

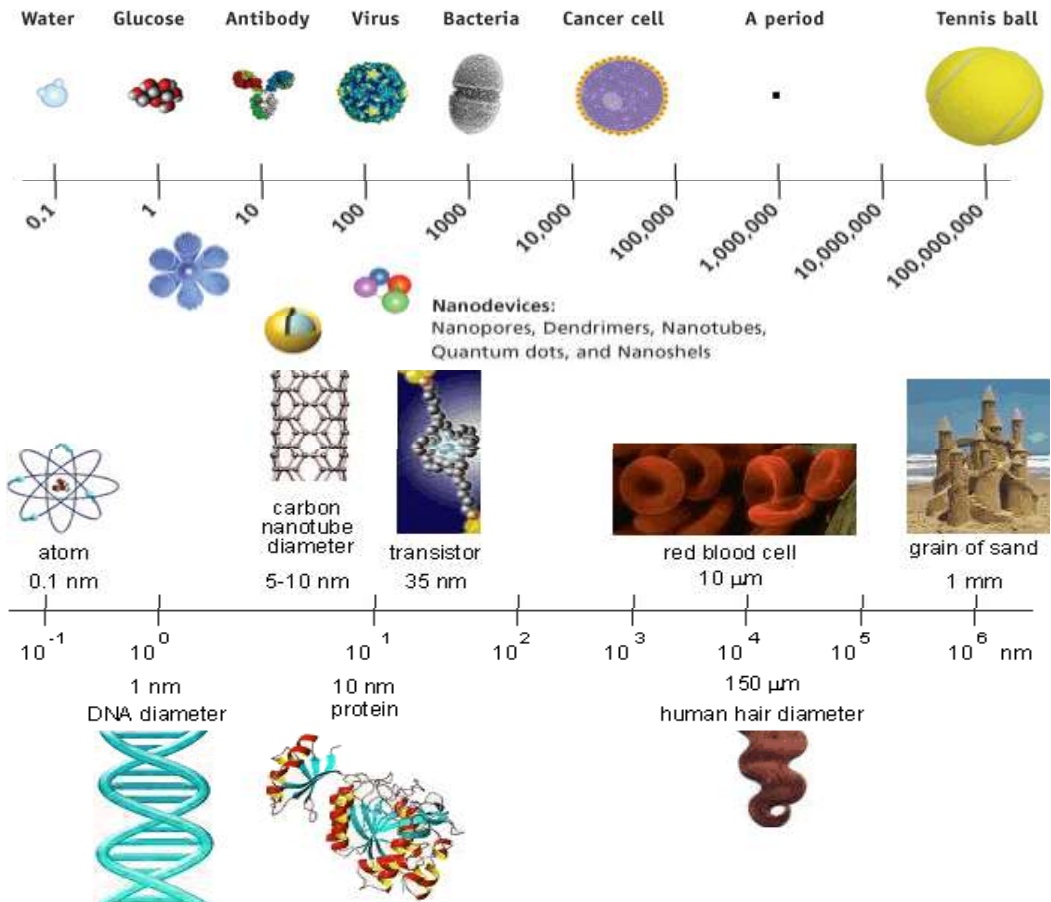
ส่วนที่ 1 คำจำกัดความและการจำแนกประเภทวัสดุนาโน  
Part 1 (Definition and classification of nanomaterials)

- วัตถุประสงค์
1. เพื่อศึกษาคำจำกัดความและความหมายของวัสดุนาโน
  2. เพื่อศึกษาการจำแนกประเภทและโครงสร้างของวัสดุนาโน
  3. เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้งานของวัสดุนาโน
  4. เพื่อศึกษาการพัฒนาและแนวโน้มการพัฒนาวัสดุนาโนในอนาคต

# บทที่ 1

## บทนำ (Introduction)

### ความหมายของวัสดุนาโน



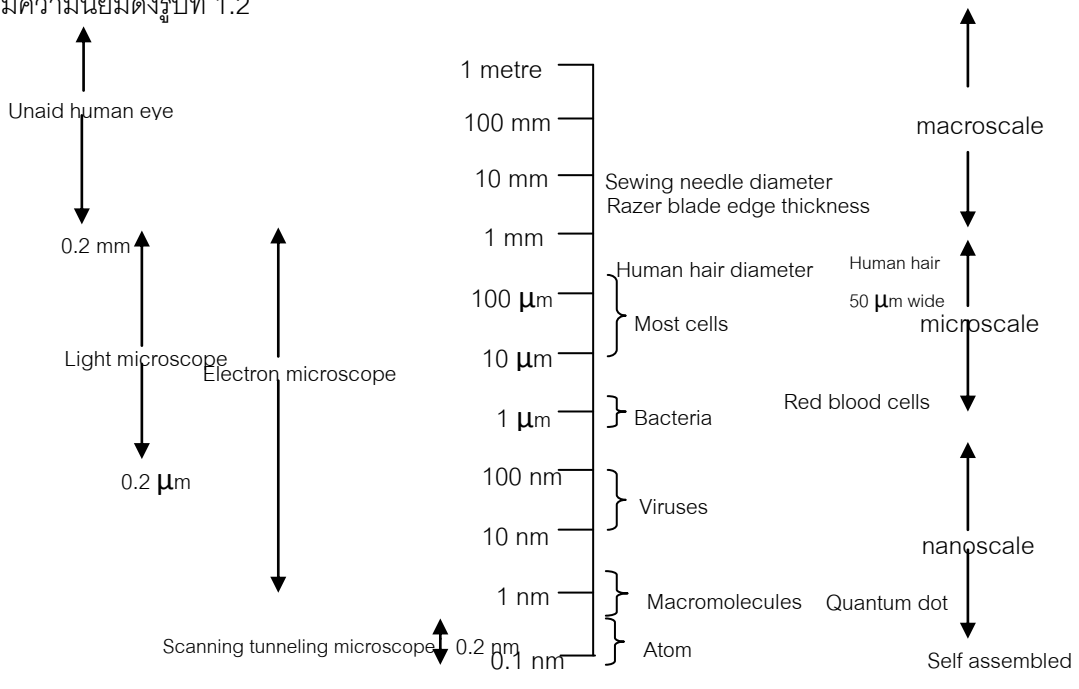
รูปที่ 1.1 ตัวอย่างวัสดุที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน ที่มา Richard P. Feynman, 2003

“Nano” มีรากศัพท์จากภาษากรีกหมายถึงหนึ่งในพันล้านส่วนซึ่งหมายถึงขนาดอนุภาคที่เล็กมากในระดับนาโนสเกลซึ่งมีอยู่หลากหลายชนิด รวมทั้งโครงสร้างของคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นแอลโลโทรป (Allotrope) ที่เรียกว่า บัคมินสเตอร์ฟูลเลอร์ีน (Buckminsterfullerene) หรือ บัคกี้บอล (Buckyball) รวมทั้งท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) ก็จัดเป็นอนุภาคนาโน การจัดลำดับขนาดอนุภาคตั้งแต่ขนาดใหญ่ระดับเมตร มิลลิเมตร ไมโครเมตร นาโนเมตรและอังสตรอม ก็เพื่อให้เกิดความเข้าใจเรื่องขนาดอนุภาคระดับนาโนได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ดังรูป 1.1 อาจกล่าวได้ว่าอนุภาคนาโนมีขนาดเล็กกว่าเมล็ดข้าว ดังนั้นการศึกษาโครงสร้าง คุณสมบัติและกระบวนการผลิตวัสดุนาโนจำเป็นต้องมีอุปกรณ์หรือเครื่องมือ

ที่มีประสิทธิภาพที่มีความเหมาะสมตั้งแต่ขั้นตอนการผลิต เนื่องจากต้องใช้เครื่องมือขนาดเล็กระดับนาโนที่เรียกว่าเครื่องจักรวิศวกรรมนาโน “Nanoengineered machines” นอกจากนี้วัสดุนาโนยังมีความเกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีนาโน “Nanotechnology” ซึ่งหมายความว่าต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีอย่างต่อเนื่องทั้งด้านวัสดุนาโนและกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์นาโน

เทคโนโลยีนาโนเป็นศาสตร์ที่เกี่ยวข้องทั้งด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ รวมทั้งข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องมือในระดับนาโน คำว่า “Nano” หมายถึง  $10^{-9}$  เมตร ดังนั้น 1 นาโนเมตรคือหนึ่งในพันล้านส่วน

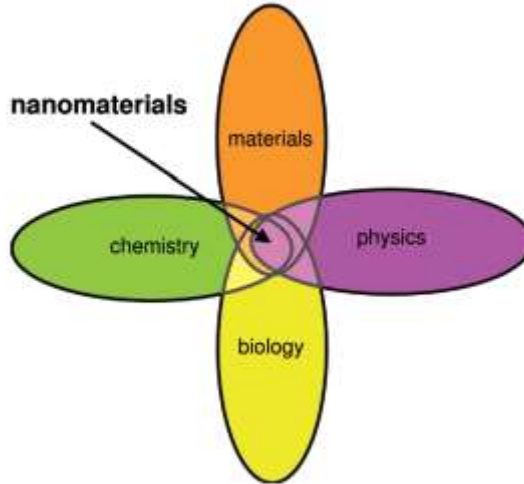
วัตถุดิบขนาดเล็กระดับนาโนประกอบด้วยสารประกอบอินทรีย์ อินทรีย์ และชีวเคมี สามารถพบได้ทั้งจากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ที่เตรียมได้จากสิ่งมีชีวิตและสิ่งไม่มีชีวิต ดังนั้นวัสดุนาโนคือวัสดุที่อาจเป็นวัสดุชนิดโลหะ เซรามิก พอลิเมอร์และคอมพอสิต ผ่านการสังเคราะห์ขึ้นมาโดยการดัดแปลงการจัดเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลให้มีขนาดอยู่ในช่วง 0.1-100 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นผมประมาณ 1 แสนเท่า ส่งผลต่อสมบัติและพฤติกรรมต่าง ๆ ของวัสดุขนาดจิ๋วเหล่านี้ ได้แก่ สมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติเชิงกล สมบัติทางแม่เหล็ก สมบัติทางแสง ทำให้วัสดุนาโนมีความแตกต่างจากวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่ในระดับที่เราคุ้นเคย เช่น เมตร เซนติเมตร มิลลิเมตร ไมโครเมตร วัสดุนาโนสามารถถูกแบ่งย่อยออกได้เป็นหลายกลุ่มตามการประยุกต์ใช้งานและตามความนิยมดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 การจัดลำดับขนาดอนุภาคของวัสดุ ที่มา Richard P. Feynman, 2003 “mushroom”

นอกจากนี้วัสดุนาโนยังสามารถจัดแบ่งตามโครงสร้างผลึกได้เป็นผลึกนาโน (Nanocrystalline) และอนุภาคนาโน (Nanoparticle) โดยที่ก้อนหรือปริมาตรของผลึกนาโนประกอบด้วยเม็ดผลึก (Grain sizes) ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนจนถึงขนาดประมาณ 100 นาโนเมตร แต่อนุภาคนาโนจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต่ำกว่า 100 นาโนเมตร ดังนั้นก้อนหรือปริมาตรของวัสดุที่เป็นผลึกนาโนประกอบขึ้นจากการรวมกลุ่มกันของอนุภาคนาโนนั่นเอง การศึกษาค้นคว้าวิจัยทางด้านวัสดุนาโนต้องใช้ความพยายามซึ่งเกี่ยวข้องกับความรู้และศาสตร์ด้านต่างๆ หลายสาขา รวมทั้งปฏิสัมพันธ์ของนักวิจัยในสาขาต่าง ๆ เช่น ฟิสิกส์ เคมี วิศวกรรมศาสตร์ และวัสดุศาสตร์ หรือแม้กระทั่งชีววิทยา และทางการแพทย์ งานวิจัยวิทยาศาสตร์พื้นฐานของวัสดุนาโนเป็นสิ่งสำคัญที่นักวิทยาศาสตร์ให้ความสนใจด้วยเช่นกัน ศักยภาพของวัสดุนาโนสามารถช่วยพัฒนาอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ และการสังเคราะห์วัสดุให้มีความบริสุทธิ์สูง เป็นการเพิ่มคุณค่าทางเศรษฐกิจและสภาพแวดล้อม รวมทั้งคุณลักษณะเฉพาะของโครงสร้างใหม่และส่งผลต่อคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของวัสดุนาโน การเตรียมผลิตภัณฑ์จากอนุภาคนาโนที่มีความหนาแน่นสูงและมีสิ่งเจือปนต่ำ และการเก็บรักษาสภาพรายละเอียดของเม็ดผลึกเพื่อดำรงไว้ซึ่งคุณสมบัติเชิงกลที่มีความสัมพันธ์กับขนาดสเกลในระดับนาโน เทคโนโลยีสำหรับเตรียมอนุภาคนาโนมีหลายวิธี ได้แก่ การเตรียมจากกระบวนการไอระเหย การเตรียมจากของเหลวหรือของแข็ง การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโดยเทคนิคไอระเหยมีหลายวิธีตัวอย่างเช่นการเตรียมจากกระบวนการตกสะสมของไอระเหยทางฟิสิกส์ (Physical vapor deposition, PVD) กระบวนการตกสะสมของไอระเหยทางเคมี (Chemical vapor deposition, CVD) การฉีดพ่นละอองฝอย (Spray drying) การระเหยควบแน่น (Evaporation condensation) พลาสมา (Plasma) แอโรซอลไพโรไลซิส (Aerosol pyrolysis) สำหรับกระบวนการเตรียมอนุภาคนาโนจากของเหลวจะเกี่ยวข้องกับวิธีการโซล-เจล (Sol-gel) และการเตรียมจากสารละลายเคมี กระบวนการเตรียมอนุภาคนาโนจากของแข็งสามารถเตรียมได้จากการบด การขัดสี หรือการสังเคราะห์ทางเคมีเชิงกล (Mechanochemical) รวมทั้งกระบวนการเคลือบผิวผลิตภัณฑ์ด้วยวัสดุนาโน เป็นต้น แต่ละวิธีดังกล่าวมีเทคนิค มีประโยชน์และข้อบกพร่องแตกต่างกัน สำหรับการเตรียมผงวัสดุนาโนในปริมาณมาก ๆ นิยมใช้กระบวนการบดหรือการขัดสีเชิงกล และการฉีดพ่นละอองสาร (Spraying) อนุภาคนาโนที่เตรียมได้จากการสังเคราะห์จากหลายวิธีดังกล่าวข้างต้น อาจส่งผลต่อโครงสร้างภายในของอนุภาคนาโนที่แตกต่างกันและมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของวัสดุที่เป็นของแข็ง กระบวนการเตรียมอนุภาคนาโนให้มีความหนาแน่นมากหรือเพื่อให้ได้วัสดุนาโนรวมกันเป็นก้อนขนาดใหญ่หรือการเคลือบผิวผลิตภัณฑ์เพื่อให้ได้ความหนาของเม็ดผลึกอยู่ในระดับนาโนนั้นทำได้ค่อนข้างยากและมีความยุ่งยากมากในทางปฏิบัติ เนื่องจากอนุภาคนาโนมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง มีความไวต่อปฏิกิริยาสูง และมีการเกาะกลุ่มกันอย่างแข็งแรงเหนียวแน่น นอกจากนี้การสังเคราะห์

อนุภาคนาโนมักเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิค่อนข้างสูง ดังนั้นการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ในระหว่างการสังเคราะห์และผลลัพธ์ของกระบวนการต่าง ๆ จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้ทลายความสามารถของนักวิจัยและนักวิทยาศาสตร์ ความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการเตรียมโครงสร้างและคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุนาโนก็เป็นสิ่งจำเป็นต่อการพัฒนาวัสดุนาโนชนิดใหม่ ๆ ที่มีคุณสมบัติ โครงสร้างและการใช้งานด้านต่าง ๆ ตามคุณสมบัติอันหลากหลายตามธรรมชาติและคุณลักษณะของวัสดุนาโนแต่ละชนิด



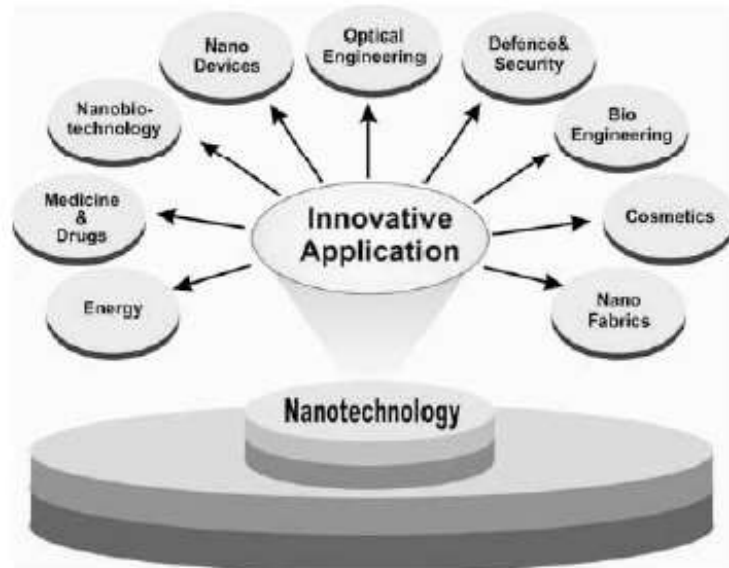
รูปที่ 1.3 ความสัมพันธ์ขององค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับศาสตร์ด้านนาโน ที่มา Vollath 2008

วัสดุนาโนยังมีความเกี่ยวข้องกับคำว่า วิทยาศาสตร์นาโน (Nanoscience) และเทคโนโลยีนาโน (Nanotechnology) ซึ่งคำทั้งสองนี้เป็นคำที่กว้างและมีความสัมพันธ์กัน สามารถประยุกต์ใช้กับงานหลากหลายสาขาเช่น อิเล็กทรอนิกส์ เคมี วัสดุ เซนเซอร์ รวมทั้งเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับศาสตร์ระดับนาโนและนอกจากนี้ยังมีศัพท์คำว่า “Nano-Universe” ที่เกี่ยวข้องและสัมพันธ์กับวิทยาศาสตร์นาโน (Nanoscience) เทคโนโลยีนาโน (Nanotechnology) และการพัฒนาการใช้ประโยชน์ของวัสดุนาโน (Nanoenable technology) โดยมีความหมายดังต่อไปนี้

คำว่า**วิทยาศาสตร์นาโน (Nanoscience)** คือความรู้และความเข้าใจขั้นพื้นฐานเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของโครงสร้างและสมบัติของวัสดุนาโน โดยการใช้เครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ทดสอบ

คำว่า**เทคโนโลยีนาโน (Nanotechnology)** เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีขั้นสูงที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดการ การสร้าง การวิเคราะห์วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักรหรือผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ รวมทั้งการออกแบบหรือการประดิษฐ์เครื่องมือเพื่อใช้สร้างหรือวิเคราะห์วัสดุขนาดเล็กในระดับนาโนเช่น การจัดเรียงตัวของอะตอมและโมเลกุลได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุหรืออุปกรณ์มีคุณสมบัติที่พิเศษขึ้นทั้งด้านฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยาเพื่อนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ ตัวอย่างเช่น วัสดุ

อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ไฟฟ้า และเครื่องมือต่าง ๆ ทำให้การพัฒนาวัสดุนาโนมีความเป็นไปได้ในเชิง เศรษฐศาสตร์และเกิดการ พัฒนาเพื่อประโยชน์ต่อสาธารณะดังรูป 1.4



รูปที่ 1.4 การพัฒนาเทคโนโลยีนาโนกับอุตสาหกรรม ที่มา Vollath 2008

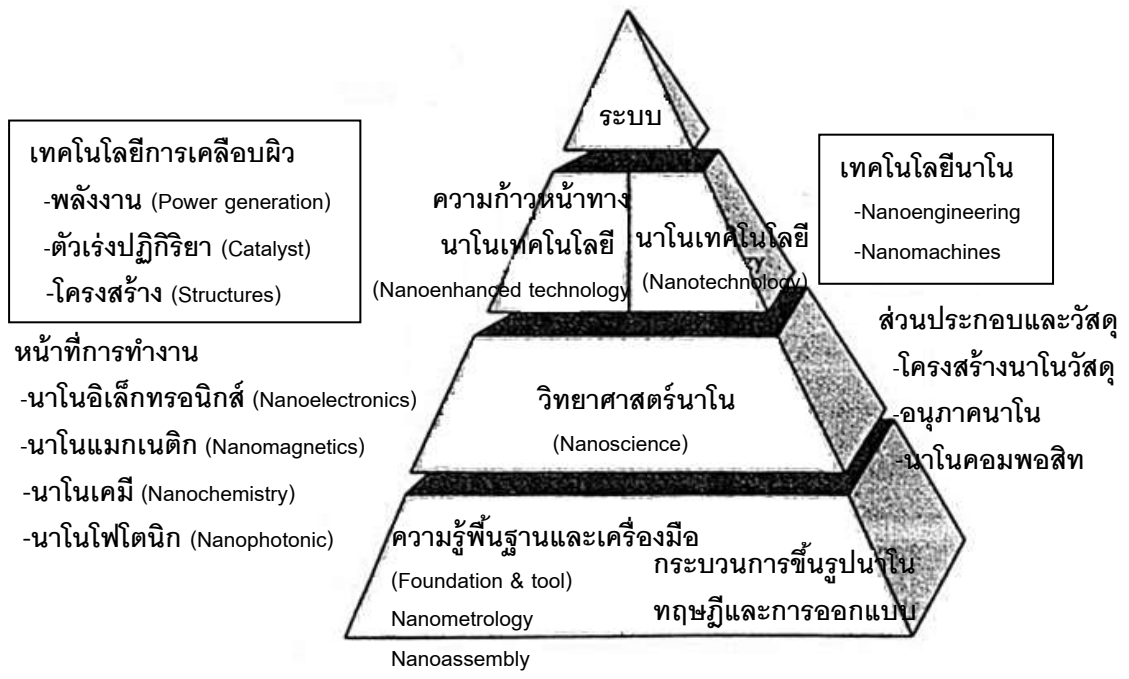
การพัฒนาการใช้ประโยชน์ของวัสดุนาโน (Nanoenable technology) คือการนำความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับวิชาการด้านนาโนวัสดุ เทคโนโลยีนาโน และวิทยาศาสตร์นาโน เพื่อการพัฒนาก่อเกิด ประโยชน์ที่เป็นรูปธรรมเช่น การผลิตตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst), เทคโนโลยีการเคลือบผิว (Coating), การพัฒนาด้านพลังงานและการสำรองพลังงาน (Power generater and storage) การพัฒนา นวัตกรรมการผลิตวัสดุชนิดใหม่ที่มีผลกระทบเชิงเศรษฐกิจอย่างแท้จริง แนวทางการพัฒนาวัสดุนา โนมี 2 แบบคือ

1. **เทคโนโลยีพัฒนาแบบบนลงล่าง (Top-Down Technology)** เป็นเทคโนโลยีที่ผลิตสิ่งต่าง ๆ โดย อาศัยวิธีทางกล เช่น การกลึง การบด การอัด การเชื่อมต้อ การตัดโค้งงอ และวิธีอื่น ๆ หรืออาจใช้วิธีทาง เคมีโดยการผสมให้เกิดการทำปฏิกิริยาทางเคมีโดยพยายามควบคุมสภาวะต่าง ๆ ให้เหมาะสมแล้วปล่อยให้ สารตั้งต้นทำปฏิกิริยากันเองหรืออาจเรียกว่าเป็นเทคโนโลยีแบบโดยรวมหรือแบบหยาบ (Bulk Technology) การผลิตอยู่ในระดับ 0.2-0.3 ไมครอน เกี่ยวข้องกับอะตอมจำนวนมากในระดับล้านล้านอะตอม ตัวอย่างเช่น ไมโครชิป

2. เทคโนโลยีพัฒนาแบบล่างขึ้นบน (Bottom-Up Technology) เป็นเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตสิ่งต่าง ๆ โดยอาศัยวิธีการจัดการกับสิ่งต่าง ๆ หรือการผลิตสิ่งต่าง ๆ โดยการนำอะตอมหรือโมเลกุลมาจัดเรียงในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ สิ่งทีผลิตขึ้นมาได้นั้นอาจเป็นสิ่งเล็ก ๆ หรือเป็นสิ่งใหญ่ก็ได้ ซึ่งอาจเรียกว่าเทคโนโลยีระดับโมเลกุล (Molecular Technology) โดยนำเอาเทคโนโลยีเหล่านี้ไปสร้างสิ่งทีใหญ่ขึ้นมา ตัวอย่างเช่น พืชสร้างผนังเซลล์จากการนำเอาโมเลกุลน้ำตาลมาเรียงต่อกัน ดังนั้นเทคโนโลยีระดับโมเลกุลนี้เองทีทำให้เกิดการพัฒนาด้าน**เทคโนโลยีนาโน**

เทคโนโลยีนาโนมีพื้นฐานการผลิตอยู่ในระดับโมเลกุลเป็นการรวมเอาหลักการทางเคมีและทางกลศาสตร์มาประยุกต์ใช้งานทีซับซ้อนขึ้น จากหลักการทางเคมีพบว่าโมเลกุลสามารถเคลื่อนทีได้โดยการแพร่และการชนกันของโมเลกุลในทุกตำแหน่งและทุกทิศทาง ส่งผลให้การควบคุมปฏิกิริยาเคมีทีเกิดขึ้นทำได้ยาก

**ความสัมพันธ์ของคำว่า “Nano-Universe”** คือความสัมพันธ์ของเทคโนโลยี วิทยาศาสตร์นาโน รวมทั้งความรู้พื้นฐานและความเข้าใจเรื่องเครื่องมือทีใช้ในการวิเคราะห์และตรวจสอบด้านวัสดุนาโน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า “Nano-Universe” หมายถึงความสัมพันธ์ทีเกี่ยวข้องกันทั้งระบบดังรูป 1.5



รูปที่ 1.5 ความสัมพันธ์ของคำว่า “Nano-Universe” ทีมา Goldstein, A.N., 1997

วัสดุนาโนเป็นวัสดุที่น่าสนใจเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนที่สามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ทั้งด้านกายภาพ เคมี ทางกล ทางความร้อน ทางโครงสร้าง รวมทั้งด้านอื่น ๆ ของวัสดุให้ดีขึ้นทั่วทั้งโครงสร้างตัวอย่างเช่น

1. ช่วยปรับปรุงสมบัติด้านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมและประจุบริเวณผิวทำให้สมบัติด้านไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์และสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุดีขึ้นโดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

2. ปรับปรุงโครงสร้างด้านชีวโมเลกุลของสารทั้งระบบให้ดีขึ้นเช่นทำให้เกิดการลอกเลียนแบบโครงสร้างและการทำงานของวัสดุหรือสารชีวโมเลกุลในธรรมชาติทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติของการเข้ากันได้ (Compatibility) กับร่างกายของสิ่งมีชีวิต

3. เนื่องจากวัสดุนาโนมีขนาดเล็ก ดังนั้นจึงมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Surface area) สูง สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือคะตะลิสต์ (Catalyst) วัสดุดูดซับ (Adsorbent) ประโยชน์ด้านการแพทย์ เช่น การนำส่งยา (Drug delivery) เข้าสู่เซลล์ในร่างกายของผู้ป่วย

4. โครงสร้างของวัสดุนาโนควรมีความแข็งแรงที่ดีเพื่อการประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ ที่หลากหลายประโยชน์ รวมทั้งการพัฒนาเพื่อผลิตวัสดุนาโนคอมพอสิตหรือวัสดุประกอบนาโน

5. วัสดุนาโนมีโครงสร้างขนาดเล็กจึงสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของผลิตภัณฑ์วัสดุนาโนให้สูงขึ้นหรือช่วยเร่งปฏิกิริยาเคมีให้เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วทำให้ประหยัดเวลาและพลังงานในกระบวนการผลิต

6. กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์วัสดุนาโนอาจมีความซับซ้อนทั้งด้านขั้นตอนกระบวนการผลิต อาจจำเป็นต้องใช้เครื่องมือในการผลิตที่มีขนาดเล็ก (Nanomachines) เพื่อใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ ตัวอย่างเช่น นาโนอิเล็กทรอนิกส์ (Nanoelectronics) เครื่องมือทางการแพทย์ขนาดนาโน (Nanomedical devices) เป็นต้น

## คำถามท้ายบท

1. จงอธิบายความหมายของคำว่าวัสดุนาโน (Nanomaterials)
2. แนวทางการพัฒนาวัสดุนาโนมีกี่แบบ อะไรบ้าง
3. แอลโลโทรป (Allotrope) ของคาร์บอนคืออะไร
4. จงยกตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากวัสดุนาโนมา 5 อย่าง
5. ข้อดีของการนำวัสดุนาโนมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เป็นอย่างไร



## บทที่ 2

### การจำแนกประเภทของวัสดุนาโน (Nanomaterials Classification)

การจำแนกประเภทและชนิดของวัสดุนาโนตามระบบการจัดเรียงโครงสร้างและพันธะภายในโครงสร้างของวัสดุ สามารถจัดแบ่งชนิดวัสดุนาโนได้เป็น 4 ประเภทดังนี้

1. วัสดุนาโนโลหะ (Nanometallic materials) รวมทั้งวัสดุนาโนโลหะอัลลอยด์ คืออนุภาคนาโนโลหะหรือโลหะอัลลอยด์ที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนที่เกิดจากโครงสร้างที่มีการยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะปฐมภูมิ (Primary bond) ชนิดพันธะโลหะ (Metallic bond) เช่น นาโนซิลเวอร์ (Nano-Silver) นาโนโกลด์ (Nano-Gold) นาโนไททาเนียม (Nano-Titanium) เป็นต้น

2. วัสดุนาโนเซรามิก (Nanoceramic materials) คือสารประกอบออกไซด์ โบรไรต์ ไนไตรด์ คาร์ไบด์ของโลหะที่มีอนุภาคนาโนขนาดเล็กในระดับนาโนเกิดจากโครงสร้างที่ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะปฐมภูมิ (Primary bond) ชนิดพันธะไอออนิก (Ionic bond) ได้แก่ นาโนซิลิกา (Nano-Silica) นาโนซิงค์ออกไซด์ (Nano-ZnO) นาโนอะลูมินา (Nano-Alumina) นาโนคอปเปอร์ออกไซด์ (Nano-CuO) และนาโนคาร์บอน (Carbon-based nanomaterials) ที่มีอนุภาคนาโนขนาดเล็กในระดับนาโนและเกิดจากโครงสร้างที่มีการยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะปฐมภูมิ (Primary bond) ชนิดพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ได้แก่ เขม่าคาร์บอน (Carbon black) ฟูลเลอร์รีน (Fullerene) ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube, CNT) เป็นต้น

3. วัสดุนาโนพอลิเมอร์ (Nanopolymer materials) คือสารอินทรีย์ เคมีอินทรีย์ ชีวเคมี และโปรตีนที่มีอนุภาคนาโนขนาดเล็กในระดับนาโนและเกิดจากโครงสร้างที่มีการยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะปฐมภูมิ (Primary bond) ชนิดพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ได้แก่ เส้นใยนาโนหรือไฟเบอร์นาโน (Nano-Fiber) ไมเซลล์ (Micelle) ซุปเปอร์โมเลกุล (Supramolecular) เนื้อเยื่อเทียม (Tissue engineering or Scaffolds) สารประกอบแมโครไซคลิก (Macrocyclic compounds)

4. วัสดุนาโนคอมพอสิต (Nanocomposite materials) ประกอบด้วยวัสดุนาโนพอลิเมอร์คอมพอสิต (Nanopolymer composites, NPMCs) วัสดุนาโนเซรามิกคอมพอสิต (Nanoceramic composite, NCMCs) และวัสดุนาโนโลหะคอมพอสิต (Nanometallic composites, NMMCs)

**พันธะภายในโครงสร้างของของแข็ง** จากโครงสร้างของของแข็งที่ทำให้ได้วัสดุนาโนทั้งชนิดโลหะ โลหะอัลลอยด์ เซรามิก พอลิเมอร์ คอมพอสิต และคาร์บอนทำให้พันธะที่ทำหน้าที่ยึดเหนี่ยวโครงสร้างมีหลากหลายชนิดดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 พันธะภายในโครงสร้างวัสดุนาโนชนิดของแข็ง

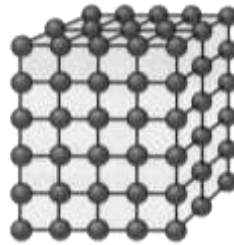
คุณลักษณะและชนิดวัสดุ	วัสดุนาโนโลหะ	วัสดุนาโนเซรามิก	วัสดุนาโนเซรามิกบางชนิด	วัสดุนาโนพอลิเมอร์
อนุภาคของยูนิทเซลล์	ไอออนของโลหะ	แคตไอออนและแอนไอออน	อะตอม	โมเลกุลหรืออะตอม
ชนิดพันธะ	พันธะโลหะระหว่างแคตไอออนและอิเล็คตรอน	พันธะไอออนิกชนิดไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic)	พันธะโควาเลนต์	พันธะโควาเลนต์ชนิดไดโพลโมเมนต์หรือพันธะไฮโดรเจน
คุณสมบัติ	นำความร้อนและนำไฟฟ้า, มีลักษณะอ่อนนุ่มจนถึงแข็งมาก	ไม่นำไฟฟ้าและไม่นำความร้อน, มีลักษณะแข็งและเปราะ,	ไม่นำไฟฟ้าและไม่นำความร้อน ยกเว้นคาร์บอนเพชร แกรไฟต์	ไม่นำไฟฟ้าและไม่นำความร้อน, มีลักษณะอ่อนนุ่ม
ตัวอย่าง	Li, Na, K, Ca, Cu, Ni, Cr	NaCl, CaBr <sub>2</sub> , K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	SiO <sub>2</sub> (ควอทซ์ และแก้ว), C (เพชร, แกรไฟต์, คาร์บอน)	CH <sub>4</sub> , O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , S <sub>8</sub>

### โครงสร้างและการจัดเรียงตัวของวัสดุนาโน

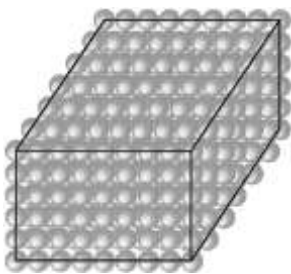
วัสดุนาโนแบ่งเป็น 3 ชนิด ตามโครงสร้างของแข็งประกอบด้วยโครงสร้างผลึก (Crystalline) โครงสร้างกึ่งผลึก (Semicrystalline) และโครงสร้างอะมอร์ฟัส (Amorphous)

1. **โครงสร้างผลึก (Crystalline structure)** คือโครงสร้างของแข็งที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอม ไอออน หรืออนุภาคอย่างเป็นระเบียบมีความสม่ำเสมอใน 3 ทิศทางหรือ 3 มิติ ได้แก่

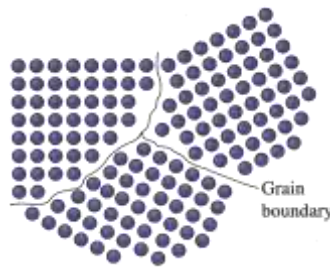
1.1 โครงสร้างผลึกของวัสดุนาโนโลหะ วัสดุนาโนอัลลอยด์ วัสดุนาโนเซรามิก ที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบดังรูปที่ 2.1 ทั้งชนิดโครงสร้างผลึกเดี่ยว (Single crystal) และโครงสร้างหลายผลึก (Polycrystal) ดังรูป 2.2 สำหรับโครงสร้างหลายผลึกทำให้เกิดรอยต่อระหว่างผลึกที่เรียกว่าขอบเกรนหรือรอยต่อเกรน (Grain boundary) โครงสร้างผลึกของวัสดุนาโนในกลุ่มนี้จะมีรูปทรงแบบเรขาคณิตตามระบบ Bravais lattice



รูปที่ 2.1 การจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบของโครงสร้างผลึก

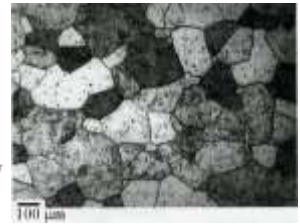


a)



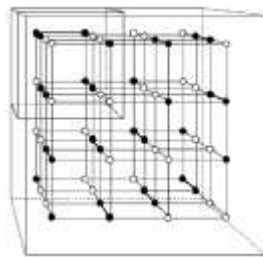
Grain boundary

b)



รูปที่ 2.2 การจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบของโครงสร้าง a) ผลึกเดี่ยว (Single crystal) และ b) หลายผลึก (Polycrystal)


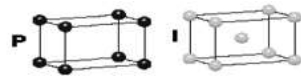
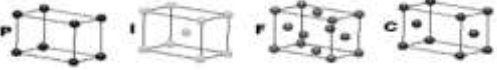

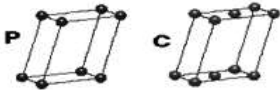
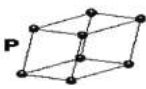

โครงสร้างตามระบบ Bravais lattice มีการจัดเรียงตามความยาวและมุมของหนึ่งหน่วยเซลล์ (Unit cell) ดังนั้น Unit cell หมายถึงหน่วยที่เล็กที่สุดของผลึกที่แสดงสมบัติความเป็นผลึกตามแลตทิซ (Lattice point) และ Lattice point หมายถึงการจัดเรียงอนุภาคในผลึกแบบซ้ำ ๆ กันใน 3 มิติดังรูป 2.3



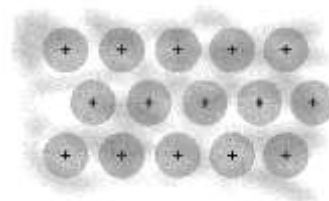
รูปที่ 2.3 ยูนิทเซลล์ของผลึก

การจัดเรียงโครงสร้างตามระบบ Bravais lattice แบ่งได้เป็น 7 ระบบ ประกอบด้วย 14 รูปแบบ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 โครงสร้างผลึกตามระบบมาตรฐาน Bravais Lattice

ชนิดของผลึก (Types of Crystal)	แลททิซ พารามิเตอร์ (Lattice parameter)	รูปแบบผลึก
คิวบิก (Cubic)	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
เตตระโกนอล (Tetragonal)	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
ออร์โธโรมบิก (Orthorhombic)	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
เฮกซะโกนอล (Hexagonal)	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
โมโนคลินิก (Monoclinic)	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma \neq 120^\circ$	
ไตรคลินิก (Triclinic)	$a \neq b \neq c,$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	
ไตรโกนอล (Trigonal)	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	

สำหรับวัสดุโนโลหะและวัสดุโนอัลลอยด์ประกอบด้วยพันธะโลหะที่ภายในโครงสร้างคือ อนุภาคโลหะเพียงอย่างเดียวที่ประกอบกันเป็นโครงสร้างตั้งแต่ 1 ชนิดขึ้นไป จึงมีการจัดเรียงตัวของผลึกค่อนข้างชัดเจนและสอดคล้องกับระบบ Bravais lattice ดังรูป 2.4

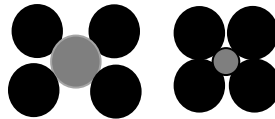


Electron sea model theory

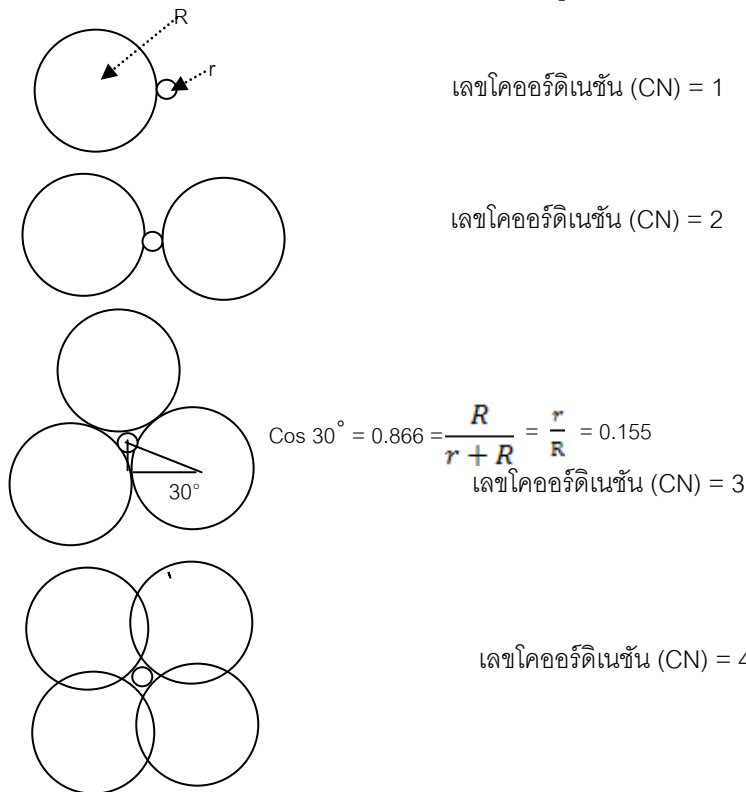
รูปที่ 2.4 อะตอมแคตไอออนในโครงสร้างวัสดุโนโลหะ

สำหรับโครงสร้างผลึกของวัสดุโนเซรามิกจะมีความซับซ้อนกว่าเนื่องจากโครงสร้างประกอบด้วยพันธะไอออนิกที่มีทั้งอะตอมของธาตุโลหะหรืออะตอมแคตไอออนที่มีศักย์ไฟฟ้าหรือประจุเป็นบวกของ

ธาตุที่อยู่ในหมู่ 1, 2, 3 และธาตุทรานซิชัน ธาตุในกลุ่มแลนทาไนด์ แอกทิไนด์ รวมอยู่กับอะตอมของธาตุโลหะหรืออะตอมแอนไอออนที่มีศักย์ไฟฟ้าหรือประจุเป็นลบจากธาตุที่อยู่ในหมู่ 5, 6 และหมู่ 7 ตามตารางธาตุ ตัวอย่างเช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) แต่เนื่องจากขนาดอะตอมของแคตไอออนและแอนไอออนแตกต่างกันจึงทำให้โครงสร้างของวัสดุนาโนเซรามิกมีความซับซ้อนและมีรายละเอียดเรื่องโครงสร้างเกี่ยวข้องกับชนิดและจำนวนอะตอมที่ล้อมรอบอะตอมกลางในตำแหน่งของยูนิตเซลล์หรือแลตทิซที่เรียกว่าโคออร์ดิเนชัน (Coordination number, CN) ดังรูป 2.5







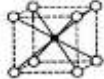

รูปที่ 2.5 อะตอมแคตไอออนและแอนไอออนในโครงสร้างของวัสดุนาโนเซรามิกที่เสถียร (Stable) เลขโคออร์ดิเนชัน (Coordination number) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงยึดเกาะระหว่างแคตไอออนและแอนไอออนด้วยมุมสัมผัสที่เหมาะสมทำให้การทำนายเลขโคออร์ดิเนชันสามารถทำนายได้จากอัตราส่วนระหว่างรัศมีแคตไอออน (r) ต่อร์ศมีแอนไอออน (R), หรือ (r/R) ดังรูปที่ 2.6



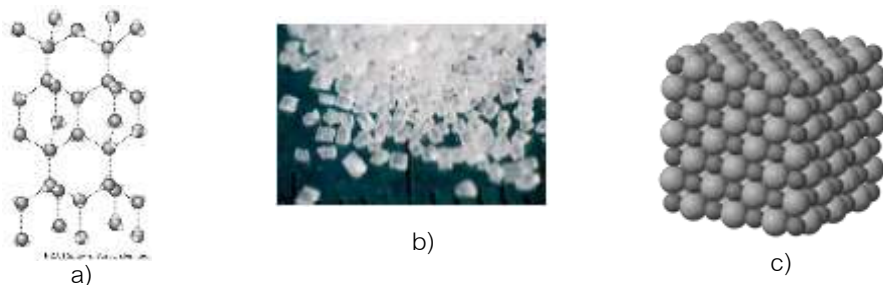
รูปที่ 2.6 เลขโคออร์ดิเนชันของวัสดุนาโนเซรามิกที่ยึดเหนี่ยวด้วยพันธะไอออนิก

จากลักษณะโครงสร้างดังกล่าวข้างต้น ส่งผลให้โครงสร้างผลึกของวัสดุนาโนเซรามิกต้องมีการทำนายโครงสร้างและการระบุรูปร่างโดยการคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างรัศมีอะตอมแคตไอออนต่อรัศมีแอนไอออน ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การทำนายเลขโคออร์ดิเนชันของพันธะไอออนิก

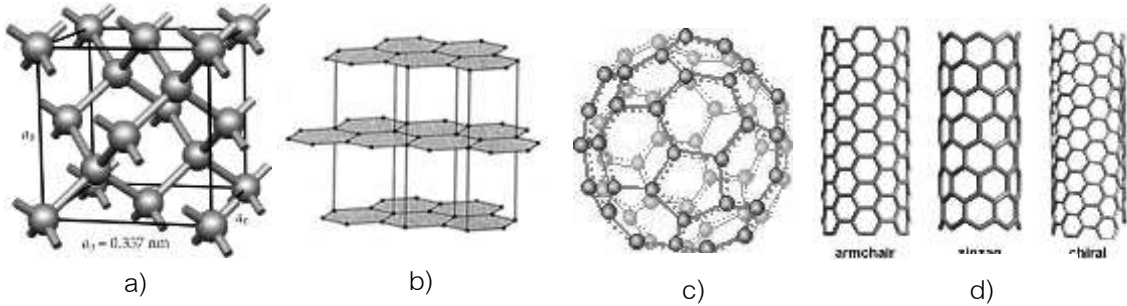
เลขโคออร์ดิเนชัน (Coordination number)	อัตราส่วนรัศมีแคตไอออนต่อรัศมีแอนไอออน (r/R)	รูปร่างโคออร์ดิเนชัน (Coordination geometry)	รูปร่าง
2	$0 < \frac{r}{R} < 0.155$		เส้นตรง
3	$0.155 \leq \frac{r}{R} < 0.225$		สามเหลี่ยม
4	$0.225 \leq \frac{r}{R} < 0.414$		เตตระฮีดรอล
6	$0.414 \leq \frac{r}{R} < 0.732$		ออกตะฮีดรอล
8	$0.732 \leq \frac{r}{R} < 1.000$		คิวบิก
12	1.000		ปิระมิด

1.2 โครงสร้างผลึกของโมเลกุล เช่น น้ำแข็ง น้ำตาล เกลือ จัดเป็นวัสดุของแข็งผลึกเช่นกัน เนื่องจากโครงสร้างที่ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมีความแข็งแรงและทำให้โครงสร้างมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบ

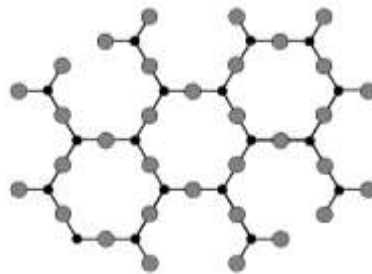


รูปที่ 2.7 โครงสร้างผลึกของโมเลกุล: a) น้ำแข็ง, b) น้ำตาล, c) เกลือหรือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

1.3 โครงสร้างผลึกแบบโครงร่างแห (Network) ของวัสดุนาโนเซรามิกชนิดคาร์บอนที่เกิดจากการยึดเหนี่ยวด้วยพันธะโควาเลนต์ เช่น เพชร แกรไฟต์ และโครงสร้างแอลโลโทรป (Allotrope) ของคาร์บอนที่เรียกว่า บัคกี้บอล (Buckyball) หรือบัคมิสเตอร์ฟูลเลอร์ีน (Buckminster fullerene) และท่อนาโนคาร์บอนดังรูป 2.8 และวัสดุนาโนเซรามิกชนิดซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) หรือ ควอทซ์ (Quartz) ดังรูป 2.9

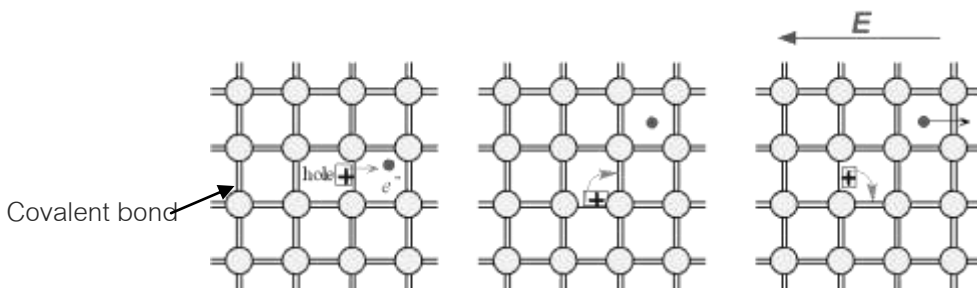


รูปที่ 2.8 โครงสร้างแบบโครงร่างแห (Network) ของ a) เพชร, b) แกรไฟต์, c) บัคกี้บอล, และ d) ท่อนาโนคาร์บอน



รูปที่ 2.9 โครงสร้างผลึกของควอทซ์หรือซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ )

1.4 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ที่เกิดจากการยึดเหนี่ยวด้วยพันธะโควาเลนต์และมีการจัดเรียงตัวของอะตอมที่เป็นระเบียบ ได้แก่ ซิลิคอน (Si) เจอมาเนียม (Ge) ดังรูป 2.10



รูปที่ 2.10 โครงสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิคอน (Si): a) ซิลิคอนในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง, b) อิเล็กตรอนและโฮลเกิดการเคลื่อนที่, c) ซิลิคอนในสภาวะที่มีการให้สนามไฟฟ้า

จากโครงสร้างผลึกของวัสดุนาโนทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของผลึกและการจัดเรียงตัวของอะตอมหรือไอออนภายในยูนิตเซลล์ (APF หรือ IPF) ได้ดังสมการ  
การคำนวณค่าความหนาแน่นต่อยูนิตเซลล์ (Density of unit cell)  
สูตรการคำนวณหาค่าความหนาแน่น

$$\text{ความหนาแน่น, } \rho = \frac{\text{มวล (Mass)}}{\text{ปริมาตร (Volume)}} = \frac{\text{Mass of atoms in unit cell}}{\text{Volume of an unit cell}} = \frac{(n/N_A)}{V_C} \times A$$

$n$  คือ จำนวนอะตอมต่อหนึ่งยูนิตเซลล์ (number of atoms per unit cell),  $A$  คือ น้ำหนักอะตอม (atomic weight, g/mol),  $V_C$  คือ ปริมาตรต่อยูนิตเซลล์ (volume per unit cell,  $\text{cm}^3/\text{unit cell}$ ),  $N_A$  คือ เลขอาโวกาโดร (Avogadro's number  $6.023 \times 10^{23}$  atoms/mol)

การคำนวณหาค่าการจัดเรียงอะตอมภายในโครงสร้างของยูนิตเซลล์ Atomic Packing Factor (APF)

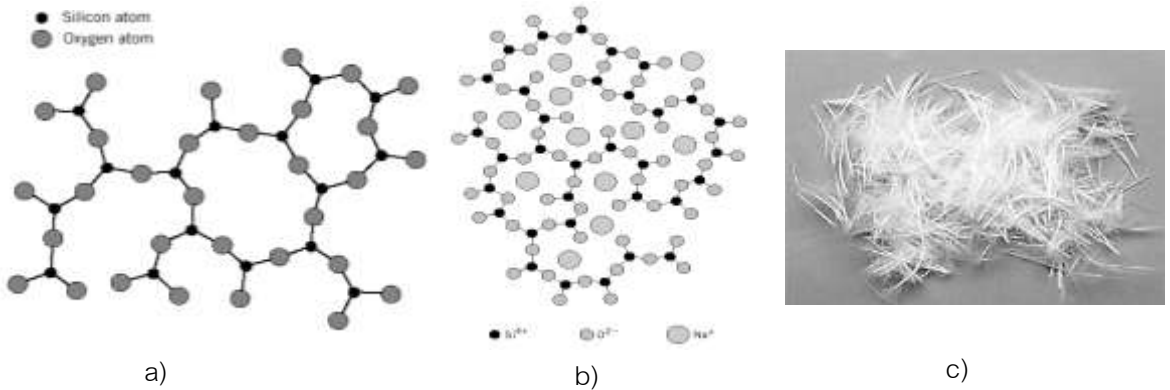
$$APF = \frac{\text{ปริมาตรของอะตอมต่อหนึ่งยูนิตเซลล์ (Volume of atoms in an unit cell)}}{\text{ปริมาตรของหนึ่งยูนิตเซลล์ (Volume of an unit cell)}}$$

การคำนวณค่าการจัดเรียงตัวของไอออนภายในโครงสร้างต่อหนึ่งยูนิตเซลล์ของสารประกอบเซรามิกที่เรียกว่า Ionic Packing Factor (IPF)

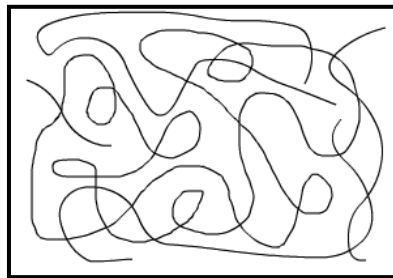
$$IPF = \frac{\text{ปริมาตรไอออนต่อยูนิตเซลล์ (Volume of ions per unit cell)}}{\text{ปริมาตรของหนึ่งยูนิตเซลล์ (} V_{\text{unit cell}} \text{)}}$$

2. โครงสร้างอะมอร์ฟัสหรือโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) คือโครงสร้างของแข็งที่ไม่มีรูปผลึกหมายความว่า การจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ การจัดเรียงตัวเป็นแบบสุ่มหรือกระจัดกระจายทำให้ไม่มีรูปทรงเรขาคณิตตามระบบ Bravais lattice เช่นเดียวกับวัสดุนาโนที่มีโครงสร้างผลึก ตัวอย่างเช่น วัสดุนาโนเซรามิกชนิดแก้ว เส้นใยแก้ว หรือกระจกที่ประกอบด้วยซิลิกาหรือซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) สำหรับใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์นาโนเซรามิก ผลิตภัณฑ์นาโนคอมพอสิตหรือฟิล์มแก้วเคลือบผิวผลิตภัณฑ์ดังรูป 2.11 โครงสร้างอะมอร์ฟัสอีกกลุ่มหนึ่งที่สำคัญคือวัสดุนาโนพอลิเมอร์โดยส่วนใหญ่ทั้งชนิดโฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) และโคพอลิเมอร์ (Copolymer) ที่ประกอบเป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรง (Linear polymer) แบบกิ่ง (Branch polymer) แบบโครงร่างแห (Network polymer) และแบบเชื่อมขวาง (Crosslink polymer) รวมทั้งอีลาสโตเมอร์ เช่น ยาง (Rubber) ทั้งชนิดยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ รวมทั้งน้ำยาง (Latex) ดังรูป 2.12



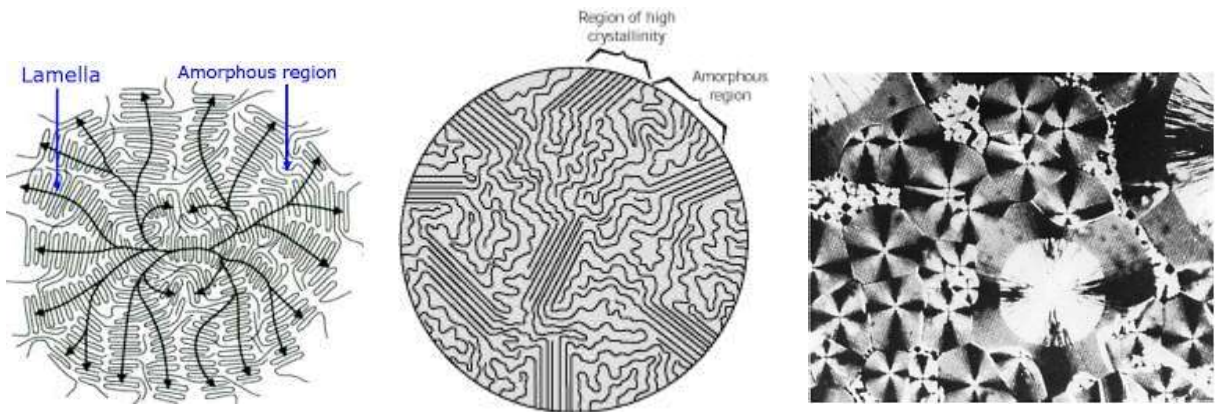


รูปที่ 2.11 โครงสร้างอะมอร์ฟัสหรือโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) ของวัสดุนาโนเซรามิก: a) แก้วซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ), b) กระจกซิลิกา, c) เส้นใยแก้ว



รูปที่ 2.12 โครงสร้างอะมอร์ฟัสหรือโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) ของวัสดุนาโนพอลิเมอร์





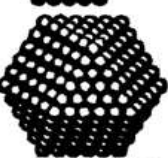

3. โครงสร้างกึ่งผลึก (Semicrystalline structure) คือโครงสร้างของวัสดุนาโนพอลิเมอร์ และวัสดุนาโนพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ประกอบด้วยโครงสร้างที่ไม่มีรูปผลึกหรืออะมอร์ฟัส (Amorphous) และโครงสร้างที่มีรูปผลึก (Crystalline) ดังรูป 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างกึ่งผลึก (Semi-crystalline structure)

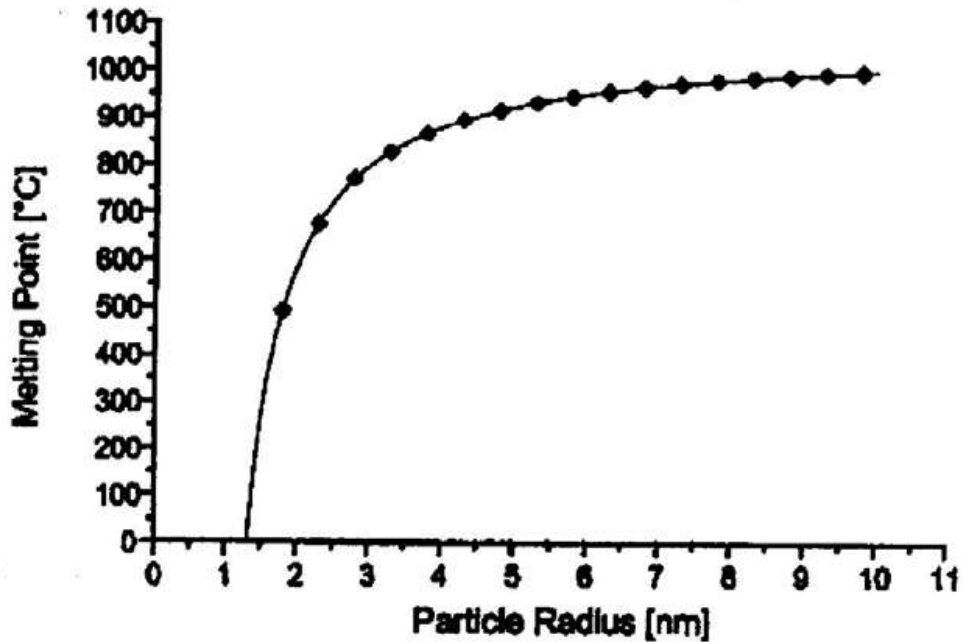
โดยทั่วไปอนุภาคนาโนจะมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวกับปริมาตรค่อนข้างสูงทำให้มีสัดส่วนของพื้นที่ผิวจำเพาะอะตอมสูงมาก ส่งผลให้อนุภาคนาโนมีคุณสมบัติแตกต่างไปจากคุณสมบัติและคุณลักษณะของอนุภาคที่เตรียมจากวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่า และหากการเตรียมอนุภาคนาโนโดยการระเหยสารตั้งต้นให้กลายเป็นไอหรือการเตรียมจากสารตั้งต้นชนิดของเหลว จะมีกลไกที่เข้ามาเกี่ยวข้อง 3 ขั้นตอนคือ การก่อตัวให้เกิดนิวเคลียส (Nucleation) การเกาะกลุ่มของอนุภาค (Coalescence) และการเติบโต (Growth) ของอนุภาคนาโนที่เริ่มต้น ณ ตำแหน่งแก่นกลางของโครงสร้างก่อนจากนั้นจึงค่อยๆ เกาะกลุ่ม และรวมตัวกันเกิดเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ขึ้น ด้วยเหตุผลนี้เองทำให้ได้อนุภาคนาโนที่มีโครงสร้างหลายขนาดและหลายแบบที่เรียกว่าโครงสร้างนาโน (Nanostructure) อนุภาคนาโนจะถูกสร้างขึ้นอย่างสม่ำเสมอจากกลุ่มอะตอมเรียงตัวกันเป็นรูปแบบกล่องลูกบาศก์ หรือโครงสร้างรูปหกเหลี่ยมแบบปิดชนิดต่าง ๆ โดยที่โครงสร้างหนึ่ง ๆ อาจเกิดจากการก่อตัวรอบ ๆ อะตอมแก่นกลางอะตอมหนึ่ง โดยในชั้นแรกมี 12 อะตอม ชั้นที่สองมี 42 อะตอม และชั้นที่ 3 มี 92 อะตอม เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จำนวนอะตอมในแต่ละชั้นจะถูกกำหนดโดยตัวเลข  $10n^2+2$  สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอะตอมทั้งหมดในกลุ่มและเปอร์เซ็นต์ของพื้นผิวอะตอม

Full shell clusters	Total number of atoms	Surface atoms (%)
One shell 	13	92
Two shells 	55	76
Three shells 	147	63
Four shells 	309	52
Five shells 	561	45
Seven shells 	1415	35

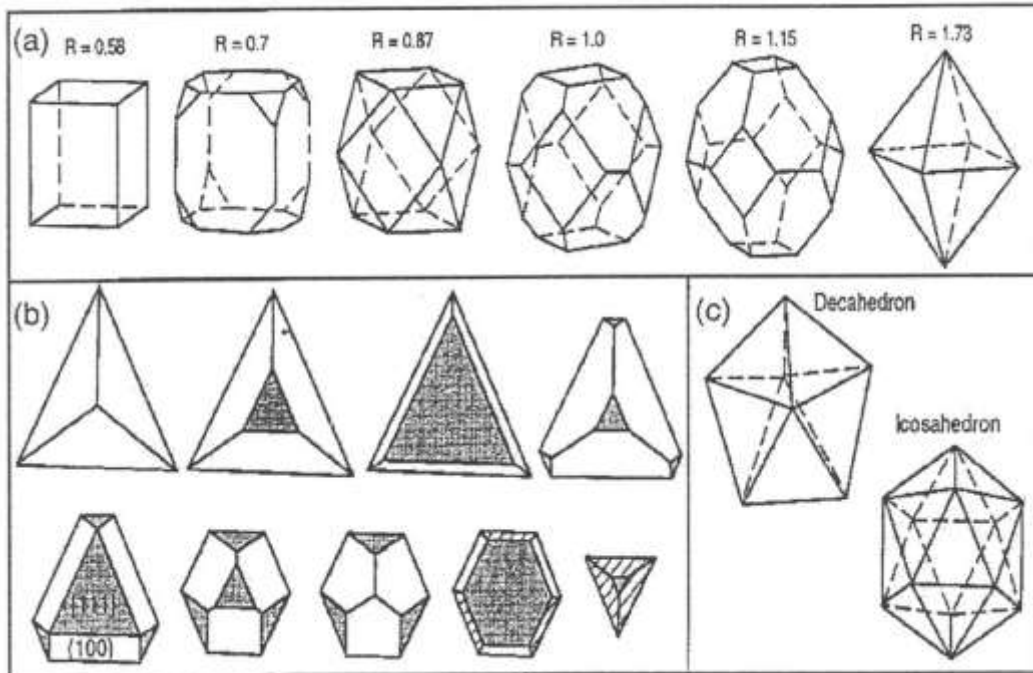
(ที่มา: S.C. Tjong, H. Chen, Materials Science and Engineering R45, 2004)

การลดลงของขนาดอนุภาคนาโน จะทำให้เปอร์เซ็นต์พื้นที่ผิวของอะตอมเพิ่มขึ้น ขนาดอนุภาคนาโนที่ลดลงจะมีผลกระทบกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติการหลอมเหลวของอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคกับจุดหลอมเหลวของอนุภาคทอง ที่มา Jisen, W., 2004

โดยทั่วไปรูปร่างเรขาคณิตจะถูกกำหนดโดยองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของการสังเคราะห์วัสดุหรือเนื่องจากกลไกการของปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างการขึ้นรูป การเกาะรวมตัวกันของอนุภาคนาโน สำหรับวัสดุนาโนโลหะบางชนิด เช่น อนุภาคนาโนโลหะทรานซิชันอาจมีโครงสร้างเกิดขึ้นใหม่ที่แตกต่างไปจากลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเดิม ๆ และมีชื่อเรียกโครงสร้างเฉพาะแตกต่างออกไปดังนี้ Cabooctahedron icosahedron และ decahedron ดังรูปที่ 2.15 โครงสร้างหรือระนาบของพื้นผิวที่แตกต่างกันไม่เพียงแต่ทำให้ความหนาแน่นเชิงผิวของอะตอมต่างกัน แต่ยังทำให้โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ ความแรงของพันธะ และปฏิกิริยาทางเคมีแตกต่างกันด้วย นอกจากนี้การควบคุมขนาด รูปร่างและโครงสร้างอนุภาคนาโนโลหะเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญอย่างมากเช่นเดียวกัน เนื่องจากความเกี่ยวข้องระหว่างตัวแปรกับคุณสมบัติทางด้านแสง ไฟฟ้า แม่เหล็กและตัวเร่งปฏิกิริยาหรืออะตอมลิสต์ที่ใช้เป็นตัวกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา



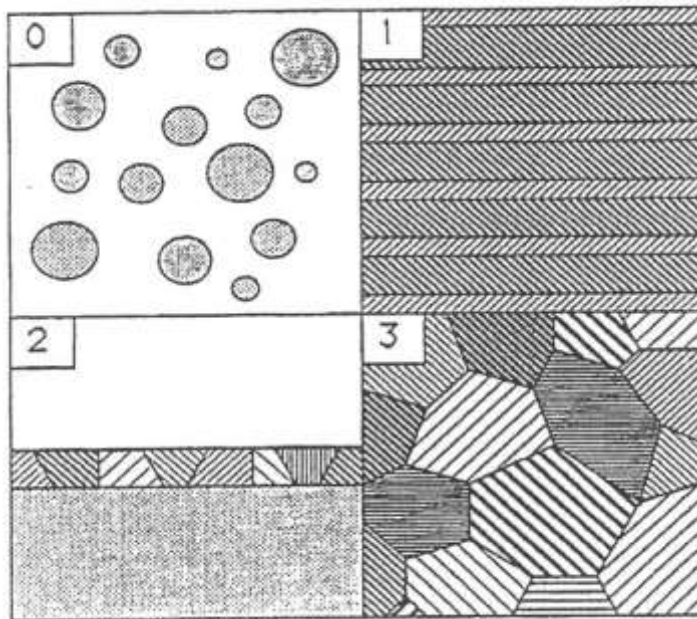
ที่มา: S.C. Tjong, H. Chen, Materials Science and Engineering R45, 2004

- รูปที่ 2.15 (a) รูปทรงเรขาคณิตของผลึกนาโน Cubooctahedral ที่อัตราค่าเรขาคณิตต่าง ๆ กัน  
 (b) การพัฒนาของรูปทรงเมื่อขนาดผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลง  
 (c) รูปทรงเรขาคณิตของอนุภาคนาโนเชิงซ้อนชนิด Decahedral และ icosahedral

โครงสร้างผลึกของวัสดุนาโน ที่จัดแบ่งตามทิศทางหรือมิติของผลึก แบ่งได้ดังนี้

1. กลุ่มอะตอมมิติศูนย์ (Zero-dimensional atom clusters)
2. โครงสร้างเนื้อเยื่อหลายชั้น 1 มิติ (Onedimensional modulated multilayers)
3. โครงสร้างเนื้อเยื่อละเอียดหลายชั้น 2 มิติ (Two-dimensional ultrafine-grained overlayers)
4. โครงสร้างผลึกนาโน 3 มิติ (Three-dimensional nanocrystalline structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.16

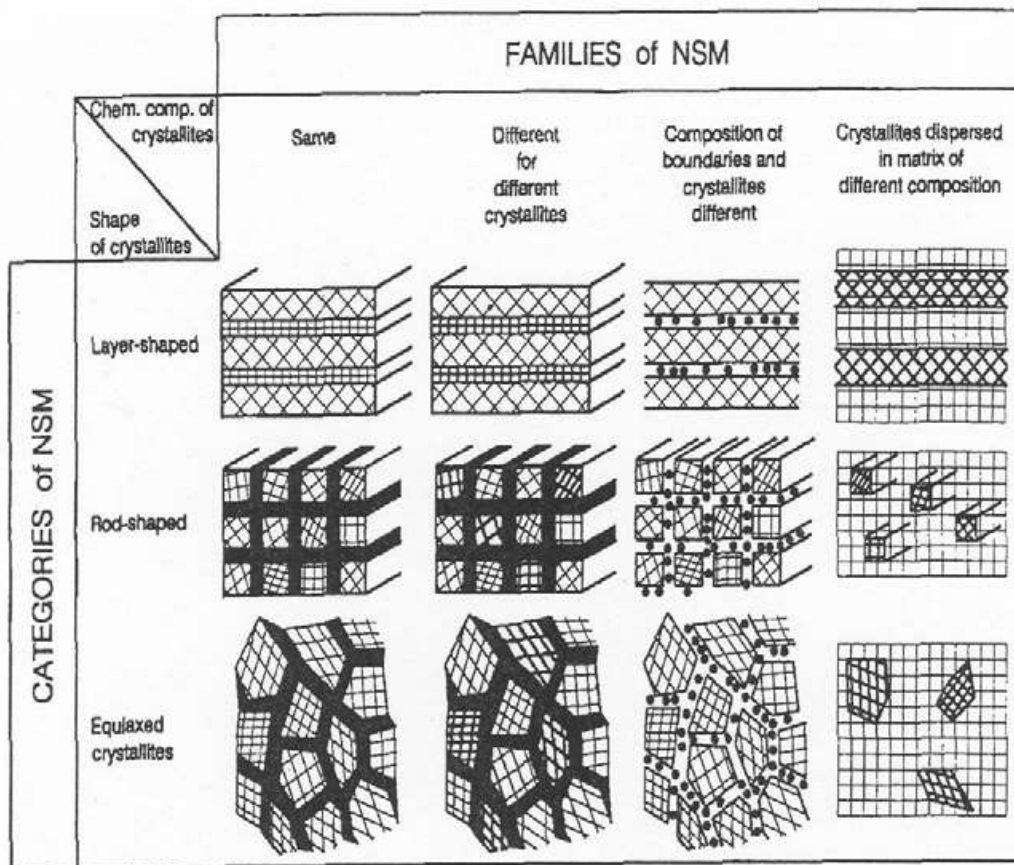
วัสดุผลึกนาโนอาจประกอบไปด้วยวัสดุนาโนชนิดผลึก วัสดุนาโนชนิดกึ่งผลึก(Quasi-crystalline) และ วัสดุนาโนชนิดอสัณฐาน (Amorphous phase) หรือแก้วนาโน (Nanoglasses) วัสดุนาโนชนิดผลึก อาจจะเป็นโลหะ กึ่งโลหะ (Intermetallics) เซรามิก คอมพอสิตหรือวัสดุประกอบ (Composites) วัสดุนาโนชนิดกึ่งผลึกอาจเป็นพอลิเมอร์ หรือวัสดุประกอบและวัสดุนาโนชนิดอสัณฐานคือแก้ว เซรามิก และ วัสดุกึ่งตัวนำ



ที่มา: S.C. Tjong, H. Chen, Materials Science and Engineering R45, 2004

รูปที่ 2.16 แสดงแผนภาพของวัสดุนาโนทั้ง 4 ชนิด ซึ่งจำแนกตามมิติของผลึก

วัสดุนาโนยังสามารถแบ่งออกเป็น 12 กลุ่ม ตามรูปร่าง(มิติ) และองค์ประกอบทางเคมีของธาตุที่ประกอบเป็นโครงสร้าง แสดงได้ดังรูปที่ 2.17 นอกจากนี้รูปร่างของผลึกยังสามารถจัดแบ่งได้เป็นรูปทรงแผ่นหรือผลึกแบบชั้น (Layer-shaped crystalline) ผลึกรูปทรงแท่ง (Rod-shaped crystalline) และผลึกรูปชวานสมมาตร (Equiaxed crystalline) หรืออาจจะจัดได้เป็น 4 กลุ่ม (Families) ตามองค์ประกอบทางเคมี คือ 1.กลุ่มที่มีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกัน 2. กลุ่มที่มีองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน 3. กลุ่มที่มีองค์ประกอบทางเคมีระหว่างชั้นผลึกแตกต่างกัน และ 4. กลุ่มที่มีมีการกระจายขององค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น สารประกอบอัลลอยด์



ที่มา: S.C. Tjong, H. Chen, Materials Science and Engineering R45, 2004

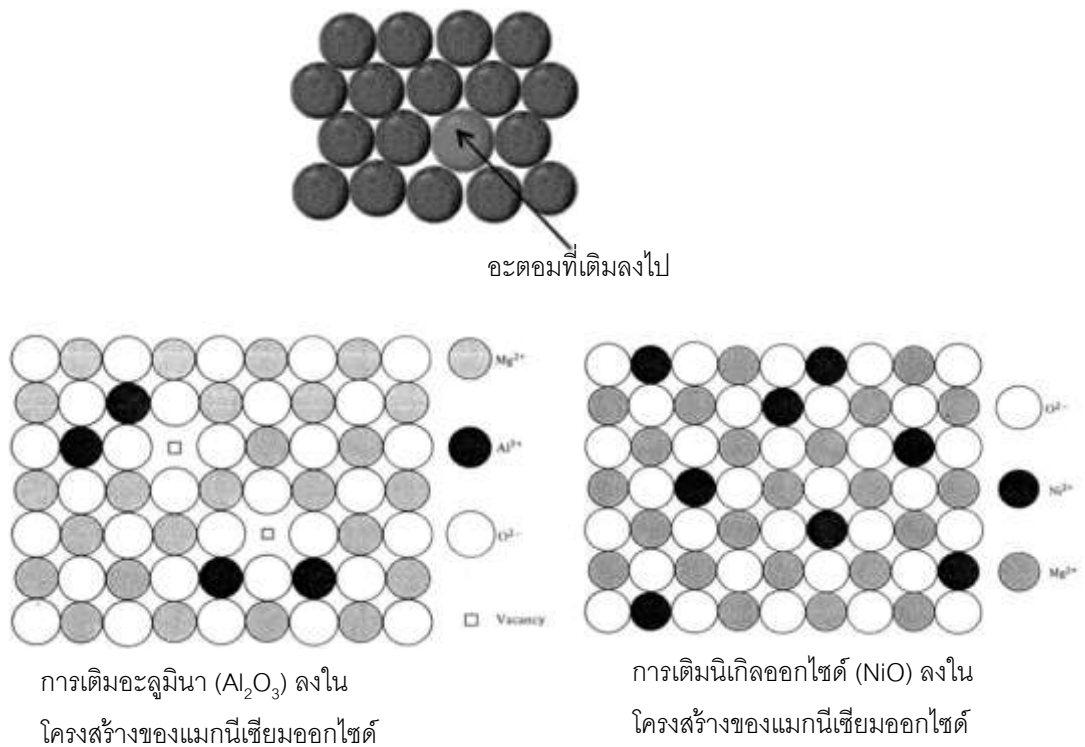
รูปที่ 2.17 แผนภาพของการแบ่งวัสดุนาโนเป็น 12 กลุ่มตามโครงสร้างทางเคมี

หากโครงสร้างของวัสดุนาโนเกิดความบกพร่องอาจส่งผลต่อสมบัติด้านต่างๆ เช่น ทางไฟฟ้า ทางแสง ทางกล ทางแม่เหล็ก รวมทั้งคุณลักษณะของวัสดุนาโนเกิดการเปลี่ยนแปลง

### ข้อบกพร่องของโครงสร้าง (Structure Imperfection)

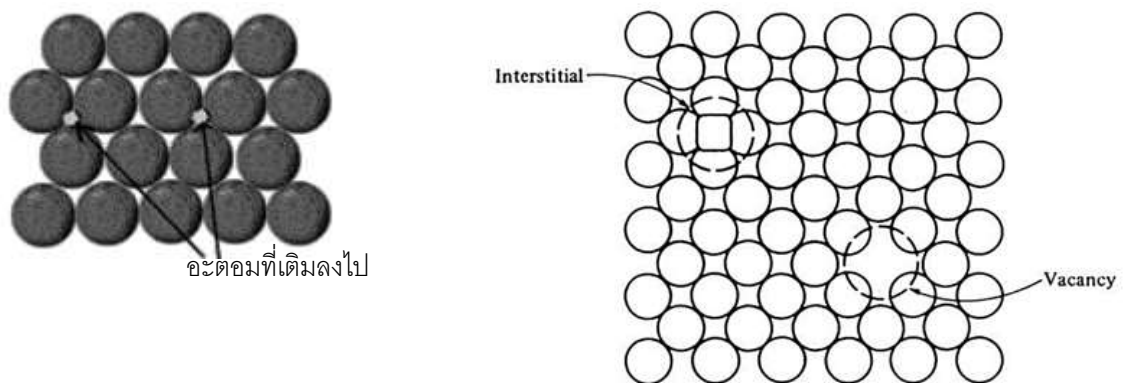
1. **โซลิดโซลูชันและความบกพร่องทางเคมี (The solid solution-chemical imperfection)** คือ ความบกพร่องแบบการเติม แบ่งได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

1.1 **ความบกพร่องแบบการเติม Substitutional solid solution** คือ การมีอะตอมชนิดอื่นปะปนอยู่ในโครงสร้างโดยที่ขนาดอะตอมเท่ากับหรือใกล้เคียงกับอะตอมเดิมของโครงสร้างหลัก



รูปที่ 2.18 การเติมอะตอมอื่นที่มีขนาดใกล้เคียงกันลงในตำแหน่งอะตอมหลัก

1.2 ความบกพร่องแบบการเติมลงในช่องว่างระหว่างอะตอมหลัก Interstitial solid solution คือ อะตอมที่มีขนาดเล็กกว่าอะตอมหลักแทรกอยู่ภายในโครงสร้าง ณ ตำแหน่งที่เรียกว่า ช่องว่าง (Void) ของอะตอมหลัก

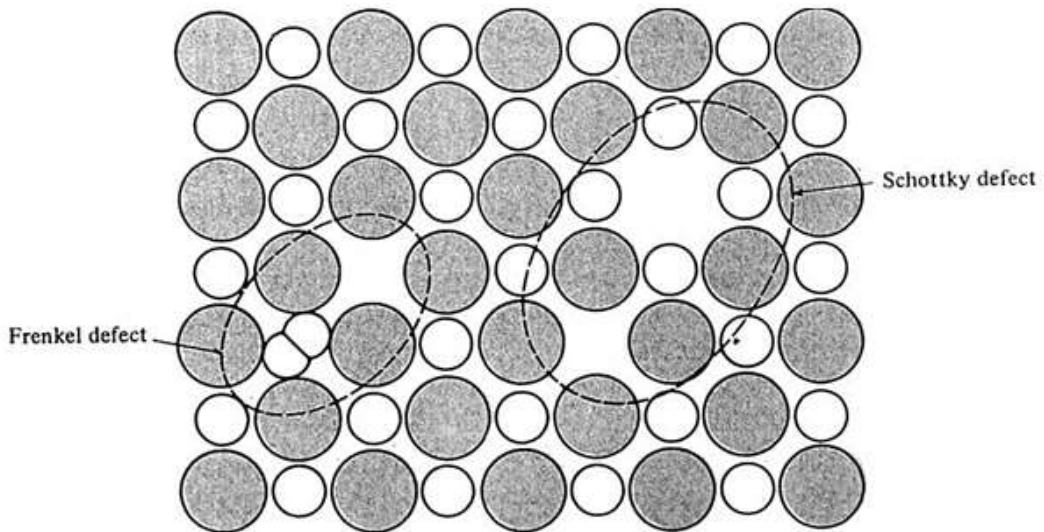


รูปที่ 2.19 อะตอมที่มีขนาดเล็กกว่าแทรกอยู่ในช่องว่างของอะตอมหลัก

2. ความบกพร่องของตำแหน่ง (Point defect) แบ่งได้เป็น 2 ชนิด เนื่องจากโครงสร้างของวัสดุนาโนเซรามิก ประกอบด้วยแคตไอออน (ประจุบวก) และแอนไอออน (ประจุลบ)

2.1 ความบกพร่องแบบเฟร็งเคิล Frenkel disorder คือการที่มีหนึ่งไอออนเคลื่อนที่ออกไปจากตำแหน่งเดิมไปอยู่ยังตำแหน่งที่เป็นช่องว่างขนาดเล็ก (Interstitial) ระหว่างไอออนหรืออะตอม แล้วทำให้ตำแหน่งเดิมที่ไอออนนั้นหลุดออกมากลายเป็นที่ว่าง (Vacancy)

2.2 ความบกพร่องแบบชอตทกี Schottky disorder คือการหลุดของไอออน 2 ชนิด (แคตไอออนและแอนไอออน) ออกไปจากตำแหน่งเดิมทำให้ตำแหน่งที่ทั้งสองไอออนหลุดออกไปกลายเป็นที่ว่าง (Vacancy)

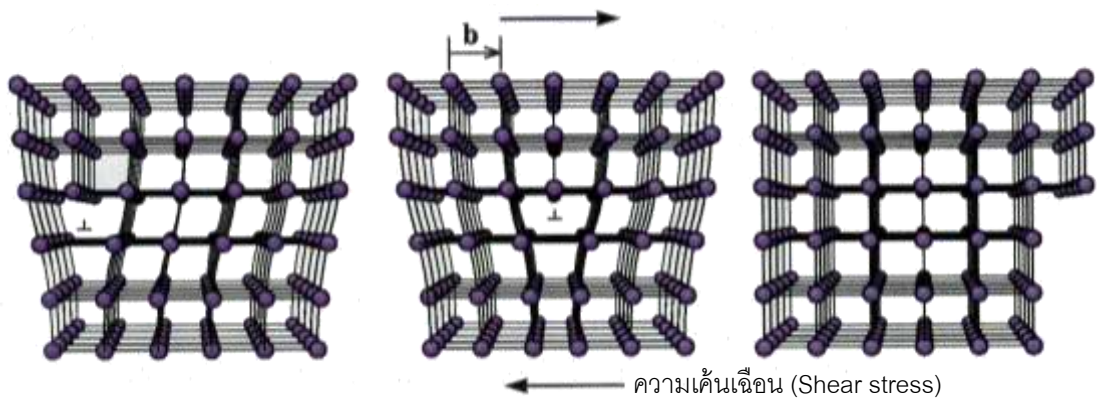


รูปที่ 2.20 ความบกพร่องของตำแหน่ง (Point defect)

3. ความบกพร่องแบบดิสโลเคชันหรือแบบเส้น (Dislocation or Line defect) แบ่งเป็น 3 ชนิด เนื่องจากโครงสร้างดังกล่าวได้รับความเค้น (Stress) หรือแรงกระทำจากภายนอกทำให้ระนาบภายในโครงสร้างเกิดการเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิม

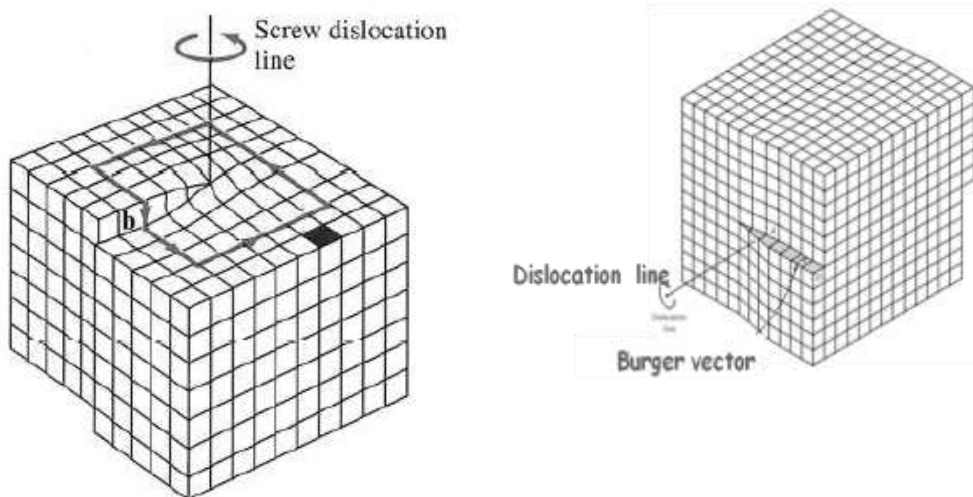
3.1 ดิสโลเคชันแบบเอ็ดจ์ (Edge dislocation) เกิดขึ้นเมื่อโครงสร้างได้รับแรงกระทำจากภายนอกทำให้ทิศทางของระนาบเกิดการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับเวกเตอร์เบอร์ก (Burgur vector,  $b$ ) ซึ่งเป็นเวกเตอร์อ้างอิงส่งผลให้ระนาบใหม่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งเดิมครึ่งระนาบ





รูปที่ 2.21 ดิสโลเคชันแบบเอ็ดจ์ (Edge dislocation) ที่มา Ashby, 1996

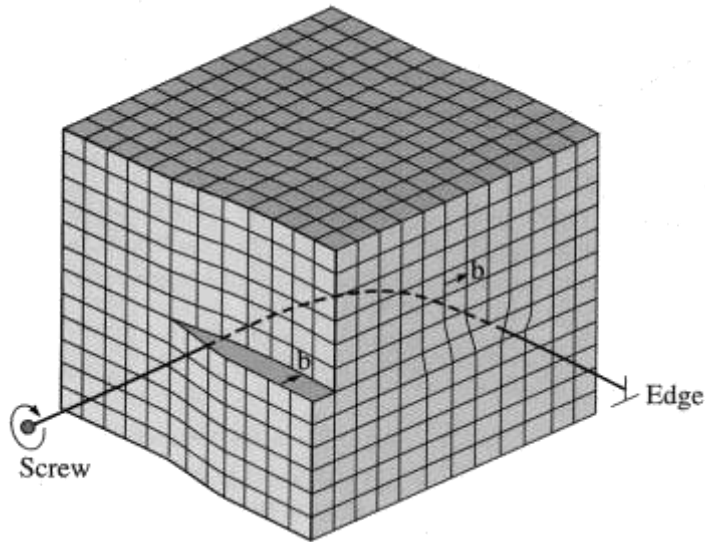
3.2 ดิสโลเคชันแบบสกรู (Screw dislocation) เกิดขึ้นเมื่อโครงสร้างได้รับแรงกระทำจากภายนอกทำให้ทิศทางของระนาบเคลื่อนที่ขนานกับเบอร์เกอร์เวกเตอร์ (Burgur vector,  $b$ ) ส่งผลให้ระนาบใหม่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งเดิมครึ่งระนาบ



รูปที่ 2.22 ดิสโลเคชันแบบสกรู (Screw dislocation) ที่มา Courtney, T.H., 2000

3.3 ดิสโลเคชันแบบผสม (Mixed dislocation) เกิดขึ้นเมื่อโครงสร้างได้รับแรงกระทำจากภายนอกแล้วทำให้ทิศของระนาบเคลื่อนที่สองทิศทางคือทิศทางตั้งฉากและขนานกับเบอร์เกอร์เวกเตอร์

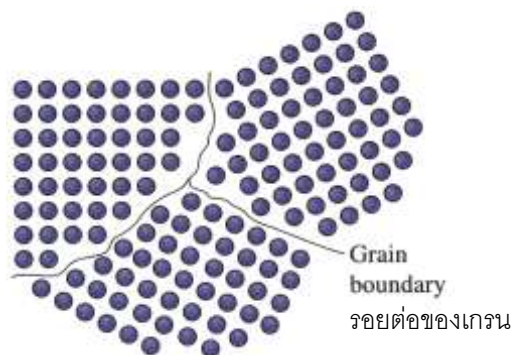
(Burgur vector,  $b$ ) ส่งผลให้ระนาบใหม่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งเดิมที่เรียกว่าดิสโลเคชันแบบผสม เนื่องจากเกิดทั้งดิสโลเคชันแบบสกรูและแบบเอดจ์



รูปที่ 2.23 ดิสโลเคชันแบบผสม (Mixed dislocation) ที่มา Courtney, T.H., 2000

4. ความบกพร่องบริเวณผิวหน้า (Interfacial defects or Planar defects) แบ่งได้เป็น 4 ชนิด

4.1 **ตรงบริเวณขอบเกรนหรือรอยต่อของเกรน (Grain boundary)** เกิดขึ้นในกรณีที่มีโครงสร้างหลายผลึก (Polycrystalline) ทำให้บริเวณตำแหน่งที่เป็นรอยต่อของเกรนหรือขอบของเกรนเกิดความแตกต่างซึ่งจัดเป็นข้อบกพร่องอย่างหนึ่งเนื่องจากตรงรอยต่อของเกรนไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 2.24 ความบกพร่องเนื่องจากรอยต่อของเกรน ที่มา Read, W.T. Jr., 1953

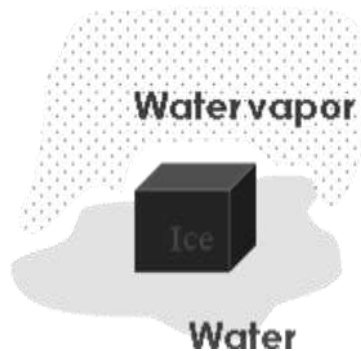
4.2 **ความบกพร่องของอะตอมบริเวณพื้นผิวด้านนอก(External surface)** ข้อบกพร่องลักษณะนี้เกิดเนื่องจากอะตอมบริเวณพื้นผิวที่บริเวณด้านนอกเกิดปฏิกิริยากับอากาศโดยรอบ ได้แก่

ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ หรือ ก๊าซอื่น ๆ ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้โครงสร้างของวัสดุนาโนเปลี่ยนแปลงไป



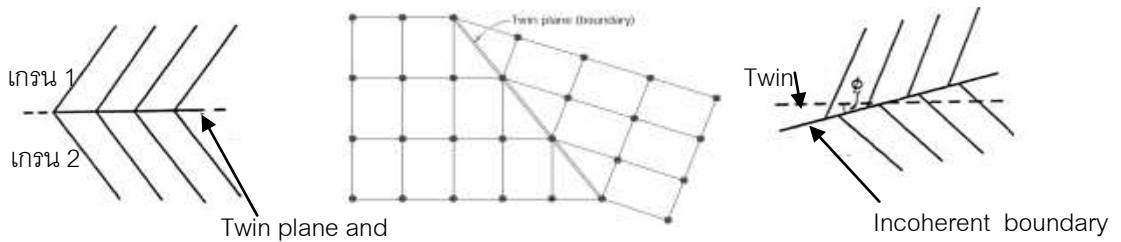
รูปที่ 2.25 ความบกพร่องเนื่องจากอะตอมบริเวณพื้นผิวด้านนอก

**4.3 ความแตกต่างของเฟส (Phase boundary)** เกิดขึ้นเนื่องจากวัสดุนาโนเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสได้ง่าย ทำให้เกิดข้อบกพร่องภายในโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น น้ำแข็งคือโครงสร้างผลึกแบบโครงร่างแห (Network) ประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนและอะตอมของออกซิเจน และเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีปัจจัยภายนอกเกี่ยวข้องได้แก่ อุณหภูมิและความดัน ทำให้โครงข่ายของโมเลกุลน้ำแข็งเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสเป็นของเหลวและก๊าซโดยที่โครงสร้างของเฟสใหม่ที่เกิดขึ้นยังคงประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนและออกซิเจนแต่ทว่าความยาวพันธะ ค่าไดโพลโมเมนต์และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของเฟสใหม่มีความแตกต่างจากเฟสเดิมที่เป็นของแข็ง จากข้อมูลดังกล่าวทำให้สมบัติของเฟสทั้งสาม (ของแข็ง ของเหลวและก๊าซ) แตกต่างกัน จึงอาจกล่าวได้ว่าข้อบกพร่องดังกล่าวเนื่องมาจากความแตกต่างของเฟสที่ทำให้มีสมบัติของเฟสใหม่แตกต่างไปจากเดิม ดังนั้นกรณีความแตกต่างของเฟสจากองค์ประกอบเดียวกันจัดว่าเป็นข้อบกพร่องที่สำคัญเช่นกัน โดยเฉพาะวัสดุนาโนที่ดูดความชื้นได้ง่ายหรือว่องไวในการเกิดปฏิกิริยากับอากาศหรือก๊าซ ตัวอย่างเช่น แนนพาสีน (ลูกเหม็น)



รูปที่ 2.26 ความบกพร่องเนื่องจากความแตกต่างของเฟส (Phase boundary)

4.4 ความบกพร่องเนื่องจากการจัดเรียงตัวของเกรนเป็นแบบทวินหรือแฝด (Twin boundary) ข้อบกพร่องแบบนี้มีสองลักษณะคือบริเวณขอบเกรนมีการซ้อนทับกันแต่ไม่สนิทที่เรียกว่า Twin plane หรือ Coherent boundary และอีกแบบคือรอยต่อของสองเกรนทำมุมกัน ( $\theta$ ) ทำให้รอยต่อของเกรนหลวมกันที่เรียกว่า Incoherent boundary



รูปที่ 2.27 ความบกพร่องเนื่องจากการจัดเรียงตัวของเกรนหรือระนาบเป็นแบบทวินหรือขอบแฝด (Twin boundary) ที่มา Callister, 2007

5. ความบกพร่องแบบอื่น ๆ เนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ ได้แก่ ความร้อน รอยแตก รอยร้าว รูพรุน รวมทั้งความบกพร่องที่เกิดจากโครงสร้างแบบอะมอร์ฟัสหรือแบบอสัณฐาน (Amorphous or Noncrystalline) ดังนี้

