



บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 เงินคอลลอยด์

เงินคอลลอยด์เป็นคอลลอยด์ชนิดหนึ่ง ซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาคของแข็งที่แขวนลอยกระจายตัวอยู่ในของเหลว ขณะที่ของแข็งคือ อนุภาคที่มีขนาดเล็กมากของโลหะเงิน และของเหลวคือน้ำหรือตัวทำละลายที่ใช้ สำหรับคำว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากในกรณีนี้ หมายถึง อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร ดังนั้นคอลลอยด์ของเงินก็จะมีอนุภาคของเงินนาโนแขวนลอยอยู่ และประกอบด้วยรูปแบบอื่นของเงิน คืออไอออนเงินอยู่ด้วย ส่วนความแตกต่างระหว่างสารละลาย(solution) คอลลอยด์(colloids) และสารแขวนลอย(suspensions) เมื่อแบ่งตามขนาดของอนุภาคมีดังนี้

สารละลาย	$< 10^{-9}$ เมตร	(น้อยกว่า 1 นาโนเมตร)
คอลลอยด์	$10^{-9} - 10^{-6}$ เมตร	(1 นาโนเมตร - 1000 นาโนเมตร)
สารแขวนลอย	$> 10^{-6}$ เมตร	(มากกว่า 1000 นาโนเมตร)

2.1.1 รูปแบบของเงิน(Silver forms)

เป็นที่ทราบกันว่าเงินคอลลอยด์ เป็นสารด้านแบคทีเรียที่มีประสิทธิภาพสูง นอกเหนือจากนี้ อนุภาคของเงินซึ่งมีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรก็เป็นที่น่าสนใจทั้งในแง่ของการวิจัย และเชิงเทคโนโลยี จึงได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย แต่อย่างไรก็ตามมีการเกิดความสับสนกับคำว่าไอออน(ions) และอนุภาคที่มีประจุ(charged particles) แล้วใช้ทั้งสองคำนี้สลับกัน เมื่อต้องการอธิบายถึงเรื่องเงินคอลลอยด์ มีผู้กล่าวว่าอนุภาคคอลลอยด์คืออะตอมเดี่ยวของเงิน และมีบางครั้งที่เขียนว่าอนุภาคเงินมีประจุเป็นบวก(positive charge) ซึ่งเป็นเรื่องเข้าใจผิด

เนื่องจากในเงินคอลลอยด์ประกอบด้วยเงิน 2 รูปแบบ คือ อนุภาคโลหะเงิน และอไอออนเงิน เราเรียกจำนวนเงินรวมที่อยู่ในเงินคอลลอยด์นี้ว่า ความเข้มข้นของเงิน(silver concentration) ซึ่งก็คือผลรวมของเงินในรูปของอนุภาคโลหะ และเงินที่อยู่ในรูปอไอออน มีเครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดความเข้มข้นของอไอออนเงินในเงินคอลลอยด์ นั่นคือ อะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโทรสโกปี(Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) ซึ่งให้ผลแม่นยำ โดยจะวัดความเข้มข้นของอไอออนเงินด้วยหลักการดูดกลืนเชิงอะตอม ซึ่งกำหนดว่าตอนแรกอนุภาคเงินจะต้องถูกกำจัดโดยการเหวี่ยงออกไปก่อน แล้วก็เหลือไว้แต่อไอออนเท่านั้น นอกจากนี้ ยังมีเครื่องมืออไอออนซีเล็กทีฟอิเล็กโทรด(Ion Selective Electrode, ISE) ใช้

สำหรับวัดอออนเงินในสารละลายเท่านั้น ทั้งนี้การวัดด้วย ISE มีความแม่นยำน้อยกว่า AAS ขณะที่ความเข้มข้นของอนุภาคเงิน จะหาได้จากการลบความเข้มข้นของอออนเงิน ออกจากความเข้มข้นรวมของเงิน

ปกติแล้วการที่จะเรียกว่าเงินคอลลอยด์ จะใช้เรียกเมื่อมีอออนเงิน และอนุภาคเงินอยู่ในเช่น มีอออนเงิน อยู่ 75-99 % และมีอนุภาคเงินอยู่เพียง 1-25 % แต่ถ้ามีอออนเงินอยู่เท่านั้นโดยไม่มีอนุภาคโลหะเงิน กรณีนี้จะไม่เรียกว่าคอลลอยด์ สำหรับสารละลายที่มีอนุภาคเงินอยู่เท่านั้นโดยที่ไม่มีอออนเงินเลย กรณีแบบนี้จะเรียกว่าคอลลอยด์บริสุทธิ์(pure colloid) ดังนั้นการวัดคอลลอยด์ของเงินในเชิงปริมาณ ก็คือการวัดหาจำนวนที่เป็นเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคเงินนั่นเอง ในเชิงอุดมคติ ปริมาณของเงินทั้งหมดจะอยู่ในรูปของอนุภาคของเงิน ไม่ใช่อออนเงิน

2.1.1.1 อะตอมของเงิน (silver atoms)

อะตอมของเงินเดี่ยวๆ เป็นอนุภาคของเงินที่มีขนาดในระดับอะตอม ซึ่งถือว่ามีความเล็กที่สุดที่ยังคงความเป็นโลหะเงิน เส้นผ่านศูนย์กลางของอะตอมของเงิน คือ 0.288 นาโนเมตร การพบอนุภาคโลหะเงินที่ประกอบด้วยอะตอมเดี่ยวของเงินนั้น เป็นไปได้ในทางทฤษฎี ซึ่งในทางปฏิบัติอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า และประกอบด้วยอะตอมจำนวนมาก หมายความว่า อนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นาโนเมตร จะประกอบด้วยอะตอมของเงิน 31 อะตอม และอนุภาคของเงินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นาโนเมตร จะประกอบด้วยอะตอมของเงิน 3900 อะตอม อนุภาคของเงินที่พบในคอลลอยด์เงินจะมีขนาดอยู่ในช่วง 5-200 นาโนเมตร เป็นต้น

2.1.1.2 อออนเงิน (silver ions)

อออนเงินคืออะตอมเดี่ยวของเงินที่ขาดอิเล็กตรอนวงนอกสุดไป 1 ตัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอออนเงินคือระดับนาโนเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าอะตอมเงินที่ยังไม่ได้เสียอิเล็กตรอนไป อะตอมของเงินมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนดังนี้คือ $[Kr] 4d^{10} 5s^1$ และเมื่อขาดอิเล็กตรอนไป หมายถึง อิเล็กตรอน $5s^1$ หายไป การที่อะตอมขาดอิเล็กตรอนไปทำให้เกิดเป็นอออนเงินบวก และทำให้สมบัติทางกายภาพก็เปลี่ยนแปลงไปด้วย โลหะเงินไม่สามารถละลายน้ำได้ แต่อออนเงินมีความสามารถในการละลายได้ซึ่งสามารถวัดได้ในชนิดจำกัด แต่เงินสามารถละลายในกรดไนตริกเพื่อฟอร์มตัวเป็นซิลเวอร์ไนเตรตได้เมื่อเงินละลายจะไม่สามารถมองเห็นได้แม้ว่าจะใช้กล้องชนิดพิเศษ และมันก็ไม่สะท้อนแสงด้วย แม้ว่าสารละลายจะมีอออนเงินบวก Ag^+ อิมตัวอยู่ แต่ก็ไม่เกิดปรากฏการณ์ทินดอลล์เอฟเฟ็ค(Tyndall effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่แสงกระเจิงออกไป เมื่อผ่านแสงเข้าไปในตัวกลางที่มีอนุภาคขนาดเล็กๆ แต่ในเงินคอลลอยด์สามารถเกิดขึ้นได้ แม้จะมีความเข้มข้นอยู่น้อยมาก คือ 0.1 พีพีเอ็ม

2.1.1.3 อนุภาคที่มีประจุ (charged particles)

อนุภาคเงินที่แขวนลอยอยู่ในน้ำบริสุทธิ์แล้วฟอร์มตัวเป็นคอลลอยด์ จะถูกสมมติว่ามีประจุลบ ประจุบนอนุภาคได้มาจากการที่อนุภาคดูดกลืนประจุที่อยู่ในสารละลายมาไว้ที่ผิว ประจุบนผิวกระจายตัวแบบมีศักย์ไฟฟ้ารอบๆ อนุภาค ค่าศักย์ไฟฟ้าที่สลิปปีงเพลน(slipping plane) มักจะถูกกำหนดว่าเป็นซีต้าโพเทนเชียล(zeta potential) ทั้งนี้ slipping plane เป็นชั้นของเหลวในเชิงไฟฟ้าอยู่ระหว่างชั้น 2 ชั้น ซึ่งอยู่รอบอนุภาค โดยชั้นใน(stern layer) เป็นบริเวณที่ประจุสร้างพันธะกันอยู่อย่างแข็งแรง และชั้นนอก(diffuse) เป็นบริเวณที่เกี่ยวข้องกับพันธะน้อยกว่า ในสารละลายเงินคอลลอยด์ที่มีไอออนเงินนั้น จะมีค่าซีต้าโพเทนเชียลอยู่ระหว่าง -35 ถึง -45 มิลลิโวลต์ ซึ่งขึ้นกับกระแสประจุ กรณีของคอลลอยด์ที่ไม่มีไอออนเงินอยู่จะมีค่านี้ติดลบมากกว่า คือ -50 มิลลิโวลต์ การที่ปริมาณ ไอออนเงินมากกว่า จะทำให้ได้ค่าซีต้าโพเทนเชียลติดลบน้อยกว่า เนื่องจากไอออนเงินบวกจะไปทำให้ประจุบนอนุภาคเป็นกลาง

2.1.2 สมบัติของเงิน

ได้มีการรวบรวมสมบัติของเงิน โดยได้แบ่งการพิจารณาตามรูปแบบ(forms)ต่างๆของเงินดังนี้ คือ อนุภาคเงิน อะตอมของเงิน และไอออนเงิน ดังตารางที่ 2.1^[5]

