บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เคมีสีเขียว

เคมีสีเขียวได้กำเนิดขึ้นในปี พ.ศ. 2534 ในโครงการพิเศษที่จัดทำขึ้นโดยหน่วยงานปกป้องรักษาสิ่งแวดล้อม ประเทศสหรัฐอเมริกา (US Environmental Protection Agency, EPA)

Anastasและ Warner เสนอแนวคิดของเคมีสีเขียว 12 ข้อ ดังนี้ [1]

1. ป้องกันการเกิดของเสีย (Prevent waste) การป้องกันการเกิดของเสียเป็นวิธีที่ดีกว่าการปล่อยให้ของเสียเกิดขึ้นแล้วต้องมีการบำบัดและกำจัดของเสียนั้น

2. ใช้ทุกอะตอมอย่างคุ้มค่า (Atom Economy) ควรจะออกแบบวิธีการสังเคราะห์สารเคมีให้ทุกสารที่ใช้ในกระบวนการมีส่วนร่วมมากที่สุดไปสู่ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการซึ่งสามารถหาประสิทธิภาพการมีส่วนร่วมของอะตอมได้จากสมการดังนี้

$$\% \text{ atom economy} = \frac{\text{มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นทั้งหมด}}{\text{มวลโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ}} \times 100$$

3. กระบวนการสังเคราะห์ที่อันตรายน้อยกว่า (Less Hazardous Synthesis) ไม่ว่าจะเป็นการปฏิบัติในที่ใดก็ตาม ควรมีการออกแบบวิธีการสังเคราะห์ให้ใช้และทำให้เกิดสารที่มีความเป็นพิษน้อยหรือไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

4. ผลิตภัณฑ์ที่ปลอดภัยกว่า (Safer Chemicals) ควรออกแบบผลิตภัณฑ์เคมีให้คงไว้ซึ่งสมรรถภาพการทำงานในขณะที่ความเป็นพิษลดลง

5. ตัวทำละลายและสารช่วยที่ปลอดภัยกว่า (Safer Solvents and Auxiliaries) ในทุกครั้งที่เป็นไปได้ควรจะไม่จำเป็นต้องมีการใช้สารช่วย (เช่น ตัวทำละลายรีเอเจนต์ช่วยในการแยก เป็นต้น) แต่ถ้าจำเป็นต้องใช้ควรจะเป็นสารที่ไม่เป็นอันตราย

6. ความมีประสิทธิภาพของพลังงาน (Energy Efficiency) ความต้องการใช้พลังงานควรจะต้องตระหนักเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมและผลกระทบด้านเศรษฐศาสตร์ และควรจะลดการใช้พลังงานกระบวนการสังเคราะห์สารควรจะจัดการที่สภาวะอุณหภูมิและความดันปกติ

7. สารตั้งต้นที่เกิดใหม่ทดแทนได้เร็ว (Renewable Feedstocks) ไม่ว่าจะปฏิบัติในที่ใดก็ตามในแง่เศรษฐศาสตร์และด้านเทคนิค

8. ลดสารอนุพันธ์ (Reduce Derivatives) เมื่อใดก็ตามที่เป็นไปได้ ควรหลีกเลี่ยงการทำอนุพันธ์ที่ไม่จำเป็น (กลุ่มกีดขวาง การป้องกัน/การเลิกป้องกัน และการดัดแปลงชั่วคราว) ด้วยกระบวนการทางเคมีหรือฟิสิกส์)

9. การเร่งปฏิกิริยา (Catalysis) ตัวเร่งปฏิกิริยา (จำเพาะที่สุดเท่าที่เป็นไปได้) เป็นสิ่งที่ช่วยให้ผลดีกว่าการใช้รีเอเจนต์ตามปริมาณสัมพันธ์เท่านั้น

10. ออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ (Design for Degradation) ควรจะออกแบบผลิตภัณฑ์เคมีเพื่อให้ไม่มีการตกค้างในสิ่งแวดล้อมเมื่อหมดอายุการใช้งานแล้ว และเสื่อมผุพังเป็นผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายแล้วไม่เป็นพิษ

11. ตรวจวิเคราะห์ติดตามผลตลอดเวลาเพื่อเฝ้าระวังการเกิดมลภาวะ (Real-time analysis for Pollution Prevention) จำเป็นต้องพัฒนาวิธีวิเคราะห์เพิ่มเข้ามาเพื่อให้มีการติดตามกระบวนการแบบทันทีตลอดเวลาและกำกับดูแลก่อนที่จะมีสารซึ่งเป็นอันตรายเกิดขึ้น

12. ระวังความปลอดภัยทางเคมีเป็นปกติวิสัยเพื่อป้องกันการเกิดอุบัติเหตุ (Inherently Safer Chemistry for Accident Prevention) ควรจะเลือกสารและสถานะของสารที่ใช้ในกระบวนการเคมีให้เหมาะสม ทั้งนี้เพื่อลดอุบัติเหตุทางเคมีที่อาจเกิดขึ้นอันได้แก่ การรั่วไหล การระเบิด และไฟไหม้

แนวคิดของเคมีสีเขียวตามหลักการพื้นฐาน 12 ข้อนี้ มุ่งเพื่อออกแบบกระบวนการผลิตทางเคมีให้มีประสิทธิภาพ ใช้วัตถุดิบ สารเคมี รีเอเจนต์ ตัวทำละลาย สารช่วย และพลังงานอย่างคุ้มค่า เพื่อให้เกิดประสิทธิผลสูงสุด ปกป้องรักษาสุขภาพของมนุษย์และมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมให้มากที่สุด

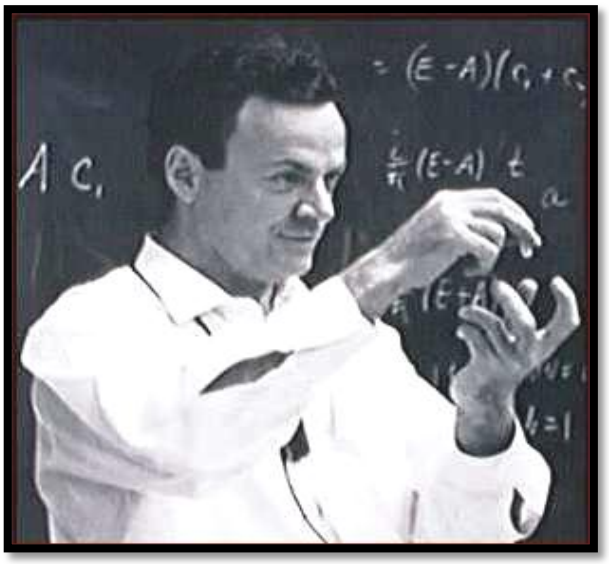
2.2 ประวัติศาสตร์นาโนและนาโนเทคโนโลยี

2.2.1 ประวัติศาสตร์นาโน

นาโนและนาโนเทคโนโลยี ได้มีนักวิทยาศาสตร์หลายท่านได้ทำการศึกษาไว้ ซึ่งได้แก่ อัลเบิร์ต ไอน์สไตล์, ศาสตราจารย์ริชาร์ด ฟายน์แมน, เกิร์ด บินนิง, เฮนริชโรห์เรอ, ศาสตราจารย์ฮาโรลด์โครโต้, ริชาร์ดสมอลลี่, โรเบิร์ตเคิร์ล และซูมิโอะ ลิจิมะ เป็นต้น [8]

ในปี พ.ศ.2448 อัลเบิร์ต ไอน์สไตล์ (Albert Einstein) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการหาขนาดโมเลกุลของน้ำตาลสมัยที่ยังศึกษาอยู่ในระดับปริญญาเอก จากผลการศึกษาพบว่า แต่ละโมเลกุลของน้ำตาลมีขนาดเล็กมากในระดับนาโน หลังจากนั้นเขาก็ได้ตีพิมพ์ผลงานเรื่องการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลน้ำตาล มีขนาดประมาณ 1 นาโนเมตร ซึ่งนับได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นหนึ่งของการค้นพบโครงสร้างระดับนาโน

ในปี พ.ศ.2502 ศาสตราจารย์ริชาร์ด ฟายน์แมน (Richard Feynman) นักฟิสิกส์แห่งสถาบันเทคโนโลยีแคลิฟอร์เนีย ได้ชื่อว่าเป็นบิดาแห่งนาโนเทคโนโลยี (รูปที่ 2.1) โดยเขาได้กล่าวว่า "ที่ความเล็กระดับนาโนเมตร เราจะค้นพบแรงชนิดใหม่ๆ ปรากฏการณ์ใหม่ๆ และความเป็นไปได้รูปแบบใหม่ๆ" ในการปาฐกถาเรื่อง “ยังมีทางขยับขยายอีกมากในระดับจุลภาค (There’s plenty of room at the bottom)” ซึ่งบรรยายเกี่ยวกับการกระตุ้นแรงบันดาลใจเกี่ยวกับการทำนายความเป็นไปได้ และขีดความสามารถของเทคโนโลยีระดับนาโน ซึ่งเป็นสิ่งที่นักวิทยาศาสตร์ทุกคนควรจะตระหนักสนใจอย่างจริงจัง และให้ความสำคัญเกี่ยวกับเทคโนโลยีนี้ให้มากขึ้น



รูปที่ 2.1 ศาสตราจารย์ริชาร์ด ฟายน์แมน (Richard Feynman) บิดาแห่งนาโนเทคโนโลยี [8]

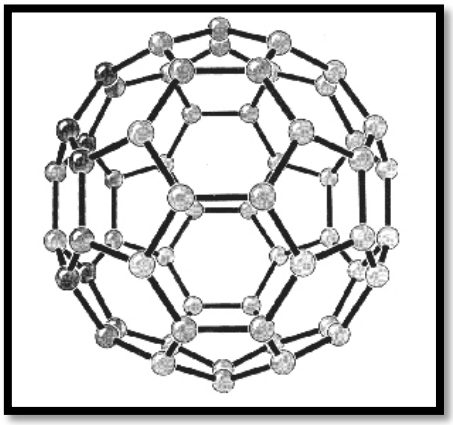
จากคำพูดของศาสตราจารย์ริชาร์ด ฟายน์แมน (Richard Feynman) ทำให้เห็นว่าความสำคัญของนาโนศาสตร์ และนาโนเทคโนโลยีไม่ได้จำกัดแค่การที่เราสามารถสร้างสิ่งต่างๆ ที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร แต่ยังรวมถึงการที่เราสามารถนำสมบัติใหม่ๆ และปรากฏการณ์ใหม่ๆ ที่เกิดขึ้นเฉพาะในระดับนาโนเท่านั้น มาใช้ให้เป็นประโยชน์ได้อีกด้วย โดยปัจจัยสำคัญที่ทำให้วัสดุ อุปกรณ์ และระบบที่มีขนาดในระดับนาโน (1-100 นาโนเมตร) มีสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแม่เหล็ก สมบัติเชิงแสง สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงเคมีแตกต่างไปจากวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่กว่า

ในปี พ.ศ.2524 เกิร์ด บินนิง (Gerd Binning) และ เฮนริชโรห์เรอ (Heinrich Rohrer) นักวิจัยในห้องปฏิบัติการของบริษัทไอบีเอ็มได้ประดิษฐ์เครื่อง STM (Scanning Tunneling Microscope) ขึ้นจนสำเร็จ (รูปที่ 2.2) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้นักวิทยาศาสตร์สามารถที่จะเห็นภาพของโลกระดับนาโนเมตรได้เป็นผลสำเร็จ ไม่เพียงแต่สามารถมองเห็นอนุภาคระดับนาโนโมเลกุลขนาดเล็ก หรืออะตอมเดี่ยวได้เพียงเท่านั้น แต่ยังสามารถที่จะใช้ในการควบคุมจัดการกับอนุภาค

ระดับนาโน อะตอม หรือโมเลกุลขนาดเล็กได้อีกด้วย จากผลงานการประดิษฐ์เครื่องมือนี้ขึ้นมา ทำให้ทั้งสองได้รับรางวัลโนเบล ในปี พ.ศ.2529

รูปที่ 2.2 เกิร์ด บินนิง (Gerd Binning) และ เฮนริชโรห์เรอ (Heinrich Rohrer) ผู้ประดิษฐ์เครื่อง STM (Scanning Tunneling Microscope) [8]

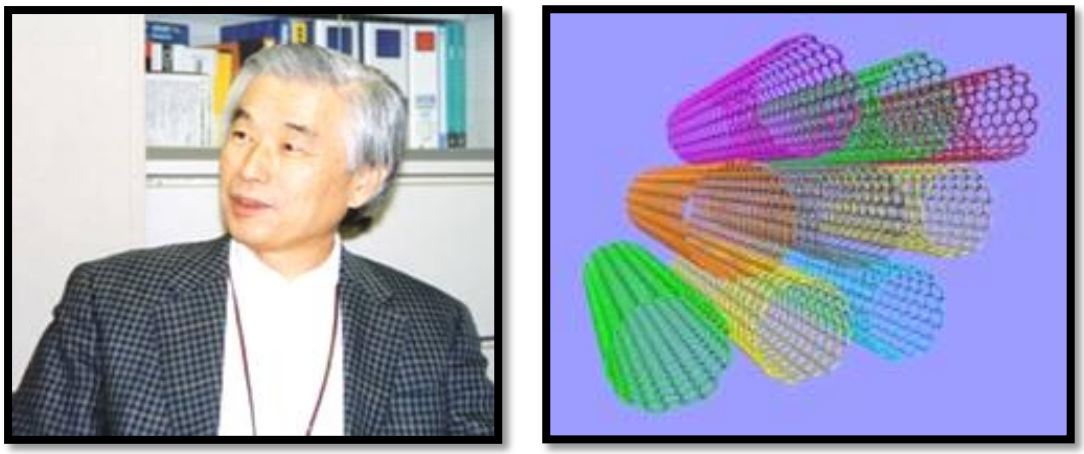
ในปี พ.ศ.2528ศาสตราจารย์ฮาโรลด์ โครโต้ (Harold Kroto) มหาวิทยาลัยซัสเซก (University of Sussex) ประเทศอังกฤษ ริชาร์ด สมอลลี่ (Richard Smalley) และ โรเบิร์ต เคิร์ล (Robert Curl) มหาวิทยาลัยไรซ์ (Rice University) ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ค้นพบโครงสร้างโมเลกุลของคาร์บอนแบบใหม่ นั่นคือ บัคมินสเตอร์ฟลูเลอรีน (buckminsterfullerene) หรืออีกชื่อหนึ่งที่เรียกกันว่า บัคกี้บอล (buckyball) (รูปที่ 2.3) ซึ่งเป็นโครงสร้างระดับนาโนเมตรของโมเลกุลคาร์บอนที่สร้างขึ้นมาจากอะตอมของคาร์บอนจำนวน 60 อะตอมเชื่อมต่อกัน และมีรูปร่างที่สมมาตรคล้ายกับลูกฟุตบอล โดยเป็นโครงสร้างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 1 นาโนเมตรเท่านั้น เนื่องจากการค้นพบนี้ทำให้พวกเขาได้รับรางวัลโนเบล สาขาเคมี ในปี ค.ศ. 2539



รูปที่ 2.3 buckminsterfullerene หรือ buckyball โครงสร้างมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นาโนเมตร [8]

ต่อมาในปี ค.ศ. 1991 ซูมิโอะ ลิจิมะ (Sumio Lijima) (รูปที่ 2.4) นักวิจัยของบริษัทเอ็นอีซี (NEC) ประเทศญี่ปุ่น ได้ค้นพบโครงร่างแบบใหม่ของคาร์บอนที่เป็นลักษณะท่อเล็กที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) ที่เกิดขึ้นมาจากแผ่นกราไฟต์ และหลังจากนั้นอีกสองปีลิจิมะก็ทำงานร่วมกันกับโดนัล เบททูน (Donald Bethune) ของบริษัทไอบีเอ็ม (IBM) ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ทำการสำรวจพบว่าโครงสร้างท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยวนั้น เป็นโครงสร้างมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 1-2 นาโนเมตรเท่านั้น

ท่อนาโนคาร์บอนสามารถแสดงพฤติกรรมได้เหมือนกับโลหะหรือสารกึ่งตัวนำ แต่สามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง สามารถถ่ายโอนความร้อนได้ดีกว่าเพชร และเป็นโครงสร้างวัสดุที่แข็งแรงที่สุดเท่าที่มนุษย์เคยรู้จักกันมา ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการนำท่อนาโนคาร์บอนมาประยุกต์ใช้ประโยชน์กันมากในด้านต่างๆ โดยเฉพาะคุณสมบัติพิเศษทางด้านไฟฟ้าและเชิงกล



รูปที่ 2.4 ซูมิโอะ ลิจิมะ(Sumio Lijima) (ซ้าย) และท่อนาโนคาร์บอน (ขวา) [8]

2.2.2 ความหมายของนาโน

“**นาโน**” (nano) เป็นคำที่มีรากศัพท์มาจากคำว่า nanos ในภาษากรีกโบราณที่แปลว่า แคระ (dwarf) ในปัจจุบันคำว่า นาโน ในทางวิทยาศาสตร์ใช้เป็น ตัวนำหน้าหน่วยหรือคำอุปสรรค (prefix) ซึ่งเป็นหน่วยความยาวใน ระบบ SI แปลความหมายได้ว่า 1/1,000 ล้าน (หนึ่งในพันล้าน) ดังนั้นถ้าเราพูดว่า 1 นาโนเมตรจึงมีขนาดเท่ากับ 1 ใน 1,000 ล้านส่วนของเมตร สามารถเขียนได้โดยแทนด้วยสัญลักษณ์ 1 nanometer (อักษรย่อคือ nm) = 1/1,000,000,000,000 m = 1×10^{-9}m [5]