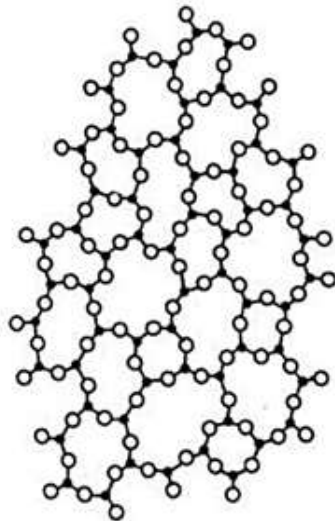
5.1 ความบกพร่องของชิ้นงาน (Bulk or volume defect) ข้อบกพร่องแบบนี้เกิดขึ้นเนื่องจากรอยแตก ร้าวหรือรูพรุนของชิ้นงานซึ่งอาจมาจากหลายสาเหตุ เช่น การได้รับแรงทางกลกระทำทั้งจากภายนอกและภายในโครงสร้างหรือมาจากขั้นตอนการเตรียมหรือกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นไปตามที่กำหนด ส่งผลทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหาย สมบัติผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป เช่น ความหนาแน่น ความแข็งแรง การต้านทานหรือการนำความร้อน การต้านทานหรือการนำไฟฟ้า รวมทั้งความทนทานต่อการใช้งานหรืออายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวอาจเปลี่ยนไป ข้อบกพร่องชนิดนี้จัดได้ว่าเป็นข้อบกพร่องที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง



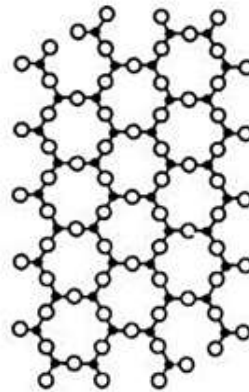
รูปที่ 2.28 ความบกพร่องของชิ้นงานทั่วทั้งผลิตภัณฑ์หรือทั้งปริมาตร (Bulk or volume defect) จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของตัวอย่างเซอร์โคเนียที่มีการเติมแมกนีเซียม ออกไซด์ลงในโครงสร้าง ที่มา Swain, M.V. and Hannink, R.J.H.,1984

5.2 ความบกพร่องเนื่องจากการสั่นสะเทือนของอะตอม (Atomic vibration) ข้อบกพร่องแบบนี้เกิดขึ้นเนื่องจากอะตอมหรือโครงสร้างได้รับการกระทำจากภายนอกได้แก่ ความร้อน (Thermal) ความเค้น (Stress) พลังงานในรูปของคลื่นแสง คลื่นเสียง ที่ทำให้อะตอมภายในโครงสร้างเกิดการสั่นสะเทือนแล้วมีการส่งถ่ายพลังงานหรือความเค้นเพื่อปรับตัวเองเข้าสู่ภาวะสมดุล ดังนั้นจะเกิดผลต่อเนื่องไปยังแลทธิของโครงสร้างโดยส่วนใหญ่หรือเกือบทั้งหมด ทำให้การจัดเรียงตัวเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากตำแหน่งเดิมส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป

5.3 ความบกพร่องเนื่องจากความไม่มีรูปผลึก (Noncrystalline solid) ข้อบกพร่องเช่นนี้ทำให้โครงสร้างขาดความสม่ำเสมอทั้งด้านรูปแบบและสมบัติที่ควรเป็นทั้ง 3 มิติ (Three dimension imperfection) ตัวอย่างเช่น วัสดุนาโนเซรามิกชนิดซิลิกาหรือซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึก 2 แบบคือโครงสร้างผลึก (Crystalline) และโครงสร้างอะมอร์ฟัสหรือไม่มีรูปผลึก (Noncrystalline) ทำให้วัสดุนาโนเซรามิกซิลิกามีสมบัติแตกต่างกันเช่นสมบัติทางแสง ความแข็งแรง การทนความร้อน



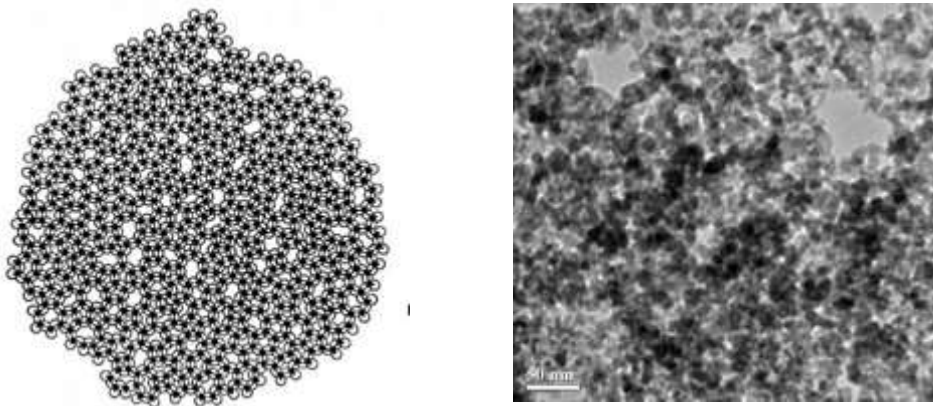
โครงสร้างแบบไม่มีรูปผลึก (Noncrystalline or Amorphous)



โครงสร้างแบบมีรูปผลึก (Crystalline)

รูปที่ 2.29 ความบกพร่องของโครงสร้างเนื่องจากรูปแบบโครงสร้างระหว่างโครงสร้างที่ไม่มีรูปผลึก (Noncrystalline) กับโครงสร้างที่มีรูปผลึก (Crystalline) ของซิลิกา ที่มา Callister, 2007

5.4 ความบกพร่องแบบแฟร็กทอล (Fractals) เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีทางเคมี เช่นกระบวนการโซล-เจล (Sol-gel) การตกตะกอน (Precipitation) การเคลือบผิวแบบต่าง ๆ เช่น CVD, PVD, Plasma spray, Electroplating เป็นต้น ทำให้โครงสร้างมีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่เรียกว่าแฟร็กทอล ความบกพร่องในลักษณะนี้สามารถเกิดขึ้นได้กับวัสดุโนนทั้งแบบไม่มีรูปผลึกหรือมีรูปผลึก



รูปที่ 2.30 ความบกพร่องแบบแฟร็กทอลโดยกระบวนการสังเคราะห์แบบโซล-เจลของซิลิกา ที่มา Nuchnapa, 2011

## คำถามท้ายบท

1. โครงสร้างของวัสดุมีกี่ชนิด อะไรบ้าง
2. พันธะปฐมภูมิชนิดใดที่ยึดเกาะโครงสร้างของวัสดุนาโนพอลิเมอร์
3. โครงสร้างผลึกของวัสดุนาโนแบ่งเป็นกี่ชนิด อะไรบ้าง
4. การเจือวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ลงในผลิตภัณฑ์สีอุตสาหกรรมจัดเป็นข้อบกพร่องของโครงสร้างแบบใด
5. คุณภูมิการหลอมเหลวกับขนาดอนุภาคของวัสดุนาโนสัมพันธ์กันอย่างไร

## บทที่ 3

### การประยุกต์ใช้งานวัสดุนาโน (Nanomaterials Applications)

การประยุกต์ใช้งานวัสดุนาโนต้องอาศัยความรู้และความเข้าใจขั้นพื้นฐานที่สำคัญหลายประการ เช่น คุณสมบัติทางแสง ไฟฟ้า แม่เหล็ก ทางกล ทางกายภาพ ทางความร้อน รวมทั้งสมบัติทางชีวภาพ การทนการกัดกร่อนของวัสดุนาโนและผลิตภัณฑ์นาโนชนิดนั้น ๆ ก่อนการใช้งานเพื่อให้ได้ประโยชน์และมีความเหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด วัสดุนาโนมีการพัฒนาใช้งานทางอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอที่เรียกว่าสิ่งทอนาโนหรือเส้นใยนาโน อุตสาหกรรมโลหะและวัสดุก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมพลังงาน อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า อุตสาหกรรมสินค้าอุปโภค-บริโภคภายในบ้าน อุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์ อุตสาหกรรมด้านยาและการแพทย์ อุตสาหกรรมด้านกีฬา อุตสาหกรรมด้านอาหารและบรรจุภัณฑ์ รวมทั้งหุ่นยนต์ หรืออุปกรณ์อัจฉริยะด้านต่างๆ เป็นต้น ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าวัสดุนาโนและเทคโนโลยีนาโนได้เกิดการเติบโตและพัฒนาอย่างรวดเร็วและอย่างต่อเนื่อง เกิดความสัมพันธ์และเกี่ยวข้องกับสิ่งต่าง ๆ หลายอย่าง ดังตัวอย่างวัสดุนาโนที่มีการใช้งานอยู่มากต่อไปนี้

**อุตสาหกรรมสิ่งทอ** ตัวอย่างเช่นการใช้อนุภาคนาโนโลหะเคลือบลงบนผิวของเส้นใยเช่น อนุภาคนาโนซิลเวอร์ อนุภาคนาโนทองคำ อนุภาคนาโนไททาเนียม เพื่อให้สิ่งทอหรือเสื้อผ้าสวมใส่ได้สบายขึ้น ช่วยฆ่าเชื้อราและแบคทีเรีย ระบายกลิ่นเหม็น มีกลิ่นหอมน่าใช้งาน เส้นใยคืนรูปได้ดี ทนทาน หรือการใช้ท่อนาโนคาร์บอนเคลือบลงบนผิวของเส้นใยเพื่อเพิ่มความแข็งแรง การทนความร้อน สามารถใช้ในการผลิตถุงมือ ชุด หรืออุปกรณ์ที่ทนไฟและทนความร้อนสูง โดยเฉพาะการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับความร้อนสูง ๆ เช่น ชุดสำหรับนักดับเพลิง ถุงมือทนความร้อนสำหรับการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับเตาเผา

**อุตสาหกรรมโลหะและวัสดุก่อสร้าง** สำหรับการก่อสร้างอาคาร บ้านพักอาศัยหรือสิ่งปลูกสร้างอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น เหล็กเส้นสำหรับการก่อสร้างอาจมีการเติมผงอนุภาคนาโนคาร์บอนเพื่อเพิ่มสมบัติความยืดหยุ่นตัว เพิ่มความเหนียวและความแข็งแรง กระเบื้องคอนกรีตสำหรับมุงหลังคาอาจมีการเติมเส้นใยนาโนพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มความแข็งแรง การทนความร้อนและทนการติดไฟได้ดีขึ้น หรือแผ่นฉนวนสำหรับอาคาร บ้านเรือนที่เรียกว่าแผ่นยิปซัม อาจเติมเติมเส้นใยนาโนเพื่อให้โครงสร้างมีน้ำหนักเบา แข็งแรง

และทนความร้อนสูงขึ้น หรือตัวอย่างสีอุตสาหกรรมสำหรับทาอาคาร อาจมีการเพิ่มเติมผงอนุภาคนาโนเซรามิก เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา เพื่อเพิ่มความขาวสว่าง ความแข็งแรง และเพิ่มความสามารถในการทำความสะอาดตัวเองได้เพิ่มขึ้น

**อุตสาหกรรมยานยนต์** สำหรับการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ชนิดต่าง ๆ ทำให้ทนทานการใช้งาน ทนความร้อน อายุการใช้งานนานขึ้น ตัวอย่างเช่นการเติมท่อนาโนคาร์บอน ลงในส่วนผสมสำหรับการผลิตตัวถัง คัดซ์ เบรก หรือชิ้นส่วนภายในรถยนต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ทำให้ผลิตภัณฑ์มีน้ำหนักเบา ไม่เป็นสนิม หรือการใช้นาโนฟิล์มของนาโนพอลิเมอร์เคลือบกระจกรถยนต์เพื่อลดการสะท้อนแสง ป้องกันคราบน้ำ และฝุ่นละอองเกาะ หรือการเติมผงอนุภาคนาโนซิลิกา วัสดุโนนคาร์บอน และวัสดุโนนแคลเซียมคาร์บอเนตเติมลงในส่วนผสมของยางรถยนต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรง เพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะถนน ช่วยการประหยัดน้ำมันและยืดอายุการใช้งานนานขึ้น

**อุตสาหกรรมพลังงาน** พลังงานเป็นเรื่องที่สำคัญและจำเป็นอย่างมากที่จำเป็นต้องมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างเช่น การพัฒนาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์เชื้อเพลิงและแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพสูง ถ่านไฟฉายสามารถชาร์จไฟสำหรับการใช้งานซ้ำและใช้งานได้นานขึ้น

**อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์** นาโนทองคำในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำสำหรับการผลิตชิป ไอซีและแผงวงจร ทำให้การนำไฟฟ้าสูงขึ้น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กลง ทำให้การใช้งานสะดวกมากขึ้น หรืออาจมีหน่วยเก็บความจำเพิ่มขึ้นที่เรียกว่านาโนแรม (NanoRAM) ด้วยวัสดุโนนคาร์บอนทำให้เก็บข้อมูลได้เพิ่มขึ้นและประหยัดไฟฟ้า

**อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า** เช่น การเติมวัสดุโนนซิลเวอร์ลงในตัวกรองเพื่อช่วยฆ่าเชื้อโรค และดับกลิ่นของตู้เย็น เครื่องปรับอากาศและเครื่องฟอกอากาศ

**อุตสาหกรรมสินค้าอุปโภคภายในบ้าน** ตัวอย่างเช่น ผงซักฟอก น้ำยาทำความสะอาด ผงดูดซับกลิ่น สเปรย์ปรับอากาศ อาจมีการเติมวัสดุโนนซิลเวอร์ลงไปเพื่อฆ่าเชื้อโรคและดับกลิ่น

**อุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์** โดยการเพิ่มเติมวัสดุโนนลงในเครื่องสำอางค์เพื่อป้องกันหรือสะท้อนรังสียูวี แสงแดด และทำให้การดูดซึมยาลงผิวหนังเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของครีมหรือเจล เช่นการเติมวัสดุโนนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) วัสดุโนนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) เป็นต้น

**อุตสาหกรรมการแพทย์และยารักษาโรค** เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซึมยาเข้าสู่เซลล์ได้รวดเร็วขึ้น สามารถลดปริมาณการใช้ยาหรืออาจไม่จำเป็นต้องรับประทานยาแต่ใช้วิธีการปิดแผ่นยาลงบนผิวหนัง แทนรวมทั้งลดปัญหาผลข้างเคียงและการรักษาโรคร้ายแรงเนื่องจากการรับประทานยาอาจส่งผลการทำลายข้างเคียง ตัวอย่างเช่นการพัฒนาการนำส่งยา (Drug delivery) ด้วยพลาสติกหรือยา การใช้วัสดุโนนแคปซูล (Nanocapsule) หรือนาโนเชลล์ (Nanoshell) บรรจุตัวยาเพื่อการรักษาโรคมะเร็ง

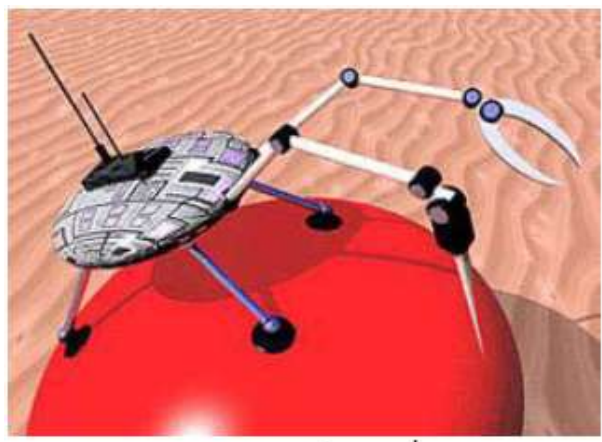


**อุตสาหกรรมอาหารและบรรจุภัณฑ์** โดยการเติมวัสดุนาโนซิลเวอร์ วัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ เพื่อเคลือบผิวภาชนะในการฆ่าหรือป้องกันการเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้อาหารไม่บูดหรือเก็บรักษาเพื่อการถนอมอาหารได้นานขึ้น อาหารไม่บูด

**อุปกรณ์กีฬา** โดยการเติมวัสดุนาโนคาร์บอนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับอุปกรณ์กีฬา เช่นไม้กอล์ฟ ไม้แบดมินตัน ไม้เทนนิส การเติมวัสดุนาโนซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนตลงในลูกบอล ลูกเทนนิส เพื่อเพิ่มความแข็งแรง เพิ่มการกระดอนตัว (Resilience) และช่วยเพิ่มอายุการใช้งานให้นานขึ้น

**อุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี** เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของปฏิกิริยาเคมีให้เร็วขึ้น โดยการเติมลงในตัวเร่งปฏิกิริยาหรือคะตะลิสต์ (Catalyst) และตัวดูดซับ (Adsorbent)

นอกจากนี้วัสดุนาโนยังสามารถใช้ในการผลิตหุ่นยนต์นาโน (Nano robot) หรือเครื่องจักรกลที่มีขนาดเล็กระดับนาโน ทำให้การทำงานและการจัดการระบบการทำงานของอะตอม โมเลกุล โปรตีนชนิดดีเอ็นเอ (DNA) อาร์เอ็นเอ (RNA) ของระบบพันธุกรรมภายในเซลล์สิ่งมีชีวิตเพื่อให้ระบบการทำงานของเซลล์ทำงานได้ดีขึ้นและมีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น การควบคุมปฏิกิริยา การเผาผลาญอาหาร การกำจัดสิ่งแปลกปลอม และการพัฒนานาโนคอมพิวเตอร์เพื่อการใช้งานด้านสมองกลเพื่อควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์นาโนดังรูป 3.1



หุ่นยนต์นาโนสำหรับซ่อมแซมปลายประสาท

หุ่นยนต์จิ้ง

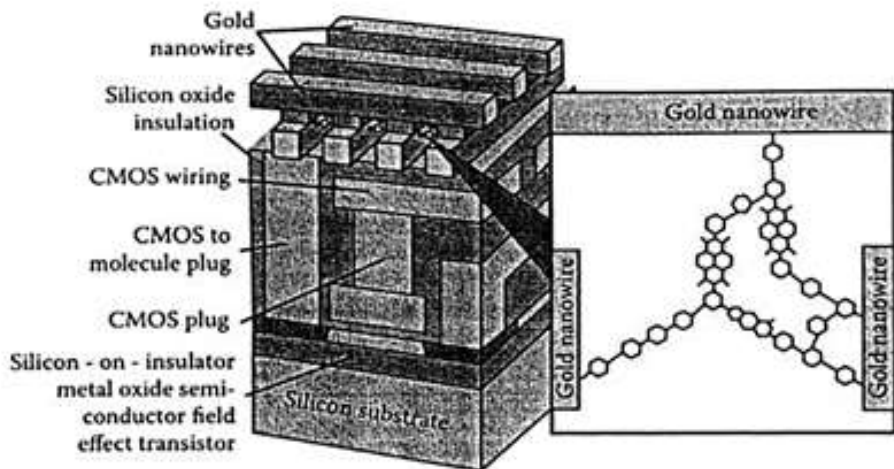
รูปที่ 3.1 หุ่นยนต์สำหรับงานทางการแพทย์ ที่มา Henrik, B. 2003 และ Marko, U., 2002

วัสดุนาโนนับเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงสามารถประยุกต์ใช้งานได้กับหลายอุตสาหกรรม ทั้งอุตสาหกรรมขนาดเล็กและอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีการใช้งานแตกต่างกัน ดังตัวอย่างต่อไปนี้ ตัวอย่างวัสดุนาโนที่สามารถประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมมีหลากหลายชนิดตามประโยชน์การใช้งาน

1. วัสดุนาโนอิเล็กทรอนิกส์ (Nanoelectronics) สำหรับการผลิตนาโนชิปดังรูป 3.2, อุปกรณ์ไฟฟ้าพลังความร้อน (Thermoelectric device), เส้นลวดนาโน (nanowire), ทรานซิสเตอร์ (Transistor), เพียโซเซรามิก, ไดอิเล็กตริก, เซนเซอร์ทางเคมีและชีววิทยา (Chemical sensor and biosensor), และตัวเร่งปฏิกิริยาดังรูป 3.3
2. วัสดุนาโนสำหรับการใช้งานด้านแสง ไฟฟ้า และแม่เหล็ก (Nano-optoelectronic and magnetic)
3. วัสดุเส้นใยนาโนคาร์บอน (Carbon nanofiber) เคลือบบนผิวเหล็กในการผลิตตะปู เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับตะปู ทำให้ตะปูมีความทนทาน มั่นวาง ความแข็งแรงสูง อายุการใช้งานนาน
4. วัสดุนาโนชุดลำดับ (Nanowire array) สำหรับใช้งานในวงจรรีเลย์ทรอนิกส์
5. วัสดุนาโนแบตเตอรี่ (Nanobattery)
6. วัสดุนาโนสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านสิ่งแวดล้อม
7. วงจรนาโนอิเล็กทรอนิกส์ (Nanocircuit) สำหรับการผลิตไอซี (Nanoscale ICs), อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Nanoscale electronic devices) ดังรูปที่ 3.4
8. วัสดุเส้นใยวิสเกอร์นาโน (Nanowhisker) สำหรับใช้ในการผลิตวัสดุนาโนคอมโพสิตชนิดต่างๆ เช่น (Nanoceramic matrix composite, CMC), (Nanopolymer matrix composite, PMC), (Nanometal matrix composite, MMC) และท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube)
9. วัสดุนาโนเซรามิก (Nanoceramic/shell) ตัวอย่างเช่นสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตสำหรับการผลิตยารักษาโรค ดังรูปที่ 3.5 แสดงตัวอย่างนาโนคาร์บอนแคปซูลสำหรับการแพทย์
10. วัสดุนาโนฟิล์ม (Nanofilm) สำหรับอุตสาหกรรมกระดาษ พลาสติก และเส้นใย ดังรูปที่ 3.6
11. วัสดุนาโนอนุภาคนาโน (Nanoparticle) สำหรับใช้ในการผลิตเครื่องสำอางค์ที่สามารถป้องกันรังสีหรือสะท้อนรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากแสงแดดดังรูป 3.7
12. วัสดุนาโนเบลต์ (Nanobelt) ที่มีลักษณะบาง แบน และโปร่งใส ผลิตจากสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ของธาตุต่อไปนี้ Zn, Sn, In, Cd และ Ga
13. วัสดุนาโนทรงกลม (Nanosphere) ตัวอย่างเช่น ซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 2-50 นาโนเมตร
14. วัสดุนาโนแคปซูล (Nanocapsule) สำหรับการใช้งานด้านการแพทย์เช่น การนำส่งยา (Drug delivery) กล้องสำหรับผ่าตัดทำให้เห็นภาพหรือตำแหน่งที่ต้องการรักษาชัดเจน
15. วัสดุเส้นใยนาโน (Nanofiber) เพื่อผลิตเนื้อเยื่อเทียม (Scaffold) ปลูกสเต็มเซลล์ (Nanofiber gel) หรือเพื่อการพัฒนาใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์ แสง แม่เหล็กและตัวเร่งปฏิกิริยา

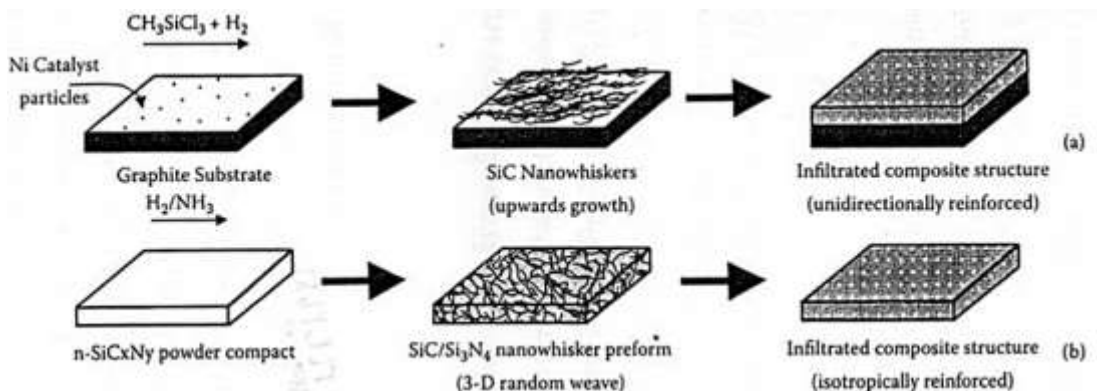
16. วัสดุเส้นใยแก๊วนาโน (Nanoantenna) สำหรับการใช้งานด้านการแพทย์เพื่อผลิตตัวรับสัญญาณแสง (Detector) การผลิตเส้นใยแก๊วนำแสงขนาดเล็กเพื่อการบำบัดรักษาโรคหรือการผลิตกล้องขนาดจิ๋วเพื่อใช้งานทางการแพทย์สำหรับงานผ่าตัด

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์นาโน

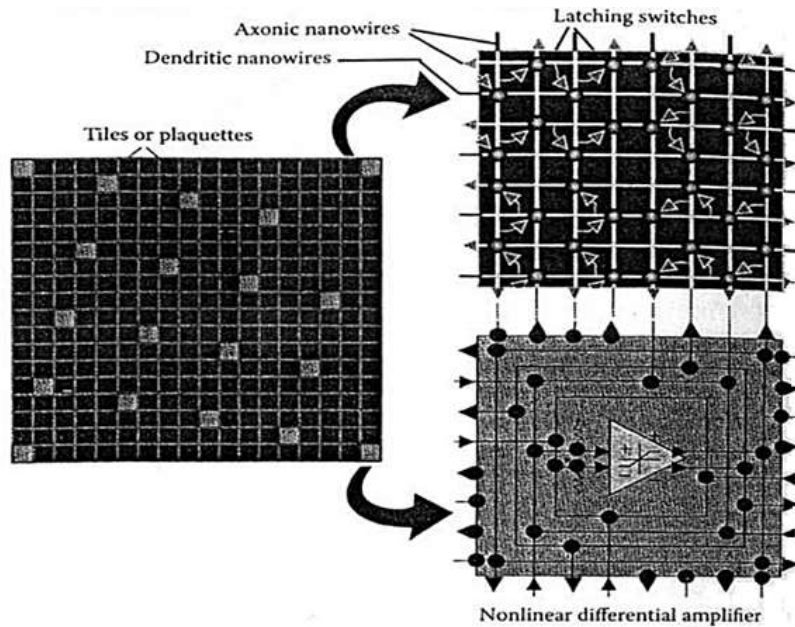


This hybrid complementary metal oxide semiconductor / molecular circuit contains a molecule that may function as a latching switch (including a single-bit memory cell) controlled by two input signals.

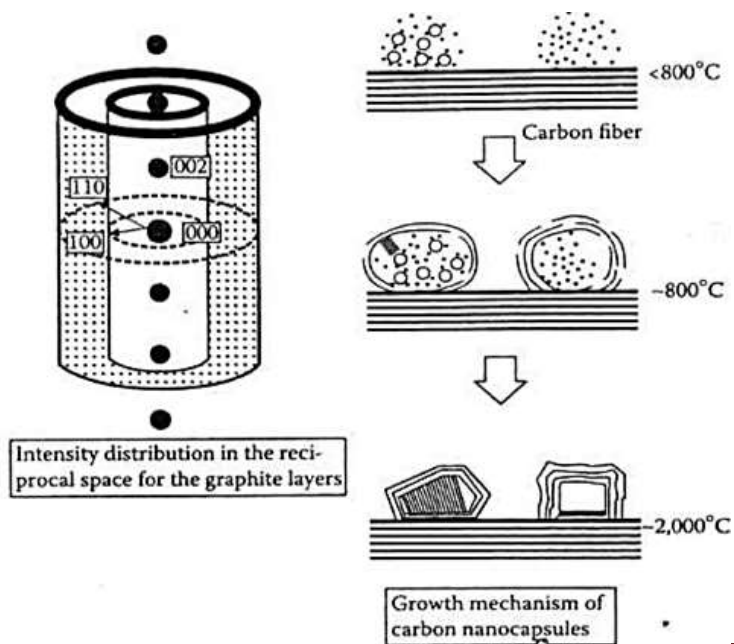
รูปที่ 3.2 วัสดุกิ่งตัวนำชนิดโลหะออกไซด์ที่มีอนุภาคนาโนทองคำเป็นขั้วอิเล็กโทรด ที่มา Schwartz, M. 2006



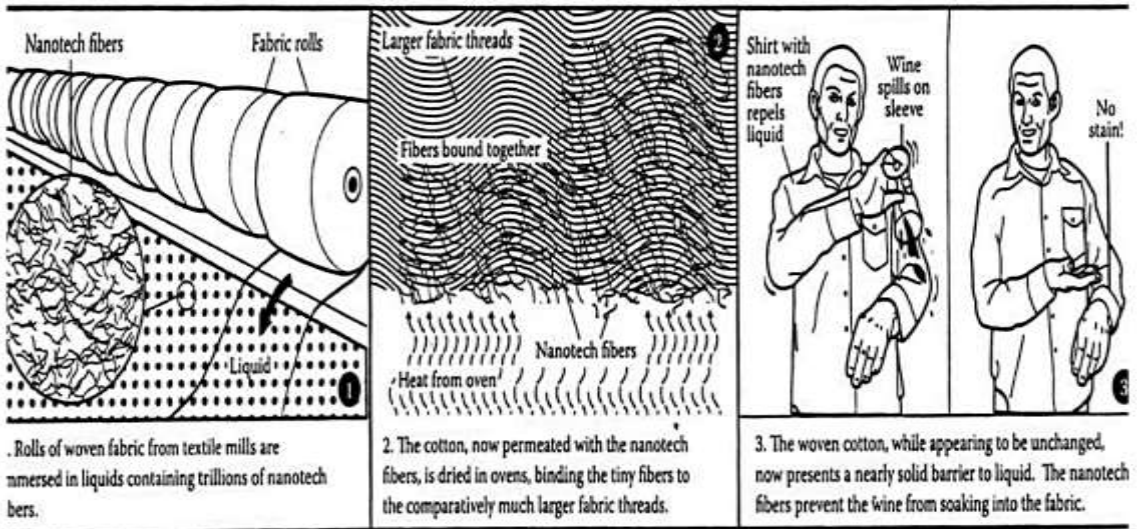
รูปที่ 3.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาคอมพอสิตชนิดซิลิคอนไนไตรด์และซิลิคอนคาร์ไบด์: a) การเสริมแรงด้วยเส้นใยวิสเกอร์แบบ 1 D และ b) การเสริมแรงด้วยเส้นใยวิสเกอร์แบบสุ่ม 3D ที่มา Kear, B.H., 1995



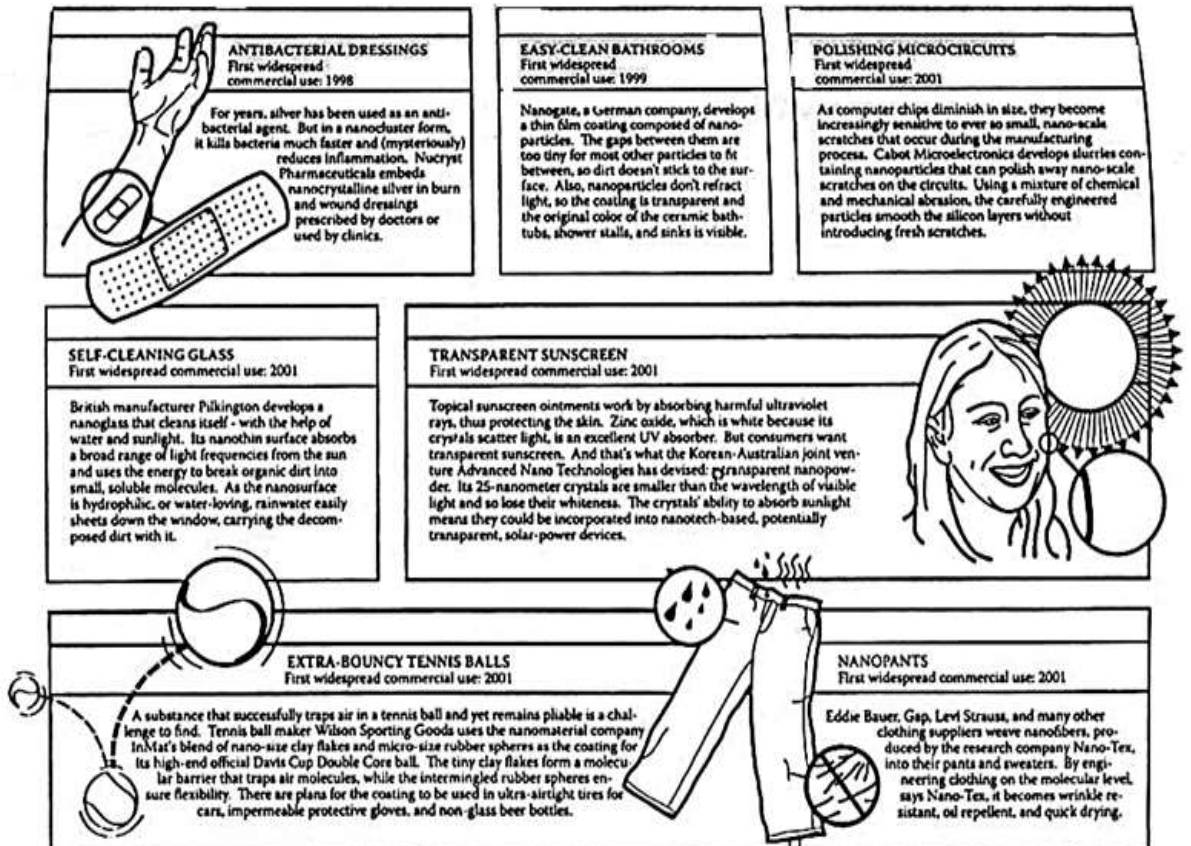
รูปที่ 3.4 การผลิตเส้นลวดนาโนสำหรับผลิตสายไฟ (Nanowire) ที่มา Schwartz, M., 2006.



รูปที่ 3.5 การผลิตคาร์บอนนาโนแคปซูลที่มา Schwartz, M., 2006.



รูปที่ 3.6 เส้นใยนาโนสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ ที่มา Schwartz, M., 2006.



รูปที่ 3.7 วัสดุนาโนสำหรับอุตสาหกรรมยา วัสดุพอลิเมอร์ เครื่องสำอางค์ กีฬาและสิ่งทอ  
ที่มา Schwartz, M., 2006

### ข้อดีของการใช้วัสดุนาโนในผลิตภัณฑ์

1. อุณหภูมิของวัสดุนาโนมีขนาดเล็กดังนั้นการเผาผนึกอนุภาค (Sintering) สามารถกระทำได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าการเผาผนึกอนุภาคผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากอนุภาคขนาดใหญ่
2. การกระจายตัวของอนุภาคดี ทำให้โครงสร้างมีความสม่ำเสมอและควบคุมการโตของเกรนได้ง่าย
3. อนุภาคมีการจัดเรียงตัวที่ดีทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นสูง
4. ผลิตภัณฑ์มีความบริสุทธิ์สูง คุณภาพสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งชิ้นงาน

อย่างไรก็ตาม การพัฒนาวัสดุนาโนและเทคโนโลยีนาโนมีความสัมพันธ์และเกี่ยวข้องกับสิ่งต่าง ๆ มากมาย ดังนั้นอาจส่งผลกระทบต่อทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตได้ในอนาคตดังต่อไปนี้

1. **เทคโนโลยีสารสนเทศ** ได้แก่ อุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor industry) ที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องสำหรับการผลิตชิ้นส่วนขนาดเล็กเพื่อเพิ่มความรวดเร็วในการทำงานและลดการใช้พลังงานของอุปกรณ์คอมพิวเตอร์สำหรับการอ่าน การเขียน และเก็บบันทึกข้อมูลให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นหรือการพัฒนาขนาดไมโครโปรเซสเซอร์และทรานซิสเตอร์ของขนาดชิ้นส่วนให้เล็กลงแต่ทำงานได้ดีขึ้น
2. **การแพทย์และสาธารณสุข** พบว่าวัสดุนาโนสามารถช่วยการศึกษา การวิจัย และการพัฒนาทางการแพทย์และสาธารณสุขได้ดีขึ้น เนื่องจากวัสดุนาโนมีขนาดเล็ก ทำให้การศึกษาด้านชีววิทยา เคมี ฟิสิกส์ และคอมพิวเตอร์ง่ายและมีประสิทธิภาพ ก่อให้เกิดองค์ความรู้ด้านเทคโนโลยีชีวภาพระดับนาโน (Nanobiotechnology) มีความก้าวหน้า ก่อให้เกิดความสำเร็จทางด้านการแพทย์และสาธารณสุขเป็นอย่างมาก มีเครื่องมือแพทย์สำหรับการรักษาและการผ่าตัดที่ทันสมัย มีระบบการตรวจสอบและติดตามอาการของโรคที่ทันสมัย ลดการผ่าตัดหรือการรักษาที่เสี่ยงอันตราย รวมทั้งก่อให้เกิดการรักษาที่ทันสมัย เช่นการปลูกถ่ายเนื้อเยื่อและอวัยวะเทียม ทำให้คุณภาพชีวิตของผู้ป่วยดีขึ้น
3. **วัสดุและผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ** พบว่าการพัฒนาวัสดุนาโนเป็นรากฐานหรือพื้นฐานที่สำคัญในการพัฒนาผลิตภัณฑ์และอุปกรณ์ใหม่ ๆ สำหรับการใช้งานมีมากขึ้นและทันสมัยขึ้นทั้งวัสดุนาโนโลหะ วัสดุนาโนเซรามิก วัสดุนาโนพอลิเมอร์ และวัสดุนาโนคอมพอสิต ทำให้กระบวนการผลิต การควบคุม

คุณภาพทำได้ดีขึ้น ส่งผลให้สมบัติด้านต่าง ๆ ของวัสดุนาโนดีขึ้นและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เช่น น้ำหนักเบา อายุการใช้งานนานขึ้น ได้ผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่สำหรับการใช้งาน มีฟังก์ชันการทำงานที่สูงขึ้น

4. **มนุษย์อวกาศและการสำรวจอวกาศ** ทำให้การสำรวจ การค้นพบสิ่งใหม่ ๆ นอกโลกทำได้ง่ายและสะดวกมากขึ้น

5. **พลังงานและสิ่งแวดล้อม** วัสดุนาโนและเทคโนโลยีนาโนช่วยก่อให้เกิดการพัฒนาพลังงานทางเลือก วิธีการเก็บสำรองพลังงาน และเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตพลังงาน รวมทั้งมีระบบการตรวจสอบคุณภาพของสิ่งแวดล้อมที่รวดเร็วมากขึ้น สามารถแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมได้อย่างรวดเร็ว

6. **ความมั่นคงของชาติ** วัสดุนาโนช่วยทำให้เกิดความมั่นคงของชาติเนื่องจากทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ ที่ทันสมัยทั้งด้านการติดต่อสื่อสารก็มีความสะดวกรวดเร็วมมากขึ้น มีหุ่นยนต์ช่วยงานด้านกองทัพ และมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นไปในภาวะวิกฤติข้อมูลด้านกองทัพ

7. **ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี** ทำให้เกิดความก้าวหน้าในการศึกษาค้นคว้าและการวิจัยที่ทันสมัย มีองค์ความรู้ด้านฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา คณิตศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์ที่ทันสมัย ทำให้เกิดความสะดวกสบายในการเก็บ บันทึก และสำรวจข้อมูลด้านต่าง ๆ

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น วัสดุนาโนนับได้ว่าเป็นวัสดุที่มีคุณค่า มีประโยชน์ ก่อให้เกิดการพัฒนาทั้งด้านเทคโนโลยีและอุตสาหกรรม แต่ในทางตรงข้ามยังพบว่ากระบวนการผลิตวัสดุนาโนและเทคโนโลยีนาโนอาจก่อให้เกิดผลเสียและมีความเสี่ยงต่อผู้ที่เกี่ยวข้องและผู้ที่ต้องสัมผัสวัสดุนาโนอยู่บ้างดังต่อไปนี้

1. การสัมผัสอนุภาคนาโน เนื่องจากการจัดเก็บวัตถุดิบ การชั่ง ตวง วัดในขั้นตอนการผลิต การเตรียมและการผสมวัตถุดิบ การเคลือบหรือการฉีดพ่น การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ การบรรจุหีบห่อ ที่อาจมีฝุ่นละอองที่ทำให้เกิดการฟุ้งกระจาย ทำให้เกิดการสัมผัสกับผิวหนังและดูดซึมเข้าสู่ร่างกายทั้งทางผิวหนัง การหายใจและการกินที่อาจทำให้เกิดการสะสมและเป็นอันตรายได้

2. อันตรายต่อสุขภาพ อาจก่อให้เกิดการอักเสบ การระคายเคือง หรือภูมิแพ้ ที่อาจกลายเป็นสาเหตุของการเกิดมะเร็ง ความผิดปกติของเซลล์ อวัยวะต่าง ๆ และพันธุกรรม

3. อันตรายจากการติดไฟและการระเบิดของวัสดุนาโน เนื่องจากวัสดุนาโนมีขนาดเล็กมาก จึงเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง หากมีความเข้มข้นในอากาศมากอาจส่งผลให้เกิดการระเบิดได้

### การป้องกันอันตรายจากวัสดุนาโน

1. การป้องกันด้านวิศวกรรม โดยมุ่งเน้นลดการฟุ้งกระจายวัสดุนาโนหรือป้องกันการสัมผัสกับวัสดุนาโน โดยการออกแบบบริเวณพื้นที่ที่ต้องทำงานไม่ให้เกิดการปนเปื้อน อาจมีการออกแบบระบบระบาย

อากาศ การกำจัดฝุ่นละอองตามมาตรฐาน รวมทั้งการตรวจสอบสภาพแวดล้อมภายในโรงงานอย่างต่อเนื่อง

2. การป้องกันของผู้ปฏิบัติงาน โดยการจัดอุปกรณ์เพื่อป้องกันฝุ่นละอองเพื่อความปลอดภัย เช่น การสวมใส่อุปกรณ์เพื่อป้องกันระบบทางเดินหายใจ โดยการใช้หน้ากากอนามัยที่มีแผ่นกรองอากาศ การสวมใส่อุปกรณ์เพื่อป้องกันการสัมผัสกับผิวหนัง โดยการสวมถุงมือและเสื้อผ้าที่เหมาะสมในการทำงานโดยการสวมใส่แว่นตาเพื่อป้องกันดวงตา

3. การอบรมให้ความรู้เรื่องการทำงานที่ปลอดภัยและอาจปรับระยะเวลาการทำงานให้เหมาะสม

4. มีมาตรการการจัดการด้านอื่น ๆ เช่น จัดทำแนวทางการปฏิบัติงานเพื่อควบคุมการทำงานได้อย่างปลอดภัยหรือการจัดทำข้อมูลเพื่อประชาสัมพันธ์ให้ทราบถึงแนวทางการปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโนเพื่อความปลอดภัยและการจัดการเฝ้าระวังทางสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานเช่น การตรวจสุขภาพและควรมีการเก็บข้อมูล รายงานผลอย่างต่อเนื่อง

## คำถามท้ายบท

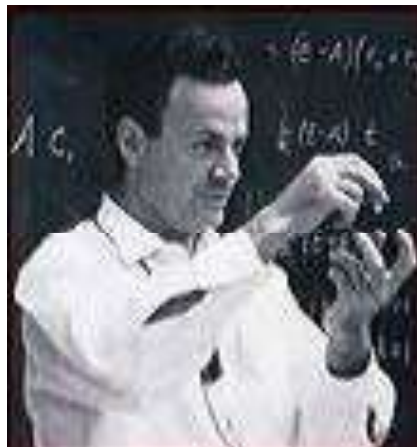
1. อันตรายจากการใช้วัสดุนาโนเป็นอย่างไร
2. ข้อดีของการใช้วัสดุนาโนในผลิตภัณฑ์เป็นอย่างไร
3. จงยกตัวอย่างการใช้วัสดุนาโนในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง
4. แนวทางป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้วัสดุนาโนควรทำอย่างไร
5. จงยกตัวอย่างการใช้วัสดุนาโนในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม



## บทที่ 4

### การพัฒนาและแนวโน้มการพัฒนาวัสดุนาโนในอนาคต (Development and Trend of Nanomaterials in the Future)

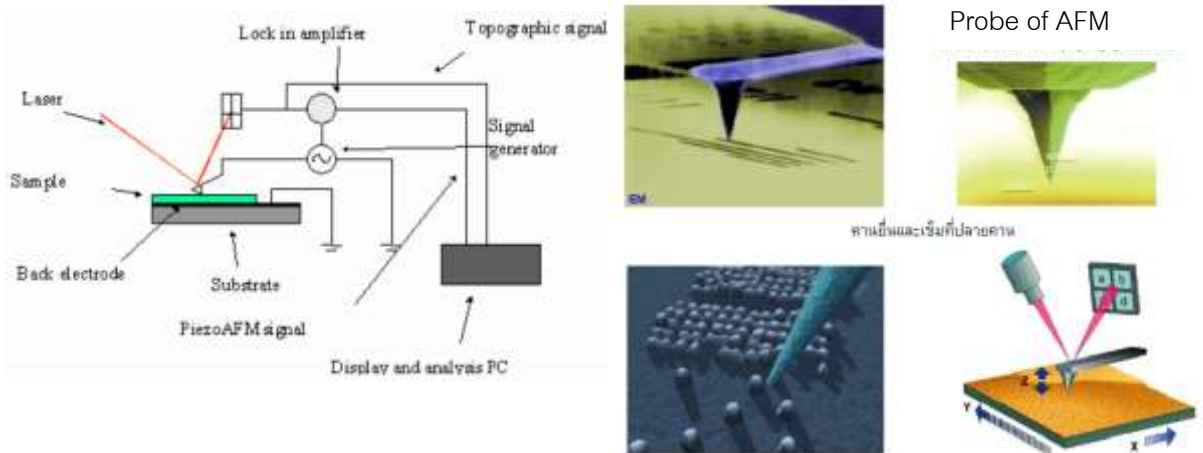
การเริ่มต้นการศึกษาด้านวัสดุนาโนเริ่มต้นจากการค้นพบโดยศาสตราจารย์ริชาร์ด ฟายน์แมน (Richard P. Feynman) ในปี ค.ศ. 1959 (พ.ศ. 2502) แสดงความเป็นไปได้ของการจัดเรียงอะตอมภายในโครงสร้างที่ละเอียดและได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1965



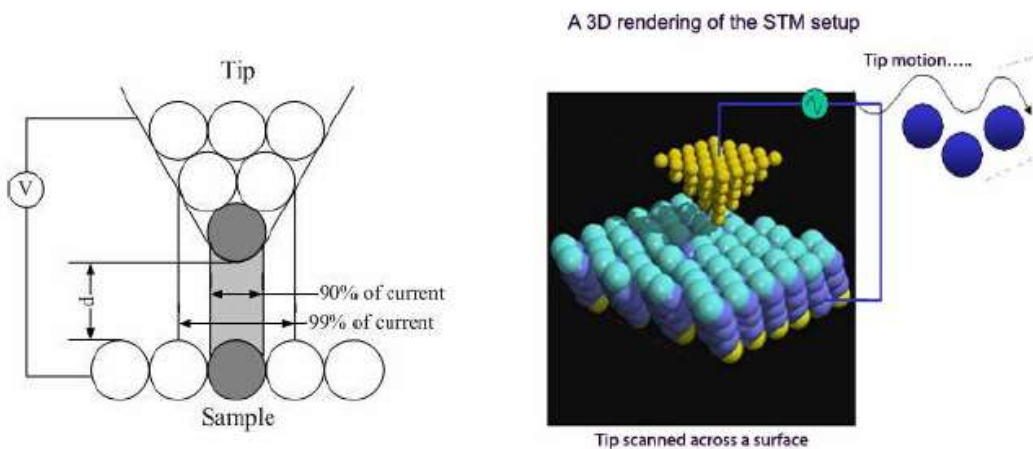
รูปที่ 4.1 ริชาร์ด ฟายน์แมน บิดาแห่งศาสตร์วัสดุนาโน

ต่อจากนั้น Gerd Binnig และ Heinrich Rohrer ผู้ประดิษฐ์กล้อง Scanning Tunneling Microscope (STM) สำหรับศึกษาโครงสร้างอะตอมบริเวณพื้นผิววัสดุในปี ค.ศ. 1981 และได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1986 เป็นกล้องที่มีส่วนประกอบคล้ายกับ Atomic Force Microscope (AFM) สำหรับ AFM เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์วัสดุตัวนำและฉนวนไฟฟ้าในสภาพแวดล้อมที่เป็นสุญญากาศ อากาศ ก๊าซ และของเหลว โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญคือคานาทำจากวัสดุที่สามารถเปลี่ยนแปลงประจุได้เมื่อถูกแรงกระทำโดยที่บริเวณปลายคานาจะมีเข็มประกอบด้วยอะตอม 1 ตัว เมื่อมีการเลื่อนคานาให้ปลายเข็มอยู่ห่างจากผิววัสดุในช่วง 0-100 นาโนเมตร แรงกระทำระหว่างอะตอมจะดึง

คานและสามารถใช้วัดระยะหรือเคลื่อนตำแหน่งอะตอมได้ที่ละ 1 ตัว ดังรูป 4.2 สำหรับกรณีของ STM จะมีเข็มที่นำไฟฟ้าได้และได้รับการป้อนแรงดันบริเวณปลายเข็มกับวัสดุตัวอย่างในระยะประมาณ 1 นาโนเมตร ที่ทำให้อิเล็กตรอนสามารถกระโดดข้ามช่องว่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุตัวอย่างได้ เพื่อให้สามารถวัดกระแสไฟฟ้าและมองเห็นภาพบริเวณพื้นผิวตัวอย่างได้อย่างชัดเจน กล้อง STM สามารถใช้ร่วมกับวัสดุที่นำไฟฟ้าดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง AFM ที่มา Richard P. Feynman, 2003



รูปที่ 4.3 การทำงานของเครื่อง STM ที่มา Richard P. Feynman, 2003

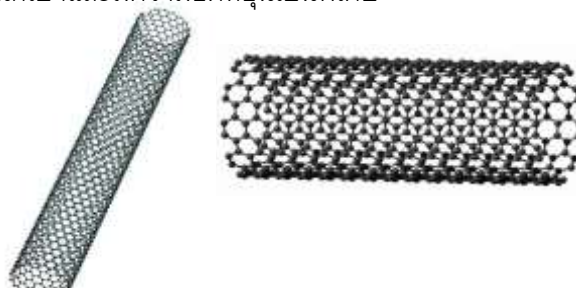
และในปี ค.ศ. 1985 โรเบิร์ต เคิร์ล (Robert F. Curl) ริชาร์ด สมอลลี (Richard E. Smalley) และ ฮาร์โวลด์ โครโต (Sir Harold W. Kroto) ได้ค้นพบโครงสร้างแบบใหม่ของคาร์บอนที่เรียกว่าฟูลเลอรีน

(Fullerene) คือโมเลกุลที่มีโครงสร้างประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนที่เรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบและมีโครงสร้างอยู่กึ่งกลางระหว่างโครงสร้างของเพชรและแกรไฟต์หรือเรียกว่าแอลโลโทรป (Allotrope) ของคาร์บอน ฟูลเลอร์ีนมีลักษณะเป็นลูกบอลรูปทรงกลมประกอบด้วยคาร์บอนจำนวน 60 อะตอมจึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า C60 ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 โครงสร้างฟูลเลอร์ีน (Fullerene) ของคาร์บอน

ในปี ค.ศ. 1989 ดอน ไอเกลอร์ (Don Eigler) นักฟิสิกส์ของศูนย์วิจัยไอบีเอ็ม (IBM) ประสบความสำเร็จในการจัดเรียงตัวอะตอมระดับนาโนของธาตุซีนอน (Xenon, Xe) ที่ละอะตอมได้อย่างแม่นยำโดยการใช้กล้อง (Scanning tunneling Microscope, STM) ที่ทำให้เกิดการพัฒนาด้านวัสดุนาโนอิเล็กทรอนิกส์ วัสดุนาโนเซมิคอนดักเตอร์ ต่อจากนั้นในปี ค.ศ. 1991 ซุมิโอะ ลิจิม่า (Sumio Iijima) นักวิจัยของบริษัทเอ็นอีซี (NEC) ประเทศญี่ปุ่น ได้ค้นพบโครงสร้างใหม่ของคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นท่อเล็ก ๆ มีขนาดในระดับนาโนเมตรที่เรียกว่าท่อนาโนคาร์บอนหรือคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube) จากแผ่นแกรไฟต์ดังรูป 4.5 และหลังจากนั้นอีกสองปีต่อมาลิจิม่าได้ทำงานร่วมกับโดนัลด์ เบททูน (Donald Bethune) บริษัทไอบีเอ็ม (IBM) ประเทศสหรัฐอเมริกา ค้นพบโครงสร้างท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยวที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพียง 1-2 นาโนเมตรเท่านั้น ท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุที่สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้เหมือนกับแท่งโลหะหรือสามารถทำหน้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทไดโอด โดยขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอน ประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับการให้ความร้อนกับคาร์บอนที่บริสุทธิ์จนกระทั่งเกิดการระเหยกลายเป็นไอแล้วปล่อยให้ควบแน่นในสุญญากาศหรือในก๊าซเฉื่อย ทำให้ได้แผ่นคาร์บอนบริสุทธิ์ที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนเพียงชั้นเดียว จากแผ่นคาร์บอนบริสุทธิ์เมื่อนำมาม้วนเป็นท่อจะมีขนาดเล็กกว่าเส้นผมของมนุษย์ 50,000 เท่า เรียกว่าท่อนาโนคาร์บอน มีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบาและมีความยืดหยุ่นเป็นพิเศษ



รูปที่ 4.5 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube)

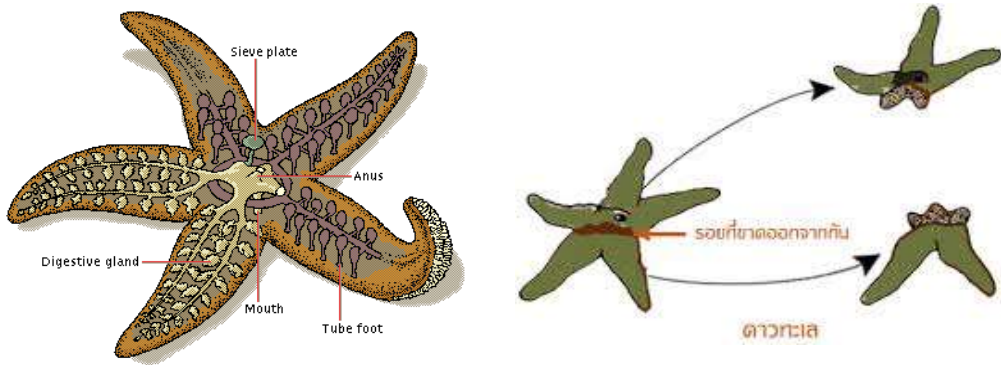
นอกจากนี้ยังได้มีการค้นพบเทคโนโลยีนาโนที่มีอยู่ในธรรมชาติทั้งที่เกี่ยวข้องกับสิ่งมีชีวิตและไม่มีชีวิต ตัวอย่างเช่น การหุบและการกางใบของพืช เช่น ไมยราพ หม้อข้าวหม้อแกงลิง หรือการงอกใหม่หรือการซ่อมแซมเซลล์ของสัตว์ชนิดต่าง ๆ เช่น ดาวทะเล จิ้งจก ตุ๊กแก หรือการที่สิ่งมีชีวิตมีอวัยวะพิเศษสำหรับการดำรงชีพและการป้องกันภัย เช่น ปลาไหลไฟฟ้า แมงกะพรุนไฟ เม่นทะเล รวมทั้งการที่จิ้งจกหรือตุ๊กแกมีขนแข็ง ๆ ขนาดเล็กที่เรียกว่าซีต (Setae) จำนวนนับล้านบริเวณขาที่มีเส้นปลายแบนขนาดเล็กที่เรียกว่าสปาตูล (Spatulae) ประกอบอยู่อีกหลายร้อยเส้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กมากประมาณ 200 นาโนเมตร ช่วยในการยึดเกาะกับผนังหรือเพดานของสัตว์เหล่านี้ ดังรูป 4.6-4.11



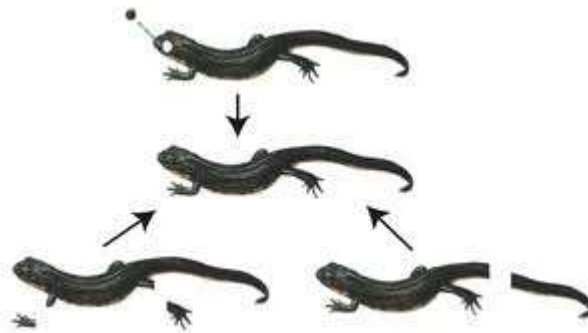
รูปที่ 4.6 การตอบสนองต่อสิ่งเร้าของไมยราพ



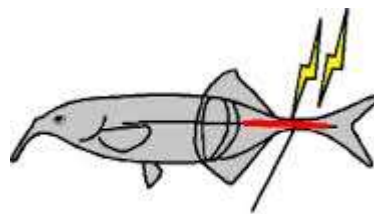
รูปที่ 4.7 การดักจับแมลงของต้นหม้อข้าวหม้อแกงลิง ที่มา Kellar Autumn, 2000



รูปที่ 4.8 การงอกใหม่ของดาวทะเล ที่มา Kellar Autumn, 2000



รูปที่ 4.9 การงอกใหม่ของหางจิ้งจก



electric organ

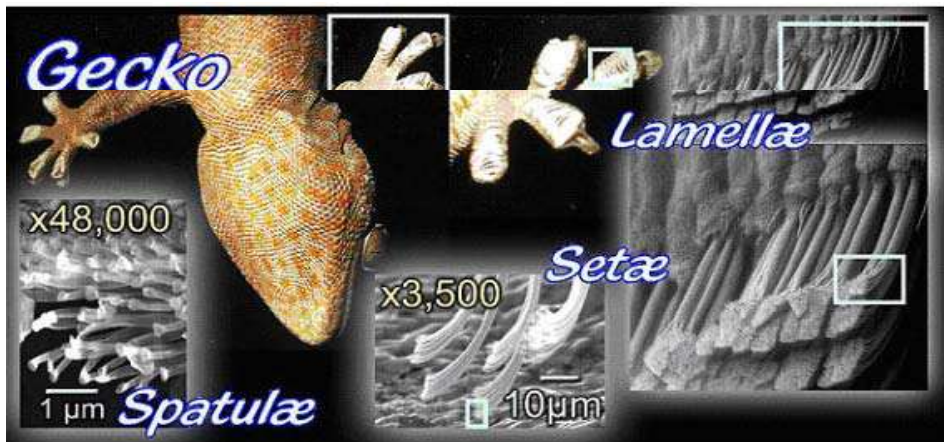
- 45 -

electric organ

resting



รูปที่ 4.10 ปลาไหลไฟฟ้า ที่มา Kellar Autumn, 2000

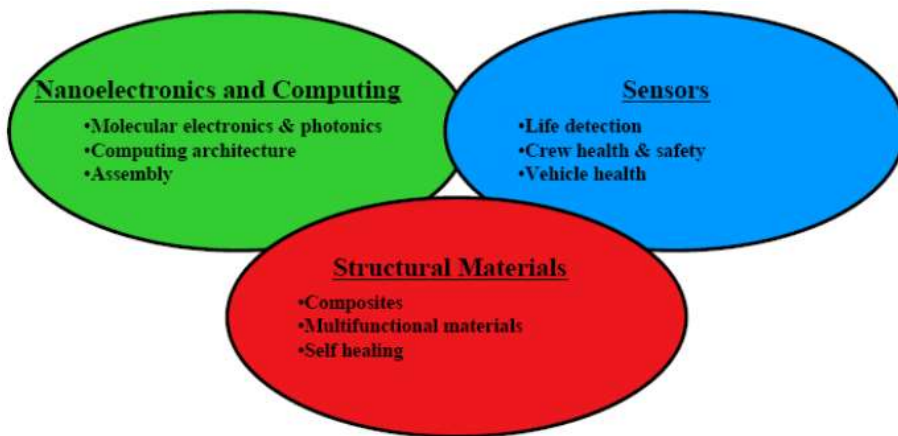


รูปที่ 4.11 การยึดเกาะของขนเล็ก ๆ บริเวณขาของจิ้งจกและตุ๊กแก ที่มา Kellar Autumn, 2000

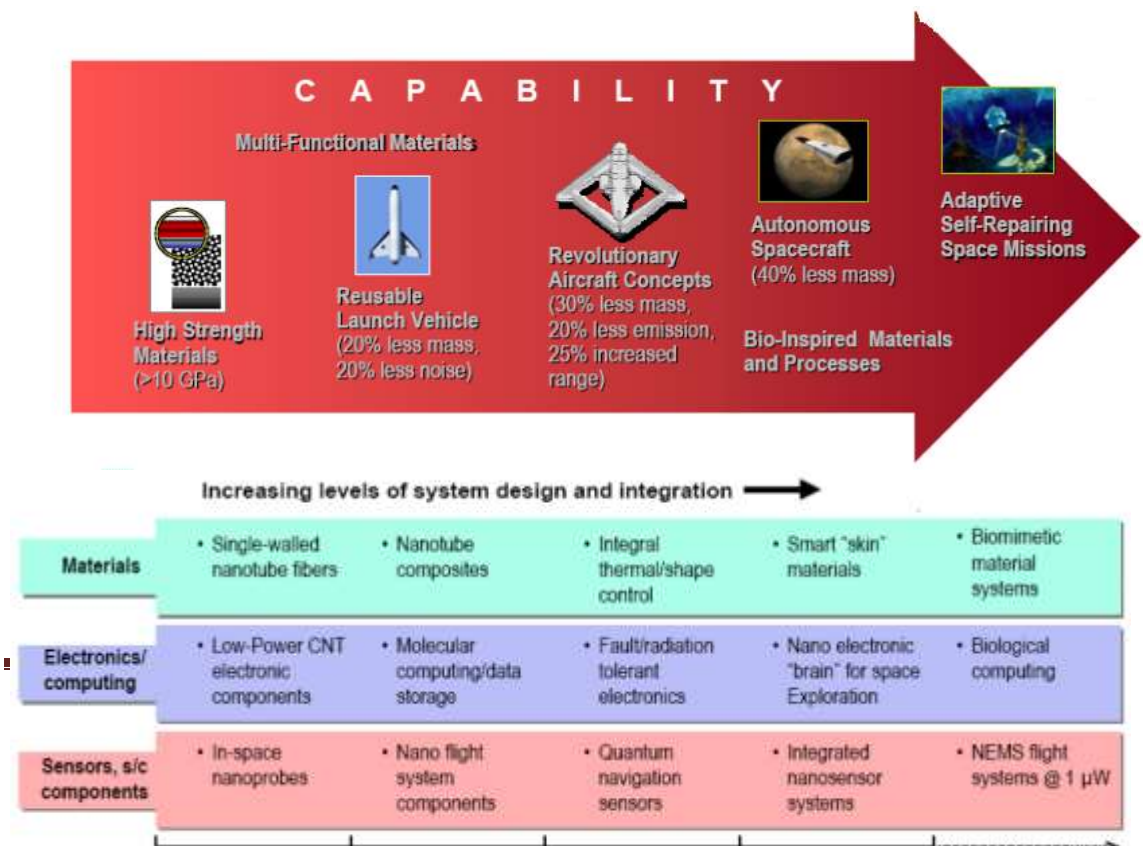
จากนวัตกรรมและองค์ความรู้ที่เกิดขึ้นทำให้การพัฒนาวัสดุนาโนเพิ่มขึ้นอย่างมากในหลายอุตสาหกรรม เนื่องจากวัสดุนาโนมีความเกี่ยวข้องกับมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอย่างมากทั้งโดยทางตรงและโดยทางอ้อม อีกทั้งยังเป็นวัสดุที่อยู่ในความสนใจของนักวิทยาศาสตร์ที่สามารถปรับเปลี่ยนคุณสมบัติดั้งเดิมของวัสดุ นั้นให้ดีขึ้นและมีประสิทธิภาพสูงมากขึ้น จึงทำให้อุตสาหกรรมนำนาโนมาใช้งานทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ แพทย์ศาสตร์ เกษศาสตร์ วัสดุศาสตร์ วิทยาศาสตร์พื้นฐานทั้งด้านเคมี ชีววิทยา ฟิสิกส์และ คณิตศาสตร์ รวมทั้งวิทยาศาสตร์ประยุกต์ที่มีผลกระทบต่อสิ่งต่าง ๆ ในอนาคต การพัฒนาวัสดุนาโนทำให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีด้านต่าง ๆ อีกมากมายเช่น ด้านอิเล็กทรอนิกส์ เซรามิก ตัวเก็บข้อมูลทาง แม่เหล็ก ด้านแสง ด้านไฟฟ้าและทางกลที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของวัสดุ

การพัฒนาวัสดุนาโนได้ถูกจัดให้เหมาะสมตามการใช้งานโดยแบ่งเป็น 3 กลุ่มที่สำคัญคือด้าน อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ ด้านเซนเซอร์ ด้านโครงสร้าง ดังแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 4.12 และ วิวัฒนาการของการพัฒนาวัสดุนาโนด้านต่าง ๆ ดังรูป 4.13 สำหรับรูปที่ 4.14 ถึงรูปที่ 4.17 แสดง รายละเอียดการพัฒนาด้านวัสดุนาโนคอมพิวเตอร์และวัสดุนาโนเซนเซอร์ (Nanocomputer and

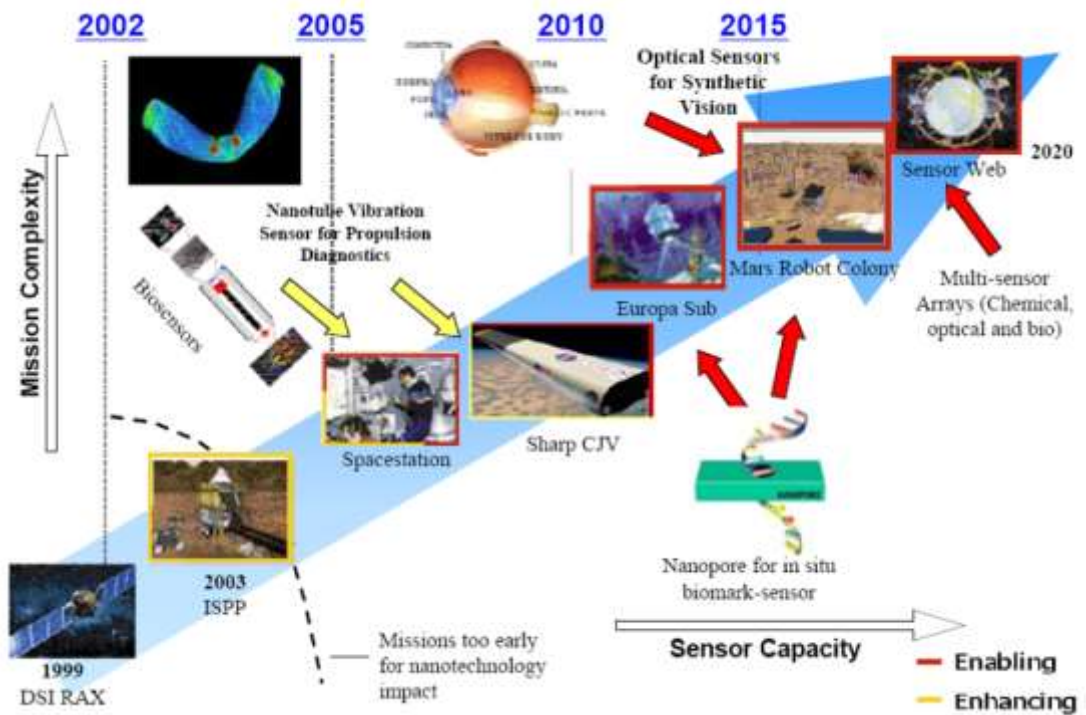
nanosensor) คือวิวัฒนาการที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเครือข่ายและโครงสร้างระดับนาโนเพื่อการส่งต่อข้อมูล (Networking) สำหรับวิวัฒนาการด้านวัสดุนาโน (Nanomaterial) คือวิวัฒนาการที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบผิววัสดุ (Coating) การสร้างอนุภาคนาโนและโครงสร้างนาโนของวัสดุโลหะ พอลิเมอร์และเซรามิก วิวัฒนาการด้านวัสดุชีวภาพและการเลียนแบบธรรมชาติ (Biomimetic) คือวิวัฒนาการที่เกี่ยวข้องกับการสร้างโมเลกุลแบบต่าง ๆ เพื่อเลียนแบบกระบวนการทำงานต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิตและวิวัฒนาการด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์ (Nanoelectronic) ก็มีความเกี่ยวข้องกับการสร้างทรานซิสเตอร์จากวัสดุนาโน การสร้างยาและสารเคมีที่ทำงานเฉพาะกับเป้าหมาย รวมทั้งการสร้างโครงสร้างต่าง ๆ ที่เรียกว่าแอกชูเอเตอร์ (Actuator) ตามช่วงระยะเวลาที่มีวิวัฒนาการเรียงตามลำดับ



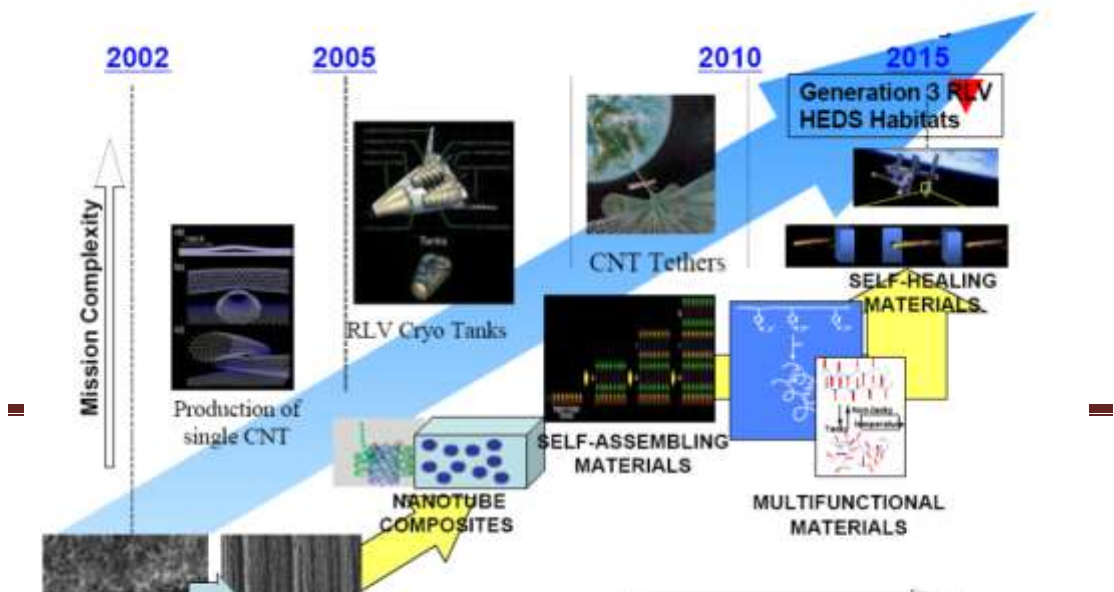
รูปที่ 4.12 การจัดกลุ่มแสดงแนวทางการพัฒนาวัสดุนาโน ที่มา Muskant S., 1985



รูปที่ 4.13 วิวัฒนาการของการพัฒนาวัสดุโนน ที่มา Musikant S., 1985

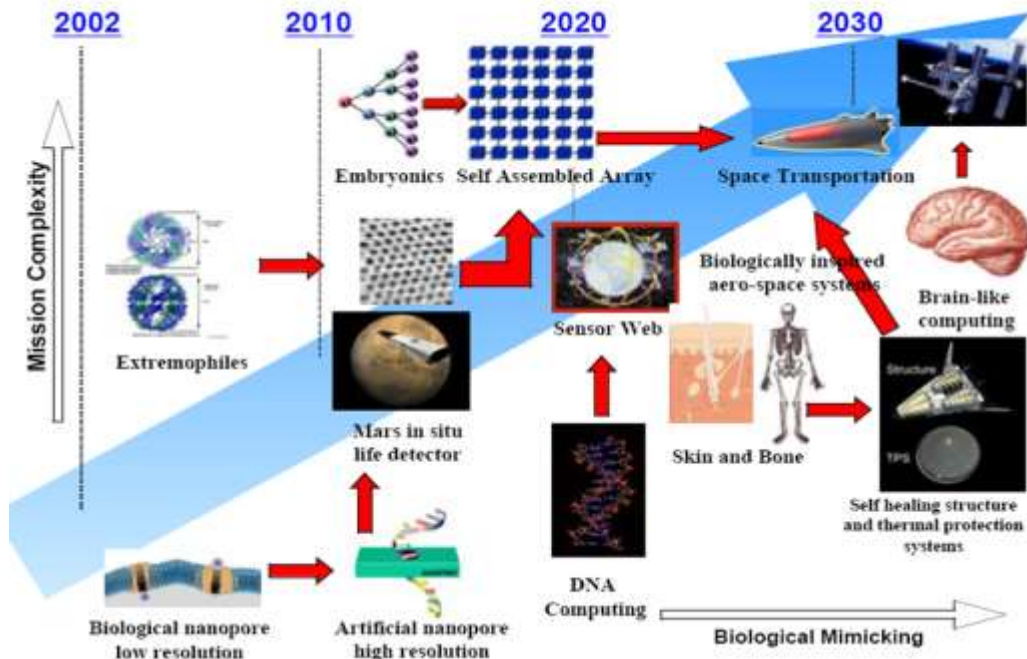


รูปที่ 4.14 การพัฒนาด้านนาโนเซนเซอร์ (Nanosensors) ที่มา Musikant S., 1985

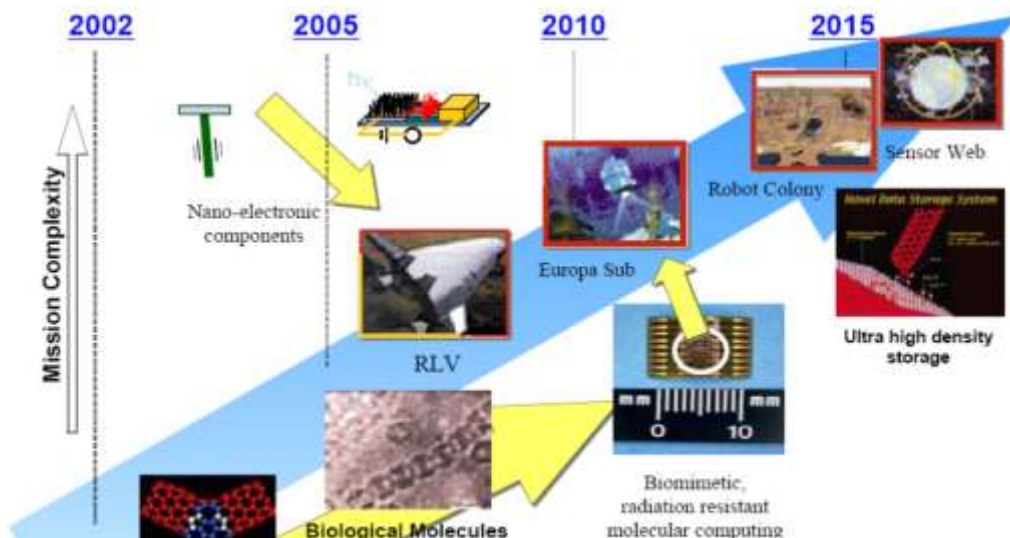




รูปที่ 4.15 การพัฒนาด้านวัสดุนาโน (Nanomaterials) ที่มา Musikant S., 1985



รูปที่ 4.16 การพัฒนาด้านวัสดุชีวภาพนาโนและการเลียนแบบธรรมชาติ (Biomimetics) ที่มา Musikant S., 1985



รูปที่ 4.17 การพัฒนาด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์ (Nanoelectronics) ที่มา Musikant S., 1985 หากพิจารณาวิวัฒนาการของวัสดุนาโนที่เกี่ยวข้องกับด้านประกอบหรือมิติของอนุภาควัสดุนาโน สามารถจัดแบ่งวิวัฒนาการวัสดุนาโนได้เป็น 1. วัสดุนาโนคือวัสดุใด ๆ ที่มีโครงสร้างด้านใดด้านหนึ่งน้อยกว่าหรือเท่ากับ 100 นาโนเมตร สำหรับวัสดุที่มีโครงสร้างด้านเดียวในระดับนาโนอาจมีลักษณะเป็นชั้นฟิล์มบาง ๆ ซึ่งชั้นเคลือบผิวดังกล่าวอาจนำมาผลิตเป็นส่วนประกอบของชิปคอมพิวเตอร์ก็ได้ 2. วัสดุนาโนที่มีโครงสร้างของด้านสองด้านอยู่ในระดับนาโน ได้แก่ เส้นลวดนาโน (Nanowires) และท่อนาโน (Nanotubes) 3. โครงสร้างของวัสดุนาโนที่มีด้านทั้งสามด้านอยู่ในระดับนาโน ตัวอย่างเช่น อนุภาคนาโน (Nanoparticles) หมุดควอนตัมหรือควอนตัมดอท (Quantum dot) และนาโนคริสตัล (Nanocrystal) องค์ประกอบด้านมิติของวัสดุนาโนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

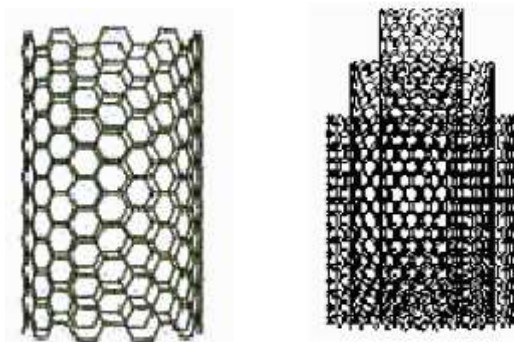
1. วัสดุนาโนที่มีด้านเพียงด้านเดียวอยู่ในระดับนาโนเมตร ตัวอย่างเช่น การผลิตแผ่นฟิล์มบาง หรือการเคลือบผิวและพื้นผิววัสดุต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ในการผลิตแผงวงจรไฟฟ้าที่ต้องการแผงวงจรบางมาก ๆ และการผลิตเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) ที่ต้องการคุณสมบัติของวัสดุนาโนที่มีความไวต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเฉพาะเจาะจง การเคลือบผิวที่บางมากในระดับนาโน สามารถพบได้ในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทไฟฟ้าและแสง (Optoelectronic) กระจกที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้เอง (Self cleaning window) ซึ่งเป็นการเคลือบพื้นผิวกระจกด้วยสารที่ไม่ชอบน้ำ (Water repellent) ตลอดจนการเคลือบผิววัสดุด้วยสารฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ รวมทั้งการพัฒนาเสื้อผ้าที่อากาศสามารถผ่านเข้าออกได้ ยกเว้นน้ำและคราบเปื้อนที่ไม่สามารถผ่านเส้นใยได้ การเคลือบผิวเพื่อเพิ่มความทนทานต่อการขีดข่วนของพื้นผิว การเคลือบผิวเพื่อเพิ่มการดูดซับ (Adhesion) และการเคลือบเพื่อลดการสูญเสียพลังงาน

2. วัสดุนาโนที่มีด้านสองด้านอยู่ในระดับนาโนเมตร ตัวอย่างวัสดุนาโนที่อยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์ชนิดท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes), ท่อนาโนอินทรีย์

(Inorganic nanotubes) เส้นลวดนาโน (Nanowires) และ วัสดุโนนเคมีหรือวัสดุโนนพอลิเมอร์ชีวภาพ (Nanochemistry or nanobiopolymers)

2.1 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes) ผู้ประดิษฐ์คิดค้นคือนักฟิสิกส์ชาวญี่ปุ่นชื่อ Sumio Iijima ในปี พ.ศ. 2534 หลังจากการค้นพบฟูลเลอร์รีน (Fullerene) นาน 6 ปี ท่อนาโนคาร์บอนประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนที่ก่อรูปขึ้นมาเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายท่อ ส่วนฟูลเลอร์รีนคือโมเลกุลที่มีโครงสร้างประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและมีโครงสร้างอยู่กึ่งกลางระหว่างโครงสร้างของเพชรและแกรไฟต์ซึ่งเป็นแอลลโทรป (Allotrope) ของคาร์บอน โครงสร้างของฟูลเลอร์รีนมีลักษณะเป็นลูกบอลเหมือนกรงปิดรูปทรงกลมประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนจำนวน 60 อะตอม จึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า C<sub>60</sub> และเมื่อดัดแปลงโมเลกุลที่ค้นพบนั้นให้ขยายยาวออกไปเป็นโครงสร้างที่เป็นท่อเรียวยาวเล็กมีเส้นผ่าศูนย์กลางเพียงไม่กี่นาโนเมตรได้สำเร็จจึงเรียกว่าท่อนาโนคาร์บอนหรือ C<sub>1,000,000</sub> ท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะเหมือนแผ่นแกรไฟต์ที่เกิดการม้วนตัวกลายเป็นท่อ ทำให้โครงสร้างเกิดแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) ที่สามารถนำอิเล็กตรอนได้ดี ปัจจุบันท่อนาโนคาร์บอนสามารถนำมาผลิตสายไฟระดับโมเลกุลได้ ท่อนาโนคาร์บอนมีความแข็งแรง น้ำหนักเบา และมีความยืดหยุ่นดีเป็นพิเศษ ท่อนาโนคาร์บอนมีความแข็งแรงสูงและเหนียวกว่าเหล็ก สามารถนำไฟฟ้าหรือเป็นฉนวนไฟฟ้าก็ได้ขึ้นอยู่กับการออกแบบทิศทางของการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอน ดังนั้นท่อนาโนคาร์บอนจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ในการผลิตสายไฟจิ๋วของเครื่องใช้ไฟฟ้า ใช้ผลิตเส้นลวดนาโน (Nanowires) และตัวนำไฟฟ้าหรือทรานซิสเตอร์ขนาดนาโน (Nanoscale transistors) ใช้ทอเป็นเส้นใยที่มีความละเอียดสูงและทนทานต่อการใช้งานเช่นการทอเป็นเส้นใยเพื่อใช้ในการผลิตแบตเตอรี่ที่มีอายุการใช้งานนานนับสิบปี ปัจจุบันท่อนาโนคาร์บอนมี 2 รูปแบบคือ ท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยว SWCNT (Single-walled Carbon Nanotubes) และท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น MNCNT (Multi-walled Carbon Nanotubes) ดังรูปที่ 3.18 แต่ละแบบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางบางเพียงไม่กี่นาโนเมตรและความยาวตั้งแต่ระดับไมโครเมตรไปจนถึงระดับเซนติเมตร ทั้งชนิด SWCNT และ MWCNT อย่างไรก็ตามการผลิตท่อนาโนคาร์บอนในทางอุตสาหกรรมที่ผลิตในแต่ครั้งทีเรียกว่า (Batch) ยังประสบความยุ่งยาก เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนที่ผลิตได้มีขนาด รูปร่าง คุณสมบัติทางไฟฟ้าและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแตกต่างกันทำให้เกิดการผสมปะปนกัน เกิดความยุ่งยากในการแยกท่อนาโนคาร์บอนแต่ละชนิดออกจากกัน อย่างไรก็ตามที่นักวิจัยจาก Northwestern University มลรัฐอิลลินอยส์ ประสบความสำเร็จในการออกแบบอุปกรณ์เพื่อจำแนกท่อนาโนคาร์บอนชนิดต่าง ๆ ออกจากกัน ทำให้ลดปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นจากการผลิตท่อนาโนคาร์บอนเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่จำเป็นต้องมีการใช้สารเติมแต่ง (Additive) ที่มีราคาแพงหรือมีข้อเสียอื่น ๆ

ที่ทำให้ศักยภาพในการใช้งานลดลง นอกจากนี้มีวิธีการใหม่ที่นักวิจัยพัฒนาคือ การผสมสารลดแรงตึงผิว (Surfactants) เข้ากับท่อนาโนคาร์บอนที่ผสมปะปนกันอยู่หลายขนาด สารลดแรงตึงผิวจะทำให้ท่อนาโนคาร์บอนสามารถละลายน้ำได้ ต่อจากนั้นนักวิจัยจะนำส่วนผสมดังกล่าวใส่ลงในหลอดทดลองที่มีสารประกอบของไอโอดีนที่เรียงตัวกันอยู่เป็นชั้น ๆ โดยความเข้มข้นของไอโอดีนและความหนาแน่นของสารละลายจะเพิ่มขึ้นตามระดับความลึกของหลอดทดลอง จากนั้นนำหลอดทดลองดังกล่าวไปปั่นเป็นเวลาหลายชั่วโมงด้วยอัตราหลายหมื่นรอบต่อนาที จากคุณสมบัติเรื่องแรงลอยตัว (Buoyancy) ที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถแยกท่อนาโนคาร์บอนขนาดต่าง ๆ ทำให้มีการจัดเรียงตัวเป็นแถบในแนวราบ (Horizontal bands) และโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนจะทำให้แต่ละแถบมีสีแตกต่างกัน วิธีใหม่นี้จะมีคุณภาพสูงสามารถแยกท่อนาโนคาร์บอนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแตกต่างกันในช่วง 200 – 300 นาโนเมตร ( $10^{-6}$  เมตร) ได้ ท่อนาโนคาร์บอนมีคุณสมบัติเป็นเซรามิก (Ceramic) และเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ที่มีแรงดึงดูดต่อโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว (Surfactants) ที่แตกต่างกันทำให้สามารถนำท่อนาโนคาร์บอนที่มีคุณสมบัติต่างกันไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในระดับอุตสาหกรรม



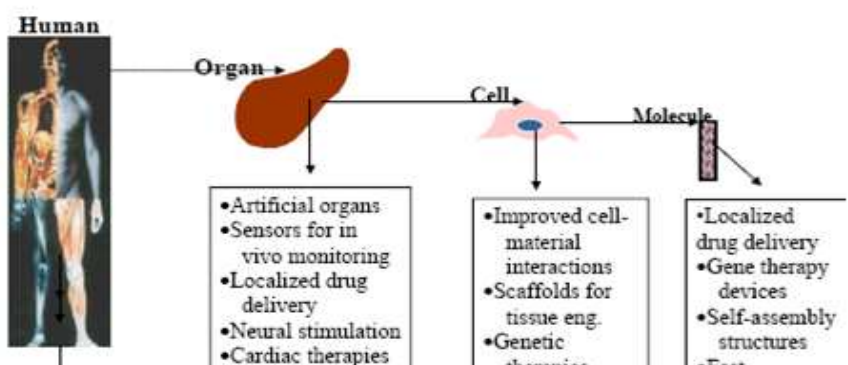
รูปที่ 4.18 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน: a) ผนังเดี่ยว (SWCNT) และ b) ผนังหลายชั้น (MWCNT)  
ที่มา Richard P. Feynman, 2003

2.2 ท่อนาโนอินทรีย์ (Inorganic nanotubes) ท่อนาโนกลุ่มนี้จะมีคุณสมบัติหลายแบบ เช่น ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Tribological or lubricating properties) สารต่อต้านการกระทบของคลื่นความถี่ ตัวเร่งปฏิกิริยาและเป็นแหล่งกักเก็บพลังงานไฮโดรเจนและลิเทียม ตัวอย่างเช่น ท่อนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ที่นำมาผลิตตัวเร่งปฏิกิริยากับแสงแดดและใช้ผลิตวัสดุสำหรับการสะสมพลังงาน

2.3 เส้นลวดนาโน (Nanowire) เป็นเส้นลวดนาโนที่ผลิตจากการรวมตัวกันของอนุภาคนาโนชนิดต่าง ๆ (Self assembly) เช่น ซิลิคอน (Silicon), แกลเลียมไนไตรด์ (Gallium nitride), อินเดียมฟอสไฟด์ (Indium phosphide) มีคุณสมบัติในการเก็บข้อมูลได้จำนวนมาก จึงนิยมนำมาประยุกต์ใช้ในระบบการจัดเก็บข้อมูล นักวิจัยสถาบัน Massachusetts Institute of Technology สามารถสร้างเส้น

ลวดนาโน (Nanowires) จากวัสดุโคบอลต์ออกไซด์และทอง ที่สามารถนำมาใช้ผลิตขั้วไฟฟ้า (Electrode) สำหรับลิเทียมไอออนแบตเตอรี่ซึ่งจะเป็นแหล่งพลังงานแบตเตอรี่ที่บางและยืดหยุ่นตัวสูง นักวิจัยได้ใช้ประโยชน์จากไวรัสที่เรียกว่า M13 ซึ่งมีขนาดความยาว 880 นาโนเมตร กว้าง 6 นาโนเมตร และหุ้มห่อตัวเองด้วยโปรตีนที่เหมือนกันสองสามพันตัว ทีมนักวิจัยสามารถนำไวรัสไปสร้างเส้นลวดนาโนจากวัสดุต่าง ๆ เพื่อใช้ในการผลิตอิเล็กทรอนิกส์ในแบตเตอรี่ นักวิจัยได้ออกแบบให้ผิวของไวรัสมีขั้วบวกแบบผสม (Hybrid anode) ทำจากโคบอลต์และทองคำที่มีประสิทธิภาพในการเก็บพลังงานมากกว่าขั้วโคบอลต์ออกไซด์เพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ กลยุทธ์ที่ใช้การออกแบบให้ไวรัสจับโลหะชนิดต่าง ๆ นั้น นับว่าเป็นงานวิจัยที่มหัศจรรย์นำไปสู่การออกแบบที่สลับซับซ้อนมากขึ้นของวัสดุคอมโพสิตหรือวัสดุประกอบ (Composite Material) และเป็นคุณสมบัติของวัสดุที่นักวิทยาศาสตร์ต้องการ

2.4 วัสดุเคมีนาโนและวัสดุพอลิเมอร์ชีวภาพนาโน (Nanochemistry or nanobiopolymers) ด้วยคุณสมบัติที่หลากหลายของวัสดุนาโนเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ชีวภาพ เช่น โมเลกุลของดีเอ็นเอ (DNA) ทำให้เกิดวิทยาการแขนงใหม่คือเทคโนโลยีชีวภาพนาโน (Nanobiotechnology) ที่อาศัยความรู้ขั้นสูงของวิทยาศาสตร์ชีวภาพ เช่น ความรู้ด้านชีวเคมีร่วมกับความรู้ด้านวิศวกรรมศาสตร์สาขาหุ่นยนต์หรือเครื่องจักรกลซึ่งทำให้ได้เซนเซอร์ที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ Biocompatible sensors การปลูกถ่ายเนื้อเยื่อเทียม (Tissue engineering or scaffold) การนำส่งยา (Drug delivery) ดังรูป 4.19 ซึ่งคาดว่าจะจะเป็นเทคโนโลยีที่มีประโยชน์ในอนาคต โดยในปัจจุบันได้มีการศึกษาทดลองอยู่ในสถาบันการแพทย์หลายแห่ง การรักษาผู้ป่วยที่เป็นไข้หวัดในอนาคตอาจทำได้ด้วยการฉีดเซลล์ประติษฐ์ขนาดเล็กมากที่เรียกว่า นาโนดีคอย (Nanodecoy) ที่มีโมเลกุลของรีเซพเตอร์นับล้านโมเลกุลเกาะอยู่บนผิวเพื่อดักจับไวรัสไข้หวัดทำให้เชื้อไวรัสมีปริมาณลดลงหรือถูกกำจัด ในที่สุดการพัฒนาแทนที่การคิดค้นยารักษาหรือยับยั้งการแพร่ระบาดของไวรัสหลังการฟักตัวซึ่งทำได้ยากกว่าและเป็นการรักษาที่ปลายเหตุ รวมทั้งยังอาจทำให้เกิดการดื้อยาและการกลายพันธุ์จนเกิดไวรัสสายพันธุ์ใหม่ การบำบัดรักษาด้านการแพทย์ยุคใหม่โดยการใช้หุ่นยนต์และกลไกการรักษาในระดับโมเลกุลส่งเข้าไปในร่างกายเพื่อตรวจอาการบาดเจ็บและอาการป่วยของระบบการทำงานต่าง ๆ ภายในร่างกาย รวมทั้งกระตุ้นให้ร่างกายสามารถดูดซึมยาได้อย่างรวดเร็วโดยทำการกระตุ้นเซลล์ในส่วนที่ตัวยายาเข้าไม่ถึง เนื่องจากสภาวะของโรค ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและการออกฤทธิ์ของยา รวมทั้งเกิดแนวโน้มการรักษาแบบใหม่ที่น่าสนใจเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.19 การพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพนาโนที่เกี่ยวข้องกับมนุษย์ ที่มา นาโนเทคโนโลยี

<http://www.biotec.or.th/?sw=knowledgeview&id=756>.

