได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

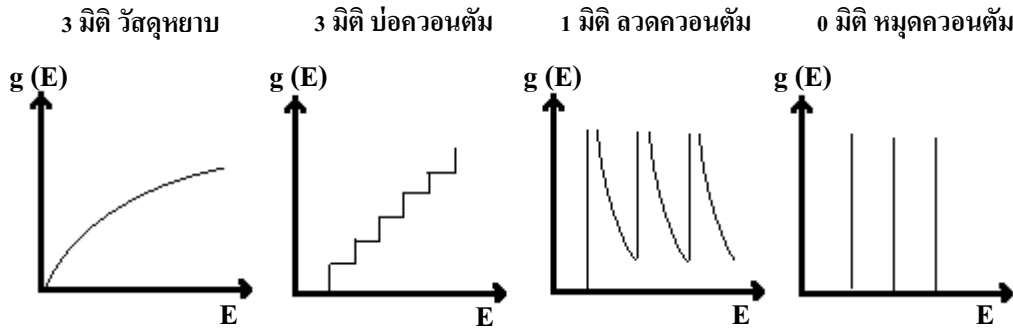
- วัสดุผสมที่มีลักษณะแยกชั้นกัน (Anolayers composite) เป็น โครงสร้างที่ประกอบขึ้นมาจากเนื้อของวัสดุที่มีลักษณะเป็นชั้นๆ โดยแต่ละชั้นมีขนาดในระดับนานาโนเมตร
- วัสดุผสมที่มีลักษณะแยกเป็นเส้นใย (Nanofilamentary composite) เป็น โครงสร้างที่ประกอบขึ้นมาจากพื้นผิวที่มีการผสมเส้นใยระดับนาโนเมตรฝังตัวไว้ในโครงสร้าง
- วัสดุผสมที่มีลักษณะแยกอนุภาค (Nanoparticulate composite) เป็น โครงสร้างพื้นผิวที่มีการผสมอนุภาคที่มีขนาดระดับนาโนเมตรฝังตัวไว้ในโครงสร้าง

วัสดุผสมระดับนาโนส่วนใหญ่จะเป็น โครงสร้างแบบพอลิเมอร์ที่ถูกทำให้สร้างพันธะกับชั้นผิวของวัสดุเส้นใยนาโนหรืออนุภาคนาโน เพื่อปรับปรุงและผลิตเป็นวัสดุที่มีสมบัติเฉพาะที่ดียิ่งขึ้น วัสดุนาโนชนิดอื่นๆ ที่สามารถเติมลงไปเพื่อสร้างเป็นวัสดุผสมระดับนาโนได้ เช่น ท่อนาโนคาร์บอน บัคมิโนสเตอร์ฟลูเลอรีน แผ่นกราฟไฟต์ เส้นใยนาโนคาร์บอน หรือเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งวัสดุต่างๆ เหล่านี้จะทำให้วัสดุผสมระดับนาโนมีสมบัติที่ดีขึ้น เช่น สมบัติทางด้านการนำไฟฟ้า และการนำความร้อน เป็นต้น

6.3 หมดควอนตัม (Quantum dot)

หมดควอนตัม มีลักษณะเป็นจุด หรือหมดระดับนาโน (Quantum dot) ซึ่งเป็น โครงสร้างนาโนแบบ ศูนย์มิติ (Zero-dimensional nanostructure) กล่าวคือไม่มีมิติ ในขณะที่ โครงสร้างนาโนของอะตอมคาร์บอนแบบ 1 มิติ ได้แก่ ท่อหรือลวดคาร์บอนนาโน โครงสร้างนาโนแบบ 2 มิติ ได้แก่ แผ่นกราฟีน และ โครงสร้างนาโนแบบ 3 มิติ ได้แก่ แท่งกราฟไฟต์ โดยที่

สมบัติเชิงแสงและคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของหมุดควอนตัมนาโน ขึ้นอยู่กับขนาดของหมุดนาโน ดังแสดงในภาพ 6.1

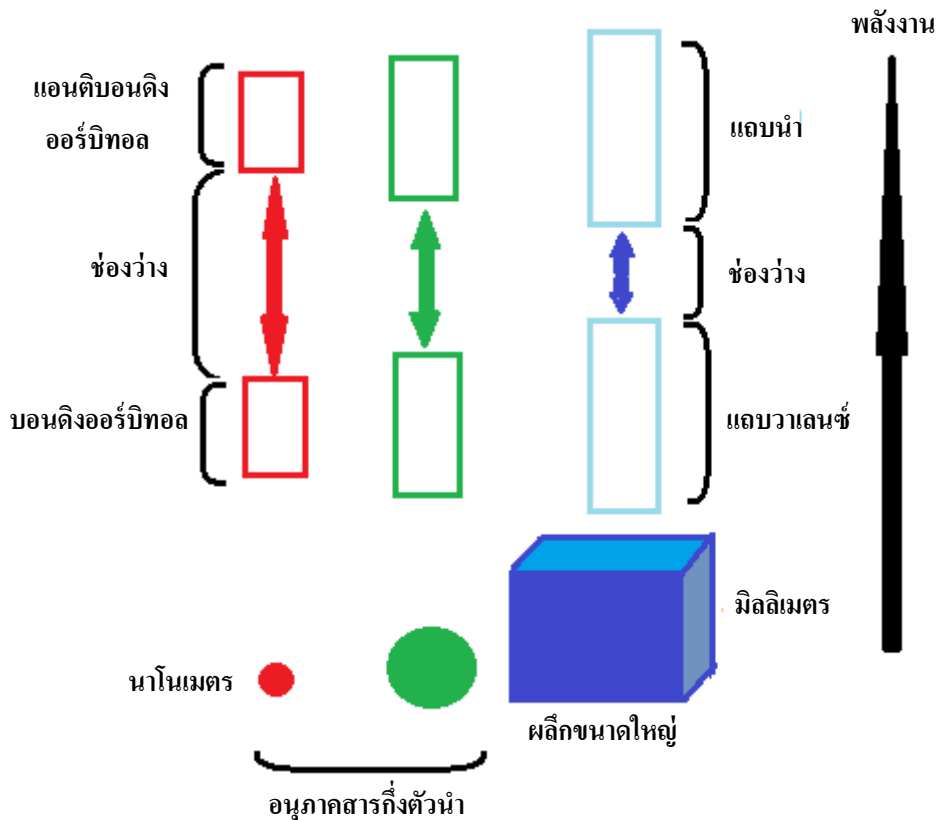


ภาพ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานกับความหนาแน่นสถานะ (Ranade et al., 2002)

หมุดระดับนาโนเป็นโครงสร้างที่มีมิติทางกายภาพทั้งสามมิติถูกจำกัดอยู่ในช่วงนาโนเมตร วัสดุหรือโครงสร้างที่มีระบบมิติต่ำ จะมีสถานะอิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง ซึ่งจะมีค่าได้อย่างจำเพาะเท่านั้น ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า ควอนไทเซชัน (Quantization) การเกิดควอนไทเซชันทางอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้เกิดสมบัติใหม่ๆ และปรากฏการณ์ใหม่ๆ ทางอิเล็กทรอนิกส์ของสสาร การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของสสารต่างๆ จะมีผลให้สมบัติของสสารเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่น สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติทางแสง ยกตัวอย่างเช่น ค่าพลังงานช่องว่างระหว่างชั้นพลังงาน (Energy band gap) ของสารกึ่งตัวนำจะแตกต่างกันตามขนาดของอนุภาคในระดับนาโน หมุดควอนตัมซึ่งเป็นอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำ หรือ โลหะ จะมีสีที่แตกต่างกันไปตามขนาด และส่วนประกอบของอนุภาค เนื่องจากโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของหมุดควอนตัมมีการเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของหมุด จึงสามารถนำหมุดควอนตัมไปใช้แทนสีข้อมฟลูออเรสเซนต์ เพื่อใช้ในการติดฉลาก และข้อมสีเซลล์สิ่งมีชีวิต หรือการใช้หมุดควอนตัมเป็นไดโอดเปล่งแสง (LED) หรือนำไปใช้แทนแสงเลเซอร์ในอุปกรณ์โทรคมนาคมแบบเส้นใยนำแสง (Fiber optic) นอกจากนี้

ยังสามารถประยุกต์ใช้หมดควอนตัมสำหรับเป็นส่วนของอุปกรณ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์ (Nanoelectronics) ชนิดต่างๆ ได้

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์มีผลต่อสภาพการนำไฟฟ้าของโลหะ กล่าวคือ โลหะแบบก้อนใหญ่ (Bulk metal) จะมีแถบการนำ (Conduction band) ดังแสดงในภาพ 6.2 แต่เมื่อโลหะมีขนาดอนุภาคเล็กลงจะทำให้อิเล็กตรอนนอกสุดถูกกักขังอยู่ในบริเวณที่จำกัด ซึ่งจะส่งผลทำให้ระดับชั้นพลังงานต่างๆ ถูกแยกออกเป็นชั้นเดี่ยวๆ อย่างชัดเจน คล้ายกับระดับชั้นพลังงานของอะตอมเดี่ยว ทำให้สมบัติทางไฟฟ้าของโลหะมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเป็นโลหะกับฉนวน (Metal-insulator transition) ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค



ภาพ 6.2 ช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำแบบก้อนใหญ่ และอนุภาคขนาดนาโนของสารกึ่งตัวนำ (Ranade et al., 2002)

เมื่อวัสดุอยู่ในสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic structures) จะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมของอิเล็กตรอนในวัสดุ เช่น พฤติกรรมการเป็นตัวนำ เป็นสารกึ่งตัวนำ หรือเป็นฉนวน โดยที่โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอะตอมที่อยู่ภายในเนื้อวัสดุ และลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอม โดยที่วัสดุนาโนทุกประเภท จะมีมิติทางกายภาพอย่างน้อยหนึ่งมิติที่ถูกจำกัดขนาดไว้ให้อยู่ในระดับนาโน จึงเป็นการบีบบังคับให้อิเล็กตรอนในวัสดุนาโนสามารถเคลื่อนที่ได้ในปริมาตรที่จำกัดเท่านั้น จึงทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่ถูกกักขัง (Quantum confinement) ปรากฏอย่างชัดเจน โดยที่ปรากฏการณ์ดังกล่าวไม่เคยเกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยมากในวัสดุที่มีขนาดปกติ

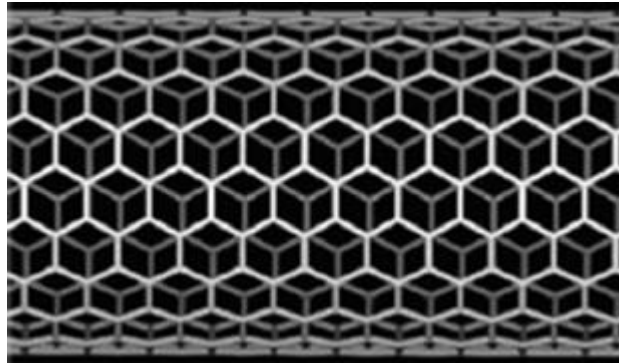
6.4 ท่อนาโนคาร์บอน (Nanotubes) เส้นลวดนาโน (Nanowire) และโพรงนาโน (Nanopores)

6.4.1 ท่อนาโนคาร์บอน (Nanotubes)

6.4.1.1 โครงสร้างท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มีลักษณะโครงสร้างพิเศษที่แตกต่างไปจากอัญรูปทั้ง 3 แบบของธาตุคาร์บอน ซึ่งก็คือ เพชร กราไฟต์ และบัคมิเนสเทอร์ฟลูเลอรีน โดยท่อนาโนคาร์บอนเกิดจากอะตอมคาร์บอนที่จัดเรียงตัวกันเป็นแผ่นที่มีความลื่นสูง อะตอมคาร์บอนเหล่านี้เชื่อมโยงกันเป็นตาข่ายที่มีลักษณะเป็นรูปหกเหลี่ยมม้วนตัวเข้าหากันเป็นท่อ ทำให้โครงสร้างนาโนนี้มีสมบัติที่พิเศษ

ท่อนาโนคาร์บอน ดังแสดงในภาพ 6.3 เป็นท่อที่มีขนาดที่เล็กมากในระดับนาโนเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออยู่ในช่วงประมาณ 0.4-4.0 นาโนเมตร และมีความยาวประมาณ 10 ไมโครเมตร ท่อนาโนคาร์บอนสังเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ แบบมีผนังชั้นเดียวหรือผนังเดี่ยว (Single wall carbon nanotube, SWCNT) และแบบที่เป็นผนังหลายชั้น (Multi-wall carbon nanotube, MWCNT) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการเอาท่อเล็กซ้อนกันเป็นท่อใหญ่หลายๆ ชั้น



ภาพ 6.3 ท่อนาโนคาร์บอน (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2554)

6.4.1.2 มัดของท่อนาโนคาร์บอน

การนำท่อนาโนคาร์บอนมัดรวมกันเป็นเส้นขนาดพื้นที่หน้าตัดหนึ่งตารางเซนติเมตร จะสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้สูงถึงหนึ่งพันล้านแอมแปร์ ซึ่งต้องมีวิธีปลูกผลึกให้ได้ในตำแหน่งและทิศทาง รวมทั้งขนาด และความยาวที่ควบคุมได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้มัดของท่อนาโนคาร์บอน จะให้ค่าความแข็งแรงสูงขึ้น

6.4.1.3 การเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนและการวิเคราะห์

การเติบโตของท่อนาโนคาร์บอน มีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ทั้งในด้านของขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว ปริมาณ คุณภาพ และความบริสุทธิ์ของท่อนาโนคาร์บอนดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 หัวข้อการปลูกผลึก

6.4.1.4 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอนเป็นโครงสร้างนาโนที่มีสมบัติพิเศษหลายด้านที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมาย ยกตัวอย่าง เช่น

- สมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลของท่อนาโนคาร์บอน คือ ท่อนาโนคาร์บอนเป็นโครงสร้างนาโนที่มีความแข็งแรง น้ำหนักเบา และมีความยืดหยุ่นอย่างมาก มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็ก 60 เท่า และสามารถทนต่อแรงดึงได้มากกว่าเล็กถึง 20 เท่า จึงได้มีการ

นำท่อนาโนคาร์บอนมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในผลิตภัณฑ์หลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น อุปกรณ์กีฬา กอล์ฟ และเทนนิส เป็นต้น

- **สมบัติทางความร้อนและค่าความจุความร้อนของท่อนาโนคาร์บอน**

ท่อนาโนสามารถทนความร้อนได้สูงถึง 2,800 องศาเซลเซียส ในสุญญากาศ และมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าเพชรถึง 2 เท่า รวมทั้งมีค่าความจุความร้อนจำเพาะที่สูง

- **สมบัติทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอน**

สมบัติทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอน คือ ท่อนาโนคาร์บอนสามารถประพฤติตัวเป็นได้ทั้งสารกึ่งตัวนำหรือเซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor) และเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดหรือซูเปอร์คอนดักเตอร์ (Superconductor) ซึ่งตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ไม่มีแรงต้านไฟฟ้าเลย โดยสมบัติดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการสังเคราะห์ การจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนตามผนังของท่อ องค์กรประกอบ และสารชนิดอื่นที่ผสมลงไปในโครงสร้างของท่อนาโน

โครงสร้างที่เล็กมากในระดับนาโนเมตรของท่อนาโนคาร์บอนจะสามารถแสดงสมบัติทางควอนตัม คือ สามารถควบคุมการไหลของอิเล็กตรอนแบบไม่ต่อเนื่อง โดยอาจจะสามารถควบคุมการไหลที่ละกลุ่มของอิเล็กตรอน หรือควบคุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทีละตัวได้ จึงได้มีการนำมาประยุกต์ใช้งานในการผลิตเป็นทรานซิสเตอร์ที่มีความเร็วสูงและมีความต้านทานต่ำมาก รวมทั้งได้มีการพัฒนาเพื่อนำท่อนาโนคาร์บอนมาประยุกต์ใช้แทนโลหะที่เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับจ่ายอิเล็กตรอนในจอภาพแบบรังสีแคโทดที่ใช้ในจอทีวีหรือจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งให้ความสม่ำเสมอและปริมาณที่เพียงพอในการจ่ายอิเล็กตรอน รวมทั้งมีอายุการใช้งานของการจ่ายอิเล็กตรอนนานกว่า ทั้งยังไม่จำเป็นต้องใช้ในสุญญากาศ จึงเป็นการประหยัดพลังงานเนื่องจากสามารถจ่ายอิเล็กตรอนได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่จำเป็นต้องเผาไส้หลอดให้แดง เพราะในกรณีการใช้โลหะเป็นไส้หลอดจำเป็นต้องเผาไส้หลอดก่อน

- สมบัติทางชีวภาพของท่อนาโนคาร์บอน

ทางด้านนาโนเทคโนโลยีชีวภาพ ได้ประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอนสำหรับเป็นพาหะในการทำยีนหรือพันธุกรรมบำบัด (Gene therapy) คือ การนำส่งยีนที่ขาดหายไปหรือการนำส่งยีนที่ต้องการใช้ในการรักษาโรคเข้าสู่ร่างกายของผู้ป่วย เพื่อใช้ในการสร้างโปรตีนที่เหมาะสม สำหรับการรักษาโรค เช่น โรคมะเร็ง โรคเอดส์ และโรคติดเชื้อ เป็นต้น

6.4.2 เส้นลวดนาโน (Nano wires)

เส้นลวดนาโนเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มีรูปร่างเป็นเส้นใน 1 มิติ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กมากในระดับนาโนเมตร (น้อยกว่า 100 นาโนเมตร) ด้วยขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร และมีโครงสร้างใน 1 มิติ ทำให้โครงสร้างนาโนเกิดปรากฏการณ์ทางควอนตัมเนื่องจากอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ในทิศทางเดียว เส้นลวดนาโนสามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายชนิดแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น เส้นลวดนาโนของโลหะได้แก่ เส้นลวดนาโนนิกเกิล เส้นลวดนาโนแพลตินัม เส้นลวดนาโนทองคำ เป็นต้น ส่วนเส้นลวดนาโนของสารกึ่งตัวนำ ได้แก่ เส้นลวดนาโนซิลิกอน เป็นต้น และเส้นลวดนาโนที่เป็นฉนวน ได้แก่ เส้นลวดนาโนออกไซด์ของซิลิกอน เส้นลวดนาโนออกไซด์ของไทเทเนียม เป็นต้น

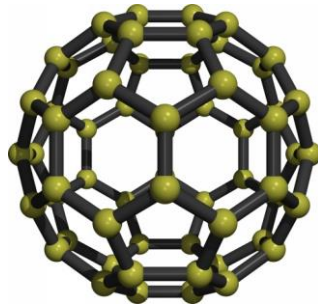
6.4.3 โพรงนาโน (Nanopores)

โพรงนาโน หรือรูพรุนนาโน (Nanopores) มีลักษณะเป็นรูหรือช่องลักษณะเล็กมากที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มตั้งแต่ 1 นาโนเมตร ไปจนถึง 100 นาโนเมตร ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้จากเครื่องมือต่างๆ และเทคนิคต่างๆ เช่น Focus ion beam (FIB) หรือจากการสังเคราะห์โดยจัดวางโมเลกุลอย่างเป็นระเบียบได้ด้วยตนเอง (Self-assembly) ของโมเลกุล เป็นต้น

6.5 บัคมิสเตอร์ฟูลเลอร์ หรือบัคกี้บอล (Bucky ball)

บัคมิสเตอร์ฟูลเลอร์ หรือบัคกี้บอล (Bucky ball) ดังแสดงในภาพ 6.4 เป็นโครงสร้างนาโนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 นาโนเมตร บัคกี้บอลเป็นโครงสร้างโมเลกุลที่ประกอบขึ้นจากอะตอมของธาตุคาร์บอนจำนวน 60 อะตอม (สัญลักษณ์ทางเคมีคือ

C_{60}) เชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างลักษณะรูปทรงกลมคล้ายกับลูกฟุตบอล ซึ่งประกอบด้วยวงหกเหลี่ยมของคาร์บอน (Hexagons) จำนวน 20 วง และวงห้าเหลี่ยม (Pentagons) จำนวน 12 วง บัคกี้บอลจัดเป็นสารในกลุ่มฟูลเลอร์ีน (Fullerenes) ซึ่งฟูลเลอร์ีนเป็นอัญรูป (Allotrope) แบบที่ 3 ของธาตุคาร์บอน โดยอัญรูปแบบที่ 1 ได้แก่ เพชร และอัญรูปแบบที่ 2 ได้แก่ กราไฟต์ หรือ ถ่าน



ภาพ 6.4 โครงสร้างนาโนของบัคมินสเตอร์ฟูลเลอร์ีน หรือบัคกี้บอล (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2554)

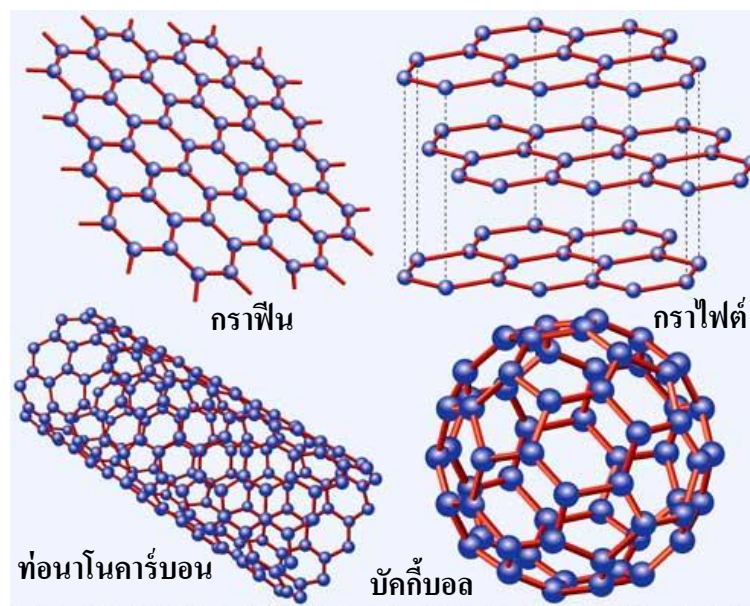
ลักษณะรูปทรงกลมเหมือนกับลูกฟุตบอลของโมเลกุลของคาร์บอนจำนวน 60 อะตอม เชื่อมต่อกันเป็น เป็นโครงสร้างที่มีความสมบูรณ์ และมีความเสถียรมากที่สุด มีความแข็งแรงมาก ซึ่งโครงสร้างในลักษณะนี้สามารถรองรับ และถ่ายเทแรงภายใน โครงสร้างได้เป็นอย่างดี เมื่อนำอะตอมของธาตุที่เป็น อัลคาไล (Alkali) เช่น โซเดียม หรือโปแตสเซียม จำนวน 3 อะตอมมายึดติดกับฟูลเลอร์ีนจะทำให้เกิดวัสดุพิเศษที่มีการนำไฟฟ้ายิ่งยวด หรือไม่มีความต้านทานไฟฟ้าเลยที่อุณหภูมิประมาณ 20-40 เคลวิน ทั้งนี้ฟูลเลอร์ีนสามารถยึดติดกับอะตอมของอัลคาไลได้ เพราะมีสมบัติเป็นลบในทางเคมี ในขณะที่โลหะอัลคาไลมีสมบัติเป็นบวกจึงทำให้สามารถจับคู่กันได้อย่างดี

สมบัติทางการแพทย์ของบัคมินสเตอร์ฟูลเลอร์ีน สามารถใช้เป็นยาในการต่อต้านเชื้อไวรัสเอชไอวี (HIV) หรือไวรัสเอดส์ สามารถใช้เป็นสารต่อต้านเชื้อแบคทีเรีย นอกจากนี้ยังสามารถนำบัคกี้บอลไปใช้ประโยชน์ในด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์ (Nanoelectronics)

เนื่องจากบัคกีบอลมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และถ้าประกอบ โครงสร้าง โมเลกุลของบัคกีบอลร่วมกับอะตอมของโลหะอัลคาไลน์ จะทำให้กลุ่มโมเลกุลของบัคกีบอลมีคุณสมบัติเป็นตัวนำยิ่งยวด (Superconductor) ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากทางด้านนาโน อิเล็กทรอนิกส์

6.6 กราฟีน (Graphene)

กราฟีน (Graphene) มีโครงสร้างที่เกิดจากการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนแบบวง หกเหลี่ยม (Hexagonal configuration) ในแนวระนาบ 2 มิติ หลายๆวงต่อกันเป็นชั้นเดียว เกิด เป็นแผ่นกราฟีนขนาดนาโน ดังแสดงในภาพ 6.5 กราฟีนค้นพบครั้งแรกในปี พ.ศ. 2547 โดย นักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซีย ชื่อ ดร.อังเดรไกม์ (Andre Geim) และดร.คอน สแตนติน โน โว เซลอฟ (Konstantin Novoselov) โดยทั้งคู่ได้ทำให้แกรไฟต์บางลงจนเหลือเพียงชั้นเดียว มี ความหนาเท่ากับอะตอมเดี่ยว ที่มีความเสถียรในสภาวะธรรมชาติ และได้เรียกวัดนี้ว่า กราฟีน (Graphene) การค้นพบนี้ทำให้ทั้งคู่ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 2010