2.2.3 ความหมายของนาโนเทคโนโลยี

“**นาโนเทคโนโลยี**” หมายถึงเทคโนโลยีประยุกต์ซึ่งเกี่ยวข้องกับการจัดการ การสร้าง การสังเคราะห์วัสดุหรืออุปกรณ์ในระดับของอะตอม โมเลกุลหรือชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กในช่วง

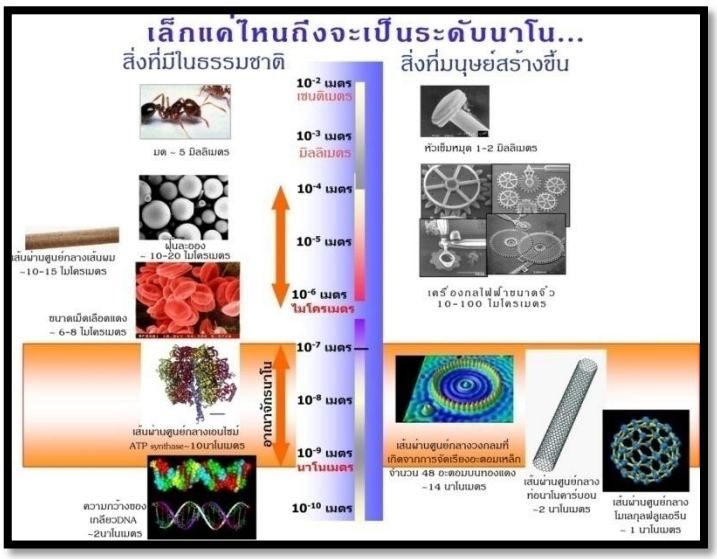
ประมาณ 1 ถึง 100 นาโนเมตร ซึ่งจะส่งผลให้วัสดุหรืออุปกรณ์ต่างๆ มีหน้าที่ใหม่ๆ และมีคุณสมบัติที่พิเศษขึ้นทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ ทำให้มีประโยชน์ต่อผู้ใช้สอยและเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจได้ [5]

นาโนเทคโนโลยีแบ่งได้ 3 ประเภทคือ [9]

1. นาโนเทคโนโลยีชีวภาพ (Nanobiotechnology) เป็นการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีด้านชีวภาพ เช่น การพัฒนานาโนไบโอเซนเซอร์ หรือ หัวตรวจวัดสารชีวภาพ และสารวินิจฉัยโรคโดยใช้วัสดุชีวโมเลกุล การปรับโครงสร้างระดับโมเลกุลของยาที่สามารถหวังผลการมุ่งทำลายชีวโมเลกุลที่เป็นเป้าหมายเฉพาะเจาะจง เช่น เซลล์มะเร็ง การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางในการส่งผ่านสารบำรุงเข้าชั้นใต้ผิวหนังได้ดียิ่งขึ้นเป็นต้น

2. นาโนอิเล็กทรอนิกส์ (Nanoelectronics) เป็นการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์ (ไฮเทค)เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพและทำงานด้วยประสิทธิภาพที่สูง เช่น การพัฒนาระบบไฟฟ้าเครื่องกลซุปเปอร์จิ๋ว การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ การพัฒนานาโนชิพ ทำให้คอมพิวเตอร์ทำงานได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูง เป็นต้น

3. วัสดุนาโน (Nanomaterials) การประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีด้านวัสดุนาโน เช่น การเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมการพัฒนาฟิล์มพลาสติกนาโนคอมโพสิตที่มีความสามารถในการสกัดกั้นการผ่านของก๊าซบางชนิดและไอน้ำ เพื่อใช้ทำบรรจุภัณฑ์เพื่อยืดอายุความสดของผักและผลไม้และเพิ่มมูลค่าการส่งออก การผลิตผลอนุภาคนาโนมาใช้ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ไวรัส หรือทำให้ไม่เปียกน้ำ เป็นต้น



รูปที่ 2.5 แสดงขนาดของวัตถุจากระดับ 10^{-2}– 10^{-10}เมตร [5]

2.2.4 คุณสมบัติของอนุภาคนาโน

การที่ขนาดของวัสดุมีขนาดเล็กลง จะส่งผลโดยตรงกับสัดส่วนของจำนวนอะตอมที่อยู่บริเวณผิวหน้า และผิวสัมผัสของวัสดุเพิ่มมากขึ้น โดยที่การเพิ่มขึ้นของจำนวนอะตอมที่บริเวณผิวสัมผัสของวัสดุ จะส่งผลให้วัสดุที่มีขนาดระดับนาโนมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติทางแสงแตกต่างไปจากวัสดุที่มีขนาดใหญ่อย่างสิ้นเชิง ทำให้ได้เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติด้านต่างๆ ที่แตกต่างไปจากเดิม [10] เช่น

1. คุณลักษณะเชิงแสง

โดยทั่วไปทองคำแบบก้อนจะมีสีเหลือง แต่ถ้าย่อหรือตัดให้ขนาดของทองคำเล็กลงไปจนมีขนาดอนุภาคในระดับนาโนเมตร จะส่งผลให้อนุภาคของทองคำนั้นมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นแสงที่มาตกกระทบมาก จึงเกิดปรากฏการณ์เชิงแสงที่เรียกว่า เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ (surface plasmon resonance) ซึ่งจะส่งผลให้อนุภาคนาโนของทองคำนั้นดูดกลืนสเปคตรัมของแสงที่อยู่ในช่วงสีเขียว (ความยาวคลื่นประมาณ 520 นาโนเมตร) ดังนั้นแล้วจึงทำให้อนุภาคนาโนของทองคำเห็นเป็นสีแดงทับทิม (แทนที่จะเป็นสีเหลืองเหมือนกับตอนที่เป็นก้อน)

รูปที่ 2.6 แสดงถ้วยโบราณที่มีผลึกนาโนทองคำเป็นส่วนประกอบ และเกิดปรากฏการณ์เชิงแสงที่เปลี่ยนไปจากเดิม [10]

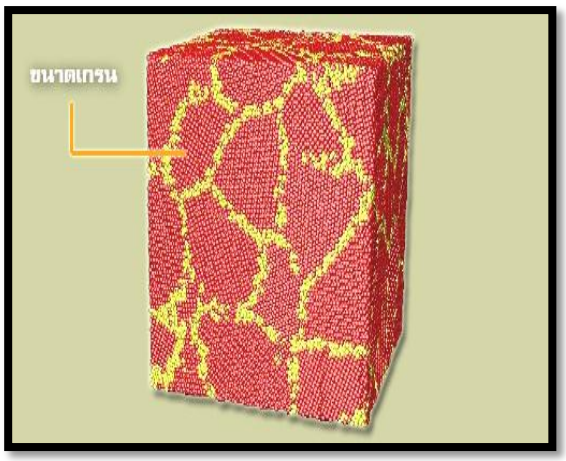
2. ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา

วัตถุที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรจะมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่กว่า เช่น อนุภาคนาโนของธาตุทองคำที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นาโนเมตร จะมีพื้นที่ผิวของอนุภาคสูงถึง 150 ตารางเมตรต่อกรัม [12] ด้วยเหตุนี้จึงทำให้วัตถุที่มีขนาดระดับนาโนจะมีจำนวนอะตอมที่อยู่บริเวณผิวหน้าสูงมาก ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวหน้าวัสดุได้ง่ายมากขึ้น และยังเอื้อต่อการเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ อันเนื่องมาจากความเร็วต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของบริเวณผิวหน้าของวัตถุ เช่น ธาตุทองคำที่ปกติจะเฉื่อยชาต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี แต่เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรแล้ว จะมีคุณสมบัติเปลี่ยนไปเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีที่ดีได้

รูปที่ 2.7 ภาพอนุภาคนาโนทองคำ (จุดสีดำ) ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวซิลิกอน (ภาพ A) ทำให้ซิลิกอนเกิดการเติบโตขึ้นมาเป็นเส้นลวดนาโนซิลิกอน (ภาพ B และ ภาพ C) [10]

3. ความแข็งแรงและความแข็ง

วัสดุประเภทโลหะและเซรามิกที่มีขนาดเกรน (grain size) ในระดับนาโนเมตร จะมีความแข็งแรงและความทนทานต่อการแตกหักสูงมากกว่าวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดเกรนในระดับไมโครเมตรหรือในระดับที่ใหญ่กว่า เช่นเดียวกันกับ โลหะที่มีโครงสร้างผลึกในระดับนาโนจะมีความแข็งแรงและความแข็งสูงกว่าโลหะที่มีขนาดผลึกใหญ่ และมีสมบัติในการต้านทานกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้นด้วย มีความจุความร้อนจำเพาะมากขึ้น และสามารถขยายตัวได้ดีมากขึ้นกว่าเดิม เช่น โลหะทองแดงที่มีขนาดเกรนในระดับนาโนเมตรจะมีความแข็งสูงกว่าทองแดงปกติถึง 5 เท่า หรือในอนุภาคระดับนาโนเมตรของอะลูมิเนียม ส่งผลให้โครงสร้างของอะลูมิเนียมมีความเหนียวและแข็งแรงมากขึ้นกว่าอะลูมิเนียมในขนาดปกติ



รูปที่ 2.8 แสดงการทดสอบในโลหะอะลูมิเนียม พบว่าขนาดเกรนของโลหะอะลูมิเนียมที่มีขนาดเล็กจะมีความแข็งแรงมากกว่าขนาดเกรนที่มีขนาดใหญ่กว่า [10]

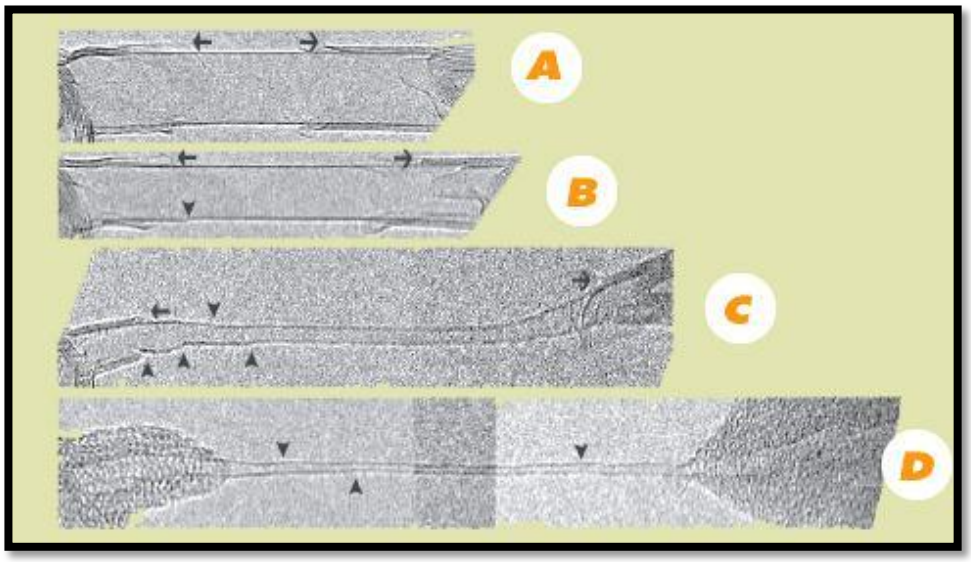
4. สมบัติทางไฟฟ้า

เมื่อโครงสร้างของวัตถุถูกทำให้เล็กจนอยู่ในระดับนาโน จะส่งผลให้คุณสมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้าของวัสดุนั้นแตกต่างออกไปจากที่เคยเป็นอยู่เดิม เช่น เมื่อวัตถุมีโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนแล้ว วงจรไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโครงสร้างนั้นไม่จำเป็นต้องเป็นไปตามกฎของโอห์ม (Ohm's law) ซึ่งกฎของโอห์มเกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้า (I) แรงเคลื่อนไฟฟ้าของต้นกำเนิดไฟฟ้า (V) และความต้านทานไฟฟ้า (R) แต่หัวใจสำคัญของกฎของโอห์มมีพื้นฐานมาจากแนวคิดที่ว่า อิเล็กตรอนไหลผ่านไปตามสายไฟฟ้าในลักษณะที่เป็นกระแส แต่ในโครงสร้างระดับนาโนนั้นอิเล็กตรอนไม่ได้เคลื่อนที่โดยไหลเป็นกระแสเช่นเดิม เพราะถ้าหากสายไฟฟ้ามีขนาดความกว้างอยู่ในระดับนาโนเมตรแล้วนั้น อิเล็กตรอนจะต้องไหลไปตามสายไฟฟ้าจากอะตอมหนึ่งไปอีกอะตอมหนึ่งในปริมาตรที่ถูกจำกัด ซึ่งจะต้องทำให้เกิดสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างออกไปจากเดิมอย่างแน่นอน

สมบัติในการเป็นตัวนำ เป็นสารกึ่งตัวนำ หรือเป็นฉนวน ของวัสดุที่ใช้เป็นโครงสร้างทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอะตอมที่อยู่ภายในวัสดุ และลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมเหล่านั้น โดยที่วัสดุระดับนาโนทุกประเภทจะมีมิติทางกายภาพ อย่างน้อยหนึ่งมิติที่ถูกจำกัดขนาดเอาไว้ จึงทำให้เป็นการบีบบังคับให้อิเล็กตรอน ในวัสดุนาโนสามารถเคลื่อนที่ได้ในปริมาตรที่จำกัดเท่านั้น จึงทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เป็นการจำกัดบริเวณของอิเล็กตรอนไว้ (quantum confinement) ปรากฏออกมาให้เห็นอย่างชัดเจน โดยที่ปรากฏการณ์ดังกล่าวไม่เคยเกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยมากในวัสดุขนาดปกติ

5. ความเป็นพลาสติก

สภาพพลาสติกพิเศษ (superplastics) จะเกิดขึ้นกับวัตถุที่มีขนาดเกรนในระดับนาโนเมตร โดยพบว่าอนุภาคระดับนาโนของวัตถุจะมีสภาพของการถูกยืด หรือทำให้ผิดรูปได้มากขึ้นกว่าเดิมอย่างมาก (ประมาณได้ว่าจาก 100 % ขยายไปจนถึง 1000 %) โดยวัตถุจะมีอุณหภูมิบริเวณพื้นผิวที่ลดต่ำลงมาก แต่จะมีอัตราความเครียดของวัตถุที่เพิ่มมากขึ้น จากการศึกษาพบว่าโครงสร้างของผลึกระดับนาโนจะสามารถมีสภาพเป็นพลาสติกพิเศษได้ เมื่ออยู่ในช่วงอุณหภูมิสูงประมาณ 400 – 500 องศาเซลเซียส เช่น ผลึกนาโนของนิกเกิล ผลึกนาโนของอะลูมิเนียมอัลลอยด์ เป็นต้น



รูปที่ 2.9 แสดงคุณสมบัติความเป็นพลาสติกพิเศษ (superplastic) ของท่อนาโนคาร์บอนภายใต้อุณหภูมิสูงๆ โดยที่มีความยาวเริ่มต้น 24 nm เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 nm (A) และสามารถมีความเครียดที่เพิ่มขึ้นได้ จนกระทั่งยืดยาวได้เรื่อยๆ จนถึง 91 nm เส้นผ่านศูนย์กลางลดลงเหลือ 0.8 nm (D) ซึ่งสามารถยืดขยายได้มากขึ้นถึง 280 % [10]

6. สภาพแม่เหล็ก

โดยทั่วไปสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุนั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวัสดุ และลักษณะการจับเรียงตัวของอะตอมของธาตุที่ประกอบกันขึ้นเป็นวัสดุ สารที่มีสภาพเป็นแม่เหล็กนั้นเป็นผลมาจากการสปินภายนอก [โมเมนตัมเชิงมุม (angular momentum) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่รอบนิวเคลียสของอิเล็กตรอน] และสปินภายในที่เกิดจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน โดยที่อิเล็กตรอนจะมีการสปินเป็นแบบ “ขึ้น” หรือ “ลง” เท่านั้น จึงทำให้อิเล็กตรอนมีสมบัติเป็นขั้วแม่เหล็กคู่ (magnetic dipole moment) ขนาดเล็ก โดยสารที่มีสภาพเป็นแม่เหล็กเกิดจากการที่อะตอมของสารมีจำนวนอิเล็กตรอนกลุ่มที่มีสปินขึ้นไม่เท่ากับพวกที่มีสปินลง ทำให้ค่าโมเมนตัมเชิงมุมหรือโมเมนต์แม่เหล็กมีค่าไม่เป็นเป็นศูนย์ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้เฉพาะ ในกรณีที่อะตอมมีจำนวนอิเล็กตรอนไม่เต็มชั้น

พลังงานย่อยเท่านั้น และเมื่อสสารและวัสดุต่างๆ มีขนาดโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนนั้น จะมีสมบัติทางแม่เหล็กแตกต่างออกไปจากวัสดุขนาดใหญ่ อันเป็นผลมาจากคุณสมบัติทางควอนตัมนั่นเอง

2.2.5 ผลิตภัณฑ์นาโนในปัจจุบัน

ปัจจุบันสินค้านาโนมีมากมาย [11] เช่น

1. แผ่นรองในรองเท้าเพื่อเพิ่มความอบอุ่นสำหรับทหารและนักกีฬาสกี ชื่อว่า Shock Doctor และ Aerogel Hotbed คือแผ่นรองที่ทำให้เท้าเย็นสบาย แผ่นรองดังกล่าวอาศัยเทคโนโลยีรูพรุนขนาดนาโนทำหน้าที่เป็นฉนวน จึงทำให้มีประสิทธิภาพดีกว่าวัสดุที่ใช้แบบเดิมถึง 20 เท่าตัว และบางเพียง 2.5 มิลลิเมตรเท่านั้น