ตัวอย่างการรักษาและฟื้นฟูเซลล์ประสาทหรือเซลล์ต่าง ๆ โดยเทคนิคการสร้างใหม่ (Regenerative Medicine) ซึ่งเป็นวิธีสร้างและฟื้นฟูเซลล์ประสาทที่ได้รับความเสียหายแล้วไม่สามารถกลับมาทำงานได้ ดั้งปกติหรือดีดั่งเดิม เช่น การรักษาผู้ป่วยโรคเส้นประสาทสันหลังบาดเจ็บ (Spinal cord injuries) โรคเบาหวาน โรคหัวใจ และโรคพาร์กินสันทำได้โดยนำสารละลายนาโนที่มีคุณสมบัติทางชีวภาพของการเข้าได้กับเนื้อเยื่อมนุษย์ฉีดเข้าไปในบริเวณเซลล์ที่ได้รับความเสียหาย สารละลายนาโนดังกล่าวจะสามารถกระตุ้นการแบ่งตัวและพัฒนาของเซลล์ต่าง ๆ เช่น เซลล์ประสาท เซลล์กระดูก เซลล์รากฟัน ให้แบ่งตัวและฟื้นฟูสภาพของโรคได้อย่างรวดเร็ว การทดลองที่ผ่านมาเป็นการฉีดสารละลายนาโนกับหนูทดลองที่เป็นโรคพาร์กินสันหรือโรคอัมพาตซึ่งสามารถทำให้อาการของหนูดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จนแทบไม่เห็นอาการกระดูกของโรคพาร์กินสันและทำให้หนูทดลองที่เป็นอัมพาตสามารถขยับตัวได้โดยการใช้สารละลายนาโนที่มีส่วนประกอบทางชีวภาพเทียบเคียงกับร่างกายมนุษย์ซึ่งไม่น่าจะมีฤทธิ์ต่อต้านกับภูมิคุ้มกันของร่างกายแต่อย่างใด อีกทั้งโครงสร้างของสารละลายนาโนได้รับการออกแบบให้มีผลออกฤทธิ์เฉพาะตำแหน่งและไม่แพร่กระจายไปส่วนอื่น ๆ ของร่างกาย นอกเหนือไปจากบริเวณที่ต้องการผลรักษา อย่างไรก็ตามยังไม่มีผลการทดลองยืนยันในมนุษย์ นับว่าเป็นก้าวสำคัญของการวิจัยทางเทคโนโลยีนาโนด้านการแพทย์ โดยการออกแบบการนำส่งยาเข้าไปยังบริเวณที่ทำการรักษา (Nano-enhanced drug) เช่น ยาสำหรับการรักษาโรคมะเร็ง ตลอดจนการมุ่งเน้นพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดความผิดปกติของร่างกายมนุษย์เพื่อทำการรักษาตั้งแต่ต้นหรือเพื่อคาดเดาความน่าจะเป็นของโรคต่าง ๆ จากการตรวจวัดส่วนประกอบต่าง ๆ ในร่างกายมนุษย์ (Nano-Imaging and Diagnostics) ดังจะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีนาโนมีความซับซ้อนและสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้อย่างไม่มีที่สิ้นสุดหรือการผ่าตัดในระดับเซลล์และโมเลกุลที่ใช้เทคโนโลยีชีวภาพทำได้โดยการสร้างอุปกรณ์ขนาดนาโนแทรกตัวเข้าไปในเซลล์และ

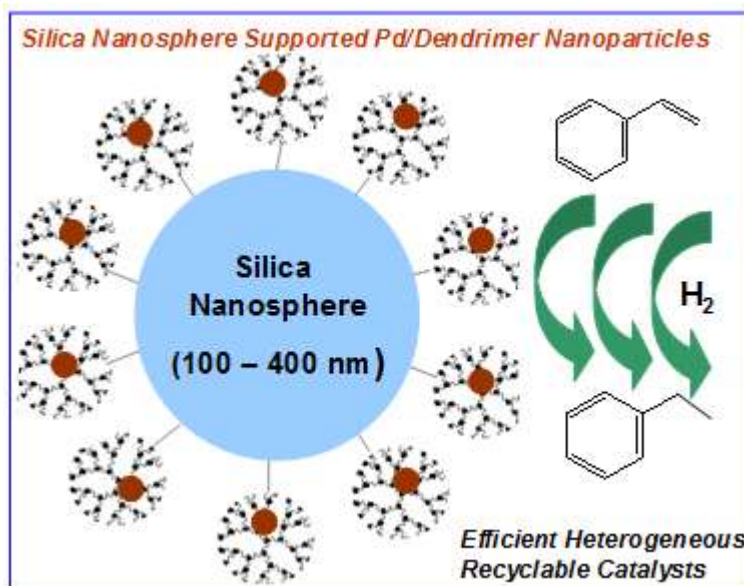
ทำการซ่อมแซมเซลล์หรือทำลายเซลล์ร้ายที่ผิดปกติ โดยอาจใช้อุปกรณ์นาโนชนิดอื่นที่ใช้เข้าไปตรวจสอบสภาพในร่างกายก่อน ตัวอย่างเช่น ยา BrachySil ที่สร้างขึ้นจากการอัดฟอสฟอรัสลงไปในรูพรุนของซิลิกอน (BioSilicon) สำหรับใช้เป็นวัสดุนาโนที่ย่อยสลายง่ายในร่างกายในรูปของกรดซิลิซิกและที่ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายแล้วกระตุ้นให้เป็นสารรังสีไอโซโทป P-32 เพื่อที่จะฆ่าเซลล์มะเร็ง มีค่าครึ่งชีวิต (half-life) 14 วัน โดยนำมาทดลองใช้ในการรักษาผู้ป่วยมะเร็งตับ ทีมนักวิจัยชาวญี่ปุ่นได้ทดลองนำกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope: AFM) มาใช้เป็นอุปกรณ์ในการผ่าตัดระดับเซลล์โดยไม่ทำลายเซลล์ขึ้นนั้น ๆ และหลังการผ่าตัดผนังเซลล์ก็จะกลับคืนสู่สภาพปกติอย่างรวดเร็ว เชื่อว่าวิธีนี้จะช่วยให้ นักวิจัยสามารถคิดโมเลกุลเช่นสายดีเอ็นเอเข้าไปแทรกตัวในนิวเคลียสเพื่อทดสอบเทคนิคใหม่ทางด้านอายุรเวชเกี่ยวกับสายพันธุกรรม (Gene therapy) ในขณะนี้มีการวิจัยและพัฒนาการรักษาด้วยสายพันธุกรรมโดยใช้ Oligodeoxynucleotide ในการรักษามะเร็งเต้านมซึ่งสนับสนุนโดยสถาบันวิจัยมะเร็งแห่งชาติของสหรัฐอเมริกา และการวิจัยอนุภาคนาโนไคโตซาน (Chitosan nanoparticles) เพื่อการนำส่งสายพันธุกรรม นอกจากนั้นการใช้เทคโนโลยีนาโนในด้านอื่น ๆ เช่น การทำวิศวกรรมเนื้อเยื่อเทียม (Tissue engineering) เพื่อสร้างอวัยวะทั้งเนื้อเยื่อและกระดูกขึ้นมาทดแทนอวัยวะที่เสื่อมสภาพไป การผลิตยาที่สามารถทำการรักษาเฉพาะจุด (Target drug) เพื่อลดปัญหาการดื้อยาและผลข้างเคียงของยา การผลิตไบโอเซนเซอร์ Biosensor ที่สามารถวัดปริมาณสารต่าง ๆ ที่มีอยู่ในเลือด บัสสวะ หรือในสภาพแวดล้อมได้อย่างจับใจหรือการผลิตดีเอ็นเอชิปซึ่งจะให้ข้อมูลด้านชีวสารสนเทศ (Bioinformatics) เพื่อตรวจหายีน (Gene) ที่ผิดปกติที่อาจเป็นสาเหตุก่อให้เกิดโรคในอนาคตตลอดจนใช้เป็นข้อมูลพันธุกรรมพื้นฐานส่วนบุคคลในการรักษา พยาบาลซึ่งแพทย์จะสามารถส่งยาที่ตอบสนองต่อร่างกายของผู้ป่วยได้อย่างถูกต้องมีประสิทธิภาพหรือการออกแบบห้องปฏิบัติการบนชิป (Lab-on-chip) หรือชิปตรวจโรคเป็นนวัตกรรมการย่อส่วนห้องแล็บตรวจโรคเอาไว้บนแผ่นชิปเป็นการผสมผสานความรู้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เคมี ชีววิทยาและกลศาสตร์เข้าด้วยกันเป็นไบโอเมมส์ (BioMEMS—Bio Micro Electro Mechanical Systems) ซึ่งเกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีชีวภาพนาโน เนื่องจากปริมาณของสิ่งที่ใช้หรือสารที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบ ใช้เพียงปริมาณที่น้อยในระดับนาโนลิตรหรือหนึ่งในพันล้านของลิตรเพื่อตรวจหาปริมาณเลือด น้ำลาย โดยอาศัยเทคโนโลยีระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคหรือเครื่องกลจิ๋วในการสร้างท่อขนส่งสารขนาดเล็กที่ประกอบด้วยตัวบ่งชี้บรรจสารและเซ็นเซอร์ทางชีวภาพที่สามารถตรวจวัดผลจากการทำปฏิกิริยาบนชิปได้ทันที จึงสามารถตรวจหาเชื้อโรคหรือตรวจสภาวะโรคที่มีอยู่ได้จับพลันทำให้สามารถใช้ผลิตเป็นชุดอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์แบบพกพาที่สามารถนำไปตรวจวิเคราะห์นอกสถานที่หรือตรวจวิเคราะห์ที่บ้านได้เอง

3. วัสดุนาโนที่มีด้านทั้งสามด้านอยู่ในระดับนาโนเมตร ตัวอย่างเช่น วัสดุนาโนภาคนาโน (Nanoparticles) เดนไดรเมอร์ (Dendrimer) ควอนตัมดอท (Quantum dot)

3.1 อนุภาคนาโน (Nanoparticles) อนุภาคนาโนของสารชนิดหนึ่งถูกออกแบบให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ส่งผลให้อนุภาคนาโนดังกล่าวมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น ตัวอย่างเช่น อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) และซิงค์ไดออกไซด์ ( $\text{ZnO}_2$ ) มีคุณสมบัติในการดูดซึมและสะท้อนแสงแดดได้ดี จึงถูกนำมาใช้ในส่วนผสมของการทำครีมกันแดด สีทาบ้านหรือสีเคลือบรถยนต์ รวมทั้งเป็นส่วนประกอบในเสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่มและสินค้าเครื่องสำอางค์ที่ประกอบด้วยอนุภาคนาโนมีความสามารถในการแทรกซึมเข้าไปในชั้นผิวหนังได้ลึกมาก จึงถูกพัฒนามาใช้ทำครีมเพื่อต่อต้านและลบริ้วรอย เช่น Plenitude Revita-lift ของ L'Oreal Paris ใช้เทคนิคการบรรจุวิตามินไว้ในแคปซูลขนาดจิ๋วทำหน้าที่เหมือนฟองน้ำที่สามารถกักเก็บครีมไว้ภายในแคปซูลแล้วจะปล่อยวิตามินดังกล่าวออกมาเมื่อชั้นแคปซูลภายนอกเกิดการละลายภายใต้ชั้นผิวหนัง นอกจากนี้ยังมีการประดิษฐ์อนุภาคนาโนจากสารเคมีเดิมที่มีอยู่แล้ว รวมทั้งยังมีการนำอนุภาคนาโนมาผสมหรือประกอบรวมเข้ากับผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ให้อยู่ในรูปคอมพอสิต เช่น การผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรม การพัฒนาฟิล์มพลาสติกนาโนคอมโพสิตที่มีความสามารถในการสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซบางชนิดและไอน้ำเพื่อใช้ทำบรรจุภัณฑ์เพื่อยืดอายุความสดของผักและผลไม้และเพิ่มมูลค่าการส่งออก การผลิตบรรจุภัณฑ์หรือเครื่องมือทางการแพทย์เพื่อใช้ฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ไวรัส หรือป้องกันความชื้นให้กับสินค้า ทำให้สินค้าอายุการใช้งานนานขึ้นหรือเก็บรักษาคุณภาพได้นานขึ้น นอกจากนี้ได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมอาหารเพื่อให้อาหารที่บรรจุในภาชนะที่จำหน่ายมีสีและรสชาติไม่เปลี่ยนแปลง สำหรับบรรจุภัณฑ์ได้มีการพัฒนาใช้วัสดุนาโนเพื่อให้บรรจุภัณฑ์มีคุณสมบัติทางกายภาพและการทนทานต่อความร้อนที่เพิ่มขึ้นเพื่อป้องกันอาหารเกิดการปนเปื้อนจากแบคทีเรียและสารเคมี รวมทั้งการออกแบบภาชนะแบบใหม่ดังกล่าวได้เริ่มมีการจำหน่ายในประเทศสหรัฐอเมริกาโดยบริษัท Sharpen Image โดยใช้วัสดุนาโนภาคนาโนเงิน (Silver Nanoparticle) วัสดุนาโนภาคนาโนเงินมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 25 นาโนเมตรหรือเล็กกว่าเส้นผมมนุษย์ 200 เท่าและเป็นสารต่อต้านการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่มีอยู่ตามธรรมชาติ (Naturally Antibacterial) ทำให้สามารถเก็บอาหารได้สดนานกว่าภาชนะปกติ 3 ถึง 4 เท่า ลดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียถึง 98 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 24 ชั่วโมง ภาชนะดังกล่าวสามารถใช้ในการเก็บผลไม้ ผัก ขนมปัง เนย ชูบเนื่อ โดยรักษาสี รส และคุณสมบัติทางโภชนาการไว้ได้นานกว่าเดิม ปริมาณการบริโภคผลิตภัณฑ์เทคโนโลยีนาโนด้านบรรจุภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มเพิ่มสูงมาก นอกจากนี้ยังมีวัสดุนาโนคอมพอสิต (Nanocomposites) เกิดจากการผสมอนุภาคนาโนกับพอลิเมอร์ (Nanofillers) เพื่อการผลิตพลาสติกชนิดใหม่ ๆ และมีคุณสมบัติดีขึ้น โดยนิยมนำอนุภาคนาโนของดิน



หรือคาร์บอน (Nanoclays หรือ nanocarbon fillers) ซึ่งเป็นแร่ตามธรรมชาติและมีขนาดอนุภาคอยู่ในระดับนาโนเมตรเข้าผสมเพื่อทำให้ได้พลาสติกชนิดใหม่ที่ทนความร้อนสูง มีความทนทาน แข็งแรง ทนไฟ และสามารถนำไฟฟ้าและหากนำวัสดุโนคอมโพสิท (Nanocomposites) มาเคลือบให้ได้ฟิล์มบางพบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้ดีขึ้น จากการศึกษาและพัฒนาของกองทัพสหรัฐอเมริกา ร่วมกับ Radiobiology Research Institute, มหาวิทยาลัยชิคาโกที่ห้องปฏิบัติการแห่งชาติอาร์กอน (Argonne National Laboratory) ในการทำความสะอาดเลือดมนุษย์ให้ปราศจากสารกัมมันตภาพรังสี สารเคมีและเชื้อโรคด้วยการใช้เทคโนโลยีนาโนแบบเดียวกับที่ใช้เป็นตัวปล่อยยารักษาไปยังเซลล์เป้าหมายและอวัยวะต่าง ๆ ภายในร่างกาย เทคโนโลยีนี้เองคือกรอาหารและยาแห่งสหรัฐฯ ได้ให้ความเห็นชอบแล้วและเป็นวิธีการรักษาแบบใหม่ของการกรองกระแสแม่เหล็ก (Magnetic filtration) ซึ่งออกแบบให้กำจัดสารพิษออกจากกระแสเลือดได้โดยตรงและสามารถนำไปขยายประยุกต์กับการแพทย์ด้านอื่น ๆ เช่น กรณีดูดเงินจากการให้ยาเกินขนาดหรือการบำบัดโรคเรื้อรังหรือโรครุนแรงชนิดต่าง ๆ รวมทั้งเทคโนโลยีนาโนสเฟียร์ (Nanosphere technology) โดยการพัฒนาใช้ในการนำส่งยาหรือเป็นตัวนำพา ยา สายพันธุกรรม และยาที่มีความเป็นพิษสูงและไม่สามารถใช้รักษาได้ เช่น โมเลกุลที่เป็นพิษขนาดเล็กของเปปไทด์ไปยังเซลล์เป้าหมายเพื่อกำจัดรักษาอวัยวะที่ต้องการโดยไม่เกิดอันตรายต่อเซลล์หรืออวัยวะที่ดี การทดลองกำลังดำเนินการอยู่ทั้งในระดับห้องทดลองและกับสัตว์ทดลอง

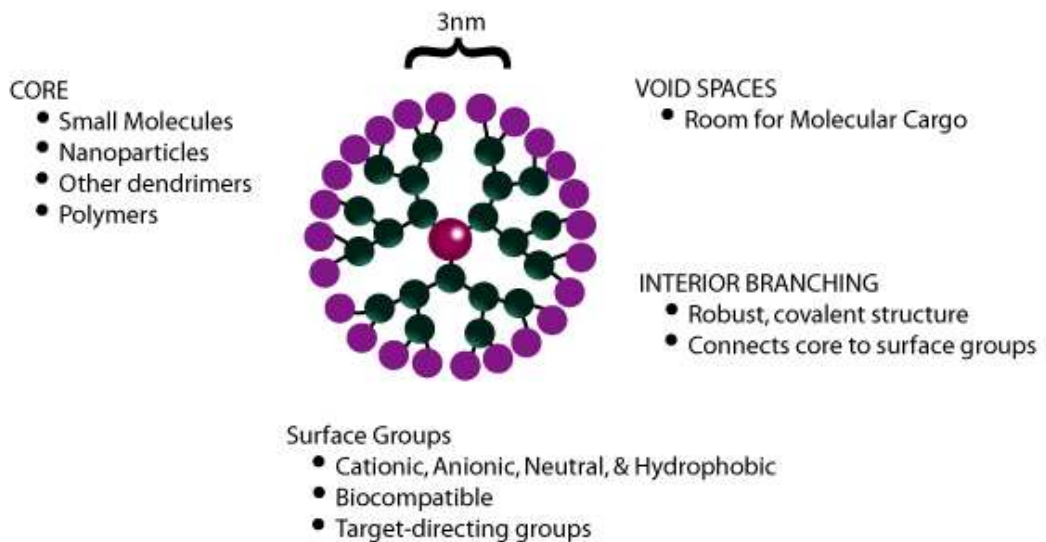


รูปที่ 4.20 อนุภาคนาโนสเฟียร์ซิลิกา (Silica nanosphere) สำหรับใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มา Fisher, J.P., 2007

3.2 เดนไดรเมอร์ (Dendrimers) คือโมเลกุลพอลิเมอร์ที่มีรูปร่างกลมเกิดจากระบวนการรวมตัวกันของอนุภาคนาโน เพื่อใช้เป็นสารเคลือบผิว และเป็นโมเลกุลที่โอบอุ้มและส่งผ่านตัวยาสู่เซลล์ต่าง ๆ ได้ทำหน้าที่คล้ายกับตัวนำส่งยา (Drug delivery) ดังรูป 4.21 รวมทั้งยังสามารถจับตัวกับไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ ได้ เพื่อใช้ในการทำหน้าที่เป็นตัวกรองสารละลายชนิดต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.22



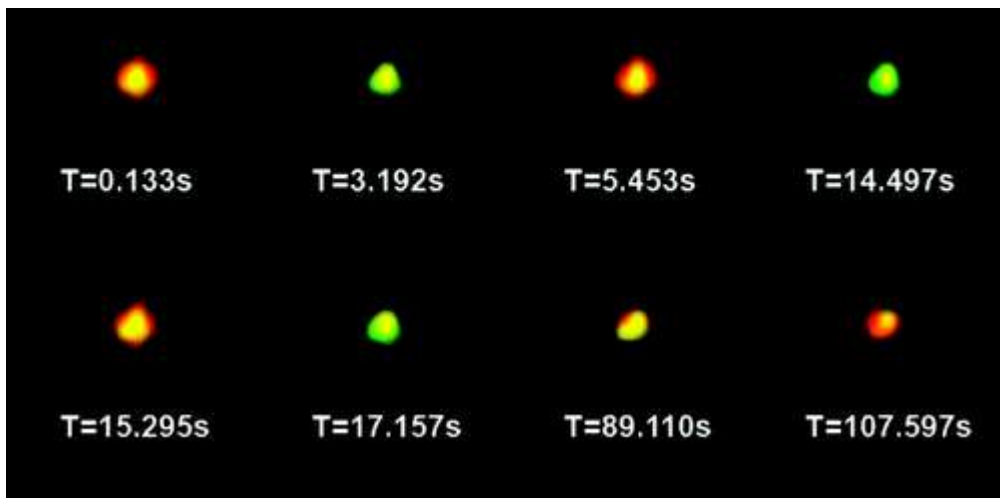
รูปที่ 4.21 ลักษณะโครงสร้างต่อเนื่องของเดนไดรเมอร์ (Dendrimer generation) ที่มา Fisher, J.P., 2007



รูปที่ 4.22 ขนาดและส่วนประกอบของเดนไดรเมอร์ ที่มา Fisher, J.P., 2007

3.3 หมู่ควอนตัมหรือควอนตัมดอท (Quantum dots) คือวัสดุนาโนที่ใช้ในอุตสาหกรรมวัสดุนาโนอิเล็กทรอนิกส์ (Nanoelectronics) และอุตสาหกรรมพลังงานเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและ

ประสิทธิภาพสูง เช่น การพัฒนาระบบไฟฟ้าเครื่องจักรกลที่มีขนาดระดับนาโน การผลิตโซลาเซลล์ (Solar cell) การพัฒนาผลิตภัณฑ์นาโนชิปให้มีขนาดเล็กลงและมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเพื่อทำให้คอมพิวเตอร์ทำงานได้อย่างรวดเร็ว มีอายุการใช้งานนาน ใช้พลังงานน้อยลง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กลงสามารถพกพาเพื่อการใช้งานสะดวกขึ้นหรืออาจฝังเข้าไปในร่างกายเพื่อรับข้อมูลและปรับเปลี่ยนโครงสร้าง ตลอดจนสำเนาตัวเองขึ้นมาใหม่ได้ เป็นต้น ตลอดจนใช้ติดตามร่องรอยของอนุภาคนาโนในสารเคมี (Fluorescent biological labels) หรือใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ เช่น Crystalline quantum dots ส่วนผลึกนาโน Nanocrystalline ก็จะถูกนำมาใช้ทำแผ่นหรือจอแสดงผลภาพ (Displays) และแบตเตอรี่ ตัวอย่างจุ่มอิเล็กทรอนิกส์ ที่ผลิตโดยบริษัท Nanosphere เพื่อตรวจหาเชื้อแอนแทรกซ์ได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว โดยใช้เทคนิคการจับคู่สายเกลียว เป็นอีกตัวอย่างหนึ่งของวัสดุนาโนอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถนำมาใช้ได้จริงในปัจจุบัน โดยใช้คุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของโมเลกุลพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้ามาเป็นกลไกในการตรวจจับที่เรียกว่า Neural net จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีนาโนสามารถนำวัสดุนาโนชนิดต่าง ๆ มาผสมผสานหรือประกอบกันเพื่อให้เกิดประโยชน์ด้านต่าง ๆ เช่น ด้านเทคโนโลยีอวกาศ เทคโนโลยีนาโนสามารถช่วยลดปัญหาด้านพลังงานเชื้อเพลิง ลดขนาดและลดน้ำหนักของยานอวกาศให้น้อยลง เนื่องจากการประยุกต์ใช้วัสดุนาโนที่มีน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงสูง ความทนทานสูงและสามารถเชื่อมโยงไปสู่การสร้างคอมพิวเตอร์นาโนที่มีประสิทธิภาพสูง ยานสำรวจอวกาศและชุดนักบินอวกาศได้ในอนาคต



รูปที่ 4.23 แสงที่ปรากฏจากหมุดควอนตัมที่อยู่ภายใน Micelle ที่มา Ruan และ Winter (2011)

กล่าวโดยสรุปแนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีวัสดุที่มีความนิยมในการพัฒนาและวิจัยในปัจจุบัน และมีความโดดเด่นมีดังต่อไปนี้

1. การพัฒนาวัสดุโนนประเภท อนุภาคนาโน เส้นลวดนาโน หมุดควอนตัม เป็นต้น เนื่องจากวัสดุโนนมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากวัสดุที่มีขนาดใหญ่ (Macro-scale) ทำให้วัสดุโนนมีบทบาทสำคัญด้านการพัฒนาเทคโนโลยีวัสดุโนนต่อไปในอนาคต เนื่องจากวัสดุโนนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ชีวการแพทย์ อุตสาหกรรมพลังงาน เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ กังหันลม อุปกรณ์ไฟฟ้าและการพัฒนาทางการแพทย์

2. การพัฒนาวัสดุชีวภาพนาโน เช่น Nanochannel Electroporation กระเจกตาเทียม และเนื้อเยื่อเทียม Tissue Scaffold เป็นต้น เพื่อสร้างวัสดุที่สามารถทดแทนส่วนต่างๆ เช่น อวัยวะ หรือเนื้อเยื่อในร่างกายที่เกิดความเสียหาย โดยไม่ก่อให้เกิดการต่อต้านและไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกาย โดยสามารถนำวัสดุชีวภาพนาโนมาใช้ประโยชน์ในการนำส่งยารักษาโรค สร้างอวัยวะเทียม เช่น กระดูก กระเจกตา เรตินา และฟัน รวมทั้งสร้างเนื้อเยื่อ

3. การพัฒนาวัสดุโนนฉลาด เช่น Shape Memory Polymers เส้นใยแก้วนำแสง และ Magnetorheological Fluids) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับรู้และตอบสนองของวัสดุโนนฉลาดต่อสิ่งเร้าหรือสิ่งแวดล้อม เช่น การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ หรือความเครียดเชิงกล โดยสามารถนำวัสดุโนนดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ เช่น อุปกรณ์ทางการแพทย์ อุตสาหกรรม อารุทธทางทหาร อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วัสดุชีวภาพนาโน และอุตสาหกรรมยานยนต์

4. การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ฟิล์มบางเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากสารอินทรีย์และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเม็ดสี เนื่องจากอุปสรรคสำคัญในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์คือ ต้นทุนการผลิต ซึ่งถ้าหากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพดีจะมีต้นทุนการผลิตสูง ดังนั้นจึงเป็นไปได้ยากในการนำเอาพลังงานดังกล่าวมาใช้ในเชิงพาณิชย์ ทั้งนี้จากข้อมูลทางสถิติที่เกี่ยวกับงานวิจัยพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จาก National Renewable Energy Laboratory ของประเทศสหรัฐฯ ในปี ค.ศ. 2011 พบว่างานวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือเซลล์แสงอาทิตย์ประเภท Multijunction Concentrators โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 43.5 โดยมีกลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์อุบัติใหม่ ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแทนเดมจากสารอินทรีย์ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเม็ดสี และเซลล์แสงอาทิตย์หมุดควอนตัมหรือควอนตัมดอท เป็นต้น

5. การพัฒนาวัสดุโนนพิเศษเช่น วัสดุล่องหน (Cloaking Material), Terahertz Metamaterial และวัสดุดูดซับชนิดอภิวัด Metamaterial Absorber ซึ่งเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่ไม่สามารถพบคุณสมบัติ เช่น การดูดซับ การสะท้อน หรือการหักเหคลื่นต่าง ๆ เช่น คลื่นแสง คลื่นเสียง และคลื่นปรุฟิโนธรรมชาติ ทั้งนี้สามารถนำวัสดุโนนชนิดพิเศษมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น การทหารทำให้

สามารถซ่อนวัตถุ เช่น เครื่องบิน เรือ เป็นต้น และหลบหลีกการตรวจจับจากเรดาร์ ดาวเทียมสื่อสาร อุปกรณ์เซ็นเซอร์ เซลล์แสงอาทิตย์ และการนำส่งยารักษาโรค

6. การพัฒนาวัสดุกราฟีน เช่น แผงวงจรไฟฟ้า ทรานซิสเตอร์ และเซ็นเซอร์ขนาดเล็ก ซึ่งเป็นวัสดุคาร์บอนที่มีความหนาเพียง 1 อะตอม และมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าเช่นเดียวกับสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน ทั้งนี้วัสดุกราฟีนเป็นวัสดุที่สามารถนำมาพัฒนาในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อที่จะนำมาใช้ทดแทนซิลิกอน เนื่องจากวัสดุกราฟีนมีประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้ามากกว่าซิลิกอน อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้พัฒนาวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ให้มีขนาดเล็กลง แต่มีประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าสูงขึ้น

รวมทั้งการพัฒนาผลิตรวัสดุนาโน (Nanomaterial), วัสดุชีวภาพ (Biomaterial), วัสดุฉลาด (Smart material), เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell), อภิวัด (Metamaterial) และวัสดุกราฟีน (Graphene Material) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

**วัสดุนาโน (Nanomaterials)** หมายถึงวัสดุในเชิงมิติที่มีด้านใดด้านหนึ่งเป็นอย่างน้อยมีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร และมีคุณสมบัติ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงไฟฟ้า หรือสมบัติทางแม่เหล็ก แตกต่างกันออกไปตามขนาด ซึ่งวัสดุนาโนจะเป็นวัสดุนาโนโลหะ วัสดุนาโนเซรามิก วัสดุนาโนพอลิเมอร์ หรือวัสดุคอมพอสิตก็ได้เพียงแต่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรเท่านั้น

**วัสดุชีวภาพ (Biomaterial)** หมายถึง วัสดุที่สามารถเป็นส่วนประกอบหรือฝังอยู่ภายในร่างกายของมนุษย์ได้ เพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับทดแทนส่วนต่าง ๆ ในร่างกายที่เสียหายจากโรค หรือจากสาเหตุอื่น ๆ โดยที่วัสดุดังกล่าวจะต้องไม่ก่อให้เกิดสารพิษ และสามารถอยู่ร่วมกับเนื้อเยื่อในร่างกายได้

**วัสดุฉลาด (Smart Material)** หมายถึง กลุ่มของวัสดุประเภทใหม่ คำว่า ฉลาด (Smart) หมายถึง วัสดุที่สามารถในการรับรู้และตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อม เช่นเดียวกันกับการตอบสนองต่อสิ่งเร้าในสิ่งมีชีวิต วัสดุฉลาดหรือระบบฉลาดประกอบด้วยวัสดุที่สำคัญ 2 ประเภท คือเซ็นเซอร์ (Sensor) บางชนิด และแอคชูเอเตอร์ (Actuator) หรืออุปกรณ์ขับเคลื่อน หมายถึงอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการตอบสนองและความสามารถในการปรับตัว (Callister, 2007)

**เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell หรือ Photovoltaic Cell หรือ Photoelectric Cell)** เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยการตกกระทบของแสงบนวัสดุที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ทั้งนี้เซลล์แสงอาทิตย์มีวัสดุกึ่งตัวนำเป็นส่วนประกอบสำคัญประเภทของสารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ได้แก่ ซิลิกอน (Silicon) คอปเปอร์ อินเดียม แกลเลียม (ได) เซเลไนด์ (Copper indium gallium (di) selenide: CIGS) แคดเมียม เทลลูไรด์ (Cadmium Telluride: CdTe) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากปัญหาเรื่องต้นทุนการผลิตที่มีราคาสูง ทำให้การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์จึงเป็นไปได้ยาก

ดังนั้นความก้าวหน้าด้านเทคโนโลยีนาโนจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตได้ เพื่อเป็นการสนับสนุนการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทน (Bertolli, 2008)

**อภิวัด (Metamaterial)** เป็นวัสดุสังเคราะห์ที่ไม่สามารถพบได้ในธรรมชาติ โครงสร้างของอภิวัดเป็นปัจจัยในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ โดยเมื่อสังเกตจากส่วนประกอบภายในจะเห็นได้ว่าไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Nonuniformity) ดังนั้นส่วนประกอบภายในจึงไม่ได้เป็นปัจจัยกำหนดคุณสมบัติของอภิวัด แต่อภิวัดมักจะใช้ลักษณะทางโครงสร้างในระดับมหภาค (Macroscopic Behavior) ในการสร้างคุณสมบัติที่แตกต่างมากกว่าการใช้ส่วนประกอบในระดับจุลภาค (Microscopic) ปัจจุบันมีการนำอภิวัดมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยด้านต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) คลื่นไหวสะเทือน (Seismic) และคลื่นเสียง (Acoustic) โดยการแบ่งตามคุณสมบัติการใช้งาน ได้แก่

1. วัสดุล่องหน (Cloaking Material) คืออภิวัดที่มีคุณสมบัติในการหักเหแสง ทำให้ไม่สามารถมองเห็นวัสดุดังกล่าวได้ด้วยตาเปล่า เนื่องจากอภิวัดสามารถเบี่ยงเบนความยาวคลื่นของแสงบางช่วงที่อยู่บริเวณรอบวัสดุหรือสิ่งของที่อยู่บริเวณใจกลางซึ่งถูกปิดทับด้วยอภิวัด เนื่องจากคลื่นแสงไม่ไปกระทบกับผิวของวัสดุ

2. สายอากาศ (Antennas) คืออุปกรณ์เครือข่ายความเร็วสูง (Broadband) ที่ใช้สำหรับการสื่อสารผ่านดาวเทียม

3. Terahertz Metamaterial แสงที่มีความยาวคลื่นยาวระดับเทราเฮิร์ตเป็นแสงที่ถูกจัดอยู่ในช่วงที่มองไม่เห็นได้ด้วยตาเปล่า เนื่องจากเป็นช่วงความยาวคลื่นที่ไกลที่สุดของแสง Far Infrared แต่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น การตรวจจับหาระเบิด หรือการคิดค้นยารักษาโรคมะเร็งผิวหนัง

4. วัสดุดูดซับชนิดอภิวัด (Metamaterial Absorber) อภิวัดที่มีคุณสมบัติในการดูดซับสูง มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น การสะท้อนหรือการนำส่งสัญญาณแตกต่างจากคุณสมบัติของวัสดุในระดับแมคโคร รวมทั้งสมบัติในการดูดซับพลังงานและเปลี่ยนพลังงาน เช่น โฟตอน (Photon) ไปอยู่ในรูปพลังงานความร้อน ตัวอย่างงานวิจัยปี ค.ศ. 2008 Landy และคณะ ได้ออกแบบเรโซเนเตอร์ (Resonator) จากอภิวัดที่มีคุณสมบัติในการดูดซับส่วนประกอบของพลังงานไฟฟ้าและพลังงานแม่เหล็กที่อยู่ในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น โฟตอนที่ตกกระทบบริเวณผิวหน้าของวัสดุ จากคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้น ทำให้นักวิจัยสามารถนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น ตัวดูดซับพลังงานในเซลล์แสงอาทิตย์

**วัสดุกราฟีน (Graphene Material)** เป็นวัสดุที่เกิดจากการเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนใน 2 มิติโดยมีโครงสร้างเป็นรูปหกเหลี่ยมต่อเรียงกันเป็นแผ่นที่มีความหนาเพียง 1 อะตอม หากนำแผ่นกราฟีนมาซ้อนทับกับทั้งหมด 1 ล้านแผ่น จะมีความหนาเพียง 1 มิลลิเมตร ในปี ค.ศ. 2004 Andre Geim และ

คณะได้ค้นพบการสร้างวัสดุกราฟีนโดยการแยกกราฟีน 1 ชั้นออกจากกราไฟต์ (Graphite) วัสดุกราฟีนมีคุณสมบัติพิเศษคือ สามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าวัสดุอื่น ๆ เช่น โลหะ และสารกึ่งตัวนำ ณ อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้วัสดุกราฟีนยังมีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กโครงสร้าง (Structural Steel) ประมาณ 200 เท่าอีกด้วย วัสดุกราฟีนสามารถใช้ทดแทนสารกึ่งตัวนำสำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ซีลิกอนสำหรับการผลิตแผงวงจร (Circuit) ทรานซิสเตอร์ (Transistor) เซ็นเซอร์ขนาดเล็ก (Sensor) และสารตัวนำยวดยิ่ง (Superconductor)

## คำถามท้ายบท

1. ผู้ค้นพบการจัดเรียงตัวของอะตอมในระดับนาโนของธาตุซีนอน (Xenon, Xe) ที่ละอะตอมอย่างแม่นยำด้วยกล้อง STM คือใคร
2. วัสดุล่องหน (Cloaking Material) คืออะไร
3. วัสดุกราฟีนผลิตจากวัสดุนาโนชนิดใด
4. จงยกตัวอย่างเทคโนโลยีนาโนกับการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติชนิดสัตว์น้ำหรือสัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำมา 1 ชนิด
5. จงยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานของวัสดุฉลาด (Smart material) มา 1 อย่าง

ส่วนที่ 2 การผลิตวัสดุนาโน

Part 2 (Nanomaterials preparation)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากระบวนการเตรียมและการผลิตวัสดุนาโน
2. เพื่อศึกษาการเคลือบผิวผลิตภัณฑ์ด้วยวัสดุนาโน
3. เพื่อศึกษาคุณภาพและการวิเคราะห์สมบัติวัสดุนาโน



## บทที่ 5

### กระบวนการผลิตวัสดุนาโน (Nanomaterials Preparation)

กระบวนการผลิตอนุภาคนาโนมีหลายวิธี ตัวอย่างเช่น การควบแน่นจากไอของเหลว (Gas condensation process) เหมาะสำหรับการผลิตวัสดุนาโนชนิดโลหะและวัสดุนาโนเซรามิกในรูปของไอ (Vapor) แล้วทำการควบแน่นให้ไอกลายเป็นของเหลวและเกิดการแข็งตัว (Solidification) กลายเป็นของแข็งในที่สุดทำให้ได้อนุภาคของแข็งที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโน อย่างไรก็ตามการผลิตวัสดุนาโนควรทำใน**สภาวะที่สะอาด (Clean condition)** เพื่อป้องกันฝุ่นละอองและไออนชนิดอื่นปนเปื้อน ตัวอย่างการระเหยและการควบแน่นโมเลกุลน้ำดังรูปที่ 5.1 สำหรับผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ผ่านกระบวนการเตรียมอนุภาคระดับนาโนมีข้อดีคือ 1. อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผนึกอนุภาค (Sintering) ต่ำกว่าวิธีอื่นที่ใช้โดยทั่วไปคืออุณหภูมิที่ต้องใช้ในการเผาอาจต้องการเพียง 600 องศาเซลเซียส 2. ลดปัญหาเรื่องการแตกร้าวของโครงสร้าง 3. ประหยัดเวลาและพลังงาน 4. ลดปัญหาเรื่องการหดตัว (Shrinkage) 5. การควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทำได้ง่ายทั้งสมบัติของวัสดุ ขนาดอนุภาค และ**ขอบเกรนหรือรอยต่อเกรน (Grain boundary)** 6. ลดปัญหาเรื่องข้อบกพร่อง (Defect) ของผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างเช่น การเตรียมผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนยานยนต์และอากาศยานจากอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ผลิตภัณฑ์มีความเหนียว (Ductility) ดี ไม่มีรอยแตกร้าว นอกจากนี้การเตรียมวัสดุนาโนยังสามารถใช้วิธีแอโรซอล Aerosolization โดยการเตรียมสารตั้งต้นในรูปของสารละลายเกลือและใช้โมเลกุลของก๊าซช่วยในการเตรียมอนุภาคนาโน นิยมใช้เตรียมวัสดุนาโนประเภทโลหะออกไซด์ เช่น วานาเดียมออกไซด์ ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ) พัลลาเดียมออกไซด์ ( $\text{PdO}$ ) ผงอนุภาคนาโนของสารตัวนำยวดยิ่งชนิดอิตเตรียม แบเรียม

คอปเปอร์ออกไซด์ ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  superconductor) รวมทั้งการเตรียมอนุภาคนาโนโดยเทคนิคโซล-เจล ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถใช้ในการเตรียมวัสดุนาโนชนิดผงอนุภาค เส้นใย หรือการเคลือบผิว ดังรูปที่ 5.2 ตัวอย่างวัสดุนาโนซิลิคอนไนไตรด์ ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) เป็นวัสดุนาโนเซรามิกที่สำคัญชนิดหนึ่ง เนื่องจากเป็นวัสดุทนอุณหภูมิสูง ความแข็งสูง รับแรงเค้น (Stress) ได้ดี สามารถใช้ในการผลิตวัสดุเครื่องมือ (Cutting tool) รวมทั้งชิ้นส่วนด้านยานยนต์ที่ต้องการให้ทนอุณหภูมิสูง (Heat engine component) และผลิตภัณฑ์แผ่นตัด (Bearing race)

กระบวนการผลิตวัสดุนาโนแบ่งตามวิธีที่ใช้ในการผลิตได้เป็น 4 ประเภทคือ

1. ไอรระเหย (Vapor)
2. ของเหลว (Liquid)
3. ของแข็ง (Solid)
4. แบบผสมกัน (Combined)

หรือแบ่งตามกระบวนการผลิตตามสถานะของอนุภาคที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิต

1. กระบวนการไอรระเหย (Vapor process) แบ่งเป็น 3 วิธี
  - 1.1 การตกสะสมของไอรระเหยทางฟิสิกส์
  - 1.2 การตกสะสมของไอรระเหยทางเคมี
  - 1.3 การฉีดพ่นละอองสาร
2. กระบวนการทางของเหลว (Liquid process) แบ่งเป็น 2 วิธี
  - 2.1 วิธีการโซล-เจล
  - 2.2 วิธีการเชิงเคมีแบบเปียก
3. กระบวนการทางของแข็ง (Solid process) แบ่งเป็น 2 วิธี
  - 3.1 การบดหรือการผสมเชิงกล
  - 3.2 วิธีการทางเคมีเชิงกล

ดังนั้นกระบวนการผลิตวัสดุนาโนมีหลายวิธีดังตัวอย่างต่อไปนี้

1. การควบแน่นจากไอของเหลว (Gas condensation process) คือการเปลี่ยนสภาพสารตั้งต้นจากของเหลวให้กลายเป็นไอแล้วทำการควบแน่นให้ไอรระเหยดังกล่าวกลายเป็นอนุภาคของแข็งนาโนซึ่งอาจใช้สารตั้งต้นมากกว่า 1 ชนิดขึ้นไปเพื่อให้ได้สารประกอบชนิดต่าง ๆ ดังตัวอย่างรูปที่ 5.1 แสดงการควบแน่นไอโมเลกุลน้ำ ได้แก่ การเคลือบหรือตกตะกอนไอรระเหยทางฟิสิกส์ (Physical vapor deposition, PVD) และการเคลือบหรือตกตะกอนไอรระเหยทางเคมี (Chemical vapor deposition, CVD)

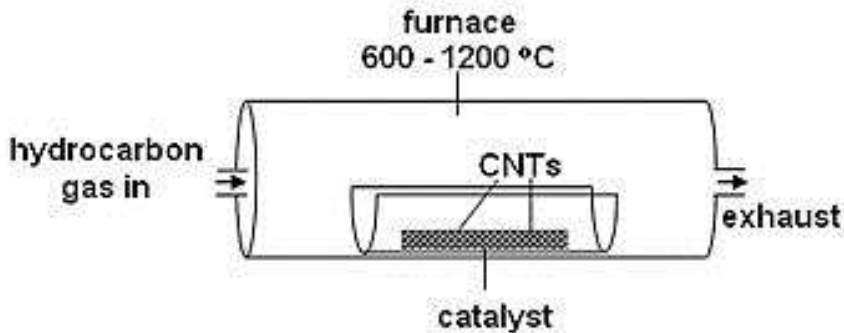


รูปที่ 5.1 การควบแน่นจากไอของเหลว (Gas condensation process) ของโมเลกุลน้ำ

1.1 การเคลือบหรือการตกตะกอนไอระเหยทางฟิสิกส์ (Physical vapor deposition, PVD) คือ การสังเคราะห์วัสดุโนนโลหะและวัสดุโนนเซรามิกเพื่อให้อนุภาคนาโนมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอโดยการสังเคราะห์ในลักษณะการก่อตัวหรือจับตัว (Condensation) ของอนุภาคในก๊าซเฉื่อย การระเหยไอของวัสดุจากพื้นผิวของแข็งให้ไปเกิดเป็นกลุ่มกระจุกของอนุภาคนาโนกระทำได้หลายวิธีการเช่น การทำให้ระเหยด้วยความร้อน (Evaporation) การสปัตเตอร์ริง (Sputtering) และการอบด้วยแสงเลเซอร์ (Laser)

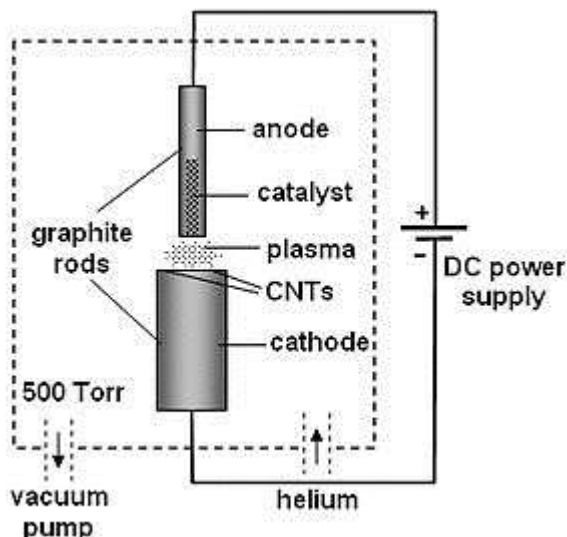
1.2 การเคลือบหรือการตกตะกอนไอระเหยทางเคมี (Chemical vapor deposition, CVD) เป็นกระบวนการที่ก๊าซซึ่งเป็นสารตั้งต้นถูกทำให้ระเหยหรือปล่อยให้ไหลผ่านเข้าไปยังฐานหรือแผ่นรองรับที่ถูกทำให้ร้อน จะเกิดการก่อตัวเป็นฟิล์มบางชนิดของแข็งของอนุภาคนาโน แท่งนาโน หรือท่อนาโนชนิดต่าง ๆ บนแผ่นรองรับ นอกจากนี้การอบด้วยความร้อน หรือแสงเลเซอร์ หรือพลาสมาไอออน ยังสามารถทำให้เกิดการแยกองค์ประกอบของก๊าซตั้งต้นได้ด้วยเช่นกัน กระบวนการเคลือบหรือตกตะกอนด้วยไอระเหยทางเคมีเป็นเทคนิคที่ใช้เคลือบหรือตกตะกอนของฟิล์มบางมาเป็นเวลานานแล้วทั้งนี้ เป็นเพราะว่าสามารถนำมาใช้กับเครื่องมือแบบง่าย ๆ ทำให้ได้ฟิล์มที่มีความสม่ำเสมอและมีความหนาแน่นสูง มีอัตราการเคลือบหรือการตกตะกอนสูง ใช้ในการผลิตระดับที่มีสเกลขนาดใหญ่ได้ ตัวอย่างเช่นใช้ในการสังเคราะห์ท่อนาโนหรืออนุภาคนาโน อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตนี้จำเป็นต้องคำนึงถึงปัญหาด้านความปลอดภัยของสุขภาพอันอาจเกิดจากควัน ก๊าซที่มีฤทธิ์กัดกร่อน หรือก๊าซพิษต่างๆ รวมทั้งกระบวนการฉีดพ่นละอองสารเป็นกระบวนการที่นำมาใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เนื่องจากเป็นกระบวนการผลิตเพียงขั้นตอนเดียว สามารถใช้งานได้หลายด้านและให้อัตราการผลิตสูง ซึ่ง

ในกระบวนการต่าง ๆ ดังกล่าวมาแล้วนั้น ของเหลวที่เป็นสารตั้งต้นจะถูกเปลี่ยนสถานะให้กลายเป็นไอระเหยแล้วถูกทำให้ควบแน่นหรือจับรวมตัวอยู่ภายในหลอดแก้วทนความร้อน



รูปที่ 5.2 การตกตะกอนไอระเหยทางเคมี (Chemical vapor deposition, CVD) ที่มา Flahaut, E., 2005

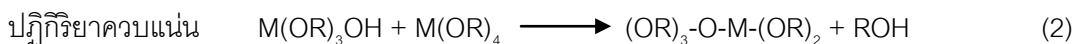
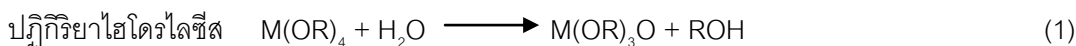
1.3 การฉีดพ่นละอองสารหรือการอาร์คดิสชาร์จ (Arc-discharge) โดยการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงตั้งแต่ 20-200 แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ประมาณ 20-40 โวลต์ ตกคร่อมแท่งแกรไฟต์สองแท่งที่วางจ่อใกล้ ๆ กัน โดยให้ระยะห่างระหว่างปลายแท่งประมาณ 1-3 มิลลิเมตร ภายใต้บรรยากาศแก๊สเฉื่อย เช่น ฮีเลียม หรือ อาร์กอนที่ความดันต่ำระหว่าง 100-500 Torr จนทำให้เกิดเป็นสถานะพลาสมา และมีอุณหภูมิสูงบริเวณระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ส่งผลให้แท่งแกรไฟต์ระเหยกลายเป็นไอแล้วมีการควบแน่นกลายเป็นท่อนาโนคาร์บอน บริเวณปลายแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วลบ (Cathode) การควบคุมขนาดหรือจำนวนชั้นของท่อนาโนคาร์บอน สามารถทำได้โดยการควบคุมความดัน อุณหภูมิ และการเติมผงโลหะเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือคะตะลิสต์ด้วยปริมาณเพียงเล็กน้อยเช่น เหล็ก นิกเกิล หรือโคบอลต์ อย่างไม่อย่างหนึ่งหรือผสมกันลงในแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วบวก (Anode)



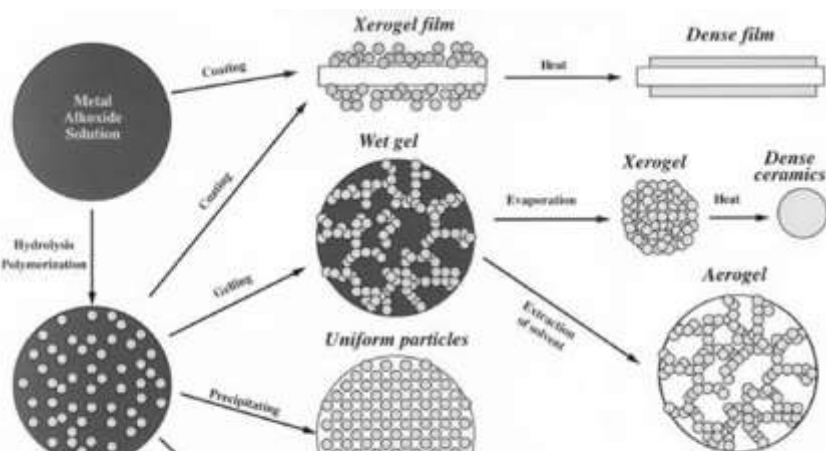
รูปที่ 5.3 วิธีอาร์คดิสชาร์จ ที่มา Robertson, J., 2004

และวิธีระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser vaporization) โดยการใช้พัลส์แสงเลเซอร์ที่มีความเข้มแสงสูงยิ่งไปยังเป้าซึ่งเป็นแกรไฟต์ผสมกับผงโลหะคะตะลิสต์ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย ที่ความดันต่ำประมาณ 500 Torr และอุณหภูมิ 1200 °C เทคนิคนี้คล้ายกับวิธีการอาร์คดิสชาร์จ ซึ่งจะได้ปริมาณและคุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนดีกว่า แต่มีข้อเสียที่จำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์กำลังสูง และมีราคาแพงมาก

2. กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel process) คือกระบวนการเตรียมวัสดุโนผ่านกระบวนการทางเคมีที่สำคัญ 2 กระบวนการคือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation) ดังสมการ 1 และ 2



โดยการเตรียมสารตั้งต้นชนิดโลหะหรือโลหะอัลคอกไซด์ (Alkoxide salts) ชนิดต่าง ๆ แขนงลอยอยู่ในสารละลายตัวกลางชนิดของเหลว เช่น น้ำ หรือแอลกอฮอล์ ด้วยสภาวะของอุณหภูมิ ความดัน เวลา ความชื้น ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เหมาะสม ที่เรียกว่า **พรีเคอร์เซอร์ (Precursor)** ทำให้สารตั้งต้นเกิดการแขวนลอยอยู่ในตัวกลางในสภาวะของเหลวที่เรียกว่าโซล (Sol) เกิดการเกาะเรียงตัวกลายเป็นโครงร่างแหอย่างไม่เป็นระเบียบที่เรียกว่าเจล (Gel) ต่อจากนั้นนำเจลที่ได้ไปผ่านการเผาผนึกอนุภาค (Sintering) ที่อุณหภูมิไม่เกิน 1000 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ ออกมา ตัวอย่างเช่น แอโรเจล (Aerogel) ซีโรเจล (Xerogel) เส้นใย (Fiber) ผงอนุภาค (Particle) ฟิล์มบาง (Film) ดังรูปที่ 5.4 เทคนิคโซล-เจล นิยมใช้ในการผลิตวัสดุโนชนิดต่าง ๆ เนื่องจากธาตุและสารประกอบที่มีอยู่ในตารางธาตุโดยส่วนใหญ่สามารถถูกเตรียมได้โดยผ่านกระบวนการโซล-เจลได้เป็นอย่างดีดังตารางที่ 5.1

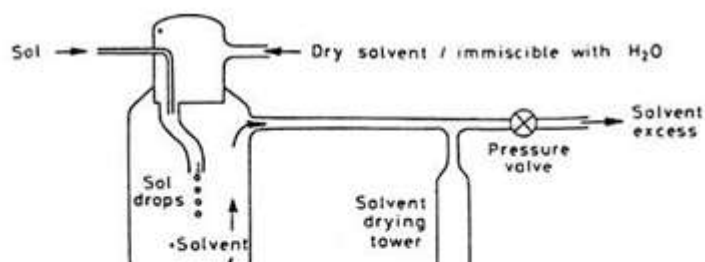


รูปที่ 5.4 กระบวนการเตรียมอนุภาคนาโนโดยเทคนิคโซล-เจล ที่มา Reed, J. S., 1989

ตารางที่ 5.1 การเตรียมอนุภาคนาโนจากธาตุโดยวิธีโซล-เจล

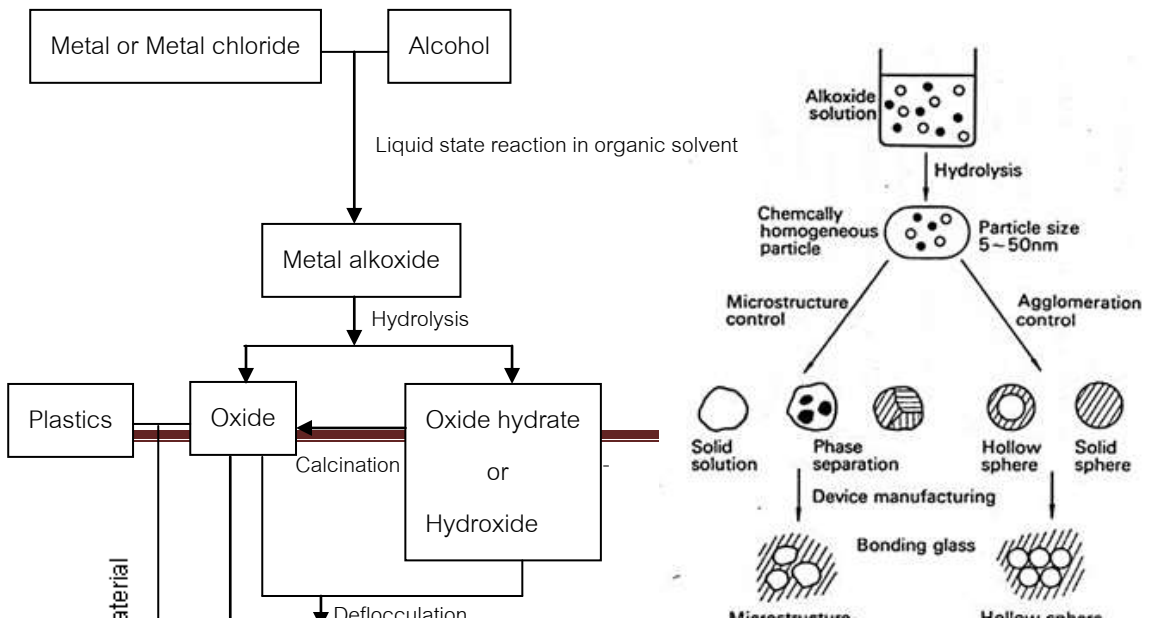
Li	Y	Cr	B	N
Na	La	Fe	Al	P
K	Nd	Co	In	As
Cs	Th	Ni	C	Sb
Mg	U	Pd	Si	O
Ca	Ti	Au	Ge	S
Sr	Zr	Zn	Sn	F
Ba	Hf	Cd	Pb	

วัสดุนาโนที่เตรียมจากธาตุโดยเทคนิคโซล-เจลมีหลายชนิดดังตัวอย่างในตาราง 5.1 โดยการเตรียมในรูปสารละลายหรือเกลือของสารละลาย โดยมีสารละลายกรดและสารละลายด่างทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเปลี่ยนสถานะจากโซลซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวหนืดข้นให้กลายเป็นเจลซึ่งเป็นของแข็งที่มีแรงยึดเหนี่ยวพันธะแข็งแรงและมีโครงสร้างผลึกแบบโครงร่างแห (Network) 3 มิติ ตัวอย่างวิธีการเตรียมอนุภาคนาโนดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 กระบวนการเตรียมอนุภาคนาโนโดยเทคนิคโซล-เจล ที่มา McCOLM, I.J., and CLARK, N.J., 1988

สำหรับอนุภาคนาโนที่เตรียมได้จากกระบวนการโซล-เจลมี 2 ลักษณะคืออนุภาคที่มีรูพรุนสูงหรือกลวง (Hollow particles) และอนุภาคตัน (Solid particles) ดังรูป 5.6 เตรียมได้จากสารประกอบเซรามิกออกไซด์หลายชนิดทั้งชนิดที่มีโครงสร้างผลึก (Crystalline) และชนิดที่ไม่มีโครงสร้างผลึกหรือโครงสร้างอะมอร์ฟัสหรืออสัณฐาน (Amorphous) รวมทั้งสารประกอบเซรามิกออกไซด์ที่มีสมบัติทางไฟฟ้าชนิดเฟอร์โรอิเล็กตริก ไดอิเล็กตริก เพียโซอิเล็กตริก และวัสดุเซนเซอร์ หรืออาจเตรียมได้จากสารประกอบเซรามิกออกไซด์ที่มีสมบัติทางแม่เหล็ก การผลิตวัสดุโนบโดยวิธีโซล-เจล ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในกระบวนการผลิตเซรามิกทั่วไปและได้ถูกพัฒนาสำหรับการเตรียมเซรามิกที่อุณหภูมิต่ำในรูปของการเคลือบผิว (Coating) ฟิล์มบาง (Thin film) และเส้นใย (Fiber) ในการนำไปใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) แบตเตอรี่ (Battery) ตัวตรวจจับ (Sensor) อุปกรณ์ไฟฟ้า (Electronics) และอุปกรณ์ทางแสง (Optic) เป็นต้น



รูปที่ 5.6 แผนภาพการเตรียมสารตั้งต้นหรือพีเคอร์เซอร์เพื่อใช้ในการผลิตวัสดุอนุภาคนาโน ที่มา Ozaki, Y., 1988.

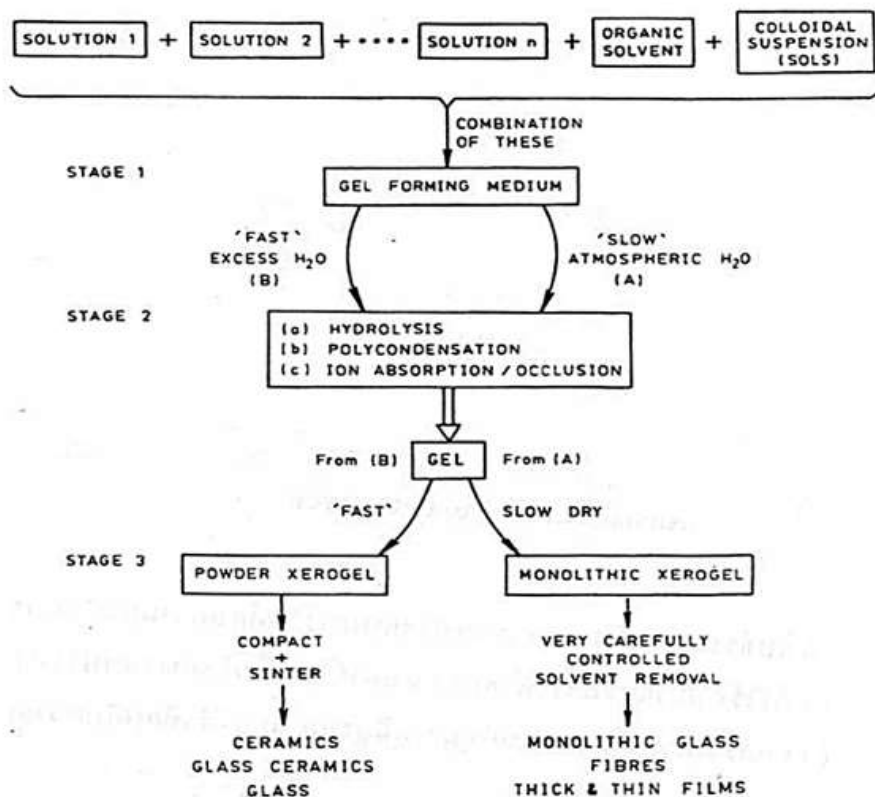
**ตารางที่ 5.2** สารประกอบเซรามิกออกไซด์ที่เตรียมจากเมททอลอัลคอกไซด์พีเคอร์เซอร์ ที่มา Shinroku Saito, Advanced Ceramics, p.167, 1988.

Crystalline	BaTiO <sub>3</sub> , SrTiO <sub>3</sub> , BaZrO <sub>3</sub> , Ba(Ti <sub>1-x</sub> Zr <sub>x</sub> )O <sub>3</sub> , Sr(Ti <sub>1-x</sub> Zr <sub>x</sub> )O <sub>3</sub> , (Ba <sub>1-x</sub> Sr <sub>x</sub> )TiO <sub>3</sub> , MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , (Mn <sub>1-x</sub> Zn <sub>x</sub> )Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , Zn <sub>2</sub> GeO <sub>4</sub> , PbWO <sub>4</sub> , SrAs <sub>2</sub> O <sub>6</sub> , CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
Hydroxide or Hydrate Oxide	BaSnO <sub>3</sub> , SrSnO <sub>3</sub> , PbSnO <sub>3</sub> , CaSnO <sub>3</sub> , MgSnO <sub>3</sub> , SrGeO <sub>3</sub> , PbGeO <sub>3</sub> , SrTeO <sub>3</sub>
Amorphous (Synthesized Without intermediate)	SrZrO <sub>3</sub> , Pb(Ti <sub>1-x</sub> Zr <sub>x</sub> )O <sub>3</sub> , Pb <sub>1-x</sub> La <sub>x</sub> (Zr <sub>y</sub> Ti <sub>1-y</sub> ) <sub>1-x/4</sub> O <sub>3</sub> , Sr(Zn <sub>1/3</sub> Nb <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub> , Sr(Zn <sub>1/3</sub> Ta <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub> , Ba(Zn <sub>1/3</sub> Ta <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub> , Sr(Fe <sub>1/2</sub> Sb <sub>1/2</sub> )O <sub>3</sub> , Ba(Fe <sub>1/2</sub> Sb <sub>1/2</sub> )O <sub>3</sub> , Sr(Co <sub>1/3</sub> Sb <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub> , Ba(Co <sub>1/3</sub> Sb <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub> , Sr(Ni <sub>1/3</sub> Sb <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub> , Ba(Zn <sub>1/3</sub> Nb <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub> , NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , CuFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , (Ni <sub>1-x</sub> Zn <sub>x</sub> )Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , (Co <sub>1-x</sub> Zn <sub>x</sub> )Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> , SrFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> , PbFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> , R <sub>3</sub> Fe <sub>5</sub> O <sub>12</sub> (R=Sm, Gd, Y, Eu, Tb), Tb <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> , R <sub>3</sub> Gd <sub>5</sub> O <sub>12</sub> (R=Sm, Gd, Y, Er), RFeO <sub>3</sub> (R=Sm, Y, La, Nd, Gd, Tb), LaAlO <sub>3</sub> , NdAlO <sub>3</sub> , R <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>9</sub> (R=Sm, Eu, Gd, Tb), Co <sub>3</sub> As <sub>2</sub> O <sub>9</sub>

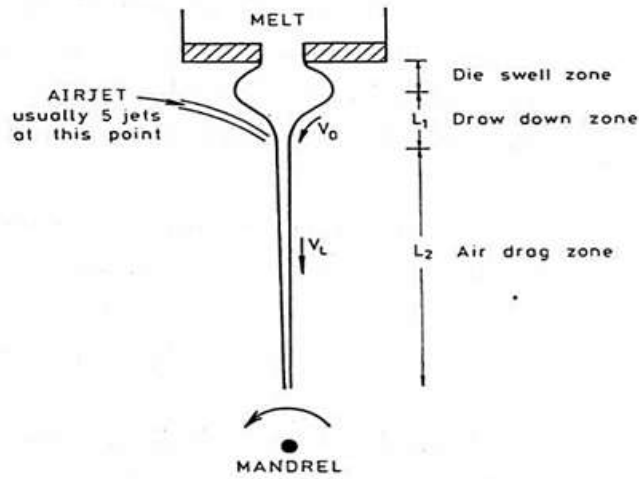
นอกจากนี้ยังสามารถสังเคราะห์สารประกอบเซรามิกได้ด้วยเทคนิคโซล-เจลโดยการใช้สารละลายหลายชนิดดังตารางที่ 5.2 ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาการควบแน่นเพื่อให้



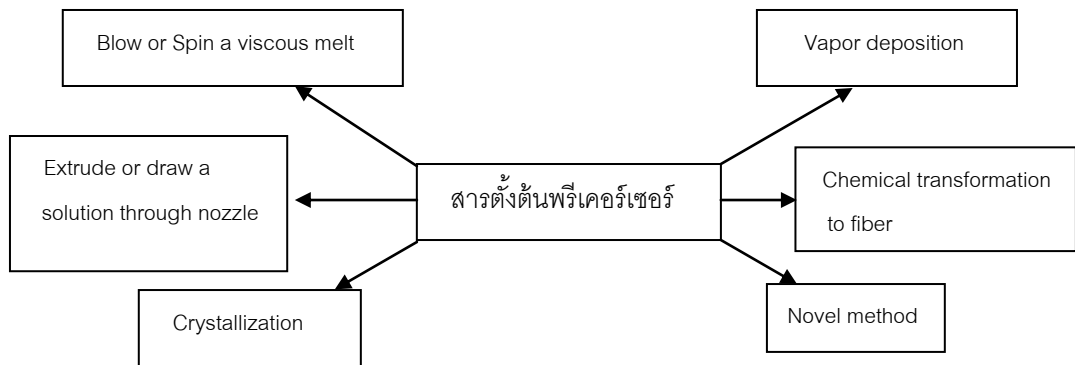
เกิดการพอร์มโครงสร้างเป็นเจลเพื่อให้ได้สารประกอบเซรามิก แก้ว หรือเพื่อใช้ในการเคลือบผิวบนวัสดุอื่นที่มีลักษณะเป็นฟิล์มบางและฟิล์มหนา การผลิตเส้นใยและสารประกอบนาโนคอมพอสิตดังรูป 5.7 และ 5.8



รูปที่ 5.7 การสังเคราะห์วัสดุนาโนคอมพอสิตโดยเทคนิคโซล-เจล McCOLM, I.J., and CLARK, N.J., 1988.



รูปที่ 5.8 การเตรียมเส้นใยนาโนโดยเทคนิคโซล-เจล McCOLM, I. J., and CLARK, N.J., 1988



รูปที่ 5.9 การใช้สารตั้งต้นพรีเคอร์เซอร์ในการผลิตวัสดุนาโนโดยเทคนิคโซล-เจล ที่มา Reed, J. S., 1989

ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่ามีหลายเทคนิคที่สามารถใช้ในการผลิตวัสดุนาโน เช่น การตกผลึก การอัดรีด การระเหยกลายเป็นไอ วิธีทางเคมีหรือเทคนิคโซล-เจลและวิธีอื่น ๆ ดังรูป 5.9 อย่างไรก็ตามเทคนิคโซล-เจลคือเทคนิคที่สามารถใช้ในการผลิตเซรามิกที่ง่ายและสะดวก สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้หลายอย่าง การเลือกใช้เทคนิคโซล-เจลมีทั้งข้อดีและข้อเสียดังต่อไปนี้

**ข้อดีของเทคนิคโซล-เจล**

1. โครงสร้างมีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียว (Homogeneity)
2. ผลิตภัณฑ์มีความบริสุทธิ์สูง

3. คุณหมุ่มีในการเผาผนึกอนุภาคต่ำ ประหยัดพลังงาน และลดระยะเวลาการเผาผนึกอนุภาค
4. สามารถควบคุมคุณภาพและทำนายโครงสร้างผลึกของผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ต้องการได้

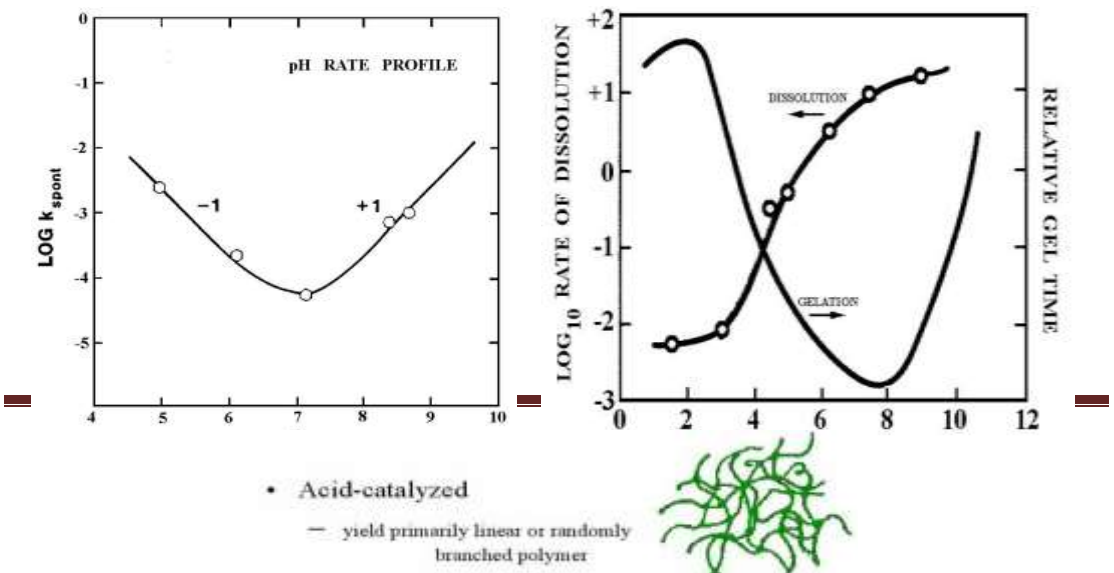
**ข้อเสียของเทคนิคโซล-เจล**

1. ผลิตภัณฑ์อาจมีการหดตัวสูงเนื่องจากมีน้ำเป็นองค์ประกอบในกระบวนการผลิต
2. มีรูพรุนขนาดเล็กในโครงสร้างผลิตภัณฑ์ เนื่องจากกระเหยของของเหลว
3. มีไฮดรอกซิลกรุป (Hydroxyl group) และสารประกอบอินทรีย์ตกค้างในผลิตภัณฑ์ที่ต้องกำจัดออก
4. สารตั้งต้นพีเรโอร์เซอร์สังเคราะห์บางชนิดอาจมีราคาแพง
5. บางผลิตภัณฑ์เซรามิกอาจใช้เวลานานในการเปลี่ยนโครงสร้างจากโซลเป็นเจล

**ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโซล-เจล**

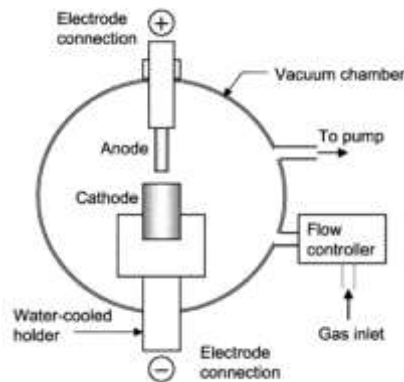
1. คุณหมุ่มี
2. ความชื้น
3. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดและด่าง
4. ขนาดอนุภาค รูปร่างและการกระจายตัวของอนุภาค รวมทั้งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค
5. ความบริสุทธิ์ขององค์ประกอบ
6. ความสมบูรณ์ของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาการควบแน่น

สารละลายกรดและด่างคือตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเตรียมสารประกอบเซรามิกโดยเทคนิคโซล-เจล เนื่องจากสารละลายกรดและด่างมีผลต่อการกระจายตัวและการรวมตัวของอนุภาคส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากสารผสมในรูปของโซลเมื่อเติมสารละลายกรดและอนุภาคเกิดการรวมตัวกันมีโครงสร้างแบบโครงร่างแหที่เรียกว่าเจลเมื่อเติมสารละลายด่าง ดังนั้นค่าความเป็นกรด-ด่างหรือพีเอช (pH) ในสภาวะกรดหรือค่าพีเอชน้อยกว่า 7 ทำให้ขั้วประจุของอนุภาคผลักกันได้โครงสร้างมีลักษณะเป็นโซล (Sol) และสภาวะด่างมีค่าพีเอชมากกว่า 7 ขั้วประจุของอนุภาคจะเกิดการดูดกันหรือเกาะตัวกันทำให้โครงสร้างมีลักษณะเป็นเจล (Gel) ดังรูป 5.10



รูปที่ 5.10 สภาพความเป็นกรด-ด่างต่อการเกิดโซลและเจล ที่มา Schwartz, M., 2006

3. กระบวนการป้อนกระแสไฟฟ้า (Electric arc discharge process) คือกระบวนการผลิตวัสดุนาโนโดยการป้อนกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ให้กับระบบที่มีสารตั้งต้นบรรจุอยู่ ทำให้อุณหภูมิของสารตั้งต้นเกิดการแตกตัวกลายเป็นพลาสมาร้อน ต่อจากนั้นทำการควบแน่นพลาสมาร้อนดังกล่าวให้กลายเป็นอนุภาคนาโนจับตัวกันอยู่ที่ขั้วแคโทด กระบวนการป้อนกระแสไฟฟ้านี้ทำให้ได้อนุภาคนาโนที่มีขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอและอาจมีการปนเปื้อนของสารชนิดอื่นที่อยู่ภายในระบบ อย่างไรก็ตามวิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถเตรียมวัสดุนาโนที่ง่ายและราคาไม่แพง ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 กระบวนการป้อนกระแสไฟฟ้า (Electric arc discharge process) สำหรับการผลิตวัสดุนาโน ที่มา Robertson, J., 2004

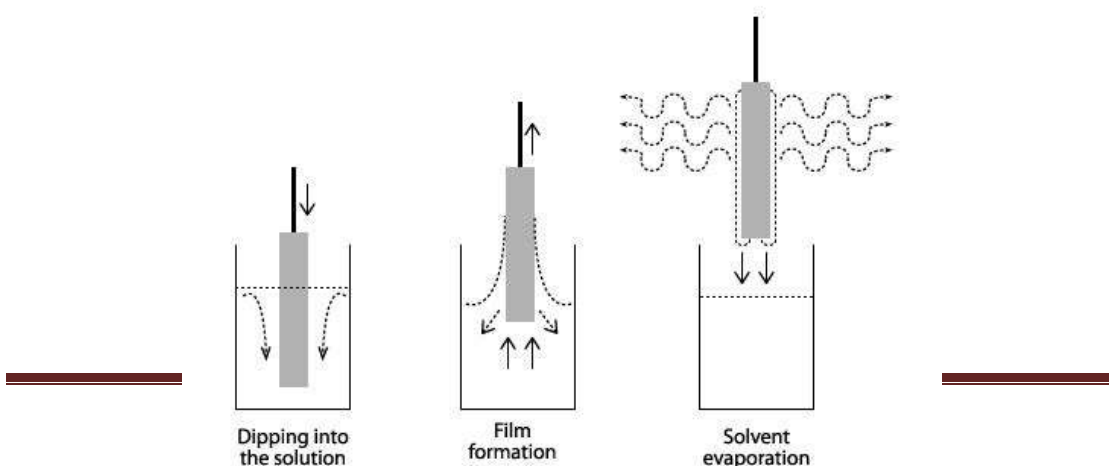
ตัวอย่างการผลิตท่อนาโนคาร์บอนโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงตั้งแต่ 20-200 แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ประมาณ 20-40 โวลต์ ตกคร่อมแท่งแกรไฟต์สองแท่งที่วางจ่อใกล้ ๆ กัน โดยให้ระยะห่างระหว่างปลายแท่งประมาณ 1-3 มิลลิเมตร ภายใต้บรรยากาศแก๊สเฉื่อย เช่น ฮีเลียมหรืออาร์กอนที่ความ

ดันต่ำระหว่าง 100-500 Torr จนทำให้เกิดเป็นสถานะพลาสมาและมีอุณหภูมิสูงบริเวณระหว่างขั้วอิเล็กโทรดส่งผลให้แท่งแกรไฟต์ระเหยกลายเป็นไอแล้วมีการควบแน่นกลายเป็นท่อนาโนคาร์บอน บริเวณปลายแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วลบ (Cathode) การควบคุมขนาดหรือจำนวนชั้นของท่อนาโนคาร์บอน สามารถทำได้โดยการควบคุมความดัน อุณหภูมิและการเติมผงโลหะเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือคะตะลิสต์ด้วยปริมาณเพียงเล็กน้อยเช่น เหล็ก นิกเกิล หรือโคบอลต์อย่างใดอย่างหนึ่งหรือผสมกันลงในแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วบวก (Anode) ดังรูปที่ 5.12

รูปที่ 5.12 การผลิตท่อนาโนคาร์บอน ที่มา Robertson, J., 2004

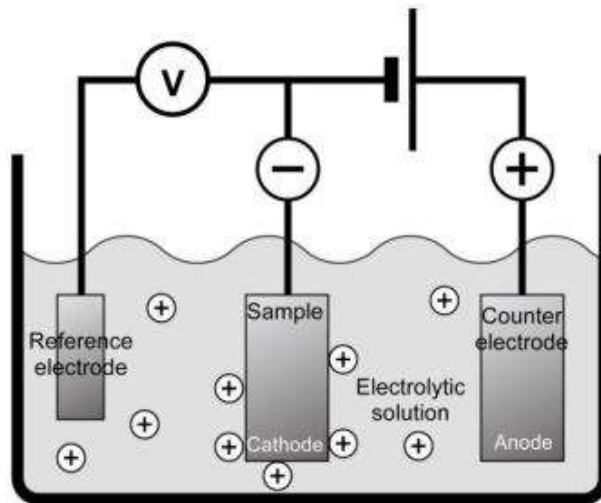
4. **การถ่ายเทประจุไฟฟ้า (Electric sparking process)** เป็นการเตรียมวัสดุโดยอาศัยการถ่ายเทประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยการทำให้เกิดประกายไฟและไอออนของอนุภาค ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระและไอออนในอากาศจำนวนมาก ต่อจากนั้นอนุภาคที่เกิดการแตกตัว จะเกิดการควบแน่นและก่อตัวขึ้นใหม่ วิธีนี้นิยมใช้กับการเตรียมวัสดุนาโนชนิดโลหะออกไซด์หุ้มควอนตัมหรือควอนตัมดอทและฟิล์มบางสำหรับใช้ในการผลิตอุปกรณ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์

5. **การเคลือบผิว (Coating process)** ทั้งชนิดทาเคลือบ (Paint coating) จุ่มเคลือบ (Dip coating) และพ่นเคลือบ (Spray coating) โดยการเตรียมสารที่ต้องการเคลือบซึ่งเตรียมได้จากกระบวนการอื่นมาทำการเคลือบผิวผลิตภัณฑ์ เพื่อให้เกิดฟิล์มบางที่ยึดติดอยู่บนผิวผลิตภัณฑ์แผ่นรองรับได้เป็นอย่างดี ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 การจุ่มเคลือบ (Dip coating) ที่มา Tjong, S.C., 2004

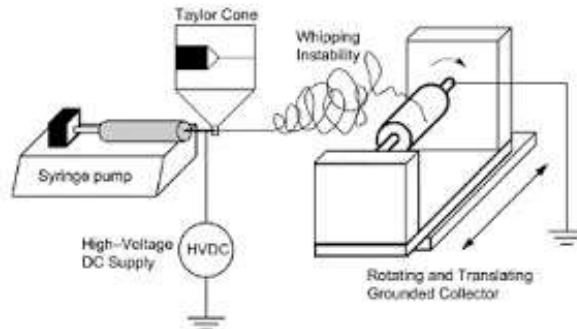
6. การเคลือบผิวด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrodeposition process) เป็นการเตรียมวัสดุนาโน โดยการทำให้อนุภาคโลหะตกลงบนผิวผลิตภัณฑ์เพื่อการเคลือบผิวโดยการให้กระแสไฟฟ้าหรือความต่างศักย์กับระบบแล้วทำให้ไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายในรูปของสารประกอบเกิดการแตกตัวผ่านปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ไอออนของโลหะที่แตกตัวจะสามารถเคลื่อนที่ไปจับกับอิเล็กตรอนที่ขั้วลบของอิเล็กโทรด เปลี่ยนสภาพกลายเป็นอนุภาคของแข็งเกาะอยู่ที่ขั้วอิเล็กโทรด วิธีนี้นิยมใช้ในการเตรียมท่อนาโนหรือฟิล์มบางนาโน ดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 การเคลือบผิวด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrodeposition process) ที่มา Tjong, S.C., 2004

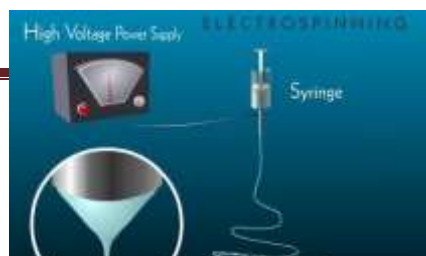
7. การผลิตเส้นใยนาโน (Nanofiber) นาโนไฟเบอร์ที่เตรียมได้จะเป็นเส้นใยที่ไม่ผ่านการทอ (Non-woven nanofiber) แต่ยังมีเส้นใยนาโนที่เตรียมได้ในลักษณะที่มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบของเส้นใย (Aligned nanofiber) หรืออยู่ในลักษณะของเส้นด้าย (Yarn nanofiber) ลักษณะของเส้นใยดังกล่าวขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมและกระบวนการผลิต ดังต่อไปนี้

7.1 อิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning process) คือการเตรียมวัสดุนาโนประกอบด้วย ส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ 1. แหล่งกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (High voltage power) 2. หลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะ (Syringe with needle) ทำให้สารละลายเกิดการเคลื่อนที่ตามทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fiber) ขนาดนาโน 3. วัสดุรองรับที่เป็นโลหะ (Metal collector) หรือวัสดุที่นำไฟฟ้าสำหรับรองรับเส้นใย ดังรูปที่ 5.15 เป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน ต้นทุนการผลิตต่ำ สามารถควบคุมขนาดและปริมาณการเกิดเส้นใยแบบต่อเนื่องได้จำนวนมาก



รูปที่ 5.15 อิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning) ที่มา Rutledge, G.-C, 2007

เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงเกิดขึ้นเมื่อ 70 ปีมาแล้ว โดยใช้ในการเตรียมเส้นใยพอลิเมอร์ ซึ่งเส้นใยที่ได้ถูกนำไปใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิต ตัวตรวจจับ วัสดุกรอง ตัวเร่งปฏิกิริยา ชุดป้องกันสารเคมี วัสดุอุปกรณ์ทางการแพทย์ ในปัจจุบันได้มีการนำมาเตรียมเส้นใยเซรามิกและท่อระดับนาโน เช่น การสังเคราะห์วานาเดียมเพนทอกไซด์ (Vanadium pentoxide;  $V_2O_5$ ) ไททานี (Titania;  $TiO_2$ ) เลดเซอร์โคเนตไททานี (PZT) เนื่องจากวิธีอิเล็กโตรสปินนิงเป็นวิธีที่ง่าย และสังเคราะห์เส้นใยได้หลากหลายชนิด อิเล็กโตรสปินนิงเป็นเทคนิคที่ใช้หลักการพื้นฐานทางไฟฟ้าสถิตย โดยการให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงแก่ระบบจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นที่ปลายเข็มและเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าจนถึงค่าหนึ่ง แรงไฟฟ้าสถิตยจะมีค่ามากกว่าแรงตึงผิวและเกิดแรงขับลำของสารละลายออกจากปลายเข็ม โดยลำของสารละลายจะพุ่งและเกิดการบิดโค้งอย่างรวดเร็วออกมาเป็นเส้นใยที่บางและยาวอย่างต่อเนื่อง มีความสม่ำเสมอ สารละลายเกิดการระเหยอย่างรวดเร็วขณะที่เกิดกระบวนการฉีด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางจะมีขนาดลดลงทำให้เกิดเส้นใยที่มีขนาดเล็กเกาะอยู่บนวัสดุรองรับซึ่งเป็นผลเนื่องจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตยโดยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยสามารถเปลี่ยนแปลงได้ในช่วงของนาโนเมตรจนถึงไมโครเมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติของสารละลายและปัจจัยในการฉีดอื่น ๆ โดยการฉีดเส้นใยสามารถทำได้ทั้งแนวราบและแนวตั้ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนืดของสารตัวอย่างที่ใช้



รูปที่ 5.16 การสังเคราะห์เส้นใยนาโนด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง ที่มา Huang, Z.-M, 2003

### ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง

เส้นใยที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงมีหลายรูปแบบและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ตลอดจนความต่อเนื่องของเส้นใยแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ และในปี ค.ศ. 2005 Ramakrishna และ Fujihara กำหนดตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อลักษณะเส้นใยเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

#### 1. สมบัติของสารละลาย

1.1 มวลโมเลกุลและความหนืดของสารละลาย (Molecular weight and solution viscosity) พอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีมวลโมเลกุลสูงพอและสารละลายต้องมีความหนืดมากพอด้วย มวลโมเลกุลที่สูงจะทำให้เกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่มากขึ้นทำให้เกิดเป็นเส้นใยที่มีความต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามสารละลายที่มีความหนืดมากเกินไปจะควบคุมการไหลได้ยากและอาจเกิดปัญหาการแห้งของตัวอย่างที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ปลายเข็มโลหะ

1.2 แรงตึงผิว (Surface tension) ในขณะที่สารละลายยืดออกเป็นเส้นใยอาจพบปมเกิดขึ้นเนื่องจากผลของแรงตึงผิวได้ ในกรณีที่สารละลายมีความหนืดน้อยโมเลกุลของตัวทำละลายที่ไม่ได้จับกับโมเลกุลของพอลิเมอร์จะมีความหนาแน่นมากส่งผลให้จับตัวกันเป็นก้อนทรงกลมเนื่องจากแรงตึงผิว

1.3 สภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity) ถ้าสารละลายมีสภาพนำไฟฟ้าที่ดีจะส่งผลให้มีประจุเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มสภาพนำไฟฟ้าอาจทำได้โดยการเติมไอออน (Ion) ดังนั้นหากเติมเกลืออิเล็กโตรไลต์ลงในสารละลายจะทำให้สารละลายยืดออกได้ดีขึ้น ซึ่งสามารถลดการเกิดปมในเส้นใยลงได้อีก ทั้งยังทำให้ขนาดของเส้นใยลดลงได้อีกด้วย



1.4 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ถ้าสารละลายมีสมบัติไดอิเล็กทริกสูงจะช่วยลดการเกิดปมและขนาดของเส้นใยลงได้ ดังนั้นอาจเติมตัวทำละลายที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงลงในสารละลาย แต่อย่างไรก็ตามการเติมตัวทำละลายที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงในสารละลายต้องพิจารณาถึงความเข้ากันได้หรือสมบัติการละลายด้วย

## 2. ตัวแปรในระบบ

2.1 ศักย์ไฟฟ้า (Voltage) หากศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่ามากจะส่งผลให้ขนาดของเส้นใยเล็กลง อีกทั้งยังทำให้สารละลายระเหยได้เร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะมีผลต่อการเกิดปม โดยปมจะเปลี่ยนรูปร่างจากรูปทรงคล้ายลูกวักบี้ (Spindle-like) เป็นรูปทรงกลมและมีจำนวนมากขึ้น

2.2 อัตราการไหลของสารละลาย (Flow rate) ถ้าอัตราการไหลมีค่ามากจะทำให้เส้นใยและปมมีขนาดใหญ่มากขึ้น อีกทั้งการเพิ่มอัตราการไหลที่มากเกินไปปริมาณสารละลายจะออกมาสูงส่งผลให้ตัวทำละลายระเหยออกไม่ทัน ทำให้เส้นใยหลอมรวมกันเป็นแผ่น

2.3 อุณหภูมิของสารละลาย ถ้าอุณหภูมิของสารละลายสูงจะเพิ่มอัตราการระเหยให้สูงขึ้น ทำให้ความหนืดลดลง เมื่อสารละลายมีความหนืดน้อย ส่งผลให้แรงคูลอมบ์มากขึ้น ทำให้ขนาดของเส้นใยเล็กลง

2.4 วัสดุรองรับ (Collector) วัสดุรองรับควรมีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminum foil) หากวัสดุรองรับเป็นฉนวนไฟฟ้า ประจุบนลำของสารละลายจะสะสมบนวัสดุรองรับทำให้เกิดเส้นใยบนวัสดุรองรับน้อยลง นอกจากนี้หากวัสดุรองรับถูกทำให้เคลื่อนที่ได้จะทำให้เส้นใยมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และยังช่วยให้ตัวทำละลายระเหยได้ดียิ่งขึ้น

2.5 ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ (Distance between tip and collector) ในกรณีที่ระยะห่างมีค่าน้อย เส้นใยจะเชื่อมต่อกันเนื่องจากตัวทำละลายระเหยออกไม่ทัน และยังพบปมเกิดขึ้นซึ่งอาจเกิดจากผลของสนามไฟฟ้าที่มีค่ามากขึ้นเนื่องจากวัสดุรองรับอยู่ใกล้ปลายเข็มและในกรณีที่ระยะห่างมีค่ามากขึ้นเส้นใยจะมีขนาดเล็กเนื่องจากลำของสารละลายมีเวลาในการยืดออกนานขึ้น

2.6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มโลหะ (Diameter of needle) เข็มที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูภายในเล็กจะช่วยลดการอุดตันที่ปลายเข็ม เนื่องจากสารละลายสัมผัสกับอากาศน้อยกว่าเข็มที่มีรูขนาดใหญ่ อีกทั้งยังช่วยให้ปริมาณปมลดลงด้วย แต่อย่างไรก็ตามเข็มที่มีขนาดเล็กเกินไปอาจไม่สามารถทำให้สารละลายไหลออกมาได้

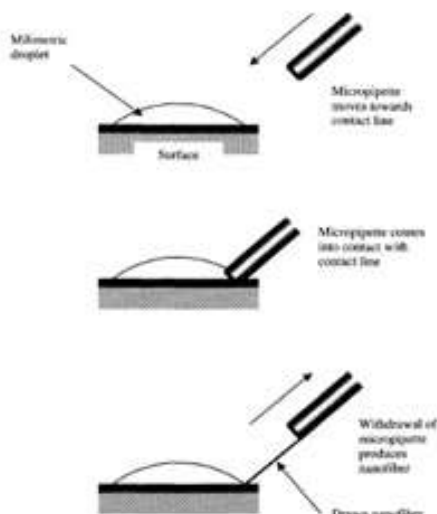
## 3. สภาพแวดล้อม

3.1 ความชื้น (Humidity) ปริมาณความชื้นในอากาศอาจส่งผลต่อเส้นใยได้ ในกรณีที่มีความชื้นสูงจะเกิดปรากฏการณ์คล้ายกับมีการควบแน่นเป็นหยดน้ำบนผิวของเส้นใย ทำให้ลักษณะของเส้นใยเกิดการเปลี่ยนแปลงและเกิดรูพรุนบนเส้นใยในปริมาณมากขึ้น ในทางตรงข้ามหากระบบมีความชื้นต่ำจะส่งผลให้ตัวทำละลายระเหยเร็วขึ้น ในบางครั้งสารละลายอาจแข็งตัวอย่างรวดเร็วและอุดตันอยู่ภายในเข็มโลหะ

3.2 ชนิดของบรรยากาศ (Type of atmosphere) ส่วนประกอบของอากาศภายในระบบส่งผลต่อกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โดยแก๊สต่างชนิดกันจะมีพฤติกรรมต่างกันออกไป ภายใต้สภาวะที่มีสนามไฟฟ้าสูง ตัวอย่างเช่น แก๊สฮีเลียมจะแตกตัวภายใต้สภาวะสนามไฟฟ้าสูงส่งผลให้กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ไม่เกิดขึ้น แต่ถ้าใช้แก๊สที่แตกตัวได้ยากขึ้น เช่น ฟรีออน 12 (freon®-12) พบว่ากระบวนการอิเล็กทรอนิกส์สามารถเกิดขึ้นได้ โดยเส้นใยจะมีขนาดใหญ่ขึ้น 2 เท่า เมื่อเทียบกับการสังเคราะห์ในสภาวะอากาศปกติ

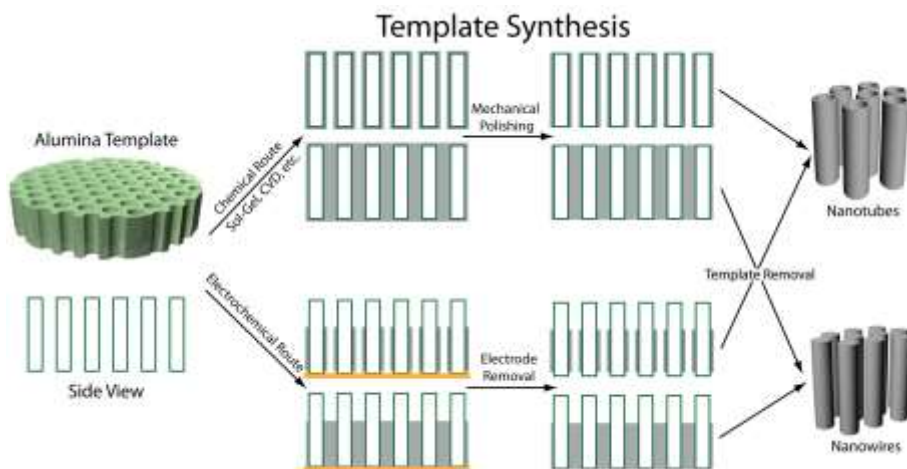
3.3 ความดัน (Pressure) การสังเคราะห์เส้นใยที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศจะส่งผลให้สารละลายไหลออกจากหลอดบรรจุสารมากขึ้น ทำให้ลำของสารละลายที่พุ่งออกมาไม่เสถียร และหากความดันในระบบต่ำมาก ๆ จะไม่เกิดกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ขึ้น เนื่องจากประจุไฟฟ้ามีการคายประจุโดยตรงภายในระบบ