2.1.3 วิธีการสังเคราะห์อนุภาคเงิน และการเอาคอลลอยด์ของเงินไปใช้ประโยชน์

ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับคอลลอยด์ของเงิน โดยเน้นศึกษาวิธีการเตรียมและการนำไปใช้งาน ซึ่งพบว่าวิธีการเตรียมตามหลักการฟอร์มตัวอยู่ 2 แบบใหญ่ๆ คือ แบบควบแน่น (condensation) และแบบการกระจาย (dispersion) โดยในแต่ละแบบแตกต่างกันตรงที่ วิธีแบบควบแน่น เป็นการทำให้อะตอมเดี่ยวหรือโมเลกุลเกิดการรวมตัวกันขึ้นเป็นสิ่งที่มีความใหญ่กว่า ส่วนวิธีแบบการกระจายเป็นการทำให้ตะกอน ที่เกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคคอลลอยด์ แยกออกจากกันแล้วให้กระจายตัวกลับเป็นสารละลายคอลลอยด์เหมือนเดิม เช่น การใช้เลเซอร์(laser ablation) เป็นต้น

2.1.3.1 การสังเคราะห์เงิน

การเตรียมหรือการสังเคราะห์อนุภาคเงินมีหลักการทั่วไปดังนี้ คือ ต้องมีการรีดิวซ์เกลือของเงิน (silver salt) ซึ่งเป็นไอออนเงินบวก(Ag^+)ให้กลายเป็นอนุภาคโลหะเงินซึ่งมีไอออนเป็นศูนย์(Ag^0) ด้วยการใช้วิธีการบางอย่าง เช่น การรีดิวซ์ด้วยสารเคมี(สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์) การแผ่รังสีของรังสียูวีหรือรังสีแกมมา และการใช้เลเซอร์ เป็นต้น หลักการรีดิวซ์เงิน^[6] อาจถูกเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้



Ag^+ เป็นไอออนเงินที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการแตกตัวของสารละลายเกลือของเงิน โดยไอออนเงินนี้จะเกิดการดึงดูดทางไฟฟ้า(electrostatic) กับสารบางชนิดที่ผสมลงไป^[7] เช่น พอลิเมอร์ ซึ่งมีหน้าที่เป็นตัวทำละลาย และเป็นสารให้ความเสถียร^[1] และบางครั้งใช้เป็นสารสำหรับให้ Ag^+ ไปเกาะ(surfactant) เพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายหลังการรีดิวซ์ เป็นต้น เมื่อเกิดการรีดิวซ์ขึ้น Ag^+ จะได้รับอิเล็กตรอน แล้วกลายเป็น Ag^0 ซึ่งเป็นโลหะเงิน อยู่ตรงบริเวณตำแหน่งที่ Ag^+ ดึงดูดอยู่กับพอลิเมอร์ในตอนแรก ถ้าไม่ต้องการให้ Ag^0 เคลื่อนที่ก็จำเป็นต้องใช้พอลิเมอร์ที่มีความเข้มข้นสูงมาก และพอลิเมอร์สามารถทำให้อนุภาคเงิน Ag^0 เสถียรได้ เพราะพอลิเมอร์จะไปหุ้มอนุภาคที่เกิดขึ้นไว้^[8] เมื่อเวลาผ่านไปอนุภาคจะไม่โตขึ้น เพราะพอลิเมอร์ทำหน้าที่ขวางกั้นไม่ให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคเงินที่เกิดขึ้นตามเวลา

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของเงินในรูปอนุภาค อะตอม และไอออน

สมบัติ	อนุภาค	อะตอม	ไอออน
ความสามารถเพิ่มการนำไฟฟ้าในสารละลายที่ได้ใส่เงินเข้าไป	ไม่	ไม่	ใช่
ปรากฏการณ์ทินดอลล์ เอฟเฟ็ค(Tyndall Effect)	ใช่	ไม่	ไม่
สามารถถูกแยกออกจากสารละลายโดยการเหวี่ยง	ใช่	ไม่	ไม่
สมบัติจะเปลี่ยนไปเมื่อมีอิเล็กตรอนถูกเพิ่มเข้ามา	ไม่	ไม่	ใช่
สมบัติจะเปลี่ยนเมื่อมีการกำจัดอิเล็กตรอนออกไป	ไม่	ใช่	ไม่
พร้อมที่จะเกิดพันธะร่วมกับไอออนลบ	ไม่	ไม่	ใช่
พร้อมที่จะเกิดพันธะร่วมกับไอออนบวก	ไม่	ไม่	ไม่
มีความสามารถในการละลายน้ำ	ไม่	ไม่	ใช่
ยังคงคุณสมบัติเดิมเมื่ออยู่ในสารละลาย	ใช่	ไม่	ใช่
สามารถถูกวัดด้วยขั้วไอออน(Ion Selective Electrode)	ไม่	ไม่	ใช่
สามารถถูกวัดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer	ใช่	ใช่	ใช่
สามารถถูกวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์แสง(Spectrophotometer)	ไม่	ไม่	ใช่
มีไอออน	ไม่	ไม่	ใช่
อาจจะมีประจุบนอนุภาค	ใช่	ไม่	ไม่
สามารถสร้างพันธะร่วมกับ โมเลกุลที่มีขั้วได้	ใช่	ไม่	ใช่
สามารถถูกแยกออกจากสารละลายได้ด้วยการกรอง	ใช่	ไม่	ไม่
เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าในสารละลายตะกอนในสารละลายจะตกลงบนขั้วบวก	ไม่	ไม่	ใช่

2.1.3.1.1 การใช้เลเซอร์ (laser ablation)

การใช้เลเซอร์เป็นวิธีการทางกายภาพสำหรับการเตรียมคอลลอยด์ของเงิน ข้อดีของวิธีนี้คือ เป็นวิธีที่มีกระบวนการที่ง่าย สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง โดยที่ไม่มีสารเคมีคงค้างอยู่ อนุภาคที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งเพียงพอที่จะนำไปใช้กับงานที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง เช่น เป็น ฐานรองของ เครื่องเซอร์เฟสเอนฮานซ์รามานสแกทเทอริง(Surface enhanced Raman scattering, SERS) เพราะจะมีประจุค้างอยู่ที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์อยู่ ซึ่งจะให้ผลทางด้านกระบวนการดูดกลืน ความ เสถียรของอนุภาค และความสามารถในการวัดซ้ำของเครื่อง SERS บางครั้งอาจใช้แผ่นโลหะเงินรีดจน เบนมาใช้ด้วยก็ได้ สำหรับกรณีนี้จะได้อนุภาคเงินที่มีขนาดอยู่ในช่วงแคบคือ 30-40 นาโนเมตร ขึ้นกับ ความยาวคลื่น และความเข้มของเลเซอร์ที่ใช้ เวลาในการให้เลเซอร์ การมีคลอไรด์(chlorides) หรือสาร ให้อนุภาคมาจับตัวอยู่(surfactants) และตัวทำละลายที่ใช้ในการแผ่รังสี นอกจากนี้มีรายงานที่ W.C.Bell และคณะ^[9] ได้เตรียมและหาลักษณะของเงินคอลลอยด์ด้วยการใช้เลเซอร์ที่มีพลังงานสูง เนื่องจากว่าการ สกัดแร่ห้อนุภาคเงินโดยปกติที่วัดจาก TEM มีขนาดประมาณ 28.4 นาโนเมตร และจากการตรวจสอบ การดูดกลืนแสงพบว่าอนุภาคเงินอยู่ที่ตำแหน่ง 420 นาโนเมตร แต่สำหรับการรีดิวซ์ด้วยเลเซอร์นี้ ได้ อนุภาคเงินขนาด 5.4 นาโนเมตร ที่ตำแหน่ง 400 นาโนเมตร การเตรียมวิธีนี้ได้อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า เมื่อเทียบกับวิธีการอื่น โดยไม่เหมาะสมนักกับการเตรียมอนุภาคชนิดอื่นอย่าง แพลตินัม และพาลาเดียม เนื่องจากพบว่าเกิดการรวมตัวกัน และตกตะกอน ข้อจำกัดวิธีนี้คือ ต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง ต้องมี ทักษะในการใช้เลเซอร์พอสมควร

2.1.3.1.2 การรีดิวซ์โดยปฏิกิริยาของคลื่นอัลตราซาวด์ (The reduction by the action of ultrasound)

วิธีนี้จัดเป็นทั้งวิธีแบบการกระจาย(dispersion) และแบบควบแน่น(condensation) เนื่องจากคลื่น อัลตราซาวด์มีประสิทธิภาพที่จะสลายน้ำให้เป็นไฮโดรเจน และอนุมูลไฮดรอกซิล(hydroxyl radicals) นอกจากนี้การเติมสารปรุงแต่งที่เหมาะสมบางอย่าง จะทำให้เกิดอนุมูลของสารอินทรีย์(organic radicals) ด้วย ซึ่งอนุมูลเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นสารรีดิวซ์ที่จะไปรีดิวซ์ไอออนเงินบวก ซึ่งอยู่ในสารละลายเกลือของ เงิน(silver salt) กับสารเซอร์เฟคแทนท์(surfactant) ให้กลายเป็นโลหะเงินได้ ทั้งนี้การใช้คลื่นความถี่ 200 kHz จะได้ขนาดของอนุภาค 13 ± 3 นาโนเมตร

2.1.3.1.3 การรีดิวซ์โดยการแผ่รังสีแกมมา (The reduction by the action of gamma radiation)

การรีดิวซ์ด้วยการใช้รังสีแกมมามีข้อดีคือ มีการรบกวนจากสารเคมีอื่นๆ น้อยมาก ทั้งนี้การมี สารเคมีอื่นมารบกวน จะทำให้อนุภาคที่เกิดขึ้นอาจดูดกลืนเอาสารเคมีมาไว้บนผิวแล้วไปเปลี่ยนสมบัติ เฉพาะบางอย่างได้ ระหว่างการแผ่รังสีไปที่สารละลายเกลือของเงินภายใต้บรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจน

จะเกิดอิเล็กตรอนจากการทำปฏิกิริยากับน้ำ(hydrated electrons) และอะตอมของไฮโดรเจน ซึ่งจะปรีดิวิซ์อ็อกซิเจนบวกให้เป็นอนุมูลโลหะเงิน พร้อมกันนั้นจะมีอนุมูลไฮดรอกซิล(OH radicals)เกิดขึ้นจากการออกซิไดซ์อนุมูลเงินด้วย แล้วจะไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของไฮโดรเจน(จากบรรยากาศก๊าซไฮโดรเจน) ทำให้เกิดอะตอมของไฮโดรเจน ซึ่งจะไปช่วยรีดิวิซ์อ็อกซิเจนด้วย การรีดิวิซ์อ็อกซิเจน และการออกซิไดซ์อนุมูลเงินที่เกิดขึ้นพร้อมกันนั้น เป็นปฏิกิริยาที่เกิดแบบค่อยเป็นค่อยไป ซึ่งทำให้อนุภาคที่ได้ไม่มีสิ่งบกพร่อง(defect)ในโครงสร้าง นั่นคือจะได้อนุภาคที่มีการกระจายตัวแบบเดี่ยว ด้วยขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย 7 นาโนเมตร การรีดิวิซ์ด้วยวิธีนี้อาจจะได้รับผลกระทบจากสารเคมีอื่นๆในระบบ เช่น ทุ-โพรพานอล(2-propanol) เป็นต้น การมีสารประกอบเชิงซ้อนอื่นในระบบ อาจไปทำปฏิกิริยากับอ็อกซิเจนแล้วกลายเป็นสารที่มีความซับซ้อนซึ่งมีผลกับการแผ่รังสีแกมมาได้

2.1.3.1.4 การรีดิวิซ์โดยการแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ต (The reduction by the action of UV radiation)

วิธีการนี้จะทำให้ได้อนุภาคเงินที่มีสมบัติเดียวกันกับการรีดิวิซ์ด้วยหลักการแผ่รังสีแกมมา ดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ แต่มีข้อดี คือ มีกระบวนการเตรียมที่ง่ายกว่า และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองก็มีประสิทธิภาพ และมีราคาถูกกว่า ขณะที่ Henglein A.^[1] ได้ทำการทดลองโดยการใช้หลอดไฟฉายปรอท (Mercury discharge lamp) เป็นแหล่งของรังสียูวี แล้วให้รังสีกับระบบสารละลายที่ประกอบด้วยเกลือของเงิน (ยกเว้น AgClO_4) อะซิโตน(acetone) ทุ-โพรพานอล(2-propanol) และสารพอลิเมอร์เพื่อให้ความเสถียร(polymeric stabilizers) เช่น พอลิเอทิลีนไอมินน์(polyethyleneimine), โซเดียมพอลิฟอสเฟต(sodium polyphosphate), โซเดียมพอลิอะคริเลต(sodium polyacrylate) และสารพอลิไวนิลไพโรลิดีน(polyvinylpyrrolidone) เป็นต้น โดยที่สารละลายอินทรีย์อะซิโตนจะได้รับการกระตุ้นจากรังสียูวีให้ไปทำปฏิกิริยากับทุ-โพรพานอล(2-propanol) แล้วได้สารที่เรียกว่าอนุมูล(Ketyl radicals)ซึ่งมีความสามารถในการรีดิวิซ์สูง โดยจะไปรีดิวิซ์อ็อกซิเจนบวกให้กลายเป็นอนุมูลเงิน ส่วนพอลิเมอร์ที่เติมไปจะทำหน้าที่เป็นตัวสร้างความเสถียรให้กับอนุภาคเงินที่เกิดขึ้น ให้มีการกระจายขนาดอยู่ในช่วงแคบๆ คือได้ขนาด 7 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังกล่าวว่า อาจใช้สารอะซิโตน(Acetophenon), เบนโซฟีนอน(benzophenon) หรือกรดแอสคอร์บิก(ascorbic acid) ทดแทนอะซิโตน ซึ่งเป็นสารเพิ่มความไวต่อแสง(photosensitive agent)ก็ได้ จะเห็นว่ามีการนำพอลิเมอร์มาใช้เป็นตัวสร้างความเสถียรให้กับอนุภาค นั้นแสดงว่าพอลิเมอร์มีส่วนในการเกิดปฏิกิริยาในการสังเคราะห์อนุภาคคอลลอยด์นี้ โดยจะไปเกิดปฏิกิริยาบางอย่างกับอ็อกซิเจน มีรายงานการสังเคราะห์อนุภาคเงินขึ้นมาในฟิล์มบางของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่วางซ้อนหลายชั้น(polyelectrolyte multilayer)^[3] บนฐานรอง(substrate) เช่น แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ นอกจากนี้มีรายงานว่า G. A. Gaddy และคณะ^[10] ได้สังเคราะห์อนุภาคและกลุ่มของเงินในฟิล์มที่เกิดการครอสลิง(crosslink)ของสารพอลิไวนิลแอลกอฮอล์(PVA)กับสารพอลิอะคริติกแอซิด(PAA) โดยการเหนี่ยวนำด้วยแสง สำหรับวิธีนี้ใช้ปฏิกิริยาจากแสงมารีดิวิซ์เกลือของเงิน(ซิลเวอร์ไนเตรต) ใช้แสงชนิด

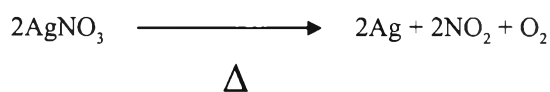
350 นาโนเมตร โฟตอน(350 nm photons) ที่มีประสิทธิภาพสูง การทดลองนี้ทำในสภาวะที่ความเข้มข้นของพอลิเมอร์สูง การรีดิวซ์จะเกิดในฟิล์มของพอลิเมอร์สองชนิดที่เชื่อมพันธะโควาเลนต์กัน ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ การเชื่อมพันธะของพอลิเมอร์ทั้งสองต้องใช้สารกลูตารัลแอลดีไฮด์(glutaraldehyde) เป็นตัวช่วย ผลที่ได้คือจะได้อนุภาคเงินเป็นส่วนใหญ่โดยมีขนาด 5 นาโนเมตร และจากการวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์เชิงแสงเพื่อวัดการดูดกลืนแสง พบว่ามีตำแหน่งอยู่ที่ 430 นาโนเมตร นอกจากนี้ก็พบกลุ่มของเงิน (Ag_3^+) ที่ตำแหน่ง 280 นาโนเมตร ด้วย นอกจากนี้ในการทดลองพบว่า การเกิดอนุภาคและกลุ่มของเงินเกิดขึ้นจากกลไกของการแพร่(diffusion)และการประสานรวมกัน(coalescence) ของอะตอมโลหะที่เคลื่อนที่อยู่ในฟิล์มนั่นเอง

2.1.3.1.5 การรีดิวซ์ด้วยสารอนินทรีย์ (The reduction by inorganic agents)

สารอนินทรีย์ที่ใช้ในการรีดิวซ์ส่วนใหญ่ทั่วไป คือ โซเดียมโบโรไฮไดรด์(sodium borohydride, $NaBH_4$) ซึ่งมีรายงานว่ามิกิจคือ Creighton และคณะ ได้เสนอการทดลองนี้ขึ้นมา โดยเฉพาะที่ใช้ในงานเกี่ยวกับเซอร์เฟสเอนฮานซ์รามานสแกทเทอริง(surface enhanced Raman Scattering) ตัวอย่างคือนำสารละลายซิลเวอร์ไนเตรดความเข้มข้น 10^{-3} mol/dm³ ปริมาตร 25 มิลลิลิตร มาผสมกับสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์($NaBH_4$) เพื่อสังเคราะห์อนุภาคนาโน โดยมีการศึกษาปัจจัยที่ผลต่อการรีดิวซ์ด้วยคือ อุณหภูมิ การมีวัตถุสำหรับให้อนุภาคนาโนจับ(surfactants) การมีกรดคาร์บอกซิลิกที่ไม่อิมตัว การมีโซเดียมไฮโดรคาร์บอเนต($NaHCO_3$) การแลกเปลี่ยนระหว่างน้ำ(H_2O) กับ D_2O หรือผลจากการกวนหรือการคน ซึ่งปกติแล้ววิธีการนี้จะให้ขนาดอนุภาคนาโนที่เล็กขนาดระดับนาโน และมีการกระจายขนาดอยู่แคบๆ ไม่เหมาะกับการเตรียมอนุภาคนาโนขนาดใหญ่ ในขณะที่ Schneider และคณะได้ปรับปรุงวิธีการรีดิวซ์เพื่อเตรียมอนุภาคนาโนที่ใหญ่กว่านี้ โดยการใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์เพื่อให้ได้อนุภาคนาโนขนาดเล็กก่อน แล้วค่อยรีดิวซ์ด้วยการใช้กรดแอสคอร์บิก(ascorbic acid) ซึ่งเป็นตัวรีดิวซ์แบบอ่อน(weaker reducing agents) เพื่อให้อนุภาครีดิวซ์ได้ในตอนแรกซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดอนุภาค(nuclei) เกิดการโตขึ้นจนเป็นอนุภาคนาโนที่ใหญ่กว่า นอกจากนี้ยังมีสารอนินทรีย์อื่นๆ ที่ใช้เป็นตัวรีดิวซ์ เช่น ไฮดราซีน(hydrazine), ไฮโดรเจน(hydrogen), ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์(hydrogen peroxide) และสารประกอบเชิงซ้อนของเกลียวเฟอร์รัส