ภาพ 6.5 บัคกีบอล ท่อนาโนคาร์บอน กราไฟต์ และกราฟีน (Williams et al., 2007)

สมบัติการนำไฟฟ้าของกราฟีนมีมากกว่าท่อนาโนคาร์บอนแบบวงเดี่ยวถึงสองเท่า ดังนั้นจึงมีการนำกราฟีนมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทางอิเล็กทรอนิกส์มากมาย เช่น ทรานซิสเตอร์ (Transistor) อุปกรณ์บันทึกความจำ (Memory device) เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) และ เซ็นเซอร์ทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical sensor) เป็นต้น

จากสมบัติที่บางที่สุดมีความหนาเพียงอะตอมเดี่ยว แสงสามารถส่องผ่านได้เป็นวัสดุชนิดแรกที่มีเพียง 2 มิติ (กว้าง x ยาว) รวมทั้งการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของอะตอมคาร์บอนทำให้กราฟีนเป็นวัสดุที่แข็งที่สุด กราฟีนแข็งแรงกว่าเหล็กประมาณ 5 เท่า ฉีกขาดได้ยาก นอกจากนี้ยังสามารถบิด งอ ม้วน หรือพับได้ โดยไม่เกิดความเสียหายต่อโมเลกุล นอกจากนี้จากการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบของอะตอมคาร์บอน ทำให้กราฟีนนำความร้อน และนำไฟฟ้าได้อย่างดีเยี่ยม เพราะในโครงสร้างของกราฟีน กระแสอิเล็กตรอนที่ไหลผ่านจะไม่กระจัดกระจาย ความต้านทานไฟฟ้าจึงต่ำมาก ถึงแม้ว่าค่าการนำไฟฟ้าจะน้อยกว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductor) แต่กราฟีนนำไฟฟ้าได้ดีมากที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งต่างจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ต้องลดอุณหภูมิจนติดลบประมาณ -100 องศาเซลเซียส จึงจะสามารถนำไฟฟ้าได้ที่อุณหภูมิห้อง

6.7 พิล์มบางนาโน (Thin film nanostructure)

ฟิล์มบางนาโน เป็นฟิล์มที่มีขนาดความบางอยู่ในระดับนาโนเมตร สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่นฟิล์มบางอินทรีย์ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในหลอดไฟแบบแบนเรียบ และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ (Organic solar cells) เป็นต้น การเตรียมฟิล์มบางในระดับนาโน สามารถเตรียมได้หลายวิธี เช่น การหมุนเหวี่ยง (Spin coating) การระเหยกลายเป็นไอ (Evaporation) การเคลือบแบบสปัตเตอร์ริง (Sputtering) และการตกสะสมไอสารด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical vapor deposition) เป็นต้น

บรรณานุกรม

1. ชีรเกียรติ์ เกิดเจริญ. 2005. ประเทศไทยกับนาโนเทคโนโลยี. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://nanotech.sc.mahidol.ac.th/nano/Thainano.pdf> (15 มีนาคม 2555)
2. ประยูร ส่งศิริฤทธิกุล. เทคโนโลยีวัสดุ และวัสดุนาโน. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา [http://science.sut.ac.th/physics/courses/105113/55-T3/Lecture/Man%20&%20Tec%2008%20-%20Materials%20Technology%20\(Handouts\).pdf](http://science.sut.ac.th/physics/courses/105113/55-T3/Lecture/Man%20&%20Tec%2008%20-%20Materials%20Technology%20(Handouts).pdf) (15 มีนาคม 2555)
3. ยุทธนา พิมพ์ทองงาม. 2551. การพัฒนาอุปกรณ์รับรู้แก๊สเอทิลีนจากสารเชิงประกอบระดับนาโนทั้งสแตนด์-อัลไนด์-ทินออกไซด์. รายงานการวิจัยเรื่อง. มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต
4. สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2554. นาโนเทคโนโลยีจากระบบธรรมชาติสู่การสังเคราะห์. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit3-7.html> (15 มีนาคม 2555)
5. สุพิน แสงสุข. 2550. นาโนเทคโนโลยีและความปลอดภัย. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=5&ID=1> (15 มีนาคม 2555)
6. สำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2554. กราฟีน (Graphene). [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.nstda.or.th/nstda-knowledge/3895-graphene> (15 มีนาคม 2555)
7. Ashley, S. 2009. Grinding out graphene, **Scientific American**. 20-21.
8. Dechsakulthorn, F., Hayes, A., Bakand, L.J., Winder Ch. 2007. In vitro cytotoxicity assessment of selected nanoparticles using human skin fibroblasts. **AATEX**. 14: 397-400.
9. Dhange, S.R., Choube, V.D., Samuel, V., Ravi, V. 2004. Synthesis of nanocrystalline TiO₂ at 100°C. **J. Mater. Chem.** 58: 2310-2313.
10. Geim, A.K., Kim, P. 2008. Carbon wonderland, **Scientific American**. 90-97.

11. Geim, A.K., MacDonald, A.H. 2007. Graphene: exploring carbon flatland, **Phys. Today**, 60: 35–41.
12. Geim, A.K., Novoselov, K.S. 2007. The rise of graphene, **Nature Mater.** 6: 183–191.
13. Heinlaan, M., Ivask, A., Blinova, I., Dubourguier, H-Ch., Kahru, A. 2008. Toxicity of nanosized and bulk ZnO, CuO and TiO₂ to bacteria vibrio fischeri and crustaceans daphnia and thamocephalusplatyurus. **Chemosphere.** 71: 1308-1316.
14. Nobelprize.org. **All about the nobel prize awarded achievements.** [Online]. Available <http://www.nobelprize.org/> (15 March 2012)
15. Ranade, M.R., Navrotsky, A., Zhang, H.Z., Banfield, J.F., Elder, S.H., Zaban, A., Borse, P.H., Kulkarni, S.K., Doran, G.S., Whitfield, H.J. 2002. Energetics of nanocrystalline TiO₂. **Proc. Natl. Acad. Sci. USA.** 99: 6476-6781.
16. Senjen, R., 2007. **Nanosilver a threat to soil, water and human health.** [Online]. Available <http://nano.foe.org.au/node/190> (15 March 2012)
17. Wang, B., Feng, W., Wang, M., Wang, T., Gu, Y., Zhu, M., Ouyang, H., Shi, J., Zhang, F., Zhao, Y., Chai, Z, Wang, H., Wang, J. 2008. Acute toxicological impact of nano- and submicro-scaled zinc oxide powder on healthy adult mice. **J. Nano. Res.** 10: 263-276.
18. Williams, J.R., DiCarlo, L. Marcus. C.M. 2007. Quantum hall effect in a graphene p-n junction. **Science.** 2: 1-4.

คำถามท้ายบท

- 6.1 อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ใช้ในการผลิตวัสดุประเภทใด และมีสมบัติอย่างไร
- 6.2 ความสามารถในการประกอบตัวเองได้แบบพอลิเมอร์ที่เป็นฟิล์มบางระดับนาโน ถูกนำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ชนิดใด
- 6.3 ท่อนาโนคาร์บอนถูกนำมาใช้ในการผลิตสิ่งใด เพื่อวัตถุประสงค์ใดของผลิตภัณฑ์ที่จะได้รับ
- 6.4 อนุภาคนาโนใดเหมาะแก่การนำมาใช้สำหรับผลิตผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการรักษาบาดแผล หรือใช้ในการฆ่าเชื้อโรค
- 6.5 โครงสร้างนาโนใดที่ถูกนำมาใช้สำหรับผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวกับครีมบำรุงผิว หรือเครื่องสำอางที่นิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน
- 6.6 บั๊กมินสเตอร์ฟูลเลอรีน หรือบั๊กกีบอล คืออะไร มีสมบัติอย่างไร และถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างไรได้บ้าง
- 6.7 รูไทล์ (Rutile) อนาเทส (Anatase) และบรูไคท์ (Brookite) คืออะไร แตกต่างกันอย่างใด อธิบาย
- 6.8 ควอนไทเซชัน (Quantization) คืออะไร และมีผลนำไปสู่การเกิดสมบัติใหม่ๆ และปรากฏการณ์ใหม่ๆ อะไรได้บ้าง
- 6.9 Nanofilamentary composite และ Nanocomposite แตกต่างกันอย่างใด อธิบาย
- 6.10 Endohedral fullerene และ Metallofullerene แตกต่างกันอย่างใด อธิบาย
- 6.11 จงอธิบายสมบัติของ Nanotubes และ Nanopores
- 6.12 กราฟีน (Graphene) คืออะไร มีสมบัติอย่างไร และนำไปใช้ประโยชน์ด้านใดบ้าง

บทที่ 7

นาโนเทคโนโลยีในด้านต่างๆ:

- 7.1 นาโนเทคโนโลยีชีวภาพและนาโนเทคโนโลยีทางการแพทย์
- 7.2 นาโนอิเล็กทรอนิกส์
- 7.3 นาโนคอมพิวเตอร์
- 7.4 ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคหรือเมมส์ (Microelectromechanical systems, MEMs)
- 7.5 ระบบเครื่องกลไฟฟ้านาโนหรือนีมส์ (Nanoelectromechanical systems, NEMs)
- 7.6 นาโนเทคโนโลยีกับการเกษตร
- 7.7 นาโนเทคโนโลยีทางด้านอาหาร

7.1 นาโนเทคโนโลยีชีวภาพ (Nanobiotechnology) และนาโนเทคโนโลยีทางการแพทย์

นาโนเทคโนโลยีชีวภาพและนาโนเทคโนโลยีทางการแพทย์ เป็นเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิจัยรวมทั้งการใช้ประโยชน์จากระบบทางชีวภาพ เช่น เซลล์โปรตีน และกรดนิวคลีอิก โดยการนำมาสังเคราะห์โครงสร้างที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร รวมทั้งการสร้างอุปกรณ์สำหรับการตรวจวินิจฉัยโรคที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในทางชีวภาพได้

ยกตัวอย่างการศึกษาวิจัยทางด้านนาโนเทคโนโลยีชีวภาพ เช่น

- การวิเคราะห์และตรวจวินิจฉัย เช่น ไบโอเซ็นเซอร์ และห้องปฏิบัติการบนไมโครชิป เป็นต้น
- การพัฒนาชนิดใหม่
- การพัฒนาวิธีการรักษาโรคแบบใหม่
- การพัฒนาระบบนำส่งยานำวิถี
- การพัฒนาทางวิศวกรรมเนื้อเยื่อ และการแพทย์เชิงเสริมสร้าง
- การเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องสำอางโดยพัฒนาระบบนำส่ง เช่น ไลโปโซม (Liposome)
- การพัฒนาระบบนำส่งยา (Drug delivery systems) ในการรักษาโรคมะเร็ง
- การค้นหาหรือสารออกฤทธิ์ชนิดใหม่ๆ เช่น ยาต้านยั้งโรคเอดส์
- การพัฒนาวิธีการตรวจวินิจฉัยโรคแบบใหม่ เช่น ไมโครชิปค้นหาฮีน (DNA chip)
- การพัฒนาตัวตรวจจับทางชีวภาพ (Nanobiosensor) เพื่อใช้ประโยชน์ทางด้าน การเกษตร และสาธารณสุข เป็นต้น
- การสร้างอวัยวะหรือเนื้อเยื่อเทียมโดยใช้เทคโนโลยีวิศวกรรมเนื้อเยื่อ

7.1.1 ไมโครชิป

ไมโครชิปค้นหาฮีน (DNA chip)

ไมโครชิปค้นหาฮีน เป็นไมโครชิปสำหรับใช้ในการค้นหาฮีนของสิ่งมีชีวิต มีลักษณะเป็นแผ่นกระจกขนาดเล็ก สร้างขึ้นด้วยกระบวนการที่คล้ายกับการสร้างไมโครชิปคอมพิวเตอร์ บนผิวของไมโครชิปค้นหาฮีนแต่ละแผ่นจะฉาบด้วยดีเอ็นเอสังเคราะห์ที่เป็นสายเดี่ยว

(Synthetic single stranded DNA sequence) ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับดีเอ็นเอในสภาพปกติ ไมโครชิพค้นหาใช้ในการตรวจหาการตอบสนองต่อยาของผู้ป่วย เพื่อค้นหาสิ่งที่อาจก่อให้เกิดโรคในอนาคต เช่น โรคทางพันธุกรรมต่างๆ เช่น โรคเบาหวาน และโรคหัวใจ หรือในทางการเกษตรเพื่อค้นหาพันธุกรรมโรค และแมลง รวมทั้งยีนสำคัญที่มีผลต่อการควบคุมปริมาณ และคุณภาพของผลผลิต ทั้งยังสามารถใช้ในการตรวจหาชิ้นมะเร็งเต้านม และมะเร็งรังไข่ เป็นต้น

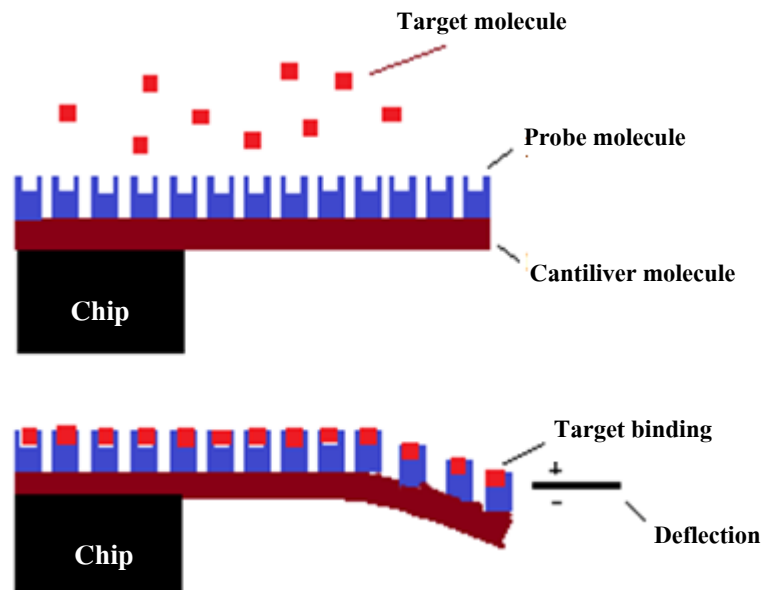
การวิเคราะห์ทางการแพทย์เพื่อพิจารณาว่าบุคคลนั้นมียีนที่ก่อให้เกิดโรคหรือไม่สามารถทำได้โดยการนำตัวอย่างที่ทราบแน่ชัดว่าไม่เป็นโรคมารับเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบ โดยนำเลือดของบุคคลนั้นมาแยกดีเอ็นเอย่อยแล้วย้อมสี (Fluorescence) จากนั้นหยดลงบนแผ่น DNA ชิพ ถ้าสีที่ย้อมติดกับแผ่นชิพอย่างปกติแสดงว่าบุคคลนั้นไม่มียีนที่ผิดปกติ แต่ถ้ามียีนผิดปกติ สีจะไม่ติดกับแผ่น DNA ชิพในบริเวณที่มีความผิดปกติของยีน

ไมโครชิพช่วยปลดปล่อยยา

ไมโครชิพช่วยปลดปล่อยยาเป็นไมโครชิพที่มีช่องสำหรับบรรจุยาที่ปิดด้วยแผ่นทองบางๆ เมื่อให้กระแสไฟฟ้าตามที่กำหนดไว้ แผ่นทองก็จะละลายพร้อมทั้งปลดปล่อยยาออกมา ทั้งนี้เพื่อสามารถให้ยาเป็นระยะๆ ตามลำดับความต้องการของโรคในร่างกาย

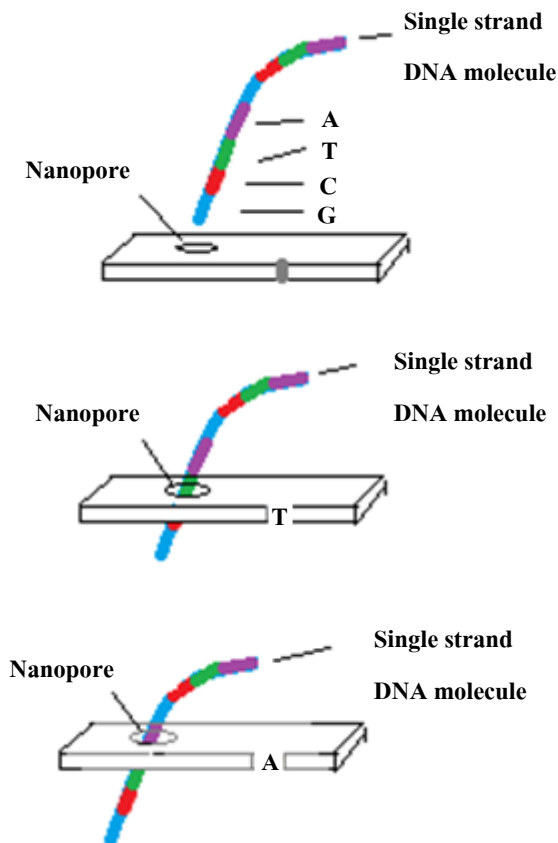
7.1.2 นาโนเทคโนโลยีกับการรักษาโรคมะเร็ง

มีการพัฒนาอุปกรณ์ขนาดจิ๋วโดยใช้เทคโนโลยีด้านนาโนสำหรับเป็นพาหนะนำยาป้องกันมะเร็งเข้าสู่ร่างกาย โดยการพัฒนาคานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM) ดังแสดงในภาพ 7.1 เพื่อตรวจสอบมะเร็งในระยะแรก โดยที่ปลายของคานสามารถดักจับโมเลกุลของสารที่พบบนเซลล์มะเร็ง เช่น สายดีเอ็นเอหรือโปรตีน เมื่อทำการสแกนด้วยปลายของคาน ผ่านเซลล์ และพบโมเลกุลดังกล่าว จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าแรงตึงผิว เป็นผลให้เกิดการงอของคาน ซึ่งทำให้ทราบได้ว่าเซลล์ชนิดใดเป็นเซลล์มะเร็ง ซึ่งมีประโยชน์ต่อการตรวจวินิจฉัยควบคู่ไปกับการรักษา



ภาพ 7.1 การงอของคาน เมื่อมีการจับกันระหว่างแอนติบอดีและแอนติเจนบนเซลล์มะเร็งต่อมลูกหมากทำให้เกิดการสะท้อนแสงที่เปลี่ยนไป (อุรชา, 2552)

การใช้ท่อนาโน (Nanotube) ในการตรวจวินิจฉัยมะเร็ง จากการตรวจการเปลี่ยนแปลงของดีเอ็นเอที่ผิดปกติที่มีการเชื่อมต่อกับเนื้อร้าย โดยใช้ท่อนาโนที่มีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของโมเลกุลดีเอ็นเอ ส่วนปลายของท่อนาโนที่เคลื่อนที่ไปบนผิวของดีเอ็นเอจะทำหน้าที่เพื่อตรวจสอบลักษณะภายนอก เมื่อพบจุดที่มีความผิดปกติ (Mutated region) ก็จะรายงานไปยังหน่วยประมวลผล เพื่อตรวจสอบว่าเป็นเนื้อร้ายที่จะเกิดเป็นมะเร็งต่อไปหรือไม่ อีกวิธีหนึ่งคือการใช้โพรงนาโน (Nanopore) เพื่อตรวจสอบความผิดปกติของดีเอ็นเอว่าเป็นความผิดปกติที่อาจก่อให้เกิดมะเร็งหรือไม่ โคนการผ่านสายดีเอ็นเอของเนื้อเยื่อที่ต้องการตรวจสอบลงไปในช่วงนาโน ดังแสดงในภาพ 7.2 ซึ่งช่วงนี้จะยอมให้ดีเอ็นเอผ่านได้ครั้งละ 1 สายเท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถติดตามรูปร่าง และค่าลำดับของแต่ละสายเบสในสายดีเอ็นเอ ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สามารถทำให้แยกแยะลำดับเบสของดีเอ็นเอที่มีความผิดปกติ และอาจก่อให้เกิดมะเร็งได้



ภาพ 7.2 การตรวจสอบลำดับเบสบนดีเอ็นเอด้วยช่องผ่านนาโน เพื่อตรวจสอบความผิดปกติเบื้องต้นในการวินิจฉัยมะเร็ง (อุรษา, 2552)

การใช้หมุดควอนตัม (Quantum dot) ในการตรวจหาตำแหน่งของเนื้อเยื่อของมะเร็ง เนื่องจากหมุดควอนตัม เป็น โมเลกุลคริสตัลในระดับนาโนเมตรของสารกึ่งตัวนำ ที่สามารถเกิดการเปล่งแสงได้เมื่อมีการกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งความยาวคลื่นหรือสีที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของผลึกคริสตัล โดยในการตรวจหาตำแหน่งจะทำการติดสารแอนติบอดีไว้กับหมุดควอนตัม ซึ่งแอนติบอดีนี้จะมีความเฉพาะเจาะจงกับแอนติเจนบนผิวเซลล์มะเร็งที่ต้องการทดสอบ โดยภายหลังจากการถูกกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต จากภายนอกร่างกาย จะทำให้เกิดการเปล่งแสงจากหมุดควอนตัม ทำให้แพทย์สามารถทราบตำแหน่งของเนื้อเยื่อที่เกิดโรคได้

สำหรับการรักษาโรคมะเร็ง สามารถใช้อนุภาคนาโน (Nanoparticles) ที่ภายในบรรจุสารสำหรับการรักษา โดยเมื่อนำเข้าสู่ร่างกายของผู้ป่วยโดยการฉีดเข้าเส้นเลือด สามารถค้นหาตำแหน่งของเซลล์มะเร็ง และเมื่อพบตำแหน่งของเซลล์มะเร็ง อนุภาคนาโนจะสามารถทำการรักษาโดยการปลดปล่อยยาออกมา ทั้งยังสามารถเป็นตัวบอกตำแหน่งของเซลล์มะเร็ง

การใช้คาร์บอน 60 อะตอม (C_{60}) ในรูปแบบทรงกลมหรือบัคกี้บอล (Buckyball) ในการพัฒนาระบบนำส่งยาเพื่อการทำเคมีบำบัด โดยการเคลือบยาสำหรับการรักษาโรคมะเร็งของบัคกี้บอล หรือบรรจุสารกัมมันตรังสี เช่น เรดอน (Radon) และแอกติเนียม-225 (Actinium-225) ไว้ภายในบัคกี้บอล และติดแอนติบอดีที่เฉพาะเจาะจงกับเซลล์มะเร็งเป้าหมายเพื่อเป็นตัวพาบัคกี้บอลนั้น ไปยังเป้าหมายได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ซึ่งสารกัมมันตรังสีจะไม่ออกมาภายนอกจนกว่าจะถึงเซลล์เป้าหมาย

7.1.3 นาโนไบโอเซ็นเซอร์ (Nanobiosensor)

ไบโอเซ็นเซอร์ (Biosensor) เป็นอุปกรณ์ตรวจจับทางชีวภาพสำหรับตรวจวิเคราะห์สารตัวอย่าง ซึ่งสามารถตรวจวิเคราะห์ได้อย่างเฉพาะเจาะจง รวมทั้งสามารถใช้ตรวจวิเคราะห์สารต่างๆ ได้หลากหลายชนิด ไบโอเซ็นเซอร์ประกอบด้วยตัวแปลงสัญญาณและสารชีวภาพ ซึ่งเป็น 2 ส่วนที่สำคัญ

สำหรับนาโนไบโอเซ็นเซอร์ เป็นตัวตรวจวัดชนิดหนึ่งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร ประกอบด้วยโครงสร้าง 2 ส่วนที่สำคัญคือ ตัวรับ (Receptor unit) และตัวให้หรือแปลสัญญาณ (Transducer หรือ Signaling unit) สัญญาณที่นาโนไบโอเซ็นเซอร์ตรวจวัดแบ่งได้เป็นหลายชนิด ได้แก่ นาโนเซ็นเซอร์เชิงแสง (Optical nanosensor) และนาโนเซ็นเซอร์ทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical nanosensor) เป็นต้น

นาโนไบโอเซ็นเซอร์สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายด้าน ยกตัวอย่างเช่น

- ด้านการแพทย์ ใช้ไบโอเซ็นเซอร์ตรวจวัดกลูโคสในผู้ป่วยโรคเบาหวาน ตรวจวัดเชื้อโรคต่างๆ รวมทั้งเชื้อไวรัสไข้เลือดออก ตรวจวัดฮอร์โมน และสารเสพติดในปัสสาวะ
- ด้านอุตสาหกรรมอาหารและการเกษตร ใช้ไบโอเซ็นเซอร์ตรวจวัดสารพิษ เชื้อโรคปนเปื้อนในอาหาร สารปลอมปนในอาหารส่งออก และสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมักในการผลิตระดับอุตสาหกรรม

- ด้านสิ่งแวดล้อม ใช้ไบโอเซ็นเซอร์ตรวจวัดสารพิษ สารฆ่าแมลง โลหะหนัก และสารมลพิษทางอากาศ
- ด้านการทหาร ใช้ไบโอเซ็นเซอร์ตรวจวัดอาวุธทางชีวภาพ หรืออาวุธเชื้อโรค และสารพิษในยา เป็นต้น