7.2 การดึง (Drawing) เป็นกระบวนการผลิตนาโนไฟเบอร์ที่ค้นพบโดย Ondarcuhu and Joachim ในปี 1998 วิธีการคือ หยดสารละลายของ Sodium citrate ใน Chloroauric acid ในระดับไมโครเมตรโดยการใช้ไมโครปิเปต จุ่มลงในหยดของสารใกล้กับ Contact line จากนั้นดึงไมโครปิเปตออกอย่างรวดเร็วโดยใช้ความเร็วประมาณ  $1 \times 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$  นาโนไฟเบอร์จะถูกดึงออกมา พร้อม ๆ กับการระเหยไปของตัวทำละลาย เทคนิคนี้จะต้องมีการทำซ้ำหลายครั้งจึงจะได้นาโนไฟเบอร์ในปริมาณที่มากพอต่อการนำไปใช้ ระบบจึงไม่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ในกระบวนการ drawing จะต้องใช้วัสดุที่มี Viscoelastic เพียงพอต่อการเปลี่ยนรูปร่างในระหว่างการดึง โดยเทคนิคนี้มักจะเรียกได้อีกชื่อว่า dry spinning at a molecular level ดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 การดึง (Drawing) ที่มา Yuh, J., 2007

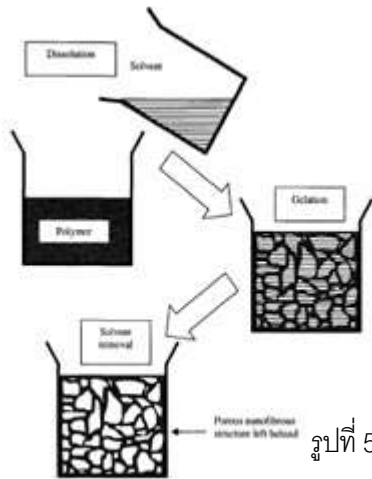
7.3 **การสังเคราะห์แบบเทมเพลต (Template synthesis)** โดยการนำสารตั้งต้นมาละลายด้วย Dimethylformamide แล้วปล่อยให้ไหลผ่านพิมพ์ที่มีรูหรือช่องขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระดับนาโนเมตร ภายใต้แรงดันน้ำ สารละลายจะถูกดันให้เคลื่อนที่ผ่านออกมาแล้วเกิดการเปลี่ยนสภาพกลายเป็นของแข็ง (Solidification) วิธีนี้ทำให้ได้เส้นใยมีลักษณะเป็นท่อหรือหลอดที่ไม่ต่อเนื่องและเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการผลิตเส้นลวดนาโน (Nanowire) หรือวัสดุเส้นลวดนาโนคอมพอสิต (Composite nanowire) หรือเส้นลวดไฮบริด (Hybrid nanowire) ดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 การสังเคราะห์แบบเทมเพลต (Template synthesis) ที่มา Yuh, J., 2007

7.4 **การแยกเฟส (Phase separation)** อาศัยความสามารถการละลายได้ในตัวทำละลายที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งสามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายชนิดหนึ่งแล้วจึงนำตัวทำละลายอีกชนิดหนึ่งที่พอลิเมอร์ดังกล่าวไม่สามารถละลายได้มาเติมลงในส่วนผสมเพื่อผลิตเส้น

โยนาโนต่อจากนั้นทำการขับเส้นโยนาโนที่เตรียมได้ให้แห้งแล้วนำไปอบโดยเทคนิค Freeze drying ในสภาวะสุญญากาศ (Vacuum) ดังรูป 5.19



รูปที่ 5.19 การผลิตเส้นโยนาโนโดยเทคนิคการแยกเฟส ที่มา Yuh, J., 2007

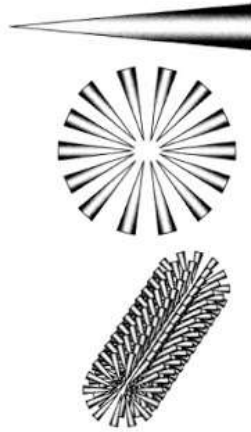
โดยมีหลักการคือพอลิเมอร์จะละลายในตัวทำละลายที่ละลายพอลิเมอร์ได้ก่อนแล้วจึงเปลี่ยนตัวทำละลายที่พอลิเมอร์นั้นละลายได้ไม่ติดไป ทำให้เกิดเป็นนาโนไฟเบอร์ขึ้น ตัวอย่างเช่น

1. เตรียมสารละลายพอลิเมอร์ (Polymer dissolution) ละลาย Poly (L-lactic) acid PLLA ใน THF (tetrahydrofuran) กวนให้เข้ากันที่ 60 °C นาน 2 ชั่วโมง
2. การเตรียมเจล (Gelation) เเท 2 ml ของสารละลาย 50°C ใน Teflon vial ย้ายไปเก็บที่อุณหภูมิประมาณ -18°C to 45°C ทำให้เกิดการพอร์มโครงสร้างเป็นเจล
3. การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) นำ vial ที่มีเจล จุ่มลงในน้ำกลั่นจะทำให้เกิดการแยกวัฏภาคหรือเฟส เป็นเวลา 2 วัน
4. การทำให้แห้ง (Freezing) นำเจลออกจากน้ำ กดลงบนกระดาษกรองให้แห้ง นำไปไว้ที่อุณหภูมิ -18°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
5. การทำให้แห้ง (Freezing dry) นำเจลไป Freeze-dried ที่ -55°C ในสุญญากาศ Vacuum

### 7.5 กระบวนการที่เกิดขึ้นได้เองตามสภาวะที่เหมาะสม (Self assembly) คือกระบวนการ

การผลิตเส้นโยนาโนโดยการใช้โมเลกุลขนาดเล็กและเมื่อมีโมเลกุลขนาดเล็กจำนวนมากจะส่งผลให้เกิดแรงกระทำระหว่างกันแล้วเกิดการจัดเรียงตัวดังรูปที่ 5.20 เป็นตัวอย่างของสายเปปไทด์ (Peptide self assembly) ที่อยู่ในสารละลายน้ำเกลือจะเกิดการจับตัวกันเป็นโครงร่างด้วยอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อเปปไทด์ คือ 99 ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยที่สายเปปไทด์ประกอบด้วยกรดอะมิโน 3 ชนิด คือ อาร์จินิน (Arginen)

อะลานีน (Alanine) และกรดกลูตามิก (Glutamic acid) จำนวน 16 โมเลกุลเรียงเข้าไปเข้ามาและมีโครงร่างแบบแผ่น (Sheet)



รูปที่ 5.20 โครงสร้างที่ได้จากกระบวนการผลิตเส้นใยนาโนโดยวิธีที่เกิดขึ้นได้เองตามสภาวะที่เหมาะสม (Self assembly) ที่มา Yuh, J., 2007

## คำถามท้ายบท

1. จงอธิบายหลักการทำงานและผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง
2. ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการโซล-เจลมีกี่ชนิด อะไรบ้าง
3. ปัจจัยอะไรบ้างที่มีผลต่อกระบวนการผลิตวัสดุนาโนเซรามิกโดยเทคนิคโซล-เจล
4. จงอธิบายขั้นตอนการผลิตวัสดุนาโนพอลิเมอร์โดยเทคนิคการแยกเฟส
5. จงอธิบายหลักการทำงานของเครื่องเคลือบหรือตกตะกอนไอระเหยทางฟิสิกส์ (Physical vapor deposition, PVD)

## บทที่ 6

### การเคลือบผิวผลิตภัณฑ์ด้วยวัสดุนาโน (Coating Products with Nanomaterials)



รูปที่ 6.1 การไม่เกาะติดของน้ำที่ผิวของใบบัวและเกิดการกลิ้งบนใบบัว ที่มา Blossey, R. 2003



รูปที่ 6.2 a) ลักษณะใบบัว b) การไม่เกาะติดของของเหลว c) พื้นผิวของใบบัว d) หยดของเหลวบนใบบัว ที่มา หน่วยสร้างเสริมศักยภาพทางนาโนศาสตร์, 2547

**ปรากฏการณ์ของน้ำที่กลิ้งอยู่บนใบบัว (Lotus effect)**

เกิดขึ้นเมื่อมีหยดน้ำหยดลงบนใบบัวและกลิ้งไปมารวมตัวกันอยู่ที่บริเวณที่ต่ำที่สุดบนใบบัว ทำให้สิ่งสกปรกเช่น ฝุ่นละออง เชื้อแบคทีเรีย เชื้อรา รวมไปถึงของเหลวที่มีความหนืดข้น ไม่สามารถเกาะติดแน่นอยู่กับใบบัว เช่น กาวน้ำหรือน้ำผึ้งก็ไม่สามารถเกาะติดอยู่บนใบบัวได้ดังรูปที่ 6.1 และ 6.2 แสดงบริเวณพื้นผิวของใบบัวที่มีลักษณะคล้ายกับหนามขนาดเล็ก ๆ จำนวนมากที่มีการเรียงตัวกระจายกันอยู่อย่างเป็นระเบียบที่มีขนาดนาโนเมตรดังรูปที่ 6.3 และมีสารที่มีสมบัติคล้ายขี้ผึ้ง (Water-repellent waxy crystals) เคลือบอยู่ที่ภายนอก ทำให้น้ำที่ตกลงบนใบบัวมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากและไม่สามารถซึมผ่านหรือกระจายตัวแผ่ขยายออกในแนวกว้างบนใบบัวได้ น้ำจึงม้วนตัวเป็นหยดน้ำดังแสดงในรูปที่ 6.4 บริเวณปลายยอดหนามขนาดนาโนเมตรเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า น้ำกลิ้งบนใบบัว (Lotus effect) อาจพบบนใบพืชอื่น ๆ เช่น กะหล่ำปลี หนุ่ยที่ขึ้นในน้ำ ทิวลิป ความขรุขระของหนามขนาดระดับนาโนเมตรบนพื้นที่ผิวของใบบัวทำให้ลดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับใบบัว ทำให้น้ำหรือของเหลวกลิ้งไปมาได้โดยไม่มีแรงเสียดทาน ปรากฏการณ์นี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสังเคราะห์วัสดุชนิดใหม่ ๆ ที่เลียนแบบคุณลักษณะของใบบัว หรือการนำไปประยุกต์ใช้เป็นสีทาอาคาร

ทั้งนี้เนื่องมาจากสมบัติแรงตึงผิว (Surface tension) คือคุณสมบัติพื้นผิวของของเหลวเป็นสิ่งที่ทำให้บางส่วนของพื้นผิวของเหลวถูกดึงดูดหรือยึดเข้าไว้ด้วยกันสู่พื้นผิวอื่น เช่น พื้นผิวของของเหลวทำให้เกิดการรวมตัวของหยดน้ำหรือหยดปรอทที่เกาะกันเป็นทรงกลม

แรงตึงผิวเกิดขึ้นด้วยการดึงดูดเนื่องจากการดึงดูดของโมเลกุลกับโมเลกุลที่เหมือนกัน เมื่อโมเลกุล

บนพื้นผิวของของเหลวไม่ได้ล้อมรอบไปด้วยโมเลกุลที่เหมือนกันในทุกๆ ด้านแล้ว โมเลกุลจะมีแรงดึงดูดกับโมเลกุลใกล้เคียงบนพื้นผิวมากขึ้น แรงดึงดูดนี้มีมิติของแรงต่อความยาวหนึ่งหน่วยหรือของพลังงานต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยซึ่งทั้งสองมีค่าเท่ากันที่เรียกว่าความเค้นพื้นผิว (Surface stress) หรือ พลังงานอิสระพื้นผิว (Surface free energy)

**ความตึงผิว**คือแรงต่อความยาวของผิวสัมผัสเป็นความพยายามในการยึดผิวของของเหลว

**แรงตึงผิวของของเหลว**คือแรงที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของเหลวสัมผัสกับของเหลวอื่นหรือกับผิว

ของแข็งโดยมีพลังงานเพียงพอต่อการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลซึ่งมีขนาดสัมพันธ์กับแรงยึดติดและแรงเชื่อมแน่นทำให้เกิดเป็นลักษณะคล้ายกับแผ่นบาง ๆ ที่สามารถต้านแรงดึงได้เล็กน้อยและมีทิศทางกับผิวของเหลวและตั้งฉากกับเส้นขอบที่ของเหลวสัมผัส เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแรงตึงผิวของของเหลวจะมีค่าลดลง

**แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของของไหลทุกชนิดมี 2 ประเภท คือ**

1. **แรงยึดเกาะ (Cohesive Forces)** คือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของของเหลวชนิดเดียวกัน แรงนี้สามารถรับความเค้นดึง (Tensile stress) ได้เล็กน้อย
2. **แรงเชื่อมติด (Adhesive force)** คือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของของเหลวกับสารชนิดอื่น เช่น น้ำกับแก้ว ปรอทกับแก้ว เป็นต้น

### ปรากฏการณ์ของความตึงผิว

1. การเกิดหยดของเหลว (Droplet) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับของเหลวที่มีขนาดเล็กและอยู่อย่างอิสระ เช่น เม็ดของของเหลวในบรรยากาศหรือเม็ดของเหลวที่เกิดจากหัวฉีดที่ฉีดของเหลวออกมาเป็นฝอยหรือละอองเล็กๆ หรือเม็ดของของเหลวที่เกาะตามใบไม้ซึ่งอิทธิพลของแรงตึงผิวจะพยายามปรับรูปร่างให้เม็ดของของเหลวมีลักษณะเป็นรูปทรงกลม ทำให้แรงดันในหยดของเหลวมากขึ้นเพื่อให้เกิดแรงต้านแรงตึงผิวเป็นผลให้หยดของเหลวคงสภาพอยู่ได้อย่างสมดุล

2. **แคปิลาริตี (Capillarity)** คือปรากฏการณ์ที่ของไหลสัมผัสกับวัตถุแล้วมีลักษณะสูงขึ้นหรือต่ำลง เนื่องจากอิทธิพลของแรงยึดติดและแรงเชื่อมแน่น เช่น บริเวณที่น้ำสัมผัสกับผิวแก้วจะมีระดับน้ำสูงขึ้นเล็กน้อยเพราะแรงยึดติดระหว่างโมเลกุลของน้ำกับโมเลกุลของแก้วมีมากกว่าแรงเชื่อมแน่นระหว่างโมเลกุลของน้ำแต่ถ้าเป็นบริเวณที่ปรอทสัมผัสกับผิวแก้วระดับปรอทจะต่ำลงเล็กน้อย เนื่องจากเชื่อมแน่นระหว่างโมเลกุลของปรอทมีมากกว่าแรงยึดติดระหว่างโมเลกุลของปรอทกับโมเลกุลของแก้ว

จากปรากฏการณ์ของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล 2 ชนิดนี้ จึงเกิดการพัฒนานำไปประยุกต์ใช้ทางด้านการเคลือบผิววัสดุใน 2 ลักษณะที่เรียกว่าการเคลือบผิวแบบฟิล์มบางและฟิล์มหนา



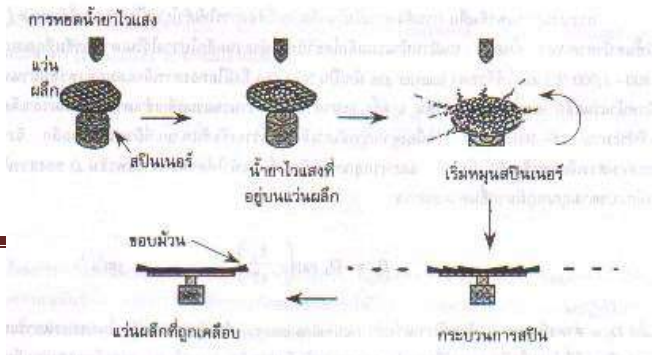
**การเคลือบผิวแบบฟิล์มบางและฟิล์มหนา**

โครงสร้างของวัสดุนาโนที่มีอนุภาคขนาดเล็กกว่า 300 นาโนเมตรและขอบเกรน (Grain boundary) ประมาณ 1-5 ไมครอน มีกระบวนการผลิตได้หลายวิธี เช่น การเคลือบผิวแบบฟิล์มบางและฟิล์มหนา ด้วยเทคนิคการตกตะกอนของไอสารเคมี (Chemical vapor deposition, CVD) เทคนิคนี้สามารถใช้ได้กับอนุภาคที่มีโครงสร้างผลึก (Crystalline) และโครงสร้างที่ไม่มีรูปผลึกที่เรียกว่าโครงสร้างอะมอร์ฟัสหรืออสัณฐาน (Amorphous) เช่นการเคลือบผิววัสดุนาโนชนิด  $Al_2O_3/SiC$ ,  $Al_2O_3/Si_3N_4$ ,  $Al_2O_3/TiC$ , mullite/SiC,  $MgO/SiC$ ,  $i_3N_4/TiN$  และ  $Si_3N_4/SiC$  เป็นต้น ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าฟิล์มบาง (Thin film) หมายถึงชั้นวัสดุบาง ๆ ที่มีความหนาอยู่ในระดับนาโนเมตรถึงไมโครเมตร ( $nm:10^{-9}m - \mu m:10^{-6}m$ ) สามารถผลิตได้ความบริสุทธิ์สูงถึง 99.99% ซึ่งถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมหลาย ๆ ด้าน เช่น

1. ด้านอุปกรณ์นำแสง (Opticals) สำหรับใช้ในการผลิตสารเคลือบสะท้อนแสง สารไม่สะท้อนแสง ตัวกรองสัญญาณรบกวนและแผ่นความจำ (CDs)
2. ด้านชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โดยการผลิตขบวนการไฟฟ้า ตัวนำไฟฟ้า อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ และอุปกรณ์ไฟฟ้าแม่เหล็ก
3. ด้านเคมีภัณฑ์ เพื่อป้องกันการแพร่ของโลหะ ป้องกันการกัดกร่อนและการเกิดออกซิเดชัน อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซและของเหลว เครื่องจักรกลและระบบเครื่องกลจุลภาค
4. ด้านอุณหภูมิ โดยการผลิตเป็นฉนวนความร้อน และตัวระบายความร้อน

**เทคนิคที่ใช้ในการผลิตฟิล์มบางหรือปลูกฟิล์มบางมีหลายวิธีต่อไปนี้**

1. กระบวนการเทแบบ (Tape Casting) คือ กระบวนการหล่อหรือเทแบบที่ใช้ในการผลิตเซรามิกเทปจากของเหลวเซรามิก กระบวนการนี้มีข้อดีคือให้อัตราการผลิตสูง ค่าใช้จ่ายต่ำ สามารถควบคุมขนาดของฟิล์มได้ด้วย โดยการใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าดอกเตอร์เบลด Doctor blade
2. กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel Process) เป็นกระบวนการที่ผสมอนุภาคเข้าด้วยกันโดยการเติมน้ำหรือสารละลายต่าง ๆ เช่น เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol), กรดอะซิติก เป็นต้น จนเกิดเป็นสารละลาย จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปปลูกฟิล์มบางโดยวิธีการต่าง ๆ เช่น การหมุนเคลือบ (Spin-Coating) หรือ การจุ่มเคลือบ (Dip-Coating)

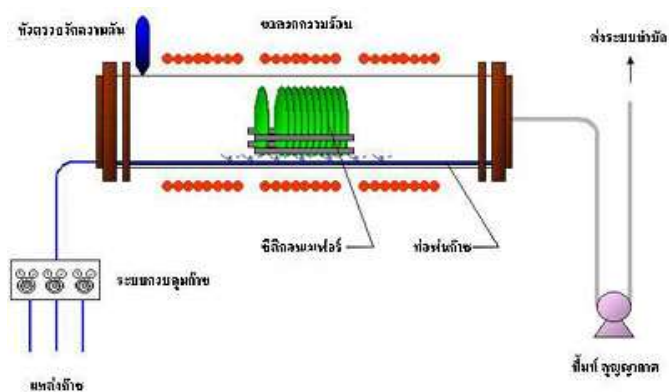


รูปที่ 6.3 กระบวนการหมุนเคลือบ (Spin coating) ผิวหน้าของแว่นตาด้วยน้ำยาไวแสง ที่มา Yuh, J., 2007

3. กระบวนการตกสะสมของไอสารเคมี (Chemical Vapor Deposition) คือ กระบวนการพ่นไอเคมี โดยการให้พลังงานจนสารตั้งต้นระเหยกลายเป็นไอ ถูกพ่นไปตกลงบนวัสดุ เนื้อพื้นจนเกิดชั้นของฟิล์มบาง

4. กระบวนการตกสะสมของไอระเหยทางฟิสิกส์ (Physical Vapor Deposition) คือ การตกตะกอนของไอสารซึ่งได้จากวิธีทางฟิสิกส์เป็นเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมวัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบางโดยการปลูกฟิล์มในระบบสุญญากาศ โดยมีขั้นตอนคือการทำให้สารตั้งต้นกลายเป็นไอ ด้วยวิธีการต่าง ๆ จากนั้นไอของสารซึ่งอาจอยู่ในรูปของอะตอมหรือไอออนจะตกตะกอนลงบนวัสดุ เนื้อพื้น การตกตะกอนของไอสารจะมีความแตกต่างกันตามวิธีที่ทำให้เกิดไอของสารเช่น Magnetron การสปัตเตอร์ริง (Sputtering), Electron Beam, Cathodic Arc Plasma

5. Low Pressure Chemical Vapor Deposition (LPCVD) เป็นการปลูกฟิล์มบางด้วยไอสารเคมีในสภาวะความดันต่ำ ตัวอย่างเช่นการปลูกฟิล์มบางพอลิคริสตัลซิลิคอนเพื่อทำหน้าที่เป็นเกต (Gate) ในทรานซิสเตอร์แบบมอส (MOS) หรือเป็นตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ ในขณะที่ฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) ทำหน้าที่เป็นฉนวนหรือวัสดุไดอิเล็กตริก ส่วนฟิล์มบางซิลิคอนไนไตรด์ (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) ทำหน้าที่เป็นชั้นของฉนวนเพื่อป้องกันความเสียหายให้กับอุปกรณ์ (Passivation Layer) ดังรูป 6.3



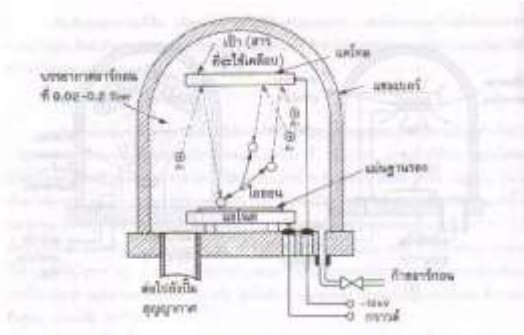
รูปที่ 6.3 การเคลือบผิวด้วยเทคนิคฟิล์มบางและฟิล์มหนาของวัสดุโนโเบียงโดยเทคนิค LPCVD ที่มา Yuh, J., 2007

เครื่อง LPCVD จะมีท่อทำปฏิกิริยาทำจากวัสดุควอทซ์ทนความร้อน โดยมีขดลวดให้ความร้อนอยู่ด้านบนนอก ควบคุมอุณหภูมิให้ผิดพลาดน้อยที่สุดไม่เกิน 2 องศาเซลเซียส ปลายท่อทั้งสองข้างถูกปิดด้วยฝาโลหะชนิดสแตนเลสที่ต่อหน้าก๊าซเข้าสู่ระบบทางด้านหน้าและท่อด้านหลังจะเชื่อมต่อกับระบบสุญญากาศทำให้ความดันในท่อลดลงเหลือ 10 มิลลิทอร์ (สภาพความดันปกติที่ระดับน้ำทะเลเท่ากับ 760 ทอร์) ก๊าซที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะถูกควบคุมอัตราการไหลให้เป็นไปตามที่กำหนดเพื่อให้อำนาจปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์อยู่ภายในระบบทำให้ได้ฟิล์มบางตามต้องการ ตัวอย่างก๊าซที่ใช้คือ ก๊าซไดคลอโรไซเลน ( $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ ) ทำปฏิกิริยาร่วมกับก๊าซแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) ที่อุณหภูมิ  $775^\circ\text{C}$  ทำให้เกิดฟิล์มบางของซิลิคอนไนไตรด์  $\text{Si}_3\text{N}_4$  และการใช้ก๊าซไซเลน ( $\text{SiH}_4$ ) สำหรับปลูกฟิล์มพอลิซิลิคอนที่อุณหภูมิ  $620^\circ\text{C}$  หรือหากผสมร่วมกับก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ  $440^\circ\text{C}$  จะได้ฟิล์มบางของซิลิคอนไดออกไซด์

การปลูกฟิล์มบางในสภาวะความดันต่ำจะทำให้ได้ชั้นฟิล์มบางที่มีความบริสุทธิ์สูงและมีความเครียดของฟิล์มน้อยเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการปลูกฟิล์มลงบนพื้นผิวที่มีลักษณะสูงต่ำ เช่น การผลิตวงจรรวมและอีกประการหนึ่งคือสามารถปลูกฟิล์มบางในพื้นที่กว้างที่สามารถทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มมีความสม่ำเสมอ เนื่องจากเป็นวิธีที่มีอัตราการปลูกฟิล์มต่ำมากประมาณ 1 ถึง 10 นาโนเมตรต่อนาที ตัวอย่าง การปลูกฟิล์มบาง 3 ชนิดลงบนแผ่นผลึกซิลิคอนขนาด 4 นิ้ว ที่มีการแปรปรวนของความหนาไม่เกิน 40 นาโนเมตร

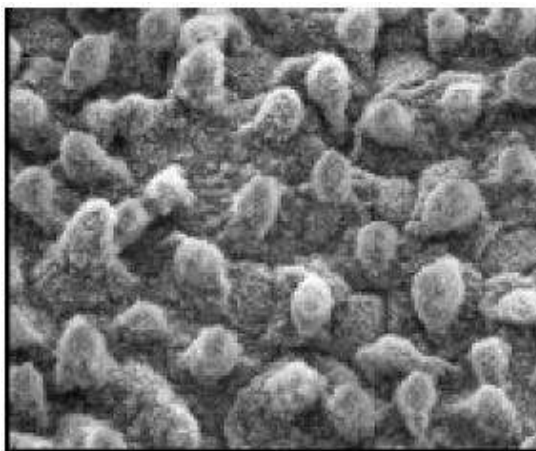
6. Sputtering สเปตเตอริงเป็นเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางอีกชนิดหนึ่งซึ่งอาจเป็นโลหะ สารกึ่งตัวนำ หรือฉนวนก็ได้ หลักการของกระบวนการสเปตเตอริงแบบดีซี (DC) เป็นแบบที่ง่ายที่สุดระบบนี้มีแผ่นฐานรองวางอยู่บนขั้วแอโนดซึ่งมีอุปกรณ์ทำความร้อนอยู่ข้างใต้เพื่อใช้เพิ่มอุณหภูมิให้แก่แผ่นฐานขณะทำการเคลือบชั้นฟิล์ม (อุณหภูมิประมาณ  $150 - 250^\circ\text{C}$ ) และขั้วแคโทดจะมีเป้าซึ่งเป็นวัสดุที่ต้องการทำการเคลือบหรือฝากลงบนแผ่นฐานที่วางอยู่ เมื่อทำการดูดอากาศออกจากแชมเบอร์จนได้ความดันต่ำเท่าที่ต้องการ (Background pressure ในช่วง  $10^{-5} - 10^{-6}$  Torr) จากนั้นจะทำการป้อนแรงดันค่าสูงให้ระหว่างขั้วแอโนด-แคโทด และปรับความดันของก๊าซเฉื่อย นิยมใช้อาร์กอน Ar เนื่องจากเป็นธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมค่อนข้างมากจึงเหมาะกับการใช้ระดมยิงเป้าที่จะเข้ามาในระบบให้มีขนาดตามต้องการอยู่ในช่วง 0.02-0.2 Torr หลังจากนั้นอาร์กอน Ar จะแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากมีสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงใช้ทำเป้าจึงทำให้อะตอมหรือกลุ่มอะตอมของวัสดุดังกล่าวหลุดจากผิวหน้าเป้ามาตกลงหรือเคลือบลงบนแผ่นฐานรอง เนื่องจากในขณะทำการปลูกฟิล์มความดันภายในแชมเบอร์มีค่าต่ำ ดังนั้นเมื่ออะตอมของวัสดุหลุดจากผิวหน้าเป้าแล้วจะมีโอกาสชนกันเพียงเล็กน้อย

หรือไม่มีเลยก่อนที่จะตกลงบนผิวหน้าฐานรอง ด้วยเหตุนี้ชั้นฟิล์มที่ปลูกได้จึงอาจมีลักษณะคล้ายกับการฉาบไอระเหยของโลหะมีลักษณะเป็นสเตปคอฟเวอเรจเกิดขึ้นซึ่งวิธีที่ช่วยลดการเกิดสเตปคอฟเวอเรจ สามารถกระทำได้โดยการใช้แผ่นเป้าที่มีหน้าตัดใหญ่ขึ้น

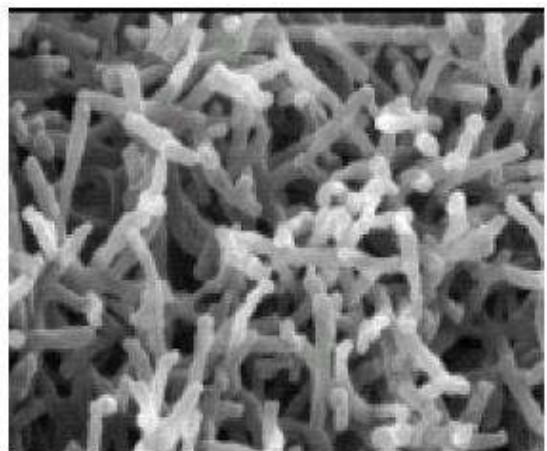


รูปที่ 6.4 วิธีการสเปตเตอริง (Sputtering) ที่มา Yuh, J., 2007

จากหลักการที่เกี่ยวข้องกับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของของไหล ยังสามารถนำมาใช้ในเรื่องการทำความสะอาดผิวของตัวเองที่เรียกว่า Self-cleaning โดยในปี ค.ศ. 1970 Barthlott เริ่มทำการศึกษาพื้นผิวของใบบัวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) พบว่าพื้นผิวประกอบไปด้วยความขรุขระระดับไมโครเมตรเป็นปุ่มแห่งเล็ก ๆ ที่เรียกว่า Micropapillar ดังรูปที่ 6.5 โดยที่แห่งเหล่านี้ถูกปกคลุมด้วยโครงสร้างแตกกิ่งแบบละเอียดระดับนาโนเมตรโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 125 นาโนเมตร ทำให้พื้นผิวมีลักษณะที่สังเกตด้วยตาเปล่าเหมือนแว็กซ์ มุมสัมผัส (Contact angle) กับน้ำมีค่ามากกว่า  $150^\circ$  ทำให้เกิดลักษณะที่เรียกว่าความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (Superhydrophobic) การที่มีปุ่มแห่งเล็ก ๆ จำนวนมากจะเกิดอากาศที่บริเวณช่องว่างระหว่างปุ่มทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของมุมสัมผัส



a)



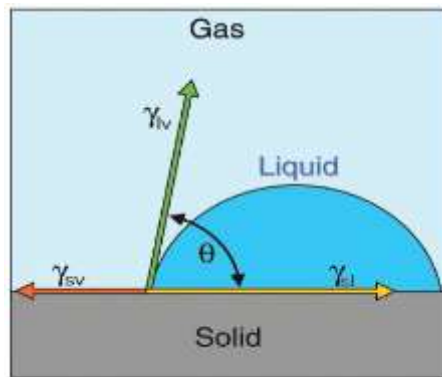
b)

รูปที่ 6.5 พื้นผิวของไบบิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (a) กำลังขยายต่ำ (b) กำลังขยายสูงบริเวณปุ่ม ที่มา Kellar Autumn, 2000

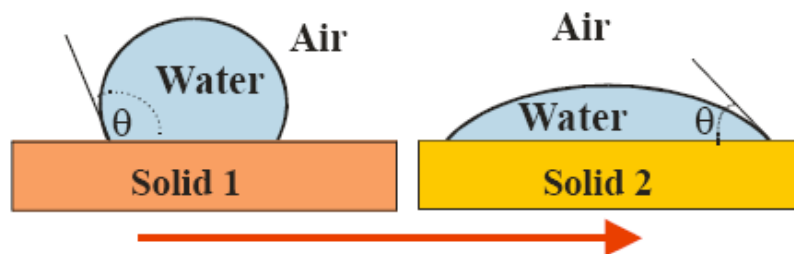
### หลักการทำความสะอาดตัวเอง

พื้นผิวฉลาดที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้ โดยอาศัยหลักเกณฑ์ที่แตกต่างกันสองประการ คือความชอบน้ำยิ่งยวดและประการที่สองคือความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด การที่น้ำอยู่บนพื้นผิวใดๆ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการยัง (Young's equation) ปราชญ์การณดังกล่าวถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1807 โดยมีความสัมพันธ์คือ  $\gamma_{SL} - \gamma_{SV} + \gamma_{LV} \cos\theta = 0$  สมการดังกล่าวอธิบายมุมสัมผัส (Contact angle,  $\theta$ ) ที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวของแข็ง หยดน้ำและอากาศรอบ ๆ และแรงตึงผิวที่เกี่ยวข้อง ค่า  $\gamma_{SL}$ ,  $\gamma_{SV}$ ,  $\gamma_{LV}$  คือพลังงานพื้นผิวร่วม (Interfacial energy) ระหว่างของแข็ง-ของเหลว, ของแข็ง-อากาศ และของเหลว-อากาศ ตามลำดับ รูปที่ 6.6 แสดงหยดน้ำถูกสมมติให้เป็นรูปหมวกโค้งเรียกว่า Spherical cap เมื่ออยู่บนผิวของของแข็งมุมสัมผัสที่มีค่าน้อยจะนำมาซึ่งหยดน้ำที่แบนราบและเกาะพื้นผิวของแข็งหรือที่เรียกว่ามีการเปียกผิวที่ดี (Good wetting) ในทางกลับกันมุมสัมผัสที่มีค่ามากจะส่งผลถึงพื้นผิวร่วมระหว่างของเหลว-ของแข็งที่น้อยและการเปียกผิบบนพื้นผิวของแข็งที่ไม่ดี (Bad wetting) พื้นผิวแบบทำความสะอาดตัวเองได้ใช้หลักการแบบใดแบบหนึ่ง กล่าวคือเมื่อมุมสัมผัสมีค่าน้อยจนเข้าสู่ศูนย์จะเกิดสถานการณ์ที่เรียกว่าความชอบน้ำยิ่งยวด หรือเมื่อมุมสัมผัสเข้าใกล้  $180^\circ$  จะเกิดสถานการณ์ที่เรียกว่าความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด โดยทั่วไปพื้นผิวที่มีมุมสัมผัสของหยดน้ำน้อยกว่า  $90^\circ$  ถูกพิจารณาว่าเป็นพื้นผิวแบบชอบน้ำและเกิดการเปียกผิวที่ดีเป็นพื้นผิวที่มีขั้วและมีการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำ ในขณะที่มุมสัมผัสของหยดน้ำมากกว่า  $90^\circ$  เป็นพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำซึ่งเป็นพื้นผิวที่ไม่มีขั้วและเกิดการเปียกผิวที่แย เช่น Teflon® (Dupont-Teflon Industrial, 2008) รูปที่ 6.7 แสดงการเปียกผิวของหยดน้ำบนผิวของแข็งถูกครจากซ้ายไปขวาแสดงถึงความเป็น Hydrophilic ของพื้นผิว น้ำซึ่งหล่นบนพื้นผิวแบบชอบน้ำยิ่งยวดจะเกิดการกระจายตัวไปทั่วทำให้เกิดชั้นฟิล์มบาง ๆ ในขณะที่พื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำยิ่งยวด น้ำจะเกิดการก่อตัวเป็นหยดเม็ดเล็ก ๆ เพื่อลดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลว ในกรณีแรกการทำ ความสะอาดเกิดขึ้นเมื่อน้ำที่แผ่กระจายเป็นชั้นบาง ๆ ไหลไปทั่วตามพื้นผิวและทำการกวาดชะล้างเศษ สิ่งสกปรกออกไป ในส่วนของกรณีที่สองนั้น หยดน้ำที่เป็นเม็ดกลมเกิดการกลิ้งบนพื้นผิวและนำพาเศษ สิ่งสกปรกติดไปด้วยระหว่างทางที่หยดน้ำกลิ้งออกไป ในทางทฤษฎีแล้วทั้งสองแนวทางที่แตกต่างกันนี้ ให้ผลลัพธ์ที่เหมือนกันคือพื้นผิวช่วยในการกำจัดสิ่งสกปรกได้มากที่สุด หลักการเบื้องต้นของพื้นผิวทำความสะอาดตัวเองทั้งสองวิธีที่กล่าวมาข้างต้นอาจฟังดูง่าย แต่การที่จะสร้างวัสดุที่สามารถทำให้เศษสิ่ง

สกปรกไหลไปตามผิวเมื่อมีน้ำไหลผ่านจำเป็นต้องใช้ความรู้อย่างลึกซึ้งเกี่ยวกับเคมีพื้นผิว องค์ความรู้วิศวกรรมด้านพื้นผิวในระดับนาโนเมตร (Seemann *et al.*, 2001) เพื่อการปรับปรุงพื้นผิวให้มีมุมสัมผัสที่มากหรือน้อยตามความต้องการและการทำพื้นผิวให้มีความขรุขระในระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตร ดังเช่น ไบบัว (Darhuber, 2000; Herminghaus 1999 & 2000) นอกจากนี้เทคโนโลยีการผลิตก็มีความสำคัญไม่น้อย เทคนิคที่มีการใช้ในปัจจุบันเช่น การกัดด้วยเลเซอร์/พลาสมา (Laser/plasma etching), กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel), เทคนิคการตกสะสมของไอสารเคมี (Chemical vapor deposition), การจัดวางโมเลกุลคอลลอยด์อย่างเป็นระเบียบ (Colloidal assembly) และการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตย์ (Electrospinning) (Ma & Hill, 2006; Tadanaga *et al.*, 1997)



รูปที่ 6.6 มุมสัมผัสและแรงตึงผิวที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวของแข็ง หยดน้ำ และอากาศโดยรอบ ที่มา Seemann R., 2001

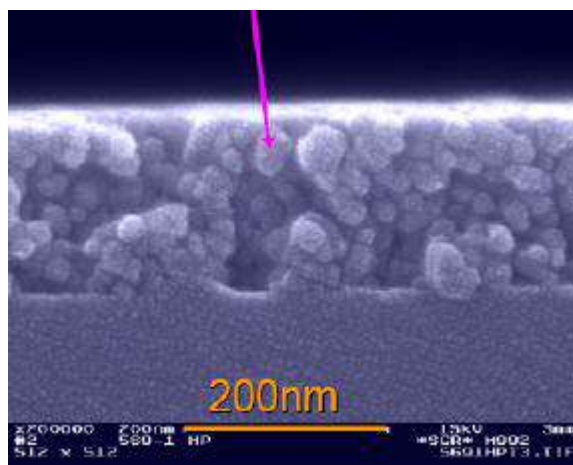


รูปที่ 6.7 การเปียกผิวของหยดน้ำบนของแข็ง ถูกคร่าจกย้ายไปขวาแสดงถึงการชอบน้ำที่เรียกว่าไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) ที่เพิ่มขึ้นของพื้นผิว ที่มา Seemann R., 2001

จากหลักการดังกล่าวได้ถูกออกแบบในการผลิตกระจกเคลือบผิวแบบพิเศษด้วยอนุภาคนาโนของไททาเนีย ( $\text{TiO}_2$  nanoparticles) ชั้นฟิล์มหนาประมาณ 40 nm และใช้เทคนิคการตกสะสมของไอสารเคมี

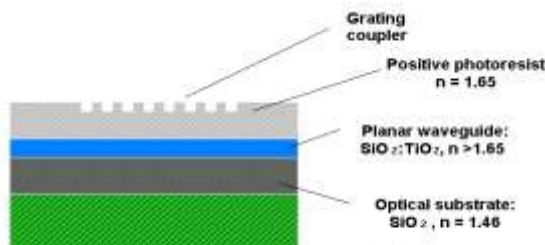
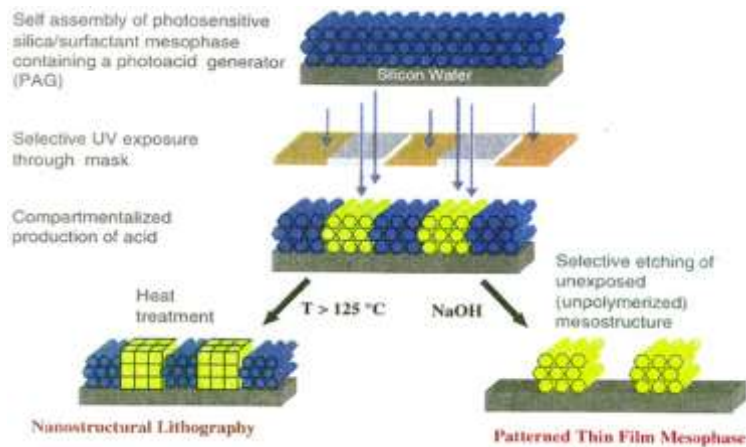
(Chemical Vapor Deposition, CVD) ในระหว่างกระบวนการผลิตกระจกที่อุณหภูมิ 600°C กระบวนการนี้ทำให้ได้ผิวที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้โดยมีความคงทนสูง ช่วงอายุการใช้งานยาวนาน ผิวกระจกเป็นแบบชอบน้ำยิ่งยวด (Superhydrophilic) เมื่อผิวกระจกได้รับแสงแดดก็จะเกิดการแตกสลายของสารอินทรีย์ที่เป็นสิ่งสกปรกที่ติดค้างอยู่ที่ผิว เช่น มูลนก จากนั้นเมื่อฝนตก น้ำก็จะเกิดการแผ่กระจายไปทั่วผิวกระจก สิ่งสกปรกจึงถูกกำจัดออกไป นอกจากนี้ น้ำที่ผิวกระจกจะเกิดการระเหยแห้งอย่างรวดเร็ว ลดการเกิดครอยคราบน้ำ ทางบริษัทกล่าวว่กระจกที่เคลือบนี้หากมองด้วยตาเปล่าจะไม่เห็นความแตกต่างจากกระจกทั่วไปและไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรง (Strength) เพียงแต่จะมีการลดลงของแสงและพลังงานที่ผ่านกระจกเป็นปริมาณเล็กน้อยเท่านั้น หลักการทำงานของสารกึ่งตัวนำไททาเนีย ( $\text{TiO}_2$ ) อนุภาคนาโนที่มีสมบัติโฟโตแคตาไลติกและความชอบน้ำยิ่งยวดคือเมื่อชั้นของอนุภาคนาโนไททาเนียที่เคลือบผิวกระจกดังแสดงในรูปที่ 6.8 ได้รับการกระตุ้นโดยแสงยูวีจากดวงอาทิตย์และเมื่อเจอบรรยากาศที่เป็นออกซิเจนก็เกิดการออกซิไดซ์ทำให้สามารถทำลายแบคทีเรียและสลายสารอินทรีย์หรือสารอินทรีย์ที่เป็นสิ่งสกปรกบางประเภทได้ สมบัติความชอบน้ำยิ่งยวดของอนุภาคนาโนไททาเนียที่เคลือบผิวเมื่อมีหยดน้ำมาเกาะบนผิวก็จะเกิดการแผ่กระจายเป็นชั้นฟิล์มบางอย่างสม่ำเสมอ สิ่งสกปรกเล็ก ๆ สามารถถูกชะล้างโดยน้ำที่แผ่ไปตามผิวได้และไม่ทำให้เกิดฝ้าหรือรอยหยดน้ำเป็นจุดที่กระจกเมื่อแห้ง

นอกจากนี้ยังได้อาศัยหลักการดังกล่าวในการผลิตสีทาภายนอกอาคาร ช่วยทำให้พื้นผิวที่ทาสีทำความสะอาดตัวเองได้เมื่อถูกน้ำชะล้างและปราศจากคราบสกปรกเกาะติด รวมทั้งผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่มีสมบัติของการทำความสะอาดตัวเองได้ดี



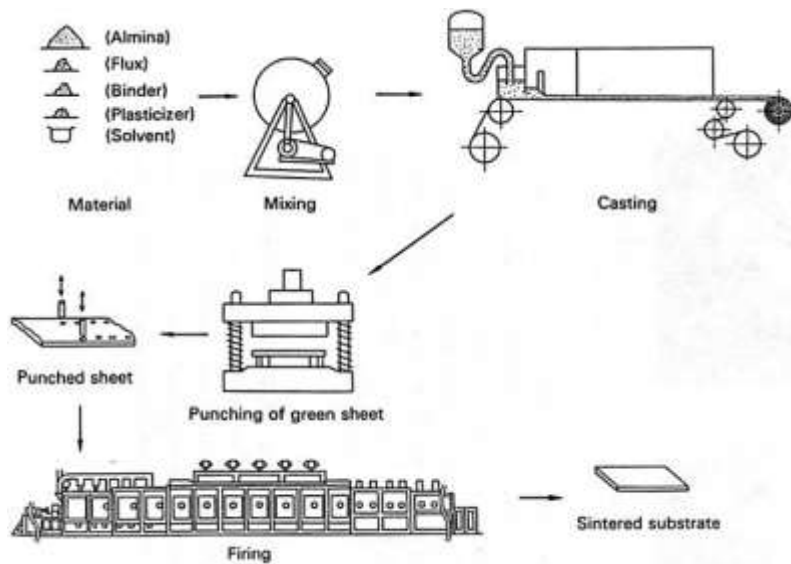
รูปที่ 6.8 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงตัวอย่างชั้นฟิล์มบางของอนุภาคนาโนไททาเนียเคลือบบนแผ่นกระจกด้วยเทคนิคการตกสะสมของไอสารเคมี ที่มา Ammerlaan, J., 2000 และ Blossy, R., 2003

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานวัสดุนาโนด้านต่างๆ เช่น วงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยวิธีนาโนลิโทกราฟี (Nanostructural lithography) โดยการเคลือบผิวด้วยสารนำไฟฟ้าเพื่อผลิตอุปกรณ์ เช่น เซอร์ทราโนซิสเตอร์ แผ่นรองวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อใช้ในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ เครื่องจักร ปิโตรเลียมและปิโตรเคมี หรืออาจใช้ในการเคลือบผิวผลิตภัณฑ์เพื่อป้องกันรอยขีดข่วน เช่น เลนส์แว่นตา นาฬิกา และการผลิตสายไฟขนาดเล็กที่เรียกว่าเส้นลวดนาโน “Nanowire” บนสารกึ่งตัวนำสำหรับใช้ในวงจรรวมอิเล็กทรอนิกส์ ดังรูป 6.9, 6.10 และ 6.11 รวมทั้งการผลิตคาร์บอนนาโนแคปซูลสำหรับใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น ด้านการแพทย์ ตัวเร่งปฏิกิริยา ดังรูป 6.12 และ 6.13 นอกจากนี้เส้นใยนาโนสามารถประยุกต์ใช้กับงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ ทำให้เส้นใยดังกล่าวคงรูป ผิวลื่น สิ่งสกปรกเกาะติดยาก รวมทั้งการใช้วัสดุนาโนสำหรับอุตสาหกรรมยา ปลายเตอร์ยาห้ามเลือดและยังช่วยกระตุ้นการเติบโตของเนื้อเยื่อใหม่บริเวณที่เกิดบาดแผลหรือเมื่อเติมวัสดุนาโนลงในเครื่องสำอางค์เพื่อช่วยกรองหรือป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตหรือรังสียูวีจากแสงแดด การเติมอนุภาคนาโนในอุปกรณ์กีฬาเพื่อช่วยเพิ่มสมบัติทางกล เช่น การยืดหยุ่นตัว การรับแรง หรือเมื่อเติมอนุภาคนาโนลงในสิ่งทอช่วยการคงรูปของเส้นใยและต้านทานการติดไฟทำให้เส้นใยนานาโนดังกล่าวติดไฟยากและเส้นใยมีการคงรูปที่ดีไม่ยับง่าย

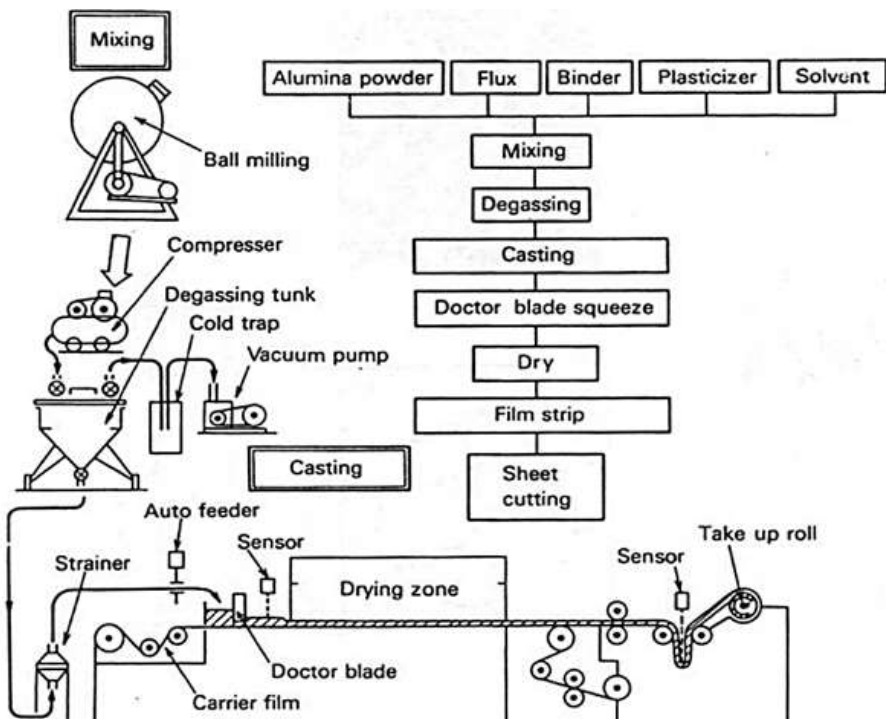




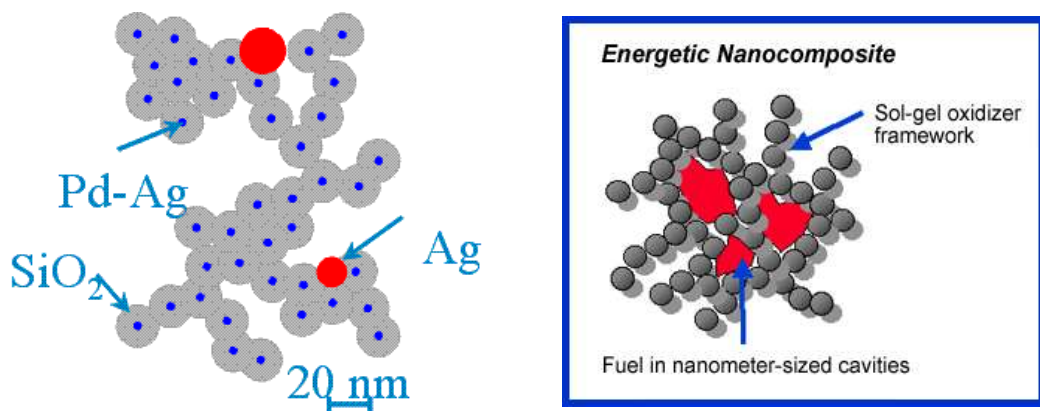
รูปที่ 6.9 การเคลือบผิวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยวัสดุนาโน ที่มา Ozaki, Y., 1988



รูปที่ 6.10 การผลิตแผ่นรองวงจรรานาโนอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอะลูมินา ที่มา Ozaki, Y., 1988



รูปที่ 6.11 กระบวนการผลิตแผ่นรองวางจรวดเล็กทรอนิกส์ด้วยเทคนิคคอกเตอร์เบลด (Doctor blade) ที่มา Ueyama, T. and Wada, H., 1988.



รูปที่ 6.12 วัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาคอมพอสิต ที่มา Goldstein, A.N., 1997



รูปที่ 6.13 การเคลือบผิวผลิตภัณฑ์ด้วยวัสดุนาโน ที่มา Goldstein, A.N., 1997

## คำถามท้ายบท

1. แรงแผ่นผิวที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบผิวแบบฟิล์มบางด้วยวัสดุนาโนมีกี่ชนิด อะไรบ้าง
2. จงยกตัวอย่างเทคนิคที่ใช้ในการปลูกฟิล์มบนพื้นผิววัสดุมา 2 วิธี
3. จงบอกประโยชน์การปลูกฟิล์มของวัสดุนาโนบนพื้นผิวผลิตภัณฑ์มา 2 อย่าง
4. ความชอบน้ำยิ่งยวด (Superhydrophilic) คืออะไร มีข้อดีอย่างไรในการนำเทคนิคนี้ไปใช้ประโยชน์
5. วิธีการใดเหมาะสำหรับการปลูกฟิล์มบางลงบนวงจรรวมอิเล็กทรอนิกส์

## บทที่ 7

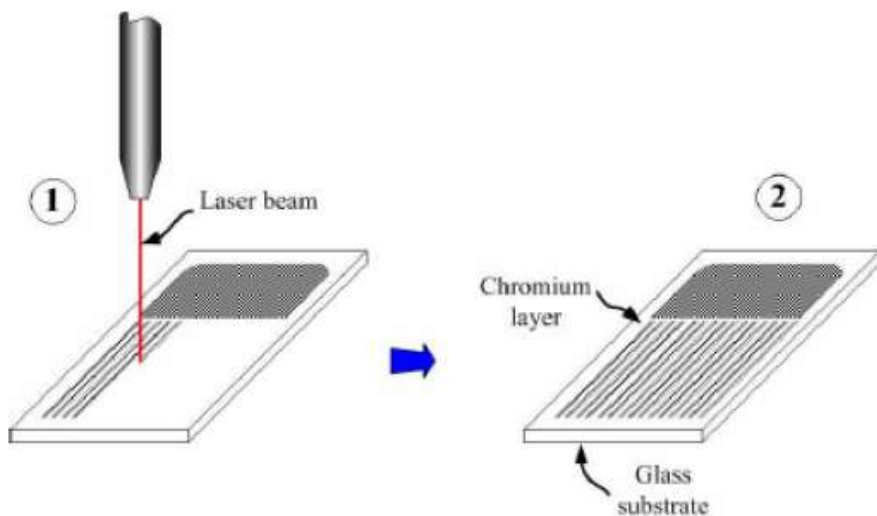
### การวิเคราะห์คุณลักษณะและคุณสมบัติวัสดุนาโน (Characterization and Properties of Nanomaterials)

การศึกษาช่วงแรกของวัสดุนาโนเป็นการศึกษาองค์ประกอบ คุณลักษณะทางกายภาพ โครงสร้าง และสมบัติด้านต่าง ๆ รวมทั้งกระบวนการผลิตที่เริ่มจากโครงสร้างขนาดใหญ่ แล้วจึงศึกษาในขอบเขตที่มีขนาดเล็กลงหรือที่เรียกว่าเป็นกระบวนการศึกษาแบบบนลงล่าง “Top-down” แต่หลังจากที่นักวิทยาศาสตร์ได้มีการประดิษฐ์คิดค้นกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงที่เรียกว่า Scanning tunneling microscope (STM) ในปี ค.ศ. 1981 ทำให้เกิดการพัฒนาด้านเทคโนโลยีนาโนอย่างรวดเร็ว มนุษย์สามารถศึกษาหรือประดิษฐ์ชิ้นส่วนวัสดุนาโนจากวัสดุที่มีโครงสร้างระดับอะตอมเพื่อให้เกิด

โครงสร้างหรือสมบัติที่ต้องการ กระบวนการนี้เป็นการศึกษาแบบล่างขึ้นบน “Bottom-up” และเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาวัสดุระดับอะตอมหรือโครงสร้างระดับนาโนเรียกว่าเทคโนโลยีนาโน (Nanotechnology) **เทคโนโลยีพัฒนาแบบบนลงล่าง (Up-bottom)** หมายถึงการผลิตวัสดุที่มีโครงสร้างขนาดนาโนเมตร โดยการใช้เทคโนโลยีแบบหยาบ (Bulk technology) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันมาตั้งแต่สมัยโบราณเป็นการจัดการกับอะตอมและโมเลกุลด้วยวิธีทางกลเช่น การตัด การกลึง การดัด การตีขึ้นรูป และอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น การทำมิดต้องทำการขึ้นรูปด้วยการเผาเหล็กให้ร้อนแล้วตีขึ้นรูป จากนั้นนำไปเจียระไนหรือลับให้คม ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาการจัดการอะตอมและโมเลกุลในระดับขนาดเล็กลง เช่น การผลิตอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กแต่อุปกรณ์เหล่านี้ยังคงประกอบด้วยอะตอมเป็นล้าน ๆ ตัวและยังคงมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ถึงแม้ว่าอุปกรณ์เหล่านี้จะทำให้คอมพิวเตอร์มีขนาดเล็กลงและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น แต่การใช้เทคโนโลยีแบบหยาบมาสร้างสิ่งที่มีขนาดเล็กย่อมขาดความเที่ยงตรงและมีความบกพร่องสูง ตัวอย่างของเทคโนโลยีแบบบนลงล่างเช่น โฟโตลิโทกราฟี ท่อนาโนคาร์บอน และวัสดุนาโน

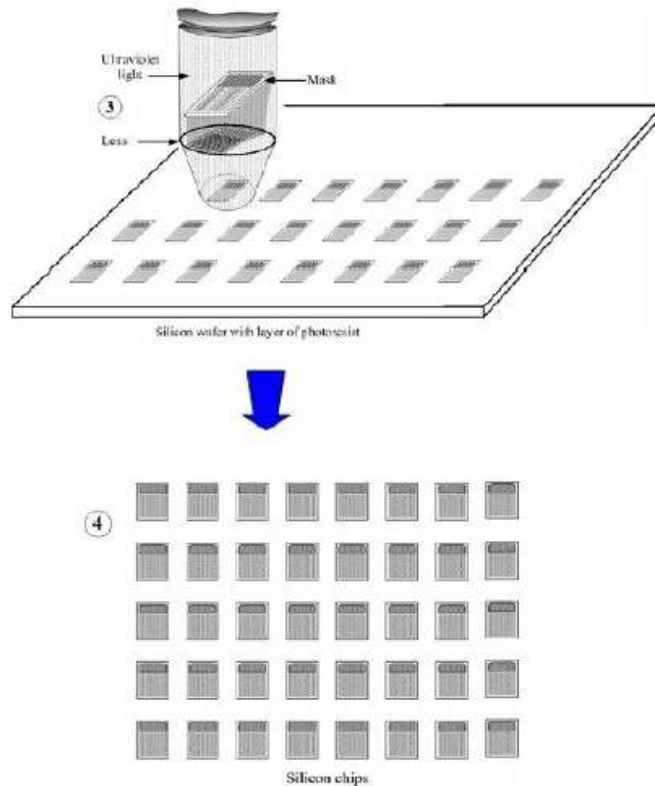
- **โฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)** เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ผลิตชิปคอมพิวเตอร์ และระบบไมโครอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ สามารถผลิตโครงสร้างที่มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตรได้แต่ทำได้ยากมาก ราคาแพงและไม่สะดวก โฟโตลิโทกราฟีเป็นเทคโนโลยีที่มีพื้นฐานมาจากการถ่ายรูป ขั้นตอนของโฟโตลิโทกราฟีมี 2 ขั้นตอน คือ

1. รูปแบบของชิ้นส่วนวงจรมิโครชิปบนผิวแก้วที่เคลือบด้วยชั้นของโครเมียมโดยใช้แสงเลเซอร์ซึ่งมีลักษณะเหมือนฟิล์มเนกะตีฟที่เรียกว่ามาสค์ (Mask)



รูปที่ 7.1 ขั้นตอนที่ 1 ใช้แสงเลเซอร์เขียนรูปแบบวงจรถ่ายสำหรับไมโครชิป ที่มา Henrik B., 2003

2. ใช้รูปแบบของวงจรถ่ายไมโครชิปที่สร้างในขั้นตอนที่ 1 ผลิตรูปแบบวงจบบนแผ่นซิลิกอนโดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตทำให้เกิดลายดังรูปที่ 7.2



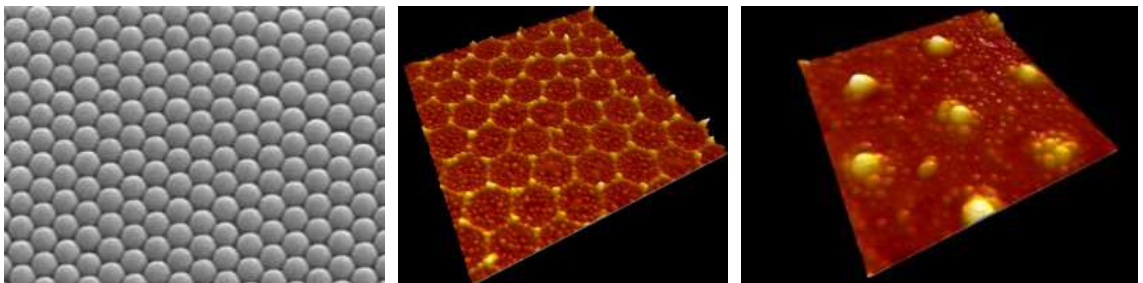
รูปที่ 7.2 แสดงขั้นตอนที่ 2 ผลิตวงจรถ่ายไมโครชิบบนแผ่นซิลิกอน ที่มา Henrik B., 2003

อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีโฟโตลิโทกราฟียังมีข้อจำกัดอันเนื่องมาจากแสงอัลตราไวโอเล็ต การปรับปรุงเทคโนโลยีโฟโตลิโทกราฟียังคงมีการทำวิจัยอย่างต่อเนื่องเพื่อให้สามารถสร้างโครงสร้างที่มีขนาดเล็กลงทำงานได้เร็วขึ้น และราคาถูกลง รวมทั้งนาโนลิโทกราฟี (Nanolithography) เป็นวิธีการลิโทกราฟีในระดับนาโนเมตร โดยมากแล้ววิธีการนี้จะใช้ในกระบวนการผลิตสารกึ่งตัวนำหรือเซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor) เพื่อประกอบสำหรับสร้างเป็นแผงวงจรรวมหรือไอซี (IC) ของชิปคอมพิวเตอร์ รวมทั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ และมีแนวโน้มในการที่จะนำมาใช้กับระบบเครื่องกลไฟฟ้าระดับนาโน (Nanoelectromechanical systems: NEMS) ปัจจุบันวิธีการนาโนลิโทกราฟีถูกนำมาใช้งานเพื่อสร้างโครงสร้างระดับนาโนดังต่อไปนี้

1. Dip-pen nanolithography เป็นวิธีการสร้างวัสดุนาโนที่มีโครงสร้างตามต้องการลงบนพื้นผิวต่างๆ โดยการเขียนลายลงบนพื้นผิวโดยตรงเหมือนกับการเขียนด้วยปากกาหมึกซึม

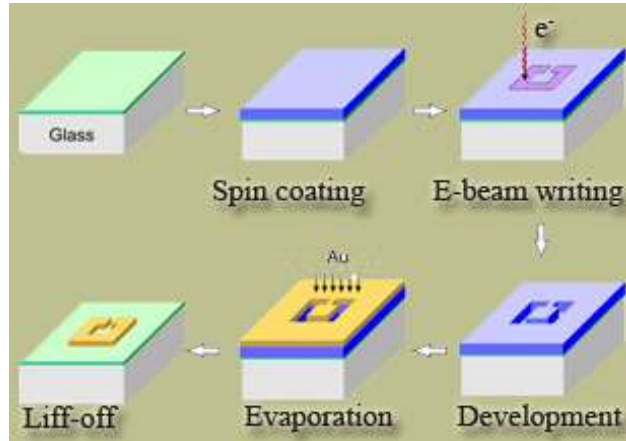
วิธีการนี้จำเป็นต้องใช้ปากกาที่มีขนาดระดับนาโน ดังนั้นจึงต้องใช้โพรบที่มีปลายแหลมของเครื่อง AFM เป็นเสมือนปากกาเขียนและเป็นที่ยึดน้ำหมึกซึ่งก็คืออะตอมหรือโมเลกุล เมื่อใช้ปลายแหลมลากผ่านพื้นผิวของวัตถุ ก็จะเกิดร่องรอยของแนวเส้นหรือแถวของอะตอมที่ใช้เป็นน้ำหมึกบนพื้นผิวของวัตถุ ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างระดับนาโนหรืออาจเรียกได้ว่าเป็นเครื่องมือแบบ Scanning probe lithography ของเหลวที่เป็นตัวทำละลายอาจเป็นน้ำหรือตัวทำละลายที่เหมาะสมโดยไม่ทำให้พื้นผิวดังต้นนั้นเกิดการละลายปกคลุมอยู่ระหว่างปลายแหลมของเครื่อง AFM และพื้นผิวดังต้นเป็นตัวควบคุมการดำเนินการส่งผ่านอะตอมของน้ำหมึกจากปลายแหลมของ AFM ไปสู่พื้นผิวที่ต้องการ จากนั้นอะตอมของน้ำหมึกก็จะทำปฏิกิริยากับพื้นผิวดังต้นจนเกิดเป็นโครงสร้างนาโนที่มีความเสถียรขึ้นมา น้ำหมึกที่นำมาใช้สามารถใช้ได้ทั้งชนิดที่เป็นสารประกอบทางชีวภาพตัวอย่างเช่น เคนโดโรเมอร์ พอลิเมอร์ หรือสารประกอบทางเคมีพวกที่เป็นกำมะถัน (Thiol) เช่น Alkanethiols หรือโมเลกุลทางชีวภาพ ตัวอย่างเช่น ดีเอ็นเอ แอนติบอดี หรือโปรตีน

2. Nanosphere lithography (NSL) เป็นอีกวิธีหนึ่งในกลุ่มของนาโนลิโทกราฟีโดยมีแนวทางหลักในการสร้างดังนี้คือการสร้างช่องหรือรูไว้ก่อนที่จะออกแบบโครงสร้างโดยการวางแบบ (Pattern) ที่ต้องการสร้างบนพื้นผิวก่อน จากนั้นใช้เนื้อวัสดุที่ต้องการสร้างจริงทำการเคลือบปกคลุมแบบที่วางเอาไว้ให้ทั่ว หลังจากนั้นก็เอาแบบที่วางไว้ตอนแรกออก ก็จะได้เป็นโครงสร้างในระดับนาโนที่เกิดขึ้นบริเวณที่เป็นช่องหรือรูจากแบบที่วางขึ้นมาได้ ตัวอย่างเช่นการนำลูกหินกลมมาเรียงบนแผ่นกระดาษจนเต็มพื้นผิวดังต้น โดยการอัดให้แน่นที่สุดเท่าที่จะทำได้ หลังจากนั้นใช้สีฉีดยาไปบนลูกหินกลมจนทั่วทั้งหมด จะพบว่าเมื่อนำลูกหินกลมเหล่านั้นออกจากแผ่นกระดาษของพื้นผิวดังต้น สีสเปรย์ที่ฉีดยาลงไปจะปรากฏอยู่บนพื้นผิวดังต้นเป็นหย่อมๆ โดยทุกจุดจะมีรูปทรงคล้ายสามเหลี่ยมแต่มีด้านที่เว้าเข้าข้างในเกิดจากสีที่ถูกพ่นผ่านช่องว่างเล็กระดับนาโนที่อยู่ระหว่างลูกหินกลมที่วางตัวอยู่ติดกัน ทำให้ได้โครงสร้างระดับนาโนของสีที่ถูกฉีดยาไปดังรูปที่ 7.3

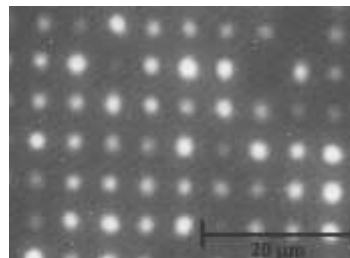


รูปที่ 7.3 โครงสร้างระดับนาโนโดยวิธี Nanosphere lithography ที่มา Marko U., 2002

3. Electron beam lithography (EBL) เป็นอีกวิธีหนึ่งของนาโนลิโทกราฟีเป็นวิธีการสร้างโครงสร้างระดับนาโนโดยใช้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเพื่อสร้างแบบแผนเฉพาะของโครงสร้างอย่างละเอียดบนพื้นผิววัตถุตั้งต้น วิธีการนี้นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมการสร้างแผงวงจรไฟฟ้าในปัจจุบัน

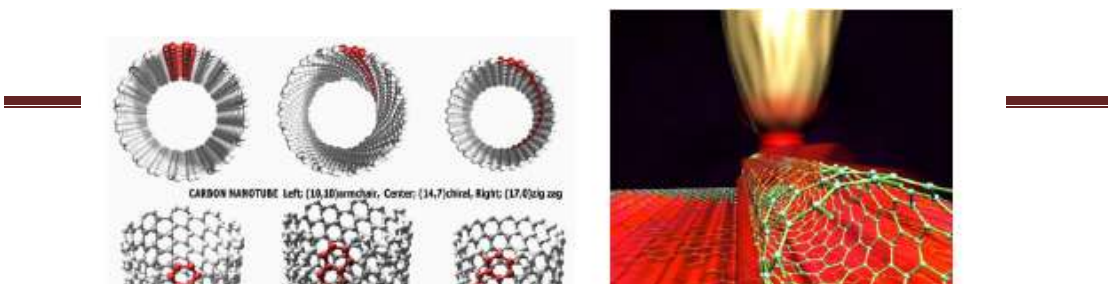


รูปที่ 7.4 การสร้างโครงสร้างระดับนาโนโดยวิธี Electron beam lithography (EBL) ที่มา Marko U., 2002



รูปที่ 7.5 โครงสร้างนาโนของ LEDs ที่ได้จากวิธีการ EBL ที่มา Marko U., 2002

- **ท่อนาโนคาร์บอน** (Carbon nanotube) เป็นวัสดุที่สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้เหมือนกับเป็นแท่งโลหะหรือสามารถทำหน้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทไดโอดซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอน การผลิตท่อนาโนคาร์บอนสามารถเตรียมได้จากการให้ความร้อนกับคาร์บอนบริสุทธิ์จนกระทั่งระเหยกกลายเป็นไอแล้วปล่อยให้ควบแน่นในสุญญากาศหรือในก๊าซเฉื่อยจะได้แผ่นคาร์บอนบริสุทธิ์ที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนเพียงชั้นเดียวจากแผ่นคาร์บอนบริสุทธิ์เมื่อนำมาม้วนเป็นท่อที่มีขนาดเล็กกว่าเส้นผมของมนุษย์ 50,000 เท่า จะได้ท่อนาโนคาร์บอน ทำให้เกิดการพัฒนากการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ เช่นท่อนาโนคาร์บอนและท่อนาโนคอมพิวเตอร์



รูปที่ 7.6 ท่อนาโนคาร์บอนและท่อนาโนคอมพิวเตอรื ที่มา Robertson, J. 2004

- **วัสดุนาโน** (Nanomaterial) วัสดุนาโนเป็นคำทั่ว ๆ ไปหมายถึงวัสดุที่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดโดยเฉลี่ยน้อยกว่า 100 นาโนเมตร และมีขนาดเล็กกว่าขนาดของอนุภาคทั่ว ๆ ไป 10,000 เท่า สมบัติของวัสดุนาโนขึ้นอยู่กับการกระทำระหว่างกันของอะตอมที่ต่อกันบนผิวของอนุภาคหรือขอบของอนุภาคที่รวมกันเป็นวัสดุนาโน ซึ่งทำให้วัสดุนาโนแสดงสมบัติทางกล เคมี ไฟฟ้า แสง และแม่เหล็ก ผิดปกติไปจากเดิม วัสดุนาโนมีศักยภาพในการนำไปทำเป็นชิ้นส่วนที่ต้องการความแข็งแรง มีอายุการใช้งานที่นานขึ้นกว่าเดิม เช่น ชิ้นส่วนเครื่องบิน รถยนต์ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานประเภทמידัด ดอกสว่าน วัสดุเชื่อมต่อเซรามิก ตลับลูกปืนสมรรถนะสูง วงจรรวม แม่เหล็กอำนาจสูงสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์

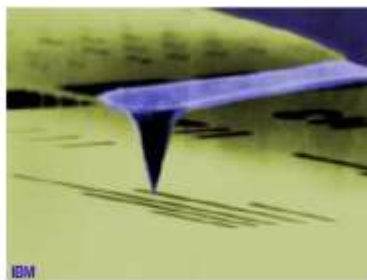
**เทคโนโลยีพัฒนาแบบล่างขึ้นบน (Bottom-up)** หมายถึงการทำโครงสร้างหรือผลิตสิ่งของโดยการนำอะตอม/โมเลกุลมาจัดเรียงหรือประกอบกันทีละอะตอม/โมเลกุล เทคโนโลยีพัฒนาแบบล่างขึ้นบนก็คือเทคโนโลยีระดับโมเลกุลหรือเทคโนโลยีนาโนซึ่งเป็นเทคโนโลยีระดับโมเลกุล (Molecular technology) และเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่สามารถจัดการกับอะตอมหรือโมเลกุลแต่ละตัวได้อย่างเที่ยงตรง เป็นเทคโนโลยีที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า การจัดการกับสิ่งต่าง ๆ หรือใช้ผลิตสิ่งต่าง ๆ สามารถทำ



ได้โดยการนำอะตอมหรือโมเลกุลมาวางในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ สิ่งที่เกิดขึ้นมาจะมีขนาดเล็กหรือใหญ่ก็ได้ เทคโนโลยีนาโนมีรากฐานอยู่บนการผลิตในระดับโมเลกุลที่ต้องการ ซึ่งเป็นการรวมหลักการทางเคมีและทางกลศาสตร์มาประยุกต์ใช้งานที่แปลกใหม่ โดยทั่วไปโมเลกุลเคลื่อนที่ได้โดยการแพร่และการชนกันของโมเลกุลในทุกตำแหน่งและทุกทิศทางที่เป็นไปได้ ผลของปฏิกิริยาเคมีเป็นสิ่งที่ยากจะควบคุม ในทางตรงกันข้ามการสร้างโมเลกุลสามารถใช้ในการผลิตอุปกรณ์ทางกลเพื่อนำการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่ต้องการให้ทำปฏิกิริยากัน โดยประยุกต์ใช้หลักการทางกลศาสตร์ของการยึดและกำหนดตำแหน่งเข้ากับการทำปฏิกิริยา ตัวอย่างเทคโนโลยีแบบล่างขึ้นบนคือ การศึกษาการใช้เครื่องมือระดับนาโน

- **เครื่องมือระดับนาโน (Nanotools)** เป็นเครื่องมือที่ใช้ได้ในระดับนาโนเมตรเครื่องมือนี้คือ AFM (Atomic Force Microscopy), STM (Scanning Tunneling Microscopy) และกล้องอิเล็กตรอน

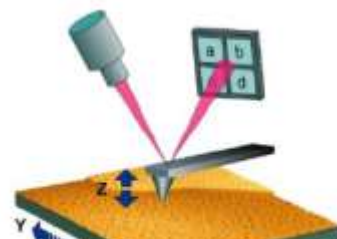
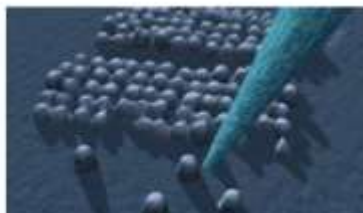
1. Atomic Force Microscopy (AFM) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้การสังเกตและจัดการเคลื่อนย้ายวัสดุขนาดนาโนเมตรได้ทั้งวัสดุที่เป็นตัวนำและฉนวน สามารถใช้งานได้ทั้งในสิ่งแวดล้อมที่เป็นสุญญากาศ อากาศ ก๊าซ และของเหลว ส่วนประกอบที่สำคัญของ AFM คือคานยื่นที่ทำจากวัสดุที่สามารถเปลี่ยนแปลงประจุได้เมื่อถูกแรงกระทำที่ปลายคานจะมีเข็มที่ประกอบด้วยอะตอม 1 ตัว เมื่อเลื่อนคานให้ปลายเข็มอยู่ห่างจากผิววัสดุระหว่าง 0 - 100 นาโนเมตร แรงกระทำระหว่างอะตอมจะดึงคานและสามารถวัดระยะหรือใช้เคลื่อนย้ายอะตอมทีละตัว ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาหลังจากเครื่อง STM ด้วยหลักการพื้นฐานเดียวกันกับเครื่อง STM โดยเครื่อง AFM จะสามารถทำงานได้โดยการใช้อุปกรณ์ตรวจหรือโพรบ (Probe) ที่มีปลายแหลมเล็กเหมือนกับเครื่อง STM ซึ่งติดอยู่กับคานยื่น (Cantilever) ที่สามารถโก่งงอตัวได้เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่สัมผัสไปบนพื้นผิวของวัตถุซึ่งสามารถที่จะวัดแรงกระทำที่ปลายแหลมของโพรบได้ แม้ว่าจะมีขนาดน้อยมากในระดับนาโน ประโยชน์ของเครื่อง AFM ที่มีมากกว่าเครื่อง STM ก็คือ สามารถที่จะตรวจวัดพื้นผิวที่เป็นฉนวนไฟฟ้าได้เช่น พื้นผิวพอลิเมอร์ เซรามิก คอมพอสิต กระจกหรือแก้ว หรือแม้แต่โมเลกุลทางชีวภาพต่าง ๆ ก็สามารถวัดได้



An atomic force microscope (AFM) tip made of Si

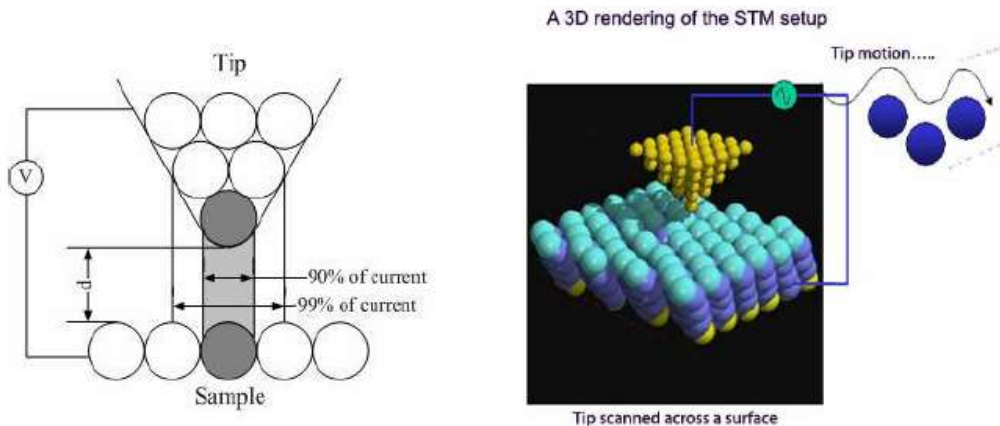


คานยื่นและเข็มที่ปลายคาน



รูปที่ 7.7 การเบี่ยงเบนของปลายคาน AFM ทำให้แสงเลเซอร์ที่สะท้อนไปยังตัวรับแสงมีการเบี่ยงเบน จึงสามารถวัดขนาดหรือระยะได้ ที่มา Hiroyuki Fujita, et al. 2001

2. Scanning tunneling microscope (STM) มีส่วนประกอบคล้ายกับ AFM ทำงานได้โดยการใช้ความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าบังคับปลายเข็มที่แหลมในระดับนาโนนี้ให้เคลื่อนที่ โดยการลากผ่านไปบนพื้นผิวของวัตถุที่เป็นโลหะนำไฟฟ้า เพื่อตรวจวัดคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าของโครงสร้างที่เป็นโลหะนั้น โดยอุปกรณ์นี้มีพื้นฐานการตรวจวัดพื้นผิวมาจากกระบวนการของการลอดผ่านได้ (Tunneling) ของอิเล็กตรอนระหว่างพื้นผิวและปลายแหลมของเครื่อง STM เข็มของ STM สามารถนำไฟฟ้าได้เมื่อมีการป้อนแรงดันระหว่างปลายเข็มและวัสดุตัวอย่าง ที่ปลายเข็มมีประจุเพียงเล็กน้อย เมื่อเลื่อนปลายเข็มเข้าหาผิวของวัสดุตัวอย่างในระยะประมาณ 1 นาโนเมตร อิเล็กตรอนจะกระโดดข้ามช่องว่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุตัวอย่างทำให้สามารถวัดกระแสและสร้างภาพของพื้นผิวได้ เครื่อง STM ใช้ได้กับวัสดุที่นำไฟฟ้า



รูปที่ 7.8



l. 2001

3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน  
 การตรวจสอบวัตถุแทนแสง  
 ความยาวคลื่นแสงถึง 100  
 กำลังขยายและการแจกแจง  
 รายละเอียดของวัตถุที่มีขนาด  
 แสงช่วยแจกแจงรายละเอียด  
 กำลังขยายสูงมากถึง 500,  
 electron microscope (TEM) และ Scanning electron microscope (SEM)

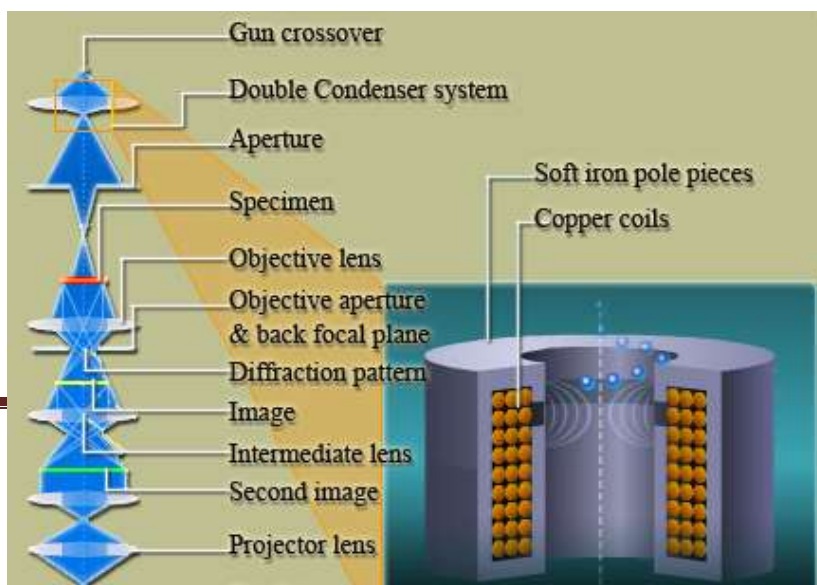
อิเล็กตรอนพลังงานสูงใน  
 กล้องจุลทรรศน์นั้นสั้นกว่า  
 การทำให้ประสิทธิภาพของ  
 แสง โดยสามารถแยก  
 ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบ  
 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนมี  
 ได้แก่ Transmission

3.1 กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบาง ซึ่งตัวอย่างถูกเตรียมโดยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนั่นเอง เครื่อง TEM เหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในตัวอย่างเช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะเยื่อหุ้มเซลล์ ผนังเซลล์ เป็นต้น ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่น ๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก กำลังขยายสูงสุดประมาณ 0.1 นาโนเมตร

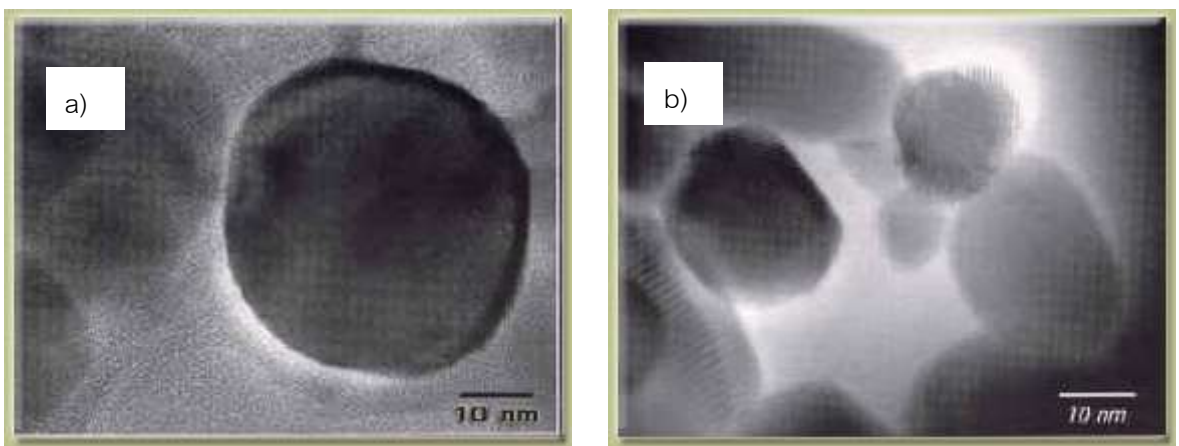
รูปที่ 7.9 กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) ที่มา  
Hiroyuki Fujita, et al. 2001

### หลักการทำงานของกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM)

TEM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบโดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างที่ต้องการศึกษา (Specimen) ตัวอย่างที่ต้องการศึกษาจะต้องมีลักษณะแบนและบางมาก (บ่อยครั้งที่พบว่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1-100 นาโนเมตร) จากนั้นจะเกิดการกระเจิงของอนุภาค และเมื่ออิเล็กตรอนทะลุผ่านตัวอย่างไป จะถูกปรับโฟกัสของภาพโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่ขยายภาพเพื่อให้ได้รายละเอียดมากที่สุด จากนั้นทำการขยายภาพด้วยเลนส์ทอดภาพไปสู่จอรับ (Projector lens) และปรับโฟกัสของลำอนุภาคอิเล็กตรอนให้ยาวพอดีที่จะปรากฏบนฉากเรืองแสง ในที่สุดจะเกิดการสร้างภาพขึ้นมาได้



รูปที่ 7.10 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ที่มา Hiroyuki Fujita, et al. 2001



รูปที่ 7.11 a) ภาพ TEM ของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) และ b) ภาพ TEM อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ( $\text{ZnO}$ ) ที่มา Hiroyuki Fujita, et al. 2001

3.2 กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นต้องเตรียมตัวอย่างให้มีขนาดบางเท่ากับเมื่อดูด้วยเครื่อง TEM ก็ได้ เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านชิ้นงานตัวอย่าง การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM จะเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาพื้นฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวตัวอย่างเช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

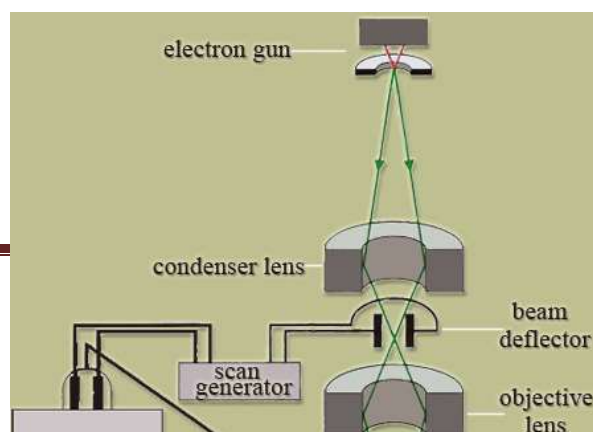
ข้อดีของเครื่อง SEM เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง TEM คือภาพโครงสร้างที่เห็นจากเครื่อง SEM จะเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ ในขณะที่ภาพจากเครื่อง TEM จะให้ภาพลักษณะ 2 มิติ อีกทั้งวิธีการใช้งานเครื่อง SEM จะมีความรวดเร็วและใช้งานง่ายกว่าเครื่อง TEM มาก



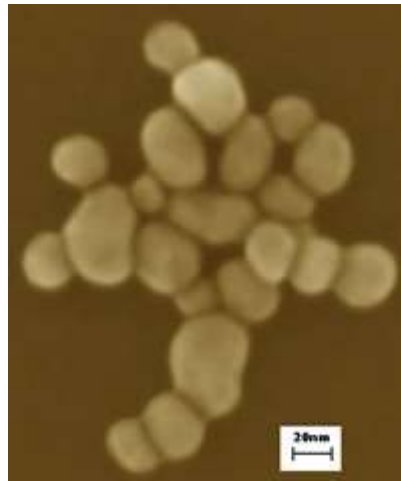
รูปที่ 7.12 กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ที่มา Hiroyuki Fujita, et al. 2001

### หลักการการทำงานของกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

SEM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยใช้เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ปรับลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกส่องกราดลงบนชิ้นงาน ทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย



รูปที่ 7.13 หลักการทำงานและส่วนประกอบของกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) ที่มา Hiroyuki Fujita, et al. 2001



รูปที่ 7.14 อนุภาคนาโนทองคำวิเคราะห้ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่มา Marko U., 2002

- **หุ่นยนต์นาโน (Nanorobot)** คือหุ่นยนต์หรือเครื่องจักรกลในระดับนาโนเมตรซึ่งอาจสามารถจัดการกับอะตอมหรือโมเลกุลแต่ละตัว รวบรวมข้อมูลและทำวัสดุใหม่หรือสำเนาตัวเอง โปรตีนเป็นเครื่องจักรกลนาโนหรือหุ่นยนต์นาโนที่นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรนาโนได้ให้ความสนใจเป็นพิเศษ เพราะโปรตีนเป็นโมเลกุลที่มีชีวิตอยู่ในสิ่งมีชีวิตทุกชนิด ควบคุมการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น เช่น การเผาผลาญอาหาร การกำจัดสิ่งแปลกปลอม ความน่าสนใจอีกอย่างหนึ่งของโปรตีนคือความสามารถในการประกอบตัวเองได้ (Self assembly) มีผู้ทดลองแยกไรโบโซม (Ribosome) ซึ่งเป็นอวัยวะหนึ่งในเซลล์ทำหน้าที่ผลิตโปรตีนออกเป็นโมเลกุลย่อย ๆ ซึ่งประกอบด้วยโปรตีนถึง 50 ชนิดแล้วนำมาผสมรวมกันใหม่ในหลอดทดลอง ผลที่ได้คือโมเลกุลย่อย ๆ เหล่านี้รวมกันเองจนกลายเป็นไรโบโซมเหมือนเดิม ความสามารถในการประกอบตัวเองนี้เป็นสิ่งสำคัญที่เทคโนโลยีนาโนที่สร้างโดยมนุษย์

จะต้องมี เพราะเป็นพื้นฐานสำคัญที่ทำให้หุ่นยนต์/เครื่องจักรกลนาโนมีราคาถูกลงในขั้นตอนการผลิต นอกจากความสามารถในการประกอบตัวเองได้แล้ว ความสามารถในการสำเนาตัวเอง (Self replication) หรือขยายพันธุ์เป็นสิ่งที่หุ่นยนต์นาโนสามารถทำได้ ได้มีผู้ลองแยก RNA ออกจากเซลล์ใส่ในหลอดทดลอง แล้วใส่วัตถุดิบที่จำเป็นต่อการสร้าง RNA ลงไป จากนั้นนำเอนไซม์ที่ช่วยในการสร้าง RNA ลงไปด้วย ผลก็คือ RNA ที่จับคู่กันอยู่ เริ่มแยกออกจากกันและเอนไซม์ที่ใส่ลงไปจะค่อย ๆ นำเอาวัตถุดิบมาสร้างคู่ของ RNA ที่อยู่โดดเดี่ยวขึ้นมาใหม่เมื่อได้ RNA ที่เป็นคู่กันแล้วมันจะแยกออกจากกันอีก แล้วเอนไซม์ก็จะนำวัตถุดิบมาสร้างคู่ของมันอีก ทำซ้ำอยู่อย่างนี้จนกระทั่งวัตถุดิบที่ใช้ในการสร้าง RNA หมด จะเห็นว่า การสำเนาตัวเองหรือการขยายพันธุ์สามารถเกิดขึ้นได้นอกเซลล์ของสิ่งมีชีวิต และเป็นกลไกที่มนุษย์สามารถออกแบบให้เกิดขึ้นกับเทคโนโลยีนาโนได้ ในแง่ของเทคโนโลยีนาโนโปรตีนเป็นหุ่นยนต์นาโนที่ได้รับคำสั่งให้ทำงานตามที่มอบหมาย โดยมีระบบพันธุกรรมหรือ DNA เป็นตัวควบคุมการทำงาน เทคโนโลยีนาโนจึงมีความน่าสนใจที่มีการสร้างระบบควบคุมคล้ายกับ DNA เพื่อควบคุมหุ่นยนต์นาโนที่มนุษย์สร้างขึ้นที่เรียกว่านาโนคอมพิวเตอร์ (Nanocomputer) โดยนาโนคอมพิวเตอร์จะเป็นส่วนสมองของหุ่นยนต์นาโนที่มนุษย์สร้างขึ้นเพื่อควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์นาโน

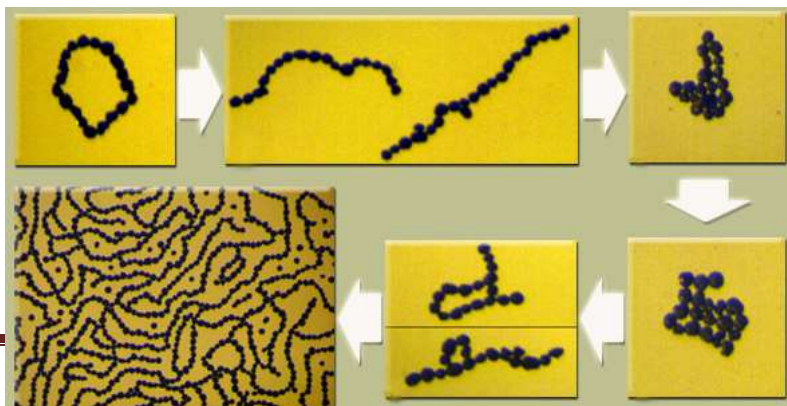


หุ่นยนต์นาโนกำลังซ่อมแซมปลายประสาท



DNA ทำหน้าที่เป็น Software ของสิ่งมีชีวิต

รูปที่ 7.15 หุ่นยนต์นาโน ที่มา Nanotechnology: <http://www.wildirisdesign.com/nano/>