2. ที่นอนซักได้ยี่ห้อ Healthsmartที่แผ่นผ้าปูด้านบนมีซิป สามารถถอดออกมาทำความสะอาด และผ้านั้นผลิตจากเส้นใยที่มีรูกลวงขนานนาโนสามารถขับไล่เหงื่อและความชื้นขณะที่เรานอนหลับ

3. ไม้กอล์ฟและลูกกอล์ฟนาโน โดยบริษัท Maruman ของญี่ปุ่น ได้ออกจำหน่ายหัวไม้ไดรเวอร์ที่ผสมลูกบอลคาร์บอนนาโน ทำให้ก้านมีความสามารถในการต้านแรงได้ มากกว่าแบบไทเทเนียมถึง 12% และแข็งกว่าประมาณ 3.6% และทำให้ตีไกลกว่าเดิม 15 หลา

4. ผลิตภัณฑ์บำรุงผิว Bionova ที่ผลิตมาเฉพาะเจาะจงสำหรับแต่ละบุคคล ให้เหมาะกับอายุ เชื้อชาติ ชนิดของผิว ของแต่ละคน

5. ผ้าปิดแผลนาโนซิลเวอร์ยี่ห้อ Ecotru ที่สามารถฆ่าเชื้อโรคและกันการติดเชื้ออย่างดีเยี่ยม

6. น้ำยาทำความสะอาดนาโนที่ผลิตจากบริษัทเดียวกับข้อ 5 ที่ใช้ฆ่าเชื้อโรคได้ทุกชนิด

7. สเปรย์กันน้ำนาโน มีการผสมอนุภาคนาโนพิเศษ สามารถใช้เคลือบพื้นผิวต่างๆ ช่วยทำให้น้ำไม่สามารถเกาะและง่ายในการทำความสะอาด

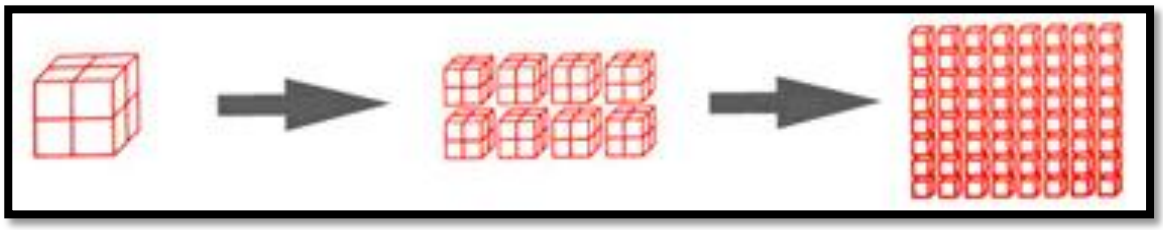
8. น้ำยาเคลือบกระจกรถยนต์ยี่ห้อ Clarity Defender ที่ช่วยป้องกันหิมะ น้ำฝนและแมลงให้เกาะติดกับกระจกช่วยเพิ่มวิสัยทัศน์ในการขับขี่ได้ถึง 34%

9. ครีมแก้ปวดเมื่อกล้ามเนื้อ ยี่ห้อ Flex-Power ที่ใช้ไลโปโซมขนาด 80 นาโนเมตร บรรจุตัวยาให้สามารถซึมเข้าสู่ผิวหนังเร็วขึ้น

10. กาวติดฟัน ที่ผลิตโดยบริษัท 3M ที่มีส่วนผสมของอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน ช่วยทำให้ติดได้แข็งแรงมากขึ้นและไม่เกาะตัวเป็นก้อนเวลาใช้งาน

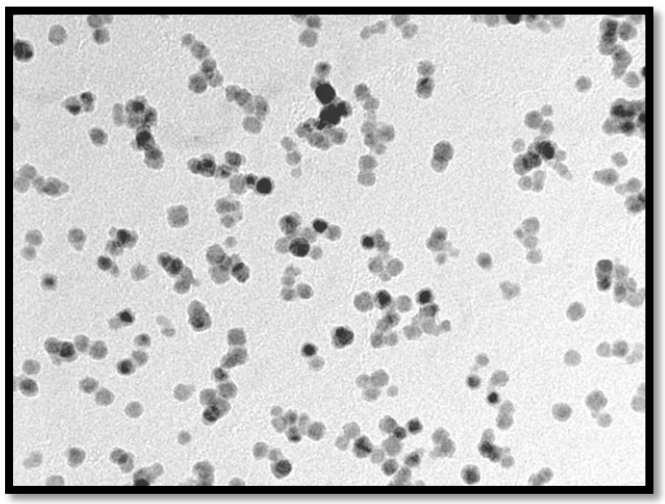
2.3 อนุภาคเงินระดับนาโน (Silver nanoparticles)

อนุภาคเงิน คือ ธาตุหนึ่งในตารางธาตุที่มีคุณสมบัติที่หลากหลายเมื่อมีขนาดเล็กลงในระดับนาโนเมตร โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวเพื่อใช้สัมผัสกับเชื้อโรคก็เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่ง และด้วยขนาดที่เล็กมาก ทำให้ใช้อนุภาคเงินเพียงเล็กน้อย ก็สามารถครอบคลุมพื้นที่ และเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกับเชื้อโรคได้มากขึ้น ดังรูปที่ 2.10 [12]



รูปที่ 2.10 แสดงภาพจำลองพื้นที่ผิวของอนุภาคเงินเมื่อมีพื้นที่ผิวเล็กลง [12]

อนุภาคเงินระดับนาโน คืออนุภาคเงินที่มีขนาดต่ำกว่าไมโครเมตร หรือ 10^{-6} โดยที่อนุภาคเงินระดับนาโนมีคุณสมบัติที่หลากหลาย เช่น คุณสมบัติทางเคมีเป็นธาตุที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุดแค่เพียงตัวเดียว เมื่อทำให้เล็กลง ในระดับนาโนเมตร โลหะเงินจะแตกตัวทำให้เกิดเป็นประจุเงินแขวนลอย (silver colloid) อนุภาคนาโนจึงสามารถแทรกซึมเข้าไปสู่ผนังของแบคทีเรียโดยจะเข้าไปจับกับหมู่ sulphydryl (-SH) ของเอนไซม์ในแบคทีเรียและทำให้แบคทีเรียตายลงในที่สุด หรือคุณสมบัติที่สามารถขจัดเชื้อโรค เชื้อจุลินทรีย์ได้เป็นอย่างดีอันเป็นคุณลักษณะเฉพาะของอนุภาคเงินนี้เอง [13]



รูปที่ 2.11 แสดงอนุภาคเงินในระดับนาโนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) [14]

2.4 การสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโน (Synthesis of silver nanoparticles)

การสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนสามารถสังเคราะห์ได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้กันได้แก่

2.4.1 วิธีทางเคมี (Chemical Methods)

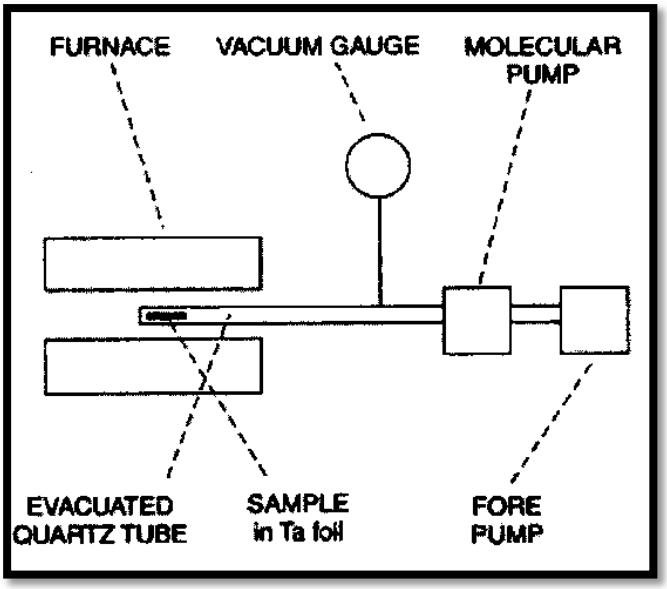
วิธีนี้จะใช้ตัวรีดิวซ์ (reducing agent) ในการทำให้อยู่ในระดับนาโน เช่น $NaBEt_3H$, $LiBEt_3H$ และ$NaBH_4$เป็นต้น โดยที่ Et คือ อนุมูลเอทิล (C_2H_5)ตัวอย่างการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของเงิน (Ag) เมื่อใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ($NaBH_4$) เป็นตัวรีดิวซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ได้อนุภาคเงินระดับนาโน (Ag^0) สมการปฏิกิริยาของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทกับสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่เกิดขึ้นเขียนได้ดังนี้ [2]

$$AgNO_{3\,(aq)} + NaBH_{4\,(aq)} \longrightarrow Ag^{0}_{(aq)} + NaNO_{3(aq)} + B_{(aq)} + 2H_{2(g)}$$

หรือโลหะบางชนิดอาศัยการแตกตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โลหะอลูมิเนียม ทำให้เป็นวัตถุนาโนโดยการแตกตัวของ $Me_2EtNAlH_3$ ในสารละลายโทลูอีน โดยที่ Me คือ อนุมูลเมทิล (CH_3) การให้ความร้อน ตัวเร่งปฏิกิริยากับสารละลาย จะเป็นตัวกำหนดขนาดของอนุภาค อาจใช้สารในกลุ่มของสารลดแรงตึงผิวช่วยเคลือบอนุภาคที่เกิดขึ้นเพื่อป้องกันการรวมกลุ่มกัน (aggregation)

2.4.2 การแตกตัวด้วยความร้อน (Thermolysis)

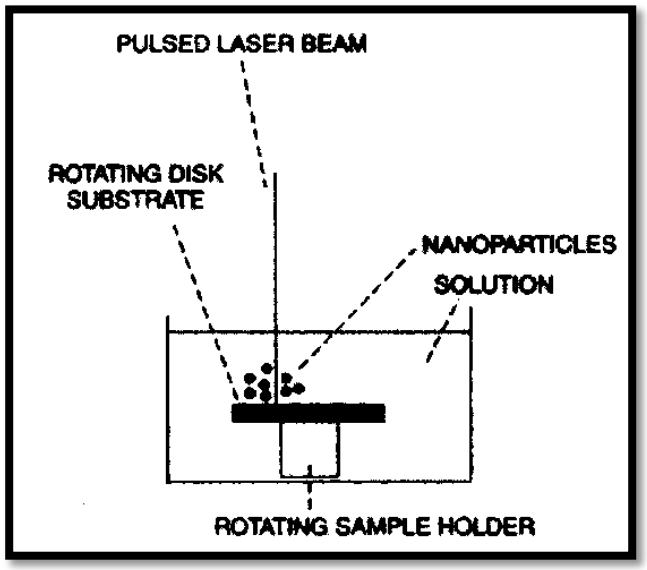
การแตกตัวของของแข็งที่อุณหภูมิสูง โดยไอออนบวกของโลหะและไอออนลบเชิงโมเลกุลหรือสารประกอบอินทรีย์โลหะ เช่น ลิเทียมมาจากลิเทียมเอซายด์ (LiN_3) วัตถุจะอยู่ในท่อควอตซ์ที่มีช่องเปิดถ่ายเทและให้ความร้อนสูงถึง 400 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2.12 ณ อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ลิเทียมเอซายด์จะแตกตัวให้แก๊สไนโตรเจน และระเหยขึ้นสู่บรรยากาศ คงเหลือไว้แต่อะตอมลิเทียมเกาะตัวกันเป็นคอลลอยด์ขนาดเล็กกว่า 5 นาโนเมตร [2]



รูปที่ 2.12 แสดงวิธีการแตกตัวด้วยความร้อน [2]

2.4.3 วิธีเลเซอร์แบบกระแทก (Pulslaser methods)

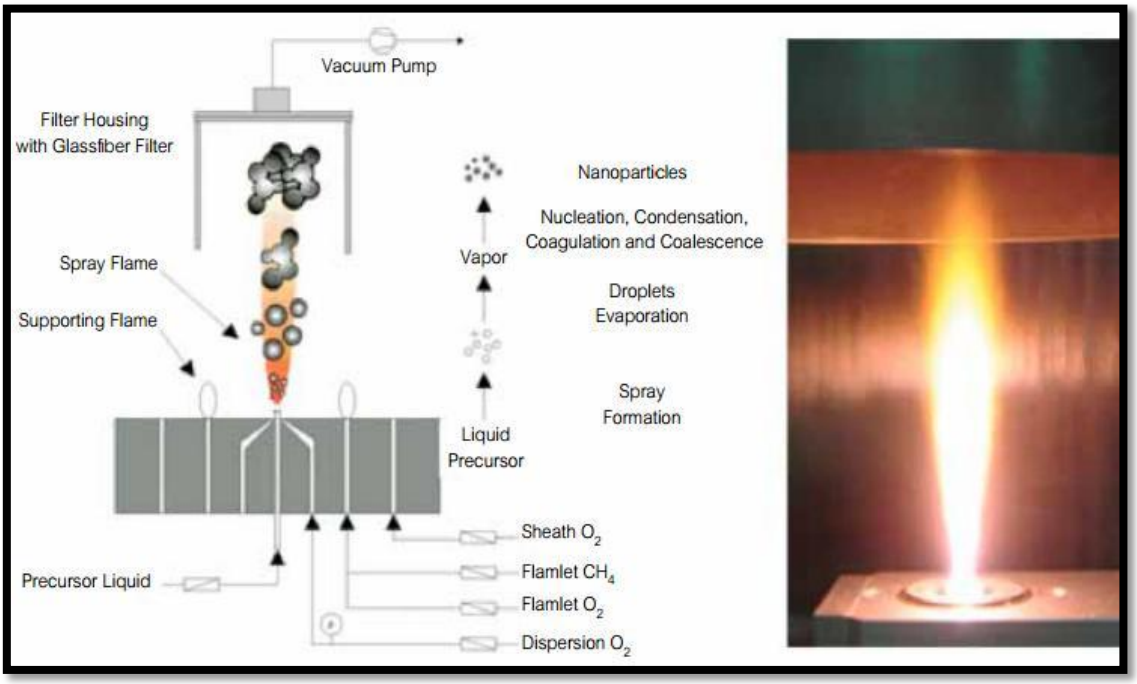
วิธีนี้ถูกนำมาใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน โดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรทและตัวรีดิวซ์ ไหลผ่านอุปกรณ์แบบจานหมุน จากนั้นยิงแสงเลเซอร์เป็นจังหวะ ทำให้เกิดจุดร้อนบนจานหมุน ดังรูปที่ 2.13 เมื่อเกิดอนุภาคระดับนาโน จะถูกเหวี่ยงให้แยกออกจากสารละลายด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง [2]



รูปที่ 2.13 แสดงวิธีเลเซอร์แบบกระแทก [2]

2.4.4 เทคนิคเฟลม สเปรย์ ไพโรลิซิส (Flame Spray Pyrolysis, FSP)

เป็นเทคนิคที่ผลิตอนุภาคระดับนาโนที่มีความบริสุทธิ์ และสามารถควบคุมขนาดอนุภาคได้ โดยอาศัยองค์ประกอบ, สภาวะในระบบ, การใช้สารตั้งต้น, การใช้แก๊สที่เหมาะสมในการเผาไหม้ ตัวทำละลายที่มีค่าเอนโทรปีของการเผาไหม้ที่ดี, การควบคุมสนามไฟฟ้าระหว่าง, การสังเคราะห์ ตลอดจนความเร็วในการไหลของสารละลายซึ่งจะมีผลต่อขนาด ความสูงของเปลวไฟ เป็นต้นโดย แต่ละปัจจัยล้วนแล้วแต่มีผลทำให้ได้ขนาด และสัณฐานวิทยาของอนุภาคที่ต่างกันออกไป [15]



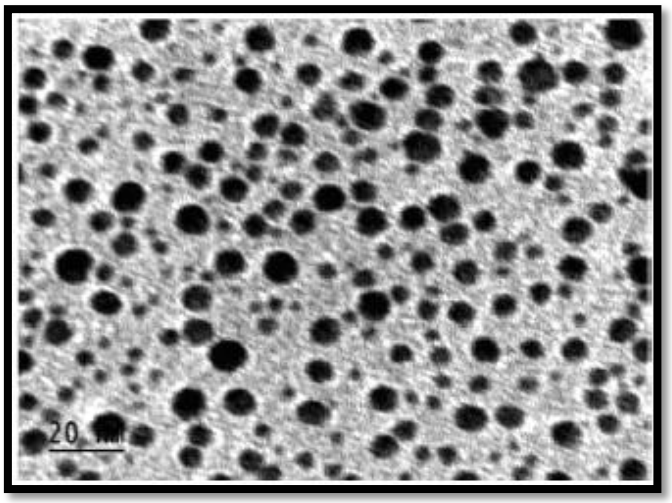
รูปที่ 2.14 แสดงขั้นตอนกระบวนการการผลิต และลักษณะเปลวไฟที่เกิดขึ้น จากการเตรียมวัสดุนาโนความบริสุทธิ์สูง โดยเทคนิคเฟลม สเปรย์ ไพโรลิซิส [15]

2.4.5 วิธีเคมีสีเขียว (Green synthesis)

2.4.5.1 Polysaccharide Method

เป็นการใช้น้ำเป็นตัวทำละลายและใช้น้ำตาลโมเลกุลเชิงซ้อน (Polysaccharide) เป็นสารเพิ่มความคงตัว โดยในบางครั้งน้ำตาลโมเลกุลเชิงซ้อน (Polysaccharide) สามารถทำหน้าที่ได้ทั้งเป็นตัวรีดิวซ์ (reducing agent) และสารเพิ่มความคงตัว (capping agent) ยกตัวอย่างเช่น การสังเคราะห์เงินระดับนาโนด้วยการใช้ Starch ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความคงตัว (capping agent) และ B-D-glucose ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์(reducing agent) และค่อยๆให้ความร้อนแก่ระบบ ในการ