นอกเหนือจากโซเดียมโบโรไฮไดรด์ บางวิธีก็ใช้ก๊าซไฮโดรเจน และอาจมีการใช้ความร้อนเข้าร่วม หรือใช้วิธีการให้ความร้อนเพื่อการรีดิวซ์โดยเฉพาะด้วย ซึ่ง Ji-Woon และคณะ^[7] ได้เตรียมอนุภาคนาโนในเซลลูโลสอะซิเตตพอลิเมอร์(Cellulose Acetate Polymer) และได้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบเงินกับพอลิเมอร์นั้นด้วย ซึ่งการทดลองนี้ได้้นำสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด และเซลลูโลสอะซิเตตมาละลายใน ทู-เมทอกซีอีทานอล(2-methoxyethanol) แล้วนำส่วนผสมเหล่านั้นมาต้มในตู้ควัน(fume hood) เป็นเวลา 15 นาที เมื่อตัวทำละลายระเหยไป ก็นำสารละลายมาหล่อเป็นฟิล์ม

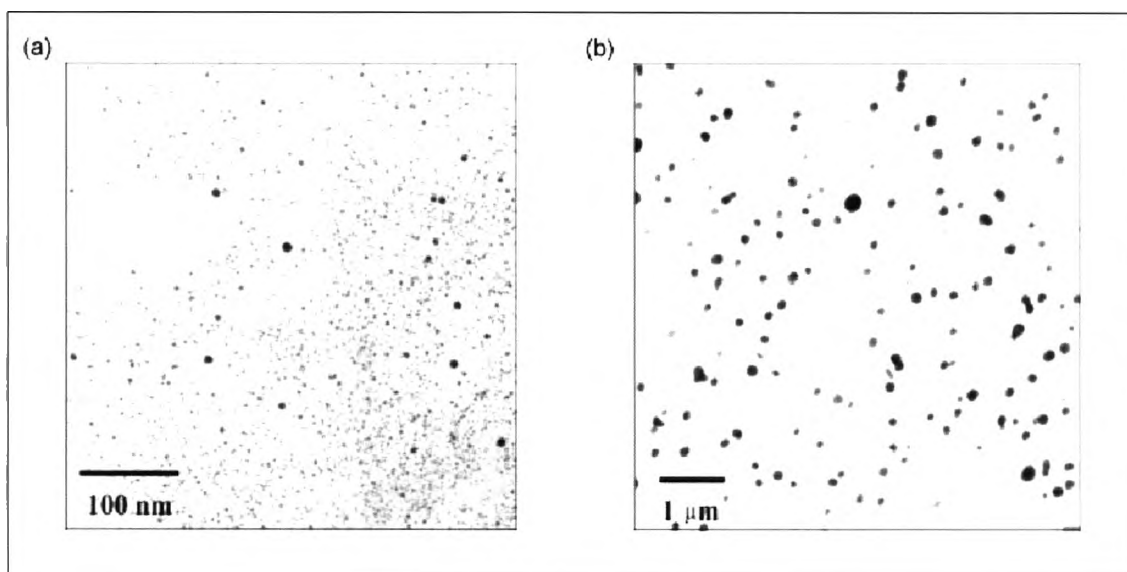
ซึ่งมีสารประกอบเงินอยู่ในฟิล์ม จากการทดลองนี้พบว่าฟิล์มนี้ที่มีสีน้ำตาลโปร่งแสง คงความเสถียรไปจนถึงอุณหภูมิ 200°C และเกลือของเงิน(ซิลเวอร์ไนเตรต) ทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์แบบแรงดึงดูดทางไฟฟ้า(electrostatic) ตามธรรมชาติเท่านั้น คือ ออกซิเจนของกลุ่มอะซิเตต(acetate groups)ในโมเลกุลของพอลิเมอร์จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนบวกของเงิน เนื่องจากไอออนเงินที่อยู่ในฟิล์มมีการเกิดออกซิเดชันต่ำจึงเกิดปฏิกิริยากันแบบอ่อน(weak interaction) หากนำฟิล์มนี้ไปละลายน้ำที่อุณหภูมิห้อง จะพบสารประกอบเงินประมาณ 95% ที่เหลือก็จะเป็นเซลล์โลสอะซิเตต ฟิล์มนี้มีค่า Tg เพิ่มขึ้นมา (Tg คือ glass transition temperature เป็นอุณหภูมิของแข็งเปลี่ยนสภาพจากแก้วที่เปราะไปเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นขึ้น)⁽¹¹⁾ เนื่องจากเงินที่อยู่ในฟิล์ม ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมให้เกิดการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์(cross-linking reagent)⁽¹¹⁾ ที่อุณหภูมิสูงกว่า และเงินนี้เกิดจากการสลายตัวของซิลเวอร์ไนเตรตในเซลล์โลสอะซิเตต ซึ่งปกติแล้วซิลเวอร์ไนเตรตจะสลายตัวที่อุณหภูมิ 414°C ดังนี้



แต่ฟิล์มนี้เริ่มสลายตัวประมาณ 100°C ในบรรยากาศก๊าซเฉื่อยอย่างก๊าซไนโตรเจน หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และที่ 150°C ไอออนบวกเงินทั้งหมดจะถูกรีดิวซ์กลายเป็นอะตอมเงิน แล้วเกิดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ส่วนฟิล์มจะเปลี่ยนไปเป็นวัสดุสีดำนวาว ส่วนการรีดิวซ์ด้วยก๊าซไฮโดรเจน (100 torr-150 psi) ทำให้ฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีคล้ำขึ้นที่อุณหภูมิห้อง แสดงว่าเกิดการรีดิวซ์ขึ้น การรีดิวซ์จะสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 120°C สำหรับในฟิล์มที่มีซิลเวอร์ไนเตรต 10% จะเกิดอนุภาคเงินนาโนขนาด 20-30 นาโนเมตร(อุณหภูมิ 120°C ความดัน 150 psi เป็นเวลา 4 ชั่วโมง) แต่ในฟิล์มที่มีซิลเวอร์ไนเตรต 20% เมื่อผ่านการรีดิวซ์ด้วยก๊าซไฮโดรเจน จะได้อนุภาคขนาด 90-200 นาโนเมตร(ความดัน 150 psi อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง) แสดงว่าสามารถควบคุมขนาดอนุภาคเงินที่ได้ด้วยการปรับความเข้มข้นของโลหะ และสภาวะการเกิดปฏิกิริยา ลักษณะของอนุภาคเป็นไปตามรูปที่ 2.1

2.1.3.1.6 การรีดิวซ์ด้วยสารอินทรีย์ (The reduction by organic reducing agents)

สารอินทรีย์ที่นิยมคือ ซิเตรต (citrate) ตามวิธีการของ Lee-Meisel (โดยเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับ SERS) ตัวอย่างคือ น้ำไตรโซเดียมซิเตรต(trisodium citrate) เข้มข้น 1% ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ในสารละลายที่มีซิลเวอร์ไนเตรต 90 mg ปริมาตร 500 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปต้ม 1 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่าการรีดิวซ์เกิดขึ้นระหว่างการทดลองใน 1-2 นาทีแรกหลังจากเติมซิเตรตลงไป ทำให้ได้อนุภาคเงินในตอนแรกที่มีขนาดใหญ่ จากนั้นจะกระจายตัวแบบต่อเนื่องกันไปคล้ายพอลิเมอร์(polydisperse) ขนาด 60-80 นาโนเมตร เมื่อให้ความร้อนจะทำให้ได้อนุภาคแบบกระจายตัวเดี่ยวๆ ขนาดเฉลี่ย 27 นาโนเมตร อนุภาคเงินที่เกิดในขั้นตอนแรก จะเป็นแหล่งกำเนิดอนุภาค(nuclei) ที่จะเกิดการโตต่อไป



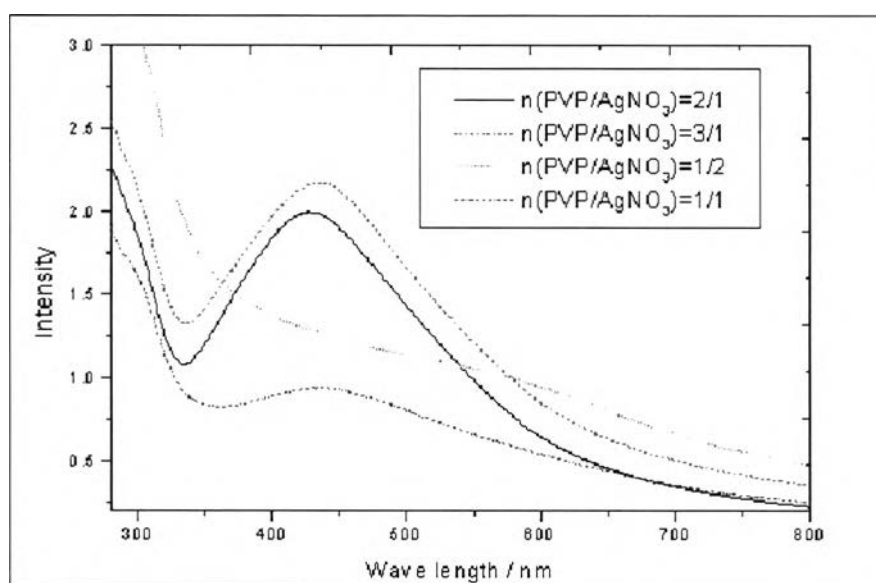
รูปที่ 2.1 ลักษณะของอนุภาคเงินที่ได้จากการควบคุมความเข้มข้นของเงิน และสถานะการทดลอง
a) फिल्मที่มีซิลเวอร์ในเตรต 10 wt% b) फिल्मที่มีซิลเวอร์ในเตรต 20 wt%