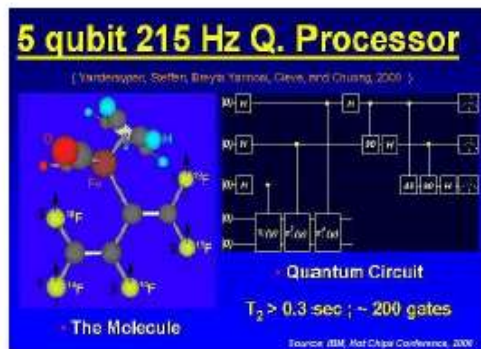




รูปที่ 7.16 อนุภาคนาโนแม่เหล็ก ที่มา Nanotechnology: <http://www.wildirisdesign.com/nano/>

การสังเคราะห์โดยจัดวางโมเลกุลอย่างเป็นระเบียบได้ด้วยตนเองนี้เป็นวิธีการผลิตโครงสร้างนาโนแบบจากล่างขึ้นบน (Bottom-up) โดยการประกอบตัวเองได้ ตามแนวคิดพื้นฐานของโครงสร้างที่เกิดการรวมตัวกันอย่างเสถียรได้ โดยปราศจากการสร้างพันธะโควาเลนต์ โดยที่โครงสร้างนาโนนั้นจะเกิดการรวมตัวเข้าด้วยกันจากแรงยึดเหนี่ยวแบบไอออนิก (Ionic interactions) พันธะไฮโดรเจน พันธะที่เกิดจากการใกล้ชิดกันมาก ๆ ของอะตอม (Dispersion forces) พันธะโคออร์ดิเนชันหรือพันธะเดทีฟ (Coordination or dative bond) แรงและพลังงานที่เกิดจากการไม่ชอบน้ำจากส่วนต่าง ๆ ของโมเลกุล (Hydrophobic effects) เป็นต้น วิธีการนี้จะเป็นการนำอะตอมหรือโมเลกุลวางลงไปยังพื้นผิวหรือโครงสร้างนาโน แล้วโมเลกุลนั้นจะเรียงตัวในตำแหน่งที่ต้องการได้เอง ทั้งนี้การรวมตัวกันเป็นไปเพื่อลดปริมาณระดับพลังงานโดยรวมให้อยู่ในระดับต่ำที่สุด ข้อได้เปรียบสำคัญของการผลิตโครงสร้างโมเลกุลด้วยวิธีการนี้คือสามารถสร้างโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ได้ ดังนั้นวิธีการนี้จึงมีแนวโน้มที่จะเป็นวิธีการใหม่ในการผลิตโครงสร้างระดับนาโนขนาดใหญ่ เช่น หน่วยความจำและหน่วยประมวลผลของคอมพิวเตอร์

- **ควอนตัมคอมพิวเตอร์ (Quantum Computer)** เป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ปฏิกิริยาทางกลศาสตร์ควอนตัมในการเข้าประมวลรหัสข้อมูลในอะตอม ถึงแม้ในปัจจุบันนี้จะยังไม่มีควอนตัมคอมพิวเตอร์แต่แบบจำลองของควอนตัมคอมพิวเตอร์ที่เสนอไว้สามารถประมวลผลข้อมูลเร็วกว่าซูเปอร์คอมพิวเตอร์ (Supercomputer) ที่มีอยู่ในปัจจุบันเป็นพันล้านเท่า



รูปที่ 7.17 ควอนตัมคอมพิวเตอร์ ที่มา Nanotechnology: <http://www.wildirisdesign.com/nano/>

## คำถามท้ายบท

1. ข้อแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์อนุภาคนาโนด้วยเครื่อง AFM และ STM คืออะไร
2. เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์อนุภาคนาโนมีอะไรบ้าง
3. นาโนลิโทกราฟีคือเทคโนโลยีนาโนชนิดใด
4. จงอธิบายหลักการทำงานของกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)
5. จงอธิบายลักษณะการเตรียมตัวอย่างที่ต้องการศึกษาโครงสร้างอนุภาคนาโนด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

### ส่วนที่ 3 การประยุกต์ใช้งานผลิตภัณฑ์วัสดุนาโน

#### Part 3 (Applications of Nano-products)

- วัตถุประสงค์
1. เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์จากวัสดุนาโนโลหะ
  2. เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์จากวัสดุนาโนเซรามิก
  3. เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์จากวัสดุนาโนอิเล็กทรอนิกส์
  4. เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์จากวัสดุนาโนพอลิเมอร์
  5. เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์จากวัสดุนาโนคอมพอสิต
  6. เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์จากวัสดุชีวภาพนาโนสำหรับการใช้งานทางการแพทย์
  7. เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ จากวัสดุนาโน

## บทที่ 8

### วัสดุนาโนโลหะ (Nanometallic materials)

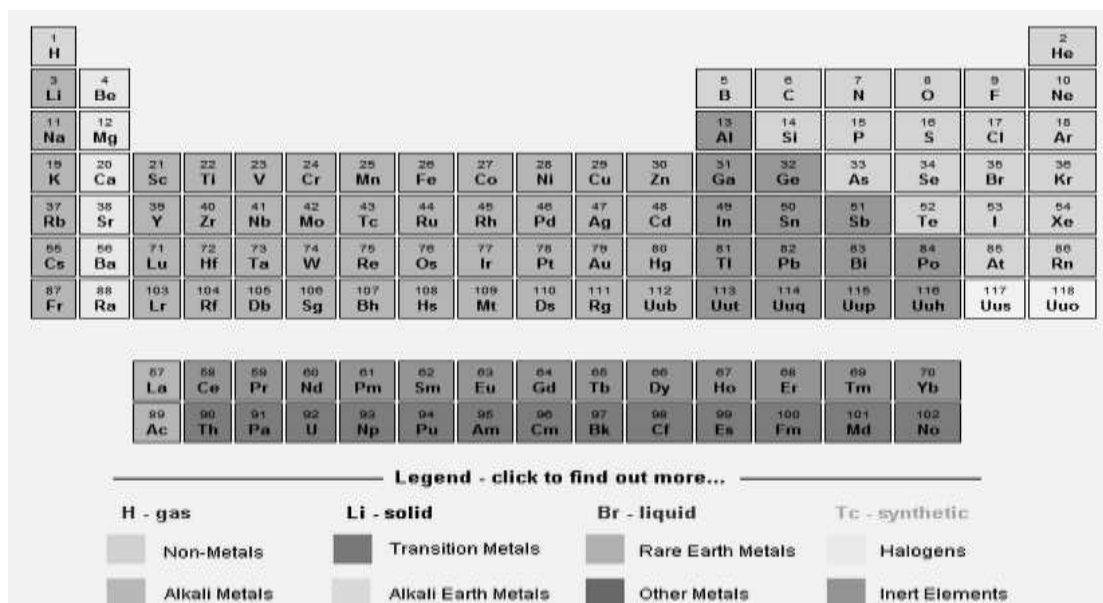
วัสดุนาโนโลหะ (Nanometal) สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ วัสดุนาโนโลหะบริสุทธิ์ (Nanometal) และวัสดุนาโนโลหะผสม (Nanometal Alloys) (Callister, 2007)

1. วัสดุนาโนโลหะบริสุทธิ์ คือ สสารที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี โครงสร้างภายในโมเลกุลของโลหะจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโลหะ (Metallic Bonding) และมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระทำให้โลหะสามารถนำไฟฟ้าได้ดี โลหะอาจประกอบขึ้นจากธาตุโลหะชนิด

เดี่ยวที่เรียกว่าโลหะบริสุทธิ์ โดยธาตุที่อยู่ในตารางธาตุส่วนใหญ่ที่อยู่ทางด้านซ้ายของตารางจะเป็นธาตุโลหะเช่น เหล็ก ทอง เงิน ทองแดง ตะกั่ว ผิวของโลหะจะมีความมันวาวเมื่อถูกขัดเรียบและมีลักษณะโครงสร้างที่แข็งแรงจึงเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในงานด้านโครงสร้างต่าง ๆ

2. วัสดุนาโนโลหะผสมหรือนาโนอัลลอยด์คือโลหะที่ประกอบด้วยธาตุโลหะสองชนิดหรือมากกว่าสองชนิดขึ้นไปประกอบอยู่ด้วยได้ ตัวอย่างเช่น ทองเหลือง เหล็กกล้า โลหะบัดกรี เนื่องจากโลหะผสมเกิดจากการผสมกันของธาตุทำให้สมบัติของโลหะผสมนั้นแตกต่างจากโลหะบริสุทธิ์

**โลหะและอัลลอยด์ (Metal and Alloy)**  
โลหะ (Metal) คือ วัสดุที่ประกอบไปด้วยธาตุโลหะที่มีอิเล็กตรอนอิสระประกอบอยู่ในอะตอมจำนวนมาก ทำให้มีสมบัติการนำไฟฟ้าดี ผิวโลหะที่ขัดเรียบจะมีความมันวาว และแข็งแรงทนทาน

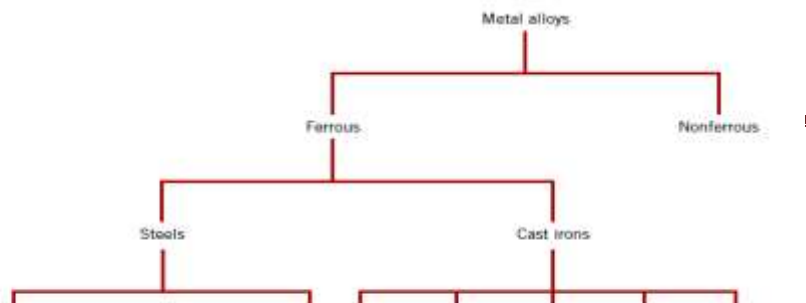


รูปที่ 8.1 ตารางธาตุ

อัลลอยด์ (Alloy) หรือโลหะอัลลอยด์ (Metal Alloy) คือ วัสดุที่ประกอบด้วยธาตุโลหะอย่างน้อย 1 ชนิดขึ้นไป โลหะอัลลอยด์เป็นวัสดุที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ เนื่องจากมีความแข็งแรง ทนทาน ทำให้มีอายุการใช้งานยาวนาน

**ประเภทของโลหะอัลลอยด์ (Metal Alloy)**

โลหื่อดังกล่าวนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ โลหะกลุ่มเหล็ก (Ferrous) และโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Nonferrous) (Callister, 2007)



รูปที่ 8.2 ประเภทของโลหะอัลลอยด์ (Metal alloy) ที่มา Callister, 2007

### กระบวนการขึ้นรูปโลหะมีหลายวิธีดังนี้

1. การหล่อขึ้นรูป (Casting)
2. การดัดรีด (Rolling)
3. การทุบหรือตีขึ้นรูป (Forging)
4. การอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion)
5. การดึง (Drawing)
6. การขึ้นรูปแบบผงโลหะ (Powder metallurgy and molding)

แต่ละวิธีดังกล่าวข้างต้นมีรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิตแตกต่างกันเช่น รูปร่าง ขนาดของผลิตภัณฑ์ ความแข็งแรง ความทนทานการใช้งานตามต้องการ ชนิดของวัตถุดิบที่ต้องการขึ้นรูป แต่อย่างไรก็ตามสำหรับการขึ้นรูปวัสดุนาโนโลหะจะเน้นที่การเตรียมผงโลหะให้มีขนาดเล็กในระดับนาโนหรือการทำให้แตกตัวในรูปของไอออน เพื่อให้เหมาะในการขึ้นรูปโดยการอัดผงโลหะหรือการเคลือบผิวแบบการตกตะกอนไอออน

### กระบวนการผลิตผงโลหะมี 3 วิธีคือ

#### 1. วิธีทางกล (Mechanical method)

1.1 การตบแต่ง (Machining) โดยการใช้เครื่องกัดเนื้อโลหะให้เป็นแตกเศษเล็ก ๆ นิยมใช้กับพวกโลหะผสมต่าง ๆ หรืออาจทำโดยการกลิ้งแล้วบดอัดด้วยลูกบดอีกครั้ง

1.2 การบด (Milling) โดยการบดแตก การกัด การกลิ้ง การชูด การเจาะ หรือการตัด สำหรับโลหะที่มีความเปราะมาก ๆ

1.3 Shoting โดยการหลอมโลหะให้เหลวแล้วเทผ่านตะแกรงตาถี่ที่ทนความร้อนได้สูงลงไปใต้น้ำ จะได้ผงโลหะขนาดใหญ่ ยาวรี มีขนาดไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลา ระยะทาง และขนาดของรูตะแกรง วิธีนี้ใช้ได้กับโลหะเหล็กเกือบทุกชนิด

1.4 การทำแกรนูล (Granulation) โดยการนำโลหะที่หลอมเหลวแล้วเทลงในภาชนะแล้วทำการกวนอย่างรวดเร็วโดยใช้ความเร็วในการกวนสูงจะทำให้โลหะแยกตัวออกมาอย่างเป็นอิสระต่อกัน จนแข็งตัวเป็นวิธีที่ไม่นิยมใช้

1.5 Atomization เป็นวิธีการพ่นโลหะเหลวเหมาะสำหรับโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำๆ เช่น ดีบุก ตะกั่ว สังกะสี อะลูมิเนียม เป็นที่นิยมใช้มากที่สุดวิธีหนึ่ง

2. วิธีทางเคมี (Reduction method) เป็นวิธีทางเคมีที่ทำให้เกิดการตกตะกอนจากปฏิกิริยาทางเคมี นิยมใช้วิธีนี้กับพวกโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ เช่น เหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) ทังสเทนไดออกไซด์ ( $WO_3$ ) โมลิบดีนัมไตรออกไซด์ ( $MoO_3$ ) ผลจากการรีดักชันจะได้ตะกอนผงที่มีลักษณะหยาบ

3. วิธีทางไฟฟ้า (Electrolytic deposition method) เป็นกรรมวิธีทางไฟฟ้าโดยการทำให้เกิดการแตกตัวของโลหะด้วยไฟฟ้า ใช้ได้ดีกับโลหะบริสุทธิ์ เช่น เหล็ก เงิน ทองแดง ตัวอย่างเช่น การแตกตัวของโลหะเหล็ก ทำได้โดยการนำแผ่นเหล็กแขวนไว้ที่ขั้วบวก (+) ใช้แผ่นสแตนเลสแขวนไว้ที่ขั้วลบ (-) หลังจากปล่อยกระแสเข้าไปนานประมาณ 48 ชั่วโมง จะเกิดสภาวะการแตกตัวของแผ่นเหล็กที่มีขั้วบวกมาปรากฏอยู่ที่ขั้วลบ ได้ความหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร เมื่อนำตะกอนนี้มาล้างและกรองด้วยตะแกรงอีกครั้งจะได้ผงที่มีสภาพเปราะ ซึ่งต้องนำไปอบอ่อนเพื่อเพิ่มความเหนียวก่อนการนำไปใช้ ขนาดของผงที่ได้จะมีขนาดเล็กประมาณ 0.1 - 30 ไมโครเมตร

กระบวนการขึ้นรูปแบบผงโลหะ (Powder metallurgy and molding, PM) คือกรรมวิธีการผลิตที่ได้รับการพัฒนาอย่างสูงสำหรับการผลิตชิ้นส่วนโลหะทั้งในและนอกกลุ่มเหล็กที่มีคุณภาพดี โดยขั้นตอนการผลิตสำหรับโลหะผงโดยทั่วไปประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือ

1. การผลิตและการเตรียมผงโลหะ โดยวิธีทางกล, ทางฟิสิกส์, และทางเคมี
2. การผสมผงโลหะ เป็นขั้นตอนการผสมผงโลหะเข้ากับ สารหล่อลื่น, สารเพิ่มการยึดเกาะหรือผงโลหะชนิดอื่น

3. การอัดขึ้นรูปผงโลหะ เป็นการอัดขึ้นรูปผงโลหะที่ผสมแล้วในแบบพิมพ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกว่า Green Compact ผงโลหะจะยึดเกาะตัวกันจนมีความแข็งแรง (Green Strength) ที่มากพอสำหรับการขนส่งเคลื่อนย้ายหรือแม้กระทั่งทนต่อกระบวนการทางกล (Machining) ได้

4. การเผาผนึกอนุภาคเป็นการเผาชิ้นงานที่ขึ้นรูปไว้เรียบร้อยแล้ว Green Compact ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของผงโลหะ โดยทั่วไปจะต้องมีการควบคุมบรรยากาศภายในเตาเพื่อยับยั้งไม่ให้เกิด

ปฏิกิริยาเคมี ผงโลหะก็จะเชื่อมติดกันที่อุณหภูมินั้น เนื่องจากพลังงานที่เกิดขึ้นจากการลดลงของพื้นที่ผิวของผงโลหะ ตามหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยชิ้นงานที่ได้จะมีความแข็งแรงมากพอที่จะนำไปใช้งานต่อไป

รูปที่ 8.3 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานแบบผงโลหะ ที่มา Nanotechnology the Manufacturing of 21st Century: <http://www.engin.swarthmore.edu/~manzivino/Nanotechnology1.htm>

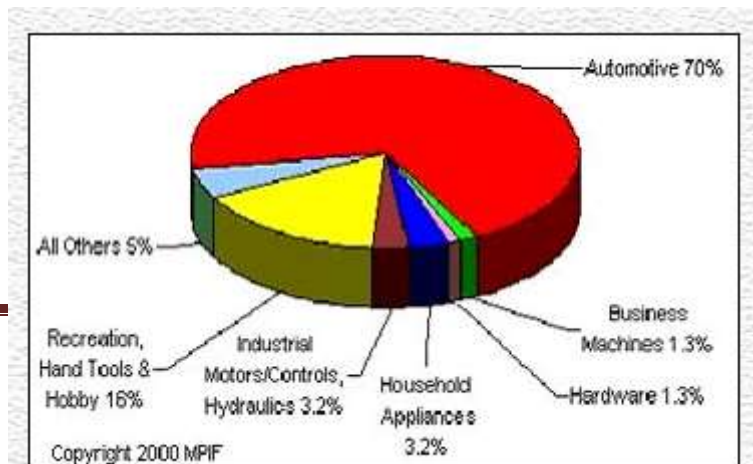
ภายหลังการเผาผนึกอนุภาค ชิ้นงานที่ได้สามารถนำไปใช้งานได้ทันทีหรืออาจจะต้องนำไปผ่านกระบวนการทางกล (Machining) อีกเพียงเล็กน้อย ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่ากรรมวิธีการขึ้นรูปทางผงโลหะนี้ สามารถผลิตชิ้นงานขึ้นได้โดยไม่เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุ (Chipless) หรือเกิดการสูญเสียในอัตราที่ต่ำมาก โดยทั่วไป ประสิทธิภาพ (Yielding) ของกระบวนการโลหะผงจะมีค่าประมาณร้อยละ 97 ซึ่งจัดได้ว่าเป็นกระบวนการผลิตที่มีประสิทธิภาพอย่างยิ่งต่อการอนุรักษ์พลังงานและวัสดุดิบ สามารถใช้ในการผลิตชิ้นงานที่มีขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ได้ดี มีรูปร่างง่ายหรือรูปร่างซับซ้อนก็ได้ ชิ้นงานที่ผลิตจากกรรมวิธีทางผงโลหะ โดยทั่วไปมักจะมีขนาดไม่เกิน 2.5 กิโลกรัม แต่ในบางกรณีเครื่องจักรก็อาจสามารถผลิตชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ได้ถึง 16 กิโลกรัม ซึ่งโดยทั่วไปชิ้นงานที่ผลิตด้วยกรรมวิธีทางผงโลหะมักจะเป็นชิ้นส่วนรถยนต์ ชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า ชิ้นส่วนทางการแพทย์ และชิ้นส่วนทางทันตกรรม เป็นต้น

**ข้อดีของการขึ้นรูปวัสดุนาโนโลหะแบบผงโลหะ**

1. ลดการใช้วิธีการทางกล
2. ลดปริมาณเศษวัสดุที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต
3. สามารถควบคุมการผสมธาตุเจือต่าง ๆ ได้อย่างหลากหลายตามความต้องการ
4. ชิ้นงานที่ผลิตได้มีสภาพผิวที่ดีเยี่ยม
5. ชิ้นงานที่ได้สามารถนำไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อเสริมคุณสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงหรือความสามารถในการต้านทานการสึกหรอ
6. ชิ้นงานที่ผลิตได้สามารถควบคุมขนาดรูปร่างภายในโครงสร้างเพื่อการประยุกต์ใช้งานด้านผลิตภัณฑ์ตัวกรองและ Self-Lubricant Bearing
7. สามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ในขณะที่การผลิตแบบอื่น ๆ ไม่สามารถทำได้
8. เหมาะสำหรับการผลิตที่ต้องการอัตราการผลิตที่สูงมาก ๆ
9. ชิ้นงานที่ผลิตได้จากกรรมวิธีนี้มีสมบัติด้านต่าง ๆ อย่างสม่ำเสมอ
10. ลดอุณหภูมิการเผาผนึกอนุภาคด้วยความร้อนโดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง
11. ต้นทุนการผลิตมีความเหมาะสม

**อนาคตของอุตสาหกรรมโลหะผง**

อุตสาหกรรมโลหะผงมีอัตราการเติบโตที่สูงมากในช่วงเวลาที่ผ่านมาและในอนาคต ทั้งนี้เนื่องมาจากการพัฒนาด้านเทคโนโลยีของการผลิตโลหะผง เช่น Hot Isostatic Pressing (HIP), Cold Isostatic Pressing (CIP) และ Powder Injection Molding เป็นต้น ซึ่งทำให้ชิ้นส่วนที่ผลิตได้มีสมบัติที่เหมาะสมและตอบสนองต่อความต้องการใช้งานที่หลากหลายสำหรับอุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่น ๆ ได้ดีที่นับวันจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ อย่างไม่หยุดยั้ง ในขณะที่ด้วยกรรมวิธีอื่น ๆ ไม่สามารถตอบสนองได้หรือสามารถตอบสนองได้ในเชิงสมบัติแต่ก็ไม่เหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์ดังกล่าวข้างต้น อุตสาหกรรมโลหะผงจึงนับได้ว่าเป็นอีกหนึ่งอุตสาหกรรมที่สามารถแข่งขันได้ในตลาดและมีศักยภาพอย่างสูงในการแข่งขันกับโลกธุรกิจในปัจจุบัน





รูปที่ 8.4 ส่วนแบ่งร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปแบบผงโลหะ ที่มา Nanotechnology the Manufacturing of 21st Century: <http://www.engin.swarthmore.edu/~manzivino/Nanotechnology1.htm>

## คำถามท้ายบท

1. Green compact ของวัสดุโนนโลหะคืออะไร
2. วิธีการเตรียมผงนาโนโลหะทำได้อย่างไรบ้าง
3. ข้อดีของการผลิตวัสดุโนนโลหะด้วยผงโลหะคืออะไร
4. จงยกตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูปวัสดุโนนโลหะ
5. พันธะชนิดใดที่ยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของวัสดุโนนโลหะ

## บทที่ 9

### วัสดุโนนเซรามิก (Nanoceramic materials)

วัสดุโนนเซรามิกประกอบด้วยสารประกอบอนินทรีย์ที่เกิดจากพันธะปฐมภูมิ (Primary bond) ชนิดพันธะไอออนิก (Ionic bond) และพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) แต่โดยส่วนใหญ่ที่พบคือพันธะไอออนิก (Ionic bond) ตัวอย่างเช่น อะลูมินา เซอร์โคเนีย เพียโซอิเล็กทริก และวัสดุโนนเซรามิกที่มีพันธะยึดเหนี่ยวชนิดพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ในบางกลุ่มของผลิตภัณฑ์เซรามิก เช่น ซิลิกา สารกึ่งตัวนำ (Semiconductors) เซรามิกชนิดสารประกอบไนไตรด์ บอไรด์ คาร์ไบด์ ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{WC}$ ) รวมทั้งเพชรและแกรไฟต์ซึ่งจัดเป็นผลิตภัณฑ์ในกลุ่มเซรามิกเช่นเดียวกันและหากพิจารณาธาตุตามตารางธาตุที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเซรามิก แก้ว สารกึ่งตัวนำ พบว่ามีเป็นจำนวนมากที่

เหมาะสำหรับการใช้งานหลากหลายประเภท โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์เซรามิกแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลักคือ เซรามิกดั้งเดิมหรือเซรามิกพื้นฐาน (Conventional ceramic) และเซรามิกขั้นสูงหรือเซรามิกสมัยใหม่ (Advanced ceramic หรือ Fine ceramic หรือ Engineering ceramic) เซรามิกดั้งเดิมมีหลายชนิด ได้แก่ เครื่องปั้นดินเผา (Clay product) แก้ว (Glass) ซีเมนต์ (Cement) วัสดุทนไฟ (Refractory) วัสดุขัดถู (Abrasives) เซรามิกขั้นสูงหรือเซรามิกสมัยใหม่มีหลายชนิดเช่นกัน โดยการแบ่งตามหน้าที่การใช้งาน เช่น เซนเซอร์ (Sensor) สารตัวนำยวดยิ่ง (Superconductor) วัสดุเซรามิกแม่เหล็ก (Magnetic ceramic) วัสดุเซรามิกนำแสง (Optical ceramic) ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ฉนวนความร้อน (Thermal insulation) เซรามิกยานยนต์และอากาศยาน (Automotive and aircraft ceramic) เซรามิกชีวภาพ (Bioceramic)

**ผลิตภัณฑ์กลุ่มเซรามิกสมัยใหม่หรือเซรามิกขั้นสูง** จำแนกตามหน้าที่การใช้ประโยชน์และสมบัติ ด้านต่าง ๆ ได้ดังนี้

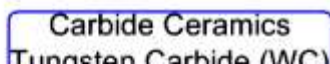
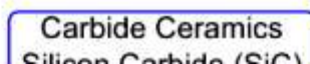
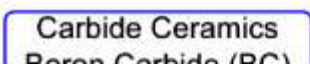
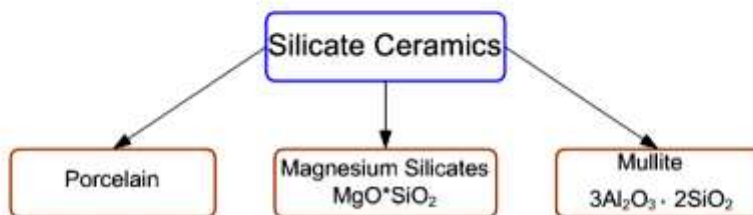
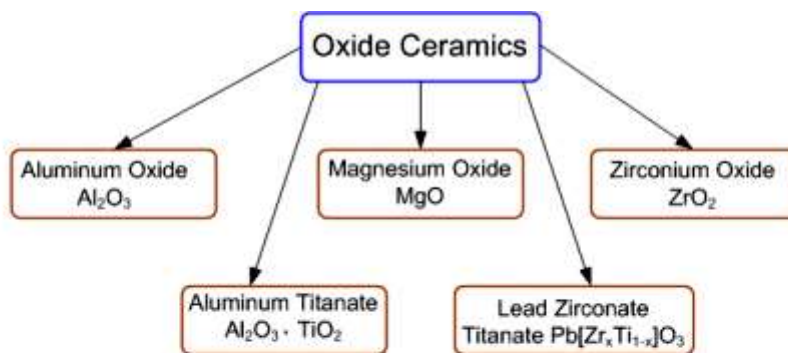
1. **ผลิตภัณฑ์เซรามิกนิวเคลียร์ (Nuclear ceramics)** ประกอบด้วยวัสดุคิบนิวเคลียร์ เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ เช่น แร่ยูเรเนียมออกไซด์ (UO<sub>x</sub>) ทอเรียมออกไซด์ (ThO<sub>x</sub>) และฉนวนป้องกันรังสี (Radiation resistance) เปลือกหุ้มเตาปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear fuel cladder) ที่ผลิตจากตะกั่วออกไซด์
2. **ผลิตภัณฑ์เซรามิกทางแสง (Optical ceramics)** ประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้งานหรือมีประโยชน์ด้านแสงโดยเฉพาะเช่น เลเซอร์ ไดโอด หลอดฟลูออเรสเซนต์ เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) ไดโอดเปล่งแสง LED (Light emitting diode) รวมทั้งฉากป้องกันแสง เส้นใยแก้วนำแสง (Optic fiber) เป็นต้น
3. **ผลิตภัณฑ์เซรามิกทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก (Electrical-magnetic ceramics)** ประกอบด้วยวัสดุคิบและผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติด้านไฟฟ้าและแม่เหล็กซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากได้แก่ ตัวนำไฟฟ้าและวัสดุนำแม่เหล็กชนิดเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectrics) คาปาซิเตอร์ (Capacitors) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductors) วัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectrics) อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Memory recorder) บัตรเครดิต (Credit card) เซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ ฉนวนไฟฟ้า แอคซิวเตอร์ ซุปเปอร์คอนดักเตอร์หรือสารตัวนำยวดยิ่ง เป็นต้น
4. **ผลิตภัณฑ์เซรามิกชีวภาพและเคมี (Biological and chemical ceramics)** ประกอบด้วยวัสดุและผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติด้านเคมีและเป็นวัสดุทดแทนอวัยวะภายในร่างกายที่มีการเข้ากันได้ (Compatibility) กับร่างกาย เช่น ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite, Ca<sub>x</sub>H<sub>y</sub>PO<sub>4</sub>.yH<sub>2</sub>O) อะลูมินา ซิลิกา เซอร์โคเนีย เป็นต้น

5. **ผลิตภัณฑ์เซรามิกที่มีสมบัติทางกล (Mechanical ceramics)** ประกอบด้วยวัสดุและผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติทางกลที่ดีเช่น **ความแข็งสูง (Hardness)** ความแข็งแรงสูง (Strength) **ทนการถูกร่อน (Wear resistance)** และ**การต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion resistance)** การทนแรงกดอัด (Compressive strength) อาทิเช่น ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทางด้านเครื่องตัด เครื่องขัดที่ผลิตจากวัสดุเซรามิกกลุ่มไนไตรด์ (โบรอนไนไตรด์, ซิลิคอนไนไตรด์  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) กลุ่มคาร์ไบด์ (โบรอนคาร์ไบด์ BC, ซิลิคอนคาร์ไบด์  $\text{SiC}$ , ทังสเทนคาร์ไบด์ WC) เป็นต้น

6. **ผลิตภัณฑ์เซรามิกด้านความร้อน (Thermal ceramics)** ประกอบด้วยวัสดุและผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติด้านความร้อน เช่น **ฉนวนความร้อน (Insulator)** ชนิดเซอร์โคเนีย อะลูมินา ซิลิกา สำหรับการใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ เพื่อยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์ อิฐทนความร้อน แผ่นฉนวนความร้อนของเครื่องบิน ฉนวนความร้อนของอาคาร บ้านเรือนและสิ่งปลูกสร้าง เป็นต้น

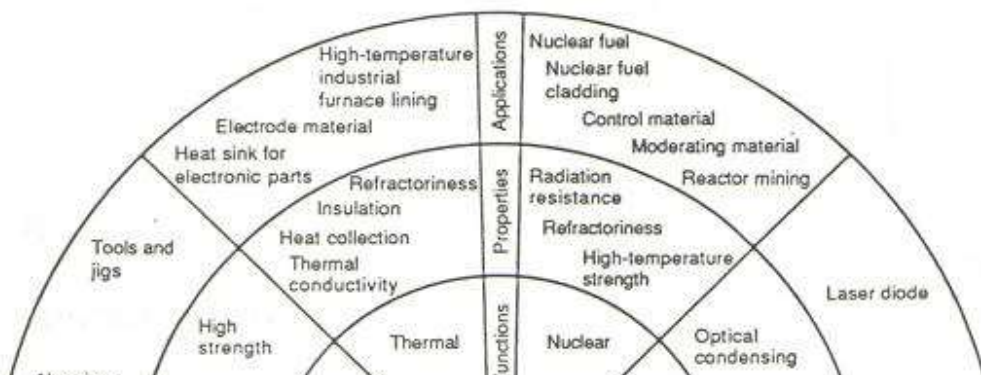
นอกจากนี้วัสดุเซรามิกยังสามารถแบ่งตามองค์ประกอบทางเคมีได้เป็น 4 ประเภทคือ

1. ออกไซด์ (Oxide) เช่น อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), แคลเซียมออกไซด์ (CaO), ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ )
2. คาร์ไบด์ (Carbide) เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC), ทังสเทนคาร์ไบด์ (WC), โบรอนคาร์ไบด์ (BC)
3. ไนไตรด์ (Nitride) เช่น ซิลิคอนไนไตรด์ ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), โบรอนไนไตรด์
4. ซิลิเกต (Silicate) เช่น โซเดียมซิลิเกต



รูปที่ 9.1 วัสดุเซรามิกที่จัดแบ่งตามองค์ประกอบทางเคมี ที่มา: Kopeliovich (General classification of ceramics, n.d.)

กล่าวโดยสรุป “เซรามิก” คือสารประกอบระหว่างธาตุโลหะและธาตุอโลหะเป็นส่วนใหญ่ ในรูปของสารประกอบออกไซด์ ไนไตรต์ คาร์ไบด์ โดยทั่วไปสมบัติขั้นพื้นฐานของวัสดุเซรามิกคือสมบัติของความเปราะ ความฉนวนไฟฟ้า ฉนวนความร้อน ทนอุณหภูมิสูงและทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมได้เป็นอย่างดี จึงทำให้เซรามิกทนทานต่อการกัดกร่อนและยังมีสมบัติทางกลที่ดี โดยพบว่าเซรามิกมีความแข็งแรงสูง แต่มีข้อเสียที่สำคัญคือเปราะ แตกหักง่าย เนื่องจากมีความเหนียวต่ำ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เซรามิกแบ่งกลุ่มตามหน้าที่การใช้งาน สมบัติวัสดุ และการประยุกต์ใช้งานได้ดังรูป 9.2



**รูปที่ 9.2** ผลิตภัณฑ์เซรามิกสมัยใหม่จำแนกตามประโยชน์การใช้งาน ที่มา Solomon Musikant, Courtesy of the Fine Ceramics Office, Ministry of International Trade and Industry, Tokyo

วัสดุโนเซรามิกสามารถเตรียมได้จากหลายวิธี ได้แก่ กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel) วิธีการตกตะกอน (Precipitation) วิธีอัดขึ้นรูป (Pressing) วิธีการขึ้นรูปแบบดั้งเดิม (Conventional process) วิธีขึ้นรูปแบบเส้นใยที่เรียกว่าอิเล็กโตรสปินนิง (Fiber forming, electrospinning) และการเคลือบผิวโดยเทคนิคต่างๆ ประโยชน์ของวัสดุโนเซรามิกมีมากมายหลายประการโดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำวัสดุโนเซรามิกมาทำการขึ้นรูป อบแห้ง และผ่านกระบวนการทางความร้อนที่เรียกว่าการเผาผนึกอนุภาคหรือซินเตอร์ริง (Sintering) ที่สามารถผนึกอนุภาคด้วยความร้อนจนได้โครงสร้างที่มีเนื้อแน่น (Densification) ได้ที่อุณหภูมิต่ำ ความเหนียว (Ductility) เพิ่มขึ้น มีคุณลักษณะทางกายภาพที่ดี ความแข็งแรงสูงและสมบัติด้านต่าง ๆ ดีขึ้นกว่าการใช้วัสดุเซรามิกที่มีขนาดอนุภาคโต ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี ประหยัดพลังงานการเผาผนึกอนุภาคโดยไม่ต้องใช้ความร้อนสูง

## คำถามท้ายบท

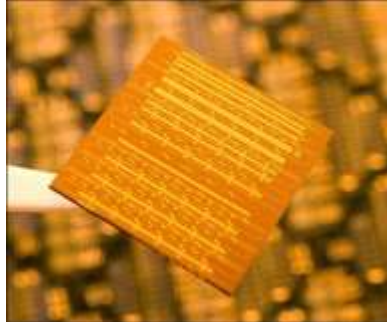
1. โครงสร้างของวัสดุนาโนเซรามิกที่แบ่งตามองค์ประกอบทางเคมีมีกี่ชนิด อะไรบ้าง
2. ข้อดีของการเลือกใช้วัสดุเซรามิกที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเป็นอย่างไร
3. วัสดุนาโนเซรามิกชีวภาพคืออะไร ยกตัวอย่างประกอบคำอธิบาย
4. กระบวนการเผาผนึกอนุภาคหรือซินเตอร์ริง (Sintering) คืออะไร
5. พันธะปฐมภูมิของวัสดุนาโนเซรามิกคือพันธะชนิดใด

## บทที่ 10

### วัสดุนาโนอิเล็กทรอนิกส์ (Nanoelectronic materials)

วัสดุนาโนอิเล็กทรอนิกส์คือ วัสดุที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่าง ๆ การพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำเนิดขึ้นเมื่อปลายปีทศวรรษ 1940 จากการประดิษฐ์ทรานซิสเตอร์ (Transistor) โดย Bardeen, Brattain, และ Shockley (ScienCentral, Inc. & The American Institute of Physics, n.d.) ทำให้เกิดการพัฒนาด้านอิเล็กทรอนิกส์อย่างต่อเนื่อง ก่อนหน้าที่จะมีการคิดค้นอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ขึ้นมาใช้งาน แผงวงจรไฟฟ้าทั้งหมดยังคงผลิตจากวัสดุที่เป็นโลหะซึ่งมีหลอดแก้วสุญญากาศ (Vacuum Tube) ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของอุปกรณ์ไฟฟ้าทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีหลอดแก้วสุญญากาศ เช่น วิทยุ คอมพิวเตอร์ และโทรทัศน์ ยังคงมีขนาดใหญ่กว่าในปัจจุบันมาก โดยการนำซิลิกอน (Silicon) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ในสถานะของแข็ง (Solid-State) และไม

โคริเล็กทรอนิกส์ที่นำมาใช้ในการผลิตแผงวงจรรวมหรือ IC (Integrated Circuit) ดังรูปที่ 10.1 ทำให้เกิดการพัฒนาวงจรรวมที่เพิ่มมากขึ้นร่วมกับเทคโนโลยีต่าง ๆ เช่น เทคโนโลยีนาโนที่เข้ามาช่วยในการคิดค้นและพัฒนาวงจรรวมที่เพิ่มมากขึ้นทำให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กลงจนเหลือเพียงจุดขนาดเล็กลง ๆ



รูปที่ 10.1 ซิลิคอนไอซีชิป (Silicon Chip) คือ แผงวงจรรวมชนิดวงจรรวมที่นำ

[http://news.cnet.com/i/ne/p/2005/021505laser\\_chip450x376](http://news.cnet.com/i/ne/p/2005/021505laser_chip450x376)

อย่างไรก็ตามการพัฒนาทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านวัสดุนาโนอิเล็กทรอนิกส์หรือวัสดุฉลาด (Smart Material) หมายถึง กลุ่มของวัสดุประเภทใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจในการวิจัยและพัฒนาเพราะสามารถช่วยผลักดันให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีหลายชนิดอยู่ในปัจจุบัน คำว่าวัสดุฉลาด (Smart) หมายถึง วัสดุที่มีความสามารถในการรับรู้และตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมเช่นเดียวกันกับการตอบสนองต่อสิ่งเร้าในสิ่งมีชีวิต ทั้งนี้ วัสดุฉลาด (หรือระบบฉลาด) ประกอบด้วยวัสดุที่สำคัญ 2 ประเภท คือ เซ็นเซอร์ (Sensor) บางชนิด และแอคชูเอเตอร์ (Actuator) หรืออุปกรณ์ขับเคลื่อนซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการตอบสนองและอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการปรับตัว ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

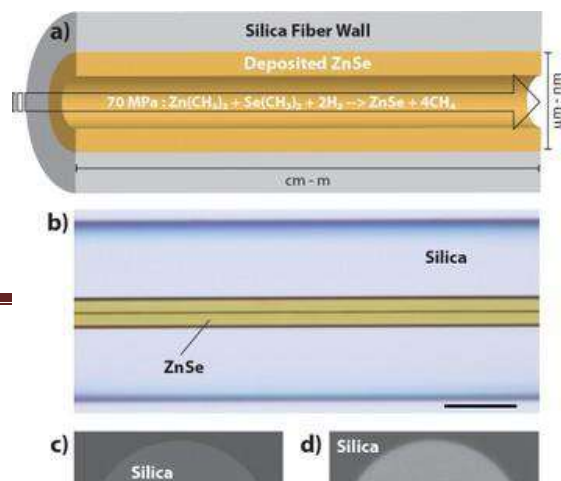
1. เซ็นเซอร์ (Sensor) สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทย่อย ได้แก่
  - 1.1 เส้นใยแก้วนำแสง (Optical Fibers)
  - 1.2 ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคหรือเมมส์ (Microelectromechanical System: MEMS)
  - 1.3 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Materials)
  - 1.4 นาโนเจนเนอเรเตอร์ (Nanogenerator)
2. ไดโอด (Diode)
3. แอคชูเอเตอร์ (Actuator) สามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทย่อย ได้แก่
  - 2.1 วัสดุอัลลอยด์จำรูป (Shape Memory Alloys) และพอลิเมอร์จำรูป (Shape Memory Polymers)
  - 2.2 เพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (Piezoelectric Ceramics)

2.3 วัสดุแมกนีโตสตริกทีฟ (Magnetostrictive Materials)

2.4 Magnetorheological Fluids

1. **เซ็นเซอร์ (Sensor) คือ** ส่วนประกอบชนิดหนึ่งในวัสดุฉลาดหรือส่วนประกอบของระบบ ได้แก่ เส้นใยแก้วนำแสง ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคหรือเมมส์ (MEMS) และวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ดังตัวอย่างต่อไปนี้

1.1 เส้นใยแก้วนำแสง (Optical Fiber) เป็นวัสดุประเภทเซรามิกชนิดหนึ่งซึ่งมีคุณสมบัติในการนำส่งสัญญาณแสง Sparks และคณะ (2011) ได้คิดค้นเส้นใยแก้วนำแสงชนิดใหม่โดยใช้ Zinc Selenide (ZnSe) ลงในบริเวณศูนย์กลางของเส้นใยแก้ว ซึ่งวัสดุดังกล่าวนอกจากจะมีความสามารถในการนำแสงได้แล้ว ยังสามารถนำมาใช้เป็นสารกึ่งตัวนำได้อีกด้วย ZnSe เป็นสารประกอบสีเหลืองอ่อน เมื่อนำมาเป็นแกนของเส้นใยแก้วนำแสงที่มีผนังเส้นใยซิลิกา (Silica Fiber Wall) ดังรูปที่ 10.2 วัสดุดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการนำแสงสูงและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับเทคโนโลยีเลเซอร์หรือเรดาร์ โดยสามารถนำมาพัฒนาใช้ในด้านต่าง ๆ เช่น อุปกรณ์ผ่าตัด หรือเลเซอร์ทางการแพทย์ เลเซอร์ทางการทหารและใช้สำหรับตรวจวัดปริมาณสารมลพิษหรือสารเคมีที่ใช้ในอาวุธชีวภาพ เป็นต้น เส้นใยแก้วนำแสงในปัจจุบันส่วนใหญ่มีแก้วเป็นแกนหลัก (Core) ซึ่งมีการจัดเรียงอะตอมภายในโมเลกุลอย่างไม่เป็นระเบียบ ในขณะที่ ZnSe มีการจัดเรียงที่เป็นระเบียบมากกว่า ทำให้สามารถนำส่งสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นที่มากกว่า เช่น ความยาวคลื่นแสงช่วง Mid-Infrared นอกจากนี้ ZnSe เป็นสารกึ่งตัวนำที่สามารถนำส่งสัญญาณแสงได้ดีกว่าซิลิกาและเมื่อนำเทคโนโลยีด้านวัสดุนาโนที่เรียกว่า High pressure chemical-deposition มาใช้ในการสร้างเส้นใยแก้วนำแสงที่มี ZnSe เป็นแกนหลักโดยมี Silica Fiber หุ้มอยู่ภายนอก ทำให้ได้เส้นใยแก้วนำแสงที่มีขนาดเล็กและยาว นอกจากนี้ประโยชน์ในการนำ ZnSe มาใช้เป็นส่วนประกอบของเส้นใยแก้วนำแสงคือ สามารถเปลี่ยนสีของแสงจากสีหนึ่งไปเป็นอีกสีหนึ่งได้โดยใช้กระบวนการ Nonlinear Frequency Conversion และสามารถนำส่งสัญญาณแสงในช่วงแสงที่นอกเหนือแสงขาวที่สามารถมองเห็นได้จนถึงช่วงแสงอินฟราเรด ซึ่งสามารถนำสมบัติดังกล่าวใช้กับอุปกรณ์ทางการแพทย์ นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดสารมลพิษหรือสารที่ก่อให้เกิดอันตรายได้โดยวัดจากค่าการดูดซับแสง

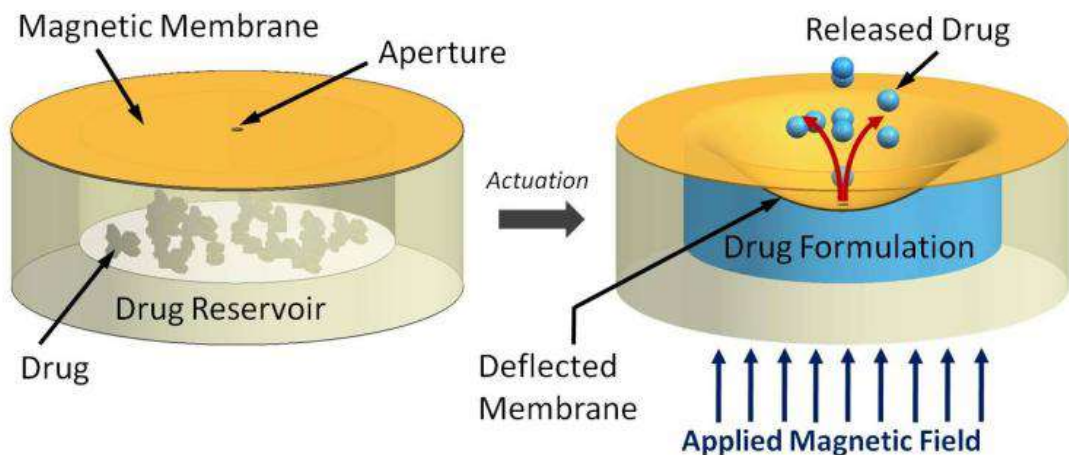




รูปที่ 10.2 ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสงที่มี ZnSe เป็นแกนหลัก ที่มา Sparks et al., 2011

### 1.2 ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคหรือเมมส์ (Microelectromechanical System: MEMS)

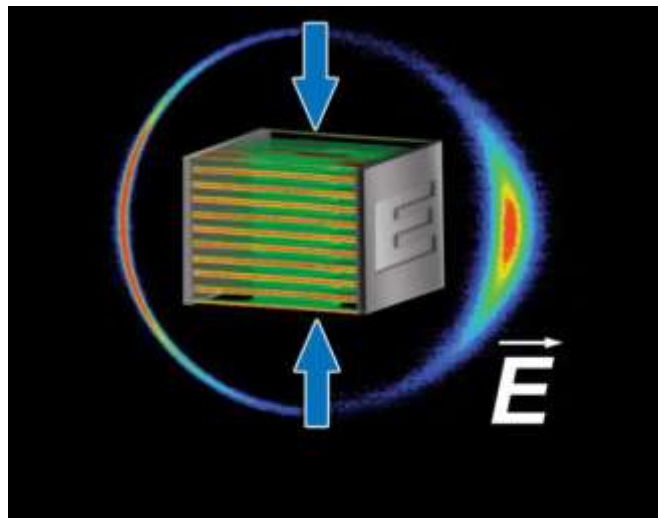
ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคหรือเมมส์ (Microelectromechanical System: MEMS) เป็นการผสมผสานระหว่างเทคโนโลยีไฟฟ้ากับเครื่องกล ระบบดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้กับหลายอุตสาหกรรมเช่น อิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งการแพทย์ ทั้งนี้ Pirmoradi และคณะ (2011) ได้นำ MEMs มาใช้เพื่อการนำส่งยารักษาโรคเบาหวานสำหรับผู้ป่วยที่สูญเสียการมองเห็น โดยฝังอุปกรณ์ดังกล่าวไว้ในดวงตาของผู้ป่วย เพื่อรักษาจอประสาทตาที่เสียหายซึ่งมีสาเหตุมาจากโรคเบาหวานซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวเรียกว่า Magnetically Controlled MEMS โดยการนำส่งยาผ่านสแนมแม่เหล็กด้านนอกและมีช่องกักเก็บยาอยู่ภายในปิดทับด้วย Elastic Magnetic Polydimethylsiloxane (Silicon) Membrane ดังรูปที่ 10.3



รูปที่ 10.3 โครงสร้างของ Magnetically Controlled MEMS ที่มา Pirmoradi et al., 2011

1.3 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Materials) เป็นวัสดุฉลาดที่ใช้ความเครียดเชิงกล (Mechanical Stress) ในการผลิตกระแสไฟฟ้า การผลิตวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจากเส้นลวดนาโนดังมีรายละเอียดต่อไปนี

1.3.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกพอลิเมอร์ (Piezoelectric Polymer) โดยทั่วไปวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Materials) ที่มีประสิทธิภาพสูงมักผลิตมาจากผลึกหรือวัสดุนาโนเซรามิก ในขณะที่วัสดุพอลิเมอร์ชนิดไม่มีขั้ว (Non-polar Polymer) จะไม่มีปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect) ซึ่งมักพบได้ในวัสดุนาโนเซรามิกและวัสดุที่มีขั้ว (Pole) เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติโพลาไรซ์ (Polarize) แต่จากรายงานการวิจัยของ Pester และคณะ (2011) ได้นำวัสดุพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วมาประกอบในวัสดุเพียโซอิเล็กทริกทำให้มีประสิทธิภาพที่ดีเนื่องจากประกอบด้วยโมเลกุลพอลิเมอร์ 2 ชนิด คือ Polystyrene และ ยาง (Rubber) ทำให้มีโครงสร้างคล้ายกับโคพอลิเมอร์ชนิดไดบล็อก (Di-block Copolymer) ดังรูปที่ 10.4 ทั้งนี้ความสามารถในการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ โดยมีแรงผลักดันระหว่างบล็อกและแรงยืดหยุ่นจากยาง รวมทั้งแรงไฟฟ้าที่สามารถปรับเปลี่ยน Intricate balance ทำให้เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก นอกจากนี้จะสามารถนำวัสดุดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับเซ็นเซอร์แล้วยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับแอคชูเอเตอร์ อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน และอุปกรณ์ทางการแพทย์ได้อีกด้วย

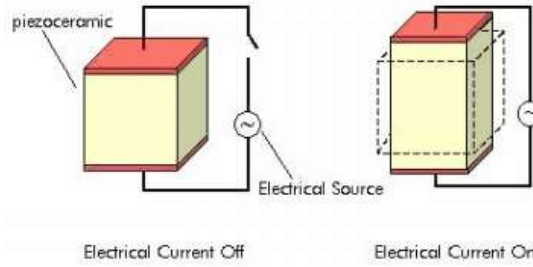


รูปที่ 10.4 ลักษณะโครงสร้างของบล็อกโคพอลิเมอร์ภายใต้สนามไฟฟ้า ที่มา Pester et al., 2011

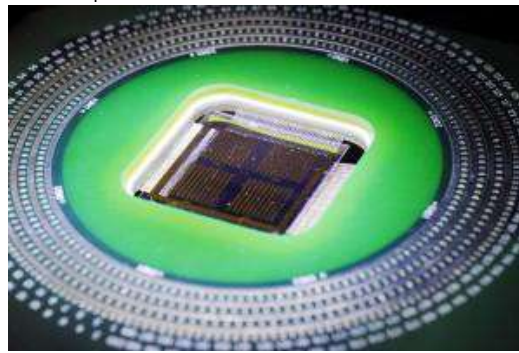
1.3.2 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (Piezoelectric Ceramic) เป็นเซรามิกที่สามารถเปลี่ยนรูปพลังงานได้ดีเช่น พลังงานกล-พลังงานไฟฟ้ากลับไปมาได้ โดยการใช้แรงกดดังรูปที่ 10.5 ซึ่งวัสดุดังกล่าวจะเปลี่ยนแรงกลให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าและสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้กลายเป็นพลังงานกลได้เช่น Lead zirconate titanate หรือ  $Pb(Zr,Ti)O_3$  ที่นำมาใช้ในการผลิตเครื่องแปลงความถี่หรือกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่าทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ชุดโพลดเซลส์สำหรับเครื่องชั่งขนาดใหญ่ ตัวจุดเตาแก๊ส (Gas ignitor) รวมไปถึงกล่องเพลงที่อยู่ในการ์ดหรือบัตรรอยพรชนิดต่าง ๆ ที่เมื่อเปิดการ์ดแล้วจะมีเสียงเพลง นอกจากนี้มีรายงานของบริษัท The Morgan Crucible Company plc, 2009 พัฒนาการผลิตเครื่องแปลงความถี่หรือกระแสไฟฟ้า (Transducer) ซึ่งเป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ปลอดจากสารตะกั่ว เนื่องจากโดยทั่วไปวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมักจะผลิตจากสารตะกั่วเป็นส่วนประกอบหลักในการผลิต แต่เนื่องจากสารตะกั่วเป็นสารอันตรายและเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมจึงได้มีการวิจัยเพื่อพัฒนาผลิตเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่ปลอดจากสารตะกั่ว (Lead-free piezoelectric ceramic) จากรายงานวิจัยของ Wu และคณะ (2009) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกและคุณสมบัติของวัสดุดังกล่าวเพื่อให้มีสมบัติเหมาะสมกับการผลิต Transducer สำหรับเครื่องอัลตราโซนิคความถี่สูง (High-frequency ultrasonic imaging) โดยมีสูตรทางเคมีคือ  $(K_{0.5}Na_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}(Nb_{0.9}Ta_{0.1})O_3$  หรือเรียกโดยย่อว่า KNLNT-0.03/0.10 แทนการใช้สารตะกั่ว เครื่องอัลตราโซนิคความถี่สูง (High frequency ultrasound imaging) ในช่วงความถี่ระหว่าง 30-150 เมกะเฮิร์ต (MHz) ซึ่งจะใช้ในการฉายภาพดวงตา หลอดเลือด ผิวหนัง หรือสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก ทั้งนี้การฉายภาพอัลตราซาวด์ที่มีกำลังการขยายภาพสูงนั้น นิยมใช้ Transducers ที่ผลิตจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกชนิดที่มีสารตะกั่วเป็นส่วนประกอบ เช่น Lead zirconate titanate ceramics (PZT) และ  $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3-PbTiO_3$  (PMN-PT) นอกจากนี้ยังมีรายงานวิจัยที่มีการนำเส้นลวดนาโน Zinc Oxide ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษเฉพาะตัวมาใช้ในการสร้างวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดใหม่เพื่อใช้อ่านและบันทึกข้อมูลสำหรับเซลล์หน่วยความทรงจำ (Memory Cell) ที่ควบคุมโดย Electromechanical Modulation ซึ่งสามารถนำมาใช้กับสมบัติทางกลในสิ่งมีชีวิตได้ ตัวอย่างวัสดุเพียโซอิเล็กทริก Piezoelectrically Modulated Resistive Memory (PRM) ดังรูปที่ 10.6 โดยการใช้ประโยชน์จากการเปลี่ยนสมบัติทางกลไปเป็นกระแสไฟฟ้าได้เนื่องจาก Zinc Oxide เป็นวัสดุเซรามิกชนิดสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นเมื่อทำให้วัสดุเกิดความเครียด (Strain) โดยแรงทางกลจะทำให้เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกขึ้น วัสดุ PRM จะมีการสร้างประจุผ่านเส้นลวดนาโน Zinc oxide ทั้งนี้ความเครียดทางกลเกิดจากแรงกระทำทางกลเช่น การใช้ปากกาเขียนหนังสือ หรือกิจกรรมทางชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในร่างกาย เช่น การเต้นของหัวใจ การควบคุมการเคลื่อนที่ของประจุทำได้โดยการใช้ความเครียด ถ้าไม่มีความเครียดเกิดขึ้นประจุจะไหลตาม

สภาพปกติแต่หากมีความเครียดเกิดขึ้น  
ควบคุมการไหลของกระแสขึ้น

จะทำให้เกิดความต่างศักย์คล้ายกับการสร้างกำแพงเพื่อ

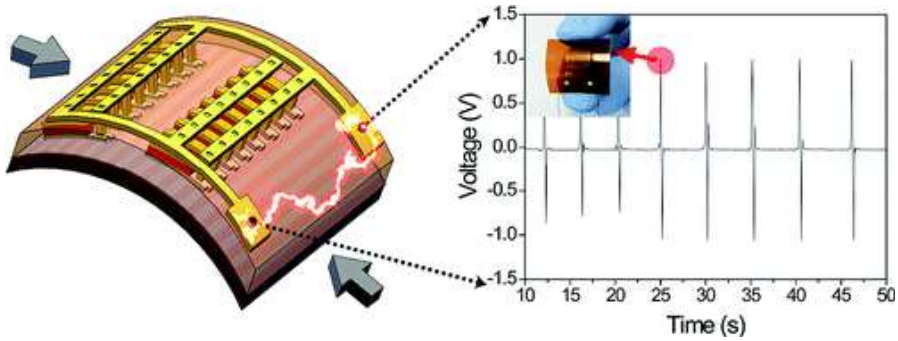


รูปที่ 10.5 หลักการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกเมื่อได้รับกระแสไฟฟ้า  
ที่มา <http://www.piezomaterials.com>



รูปที่ 10.6 ลักษณะโครงสร้างของ PRM ที่ประกอบด้วยเส้นลวดนาโนเพียโซอิเล็กทริก Zinc Oxide  
ที่มา: Wu และ Wang, 2011

1.4 นาโนเจนเนอเรเตอร์ (Nanogenerator) คือ ระบบการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยไม่ใช้แบตเตอรี่ซึ่งเป็นการรวมกันของเทคโนโลยีนาโนกับเพียโซอิเล็กทริก Piezoelectrics ซึ่งนอกจากจะสามารถใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่แล้ว ยังสามารถใช้เป็นเซ็นเซอร์ที่ฝังอยู่ในร่างกายหรือเป็นแหล่งพลังงานให้กับหุ่นยนต์ขนาดเล็กอีกด้วย แหล่งพลังงานของ Nanogenerator นอกจากจะเป็นแหล่งพลังงานจากธรรมชาติ เช่น พลังงานลม ยังมีแหล่งพลังงานจากกลไกทางชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในร่างกายเช่น การเต้นของหัวใจ การไหลเวียนของเลือด และการยืด/หดของกล้ามเนื้ออีกด้วย จากงานวิจัยของนักวิจัยที่ Georgia Institute of Technology ได้พัฒนาเทคโนโลยี Nanogenerator ในรูปแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และมีความยืดหยุ่น โดยการใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก Piezoelectric  $\text{BaTiO}_3$  Thin Film Nano-Material ดังรูปที่ 10.7 ทำให้สามารถเปลี่ยนการเคลื่อนไหวเพียงเล็กน้อย เช่น การเต้นของหัวใจหรือการไหลเวียนของโลหิตให้เป็นกระแสไฟฟ้าได้ ทั้งนี้ นักวิจัยได้ใช้ Radio Frequency Magnetron Sputtering เพื่อทำให้ Ferroelectric  $\text{BaTiO}_3$  Thin Film ติดบน  $\text{Pt/Ti/SiO}_2/(100)$  Si Substrate ซึ่งวัสดุดังกล่าวสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงสุดถึง 1.0 โวลต์ (Park, et al., 2010)

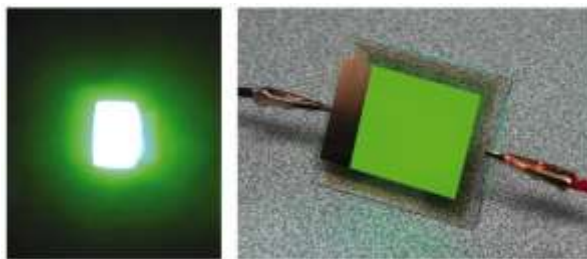


รูปที่ 10.7 โครงสร้างของวัสดุ Nanogenerator ที่สามารถสร้างกระแสไฟฟ้าได้เมื่อเกิดการโค้งงอ ที่มา Park et al., 2010

2. **ไดโอด (Diode)** เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำสองชนิดคือ ชนิด P (Positive) และชนิด N (Negative) ซึ่งสารกึ่งตัวนำชนิด P เกิดจากการผสมกันของสารกึ่งโลหะหมู่ V และหมู่ III แต่สารกึ่งตัวนำชนิด N เกิดจากการผสมกันของสารกึ่งโลหะหมู่ V และหมู่ VI เข้าด้วยกัน ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถควบคุมทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าให้เป็นไปในทางเดียวกัน และสามารถกั้นไม่ให้กระแสไหลไปในทิศทางตรงข้ามได้ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้ในการผลิตไดโอดคือ ซิลิกอน (Silicon) ไดโอดจะถูกแบ่งเป็นสองด้านคือ N-type Semiconductor (ด้านที่มีประจุลบมาก) และ P-type Semiconductor (ด้านที่มีประจุบวก) โดยบริเวณที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดอยู่ติดกันเรียกว่า P-N Junction ทั้งนี้ประเภทไดโอดแบบสารกึ่งตัวนำ ได้แก่ ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode) โฟโตไดโอด (Photo Diode) ไดโอดกำลัง (Power Diode) ไดโอดวาร์เรเตอร์หรือวาริแคป (Varactor or Varicap Diode) และซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode) เป็นต้น

2.1 ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diodes: LEDs) หรือที่เรียกว่าแอลอีดี LEDs คือ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทไดโอดชนิดหนึ่ง โดยเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะสามารถเปล่งแสงออกมาได้ในช่วงสเปกตรัม (Spectrum) ที่แคบและเมื่อต่อวงจรในรูปแบบ Forward-Bias จะทำให้เกิดการเรืองแสงขึ้นที่ LEDs (Electroluminescence) ซึ่งองค์ประกอบของสารกึ่งตัวนำที่แตกต่างกันจะทำให้ LEDs สามารถเปล่งสีที่แตกต่างกันออกมาได้ ปัจจุบันได้มีการนำ LEDs มาใส่ในอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อให้แสงสว่าง เช่น เครื่องคิดเลข สัญญาณจราจร ไฟท้ายรถยนต์ ป้ายสัญญาณต่าง ๆ ไฟฉาย จอโทรทัศน์ จอโทรศัพท์มือถือ ในปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิต LEDs ที่น่าสนใจในการวิจัยและพัฒนาคือ Organic light emitting diodes หรือ OLEDs ซึ่งเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเช่นเดียวกับไดโอดเปล่งแสงหรือ

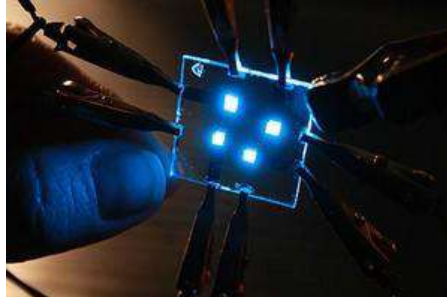
LEDs แต่แตกต่างกันตรงที่ OLEDs ทำจากวัสดุอินทรีย์กึ่งตัวนำที่เปล่งแสงได้เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน โดยผ่านกระบวนการ Electroluminescence เช่นเดียวกับ LEDs และเนื่องจาก OLEDs มีค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ต่ำ ใช้พลังงานในการเปล่งแสงน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณแสงต่อพื้นที่ของ LEDs ที่ผลิตจากวัสดุอนินทรีย์กึ่งตัวนำและยังมีความยืดหยุ่นสูง ดังนั้นหน้าจอส (Screen) ที่ผลิตจาก OLEDs จึงมีความบางกว่าและเบากว่า ดังนั้นเทคโนโลยีวัสดุอินทรีย์กึ่งตัวนำ โดยเฉพาะ OLEDs จึงเป็นสิ่งที่มีความน่าสนใจในการวิจัยและพัฒนา จากรายงานของ Helander และคณะ (2011) ได้พัฒนาอุปกรณ์ CI-OLED ดังรูปที่ 10.8 นำสารคลอรีน (Chlorine) มาใช้ในการลดความซับซ้อนของอุปกรณ์ OLEDs แบบเดิม เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของ OLEDs โดยการนำแผ่นฟิล์มที่มีอะตอมเดี่ยวของคลอรีนมาติดที่บริเวณผิวของ Indium tin oxide (ITO) ซึ่งเป็นวัสดุขั้วไฟฟ้า (Electrode) มาตรฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตหน้าจอแบนในปัจจุบันและแผ่นฟิล์มดังกล่าว ทำหน้าที่เป็นตัวกลางที่ปล่อยให้การขนส่งกระแสไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากขึ้น อีกทั้งยังได้พัฒนากระบวนการผลิตแสงยูวี (UV light) เพื่อช่วยในการเกิดปฏิกิริยาคลอรีนชัน (Chlorination) ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ก๊าซคลอรีนในกระบวนการดังกล่าวเพื่อเพิ่มความปลอดภัยและสร้างความน่าเชื่อถือในการนำไปใช้งาน นอกจากนี้การใช้ CI-OLED จะสามารถเปล่งแสงสีเขียวได้มีประสิทธิภาพมากกว่า OLEDs แบบเดิม โดยสามารถเปล่งแสงได้สว่างมากกว่า อีกทั้งยังสามารถป้องกันประสิทธิภาพที่อาจลดต่ำลงได้เมื่อความสว่างเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ CI-OLED ช่วยลดปริมาณของ Stacked Layers ที่ใช้ใน OLEDs ทำให้สามารถลดขั้นตอนและอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ในการผลิต อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตที่เป็นจุดด้อยของ OLEDs ได้อีกด้วย



รูปที่ 10.8 OLEDs ที่มีขั้วไฟฟ้า ITO เคลือบด้วยแผ่นฟิล์มคลอรีน (CI-ITO) ที่มา: Helander et al., 2011

เนื่องจากปัญหาของ OLEDs ในปัจจุบันคือ ประสิทธิภาพการเปล่งแสงสีน้ำเงินที่มีอายุการใช้งานสั้นแต่แสงสีอื่นกลับมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า ในปี ค.ศ. 2009 ห้องปฏิบัติการ Pacific Northwest National Laboratory ภายใต้กระทรวงพลังงานสหรัฐฯ (United State Department of Energy: U.S. DOE) ได้ทำการวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ OLEDs ทำให้สามารถเปล่งแสงสีน้ำเงินได้

ดีกว่า OLEDs ทั่วไปเพิ่มขึ้นร้อยละ 25 ดังรูปที่ 10.9 ซึ่ง OLEDs เป็นวัสดุที่มีเลเยอร์ (Layers) หลายชั้น และได้พยายามพัฒนาให้ OLEDs สามารถใช้ทดแทนหลอดไฟฟ้าที่ให้แสงสีขาวเช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ แสงสีขาวดังกล่าวเกิดจากการรวมตัวของแสงสีแดง น้ำเงิน และเขียว



รูปที่ 10.9 วัสดุที่ใช้ทำ OLEDs ผลิตโดยห้องปฏิบัติการ Pacific Northwest National ที่มา (DOE/Pacific Northwest National Laboratory, 2009)

3. **แอคชูเอเตอร์ (Actuator)** คือ วัสดุที่สามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าให้กลายเป็น การเคลื่อนที่หรือแรงทางกล เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า ระบบนิวแมติกส์ และระบบไฮดรอลิกส์ได้แก่ วัสดุอัลลอยด์จำรูป (Shape Memory Alloys) และพอลิเมอร์จำรูป (Shape Memory Polymer), เพียโซอิเล็กทริก เซรามิก (Piezoelectric Ceramics) วัสดุ Magnetostrictive และ Magnetorheological Fluids โดยมี รายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุอัลลอยด์จำรูป (Shape Memory Alloys) และวัสดุพอลิเมอร์จำรูป (Shape Memory Polymer) คือวัสดุฉลาดที่สามารถตอบสนองต่อสิ่งเร้าหรือสิ่งกระตุ้นภายนอกได้ เช่น เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงหรือมีความเค้นกระทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า Shape Memory Alloys (SMA) โลหะจำรูปคือวัสดุฉลาดประเภทแอคชูเอเตอร์ (Actuator) ที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างในลักษณะที่เป็นของแข็งได้เมื่อได้รับความร้อน ซึ่งโครงสร้างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงในระดับอะตอม ทั้งนี้ โลหะจำรูปสามารถประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น ด้านการแพทย์โดยการทำลิ้นปิด-เปิด (Stent และ Bone Plate) ด้านการบิน เช่น ปีกเครื่องบิน และ Flap Actuator และด้านอื่น ๆ ทั้งนี้ โลหะจำรูปมีหลายชนิด เช่น Fe-Mn-Si หรือ Fe-Zn-Cu-Al จากรายงานวิจัยของ Zarnetta และคณะ (2010) ได้ออกแบบวัสดุโลหะจำรูปชนิดใหม่ที่มีความเสถียร โดยการผสมวัสดุหลายชนิดเพื่อให้ได้โลหะผสม SMA ที่มีรูปร่างเสถียรและมีอายุการใช้งานที่นานขึ้นเพื่อการใช้ประโยชน์ด้านต่าง ๆ วัสดุดังกล่าวเกิดจากการผสมระหว่าง ไทเทเนียม (Titanium) นิกเกิล (Nickel) ทองแดง (Copper) และแพลเลเดียม (Palladium) ซึ่งมีสูตรทาง

เคมี คือ  $Ti_{50}Ni_{34}Cu_{12}Pd_{3.1}$  โดยการสร้างวัสดุดังกล่าวด้วยเทคนิคการเคลือบผิว Thin-film composition-spread และ High-throughput Characterization Method

3.2 วัสดุพอลิเมอร์จำรูป (Shape Memory Polymers) เป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถเปลี่ยนรูปและคืนสู่รูปร่างเดิมได้เมื่อมีการตอบสนองต่อสิ่งเร้าเช่น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นหรือได้รับกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จากรายงานของ Davisa และคณะ (2011) ได้ออกแบบวัสดุพอลิเมอร์จำรูป (Shape Memory Polymers: SMP) เพื่อใช้ในการศึกษาการตอบสนองภายในเซลล์ต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกลไกทางชีวภาพของเซลล์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเซลล์จะทำบนวัสดุพื้นผิวเรียบและไม่สามารถเปลี่ยนรูปได้ ทำให้ไม่สามารถศึกษาการรับรู้และตอบสนองของเซลล์จากวัสดุดังกล่าวได้ ดังนั้นนักวิจัยจึงได้พัฒนา SMP ที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ เพื่อศึกษาการตอบสนองระหว่างเซลล์กับวัสดุที่ใช้ผลิต โดยรูปร่างของ SMP จะขึ้นกับอุณหภูมิเมื่อนักวิจัยใช้โปรแกรมที่ทำให้วัสดุ SMP ที่เป็นอาหารเลี้ยงเซลล์เปลี่ยนรูปร่างสองแบบคือ ผิวร่องและผิวเรียบ จากงานวิจัยดังกล่าวสามารถนำไปพัฒนาใช้เป็นวัสดุชีวภาพเพื่อผลิตเนื้อเยื่อเทียม Scaffold ที่ช่วยลดความเสียหายของเซลล์จากกระบวนการผ่าตัดต่อไป

3.3 เพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (Piezoelectric Ceramics) หมายถึงวัสดุเซรามิกที่สามารถเปลี่ยนรูปพลังงานกล-พลังงานไฟฟ้ากลับไปได้

3.4 วัสดุแมกนีโตสทริกทีฟ (Magnetostrictive Material: MsM) คือวัสดุที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้คล้ายกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแต่แตกต่างกันตรงที่วัสดุแมกนีโตสทริกทีฟสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ภายใต้สนามแม่เหล็กและเป็นวัสดุของแข็งที่สามารถเปลี่ยนรูปได้มากเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก ตัวอย่างวัสดุแมกนีโตสทริกทีฟที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เช่น TERFENOL-D และ Galfenol (Fe-Gallium) สำหรับระบบการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยการสั่นสะเทือน (Optimal Vibration-based Energy Harvesting System) และฟิล์มบาง (Thin Film) จากรายงานวิจัยของ Xu และคณะ (2011) ได้ออกแบบระบบ Optimal Vibration-based Energy Harvesting System ที่ใช้วัสดุ MsM ที่สามารถนำมาใช้ในการสร้างพลังงานให้กับเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยการเปลี่ยนพลังงานแม่เหล็กเป็นพลังงานไฟฟ้าภายใต้แรงดึงดูดสนามแม่เหล็กจากการสั่นสะเทือน เนื่องจากปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณพลังงานไฟฟ้าได้แก่ MsM Layers Coil Design และ Load Matching ซึ่งการออกแบบระบบดังกล่าวทำให้มีกระแสไฟฟ้าได้สูงถึง 970 ไมโครวัตต์ นอกจากการนำวัสดุ MsM มาใช้ในการพัฒนาระบบเซ็นเซอร์สำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานแล้ว วัสดุดังกล่าวยังสามารถนำมาใช้กับฟิล์มบาง (Thin Film) ได้อีกด้วย Hunter และคณะ (2011) ได้พัฒนาวัสดุฟิล์มบางโลหะผสมระหว่างเหล็กและโคบอลต์ (Iron/Cobalt Alloy Thin Film: Co-Fe Film) ให้มีสมบัติเป็นวัสดุ MsM จากผลการวิจัยพบว่าวัสดุดังกล่าวจะเกิดความเครียดทางกลเมื่อวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก จากหลักการดังกล่าวทำให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับ MEMS เซ็นเซอร์ และ



แอคซ์เตอรี้ได้ แต่เนื่องจากส่วนประกอบของวัสดุ MsM หาได้ยากและมีขั้นตอนการประกอบวัสดุที่ยุ่งยาก ดังนั้นวัสดุ MsM ที่เป็น Iron/Cobalt Alloy จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับการสร้างวัสดุ MsM เนื่องจากมีต้นทุนต่ำและมีสมบัติของการเป็น Magnetostriction ที่ดีกว่า

3.5 Magnetorheological Fluids (MR Fluids) เป็นวัสดุฉลาดประเภทหนึ่งซึ่งมีสมบัติเกี่ยวข้องกับกรไหล (Rheological) เช่น ความหนืด (Viscosity) ที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างจากของเหลวไปเป็นของแข็งเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กเนื่องจากอนุภาคแม่เหล็กที่แขวนลอยอยู่ใน MR Fluids มีปฏิกิริยาต่อสนามแม่เหล็กซึ่งสามารถต้านแรงเฉือน (Shear Deformation) หรือการไหลได้ ดังนั้น MR Fluids จึงสามารถเปลี่ยนสถานะไปมาระหว่างของเหลวและกึ่งของแข็ง โดย MR Fluids สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น งานก่อสร้าง การขนส่ง วิศวกรรมความปลอดภัย และวิทยาศาสตร์ชีวิตภาพ (Life Science) จากรายงานวิจัยของ Kciuk & Turczyn, 2006 มีตัวอย่างอุตสาหกรรมยานยนต์ที่มีการนำเทคโนโลยี MR Fluids มาใช้ เช่น MR-Fluid Basonetic® ในใช้คัพแม่เหล็ก ซึ่งนำ MR Fluids มาใส่แทนน้ำมันทำให้สามารถควบคุมความหนืดได้โดยการใช้สนามแม่เหล็กเพื่อควบคุมการสั่นสะเทือนเช่นการใช้ MR Fluids-Elastomer (MRF-E) Mount เป็น MR Fluids ประเภทหนึ่งที่ถูกห่อหุ้มด้วย Elastomer Matrix จากงานวิจัยของ York และคณะ (2011) ได้ออกแบบ MRF-E Mount เพื่อการศึกษาวิจัยการสั่นแบบ Harmonic Oscillatory สำหรับคลื่นความถี่ในช่วงกว้างและค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กในระดับต่าง ๆ โดยนำระบบ Single Degree-of-Freedom (SDOF) มาใช้ประโยชน์ จากงานวิจัยดังกล่าวสามารถควบคุมระบบการสั่นของอุปกรณ์ที่สามารถวัดค่าแอมพลิจูดและความถี่ที่มีค่าน้อย ๆ ได้ นอกจากนี้ Shafirir และคณะ (2009) ได้นำเทคโนโลยี Magnetorheological finishing (MRF) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการขัดเงาที่ใช้ MR Fluids ประกอบด้วยอนุภาคแม่เหล็กขนาดไมครอนของ Carbonyl Iron (CI) สำหรับกระบวนการ Finishing Optic ทำให้มีความแม่นยำสูง ดังนั้นเมื่อนำ Zirconia coated carbonyl-iron-particle-based MR Fluid (Zirconia-coated-CI-based MR Fluid) มาใช้ปรับปรุงกระบวนการ MRF ทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้นและทำให้เส้นใยแก้วนำแสงและวัสดุผลึกเซรามิก (Polycrystalline Ceramic) มีผิวเรียบมากขึ้นส่งผลต่อประสิทธิภาพความแม่นยำของวัสดุนำแสงสูงขึ้นไป

## คำถามท้ายบท

1. นาโนเจนเนอเรเตอร์คืออะไร
2. แอคซ์เตอรี้คือวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณลักษณะอย่างไร
3. จงยกตัวอย่างวัสดุนาโนเซรามิกที่สามารถใช้ในการผลิตเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก 2 ชนิด

4. จงอธิบายประโยชน์ของวัสดุพอลิเมอร์จำรูป
5. จงอธิบายความหมายของวัสดุฉลาด

## บทที่ 11

### วัสดุนาโนพอลิเมอร์ (Nanopolymer materials)

**พอลิเมอร์** (Polymer) มีรากศัพท์จากภาษากรีกที่สำคัญ 2 คำ คือ Poly (หมายถึง จำนวนมาก) และ Meros (หมายถึง ส่วน หรือ หน่วย) พอลิเมอร์เป็นสารโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecule) พอลิเมอร์จะประกอบไปด้วยหน่วยซ้ำกัน (Repeating unit) ของมอนอเมอร์ (Monomer) หลาย ๆ หน่วยมาทำปฏิกิริยากัน มอนอเมอร์นี้จัดเป็นสารไมโครโมเลกุล (Micromolecule) ชนิดหนึ่ง พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยหรือมอนอเมอร์ชนิดเดียวกันทั้งหมดจัดเป็น**โฮโมพอลิเมอร์** (Homopolymer) แต่ถ้ามีมอนอเมอร์ต่างกันตั้งแต่ 1 ชนิดขึ้นไป จัดเป็น**โคพอลิเมอร์** (Copolymer) สารบางอย่างที่มีสมบัติอย่างพอลิเมอร์เช่นสารพวกไขมันที่มีแต่ละหน่วยไม่ซ้ำกัน จัดเป็นเพียงแค่สารแมคโครโมเลกุลเท่านั้นไม่จัดเป็นพอลิเมอร์

พอลิเมอร์มีทั้งที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติ (Natural polymer) และพอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic polymer) ตัวอย่างของพอลิเมอร์ธรรมชาติได้แก่ แป้ง เซลลูโลส โปรตีน กรดนิวคลีอิก และยางธรรมชาติ ส่วนพอลิเมอร์สังเคราะห์เช่น พลาสติก เส้นใย โฟม และกาว พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในชีวิตประจำวันและพอลิเมอร์แต่ละชนิดมีสมบัติต่างกันจึงสามารถนำไปใช้งานที่แตกต่างกันได้อย่างมากมาย

พอลิเมอร์ที่มีการใช้งานมากที่สุดคือพลาสติก พอลิเมอร์ชีวภาพ เช่น โปรตีนและกรดนิวคลีอิกที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการทางชีวภาพ พอลิเมอร์ธรรมชาติอื่น ๆ เช่น เซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบหลักของกระดาษและไม้ พอลิเมอร์สังเคราะห์ที่รู้จักทั่วไปได้แก่ บากาไลต์, นีโอพรีน, ไนลอน, พีวีซี, พอลิไธรีน, พอลิอะครีโลไนไตรล์ และพีวีบี พอลิเมอร์สังเคราะห์ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเกือบทุกชนิด พอลิเมอร์มีการใช้งานอย่างกว้างขวางตั้งแต่การใช้เป็นโครงสร้างของเด็กเล่น จนถึงยานอวกาศ นอกจากนี้ยังมีการใช้พอลิเมอร์เป็นยาทางชีวภาพในฐานะเป็นตัวช่วยการนำส่งยาในสิ่งมีชีวิต พอลิเมอร์ดังกล่าวเช่นพอลิเมทิลเมทาครีเลตที่ใช้ในกระบวนการโฟโตเรซิสในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำและสารไดอิเล็กทริกไปแทสเซียมต่ำสำหรับใช้ในคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูง ปัจจุบันมีการพัฒนาพอลิเมอร์ชนิดยืดหยุ่นสำหรับงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

### โครงสร้างพอลิเมอร์ (Structures of polymer)

1. **พอลิเมอร์สายตรง (Linear polymer)** พอลิเมอร์ชนิดนี้จะเป็นสายโซ่ตรงที่มีความยาว ถ้าให้ A และ B แทนมอนอเมอร์ โครงสร้างอย่างง่ายของโฮโมพอลิเมอร์จะเป็นดังนี้

A-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A Linear homopolymer

ส่วนโคพอลิเมอร์มีรูปแบบ 3 ชนิด ดังนี้

1. Alternating copolymer A-B-A-B-A-B-A-B เป็นพอลิเมอร์ที่มีมอนอเมอร์ A และ B เรียงสลับกันเป็นช่วง หน่วยต่อหน่วย

2. Block copolymer A-A-B-B-B-B-A-A-A เป็นกลุ่มของมอนอเมอร์ A และ B ที่เรียงสลับกันเป็นกลุ่ม

3. Random copolymer A-A-A-B-A-B-A-A-B-B เป็นมอนอเมอร์ A และ B เรียงสลับกันอย่างอิสระ

2. **พอลิเมอร์กิ่งสาขา (graft polymer)** พอลิเมอร์ชนิดนี้จะมีส่วนประกอบสองส่วน คือ ส่วนที่เป็นสายโซ่หลักและส่วนที่เป็นสายโซ่กิ่ง โดยสายโซ่หลักประกอบด้วยมอนอเมอร์เพียงชนิดเดียวเท่านั้น ส่วนมอนอเมอร์อีกชนิดจะเป็นสายโซ่กิ่ง

3. **พอลิเมอร์ร่างแห (Cross-link polymer)** เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นร่างแหมีหลายสายโซ่เชื่อมต่อกันซึ่งเป็นที่ตั้งโพลิเมอร์และโคพอลิเมอร์

**พอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic polymer)** การสังเคราะห์พอลิเมอร์เป็นกระบวนการของการรวมโมเลกุลขนาดเล็กที่เป็นหน่วยย่อยเข้าด้วยกันด้วยพันธะโควาเลนต์ระหว่างกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ หมู่ฟังก์ชันทางเคมีบางตัวจะหลุดออกจากหน่วยย่อย หน่วยย่อยในพอลิเมอร์จะเป็นหน่วยซ้ำ ๆ กัน แบ่งเป็น 3 กลุ่มดังนี้

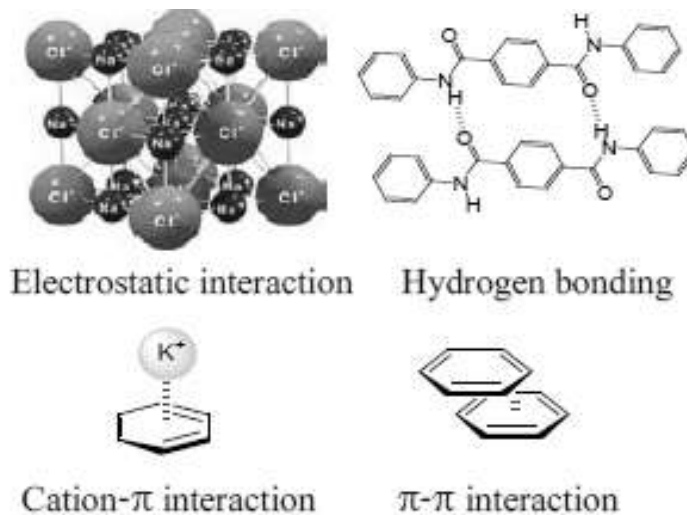
1. การสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ แบ่งได้เป็นสองกลุ่มคือการสังเคราะห์แบบควบแน่นและการสังเคราะห์แบบเติม อย่างไรก็ตามวิธีการที่ใหม่กว่าเช่น การสังเคราะห์แบบของเหลว ไม่สามารถจัดเข้าในกลุ่มใดได้ ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์อาจเกิดขึ้นโดยมีหรือไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาก็ได้

2. การสังเคราะห์ทางชีวภาพ พอลิเมอร์ธรรมชาติมีสามกลุ่มคือพอลิแซ็กคาไรด์ พอลิเปปไทด์ และพอลินิวคลีโอไทด์ ในเซลล์ของพอลิเมอร์เหล่านี้ถูกสังเคราะห์ด้วยเอนไซม์เช่นการสร้างดีเอ็นเอด้วยเอนไซม์ดีเอ็นเอพอลิเมอเรส การสังเคราะห์โปรตีนเกี่ยวข้องกับการใช้เอนไซม์ที่ซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับ การถอดรหัสทางพันธุกรรมในดีเอ็นเอแล้วจึงถ่ายถอดรหัสจากดีเอ็นเอเป็นข้อมูลของลำดับกรดอะมิโน โปรตีน และอาจถูกดัดแปลงหลังจากการแปลรหัสเพื่อให้มีโครงสร้างเหมาะสมกับการทำงาน

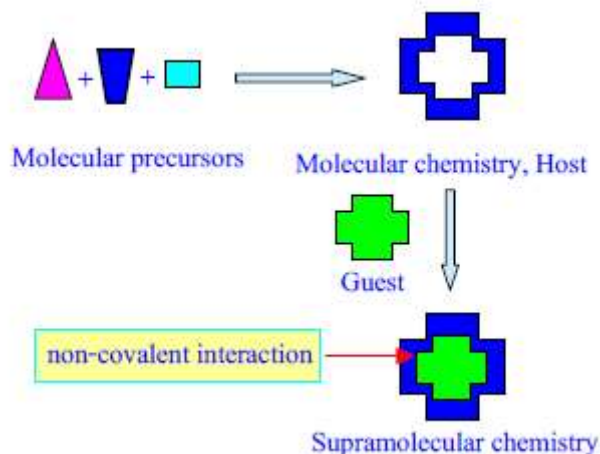
3. การดัดแปลงพอลิเมอร์ธรรมชาติ พอลิเมอร์ที่มีความสำคัญในทางการค้าหลายชนิดสามารถสังเคราะห์ได้จากการดัดแปลงพอลิเมอร์ธรรมชาติโดยวิธีทางเคมี ตัวอย่างเช่นปฏิกิริยาระหว่างกรดไนตริกกับเซลลูโลส เกิดเป็นไนโตรเซลลูโลสและการทำให้ยางธรรมชาติแข็งตัวโดยการเติมกำมะถัน

**เคมีซูปราโมเลคิวลาร์ (Supramolecular chemistry)** เป็นการศึกษาอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลที่มีความจำเพาะซึ่งกันและกัน โดยการศึกษาเพื่อให้เกิดความเข้าใจพฤติกรรมที่โมเลกุลต่าง ๆ มีต่อกัน ปัจจุบันนี้เคมีซูปราโมเลคิวลาร์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเพราะเป็นการนำความรู้มาพัฒนาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่าง ๆ เช่น การพัฒนายารักษาโรค การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาและการพัฒนาเซ็นเซอร์ทางเคมี ซูปราโมเลคิวลาร์หรือซูเปอร์โมเลกุลเป็นโมเลกุลที่มีลักษณะแตกต่างไปจากโมเลกุลธรรมดาโดยเป็นการรวมตัวกันของโมเลกุลย่อย ๆ ด้วยพันธะระหว่างโมเลกุลซึ่งโดยทั่วไปจะหมายถึงพันธะที่ไม่ใช่พันธะโคเวเลนต์ (Non-covalent bond) เช่น พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) อันตรกิริยาแบบไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic interaction) อันตรกิริยาแคตไอออน-ไพ (Cation- $\pi$  interaction) และอันตรกิริยาไพ-ไพ ( $\pi$ - $\pi$  interaction) ดังรูปที่ 11.1 โมเลกุลที่ใช้เป็นตัวรับเรียกว่าโฮสต์ (Host) และโมเลกุลที่ถูกจับเรียกว่าเกสต์ (Guest) ดังรูปที่ 11.2 ดังนั้นในการออกแบบและการสร้างโมเลกุลของโฮสต์เพื่อที่จะทำให้เกิดอันตรกิริยาของโฮสต์-เกสต์มีหลากหลาย การศึกษาอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลโฮสต์-เกสต์ (Host-guest chemistry) เป็นการศึกษาเรื่องการจดจำของโมเลกุล

(Molecular recognition) การศึกษาปฏิกิริยาเชิงซูปราโมเลกุลและคะตะไลซิส (Supramolecular reactivity and catalysis) กระบวนการเซลฟ์แอสเซมบลี (Self-assembly) และทำยที่สุดคือการออกแบบและสร้างเครื่องมือระดับโมเลกุล (Molecular and supramolecular devices) เพื่อการใช้งาน



รูปที่ 11.1 ตัวอย่างการเกิดอันตรกิริยาของเคมีซูปราโมเลกุล ที่มา Beer, P.D., 1999



รูปที่ 11.2 แผนภาพแสดงคำจำกัดความเคมีซูปราโมเลกุล ที่มา Steed, J.W. และ Atwood, J.L., 2000

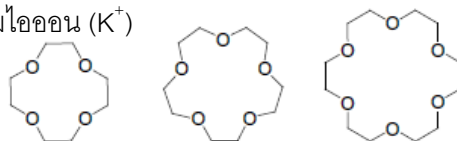
การออกแบบโมเลกุลโฮสต์ให้จับตัวกับโมเลกุลของเกสต์ได้อย่างจำเพาะเจาะจง ต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมทั้งในด้านโครงสร้างและด้านอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic) ของโมเลกุลโฮสต์กับโมเลกุลเกสต์ องค์ประกอบที่สำคัญที่มีผลต่อการจับกันของโมเลกุลโฮสต์กับโมเลกุลเกสต์คือ ขนาดและรูปร่างของเกสต์ ขนาดโพรงหรือช่องว่างของโฮสต์ ทิศทางของโมเลกุลโฮสต์ในการจัดเรียงตัวเมื่อจับกับเกสต์แล้วมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างน้อยที่สุด (Pre-organize) อะตอมที่ทำหน้าที่ในการเกิดอันตรกิริยาและอิทธิพลของตัวทำละลาย การออกแบบโมเลกุลโฮสต์มีความสำคัญเป็นอย่างมากเนื่องจากการจับตัวกันของโมเลกุลเกสต์ชนิดแคตไอออน (Cation) แอนไอออน (Anion) หรือโมเลกุลที่เป็นกลาง (Neutral) ได้อย่างจำเพาะเจาะจง โมเลกุลโฮสต์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดดังนี้

1. โมเลกุลโฮสต์สำหรับแคตไอออน (Cation receptors)
2. โมเลกุลโฮสต์สำหรับแอนไอออน (Anion receptors)
3. โมเลกุลโฮสต์สำหรับคู่อิออน (Ion-pair) และโมเลกุลโฮสต์ชนิดสวิตเทอร์เรียน (Zwitterion receptors)

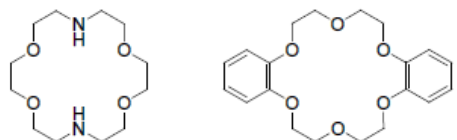
### โมเลกุลโฮสต์สำหรับแคตไอออน (Cation receptors)

โมเลกุลโฮสต์สำหรับจับกับแคตไอออนนั้นจะต้องมีส่วนประกอบของอะตอมที่ให้อิเล็กตรอน (Donor atom) ตัวอย่างเช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน หรือหมู่ธาตุโลหะที่มีประจุลบ และลิแกนด์ประเภทคราวน์อีเทอร์ (Crown ether) คริปแทน (Cryptan) ไฮโดเฟน (Cytophane) แมคโครไซคลิก (Macrocyclic) ตัวอย่างเช่น

1. คราวน์อีเทอร์ (Crown ethers) คือสารประกอบแมคโครไซคลิกพอลิอีเทอร์ (Macrocyclic polyethers) มีทำหน้าที่เป็นโฮสต์สำหรับจับกับโลหะอัลคาไลน์หมู่ 1 และโลหะอัลคาไลน์เอิร์ทหมู่ 2 ได้อย่างเหมาะสม เนื่องจากประกอบด้วยหน่วย  $-OCH_2CH_2-$  ซ้ำ ๆ กันเป็นวงและการเลือกจับกับแคตไอออนที่ทำหน้าที่เป็นเกสต์ขึ้นอยู่กับขนาดโพรงหรือช่องว่าง (Cavity) ของคราวน์อีเทอร์ และการจัดตัวของโครงสร้างดังรูปที่ 11.3 แสดงโครงสร้างของคราวน์อีเทอร์ชนิดต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น [18]-crown-6 สามารถจับได้ดีกับโพแทสเซียมไอออน ( $K^+$ )



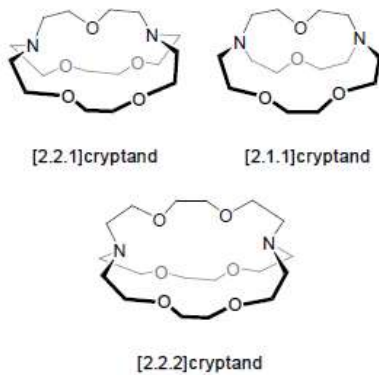
[12]-crown-4 [15]-crown-5 [18]-crown-6



Diaza-[18]-crown-6 Dibenzo-[18]-crown-6

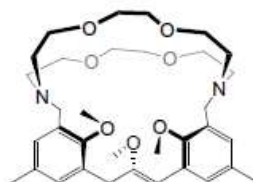
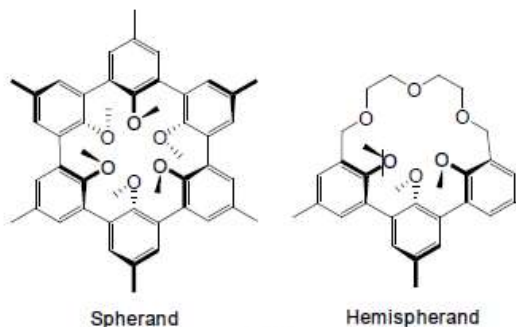
รูปที่ 11.3 ลิแกนด์ชนิดคราวน์อีเทอร์ (Crown ether) ที่มา Lehn, J.M., 1995