เกิดปฏิกิริยาระหว่าง Starch กับอนุภาคเงินระดับนาโน จะเกิดแบบอ่อนๆ และสามารถเกิดการย้อนกลับได้ที่อุณหภูมิสูง [16]



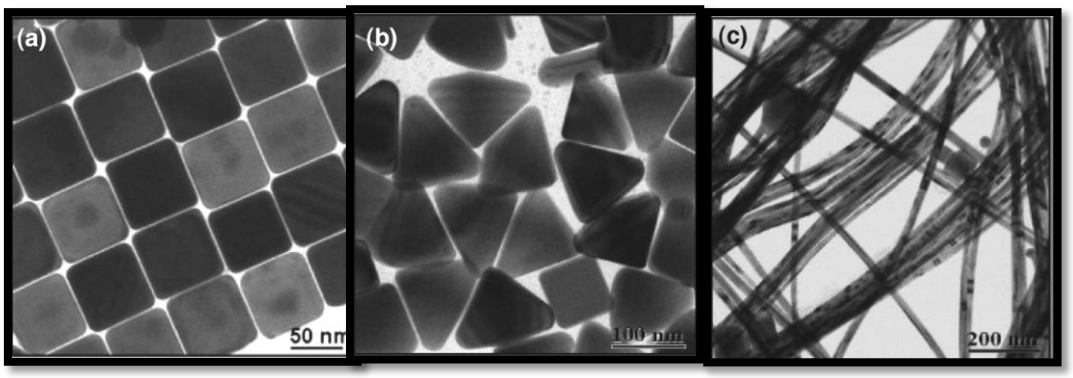
รูปที่ 2.15 แสดงอนุภาคเงินระดับนาโนจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM) ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี Polysaccharide Method [16]

2.4.5.2 Tollens Method

การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนโดยใช้วิธีนี้ จะให้อนุภาคเงินระดับนาโนที่สามารถควบคุมขนาดได้ ปฏิกิริยารีดักชันของ $Ag(NH_3)^+_2$ แสดงได้ดังสมการ

$$Ag(NH_3)^+_{2(aq)} + RCHO_{(aq)} \longrightarrow Ag_{(s)} + RCOOH_{(aq)}$$

$Ag(NH_3)^+_2$ เป็นรูปที่เสถียรเมื่อสังเคราะห์ด้วยแอมโมเนียที่ความเข้มข้นสูงๆ แต่เมื่อทำการศึกษาที่แอมโมเนียความเข้มข้นต่ำๆ พบว่าจะได้อนุภาคขนาดเล็ก เช่น เมื่อใช้กลูโคสและแอมโมเนียความเข้มข้น 0.005 M พบว่าได้อนุภาคมีขนาดเฉลี่ย 57 นาโนเมตร และเกิด SPR ขึ้นที่ 420 นาโนเมตร ถ้า $Ag(NH_3)^+_2$ ถูกรีดิวซ์ด้วย HTAB (n-hexadecyltrimethylammonium bromide) จะได้อนุภาคเงินระดับนาโนที่แตกต่างกัน เช่น สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยมและเส้นใย [16]



รูปที่ 2.16 อนุภาคเงินระดับนาโนจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM) ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี Tollens Method [16]

2.4.5.3 Irradiation Method

เป็นการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนด้วยการฉายรังสี เช่น การให้รังสีจากเลเซอร์ หรือรังสีจากไมโครเวฟ การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนด้วยรังสีจากเลเซอร์ทำได้โดยการให้รังสีสารละลายเกลือของซิลเวอร์และสารลดแรงตึงผิว วิธีนี้ทำได้โดยไม่ต้องใช้ตัวรีดิวซ์ และเมื่อใช้พลังงานจากเลเซอร์น้อยจะได้อนุภาคเงินระดับนาโน มีขนาดประมาณ 20 นาโนเมตร และเมื่อเพิ่มพลังงานของเลเซอร์มากขึ้นจะได้อนุภาคเงินระดับนาโนมีขนาดประมาณ 5 นาโนเมตร อนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ด้วยรังสีจากไมโครเวฟ จะมีความเสถียรประมาณ 2 เดือน ที่อุณหภูมิห้อง [16]

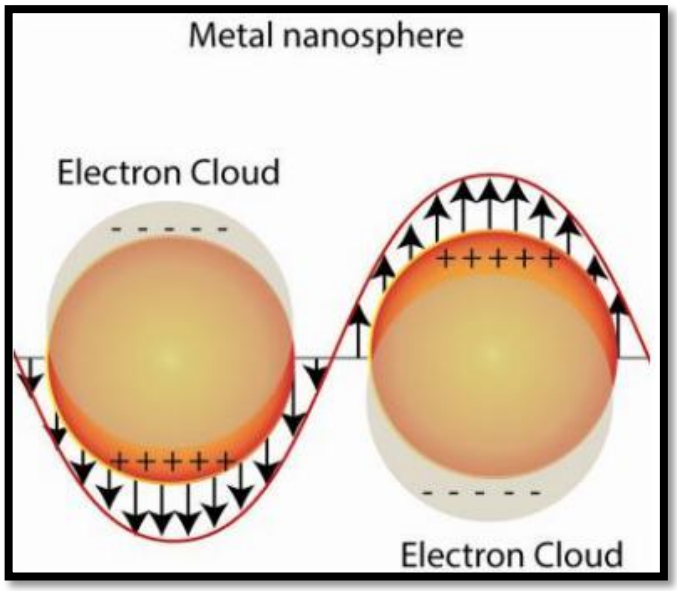
2.4.5.4 Biological Method

เป็นการสกัดสารจากสิ่งมีชีวิต ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นทั้งตัวรีดิวซ์ (reducing agent) และสารรักษาเสถียรภาพในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน เช่น การใช้สารสกัดจากพืช เป็นต้น พืชที่นิยมใช้คือ alfalfa โดยพืชชนิดนี้สามารถใช้เป็น reducing agent และสารเพิ่มความคงตัวในได้เวลาเดียวกัน เมื่อนำสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทกับสารสกัดจากพืช แล้วนำไปให้ความร้อนนาน 2 ชั่วโมง ก็จะได้สารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน [16]

2.5 Surface Plasmon Resonance (SPR)

เซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์ คือปรากฏการณ์เชิงแสงที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอิเล็กตรอนที่อยู่ในโลหะที่มีขนาดระดับนาโน หรือกล่าวได้ว่าเมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกมาตกกระทบโลหะ กลุ่มอิเล็กตรอนที่ถูกจำกัดอยู่ในอนุภาคระดับนาโน

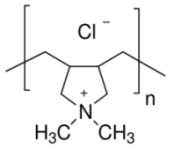
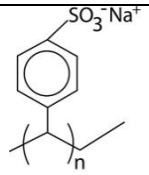
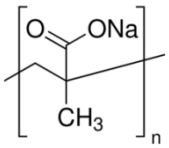
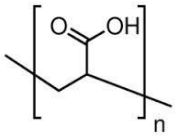
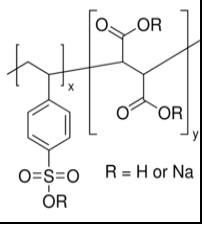
จะเกิดการสั่นรวม (collective oscillation) และเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอก มีความยาวคลื่นเดียวกันกับความยาวคลื่นที่อิเล็กตรอนสั่นในอนุภาคนาโน จะทำให้เกิดการกำทอนขึ้นซึ่งอันตรกิริยาที่แสงกระทำต่อโลหะจะเกิดได้สองแบบคือ แสงจะตกกระทบและสะท้อนออกไปด้วยความยาวคลื่นเท่าเดิมทุกทิศทุกทาง เรียกว่าการกระเจิง (scattering) และในขณะเดียวกัน บางโฟตอนก็จะถูกดูดกลืนและถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานการสั่น ซึ่งเรียกว่าการดูดกลืนแสง (absorption) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วโครงสร้างระดับนาโนจะเกิดทั้งกระบวนการกระเจิงแสงและการดูดกลืนแสง ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ จะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโน [17]



รูปที่ 2.17 การเกิดเซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์
โดยแสดงการสั่นของกลุ่มอิเล็กตรอนในแถบเหนี่ยวนำเมื่อมีแสงจากภายนอกส่องผ่าน [17]

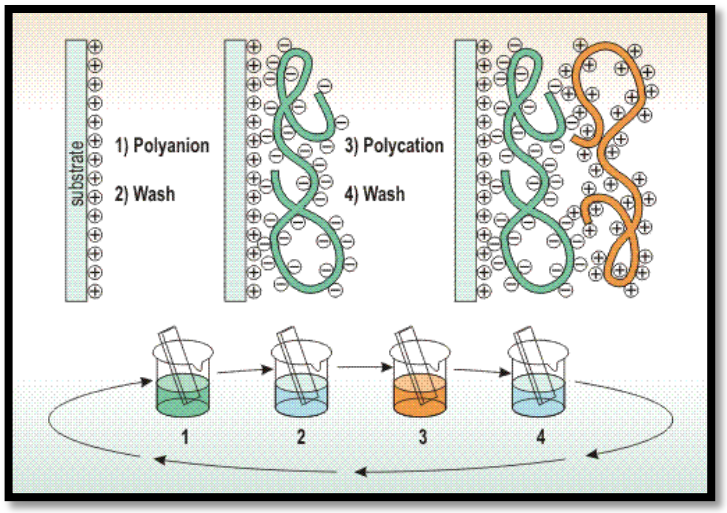
2.6 พอลิเมอร์ที่มีประจุ (Polyelectrolytes, PE)

พอลิเมอร์ที่มีประจุ คือกลุ่มของสารโมเลกุลใหญ่ที่สามารถแตกตัวได้เมื่ออยู่ในของเหลวเกิดเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนพอลิอิเล็กโทรไลต์ทำได้โดยการนำสารที่มีประจุบวกและประจุลบมารวมกัน ทำให้เกิดการตกตะกอน ได้ตะกอนที่ไม่ละลาย พบว่าพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเกิดจาก coulomb interaction ที่แข็งแรง แต่ในบางกรณีการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน พอลิอิเล็กโทรไลต์สามารถเกิดได้จากพันธะไอออนิกที่ไม่แข็งแรง (weak ionic interaction) ได้เช่นกัน [18]

ชนิดของประจุ	ชื่อเต็ม	ชื่อย่อ	โครงสร้าง
Cation	Poly(diallyldimethylammonium chloride)	PDAD	
Anion	Poly(styrenesulfonic acid), sodium salt	PSS	
	Poly(methacrylic acid sodium salt)	PMA	
	Poly(acrylic acid)	PAA	
	Poly(4-styrenesulfonic acid-*co*-maleic acid) sodium salt	CoPSS	

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างชนิดของพอลิเมอร์ที่มีประจุ [19-23]

2.7 การเคลือบผิวหน้าบนวัสดุด้วยวิธีการเคลือบชั้นต่อชั้น (Layer By Layer, LbL)



รูปที่ 2.18 แสดงขั้นตอนการเคลือบผิวหน้าบนวัสดุด้วยวิธีการเคลือบชั้นต่อชั้น (LbL) [24]

เป็นเทคนิคการสร้างประจุเป็นชั้นต่อชั้นลงบนพื้นผิวของวัสดุ โดยอาศัยการเคลือบลงบนวัสดุ โดยประจุที่เคลือบจะจัดเรียงตัวเอง ทั้งนี้ความหนาของชั้นจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น จำนวนเวลาที่ใช้ในการเคลือบ, ความเข้มข้นของสารตั้งต้น, การกระจายตัวของสาร, ชนิดของสารที่มีประจุ, จำนวนชั้นในการเคลือบ เป็นต้น เทคนิคจะเป็นที่จะต้องทำการศึกษาชนิดของวัสดุ ตลอดจนโครงสร้างของวัสดุที่ใช้รองรับประจุอีกด้วย

เทคนิคนี้นับว่าเป็นอีกหนึ่งเทคนิคที่ใช้ประยุกต์ได้หลากหลาย เพราะไม่ซับซ้อน, ต้นทุนในการทำต่ำ เป็นต้น [24]

2.8 เชื้อจุลินทรีย์

จุลินทรีย์เป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่ประกอบด้วยเซลล์เดียว (Unicellular) หรือหลายเซลล์ (Multicellular) แต่ทว่าเซลล์เหล่านั้นต่างก็เป็นเซลล์ชนิดเดียวกันและมีรูปร่างเหมือนกัน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของเซลล์เพื่อทำหน้าที่เฉพาะเหมือนในสิ่งมีชีวิตชั้นสูง จุลินทรีย์สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆตามประเภทของเซลล์ คือ 1.โปรคารีโอต คือ ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส เช่น แบคทีเรีย และสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน 2. ยูคารีโอต คือ มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส เช่น เชื้อรา โปรโตซัว และสาหร่ายต่างๆ ยกเว้นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน [25]

ประเภทของจุลินทรีย์ มี 5 ประเภท ได้แก่

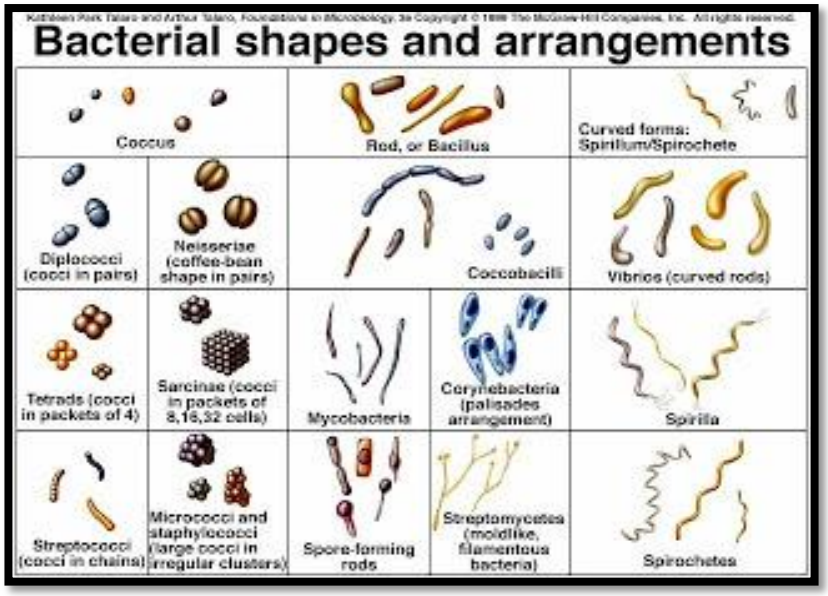
1. แบคทีเรีย (Bacteria) เป็นจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็กมาก ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูงส่องดู แบคทีเรียประกอบด้วยเซลล์เพียงเซลล์เดียว และเป็นพวกโปรคารีโอต มีผนังเซลล์ที่คงรูป (Rigid cell wall) ทำให้แบคทีเรียรักษารูปร่างได้ แบคทีเรียมีรูปร่างได้หลายแบบมีเพศและไม่มีเพศ โดยแบบมีเพศเกิดจากการรวมตัวของเซลล์ 2 เซลล์ ส่วนการสืบพันธุ์แบบไม่มีเพศโดยทั่วไปเป็นแบบ Binary fission หรือเป็นแบบการแตกหน่อ (Budding) แบคทีเรียสามารถพบได้ทั่วๆไปไม่ว่าจะเป็นดิน น้ำ อากาศ มีทั้งชนิดที่ให้ประโยชน์และบางชนิดก็เป็นโทษ [25]

แบคทีเรียสามารถแบ่งได้หลายแบบ เช่น

- แบ่งตามการติดสีย้อมแกรม (Gram stain) ถ้าติดสีน้ำเงินเรียกว่าแบคทีเรียชนิดแกรมบวก (Gram positive bacteria) ถ้าติดสีแดงเรียกว่าแบคทีเรียชนิด แกรมลบ (Gram negative bacteria)

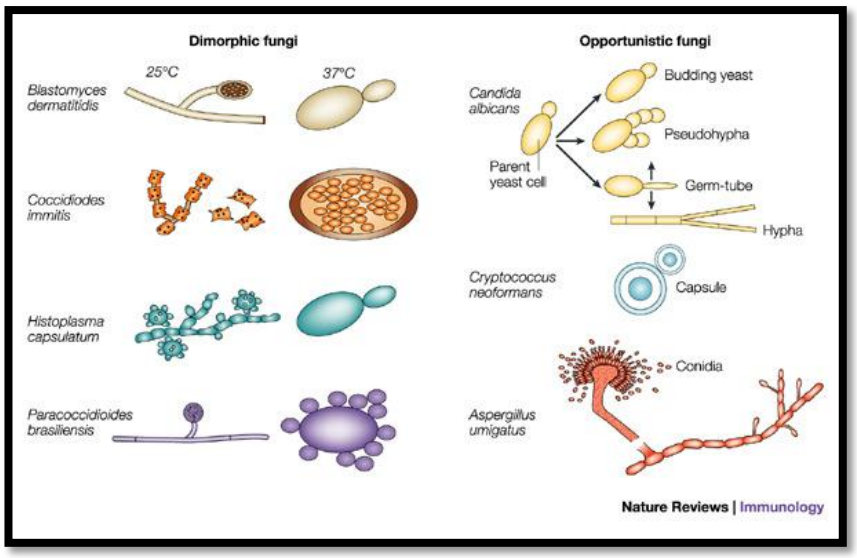
- แบ่งตามรูปร่างของแบคทีเรีย เช่น แบคทีเรียรูปร่างกลมเรียกว่า คอคคัส (Coccus) แบคทีเรียรูปร่างเป็นแท่งเรียกว่า บาซิลลัส (Bacillus)