7.2 นาโนอิเล็กทรอนิกส์ (Nanoelectronics)

นาโนอิเล็กทรอนิกส์ (Nanoelectronics) เป็นการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพและสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ตัวอย่างเช่น การพัฒนาระบบไฟฟ้าเครื่องกลขนาดเล็ก การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ การพัฒนานาโนชิพทำให้ออมพิวเตอร์ทำงานได้รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพสูง เป็นต้น

จากปัญหาในการผลิตแผงวงจรรวมหรือไอซีโดยใช้ซิลิกอนซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำ ในการผลิตทรานซิสเตอร์สำหรับทำชิพซึ่งต้องการขั้นตอนที่อาศัยความแม่นยำ และความสะอาดสูง ทั้งยังต้องอาศัยความร่วมมือของผู้เชี่ยวชาญหลากหลายสาขา รวมทั้งขนาดของไมโครชิพที่พยายามลดขนาดลงไปจนถึง 0.05 ไมโครเมตร ซึ่งชิพดังกล่าวมีราคาแพงมาก จากปัญหาดังกล่าวจึงนำไปสู่การสร้างวงจรรีเล็กทรอนิกส์ด้วยโมเลกุล (Molecular electronics) โดยอุปกรณ์แต่ละตัวเป็นแบบอิเล็กตรอนเดี่ยว (Single electron devices) และ โมเลกุลที่ใช้มีสมบัติเป็นเรกติไฟเออร์ (Rectifier) ซึ่งก็คือ ไดโอด เป็นอุปกรณ์พื้นฐานของวงจรรีเล็กทรอนิกส์ อย่างไรก็ตามการต่อเรกติไฟเออร์ดังกล่าวเพื่อสร้างเป็นวงจรรีเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานอย่างสมบูรณ์ ในปัจจุบันยังไม่สามารถทำได้ นอกจากเรกติไฟเออร์แล้วทรานซิสเตอร์ ซึ่งเป็นหน่วยย่อยพื้นฐานหน่วยหนึ่งที่สำคัญสำหรับการสร้างวงจรรีเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) ซึ่งมีแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) ที่สามารถนำอิเล็กตรอนได้ดี สามารถทำเป็นสายไฟระดับโมเลกุลได้

นาโนอิเล็กทรอนิกส์อีกตัวอย่างหนึ่งคือ จมูกอิเล็กทรอนิกส์ใช้สำหรับตรวจหาเชื้อแอนแทรกซ์ที่มีความแม่นยำและรวดเร็ว โดยใช้สมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของโมเลกุลพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าได้เพื่อเป็นกลไกในการตรวจจับ

7.3 นาโนคอมพิวเตอร์

คอมพิวเตอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆในปัจจุบันได้ถูกทำให้มีขนาดเล็กกลงและมีน้ำหนักเบา เช่น Smart phone, iPhone, iPad และ Tablet เป็นต้น แต่อุปกรณ์เหล่านี้กลับสามารถทำงานได้รวดเร็วขึ้น มีระบบปฏิบัติการที่น่าสนใจเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทั้งนี้ก็เพื่อที่จะเพิ่มจำนวนทรานซิสเตอร์ที่บรรจุอยู่ในแผงวงจรรวม (Integrated circuits; IC) ให้มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์มีขนาดเล็กกลง แต่มีประสิทธิภาพสูง

ซิลิกอนเป็นสารกึ่งตัวนำที่จำเป็นต่อการสร้างทรานซิสเตอร์สำหรับประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ เพราะว่าซิลิกอนหาได้ง่าย ราคาถูก ประสิทธิภาพดี และสามารถผลิตได้เป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตามทรานซิสเตอร์ชนิดซิลิกอนยังมีข้อจำกัดบางประการจากการพยายามลดขนาดให้มีขนาดเล็กกลงและบางลง เพราะซิลิกอนมีข้อจำกัดทางฟิสิกส์ ทรานซิสเตอร์ชนิดซิลิกอนที่มีขนาดเล็กประมาณ 0.05 ไมโครเมตร จะไม่สามารถต้านกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งมีสาเหตุดังนี้คือ

- อิเล็กตรอนที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ที่มีขนาดเท่ากับหรือเล็กกว่า 50 นาโนเมตร จะถูกเร่งจากสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เร็วขึ้น จนทำให้เกิดการรั่วไหลของอิเล็กตรอนออกจากทรานซิสเตอร์กลายเป็นพลังงานความร้อน

- เนื่องจากทรานซิสเตอร์มีขนาดเล็กมาก และอยู่ใกล้ชิดกันมากขึ้น จนอาจเป็นสาเหตุให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ทะลุ (Tunneling) ผ่านเกตไปยังอีกด้านหนึ่งของทรานซิสเตอร์ได้โดยไม่ต้องอาศัยกำแพงศักย์ ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้นได้

- ไม่สามารถสร้างวงจรไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กกว่า 50 นาโนเมตร ได้ จากวิธีการสลักวาดลายวงจรด้วยแสงอัลตราไวโอเลต เพราะความยาวคลื่นของแสงยูวีมีขนาดใหญ่กว่าร่องของวงจรไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่บนแผ่นซิลิกอน

นอกจากนี้การลดขนาดของทรานซิสเตอร์สำหรับใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ใช้ในวงจรไมโครชิปต้องใช้ต้นทุนในการผลิตสูง ดังนั้นในการผลิตเชิงพาณิชย์จึงมีข้อจำกัด แต่ข้อจำกัดนี้สามารถแก้ไขได้จากการพัฒนานาโนคอมพิวเตอร์ขึ้นมา การพัฒนาทางด้านนาโนคอมพิวเตอร์แบ่งออกเป็น 4 ประเภทด้วยกันดังนี้คือ

7.3.1 นาโนคอมพิวเตอร์เชิงอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic nanocomputer)

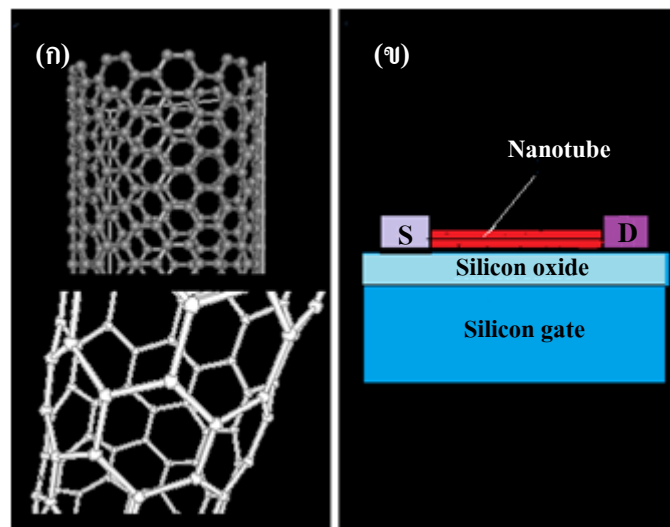
นาโนคอมพิวเตอร์เชิงอิเล็กทรอนิกส์ เป็นนาโนคอมพิวเตอร์ที่มีพื้นฐานการสร้าง และการทำงานคล้ายคลึงกับคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันที่อาศัยหลักการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ แต่ต่างกันตรงที่นาโนคอมพิวเตอร์อาศัยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเพียงตัวเดียว หรือจำนวนน้อยมาก

นาโนคอมพิวเตอร์เชิงอิเล็กทรอนิกส์แบบสถานะของแข็ง (Solid state) เซิงควอนตัม (Solid-state quantum-effect nanoelectronic devices) เป็นนาโนคอมพิวเตอร์ที่อาศัยสถานะทางควอนตัมของสารกึ่งตัวนำ หรือสารประกอบโลหะหนักที่ใช้ประกอบวงจรมานำใช้ในการควบคุมการทำงานของวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ ซึ่งเริ่มต้นจากการที่อิเล็กตรอนที่อยู่ด้านหนึ่งของวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้าหรือช่องว่างไปยังบริเวณ เกาะกลาง (Island) เล็กๆ ที่สังเคราะห์ขึ้นจากสารกึ่งตัวนำหรือออกไซด์ของสารประกอบโลหะหนัก ไปยังอีกด้านหนึ่งของวงจรรีเลย์ ซึ่งคล้ายคลึงกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจาก Source ผ่าน Gate ไปยัง Drain ของทรานซิสเตอร์ในยุคไมโครอิเล็กทรอนิกส์ นาโนคอมพิวเตอร์ชนิดนี้สามารถย่อขนาดของวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ให้เล็กลงได้น้อยที่สุดประมาณ 25 เท่า โดยมีวงจรมีขนาด 5 ถึง 10 นาโนเมตร

นาโนอิเล็กทรอนิกส์เชิงโมเลกุล (Molecular electronic devices) การใช้พันธะโควาเลนต์ของโมเลกุลต่างๆ ทำหน้าที่แทนสายไฟและอุปกรณ์ที่เป็นสวิตช์ปิดและเปิด กล่าวคือ โมเลกุลสามารถทำหน้าที่เป็นไดโอด (Diode) ซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานที่สำคัญชิ้นหนึ่งของวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ โดยการกรองกระแสให้สามารถไหลผ่านได้ทางเดียวโดยโมเลกุลที่มีสมบัติดังกล่าวต้องมีปลายของโมเลกุลด้านหนึ่งทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอน และปลายอีกด้านหนึ่งสามารถรับอิเล็กตรอน และมีบางส่วนของโมเลกุลที่อยู่ระหว่างกลางทำหน้าที่เป็นตัวขัดขวางการไหลของอิเล็กตรอน เพื่อบังคับให้อิเล็กตรอนสามารถไหลผ่านโมเลกุลได้เพียงทางเดียว

ทรานซิสเตอร์โมเลกุลเป็น โมเลกุลที่มีสมบัติเป็นสวิตช์ ทำหน้าที่ยอมให้อิเล็กตรอนไหลผ่านหรือไม่ยอมให้อิเล็กตรอนไหลผ่านโมเลกุล โดยขึ้นอยู่กับข้อกำหนดการไหลของกระแสไฟฟ้าหรือความเข้มแสง หรือทั้งสองอย่างรวมกัน โมเลกุลเดี่ยวที่นำมาใช้เป็น

ทรานซิสเตอร์หรือสวิตช์โมเลกุลมิได้ทั้งโมเลกุลของสารอินทรีย์ หรือโพลิเมอร์นำไฟฟ้า โมเลกุลของสารที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์นี้มีขนาดเล็กเพียง 1.5 นาโนเมตร หรือชิปคอมพิวเตอร์ที่มีพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร สามารถบรรจุสวิตช์โมเลกุลแบบนี้ได้ 1 ล้านล้านโมเลกุล ดังนั้นถ้า นาโนคอมพิวเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์เชิงโมเลกุลทำงานได้จริง จะทำให้คอมพิวเตอร์มีขนาดเล็กลงและมีประสิทธิภาพสูง



ภาพ 7.3 (ก) ท่อนาโนคาร์บอนมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอน เช่น ถ้าโครงสร้างของวงเบนซินเรียงตัวตั้งฉากกับแกนตามแนวยาวของท่อจะทำให้ท่อนาโนมีสมบัติเป็นโลหะสามารถนำไฟฟ้าได้ (ด้านบน) แต่ถ้าวงเบนซินเรียงตัวขนานไปกับแกนตามยาวของท่อจะทำให้ท่อนาโนมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (ด้านล่าง) (ข) ลักษณะของทรานซิสเตอร์ที่มีท่อนาโนคาร์บอนทำหน้าที่เป็นเกต (Gate) (ณัฐพันธุ์, 2011)

ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes) ดังแสดงในภาพ 7.3 ได้รับความสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางนาโนอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากการที่ผนังด้านในของท่อมีแถบนำไฟฟ้าที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี โดยไม่มีความต้านทาน (Superconductors) จึงทำให้ท่อนาโนคาร์บอนถูกนำมาใช้เป็นสายไฟโมเลกุลในวงจรนาโนอิเล็กทรอนิกส์ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้

สมบัติการนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนยังเปลี่ยนแปลงไปตามขนาด ความยาว และเกลียว การหมุนของท่อจึงทำให้ท่อนาโนคาร์บอนถูกนำมาใช้ในการสร้างทรานซิสเตอร์โมเลกุล

7.3.2 นาโนคอมพิวเตอร์เชิงชีวเคมีหรือเคมี (Biochemical or chemical nanocomputer)

นาโนคอมพิวเตอร์เชิงชีวเคมีหรือเคมี ทำงานได้จากการสร้างหรือสลายพันธะทางเคมีหรือชีวเคมี โดยที่สามารถเก็บข้อมูล และทำงานได้จากการปรับเปลี่ยนการจัดเรียงตัวของโครงสร้างทางเคมี และโครงสร้างโมเลกุลของสารต่างๆ หรือจากการวัดปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างสารต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น คอมพิวเตอร์ดีเอ็นเอ (DNA computer) เนื่องจากดีเอ็นเอมีสมบัติหลายประการที่สามารถนำมาใช้เป็นนาโนคอมพิวเตอร์ได้ ข้อมูลที่ถูกจัดเก็บไว้ในสายเกลียวคู่ที่เป็นรหัส 3 ตัวสลับไปมาระหว่างเบส 4 ตัวคือ A T G และ C ทำให้สามารถทราบระบบการทำงานของร่างกายที่ซับซ้อนมากได้ สายดีเอ็นเอที่มีความยาว 1 นิ้วสามารถเก็บข้อมูลได้ถึง 100 ล้านบิต

7.3.3 นาโนคอมพิวเตอร์เชิงควอนตัม (Quantum nanocomputer)

นาโนคอมพิวเตอร์เชิงควอนตัม อาศัยการทำงานตามสถานะทางควอนตัม (Quantum state) สามารถสร้างให้มีความหนาแน่นของวงจรสูงมากได้ ทำงานได้จากการควบคุมสนามแม่เหล็กروبๆ ทำให้ประมวลผลได้อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันที่การประมวลผลทำได้เพียงทีละคำสั่งเท่านั้น ดังนั้นการถอดรหัสลับต่างๆ ที่ยากในปัจจุบันก็จะง่ายขึ้น

7.4 ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคหรือเมมส์ (Microelectromechanical systems, MEMS)

ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคหรือเมมส์ (Micro-electromechanical systems, MEMS) เป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร ประกอบด้วยระบบไฟฟ้าและระบบกลไกเชิงกล สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) แบบเดียวกับที่ใช้ในการผลิตวงจรรวมหรือไอซี (Integrated circuit, IC) แต่อุปกรณ์เมมส์จะแตกต่างไปจากอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่นตรงที่เมมส์สามารถทำงานเชิงกลได้ ตัวอย่างเช่น การทำงานร่วมกันระหว่างเซ็นเซอร์ และแอกทูเอเตอร์ (Actuator) ที่มีขนาดในระดับไมโครเมตร ในลักษณะที่เป็น

งานเชิงกล การพัฒนาอุตสาหกรรมที่มีความจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เมมส์ เช่น อุตสาหกรรม เทคโนโลยีสารสนเทศ เทคโนโลยีหุ่นยนต์ เทคโนโลยียานยนต์ เทคโนโลยีชีวภาพและการแพทย์ รวมทั้งเครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรม เป็นต้น

ระบบไมโคร (Microsystem) เป็นระบบการทำงานร่วมกันระหว่างเครื่องกลระดับไมโคร (Micromechanical structure) ที่ทำงานได้หลากหลาย (Multifunctional materials) และใช้วงจรรีเลย์ทรอนิกส์แบบใช้แสง (Micro-/opto-electronic circuit) เป็นระบบที่ใช้ในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น เอกซุเอเตอร์ เครื่องสูบลมระดับไมโครเมตร (Micro-pump) วาล์ว (Valve) ตัวตรวจจับ (Sensor) ทางกายภาพ ชีวภาพ และเชิงเคมี เป็นต้น

7.5 ระบบเครื่องกลไฟฟ้านาโนหรือเนมส์ (Nanoelectromechanical systems, NEMs)

อุปกรณ์เมมส์ได้รับการออกแบบให้มีโครงสร้างขนาดเล็กลงจนถึงระดับนาโน (น้อยกว่า 100 นาโนเมตร) หรือเรียกว่าระบบเครื่องกลไฟฟ้านาโนหรือเนมส์ (Nanoelectromechanical systems, NEMs) ซึ่งคาดว่าจะเข้ามามีบทบาทในการพัฒนาอุตสาหกรรมด้านต่างๆ หรือส่งเสริมความก้าวหน้าของวิทยาการแขนงอื่นๆ เช่น ทางด้านการแพทย์ การโทรคมนาคมขนส่ง และเทคโนโลยีอวกาศในอนาคต

7.6 นาโนเทคโนโลยีกับการเกษตร (Agriculture nanotechnology)

การนำนาโนเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ทางด้านอุตสาหกรรมอาหารและการเกษตร มีจุดประสงค์เพื่อเป็นการเสริมสร้างความสามารถในการแข่งขันของภาคการเกษตรและอุตสาหกรรมอาหาร รวมทั้งคุ้มครองความปลอดภัยของผู้บริโภค โดยมีแนวทางการประยุกต์ใช้ดังต่อไปนี้

7.6.1 การเพิ่มความปลอดภัยในระหว่างการผลิตและการขนส่งผลผลิตทางการเกษตรและอาหาร (Food safety)

โดยการพัฒนานาโนเซนเซอร์สำหรับใช้ในการตรวจจับสารเคมีตกค้าง เช่น สารอะฟลาทอกซิน (Aflatoxin) ในเมล็ดธัญพืช สารเร่งเนื้อแดงที่พบในเนื้อหมู สารฟอกขาวหรือสารโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ (Sodium hydrosulfite) ในผัก และผลไม้แปรรูป สารบอแรกซ์

(Borax) ที่ปนเปื้อนในเนื้อหมู ลูกชิ้น และผลไม้ดอง สารฟอรัมาลิน (Formalin) ที่ปนเปื้อนในอาหารทะเลและเนื้อสัตว์ และโลหะหนัก เช่น แคดเมียม (Cadmium) ในอาหารทะเล ยาปฏิชีวนะที่ตกค้างในเนื้อสัตว์ เช่น คลอแรมเฟนิคอล (Chloramphenicol) ในเนื้อไก่และกุ้ง สารไนโตรฟูแรนส์ (Nitrofurans) ในกุ้ง หรือจุลินทรีย์ก่อโรคที่ปนเปื้อนในสินค้าการเกษตร และอาหาร เป็นต้น

7.6.2 การพัฒนาอุปกรณ์นาโน (Nanodevices) และวัสดุนาโน (Nanomaterials)

การใช้ดีเอ็นเอชิป (DNA chip) ร่วมกับข้อมูลชีวสารสนเทศ (Bioinformatics) เพื่อตรวจหาชิ้นที่ผิดปกติที่อาจก่อให้เกิดโรครักกับพืชหรือสัตว์เลี้ยง หรือใช้ในการค้นหาชิ้นที่ต้านทานโรค และแมลงศัตรูพืช รวมถึงการค้นหาชิ้นสำคัญที่ทำหน้าที่ควบคุมการเจริญเติบโต ควบคุมปริมาณ และคุณภาพ และควบคุมการตอบสนองต่อสภาวะแวดล้อมต่างๆ ของพืชและสัตว์แต่ละชนิด หรือการพัฒนาเครื่องตรวจวัดนาโน (Nanodetector) ที่มีศักยภาพในการตรวจสอบการทำงานของยีนที่แตกต่างกันจำนวนหลายพันยีนในจีโนมของพืชหรือสัตว์ได้ในเวลาเดียวกัน ซึ่งจะช่วยให้ทราบอย่างรวดเร็วว่ายีนชนิดใดที่ถูกกระตุ้นให้แสดงออก และยีนชนิดใดที่ถูกยับยั้งการทำงานระหว่างที่สัตว์กำลังเจริญเติบโตหรือป่วยเป็นโรค

7.6.3 การใช้นาโนเทคโนโลยีในการเฝ้าระวังและการป้องกันสิ่งแวดล้อมต่างๆ

การพัฒนานาโนเซนเซอร์ในการตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้น ความเป็นกรดด่างของดิน ความเค็มของดิน ปริมาณสารอาหารในดิน เช่น ไนเตรต (Nitrate) และฟอสเฟต (Phosphate) ปริมาณสารพิษ เช่น ไดออกซิน (Dioxins) ตลอดจนเชื้อก่อโรคนชนิดต่างๆ

7.6.4 การพัฒนาวิธีผลิตปุ๋ย ยาปราบศัตรูพืช และสารปรับสภาพดิน (Soil conditioners) ให้กลายเป็นอนุภาคนาโน (Nanoparticles)

ทำให้ช่วยลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมี และยาปราบศัตรูพืช ซึ่งถือว่าการลดมลภาวะของดินในระยะยาว

7.6.5 การวิจัย และพัฒนาเทคนิคการแยกระดับนาโน (Nanoseparation)

การแยกหรือการคัดกรองเอนไซม์ หรือชีวโมเลกุล ที่มีคุณค่าต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมการเกษตรและอาหาร

7.6.6 การใช้นาโนเทคโนโลยีในการเพิ่มมูลค่าของสินค้าทางการเกษตร และผลิตภัณฑ์อาหาร รวมทั้งการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรให้มีคุณค่าทางอุตสาหกรรม

การสกัดแยกไคติน และไคโตซานจากเปลือกกุ้ง เพื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการสร้างวัสดุนำส่งยาหรือสารออกฤทธิ์ เป็นต้น

7.6.7 การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยานาโน (Nanocatalysts)

การผลิตสินค้าทางการเกษตร และอาหาร สามารถลดระยะเวลาให้สั้นลงได้ โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน เช่น การใช้อนุภาคนาโนของทองในการลดระยะเวลาการหมักบ่มไวน์ หรือการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานาโนในการลดเวลาในการเปลี่ยนสภาพของน้ำมันพืช และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรให้กลายเป็นตัวทำละลายที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable solvents) และเชื้อเพลิงชีวภาพ เป็นต้น

7.6.8 การพัฒนาวัสดุแผ่นกรองที่มีรูพรุนในระดับนาโนเมตร

สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตน้ำดื่มบริสุทธิ์ หรือการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม กระบวนการกรองด้วยเยื่อแผ่น สามารถแบ่งได้ 3 วิธี คือ ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis) อัลตราฟิวเตรชัน (Ultrafiltration) และนาโนฟิวเตรชัน (Nanofiltration) แต่วิธีอัลตราฟิวเตรชันไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากมีขนาดรูเปิดของเยื่อกรองใหญ่ ไม่สามารถกรองอนุภาคของเสียออกจากน้ำเสียได้ ส่วนวิธีออสโมซิสย้อนกลับเหมาะสำหรับการกำจัดสีที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ได้แก่ สีแท้ เป็นการกรองแยกน้ำออกจากของแข็งแขวนลอย หรือของแข็งที่ละลายน้ำ โดยผ่านรูพรุนขนาดเล็กและใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อนให้น้ำไหลผ่านตัวกรองเป็นกระบวนการที่ต้องผ่านเยื่อแผ่น 2 ขั้นตอน คือ เยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย และเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล ซึ่งเยื่อแผ่นแรกสามารถกำจัดสีปรากฏซึ่งมาจากโรงฟอกย้อมได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังเยื่อแผ่นที่สอง และสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 94 สำหรับกระบวนการกำจัดสีโดยใช้แผ่นกรองนาโนใช้หลักการเดียวกับการออสโมซิสย้อนกลับ แต่การกรองผ่านแผ่นนาโนมีประสิทธิภาพมากกว่าเนื่องจากมีรูขนาดเล็กกว่า ทำให้แยกสีออกจากน้ำได้ดีกว่าโดยสามารถแยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำออกจากสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น สารอินทรีย์ เชื้อจุลินทรีย์ กรดอินทรีย์

ต่างๆ ซึ่งขนาดของแผ่นกรองส่วนใหญ่เป็นแบบเชิงประกอบที่มีรูพรุนประมาณ 1.5-2.5 นาโนเมตร และมีช่วงความดันที่ใช้ประมาณ 10-34 บาร์ เยื่อแผ่นนาโนสามารถกำจัดสิ่งขุ่นที่ความดัน 10 บาร์ อุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียส มากกว่าร้อยละ 97 และจะลดลงเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะการกรองผ่านด้วยแผ่นนาโน ได้แก่ อัตราการไหลและลักษณะการไหล ความดัน ความเป็นกรดต่าง และอุณหภูมิ เป็นต้น

7.6.9 การพัฒนาวิธีการในการทำให้อาหาร และบรรจุภัณฑ์ปลอดเชื้อก่อนบรรจุ (Sterilization)

เพื่อประสิทธิภาพ และรวดเร็วมากขึ้น รวมทั้งใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายน้อยลง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การพัฒนาการฆ่าเชื้อแบบใช้พลาสมาที่อุณหภูมิต่ำ (Low-temperature plasma treatment) เป็นต้น

7.6.10 การค้นหาวัดวัสดุที่มีสมบัติประกอบตัวเองได้ (Self-assembling materials)