2. คริปแทน (Cryptan) มีรูปร่างเป็น 3 มิติดังรูปที่ 11.4 มีความแข็งแกร่งสูง มีโครงร่างที่แน่นอน และมีความจำเพาะเจาะจงสูง เมื่อเทียบกับคราวน์อีเทอร์ ตัวอย่างคริปแทนชนิดต่าง ๆ ที่มีความจำเพาะกับไอออนที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่นคริปแทนชนิด [2.2.2] ที่มีความจำเพาะเจาะจงกับโปแตสเซียมไอออน  $K^+$  ( $\log K_{11}=10.5$ ), คริปแทนชนิด [2.2.1] ที่มีความจำเพาะเจาะจงกับโซเดียมไอออน  $Na^+$  ( $\log K_{11}=8.05$ ) และคริปแทนชนิด [2.1.1] ที่มีความจำเพาะเจาะจงกับลิเทียมไอออน  $Li^+$  ( $\log K_{11}=8.05$ )



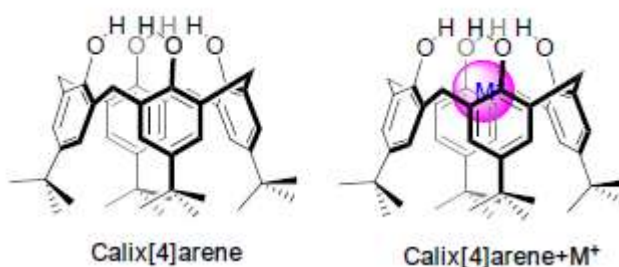
รูปที่ 11.4 คริปแทนชนิดต่าง ๆ ที่มา Dietrich, B., 1996

3. สเฟียแลนด์ (Spherand) เนื่องจากคริปแทนมีโครงร่างที่แน่นอนแต่เมื่อละลายในตัวทำละลาย จะมีความยืดหยุ่นตัวสูงจึงมีการเพิ่มหมู่ฟีนิลเพื่อให้ได้โฮสต์ที่มีความยืดหยุ่นน้อยกว่าที่เรียกว่าสเฟียแลนด์ ซึ่งการต่อกันของหมู่ฟีนิลจะเกิดโครงร่างแบบ 3 มิติที่มีรูปทรงคล้ายตะกร้าดังรูปที่ 11.5 สเฟียแลนด์จะเป็นโมเลกุลที่สามารถจับกับลิเทียมไอออน  $Li^+$  ได้ดีที่สุดในบรรดาโฮสต์เหล่านี้ แต่การประยุกต์ใช้งานบางครั้งต้องการความยืดหยุ่นและความสามารถในการละลายที่ดีจึงมีการนำคราวน์อีเทอร์และคริปแทนมารวมกับสเฟียแลนด์ เกิดโฮสต์ที่เรียกว่าเฮมิสเฟียแลนด์ (Hemi-spherand) และคลิปตาสเฟียแลนด์ (Crypta-spherand)



รูปที่ 11.5 โครงสร้างสเฟียแลนด์ ที่มา Cram, D.J., 1986

4. คาลิกซารีน (Calixarenes) เป็นแมโครไซคลิกที่ประกอบด้วยหน่วยฟีนอล (Phenolic unit) จำนวน  $n$  หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยสะพานเมทิลีนที่ตำแหน่งออร์โธของหมู่ไฮดรอกซี ซึ่งอนุพันธ์ที่นิยมใช้คือคาลิกซารีน โดยเมื่อเกิดการจับกับไอออนบวกจะเกิดทั้งอันตรกิริยาแบบไอออน-ไดโพลและแคตไอออน-ไพ ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการจับกันได้มากขึ้นดังรูปที่ 11.6 สารประกอบคาลิกซารีนได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการนำมาทำเป็นโครงสร้างหลัก (Platform) เนื่องจากการสังเคราะห์คาลิกซารีนทำได้ง่ายและมีความจำเพาะเจาะจงสูงและเตรียมได้ปริมาณมากจากสารตั้งต้นที่มีราคาไม่แพงอีกทั้งยังสามารถทำการเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันได้ที่ตำแหน่งพาราและหมู่ไฮดรอกซีได้อย่างจำเพาะเจาะจงทำให้เกิดอนุพันธ์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งในการเตรียมอนุพันธ์นี้สามารถเกิดขึ้นได้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน เช่นที่ตำแหน่งพาราลงการทำปฏิกิริยากำจัดหมู่อัลคิล (Dealkylation) หรือที่ตำแหน่งเมตาของหน่วยฟีนอล บริเวณสะพานเมทิลีนหรือที่หมู่ไฮดรอกซี



รูปที่ 11.6 โครงสร้างคาลิกซารีนและการจับกับแคตไอออน ที่มา Gutsche, C.D., 1988 และ Vicens, J., และ Bohmer, V., 1991

### โมเลกุลโฮสต์สำหรับแอนไอออน (Anion receptors)

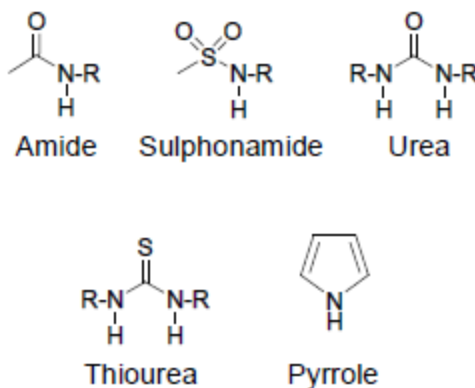
การออกแบบโมเลกุลโฮสต์สำหรับจับกับแอนไอออนจะมีความซับซ้อนมากกว่าแคตไอออน เนื่องจากแอนไอออนมีขนาดใหญ่กว่าแคตไอออน รูปร่างของแอนไอออนมีหลายรูปแบบเช่น ทรงกลม



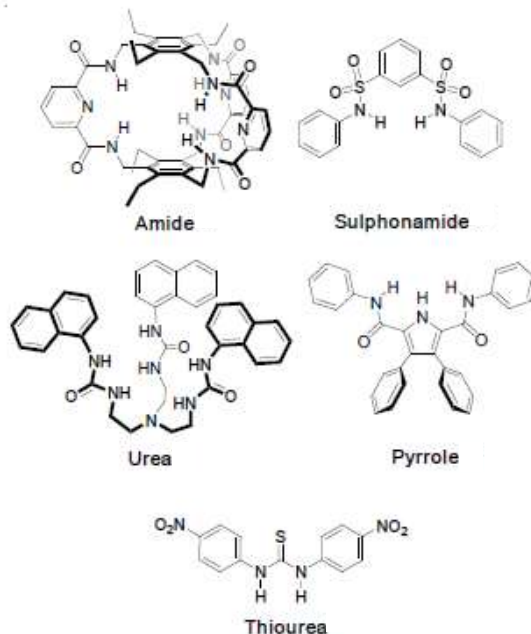
(Spherical) ได้แก่  $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Br^-$  และ  $I^-$  รูปทรงเส้นตรง (Linear) ได้แก่  $CN^-$ ,  $SCN^-$  และ  $N_3^-$  รูปทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ได้แก่  $SO_4^{2-}$  และ  $PO_4^{3-}$  เป็นต้น ดังนั้นโมเลกุลไฮสโตที่จับกับแอนไอออนจึงต้องมีรูปร่างสอดคล้องกับแอนไอออนเพื่อให้สามารถจับกันได้เหมาะสม สาเหตุที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือแอนไอออนมีพลังงานไฮเดรชัน (Solvation energy) สูงในสารละลายที่มีขั้วเมื่อเทียบกับแคตไอออน ทำให้แอนไอออนจับกับตัวทำละลายที่มีขั้วที่เสถียรมากกว่า นอกจากนั้นแอนไอออนบางชนิดมีช่วงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่แตกต่างกันไปในการจับกับไฮสโตอย่างเหมาะสม ดังนั้นโมเลกุลไฮสโตที่ใช้ต้องเป็นโมเลกุลที่สามารถมีส่วนที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับแอนไอออนได้ซึ่งอาจจะเป็นอันตรกิริยาแบบพันธะไฮโดรเจน โคออร์ดิเนชันด้วยไอออน แรงประจุไฟฟ้าและ/หรือแรงไฮโดรโฟบิกแสดงดังรูปที่ 11.7 สำหรับโมเลกุลไฮสโตที่สามารถจับกับแอนไอออนแบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ตามชนิดของอันตรกิริยา

รูปที่ 11.7 อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในตัวตรวจวัดแอนไอออน ที่มา Gale, P. A., 2001

1. ไฮสโตที่เกิดอันตรกิริยาพันธะไฮโดรเจน ไฮสโตกลุ่มนี้จะต้องมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้เช่น หมู่เอไมด์ (Amide), หมู่ซัลโฟนาไมด์ (Sulphonamides), หมูยูเรีย (Ureas), หมูไทอูเรีย (Thioureas) และไพโรล (Pyrrole) ดังรูปที่ 11.8 และตัวอย่างไฮสโตที่มีหมู่เหล่านี้เป็นองค์ประกอบในรูปที่ 11.9

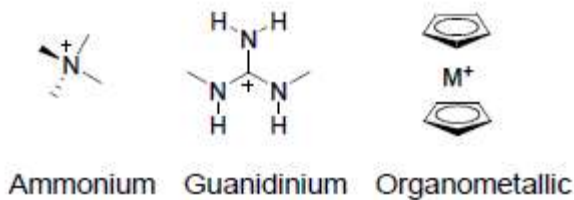


รูปที่ 11.8 หมู่ฟังก์ชันที่ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจน ที่มา Bondy, C.R. et al. และ Sessler, J.L., 2003

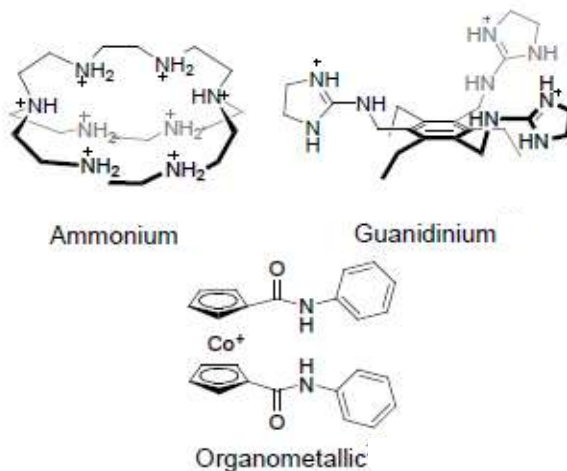


รูปที่ 11.9 ไฮสดีที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน ที่มา Kavallieratos, K, 1999

2. ไฮสดีที่เกิดอันตรกิริยาแบบไฟฟ้าสถิต ไฮสดีกลุ่มนี้จะมีหมู่หรือส่วนของโมเลกุลที่สามารถเกิดแรงประจุไฟฟ้ากับแอนไอออนได้ เช่น หมู่แอมโมเนียม (Ammonium), หมู่กวานิดีนียม (Guanidinium) และสารที่มีโลหะเป็นองค์ประกอบ (organometallic) แสดงดังรูปที่ 11.10 และตัวอย่างไฮสดีที่มีหมู่เหล่านี้เป็นองค์ประกอบแสดงในรูปที่ 11.11

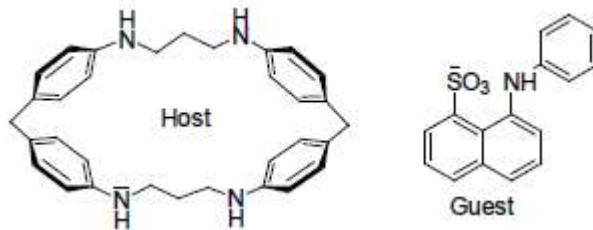


รูปที่ 11.10 หมู่ฟังก์ชันที่สามารถทำให้เกิดแรงประจุไฟฟ้ากับแอนไอออน ที่มา Metzger, A., และ Anslyn, E.V., 1998



รูปที่ 11.11 โฮสต์ที่สามารถใช้แรงประจุไฟฟ้าในการจับ ที่มา Metzger, A., และ Anslyn, E.V., 1998

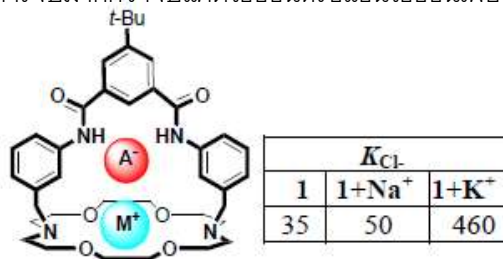
3. โฮสต์ที่เกิดอันตรกิริยาแบบแรงไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) เป็นโฮสต์ที่จับกับโมเลกุลที่ประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วและส่วนที่ไม่มีขั้วในโมเลกุล เช่น โปรตีน ฟอสโฟไลปิด ลีซัยอม เมื่อโมเลกุลเหล่านี้เจอกับน้ำส่วนที่มีขั้วจะจับกับน้ำทำให้เหลือส่วนที่ไม่มีขั้ว จึงเกิดแรงกระทำกับโฮสต์ชนิดนี้ได้ ตัวอย่างของโฮสต์แสดงดังรูปที่ 11.12



รูปที่ 11.12 โฮสต์ที่ใช้แรงไฮโดรโฟบิกในการจับ ที่มา Diederich, F., 1991

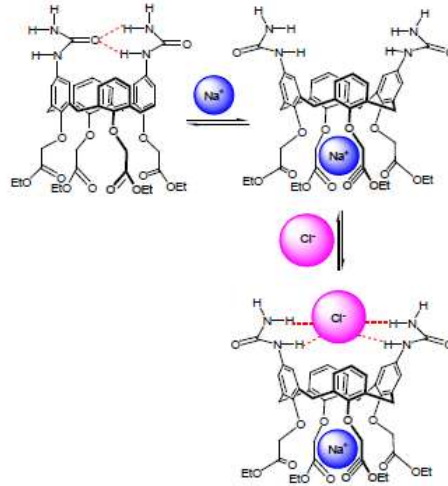
โมเลกุลโฮสต์สำหรับคู่ไอออน (Ion-pair) และโมเลกุลโฮสต์ชนิดสวิตเทอร์เรียน (Zwitterion receptors)

โมเลกุลโฮสต์สำหรับคู่ไอออนและสวิตเทอร์เรียนไอออนได้ถูกพัฒนาจากการออกแบบโมเลกุลโฮสต์ให้สามารถจับได้ทั้งแคตไอออนและแอนไอออนพร้อมกัน โดยมีทั้งหน่วยรับแคตไอออนและหน่วยรับแอนไอออนเชื่อมต่อกันเป็นโมเลกุลเดียวซึ่งการจับของไดทอปิก (Ditopic receptor) เป็นการจับแบบนอน-โคเวเลนต์และเป็นการจับแบบคู่ไอออนที่แข็งแรงมากกว่า การแยกจับกับไอออนเพียงโมเลกุลใดโมเลกุลหนึ่ง ตัวอย่างไดทอปิกโฮสต์เช่น โฮสต์ที่มีส่วนของเฮซาครอนสำหรับจับไอออนบวกและหมู่เอไมด์สำหรับจับแอนไอออน จากการศึกษาการจับของลิแกนด์กับไอออน โดยเปรียบเทียบค่าคงที่การจับ พบว่าการจับแบบไดทอปิกมีค่าคงที่การจับมากกว่าจับแคตไอออนหรือแอนไอออนเพียงอย่างเดียวดังรูปที่ 11.13



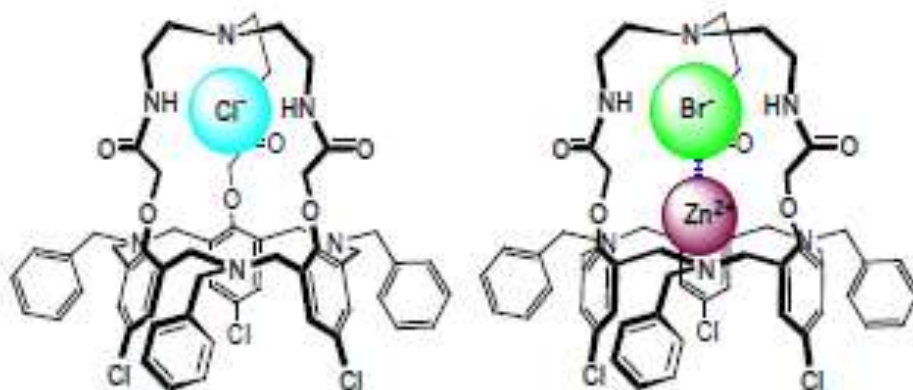
รูปที่ 11.13 การจับแบบไดทอปิกของโมเลกุลโฮสต์ ที่มา Mahoney, J.M., et al., 2001

นอกจากนี้ยังมีการใช้คาลิกซ์เอรีนเป็นโครงสร้างหลักโดยมีหมู่เอสเทอร์เป็นส่วนจับกับไอออนบวกและหมู่เรียวจับกับไอออนลบ เมื่อโฮสต์เกิดการจับกับไซเตียมไอออนจะทำให้การทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของหมู่เรียวถูกทำลาย ส่งผลให้โฮสต์สามารถใช้หมู่เรียวจับกับคลอไรด์แอนไอออนได้ ดังรูปที่ 11.14



รูปที่ 11.14 ความเป็นไปได้ในการจับกันของโฮสต์เมื่อจับกับ  $\text{Na}^+$  และ  $\text{Cl}^-$  ที่มา Scheerder, J., 1996

สำหรับเฮกซาไฮโมไตรอะซาลิกซ์ [3] เอรีน (Hexahomotriaxacalix [3] arene หรือ Azacalix [3]-arene) ซึ่งมีโครงสร้างหลักคล้ายคาลิกซ์เอรีนแต่มีอะตอมไนโตรเจนอยู่บนสะพานเชื่อมต่อระหว่างหน่วยฟีนอลซึ่งเป็นการเพิ่มตำแหน่งการจับได้ จากการศึกษาพบว่าเฮกซาไฮโมไตรอะซาลิกซ์ [3]-คริปแทน ซึ่งอยู่ในรูปแบบโคนและมีโพรงแบบปิดสามารถใช้เป็นตัวจับที่จำเพาะสำหรับ  $\text{Cl}^-$  แต่เมื่อจับกับ  $\text{Zn}^{2+}$  ก่อนการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนจะมีความจำเพาะเจาะจงกับ  $\text{Br}^-$  แทนดังรูปที่ 11.15

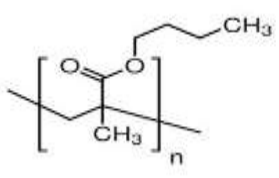
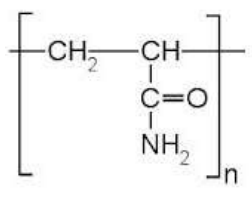


รูปที่ 11.15 ความเป็นไปได้ในการจับกันของโฮสต์กับ  $\text{Cl}^-$  ซึ่งสามารถเปลี่ยนไปจับกับ  $\text{Br}^-$  เมื่อมี  $\text{Zn}^{2+}$

ที่มา Kaewtong, C., et al., 2006

**ไฮโดรเจล (Hydrogel)** คือพอลิเมอร์ชนิดไฮโดรฟิลิกที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่ายหรือโครงร่างแหแบบสามมิติ โครงสร้างของไฮโดรเจลประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญคือส่วนที่สามารถเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับโมเลกุลของน้ำหรือเรียกว่าส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic group) เช่น หมู่ -OH, -COOH, -CONH<sub>2</sub>, -CONH- และ -SO<sub>3</sub>H เป็นต้น และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic group) เช่น หมู่ -CH<sub>2</sub>- และ -CH<sub>3</sub> เป็นต้น ระหว่างสายโซ่มีการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ พันธะไฮโดรเจน หรืออันตรกิริยาระหว่างหมู่ต่าง ๆ ในสายโซ่ประกอบกันเป็นสายโซ่ยาวจำนวนมากและโมเลกุลมีการพันทับกันหรือขดตัวกันอยู่ ทำให้ภายในโครงร่างโดยรวมเกิดรูพรุนขนาดเล็ก ๆ จำนวนมาก ตัวอย่างของโครงสร้างทางเคมีของไฮโดรเจลแสดงดังตาราง 11.1 (Williams, 1981) สมบัติเด่นของไฮโดรเจลคือสามารถดูดซับน้ำไว้ภายในโครงร่างที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างผลึกแบบโครงร่างแห (Crosslinked network structure) ได้มากกว่า 20% พร้อมกับสามารถพองตัวหรือขยายตัวออกได้และยังสามารถหดตัวได้เมื่อมีการสูญเสียโมเลกุลของน้ำออกไป อย่างไรก็ตามไฮโดรเจลมีโครงสร้างที่ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายได้ทุกชนิด (Ottenbrite, 1996)

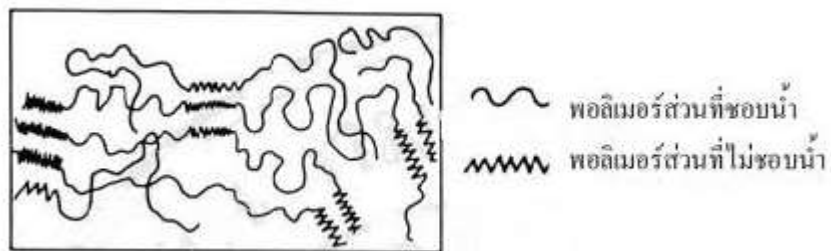
ตาราง 1.1 ตัวอย่างไฮโดรเจลที่นิยมประยุกต์ใช้งาน (Williams, 1981)

สูตรโครงสร้างทางเคมี	ชนิดไฮโดรเจล	ประเภทไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้นได้
	พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) Poly(2-hydroxyethyl methacrylate)	ฟิล์ม, โครงสร้างผลึกแบบโครงร่างแห, กราฟท์ลงบนพื้นผิว, การแผ่ยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์ (Interpenetrating polymer network)
	พอลิ(อะครีลาไมด์) Poly(acrylamide)	โครงสร้างผลึกแบบโครงร่างแห, กราฟท์ลงบนพื้นผิว, การแผ่ยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์ (Interpenetrating polymer network)

$\left[ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{CO}_2\text{H} \\   \quad   \\ -\text{C}-\text{C}- \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{CH}_3 \end{array} \right]_n$	พอลิ(เมทาคริลิก แอซิด) Poly (methacrylic acid)	โครงสร้างผลึกแบบโครงร่างแห, กราฟท์ลงบนพื้นผิว
	พอลิ(เอ็น,เอ็น-ไดเมทิลามิโนเอทิล เมทาคริลेट) Poly(N,N-dimethyl aminoethyl methacrylate)	โครงสร้างผลึกแบบโครงร่างแห, กราฟท์ลงบนพื้นผิว
	พอลิ(เอ็น-ไวนิล ไพโรลิโดน) Poly(N-vinyl pyrrolidone)	โครงสร้างผลึกแบบโครงร่างแห, กราฟท์ลงบนพื้นผิว
	พอลิ(เอทิลีน ออกไซด์) Poly(ethylene oxide)	โครงสร้างผลึกแบบโครงร่างแห

การจำแนกประเภทของไฮโดรเจลแบ่งเป็น 4 ประเภทใหญ่ ๆ ตามลักษณะของการสังเคราะห์และการประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้ (Williams, 1981)

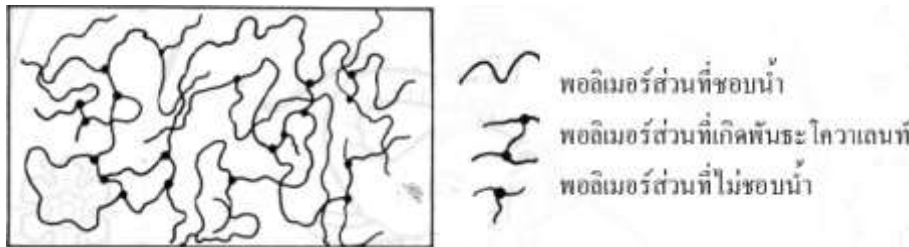
1. **ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์ม (Cast Film)** คือไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์มมักนำไปใช้เพื่อเคลือบพื้นผิวของวัสดุต่าง ๆ ไฮโดรเจลชนิดนี้มีโครงสร้างภายในที่ประกอบด้วยทั้งส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ ส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะช่วยป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลายต่าง ๆ ได้ โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังรูป 11.16



รูปที่ 11.16 โครงสร้างไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์ม ที่มา Williams, 1982

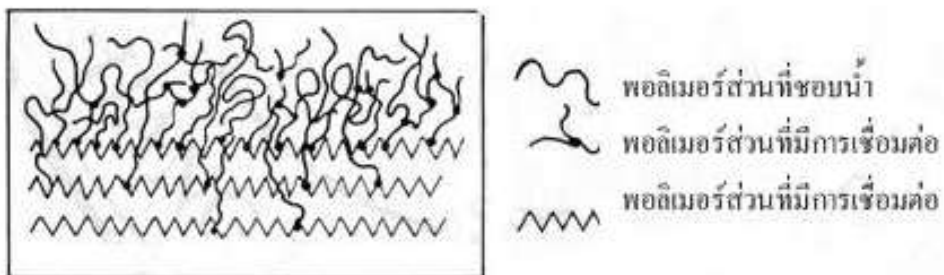
2. **ไฮโดรเจลแบบโครงร่างแห (Crosslinked Network)** คือไฮโดรเจลแบบโครงร่างแหเตรียมจากการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerisation) ระหว่างสารละลายผสมของมอนอเมอร์ (Monomer) ตัว

ริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) และสารเชื่อมขวางโมเลกุล (Crosslinking agent) หรือบางกรณีอาจเติมตัวทำละลายลงไปด้วยต่อจากนั้นเทลงในแม่พิมพ์ โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังรูป 11.17



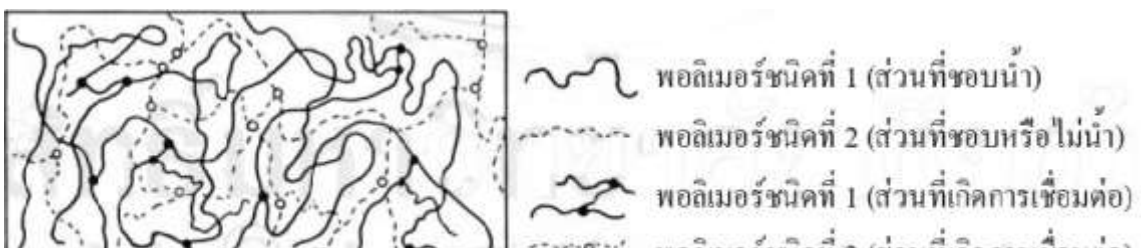
รูปที่ 11.17 โครงสร้างไฮโดรเจลแบบโครงสร้างผลึกแบบโครงร่างแห ที่มา Williams, 1982

3. ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิว (Surface Grafted Polymer) ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิวทำได้โดยการให้ไฮโดรเจลเกิดพันธะบนพอลิเมอร์อื่นที่ไม่สามารถละลายน้ำ เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลให้ตรงกับความต้องการเพื่อเหมาะกับการประยุกต์ใช้งานได้ เช่น ปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น โดยทำให้เกิดพันธะกับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติทางกลที่ดีกว่า หรือการทำให้ไฮโดรเจลที่ละลายน้ำได้กลายเป็นไฮโดรเจลที่ไม่ละลายน้ำ โดยเกิดพันธะกับพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถละลายในน้ำ โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังรูป 11.18



รูปที่ 11.18 โครงสร้างไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิว ที่มา Williams, 1982

4. ไฮโดรเจลแบบแผ่ยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์ (Interpenetrating Polymer Network, IPN) คือไฮโดรเจลที่มีโครงร่างแหของพอลิเมอร์ 2 ชนิดแทรกกันอยู่ที่ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ ส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมมีความแข็งแรงมากขึ้นหรือมีสมบัติด้านอื่น ๆ ที่ตรงกับความต้องการในการประยุกต์ใช้งานได้ดีขึ้นดังรูปที่ 11.19



รูปที่ 11.19 โครงสร้างไฮโดรเจลแบบแผ่ยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์ ที่มา Williams, 1982

นอกจากนี้ยังมีไฮโดรเจลอีกชนิดหนึ่งที่เรียกว่าชนิดกึ่งแผ่การยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์ (Semi-Interpenetrating polymer network, Semi-IPN) คือไฮโดรเจลที่มีการปะปนกันระหว่างพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบโครงร่างแหกับพอลิเมอร์ที่ไม่มีโครงร่างตาข่ายสอดแทรกกันอยู่ทำให้มีสมบัติของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดอยู่ด้วยกัน จึงเป็นการปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลได้อีกทางหนึ่งเพื่อการประยุกต์ใช้งานที่เพิ่มขึ้น (Park, 1993)

**สมบัติของไฮโดรเจล (Properties of Hydrogels) (Williams, 1982 และ Dumitriu, 2003)**

สมบัติเด่นของไฮโดรเจลคือการพองตัวแต่ไม่ละลายน้ำ เนื่องจากไฮโดรเจลมีส่วนประกอบทั้งส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ เมื่อนำไฮโดรเจลไปแช่น้ำ โมเลกุลของน้ำสามารถแพร่ผ่านและแทรกเข้าไปอยู่ในบริเวณที่ว่างหรือรูพรุนภายในโครงร่างสามมิติของไฮโดรเจลได้ เนื่องจากแรงดันออสโมติก (Osmotic pressure) โมเลกุลน้ำบางส่วนจะเกิดอันตรกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์แล้วผลักดันให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการขยายตัวหรือเกิดการพองตัวขึ้น ซึ่งเป็นการปรับโครงสร้างของไฮโดรเจลให้เกิดสมดุลใหม่ ไฮโดรเจลเมื่อขยายตัวเต็มที่จะไม่แยกขาดออกจากกัน เนื่องจากภายในโครงร่างประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่มีความยาวจำกัดและยึดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์โดยมีสารเชื่อมขวางโมเลกุล (Crosslink agent) เป็นสารช่วยการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ การพองตัวของสายโซ่พอลิเมอร์แสดงดังรูปที่ 11.20





รูปที่ 11.20 การเปลี่ยนแปลงของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการพองตัวโดยมีการแพร่ผ่านโมเลกุลน้ำเข้าไปภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล ที่มา Williams, 1982

**ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวของไฮโดรเจล มีดังต่อไปนี้คือ**

1. แรงดันออสโมติก เนื่องจากปริมาณน้ำภายในและภายนอกไฮโดรเจลไม่เท่ากันจึงทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติก ดังนั้นน้ำจากภายนอกจึงแพร่เข้าไปในช่องว่างหรือรูพรุนของไฮโดรเจลนั้น ถ้าแรงดันออสโมติกแตกต่างกันมาก น้ำจะสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในไฮโดรเจลได้มากขึ้น
2. แรงกระทำระหว่างโมเลกุลน้ำกับไฮโดรเจล เนื่องจากพอลิเมอร์ดังกล่าวมีโครงสร้างทางเคมีที่เหมาะสมสามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้มาก เช่น การเกิดพันธะไฮโดรเจน หรือแรงดึงดูดระหว่างขั้วทำให้เกิดการเหนี่ยวนำโมเลกุลน้ำแพร่เข้าสู่ไฮโดรเจลได้มาก
3. ช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากไฮโดรเจลมีช่องว่างหรือรูพรุนระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์มาก น้ำจะสามารถแพร่ผ่านเข้าไปได้มาก
4. ความยืดหยุ่นของสายโซ่พอลิเมอร์ หากสายโซ่โมเลกุลมีความยืดหยุ่นสูง จะช่วยลดแรงต้านทานการแพร่ของโมเลกุลน้ำ (Resistance force) เพื่อเข้าสู่สมดุใหม่ ทำให้โมเลกุลน้ำแพร่ผ่านเข้าสู่ไฮโดรเจลได้มาก
5. ความหนาแน่นของการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ หากความหนาแน่นของการเชื่อมต่อนั้นเปรียบเสมือนกับเป็นการเพิ่มแรงต้านทานการขยายตัวของไฮโดรเจลทำให้ความสามารถในการพองตัวของไฮโดรเจลลดลง โมเลกุลน้ำที่อยู่ภายในไฮโดรเจลมี 2 ลักษณะแสดงดังรูปที่ 11.21 ได้แก่ โมเลกุลน้ำที่ไม่เกิดอันตรกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์ที่เรียกว่า “โมเลกุลน้ำอิสระ” (Free water) สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ระบายได้ง่ายส่งผลกระทบต่อสมบัติของไฮโดรเจลไม่มากนัก และโมเลกุลน้ำที่เกิดพันธะกับโมเลกุลสายโซ่ (Bound water) ที่เคลื่อนที่อยู่ภายในโครงสร้างไฮโดรเจลได้ยากกว่าและต้องใช้ความร้อนปริมาณหนึ่งในการระเหยโมเลกุลน้ำลักษณะนี้ออก



รูปที่ 11.21 อันตรกิริยาของโมเลกุลน้ำในโครงสร้างไฮโดรเจลชนิด PVA ที่มา Williams, 1982

ปริมาณน้ำร้อยละที่มีอยู่ในองค์ประกอบของไฮโดรเจล (Water content, WC) สามารถคำนวณได้จากสมการ (11.1) (Williams, 1982)

$$\frac{(\text{น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำ} - \text{น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่แห้ง}) \times 100}{(\text{น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำ})} = \% \text{ปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบ} \quad (11.1)$$

สำหรับปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้างของไฮโดรเจล ขณะที่ไฮโดรเจลพองตัวเต็มที่เรียกว่า “ปริมาณน้ำสมดุล” (Equilibrium water content, EWC) นอกจากการหาปริมาณน้ำร้อยละที่มีเป็นองค์ประกอบที่อยู่ภายในไฮโดรเจลในตัวแปรของ WC ยังมีการศึกษาในตัวแปรสัดส่วนของการพองตัว (Swelling ratio, SR) ซึ่งเป็นการแสดงน้ำหนักของน้ำที่ถูกดูดซับเข้าไปเทียบกับพอลิเมอร์ การคำนวณหา SR แสดงดังสมการ (11.2) (Kim, 2004)

$$\frac{(\text{น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำ} - \text{น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่แห้ง})}{(\text{น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำ})} = \text{สัดส่วนการพองตัว} \quad (11.2)$$

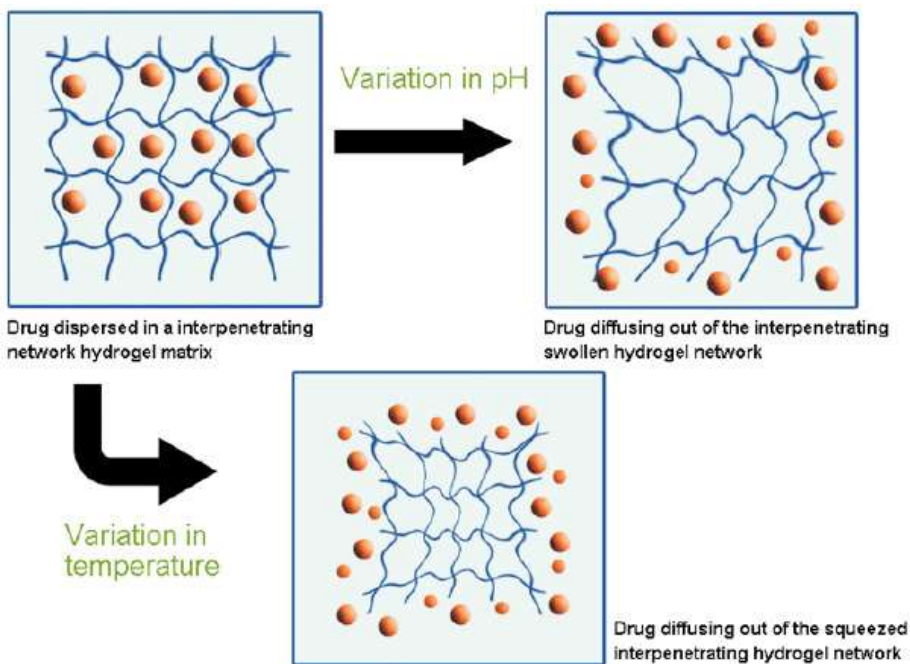
สมบัติที่สำคัญอีกประการของไฮโดรเจล คือ การยอมให้มีการแพร่ผ่านของโมเลกุลต่าง ๆ เช่น น้ำ ยา โปรตีน หรือแม้แต่ก๊าซออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านทางการแพทย์ (Dumitriu, 2003)

**การประยุกต์ใช้ไฮโดรเจลทางการแพทย์สำหรับการทำวัสดุปิดแผล (Medical Applications of Hydrogels for Used as Wound Dressing) Williams, 1982**

ในปี ค.ศ. 1960 ได้เริ่มการศึกษานำพอลิเมอร์สังเคราะห์มาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปิดแผลโดย Wichterle และ Lim (1960) ได้นำพอลิ (2-ไฮดรอกซีเอทิล เมทาคริเลต, poly (2-hydroxyethyl methacrylate, PHEMA) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชนิดโครงร่างตาข่าย ข้อดีของพอลิเมอร์ชนิดนี้ คือสามารถดูดซับน้ำได้ ยอมให้มีการแพร่ผ่านของไอน้ำและเมตาบอลิซึม และยังสามารถนำไปผ่านการปลอดเชื้อ (Sterilize) ได้โดยที่ไม่ทำให้พอลิเมอร์เสียสภาพ นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบรูปร่างรวมถึงโครงสร้างย่อย (Microstructure) ได้หลากหลายเพื่อให้เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานที่กว้างมากขึ้น ต่อมา Tanaka (1979) ได้มีความสนใจ พอลิ(อะคริลาไมด์, Poly(acrylamide) พบว่ามีสมบัติที่ใกล้เคียงกับ พอลิ (2-ไฮดรอกซีเอทิล เมทาคริเลต) ข้างต้น แต่มีข้อดีเพิ่มขึ้นมาคือ สามารถดูดซับน้ำได้ในอัตราที่เร็วกว่า นอกจากพอลิเมอร์สังเคราะห์สองชนิดที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ยังมีความพยายามที่จะนำพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ มาใช้ เช่น พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ เอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน (N-vinyl-2-pyrrolidone) เมทาคริลิก แอซิด (methacrylic acid) เมทิล เมทาคริเลต (Methyl methacrylate) และ 2-อะคริลาไมโด-2-เมทิลโพรเพน-ซัลโฟนิคแอซิด (2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid, AMPS) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการปรับปรุงพอลิเมอร์ดังกล่าวด้วยวิธีการพอลิเมอร์ไรเซชันในลักษณะต่าง ๆ เช่น โคพอลิเมอร์ พอลิเมอร์เบลนด์ และพอลิเมอร์แบบกราฟท์ เป็นต้น ตัวอย่างวัสดุปิดแผลชนิดไฮโดรเจลทางการค้าที่ได้รับความนิยมเช่น ไฮดรอน (Hydron®) วิจิลอน (Vigilon®) และเจลิเพิร์ม (Geliper®) เป็นต้น ซึ่งไฮโดรเจลเหล่านี้ประกอบขึ้นมาจากมอนอเมอร์ที่มีความเป็นไฮโดรฟิลิก เช่น HEMA เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol) และ อะครีลาไมด์ (Acrylamide) เป็นต้น นอกจากนี้แผ่นไฮโดรเจลทางการค้าบางชนิดยังมีการออกแบบให้มีลักษณะที่ประกอบขึ้นเป็นชั้น ๆ เพื่อเพิ่มความสามารถในการใช้งานให้มีหน้าที่จำเพาะของแต่ละชั้นด้วยวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันไปดังรูป 11.22 วัสดุไฮโดรเจลสามารถช่วยป้องกันการติดเชื้อเนื่องจากมีส่วนของชั้นที่ป้องกันการผ่านเข้ามาของสิ่งสกปรกหรือแบคทีเรียจากภายนอกและส่งเสริมให้เกิดการหายของแผลได้ในระยะเวลาที่เร็วขึ้นเนื่องจากแผ่นไฮโดรเจลมีความสามารถรักษาความชุ่มชื้นให้กับบาดแผล ซึ่งมีหลักฐานยืนยันทางการแพทย์ระบุว่าแผลที่มีความชุ่มชื้นในระดับที่เหมาะสมจะลดการติดเชื้อและที่สำคัญคือช่วยเร่งการหายของแผล (Kroschwitz, 1989) การนำวัสดุปิดบาดแผลมาใช้กับแผลใหม่ต้องพิจารณาสมบัติต่าง ๆ ที่จะมีผลกระทบต่อโครงสร้างและสภาพของผิวหนังที่กำลังซ่อมแซม รวมถึงเนื้อเยื่อที่สร้างขึ้นมาทดแทน ดังนั้นวัสดุปิดบาดแผลที่ดีควรมีสมบัติดังนี้

1. รักษาอัตราการระเหยของน้ำบริเวณบาดแผลให้เหมาะสม เพื่อป้องกันการสูญเสียของร่างกายและเพื่อป้องกันการคั่งของสารคัดหลั่งจากบาดแผล นอกจากนี้ยังต้องช่วยรักษาความชุ่มชื้นบริเวณบาดแผล

2. ไม่มีการต่อต้านจากเนื้อเยื่อ และไม่เป็นพิษ
3. สามารถป้องกันเชื้อโรคจากภายนอกบาดแผลได้
4. สามารถควบคุมปริมาณสารคัดหลั่งบริเวณบาดแผลให้เหมาะสมต่อการซ่อมแซมของบาดแผล
5. สามารถนำไปผ่านกระบวนการที่ทำให้ปราศจากเชื้อโรคได้
6. เป็นวัสดุที่ปิดบาดแผลได้แนบสนิท ไม่หลุดลอกได้ง่าย
7. ไม่เกาะติดกับเนื้อเยื่อที่ซ่อมแซมขึ้นมาใหม่และสามารถนำออกจากบาดแผลได้ง่ายโดยไม่ทำให้เกิดการเจ็บปวดในระหว่างการเปลี่ยนวัสดุปิดแผล
8. เป็นวัสดุที่มีสมบัติแลกเปลี่ยนและส่งผ่านอากาศ(ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์) ระหว่างบาดแผลกับบรรยากาศภายนอกได้ดี
9. เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง และยืดหยุ่นดีในระดับหนึ่งเพื่อয়ต่อการนำไปใช้งาน
10. อ่อนนุ่ม โค้งงอได้ สามารถแนบติดกับผิวของบาดแผลที่ไม่สม่ำเสมอได้ดี
11. มีอายุการใช้งานที่นานพอสมควรและมีเงื่อนไขในการเก็บรักษาคุณภาพวัสดุปิดบาดแผลน้อย
12. ป้องกันการลุกลามของบาดแผล
13. มีความสามารถในการส่งผ่านยาปฏิชีวนะ
14. ควรเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและราคาถูกลง



รูปที่ 11.22 ประโยชน์ของไฮโดรเจลในการนำส่งยาเข้าสู่ร่างกาย ที่มา Kroschwitz, 1989

## คำถามท้ายบท

1. ควรวนอีเทอร์คือพอลิเมอร์ประเภทใด
2. คุณลักษณะที่ดีของวัสดุปกปิดบาดแผลเป็นอย่างไร
3. ปัจจัยใดบ้างมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของไฮโดรเจล
4. โครงสร้างของพอลิเมอร์มีกี่ชนิด อะไรบ้าง
5. พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างประกอบด้วยหน่วยย่อยหรือมอนอเมอร์เพียงชนิดเดียวจัดเป็นพอลิเมอร์ชนิดใด

## บทที่ 12

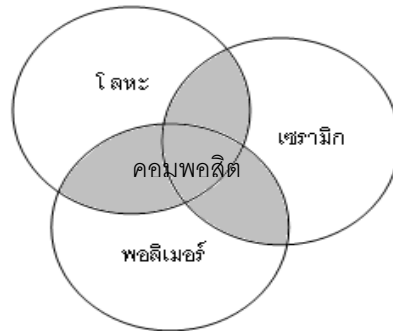
### วัสดุโนนคอมพอสิต (Nanocomposite materials)

วัสดุโนนคอมพอสิตคือการนำระบบวัสดุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมารวมกันหรือประกอบกันเพื่อทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณลักษณะและสมบัติโดดเด่นกว่าเดิม วัสดุโนนคอมพอสิตแบ่งเป็นสองเฟสคือเฟสปฐมภูมิหรือเฟสหลัก (Primary phase) เพื่อทำหน้าที่เป็นเฟสพื้น (Matrix phase) และเฟสทุติยภูมิหรือเฟสที่สอง (Secondary phase) เพื่อทำหน้าที่เป็นเฟสตัวเติม (Dispersing phase) หรือสารเสริมแรง (Reinforcing agent) หรือสารตัวเติม (Filler) ให้กับเฟสหลักโดยทั่วไปสัดส่วนการเติมเฟสตัวเติมลงในเฟสหลักที่เหมาะสมควรมีค่าไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร หรือคิดโดยสัดส่วนปริมาตร (Volume fraction) ไม่เกิน 0.5

วัสดุโนนคอมพอสิตถูกเตรียมขึ้นเพื่อต้องการปรับปรุงคุณภาพหรือคุณสมบัติของเฟสพื้นหรือเฟสหลักให้ดีขึ้นกว่าเดิมได้แก่ สมบัติทางกล เช่น การรับแรงดึง (Tensile stress) แรงกด (Compressive stress) มอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Strength) การทนแรงดึงยืด (Toughness) ความเหนียว (Ductility) สมบัติทางความร้อนและสมบัติทางไฟฟ้า เช่น การนำความร้อน (Thermal conductivity) หรือการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) การเป็นฉนวนความร้อนหรือฉนวนไฟฟ้า การทนความร้อน สมบัติทางแม่เหล็กและ

สมบัติทางแสง เช่น การเป็นตัวนำหรือการเป็นฉนวนแม่เหล็ก การเป็นตัวนำหรือการเป็นฉนวนไฟฟ้า นอกจากนี้การเติมเฟสตัวเติมอาจช่วยลดต้นทุนการผลิตให้ต่ำลง รวมทั้งปรับปรุงสมบัติทางกายภาพได้ด้วยเช่น ปรับปรุงสีและกลิ่น เพิ่มความสวยงาม ลดความหนาแน่น ลดน้ำหนักผลิตภัณฑ์ให้เบาขึ้นหรือบางขึ้น และเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะ เป็นต้น การปรับปรุงสมบัติทางเคมีของเฟสหลักเช่น การทนต่อสารเคมี ทนการกัดกร่อน ความเสถียรต่อสภาพแวดล้อม การทนความร้อน วัสดุนาโนคอมพอสิตดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายอุตสาหกรรมทั้งด้านปิโตรเลียม เช่น น้ำมันและแก๊สธรรมชาติ อุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่น สี ยา เครื่องสำอางค์ ยาสีฟัน กระจก ยานยนต์ หมึกพิมพ์ ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง อาหาร และเครื่องดื่ม อาหารสัตว์ รวมทั้งอุตสาหกรรมยานยนต์ อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์และอุปกรณ์กีฬา

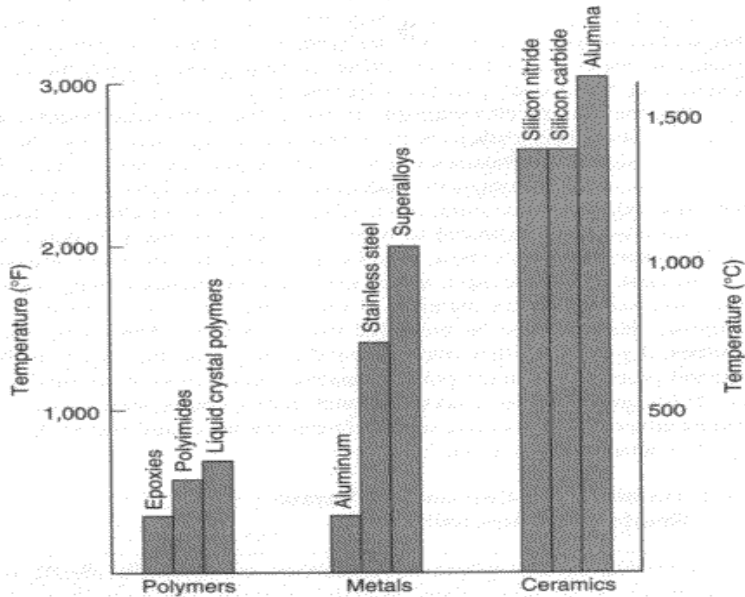
วัสดุนาโนคอมพอสิตทนทานต่อการกัดกร่อนและการกัดกร่อนสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ เครื่องจักร และอุตสาหกรรมอื่น ๆ มากมาย เนื่องจากเป็นวัสดุที่รวมคุณลักษณะและสมบัติที่ดีระหว่างเฟสพื้นและเฟสตัวเติมเข้าด้วยกัน การจำแนกประเภทวัสดุนาโนคอมพอสิตแบ่งตามชนิดของเฟสหลักที่เป็นองค์ประกอบได้แก่ โลหะ (Metal matrix composite, MMC) เซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC) และพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite, PMC) ดังรูป 12.1 เฟสตัวเติมหรือเฟสทุติยภูมิแบ่งตามรูปร่างและลักษณะโครงสร้างดังนี้คือ อนุภาค (Particle) เส้นใย (Fiber) และโครงสร้าง (Structural) การผสมเฟสพื้นและเฟสตัวเติมเข้าด้วยกันทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโครงสร้างที่แข็งแรงให้กับวัสดุนาโนคอมพอสิต



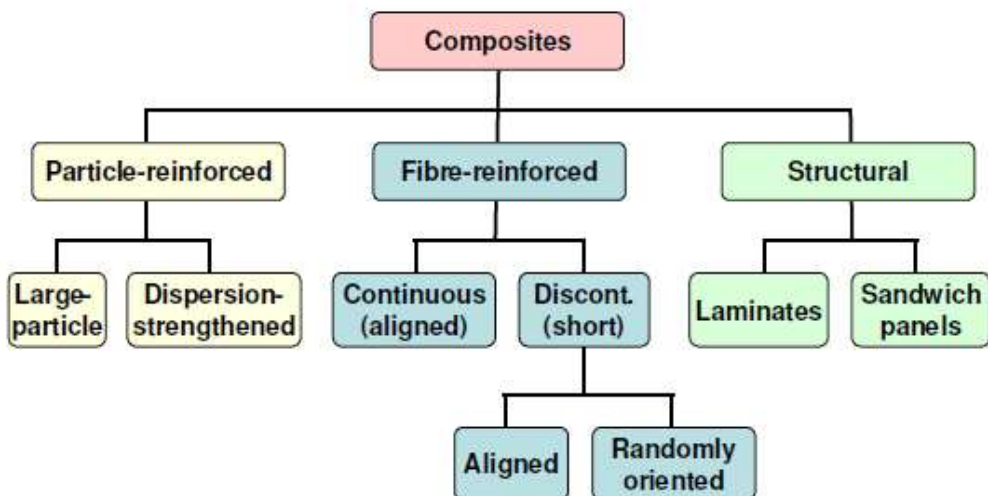
รูปที่ 12.1 วัสดุนาโนคอมพอสิตหรือวัสดุประกอบ ที่มา Callister, W.D., 2007

วัสดุนาโนคอมพอสิตมีความโดดเด่นและมีสมบัติที่ดีขึ้นอยู่กับเฟสพื้นและเฟสตัวเติม ดังนั้นหากต้องการผลิตวัสดุนาโนคอมพอสิตใด ๆ จำเป็นต้องคำนึงถึงสมบัติพื้นฐานของเฟสพื้นก่อน การเลือกเติมเฟสตัวเติมที่เหมาะสมลงในเฟสหลักเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์คอมพอสิตที่ดีและมีคุณภาพตามต้องการ

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เซรามิกคือผลิตภัณฑ์ที่ทนความร้อนสูงกว่าโลหะและพอลิเมอร์เหมาะที่จะใช้เป็นทั้งเฟสหลักและเฟสตัวเติมแต่เซรามิกมีความเหนียวต่ำ เพราะ รับแรงน้อย ดังรูป 12.2



รูปที่ 12.2 เปรียบเทียบการทนอุณหภูมิของพอลิเมอร์ โลหะและเซรามิก ที่มา Upadhyaya, G.S., 2000 วัสดุนาโนคอมพอสิตแบ่งออกเป็นสามประเภทใหญ่ ๆ คือ วัสดุนาโนคอมพอสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-reinforced composite) วัสดุนาโนคอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fibre-reinforced composite) และวัสดุนาโนคอมพอสิตโครงสร้าง (Structural composite) นอกจากนี้วัสดุนาโนคอมพอสิตแต่ละประเภทยังสามารถแบ่งเป็นประเภทย่อย ๆ ได้อีก ดังแสดงในแผนผังการแบ่งประเภทของวัสดุนาโนคอมพอสิต ดังรูปที่ 12.3



รูปที่ 12.3 ประเภทของวัสดุนาโนคอมพอสิต ที่มา Callister, W.D., 2007

### ประเภทของวัสดุนาโนคอมพอสิต

#### 1. วัสดุนาโนคอมพอสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-reinforced composite)

วัสดุนาโนคอมพอสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคคือวัสดุนาโนคอมพอสิตที่มีอนุภาคของวัสดุใดๆ กระจายตัวอยู่เฟสพื้น (Matrix) หรือเพื่อทำหน้าที่เสริมแรงที่เรียกว่าวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) มีรูปร่างหลายแบบ ตัวอย่างเช่น แผ่นบาง (Flake) อนุภาคกลม (Particle) เม็ดขนาดใหญ่ที่เรียกว่าแกรนูล (Granule) วัสดุนาโนคอมพอสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคแบ่งได้เป็นสองประเภทคือ วัสดุนาโนคอมพอสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ (Large-particle composite) และวัสดุนาโนคอมพอสิตที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยการกระจายตัวของอนุภาค (Dispersion-strengthened composite)

1.1 วัสดุนาโนคอมพอสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ (Large-particle composite) คำว่าอนุภาคขนาดใหญ่หมายถึงการมองในภาพรวมของอนุภาค ไม่ใช่มองในระดับอะตอมหรือโมเลกุล อย่างไรก็ตามเพื่อการเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพ ขนาดของอนุภาคไม่ควรมีขนาดใหญ่เกินไปและอนุภาคควรมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเฟสพื้น (Matrix) รูปร่างของอนุภาคอาจเป็นได้หลายแบบแต่ควรมีลักษณะสมมาตร (Equiaxed) คือมีขนาดเท่ากันในทุก ๆ ทิศทาง นอกจากนี้ปริมาณของอนุภาคที่ทำหน้าที่เป็นเฟสตัวเติมจะมีผลทำให้สมบัติหลายอย่าง เช่น ทางกล ทางความร้อน ทางไฟฟ้า และด้านอื่นๆ ของวัสดุนาโนคอมพอสิตดีขึ้น ตัวอย่างค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นของวัสดุนาโนคอมพอสิตที่เกิดจากสององค์ประกอบคือเฟสพื้นและเฟสตัวเติมและขึ้นอยู่กับสัดส่วนโดยปริมาตรขององค์ประกอบทั้งสองชนิดสามารถคำนวณได้จากสมการ "กฎการผสม (Mixture's rule)" โดยที่ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นของวัสดุนาโนคอมพอสิตจะมีค่าอยู่ระหว่างค่าขอบเขตสูงสุดของค่ามอดุลัสความยืดหยุ่น ( $E_c(u)$ ) กับค่าขอบเขตต่ำสุดของค่ามอดุลัสความยืดหยุ่น ( $E_c(l)$ ) ของวัสดุนาโนคอมพอสิต

ค่า  $E_c(u)$  และค่า  $E_c(l)$  สามารถหาได้จากสมการ

$$E_c(u) = E_m V_m + E_p V_p \quad (12.1)$$

ค่าต่ำสุด (Lower bound)

$$E_c(l) = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m} \quad (12.2)$$

โดยที่  $E_c(u)$  = ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นสูงสุดของวัสดุนาโนคอมพอสิต,  $E_c(l)$  = ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นต่ำสุดของวัสดุนาโนคอมพอสิต  $E_m$  = ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นของเฟสพื้น,  $E_p$  = ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นของอนุภาค,  $V_m$  = สัดส่วนโดยปริมาตรของเฟสพื้น,  $V_p$  = สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาค



ตามลำดับ ทั้งสองสูตรสามารถใช้เป็นสูตรต้นแบบสำหรับการคำนวณเพื่อหาค่าอื่น ๆ ได้อีกเช่น ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity,  $K$ ), ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity,  $\sigma$ ) เป็นต้น โดยการแทนค่าตัวแปรที่ต้องการทราบลงในตำแหน่งตัวแปรค่ามอดุลัสความยืดหยุ่น

รูปที่ 12.4 สมบัติมอดุลัสยืดหยุ่นของวัสดุคอมพอสิต ที่มา Callister 6<sup>th</sup> ed. (Fig. 16.3 is from R.H. Krock, *ASTM Proc*, Vol. 63, 1963

ตัวอย่างวัสดุโนคอมพอสิตประเภทหนึ่งที่รู้จักกันดีคือคอนกรีตประกอบด้วยเฟสพื้นคือซีเมนต์ โดยมีทรายและกรวดทำหน้าที่เป็นเฟสตัวเติมที่กระจายตัวอยู่เพื่อช่วยเสริมแรงและนอกจากจะช่วยเสริมแรงแล้วการที่ใส่ทรายและกรวดลงไปผสมทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตได้ เนื่องจากช่วยลดปริมาณของซีเมนต์ซึ่งมีราคาแพงกว่า

1.2 วัสดุโนคอมพอสิตที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยการกระจายตัวของอนุภาค (Dispersion-strengthened composite) วัสดุโนคอมพอสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคในกลุ่มนี้ ควรให้อนุภาคมีการกระจายตัวที่ดีอยู่ภายในโครงสร้างวัสดุคอมพอสิตดังนั้นควรให้ขนาดอนุภาคของเฟสตัวเติมมีขนาดเล็กกว่าเฟสหลัก โดยทั่วไปอนุภาคจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10-100 นาโนเมตร อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคซึ่งเป็นเฟสตัวเติมกับเฟสพื้น (Particle-matrix interaction) จะเป็นตัวช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างระดับอะตอมหรือโมเลกุล กระบวนการเพิ่มความแข็งแรงคล้ายกับกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน (Precipitation hardening) ตัวอย่างของวัสดุโนคอมพอสิตประเภทนี้ เช่น นิกเกิล ทีดี (TD nickel) คือ นิกเกิลอัลลอยด์ที่มีการเติมอนุภาคของทอเรีย (Thoria,  $\text{ThO}_2$ ) ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ยังคงมีความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิสูง และอีกตัวอย่างหนึ่งคือล้อยางรถยนต์ที่มีการเติมผงเขม่าคาร์บอน (Carbon black) ที่มีขนาดอนุภาค

ในช่วง 20-50 นาโนเมตร ปริมาณ 15-30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรลงไปใว้ในยางวัลคาไนซ์ (Vulcanised rubber) เพื่อช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึง ความแกร่ง และความต้านทานการสึกหรอให้กับล้อยาง

## 2. วัสดุโนนคอมพอลิทเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fibre-reinforced composite)

วัสดุโนนคอมพอลิทเสริมแรงด้วยเส้นใย เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและความแข็งดิ่งสูงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนัก ลักษณะเฉพาะดิ่งกล่าวสามารถแสดงได้ใว้ในรูปของค่าความแข็งแรงจำเพาะ ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความต้านทานแรงดิ่งกับความถ่วงจำเพาะ และใว้ในรูปของมอดุลัสจำเพาะซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างมอดุลัสความยืดหยุ่นกับความถ่วงจำเพาะ

**องค์ประกอบของวัสดุโนนคอมพอลิทเสริมแรงด้วยเส้นใย** ประกอบด้วย 1. เฟสตัวเติม (Dispersed phase) ชนิดเส้นใยสั้นหรือวิสเกอร์ (Whisker) เส้นใยขนาดยาวหรือไฟเบอร์ (Fiber) และเส้นใยขนาดเล็ก (Fine wire) และ 2. เฟสพื้น (Matrix)

### เฟสตัวเติม (Dispersed phase)

1. เส้นใยสั้นหรือวิสเกอร์ (Whisker) คือผลึกเดี่ยวที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวกับเส้นผ่าศูนย์กลางสูงมากและมีความเป็นผลึกที่สมบูรณ์ ความแข็งแรงสูง โดยทั่วไปแล้วเส้นใยสั้นหรือวิสเกอร์จะมีราคาแพงมาก เนื่องจากเตรียมยาก ตัวอย่างเช่น แกรไฟต์ ซิลิกอนคาร์ไบด์ ซิลิกอนไนไตรด์ อะลูมินา

2. เส้นใยขนาดยาว (Fiber) คือเส้นใยของวัสดุที่มีโครงสร้างกึ่งผลึก (Semi-crystalline) หรือโครงสร้างอะมอร์ฟัส (Amorphous) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็ก โดยทั่วไปแล้วมักจะเป็นพอลิเมอร์หรือเซรามิก ตัวอย่างเช่น อะรามิด (Aramid) แก้ว (Glass) คาร์บอน (C) โบรอนออกไซด์ ( $B_2O_3$ ) และอะลูมินา ( $Al_2O_3$ )

3. เส้นใยขนาดเล็ก (Fine wire) โดยทั่วไปแล้วเส้นใยขนาดเล็กจะมีขนาดที่โตกว่าเส้นใยสั้นหรือวิสเกอร์และเส้นใยขนาดยาวหรือไฟเบอร์และมักจะหมายถึงวัสดุโลหะ ตัวอย่างเช่น เหล็กกล้า (Steel) โมลิบดีนัม (Molybdenum, Mo) และทังสเตน (Tungsten, W) ตัวอย่างการใ้ใช้งานเช่น เส้นลวดเหล็กกล้าที่ใ้เสริมแรงใว้ในยางรถยนต์หรือลวดเสริมแรงใว้ในชิ้นส่วนของจรวด (Rocket casing)

**ขนาดความยาวของเส้นใย**มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงและความแข็งดิ่งของวัสดุโนนคอมพอลิท

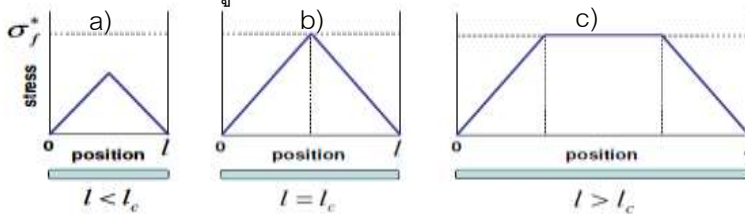
และเพื่อให้วัสดุโนนคอมพอลิทมีสมบัติด้านต่าง ๆ ที่ดี ขนาดของเส้นใยที่นำมาใ้ใ้ในการเสริมแรงควรมีค่าความยาววิกฤติค่าหนึ่งที่เหมาะสมซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย ค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate strength) หรือความต้านทานแรงดิ่ง (Tensile strength) และค่าความแข็งแรงของพันธะระหว่างเฟสพื้นกับเส้นใยหรือค่าความแข็งแรงเฉือน ณ จุดคราก (Shear yield strength) ของเฟสพื้นแล้วแต่ว่าค่าใดน้อยกว่ากัน ความสัมพันธ์ระหว่างความยาววิกฤติของเส้นใย เส้นผ่าศูนย์กลางของ

$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2\tau_c}$$

เส้นใย ความต้านทานแรงดึงของเส้นใย และความแข็งแรงของพันธะระหว่างเฟสพื้นกับเส้นใย แสดงดังสมการ 12.3

$$(12.3)$$

เมื่อ  $l_c$  คือความยาววิกฤติ,  $d$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย,  $\sigma_f^*$  คือความแข็งแรงสูงสุดหรือความต้านทานแรงดึงของเส้นใย  $\tau_c$  คือความแข็งแรงของพันธะระหว่างเฟสพื้นกับเส้นใย หรือค่าความแข็งแรงเฉือน ณ จุดครากของเฟสพื้น แล้วแต่ที่ว่าค่าใดน้อยกว่ากัน โดยทั่วไปแล้ว สำหรับวัสดุนาโนคอมพอสิตระหว่างเส้นใยแก้วกับเฟสพื้นชนิดคาร์บอน เส้นใยจะมีค่าความยาววิกฤติ ประมาณ 1 มิลลิเมตร ซึ่งคิดเป็น 20-150 เท่าของความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย



รูปที่ 12.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\sigma_f^*$  และความยาวของเส้นใย ( $l$ ): a)  $l < l_c$ , b)  $l = l_c$ , และ c)  $l > l_c$  ที่มา Callister, W.D., 2007

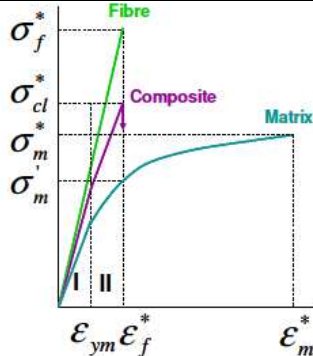
ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\sigma_f^*$  และความยาวของเส้นใยดังรูปที่ 12.5 อธิบายได้ว่า เมื่อเส้นใยมีความยาวน้อยกว่า  $l_c$  (รูปที่ 12.5 a) เส้นใยจะไม่สามารถรับแรงได้มากถึงค่า  $\sigma_f^*$  แต่เมื่อเส้นใยมีความยาวเท่ากับ  $l_c$  (รูปที่ 12.5 b) บริเวณกึ่งกลางของความยาวเส้นใยจะสามารถรับแรงได้ถึงค่า  $\sigma_f^*$  และถ้าเส้นใยมีความยาวมากกว่า  $l_c$  (รูปที่ 12.5 c) ช่วงของความยาวเส้นใยที่สามารถรับแรงได้ถึงค่า  $\sigma_f^*$  จะเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงด้วยเส้นใยดีขึ้น

### การจัดเรียงตัวของเส้นใยในการรับแรงทางกล

เมื่อมีแรงทางกลกระทำต่อวัสดุนาโนคอมพอสิตที่ผสมเฟสตัวเติมชนิดเส้นใย พบว่าเส้นใยจะเกิดการจัดเรียงตัวเพื่อทำหน้าที่รับแรงและกระจายแรงทางกล ทำให้ผลิตภัณฑ์ของวัสดุนาโนคอมพอสิตมีความปลอดภัย อายุการใช้งานนานขึ้น ดังนั้นการออกแบบเพื่อเติมเฟสตัวเติมชนิดเส้นใยลงในเฟสพื้นจึงทำได้หลายแบบเพื่อให้สามารถรับแรงและกระจายแรงทางกลและเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด เช่น การจัดเรียงเส้นใยแบบทิศทางเดียวกัน (Anisotropic, 1D) ดังรูปที่ 12.6, หลายทิศทางหรือแบบสุ่ม (Isotropic, 2D และ 3D), ถักทอเส้นใยแบบ 2 มิติ หรือ 3 มิติ ดังรูปที่ 12.7 โดยมีแพ็คเกจที่แสดงประสิทธิภาพการรับแรงที่ต่างกันดังตารางที่ 12.1

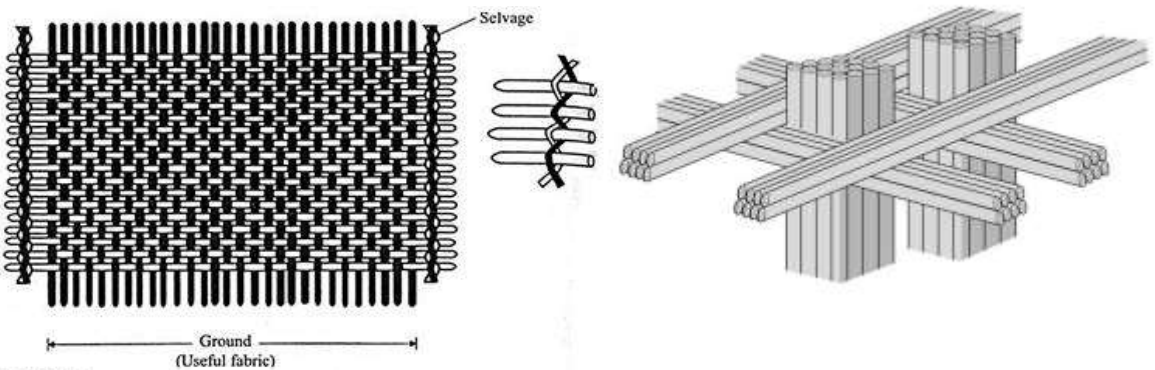
ตารางที่ 12.1 ทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยส่งผลต่อการรับและกระจายแรงที่ต่างกัน

การจัดเรียงตัวเส้นใย	ทิศทางความเค้น	ประสิทธิภาพการเสริมแรง (K)
เส้นใยขนานกันทุกเส้น (1D)	ขนานกับเส้นใย	1
	ตั้งฉากกับเส้นใย	0
เส้นใยกระจายตัวในทิศทาง 2D	ทุกทิศทางระนาบ 2D	3/8
เส้นใยกระจายตัวในทิศทาง 3D	ทุกทิศทางระนาบ 3D	1/5



- $\sigma'_m$  ความเค้นของเมทริกซ์เมื่อเส้นใยแตกหัก
- $\sigma*_m$  ความเค้นสูงสุดของเส้นใย
- $\sigma*_cl$  ความเค้นสูงสุดของคอมโพสิต
- $\sigma*_m$  ความเค้นสูงสุดของเส้นใย
- $\epsilon_{ym}$  ความเครียด ณ จุดครากของเมทริกซ์
- $\epsilon*_f$  ความเครียดสูงสุดเมื่อเส้นใยแตกหัก
- $\epsilon*_m$  ความเครียดสูงสุดเมื่อเมทริกซ์แตกหัก

รูปที่ 12.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใย เฟสพื้น และวัสดุนาโนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแบบต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน เมื่อทิศทางการให้แรงขนานกับเส้นใย ที่มา Callister, W.D., 2007



รูปที่ 12.7 การถักทอของเส้นใยแบบ 3 มิติ (3D) ที่มา Schwartz, M., 2006  
สมการที่ใช้ในการคำนวณสมบัติต่างๆ ของวัสดุนาโนคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยดังตัวอย่างสมการที่ 12.4 และ 12.5

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + K \sigma_f V_f \tag{12.4}$$

$$E_c = E_m V_m + K E_f V_f \quad (12.5)$$

โดยที่  $E_c$  คือค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นของวัสดุโนคอมพอสิต,  $E_m$  คือค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นของเฟสพื้น,  $E_f$  คือมอดุลัสความยืดหยุ่นของเฟสตัวเติมหรือเส้นใย,  $V_m$  คือสัดส่วนโดยปริมาตรของเฟสพื้น,  $V_f$  คือสัดส่วนโดยปริมาตรของเฟสตัวเติมหรือเส้นใย,  $\sigma$  คือความเค้น (Stress) และ  $\epsilon$  คือความเครียด (Strain) สำหรับแฟกเตอร์แสดงประสิทธิภาพการเสริมแรงตามทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยมีดังนี้  $k = 1$  (Anisotropic, 1D),  $k = 3/8$  (Random, 2D isotropic),  $k = 1/5$  (Random, 3D isotropic) สูตรที่ใช้คำนวณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุโนคอมพอสิตผสมเฟสตัวเติมชนิดเส้นใยได้แก่ ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่น ค่าการนำความร้อน การนำไฟฟ้า ค่าความหนาแน่น ค่าปัวซอง (Poisson's ratio) เป็นต้น สามารถคำนวณได้จากสมการ (12.4) และสมการ (12.5) ซึ่งสามารถใช้สมการดังกล่าวเป็นต้นแบบเพื่อคำนวณค่าอื่น ๆ ที่ต้องการทราบเช่น การนำไฟฟ้า การนำความร้อน ความหนาแน่น โดยการแทนที่ตัวแปรในสมการนี้คือ ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่น ( $E$ ) ด้วยตัวแปรอื่นที่ต้องการคำนวณ เช่น เปลี่ยนจาก  $E$  เป็น  $\sigma$  หรือ  $K$  หรือ  $\rho$  เป็นต้น

**เฟสพื้น (Matrix)** วัสดุอาจเป็นได้ทั้งชนิดโลหะ เซรามิก หรือพอลิเมอร์ โดยทั่วไปแล้วเฟสพื้นมักมีความเหนียวที่ดีและมีหน้าที่หลักคือยึดเส้นใยไฟเบอร์ไว้ด้วยกัน รวมทั้งทำหน้าที่เป็นตัวกลางส่งผ่านแรงที่มากระทำไปยังไฟเบอร์ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันความเสียหายของเส้นใยไฟเบอร์เนื่องจากการขีดถูหรือการเกิดปฏิกิริยาเคมี แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะ (Adhesive force) ระหว่างเส้นใยไฟเบอร์กับเฟสพื้นควรมีค่าสูงพอเพื่อป้องกันเส้นใยไฟเบอร์จะถูกดึงให้หลุดออกจากเฟสพื้น

นอกจากนี้ยังมีวัสดุโนคอมพอสิตอีกชนิดหนึ่งที่เรียกว่า **วัสดุโนคอมพอสิตแบบไฮบริด (Hybrid composite)** วัสดุโนคอมพอสิตแบบไฮบริดเป็นการเสริมแรงด้วยเส้นใยมากกว่าหนึ่งชนิด ตัวอย่างเช่น วัสดุโนคอมพอสิตแบบไฮบริดของพอลิเมอร์เรซินที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอนมีความแข็งแรง ความแข็งตึงสูง น้ำหนักเบา แต่ราคาแพง ในขณะที่เส้นใยแก้วอาจแข็งแรงไม่เท่าแต่มีราคาถูกกว่า จึงนำมาใช้ผสมกัน และทำให้วัสดุโนคอมพอสิตแบบไฮบริดที่ได้มีความแข็งแรง ความแข็งตึง และความต้านทานการกระแทกสูงขึ้น ตัวอย่างการใช้งานวัสดุชนิดนี้ เช่น ชิ้นส่วนโครงสร้างของยานพาหนะเช่น เรือ รถยนต์ และเครื่องบิน อุปกรณ์กีฬา เช่นไม้กอล์ฟ ไม้เทนนิส และชิ้นส่วนงานทางการแพทย์ที่ต้องการให้มีน้ำหนักเบา (Lightweight orthopaedic component)

### กระบวนการผลิตวัสดุโนคอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย

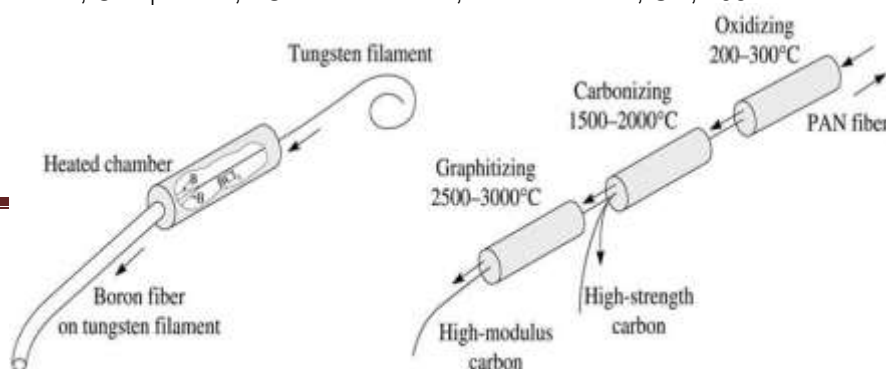
วัสดุโนคอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยสามารถผลิตได้หลายวิธีเช่น การอัดรีดหรือพัลทรูชัน (Extrusion or Pultrusion) ดังรูปที่ 12.8 การพันใยยาว (Filament winding) ดังรูปที่ 12.9 การฉีกทอแบบ 3 มิติ ดังรูป 12.7 เพื่อให้การรับแรงและการกระจายแรงทางกลมีประสิทธิภาพสูงสุดเช่น การใช้เส้น

ใยชนิดโบรอนคาร์บอนหรือทังสเตนมาห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์หรือเซรามิกผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน และกระบวนการแกรไฟไทเซชันที่อุณหภูมิสูงดังรูป 12.10 ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไฟฟ้า นำความร้อน รับแรงทางกลดี เช่น ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นสูง ความแข็งแรงสูง การรับแรงดึงสูง เหมาะสำหรับผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อใช้งานในอุตสาหกรรมพวกขดลวดความร้อนหรือฮีทเตอร์ คอนเดนเซอร์ เครื่องจักร เครื่องใช้ไฟฟ้า รถยนต์และอากาศยาน เป็นต้น นอกจากนี้เส้นใยอาจถูกนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์นาโนคอมพอสิตโดยวิธีการขึ้นรูปแบบเทปกาวโดยให้เส้นใยวางอยู่ตรงกลางดังรูปที่ 12.11 ปิดทับด้วยเฟสพื้นที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางบางเช่นเดียวกัน หรืออาจใช้อุปกรณ์อื่นช่วยในการขึ้นรูปเช่น แมนเดรลเพื่อให้การดักทอของเส้นใยหรือแผ่นเทปที่เตรียมไว้เรียบร้อยแล้วขึ้นรูปได้ง่ายและสะดวกมากขึ้นดังรูป 12.12

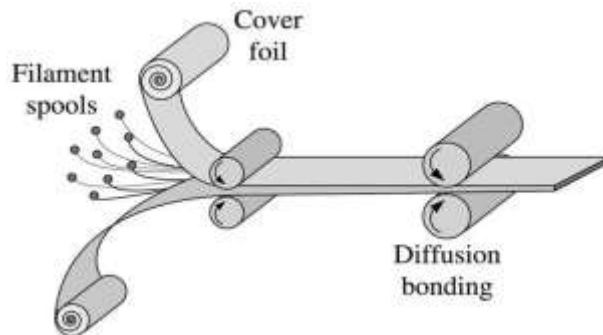
รูปที่ 12.8 การผลิตวัสดุนาโนคอมพอสิตโดยวิธีพัลทรูชัน (Pultrusion) ที่มา Engineering Materials Handbook, Vol.1, Composites, ASM International, Materials Park, OH, 1987



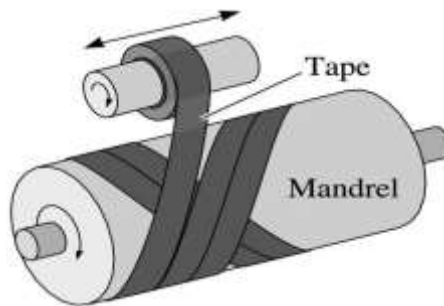
รูปที่ 12.9 การผลิตวัสดุนาโนคอมพอสิตโดยวิธีพัลทรูชัน ที่มา Engineering Materials Handbook, Vol.1, Composites, ASM International, Materials Park, OH, 1987



รูปที่ 12.10 การผลิตวัสดุนาโนคอมพอสิตโดยใช้เส้นใยเป็นเฟสตัวเติม: a) เส้นใยทั้งสแตนเลสและโบริออน และ b) เส้นใยพอลิอะครายโลไนโตรน (PAN) ที่มา Engineering Materials Handbook, Vol.1, Composites, ASM International, Materials Park, OH, 1987



รูปที่ 12.11 การผลิตวัสดุคอมพอสิตแบบเทปขาว (Tape) ที่มา Engineering Materials Handbook, Vol.1, Composites, ASM International, Materials Park, OH, 1987

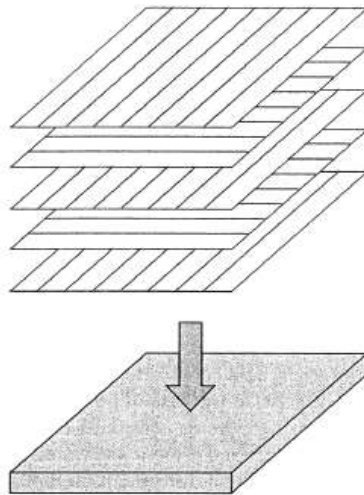


รูปที่ 12.12 การผลิตวัสดุคอมพอสิตแบบเทปโดยการถักทอด้วยแมนเดรล (Mandrel) ที่มา Engineering Materials Handbook, Vol.1, Composites, ASM International, Materials Park, OH, 1987

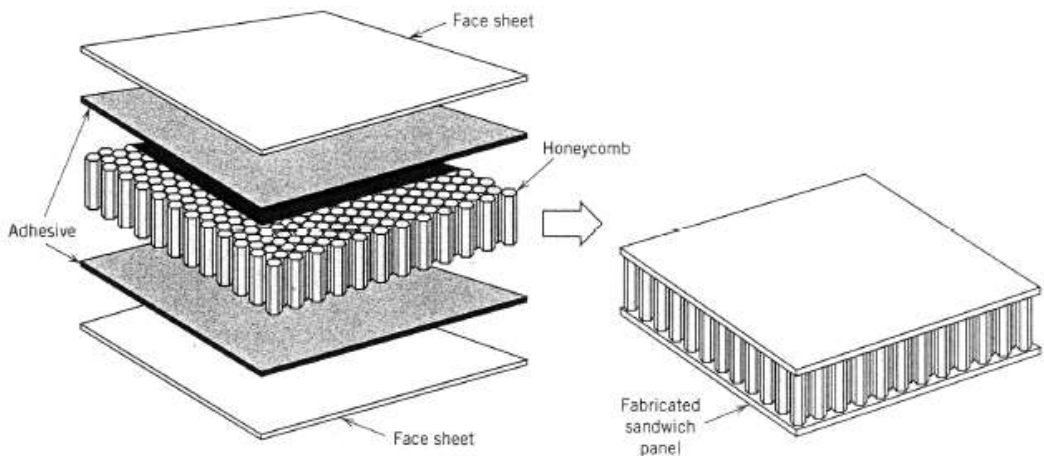
### 3. วัสดุนาโนคอมพอสิตชนิดโครงสร้าง (Structural composite)

วัสดุนาโนคอมพอสิตโครงสร้างสามารถประกอบขึ้นจากวัสดุเนื้อเดียวและสมบัติของวัสดุนาโนคอมพอสิต ขึ้นอยู่กับโครงสร้าง องค์ประกอบและชนิดของวัสดุนาโนที่นำมาประกอบกัน สามารถแบ่งวัสดุนาโนคอมพอสิตโครงสร้างได้เป็นสองประเภท คือ วัสดุนาโนคอมพอสิตแบบเคลือบทับหรือลามิเนต

(Laminar composite) ดังรูปที่ 12.13 และผลิตภัณฑ์นาโนคอมโพสิตชนิดแผ่นประกอบแบบแซนด์วิช (Sandwich panel) ดังรูปที่ 12.14



รูปที่ 12.13 วัสดุนาโนคอมโพสิตแบบเคลือบทับหรือลามิเนต ที่มา Callister, W.D., 2007

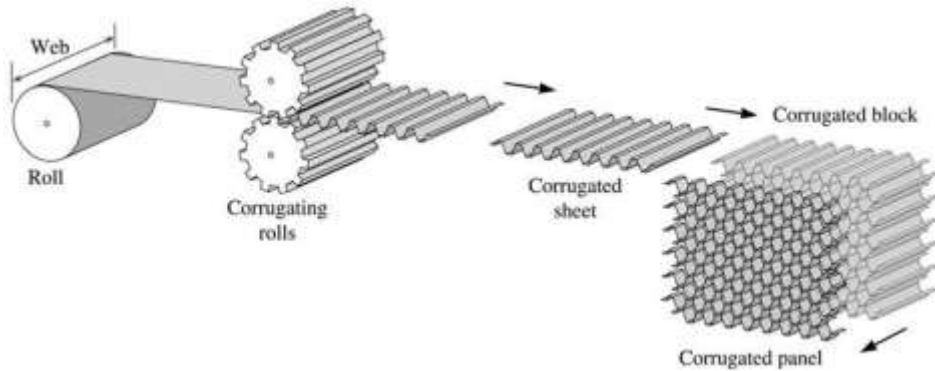


รูปที่ 12.14 วัสดุนาโนคอมโพสิตชนิดแผ่นประกอบแบบแซนด์วิช ที่มา Callister, W.D., 2007  
**ข้อดีของการเลือกใช้เฟสตัวเติมชนิดโครงสร้างคือ** ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีน้ำหนักเบา รูปทรงสูง ยึดหยุ่นตัว ความแข็งแรงสูง ทนอุณหภูมิสูง ทนความร้อน ทนน้ำมัน และทนการกัดกร่อน ผลิตภัณฑ์คอมโพสิต

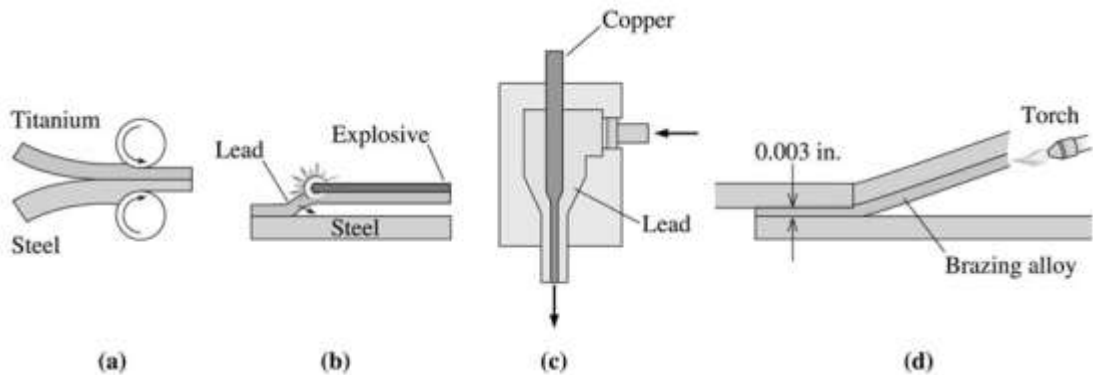


ชนิดโครงสร้างสามารถถูกออกแบบให้มีรูปร่าง รูปทรง เหมาะกับตำแหน่งที่ต้องการติดตั้งและใช้งานเช่น การทำเป็นทรงเหลี่ยม ทรงกลม ม้วนโค้ง แบบรอยหยักที่เรียกว่าคอรูเกต (Corrugated core) หรือรูปแบบอื่น ๆ ได้ง่าย

กระบวนการผลิตวัสดุคอมพอสิตชนิดโครงสร้างมีหลายวิธี เช่น การอัดรีด (Extrusion) การขึ้นรูปโดยการกดอัดด้วยแบบพิมพ์ (Compression molding) การม้วนรีด (Rolling) หรืออาจใช้วิธีการเชื่อมการบัดกรี เพื่อช่วยให้การยึดเกาะระหว่างผิวรอยต่อของเฟสพื้นและเฟสตัวเติมแข็งแรง



รูปที่ 12.15 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์คอมพอสิตแบบรังผึ้งคอรูเกต (Corrugated honeycomb core) ที่มา Engineering Materials Handbook, Vol.1, Composites, ASM International, Materials Park, OH, 1987.