- แบ่งตามการใช้ออกซิเจนของแบคทีเรีย แบคทีเรียที่ต้องใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิต เรียกว่า แอโรบิคแบคทีเรีย(Aerobic bacteria) แบคทีเรียที่ไม่ต้องใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิต เรียกว่า แอนแอโรบิคแบคทีเรีย (Anaerobic bacteria) [26] ตัวอย่างของแบคทีเรีย เช่น Bacillus spp. Lactobacillus spp. Streptococcus spp. Staphylococcus spp. Escherichia coli Proteus vulgaris Spirillum spp. และ Streptomyces spp. เป็นต้น [25]



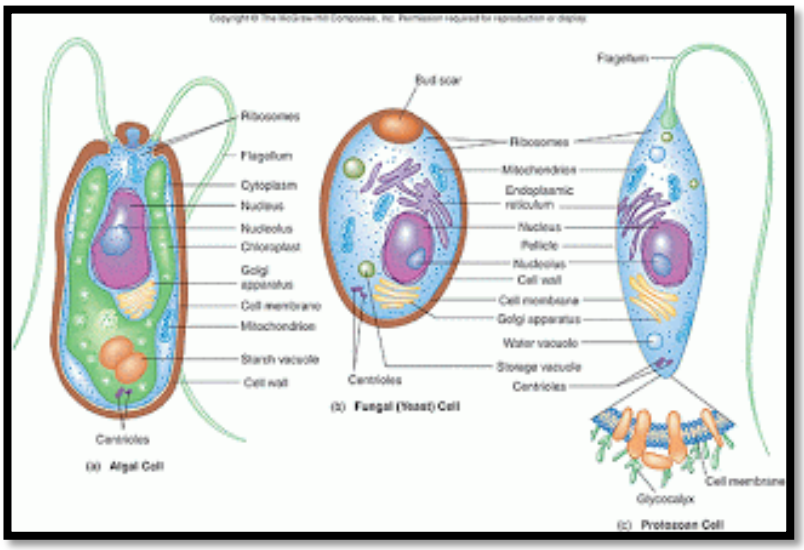
รูปที่ 2.19 แสดงรูปร่างของแบคทีเรีย [25]

2. เชื้อรา (Fungi) เป็นจุลินทรีย์ที่มีเซลล์แบบยูคารีโอต มีทั้งชนิดเซลล์เดี่ยวคือยีสต์ (Yeast) ซึ่งส่วนใหญ่สืบพันธุ์ โดยการแตกหน่อ และหลายเซลล์ซึ่งได้แก่ รา (Mold) โดยมีรูปร่างเป็นเส้นใย (Filamentous) เส้นใยมีทั้งแบบมีผนังกั้นและไม่มีผนังกั้น ผนังเซลล์ของเชื้อราแตกต่างจากผนังเซลล์ของแบคทีเรียขนาดและรูปร่างของเชื้อราแตกต่างกันไป เชื้อราเจริญได้ดีในที่ที่มีความเป็นกรดสูง ราทุกชนิดเป็นพวกที่ต้องการอากาศส่วนใหญ่ชอบอุณหภูมิปานกลาง สืบพันธุ์ได้ทั้งแบบมีเพศและไม่มีเพศ ตัวอย่างของเชื้อราพวกที่เป็นเซลล์เดียว เช่น ยีส Saccharomyces cerevisiae ส่วนพวกหลายเซลล์ที่เป็นเส้นใย เช่น Rhizopus spp. Aspergillus spp. Penicilliun spp. และเห็ด เช่น เห็ดฟาง Volvariella volvaceae เป็นต้น [25]



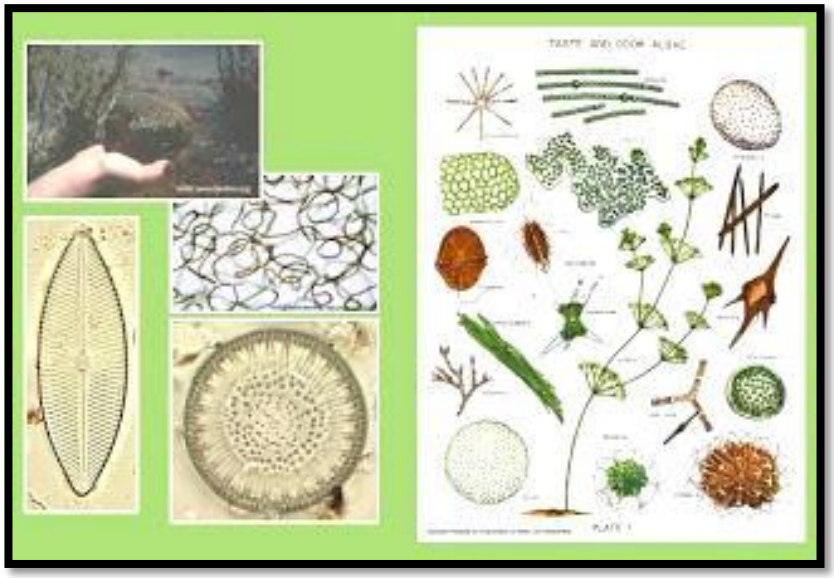
รูปที่ 2.20 แสดงรูปร่างและชนิดของเชื้อรา [25]

3. โปรโตซัว (Protozoa) ลักษณะเซลล์เป็นเซลล์เดียวและเป็นพวกยูคารีโอตแต่ไม่มีผนังเซลล์ เป็นจุลินทรีย์ที่มีวิวัฒนาการของเซลล์ไปมากที่สุด การแพร่พันธุ์มีทั้งแบบใช้เพศและไม่ใช้เพศ โดยแบบไม่มีเพศอาจจะเป็น Binary fission การแตกหน่อ หรือการสร้างสปอร์ เป็นต้น สามารถเคลื่อนที่ได้ในบางช่วงของวงจรชีวิต ขนาดและรูปร่างของโปรโตซัวมีความแตกต่างกันมาก เช่น รูปกลม รูปไข่ รูปแท่งหรือท่อน บางชนิดมีรูปร่างหลายแบบในช่วงการเจริญ บางชนิดเห็นได้ด้วยตาเปล่า พบได้ทั่วไปในดิน น้ำ อากาศ และในสิ่งมีชีวิต ปกติโปรโตซัวกินแบคทีเรียเป็นอาหาร ดังนั้นบริเวณที่มีแบคทีเรียมากย่อมมีโปรโตซัวมาก [25]



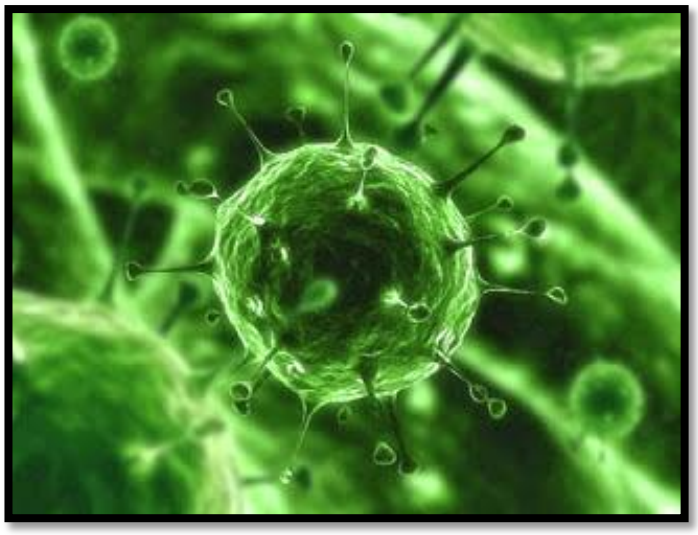
รูปที่ 2.21 แสดงรูปร่างของโปรโตซัว [25]

4. สาหร่าย (Algae) เป็นจุลินทรีย์ที่สังเคราะห์แสงได้เหมือนพืชชั้นสูง เพราะมีคลอโรฟิลล์ นอกจากนี้ยังมีรงควัตถุ (Pigment) อื่นๆอีก ทำให้สาหร่ายมีสีต่างๆกันไป เช่น สีเขียว สีแดง สีน้ำตาล สีน้ำเงิน ซึ่งใช้เป็นลักษณะสำคัญในการจัดจำแนกหมวดหมู่ของสาหร่าย หรืออาจใช้ประเภทของคลอโรฟิลล์ในการจัดจำแนกก็ได้เช่นกัน ลักษณะของเซลล์เป็นพวกยูคารีโอต มีทั้งพวกที่เป็นเซลล์เดียวมีขนาดเล็กต้องส่องดูด้วยกล้อง บางชนิดมีหลายเซลล์ขนาดใหญ่อาจยาวถึง 100 ฟุต ลักษณะรูปร่างต่างกันไป เช่น รูปกลม รูปท่อน รูปเกลียว รูปแฉก รูปกระสวย บางชนิดเซลล์อาจอยู่รวมกันเป็นกลุ่มเช่น Volvox ต่อกันเป็นสาย เช่น Anabacna เรียงกันเป็นแผ่น เช่น Ulva การสืบพันธุ์มีทั้งแบบมีเพศและไม่มีเพศ [25]



รูปที่ 2.22 แสดงรูปร่างของสาหร่าย [25]

5. ไวรัส (Virus) ไม่สามารถจัดเป็นเซลล์ได้ เพราะขาดโครงสร้างและองค์ประกอบของเซลล์อีกทั้งไม่สามารถอาศัยอยู่ได้อย่างอิสระได้ จำเป็นต้องอาศัยอยู่ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เพื่อดำรงชีวิตและเพื่อการเพิ่มจำนวนเรียกลักษณะนี้ว่า Obligate intracellular parasite โครงสร้างของไวรัสจะประกอบด้วยกรดนิวคลีอิกที่เป็น DNA หรือ RNA เพียงอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น และมีโปรตีนที่เรียกว่า Capsid หุ้มอยู่ นอกจากนี้อาจมีเยื่อหุ้มที่เรียกว่า Envelope ไวรัสมีขนาดเล็กมากประมาณ 20-25 นาโนเมตร จนถึง 200-300 นาโนเมตร จึงไม่สามารถมองเห็นด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา หากแต่ต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ตามธรรมชาติพบได้ทั่วไปโดยอาศัยอยู่กับเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ไม่ว่าจะเป็นพืช สัตว์ หรือมนุษย์ ตลอดจนจุลินทรีย์ [25]

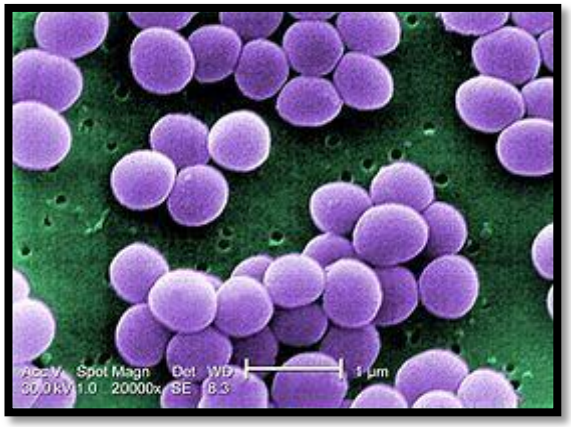


รูปที่ 2.23 แสดงรูปร่างของไวรัส [25]

2.9 เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษา

2.9.1 *Staphylococcus aureus*

Staphylococcus aureus (S. aureus) มีการจำแนกชั้นทางวิทยาศาสตร์โดยจัดอยู่ในอาณาจักร Eubacteria ไฟลัม Firmicutes ชั้น Bacilli อันดับ Bacillales วงศ์ Staphylococcaceae สกุล Staphylococcus [27] เป็นแบคทีเรียที่มีลักษณะกลม เรียงตัวเป็นกลุ่มคล้ายพวงองุ่น (รูปที่ 2.24) หรือเป็นคู่ หรือเป็นสายสั้นๆ เป็นแบคทีเรียแกรมบวก โคโลนีมีสีเหลืองหรือสีทอง ไม่สร้างสปอร์ ไม่เคลื่อนไหว ส่วนใหญ่ไม่มีแคพซูล และในภาวะที่ไม่มีออกซิเจนจะสลายน้ำตาลกลูโคสให้กรดอินทรีย์ จัดอยู่ในกลุ่ม facultative anaerobe คือเจริญได้ในที่มีอากาศและไม่มีอากาศ แต่เจริญได้ดีกว่าในสภาวะที่มีอากาศ Staphylococcus aureus สร้างสารพิษ (toxin) ชนิดเอนทีโรทอกซิน (enterotoxin) สารพิษที่สร้างมีสมบัติพิเศษ คือ ทนความร้อน



รูปที่ 2.24 แสดงลักษณะของ *Staphylococcus aureus* [27]

Staphylococcus aureus เจริญได้ในช่วงอุณหภูมิ 6-46 องศาเซลเซียส โดยมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 30-37 องศาเซลเซียส สร้างสารพิษได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 10 องศาเซลเซียส เจริญได้อยู่ในช่วงค่า pH 4.0-10.0 โดยมีช่วงที่เหมาะสมคือ 7.0-7.5 วอเตอร์แอคทิวิตี (water activity, aw) ต่ำสุดที่ Staphylococcus aureus สามารถเจริญได้ คือ 0.85 แต่ถ้าค่า aw ต่ำกว่า 0.94 จะเจริญได้อย่างช้าๆ สามารถทนเกลือสูงถึง15-18% และทนต่อการฉายรังสี (food irradiation) [26]

Staphylococcus aureus ทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษ ชนิด intoxication ซึ่งเกิดจากบริโภคอาหารที่มีสารพิษ enterotoxin ที่เชื้อสร้างขึ้น ปนเปื้อนในปริมาณน้อยกว่า 1 ไมโครกรัม จะสามารถทำให้เกิดอาการเจ็บป่วยได้ มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน วิงเวียน เป็นตะคริวในช่องท้องและอ่อนเพลีย ผู้ป่วยบางรายอาจมีอาการปวดศีรษะ เป็นตะคริวที่กล้ามเนื้อ และมีการเปลี่ยนแปลงความดันโลหิตเป็นระยะๆ รวมทั้งอาจมีการเต้นของชีพจรผิดปกติ ซึ่งโดยทั่วไปอาการจะดีขึ้นภายใน 2-3 วัน ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับสภาพความต้านทานสารพิษของร่างกาย ปริมาณการปนเปื้อนของเชื้อในอาหารและปริมาณสารพิษที่สร้างขึ้นในอาหาร รวมทั้งสภาพร่างกายโดยทั่วไปของผู้ที่ได้รับเชื้อด้วย

2.9.2 *Pseudomonas aeruginosa*

Pseudomonas aeruginosa (*P. aeruginosa*) มีการจำแนกชั้นทางวิทยาศาสตร์โดยจัดอยู่ในอาณาจักร Bacteria ไฟลัม Proteobacteria ชั้น Gamma Proteobacteria อันดับ Pseudomonadales วงศ์ Pseudomonadaceae สกุล *Pseudomonas* ชนิด *Pseudomonas aeruginosa* [28] เป็นแบคทีเรียรูปท่อน แกรมลบ เคลื่อนที่ได้ บางชนิดสร้างรงควัตถุที่ละลายน้ำได้ ดำรงชีวิตอย่างอิสระ ลักษณะเด่นของเชื้อ P. aeruginosa คือกลิ่นที่พิเศษเฉพาะของเชื้อคล้ายกลิ่นองุ่นและเจริญได้ดีในอุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส และในที่มีออกซิเจนมากกว่าไม่มีออกซิเจน [30] อยู่ในที่ชื้นบางชนิดเป็นเชื้อก่อโรคกับพืช แมลง และสัตว์ มีเพียงไม่กี่ชนิดที่ก่อโรคกับคน pseudomonas มักเป็นเชื้อฉวยโอกาส (opportunits) ที่ทำให้เกิดโรคในคนไข้ที่ภูมิคุ้มกันผิดปกติ และเกิดอาการรุนแรงในคนไข้ที่แผลไฟไหม้และคนไข้ที่สวนท่อปัสสาวะ โรคที่เกิดขึ้นในคนพบว่าส่วนใหญ่เกิดจาก P.aeruginosa [29]

รูปที่ 2.25 แสดงลักษณะของ *Pseudomonas aeruginosa* [29]

2.9.3 *Candida albicans*

Candida albicans (C. *albicans)* มีการจำแนกชั้นทางวิทยาศาสตร์โดยจัดอยู่ในอาณาจักร Fungi ไฟลัม Ascomycota ชั้น Saccharomycetes อันดับ Saccharomycetales วงศ์ Saccharomycetaceae สกุล Candida [31] เป็น ยีสต์มีขนาด ตั้งแต่ 3- 7 ไมครอน เพิ่มจำนวนด้วยการแตกหน่อ (budding) ความสามารถในการแตกหน่อขึ้นกับปัจจัยสิ่งแวดล้อม อุณหภูมิที่เหมาะต่อการเพิ่มจำ นวน ที่ 37 องศาเซลเซียส รูปร่างของสายรา (hypha) เป็นแบบมีผนังกั้นขวาง (septate hypae) ขนาดความกว้าง 4-8 ไมครอน เชื้อนี้สามารถ แปลงรูปไปเป็น สายราเทียม (pseudohypha) โดยมีปัจจัยเกี่ยวข้องหลายอย่าง อาทิ สภาพแวดล้อมในเนื้อเยื่อที่มันอยู่, ระดับความเป็นกรด-ด่าง, ปริมาณและชนิดของสารอาหาร เป็นต้น [32]

รูปที่ 2.26 แสดงลักษณะของ *Candida albicans* [32]