นอกจากนี้ยังมีวิธีการของ Tollen reagent ซึ่งใช้น้ำตาล หรือแอลดีไฮด์ (aldehydes) เป็นตัวที่ไปรีดิวซ์สารประกอบเชิงซ้อนของแอมโมเนียม(ammonium complex) ส่วนการรีดิวซ์ด้วยฟอร์มอลดีไฮด์ (formaldehyde) และซอร์บิทอล(sorbitol) จะได้อนุภาคเงินขนาด 20-50 นาโนเมตร กรดแอสคอบิกก็เป็นสารรีดิวซ์ตัวหนึ่งด้วย นอกจากนี้การมีสารพอลิเมอร์อย่าง ไวนิลแอลกอฮอล์(vinylalcohol) และ เอ็น-ไวนิลไพโรลิดีน(N-vinylpyrrolidone copolymer)ในสารละลายด้วย จะทำให้ได้อนุภาคที่มีขนาด 3-7 นาโนเมตร โดยขึ้นกับจำนวนพอลิเมอร์ที่ใส่เข้าไป ในขณะที่มีสารอินทรีย์บางชนิดที่ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวทำละลาย และเป็นสารรีดิวซ์ด้วย ตัวอย่างเช่น เอ็น, เอ็น-ไดเมทิลฟอร์มเอไมด์ หรือ DMF (N,N-dimethylformamide), ไดเมทิลซัลโฟไซด์(dimethylsulfoxide) และทุ-โพรพานอล(2-propanol) เป็นต้น โดยการรีดิวซ์ด้วยสารเหล่านี้ จะได้อนุภาคที่มีขนาดประมาณ 20 นาโนเมตร ตัวอย่างการใช้พอลิเมอร์ในการควบคุมขนาดอนุภาคเงิน เช่น มีรายงานจาก Jian Liu และคณะ^[8] ที่ได้สังเคราะห์อนุภาคเงินนาโนที่หุ้มด้วยสารประกอบไทออลแบบแมโครไซคลิก(macrocyclic thiol) 4 ชนิด ได้แก่ เปอร์ไทโอเลทเบต้า-ซีดี(perthiolated β -CD), เปอร์ไทโอเลทคาวิตานด์(perthiolated cavitand), โมโนไทโอเลทเบต้า-ซีดี(monothiolated β -CD) และโทลูอินไทออล(toluenethiol) โดยการรีดิวซ์ด้วยสารในตระกูลไดเมทิลฟอร์มเอไมด์(N,N-dimethylformamide, DMF) ขณะที่วิธีนี้ใช้ซิลเวอร์ในเตรตเป็นสารที่จะต้องถูกรีดิวซ์ งานวิจัยนี้ต้องการที่จะศึกษาผลของสารต่างๆ แบบแมโครไซคลิกไทออลที่มีต่อการฟอร์มตัวของอนุภาคเงินที่ถูกหุ้มด้วยสารเหล่านี้ ทั้งนี้จะพิจารณาถึงขนาดอนุภาคของเงินที่ได้และความสามารถที่จะยังคงความเสถียรอยู่ได้โดยไม่เกิดการรวมตัวกัน การตรวจสอบจะใช้เครื่องมือเชิงแสง อย่างเช่น เครื่องวิซิบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์(visible spectrophotometer) และเครื่องโฟตอน

คอร์เรลชันสเปกโทรสโกปี (photon correlation spectroscopic) จากการทดลองพบว่า การสังเคราะห์อนุภาคที่มีสารเพอร์ไทโอเลทเบต้า-ซิติ ให้ประสิทธิภาพแก่อนุภาคได้ดีกว่าเพอร์ไทโอเลทคิวเทนคัที่ ให้ประสิทธิภาพดีกว่าโมโนไทโอเลทเบต้า-ซิติ คือ ทำให้ได้อนุภาคที่มีขนาดเล็ก และมีความเสถียรกว่า เหตุผลคือ เป็นไปได้ว่าเพอร์ไทโอเลท เบต้า-ซิติ มีความสามารถในการแนบติด หรือห่อหุ้มกับผิวของอนุภาคเงินที่เกิดขึ้นได้ดีกว่า เพราะมีโครงสร้างของ ฟังก์ชันนอลกรุป (functional group) มากกว่าสารตัวอื่น การหุ้มด้วยสารนี้ทำให้อนุภาคเงินไม่สามารถเกิดการรวมตัวกัน หรือเกิดการโตได้อีก ทำให้อนุภาคเงินยังคงความเสถียร และมีขนาดเล็ก อนุภาคที่เตรียมด้วยสารเหล่านี้มีขนาดอยู่ในช่วง 38-82 นาโนเมตร วิธีการสังเคราะห์แบบนี้ดีต่อการศึกษาทางจุลศาสตร์ด้วยการรีดิวซ์จะเป็นไปอย่างช้าๆ เพราะที่อุณหภูมิต่ำนั้น การรีดิวซ์ด้วย DMF ซึ่งเป็นสารรีดิวซ์และตัวทำละลายแบบอ่อน จะทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างช้าๆ นอกจากนี้มีรายงานการรีดิวซ์ด้วยสารอินทรีย์ที่มีการควบคุมลักษณะของอนุภาคด้วย คือ Li Guoping และคณะ^[12] ได้เตรียมอนุภาคนาโนแบบเดนไดรติก (dendritic) โดยการรีดิวซ์ด้วยสารเคมีโดยตรง คือ ใช้เอทานอลเป็นตัวรีดิวซ์ การทดลองมีดังนี้ คือ เดิมโพลิเอิน-ไวนิล-2-ไพโรลิดีน หรือ PVP หรือ poly(N-vinyl-2-pyrrolidone และเอทานอลด้วยการใช้หลอดฉีดยา (เดิมทีจะอย่างตามลำดับ) ลงในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) แล้วคนให้เข้ากัน จากนั้นเก็บไว้ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 80 °C จนเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ จากนั้นก็ทำการตรวจสอบด้วยเครื่องมือดังต่อไปนี้ คือ เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-visible spectroscopy), กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) และอิเล็กตรอนดิฟแฟรกชันอิมเมจ (electron diffraction image) การทดลองนี้ศึกษาถึงผลของสัดส่วน PVP ที่เติมลงไปต่อประจุเงิน ในเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งพบว่าจะได้อนุภาคที่มีลักษณะเป็นกิ่งเดนไดรติก พร้อมด้วยรูปร่างแบบเข็ม โดยที่ $\text{PVP}/\text{AgNO}_3 = 1$ เป็นสัดส่วนที่ดีที่สุดในการเตรียมอนุภาคนาโนแบบเดนไดรติก และทำให้ทราบว่าเมื่อสัดส่วนของ PVP มากขึ้นจะทำให้สเปกตรัมการดูดกลืนแสงจากเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี มีค่าความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น กรณีนี้ PVP ทำหน้าที่เป็นสารปกป้อง (protective agent) ส่วนเอทานอลทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ รูปที่ 2.2 แสดงถึงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงซึ่งเป็นผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล ของสารละลายผสมที่มีซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร และ PVP ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ภายหลังจากการรีดิวซ์ด้วยเมทานอลเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้ทราบว่าเมื่อมีสัดส่วนของ PVP มากขึ้น หรือมีสัดส่วนของ PVP ต่อ AgNO_3 มากจะทำให้ได้สเปกตรัมการดูดกลืนแสง (peak) ที่ความยาวคลื่นมากขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคนาโนแบบเดนไดรติกไปเป็นแบบกลม

รูปที่ 2.3 แสดงถึงโครงสร้างของอนุภาคนาโนเงินจาก TEM ที่มีสัดส่วน PVP/AgNO_3 ดังนี้คือ (รูป a) 1, (รูป b) 2, (รูป c) 0.5, (รูป d) 0 และ (รูป f) 3 จากภาพจะเห็นว่ารูป a, b และ c มีอนุภาคนาโนแบบเดนไดรติก โดยรูป a) มีสัดส่วนเท่ากับ 1 อนุภาคนาโนแบบเดนไดรติกจะค่อนข้างสมมาตร รูป b) มีสัดส่วนเท่ากับ 2 จะได้อนุภาคนาโนแบบเดนไดรติกที่มีสีจางกว่า และไม่แตกแขนงเท่ากับ รูป a) ขณะที่รูป c) มีสัดส่วนเท่ากับ 0.5 ได้อนุภาคนาโนแบบเดนไดรติกที่มีลักษณะที่โตมาจากอนุภาคนาโนขนาดเล็ก

ใหญ่ ส่วนรูป c) มีสัดส่วนเท่ากับ 0 แสดงลักษณะอนุภาคเงินที่มีรูปร่างไม่แน่นอน(irregular) และสุดท้ายคือรูป f) มีสัดส่วนเท่ากับ 3 จะได้อนุภาคเงินที่มีลักษณะเป็นทรงกลม นอกเหนือจากนี้ มีการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมการดูดกลืน โดยเครื่องยูวี-วิสิเบิลของสารละลายที่เป็นฟังก์ชันกับเวลา คือพบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น สเปกตรัมการดูดกลืนแสงจะมีความเข้มของการดูดกลืนมากขึ้น และเลื่อนไปทางความยาวคลื่นมากขึ้น ซึ่งแสดงว่าอนุภาคมีขนาดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเวลาเกิน 70 นาที จะพบว่าความเข้มจะลดลง ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4

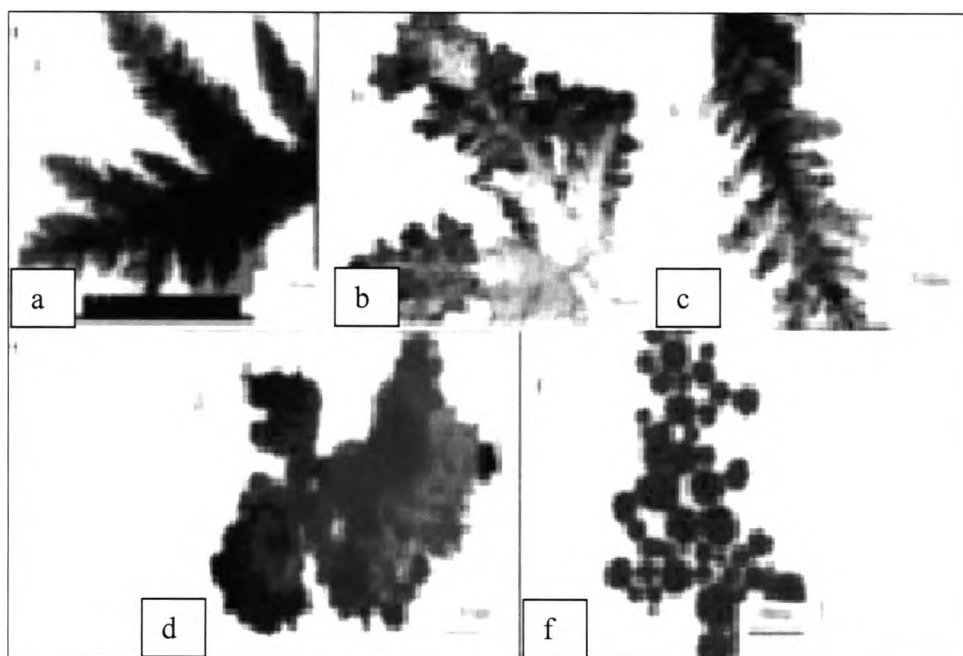


รูปที่ 2.2 สเปกตรัมการดูดกลืนของสารละลายที่มีสัดส่วนของพอลิเมอร์ต่อซิลเวอร์ในเตรด คือ 2:1, 3:1, 1:2 และ 1:1