การพัฒนาเทคนิคในการเคลือบผิววัสดุเพื่อใช้ในการสร้างบรรจุภัณฑ์ที่สามารถปกป้องผลผลิตทางการเกษตร และผลิตภัณฑ์อาหาร จากการปนเปื้อนด้วยเชื้อโรค หรือการพัฒนาฟิล์มพลาสติกชนิดวัสดุผสมนาโน (Nanocomposite) ที่สามารถควบคุมอัตราการผ่านของแก๊สออกซิเจน และไอน้ำ เพื่อรักษาความสดของผัก ผลไม้ และเนื้อสัตว์ ตลอดจนการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ที่มีตัวตรวจจับอัจฉริยะ (Smart detectors) ที่สามารถตรวจจับจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสียได้ ทำให้สามารถยืดระยะเวลาในการเก็บสินค้าทางการเกษตร และอาหารไว้ได้นานขึ้น

7.7 นาโนเทคโนโลยีทางด้านอาหาร (Food nanotechnology)

จมูกอิเล็กทรอนิกส์ เป็นอุปกรณ์ที่เลียนแบบการทำงานของจมูกจริงๆ ของมนุษย์ เมื่อหายใจเอาอากาศเข้าไป อากาศจะพาไอของโมเลกุลซึ่งอาจมีกลิ่นเข้าไปในโพรงจมูก ไอของโมเลกุลนั้นจะสัมผัสกับต่อมรับกลิ่นซึ่งอยู่บนเซลล์ประสาทรับกลิ่น โดยปลายข้างหนึ่งของเซลล์จะรวมกันอยู่ที่ต่อมรวมประสาท (Glomeruli) ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณ (Amplifier) แล้วนำสัญญาณส่งไปสู่สมองส่วนที่เรียกว่า Olfactory cortex การรับรู้กลิ่นเกิดจากการทำงานในระดับนาโน กล่าวคือ โมเลกุลของกลิ่นจะเกิดอันตรกิริยาหรือจับตัวเข้ากับโมเลกุลของตัวรับกลิ่น (Receptor) ซึ่งมีอยู่หลากหลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น ถ้าหายใจเอากลิ่นดอกกุหลาบเข้าไป

ไอระเหยของดอกกุหลาบมีโมเลกุลอินทรีย์นับสิบชนิด โมเลกุลอินทรีย์จากดอกกุหลาบสามารถเข้าจับตัวกับโมเลกุลรับกลิ่นในจมูก เกิดรูปแบบขึ้น สมองจะจดจำว่าเป็นกลิ่นดอกกุหลาบ แต่ถ้าเป็นดอกกุหลาบต่างชนิดกันก็อาจมีชนิดของโมเลกุลอินทรีย์ต่างกัน ทำให้สมองจำรูปแบบได้ว่าเป็นชนิดไหน

ระบบการรับรู้กลิ่นมีความซับซ้อน บุคคลที่ได้รับการฝึกในการรับกลิ่น เช่น นักดมกลิ่นน้ำหอม อาจมีความสามารถจดจำกลิ่นได้ถึง 10,000 ชนิด สำหรับบุคคลทั่วไปจะจดจำกลิ่นได้จำนวนในหลักร้อย หรือหลักพัน จมูกมนุษย์มีข้อจำกัดที่ไม่สามารถดมกลิ่นที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง รวมทั้งแก๊สพิษหลายๆ ชนิด เช่น แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ รวมทั้งไม่สามารถระบุกลิ่นในเชิงปริมาณได้ รู้เฉพาะความแรงหรืออ่อนของกลิ่นเท่านั้น ดังนั้นจึงมีการสร้างจมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic nose) เพื่อเลียนแบบจมูกมนุษย์ขึ้น

ระบบรับรู้กลิ่นตามธรรมชาติประกอบด้วย

- ส่วนรับกลิ่น (ตัวรับกลิ่น และระบบนำกลิ่น)
- ระบบนำสัญญาณประสาท (ระบบส่ง และขยายสัญญาณ)
- ระบบประมวลผล (แยกแยะ และจดจำกลิ่น)

ดังนั้นจมูกอิเล็กทรอนิกส์จึงมีลักษณะที่เลียนแบบระบบรับรู้กลิ่นในธรรมชาติ ดังนี้คือ

- ส่วนรับกลิ่น ประกอบไปด้วยตัวนำกลิ่นซึ่งอาจมีมอเตอร์ดูดอากาศ มีท่อรวบรวมกลิ่น (Concentrator) เพื่อให้กลิ่นมีความเข้มข้นสูงขึ้น และที่สำคัญที่สุดก็คือ เซ็นเซอร์รับกลิ่นจำนวนมาก 4 ถึง 1,000 ตัว

- ส่วนรวบรวมสัญญาณ ทำการแปรสัญญาณจากตัวตรวจจับ และทำการจัดการสัญญาณ (Signal conditioning) เช่น ลดสัญญาณรบกวน จากนั้นก็จะแปลงสัญญาณจากอนาล็อกให้เป็นดิจิทัล (A/D converter)

- ส่วนประมวลผล นำสัญญาณที่ได้รับเปรียบเทียบกับเชิงสถิติกับฐานข้อมูลที่มีอยู่เดิม ซึ่งใช้วิธีระบบประสาทเทียม (Artificial neural networks) เพื่อทำการแยกแยะกลิ่น รวมไปถึงการเรียนรู้ และจดจำรูปแบบของกลิ่น

การประยุกต์ใช้งานจุมุกอิเล็กทรอนิกส์ทางด้านอาหาร ยกตัวอย่างเช่น

- การวัดความสุกของผลไม้ นำจุมุกอิเล็กทรอนิกส์รับคลื่นจากผลไม้ แล้วให้ค่าความสุกของผลไม้ตามระดับตัวเลขที่ได้กำหนดไว้
- การควบคุมคุณภาพของไวน์ และเครื่องดื่ม จุมุกอิเล็กทรอนิกส์สามารถจำแนกยี่ห้อของไวน์ได้ และสามารถจำแนกไวน์ยี่ห้อเดียวกันแต่ผลิตในปีที่ต่างกัน ได้ ดังนั้นจุมุกอิเล็กทรอนิกส์จึงสามารถจำแนกไวน์แท้หรือปลอมได้อย่างรวดเร็ว
- การตรวจวัดความสดของปลา กุ้ง เนื้อสัตว์ จุมุกอิเล็กทรอนิกส์สามารถจำแนกระดับความสดของเนื้อสัตว์ได้ ทำให้ผู้ผลิตอาหารแช่แข็งเพื่อส่งออก รวมทั้งสามารถประเมินระดับความสดของผลิตภัณฑ์ได้
- การประเมินคุณภาพของชา และกาแฟ จุมุกอิเล็กทรอนิกส์สามารถระบุความหอมของชา และกาแฟได้

บรรณานุกรม

1. ณัฐพันธุ์ ศุภกา. 2011. ก้าวสู่ยุคนาโนอิเล็กทรอนิกส์. **Bio & Nano**. 38: 32-37.
2. ณัฐพันธุ์ ศุภกา. 2010. Nanobiotechnology ในอุตสาหกรรมอาหารและการเกษตร. **Bio & Nano**. 37: 32-34.
3. ยอดหทัย เทพธรานนท์ และประมวล ตั้งบริบูรณ์รัตน์. 2545. **นาโนเทคโนโลยี: เทคโนโลยีซูเปอร์จิ๋ว**. พิมพ์ลักษณ์, กรุงเทพฯ: มูลนิธิบัณฑิตยสภาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 620 น.
4. วรวิภา เจริญศิริ. 2552. **นาโนเทคโนโลยีทางการแพทย์**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://52011211096.blogspot.com/2012/05/blog-post.html> (15 มีนาคม 2555)
5. ศิริศักดิ์ เทพาคำ. **นาโนเทคโนโลยี คลื่นลูกใหม่แห่งวงการวิทยาศาสตร์**. นักวิชาการศูนย์พันธุ์วิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://school.obec.go.th/thungmapraw_liberry/word/nano.html (15 มีนาคม 2555)
6. ศุภกร ภู่เกิด, อุดม ทิพราช, ทิพวรรณ สายพิณ, 2549. **วัสดุนาโน (Nanomaterials)**. วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 8: 27-40.
7. อรุษา รังสาตทอง. 2552. **นาโนเทคโนโลยีกับการรักษาโรคมะเร็ง**. ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.vcharkarn.com/varticle/38387> (15 มีนาคม 2555)
8. Textileinfo. **Nanotechnology product**. [Online]. Available <http://textileinfo.com/en/tech/three/05.html> (15 March 2012)

คำถามท้ายบท

- 7.1 แนวคิดการสร้างหุ่นยนต์นาโน ถูกเสนอขึ้นเพื่อนำมาใช้ประโยชน์อย่างไร
- 7.2 หากแนวคิดเกี่ยวกับการสร้างจักรกลโมเลกุลสามารถทำได้ในเวลาอีกไม่นาน แนวโน้มของการพัฒนาจะเป็นไปในทิศทางใด และเกี่ยวข้องกับสิ่งใดบ้าง
- 7.3 คอมพิวเตอร์นาโนในอนาคตมีการนำเสนอโดยแบ่งได้เป็นกี่แบบ อะไรบ้าง และนำมาใช้อย่างไร
- 7.4 จงบอกข้อจำกัดของทรานซิสเตอร์ชนิดซิลิกอนที่นำไปสู่การพัฒนานาโนคอมพิวเตอร์
- 7.5 คอมพิวเตอร์ในยุคปัจจุบันกับนาโนคอมพิวเตอร์แตกต่างกันอย่างไร
- 7.6 การพัฒนานาโนคอมพิวเตอร์เชิงอิเล็กทรอนิกส์ แบ่งเป็นกี่แนวทาง คืออะไรบ้าง อธิบาย
- 7.7 ระบบ Microelectromechanical systems, MEMs คืออะไร ยกตัวอย่างประกอบ
- 7.8 จงยกตัวอย่างนาโนเทคโนโลยีกับการเกษตร พร้อมทั้งอธิบาย
- 7.9 Electronic Nose คืออะไร อธิบายหลักการทำงาน พร้อมทั้งระบุว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานอะไรได้บ้าง

บทที่ 8

การประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยี:

- 8.1 ประยุกต์ใช้ทางด้านสิ่งแวดล้อม
 - 8.1.1 การบำบัดสิ่งปนเปื้อนที่เป็นสารอินทรีย์ในน้ำโดยการย่อยสลายด้วยแสง (Photocatalytic activity)
 - 8.1.2 วัสดุที่สามารถทำความสะอาดหรือกำจัดสิ่งสกปรกได้ด้วยตัวเอง (Self cleaning)
 - 8.1.2.1 พื้นผิวทำความสะอาดตัวเอง
 - 8.1.2.2 เลื่อนาโน
- 8.2 ประยุกต์ใช้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์
 - 8.2.1 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยแสง (Solar cells)
 - 8.2.1.1 พารามิเตอร์ที่บอกสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์
 - 8.2.1.2 ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์
 - 8.2.2 การตรวจวัดแก๊ส (Gas sensor) ของอนุภาคนาโนของสารประกอบออกไซด์
- 8.3 ประยุกต์ใช้ทางด้านสิ่งทอ
- 8.4 ประยุกต์ใช้ทางการแพทย์

8.1 ประยุกต์ใช้ทางด้านสิ่งแวดล้อม

8.1.1 การบำบัดสิ่งปนเปื้อนที่เป็นสารอินทรีย์ในน้ำโดยการย่อยสลายด้วยแสง (Photocatalytic activity)

8.1.1.1 หลักการของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส (Fundamental of photocatalysis reaction)

กระบวนการโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic Process) เป็นการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวกระตุ้นหรือตัวแคตาลิสต์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากการถูกกระตุ้นด้วยแสง ซึ่งปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส มีองค์ประกอบที่สำคัญ ดังนี้คือ

- ตัวแคตาลิสต์ เช่น สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) จำพวกซิงก์ออกไซด์ (ZnO) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) เป็นต้น
- พลังงานแสง ที่มีต้องมีค่าพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับค่าพลังงานช่องว่าง (Band gap) ของตัวแคตาลิสต์
- น้ำ (H₂O)
- ออกซิเจนหรือตัวออกซิแดนท์ (Oxidants)

8.1.1.2 พลังงานแสง

การฉายแสงในกระบวนการโฟโตแคตาไลติก เป็นการให้พลังงานกับระบบในรูปของพลังงานโฟตอน (Photon energy) ที่มีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ ซึ่งพลังงานดังกล่าวนี้ เรียกว่า พลังงานกระตุ้น (Activation energy) สามารถคำนวณได้จากสมการ 8.1 ดังนี้

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad \dots\dots\dots (8.1)$$

เมื่อ E คือพลังงานโฟตอน (Photon energy) (J)

h คือค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) มีค่าเท่ากับ 6.625×10^{-34} J.s

ν คือความถี่ของแสง (Hz)

λ คือความยาวคลื่นแสง (nm)

c คือความเร็วของแสง มีค่าเท่ากับ 2.997×10^8 m/s

พลังงานของแสงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นลดลง ดังแสดงไว้ในภาพ 5.14 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของพลังงานกับความยาวคลื่น โดยสเปกตรัมของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet, UV) มีความยาวคลื่นของแสง อยู่ในช่วง 100-400 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นแสงที่ได้รับความสนใจในการศึกษาสำหรับกระบวนการโฟโตแคตาไลติก สำหรับความยาวคลื่นแสงที่สามารถมองเห็นได้หรือแสงขาว (Visible) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 380-750 นาโนเมตร

รังสีอัลตราไวโอเล็ต แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงคือ

- รังสีอัลตราไวโอเล็ต ที่มีความยาวคลื่นยาว (Long Wave U, UV-A) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-320 นาโนเมตร

- รังสีอัลตราไวโอเล็ต ที่มีความยาวคลื่นกลาง (Middle Wave UV, UV-B) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 320-280 นาโนเมตร

- รังสีอัลตราไวโอเล็ต ที่มีความยาวคลื่นสั้น (Short Wave UV, UV-C) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 280-200 นาโนเมตร

ในกระบวนการโฟโตแคตาไลติกจะใช้ตัวแคตาลิสต์ ที่มีค่าพลังงานช่องว่าง (Band gap) ที่เหมาะสม เพื่อให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสเกิดขึ้นได้ ยกตัวอย่างเช่น ซิงก์ออกไซด์เป็นตัวแคตาลิสต์ที่นิยมนำมาใช้ เนื่องจากซิงก์ออกไซด์มีพลังงานช่องว่างประมาณ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้นการให้พลังงานกับระบบต้องให้พลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานช่องว่างของซิงก์ออกไซด์ ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสจึงจะเกิดขึ้นได้ ซึ่งช่วงความยาวคลื่นของแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตร จะให้ค่าพลังงานที่มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานช่องว่างของซิงก์ออกไซด์ (จากการพิจารณาตามสมการ 8.1) แต่เนื่องจากแสงอาทิตย์ที่ส่งมายังพื้นผิวโลกมีช่วงแสงที่เป็นแสงอัลตราไวโอเล็ตในปริมาณน้อยมาก คือเฉพาะช่วงความยาวคลื่น 350-400 นาโนเมตร เท่านั้น ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพของซิงก์ออกไซด์ให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงแสงที่สามารถมองเห็นหรือช่วงแสงขาว ซึ่งวิธีหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของซิงก์ออกไซด์คือ การเติมโลหะทรานซิชันลงในสารกึ่งตัวนำซิงก์ออกไซด์ในขั้นตอนของกระบวนการสังเคราะห์ รวมทั้งการลดขนาดให้มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร เป็นต้น

8.1.1.3 ประเภทของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส

ประเภทของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส แบ่งออกเป็น 2 ประเภท เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวแคตตาลิสต์ ดังนี้คือ

- ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสแบบสถานะเดียว (Homogeneous photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวแคตตาลิสต์ซึ่งมีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด โดยทั่วไปเป็นของเหลว เช่น การย่อยสลาย 2,4 dinitrotoluene โดยใช้ UV/H₂O₂

- ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสแบบสถานะต่าง (Heterogeneous photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวแคตตาลิสต์ ซึ่งมีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่น การย่อยสลาย 2-chlorophenol โดยใช้ UV/TiO₂

ตัวแคตตาลิสต์ จำพวกสารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้ในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสอีกชนิดหนึ่ง คือไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ มีความสามารถในการละลายต่ำ มีความเสถียรสูง นอกจากนี้จากการศึกษาเปรียบเทียบสารกึ่งตัวนำหลากหลายชนิดที่นำมาใช้ในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส พบว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบแขวนลอยสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าพลังงานช่องว่างประมาณ 3.2 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งเท่ากับพลังงานช่องว่างของซิงก์ออกไซด์ ทำให้ต้องใช้พลังงานแสงในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต (ความยาวคลื่น ≤ 400 นาโนเมตร) ซึ่งเป็นช่วงแสงที่ส่งลงมาบนพื้นโลกน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ไม่สามารถใช้แสงธรรมชาติได้ ดังนั้นในการทดลองจึงต้องใช้แสงจากหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ต เป็นแหล่งกำเนิดแสงแทน

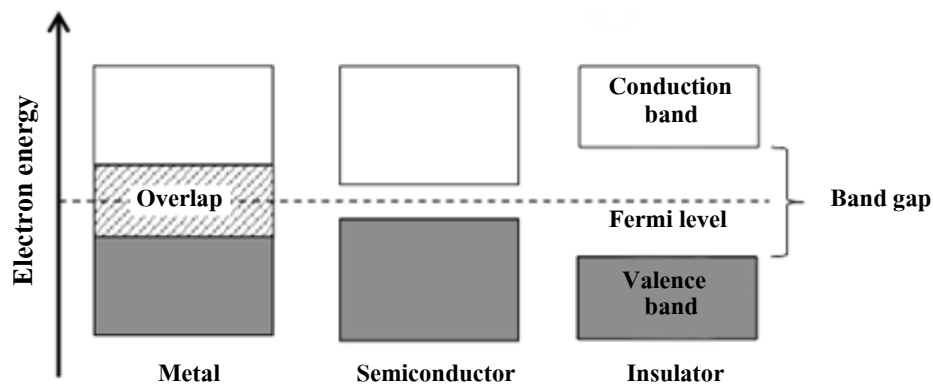
8.1.1.4 ประเภทของตัวแคตตาลิสต์

สารที่ใช้เป็นตัวแคตตาลิสต์ในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส ยกตัวอย่าง เช่น

- กลุ่มโลหะตัวนำ (Transition Metal) เช่น ทองแดง (Copper, Cu) โครเมียม (Chromium, Cr) นิกเกิล (Nickel, Ni) เป็นต้น

- กลุ่มสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO₂) แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium sulfide, CdS) ซิงก์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) เป็นต้น

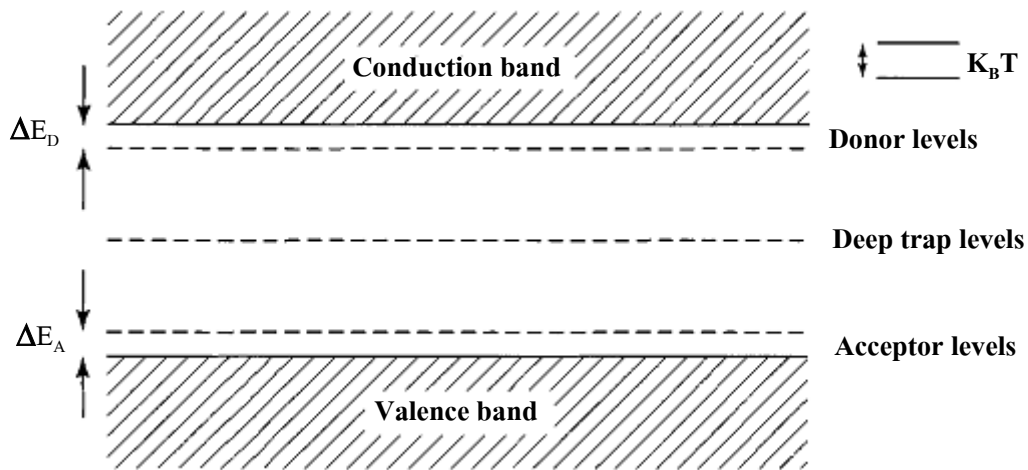
แถบพลังงานของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยแถบวาเลนซ์ (Valence band) และแถบคอนดักชัน (Conduction band) ในโลหะตัวนำจะมีแถบวาเลนซ์และแถบคอนดักชันซ้อนทับกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำแถบวาเลนซ์และแถบคอนดักชันจะไม่ติดกัน โดยเกิดเป็นช่องว่างซึ่งเรียกว่าช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap) เมื่ออิเล็กตรอน (Electron, e^-) ที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานโฟตอนจากแสง (E) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังแถบคอนดักชัน ในขณะที่บริเวณแถบวาเลนซ์จะเกิดช่องว่างหรือโฮล (Hole, h^+) ซึ่งเป็นประจุบวก ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในแถบวาเลนซ์ ส่วนแถบคอนดักชันอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากแถบวาเลนซ์เคลื่อนที่ไปอย่างอิสระทั่วแถบคอนดักชันเช่นกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-Hole pairs, e^-/h^+) สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบคอนดักชันได้ง่ายและรวดเร็ว เพราะไม่มีช่องว่างแถบพลังงาน ดังนั้นจึงทำให้ e^-/h^+ รวมตัวกันใหม่ได้ง่าย ในขณะที่การรวมตัวกันใหม่ของ e^-/h^+ ในสารกึ่งตัวนำเกิดได้ยาก เนื่องจากมีช่องว่างแถบพลังงานคั่นอยู่ทำให้คู่อิเล็กตรอน-โฮลแยกจากกันได้นาน แถบพลังงานของโลหะตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวน แสดงในภาพ 8.1



ภาพ 8.1 แถบพลังงานของโลหะ (Metal) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และฉนวน (Insulator)

ในสภาวะปกติ ณ อุณหภูมิห้อง สารกึ่งตัวนำจะมีสมบัติเป็นตัวนำได้บ้าง ทั้งนี้เนื่องจากมีพลังงานช่องว่าง (Energy gap, E_g) เข้าใกล้พลังงานความร้อน (Thermal energy) $k_B T$

และความร้อนในตัววัสดุ จะกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนส์ให้สามารถขึ้นไปยังแถบคอนดักชัน ที่ซึ่งทำให้เกิดการไหลของกระแสได้ แต่ปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นคอนดักชันจากกระบวนการกระตุ้นทางความร้อน (Thermal excitation process) นี้ยังน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุโลหะ ดังนั้นสภาพการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำในสภาวะปกติ ณ อุณหภูมิห้องจึงน้อย ดังแสดงในภาพ 8.2

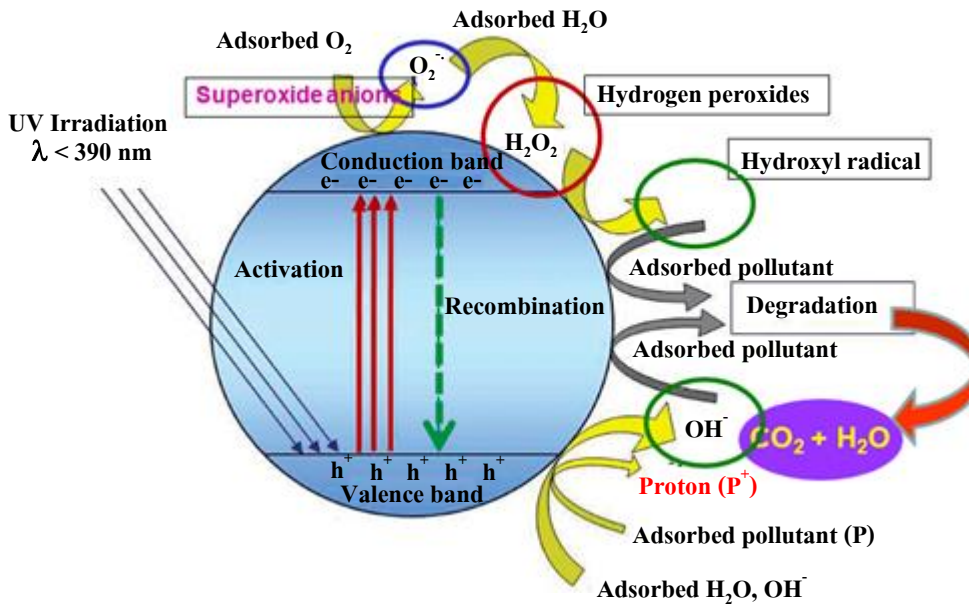


ภาพ 8.2 แผนภาพจำลองของช่องว่างพลังงานแสดงระดับพลังงานตัวให้ (Acceptor levels, ΔE_A) (เหนือด้านบนของแถบวาเลนส์) ระดับพลังงานตัวรับ (Donor levels, ΔE_D) (ด้านล่างของแถบคอนดักชัน) และตรงกลางช่องว่างแสดงระดับพลังงานการกักอิเล็กตรอน (Trap levels) (Poole and Owens, 2003)

8.1.1.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส (Mechanism of photocatalysis reaction)

ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสของตัวแคตาลีสต์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ประกอบด้วยแสงที่ส่องผ่านน้ำไปยังตัวแคตาลีสต์ ซึ่งเป็นแสงที่มีพลังงานโฟตอน (E) ที่สูงกว่าพลังงานของแถบช่องว่างของตัวแคตาลีสต์ พลังงานโฟตอนจะกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนส์ให้