2.10 แอมโมเนีย

แอมโมเนีย (NH_3) เป็นก๊าซไม่มีสีที่อุณหภูมิและความดันปกติ กลิ่นฉุนคล้ายปัสสาวะรุนแรงมาก น้ำหนักโมเลกุล 17.03 จุดเยือกแข็ง -77.70 องศาเซลเซียส จุดเดือด -33.4 องศาเซลเซียส เมื่ออัดด้วยความดันสูงจะกลายเป็นของเหลว หากปล่อยให้ระเหยจะดูดความร้อน จึงใช้ก๊าซแอมโมเนียในอุปกรณ์ทำความเย็นได้ แอมโมเนียละลายน้ำได้ดี ได้สารละลายแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นสูงสุดในน้ำ ประมาณร้อยละ 25-29 และความเข้มข้นร้อยละ 10 ใช้สำหรับเป็นยาประจำบ้าน ก๊าซชนิดนี้ติดไฟได้เองที่อุณหภูมิ 651 องศาเซลเซียส

ปัจจุบันนิยมใช้ก๊าซแอมโมเนียกับอุปกรณ์ทำความเย็นขนาดใหญ่ เช่น โกดัง ห้องเย็บเก็บอาหารแช่แข็ง โรงทำน้ำแข็ง เป็นต้น แอมโมเนียหรือแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ใช้ผลิตปุ๋ยเคมีสำหรับเกษตรกรรม สารเคมี พลาสติก วัตถุเสพติด กรดไนตริก สารเคมีกำจัดศัตรูพืช น้ำยาล้างกระจก และผงซักฟอก เป็นต้น

อันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม เกิดจากการสูดดม การสัมผัสและการกลืนกินโดยอุบัติเหตุทั้งแอมโมเนีย และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ในปริมาณที่มากพอ สามารถทำลายเซลล์โดยตรงเนื่องจากความเป็นด่างของสาร ทำให้ระคายเคืองและเจ็บปวดรุนแรงเมื่อสารถูกเยื่อเมือก แอมโมเนียจะทำปฏิกิริยาเป็นเกลือและใช้สังเคราะห์ยูเรีย (Urea) ในร่างกายพิษส่วนใหญ่เกิดจากการสูดดมไอระเหยของก๊าซ ที่ความเข้มข้น 1,000 ppm จะระคายเคืองตาและทางเดินหายใจส่วนบน ทำให้ไอ อาเจียน เยื่อเยื่อในปาก คอ และจมูกแดง ถ้ามากกว่า 1,000 ppm ทำให้ริมฝีปากบวม ตาบอดชั่วคราว กระวนกระวาย แน่นหน้าอก ซีดเขียว หัวใจเต้นอ่อนและเร็วพิษจากการสัมผัส คือ ปวดร้อน ผิวหนังถูกทำลาย หากเข้าตาจะมีอาการปวดรุนแรง ตาขาวบวม และตาดำฝ้ามัวการกลืนกิน พิษไม่รุนแรงเท่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีอาการปวดรุนแรงในปาก หน้าอก และท้อง ไอ อาเจียน สลบ ระคายเคืองปอด อาจมีปอดบวมน้ำ [33]

2.11 กรดออกซาลิก

กรดออกซาลิก (Oxalic Acid) เป็นสารประกอบอินทรีย์ซึ่งมีสูตรโมเลกุล $H_2C_2O_4$และมีความเป็นกรดสูงกว่ากรดน้ำส้ม (Acetic Acid) 10000 เท่า เมื่ออยู่ในรูปของประจุจะเรียกว่า ออกซาเลต (oxalate) ซึ่งเป็นตัวรีดิวส์ ที่ดีเหมือนกับหมู่ลิแกนด์ (ligand) [34] เมื่อรับประทานอาหารที่มีกรดออกซาลิกเข้าสู่ร่างกาย จะไปรวมกับแร่ธาตุอื่นกลายเป็นผลึกออกซาเลต เช่น แคลเซียมออกซาเลต โซเดียมออกซาเลต แมกนีเซียมออกซาเลต และโปแตสเซียมออกซาเลต โดยเฉพาะผลึกของแคลเซียมออกซาเลต เกิดได้ง่ายถ้าร่างกายได้รับแคลเซียม และ กรดออกซาลิกจากอาหารมากเกินไป ปริมาณ Oxalic acid ที่รับประทานได้แต่ละวันโดยไม่มีความเสี่ยงนั้นมีบอกไว้ว่าประมาณ 22 กรัม สำหรับคนที่มีน้ำหนักตัว 60 กิโลกรัม หรือประมาณ 378 มิลลิกรัม/น้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม

ที่มาของกรดออกซาลิก

1. เกิดขึ้นภายในร่างกายได้เองโดยมาจากขบวนการเมทาบอลิซึมของ glyoxylic และ (unused)ascorbic acid ดังนั้นถ้าร่างกายได้รับวิตามินซีมากเกินไป (megadosers) เป็นเวลานานๆ อาจจะทำให้มีกรดออกซาลิก เพิ่มขึ้นและมีผลให้เกิดก้อนนิ่วแคลเซียมออกซาเลตในไตและกระเพาะปัสสาวะได้

2. ได้รับจากภายนอก โดยรับประทานอาหารที่มีกรดออกซาลิก เช่น ผักต่างๆ โดยเฉพาะใบยอด และ ต้นอ่อน เช่น ใบชะพลู ยอดพริกชี้ฟ้า ใบยอ ผักปัง และใบกระเจี๊ยบ ผักโขม เป็นต้น [35]

2.12 การประยุกต์ใช้สารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน

2.12.1 การวิเคราะห์แอมโมเนียและกรดออกซาลิกด้วยอนุภาคเงินระดับนาโน

ในการวิเคราะห์แอมโมเนียและกรดออกซาลิกด้วยอนุภาคเงินระดับนาโนจะใช้คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงทางสีของอนุภาคเงินระดับนาโน คือ สีของสารละลายของอนุภาคเงินระดับนาโนหลังจากที่มีการเติมสารละลายแอมโมเนียและกรดออกซาลิก จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสี

2.12.2 การฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยอนุภาคเงินระดับนาโน

แบคทีเรียเป็นจุลชีพที่ก่อให้เกิดโรคในมนุษย์และสัตว์มากที่สุดชนิดหนึ่ง แบคทีเรียแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือแบคทีเรียแกรมบวก (Gram-positive Bacteria) และแกรมลบ (Gram-negative Bacteria) โดยแบคทีเรียแกรมบวกจะมีผนังเซลล์ที่ประกอบด้วย Peptidoglycan ที่หนาประมาณ 30 นาโนเมตร ในขณะที่แบคทีเรียแกรมลบจะมีชั้นของ Peptidoglycan หนาเพียง 2 – 3 นาโนเมตร และมี Outer membrane หุ้มอยู่ด้านนอกอีกชั้นหนึ่ง เนื่องจากแบคทีเรียแกรมลบเป็นพวกที่สามารถเจริญเติบโตในช่วงอุณหภูมิของร่างกายได้ดีกว่าแบคทีเรีย แกรมบวก ดังนั้นแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของโรคที่เกิดกับคนส่วนใหญ่จึงมีสาเหตุมาจากแบคทีเรียแกรมลบ

การฆ่าเชื้อด้วยอนุภาคเงินระดับนาโน เกิดขึ้นจากการที่อนุภาคเงินระดับนาโนเกาะบนผนังของเชื้อแบคทีเรียและแทรกเข้าไปภายในโดยไปเกาะกับหมู่ซัลฟ์ไฮดริล (Sulfhydryl, -SH) ของเอนไซม์ที่ทำหน้าที่เผาผลาญออกซิเจนและพลังงาน (Oxygenic metabolic enzymes) ทำให้ไปขัดขวางการทำงานของเอนไซม์และทำให้เชื้อแบคทีเรียขาดอาหารและตายในที่สุด [36]

2.13 ความปลอดภัยของอนุภาคเงินระดับนาโน

อนุภาคเงินระดับนาโนในปัจจุบัน พบได้มากขึ้นในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น การบรรจุหีบห่ออาหาร สิ่งทอที่ต้านทานการเกิดกลิ่น อุปกรณ์เครื่องใช้ในบ้าน และอุปกรณ์ทางการแพทย์ รวมถึงผ้าปิดแผล เมื่อไม่นานมานี้มีการตระหนักถึงความเสี่ยงของอนุภาคเงินระดับนาโนต่อการเป็นพิษต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม มีความเป็นไปได้ที่อนุภาคเงินระดับนาโนจะส่งผลกระทบต่อแบคทีเรียที่มีประโยชน์ในสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินและน้ำ หรือทำให้แบคทีเรียที่มีโทษเกิดการต้านทานในการยับยั้งต่ออนุภาคเงินระดับนาโน

ด้วยเหตุที่อนุภาคเงินระดับนาโนมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ จึงเป็นไปได้ว่าอนุภาคเงินระดับนาโนอาจทำลายแบคทีเรียที่มีประโยชน์ที่อยู่ในระบบนิเวศน์ ไม่ว่าจะเป็นแบคทีเรียในดินที่มีบทบาทสำคัญในการตรึงไนโตรเจนและย่อยสลายสารอินทรีย์ แบคทีเรียที่ช่วยรักษาน้ำให้สะอาดด้วยการนำไนเตรตออกจากการปนเปื้อนในแหล่งน้ำจากการใช้ปุ๋ยมาก

เกินไป นอกจากนี้แบคทีเรียก่อให้เกิดความสัมพันธ์ในการอยู่ร่วมกันกับสัตว์ตั้งแต่แมลงจนถึงมนุษย์ แบคทีเรียหลายชนิดช่วยในเรื่องการย่อยอาหารให้กับสัตว์ที่มันอาศัยอยู่ และบางชนิดยังทำหน้าที่มากไปกว่านั้น แบคทีเรียบางชนิดผลิตสารปฏิชีวนะช่วยป้องกันตัวต่อจากโรคที่เกิดจากเชื้อรา แบคทีเรียบางชนิดผลิตแสงได้ซึ่งช่วยปลาหมึกฮาวายในการพรางตัวจากศัตรู

สำหรับแบคทีเรียที่มีโทษ มีความเป็นไปได้ว่าอนุภาคเงินระดับนาโนอาจเพิ่มความต้านทานในการฆ่าเชื้อของแบคทีเรียที่เป็นอันตรายได้ และอาจต้านทานต่อยาฆ่าเชื้อที่มีอยู่ในปัจจุบันด้วย

อนุภาคเงินระดับนาโนก็เป็นอันตรายอย่างมากต่อปลา สาหร่าย สัตว์น้ำพวกกุ้ง ปู พืชบางชนิด รา และแบคทีเรีย อนุภาคเงินระดับนาโนยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ด้วยระดับความเข้มข้นที่ต่ำกว่าโลหะหนักชนิดอื่นๆ และความเป็นพิษของอนุภาคเงินระดับนาโนมากกว่าอนุภาคเงิน อนุภาคเงินมีความเป็นพิษสูงกว่าโลหะอื่นที่อยู่ในรูปของอนุภาคเงินระดับนาโน เหมือนกันการศึกษาในหลอดทดลอง (In vitro) แสดงให้เห็นว่าอนุภาคเงินระดับนาโนมีความเป็นพิษต่อเซลของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมไม่ว่าจะเป็นเซลล์ตับ สเต็มเซลล์ และแม้แต่เซลล์สมอง

ดังนั้นการใช้ประโยชน์จากอนุภาคเงินระดับนาโน ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ จึงควรศึกษาข้อมูลด้านอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านพิษวิทยา หรือด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมให้แน่ชัดเสียก่อน [37]

2.14 เครื่องมือในการวิเคราะห์

2.14.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM)

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านนั้น จะอาศัยลำแสงอิเล็กตรอนวิ่งไปชนกับวัตถุที่ต้องการจะส่อง โดยอาศัยการป้อนพลังงานไฟฟ้าไปยังขดลวดที่เป็นขั้วแคโทด เมื่อพลังงานมากพอ อิเล็กตรอนจะถูกปลดปล่อยออกมา แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นขั้วประจุไฟฟ้า มันก็จะวิ่งเข้าไปหาอนุภาคที่มีขั้วประจุต่างกันเช่นในอากาศ ทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถวิ่งเข้าไปชนเป้าชิ้นตัวอย่างหรือ sample ได้ ดังนั้นภายในกล้องจุลทรรศน์จะต้องทำให้เป็นระบบสุญญากาศ และจะมี Condenser เป็นตัวเพิ่มความเข้มแสง ซึ่งจะใช้เป็นขดลวดพันรอบแท่งเหล็ก เพื่อเหนี่ยวนำให้ทิศทางของลำอิเล็กตรอนอยู่ในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจะให้เกิดความเข้มของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น

เมื่ออนุภาคหรือลำแสงอิเล็กตรอนสามารถวิ่งไปชนวัตถุหรือชิ้นงาน แสงก็จะถูกดูดกลืน และลำแสงส่วนที่เหลือก็จะสามารถทะลุผ่านชิ้นวัตถุไปยัง เลนส์วัตถุ Objective Len หลังจากนั้น ทางด้านล่างของเลนส์วัตถุจะมีระบบเลนส์ต่างๆเพื่อแยกการมองออก เป็นสองเส้นทาง ทำให้ได้ภาพเป็นสองมิติ โดย Fluorescence screen จะเป็นฉากรับภาพ

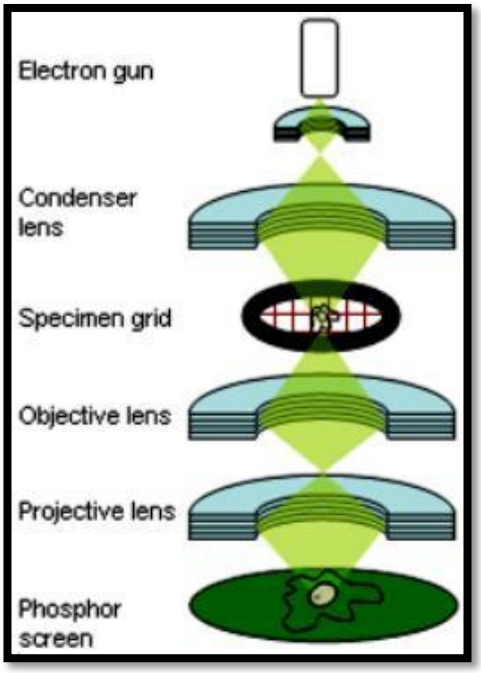
1.แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนมาจาก electron gun

2.อิเล็กตรอนที่ได้จะผ่าน condenser lens เพื่อรวมแสงให้ตกกระทบมายังตัวอย่างที่ตัดเป็นแผ่นบาง ๆ

3.ลำอิเล็กตรอนผ่านตัวอย่างไปยัง objective lens และ intermediate lens ซึ่งทำหน้าที่ในการขยายภาพ

4.ถูกขยายต่อโดย projector lens

5. ฉายภาพขยายลงบนฉากเรืองแสง (screen) หรือแผ่นฟิล์ม [38]



รูปที่ 2.27 แสดงหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) [39]

รูปที่ 2.28 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน(TEM) [39]

2.14.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scaning electron microscope, SEM)

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนั้นภายในคอลัมน์ (column) ของเครื่องจะมีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ซึ่งทำหน้าที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา (primary electron) เราจะควบคุมจำนวนอิเล็กตรอนนั้นด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง ๆ (high voltage) และใช้เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) โฟกัสให้อิเล็กตรอนนั้นตกกระทบชิ้นงาน และเมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบชิ้นงานจะเกิดอันตรกริยา (interaction) ได้สัญญาณแบบต่าง ๆ เช่น สัญญาณจากอิเล็กตรอนในชิ้นงานที่หลุดออกมา (secondary electron) อิเล็กตรอนที่กระดอนกลับ (bacscattered electron) หรือ x-ray สัญญาณแต่ละชนิดจะถูกจับโดย detector และแปลผลเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และแปลเป็นภาพในที่สุด

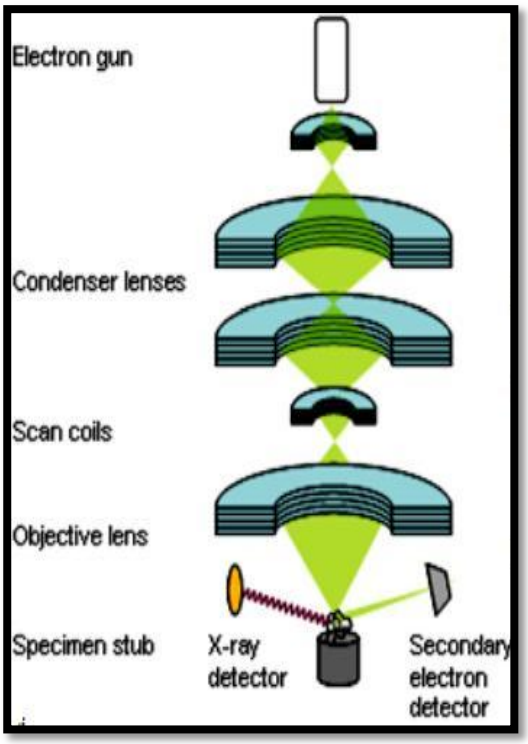
1. Electron gun ทำหน้าที่ผลิตกลุ่มอิเล็กตรอน

2.กลุ่มอิเล็กตรอนผ่าน condenser lens กลายเป็นลำอิเล็กตรอน

3.ลำอิเล็กตรอนจะผ่านobjective lens

4.ลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนผิวของชิ้นงาน เกิด secondary electron

5. สัญญาณจาก secondary electron ถูกแปลงไปเป็นสัญญาณปรากฏภาพบนจอรับภาพ (CRT) [38]



รูปที่ 2.29 แสดงหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) [39]

รูปที่ 2.30 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) [39]