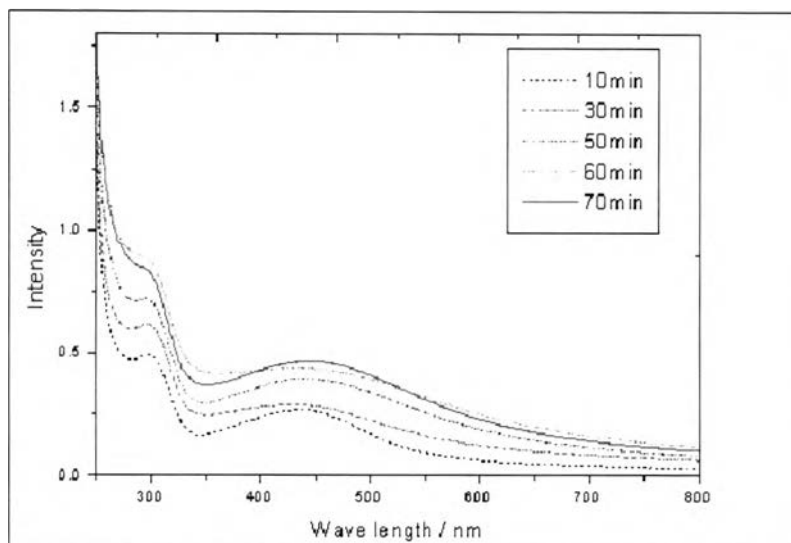
จากการพิจารณาตรงนี้ก็อธิบายได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของขนาดและรูปร่างของอนุภาคเงิน แต่เมื่อใช้เอทานอลเป็นตัวรีดิวซ์ จะทำให้มีอัตราการรีดิวซ์ช้าลงที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากมีค่าความเป็นกรดต่างค่า คือ pH 5.18 แต่อย่างไรก็ตาม อัตราการรีดิวซ์ต่ำมีความจำเป็นต่อการเตรียมอนุภาคเงินแบบเดนไดรต์ เพราะทำให้มีเวลาเพียงพอที่จะฟอร์มเป็นอนุภาคเงินแบบเดนไดรต์ ดังนั้นรูปร่างของอนุภาคเงินจึงขึ้นกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยา สเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 430 นาโนเมตร เป็นสิ่งที่ใช้ระบุถึงอนุภาคเงิน เมื่อสเปกตรัมการดูดกลืนแสงมีความเข้มสูงขึ้น และเลื่อนไปที่มีความยาวคลื่นยาวกว่า(red shift) เมื่อเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แสดงว่ามีการเพิ่มขึ้นของขนาดอนุภาค

ขณะที่รูปที่ 2.5 แสดงถึงผลของเวลาต่อลักษณะของอนุภาคเงิน โดยเริ่มแรกจะได้อนุภาคที่เป็นทรงกลมดังรูปa) เนื่องจากขั้นตอนนี้ไอออนเงินได้ถูกรีดิวซ์ไปเป็นอะตอมเงิน และการใช้เมทานอลเป็นตัวรีดิวซ์(ซึ่งมีความสามารถในการรีดิวซ์ต่ำ) ประกอบกับมี PVP มากเพียงพอล้อมรอบอนุภาคเงินอยู่ ซึ่งจะปกป้องกันไม่ให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคเงิน จึงทำให้ได้อนุภาคที่เป็นทรงกลม เมื่อเวลาใน

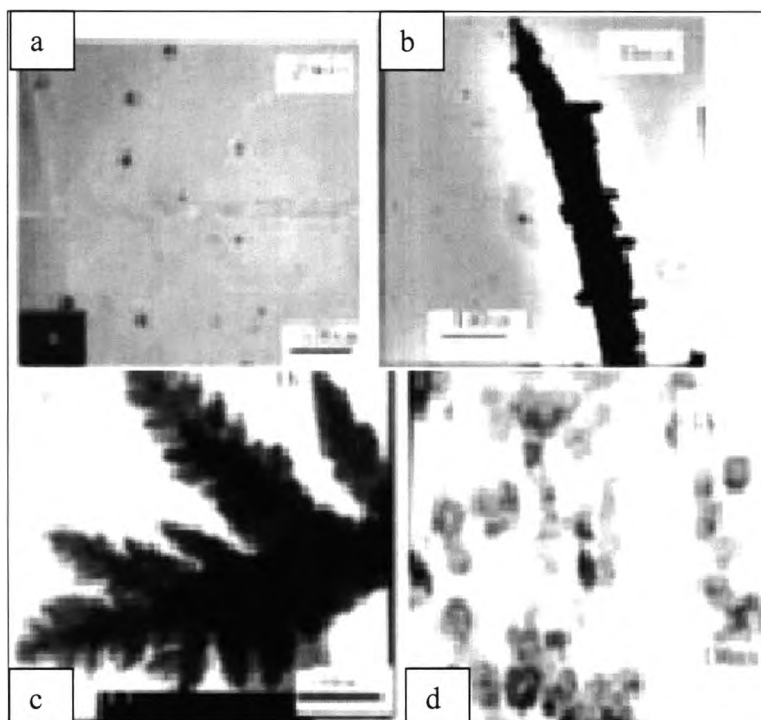
การรีดิวซ์นานขึ้นจนถึง 60 นาที ก็จะเกิดอนุภาคเงินแบบเดนไดรต์ซึ่งแสดงไว้ในรูป c) ส่วนรูป d) แสดงถึงเวลาการเกิดปฏิกิริยานานออกไป ทำให้เกิดการตกตะกอนของ PVP ส่งผลให้การป้องกันการโตของอนุภาคไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้ก็ยังมีรายงานการรีดิวซ์ด้วยสารอินทรีย์เพิ่มเติม คือ Kvitex Libor และคณะ^[13] ได้ทดลองเตรียมอนุภาคเงินคอลลอยด์โดยการรีดิวซ์ด้วยสารอินทรีย์ ดั้งชั้นตอนต่อไปนี้เป็น $[Ag(SO_3)_3]^{3-}$ ซึ่งเป็นแหล่งของเงินหรือเกลือของเงิน จะถูกรีดิวซ์ด้วยไฮโดรควิโนโนโมโนซัลโฟเนต (hydroquinonemonosulfonate) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ในสารละลายแอลคาไลน์ การเตรียมด้วยวิธีนี้ทำให้ได้อนุภาคขนาด 170-700 นาโนเมตร ขณะที่ Z.-Y. Huang และคณะ^[14] ได้เตรียมอนุภาคเงินโดยการรีดิวซ์ด้วย ทุ-โพรพานอล(2-propanol)ในสภาวะเบส โดยทดลองดังนี้ อีออนบวกเงินที่อยู่ในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต($AgNO_3$) ถูกรีดิวซ์ด้วยสารทุ-โพรพานอลที่อิมตัวในสภาวะต่าง นอกจากนี้จะมีการเติม Nafion ด้วย โดยทำหน้าที่เป็นสารสร้างความเสถียรให้กับอนุภาคที่เกิดขึ้น จึงทำให้ได้อนุภาคเงินที่มีขนาด 7.4 นาโนเมตร ทั้งนี้วิธีการนี้มีข้อดีคือ ทำได้ง่าย จากการค้นคว้าการสังเคราะห์อนุภาคนาโนจากรายงานต่างๆ ที่ได้กล่าวไปแล้ว ได้รวบรวมรายละเอียดโดยสรุปไว้ในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.3 ลักษณะของอนุภาคเงินจาก TEM ที่มีสัดส่วน PVP/ $AgNO_3$ ดังนี้คือ (รูป a) 1, (รูป b) 2, (รูป c) 0.5, (รูป d) 0 และ(รูป f) 3



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเทียบกับเวลา



รูปที่ 2.5 ผลของเงินต่อลักษณะของอนุภาคเงิน a) 20 นาที ได้อนุภาคทรงกลม b) 35 นาที ได้อนุภาค ทรงกลม c) 60 นาที ได้อนุภาคที่มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ และ d) 3 ชั่วโมง ได้อนุภาคที่ไม่ปรากฏลักษณะชัดเจน

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของรายงานการสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโน

นักวิจัย	เกลือของเงิน	วิธีการรีดักชัน	สารเพิ่มประสิทธิภาพ	ขนาดอนุภาค
Henglein A.	AgClO ₄	UV	acetone 2-propanol polyethylenimine sodium polyphosphate sodium polyacrylate polyvinylpyrrolidone	7 nm
Ji-Woon และคณะ	AgNO ₃	H ₂	Cellulose acetate film 2-methoxyethanol	10 wt%AgNO ₃ ได้ 20-30 nm 20 wt%AgNO ₃ ได้ 90-200 nm
Li Guoping และคณะ	AgNO ₃	ethanol methanol	PVP N ₂	dendrite < 150 nm
Kvitek Libor และคณะ	AgNO ₃	สารอินทรีย์ (HQS)	Na ₂ SO ₃	170-700 nm
Z-Y.Huang และคณะ	AgNO ₃	2-propanol	Nafion	7.4 nm
Jian Liu และคณะ	AgNO ₃	สารอินทรีย์ (DMF)	macrocyclcthiol	38-82 nm
G.A.Gaddy และคณะ	AgNO ₃	350 nm-photon	PVA-PAA crosslink	เฉลี่ย 5 nm