รูปที่ 12.16 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์คอมพอสิตชนิดแกนวิซแบบต่างๆ a) การม้วนรีด (Rolling bonding); b) การยึดเกาะผิว (Explosive bonding); c) การอัดรีดขึ้นรูปแบบผสม (Coextrusion); และ d) การบัดกรี (Brazing) ที่มา Engineering Materials Handbook, Vol.1, Composites, ASM International, Materials Park, OH, 1987

ชนิดของวัสดุนาโนคอมพอสิตแบ่งเป็น 3 ชนิดตามประเภทของเฟสพื้นคือพอลิเมอร์ เซรามิก และโลหะ

1. วัสดุนาโนพอลิเมอร์คอมพอสิต Nanopolymer-matrix composites (NPMCs)

NPMCs คือวัสดุนาโนพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีพอลิเมอร์เป็นเฟสพื้นและเฟสตัวเติมเป็นได้หลายชนิดวัสดุเช่น แก้ว คาร์บอน และอะรามิด วัสดุนาโนพอลิเมอร์คอมพอสิตมีการใช้งานแพร่หลายเนื่องจากมีราคาถูก และขึ้นรูปง่ายที่อุณหภูมิห้อง พอลิเมอร์ที่นิยมใช้เป็นเฟสพื้นมากที่สุดคือพอลิเอสเตอร์และไวนิลเอสเตอร์ แต่ยังมีพอลิเมอร์ประเภทอื่น ๆ อีก ตัวอย่างเช่น อีพอกซีซึ่งมีราคาสูงกว่าพอลิเอสเตอร์หรือไวนิลเอสเตอร์ แต่มีสมบัติทางกลที่ดีกว่าและสามารถทนความร้อนได้สูงกว่าหรือพอลิไอมิดเรซิน (Polyimide resin) ซึ่งทนความร้อนได้ดีกว่าพอลิเมอร์ทั่วไป จึงถูกนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ถึง 230 °C หรือพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (Polyether etherketone, PEEK) พอลิฟีนิลินซัลไฟด์ (Polyphenylene sulphide, PPS) พอลิอีเทอร์ไอมิด (Polyetherimide, PEI) ซึ่งมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้งานด้านยานอวกาศในอนาคต ตัวอย่างวัสดุนาโนพอลิเมอร์คอมพอสิต (NPMC) เช่น การใช้เส้นใยเคปล่า (Kevlar) ซึ่งสามารถรับแรงทางกลสูงมากในการผลิตผลิตภัณฑ์ของวัสดุคอมพอสิตจำพวก ถุงมือ หมวก เสื้อผ้า รองเท้า ดังรูป 12.17



รูปที่ 12.17 การประยุกต์ใช้งานของผลิตภัณฑ์คอมพอสิตเคปล่าเพื่อผลิต หมวก ถุงมือ รองเท้าและเสื้อผ้า ที่มา Saito, S., 1988

2. วัสดุนาโนเซรามิกคอมพอสิต Nanoceramic-Matrix Composite (NMCs)

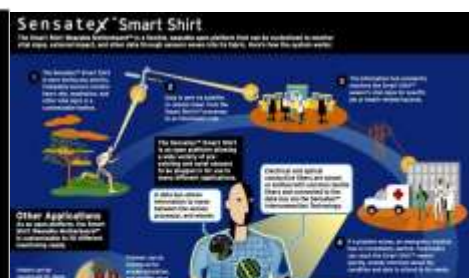
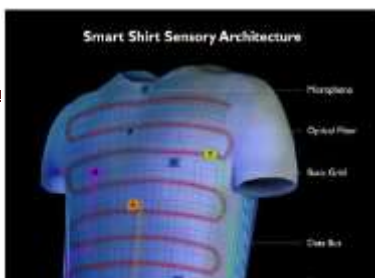
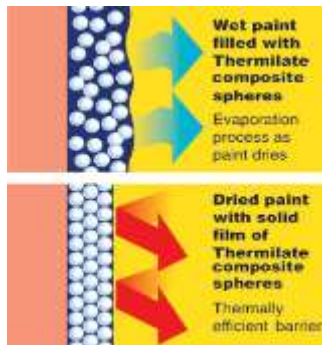
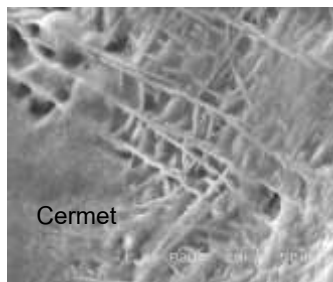
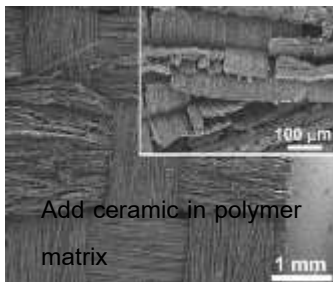
โดยทั่วไปแล้ว วัสดุนาโนเซรามิกสามารถทนต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ที่อุณหภูมิสูงแต่มีข้อด้อยคือมีค่าความทนทานต่อการแตกหักต่ำเมื่อเทียบกับโลหะ ดังนั้นวัสดุนาโนเซรามิกจึงถูกปรับปรุงสมบัติให้มีความเหนียวและรับแรงได้ดีขึ้น จึงนำมาทำเป็น NCMCs ซึ่งการเสริมแรงสามารถทำได้โดยการเติมเฟสตัวเติมชนิดอนุภาค เส้นใยสั้นหรือวิสเกอร์ หรือเส้นใยยาวหรือไฟเบอร์

Cermet หรือ ceramic-metal composite คือ NMMCs ที่มีเฟสพื้นเป็นโลหะน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรและเสริมแรงด้วยอนุภาคเซรามิกจำพวกออกไซด์ โบโรไซด์ คาร์ไบด์ หรืออะลูมินา ส่วนโลหะที่ทำหน้าที่เป็นเฟสพื้นอาจเป็นนิกเกิล โมลิบดีนัม หรือโคบอลต์ ตัวอย่าง Cermet เช่น เฟสพื้นชนิดโคบอลต์หรือนิกเกิลเสริมแรงด้วยอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์ หรือไทเทเนียมคาร์ไบด์ (อาจเติมได้มากถึง 90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) วัสดุที่ได้จะมีความแข็งแรง (รองจากเพชร) และสามารถทนความร้อนได้ดี ตัวอย่างการใช้งานของ Cermet ได้แก่ ใช้ในกระบวนการผลิตตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องใช้งานที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยังมีวัสดุนาโนคาร์บอน-คาร์บอนคอมพอสิต (Carbon-carbon composite) เป็นวัสดุนาโนคอมพอสิตแบบใหม่และมีราคาแพง แต่มีสมบัติที่น่าสนใจเนื่องจากมีค่ามอดูลัสแรงดึงและความต้านทานแรงดึงสูงที่อุณหภูมิสูงถึง 2000 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังมีความต้านทานการยึดตัว (Creep) ความทนทานต่อการแตกหัก สภาพการนำความร้อนสูง และมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ สามารถนำไปใช้ทำชิ้นส่วนของเครื่องยนต์หลายอย่างเช่น ทรายนต์ จรวด และเครื่องบิน ใช้เป็นวัสดุเพิ่มความเสียดทานประเภท เบรก คลัช ให้กับเครื่องบิน อากาศยานและทรายนต์สมรรถนะสูง หรือทำแบบพิมพ์อัดร้อน (Hot Isostatic Pressing) Hot pressing เป็นต้น การประยุกต์ใช้งานของวัสดุนาโนเซรามิกคอมพอสิตมีหลายอย่าง เช่น อิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ อุปกรณ์ไฟฟ้า เครื่องจักร อุตสาหกรรมสิ่งทอได้แก่ เสื้อผ้าหรือเส้นใยทนความร้อน อุตสาหกรรมสีทาอาคารที่สามารถทนแสงแดด สะท้อนรังสีอัลตราไวโอเล็ต เสื้อกันกระสุน ฉนวนความร้อนสำหรับเครื่องบินและอากาศยาน ทรายนต์กันกระสุน กระฉกกันกระสุน หมวกนิรภัยรับแรงกระแทก รวมทั้งการใช้ประโยชน์ทางการแพทย์และทันตกรรมเช่นรากฟันเทียม ฟันปลอม เป็นต้นดังตารางที่ 12.2

**ตารางที่ 12.2** ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานของวัสดุนาโนเซรามิกคอมพอสิต

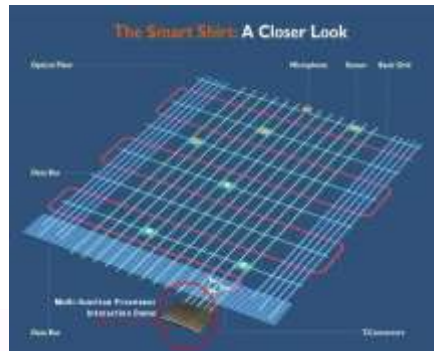
ระบบ	ประโยชน์
Ag-CdO	ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (Electrical contact materials)
Al-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ชิ้นส่วนในเตาปฏิกรณ์ปรมาณู (Possible use in nuclear reactors)
Be-BeO	ชิ้นส่วนอากาศยานและเตาปฏิกรณ์ปรมาณู (Aerospace and nuclear reactors)

Co-ThO <sub>2</sub> , Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	วัสดุแม่เหล็กที่สามารถต้านทานการยืดตัว (Possible creep-resistant magnetic materials)
Ni-20% Cr-ThO <sub>2</sub>	ส่วนประกอบของใบพัดในเครื่องยนต์ (Turbine engine components)
Pb-PbO	ขั้วแบตเตอรี่ (Battery grids)
Pt-ThO <sub>2</sub>	ขดลวดไฟฟ้า (Filaments), ส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ (electrical components)
W-ThO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub>	ขดลวดไฟฟ้า (Filaments), ขดลวดความร้อนหรือฮีทเตอร์ (Heaters)

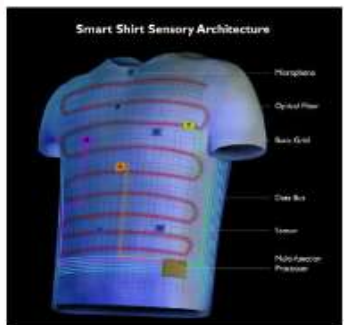


รูปที่ 12.18 การประยุกต์ใช้งานของวัสดุนาโนเซรามิกคอมพอสิต เช่น เสื้ออัจฉริยะและสีทาอาคาร  
 ที่มา Dresselhaus, M.S., et al., 1988

จากรูป 12.18 แสดงตัวอย่างวัสดุนาโนเซรามิกคอมพอสิตเซรามิกสำหรับการผลิตเป็นฉนวนความร้อนของเครื่องบิน รถยนต์ วัสดุกันกระสุนหรือรับแรงกระแทกของรถยนต์ วัสดุคอมพอสิตเซรามิกในตัวอย่างรถยนต์ วัสดุนาโนเซรามิกคอมพอสิตของฟันปลอม ฐานรองพื้น คอพื้น วัสดุนาโนเซรามิกคอมพอสิตรับแรงกระแทกของหมวกกันน็อกหรือวัสดุนาโนเซรามิกคอมพอสิตสำหรับเรือเพื่อให้มีน้ำหนักเบา นอกจากนี้ยังอาจใช้วัสดุนาโนเซรามิกคอมพอสิตในการผลิตเสื้อทหารกันกระสุนที่เรียกวัสดุนี้ว่าเซอร์เมต (Cermet) หรือการผลิตเสื้อทนความร้อนสำหรับใช้ในการดับเพลิง เสื้ออัจฉริยะสำหรับการติดตามดูแลผู้ป่วยอย่างใกล้ชิด และการผลิตวัสดุคอมพอสิตเซรามิกสำหรับอุตสาหกรรมสีทาอาคารให้ทนความร้อน ทนแสงแดด สีทาอาคารซีดช้าลง และเพิ่มอายุการใช้งานให้นานขึ้น



**Platform Implementation**  
 Combined Small Area & Wide Area Wireless Monitoring Application



รูปที่ 12.19 ผลิตภัณฑ์วัสดุนาโนเซรามิกคอมพอสิตสำหรับการผลิตเสื้ออัจฉริยะสำหรับเด็กและผู้ป่วย ที่มา Kasap, S.O., 2002

นอกจากนี้วัสดุนาโนเซรามิกคอมพอสิตยังสามารถผลิตเสื้ออัจฉริยะ (Smart shirt) สำหรับการติดตามผลการรักษาและดูแลผู้ป่วย เด็ก ทารก โดยการติดเซนเซอร์ไว้ภายในเสื้อหรือการผลิตเซนเซอร์เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิ ความร้อน อัตราการแพร่ก๊าซออกซิเจนหรือก๊าซอื่น ๆ เป็นต้น ดังรูป 12.19 กล่าวโดยสรุปได้ว่าประโยชน์การใช้งานของวัสดุนาโนเซรามิกคอมพอสิต (NCMC) มีดังต่อไปนี้

- ใช้ในการผลิตโครงสร้างยานพาหนะประเภทต่าง ๆ เช่น รถยนต์ขนาดเล็ก รถบรรทุก
- ใช้ในการผลิตสัญญาณไฟจราจรอัจฉริยะสำหรับการจราจรบนถนน
- ใช้ผลิตสีอุตสาหกรรม
- ใช้ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ได้แก่ เบรก คลัช แหวนรอง ชิ้นส่วนภายในห้องเครื่องยนต์ เป็นต้น
- ผลิตระบบควบคุมอุณหภูมิ เช่น เครื่องปรับอากาศ ระบบฮีทเตอร์
- ผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรม
- ผลิตโครงสร้างและชิ้นส่วนเครื่องบินและอากาศยาน
- ผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
- ผลิตชิ้นส่วนและอุปกรณ์เตาปฏิกรณ์ปรมาณูเช่น ฉนวนหุ้มเตาปฏิกรณ์ปรมาณู
- ผลิตชิ้นส่วนและอุปกรณ์ทางการแพทย์
- ผลิตชิ้นส่วนและอุปกรณ์สำหรับวัสดุเครื่องมือ (Cutting tools)
- ผลิตชิ้นส่วนสำหรับระบบการสื่อสาร โทรคมนาคม เวดาร์

**ข้อดี**ของการเลือกใช้วัสดุนาโนเซรามิกคอมพอสิต (NCMC) มีดังต่อไปนี้คือความแข็งแรงสูง การยึดเกาะแน่น ความเหนียวสูง ประสิทธิภาพการใช้งานสูง ลดต้นทุนการผลิต รับแรงกระแทกดี ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนต่ำ (Low heat transfer coefficient) ทนการกัดกร่อน น้ำหนักเบา มีความสวยงาม การออกแบบใช้งานมีหลายรูปแบบโดยคำนึงถึงความต้องการใช้งาน โดยทั่วไปพันธะหลัก (Primary bond) ของเซรามิกคือพันธะไอออนิกแต่มีเซรามิกบางชนิดที่มีพันธะหลักคือพันธะโควาเลนต์เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ซิลิคอนไนไตรด์ (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) โบรอนคาร์ไบด์ (B<sub>4</sub>C) ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) คาร์บอน และเส้นใยแก้วที่สามารถผลิตวัสดุคอมพอสิตได้เช่นเดียวกันสรุปได้ว่าข้อดีของผลิตภัณฑ์นาโนเซรามิกคอมพอสิต (NCMC) มีดังนี้คือ

1. พันธะยึดเหนี่ยวสารประกอบเซรามิกชนิดพันธะไอออนิกและพันธะโควาเลนต์มีความแข็งแรงสูง

2. จุดหลอมเหลวสูง
3. ต้านทานการกัดกร่อนที่ดี
4. มีความเสถียรทางเคมีและคงสภาพโครงสร้างที่อุณหภูมิสูง โดยไม่เกิดการเสียรูป
5. การรับแรงกดสูง
6. เป็นผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง
7. ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นสูงและการรับแรงดึงยึดต่ำ
8. การรับแรงทางกลสูงขึ้น ลดปัญหาเรื่องความเสียหาย (Failure) เมื่อเติมเฟสตัวเติมหรือสารเสริมแรง
9. สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ ลดปัญหาการแตกร้าวหรือช่วยยืดอายุการใช้งานผลิตภัณฑ์ให้สามารถใช้งานได้ยาวนานขึ้น

### 3. วัสดุโนโลหะคอมพอสิต Nanometal-Matrix Composites (MMCs)

NMMCs คือวัสดุโนโลหะคอมพอสิตที่มีโลหะหรือโลหะผสมเป็นเฟสพื้นและเฟสตัวเติมคือวัสดุที่ทำหน้าที่เสริมแรง สามารถเป็นได้ทั้งชนิดอนุภาค หรือเส้นใย แบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่อง ข้อดีของ NMMCs คือสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง ไม่ติดไฟ แต่ว่ามีราคาแพง ดังนั้นจึงนิยมใช้งานเฉพาะทางที่ต้องการสมบัติเด่นด้านความแข็งแรงจำเพาะ ความแข็งตึงจำเพาะ การต้านทานการสึกกร่อน การต้านทานการยึดตัว (Creep) การนำความร้อน หรือความเสถียรของขนาด (Dimensional stability) เป็นต้น ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน NMMCs เช่น ใช้ผลิตอะลูมิเนียมอัลลอยด์เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนเพื่อทำยานยนต์ หรือใช้อะลูมิเนียมอัลลอยด์ชั้นสูงเสริมแรงด้วยอนุภาคโบรอนเพื่อผลิตกระสวยอวกาศหรือยานอวกาศ เป็นต้น



รูปที่ 12.19 การประยุกต์ใช้งานของผลิตภัณฑ์คอมพอสิตเช่น ฟันปลอม รถยนต์กันกระสุน หมวกนิรภัย รถถัง ที่มา Shackelford, J.F., 1985

ดั่งนี้กล่าวโดยสรุป วัสดุนาโนคอมพอสิต (Nanocomposite) หมายถึง วัสดุผสมที่มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ซึ่งในส่วนเสริมแรงจะมีวัสดุหรือสารประกอบที่มีขนาดเล็ก เช่น อนุภาค หรือเส้นใย รวมทั้งท่อนาโนคาร์บอนหรือการเคลือบผิวทึบและแซนวิช (Sandwich panel) เพื่อการประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น

## คำถามท้ายบท

1. วัสดุนาโนคอมพอสิตประกอบด้วยเฟสที่สำคัญกี่ชนิด อะไรบ้าง
2. วัตถุประสงค์หลักของการผลิตวัสดุนาโนคอมพอสิตคืออะไร
3. เซอร์เมต (Cermet) คือวัสดุคอมพอสิตประเภทใด
4. วัสดุนาโนคอมพอสิตแบบไฮบริดเป็นอย่างไร
5. วัสดุนาโนคอมพอสิตมีกี่ชนิด อะไรบ้าง

## บทที่ 13

### วัสดุชีวภาพนาโนสำหรับการใช้งานทางการแพทย์ (Bio-Nanomaterials for Medical Applications)

วัสดุชีวภาพนาโน (Bionanomaterial) หมายถึงวัสดุที่ไม่ใช่ยาซึ่งเกิดขึ้นจากการสังเคราะห์หรือจากธรรมชาติเป็นวัสดุที่สามารถเป็นส่วนประกอบหรือฝังอยู่ภายในร่างกายของมนุษย์ได้ เพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับทดแทนส่วนต่าง ๆ ในร่างกายที่เสียหายจากอุบัติเหตุ โรค หรือจากสาเหตุอื่น ๆ โดยที่วัสดุดังกล่าวเมื่อทำการปลูกถ่ายจะไม่ก่อให้เกิดสารพิษ (Nontoxic) หรือไม่เป็นพิษต่อเนื้อเยื่อข้างเคียง มีการเข้ากันได้ (Biocompatibility) กับร่างกายและสามารถอยู่ร่วมกับเนื้อเยื่ออื่น ๆ ภายในร่างกายได้เป็นอย่างดีเช่น ไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางชีวภาพที่ไม่พึงประสงค์ ทั้งนี้วัสดุชีวภาพอาจมีส่วนประกอบของวัสดุต่าง ๆ เช่น โลหะ เซรามิก พอลิเมอร์ วัสดุคอมพอสิต และสารกึ่งตัวนำ แบ่งตามประเภทการใช้งาน ได้แก่ การนำส่งยา (Drug Delivery) เพื่อการรักษาโรค ทันตกรรมรากฟันและการอุดฟัน (Dental Implant and Filling) กระจกตาและเรตินาเทียม (Cornea and Retinal Implant) กระดูกเทียม (Bone Implant) และเทคโนโลยีวิศวกรรมเนื้อเยื่อเทียม (Tissue Engineering) วัสดุที่เข้าแทนที่ข้อต่อ (Joint Replacement) แผ่นรองกระดูก (Bone Plate) วัสดุที่ใช้ยึดติดกระดูก (Bone Cement) ลิ้นหัวใจ (Heart Valves) คอน



แทคเลนส์ (Contact Lens) เส้นเลือดเทียม (Blood Vessel Prostheses) การกำหนดความจำเพาะตำแหน่งของการให้ยารักษาโรค (Drug Target) เช่น ระบุเป้าหมายหรือตำแหน่งของเซลล์มะเร็ง (Tumor) และการพัฒนาในการรักษาโดยยีนบำบัด (Gene Therapy) เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้งานวัสดุชีวภาพนาโนได้เป็นอย่างดี ดังตารางที่ 13.1

**การจำแนกประเภทวัสดุชีวภาพนาโนในการประยุกต์ใช้งานด้านการแพทย์มีดังต่อไปนี้**

1. วัสดุชีวภาพชนิดเฉื่อย (Bioinert material)
2. วัสดุชีวภาพชนิดว่องไว (Bioactive material/surface reactive)
3. วัสดุชีวภาพชนิดย่อยสลายได้ง่าย (Biodegradable/Resorbable material)

**ปัจจัยที่ควรต้องคำนึงถึงในการเลือกใช้วัสดุชีวภาพนาโนมีดังต่อไปนี้**

1. การรับแรงสูง (Sufficient static load) ความแข็งแรงสูง ทนทานต่อการแตกหัก (Fracture strength) และทนทานต่อการสึกกร่อน (Wear resistance)
2. ไม่เป็นพิษ (Non-toxic) ไม่ก่อการระคายเคือง (Non-allergenic) และไม่ก่อมะเร็ง (Non-carcinogenic)
3. ด้านทานการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมของการใช้งาน
4. ไม่ก่อให้เกิดผลข้างเคียงกับเนื้อเยื่อเดิม (Host tissue), กระดูก (Bone) และของเหลว

(Body fluid) ภายในร่างกายที่ปลูกถ่ายวัสดุชีวภาพทดแทนโดยรอบ

**ตารางที่ 13.1** การประยุกต์ใช้วัสดุชีวภาพนาโนด้านการแพทย์ ที่มา Ratner, B.D., et al., 1996

การใช้งาน	ชนิดวัสดุ
<b>ระบบโครงกระดูก (Skeletal system)</b> - กระดูก Joint replacements (สะโพก hip, หัวเข่า knee) - แผ่นกระดูกตรึงการแตกหัก (Bone plate for fracture fixation) - วัสดุประสานกระดูก (Bone cement) - การซ่อมตำหนิที่กระดูก (Bony defect repair) - เส้นกล้ามเนื้อเทียมและเอ็นยึด (Artificial tendon and ligament) - ฟันและฐานยึดฟัน (Dental implant and fixation)	Titanium, Ti-Al-V alloy, Stainless steel, Polyethylene  Stainless steel, Cobalt-chromium alloy  Poly(methyl methacrylate)  <u>Hydroxyapatite</u>  Teflon, Dacron  Titanium, Alumina, Calcium phosphate
<b>ระบบหัวใจร่วมหลอดเลือด(Cardiovascular)</b>	

system) - หลอดเลือด(Blood vessel prosthesis) - ลิ้นหัวใจ (Heart valve) - หลอดสวน (Catheter)	Dacron,Teflon, Polyurethane Reprocessed tissue, Stainless steel, Carbon Silicone rubber,Teflon, Polyurethane
<b>อวัยวะ (Organs)</b> - หัวใจเทียม (Artificial heart) - แผ่นผิวหนัง (Skin repair template) - ไตเทียม (Artificial kidney, hemodialyzer) - ระบบปอดและหัวใจ (Heart-lung machine)	Polyurethane Silicone-collagen composite Cellulose, Polyacrylonitrile Silicone rubber
<b>การรับรู้ (Senses)</b> - ประสาทหูเทียม (Cochlear replacement) - แก้วตาเทียม (Intracular lens) - เลนส์สัมผัส (Contact lens) - จอตา (Comeal bandage)	Platinum electrodes Poly(methyl methacrylate), <u>silicone rubber</u> , <u>Hydrogel</u> <u>Silicone-acrylate</u> , <u>Hydrogel</u> Collagen, <u>Hydrogel</u>

วัสดุโนสามารถประยุกต์ใช้งานด้านการแพทย์ได้หลากหลายประการตามหน้าที่การใช้งานของวัสดุโนแบ่งได้เป็น 6 กลุ่มดังนี้

**1. การนำส่งยารักษาโรค (Drug Delivery)**

เทคโนโลยีการนำส่งยารักษาโรค (Drug Deliver) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษา เพื่อให้ยารักษาโรคสามารถเคลื่อนที่ตรงไปสู่เซลล์เป้าหมายที่ต้องการรักษาได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ซึ่งปัจจุบันวัสดุโนมีบทบาทที่สำคัญในการนำส่งยารักษาโรค ด้วยเทคนิคดังต่อไปนี้

**1.1 การนำส่งยาด้วยอนุภาคนาโนสำหรับยีนบำบัด (Genetic Therapy)** เป็นการนำดีเอ็นเอ (DNA) ส่งเคราะห์มาสร้างเป็นอนุภาคนาโนที่เรียกว่า “DNAsomes” โดยสามารถนำอนุภาคดังกล่าว

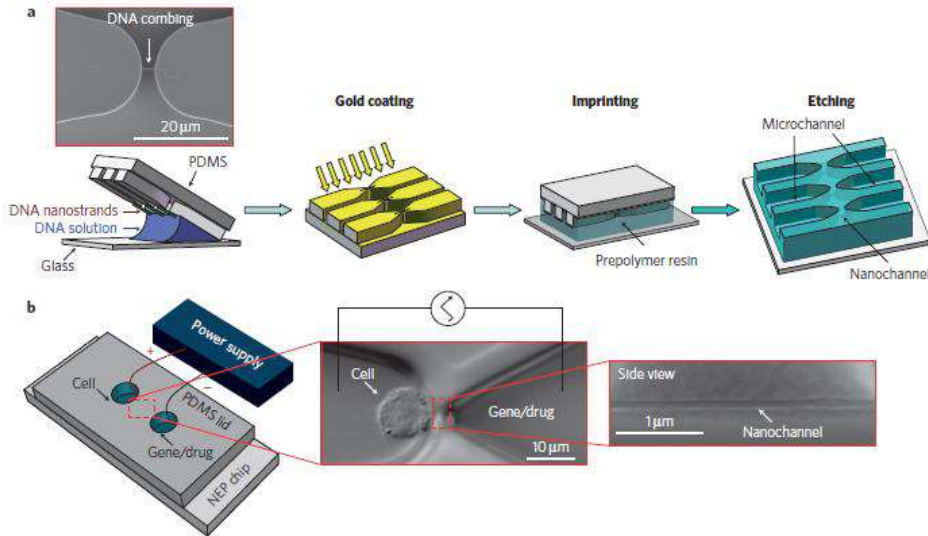
มาใช้ประโยชน์สำหรับการนำส่งยา และการบำบัดด้วยยีนที่อยู่ภายในเซลล์ ทั้งนี้ DNAsome สามารถนำส่งยารักษาโรคและโมเลกุลอาร์เอ็นเอ (RNA) ที่ได้รับการออกแบบให้สามารถยับยั้งการแสดงออกของยีน ซึ่งเป็นการนำส่งยาในรูปแบบใหม่ที่แตกต่างจากการนำส่งยาในปัจจุบันที่ใช้ Liposome หรืออนุภาคนาโนพอลิเมอร์และยังคงมีปัญหาในการนำส่งยา เนื่องจากการก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อเซลล์ในร่างกาย สำหรับ DNAsome ประกอบด้วยสายโซ่ DNA ส่งเคราะห์ขนาดสั้น 3 สายโซ่ที่นำมาประกอปกั้นคล้ายกับตัว Y (Y-shape) โดยมี Lipid Molecule ติดอยู่ที่ปลายและมียารักษาโรคติดอยู่ที่แขนของสาย DNA และยังสามารถติดโมเลกุลขนาดเล็ก (Small interfering RNA, siRNA) เพื่อทำการยับยั้งการ

แสดงออกของยีนดังรูปที่ 13.1 และเมื่อปล่อยให้เกิดการจำลองตัวเองในสารละลายที่ประกอบด้วยน้ำและไขมัน Lipids จะเกิดการจับตัวกันของสาย DNA หลายชั้นจนกลายเป็นทรงกลมกลวงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดตั้งแต่ 100-5,000 นาโนเมตร (Roh, et al.,2011)

รูปที่ 13.1 กระบวนการสร้าง DNAsome ที่มียารักษาโรคหรือโมเลกุล RNA ติดอยู่ด้วย ที่มา Roh, Y.H., et al., 2011

นอกจากนี้ยังมีการใช้อนุภาคนาโนในการนำส่งยารักษาโรค เช่น การรักษาโรคโดยใช้เซลล์ที่เรียกว่าเซลล์ต้นกำเนิด (Stem Cell หรือ Synthetic Cell) เพื่อการรักษาโรคได้เช่นเดียวกัน จากงานวิจัยของ Sarkara, D., et al., 2011 ได้ตัดแต่ง Mesenchymal Stem Cell (MSC) หรือเซลล์ต้นกำเนิดจากสายสะดือที่สามารถควบคุมลักษณะ ชนิด และสมบัติของเซลล์ ความอยู่รอด หรือการผลิตสารชีวภัณฑ์เพื่อการรักษา (Therapeutic Protein) ซึ่งคุณสมบัติพิเศษดังกล่าวข้างต้นทำให้เซลล์สามารถทำหน้าที่ในการนำส่งยารักษาโรคได้ เช่น สารเคมีบำบัดไปยังเซลล์มะเร็งทำให้ช่วยลดการเกิดผลข้างเคียงให้น้อยที่สุด นอกจากการนำส่งยารักษาโรคแล้ว ยังสามารถผสมเซลล์ดังกล่าวร่วมกับเซลล์ชนิดอื่น ๆ เช่น เซลล์ที่สามารถกระตุ้นให้เกิดการสร้างเซลล์หัวใจ เพื่อทดแทนเซลล์หัวใจที่ตายและยังสามารถป้องกันการเกิดโรคหัวใจวายได้อีกด้วย นอกจากนี้ Boukany, P.E., et al., 2011 ได้ใช้ Nanochannel Electroporation (NEP) ในการนำส่งจำนวนโมเลกุลทางชีวภาพที่มีความแม่นยำสูงเข้าไปในเซลล์สิ่งมีชีวิต ซึ่ง NEP มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 90 นาโนเมตร ยาวประมาณ 3 ไมโครเมตร โดย NEP มีประโยชน์ในการนำส่งยารักษาโรคหรือโมเลกุลชีวภาพที่มีผลต่อเซลล์ ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวสามารถนำส่งโมเลกุลขนาดเล็กเข้าไปในเซลล์ได้แตกต่างจากวิธีชีวภาพอื่น ๆ ที่ต้องใช้เข็มในการฉีดโมเลกุลชีวภาพ ทั้งนี้ NEP ประกอบด้วยสายนาโน DNA ที่เป็นเส้นตรงเพื่อใช้เป็นช่องทางผ่านที่มีขนาด

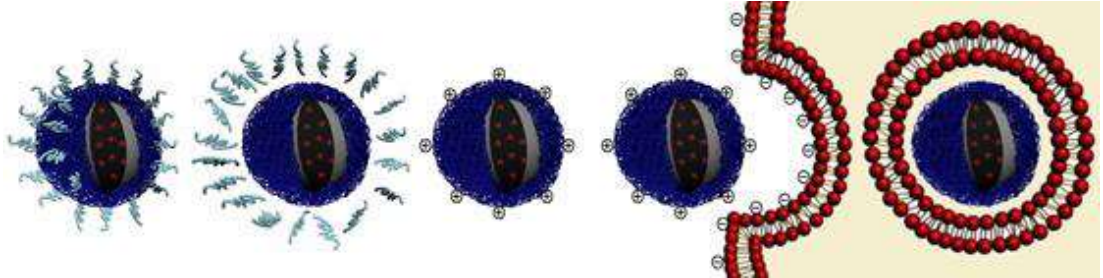
ใหญ่ในระดับนาโนเมตรและเคลือบด้วยทองและใช้กระแสไฟฟ้าในการผลักโมเลกุลชีวภาพผ่านเข้าไปในเซลล์ดังรูปที่ 13.2 ทั้งนี้วิธีการดังกล่าวไม่ทำให้เซลล์เกิดความเสียหายและมีความแม่นยำสูง



รูปที่ 13.2 การนำส่งโมเลกุลทางชีวภาพเข้าสู่เซลล์ของสิ่งมีชีวิตโดยเทคนิค Nanochannel Electroporation (NEP) ที่มา: Boukany, et al., 2011

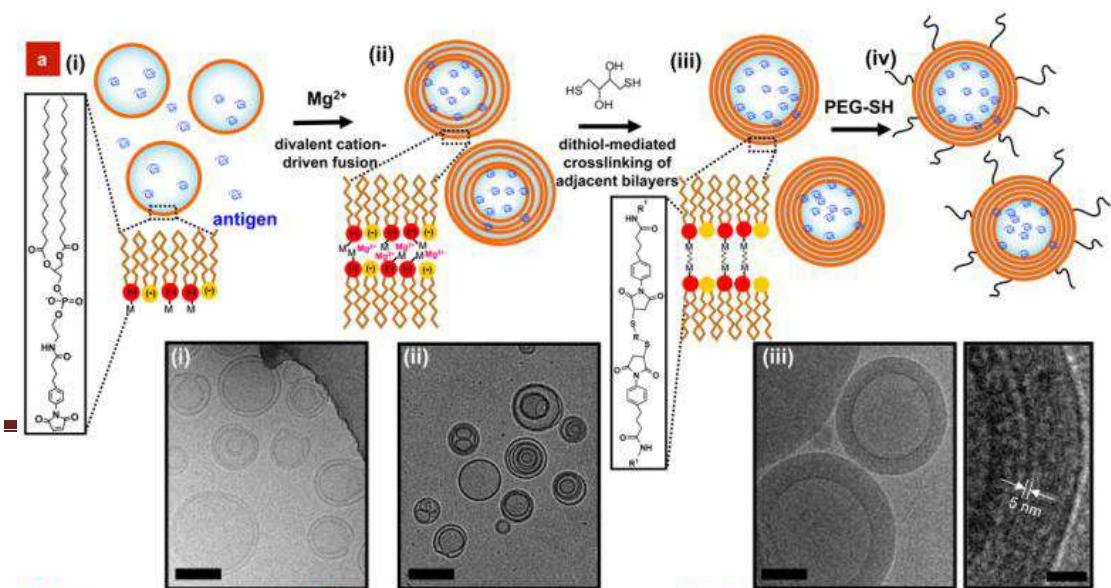
**1.2 การนำส่งยาด้วยอนุภาคนาโน** จากรายงานของ Poon, Z., et al., 2011 ได้ออกแบบอนุภาคนาโนสำหรับการนำส่งยาในรูปแบบใหม่ ซึ่งแต่ละอนุภาคสามารถจับเซลล์เป้าหมาย (Target) ที่เป็นเซลล์มะเร็งได้ทุกชนิด และยังสามารถนำไปใช้กับยาชนิดใดก็ได้ ซึ่งอนุภาคนาโนดังกล่าวถูกห่อหุ้มด้วยวัสดุนาโนพอลิเมอร์ในลักษณะ Layer-by-Layer (LbL) แบบฟิล์มบางเพื่อป้องกันอนุภาคย่อยสลายในกระแสเลือด จากรูปที่ 13.3 แสดงส่วนประกอบชั้นนอกของอนุภาคนาโนที่เป็น Polyethylene Glycol หรือ PEG จะหลุดออกเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดในบริเวณเซลล์มะเร็ง เนื่องจากเซลล์มะเร็งมีอัตราการเพิ่มจำนวนของเซลล์มากกว่าเซลล์ปกติ ในบริเวณเซลล์มะเร็งจึงมีอัตราเมตาบอลิซึม (Metabolism) สูง ทำให้มีการเพิ่มปริมาณกรดที่เป็นผลพลอยได้ (By product) จำนวนมาก ดังนั้น เมื่อชั้น PEG หลุดออกมา ประจุบวกที่สะสมอยู่บริเวณผิวชั้นในของอนุภาคจะถูกปล่อยออกมา ประจุบวกจะช่วยให้อนุภาคนาโนแพร่ผ่านเข้าไปในผนังเซลล์ที่มีประจุลบได้ง่าย พอลิเมอร์ชั้นที่อยู่ด้านในจะห่อหุ้มอนุภาคนาโนที่สามารถบรรจุยารักษาโรคมะเร็งหรือหมุดควอนตัม (Quantum Dot) เพื่อใช้ในการถ่ายภาพได้ ทั้งนี้ โครงสร้างดังกล่าวเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการนำส่งยารักษาโรคมะเร็งที่มีความจำเพาะต่อเซลล์มะเร็งมากขึ้น ซึ่งเป็นแนวทางแก้ไขปัญหาค้นหาสำหรับการนำส่งยาด้วยอนุภาคนาโน ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีความจำเพาะเพียงพอ ทำให้การรักษาด้วยยาจึงไม่สามารถเข้าถึงตำแหน่งเซลล์มะเร็งได้อย่างแม่นยำ โดยทั่วไปการนำส่งยาด้วยอนุภาคนาโนจะเป็นการนำโมเลกุลที่สามารถจับกับโปรตีนที่อยู่บนผิว

ของเซลล์มะเร็งมาติดกับอนุภาคนาโนแต่การหาโมเลกุลเป้าหมายนั้นเป็นไปได้ยาก รูปแบบของอนุภาคนาโนดังกล่าวได้ถูกนำมาทดสอบในสัตว์ทดลองแล้วและคาดว่าในอนาคตข้างหน้าน่าจะมีการพัฒนา มาทดลองในมนุษย์ได้



รูปที่ 13.3 การนำส่งยาโดยการห่อหุ้มอนุภาคนาโนด้วยฟิล์มพอลิเมอร์สำหรับการรักษาเซลล์มะเร็ง ที่มา Poon, Z., et al., 2011

**1.3 การเพิ่มประสิทธิภาพวัคซีนด้วยอนุภาคนาโน** จากรายงานของ Moon และคณะ (2011) ได้ออกแบบอนุภาคนาโนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพวัคซีนสำหรับป้องกันโรคเอดส์และโรคภัยแรงอื่น ๆ เช่น โรคมาลาเรีย ทั้งนี้อนุภาคนาโนประกอบด้วย Concentric Fatty Sphere ซึ่งเป็นชั้นไขมัน Liposome ที่มีรูปร่างเป็นทรงกลม ทำหน้าที่คล้ายแคปซูลหรือเป็นโครงสร้าง Interbilayer-Crosslinked Multilamellar Vesicles (ICMVs) ที่บรรจุโปรตีนสังเคราะห์ (Antigen) ทำให้อนุภาคนาโนดังกล่าวสามารถกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายได้โดยไม่เกิดอันตราย เมื่อเปรียบเทียบกับโปรตีนที่ผลิตจากไวรัส โครงสร้างของอนุภาคนาดังกล่าวช่วยให้อนุภาคนาโนมีความเสถียรเมื่ออยู่ในกระแสเลือดหรือในของเหลวภายในร่างกาย (Body fluid) เมื่ออนุภาคนาดังกล่าวถูกดูดซึมโดยเซลล์ของร่างกาย อนุภาคนาดังกล่าวจะสลายตัวและปลดปล่อยโปรตีนวัคซีน เพื่อกระตุ้นการทำงานของ T-cell ซึ่งก็คือเซลล์ที่อยู่ในระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายดังรูปที่ 13.4



## บทที่ 14

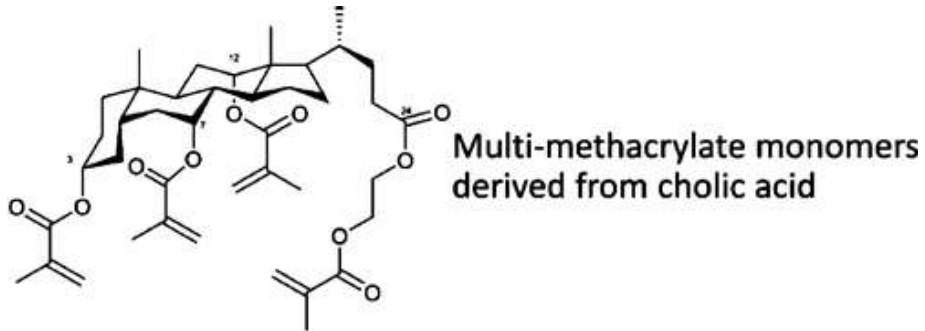
### วัสดุนาโนชนิดรูพรุน (Nanoporous materials)

รูปที่ 13.4 การสังเคราะห์ Interbilayer-Crosslinked Multilamellar Vesicles (ICMV) และภาพถ่ายของ ICMV จากกล้อง Cryoelectron Microscope ที่มา Moon, J.J., et al., 2011

2. **ทันตกรรมรากเทียมและการอุดฟัน (Dental Implant and Filling)** ทันตกรรมรากเทียม (Dental Implant) เป็นเทคโนโลยีที่นำวัสดุชีวภาพมาใช้ในการสร้างฟันเพื่อทดแทนฟันที่สูญเสียไป จากรายงานของนักวิจัย North Carolina State University ได้พัฒนาวัสดุนาโนที่เรียกว่า Smart Coating เพื่อทำให้การยึดเกาะของรากเทียมมีความใกล้เคียงกับกระดูกจริงมากยิ่งขึ้น อีกทั้งเทคโนโลยีดังกล่าวยังช่วยยับยั้งการติดเชื้ออีกด้วย ทั้งนี้วัสดุเคลือบดังกล่าวประกอบด้วยอนุภาคนาโนเงิน (Silver Nanoparticle) เพื่อช่วยป้องกันการติดเชื้อ โดยทั่วไปหลังจากการผ่าตัดของผู้ป่วยจะต้องได้รับยาปฏิชีวนะเพื่อป้องกันการติดเชื้อแต่บริเวณที่ได้รับการผ่าตัดยังคงเสี่ยงต่อการติดเชื้อ ทั้งนี้อนุภาคนาโนเงินจะทำหน้าที่คล้ายกับยาต้านจุลชีพ (Antimicrobial Agent) ในรูปของชั้นสารละลายที่มีโครงสร้างอะมอร์ฟัส (Amorphous) ซึ่งทำให้วัสดุนาโน Smart Coating ช่วยให้กระดูกหรือเนื้อเยื่อสามารถเจริญได้ในบริเวณที่ทำการฝังรากเทียม นอกจากนี้ วัสดุเคลือบดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้กับการผ่าตัดหัวเข่าเทียมและสะโพกเทียมได้อีกด้วย (Bai, More, Rouleau, & Rabiei, 2010)

วัสดุนาโนสำหรับอุดฟันที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันผลิตมาจากวัสดุประเภทต่าง ๆ เช่น วัสดุคอมพอสิตหรือพลาสติก จากรายงานวิจัยของ Gauthier, M.A., 2009 ได้คิดค้นวัสดุสำหรับการอุดฟันที่มีความแข็งแรงและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าวัสดุที่ใช้ในปัจจุบันอีกด้วย ซึ่งวัสดุนาโนสำหรับการอุดฟันที่ใช้ในปัจจุบันมักทำมาจากพลาสติกที่มีสีขาวทดแทนที่วัสดุสำหรับการอุดฟันในรูปแบบเดิมที่ใช้สารอุดฟันจากโลหะเงินที่มีส่วนผสมของสารปรอทและอาจมีอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมในส่วนของ

พลาสติกที่ใช้สำหรับอุดฟันประกอบไปด้วยสารประกอบหลายชนิด เช่น BisGMA หรือ UMDA ซึ่งมีผลทำให้วัสดุอุดฟันเกิดการแตกร้าวก่อนกำหนด อีกทั้งยังปล่อยสาร Bisphenol A ที่เป็นสารอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ทั้งนี้วัสดุสำหรับอุดฟันชนิดใหม่เป็นวัสดุผสมที่ไม่มีสารประกอบดังกล่าวข้างต้น โดยใช้สารประกอบจากธรรมชาติคือ Bile Acid หรือกรดน้ำดีที่ผลิตจากตับและเก็บไว้ที่ถุงน้ำดีเพื่อใช้สำหรับช่วยย่อยไขมัน โดยมีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 13.5 จากผลการวิจัยพบว่าวัสดุดังกล่าวได้เปลี่ยนวัสดุในรูปของแข็งให้อยู่ในรูปของเรซินทำให้มีความแข็งแรงและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น



รูปที่ 13.5 โครงสร้างทางเคมีของ Multi-methacrylate monomer จาก Cholic acid ที่มา Gauthier, M. A., et al., 2009

วัสดุนาโนเซรามิกชีวภาพสำหรับการทดแทนฟัน (Dentals) ผลิตจากวัสดุนาโนโลหะ วัสดุนาโนพอลิเมอร์ วัสดุนาโนคอมพอสิต และวัสดุนาโนเซรามิก โดยเฉพาะวัสดุนาโนเซรามิกมีหลายชนิดอยู่ในรูปสารประกอบได้แก่ กลาสเซรามิก พอร์ซซีเลน อะลูมินา ไฮดรอกซีอะพาทาइट เป็นต้น แต่การใช้วัสดุนาโนเซรามิกชีวภาพทดแทนฟันมีข้อดีหลายประการคือ สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ สี ความสวยงาม สมบัติทางกล ได้แก่ ความแข็งแรง การบดเคี้ยว ทนทานต่อการกัดกร่อนดี สามารถใช้งานได้ในระยะยาว โดยที่คุณภาพไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง เสถียรต่อสภาวะกรดและด่าง มีสมบัติทางแสงด้านความโปร่งแสง จนถึงทึบแสงสูง ความมันเงาดี รวมทั้งวัสดุเซรามิกชีวภาพมีคุณลักษณะการเข้ากันได้ดีกับร่างกายทั้งเนื้อเยื่อและของเหลวภายในร่างกาย ไม่ก่อการระคายเคืองหรืออาการแพ้ต่อร่างกาย รวมทั้งการใช้เป็นวัสดุทดแทนภายในช่องปากโดยเฉพาะการใช้ในตำแหน่งของ ฐานรองคอฟัน ครอบฟัน เนื้อฟันและรากฟัน เป็นต้น ดังรูปที่ 13.6 และรูปที่ 13.7



พอร์ซซีเลน (Porcelain)



อะครายลิกพอลิเมอร์ (Acrylic polymer)



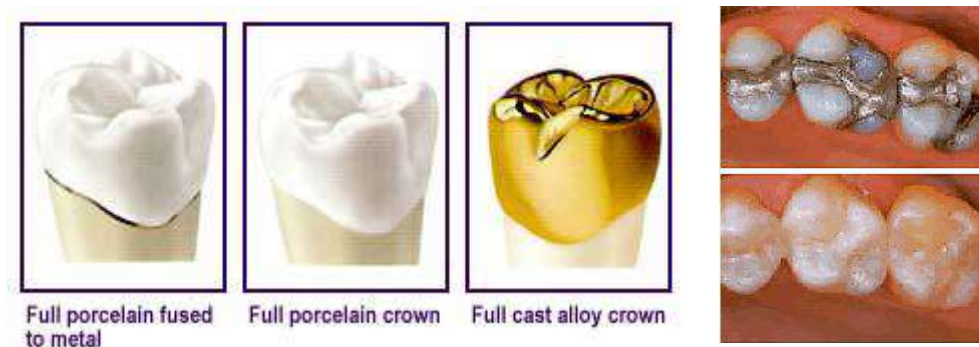
กลาสเซรามิก (Glass ceramic)



พอร์ซซีเลน (Porcelain) พร้อมด้วยครอบฟัน

และสะพานฟันโลหะ (Metal crowns and

รูปที่ 13.6 วัสดุชีวภาพนาโนทดแทนฟัน ที่มา Fisher, J. P., et al., 2007

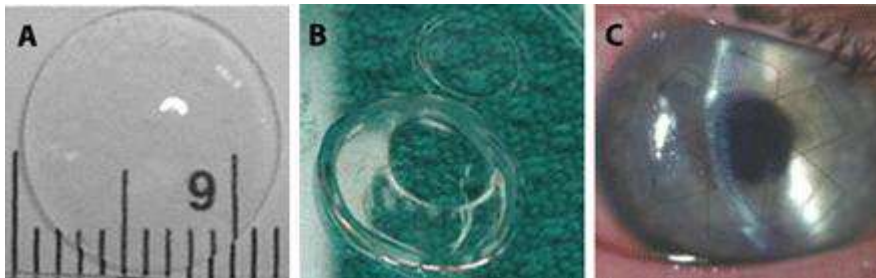


รูปที่ 13.7 การใช้วัสดุนาโนเซรามิกสำหรับการทันตกรรมและอุดฟัน ที่มา Fisher, J. P., et al., 2007

วัสดุนาโนเซรามิกชีวภาพชนิดพอร์ซีเลนและเนื้อแก้วที่มีรูปพุนสูงมีความเหมาะสมสำหรับให้เอนไซม์ แอนติบอดี แอนติเจน ผ่านเข้าออกได้สะดวกและมีข้อดีที่ช่วยต้านทานการติดเชื้อโรค เสถียรต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH changes) เสถียรต่อสารเคมีและตัวทำละลาย (Solvent resistance) ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันภายในร่างกายที่มีของเหลวเป็นองค์ประกอบ สำหรับวัสดุเซรามิกที่นิยมมากในงานทันตกรรมได้แก่ พอร์ซีเลนสำหรับทำเนื้อฟัน (Dentures) ฐานรองฟัน และตัวครอบฟัน (Gold-porcelain crowns) และแก้วนิยมนำมาทำไอโอโนเมอร์เซอรัมเมต (Glasses filled ionomer cermets) หรือวัสดุนาโนคอมพอสิตระหว่างเซรามิกกับโลหะสำหรับงานทันตกรรม การประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์และทันตกรรมของวัสดุนาโนเซรามิกชีวภาพสามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนทั้งชิ้นหรือเพียงบางส่วนโดยการเคลือบผิวหรือการทำวัสดุนาโนคอมพอสิตเพื่อให้การนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนภายในร่างกายเกิดความเหมาะสมทั้งเรื่องการทนทานของเหลวชนิดต่าง ๆ ภายในร่างกาย ได้แก่ เลือด น้ำเหลือง ไม่เป็นพิษต่อร่างกายและวัสดุทดแทนที่ปลูกถ่ายก็มีความทนทานต่อสภาพความเป็นกรด-ด่างภายในร่างกาย การรับน้ำหนัก การรับแรงกด (Compressive stress) แรงเฉือน หรือการบิดเคี้ยวภายในช่องปาก เกิดความปลอดภัยในการใช้งาน อายุการใช้งานนาน วัสดุปลูกถ่ายมีการเข้ากันได้ดีกับร่างกายและเกิดการยึดเกาะหรือการเติบโตทดแทนอวัยวะเดิมได้อย่างมีประสิทธิภาพ



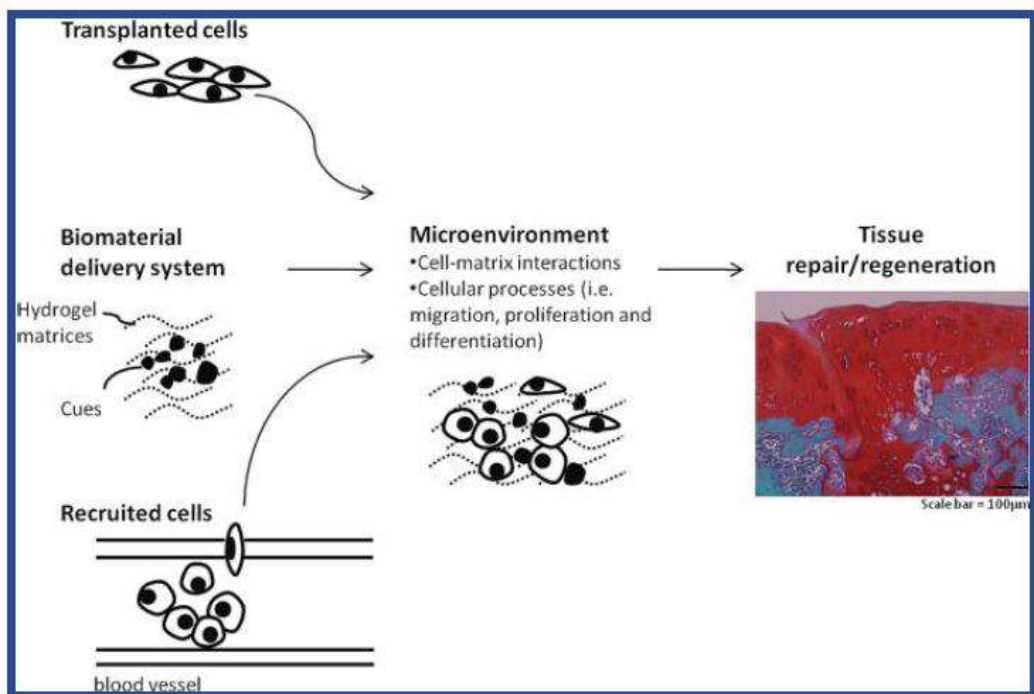
3. **กระจกตาและเรตินาเทียม (Cornea and Retinal Implant)** วัสดุนาโนที่ใช้แทนที่กระจกตา (Cornea) หรือกระจกตาเทียม (Artificial Cornea) ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ได้แก่ AlphaCor Device หรือ Dohlman Device ซึ่งเป็นกระจกตาเทียมที่นำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับกระจกตาจากผู้บริจาค จากรายงานการวิจัยของ Fagerholm, P., et al., 2010 สร้างกระจกตาชีวสังเคราะห์ (Biosynthetic Cornea) ที่สามารถช่วยซ่อมแซมเนื้อเยื่อดวงตาที่เกิดความเสียหายและช่วยฟื้นฟูการมองเห็นได้ ทั้งนี้กระจกตาดังกล่าวประกอบด้วยชั้นของคอลลาเจน (Collagen) และเซลล์ที่ทำงานร่วมกันคล้ายกับหน้าตาของดวงตา วัสดุนาโนดังกล่าวมีความบางและโปร่งแสง ทำให้แสงสามารถทะลุผ่านได้ดี ช่วยในการโฟกัส (Focus) ภาพของดวงตา Biosynthetic Cornea เกิดจากกระบวนการ Cross-linked Recombination ของ Collagen ในร่างกายมนุษย์ทำให้กระจกตาค่อย ๆ เจริญและขยายตัว โดยไม่เกิดการต่อต้านของระบบภูมิคุ้มกัน ซึ่งถือเป็นปัจจัยสำคัญในการรับบริจาคกระจกตา ทั้งนี้กระจกตาที่ได้รับการฟื้นฟูด้วยวัสดุนาโนดังกล่าว สามารถใช้งานได้ปกติ จากรูปที่ 13.8 แสดงถึงลักษณะของวัสดุที่ใช้ทำ Biosynthetic Cornea ที่มีความใสและวัสดุนาโนดังกล่าวจะถูกเจาะเพื่อเปิดรูสำหรับการฝังกระจกตาเทียม ซึ่งเนื้อเยื่อที่เกิดความเสียหายจะถูกตัดออกและถูกปิดทับกลับด้วยปั๊มข้างต้น



รูปที่ 13.8 วัสดุที่ใช้ในการสร้าง Biosynthetic Cornea ที่มา Fagerholm, P., et al., 2010

4. **กระดูกเทียมและการซ่อมแซมกระดูก (Bone Implant and Repair)** เทคโนโลยีการซ่อมแซมกระดูกหรือการศัลยกรรมกระดูกโดยใช้กระดูกเทียมจากการใช้วัสดุนาโนสังเคราะห์หรือวัสดุนาโนจากธรรมชาติ ทั้งนี้โรคที่มักจะทำให้เกิดความเสียหายแก่กระดูก เช่น โรคข้อเสื่อมหรือโรคข้ออักเสบ (Osteoarthritis) นักวิจัยได้ทำการวิจัยและพัฒนาวัสดุชีวภาพนาโนที่สามารถซ่อมแซมกระดูกที่เกิดจากโรคดังกล่าว โดยเฉพาะความเสียหายที่เกิดขึ้นแก่กระดูกอ่อนที่หุ้มข้อต่อ (Articular Cartilage) ซึ่งมีลักษณะเป็นกระดูกอ่อนสีขาว ผิวเรียบ และมีเนื้อเยื่อที่มีความยืดหยุ่น ที่ทำหน้าที่หุ้มและป้องกันการกระแทกที่อาจเกิดขึ้นบริเวณปลายกระดูกในข้อต่อ โรคดังกล่าวมีสาเหตุเกิดจากเนื้อเยื่อในบริเวณ

ดังกล่าวขาดเลือดไปหล่อเลี้ยง ทำให้เนื้อเยื่อซ่อมแซมและเจริญเติบโตได้ยาก อีกทั้งการฉีกขาดของเนื้อเยื่อที่สะสมมาในช่วงระยะเวลามากกว่า 1 ปี ทำให้เกิดโรคข้อเสื่อมอักเสบ เทคโนโลยีวิศวกรรมเนื้อเยื่อจึงเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่จะช่วยในการคิดค้นวิธีการรักษาและซ่อมแซมเนื้อเยื่อที่เสียหาย เช่น เนื้อเยื่อเทียม Scaffolds ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีการนำวัสดุนาโนชีวภาพที่คล้ายกับ Cartilage Matrix ในร่างกาย เช่น ไฮโดรเจล (Hydrogel) ทั้งนี้ นักวิจัยได้ใช้วัสดุนาโนชีวภาพในระบบการนำส่งเซลล์เสมือนกับระบบนำร่อง เช่น Transplanted cells หรือ Recruited Cells เพื่อช่วยในการซ่อมแซมเนื้อเยื่อดังรูปที่ 13.9 (Toh, Spector, Lee, and Cao, 2011)



รูปที่ 13.9 ระบบการซ่อมแซมเนื้อเยื่อกระดูกโดยใช้วัสดุชีวภาพนาโนในการนำส่งเนื้อเยื่อ ที่มา Toh, W.S., et al., 2011

นอกจากการนำวัสดุชีวภาพนาโนมาใช้ประโยชน์เพื่อการซ่อมแซมกระดูกแล้ว ยังสามารถนำวัสดุชีวภาพมาใช้ในการทำกระดูกเทียม จากรายงานวิจัยของ Vendra, L. และ Rabiei, A., 2010 ได้สร้างวัสดุนาโนโลหะชีวภาพที่เรียกว่า Metal Foam ซึ่งมีความยืดหยุ่นเช่นเดียวกับกระดูกทำให้สามารถทำงานร่วมกันกับกระดูกได้โดยไม่ถูกร่างกายปฏิเสธ (Bone Rejection) ตัวอย่างวัสดุนาโนโลหะชีวภาพที่ใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ ไทเทเนียม (Titanium) Metal Foam มีน้ำหนักเบากว่าอะลูมิเนียม (Aluminum) โดยโครงสร้างดังกล่าวสามารถใช้แต่เพียงเหล็กกล้า (Steel) หรือผสมกันระหว่างเหล็กกล้าและอะลูมิเนียม โดยการใช้กรรมวิธีทางโลหะผง (Powder Metallurgy Technique) ซึ่งจากลักษณะโครงสร้างที่ได้จะมีความยืดหยุ่นใกล้เคียงกับกระดูกทำให้เมื่อวัสดุดังกล่าวเมื่อได้รับแรงกด (Compression) จะเปลี่ยนรูปไปแต่สามารถคืนรูปร่างเดิมได้เมื่อไม่ได้รับแรงกดแล้ว นอกจากนี้พื้นผิวที่ขรุขระของวัสดุนาโนโลหะชีวภาพดังกล่าวยังช่วยให้กระดูกสามารถเจริญใน Metal Foam ได้ ซึ่งเป็นการเสริมความแข็งแรงของวัสดุได้อีกทางหนึ่งและเนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีโครงสร้างเป็นรูพรุน จึงทำให้มีน้ำหนักเบา ส่วนประกอบของกระดูกเทียมนอกจากจะประกอบด้วยโลหะแล้วนั้น ยังสามารถนำวัสดุนาโนคอมพอสิตมาใช้ในการสร้างกระดูกเทียมได้เช่นกัน ทั้งนี้จากรายงานวิจัยของ Phadke, A., et al., 2010 ได้สังเคราะห์วัสดุนาโนโลหะชีวภาพจากวัสดุนาโนคอมพอสิต โดยใช้ไฮโดรเจลสังเคราะห์ (Synthetic Hydrogel) ซึ่งมีปลายสายจับกับคาร์บอกซิลกรุป (Carboxyl Group) เพื่อใช้เป็นต้นแบบของกระบวนการทางแร่ที่เรียกว่า Mineralization โดยคุณสมบัติของเฟสพื้นชนิดไม่ชอบน้ำ (Matrix Hydrophobicity) ของ Anionic ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยน Poly(ethylene glycol) Hydrogel ด้วยความยาวที่แตกต่างกันของปลายสายไฮโดรเจล  $\text{CH}_2=\text{CHCONH}(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$  (เมื่อ  $n = 1, 3, 5$  และ  $7$ ) กระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโนคอมพอสิตดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาการผลิตวัสดุนาโนพอลิเมอร์ชีวภาพ (Mineral-Polymer Composite) ซึ่งใช้สำหรับสร้างเนื้อเยื่อเทียม (Scaffolds) ในการวิศวกรรมเนื้อเยื่อกระดูกและเป็นต้นแบบสำหรับการพัฒนาวัสดุนาโนคอมพอสิตชนิดอินทรีย์และอนินทรีย์

นอกจากนี้ยังมีรายงานวิจัยจากบริษัท Huntsman, 2005 ได้ร่วมมือกับ Pacific Research Laboratories ประเทศสหรัฐอเมริกาในการผลิตชิ้นส่วนของกระดูกเทียมจากสารประกอบพอลิเมอร์ชนิด Epoxies เพื่อใช้ในการทดสอบทางยาโดยใช้ RenCast® 2000 epoxy resin และ Ren® 2000 hardener เป็นส่วนประกอบในการหล่อกระดูกเทียมทำให้กระดูกเทียมที่ได้มีความแข็งแรงและความเหนียวใกล้เคียงกับกระดูกจริงเหมาะกับการใช้ในการทดสอบและการรักษาโรคทางกระดูก เช่น ความยืดหยุ่น

ความแข็ง อีกทั้งยังสามารถทนต่ออุณหภูมิและความดันสูง ที่เกิดจากสภาวะการหล่อกระดูกได้ ทำให้ได้กระดูกเทียมต้นแบบที่มีประสิทธิภาพเหมาะสำหรับใช้ในการศึกษาด้านการแพทย์ดังรูปที่ 13.10



รูปที่ 13.10 กระดูกเทียมที่ผลิตจาก Epoxy ที่มา Huntsman, 2005

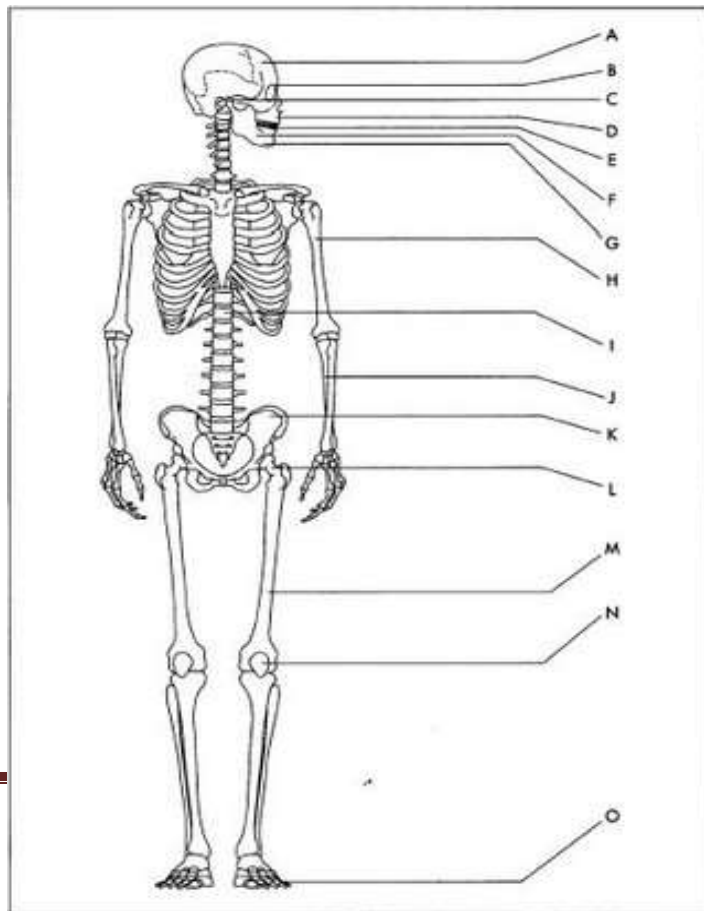
สำหรับวัสดุนาโนเซรามิกชีวภาพที่สามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนภายในร่างกายมีหลายชนิด ตัวอย่างเช่น อะลูมินา เซอร์โคเนีย เนื่องจากเป็นวัสดุที่เฉื่อย (Bioinert material) เสถียรต่อปฏิกิริยาเคมี รับแรงกดอัดสูง (High compressive strength) ทนทานต่อการกัดกร่อน ดังนั้นจึงนิยมใช้เป็นวัสดุทดแทนชนิดรับแรงกดอัด (Load-bearing replacement devices) เช่นบริเวณส่วนต้นของข้อต่อสะโพก (Femoral head of a hip joint implant), ฟัน (Dental implants), การผ่าตัดบริเวณใบหน้า (Maxillofacial surgery)

วัสดุนาโนเซรามิกชีวภาพชนิดว่องไว (Bioactive materials) ได้แก่ แก้ว (Glasses), แก้วเซรามิก (Glass-ceramics), แคลเซียมฟอสเฟตชนิดความหนาแน่นสูง (Dense calcium phosphate) วัสดุชีวภาพเหล่านี้มีความว่องไวต่อการยึดเกาะกับเนื้อเยื่อข้างเคียงแต่วัสดุเซรามิกชีวภาพในกลุ่มนี้มีข้อเสียคือความแข็งแรงต่ำ (Low strength) การรับแรงที่ทำให้เกิดการแตกร้าวต่ำ (Low fracture toughness) และรับน้ำหนักได้น้อย (Low load-bearing devices) ดังนั้นจะนิยมใช้ในการเคลือบผิว (Coating) หรือใช้ทำผลิตภัณฑ์ในรูปวัสดุนาโนคอมพอสิต

วัสดุนาโนเซรามิกชีวภาพชนิดอะลูมินาบริสุทธิ์สูง (Ultra high purity aluminas) นิยมใช้ผลิตข้อต่อหรือวัสดุทดแทนบริเวณส่วนต้นของสะโพก (Femoral head of a hip joint implant), กระดูกหูชั้นกลาง (Middle-ear implants) และแผ่นเบ้าตา (Orbital base plate) เพราะอนุภาคมีขนาดเล็ก กระจายตัวสม่ำเสมอและความหนาแน่นสูงถึงแม้ว่าความแข็งแรงและค่ามอดุลัสยืดหยุ่นที่ต่ำแห่งดังกล่าวข้างต้นจะต่ำกว่าค่าความแข็งแรงและค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของกระดูก (Bone) ก็ตาม แต่สามารถใช้ทดแทนในตำแหน่งดังกล่าวได้ดีเพื่อรับน้ำหนักและการเคลื่อนไหวของร่างกายได้อย่างมีประสิทธิภาพหลังการปลูกถ่าย

นอกจากนี้สารประกอบไฮดรอกซีอะพาทาइट (Hydroxyapatite) เป็นวัสดุเซรามิกที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง เนื่องจากมีสมบัติทางกลที่ดีและการเข้ากันได้ดี (Biocompatibility) กับร่างกาย เนื่องจากมีองค์ประกอบของแคลเซียมฟอสเฟตภายในโครงสร้างคล้ายกับโครงสร้างของกระดูกและฟันของมนุษย์ในหลายตำแหน่ง

ตำแหน่งภายในร่างกายที่สามารถใช้วัสดุเซรามิกชีวภาพเพื่อการปลูกถ่ายและการทดแทนอวัยวะมีมากมายดังรูป 13.11 ตัวอย่างเช่น กระดูกข้อต่อ กะโหลก ฟัน กระดูกขากรรไกร ข้อสะโพก เป็นต้น

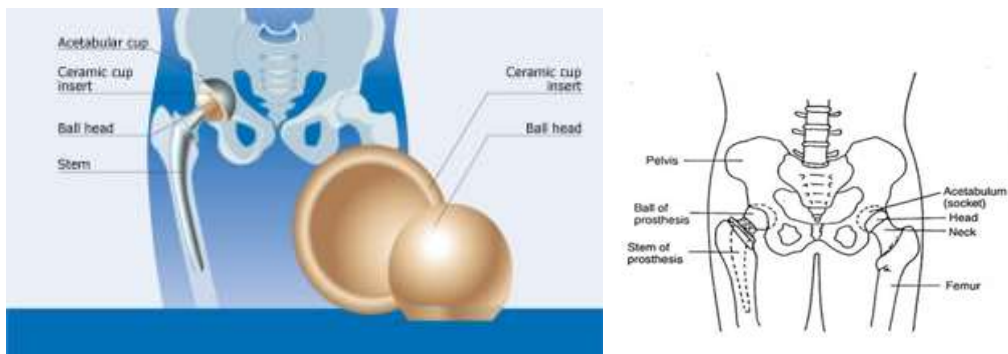


Bioceramic applications: A. Cranial repair, B. Eye lens, C. Ear implants, D. Facial reconstruction, E. Dental implants, F. Jaw augmentation, G. Periodontal pockets, H. Percutaneous devices, I. Spinal surgery, J. Iliac crest repair, K. Space fillers, L. Orthopedic support purposes, M. Orthopedic fillers, N. Artificial tendons, and O. Joints.

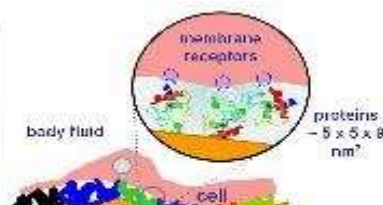
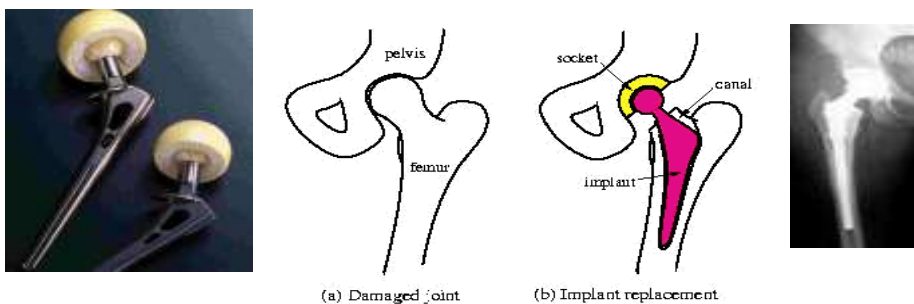
รูปที่ 13.11 วัสดุนาโนเซรามิกชีวภาพกับตำแหน่งต่าง ๆ ของร่างกาย ที่มา Fisher, J. P., et al., 2007

### วัสดุนาโนเซรามิกชีวภาพสำหรับการทดแทนข้อต่อกระดูก (Bone replacement)

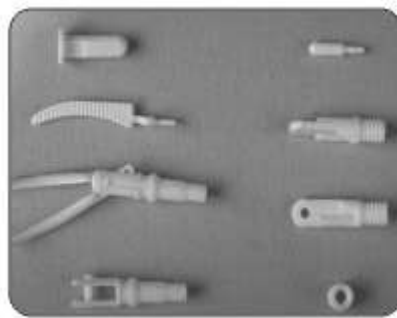
วัสดุทดแทนข้อต่อ กระดูก ฟัน สามารถผลิตได้จากวัสดุเซรามิกชีวภาพหลายชนิดได้แก่ อะลูมินา ไฮดรอกซีอะพาไทต์ เซอร์โคเนีย กลาสเซรามิก (Glass-ceramic) โบนซีเมนต์ (Bone cement) โดยการใช้เป็นวัสดุทดแทนตำแหน่งต่าง ๆ ของร่างกาย ได้แก่ ข้อต่อ ข้อสะโพก กระดูกแขน ขา และ กระโหลกศีรษะ ดังรูป 13.12, 13.13 และ 13.14



รูปที่ 13.12 การประยุกต์ใช้งานของวัสดุนาโนเซรามิกชีวภาพบริเวณข้อสะโพก (Hip joint) ที่มา Fisher, J. P., et al., 2007

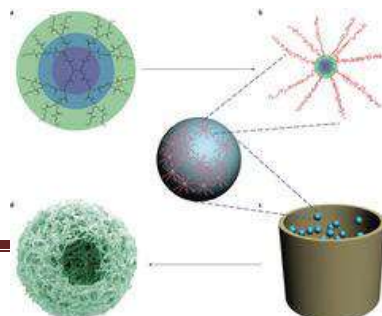


รูปที่ 13.13 การใช้งานและการเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อของวัสดุนาโนเซรามิกชีวภาพบริเวณข้อสะโพก (Hip joint) ที่มา Fisher, J. P., et al., 2007



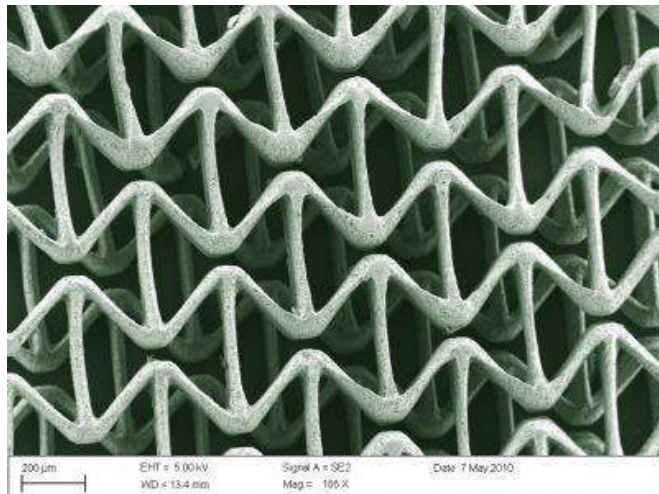
รูปที่ 13.14 ข้อต่อแบบต่างๆ ของวัสดุเซรามิกชีวภาพ ที่มา Fisher, J. P., et al., 2007

**5. เทคโนโลยีวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (Tissue Engineering)** เทคโนโลยีวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (Tissue Engineering) เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจให้นักวิจัยได้ให้ความสนใจในการวิจัยและพัฒนา เนื่องจากสามารถนำผลการวิจัยที่ได้ไปใช้ในการรักษาและฟื้นฟูสภาพของเนื้อเยื่อที่เกิดความเสียหาย ทั้งนี้วัสดุชีวภาพที่สามารถนำมาใช้ในการซ่อมแซมและฟื้นฟูเนื้อเยื่อในปัจจุบัน เช่น เส้นใยหรือไฟเบอร์ (Fiber) จากการวิจัยของ Liu, X., et al., 2011 ได้ออกแบบวัสดุนาโนไฟเบอร์ทรงกลม (SS-PLLA) เพื่อใช้เป็นพาหนะสำหรับขนส่งเซลล์ที่สามารถกระตุ้นการซ่อมแซมของเนื้อเยื่อในบริเวณที่มีบาดแผล ทั้งนี้วัสดุดังกล่าวสร้างขึ้นจากพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างรูปดาว ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ ดังนั้นหลังจากฉีดวัสดุนาโนไฟเบอร์ทรงกลมเข้าไปในบริเวณบาดแผล ผนังของวัสดุจะย่อยสลายไปทำให้เซลล์ที่อยู่ในทรงกลมไปกระตุ้นการซ่อมแซมเนื้อเยื่อที่เสียหายได้ จากรูปที่ 13.15 แสดงถึงการสร้าง SS-PLLA โดย PAMAM (G2) เป็นสารตั้งต้น



รูปที่ 13.15 โครงสร้างของ SS-PLLA ที่มา Liu, X., et al., 2011

Fozdar, D.Y., et al., 2011 ได้ออกแบบวัสดุชีวภาพที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับเนื้อเยื่อของมนุษย์ ดังรูปที่ 13.15 เพื่อใช้ในการซ่อมแซมเนื้อเยื่อที่เสียหาย โดยเมื่อถูกยึดตัวออกไปจะไม่เกิดเป็นรอยย่น ประยุกต์ใช้ในการซ่อมแซมเนื้อเยื่อในส่วนต่าง ๆ ของร่างกายที่เกิดความเสียหายได้ เช่น ผนังหัวใจ หลอดเลือด และผิวหนัง โดยการใช้เทคโนโลยีด้านแสงและกระจกด้วยวิธีการฉายแสงบนสารละลายที่ประกอบด้วยเซลล์และพอลิเมอร์ชนิดพอลิเอททิลีนไกลคอล (Polyethylene Glycol) เพื่อใช้ในการสร้าง วัสดุพอลิเมอร์ 3 มิติชนิดมีรูพรุนที่เรียกว่า Scaffold โดยสามารถควบคุมรูปแบบโครงสร้างได้ ทั้งนี้ นักวิจัยได้ออกแบบให้วัสดุดังกล่าวมีรูปร่างที่แตกต่างกันออกไป เนื่องจากรูปร่างที่ต่างกันทำให้มี สมบัติทางกลแตกต่างกัน เช่น รูปร่าง Reentrant Honeycomb และ Cut Missing Rib ทำให้วัสดุไม่เกิด รอยย่นเมื่อถูกยึดตัว (Negative Poisson's Ratio) และจากสมบัติดังกล่าวจะคงอยู่ถึงแม้ว่าจะมีเนื้อเยื่อ ติดเพียงชั้นเดียวหรือหลายชั้นก็ตาม

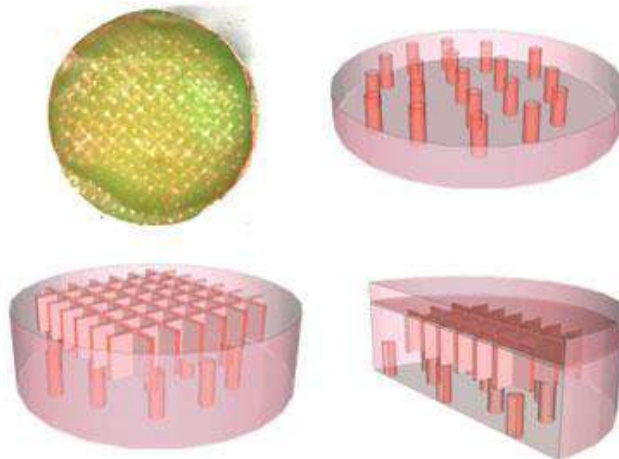


รูปที่ 13.16 โครงสร้างของ Polyethylene Glycol Scaffolds ที่มา Fozdar, D.Y., et al., 2011

เทคโนโลยีวิศวกรรมเนื้อเยื่อเทียม (Tissue Scaffold) ชนิดที่มีรูพรุน นิยมนำมาใช้ในการกระตุ้น การสร้างเนื้อเยื่อ เพื่อซ่อมแซมเนื้อเยื่อส่วนที่เสียหาย จากการวิจัยของ Zhenga, Y., et al., 2011 ได้



ออกแบบการผลิตเนื้อเยื่อเทียม Tissue Scaffold ซึ่งเป็นเนื้อเยื่อสังเคราะห์ที่มีรูพรุนเพื่อใช้สำหรับการรักษาผู้ได้รับบาดเจ็บทางผิวหนัง เช่น แผลไฟไหม้ แผลจากการผ่าตัด ซึ่งขนาดแผลขนาดใหญ่มักใช้ระยะเวลาในการฟื้นฟูเนื้อเยื่อ ทั้งนี้วัสดุดังกล่าวมีคุณสมบัติในการกระตุ้นการเจริญของระบบท่อลำเลียง (Growth Vascular System) เพื่อกระตุ้นให้เกิดการฟื้นฟูของเนื้อเยื่อในบริเวณที่เกิดบาดแผล ทำให้ไม่จำเป็นต้องได้รับการผ่าตัด วัสดุชีวภาพนาโนดังกล่าวมีชื่อว่า "Type 1 Collagen" มีลักษณะคล้ายกับก้อนเต้าหู้ประกอบด้วย Collage ที่สามารถใช้สำหรับการผ่าตัดและใช้ในประโยชน์ทางการแพทย์อื่น ๆ โดยนักวิจัยได้ติดระบบการเชื่อมต่อดังกล่าวด้วยท่อจุลภาคขนาดเล็ก (Microchannels) เพื่อใช้ในการกระตุ้นการเจริญของเนื้อเยื่อที่ดีในบริเวณบาดแผลผ่านการกระตุ้นการเจริญของระบบท่อลำเลียง ซึ่งระบบดังกล่าวเป็นเครือข่ายสำคัญในการนำส่งเลือดและของเหลวไหลเวียนไปทั่วร่างกาย ทั้งนี้ Type 1 Collagen เป็นวัสดุชีวภาพนาโนที่มีส่วนประกอบซึ่งพบได้ในร่างกาย ทำให้ไม่เกิดการต่อต้านจากระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย จากรูปที่ 13.17 แสดงถึงลักษณะโครงสร้างของ Type 1 Collagen ที่มีโครงสร้าง Microchannels อยู่ภายใน Collagen ซึ่งช่องดังกล่าวช่วยให้เนื้อเยื่อที่ดีและท่อลำเลียงสามารถเจริญเติบโตผ่านเข้าไป ทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการฟื้นฟูเซลล์หรือเนื้อเยื่อลดน้อยลง



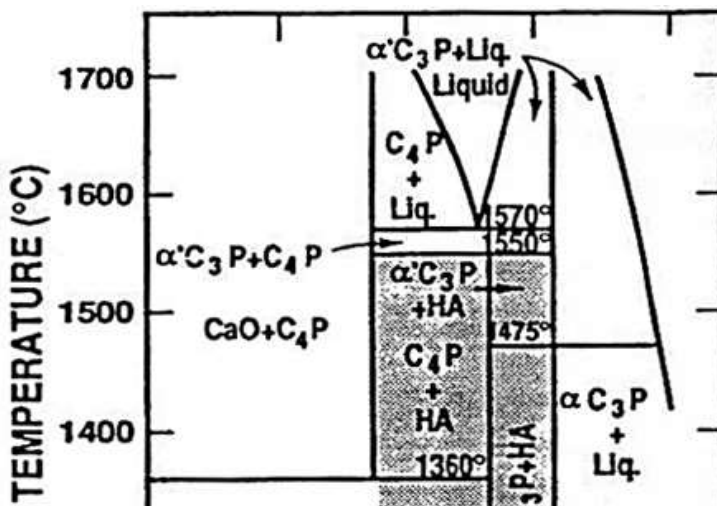
รูปที่ 13.17 โครงสร้างของ Type 1 Collagen ที่มีบรรจุ Microchannels ที่มา Zhenga, Y., 2011 การนำวัสดุชีวภาพนาโนประยุกต์ใช้งานด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ

1. การพัฒนาผลิตเนื้อเยื่อเทียม Scaffold ทางวิศวกรรมโดยสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต (Ca-P)

2. การผลิตวัสดุทดแทนทางชีวภาพชนิดแคลเซียมฟอสเฟตเพื่อการใช้งานในอนาคต เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีการเข้ากันได้ (Biocompatibility) อย่างดีกับร่างกาย ความสามารถในการดูดซับสูง (Resorption) และมีค่าการนำไฟฟ้าที่เหมาะสมกับร่างกาย
3. สำหรับงานวิจัยในอนาคตของการใช้วัสดุทดแทน มีความจำเป็นที่ต้องทำการศึกษาให้ชัดเจนและทำการตรวจสอบคุณภาพและสมบัติที่ต้องการใช้งานวัสดุชีวภาพนาโนดังกล่าว
4. แนวทางการเลือกใช้วัสดุชีวภาพนาโนอาจทำในลักษณะการทำวัสดุนาโนคอมพอสิตเพื่อให้เกิดการยึดเกาะของวัสดุชีวภาพนาโนกับเนื้อเยื่อโดยรอบติดแน่นและแข็งแรงเรียกว่าการกราฟต์ (Grafting) ทำให้มีประสิทธิภาพสูง
5. การปลูกถ่ายเนื้อเยื่อทางวิศวกรรมที่เรียกว่าเนื้อเยื่อเทียม Scaffold หรือ Tissue engineering

ความสำคัญที่จำเป็นต้องเข้าใจศาสตร์ด้านวัสดุนาโนเนื่องจากการเตรียมอนุภาควัสดุนาโนชนิดไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีขนาดเล็กเหมาะสมมากกว่าวัสดุที่มีอนุภาคขนาดใหญ่เพราะส่งผลต่อการรับแรงทางกล เช่น แรงกด แรงดึง แรงเฉือน ได้สูงกว่า นอกจากนี้วัสดุชีวภาพนาโนที่มีขนาดเล็กจะช่วยให้การยึดเกาะกับคอลลาเจนแข็งแรง

นอกจากนี้ยังมีวัสดุชีวภาพนาโนชนิดอื่นที่สามารถใช้งานทางการแพทย์ได้ด้วยเช่นกัน ตัวอย่างเช่น วัสดุนาโนคอมพอสิตกับพอลิยูรีเทนโดยการวางเรียงซ้อนกันเป็นชั้น ๆ เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงทางกลและช่วยลดปริมาณก๊าซที่ผ่านเข้าออกวัสดุดังกล่าวได้ดีขึ้นหรือการเลือกใช้วัสดุชีวภาพชนิดย่อยสลายได้ง่าย (Biodegradable) ช่วยลดปัญหาเรื่องแผลผ่าตัด เช่น การใช้ไหมละลายสำหรับการผ่าตัดเพียงครั้งเดียวทำให้การยึดเกาะของโครงสร้างกับโปรตีนภายในร่างกายมีความแข็งแรง สำหรับโครงสร้างของสารประกอบไฮดรอกซีอะพาไรต์ (Hydroxyapatite, HA,  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ) ซึ่งเป็นสารประกอบเซรามิกชีวภาพที่สามารถสังเคราะห์ได้ในห้องปฏิบัติการโดยการเตรียมจากสารประกอบแคลเซียมออกไซด์กับกรดฟอสฟอริกด้วยสัดส่วน อุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมดังรูป 13.18 และตาราง 13.2 และตาราง 13.3



รูปที่ 13.18 เฟสไดอะแกรมของสารประกอบไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxy apatite) ที่มา K.de Groot, 1988

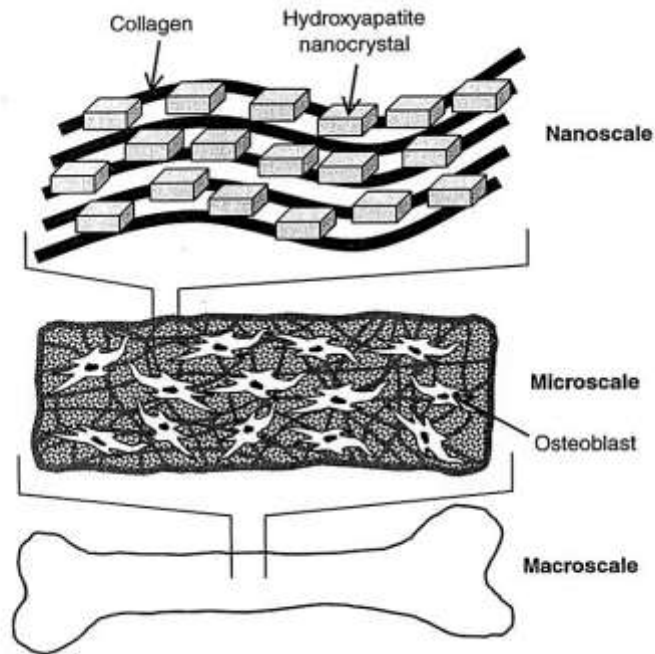
**ตารางที่ 13.2** อัตราส่วนแคลเซียมและฟอสฟอรัสของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต ที่มา K.de Groot, 1988

สัดส่วน Ca/P	สูตร (Formula)	ชื่อ Name/mineral	ชื่อย่อ (Abbreviation)
0.5	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Monocalcium phosphate monohydrate	MCPM
1.0	$\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Hydrated calcium phosphate/Brushite	DCP
1.0	$\text{CaHPO}_4$	Anhydrous calcium phosphate/Monetite	ADCP
1.33	$\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Octacalcium phosphate	OCP
1.5	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	Tricalcium phosphate/Whitlockite	TCP
1.67	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{F})_2$	Fluorapatite	FA
1.67	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$	Hydroxyapatite	HA
2.0	$\text{CaO} \cdot \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	Tetracalcium	TTCP

		phosphate/Hilgenstockite	
--	--	--------------------------	--

**ตารางที่ 13.3** สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตจากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ ที่มา K.de Groot, 1988

สัดส่วน Ca:P	ชื่อแร่ (Mineral names)	สูตร (Formula)	ชื่อเคมี (Chemical name)
1.0	Monetite	$\text{CaHPO}_4$	Dicalcium phosphate (DCP)
1.0	Brushite	$\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Dicalcium phosphate dihydrate (DCPD)
1.33	-	$\text{Ca}_8(\text{HPO}_4)_2(\text{PO}_4)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Octocalcium phosphate (OCP)
1.43	Whiyllockite	$\text{Ca}_{10}(\text{HPO}_4)(\text{PO}_4)_6$	
1.50		$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	Tricalcium phosphate (TCP)
1.67	Hydroxyapatite	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$	



รูปที่ 13.19 การยึดเกาะของวัสดุนาโนเซรามิกคอมพอลิเมอร์ระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์และคอลลาเจน  
ที่มา Fisher, J. P., et al., 2007

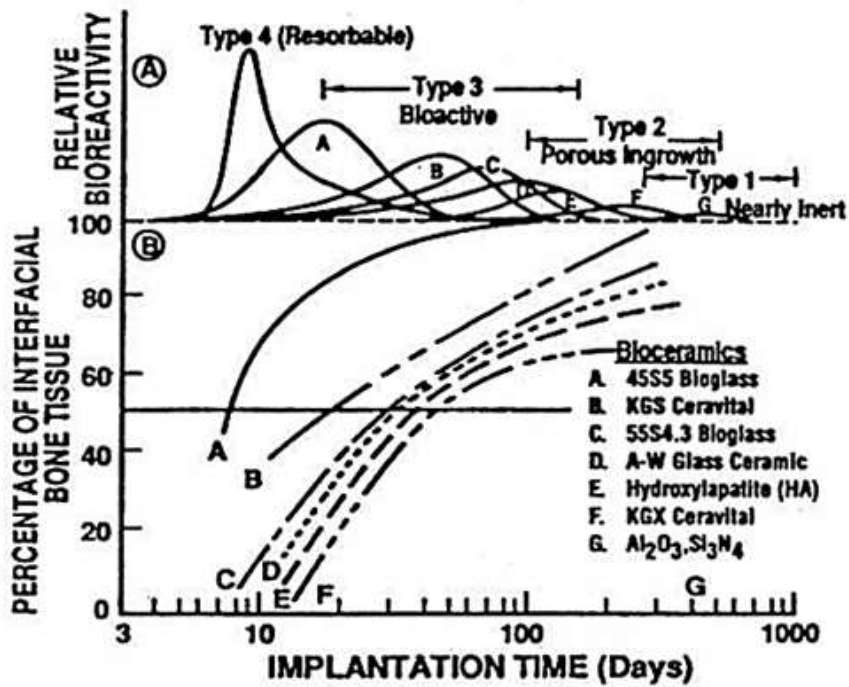
ตารางที่ 13.4 วัสดุชีวภาพนาโน ที่มา K.de Groot, 1988

วัสดุนาโน	สูตรทางเคมี	วัสดุคอมพอลิเมอร์สำหรับงานทางการแพทย์
Carboxylate alumoxane	$[Al(O)_x(OH)_y(O_2CR)_z]_n$	PPF
Montmorillonite	$M_x(Al_{4-x}Mg_x)Si_8O_{20}(OH)_4$	PLLA Polyurethane
Hydroxyapatite	$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$	PMMA PEG, PMMA, PBMA, PHEMA, PEG/PBT, Chitosan, PPF, Collagen
Silica	$SiO_2$	PMMA, PCL
Alumina	$Al_2O_3$	Ce-TZP
Carbon nanotube	C	PMMA PLA

นอกจากการใช้วัสดุเซรามิกชีวภาพ เช่น สารประกอบไฮดรอกซีอะพาไทต์ อะลูมินา ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นวัสดุทดแทนแล้วยังมีสารประกอบแก้วซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกาที่ว่องไวในการใช้เป็นวัสดุทดแทนทางชีวภาพได้อีกชนิดหนึ่ง สารประกอบซิลิกาที่ว่องไวทำให้โครงสร้างหลังการปลูกถ่ายยึดเกาะกับอวัยวะภายในร่างกายได้อย่างแข็งแรง การต้านทานการกัดกร่อนดี ปลอดภัยในการใช้งาน อายุการใช้งานนาน อย่างไรก็ตามเนื่องจากแก้วซิลิกามีหลายชนิดและหลายเกรดสามารถสังเคราะห์ได้จากหลายสูตรผสม ดังตารางที่ 13.5 ส่งผลต่อการเป็นแก้วซิลิกาที่ว่องไวและยึดเกาะกับเนื้อเยื่อในร่างกายได้แข็งแรงแตกต่างกัน

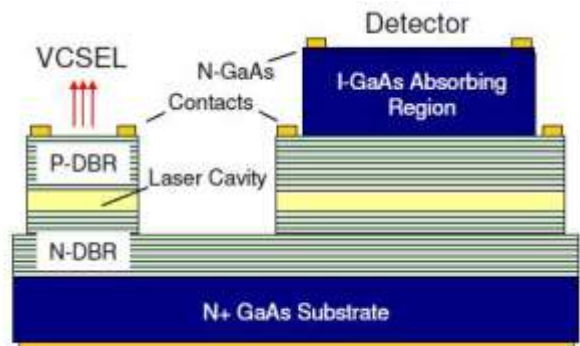
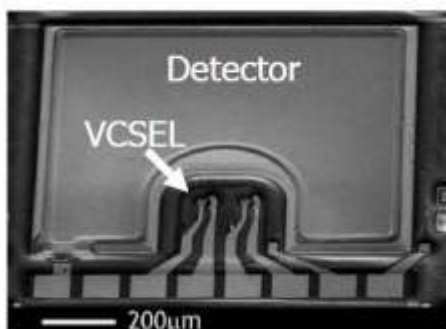
ตารางที่ 13.5 องค์ประกอบของแก้วซิลิกาที่ว่องไว (Bioactive glasses) และกลาสเซรามิก (Glass-ceramics) ในหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่มา Fisher, J. P., et al., 2007

	45S5 Bioglass	45S5F Bioglass	45S5.4F Bioglass	40S5B5 Bioglass	52S4.6 Bioglass	55S4.3 Bioglass	KGC Ceravital	KGS Ceravital	KGy213 Ceravital	A-W GC	MB GC
SiO <sub>2</sub>	45	45	45	40	52	55	46.2	46	38	34.2	19-52
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6	6	6	6	6	6				16.3	4-24
CaO	24.5	12.25	14.7	24.5	21	19.5	20.2	33	31	44.9	9-3
Ca(PO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>							25.5	16	13.5		
CaF <sub>2</sub>		12.25	9.8							0.5	
MgO							2.9			4.6	5-15
MgF <sub>2</sub>											
Na <sub>2</sub> O	24.5	24.5	24.5	24.5	21	19.5	4.8	5	4		3-5
K <sub>2</sub> O							0.4				3-5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>									7		12-33



รูปที่ 13.20 เปรียบเทียบวัสดุชีวภาพชนิดว่องไว (Bioactive material) : A) เปรียบเทียบความว่องไวของการปลูกถ่าย (Bioreactivity) วัสดุชีวภาพในร่างกาย, B) เวลาการเกิดพันธะระหว่างวัสดุเซรามิกชีวภาพกับเนื้อเยื่อบริเวณรอยต่อกระดูกหลังการปลูกถ่าย (Implant interfacial) วัสดุชีวภาพในร่างกาย ที่มา Fisher, J. P., et al., 2007

6. **ตัวตรวจวัดทางชีวภาพ (Biosensor)** ตัวตรวจวัดทางชีวภาพหรือไบโอเซ็นเซอร์ (Biosensor) คือ อุปกรณ์ตรวจวัดที่เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างส่วนแปลงสัญญาณที่เรียกว่าทรานสดิวเซอร์ (Transducer) และสารชีวภาพ (Biological Component) เช่น วัสดุชีวภาพนาโน (เช่น เนื้อเยื่อ (Tissue) จุลชีพ (Microorganisms) Receptors เอนไซม์ (Enzymes) แอนติบอดี (Antibodies) กรดนิวคลีอิก (Nucleic acids) และสารอื่น ๆ จากธรรมชาติ Biologically Derived Material เช่น Recombinant Antibodies Engineered Proteins และ Aptamers เป็นต้น หรือ สารเลียนแบบธรรมชาติ เช่น Synthetic Receptors Biomimetic Catalysts Combinatorial Ligands และ Imprinted Polymers เป็นต้น เพื่อใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น สิ่งแวดล้อม การแพทย์ และอุตสาหกรรม เป็นต้น (Cavin, 2008; Walker, 2008) จากรายงานของ O'Sullivan, T., et al., 2010 พัฒนาตัวตรวจวัดทางชีวภาพหรือไบโอเซ็นเซอร์ (Biosensor) ที่ผลิตจากสารกึ่งตัวนำที่สามารถฝังในร่างกายสำหรับใช้ทดลองในสิ่งมีชีวิต (In vivo) เพื่อทดสอบความว่องไวต่อโมเลกุลของแสงฟลูออเรสเซนซ์ในช่วง far-infrared ทั้งนี้ในการวิจัยได้ใช้อุปกรณ์ตรวจวัดประเภท Monolithically Integrated ที่มีแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) เป็นส่วนประกอบหลักในการทดสอบความว่องไวในหนูทดลองซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวทำงานร่วมกับแสงเลเซอร์แบบวีซีเอสอีแอล (Vertical-cavity Surface-emitting Laser: VCSEL) ที่มีความยาวคลื่น 675 นาโนเมตร อุปกรณ์ตรวจวัดแสง (PIN photodiode) ที่มีโครงสร้างของ GaAs และที่กรองแสงฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence Emission Filter) ดังรูปที่ 13.21 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ (SEM) แสดงให้เห็นถึง Integrated Fluorescence Sensor ที่มีแผ่นฟิล์มบางชนิดไดอิเล็กตริกฟลูออเรสเซนซ์ Dielectric Fluorescence Emission Filter ประกอบอยู่ด้วย ส่วนรูปด้านขวาแสดงถึงภาพตัดขวางจำลองของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 13.21 เซนเซอร์อินทรีเกตฟลูออเรสเซนซ์ (Integrated Fluorescence Sensor) ที่มา O'Sullivan, T., et al., 2010

งานวิจัยดังกล่าวได้ใช้เทคโนโลยีภาพเรืองแสง (Fluorescent Imaging Technology) เพื่อใช้ขยายโอกาสในการศึกษาด้านชีววิทยาและชีวเคมี งานวิจัยดังกล่าวได้ใช้อุปกรณ์ตรวจวัดขนาดเล็กที่มีความไวต่อแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ฝังอยู่ในสัตว์ทดลองขนาดเล็ก เช่น หนูทดลองพร้อมกับติดตั้งระบบส่งข้อมูลระยะไกลแบบไร้สาย (Wireless Telemetry System) ไว้กับอุปกรณ์ตรวจวัดดังกล่าว เพื่อใช้สังเกตโมเลกุล อีกทั้งอุปกรณ์ตรวจวัดยังไวต่อสารไซยาไนด์ 5.5 (Cyanine 5.5, Cy 5.5) ทำให้นักวิจัยใช้สารดังกล่าวเป็นตัวตรวจวัดผลการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยดังกล่าวคือการศึกษากระบวนการทางชีวเคมีในระดับโมเลกุลเพื่อค้นหาเป้าหมายที่เหมาะสมสำหรับการรักษาและเพื่อค้นหาแนวทางการรักษาในรูปแบบใหม่ของสิ่งมีชีวิต