2.14.3 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Ultraviolet and Visible Spectroscopy, UV-Vis Spectroscopy)

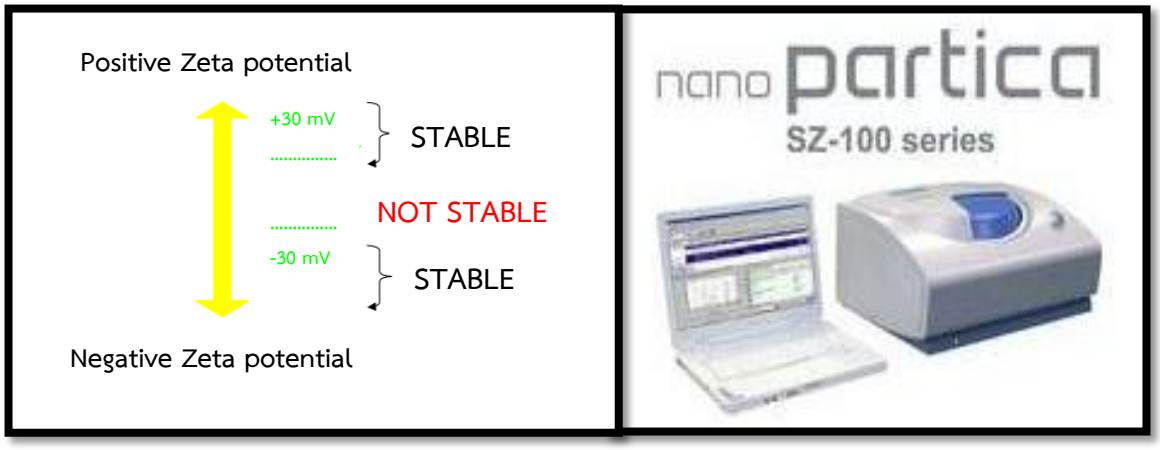
เทคนิคการวิเคราะห์สารโดยใช้หลักการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิล ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190-1,000 นาโนเมตร โดยนำสารตัวอย่างใส่ในเซลควอร์ต แล้ววางในบริเวณใกล้แหล่งกำเนิดแสง สารตัวอย่างจะดูดกลืนรังสี หรือแสงบางส่วนไว้ แสงที่ไม่ดูดกลืนจะผ่านออกมายังเครื่องวัดแสง (photomultiplier tube) เครื่องวัดแสงจะทำการวัดปริมาณแสงที่ออกมาโดยการหักล้างกับปริมาณของแสงก่อนดูดกลืน จากนั้นจะทำการประมวลผลเป็น curve หรือสเปกตรัม ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) และค่าความยาวคลื่น [40]

รูปที่ 2.31 แสดงเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectroscopy) [41]

2.14.4 เครื่องวัดค่าศักย์ซีต้า (Zeta sizer :ζ)

ค่าศักย์ซีต้าคือค่าความต่างศักย์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวอนุภาคกับศักย์ไฟฟ้าในชั้นสารละลาย ซึ่งค่าศักย์ซีต้าที่ได้สามารถทำนายค่าความคงตัวของการกระจายตัวของอนุภาคได้ อนุภาคที่มีค่าศักย์ซีต้าเป็นบวกหรือลบมากจะเกิดการหักล้างต่อกันเกิดเสถียรภาพการกระจายตัว แต่ถ้าอนุภาคที่มีค่าศักย์ซีต้าเป็นบวกหรือลบน้อย ทำให้ไม่มีแรงป้องกันอนุภาคอื่นที่เข้ามา ดั้งนั้นจึงไม่เกิดเสถียรภาพการกระจายตัวหรือเกิดการรวมกัน และที่สำคัญคือตรวจวัดวิเคราะห์ได้ในช่วงระยะที่กว้างมาก (0.3 nm ~ 8 μm) ทั้งยังมีสมรรถนะสูงอีกด้วย

หลักการทำงานของเครื่องวัดศักย์ซีต้า คือการวัดอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคเมื่อทำให้อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า โดยใช้ Laser Doppler Velocimetry (LDV) โดยเครื่องวัดค่าศักย์ซีต้า ค่าศักย์ซีต้าขึ้นกับค่าพีเอช (pH) {ที่ pH ต่ำ: มีประจุบวกจาก H^+ มากเกินไป Zeta Potential เป็นค่าบวก ที่ pH สูง: มีประจุลบจาก OH^- มากเกินไป Zeta Potential เป็นค่าลบ} ซึ่งอนุภาคแขวนลอยจะเสถียร เมื่อศักย์ซีต้ามีค่ามากกว่า +30 มิลลิโวลต์ หรือน้อยกว่า -30 มิลลิโวลต์ ถ้าศักย์ซีต้ามีอยู่ในค่าช่วง -30 ถึง 30 มิลลิโวลต์ หรือประมาณศูนย์ สารแขวนลอยจะไม่เสถียร จะมีการเกาะตัวกันเป็นก้อนและตกตะกอน เรียกจุดที่ศักย์ซีต้า เท่ากับศูนย์ว่า “Isoelectric point” [42]



รูปที่ 2.32 (ซ้าย) แสดงแนวโน้มความเสถียรของอนุภาคแขวนลอย [44]

รูปที่ 2.33 (ขวา) แสดงเครื่องวัดค่าศักย์ซีต้า [44]

2.15 บทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.15.1 เคมีสีเขียวของการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโน โดยใช้สารสกัดจากใบบานไม่รู้โรยฝรั่งที่อุณหภูมิห้องและการออกฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย

ในปี ค.ศ. 2014 Deenadayalan Ashok Kumar, V. Palanichamy, SelvarajMohanaroopan ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโน โดยใช้สารละลายที่สกัดได้จากใบบานไม่รู้โรยฝรั่ง (Alternanthera dentate leaf) ในการรีดิวซ์ไอออนของเงินให้เป็นอนุภาคเงินในระดับนาโน ในการวิจัยได้ทำการยืนยันข้อมูลของอนุภาคเงินในระดับนาโนด้วย Surface Plasmon Resonance (SPR) ที่ 430 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง UV-visible spectrophotometer การสังเคราะห์อนุภาคนาโนในครั้งนี้ได้ศึกษาคุณลักษณะของอนุภาคเงินในระดับนาโนโดยใช้เครื่อง UV-visible spectrophotometer พบว่ามี SPR ที่ 430 นาโนเมตรเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) เครื่อง X-ray Diffactometer (XRD) เครื่อง Scaning Electron Microscopy (SEM) และ เครื่อง Transmission Electron Microscope (TEM) พบว่าอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอยู่ในช่วง 50-100 nm วิธีการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิห้อง รวดเร็ว ง่าย ถูก และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สารละลายคอลลอยด์ของอนุภาคเงินในระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้มีความเสถียรมากกว่า 4 เดือน และสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ชนิดแกรมลบ เช่น Escherichia coli, Klebsiella pneumonia, Pseudomonas aeroginosa, และ Enterococcus faecalis. [45]

2.15.2 เคมีสีเขียวของการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโน โดยใช้สารสกัดจากฝิ่นหนามและการประเมินผลการออกฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย

ในปี ค.ศ. 2010 Nitin Khandelwal และคณะ ได้เห็นถึงความต้องการทางการค้าในด้านนาโนเทคโนโลยี เนื่องจากอนุภาคนาโนสามารถใช้งานได้อย่างกว้างขวาง เช่น อิเล็กทรอนิกส์ ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี ด้านเคมี ด้านพลังงาน ด้านการแพทย์ การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแบบดั้งเดิมนั้นจะใช้เทคนิคเคมีแบบเปียก ซึ่งการสังเคราะห์โดยใช้สารเคมีนั้นค่อนข้างจะใช้สารที่เป็นพิษและสามารถติดไฟได้ ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้เทคนิคที่มีราคาถูก มีประสิทธิภาพ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในการสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโน ทำได้จากสารละลายไนเตรต และสารละลายสกัดจากฝิ่นหนาม (Argimonemaxicana leaf) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์(reducing agent) และสารเพิ่มความคงตัว (Capping agent) และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง 4 ชั่วโมง ทำการยืนยันอนุภาคนาโนด้วย UV-VIS spectrophotometerเกิดการดูดกลืนแสงช่วง 440 nm และจากการวิเคราะห์ด้วย XRDและSEM พบว่าขนาดของอนุภาคมีขนาดอยู่ที่ 25-50 nm และมีโครงสร้างแบบลูกบาศก์(cubic structure) อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้สามารถยับยั้งแบคทีเรียชนิด Escherichia coli และ

Pseudomonas aeruginosa วิเคราะห์ด้วยวิธี Standard disc diffusion และสามารถยับยั้งเชื้อราชนิด Aspargillusflavusวิเคราะห์ด้วยวิธี Food poisoning ดังนั้นซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้นั้นมีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียได้ดี และสังเคราะห์ได้ง่ายและสะดวกรวดเร็ว [46]

2.15.3 เทคนิค In situ และเคมีสีเขียวของการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนและการต้านเชื้อแบคทีเรีย

ในปี ค.ศ. 2013 Is mail Aiad และคณะ ได้ทำการศึกษา one-step in situ และการสังเคราะห์เคมีสีเขียวของซิลเวอร์นาโน โดยใช้แสงอาทิตย์เป็นตัวรีดิวซ์ (reducing agent) ร่วมกับการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดแคทไอออนิก ทำหน้าที่เป็นสารรักษาเสถียรภาพ (Stabilizing agent) ในปฏิกิริยารีดักชัน การสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโนด้วยแสงอาทิตย์จะเกิดการเปลี่ยนสีที่รวดเร็วกลายเป็นสารละลายสีเหลือง ทำการยืนยันด้วย TEM, DLS, EDXและ FTIR จาก TEM พบว่าได้โครงสร้างของซิลเวอร์นาโนแบบทรงกลม (Spherical) และแบบหกมุม (Hexagonal) ซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมบวก (Bacillus pmilusและ Micrococcus luteus) และชนิดแกรมลบ (Pseudomonas aeuroginosa และ Sarcinalutea) [47]

2.14.4 เคมีสีเขียวของการสังเคราะห์และการศึกษาคุณสมบัติของอนุภาคเงินระดับนาโนโดยใช้สารสกัดจากผักขมหินเพื่อใช้ในการต้านเชื้อแบคทีเรีย

ในปี ค.ศ. 2013 P.P.N. Vijay Kumar และคณะ ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโน โดยใช้สารสกัดผักขมหิน(Boerhaaviadiffusa plant) เป็นตัวรีดิวซ์(reducing agent) ในการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่สะอาด ไม่มีสารพิษ เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม เมื่อเทียบกับการใช้สารเคมีการสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโน ทำได้โดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตผสมกับสารที่สกัดจากผักขมหิน (Boerhaaviadiffusa plant) นำไปบ่ม 24 ชั่วโมง สารละลายจะเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาล การยืนยันอนุภาคซิลเวอร์นาโนได้ข้อมูลดังนี้ เมื่อใช้ TEM ทำให้ทราบว่าซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างแบบทรงกลม (Spherical) และมีขนาดเฉลี่ย 25 nm และเกิดการดูดกลืนแสงที่ 418 nm วัดด้วย UV-VIS spectrophotometer และจากการวิเคราะห์ด้วย FTIR พบว่า เกิดพีคที่ 3,440 cm^{-1} ของพันธะ O-H และพีคที่ 1380 cm^{-1} ของหมู่ NO^{-}_{3}ในการทดลองนี้ได้ทดลองกับเชื้อแบคทีเรีย 3 ชนิดที่พบในปลา พบว่า MIC ของซิลเวอร์นาโนคือ 50 ug/ml ที่ทำให้เกิดพื้นที่ยับยั้งการเติบโตของเชื้อแบคทีเรียได้ดีที่สุด กับแบคทีเรียชนิด F. branchiophylum (15 mm) เมื่อเปรียบเทียบกับ A.hydrophilla (14mm) และ P.fluorescence (12mm) เมื่อเปรียบเทียบกับ $AgNO_3$ ความเข้มข้น 0.1 M พบว่าพื้นที่การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเกิดขึ้นน้อยกว่า และเมื่อทดสอบการยับยั้งแบคทีเรียด้วยสารสกัดผักขมหิน (Boerhaaviadiffusa plant) ไม่พบพื้นที่การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย [48]

2.15.5 การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนด้วยรังสีไมโครเวฟร่วมกับโซเดียมอะจิเนตและการศึกษาการต้านเชื้อแบคทีเรีย

ในปี ค.ศ. 2013 Xihui Zhao และคณะ ได้ทำการสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโน ด้วยวิธีการสังเคราะห์ด้วยไมโครเวฟ โดยใช้โซเดียม อัลจิเนตเป็นตัวรีดิวซ์(reducing agent) และสารรักษาเสถียรภาพ(Stabilizing agent) ตัวรีดิวซ์ที่ใช้ในการเตรียมอนุภาคนาโนมีหลายชนิด เช่น $NaBH_4$, ไฮดราซีน, N,N-dimethylformamideหรือพวกสารประกอบอินทรีย์ เป็นต้น สารพวกนี้เกิดปฏิกิริยาได้สูง แต่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม กำจัดยาก ดังนั้นวิธีการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมทำได้โดยการใช้ตัวรีดิวซ์ที่เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ เช่น Chitosan, Soluble starch, Polypeptied, Heparin, Hyaluronanเป็นต้น ในการเตรียมอนุภาคนาโน ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ โซเดียม อัลจิเนต เพราถูกใช้อย่างกว้างขวางในด้านอาหาร เครื่องดื่ม และอุตสาหกรรมยา เพราะมีพิษต่ำ ราคาถูก เป็นต้น ในการสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโน หมู่คาร์บอกซิลของโซเดียม อัลจิเนต จะฟอร์มตัวกับ Ag^+ และหมู่ไฮดรอกซิลจะเป็นตัวรีดิวซ์ให้ Ag^+ เปลี่ยนเป็น Ag^0 จากการสังเคราะห์ด้วยไมโครเวฟ สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีน้ำตาลอย่างช้าๆ เขาได้ทำการศึกษาช่วงระยะเวลา 1-10 นาที ความเข้มข้นของโซเดียม อัลจิเนต 0.1%-1.5% ค่า pH 5-11 และความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรต 0.4-0.8 mmol/L จากนั้นพบว่าเกิดแถบ SPR ที่ 417 nm ด้วย UV-VIS spectrophotometer และใช้เครื่อง TEM พบว่าอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้มีขนาด 10-15 nm ผลของการต้านเชื้อแบคทีเรียทำการศึกษา 2 สภาวะ คือสภาวะที่ใช้ 0.5% ของโซเดียม อัลจิเนต และ 1.0% ของโซเดียม อัลจิเนตพบว่า ซิลเวอร์นาโนที่เตรียมจาก 0.5% ของโซเดียม อัลจิเนต สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมบวก (S. aureus) และชนิดแกรมลบ (E. coli) ได้สูงกว่าซิลเวอร์นาโนที่เตรียมจาก1.0% ของโซเดียม อัลจิเนต เพราะซิลเวอร์นาโนที่เตรียมจาก 0.5% ของโซเดียม อัลจิเนต มีขนาดเล็กกว่า [49]

2.15.6 การยึดเกาะอนุภาคเงินระดับนาโนที่สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียบนเส้นใยสิ่งทอด้วยเทคนิค Layer-by-Layer

ในปี ค.ศ. 2006 Stephan T. Dubas และคณะ ได้ทำการยึดเกาะ antimicrobial AgNPs บนสิ่งทอที่เป็นเส้นใย ด้วยเทคนิค Layer By Layer ในการสังเคราะห์AgNPs เตรียมได้จากการรีดิวซ์ด้วยแสงจาก UV Lamp เพื่อรีดิวซ์สารละลาย $AgNO_3$ ที่รวมกับ PMA เมื่อสารละลายสัมผัสกับแสงจาก UV Lamp จะค่อยๆเปลี่ยนสีเป็นสีชมพูจนสุดท้ายจะได้สารละลายสีแดง เขาได้ใช้เทคนิค Layer By Layer ในการยึดเกาะ anionic poly(PMAcapAg) บนไนลอนหรือเส้นไหม ร่วมกับ Cationic poly(PDAD) จากการสังเคราะห์ AgNPs ทำการติดตามโดยใช้ UV-VIS spectrophotometer พบการเกิดดูดกลืนแสงที่ 400-415 นาโนเมตร ส่วนอนุภาคที่ยึดเกาะด้วยเทคนิค Layer By Layer ติดตามโดยใช้เครื่อง Reflectance spectrophotometerในส่วนของการต้านเชื้อแบคทีเรีย ได้ทดสอบกับเชื้อ

ชนิด Staphylococcus areus กับเส้นไหม และไนลอน ที่ทำการเคลือบ 0, 10 และ 20 ชั้นของ PDAD/PMAcapAgและทำการจุ่มลงในสารละลายแบคทีเรีย พบว่าเส้นไหมที่เคลือบ PDAD/PMAcapAg 10 และ 20 ชั้น สามารถต้านเชื้อ Staphylococcus areus ได้ 50% และ 80% ตามลำดับ และ ไนลอนที่เคลือบ PDAD/PMAcapAg 10 และ 20 ชั้น สามารถต้านเชื้อ Staphylococcus areus ได้ 0% และ 50% ตามลำดับ [50]