2.1.3.2 ตัวอย่างการนำเงินคอลลอยด์ไปใช้

2.1.4.2.1 ใช้ใน เครื่อง SERS และ SERRS

การตรวจจับสารเคมีที่มีความเข้มข้นต่ำมากในสารละลายมีความสำคัญมาก โดยเฉพาะในทางชีววิทยา และทางการแพทย์ จึงต้องมีอุปกรณ์ที่มีศักยภาพในการวิเคราะห์ที่ต้องใช้เทคนิคในการแยกแสงที่มีความไวสูง ซึ่งเรียกว่าเซอร์เฟสเอนฮานซ์รามานสเปกโทรสโกปี(surface enhanced Raman spectroscopy) และเครื่องเซอร์เฟสเอนฮานซ์เรโซแนนซ์รามานสเปกโทรสโกปี(surface enhanced

resonance Raman spectroscopy) โดยถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือในเชิงวิเคราะห์ ซึ่งมีความสามารถในการเข้าถึงข้อมูลเชิงโครงสร้างได้มากกว่า และเมื่อเร็ว ๆ นี้ สามารถนำมาตรวจค้นหาโมเลกุลเดี่ยวได้ด้วย เครื่องมือนี้จะมือนุภาคโลหะเป็นองค์ประกอบ เพื่อตรวจจับโมเลกุลเดี่ยวที่จะมาจับบนอนุภาคโลหะเล็กๆ เหล่านี้ โลหะที่มีประสิทธิภาพสูงในกรณีนี้ คือ เงิน

2.1.4.2.2 ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา(catalyst)

ปกติแล้วการกระจายตัวของคอลลอยด์โลหะจะถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในกระบวนการรีดักชัน โดยจะไม่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน แต่สำหรับคอลลอยด์ของเงินนั้นเป็นข้อยกเว้น คอลลอยด์ของเงินสามารถเร่งปฏิกิริยาการออกซิเดชันได้ เช่น ในกระบวนการเตรียมเอทิลีนออกไซด์(ethylene oxide) จากเอทิลีน(ethylene) เป็นต้น เนื่องจากสมบัติของอนุภาคโลหะที่มีขนาดเล็กจะแตกต่างจากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ จึงมีการทดลองปรับปรุงสมบัติในการเร่งปฏิกิริยาของพวกเขา เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล ทองแดง รูทีเนียม เงิน พลาตินัม ทอง พรอท รูเดียม พาลาเดียม ซึ่งพบว่าสมบัติการเร่งปฏิกิริยาขึ้นกับขนาดของอนุภาค

2.1.4.2.3. การใช้อนุภาคเงินในเซนเซอร์ หรือเครื่องตรวจจับความไวสูง (The use of silver particles in sensorics)

ปรากฏการณ์เชิงแสงของอนุภาคเงินนาโนซึ่งมีแถบการดูดกลืนแสงเฉพาะตัว โดยจะไม่พบในเส้นสเปกตรัมของอนุภาคเงินที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากในอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีจังหวะการสั่นของอิเล็กตรอนแบบส่ายไปมา หรือแบบสลับที่สอดคล้องกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะถูกเรียกว่าการเกิดเซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์(surface plasmon resonance, SPR) ตำแหน่งของความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสง(peak absorption wavelength, λ_{max}) และรูปร่างของสเปกตรัมการดูดกลืนนี้ ขึ้นอยู่กับสิ่งต่อไปนี้ขนาดและรูปร่างของอนุภาค ระดับการเข้าทำปฏิกิริยาเชื่อมติดระหว่างกันของสาร และสภาวะแวดล้อมภายนอกที่เป็นฉนวน การขึ้นอยู่กัสิ่งเหล่านี้จึงถูกนำมาปรับปรุงเพื่อใช้ประโยชน์ในเซนเซอร์(sensor)ที่มีความไวสูง โดยความยาวคลื่นของ SPR ของเซนเซอร์หนึ่งจะเลื่อนไปที่ตำแหน่งอื่น เมื่อตรวจพบสารเคมีที่เซนเซอร์นั้นสามารถตรวจจับได้ด้วยความไวสูง แต่ก็มีข้อจำกัดในการตรวจจับ คือ ความเข้มข้นของสารที่จะตรวจจับ และความสามารถของอุปกรณ์ตรวจจับ

2.1.4.2.4 เงินคอลลอยด์ต้านแบคทีเรีย (Antimicrobial activity of colloid silver)

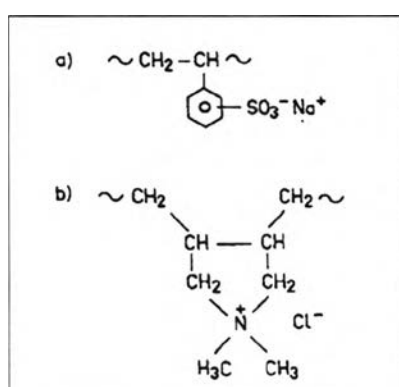
ความสามารถในการต้านแบคทีเรียของโลหะเงินนั้นเป็นที่ทราบกันมานานแล้ว ในยุคกรีกและโรมันนั้น ภาชนะเงินมีไว้เพื่อถนอมน้ำและอาหารที่จะบริโภคเพื่อให้แน่ใจว่าปลอดภัยต่อสุขภาพ อย่างไรก็ตาม

ก็ตามในยุคกลางมีการนำผงเงินมาผสมกับอาหาร ซึ่งทำให้เกิดพิษ ต่อมาในปลายศตวรรษที่ 19 และต้นศตวรรษที่ 20 ได้มีการนำคอลลอยด์ของเงินมาใช้ในเชิงจุลชีวภาพ(microbiology) และทางการแพทย์ ขนาดอนุภาคที่ดีที่สุดที่จะต้านแบคทีเรียได้คือ ขนาดช่วง 1-10 นาโนเมตร

2.2 พอลิอิเล็กโทรไลต์(polyelectrolyte)^[15]

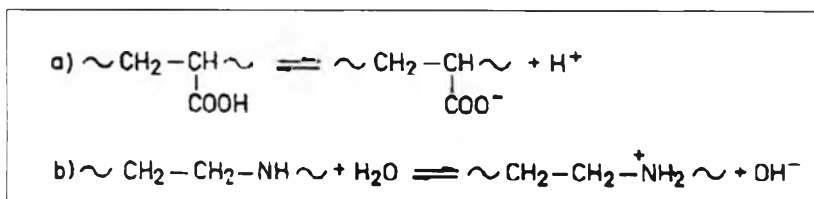
คำว่า “พอลิอิเล็กโทรไลต์” เป็นคำที่ใช้กล่าวถึงระบบพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยแมโครไอออน (macroion) ซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดมหภาค ที่สร้างพันธะโควาเลนต์ร่วมกับกลุ่มประจุบวกหรือประจุลบ กับเคาน์เตอร์ไอออน(counterions) ซึ่งมีหน้าที่รักษาความเป็นกลางให้แก่พอลิอิเล็กโทรไลต์ โดยมีประจุตรงข้ามกับแมโครไอออน ตัวอย่างคือ โซเดียมพอลิสไตรีนซัลโฟเนต(sodium polystyrene sulfonate) และพอลิไดอัลไคเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์(poly(diallyldimethylammonium chloride), poly-DADMAC, PDADMAC) ดังรูปที่ 2.6

พอลิอิเล็กโทรไลต์จะแยกตัวเป็นแมโครไอออน และเคาน์เตอร์ไอออน ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรดต่างระหว่าง 0-14 มีตัวอย่างพอลิเมอร์ที่เกี่ยวข้องกับการแตกตัวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่าง เช่น พอลิอะคริลิกแอซิด(polyacrylic acid) และพอลิเอทิลีนไอไมน์(polyethylene imine)โดยปกติถูกจัดว่าเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ โดยพวกมันจะอยู่ในระบบเคาน์เตอร์ไอออนกับประจุพอลิเมอร์ในช่วงความเป็นกรดต่างเฉพาะตัวของมันเท่านั้น ก็จะเป็นพอลิเมอร์กรดที่ไม่แตกตัวเมื่ออยู่ในสารละลายที่เป็นกรด หรืออาจจะเป็นพอลิเมอร์ด่าง ซึ่งไม่แตกตัวเมื่ออยู่ในสารละลายที่เป็นด่างหรือแอลคาไลน์ การเปลี่ยนแปลงของพอลิอิเล็กโทรไลต์เมื่อภาวะความเป็นกรดต่างเปลี่ยนไป เป็นการบ่งบอกว่าพอลิอิเล็กโทรไลต์เหล่านี้เป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์อ่อน ดังรูปที่ 2.7 ได้แสดงการแตกตัวของพอลิอิเล็กโทรไลต์อ่อน



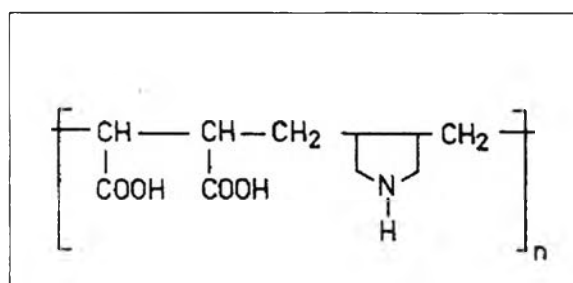
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของ a) โซเดียมพอลิสไตรีนซัลโฟเนต (sodium polystyrene sulfonate)

b) โพลิไดอัลไคเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์(poly(diallyldimethylammoniumchloride))