เคลื่อนที่ไปยังแถบคอนดักชัน ผลคือทำให้เกิด e^- และ h^+ กระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในภาพ 8.3



ภาพ 8.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสบนสารกึ่งตัวนำ (Kruefu et al., 2011)

ปฏิกิริยาที่เกิดบนผิวแถบคอนดักชัน และปฏิกิริยาที่เกิดในสารละลายอธิบายได้ ดังนี้ คือ จากภาพ 8.3 เมื่อตัวแคตาลิสต์ได้รับการกระตุ้นด้วยพลังงานแสงที่มีค่าพลังงานมากกว่าพลังงานช่องว่างของตัวแคตาลิสต์ จะทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนส์กระโดดขึ้นไปยังแถบคอนดักชัน จากนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากแถบคอนดักชัน ไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) ในสารละลาย เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ขึ้น ส่วนบริเวณแถบวาเลนส์ ซึ่งมีโฮลจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยสารละลายทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron donor) ในสภาวะปกติความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของอิเล็กตรอนที่แถบคอนดักชันไม่มีศักยภาพพอที่จะบำบัดสารอินทรีย์ได้ แต่เนื่องจากในระบบบำบัดมีออกซิเจน (O_2) ละลายน้ำอยู่ ออกซิเจนนี้จะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนจากแถบคอนดักชัน เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (Superoxide radical, $O_2^{\cdot -}$) ซึ่งเป็นตัว

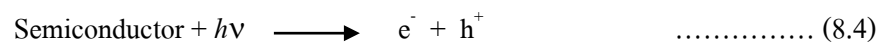
ออกซิแดนซ์ที่ต่ำมาก สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ได้ และในทางตรงกันข้าม โสลที่แถบวาเลนซ์เป็นตัวออกซิแดนซ์ที่ต่ำมากเช่นกัน

สมการการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสในการย่อยสลายสารอินทรีย์แสดงดังสมการ 8.2 และสมการ 8.3 ซึ่งมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ คือ บริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำที่มีโซล (h^+) จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และน้ำ เกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดดิคัล (OH^\cdot) และแรดดิคัลตัวอื่น ดังแสดงในสมการ 8.5 และสมการ 8.6 ส่วนที่ผิวของสารกึ่งตัวนำที่มีอิเล็กตรอนจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนที่บนผิวของสารกึ่งตัวนำเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออนแรดดิคัล ($O_2^{\cdot-}$) เปอร์ไฮดรอกซิลแรดดิคัล (OH_2^\cdot) ดังสมการ 8.7 และสมการ 8.8 และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ดังแสดงในสมการ 8.9 และสมการ 8.10 ในขณะที่เกิดปฏิกิริยามีออกซิเจนไม่เพียงพอ โฟตอนซึ่งเกิดจากการแตกตัวของน้ำจะเข้ามา มีบทบาทเข้ารับอิเล็กตรอนแทน เกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดดิคัล (Hydrogen radical, H^\cdot) ตามสมการ 8.11 ไฮดรอกซิลแรดดิคัล เป็นสารออกซิแดนซ์หลักในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส เพราะไฮดรอกซิลแรดดิคัล เป็นสารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา และทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ได้ทุกชนิด การเกิดแรดดิคัลต่างๆ แสดงได้ตามสมการดังนี้

การบำบัดสารอินทรีย์



การกระตุ้น



การเกิดแรดดิคัลจาก e^-/h^+





การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล (Electron-hole recombination)



เมื่อ h^+ คือ โฮลที่วาเลนซ์แบนด์ (Valence band hole)

e^- คือ อิเล็กตรอน (Electron)

OH^\cdot คือ ไฮดรอกซิลแรดดิคัล (Hydroxyl radical)

O_2^\cdot คือ ซุปเปอร์ออกไซด์ไอออนแรดดิคัล (Superoxide ion radical)

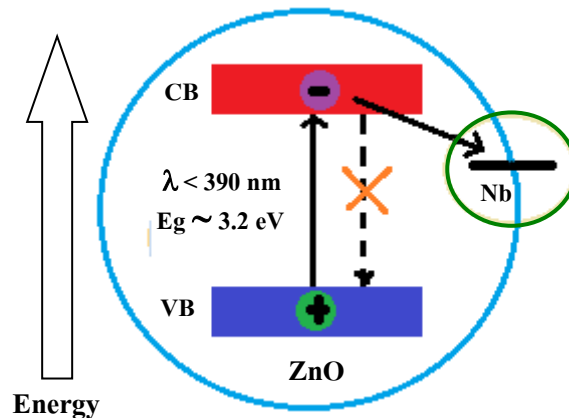
OH_2^\cdot คือ เพอร์ไฮดรอกซิลแรดดิคัล (Perhydroxyl radical)

H^\cdot คือ ไฮโดรเจนแรดดิคัล (Hydrogen radical)

เนื่องจากไฮดรอกซิลแรดดิคัล และ โฮล ที่ผิวของตัวแคตาลิสต์มีประจุบวก การออกซิไดซ์ของโฮลกับไฮดรอกไซด์ไอออน ได้ไฮดรอกซิลแรดดิคัล และขณะเดียวกันโฮลเกิดจากการออกซิไดซ์โดยตรงของสารอินทรีย์ที่อยู่บนตัวแคตาลิสต์กับโฮลด้วย ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโฟโตแคตาไลซิส จึงเกิดขึ้นได้ทั้ง 2 ทาง กล่าวคือ

- การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโฮลกับไฮดรอกไซด์ไอออนหรือน้ำ ได้ไฮดรอกซิลแรดดิคัล และปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนกับออกซิเจนหรือไฮโดรเจนไอออน ได้ซุปเปอร์ออกไซด์ไอออนแรดดิคัล เพอร์ไฮดรอกซิลแรดดิคัล หรือไฮโดรเจนแรดดิคัล

- การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงของสารอินทรีย์ที่อยู่บนตัวแคตาลิสต์กับโฮล ซึ่งความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์มีมากกว่าความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนตัวแคตาลิสต์



ภาพ 8.4 การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล (Kruefu et al., 2011)

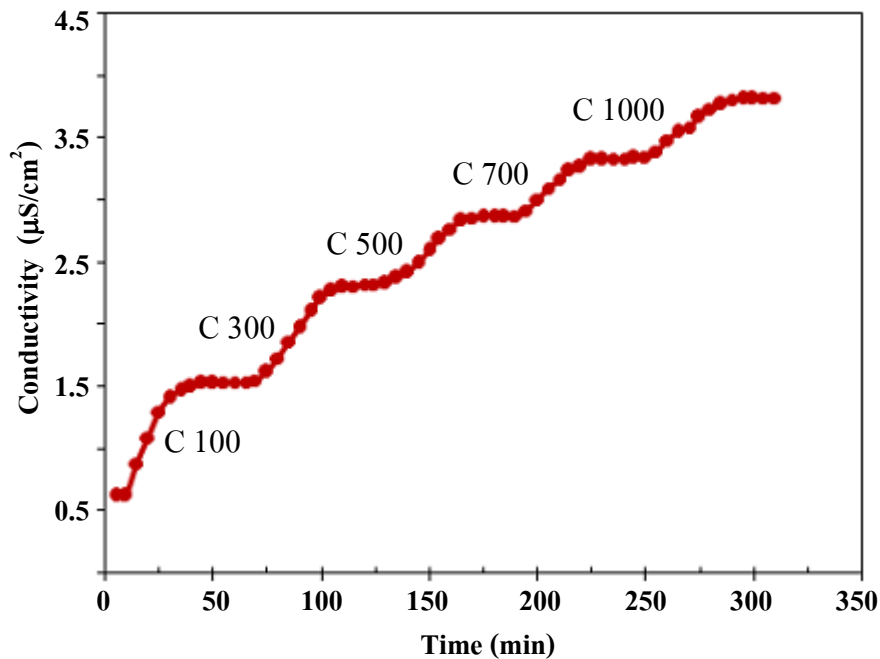
ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสจะเกิดขึ้นน้อยลงเมื่อมีการรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล ดังแสดงในสมการ 8.12 เนื่องจากจะมีความร้อนเกิดขึ้น ดังนั้นสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ โดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสควรให้มีการเกิดขึ้นของการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล น้อยที่สุด เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ที่แถบคอนดักชันของอิเล็กตรอนมากที่สุด ปฏิกิริยาการย่อยสลายก็จะเกิดได้เร็วขึ้น ซึ่งสามารถทำได้วิธีหนึ่ง คือ การเจือโลหะบางชนิด เช่น ไนโอเบียม (Nb) ทอง (Au) หรือ แพลทินัม (Pt) เป็นต้น ลงไปในโลหะของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นตัวแคตาลิสต์ โดยโลหะที่เจือลงไปเหล่านี้ เมื่อไปเกาะที่ผิวของตัวแคตาลิสต์ ดังแสดงในภาพ 8.4 จะทำหน้าที่ในการจับ (Trap) อิเล็กตรอนไว้ ไม่ให้เกิดการรวมตัวกับโฮล จึงสามารถลดการเกิดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอน และโฮลได้

8.1.1.6 การศึกษาปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสซึ่งก่อกำเนิดในการกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ

1. การสอบเทียบโฟโตแคตาไลติกรีดักเตอร์

ทำการสอบเทียบความสามารถของโฟโตแคตาไลติกรีดักเตอร์ ด้วยซึ่งก่อกำเนิดที่เตรียมด้วยกระบวนการเฟลมสเปร์ไฟโรลิซิส โดยใช้ปริมาณของผงซึ่งก่อกำเนิดบริสุทธิ์ 0.05 กรัม ผสมกับน้ำปราศจากไอออนจนมีปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ใน

รีแอคเตอร์ และทำการฉีดเมทานอล ที่มีจำนวนคาร์บอน 100, 300, 500, 700 และ 1000 อะตอม ตามลำดับ และทำการบันทึกค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นโดยใช้โปรแกรม Cybercom 500 ได้ผลดัง แสดงในภาพ 8.5



ภาพ 8.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้า และเวลา เมื่อฉีดเมทานอลที่มีจำนวนคาร์บอน 100, 300, 500, 700 และ 1,000 อะตอม ตามลำดับ ลงใน โฟโตแคตาไลติกรีแอคเตอร์ ที่มีซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (วิรัชชา, 2556)

จากภาพ 8.5 พบว่าเมื่อทำการฉีดเมทานอลที่มีจำนวนคาร์บอน 100, 300, 500, 700 และ 1,000 อะตอม ตามลำดับ ลงใน โฟโตแคตาไลติกรีแอคเตอร์ ที่มีซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง พบว่าในช่วงที่ฉีดเมทานอลลง โฟโตแคตาไลติกรีแอคเตอร์ ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นสัดส่วน โดยตรงกับเวลา ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากจำนวนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นจากการสลายตัวของเมทานอล และเมื่อการสลายตัวเสร็จสิ้นค่า

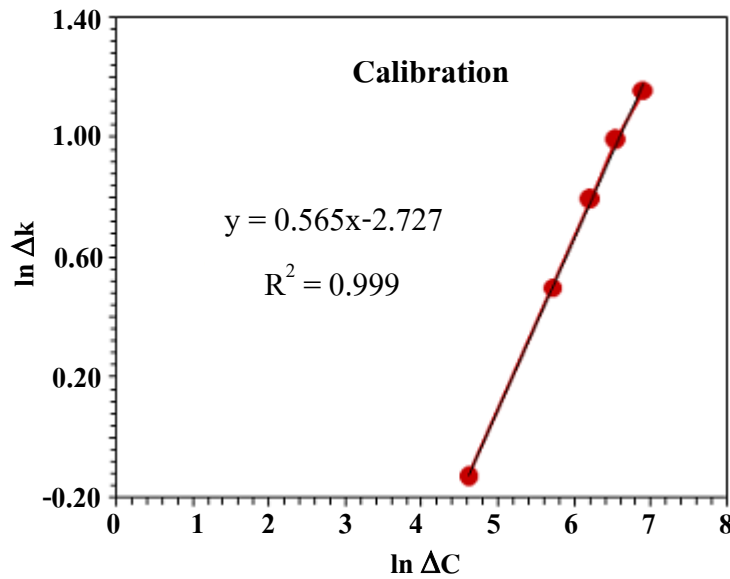
การนำไฟฟ้าจะคงที่กับเวลา ดังแสดงในภาพช่วงที่กราฟมีค่าคงที่ ซึ่งค่านำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนคาร์บอนที่เกิดขึ้น

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับเวลา สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนคาร์บอนที่เกิดขึ้น (ΔC) กับค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (ΔK) ซึ่งจำนวนคาร์บอนที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของเมทานอลที่ถูกย่อยสลาย ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาทราบว่า $\ln(\Delta C)$ และ $\ln(\Delta K)$ มีความสัมพันธ์กันแบบเป็นเชิงเส้น จึงนำค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น และจำนวนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น คำนวณหาค่า $\ln(\Delta C)$ และ $\ln(\Delta K)$ เพื่อใช้คำนวณหาสมการความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันต่อไป ได้ผลดังแสดงในตาราง 8.1

ตาราง 8.1 ค่าการนำไฟฟ้า และจำนวนคาร์บอนที่อยู่โพโตแคตาไลติกรีแอกเตอร์ในช่วงเวลาต่างๆ และค่า $\ln(\Delta C)$ และ $\ln(\Delta K)$ ที่คำนวณได้ (วิรันธชา, 2556)

จำนวนคาร์บอน (μg)	$\ln(\Delta C)$	ค่าการนำไฟฟ้า ($k, \mu\text{S/cm}$) (Initial value, $k = 0.62$)	Δk	$\ln(k)$	$\ln(\Delta k)$
100	4.61	1.4990	0.8790	0.40	-1.03
300	5.70	2.2700	1.6500	0.82	0.50
500	6.21	2.8340	2.2140	1.04	0.79
700	6.55	3.3200	2.7000	1.20	0.99
1000	6.91	3.8080	3.1880	1.34	1.16

เมื่อกำหนดค่าต่างๆ ในตาราง 8.1 เรียบร้อยแล้ว ทำการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\Delta C)$ และ $\ln(\Delta K)$ โดยนำค่า $\ln(\Delta C)$ และ $\ln(\Delta K)$ ในตาราง 8.1 มาเขียนกราฟ โดย $\ln(\Delta C)$ เป็นค่าในแกน x และ $\ln(\Delta K)$ เป็นค่าในแกน y ดังแสดงในภาพ 8.6



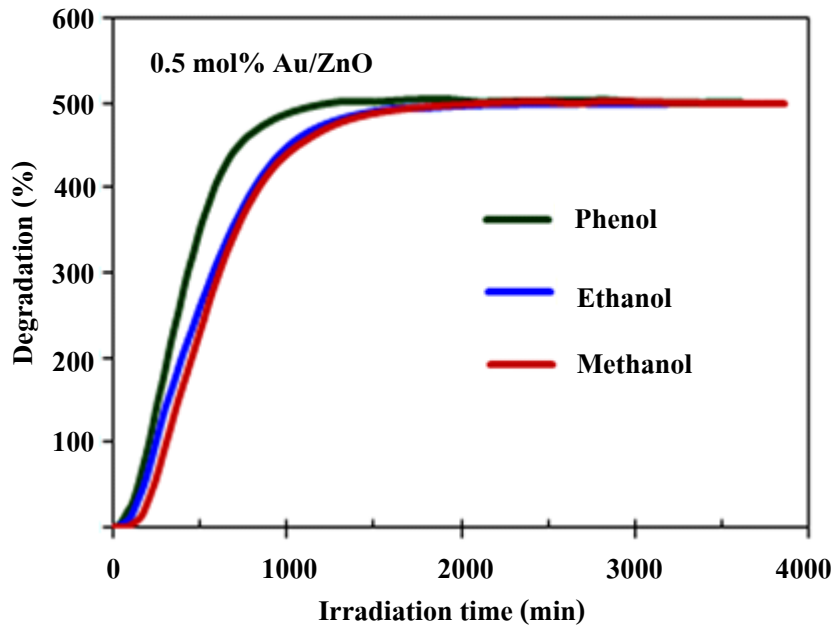
ภาพ 8.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\Delta C)$ และ $\ln(\Delta K)$ เมื่อ C คือ จำนวนคาร์บอนอะตอมในรีแอกเตอร์ และ K คือ ค่าการนำไฟฟ้า (วิรัชชา, 2556)

จากภาพ 8.6 พบว่าค่าของ $\ln(\Delta C)$ และ $\ln(\Delta K)$ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกันจริง โดยมีค่า R-squared เท่ากับ 0.999 ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1 มาก แสดงให้เห็นว่าสมการเส้นตรงที่คำนวณได้มีความน่าเชื่อถือสูง ซึ่งสมการที่คำนวณได้มีค่า $y = 0.565x - 2.727$ หรือเขียนได้เป็น $\ln(\Delta K) = 0.565\ln(\Delta C) - 2.727$ ซึ่งสมการนี้จะนำไปใช้ในการเปลี่ยนค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้โดยเครื่องโฟโตแคตาลิติกรีแอกเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง สำหรับเทียบเป็นปริมาณของสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายในการทดลองต่อไป

2. การทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสำหรับการย่อยสลายเมทานอล เอทานอล และ ฟีนอล

การทดสอบ และเปรียบเทียบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์ และซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทอง 0.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ที่สังเคราะห์ได้

โดยกระบวนการเฟลมสเปรย์ไฟโรลิซิส โดยการย่อยสลายเมทานอล เอทานอล และฟีนอล ในเครื่องโฟโตแคทาไลติกรีแอกเตอร์ ดังแสดงผลในภาพ 8.7



ภาพ 8.7 ปริมาณเมทานอล เอทานอล และฟีนอล ที่ถูกย่อยสลายในช่วงเวลาต่างๆ เมื่อใช้ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทอง 0.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาคู่ด้วยแสง (วิรัชชา, 2556)

จากภาพ 8.7 กราฟแสดงปริมาณสารอินทรีย์ (เมทานอล เอทานอล และฟีนอล) ที่ย่อยสลายเทียบกับเวลา ทุกกราฟมีลักษณะคล้ายกัน คือ คล้ายตัวเอส (S) โดยการย่อยสลายสารอินทรีย์อาจแบ่งออกเป็น 4 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 คือช่วงสั้นๆ หลังจากฉีดสารใส่รีแอกเตอร์ การย่อยสลายจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ช่วงที่ 2 การย่อยสลายสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ความชันในกราฟเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ช่วงที่ 3 การย่อยสลายสารอินทรีย์จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ อีกครั้ง ความชันในกราฟน้อยกว่ช่วงที่ 2 และช่วงที่ 4 เป็นช่วงในการย่อยสลายสารอินทรีย์เสร็จสิ้นแล้ว ไม่มีการย่อยสลายเพิ่มขึ้นกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง

สำหรับความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงวัดจากเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายหลังจากที่ฉีดสารอินทรีย์ลงในเครื่องโฟโตแคตาไลติกรีแอกเตอร์จนเสร็จสิ้นกระบวนการ กล่าวคือสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายเป็น 100 เปอร์เซ็นต์

ตาราง 8.2 เวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย (Completed degradation time) เมทานอล เอทานอล และฟีนอล เมื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงต่างๆ (วิรัชชา, 2556)

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	เวลาในการย่อยสลายทั้งหมด (นาที)		
	ฟีนอล (Phenol)	เอทานอล (Ethanol)	เมทานอล (Methanol)
ไม่มี	113.3	145.9	127.2
ซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์	67.5	94.3	81.6
ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทอง (0.5 เปอร์เซ็นต์โดยโมล)	15.3	33.3	32.2

จากตาราง 8.2 พบว่าเมทานอล เอทานอล และฟีนอล สามารถย่อยสลายได้เองเมื่อได้รับแสงอัลตราไวโอเล็ตภายในเครื่องโฟโตแคตาไลติกรีแอกเตอร์ แต่ใช้เวลานานมากจึงจะย่อยสลายหมด คือ ใช้เวลาประมาณ 127.2, 145.9 และ 113.3 นาที ตามลำดับ และเมื่อใช้ซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง สามารถเร่งการย่อยสลายเมทานอล เอทานอล และฟีนอลได้ โดยใช้เวลา 81.6, 94.3 และ 67.5 นาที ตามลำดับ และเมื่อใช้ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทอง 0.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง พบว่าสามารถเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายเมทานอล เอทานอล และฟีนอล ได้ดีกว่าซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์ โดยการย่อยสลายเมทานอล เอทานอล และฟีนอล ใช้เวลา 32.2, 33.3 และ 15.3 นาที ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการเจือทองลงไปปริมาณที่เหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่มีต่ออนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ได้

นอกจากนี้ยังพบว่าซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทอง 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยโมล สามารถย่อยสลาย ฟีนอล ได้เร็วที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการย่อยสลาย เมทานอล และเอทานอล

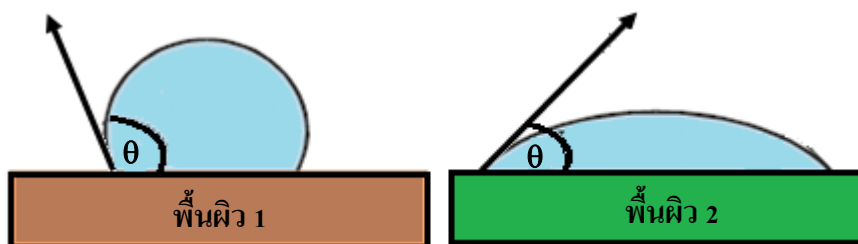
8.1.2 วัสดุที่สามารถทำความสะอาดหรือกำจัดสิ่งสกปรกได้ด้วยตัวเอง

(Self cleaning)

8.1.2.1 พื้นผิวทำความสะอาดตัวเอง

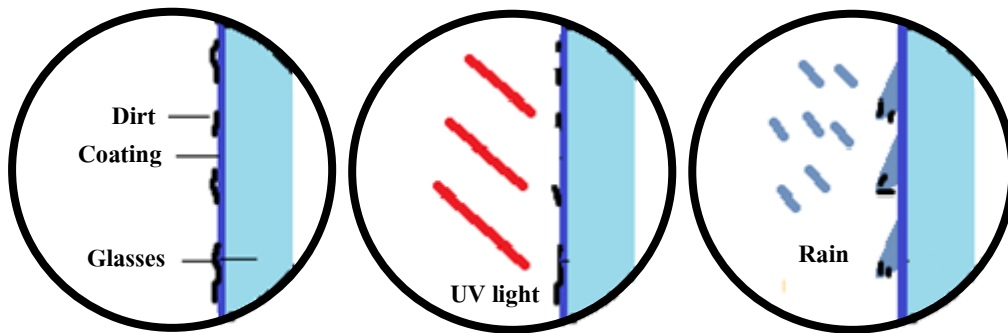
- ผลิตภัณฑ์ที่เป็นกระจกทำความสะอาดตัวเองโดยใช้สมบัติความชอบน้ำยิ่งยวด และกระบวนการโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic)

กระจกทำความสะอาดตัวเองได้ เนื่องจากที่ผิวกระจกจะเคลือบผิวแบบพิเศษด้วยอนุภาคขนาดนาโนของสารบางชนิด เช่น อนุภาคขนาดนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide nanoparticles, TiO_2) ที่มีความหนาของชั้นเคลือบประมาณ 40 นาโนเมตร โดยใช้เทคนิคการเคลือบแบบการตกสะสมไอสารด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical vapor deposition, CVD) ที่อุณหภูมิ ประมาณ 600 องศาเซลเซียส กระจกที่ได้สามารถทำความสะอาดตัวเองได้โดยมีความคงทนสูง มีช่วงอายุการใช้งานยาวนาน รวมทั้งผิวกระจกเป็นแบบชอบน้ำยิ่งยวด (Hydrophilic) ดังแสดงในภาพ 8.8 เมื่อผิวกระจกได้รับแสงแดด จะเกิดการแตกสลายของสารอินทรีย์ที่เป็นสิ่งสกปรกที่ติดค้างอยู่ที่ผิว เช่น มูลนก จากนั้นเมื่อฝนตกน้ำก็จะเกิดการแผ่กระจายไปทั่วผิวกระจกสิ่งสกปรกก็จะถูกชะล้างออกไป นอกจากนี้ น้ำที่ผิวกระจกจะระเหยแห้งอย่างรวดเร็วซึ่งช่วยลดการเกิดครอยคราบน้ำบนผิวกระจก



ภาพ 8.8 ความชอบน้ำบนพื้นผิวถูกสรจากซ้ายไปขวาแสดงถึงความชอบน้ำ (Hydrophilic) ที่เพิ่มขึ้นของพื้นผิว (Pilkington, 2554)