7. **ไบโออิเล็กทรอนิกส์ (Bioelectronic)** หมายถึง การผสมผสานความรู้และเทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์กับวัสดุชีวภาพ เช่น การตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่ผลิตโดยร่างกายและการนำทรานซิสเตอร์มาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ทางการแพทย์ ทั้งนี้สมบัติที่สำคัญของ Bioelectronic คือ การใช้กระแสไฟฟ้าเข้ามาช่วยในด้านชีวภาพและยารักษาโรค ซึ่งจะมุ่งเน้นในการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับระบบที่เกี่ยวข้องทางชีวภาพ เช่น ชีวอิเล็กทรอนิกส์สำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดด้านสมอง Brain-machine Cell-electrode หรือ ชีวโปรตีน Protein-electrode โดยมีวัตถุประสงค์ในการใช้เทคโนโลยีไบโออิเล็กทรอนิกส์ (Bioelectronic) ในการช่วยรักษาโรคที่เกี่ยวข้องกับสมองหรืออาการบาดเจ็บอื่น ๆ

## คำถามท้ายบท

1. วัสดุชีวภาพนาโนคืออะไร
2. คุณลักษณะเด่นของไบโออิเล็กทรอนิกส์คืออะไร
3. จงยกตัวอย่างวัสดุนาโนเซรามิกชีวภาพมา 2 ชนิด
4. คุณลักษณะที่สำคัญของวัสดุชีวภาพนาโนในการใช้เป็นวัสดุทดแทนคืออะไร
5. จงยกตัวอย่างกระบวนการผลิตวัสดุชีวภาพนาโนด้านการแพทย์ 2 วิธี



## บทที่ 14

### วัสดุนาโนสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านอื่น ๆ (Nanomaterials for Other Applications)

#### 14.1 แบตเตอรี่นาโน (Nano battery)

เทคโนโลยีนาโนหมายถึงเทคโนโลยีประยุกต์ซึ่งเกี่ยวข้องกับการจัดการ การสร้าง การสังเคราะห์ วัสดุหรืออุปกรณ์ในระดับของอะตอม โมเลกุลหรือชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กในช่วงประมาณ 1 ถึง 100 นาโนเมตร ซึ่งจะส่งผลให้วัสดุหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ มีหน้าที่การทำงานเพิ่มขึ้นและมีคุณสมบัติที่พิเศษขึ้นทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ ทำให้มีประโยชน์ต่อผู้ใช้สอยและเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจได้ ปัจจุบันเทคโนโลยีนาโนถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลายวงการไม่ว่าจะเป็นทางการแพทย์ อุตสาหกรรมต่าง ๆ หรือแม้แต่แบตเตอรี่เองก็มีการพัฒนาใช้เทคโนโลยีนาโนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติแบตเตอรี่เช่นกัน ซึ่งงานวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีนาโนในแบตเตอรี่นั้นมีมากมายโดยเฉพาะการปรับปรุงแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีที่เก็บไว้มาเป็นพลังงานไฟฟ้าและในยุคที่ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีได้รับการยอมรับมากขึ้นแบตเตอรี่แบบธรรมดาดูเหมือนจะลดความสำคัญลงและนักวิทยาศาสตร์มีความหวังว่าจะสามารถพัฒนาแบตเตอรี่แบบใหม่ขึ้นได้โดยการนำเทคโนโลยีนาโนมาประยุกต์ใช้อาทิเช่น การนำเทคโนโลยีนาโนมาใช้ในกระบวนการผลิตแบตเตอรี่

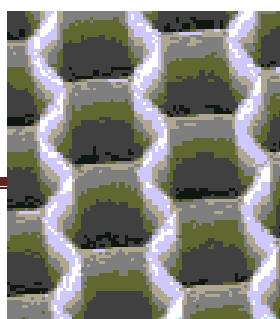
## ประโยชน์ของแบตเตอรี่นาโน

1. เพิ่มพลังงานให้แบตเตอรี่มากขึ้นและลดเวลาในการประจุไฟฟ้าหรือชาร์จใหม่โดยการเคลือบผิวของขั้วไฟฟ้าด้วยอนุภาคนาโนซึ่งจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับขั้วไฟฟ้าจึงทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านขั้วไฟฟ้าและสารเคมีที่อยู่ในแบตเตอรี่ได้มากขึ้น เทคนิคนี้นอกจากจะเพิ่มประสิทธิภาพแบตเตอรี่แล้ว ยังเป็นการลดน้ำหนักของแบตเตอรี่และสามารถให้พลังงานได้เพียงพอต่อความต้องการ
2. เพิ่มอายุการใช้งานให้แบตเตอรี่โดยการใช่วัสดุนาโนแยกของเหลวในแบตเตอรี่ออกจากขั้วไฟฟ้าที่เป็นของแข็งเมื่อไม่ได้ใช้งาน การแยกของเหลวออกจากขั้วที่เป็นของแข็งนั้นเป็นการป้องกันการคายประจุด้วยตัวเอง ซึ่งจะเป็นการเพิ่มอายุการเก็บรักษาแบตเตอรี่อย่างดี
3. ลดความเสี่ยงที่แบตเตอรี่จะเกิดการติดไฟโดยการใช่วัสดุอิเล็กโทรดหรือขั้วไฟฟ้าที่ทำจากวัสดุติดไฟยาก

ในอนาคตแบตเตอรี่นาโนจะมีบทบาทสำคัญในอุปกรณ์ฉุกเฉินต่างๆ รวมทั้งอุปกรณ์ที่ต้องการให้แบตเตอรี่พร้อมใช้งานเสมอหรือสามารถใช้งานได้เป็นเวลานาน ๆ ตัวอย่างเช่น เซนเซอร์ตรวจระเบิดชีวภาพซึ่งต้องพร้อมใช้งานและมีความถูกต้องร้อยเปอร์เซ็นต์เมื่อเครื่องเริ่มทำงาน นอกจากนี้แบตเตอรี่นาโนยังมุ่งเป้าไปยังกลุ่มผลิตภัณฑ์โทรศัพท์มือถือหรือคอมพิวเตอร์พกพาอีกด้วย นอกจากการพัฒนาให้แบตเตอรี่สามารถเก็บรักษาและใช้งานได้นานขึ้น นักวิจัยยังได้พยายามที่จะทำให้แบตเตอรี่นาโนไม่มีพิษโดยการใช้น้ำที่สะอาดจะทำให้สารเคมีภายในแบตเตอรี่กลายเป็นกลางเมื่อพลังงานถูกใช้หมดไป

## การวิจัยและพัฒนาแบตเตอรี่นาโน

แบตเตอรี่ธรรมดาทั่วไปจะประกอบด้วยสารเคมีจำนวนเล็กน้อยสองชนิดทำปฏิกิริยากันก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าและเป็นความจริงที่ว่าแม้ไม่ได้มีอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้าต่อพ่วงไว้กับแบตเตอรี่ก็ตาม แบตเตอรี่ก็มีการสูญเสียประจุไฟฟ้าไปเรื่อย ๆ จากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในแบตเตอรี่เอง โดยแบตเตอรี่จะสูญเสียประจุไปประมาณร้อยละ 7 ถึง 10 ต่อปี ดังนั้นเพื่อลดความสูญเสียและยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ปัจจุบันนักวิจัยได้พัฒนาแบตเตอรี่ที่นำเทคโนโลยีใหม่ ๆ มาใช้ โดยการพัฒนาส่วนประกอบที่เรียกว่า “นาโนเมมเบรน (Nanomembrane)” ซึ่งเป็นเยื่อที่มีขนาดเล็กมากและมีรูแบบรูปร่างผึ้งดังรูปที่ 14.1 เพื่อนำมาใช้กั้นภายในของเหลวที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) จากส่วนที่ทำปฏิกิริยาภายในของเหลวที่เป็นอิเล็กโทรไลต์จะไม่สามารถไหลผ่านเยื่อนาโนเมมเบรนจนกว่าจะมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาต่อเข้ากับแบตเตอรี่



รูปที่ 14.1 นาโนเมมเบรนซึ่งเป็นเยื่อที่มีขนาดเล็กมากมีรูปแบบรูปร่างที่มาจาก Lucent Technology

เยื่อนาโนเมมเบรนรูปร่างนี้ช่วยให้แบตเตอรี่มีความเสถียรมากขึ้นสามารถเก็บรักษาได้ยาวนานขึ้นอีกทั้งสามารถจ่ายไฟได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ นาโนเมมเบรนรูปร่างนี้โดยปกติจะไม่ยอมให้น้ำผ่านได้ภายใต้สภาวะปกติแต่เมื่อแบตเตอรี่ถูกใช้งานจะปรับสภาพโดยยอมให้น้ำหรือสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผ่านได้และผลจากการที่สารเคมีทำปฏิกิริยาจะถูกเก็บแยกกันจนกว่าแบตเตอรี่จะถูกใช้งาน นั่นมีผลให้แบตเตอรี่นาโนสามารถเก็บไว้ได้ถึง 15 ปี โดยไม่สูญเสียพลังงาน อย่างที่ทราบกันดีว่าแบตเตอรี่ลิเทียมได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีสมบัติที่เด่นกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ แต่ก็ยังมีข้อด้อยในเรื่องของความปลอดภัย และอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ดังนั้นการนำเทคโนโลยีนาโนมาปรับปรุงสมบัติบางส่วนให้ดีขึ้นโดยการลดขนาดของวัสดุที่นำมาใช้ทำเป็นขั้วของแบตเตอรี่ ซึ่งส่งผลให้ตัวแบตเตอรี่มีขนาดลดลง อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มปริมาณความจุพลังงานให้กับแบตเตอรี่ด้วย แบตเตอรี่แบบลิเทียมไอออนมีความจุได้มากขึ้นถึงสองเท่าแต่ก็ยังไม่เพียงพอหากต้องนำมาใช้ในอุปกรณ์ขนาดใหญ่ขึ้น ปัจจุบันผู้ผลิตแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนให้กับรถยนต์พลังไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น Chevrolet Volt ได้เปลี่ยนขั้วลบจากเดิมที่เป็นแกรไฟต์ไปเป็นท่อเจอร์เมเนียมขนาดนาโน ทำให้ประสิทธิภาพในการเก็บและคายประจุเพิ่มขึ้นถึง 5 เท่า วัสดุอย่างเจอร์เมเนียมในปัจจุบันมีต้นทุนที่สูงมาก ดังนั้นจึงมีการวิจัยเปลี่ยนวัสดุเป็นท่อนาโนซิลิคอนที่สามารถเก็บประจุได้มากกว่าแบตเตอรี่ทั่วไปถึง 10 เท่า เทียบในปริมาณน้ำหนักที่เท่ากันแต่ข้อเสียของท่อนาโนซิลิคอนคือความสามารถในการอัดประจุที่น้อยลง ปัญหาการหดตัวและการบวมของท่อนาโนซิลิคอน ดังนั้นนักวิจัยจึงพัฒนาขั้วลบให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นด้วยการใช้วัสดุที่สามารถเก็บประจุแบตเตอรี่ได้มากกว่า โดยการใช้ซิลิคอน (Si) ร่วมกับเจอร์เมเนียม (Ge) นอกจากเรื่องของความจุพลังงานแล้ว ระยะเวลาในการอัดประจุไฟฟ้าก็เป็นส่วนที่นักวิจัยสนใจพัฒนาและมีการปรับปรุงเรื่อยมา เนื่องจากความนิยมในการใช้รถไฟฟ้าและมีจำนวนผู้ใช้มากขึ้น ระยะเวลาในการชาร์จไฟจึงเป็นปัจจัยสำคัญเพื่อให้ได้แบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพในการประจุไฟเข้าไปได้อย่างรวดเร็วและใช้งานได้ยาวนาน แบตเตอรี่แบบใหม่นี้มีชื่อเรียกว่านาโนบอลแบตเตอรี่ (Nanoball Battery)

นาโนบอลแบตเตอรี่คือแบตเตอรี่ที่ขั้วลบประกอบไปด้วยลิเทียมไอออนฟอสเฟต (Lithium Iron Phosphate) โดยตัวลิเทียมไอออนฟอสเฟตที่อยู่ในนาโนบอลแบตเตอรี่จะมีลักษณะที่คล้ายกับลูกบอล

ขนาดเล็กประกอบเข้าด้วยกัน เมื่อแบตเตอรี่ถูกอัดประจุไฟฟ้าเข้าไป นาโนบอลจะปล่อยลิเทียมไอออน จากขั้วลบมายังขั้วบวกเพื่อทำการอัดประจุไฟฟ้าและเมื่อเลิกการอัดประจุไฟแล้วภายในแบตเตอรี่ก็จะเกิดปฏิกิริยาตรงข้ามคือขั้วไฟฟ้าบวกจะส่งลิเทียมไอออนกลับมายังขั้วลบ จากนั้นลิเทียมไอออนที่ถูกส่งกลับมาก็มจะถูกดูดซับโดยนาโนบอลซึ่งลิเทียมฟอสเฟตบาง ๆ เคลือบอยู่ที่ผิวของนาโนบอลจะทำให้สามารถดึงลิเทียมไอออนส่งออกไปได้รวดเร็วมากขึ้น นอกจากนี้นักวิจัยของ MIT ได้ทำการประดิษฐ์ แบตเตอรี่ขนาดเล็กขึ้นมาซึ่งสามารถประจุไฟได้เต็มโดยใช้เวลาเพียง 10-20 วินาที หรือในบางครั้งก็ใช้เวลาประจุไฟประมาณ 6 นาที แบตเตอรี่แบบใหม่นี้จะทำให้มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบตเตอรี่โดยทั่วไป เพราะแบตเตอรี่นาโนจะมีขนาดเล็กกว่า เบากว่า และสามารถใช้เวลาในการประจุไฟฟ้าเข้าไปน้อยกว่า แบตเตอรี่ปกติหลายเท่า นวัตกรรมแบตเตอรี่มีการพัฒนาล้ำหน้าไปเรื่อย ๆ จากการใช้เทคโนโลยีนาโนที่สามารถทำให้แบตเตอรี่มีขนาดบางกว่ากระดาษโดยศาสตราจารย์ Robert J. Linhardt นักวิจัยจาก ศูนย์เทคโนโลยีชีวภาพและสหวิทยาการสถาบัน Rensselaer Polytechnic Institute (RPI) ได้พัฒนา แบตเตอรี่ที่มีความบาง น้ำหนักเบาเป็นพิเศษและยังสามารถโค้งงอได้ แบตเตอรี่ดังกล่าวถูกออกแบบให้สามารถปรับเปลี่ยนขนาดเพื่อขยายกำลังไฟสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการพลังงานมากขึ้นได้ โดยการ พัฒนาให้กระบวนการปรับเปลี่ยนกำลังไฟทำได้ง่ายและมีความยืดหยุ่นกว่าแบตเตอรี่ที่มีขนาดบางเท่ากระดาษ รุ่นก่อนซึ่งแบตเตอรี่รุ่นต้นแบบมีขนาดหนากว่าและให้พลังงานเพียง 2.5 โวลต์ ซึ่งเพียงพอสำหรับพัดลม ขนาดจิ๋วและไฟฉายเท่านั้น แบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถซ่อนแผ่นแบตเตอรี่เข้าไปที่ด้านบนได้โดยตรงเพื่อให้พลังงานเพิ่มขึ้น โดยการทดลองซ่อนแผ่นแบตเตอรี่จำนวน 10 แผ่น ปรากฏว่าสามารถทำงานได้ดี เชื่อว่าผู้ใช้สามารถซ่อนกระดาษแบตเตอรี่ได้ตามต้องการ แม้ว่าจำนวนที่ต้องการจะสูงถึง 500 แผ่นก็ตาม แบตเตอรี่ดังกล่าวยังสามารถม้วนงอหรือพับเพื่อแทรกแบตเตอรี่รูปทรงใดก็ได้ลงในตำแหน่งที่จำกัดทำให้ช่วยลดข้อจำกัดในเรื่องการออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ นอกจากนี้ความพิเศษที่ ขนาดของแบตเตอรี่บางกว่ากระดาษแล้ว นักวิจัยยังใช้ท่อนาโน (Nanotube) แทนการใช้ขั้วอิเล็กโทรด และในส่วนสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั้นนักวิจัยใช้ของเหลวที่มีประจุ (Ionic liquid) เช่น สารละลายเกลือที่ไม่มีน้ำเป็นส่วนประกอบจึงทำให้ไม่มีปัญหาเรื่องการเย็นจนแข็งตัวหรือระเหยกลายเป็นไอ

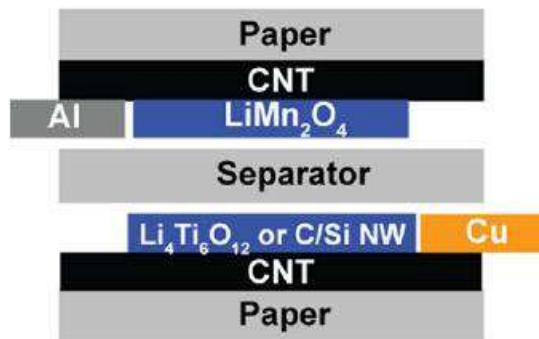
นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Dr.Hiroyuki Nishide, Dr. Hiroaki Konishi และ Dr.Takeo Suga จากมหาวิทยาลัยวาเซดะ พัฒนาแบตเตอรี่นาโนจากกระดาษที่มีความยืดหยุ่นตัวเพื่อให้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นแบตเตอรี่แบบใหม่ที่ทำจากฟิล์มพอลิเมอร์อินทรีย์ที่มีความหนาเพียง 200 นาโนเมตร โดยมีกลุ่มของธาตุไนโตรอกไซด์ (Nitroxide) ที่ใส่ไว้ในแบตเตอรี่ทำหน้าที่เป็นตัวนำประจุ แบตเตอรี่จากพอลิเมอร์อินทรีย์นี้มีความหนาแน่นของธาตุสูง ตัวแบตเตอรี่จึงมีความสามารถในการประจุพลังงานและปล่อยประจุสูงตามไปด้วยจึงเป็นความได้เปรียบที่เหนือกว่าแบตเตอรี่จากสารอินทรีย์ชนิดอื่น ๆ ส่งผล

ให้ประสิทธิภาพของพลังงานของแบตเตอรี่สูงตามไปด้วยผลก็คือแบตเตอรี่จากธาตุอินทรีย์ชนิดนี้ใช้เวลาในการประจุไฟฟ้าเพียง 1 นาที อีกทั้งยังสามารถใช้งานได้ยาวนานโดยสามารถประจุไฟใหม่ได้ถึง 1,000 ครั้ง ซึ่งทีมนักวิทยาศาสตร์ผู้พัฒนาแบตเตอรี่ชนิดนี้ใช้วิธีหลอมละลายพอลิเมอร์จากนั้นฉาบผิวหน้าของพอลิเมอร์ด้วยกลุ่มธาตุไนโตรอกไซด์ (Nitroxide) แล้วนำมาผ่านกระบวนการฉายแสงด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตทำให้พอลิเมอร์นี้เชื่อมประสานกัน แต่แบตเตอรี่ดังกล่าวยังมีปัญหาอยู่ที่ความสามารถทำละลายได้ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งจะมีผลในการปล่อยประจุของแบตเตอรี่ อย่างไรก็ตามวิธีฉายแสงเพื่อประสานพอลิเมอร์นี้สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ อีกทั้งยังช่วยให้พอลิเมอร์มีความเหนียวเพิ่มขึ้นด้วยดังรูป 14.2

รูปที่ 14.2 แบตเตอรี่นาโนจากพอลิเมอร์อินทรีย์ที่มีความยืดหยุ่นคล้ายพลาสติก ที่มา

URL:<http://www.euroscan.co.th/th/main/content.php?page=products&category=37&id=139>

จากงานวิจัยแบตเตอรี่นาโนนั้นพบว่านิยมทำให้มีขนาดบางเท่ากระดาษโดยใช้วัสดุที่แตกต่างกันออกไป Yi Chui และคณะวิจัยจาก Stanford University ได้ใช้กระดาษสำนักงานทำให้กลายเป็นแบตเตอรี่ที่สามารถเก็บประจุได้ดี มีน้ำหนักเบา โค้งงอได้และมีราคาถูกได้สำเร็จซึ่งทำได้ด้วยวิธีการง่าย ๆ โดยการเคลือบกระดาษด้วยหมึกสีดำที่ทำจากท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยว (Single-walled carbon nanotube, CNT) ส่วนขั้วบวกและขั้วลบทำจากสเลอรี่ (Slurry) ของแท่งนาโนลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) และผงนาโนลิเทียมไทเทเนียมออกไซด์ ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ) หรือเส้นลวดนาโนซึ่งมีคาร์บอนเป็นแกนกลางและมีซิลิคอนหุ้มชั้นนอก (C/Si core/shell NW) ตามลำดับ จากนั้นจึงนำแบตเตอรี่นี้ไปจุ่มในสารละลายลิเทียมเฮกซะฟลูออโรฟอสเฟต ( $\text{LiPF}_6$ ) ซึ่งเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อเชื่อมขั้วอิเล็กโทรดและหุ้มปิดโดยมีการจัดเรียงองค์ประกอบดังรูปที่ 14.3



รูปที่ 14.3 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่กระดาษ ที่มา URL:[http://www.mtec.or.th/index.php?option=com\\_content&task=view&id=1078&Itemid=177](http://www.mtec.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=1078&Itemid=177)

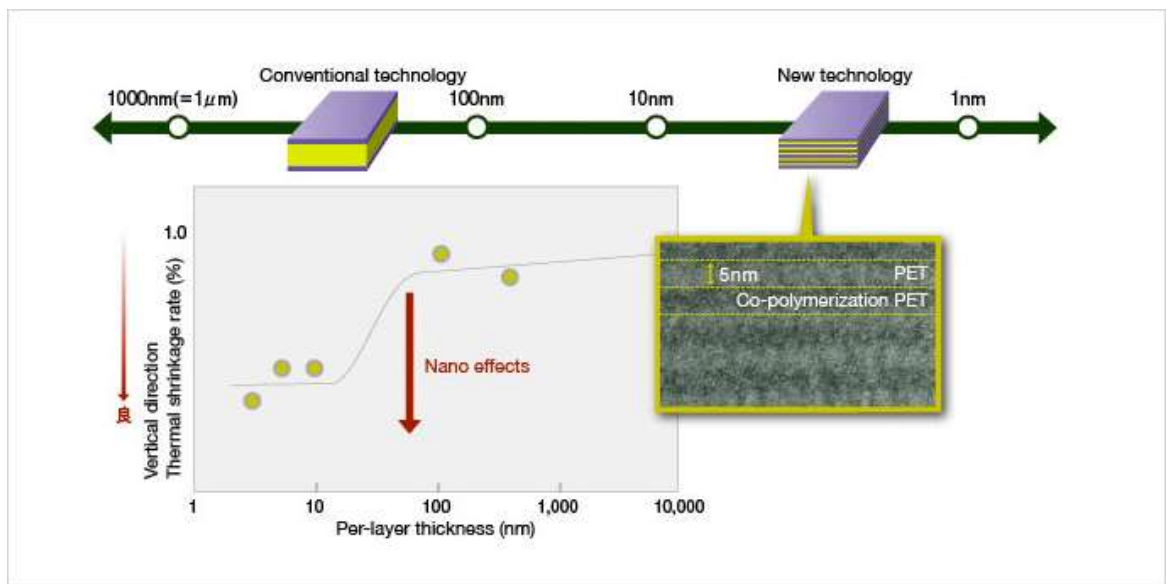
ท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยวนี้มีโครงสร้างเป็น 1 มิติ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมาก จึงทำให้หมึกสามารถยึดเกาะกับเส้นใยของกระดาษได้ดี เมื่อนำไปทำแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุพิเศษ (Supercapacitor) จึงมีความหนาแน่นมาก ตัวเก็บประจุพิเศษชนิดกระดาษสามารถอัดประจุและปล่อยประจุได้ถึง 40,000 รอบ หรืออย่างน้อยที่สุดก็มากกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมประมาณ 10 เท่า นอกจากนี้แบตเตอรี่ที่ทำจากกระดาษยังสามารถพับงอ ม้วน หรือแช่ในสารละลายกรดหรือด่างได้โดยที่ไม่ทำให้ประสิทธิภาพแย่งลง ขั้นตอนการทำบนกระดาษจะง่ายกว่าการทำบนวัสดุชนิดอื่น ๆ เช่น แก้ว หรือพลาสติก เนื่องจากการทำบนกระดาษไม่จำเป็นต้องเข้มงวดในเรื่องสมบัติการไหล (Rheology) ของน้ำหมึกมากนัก ในขณะที่การทำบนพลาสติกและแก้วจะต้องปรับสมบัติและความหนืดของน้ำหมึกให้พอเหมาะ ซึ่งจะต้องเติมสารเติมแต่งเข้าไป แต่การเติมสารนี้ทำให้สมบัติการนำไฟฟ้าลดลงและอีกเหตุผลหนึ่งคือการทำบนกระดาษไม่จำเป็นต้องทำขั้นตอนการล้างด้วยสารลดแรงตึงผิวเพื่อเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าเช่นเดียวกับการทำบนแก้วและพลาสติก ดังนั้นค่าความต้านทานของท่อนาโนคาร์บอน CNT บนกระดาษจึงไม่เปลี่ยนแปลง จากการทดลองพบว่ากระดาษท่อนาโนคาร์บอนมารวมเข้ากับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบเดิมหรือแบตเตอรี่ที่สามารถประจุไฟได้ทั่วไปจะสามารถลดน้ำหนักได้มากถึงร้อยละ 20 ซึ่งเหมาะที่จะนำไปใช้ในรถไฟฟ้าหรือรถยนต์ไฮบริด นอกจากนี้ยังช่วยยืดอายุการใช้งานของโทรศัพท์มือถือ เครื่องคอมพิวเตอร์พกพา หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาอื่น ๆ ได้อีกด้วย แต่อุปสรรคที่สำคัญของงานนี้คือราคาของท่อนาโนคาร์บอน CNT ที่ค่อนข้างสูงแต่หากมีการเพิ่มปริมาณการผลิตราคาก็จะลดลง นอกจากนี้ข้อดีอีกประการหนึ่งคือจะสร้างขึ้นได้ง่ายด้วยการจุ่มกระดาษด้วยท่อนาโนคาร์บอน ปัจจุบันมีการวิจัยพบว่าถ้าจุ่มด้วยวัสดุแกรฟีน (Graphene) ซึ่งเป็นวัสดุโนนที่มีราคาถูกกว่าท่อนาโนคาร์บอนมีการเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมเป็นชั้นเพียงชั้นเดียวและเมื่อเรียงตัวแบบตั้งฉากกับขั้วไฟฟ้ายิ่งทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงมากขึ้นและมีประสิทธิภาพที่สูงมากขึ้นไปอีกเพราะคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีของแกรฟีนและพื้นที่ผิวจำเพาะที่เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าของท่อนาโนคาร์บอน

#### 14.2 พิล์มลามิเนตนาโน ซึ่งมีจำนวนชั้นมากถึง 2000 ชั้นและมีความหนาเพียง 10 ไมครอน

Toray ได้พัฒนาเทคโนโลยีการเกิดฟิล์มเป็นรายแรกของโลกที่ออกแบบเพื่อใช้ในการลามิเนตพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ที่ความหนาระดับโมเลกุลหลายนาโนเมตรอย่างเที่ยงตรงสูง เทคโนโลยีการลามิเนตความเที่ยงตรงสูงนี้ประสบความสำเร็จในเทคโนโลยีนาโนที่ไม่เคยมีมาก่อน Toray ได้พัฒนาเทคโนโลยีใหม่อันล้ำหน้านี้ เพื่อนำไปสู่การสรรหานวัตกรรมใหม่ด้านคุณสมบัติฟิล์มอันไม่มีจุดสิ้นสุดในการพัฒนาวัสดุฟิล์มชั้นสูง

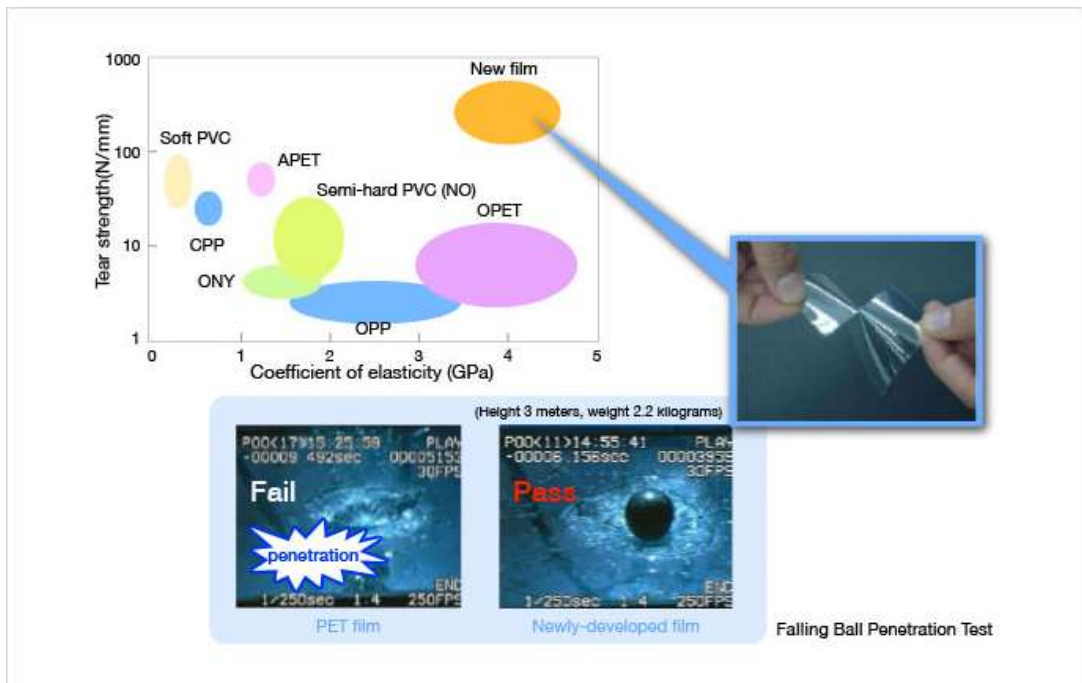
**คุณสมบัติสำคัญของฟิล์มลามิเนตนาโน**

ช่วยปรับปรุงด้านการทนทานต่อความร้อนได้อย่างมาก, สมบัติทางไฟฟ้า, สมบัติทางแสง, คุณสมบัติที่สำคัญของการซึมผ่านของแก๊สและคุณลักษณะด้านอื่น ๆ เพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ให้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติของฟิล์มก่อนหน้านี้ที่ด้อยกว่า รวมทั้งหลีกเลี่ยงความเสียหายที่อาจเกิดกับผลิตภัณฑ์ฟิล์มแบบทั่วไป



รูปที่ 14.4 โครงสร้างฟิล์มลามิเนตนาโน ที่มา Nanotechnology the Manufacturing of 21st Century

ฟิล์มนาโนใหม่แบบหลายชั้นมีลักษณะพิเศษหลายประการ เช่น ความยืดหยุ่น, ความแข็งแรง, ความทนทานต่อความร้อน, ความเสถียรภาพเชิงมิติที่เท่าเทียมกัน ฟิล์มนี้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อให้ยากต่อการรับแรงฉีกเป็นอย่างยิ่ง โดยทั่วไปฟิล์มชนิดนี้มีความทนทานต่อแรงฉีกจนถึง 40 เท่าของฟิล์มทั่วไป นอกจากนี้คุณสมบัติอันโดดเด่นเหล่านี้ ฟิล์มใหม่นี้ยังมีความโดดเด่นด้านความโปร่งใส ด้วยการใช้ประโยชน์จากข้อดีเหล่านี้ ทำให้การใช้งานฟิล์มใหม่นี้กำลังขยายไปสู่ที่บังแดดชนิดติดกับหน้าต่างและอุปกรณ์การก่อสร้างอื่น ๆ ที่ต้องใช้ความโปร่งใสและความปลอดภัยสูง จอแบนและวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ และการใช้งานอื่น ๆ อีกมากมายดังรูป 14.5



รูปที่ 14.5 คุณสมบัติพิเศษทางกลของฟิล์มลามิเนตนาโน ที่มา Nanotechnology the Manufacturing of 21st Century

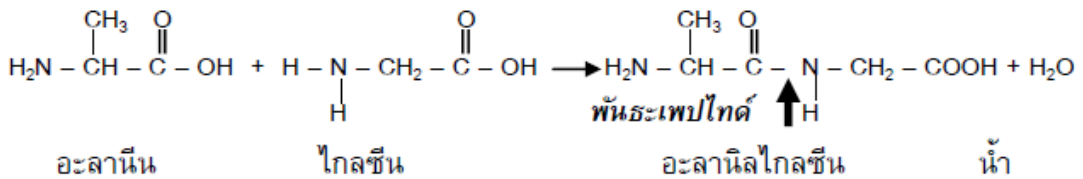


14.3 สารชีวโมเลกุล (Biomolecule)

สารชีวโมเลกุลคือสารอาหารที่ได้รับจากธรรมชาติ ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรตและไขมันซึ่งเป็นสารชีวโมเลกุลที่ได้จากอาหาร

โปรตีน

โปรตีนคือธาตุที่มีองค์ประกอบหลัก 4 ธาตุ คือ C , H , O, และ N นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่น ๆ ร่วมอยู่ด้วยเช่น S, P, Fe, Zn และ Cu โปรตีนเป็นสารชีวโมเลกุลที่มีมวลโมเลกุลสูง (5 x 10<sup>3</sup> ถึง 1 x 10<sup>7</sup>) ซึ่งประกอบด้วยกรดอะมิโนจำนวนมากเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเปปไทด์ซึ่งเป็นพันธะโควาเลนต์ชนิดหนึ่ง ดังรูปที่ 14.6



รูปที่ 14.6 ตัวอย่างโครงสร้างของโปรตีน ที่มา กฤษณา ชูติมา, 2551

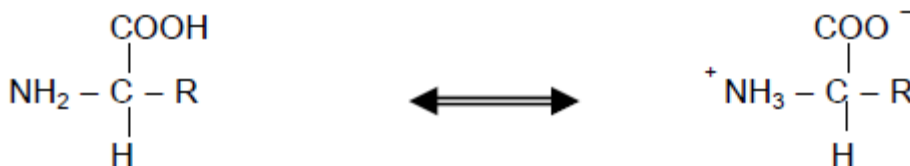
โปรตีนแบ่งตามองค์ประกอบได้ 2 ชนิดคือโปรตีนที่ประกอบด้วยกรดอะมิโนเพียงอย่างเดียว และโปรตีนที่ประกอบด้วยกรดอะมิโนและสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ เช่น

ไลโปโปรตีนเกิดจากกรดอะมิโน และลิพิด (คอเรสเตอรอล) พบใน นม,ไข่แดง

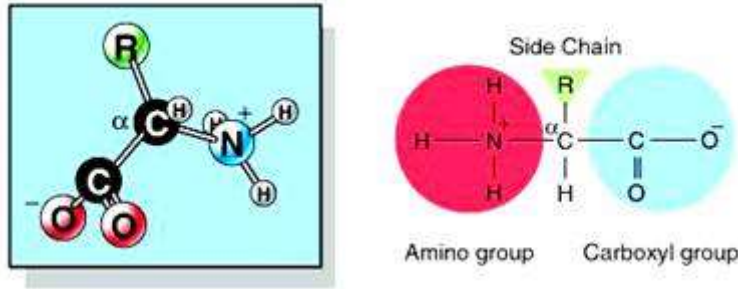
ไกลโคโปรตีน เกิดจากกรดอะมิโนและคาร์โบไฮเดรต พบใน เยื่อหุ้มเซลล์

นิวคลีโอโปรตีน เกิดจากกรดอะมิโนและกรดนิวคลีอิก พบใน นิวเคลียสของเซลล์

กรดอะมิโนคือสารที่มีสมบัติเป็นได้ทั้งกรดและเบสในสภาวะที่มีค่า pH เหมาะสม ซึ่งพบว่ากรดอะมิโนแสดงสมบัติเป็นได้ทั้งไอออนบวกและไอออนลบในโมเลกุลเดียวกันเรียกว่า สวิตเทอร์เรียน Zwitterion เพราะมีการถ่ายโอนโปรตอนระหว่างหมู่คาร์บอกซิลกับหมู่อะมิโนในโมเลกุลจึงเสมือนเกิดคาร์บอกซิเลตไอออนและแอมโมเนียมไอออนได้ดังรูป 14.8



รูปที่ 14.7 โครงสร้างของกรดอะมิโน ที่มา กฤษณา ชูติมา, 2551



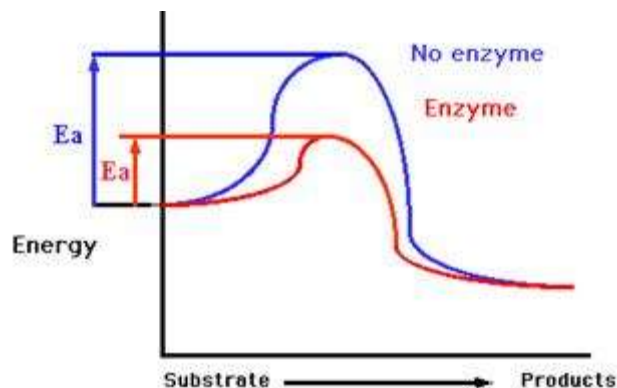
รูปที่ 14.8 โครงสร้างของกรดอะมิโน ที่มา Nanotechnology the Manufacturing of 21st Century

การแปลงสภาพโปรตีนเป็นการทำลายพันธะเปปไทด์ พันธะไฮโดรเจน หรือการเปลี่ยนแปลงลำดับกรดอะมิโนในโปรตีนซึ่งมีผลทำให้โครงสร้างของโปรตีนเปลี่ยนแปลงไป ปัจจัยที่มีผลต่อการแปลงสภาพโปรตีน ได้แก่ ความร้อน สารละลายกรด-เบส แอลกอฮอล์ และโลหะหนัก นอกจากนี้การเติมสารซักฟอก การฉายรังสีเอกซ์ การเขย่าแรง ๆ ก็สามารถทำให้โปรตีนแปลงสภาพได้

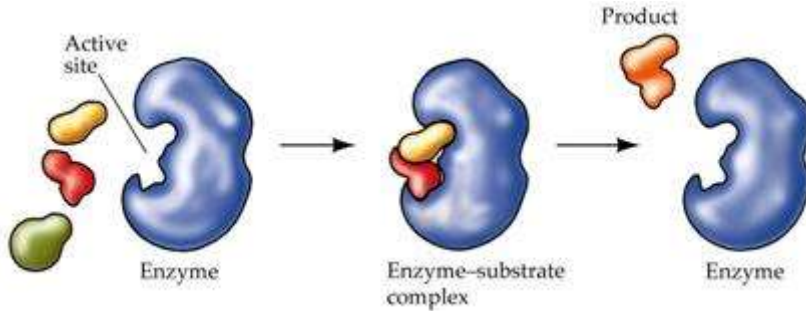
**เอนไซม์ (Enzyme)** เป็นโปรตีนมีหน้าที่เร่งปฏิกิริยาในเซลล์สิ่งมีชีวิต โดยเอนไซม์จะลดพลังงานก่อกัมมันต์ทำให้อุณหภูมิของสารตั้งต้นรวมกับเอนไซม์ได้เหมาะสมมากขึ้น ปฏิกิริยาจึงเกิดได้เร็วขึ้นดังรูปที่ 14.9 หลักการทำงานของเอนไซม์คือการที่สารตั้งต้น (Substrate) เข้าจับกับเอนไซม์ในบริเวณที่เป็นบริเวณเร่งและเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจนถึงสิ้นสุดปฏิกิริยาได้ผลิตภัณฑ์และเอนไซม์ก็กลับออกมาด้วยดังรูปที่ 14.10 เอนไซม์มีหลายชนิดในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตโดยเอนไซม์ชนิดหนึ่ง ๆ สามารถทำปฏิกิริยาได้เฉพาะอย่างเท่านั้น แต่เอนไซม์บางชนิดก็อาจมีบริเวณเร่งมากกว่า 1 ตำแหน่งได้ เอนไซม์มีชื่อเรียกตามสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยา โดยลงท้ายเสียงเป็น -ส เช่นซูเครส ไลเปส

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ มีดังนี้

1. อุณหภูมิ โดยส่วนใหญ่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นการทำงานจะดีขึ้น
2. ค่า pH หาก pH ไม่เหมาะสมการทำงานจะลดลง



รูปที่ 14.9 หน้าทีของเอนไซม์คล้ายกับตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ที่มา Santi Kulprathipanja, 2006



รูปที่14.10 ขั้นตอนการทำงานของเอนไซม์ ที่มา Santi Kulprathipanja, 2006

**กรดนิวคลีอิก (Nucleic acid)** คือสารโมเลกุลใหญ่คล้ายโปรตีน โมเลกุลของกรดนิวคลีอิกประกอบด้วยธาตุคาร์บอน, ไฮโดรเจน, ออกซิเจน, ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส กรดนิวคลีอิกในร่างกายสามารถสร้างได้จากกรดอะมิโนและคาร์โบไฮเดรตมีหน้าที่ในการเก็บและถ่ายทอดข้อมูลทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตและควบคุมการสังเคราะห์โปรตีน เพื่อไปทำหน้าที่ต่าง ๆ ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต กรดนิวคลีอิก 2 ชนิด คือกรดดีออกซีไรโบนิวคลีอิก (DNA) และกรดไรโบนิวคลีอิก (RNA) เป็นพอลิเมอร์ที่มีมอนอเมอร์ชื่อนิวคลีโอไทด์ โดยนิวคลีโอไทด์ 1 โมเลกุลประกอบด้วยส่วนย่อย 3 ส่วน ดังนี้

1. หมู่ฟอสเฟต
2. น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่มี C 5 อะตอม หรือเรียกว่าน้ำตาลเพนโตส ซึ่งมี 2 ชนิด

คือ น้ำตาลไรโบสกับน้ำตาลดีออกซีไรโบส

3. เบสที่มีไนโตรเจนในโมเลกุลซึ่งเบสที่พบในนิวคลีโอไทด์มีโครงสร้างแตกต่างกัน 5 ชนิด ได้แก่ อะดีนีน (A), กวานีน (G), ไซโตซีน (C), ไทมีน (T) และยูราซิล (U) นิวคลีโอไทด์หลายโมเลกุลรวมกันจะได้พอลิเมอร์ของนิวคลีโอไทด์ ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยน้ำตาลเพนโทสของนิวคลีโอไทด์โมเลกุลหนึ่งกับหมู่ฟอสเฟตของนิวคลีโอไทด์อีกโมเลกุลหนึ่ง ในโมเลกุลของ DNA สายพอลิเมอร์จะเป็นเกลียวคู่แต่ในโมเลกุลของ RNA จะเป็นสายเดี่ยว ใน DNA ประกอบด้วยสายพอลิเมอร์นิวคลีโอไทด์ 2 สายเชื่อมต่อกันด้วยคู่เบสที่เหมาะสมด้วยพันธะไฮโดรเจน

**คาร์โบไฮเดรต** เป็นสารชีวโมเลกุลประกอบด้วยธาตุ C, H และ O ทำหน้าที่เป็นสารสะสมพลังงาน ถ้าแบ่งโครงสร้างของคาร์โบไฮเดรต ตามจำนวนหน่วยย่อยที่เป็นองค์ประกอบแบ่งได้ 3 กลุ่ม ดังนี้

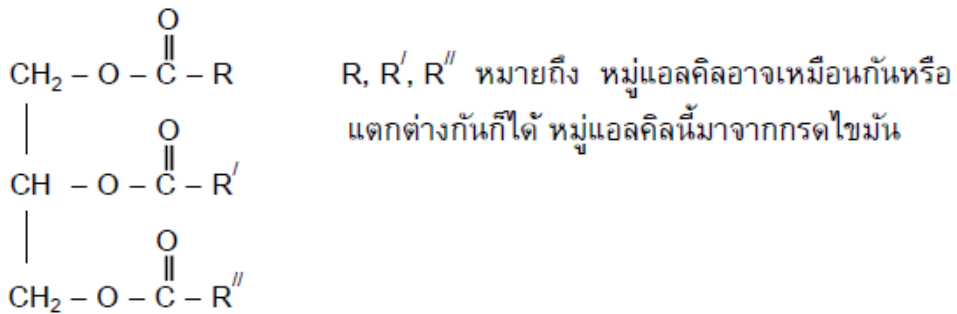
1. มอนอแซ็กคาไรด์ประกอบด้วย C 3-8 อะตอมที่พบมากได้แก่ เพนโทสและเฮกโซส
2. ไดแซ็กคาไรด์เกิดจากการรวมตัวของมอนอแซ็กคาไรด์ 2 โมเลกุล ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก ไดแซ็กคาไรด์ที่สำคัญ ได้แก่ ซูโครส มอลโทส และแลคโทส
3. พอลิแซ็กคาไรด์ เกิดจากมอนอแซ็กคาไรด์หลาย ๆ โมเลกุลเชื่อมต่อกัน พอลิแซ็กคาไรด์ที่สำคัญ ได้แก่ แป้ง เซลลูโลส และไกลโคเจน

**สำลี** คือ เซลลูโลสชนิดหนึ่งประกอบด้วยกลูโคสที่ต่อกันเป็นแบบโซ่ตรง

**เซลลูโลส** เป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่งทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของพืช หน่วยย่อยของเซลลูโลส คือ กลูโคส

**ไกลโคเจน** เป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในเซลล์ของสัตว์ประกอบด้วยกลูโคสที่ต่อกันคล้ายอะไมโลเพกตินของแป้งแต่มีมวลโมเลกุลและมีโซ่กิ่งมากกว่า พบมากในตับและในกล้ามเนื้อ

**ลิปิด** เป็นสารชีวโมเลกุลที่ประกอบด้วยธาตุหลัก 3 ชนิด คือ C, H และ O นอกจากนั้นอาจประกอบด้วยธาตุ N และ P ลิปิดที่มีสถานะเป็นของแข็ง เช่น ไขมัน ส่วนลิปิดที่มีสถานะเป็นของเหลว เช่น น้ำมัน ทั้งไขมันและน้ำมันเป็นสารประกอบประเภทเอสเทอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลกับกรดไขมัน โดยกลีเซอรอล 1 โมเลกุลจะรวมตัวกับกรดคาร์บอกซิลิกสายยาวหรือกรดไขมันจำนวน 3 โมเลกุล ไขมันส่วนใหญ่เป็นไตรเอสเทอร์ของกลีเซอรอลหรือไตรกลีเซอไรด์หรือเรียกว่าไตรเอซิลกลีเซอรอล สูตรทั่วไปของไขมันหรือน้ำมันเขียนได้ดังนี้



รูปที่ 14.11 โครงสร้างของลิปิดหรือไขมัน ที่มา กฤษณา ชูติมา, 2551

กรดไขมันที่อยู่ในไขมันหรือน้ำมันจะมีทั้งกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัวและเป็นไฮโดรคาร์บอนโซ่ยาวที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ (12 - 24 อะตอม) โครงสร้างส่วนใหญ่จะเป็นโซ่ตรง การพิจารณาไขมันและน้ำมันว่าเป็นประเภทอิ่มตัวหรือไม่อิ่มตัวให้พิจารณาที่ชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ ถ้าเป็นน้ำมันจากพืชมักมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวแต่ถ้าเป็นไขมันจากสัตว์มักมีกรดไขมันอิ่มตัว โดยทั่วไปกรดไขมันอิ่มตัวจะมีจุดหลอมเหลวสูงกว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัวและจุดหลอมเหลวจะเพิ่มตาม

จำนวนคาร์บอนอะตอมที่เพิ่มขึ้น ส่วนกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเท่ากัน แต่มีพันธะคู่ต่างกัน ยิ่งมีพันธะคู่เพิ่มมากขึ้นเท่าไรจุดหลอมเหลวยิ่งลดลง การพิจารณาสถานะของไขมันหรือน้ำมันให้พิจารณาที่กรดไขมัน ถ้ามีกรดไขมันอิ่มตัวเป็นองค์ประกอบมากจะทำให้มีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ถ้ามีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบมากจะมีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง

ในการปรุงอาหารควรเลือกน้ำมันให้เหมาะสมกับการประกอบอาหาร ถ้าใช้ปรุงอาหารที่ต้องให้ความร้อนนาน ๆ เช่น การทอด ควรเลือกใช้น้ำมันแบบอิ่มตัวเพราะกรดไขมันอิ่มตัวจะเกิดปฏิกิริยากับสารอื่นได้ยาก ส่วนการปรุงอาหารที่ให้ความร้อนในเวลาสั้น ๆ เช่น การผัดควรเลือกใช้น้ำมันแบบไม่อิ่มตัว การนำน้ำมันประเภทไม่อิ่มตัวไปใช้ปรุงอาหารที่ต้องให้ความร้อนนาน ๆ เช่น การทอดจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระได้มากซึ่งจะก่อให้เกิดอันตรายแก่ร่างกายได้เพราะพันธะคู่ในกรดไขมันไม่อิ่มตัวจะเกิดปฏิกิริยากับสารอื่นได้ง่าย ดังนั้นจึงไม่ควรนำน้ำมันที่ใช้แล้วกลับมาใช้อีกซ้ำหลาย ๆ ครั้ง การบริโภคไขมันที่มีกรดไขมันอิ่มตัวมาก ๆ จะทำให้เกิดผลเสียต่อร่างกายคือ อาจทำให้หลอดเลือดอุดตัน

### การเหม็นหืนเกิดได้ 2 กรณี ดังนี้

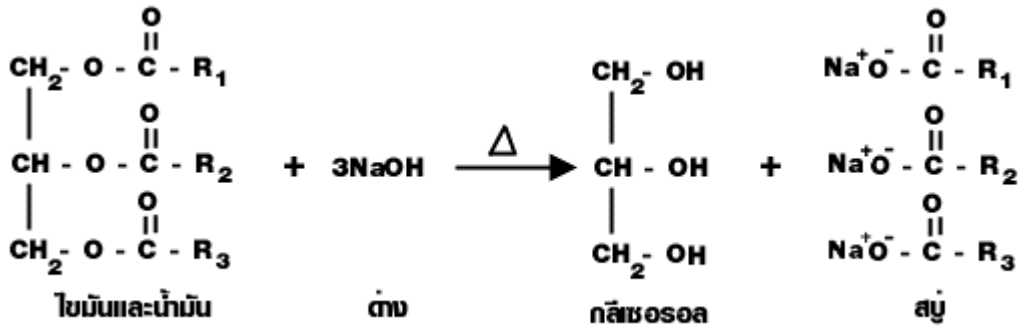
1. การเหม็นหืนในน้ำมันเกิดจากก๊าซออกซิเจนในอากาศเข้าไปทำปฏิกิริยาที่บริเวณตำแหน่งพันธะคู่ระหว่างอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุลของกรดไขมันเกิดเป็นสารเปอร์ออกไซด์และสลายตัวได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประเภทแอลดีไฮด์และกรดไขมันโมเลกุลเล็ก ๆ ซึ่งมีกลิ่นเหม็นหืน
2. การเหม็นหืนของไขมันหรือน้ำมันเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสระหว่างไขมันกับน้ำ ปฏิกิริยานี้มีเอนไซม์จากจุลินทรีย์ในอากาศเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้

### การป้องกันการเหม็นหืนของไขมันหรือน้ำมันทำได้ดังนี้



1. เก็บไขมันหรือน้ำมันในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำและปิดภาชนะให้สนิท ไม่ให้ถูกแสง ไม่ให้สัมผัสกับก๊าซออกซิเจนและไอน้ำในอากาศ เป็นการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส
2. เติมสารเคมีบางชนิดลงไป เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันส่วนใหญ่จะเติม BHA (Butylated Hydroxy Anisole), BHT (Butylated Hydroxy Toluene) หรือเติมสารป้องกันการเหม็นหืนที่มีอยู่ตามธรรมชาติอย่างเช่น วิตามินอี วิตามินซี วิตามินเอ เป็นต้น ไขมันหรือน้ำมันเป็นโมเลกุลไม่มีขั้วจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์แต่ไม่ละลายในน้ำ

### 14.4 ผงซักฟอกและสบู่

ปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (Saponification) เป็นปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสไขมันหรือน้ำมันด้วยเบสเช่น NaOH ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสบู่หรือเกลือโซเดียมของกรดไขมัน และกลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้ การแยกกลีเซอรอลออกจากสบู่ทำได้โดยการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ลงไปวิธีนี้เรียกว่า Salting out ในการเตรียมสบู่จะเติมแอลกอฮอล์ลงไปเพื่อให้น้ำมันกับ NaOH ผสมกันได้ดี



รูปที่ 14.12 ปฏิกิริยาการสะปอนนิฟิเคชัน (Saponification) ที่มา กฤษณา ชูติมา, 2551

สบู่ หรือ เกลือโซเดียมของกรดไขมัน มีสูตรทั่วไปว่า  $\text{R} - \overset{\text{O}}{\parallel} \text{C} - \text{ONa}$  แต่เนื่องจาก R หรือหมู่แอลคิลมักเป็นโซ่ยาวจึงเขียนสัญลักษณ์ได้ว่า   $\text{CO}^- \text{Na}^+$  สบู่มีทั้งส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้ว ส่วนที่มีขั้วคือด้านโซเดียมคาร์บอกซิเลต ( $-\text{COO}^- \text{Na}^+$ ) และส่วนที่ไม่มีขั้วคือ R หรือ  ดังนั้นสบู่จึงละลายได้ทั้งในน้ำโดยหันส่วนที่มีขั้ว ( $-\text{COO}^-$ ) เข้าหาน้ำและทำความสะอาดไขมันหรือสิ่งสกปรกโดยใช้ส่วนที่เป็น R หันเข้าล้อมรอบไขมัน ทำให้ไขมันหรือสิ่งสกปรกหลุดออกมาและแพร่กระจายอยู่ในน้ำในรูปของอิมัลชัน

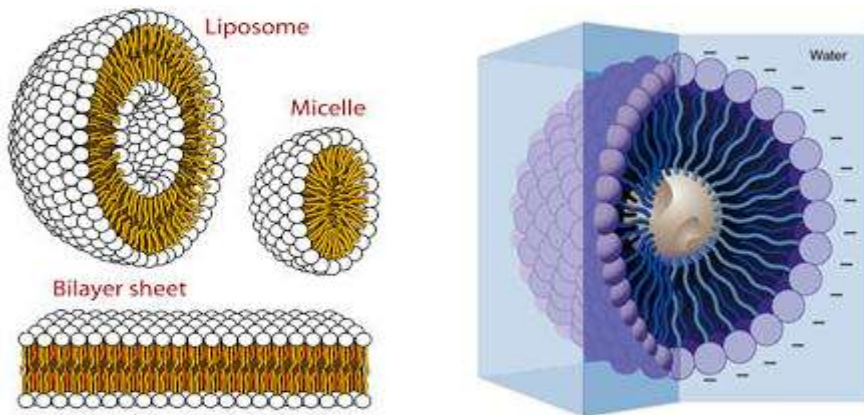
น้ำที่ใช้ในแต่ละแหล่งจะมีส่วนประกอบไม่เหมือนกัน น้ำที่มีไอออนของแคลเซียมและแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบเรียกว่า น้ำกระด้าง การใช้สบู่กับน้ำกระด้างจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดลดลง เพราะจะเกิดฝ้าอยู่บนผิวน้ำซึ่งเรียกว่า ไคลสบู่ การเกิดฝ้าหรือไคลสบู่เกิดจากแคลเซียมไอออนหรือแมกนีเซียมไอออนรวมตัวกับไอออนลบของสบู่เกิดเป็นเกลือแคลเซียมหรือแมกนีเซียมของกรดไขมันซึ่งไม่ละลายน้ำเรียกว่าไคลสบู่ดังรูป 14.13



รูปที่ 14.13 ปฏิกิริยาการเกิดไคลสบู่ ที่มา กฤษณา ชูติมา, 2551

สารซักฟอกเป็นสารที่ผลิตขึ้นมาเพื่อใช้ทำความสะอาดแทนสบู่ โมเลกุลจึงมีทั้งส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้วเมื่อสบู่หรือสารซักฟอกละลายน้ำจะแตกเป็นไอออน ไอออนบวกของโลหะจะถูกน้ำล้อมรอบเกิด

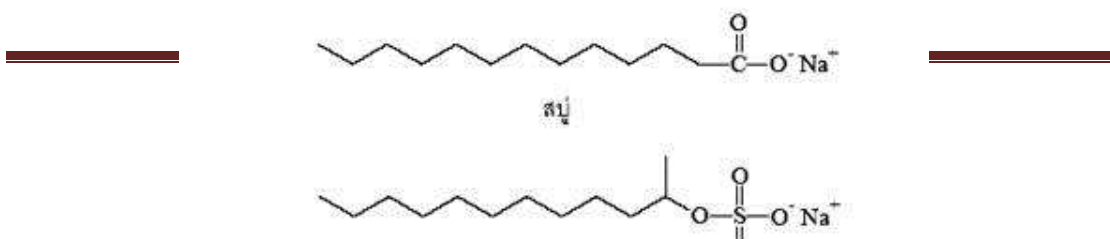
แรงดึงดูดระหว่างไอออนกับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่วนไอออนลบของสบู่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นคาร์บอกซิเลต (-COO-) เป็นส่วนที่มีขั้ว จะยึดกับน้ำโดยมีโมเลกุลน้ำล้อมรอบและส่วนที่ไม่มีขั้วเป็นกลุ่มไฮโดรคาร์บอนจะหันเข้าหากัน แล้วจับกันเป็นกลุ่มก้อนเรียกว่าไมเซลล์ (Micell) ดังรูปที่ 14.14 แต่สารซักฟอกเป็นเกลือโซเดียมซัลโฟเนตของสารไฮโดรคาร์บอน ส่วนมีขั้วจึงเป็นโซเดียมซัลโฟเนต ซึ่งละลายน้ำได้และส่วนที่ไม่มีขั้วคือไฮโดรคาร์บอนซึ่งมีทั้งแบบโซ่ตรงโซ่กิ่งและวงแหวนละลายได้ในน้ำมัน สารซักฟอกจะไม่เกิดตะกอนกับไอออนของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่อยู่ในน้ำกระด้างทำให้ไม่เกิดโคลสบู่เนื่องจากสารซักฟอกมีโครงสร้างหลายแบบโดยแตกต่างกันที่สารไฮโดรคาร์บอนถ้าเป็นสารซักฟอกที่มีไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรงจะถูกละลายได้อย่างสมบูรณ์โดยจุลินทรีย์ในน้ำ ถ้าในน้ำมีปริมาณออกซิเจนเพียงพอไฮโดรคาร์บอนแบบโซ่ตรงจะก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด แต่ถ้าเป็นสารซักฟอกที่มีวงแหวนอยู่ในโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนของจุลินทรีย์ก็ยังคงย่อยสลายได้บ้างแต่ไม่ดีนักทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ หากเป็นสารซักฟอกที่มีโซ่กิ่งจะย่อยสลายไม่ได้ ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมมากที่สุด



รูปที่ 14.14 โครงสร้างของไมเซลล์ในสบู่ ที่มา Nanotechnology the Manufacturing of 21st Century

**ชนิดของสารซักฟอก**

สารซักฟอกสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ สบู่ ผงซักฟอก และแอลบีเอส ดังรูปที่ 14.15



รูปที่ 14.15 โครงสร้างและองค์ประกอบของสารซักฟอก ที่มา กฤษณา ชูติมา, 2551

สารซักฟอก มีส่วนประกอบดังนี้

1. สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) คือ สารที่ทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวของน้ำ จึงช่วยทำให้สิ่งสกปรกละลายน้ำได้มากขึ้น จำแนกตามหมู่ฟังก์ชันที่มีผลต่อการลดแรงตึงผิวได้ 3 กลุ่ม

1.1 ไอออนลบ ส่วนใหญ่มาจากสารต่อไปนี้

1.1.1 เกลือโซเดียมซัลโฟเนตของเอสเทอร์ที่มาจากกรดอินทรีย์ (RCOOSO<sub>3</sub>Na)

1.1.2 เกลือโซเดียมของเอไมด์จากกรดอินทรีย์ (RCONSO<sub>3</sub>Na)

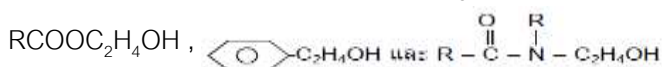
1.1.3 เกลือโซเดียมซัลโฟเนตของแอลกอฮอล์ (ROSO<sub>3</sub>Na)

1.1.4 เกลือโซเดียมซัลโฟเนตของแอลคิลเบนซิน (RCOOSO<sub>3</sub>Na)

**หมายเหตุ** กรดอินทรีย์จะมีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 16 – 18 อะตอม

1.2 ไอออนบวก ส่วนใหญ่เป็นเกลือของเบสที่มีสูตรทั่วไปดังนี้ R<sub>4</sub>NCl

1.3 สารที่ไม่แตกตัวเป็นไอออน ส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ของเอทิลีนออกไซด์ชนิดต่าง ๆ เช่น





สารเหล่านี้จะแตกตัวหรือไม่แตกตัวเมื่อละลายน้ำ โดยหมู่ที่แสดงหมู่ฟังก์ชันเป็นไอออนชนิดต่าง ๆ มักจะเป็นสารจำพวกเกลือ สารลดแรงตึงผิวจะมีอยู่ในสารซักฟอกประมาณ 12-30%

2. สารประกอบฟอสเฟต (Phosphate) เป็นสารที่ช่วยทำให้สารละลายเป็นเบสทำให้สารซักฟอกมีประสิทธิภาพในการซักล้างดีขึ้นและยึดสิ่งสกปรกไม่ให้กลับไปติดเนื้อผ้า ช่วยลดความกระด้างในน้ำ ตัวอย่างสารประกอบฟอสเฟต เช่น เกลือ Tetrasodium phosphate, Sodiumtripoly phosphate สารเหล่านี้มีในสารซักฟอกประมาณ 30-50%

3. สารประกอบซิลิเกต (Silicate) เป็นสารที่ใส่เพื่อป้องกันสนิม เช่น Sodium silicate มีประมาณ 5-10%

4. โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium Carboxymethyl Cellulose) เป็นสารที่ใส่เพื่อป้องกันการตกตะกอนของสารซักฟอกควรเติมประมาณ 0.5-1.0% เพื่อให้ละลายน้ำได้ดีขึ้น

5. สารเพิ่มความสดใส (Optical Brightening Agents) เป็นสารที่ดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ต แล้วปล่อยแสงบางช่วงคลื่นออกมาทำให้ผ้าดูสดใส เช่น ผงฟอกนวล

6. สารช่วยเพิ่มฟอง

7. สารฟอกขาว

8. เอนไซม์ที่ช่วยย่อยโปรตีนและคราบเลือด

9. สารที่ช่วยลดความกระด้างของน้ำ เช่น โซเดียมคาร์บอเนต หรือโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต

10. สารเพิ่มปริมาณสารซักฟอก เช่น โซเดียมซัลเฟต สารนี้ใส่เพื่อลดต้นทุนการผลิตให้ถูกลง

สารซักฟอกมี 2 ชนิด ดังนี้

1. สารซักฟอกชนิดอ่อน (Soft detergent) มีสารลดแรงตึงผิวเป็นหมู่แอลคิลที่มีโครงสร้างเป็นโซ่ตรง เรียกว่า LAS (Linear Alkylbenzene Sulfonate) ถูกย่อยสลายได้ง่าย ปัจจุบันประเทศไทยผลิตสารซักฟอกชนิดนี้มาก

2. สารซักฟอกชนิดกระด้าง (Hard detergent) มีสารลดแรงตึงผิวเป็นหมู่แอลคิลที่มีโครงสร้างเป็นโซ่กิ่ง เรียกว่า ABS (Alkylbenzene Sulfonate) ถูกย่อยสลายยากทำให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำและมลพิษในดิน

## คำถามท้ายบท

1. วิธีป้องกันการเหม็นหืนของไขมันหรือน้ำมันทำได้อย่างไร
2. สารซักฟอกมีกี่ชนิด อะไรบ้าง
3. จงอธิบายประโยชน์ของนาโนเมมเบรน (Nanomembrane)

4. จงอธิบายหลักการทำงานของนาโนบอลแบดเดอรี
5. หน้าที่ของสารลดแรงตึงผิวสำหรับการผลิตสารซักฟอกคืออะไร

## เอกสารอ้างอิง

1. กฤษณา ชูติมา, 2551, หลักเคมีทั่วไปเล่ม 2
2. หน่วยสร้างเสริมศักยภาพทางนาโนศาสตร์, 2547, “นาโนเทคโนโลยี วิทยาการที่เส้นขอบฟ้า,” <http://nanotech.sc.mahidol.ac.th/> สืบค้นวันที่ 25 ตุลาคม 2547
3. Ammerlaan, J., McCurdy, R.J. and Hurst, S.J. (2000). Process for the production of photocatalytic coatings on substrates, World patent 00/75087.
4. Ashby, M.F., and D.R.H. Jones, 1996, Engineering Materials I, 2<sup>nd</sup> ed.
5. Bai, X., More, K., Rouleau, C. M., & Rabiei, A., 2010, Functionally graded hydroxyapatite coatings doped with antibacterial components, Acta Biomaterialia, 6 (6), 2264-2273.
6. Beer, P.D., Gale, P. A., & Smith, D. K., 1999, *Supramolecular Chemistry*. New York: Oxford University Press.

7. Blossey, R., Self-cleaning surfaces-virtual realities, *Nature materials*, 2, 2003, 301-306.
8. Bondy, C.R., & Loeb, S.J., 2003, Amide based receptors for anions, *Coord. Chem. Rev.*, 240, 77-99.
9. Boukany, P. E., Morss, A., Liao, W.-c., Henslee, B., Jung, H., Zhang, X., et al., 2011, Nanochannel electroporation delivers precise amounts of biomolecules into living cells. *Nature Nanotechnology*, 6, 747-754.
10. Callister, W.D., 2007, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, John Wiley & Sons, 806 p.
11. Cavin, R. (2008, November 4), *Semiconductor Roadmap and Bioelectronics*. Retrieved October 25, 2011, from *Bioelectronics Roundtable*: [www.src.org/calendar/e003426/cavin.pdf](http://www.src.org/calendar/e003426/cavin.pdf)
12. Courtney, T.H., 2000, *Mechanical Behaviour of Materials*, 434 p.
13. Cram, D.J., 1986, Preorganization-From solvents to spherands, *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.* 25, 1039-57.
14. Darhuber, A., Trojan, S.M. and Miler, S., Morphology of liquid microstructure on chemically patterned surfaces. *Journal of Applied Physics*, 87, 2000, 7768-7775.
15. Diederich, F., 1991, *Cyclophanes*. Cambridge: The Royal Society of Chemistry.
16. Dietrich, B., 1996, "Cryptands" in *Comprehensive Supramolecular Chemistry*, Gokel, G. W. (Ed.), pp 153-211. Oxford: Elsevier.
17. Dresselhaus, M.S., G. Dresselhaus, K. Sugihara, I.L. Spain, and H.A. Goldberg, 1988, *Graphite Fibers and Filaments*, Heidelberg: Springer-Verlag.
18. Dumitriu, P., et al., 2003, Effect of calixarenes on thermal stability of polyethylenes, *Polym. Degrad. Stab.*, 80, 203-208
19. *Engineering Materials Handbook, Vol.1, Composites*, ASM International, Materials Park, OH, 1987.
20. Fagerholm, P., Lagali, N. S., Merrett, K., Jackson, W. B., Munger, R., Liu, Y., et al., 2010, A Biosynthetic Alternative to Human Donor Tissue for Inducing Corneal Regeneration: 24-Month Follow-Up of a Phase 1 Clinical Study, *Science Translational Medicine*, 2 (46), 46ra61.

21. Fisher, J. P., A.G. Mikos, and J.D. Bronzino, 2007, *Tissue Engineering*, CRC Press, New York, 33-19 p.
22. Flahaut, E., Laurent, Ch., and Peigney, H., Catalytic CVD Synthesis of Double and Triple-Walled Carbon Nanotubes by the Control of the Catalyst Preparation, *Carbon* 34, 2005, 375-383.
23. Fozdar, D. Y., Soman, P., Lee, J. W., Han, L.-H., & Chen, S., 2011, Three-Dimensional Polymer Constructs Exhibiting a Tunable Negative Poisson's Ratio, *Advanced Functional Materials*, 21 (14), 2712–2720.
24. Gale, P. A., 2001, Anion receptor chemistry: highlights from 1999, *Coord. Chem. Rev.* 213, 79-128.
25. Gauthier, M. A., Zhang, Z., & Zhu, X. X., 2009, New Dental Composites Containing Multimethacrylate Derivatives of Bile Acids: A Comparative Study with Commercial Monomers, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 1 (4), 824–832.
26. Goldstein, A.N., 1997, *Handbook of Nanophase Materials*, Marcel Dekker, Inc., 369 p.
27. Groot, K.de, 1988, *Ann.New York, Acad. Sci.*, 523:227.
28. Gutsche, C.D., 1989, "Calixarenes"-Monographs in Supramolecular Chemistry, J. F. Stoddart (Ed.). Cambridge: The Royal Society of Chemistry.
29. Helander, M. G., Wang, Z. B., Qiu, J., Greiner, M. T., Puzzo, D. P., Liu, Z. W., et al., 2011, Chlorinated Indium Tin Oxide Electrodes with High Work Function for Organic Device Compatibility, *Science*, 332 (6032), 944-947.
30. Henrik B., 2003, *Introduction to Nanotechnology*, Mikroelektronik Centret Technical University of Denmark.
31. Herminghaus, S., Liquid microstructures at solid interfaces, *Journal of Physics*, A11, 1999, 57-74.
32. Herminghaus, S., Roughness-induced nonwetting. *Europhysics Letters*, 52, 2000, 165-170.
33. Hiroyuki Fujita, Hiroshi Toshiyoshi, Gen Hashigushi, and Yasuo Wada, *Micromachined Tools for Nano Technology*, RIKEN Review, No.36, 2001.

34. Huang, Z.-M., Zhang, Y.-Z., Kotaki, M. and Ramakrishna, S., A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Compos. Sci. Technol.*, 63, 2003, 2223-2253.
35. Jisen, W., Jinkai, Y., Jinquan, S. and Ying, B., Synthesis of Copper Oxide Nanomaterials and the Growth Mechanism of Copper Oxide Nanorods, *Materials and Design*. 25, 2004, 625-629.
36. Kaewtong, C., Fuangswasdi, S., Muang-sin, N., Chaichit, N., Vicens, J., & Pulpoka, B., 2006, Novel C<sub>3v</sub>-symmetrical N7-Hexahomotriazacalix [3] cryptand: a highly efficient receptor for halide anions, *Org. Lett.*, 8, 1561-4.
37. Kasap, S.O., 2002, Principles of electronic materials and devices, The McGraw-Hill companies 2nd, 745 p.
38. Kavallieratos, K., Bertao, C.M., & Crab-tree, R.H., 1999, Hydrogen bonding in anion recognition: A family of versatile, nonpreorganized neutral and acyclic receptors, *J. Org. Chem.*, 64, 1675-83.
39. Kear, B.H., and P.R. Strutt, Chemical-Processing and Applications for Nanostructured Materials, *Nanostructured Materials*, 6/1-4, 1995, 227-236.
40. Kellar Autumn, Yiching A. Liang, S. Tonia Hsieh, Wolfgang Zesch, Wai Pang Chan, Thomas W. Kenny, Ronald Fearing and Robert, Adhesive force of a single gecko foot-hair, *Nature* 405, 2000, June 8, 681-684.
41. Kopeliovich, D. (n.d.). *General classification of ceramics*. Retrieved 12 1, 2010, from SubsTech Substances & Technologies: [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=general\\_classification\\_of\\_ceramics](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=general_classification_of_ceramics)
42. Kroschwitz, J.I. and Mark, H.F., 1989, Encyclopedia of polymer science and engineering, 2<sup>nd</sup> ed., 889 p.
43. Lehn, J.-M., 1995, Supramolecular Chemistry: Concepts and Perspective. Weinheim: VCH publisher.
44. Liu, X., Jin, X., & Ma, P. X. (2011). Nanofibrous hollow microspheres self-assembled from starshaped polymers as injectable cell carriers for knee repair. *Nature Materials*, 10, 398-406.

45. Lucent Technologies: [http://www.sciencentral.com/articles/iew.php3?type=article&article\\_id=218392734](http://www.sciencentral.com/articles/iew.php3?type=article&article_id=218392734)
46. Ma, M. and Hill, R.M., Superhydrophobic surfaces, Current Opinion in Colloid & Interface Science, 11, 2006, 193-202.
47. Mahoney, J.M., Beatty, A.M., & Smith, B.D., 2001, Selective Recognition of an Alkali Halide Contact Ion-Pair, J. Am. Chem. Soc., 123, 5847–5848.
48. Marko U., 2002, Introduction to Nanotechnology–Soft Lithography, University of Ljubljana.
49. McCOLM, I. J., and N.J. CLARK, 1988, Forming, Shaping and Working of HIGH-PERFORMANCE CERAMICS, Chapman and Hall, New York, 345.
50. Metzger, A., & Anslyn, E.V., 1998, A chemosensor for citrate in beverages, Angew. Chem. Int. Ed., 37, 649-652.
51. Moon, J. J., Suh, H., Bershteyn, A., Stephan, M. T., Liu, H., Huang, B., et al., 2011, Interbilayercrosslinked multilamellar vesicles as synthetic vaccines for potent humoral and cellular immune responses, Nature Materials, 10 (3), 243–251.
52. Musikant, S., 1990, What Every Engineer Shouldknow About CERAMICS, TransCon Technologies, Inc., Paoli, Pennsylvania, USA, 203 p.
53. Musikant S., et al., 1985, NASA Report No. CR-174907, January.
54. Nanotechnology: <http://www.wildirisdesign.com/nano/>
55. Nanotechnology the Manufacturing of 21st Century: <http://www.engin.swarthmore.edu/~manzivino/Nanotechnology1.htm>
56. Nuchnapa Tangboriboon, Sujitra Wongkasemjit, Ruksapong, Kunanuruksapong, Anuvat Sirivat, An Innovative Synthesis of Calcium Zeolite Type A Catalysts from Eggshells via the Sol-Gel Process, J. Inorg. Organomet. Polym. Mat., 21/1, 2011, 50-60.
57. Nuchnapa Tangboriboon, Tunchanoke Khongnakhon, Supawinee Kittikul, Ruksapong, Kunanuruksapong, Anuvat Sirivat, An innovative CaSiO<sub>3</sub> dielectric material from eggshells by sol-gel process, Sol-Gel Sci. Technol., 58/1, 2011, 33-41.

58. O'Sullivan, T., Munro, E. A., Natesh, P., Conca, C., Gambhir, S. S., Harris, J. S., et al., 2010, Implantable semiconductor biosensor for continuous in vivo sensing of far-red fluorescent molecules, *Optics Express*, 18 (12), 12513-12525.
59. Ottenbrite, R., 1996, *Polymeric Drugs and Drug Administration*, ACS Symposium Series No. 545, 1994.
60. Ozaki, Y., 1988, *Preparation and Application of Fine Powder from the Metal Alkoxide*, Seikei University, 165-183.
61. Park, H. and Park, K., 1996, Biocompatibility issues of implantable drug delivery systems. *Comprehensive Biotechnology*, 13, 1770–1776.
62. Park, K.-I., Xu, S., Liu, Y., Hwang, G.-T., Kang, S.-J. L., Wang, Z. L., et al., 2010, Piezoelectric BaTiO<sub>3</sub> Thin Film Nanogenerator on Plastic Substrates, *Nano Letters*, 10 (12), 4939–4943.
63. Pester, C. W., Ruppel, M., Schoberth, H. G., Schmidt, K., Czubak, T., Mays, J., et al., 2011, Piezoelectric Properties of Non-Polar Block Copolymers, *Advanced Materials*, 23 (35), 4047–4052.
64. Phadke, A., Zhang, C., Hwang, Y., Vecchio, K., & Varghese, S., 2010, Templated Mineralization of Synthetic Hydrogels for Bone-Like Composite Materials: Role of Matrix Hydrophobicity, *Biomacromolecules*, 11 (8), 2060-2068.
65. Pirmoradi, F. N., Jackson, J. K., Burtb, H. M., & Chiao, M. (2011). On-demand controlled release of docetaxel from a battery-less MEMS drug delivery device, *Lab Chip*, 11 (16), 2744-2752.
66. Poon, Z., Chang, D., Zhao, X., & Trafton, A., 2011, Layer-by-Layer Nanoparticles with a pH Sheddable Layer for In Vivo Targeting of Tumor Hypoxia, *ACS Nano*, 5 (6), 4284–4292.
67. Ratner, B.D., Schoen, F.J., Lemons, J.E., and Hoffman, A.S., 1996, *Biomaterials Science (An Introduction to Materials in Medicine)*, Academic Press, USA, 484 p.
68. Read, W.T. Jr., 1953, *Dislocation in Crystals*, McGraw-Hill Book Company, New York.
69. Reed, J. S., 1989, *Principles of Ceramic Processing*, John Wiley & Sons, 486 p.

70. Richard P. Feynman, 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.
71. Robertson, J. 2004, Realistic Applications of CNTs, Materials Today, October, 46-52.
72. Roh, Y. H., Lee, J. B., Kiatwuthinon, P., Hartman, M. R., Cha, J. J., Um, S. H., et al. 2011, DNAsomes: Multifunctional DNA-Based Nanocarriers, Small, 7 (1), 74-78.
73. Ruan, G., & Winter, J. O., Alternating-Color Quantum Dot Nanocomposites for Particle Tracking. Nano Letters, 11 (3), 2011, 941-945.
74. Rutledge, G.-C., and Fridrikh, S.-V., Formation of fibers by electrospinning. Adv. Drug Delivery Reviews, 59, 2007, 1384-1391.
75. Saito, S., 1988, Advanced Ceramics, Oxford University Press, 278 p.
76. Santi Kulprathipanja, Petrochemical Industrial: Catalysis and Separation, 2003, เอกสารประกอบการสอน, Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University
77. Sarkara, D., Ankruma, J. A., Teoa, G. S., Carmand, C. V., & Karp, J. M., 2011, Cellular and extracellular programming of cell fate through engineered intracrine-, paracrine-, and endocrine-like mechanisms. Biomaterials, 32 (11), 3053-3061.
78. Seemann, R., Monch, W. and Herminghaus, S., Liquid flow in wetting layers on rough substrates, Europhysics Letters, 55, 2001, 698-704.
79. Sessler, J.L., Camiolo, S., & Gale, P. A., 2003, Pyrrolic and polypyrrolic anion binding agents, Coord. Chem. Rev., 240, 17-55.
80. Scheerder, J., Van Duynhoven, J. P. M., Engbersen, J. F. J., & Reinhoudt, D. N., 1996, Solubilization of NaX salts in chloroform by bifunctional receptors, Angew. Chem. Int. Ed., 35, 1090-1093.
81. Schwartz, M., 2006, New Materials Processes, and Methods Technology, CRC, Taylor & Francis, 686 p.
82. Shackelford, J.F., 1985, Introduction to Materials Science for Engineers, 3rd ed., MacMillan, New York, 793 p.
83. Sparks, J. R., He, R., Healy, N., Krishnamurthi, M., Peacock, A. C., Sazio, P. J., et al., 2011, Zinc Selenide Optical Fibers, Advanced Materials, 23 (14), 1647-1651.



- 
84. Steed, J.W., & Atwood, J.L., 2000, Supramolecular chemistry. England: John Wiley & Sons Ltd, Chic.
  85. Swain, M.V., and Hannink, R.J.H., R-curve behavior in zirconia ceramics, in *Advanced Ceramics*, 12, 1984, 225-239.
  86. Tadanaga, K., Katata, N. and Minami, T., Formation process of super-water-repellant Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating films with high transparency by the sol-gel method, *Journal of the American Ceramic Society*, 80, 1997, 3213-3229.
  87. Tjong, S.C., and Chen, H., Nanocrystalline Materials and Coatings, *Materials Science and Engineering*. R45, 2004, 1-88.
  88. Toh, W. S., Spector, M., Lee, E. H., & Cao, T., 2011, Biomaterial-Mediated Delivery of Microenvironmental Cues for Repair and Regeneration of Articular Cartilage, *Molecular Pharmaceutics*, 8 (4), 994-1001.
  89. Ueyama, T., and H. Wada, 1988, Alumina Ceramic Substrates, in *Advanced Ceramics*, Hitachi Chemical Co., Ltd., 184-200.
  90. Upadhyaya, G.S., 2000, Sintered Metallic and Ceramic Materials, John Wiley & Sons, LTD., USA, 670 p.
  91. [URL:http://www.euroscan.co.th/th/main/content.php?page=products&category=37&id=139](http://www.euroscan.co.th/th/main/content.php?page=products&category=37&id=139)
  92. [URL:http://www.mtec.or.th/index.php?option=com\\_content&task=view&id=1078&Itemid=177](http://www.mtec.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=1078&Itemid=177)
  93. Vendra, L., & Rabiei, A., 2010, Evaluation of modulus of elasticity of composite metal foams by experimental and numerical techniques, *Materials Science and Engineering: A*, 527 (7-8), 1784-1790.
  94. Vicens, J., & Bohmer, V., 1991, *Calixarenes-A Versatile Class of Macrocyclic Compounds*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
  95. Vollath, D., 2008, *Nanomaterials: An Introduction to Synthesis, Properties and Applications*, September, Germany: John Wiley & Sons, Inc.
  96. Walker, G. (2008, November 4), *Bioelectronics: Overview, Opportunities, and Challenges*. Retrieved October 25, 2011, from Bioelectronics Roundtable: [www.src.org/calendar/e003426/walker.pdf](http://www.src.org/calendar/e003426/walker.pdf)
-

97. Williams, D.F., 1982, Review: Biodegradation of surgical polymers, J. Mat.Sci., 17, 1233-1246.
98. Wu, W., & Wang, Z. L., 2011, Piezotronic Nanowire-Based Resistive Switches As Programmable Electromechanical Memories, Nano Letters, 11 (7), 2779–2785.
99. Yuh, J., Perez, L.W., Sigmund, M.J. and Nino, C., Sol-gel based synthesis of complex oxide nanofibers. J. Sol-Gel Sci. Technol., 42, 2007, 323-329.
100. Zhenga, Y., Hendersonb, P. W., Choia, N. W., Bonassarc, L. J., & Spector, J. A., 2011, Microstructured templates for directed growth and vascularization of soft tissue in vivo, Biomaterials, 32 (23), 5391-5401.

### ภาคผนวก 1 ค่าคงตัวทางฟิสิกส์

Quantity	Symbol	SI Units	cgs Units
Avogadro's number	$N_A$	$6.023 \times 10^{23}$ molecules/mol	$6.023 \times 10^{23}$ molecules/mol
Boltzmann's constant	K	$1.38 \times 10^{-23}$ J/atom-K	$1.38 \times 10^{-16}$ erg/atom-K $8.62 \times 10^{-5}$ eV/atom-K
Bohr magneton	$\mu_B$	$9.27 \times 10^{-24}$ A-in <sup>2</sup>	$9.27 \times 10^{-21}$ erg/gauss <sup>a</sup>
Electron charge	E	$1.602 \times 10^{-19}$ c	$4.8 \times 10^{-10}$ statcoul <sup>b</sup>
Electron mass	—	$9.11 \times 10^{-31}$ kg	$9.11 \times 10^{-28}$ g
Gas constant	R	8.31 J/mol-K	1.987 cal/mol-K
Permeability of a vacuum	$\mu_0$	$1.257 \times 10^{-6}$ henry/m	unity <sup>a</sup>
Permittivity of a vacuum	$\epsilon_0$	$8.85 \times 10^{-12}$ farad/m	unity <sup>b</sup>
Planck's constant	H	$6.63 \times 10^{-34}$ J-s	$6.63 \times 10^{-27}$ erg-s $4.13 \times 10^{-15}$ eV-s
Velocity of light in a vacuum	C	$3 \times 10^8$ m/s	$3 \times 10^{10}$ cm/s

<sup>a</sup> In cgs-emu units. <sup>b</sup> In cgs-esu units.

**หน่วยอนุพันธ์**

A = Ampere	in. = Inch	N = Newton
Å = Angstrom	J = Joule	Nm = Nanometer
Btu = British thermal unit	K = degrees Kelvin	P = Poise
C = Coulomb	Kg = Kilogram	Pa = Pascal
°C = degrees Celsius	lb <sub>f</sub> = pound force	S = Second
cal = calorie (gram)	lb <sub>m</sub> = pound mass	T = Temperature
cm = Centimeter	M = Meter	µm = micrometer(micron)
eV = electron volt	Mg = Megagram	W = Watt
°F = degrees Fahrenheit	Mm = Millimeter	Psi = pounds per square inch
ft = Foot	Mol = Mole	
G = Gram	MPa = Megapascal	

SI Multiple and Submultiple Prefixes

Factor by Which Multiplied	Prefix	Symbol
10 <sup>9</sup>	giga	G
10 <sup>6</sup>	mega	M
10 <sup>3</sup>	kilo	k
10 <sup>-2</sup>	centi <sup>a</sup>	c
10 <sup>-3</sup>	milli	m
10 <sup>-6</sup>	micro	µ
10 <sup>-9</sup>	nano	n
10 <sup>-12</sup>	pico	p

<sup>a</sup> Avoided when possible.

**ภาคผนวก 2**

Material Element	Symbol	Composition Atomic Number	Atomic Weight (amu)	Density Solid, 20°C (g/cm <sup>3</sup> )	Material Structure, 20°C	Atomic Radius (nm)	Composition Most Common Valence	Density Point (°C)
Albite		NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>		2.61	Microcline		Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	2.58
Aluminum nitride		AlN		2.80	Montmorillonite		(Al <sub>1-x</sub> Na <sub>x</sub> ) <sub>2</sub> Mg <sub>3</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )(OH) <sub>2</sub>	2.50
Anorthite		CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>		2.77	Mullite		Al <sub>6</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>13</sub>	3.23
Andalusite		Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>		3.15	Muscovite		Al <sub>2</sub> K(Si <sub>1.5</sub> Al <sub>0.5</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>	2.90
Anorthoclase		KNaAl <sub>2</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>16</sub>		2.58	Orthoclase		KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	2.55
Barium ferrite		BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub>		5.31	Periclase		MgO	3.58
Barium titanate		BaTiO <sub>3</sub>		6.01	Pyrite		FeS <sub>2</sub>	5.02
Beryllium oxide		BeO		3.00	Pyrophyllite		Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>	2.80
Boron carbide		B <sub>4</sub> C		2.50	Quartz		SiO <sub>2</sub>	2.65
Calcite		CaCO <sub>3</sub>		2.71	Rutile		TiO <sub>2</sub>	4.26
Cordierite (beta)		Mg <sub>2</sub> Al <sub>4</sub> Si <sub>5</sub> O <sub>18</sub>		2.60	Silica, vitreous		SiO <sub>2</sub>	2.20
Corundum		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		3.98	Silicon carbide		SiC	3.21
Forsterite		Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>		3.22	Silicon nitride		Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3.10
Galena		PbS		7.50	Sillimanite		Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>	3.23
Graphite		C		2.25	Spinel		MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	3.60
Halloysite		Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O		2.62	Spodumene (beta)		Li <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>12</sub>	2.35
Hematite		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		5.25	Spodumene (alpha)		Li <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>12</sub>	3.20
Ilmenite		FeTiO <sub>3</sub>		4.70	Talc		Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	2.75
Kaolinite		Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>		2.61	Titania		TiO <sub>2</sub>	4.26
Kyanite		Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>		3.60	Tungsten carbide		WC	15.7
Lime		CaO		3.30	Zinc oxide		ZnO	5.68
Manesite		MgCO <sub>3</sub>		2.96	Zircon		SiZrO <sub>4</sub>	4.70
					Zirconia, stabilized		ZrO <sub>2</sub> (8% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	6.00

### ภาคผนวก 3 โครงสร้างและสมบัติของธาตุบางชนิด

Element	Symbol	Atomic Number	Atomic Weight (amu)	Density of Solid, 20°C (g/cm <sup>3</sup> )	Crystal Structure, 20°C	Atomic Radius (nm)	Ionic Radius (nm)	Most Common Valence	Melting Point (°C)
Aluminum	Al	13	26.98	2.71	FCC	0.143	0.053	3+	660.4
Argon	Ar	18	39.95	—	—	—	—	Inert	-189.2
Barium	Ba	56	137.33	3.5	BCC	0.217	0.136	2+	725
Boron	B	5	10.81	2.34	Rhom.	0.191	0.023	3+	2300
Bromine	Br	35	79.90	—	—	—	0.196	1-	-7.2
Cadmium	Cd	48	112.41	8.65	HCP	0.149	0.095	2+	321
Calcium	Ca	20	40.08	1.55	FCC	0.197	0.100	2+	839
Carbon	C	6	12.011	2.25	Hex.	0.071	~0.016	4+	sublimes at 3367 K
Cesium	Cs	55	132.91	1.87	BCC	0.265	0.170	1+	28.4
Chlorine	Cl	17	35.45	—	—	—	0.181	1-	-101
Chromium	Cr	24	52.00	-7.19	BCC	0.125	0.063	3+	1875
Cobalt	Co	27	58.93	8.9	HCP	0.125	0.072	2+	1495
Copper	Cu	29	63.55	8.94	FCC	0.128	0.096	1+	1085
Fluorine	F	9	19.00	—	—	—	0.133	1-	-220
Gallium	Ga	31	69.72	5.90	Ortho.	0.122	0.062	3+	29.8
Germanium	Ge	32	72.64	5.32	Dia.	0.122	0.053	4+	937
Gold	Au	79	196.97	19.32	FCC	0.144	0.137	1+	1064
Helium	He	2	4.003	—	—	—	—	Inert	-272 at 26 atm
Hydrogen	H	1	1.008	—	—	—	0.154	1+	-259
Iodine	I	53	126.91	4.93	Ortho.	0.136	0.220	1-	114
Iron	Fe	26	55.85	7.87	BCC	0.124	0.077	2+	1538
Lead	Pb	82	207.2	11.35	FCC	0.175	0.120	2+	327
Lithium	Li	3	6.94	0.534	BCC	0.152	0.068	1+	181
Magnesium	Mg	12	24.31	1.74	HCP	0.160	0.072	2+	649
Manganese	Mn	25	54.94	7.44	Cubic	0.112	0.067	2+	1244
Mercury	Hg	80	200.59	—	—	—	0.110	2+	-38.8
Molybdenum	Mo	42	95.94	10.22	BCC	0.136	0.070	4+	2617
Neon	Ne	10	20.18	—	—	—	—	Inert	-248.7
Nickel	Ni	28	58.69	8.90	FCC	0.125	0.069	2+	1455
Niobium	Nb	41	92.91	8.57	BCC	0.143	0.069	5+	2468
Nitrogen	N	7	14.007	—	—	—	0.01-0.02	5+	-209.9
Oxygen	O	8	16.00	—	—	—	0.140	2-	-218.4

โครงสร้างและสมบัติของธาตุบางชนิด (ต่อ)

Phosphorus	P	15	30.97	1.82	Orthorhombic	0.109	0.035	5+	44.1
Platinum	Pt	78	195.08	21.45	FCC	0.139	0.080	2+	1772
Potassium	K	19	39.10	0.862	BCC	0.231	0.138	1+	63
Silicon	Si	14	28.09	2.33	Dia. cubic	0.118	0.040	4+	1410
Silver	Ag	47	107.87	10.49	FCC	0.144	0.126	1+	962
Sodium	Na	11	22.99	0.971	BCC	0.186	0.102	1+	98
Sulfur	S	16	32.06	2.07	Orthorhombic	0.106	0.184	2-	113
Tin	Sn	50	118.71	7.27	Tetrahedral	0.151	0.071	4+	232
Titanium	Ti	22	47.87	4.51	HCP	0.145	0.068	4+	1668
Tungsten	W	74	183.84	19.3	BCC	0.137	0.070	4+	3410
Vanadium	V	23	50.94	6.1	BCC	0.132	0.059	5+	1890
Zinc	Zn	30	65.41	7.13	HCP	0.133	0.074	2+	420
Zirconium	Zr	40	91.22	6.51	HCP	0.159	0.079	4+	1852

#### ภาคผนวก 4 สัญลักษณ์และคำย่อที่สำคัญ

$V_C$  ปริมาตรต่อยูนิตเซลล์ (volume per unit cell,  $\text{cm}^3/\text{unit cell}$ )

$N_A$  เลขอาโวกาโดร (Avogadro's number  $6.023 \times 10^{23}$  atoms/mol)

CVD Chemical vapor deposition

PVD Physical vapor deposition

---

HCP	Hexagonal close-packed
PZT	Lead zirconate titanate
$\Phi, \theta, \alpha, \beta, \gamma$	Angle
CNT	Carbon nanotube
APF	Atomic packing factor
IPF	Ionic packing factor
b	Burgur vector
1D	One dimension
3D	Three dimensions
CMC	Nanoceramic matrix composite
PMC	Nanopolymer matrix composite
MMC	Nanometal matrix composite
SWCNT	Single-walled Carbon Nanotubes
MNCNT	Multi-walled Carbon Nanotubes
EBL	Electron beam lithography
LPCVD	Low Pressure Chemical Vapor Deposition
SEM	Scanning electron microscope
$\gamma_{SL}, \gamma_{SV}, \gamma_{LV}$	พลังงานพื้นผิวร่วม (Interfacial energy) ระหว่างของแข็ง-ของเหลว, ของแข็ง-อากาศ และของเหลว-อากาศ ตามลำดับ
STM	Scanning tunneling microscope
NEMS	Nanoelectromechanical systems
AFM	Atomic Force Microscopy
TEM	Transmission electron microscope
LEDs	Light Emitting Diodes
SDOF	Single Degree-of-Freedom
$E_c(u)$	ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงสุดของวัสดุโนนคอมพอสิต
$E_c(l)$	ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นต่ำสุดของวัสดุโนนคอมพอสิต
$E_m$	ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของเฟสพื้น
$E_p$	ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของอนุภาค

---

---

$V_m$	สัดส่วนโดยปริมาตรของเฟสพื้น
$V_p$	สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาค
K	ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity)
$\sigma$	ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity)
BHA	Butylated Hydroxy Anisole
BHT	Butylated Hydroxy Toluene
LAS	Linear Alkylbenzene Sulfonate
ABS	Alkylbenzene Sulfonate