2.15.7 การตรึงอนุภาคเงินระดับนาโนบนเส้นใยสิ่งทอด้วยเทคนิค PEM

ในปี ค.ศ. 2005 Panittamat Kumlangdudsana ได้ศึกษาการตรึงอนุภาคเงินนาโนบนเส้นใยสิ่งทอด้วยเทคนิค PEM งานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์อนุภาคเงินนาโนจากสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตที่มีพอลิเมทาคริลิคแอซิด(PMA) เป็นโพลีอิเล็กโทรไลต์ ด้วยปฏิกิริยาโฟโตรีดักชันภายใต้แสงอาทิตย์ ทำการยืนยันการเกิดอนุภาคเงินนาโนด้วยเครื่อง Transmission Electron Microscope (TEM) และ เครื่อง UV-visible spectrophotometer อนุภาคเงินระดับนาโนที่ถูกล้อมรอบด้วย PMA ถูกนำมาตรึงบนเส้นใยไหมและไนลอน ด้วยการสร้างฟิล์มบางหลายชั้นกับพอลิไดอัลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (PDAD) การใช้เทคนิค layer-by-layer และยืนยันการเติบโตของฟิล์มด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer เส้นใยที่ผ่านการตรึงด้วยอนุภาคเงินนาโน สามารถต้านแบคทีเรียชนิด Staphylococcus aureus ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่เส้นใยที่ได้มีสีเหลืองแต่เมื่อได้รับแสงแดดจะเปลี่ยนเป็นสีแดงทันที เนื่องจากเกิดผลึกของซิลเวอร์คลอไรด์ ทำให้ความสามารถในการต้านเชื้อเกิดจากอนุภาคเงินนาโน และไอออนของเงินในรูปผลึกของซิลเวอร์ไนเตรต ดังนั้นเพื่อยืนยันว่าอนุภาคเงินนาโน เพียงอย่างเดียวที่สามารถทำให้เส้นใยต้านแบคทีเรียได้ จึงได้ทดลองเตรียมอนุภาคเงินนาโนจากสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ที่มี CoPSS และอัลจินิกแอซิด ซึ่งให้ปริมาณอนุภาคเงินนาโนสูงกว่า PMA และเป็นการลดผลของไอออนของเงิน นำอนุภาคของเงินที่ได้จากโพลีอิเล็กโทรไลต์ทั้ง 2 ชนิดมาตรึงลงบนเส้นใยไหม พบว่าเส้นใยที่ได้มีสีเหลืองและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับแสงแดด และพบว่าเส้นใยที่ได้สามารถต้านทานแบคทีเรียได้อย่างมีประสิทธิภาพ [51]

2.15.8 การใช้อนุภาคเงินระดับนาโนเพื่อตรวจหายูเรีย

ในปี ค.ศ. 2010 Nattanun Sap-Iam ได้ทำการตรวจหายูเรียในปัสสาวะ โดยใช้คุณสมบัติเชิงแสงของนาโนพาร์ทิเคิลของเงิน อนุภาคเงินนาโนถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยใช้พอลิเมอร์ชนิดประจุลบ คือ พอลิเมทาคริลิคแอซิด และการเกิดปฏิกิริยาโฟโตรีดักชันจากแสงยูวี โดยนาโนพาร์ทิเคิลของเงินที่สังเคราะห์ได้มีสีม่วงและดูดกลืนแสงที่ช่วง 515 nm และจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ได้หลังเติมสารละลายแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 2,000 ppm การเตรียมนาโนพาร์ทิเคิลของเงินเลือกใช้อัตราส่วนโดยความเข้มข้น (mM) ของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต: สารละลายอะซิติก-อะซิเตรต

บัฟเฟอร์: PMA เท่ากับ 10:10:10 และสังเคราะห์ภายใต้หลอดยูวีเป็นเวลา 120 นาที ขนาดอนุภาค และความต่างศักย์พื้นผิวของนาโนพาร์ทิเคิลของเงินที่ได้มีค่าเท่ากับ 12.82 ±3.47 นาโนเมตร และ-27.7±3.07 มิลลิโวลต์ ในการวิเคราะห์ปริมาณยูเรียจะใช้สารละลายยูเรียและการเติมยูรีเอส เอมไซม์กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อทำให้เกิดก๊าซแอมโมเนียก่อน และก๊าซที่เกิดขึ้นจึงจะทำปฏิกิริยากับนาโนพาร์ทิเคิล ในการตรวจหาปริมาณยูเรียจะทดลองโดยใช้ปริมาตรของนาโนพาร์ทิเคิลเท่ากับ 250 มิลลิลิตร และใช้อัตราการไหลของสารละลายเพื่อให้เกิดก๊าซแอมโมเนียเท่ากับ 600 มิลลิลิตรต่อนาที จากการทดลองพบว่านาโนพาร์ทิเคิลของเงินสามารถตรวจวัดยูวีได้ในช่วงความเข้มข้น 50-350 มิลลิโมลาร์ และใช้เวลาในการจรวจวัดไม่เกิน 5 นาที นาโนพาร์ทิเคิลที่ได้ สามารถใช้ตรวจหายูเรียในปัสสาวะเทียมได้โดยปราศจากการรบกวนของอิเล็คโทรไลต์ [52]

2.15.9 การสังเคราะห์และฤทธิ์การต้านเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคเงินระดับนาโนด้วยขนาดที่แตกต่างกัน

ในปี ค.ศ. 2008 G.A. Martinez-Castanon และคณะ ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนในขนาดที่แตกต่างกันคือ 7, 29 และ 89 นาโนเมตร เพื่อใช้ต้านเชื้อแบคทีเรีย ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน โดยใช้ gallic acid เป็นตัวรีดิวซ์(reducing agent) และสารรักษาเสถียรภาพ (Stabilizing agent) ปฏิกิริยาออกซิเดชันของหมู่ฟีนอลใน gallic acid มีหน้าที่รีดิวซ์ Ag^{+} และผลิตสารประกอบ quinoid ที่สามารถดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาคเงินระดับนาโนทำให้เกิดความเสถียร ในการเตรียมอนุภาคเงินระดับนาโนขนาด 7 และ 29 นาโนเมตร ปฏิกิริยารีดักชันจะต้องใช้ค่า pH ที่ 11 และ 10 ตามลำดับ ค่า pH จะทำให้หมู่ฟีนอลแตกตัวเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้อย่างรวดเร็ว ส่วนอนุภาคเงินระดับนาโน 89 นาโนเมตรใช้การแตกตัวของหมู่ฟีนอล โดยใช้แสง UV ในปฏิกิริยา photoionization ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จากการศึกษาด้วย TEM พบว่า อนุภาคเงินระดับนาโนขนาด 7 และ 29 นาโนเมตร มีลักษณะเป็นทรงกลม และขนาด 89 นาโนเมตร มีลักษณะคล้ายทรงกลม และการศึกษาโดยใช้ UV-Vis spectrophotometer พบว่าอนุภาคเงินระดับนาโนขนาด 7, 29 และ 89 นาโนเมตร เกิด SPR ขึ้นที่ 410, 425 และ 490 นาโนเมตร ตามลำดับ ในส่วนของการศึกษาฤทธิ์การต้านเชื้อแบคทีเรียได้ทำการทดสอบกับแบคทีเรียชนิด E. coli (ชนิดแกรมลบ) และแบคทีเรียชนิด S. aureus (ชนิดแกรมบวก) พบว่าอนุภาคเงินระดับนาโนขนาด 7 นาโนเมตร สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดได้ดีที่สุด เพราะมีขนาดเล็กที่สุด ทำให้สามารถเข้าถึงนิวเคลียสของแบคทีเรียได้ง่าย [53]

2.15.10 การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนที่เป็นตัวต้านเชื้อจุลินทรีย์ โดยทำการศึกษา E. coli ที่เป็นตัวแทนของแบคทีเรียชนิดแกรมลบ

ในปี ค.ศ. 2004 Ivan Sondi และBranka Salopek-Sondi ได้ทำการศึกษาการต้านฤทธิ์จุลินทรีย์ของอนุภาคเงินระดับนาโน โดยทำการทดสอบกับ E. coli ซึ่งเป็นตัวแทนของแบคที่เรียชนิดแกรมลบ ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนทำได้โดยใช้ ascorbic acid เป็นตัวรีดิวซ์ (reducing agent) และใช้ Daxad 19 surfactant (Sodium salt of a high-molecular-weight naphthalene sulfonate formaldehyde condensate) ทำหน้าที่เป็นสารรักษาเสถียรภาพ(Stabilizing agent) และทำการปั่นกวน 900 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง จากการศึกษาอนุภาคเงินระดับนาโนด้วย UV-Vis spectrophotometer พบว่าเกิด Plasmon band ที่ 405 นาโนเมตร ในการทดสอบการต้านฤทธิ์เชื้อจุลินทรีย์ทำใน Luria-Bertani (LB) บนแผ่น agar ที่เป็นของแข็งและได้ปรับเปลี่ยนความเข้มข้นที่แตกต่างกันของอนุภาคเงินระดับนาโน คือ 10 - 100 ug/cm^{3}พบว่า ที่ความเข้มข้น 10 ug/cm^{3}สามารถยับยั้งการเติบโตของแบคทีเรียได้ 70% และที่ความเข้มข้น 50-60 ug/cm^3 สามารถยับยั้งการเติบโตของแบคทีเรียได้ 100% [54]

2.15.11 การทดลองผลการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของอนุภาคเงินระดับนาโน

ในปี ค.ศ. 2006 Jun Sung Kim และคณะ ได้ทำการทดลองผลการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของอนุภาคเงินระดับนาโนอนุภาคเงินระดับนาโนที่เสถียรสามารถเตรียมได้จากสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ความเข้มข้น 1.0 x 10^{-3} M ปริมาตร 100 ml ผสมกับสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดร์ด ความเข้มข้น 2.0 x 10^{-3} M ปริมาตร 300 ml (สารทั้ง 2 ถูกละลายด้วยน้ำกลั่นที่ผ่านการกลั่น 3 ครั้ง) จากนั้นนำสารละลายทั้งสองไปให้ความเย็นก่อนที่จะผสมกัน และปั่นกวนประมาณ 60 นาที โดยที่การผสมกันนั้น ซิลเวอร์ไอออนจะถูกรีดิวซ์และรวมตัวกันได้สารละลายสีเหลือง อนุภาคเงินระดับนาโนที่เสถียรจะไม่เกิดการเปลี่ยนสีเมื่อผ่านไปหลายเดือนโดยไม่ต้องใช้สารรักษาเสถียรภาพ(Stabilizing agent) จากการศึกษาด้วย TEM พบว่าเกิดการกระจายตัวสูงและมีเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ย 13.5 นาโนเมตร และการศึกษาด้วย Surfactant Zeta Potential ของอนุภาคเงินระดับนาโน พบว่ามีประจุลบเพียงเล็กน้อยของโบเรทไอออน ที่ดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาคเงินระดับนาโน ในการทดสอบการต้านเชื้อจุลินทรีย์ เช่น ยีสต์, E. coli, S.aureus จะใช้วิธี agar disk diffusion โดยใช้ 10^7 Colony-forming units (CFU) ของเชื้อจุลินทรีย์ เพาะไว้บนแผ่น Muller Hinton agar (MHA) และใส่ 20 ul ของอนุภาคเงินระดับนาโนให้แพร่กระจายในความเข้มข้นของ 0.2-33 n MItraconazol สำหรับยีสต์ และ Gentamicin สำหรับ E.coliและ S.aureus จากนั้นนำแผ่น MHA ไปอบ ที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และพบว่าค่าของ Minimal

inhibitory concentration (MIC) ของอนุภาคเงินระดับนาโน คือ ยีสต์ > 6.6 nM, E.coli > 3.3 nM และ S.aureus > 33 nM [55]

2.15.12 เคมีสีเขียวการสังเคราะห์ของอนุภาคเงินระดับนาโนและการประยุกต์ใช้สำหรับควบคุมยุง

ในปี ค.ศ. 2014 Naba Kumer Mondal และคณะ ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนจากสารสกัด Partheniumhysterophorus (P. hysterophorus) เพื่อใช้ในการควบคุมยุง ชนิด Cx.quinquefasciatus ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนทำได้โดยการใช้สารละลายจากสารสกัด P.hysterophorus (ตัวรีดิวซ์) และสารสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ในอัตราส่วน 1:3, 1:5, 1:7 และ 1:9 และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง จะได้สารละลายเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแกมสีแดง สีที่ดีที่สุดได้จากอัตราส่วน 1:9 ในการทดสอบการควบคุมยุง ทำได้โดยการนำยุงชนิด Cx.quinquefasciatus ในระยะตัวอ่อนระหว่างการลอกคราบ ในน้ำข้าวที่มีสารละลาย 15% น้ำตาลซูโครส ปริมาตร 100 ml และผสมกับอนุภาคเงินระดับนาโน ที่ปริมาณแตกต่างกัน คือ 0.5 ml, 1 ml และ 2 ml เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากการศึกษาด้วย Fluoriscent micrograph พบว่าอนุภาคเงินระดับนาโนมีรูปร่างทรงกลม และจาก SEM พบว่าอนุภาคเงินระดับนาโนมีพื้นผิวขรุขระ และ FTIR พบพีคของหมู่ NH เกิดขึ้นที่ 1,635 cm^{-3} และหมู่ C=O ที่ 3,280 cm^{-3} จากการศึกษาการควบคุมยุง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของอนุภาคเงินระดับนาโน จะทำให้ % Mortality rate เพิ่มขึ้น [56]

2.15.13 เคมีสีเขียวของการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน เพื่อใช้เป็นตัวรับรู้แอมโมเนีย

ในปี ค.ศ.2008 Stephan T. Dubas และ VimolvanPimpan ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสีการเป็นตัวรับรู้แอมโมเนีย ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนโดยทั่วไปจะใช้ตัวรีดิวซ์ ซึ่งเป็นสารเคมี เช่น Hydrazine หรือ โซเดียมโบโรไฮไดร์ด ($NaBH_4$) ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงได้ทดลองใช้แสงจากหลอด UV ซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนทำได้โดยการผสม 25 ml ของ 10 mM สารละลาย PMA และ 25 ml ของ 10 mM สารละลาย $AgNO_3$ และทำการปั่นกวน 5 นาที (สารละลายทั้งสองเตรียมด้วยอะซีติก-อะซีเตรท บัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 100 mM ค่า pH = 4) จากนั้นนำสารละลายไปสัมผัสกับแสง UV พบว่าสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูอย่างช้าๆ จนสุดท้ายจะได้สีม่วง ใช้เวลาสัมผัสกับแสง UV เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเก็บไว้ในขวดสีทึบ ทำการศึกษาอนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ด้วย UV-Vis spectrophotometer พบว่าอนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ด้วย UV-Lamp จะได้สารละลายสีม่วง เกิดการดูดกลืนแสงที่ 515 นาโนเมตร ส่วนอนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ด้วย $NaBH_4$ จะได้สารละลายสีเหลือง เกิดการดูดกลืนแสงที่ 400 นาโนเมตร

เมื่อศึกษาด้วย TEM พบว่าอนุภาคเงินระดับนาโนมีรูปร่างเป็นทรงกลมและมีขนาดเฉลี่ย 8 นาโนเมตร จากการนำอนุภาคเงินระดับนาโนไปประยุกต์ใช้ในการเป็นตัวรับรู้แอมโมเนีย พบว่าสามารถตรวจวัดแอมโมเนียได้ในช่วง 5-100 ppm และพบว่าเมื่อเติมแอมโมเนีย 0 ppm จะมีการดูดกลืนแสงที่ 515 นาโนเมตร (สีม่วง) และเมื่อเติมแอมโมเนีย 100 ppm จะมีการดูดกลืนแสงที่ 460นาโนเมตร (สีเหลือง) [57]

2.15.14 เคมีสีเขียวของการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนโดยการใช้ Artocarpusheterophyllus Lam. Seed extract เพื่อใช้ในการต้านเชื้อแบคทีเรีย

ในปี ค.ศ. 2012 Umesh B. Jagtap และ Vishwas A. Bapat ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน โดยใช้สารที่ได้จากธรรมชาติ เป็นวิธีที่สะอาด ไม่ใช้ตัวทำละลายที่มีพิษ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน ทำได้โดยปฏิกิริยารีดักชันของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต โดยใช้ Artocarpusheterophyllus Lam. Seed power extract (ASPE) ความเข้มข้น 2, 4, 6, 8 และ 10 %w/v และเติมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ความเข้มข้น 6 mM ในอัตราส่วน 1:4 ผสมกันและเก็บใน autoclave ที่ความดัน 15 psi, 121 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที และทำการทดลองเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท 2, 4, 6, 8 และ 10mM และเติม ASPE (6% w/v) ในอัตราส่วน 1:4 จากนั้นนำสารละลายไปเซนทิฟิวซ์ เมื่อทำการศึกษาอนุภาคเงินระดับนาโนด้วย UV-Vis spectrophotometer พบการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 400-500 นาโนเมตร พวกเขาได้เลือกสภาวะ 6 mM AgNO3 และ 6% w/v ASPE ในการศึกษา เมื่อศึกษาด้วย TEM พบว่า อนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นมีรูปร่างขรุขระ และมีขนาดแตกต่างกัน อยู่ในช่วง 3-25 นาโนเมตร และผลการต้านเชื้อแบคทีเรีย พบว่า ASPE ไม่สามารถต้านเชื้อแบคทีเรีย ผลการต้านเชื้อแบคทีเรียทั้งชนิดชนิดแกรมบวก เช่น Bacillus cereus, Bacillus subtilis, Salmonella typhimurium, Staphyloccocusaureusและแกรมลบ เช่น Proteus vulgaris, Pseudomonas aeruginosaรายงานด้วยค่า Inhibition zone diameter พบว่า Bacillus cereus ได้ 9 mm, Bacillus subtilisได้ 12 mm, Salmonella typhimuriumไม่พบการต้านเชื้อ, Staphyloccocusaureus ได้ 15 mm, Proteus vulgarisไม่พบการต้านเชื้อและPseudomonas aeruginosaได้ 6 mm [58]