หลักการทำงานของอนุภาคนาโนของไทเทเนียม (TiO_2) ที่เคลือบบนผิวกระจก ซึ่งเป็นอนุภาคนาโนที่มีสมบัติโฟโตแคตาไลซิสและความชอบน้ำยิ่งยวด มีดังนี้คือ เมื่อชั้นของอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบผิวกระจก ดังแสดงในภาพ 8.9 ได้รับการกระตุ้นโดยแสงอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ และเมื่อสัมผัสกับบรรยากาศที่เป็นออกซิเจนจะเกิดการออกซิไดซ์ ทำให้สามารถทำลายแบคทีเรีย และสลายสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่เป็นสิ่งสกปรกบางประเภทได้ สมบัติความชอบน้ำยิ่งยวดของอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบผิว เมื่อมีหยดน้ำมาเกาะบนผิวจะเกิดการแผ่กระจายเป็นชั้นฟิล์มบางอย่างสม่ำเสมอ สิ่งสกปรกเล็กๆ จึงถูกชะล้างออกไปได้ง่ายและไม่ทำให้เกิดรอยคราบหยดน้ำเป็นจุดหรือฝ้าที่กระจกเมื่อแห้งตัว



ภาพ 8.9 กระจกทำความสะอาดตัวเอง (Pilkington, 2554)

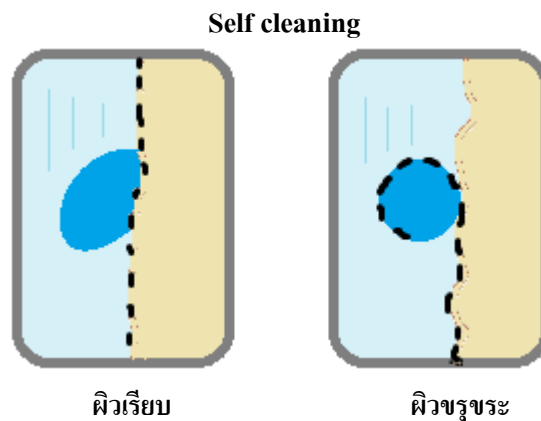
- พื้นผิวทำความสะอาดตัวเองแบบใช้หลักการความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (Hydrophobic)

ผลิตภัณฑ์ที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้โดยใช้หลักการความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด ยกตัวอย่างเช่น แก้วบอโรซิลิเกตที่เคลือบผิวด้วยฟิล์มบางของอนุภาคนาโนของซิงก์ออกไซด์ ด้วยวิธีการเคลือบแบบการตกตะกอนไอสารด้วยวิธีการทางเคมี ฟิล์มบางที่ได้จะมีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด กล่าวคือ เมื่อมีของเหลวมาเกาะที่ผิวจะทำให้เกิดมุม

สัมพัทธ์ระหว่างของเหลวกับอากาศที่มากกว่า 165 องศา ดังแสดงในภาพ 8.9 ทำให้เมื่อมีสิ่งสกปรกติดอยู่ จะถูกชะล้างได้โดยง่าย โดยสิ่งสกปรกจะเกาะติดออกมากับหยดน้ำ

8.1.2.2 เสื้อนาโน (Nano shirt)

เป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถทำความสะอาดหรือกำจัดสิ่งสกปรกได้ด้วยตัวเอง เนื่องจากถูกเคลือบด้วยสารละลายที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเป็นส่วนประกอบ ดังแสดงในภาพ 8.10 โดยในขั้นตอนของการเคลือบ เริ่มจากการแช่ผลิตภัณฑ์ในสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการอัดรีด เพื่อรีดเอาสารละลายส่วนเกินออก และทำให้แห้ง ในขั้นตอนสุดท้ายจะนำไปผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) และต้มผ้าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก็จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเคลือบอยู่บนเส้นใย โดยมีความหนาประมาณ 50 นาโนเมตร อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเกาะติดได้ดีบนเส้นใยรวมทั้งเส้นใยสังเคราะห์ และวัสดุอื่นๆ เช่น พลาสติก และไม้ สารเคลือบนี้มีสมบัติในการย่อยสลายสารอินทรีย์ กลิ่น แบคทีเรีย และสารพิษ เช่น ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde) โดยเมื่อสารเคลือบได้รับพลังงานแสงอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ หรือจากหลอดไฟ ก็จะเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารเหล่านี้ให้กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O)



ภาพ 8.10 การทำความสะอาดตัวเองได้เมื่อสัมผัสกับน้ำ (วีรยา, 2554)

จากเทคโนโลยีดังกล่าวนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายชนิดที่ทำความสะอาดได้ยาก เช่น เฟอร์นิเจอร์ ผ้าปูที่นอน ผ้าม่าน พรหม รวมไปถึงชุดสำหรับทหาร นักเดินทางที่ไม่มีเวลาหรือไม่มีน้ำเพียงพอสำหรับการซักผ้า เพราะเมื่อเสื้อผ้ามีคราบสกปรก เมื่อได้รับแสงอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ ประมาณ 3 วัน กลิ่นและแบคทีเรียก็จะจางหายไป นอกจากนี้ยังเป็นกระบวนการที่ง่ายโดยไม่จำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือพิเศษเพิ่มเติม ทั้งยังช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมโดยช่วยลดการใช้พลังงาน และสารเคมีในการซักผ้าให้น้อยลง เทคโนโลยีนี้จึงได้รับความสนใจสำหรับทำการผลิตในเชิงพาณิชย์

อนุภาคนาโนของซิงก์ออกไซด์ (ZnO nano) เป็นสารอีกชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้เพื่อเพิ่มสมบัติในการฆ่าเชื้อรา หรือแบคทีเรียบนเสื้อผ้า กล่าวคือ เมื่อแบคทีเรียหรือเชื้อราเข้าไปเกาะบนเสื้อผ้าที่มีซิงก์ออกไซด์ขนาดนาโนเคลือบอยู่ อนุภาคนาโนของซิงก์ออกไซด์จะซึมผ่านผนังเซลล์ของแบคทีเรียเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารบางอย่างของเยื่อเซลล์แบคทีเรีย และขัดขวางการแบ่งตัวของดีเอ็นเอของแบคทีเรียทำให้แบคทีเรียตายลง

8.2 ประยุกต์ใช้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์

8.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells)

พลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนที่เป็นทางเลือกหนึ่งที่ปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยกันอย่างแพร่หลาย เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) หรือเซลล์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic cells) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ที่ทำหน้าที่ในการแปลงพลังงานแสงหรือพลังงานโฟตอนจากแสงในธรรมชาติเป็นพลังงานไฟฟ้า

หลักการทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ เกิดจากการสร้างพาหะนำไฟฟ้า ซึ่งก็คือ ประจุลบ (อิเล็กตรอน) และประจุบวก (โฮล) ขึ้น จากการกระตุ้นด้วยพลังงานแสงบนวัสดุกึ่งตัวนำที่ใช้ผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเคลื่อนที่ของประจุพาหะก็จะเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าที่สามารถจัดเก็บ และนำมาใช้งานได้

เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จากในยุคแรกที่เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน (Silicon) ซึ่งแบ่งเป็นชนิดซิลิกอนผลึกเดี่ยว (Single crystalline silicon solar cell) ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน (Amorphous silicon solar cell) และชนิดซิลิกอนหลายผลึก

(Polycrystalline silicon solar cell) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย และให้ประสิทธิภาพสูง เป็นชนิดซิลิกอนผลึกเดี่ยว ที่ให้ค่าประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงถึง 15-30 เปอร์เซ็นต์ แต่เนื่องจากข้อจำกัดอย่างหนึ่งของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน คือ การผลิตซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยวทำได้ค่อนข้างยาก และมีต้นทุนการผลิตสูง ดังนั้นจึงได้มีความพยายามที่จะใช้สารสีที่ได้จากวัสดุธรรมชาติเคลือบลงบนผิวของโลหะออกไซด์ เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-Sensitized solar cell, DSSC) เพื่อมาใช้แทนซิลิกอนผลึกเดี่ยว ซึ่งถือเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ในยุคที่สอง

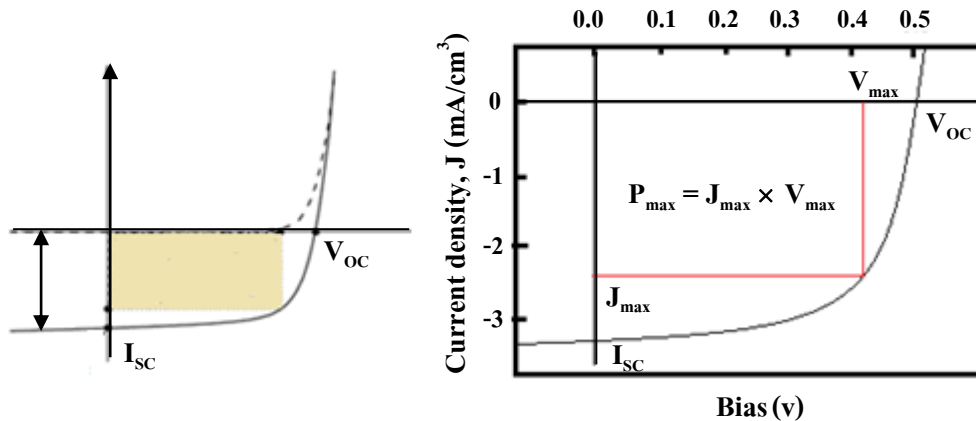
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากสารกึ่งตัวนำจำพวกโลหะออกไซด์ ที่มีแถบช่องว่างพลังงานกว้าง เคลือบผิวสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์นี้ด้วยโมเลกุลสีย้อมไวแสง (Dye sensitized) ซึ่งทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์แล้วส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังสารกึ่งตัวนำ ข้อดีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้คือ สารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นสารประกอบโลหะออกไซด์ มีเสถียรภาพสูง ซึ่งในปัจจุบันได้รับการพัฒนาจนมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงถึง 11 เปอร์เซ็นต์ และยังมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน แต่อย่างไรก็ตามระยะเวลาในการใช้งานจริงยังสั้นกว่า

เซลล์แสงอาทิตย์ในยุคที่สาม เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์ (Organic photovoltaic cell, OPV) หรือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดพอลิเมอร์ (Polymer solar cell) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอลิเมอร์นำไฟฟ้า ซึ่งมีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งตัวนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในการดูดกลืนแสง และส่งผ่านประจุ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์ได้รับการพัฒนาต่อเนื่อง โดยที่เซลล์แสงอาทิตย์อินทรีย์นี้มีข้อแตกต่างทั้งในเรื่องของต้นทุนการผลิตที่มีราคาต่ำกว่า และสามารถที่จะสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ออกมาได้หลายรูปแบบ เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์อินทรีย์มีความยืดหยุ่นได้ตามรูปแบบของฐานรองรับ ดังนั้นในปัจจุบันนี้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์จึงเป็นที่สนใจ และได้รับการวิจัยและพัฒนากันอย่างแพร่หลายในระดับนานาชาติ

8.2.1.1 พารามิเตอร์ที่บอกสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงสามารถบอกลักษณะเฉพาะได้โดยพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ กระแสลัดวงจร (Short-circuit current, I_{sc}) กระแสเปิดวงจร (Open-circuit voltage, V_{oc}) Fill factor (FF) และ ประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแสง

(Power conversion efficiency, η) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้สามารถบอกได้จากกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง ดังแสดงดังภาพ 8.11



ภาพ 8.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงพร้อมด้วยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ (Kruefu et al., 2010)

- กระแสลัดวงจร (Short-circuit current)

กระแสลัดวงจร (I_{sc}) คือ ค่ากระแสที่ได้ขณะที่ให้ความต่างศักย์เป็นศูนย์แก่เซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง ($V=0$ โวลต์) โดยค่านี้ได้จากบริเวณที่ทับซ้อนกันของค่าการดูดกลืนสเปกตรัมของเซลล์แสงอาทิตย์กับสเปกตรัมของแสงที่ให้เข้ามา ค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ ค่าความหนาของชั้นแอคทีฟ และประสิทธิภาพในการเก็บประจุที่ถูกกระตุ้น

- ความต่างศักย์เปิดวงจร (Open-circuit voltage)

ความต่างศักย์เปิดวงจร (V_{oc}) คือ ค่าความต่างศักย์ ขณะที่ไม่ต้องการให้มีกระแสเกิดขึ้นในเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง ดังนั้นที่จุด V_{oc} จึงไม่มีกระแสภายนอกเกิดขึ้นในชั้นงานที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง หรือกล่าวคือ ค่ากระแสเป็นศูนย์ที่จุดนี้ ($I=0$ แอมแปร์)

- Fill Factor

บริเวณที่แสดงค่าพลังงานที่เซลล์แสงอาทิตย์ให้ออกมา ในจตุภาค (Quartile) ที่ 4 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (I) และความต่างศักย์ (V) สามารถหาค่า Fill factor (FF) ได้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าพลังงานจากจุดที่ให้พลังงานงานสูงที่สุดจากกราฟ (Maximum deliverable power, P_{max}) หารด้วยค่าพลังงานสูงที่สุดจากการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งได้มาจากค่า V_{OC} และ I_{SC} ดังแสดงในสมการ 8.13

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{theor\ max}} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{I_{SC} \cdot V_{OC}} \dots\dots\dots (8.13)$$

จากการคำนวณ ถ้าค่า Fill factor มีค่าสูงแสดงว่าเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีคุณภาพสูง

- ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (Power conversion efficiency)

ประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแสง (η) แสดงถึงความสามารถในการแปลงพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าพลังงานสูงสุด ต่อค่าพลังงานของแสงที่ให้เข้ามา ดังแสดงในสมการ 8.14

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{light}} = \frac{I_{SC} \cdot V_{OC} \cdot FF}{P_{light}} \dots\dots\dots (8.14)$$

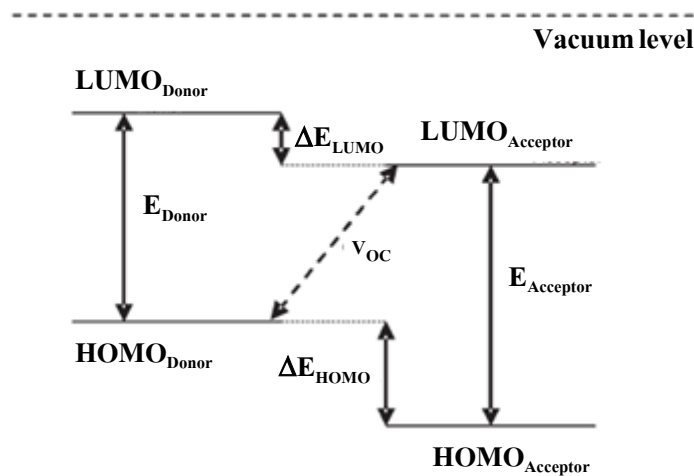
เนื่องจากประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแสงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิกระตุ้น (Temperature excitation) สเปกตรัมของแสง และความเข้มของแสงที่ได้รับ ดังนั้นการทดสอบหาประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแสง ต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน จึงจะสามารถเปรียบเทียบกันได้ ยกตัวอย่างการทดสอบหาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ แสดงดังสมการ 8.15

$$V_{OC} = (1/e) \left(|E^{Donor\ HOMO}| - |E^{Acceptor\ LUMO}| \right) - 0 \dots\dots\dots (8.15)$$

เมื่อ	V_{OC}	คือ	ความต่างศักย์เปิดวงจร (V)
	e	คือ	ค่าประจุของอิเล็กตรอน
	$E^{Donor} HOMO$	คือ	ค่าระดับพลังงานของชั้น HOMO ของพอลิเมอร์ตัวให้อิเล็กตรอน
	$E^{Acceptor} LUMO$	คือ	ค่าระดับพลังงานของชั้น LUMO ของพอลิเมอร์ตัวรับอิเล็กตรอน

สมการ 8.15 เป็นสมการที่ใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์แบบ 2 รอยต่อ ที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ 2 ชนิด ที่มีค่าพลังงานช่องว่างแตกต่างกันผสมรวมกันเป็นชั้นกระตุ้น (Active) คือ พอลิเมอร์ P3HT และ PCBM ดังแสดงในภาพ 8.12

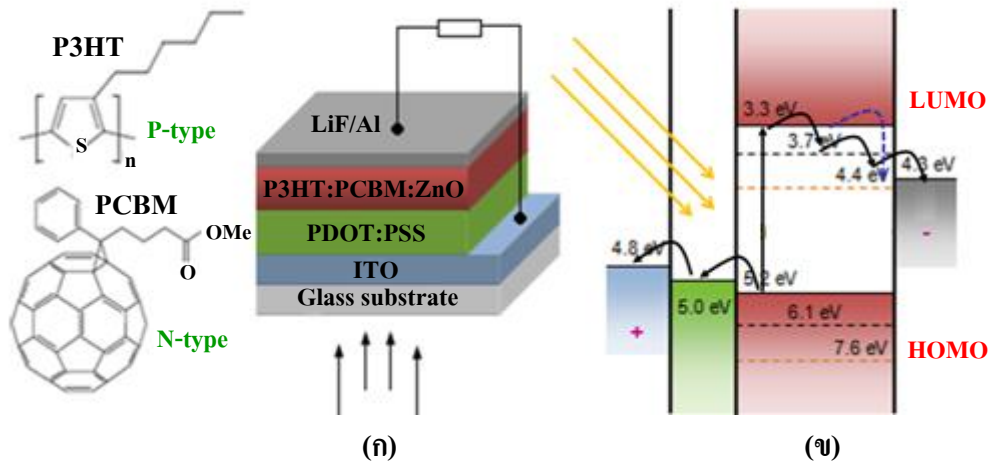
เมื่อ P3HT คือ Poly (3-hexythiophene-2,5-diyl)
 PCBM คือ Phenyl-C₆₁-butyric acid methyl ester



ภาพ 8.12 ระดับพลังงาน HOMO และ LUMO ของตัวให้อิเล็กตรอน (Donor) และตัวรับอิเล็กตรอน (Acceptor) ในการคำนวณหาค่าความต่างศักย์เปิดวงจร (V_{OC}) (Kruefu et al., 2010)

8.2.1.2 ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายชั้น

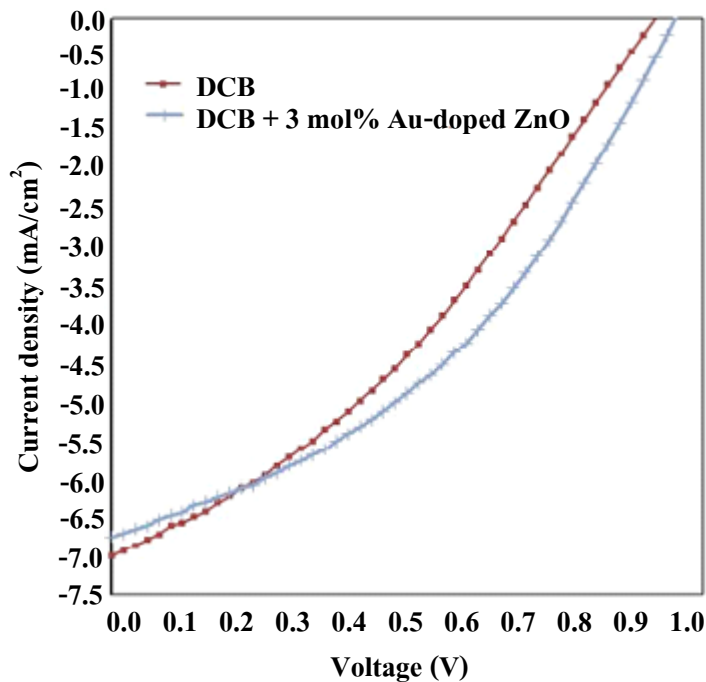
ภาพ 8.13 แสดงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแบบหลายชั้นที่ใช้ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทอง (Au/ZnO) P3HT และ PCBM เป็นตัวเว้นช่วงแสง ประกอบด้วยชั้นต่างๆ ดังนี้ ชั้นสเตรท (Substrate) เป็นกระจกโปร่งใสเพื่อใช้เป็นฐานรองรับความแข็งแรงของเซลล์แสงอาทิตย์ ชั้นต่อมาเป็นชั้นของฟิล์มอินเดียม-ดีบุก ออกไซด์ (Indium Tin Oxide, ITO) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า ชั้นต่อมาเป็น PEDOT:PSS (Poly[3,4-(ethylenedioxy)-Thiophene]:Poly(styrene sulfonate) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้า (Conjugated polymer) ที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า ITO ซึ่งพอลิเมอร์ตัวนี้ทำหน้าที่เก็บ โฮล (h^+) ได้ดี ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ดีขึ้น ชั้นต่อมาเป็นชั้นแอคทีฟ (Active layer) ประกอบไปด้วย โคพอลิเมอร์ (Copolymer) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ส่วนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทอง และ PCBM ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ถัดจากชั้นกระตุ้น เป็นชั้นบางๆ ของลิเทียมฟลูออไรด์ (LiF) ซึ่งมีความหนาประมาณ 3-4 นาโนเมตร ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้า (Electrode) ตรงข้ามมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น และชั้นสุดท้ายเป็นขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม (Aluminium electrode) ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน จากนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นจะถูกทดสอบหาลักษณะเฉพาะ รวมถึงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า



ภาพ 8.13 (ก) โครงสร้างของพอลิเมอร์และชั้นรูปแบบของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 2 รอยต่อ (ข) โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 2 รอยต่อ ชนิดสารอินทรีย์ (Kruefu et al., 2010)

8.2.1.3 การวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และความต่างศักย์ ของเซลล์แสงอาทิตย์

ภาพ 8.14 แสดงกราฟลักษณะเฉพาะระหว่างความหนาแน่นกระแส (J_{sc} , mA/cm^2) และค่าความต่างศักย์ (V) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ที่ใช้ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองและ PCBM เป็นตัวเว้นช่วงแสง



ภาพ 8.14 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะระหว่างความหนาแน่นกระแส (J_{sc} , mA/cm^2) และค่าความต่างศักย์ (V) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์ ที่ใช้ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองและ PCBM เป็นตัวเว้นช่วงแสงในตัวทำละลาย Dichlorobenzene (Khantha, 2013)

จากกราฟความสัมพันธ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ระหว่างความหนาแน่นกระแส (mA/cm^2) และค่าความต่างศักย์ (V) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นในภาพ 8.14 มีลักษณะเพิ่มขึ้นเป็นรูปพาราโบลาหงายจากค่าความหนาแน่นกระแสที่เป็นลบ จนไปตัดแกน x (ความหนาแน่นกระแสเป็นศูนย์) ที่ค่าความต่างศักย์ต่างๆ กัน โดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์นี้ใช้

PCBM ที่ละลายในสารละลาย Dichlorobenzene (DCB) ผสมกับสารละลายซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองเป็นชั้นแอคทีฟ ให้ค่าความต่างศักย์เป็นลบที่ค่าหนาแน่นกระแสเป็นศูนย์สูงสุด แต่ค่าความหนาแน่นกระแสที่ค่าความต่างศักย์เป็นศูนย์ มีค่าต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้เติมซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทอง อย่างไรก็ตามค่าประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแสงไม่ได้คำนวณจากค่า J_{sc} และ V_{oc} อย่างไรก็ดีอย่างหนึ่งเท่านั้น หากแต่ต้องคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างความหนาแน่นกระแสและค่าความต่างศักย์ ดังนั้นจากภาพ 8.14 จะพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ที่เติมซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองในชั้นแอคทีฟ ให้ค่าประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแสงสูงที่สุด

8.2.2 การตรวจจับแก๊ส (Gas sensor) ของอนุภาคนาโนของสารประกอบออกไซด์

ยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์เป็นตัวตรวจจับแก๊ส

8.2.2.1 กลไกการทำงานของตัวตรวจจับแก๊ส

การตรวจจับแก๊สของตัวตรวจจับแก๊ส เกิดขึ้นจากการมีช่องว่างออกซิเจนในโครงสร้างผลึก เมื่อซิงก์ออกไซด์มีอุณหภูมิสูงขึ้น แก๊สออกซิเจนในอากาศโดยรอบจะเข้ามายึดติดกับช่องว่างออกซิเจน โดยการดึงอิเล็กตรอนจากบริเวณที่พื้นผิวของซิงก์ออกไซด์แล้วแตกตัวเป็นไอออนลบ ดังนี้คือ กลุ่มของซูเปอร์ออกไซด์ไอออน (Superoxide ion) (O_2^- หรือ O^- หรือ O^{2-}) ดังแสดงในสมการ 8.16-8.19



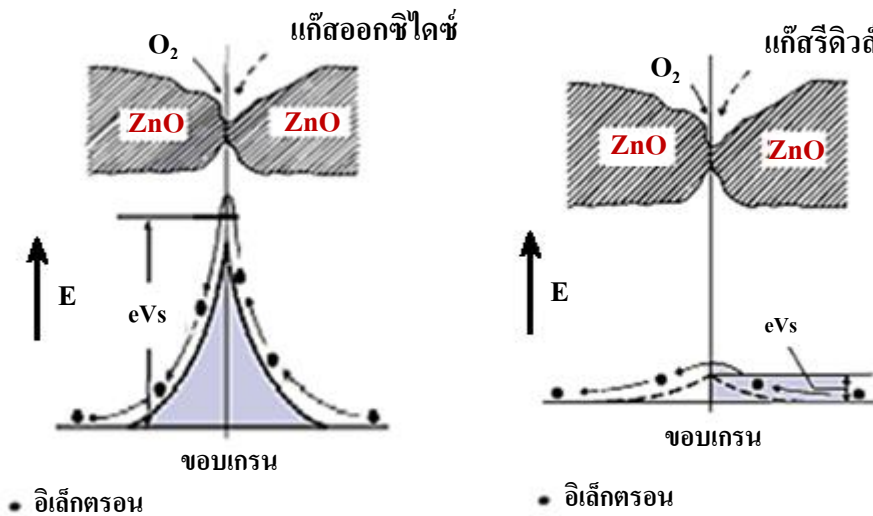
จากนั้นไอออนลบจะเข้ามายึดติดที่ผิวหน้าของซิงก์ออกไซด์ ในบริเวณที่มีช่องว่างออกซิเจน โดยกลไกการตรวจจับแก๊สจะเริ่มต้นจากกระบวนการดูดซับออกซิเจน (Oxygen adsorption) ที่อุณหภูมิการทำงานในช่วง 200-400 องศาเซลเซียส โดยเมื่อฟิล์มเซ็นเซอร์สัมผัสกับอากาศที่อุณหภูมิสูง อิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนกลายเป็นออกซิเจนไอออน เช่น O^{2-} หรือ O^- ซึ่งจะก่อตัวเป็นกำแพงศักย์กั้นขวางการเคลื่อนที่ของ

อิเล็กตรอนอิสระผ่านระหว่างเกรนไม่ให้เป็นไปอย่างอิสระ ทำให้สภาพการนำไฟฟ้าของฟิล์ม เซ็นเซอร์ลดลง โดย O^- จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าให้มีค่าต่ำมาก เมื่ออยู่ใน สถานะอากาศบริสุทธิ์ และอุณหภูมิการทำงานปกติซึ่งจะมีผลทำให้ค่าแก๊งค์มีค่าสูง

กระบวนการตรวจจับแก๊สสามารถสรุปได้เป็น 2 ขั้นตอน ดังแสดงในภาพ 8.15 ดังต่อไปนี้คือ

- อิเล็กตรอนที่ปกคลุมพื้นผิวของฟิล์มเซ็นเซอร์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน กลายเป็น O^{2-} หรือ O^- ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าแก๊งค์มีค่าสูงขึ้นและทำให้สภาพความนำไฟฟ้ามีค่า ลดลง

- ผลของแก๊สรีดิวส์ (Reducing gases) จะทำให้ปริมาณของออกซิเจนที่ถูกดูด ชั้บริเวณพื้นผิวของฟิล์มเซ็นเซอร์ลดลง ซึ่งจะทำให้ค่าแก๊งค์ลดลง และมีผลต่อเนื่องทำให้ ค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น สำหรับผลของแก๊สออกซิไดซ์ (Oxidizing gas) จะให้ผลตรงกันข้าม กล่าวคือขณะที่มีแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยากับออกซิเจนไอออน อิเล็กตรอนจะถูกดูดซับด้วย จึง ส่งผลให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามูลค่าเพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าลดลง

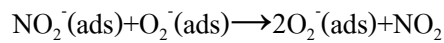
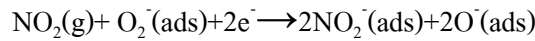
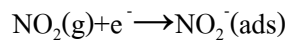


ภาพ 8.15 ตัวอย่างการก่อตัวบริเวณปลอดประจุของพื้นผิวฟิล์ม ค่าแก๊งค์บริเวณรอยต่อเกรน มีค่าลดลงเมื่อมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Figaro, 2556)

กลไกการตรวจจับแก๊สของตัวตรวจจับแก๊สสามารถอธิบายกลไกของการเกิดปฏิกิริยาได้ดังต่อไปนี้

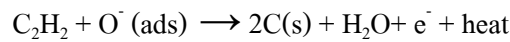
กรณี Oxidizing gas

ขณะตรวจจับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (Nitrogen dioxide gas; N_2)

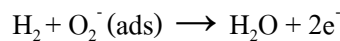
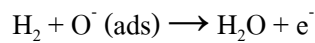


กรณี Reducing gases

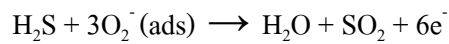
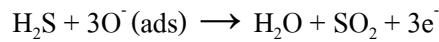
ขณะตรวจจับแก๊สอะเซทิลีน (Acetylene gas; C_2H_2)



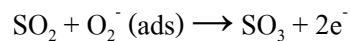
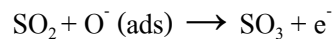
ขณะตรวจจับแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen gas; H_2)



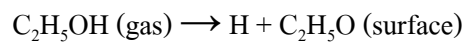
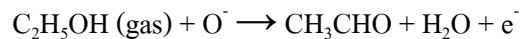
ขณะตรวจจับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide gas; H_2S)



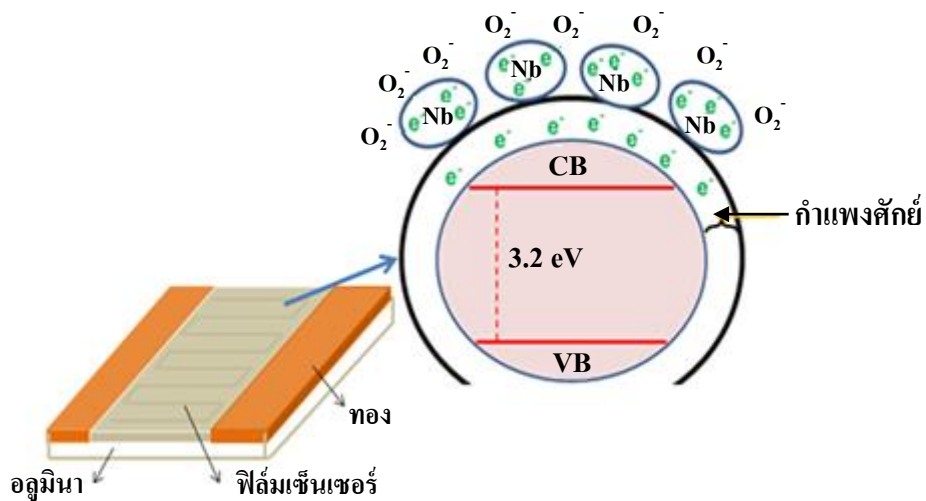
ขณะตรวจจับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide gas; SO_2)



ขณะตรวจจับของเอทานอล (Ethanol; $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)



ภาพ 8.16 แสดงปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนกับอิเล็กตรอนบนพื้นผิวฟิล์ม เซ็นเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียม (Kruefu, 2011)



ภาพ 8.16 ปฏิกริยาระหว่างออกซิเจนกับอิเล็กตรอนบนพื้นผิวฟิล์มเซินเซอร์ซิงก้ออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียม (Kruefu, 2011)

8.2.2.2 สมบัติของตัวตรวจจับแก๊ส

ตัวตรวจจับแก๊สที่ดีควรมีสมบัติที่สำคัญ 6 ประการคือ

1. ความจำเพาะ (Selectivity)

ความจำเพาะ คือ ความสามารถในการแยกแยะความแตกต่างระหว่างแก๊สที่ต้องการตรวจจับกับแก๊สที่ไม่ต้องการตรวจจับ กล่าวคือ ตัวตรวจจับแก๊สชนิดหนึ่งๆ ควรมีความสามารถในการตอบสนองต่อแก๊สชนิดหนึ่งชนิดเดียวที่ต้องการตรวจจับ ไม่ควรที่ตอบสนองต่อแก๊สชนิดอื่น เพราะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนการตรวจจับได้ วัสดุที่ใช้ทำฟิล์มเซินเซอร์ควรมีความไวในการตอบสนองต่อแก๊สที่ต้องการตรวจจับ หรือเมื่อเกิดการตอบสนองต่อแก๊สที่ไม่ต้องการตรวจจับ ความจำเพาะเป็นสมบัติที่สำคัญมาก ตัวตรวจจับแก๊สที่ดีต้องมีความจำเพาะสูง

2. ค่าการตอบสนอง (Response, R)

ค่าการตอบสนอง คือ ความสามารถในการตรวจจับแก๊สของตัวตรวจจับ เช่น ตัวตรวจจับแก๊สบางชนิดไม่สามารถบอกความแตกต่างของแก๊สปริมาณน้อยๆ ได้ เช่น เมื่อนำตัวตรวจจับแก๊สไปตรวจจับแก๊ส 2 บริเวณที่มีปริมาณแก๊สแตกต่างกันน้อยๆ

ยกตัวอย่างเช่น ที่ความเข้มข้นของแก๊ส 4 พีพีเอ็ม กับ 5 พีพีเอ็ม ทำให้ไม่สามารถแยกแยะได้ว่าเป็นแก๊สชนิดใด สมบัติชนิดนี้สำคัญเฉพาะกรณีที่ต้องการความถูกต้องในการตรวจจับสูง หรือแก๊สที่ตรวจจับมีปริมาณน้อยๆ เท่านั้น เมื่อสารประกอบโลหะออกไซด์เกิดปฏิกิริยาเคมีกับแก๊ส ค่าการตอบสนอง สามารถคำนวณได้จากค่าการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้า ดังแสดงในสมการ 8.20

$$S = \frac{\sigma_g}{\sigma_a} = \frac{\rho_a}{\rho_g} \quad \dots\dots\dots (8.20)$$

เมื่อ S คือ ค่าการตอบสนอง

ρ_a คือ สภาพความต้านทานไฟฟ้าของตัวตรวจจับที่คงที่ก่อนได้รับไอสาร

ρ_g คือ สภาพความต้านทานไฟฟ้าของตัวตรวจจับขณะได้รับไอสาร

σ_g คือ สภาพความนำไฟฟ้าของตัวตรวจจับก่อนได้รับไอสาร

σ_a คือ สภาพความนำไฟฟ้าของตัวตรวจจับขณะได้รับไอสาร

การคำนวณหาค่าการตอบสนองของตัวตรวจจับแก๊สคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างความต้านทานของสองสภาวะ ดังแสดงในภาพ 8.17 คือ ความต้านทานในสภาวะบรรยากาศ และความต้านทานในสภาวะที่มีแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยากับตัวตรวจจับแก๊ส ทั้งนี้สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าการตอบสนองในการตรวจจับแก๊สชนิดต่างๆ ต่อตัวตรวจจับแก๊สนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊สที่จะทำการทดสอบว่าเป็นชนิดใดระหว่างแก๊สรีดิวส์ (Reducing gas) หรือแก๊สออกซิไดซ์ (Oxidizing gas) การคำนวณหาค่าความไวในการตรวจจับแก๊สชนิดแก๊สรีดิวส์ เช่น แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide, SO₂) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide, CO) ไอของเอทานอล (Ethanol, C₂H₅OH) และไอของแอมโมเนีย (Ammonia, NH₃) เป็นต้น ต่อตัวตรวจจับแก๊ส สามารถคำนวณได้จากสมการ 8.21 และการคำนวณหาค่าความไวในการตรวจจับแก๊สชนิดแก๊สออกซิไดซ์ เช่น แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (Nitrogen dioxide, NO₂) เป็นต้น ต่อตัวตรวจจับแก๊ส สามารถคำนวณได้จากสมการ 8.22 ภาพ 8.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต้านทานของแก๊สชนิดออกซิไดซ์ และรีดิวส์

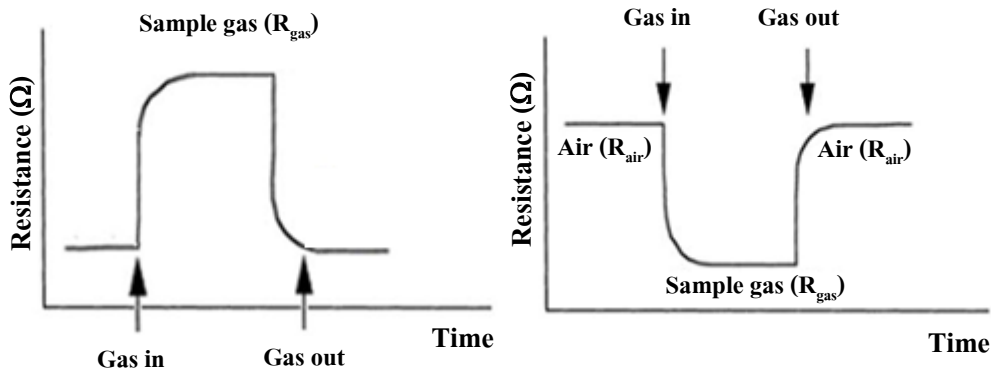
$$S = \frac{R_{air}}{R_{gas}} = \frac{R_{air} - R_{gas}}{R_{gas}} \quad (\text{สำหรับแก๊สรีดิวซ์}) \quad \dots\dots\dots (8.21)$$

$$S = \frac{R_{gas}}{R_{air}} = \frac{R_{gas} - R_{air}}{R_{air}} \quad (\text{สำหรับแก๊สออกซิไดซ์}) \quad \dots\dots\dots (8.22)$$

โดยที่ S คือ ค่าการตอบสนอง

R_{air} คือ ค่าของต้านทานในสภาวะบรรยากาศ

R_{gas} คือ ค่าของต้านทานในสภาวะที่มีแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยา



ภาพ 8.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต้านทานของแก๊สชนิด (ก) ออกซิไดซ์ และ (ข) รีดิวซ์ (Figaro, 2556)

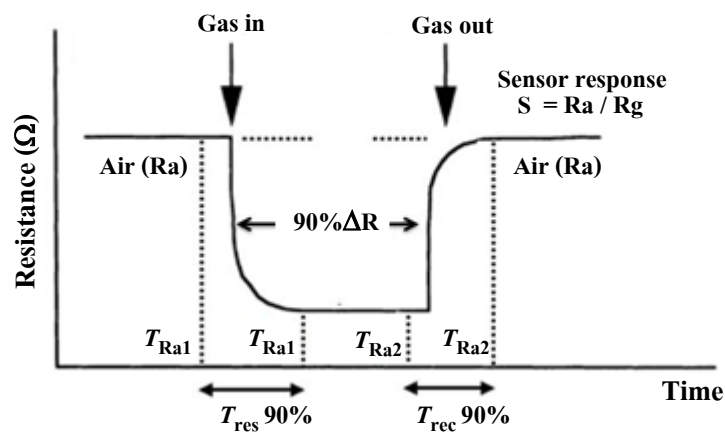
3. เวลาการตอบสนอง (Response time, T_{res})

เวลาการตอบสนอง คือความสามารถในการตอบสนองอย่างรวดเร็ว ในทันทีของตัวตรวจจับแก๊สเมื่อสัมผัสกับแก๊สที่ตรวจจับสมบัติข้อนี้มีความสำคัญมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีแก๊สที่ทำการตรวจจับเป็นแก๊สไวไฟ หรือแก๊สพิษ เพื่อสามารถป้องกัน และแก้ไขได้ทันท่วงทีก่อนที่จะได้รับอันตราย ขณะที่สารประกอบโลหะออกไซด์เกิดปฏิกิริยาเคมีกับแก๊ส ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient response) อยู่ครู่หนึ่ง

แล้วคงที่กับเวลา (Steady state response) เวลาการตอบสนอง เป็นเวลาขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเป็น 90 เปอร์เซ็นต์ของผลต่างระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเดิมกับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่คงที่กับเวลา ดังแสดงในภาพ 8.18

4. เวลาการคืนกลับสู่สภาพเดิม (Recovery time, T_{rec})

เวลาการคืนกลับสู่สภาพเดิม คือความสามารถในการคืนกลับสู่สภาพเดิมของตัวตรวจจับแก๊ส ภายหลังจากการเกิดปฏิกิริยากับแก๊ส สมบัติข้อนี้ก็มีความสำคัญมาก เช่นเดียวกันเนื่องจากการบ่งบอกได้ถึงความสามารถ และประสิทธิภาพที่ดีของตัวตรวจจับแก๊ส เวลาการคืนกลับสู่สภาพเดิมเป็นตัวแปรที่แสดงสภาพการคืนกลับสู่สภาวะปกติอย่างรวดเร็วภายหลังจากการเกิดสภาวะในการตอบสนองต่อแก๊ส เมื่อภายหลังการเกิดปฏิกิริยากับแก๊ส ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง (Transient response) อยู่ครู่หนึ่งแล้วคงที่กับเวลา (Steady state response) เมื่อไม่มีแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องแล้วความต้านทานจะกลับสู่สภาวะเดิม (Original baseline) เวลาการคืนกลับสู่สภาพเดิมเป็นเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพต้านทาน ไฟฟ้ากลับสู่สภาพเดิมจนมีค่าเป็น 90 เปอร์เซ็นต์ ของผลต่างระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่คงที่กับเวลาในสภาวะการตอบสนองต่อแก๊ส ดังแสดงในภาพ 8.18



ภาพ 8.18 เวลาในการตอบสนอง และเวลาในการกลับคืนสู่สภาพเดิม (Figaro, 2556)

การคำนวณหาค่าเวลาการตอบสนอง และเวลาการกลับคืนสู่สภาพเดิม ที่ 90 เปอร์เซ็นต์ ของค่าความต้านทานเมื่อมีแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยา และค่าความต้านทานสถานะเดิมของตัวตรวจจับแก๊ส สามารถคำนวณได้จากสมการ 8.23 และ 8.24 ตามลำดับ

$$T_{res} = \left[T_{Ra1} - \left\{ (T_{Ra1} - T_{Rg1}) \right\} \times \frac{90}{100} \right] - T_{Ra1} \quad \dots\dots\dots (8.23)$$

$$T_{rec} = \left[T_{Ra2} - \left\{ (T_{Ra2} - T_{Rg2}) \right\} \times \frac{90}{100} \right] - T_{Ra2} \quad \dots\dots\dots (8.24)$$

- โดยที่ T_{res} คือ เวลาในการตอบสนอง
- T_{rec} คือ เวลาในการกลับคืนสู่สภาพเดิม
- T_{Ra1} คือ เวลาที่ค่าของความต้านทานในสถานะบรรยากาศ (R_a) คงที่ ก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานเมื่อมีแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยา
- T_{Rg1} คือ เวลาที่ค่าของความต้านทานในสถานะที่มีแก๊สเข้าไปทำปฏิกิริยากับตัวตรวจจับแก๊ส (R_g) คงที่ ก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานกลับสู่สภาพเดิม
- T_{Ra2} คือ เวลาที่ค่าของความต้านทานในสถานะกลับสู่บรรยากาศ (R_a) คงที่อีกครั้ง หลังจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานเมื่อมีแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยา
- T_{Rg2} คือ เวลาที่ค่าของความต้านทานในสถานะที่มีแก๊สเข้าไปทำปฏิกิริยากับตัวตรวจจับแก๊ส (R_g) คงที่ จุดสุดท้าย ก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานกลับสู่สภาพเดิมในการหาค่าการคืนกลับสู่สภาพเดิม

5. เสถียรภาพ (Stability)

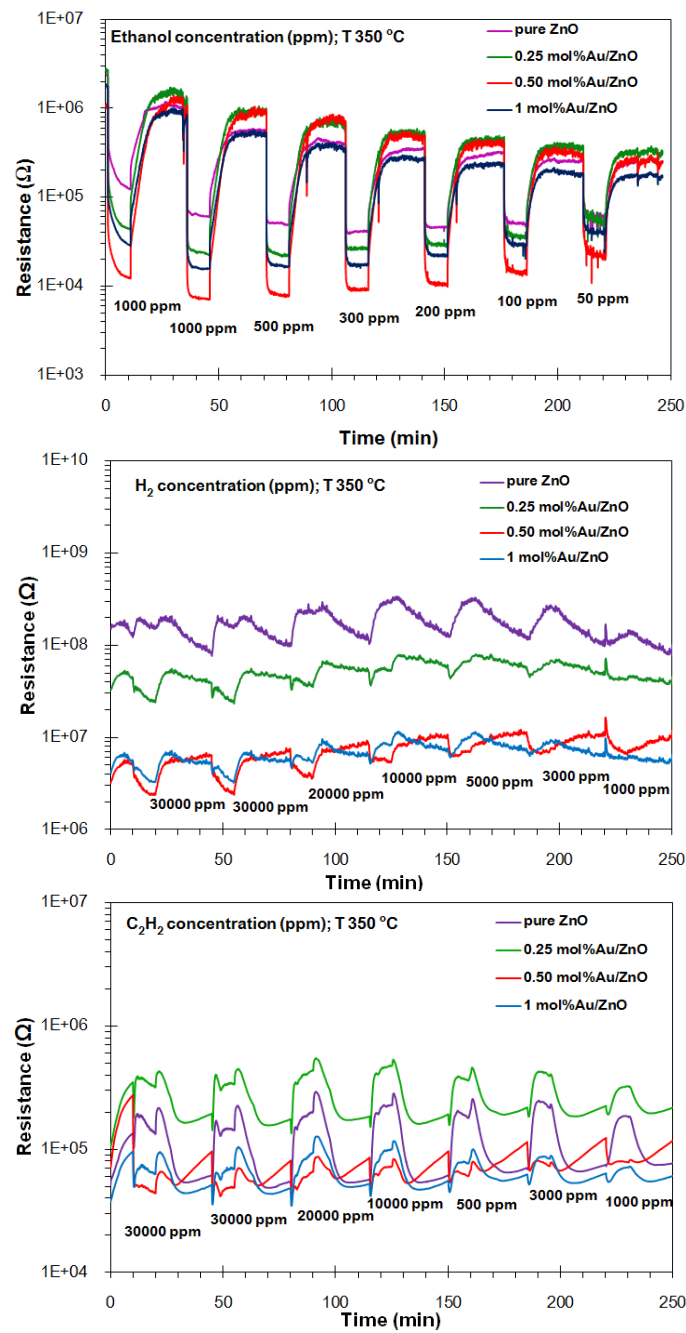
เสถียรภาพ คือ ความสามารถในการตรวจจับแก๊สของตัวตรวจจับที่ไม่เสื่อมสภาพเร็วในการใช้งาน หรือให้ค่าการตอบสนองที่คงที่และต่อเนื่อง

6. พิสัยการตรวจจับ (Dynamic range)

พิสัยการตรวจจับ คือ ช่วงกว้างของความเข้มข้นของแก๊สที่ตัวตรวจจับแก๊สสามารถจับแก๊สได้ ตัวตรวจจับแก๊สบางตัวสามารถตรวจจับปริมาณแก๊สตั้งแต่ความเข้มข้นของแก๊ส 1000-100,000 พีพีเอ็ม แต่บางตัวใช้วัดในช่วงความเข้มข้นของแก๊ส 5-10 พีพีเอ็ม

8.2.2.3 การวิเคราะห์ผลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต้านทานที่เกิดขึ้น

ภาพ 8.19 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานในการตอบสนองต่อไอของเอทานอล แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สอะเซทีลีน ตามลำดับ ของฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำความเข้มข้น 0.25, 0.50 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ขณะอุณหภูมิในการทำงานของตัวตรวจจับแก๊สที่ 350 องศาเซลเซียส พบว่าฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำมีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานที่ดีต่อไอของเอทานอลได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับในการตรวจจับแก๊สชนิดอื่น โดยพิจารณาจากค่าความต้านทานเริ่มต้นและค่าความต้านทานขณะที่มีแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยา และพบว่าฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำ 0.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ให้ค่าการตอบสนองที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำในปริมาณอื่นๆ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าทองคำที่เจือลงไปในซิงก์ออกไซด์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับแก๊สให้ดียิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์



ภาพ 8.19 การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานของฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการตอบสนองต่อไอของเอทานอล แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สอะเซทีลีน (มณฑิรา, 2555)

8.3 ประยุกต์ใช้ทางด้านสิ่งทอ

สิ่งทอนาโน หมายถึง สิ่งทอทั่วไปที่มีการนำนาโนเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ในขั้นตอนการผลิตหรือหลังการผลิต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสิ่งทอให้มีสมบัติพิเศษเพิ่มขึ้น เช่น ป้องกันแบคทีเรีย กันน้ำ เป็นต้น

สิ่งทอนาโนจะมีเส้นใยนาโน (Nano-fiber) หรืออนุภาคนาโน (Nanoparticles) อยู่บนผิว หรือผสมอยู่ในเนื้อของเส้นใย หรือมีชั้นฟิล์มบางในระดับนาโน (Nano thin film) เคลือบอยู่บนผิวของเส้นใย อนุภาคนาโนหรือชั้นฟิล์มบางนาโนจะมีการจัดเรียงตัวใหม่บนเส้นใยอย่างเป็นระเบียบทำให้มีสมบัติใหม่เกิดขึ้น หรือเรียกว่าสมบัติพิเศษของสิ่งทอนาโน ยกตัวอย่างเช่น

- สมบัติกันน้ำหรือสะท้อนน้ำ

เส้นใยนาโนกันน้ำหรือสะท้อนน้ำ เป็นการเตรียมผ้าให้มีสมบัติกันน้ำหรือสะท้อนน้ำ โดยการเคลือบสารที่ไม่ชอบน้ำลงบนผ้า เมื่อน้ำ หรือกาแฟ หลงบนผ้า ก็จะกลิ้งไปมาบนผ้าโดยไม่ซึมเข้าในเส้นใย ทำให้ผ้าสะอาดเพราะสิ่งสกปรกซึมเข้าไปในเส้นใยได้ยาก ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับน้ำที่กลิ้งอยู่บนใบบัว

- สมบัติยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

เส้นใยนาโนที่ผ่านการเติมอนุภาคนาโน (Nano-particle) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ หรือซิงก์ออกไซด์ ลงในเส้นใยในขั้นตอนของกระบวนการผลิต เส้นใยจะมีสมบัติพิเศษในการต้านแบคทีเรีย หรือเชื้อรา เส้นใยนาโนเป็นเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร การผลิตเส้นใยนาโนสามารถเตรียมได้จากกระบวนการ Electro-spinning ซึ่งเมื่อนิตสารออกมาผลิตภัณฑ์จะอยู่ในรูปของผ้า Nonwoven

- สมบัติป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิต

เนื้อผ้าที่เคลือบด้วยสารเพิ่มความชื้น เช่น สารในหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ไฮลีนนาโนซอล (Silane nanosol) หรือสารที่มีสมบัตินำไฟฟ้า เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิงก์ออกไซด์ จะสามารถลดไฟฟ้าสถิตที่สะสมในเนื้อผ้าได้

- สมบัติป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต ทั้ง UV-A และ UV-B

อนุภาคที่มีขนาดเล็กลงในระดับนาโนเมตรของไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิงก์ออกไซด์ จะมีสมบัติในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ โดยจะสามารถสะท้อนแสงและ

รังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากสารที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรจะมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ทั้งยังมีสมบัติโปร่งแสง มีลักษณะใส ซึ่งสามารถป้องกันกันได้ที่ทั้ง UV-A และ UV-B โดยเมื่อนาอนุภาคดังกล่าวเคลือบบนเส้นใยผ้าก็จะสามารถกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้

- สมบัติป้องกันการยับ

อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างเส้นใยเซลลูโลสในเนื้อผ้าฝ้ายได้ และอนุภาคนาโนซิลิกาผสมกับสารกระตุ้นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Meleic anhydride) สามารถป้องกันการยับในผ้าไหมได้ดี ทั้งนี้เพราะผ้าฝ้ายและผ้าไหม เป็นผ้าที่สวมใส่สบายแต่ยับง่าย

- สมบัติอื่นๆ เช่น เบา นุ่มลื่น ให้กลิ่นหอม เป็นต้น

8.4 ประยุกต์ใช้ทางการแพทย์

การนำนาโนเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ มีเป้าหมายที่สำคัญ ดังนี้คือ

- เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการวินิจฉัยโรค การนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้ก็เพื่อให้สามารถออกแบบแนวทางการตรวจวินิจฉัยโรคต่างๆ ที่รวดเร็ว ถูกต้อง และแม่นยำมากขึ้น นอกจากนี้ด้วยหลักการเดียวกันยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการติดตามผลการรักษาที่สามารถหลีกเลี่ยงผลข้างเคียงหรือฤทธิ์อื่นไม่พึงประสงค์ที่เกิดจากการบำบัดรักษาได้มากกว่าเดิม

- เพื่อใช้ในการศึกษากระบวนการทางสรีรวิทยาที่เกิดขึ้นในร่างกายมนุษย์โดยใช้แนวทางของนาโนเทคโนโลยี และประยุกต์ใช้สำหรับศึกษาความผิดปกติที่เกิดจากโรคภัยไข้เจ็บทุกชนิด รวมทั้งโรคที่ยังไม่ทราบสาเหตุ

- เพื่อสร้างหุ่นยนต์นาโน (Nanorobots) สำหรับทำหน้าที่ช่วยเซลล์ในระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายที่มีอยู่ในธรรมชาติ โดยทำหน้าที่ป้องกันอันตรายจากสิ่งแปลกปลอมทั้งที่ก่อให้เกิดการติดเชื้อ ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง และก่อให้เกิดโรคอโตอิมมูน คล้ายกับคอมพิวเตอร์ดีเอ็นเอ (DNA computer) ที่กำลังได้รับการพัฒนาเพื่อมาแทนที่ซิลิโคน (Silicon Chip) ในอนาคต

บรรณานุกรม

1. กระบวนการ Photocatalytic. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://sichon.wu.ac.th/file/envi-shh-20090110-112240-pwrqR.pdf> (20 มีนาคม 2555)
2. พรรณทิพย์ ตั้งปรียารักษ์. 2551. เทคนิคปฏิบัติการใช้เครื่อง UV-Vis spectrophotometer ในการวิเคราะห์ทางเคมี. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.mwit.ac.th/~sarawoot/chem40235.htm> (5 มีนาคม 2555)
3. ภัทร์ สุขแสน. 2554. พื้นผิวอัจฉริยะด้วยนาโนเทคโนโลยี. ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากรวิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 16 (1): 124-130.
4. มณฑิรา ผารินทร์. 2555. การสังเคราะห์และหาลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองและไนโอเบียมสำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับแก๊ส. รายงานการศึกษาคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 120 น.
5. วีรยา ภัคเวช. 2554. เลื่อนาโน. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.nstda.or.th/nstda-doc-archives/doc_download/34- (20 มีนาคม 2555)
6. วิรัชชา เครือฟู. 2556. ผลของทองต่อความสามารถในการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ในแหล่งน้ำธรรมชาติของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยเฟลมสเปรย์ไฟโรลิสซิส, งานวิจัยคณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยแม่โจ้
7. Ammerlaan, J., McCurdy, R.J., Hurst, S.J. 2000. Process from the production of photocatalytic coatings on substrates. **World patent** 00/75087.
8. Blossey, R. 2003. Self-cleaning surfaces-virtual realities. **Nature Mater.** 2: 301-306.
9. Building with Conscience. วัสดุก่อสร้างที่มีสมบัติการทำมาสะอาดตัวเอง. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.stocorp.com> (20 มีนาคม 2555)
10. Cassie, A.B.D., Baxter, S. 1944. Wettability of porous surface. **Transitions Far. Soc.** 40: 546-551.

11. Feng X.J., Feng L, Jin M.H., Zhai J. 2004. Reversible super-hydrophobicity to super-hydrophilicity transition of aligned ZnO nanorod films. **J. Am. Ceram. Soc.** 126: 62-63.
12. Figaro. 2556. **Operating principle of semiconductor type gas sensors.** [Online]. Available <http://www.figaro.co.jp/en/item2.html> (5 มิถุนายน 2556)
13. Gimat. 2551. **ผิวทำความสะอาดตัวเองแบบใช้หลักการความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.ngimat.com/> (20 มีนาคม 2555)
14. Greenberg, C.B., 2000. Photocatalytically-activated self-cleaning article and method of making. **World patent** 98/41480.
15. Jazairli M.A.K., 2008. **Growth of zinc oxide nanoparticles on top of polymer and organic small molecules as a transparent cathode in tandem photovoltaic device,** Ph.D. thesis, Linkoping University, Sweden.
16. Khantha, C., Yakhanthip, T., Macneill, C.M., Aiamsen, P., Kruefu, V., Kungwan, N., Coffin, R.C., Phanichphant, S., Carroll, D.L. 2013. Synthesis of copolymer thieno[3,4-b]thiophene and benzodithiophene for application in solar cells, **Mol. Cryst. Liq. Cryst.**, 578: 1-7.
17. Kruefu, V. 2011. **Syntheses of niobium-doped zinc oxide nanoparticles by flame spray pyrolysis and their applications.** Ph.D. thesis. Chiang Mai University
18. Kruefu, V., Ninsonti, H., Wetchakun, N., Inceesungvorn, B., Pookmanee, P., Phanichphant, S. 2011. Photocatalytic degradation of phenol using Nb-doped ZnO nanoparticles, **Engineering Journal.** 16(3): 91-99.
19. Kruefu, V., Peterson, E., Khantha, C., Siriwong, C., Phanichphant S., Carroll, D.L. 2010. Flame-made niobium doped zinc oxide nanoparticles in bulk heterojunction solar cells, **Appl. Phys. Lett.** 97: 053302.

20. Liewhiran, C., Phanichphant, S. 2007. Effects of palladium loading on the response of a thick film flame-made ZnO gas sensor for detection of ethanol vapor. **Sensors**, 7(7): 1159-1184.
21. Liewhiran, C., Phanichphant, S. 2007. Influence of thickness on ethanol sensing characteristics of doctorbladed thick film from flame-made ZnO nanoparticles. **Sensors**, 7: 185-201.
22. Nanotex. **ผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่มีสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.nanotex.com> (20 มีนาคม 2555)
23. Pilkington. 2554. **ผลิตภัณฑ์ที่เป็นกระจกทำความสะอาดตัวเอง**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.pilkington.com/seficleaningglass> (20 มีนาคม 2555)
24. Poole Jr, C.P., Owens, F.J. 2003. **Introduction to nanotechnology**. John Wiley & Sons, Inc. 400 page.
25. Schierbaum, K.D. SnO₂ sensors. **Sens. Actuators B: Chem.** 71(18-19): 1194-1201.
26. Tseng, Y.K., Huang, C.J., Cheng, H.M., Lin, I.N. 2003. Properties of needle-like zinc oxide nanowires grown vertically on conductive zinc oxide films. **Adv. Funct. Mater.** 13: 811-814.
27. Wagh, M.S., Patil, L.A., Seth, T., Amalnerkar, D.P. 2004. Surface cupricated SnO₂-ZnO thick films as a H₂S gas sensor. **Mater. Chem. Phys.** 84: 228-233.
28. Wenzel, R.N. 1936. Surface roughness and contact angle. **Ind. Eng. Chem. Res.** 28: 988-994.
29. Zhu, B.L., Zeng, D.W., Wu, J., Song, W.L., Xie, C.S. 2003. Synthesis and gas sensitivity of In-doped ZnO nanoparticles. **J. Mater. Sci. –Mater. Electron.** 14: 521-526.

คำถามท้ายบท

- 8.1 ความหวังที่สำคัญที่สุดของมนุษยชาติในการนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้คืออะไร
- 8.2 ปัจจุบันมีการนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้ในด้านอาหารอย่างไรบ้าง
- 8.3 แนวคิดในการนำเทคโนโลยีระดับนาโนไปใช้ในการบำบัดรักษาโรคร้ายนั้นเป็นอย่างไร จำเป็นต้องใช้สิ่งใดบ้างจึงจะสามารถทำได้
- 8.4 เนื่องจากสมบัติเด่นด้านใดของวัสดุนาโน จึงมีการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีกับอุตสาหกรรมสิ่งทอ
- 8.5 จงยกตัวอย่างเทคโนโลยีทางด้านนาโนที่สามารถช่วยวิเคราะห์ทางการแพทย์ได้ว่าบุคคลนั้นมียีนส์ที่ก่อให้เกิดโรคหรือไม่ พร้อมทั้งอธิบายขั้นตอนการตรวจสอบ
- 8.6 Nanobiosensor คืออะไร ยกตัวอย่างการนำไปประยุกต์ใช้งาน
- 8.7 จงอธิบายว่านาโนเทคโนโลยีต่อไปนี้จะเกี่ยวข้องกับอย่างไรกับการรักษาโรคมะเร็ง อธิบาย
 - Cantilevers ของ AFM
 - Nanopore
 - Quantum dot
- 8.8 ผลิตภัณฑ์ เช่น Nano-Care, Nano-Pel และ Nano-Touch ของบริษัท NANO-TEX มีสมบัติเด่นคืออะไร
- 8.9 จงอธิบายให้เข้าใจเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานนาโนเทคโนโลยีในด้านต่อไปนี้
 - Self cleaning
 - Solar cell
- 8.10 ถ้าต้องการให้อิเล็กตรอนของซิงก์ออกไซด์สามารถกระโดดจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้น ซึ่งมี Band gap เท่ากับ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ แสงที่มากกระตุ้นจะต้องมีความยาวคลื่นอย่างน้อยเท่าใด ถ้ากำหนดให้ ค่าคงที่ของพลังค์เท่ากับ 6.626×10^{-34} จูล.วินาที และความเร็วแสงเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที (388 นาโนเมตร)

บทที่ 9

ความเป็นพิษของวัสดุนาโน:

- 9.1 วัสดุนาโนกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
- 9.2 ความปลอดภัยของนาโนเทคโนโลยี
- 9.3 นาโนเทคโนโลยีกับความปลอดภัย
- 9.4 ฉลากผลิตภัณฑ์นาโนคิว

9.1 วัสดุนาโนกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

การพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีในปัจจุบันได้พัฒนาอย่างรวดเร็ว และจากหลากหลายกิจกรรมของมนุษย์ ได้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งทางตรงและทางอ้อม ยกตัวอย่างเช่น การใช้สาร คลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbon, CFC) ทำให้เกิดรูโหว่ในบรรยากาศ ชั้นโอโซน ภาวะโลกร้อน ความแปรปรวนของฤดูกาล หรือภัยพิบัติต่างๆ เช่น น้ำท่วมและแผ่นดินไหว หรือสิ่งมีชีวิตที่มีความผิดปกติไป เช่น จิ้งจกสองหัว เป็นต้น สิ่งเหล่านี้สะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมทุกๆ ส่วนทั้งดิน น้ำ และอากาศ สำหรับวัสดุนาโนซึ่งเป็นวัสดุชนิดใหม่ที่ยังไม่รู้จักกันอย่างแพร่หลายมากนัก เมื่อพิจารณาถึงการแพร่กระจายของวัสดุนาโนสู่สิ่งแวดล้อม เมื่อใช้เป็นองค์ประกอบของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ในขณะที่ผู้ประกอบการส่วนใหญ่ยังไม่ได้ตระหนักถึงการปนเปื้อนของวัสดุนาโนสู่สิ่งแวดล้อม และผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นตามมา เนื่องจากผลเสียของวัสดุนาโนยังไม่ได้มีผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพของมนุษย์ แต่การปนเปื้อนของวัสดุนาโนที่เพิ่มขึ้นจากการนำมาประยุกต์ใช้ อาจทำให้สิ่งมีชีวิตอื่นๆ ในระบบนิเวศน์ที่อาศัยอยู่ทั้งในดิน น้ำ และอากาศ ได้รับผลกระทบจากวัสดุนาโนได้

ปัจจุบันในต่างประเทศเริ่มมีการศึกษาวิจัยถึงผลกระทบของอนุภาคนาโนต่อระบบนิเวศน์ตัวอย่างเช่น การศึกษาเปรียบเทียบความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ซิลิกา และซิงก์ออกไซด์ ในสภาพที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ได้แก่ ความเข้มข้นของสารแขวนลอยทั้ง 3 ชนิด ขนาดของอนุภาคนาโน และการกระตุ้นด้วยแสง โดยใช้แบคทีเรีย 2 ชนิด เป็นตัวแทนของแบคทีเรียในธรรมชาติ ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่า ความเป็นพิษต่อแบคทีเรียเรียงลำดับได้ดังนี้คือ ซิงก์ออกไซด์ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียมากที่สุด รองลงคือไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิลิกา นอกจากนี้ผลการวิจัยยังแสดงให้เห็นว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนและได้รับการกระตุ้นด้วยแสง สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้มากขึ้น เช่น ซิงก์ออกไซด์ขนาด 480 นาโนเมตร ที่ระดับความเข้มข้นเพียง 10 พีพีเอ็ม (ppm) ในสภาพที่ได้รับแสง สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ถึงร้อยละ 90 จากตัวอย่างของผลการวิจัยนี้ เพื่อจุดประสงค์ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสำหรับ

ผลิตภัณฑ์ใดผลิตภัณฑ์หนึ่ง แต่ยังไม่ได้มีการควบคุมในกรณีที่อนุภาคนาโนอาจแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นๆได้ เช่น ทำลายแบคทีเรียที่มีประโยชน์

9.2 ความปลอดภัยของนาโนเทคโนโลยี

เพื่อการแข่งขันทางการค้า ผู้ประกอบการจึงใช้กลยุทธ์ต่างๆ ในการสร้างตลาด ซึ่งหนึ่งในกลยุทธ์ที่ใช้ในปัจจุบัน คือ การนำเทคโนโลยีใหม่ๆ มาใช้ในการผลิตหรือเป็นองค์ประกอบของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ เพื่อให้สินค้ามีคุณภาพหรือประสิทธิภาพที่เหนือคู่แข่ง นาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ตั้งผู้ประกอบการและผู้บริโภคเริ่มมีความเกี่ยวข้องมากขึ้น ซึ่งการรับข้อมูลส่วนใหญ่เป็นไปเพียงตามคำโฆษณาของสินค้าประเภทนั้นๆ เช่น ซิลเวอร์นาโน คือ ใช้โลหะเงินขนาดนาโน หรือไทเทเนียมนาโน คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโน โดยส่วนใหญ่ยังไม่ได้รับข้อมูลด้านความเป็นพิษ เนื่องจากข้อมูลดังกล่าวยังอยู่ในเฉพาะรายงานการวิจัย ในขณะที่สินค้าที่ใช้นาโนเทคโนโลยีกลับมีเพิ่มขึ้น ดังนั้นผู้บริโภคจึงต้องมีความรู้พอสมควรในการแยกแยะที่จะเลือกหรือไม่เลือกใช้ผลิตภัณฑ์นาโน

การสร้างมาตรการรองรับ โดยอาจออกเป็นกฎหมายให้ผู้ประกอบการที่ต้องการนำเข้าสู่ผลิตภัณฑ์หรือจำหน่ายสินค้าที่ใช้นาโนเทคโนโลยีหรือมีวัสดุนาโนเป็นองค์ประกอบ ต้องได้รับการขึ้นทะเบียนเป็นอุตสาหกรรมใหม่ที่ต้องเฝ้าระวัง เพื่อให้องค์กรของรัฐทราบถึงปริมาณการใช้วัสดุนาโน ตลอดจนเส้นทางสู่ผู้บริโภค จนสิ้นสุดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด และเพื่อให้องค์กรของรัฐสามารถประเมินความเสี่ยงที่อาจเกิดจากการใช้ผลิตภัณฑ์นาโนได้ ผู้ประกอบการต้องมีการศึกษาด้านความเป็นพิษ ความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมก่อนที่จะนำเข้าสู่ผลิตภัณฑ์หรือจำหน่ายสินค้านั้น รวมทั้งหน่วยงานของรัฐที่ทำหน้าที่ในการกำกับดูแลผู้ประกอบการต้องตระหนักถึงความหลากหลายของสินค้าจากนาโนเทคโนโลยีที่อยู่ในหลายกลุ่มผลิตภัณฑ์ ทั้งอาหาร เครื่องสำอาง เสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่ม เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องได้รับการกำกับดูแลให้เป็นอย่างมีประสิทธิภาพ

9.3 นาโนเทคโนโลยีกับความปลอดภัย

ระบบการติดตามและจัดการความเสี่ยงด้านนาโนได้รับการรับรองขึ้นเป็นครั้งแรก (Certifiable nanospecific risk management and monitoring system, CENARIOS) ในต่างประเทศ เพื่อเป็นการสร้างมาตรฐานความปลอดภัยตั้งแต่การผลิต การขนส่ง จนถึงผู้บริโภค สำหรับประเทศไทย การวิจัยและพัฒนาด้านการใช้ประโยชน์จากนาโนเทคโนโลยีมีมากขึ้น แต่ความรู้ด้านอันตรายจากนาโนเทคโนโลยียังมีน้อยมาก ดังจะเห็นได้จากการวิจัยทางด้านนาโนเทคโนโลยี หลักสูตรการเรียนการสอนด้านนาโนเทคโนโลยีในระดับมหาวิทยาลัย หรือสินค้า ซึ่งใช้คำว่านาโนที่เพิ่มขึ้นมาก ซึ่งถือว่าเป็นความเสี่ยงของประเทศไทยที่ทั้งงานวิจัยและการใช้ผลิตภัณฑ์จากนาโนเทคโนโลยีมีมากขึ้น โดยไม่มีมาตรการในการควบคุมด้านความปลอดภัยให้กับผู้ที่เกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยีไม่ว่าจะเป็นนิสิต นักศึกษา นักวิจัย คนงานในโรงงาน หรือแม้แต่ผู้บริโภค และยิ่งไปกว่านั้นคือการแพร่กระจายสู่อากาศ แหล่งดิน และแหล่งน้ำ สาธารณะ ซึ่งอาจก่อให้เกิดผลเสีย คือการปนเปื้อนของอนุภาคนาโนในสิ่งแวดล้อม และผลกระทบต่อระบบนิเวศของสิ่งมีชีวิตโดยรวม เป็นต้น

9.4 ฉลากผลิตภัณฑ์นาโนคิว

เนื่องจากประเทศไทยยังไม่มีกฎหมายเฉพาะด้านนาโนเทคโนโลยี และยังไม่มีความเห็นหน่วยงานใดในภาครัฐ และเอกชนที่ทำหน้าที่ควบคุมดูแล รวมทั้งเฝ้าระวังผลกระทบในด้านนาโนเทคโนโลยี ดังนั้นศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ได้ร่วมกันจัดทำร่างแผนยุทธศาสตร์ด้านความปลอดภัยและจริยธรรมนาโนเทคโนโลยี (พ.ศ. 2555-2559) ขึ้น เพื่อใช้เป็นกรอบการทำงาน ครอบคลุมตั้งแต่การสร้างความรู้ความเข้าใจ ควบคุมกำกับดูแล เฝ้าระวัง รวมทั้งบริหารจัดการด้านความปลอดภัย และจริยธรรม ควบคู่ไปกับการพัฒนาเพื่อเป็นการป้องกัน และเตรียมรับมือแก้ไขผลกระทบต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้และพัฒนาด้านนาโนเทคโนโลยี และผลิตภัณฑ์นาโนในประเทศ

ฉลากนาโนคิว ดังแสดงในภาพ 9.1 คือฉลากผลิตภัณฑ์ที่ทำให้การรับรองว่าผลิตภัณฑ์นั้นมีวัสดุนาโนเป็นส่วนประกอบ โดยฉลากจะระบุขนาดของอนุภาคนาโน และสมบัติของผลิตภัณฑ์นาโน เช่น สมบัติด้านเชื้อแบคทีเรีย (Antibacterial) เป็นต้น ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อให้

เกิดความมั่นใจ และสร้างมาตรฐานผลิตภัณฑ์นาโนให้กับผู้บริโภค รวมทั้งทราบถึงสมบัติของผลิตภัณฑ์นาโน ผลิตภัณฑ์ที่จะได้รับฉลากนาโนคิวต้องเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้วัสดุนาโนในสถานะคอลลอยด์ (Colloid) ในขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งของการผลิตผลิตภัณฑ์ชนิดนั้น หรือมีการใช้วัสดุนาโนผสมอยู่ภายในเนื้อของผลิตภัณฑ์หรือเคลือบอยู่บนผิวของผลิตภัณฑ์



ภาพ 9.1 ฉลากนาโนคิว (ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2554)

บรรณานุกรม

1. คณะอนุกรรมการด้านความปลอดภัยและการบริหารความเสี่ยงด้านนาโนเทคโนโลยี. 2554. แผนยุทธศาสตร์ความปลอดภัยและจริยธรรมนาโน (ฉบับร่าง). ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ
2. โครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. ประวัติความเป็นมาของนาโนเทคโนโลยี. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=32&chap=8&page=t32-8-infodetail02.html> (25 มีนาคม 2555)
3. วิสันติ เลหาอุดมโชค. 2555. ความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยี. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.oshthai.org/phocadownload/nano.pdf> (25 มีนาคม 2555)
4. ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2554. Nano safety. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.nanotec.or.th/th/?cat=31> (25 มีนาคม 2555)
5. สุพิน แสงสุข. 2552. นาโนเทคโนโลยีและความปลอดภัย. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=5&ID=7> (25 มีนาคม 2555)
6. Adams, L.K., Lyon, D.Y., Alvarez, P.J.J. 2006. Comparative eco-toxicity of nanoscale TiO₂, SiO₂ and ZnO water suspension. **Water Res.** 40(19): 3527–3532.
7. Bartis, J.T., Landree, E., 2006. **Nanomaterials in the workplace policy and planning workshop on occupational safety and health.** Atlanta: National institute for occupational safety and health. 48 pages.
8. National institute for occupational safety and health. 2009. **Approaches to safe nanotechnology: managing the health and safety concerns associated with engineered nanomaterials.** DHHS-NIOSH Publication.
9. National institute for occupational safety and health. **Nanotechnology: 10 Critical Topic Areas.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.cdc.gov/niosh/topics/nanotech/critical.html> (25 มีนาคม 2555)

10. Phoenix, C., Treder, M. 2003. **Safe utilization of advanced nanotechnology.** [Online]. Available <http://crnano.org/safe.htm> (25 March 2012)

คำถามท้ายบท

- 9.1 โทษของวัสดุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนมีอะไรบ้าง
- 9.2 จงยกตัวอย่างผลกระทบจากวัสดุนาโนที่มีต่อสิ่งแวดล้อม
- 9.3 Certifiable nanospecific risk management and monitoring system (CENARIOS) คืออะไร
- 9.4 วัสดุนาโนคือ ระบุอะไร มีวัตถุประสงค์เพื่ออะไร และได้รับการรับรองจากที่ใด



สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 50290
PROGRAM IN MATERIALS SCIENCE, FACULTY OF SCIENCE,
MAEJO UNIVERSITY 50290