รูปที่ 2.7 การแตกตัวของพอลิอิเล็กโทรไลต์อ่อน

ขณะที่พอลิเมอร์อย่างเซลลูโลสที่แตกตัวเป็นประจุลบของเซลลูโลส(แมคโครไอออน) และ คาน์เตอร์ไอออนบวกที่สภาวะแอลคาไลน์สูงมาก(pH >14) จะไม่จัดว่าเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ เพราะในช่วงค่าความเป็นกรดต่างที่ใช้กันปกติทั่วไป(pH 0-14) กลุ่มไฮดรอกซี(OH)ของพอลิเมอร์นี้ไม่แตกตัว ส่วนพอลิเมอร์ชนิดพิเศษที่เรียกว่า พอลิแอมโฟไลต์(polyampholytes) ประกอบไปด้วยกลุ่มประจุทั้ง บวกและลบที่สร้างพันธะร่วมกับแมคโครโมเลกุล พบได้มากตามธรรมชาติ คือ โปรตีน แต่ก็สามารถ สังเคราะห์ขึ้นมาได้ด้วย ตัวอย่างคือ มาเลอิก แอซิด-ไดแอลลิวเอมีน โคพอลิเมอร์ (maleic acid-diallylamine copolymer) ซึ่งประกอบด้วยพอลิอิเล็กโทรไลต์สองชนิดสร้างพันธะร่วมกัน ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของโคพอลิเมอร์หรือ โพลีแอมโฟไลต์(polyampholyte)

โดยที่จะเป็นพอลิเมอร์ที่มีประจุลบเมื่ออยู่ในตัวกลางแอลคาไลน์ และเป็นบวกเมื่ออยู่ในกรด แต่เมื่ออยู่ในภาวะความเป็นกรดต่าง pH 4 จะไม่ปรากฏประจุที่แมคโครโมเลกุล จึงเรียกว่า ไอโซอิเล็กตริกพอยท์ (isoelectric point) เนื่องจากโครงสร้างของแมคโครโมเลกุล สามารถที่จะถูกปรับเปลี่ยนให้กลายเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ได้ ซึ่งเกี่ยวข้องกับจำนวนกลุ่มประจุ ที่สร้างพันธะโควาเลนต์อยู่กับแกนของสายโซ่พอลิเมอร์(แมคโครโมเลกุล) ทั้งที่เป็นแบบเชิงเส้น และเป็นแบบกิ่งที่สามารถละลายได้ในตัวกลางที่มีค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม ซึ่งในตารางที่ 2.3 แสดงถึงความหลากหลายของโครงสร้างทางเคมีของพอลิอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเป็นผลมาจากจำนวนของโครงสร้างที่เป็นแกนของพอลิเมอร์(สายโซ่พอลิเมอร์)

ตารางที่ 2.3 การจัดกลุ่มของพอลิอิเล็กโทรไลต์

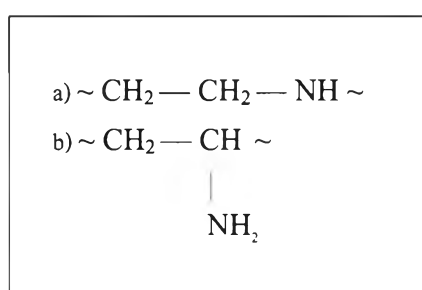
Anionic and cationic polysaccharides and polysaccharidic derivatives
Nucleic acids
Gelatin
Lignosulfonic acids
Polyacrylic and polymethacrylic acid and its copolymers
Maleic acid anhydride copolymers
Polystyrene sulfonic acid
Polyethylene imine
Polyamines and polyamidamines
Ionenes
Poly(diallyldimethylammonium chloride)
Homo-and copolymers of cationic acrylic acid esters

ตารางที่ 2.4 โครงสร้างของตำแหน่งไอออนิกในพอลิอิเล็กโทรไลต์

$-\text{COO}^-$	$-\text{NH}_3^+$
$-\text{CSS}^-$	$=\text{NH}_2^+$
$-\text{O}\cdot\text{SO}_3^-$	$\equiv\text{NH}^+$
$-\text{SO}_3^{--}$	$-\text{NR}_3^+$
$-\text{OPO}_3^{2-}$	

พอลิอิเล็กโทรไลต์ในทางการค้า มักได้มาจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน(polymerization) การเกิดพอลิเมอร์จากการควบแน่น(polycondensation) หรือโพลีแอดดิชัน(polyaddition) เนื่องจากพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่สำคัญส่วนมากก็มาจากธรรมชาติด้วย เช่น เจลาติน กลุ่มของโปรตีน และเพคติน (สารคล้ายวุ้นในผลไม้สด) ซึ่งอยู่ในกลุ่มของแอนไอออนิกโพลีแซคคาไรด์(anionic polysaccharides) นอกจากนี้ก็มีพอลิอิเล็กโทรไลต์บางชนิดที่มีความสำคัญและนำไปใช้ได้จริงโดยเกิดจากการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของพอลิเมอร์ตามธรรมชาติที่ไม่มีประจุอย่างเซลลูโลสและแป้ง(starch)ด้วย เมื่อเปรียบเทียบความหลากหลายของโครงสร้างแกนพอลิเมอร์ จำนวนของโครงสร้างตำแหน่งที่เป็นประจุบวก และประจุลบ ซึ่งเป็นตำแหน่งกำหนดลักษณะพิเศษของพอลิอิเล็กโทรไลต์ จะมีความหลากหลายค่อนข้าง

น้อยกว่า ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4 กลุ่มประจุเหล่านี้โดยปกติถูกจัดว่าเป็นประจุบวก และประจุลบ แล้วต่อมาก็ถูกแยกย่อยเป็นกลุ่มกรดแก่ กรดอ่อน และเบสแก่ เบสอ่อน ซึ่งซัลโฟเนต(sulfonate) ซัลเฟตฮาฟ-เอสเทอร์(sulfate half-ester) และเตตระแอลคิลแอมโมเนียมก็ถูกจัดเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์แก่ นอกเหนือจากความแข็งแรงของกรด และเบสตรงบริเวณประจุแล้ว ระยะห่างระหว่างประจุบวกกับลบไปตามสายโซ่พอลิเมอร์ก็เป็นตัวแปรหนึ่ง ที่กำหนดลักษณะของพอลิอิเล็กโทรไลต์ด้วย โดยเฉพาะในสภาวะการละลาย ทั้งนี้ความหนาแน่นของประจุถูกกำหนดว่าเป็นระยะเฉลี่ยระหว่างตำแหน่งประจุ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับพิจารณาการสร้างพันธะเป็นรูปร่าง ทางด้านเรขาคณิตด้วย ส่วนในกรณีที่อยู่ในกลุ่มโคพอลิเมอร์ ระยะทางคือจำนวนเฉลี่ยของตำแหน่งประจุต่อหน่วยของโมโนเมอร์ นอกเหนือจากความหนาแน่นของประจุ ความเป็นระเบียบของการกระจายตัวของตำแหน่งประจุไปตามสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีผลต่อสมบัติของพอลิอิเล็กโทรไลต์ในแง่ของระยะห่างระหว่างประจุด้วย เช่น ความสามารถในการละลาย ข้อกำหนดเหล่านี้ขึ้นอยู่กับได้กฏหนึ่งที่ว่า การที่พอลิอิเล็กโทรไลต์จะมีสมบัติหนึ่งใดก็ตามเมื่อมีตำแหน่งประจุมากกว่า 1 ตำแหน่งต่อโมโนเมอร์ 10 หน่วย ปัจจัยสุดท้ายนอกเหนือจากความแข็งแรงของประจุ และความหนาแน่นของประจุแล้ว ตำแหน่งของประจุภายในโครงสร้างของแมโครไอออนก็มีความสำคัญด้วย เช่น ดังรูปที่ 2.9 เป็นตัวอย่างพอลิอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งถูกแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ อินทิกรอล(integral) โดยสายโซ่จะไม่มีกลุ่มประจุนอก หรือมาเกาะอยู่ ขณะที่เพนแดนท์(pendant) เป็นพอลิเมอร์ที่มีกลุ่มประจุเกาะตัวแยกออกมาจากสายโซ่ นอกเหนือจากแมโครไอออนแล้ว เคาน์เตอร์ไอออนก็มีความสำคัญมากต่อลักษณะของระบบโดยรวม โดยเฉพาะทางด้านความสามารถในการละลาย และการเกิดโครงสร้าง เคาน์เตอร์ไอออนไม่เพียงแต่เป็นตัวรักษาความเป็นกลางให้แก่ระบบพอลิอิเล็กโทรไลต์เท่านั้น เช่น จากรูปที่ 2.6 คลอไรด์ใน PDADMAC ทำให้สามารถละลายในน้ำได้อย่างง่ายดาย และในทางตรงกันข้ามถ้าเป็นไอออไดด์(iodide) จะไม่ค่อยจะละลายน้ำ เป็นต้น



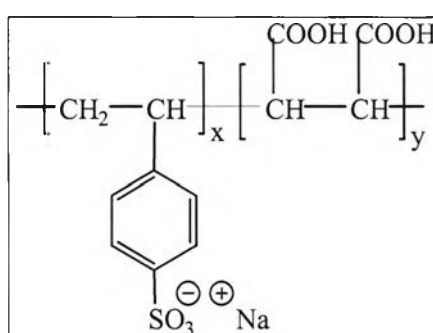
รูปที่ 2.9 พอลิอิเล็กโทรไลต์ 2 ชนิด คือ a) แบบอินทิกรอล(integral) b) แบบเพนแดนท์(pendant)

2.2.1 ตัวอย่าง และสมบัติของพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่สำคัญ

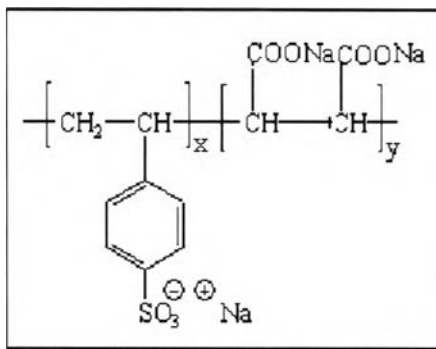
2.2.1.1 พอลิ-4-สไตรีนซัลโฟนิคโคมาเลอิกแอซิด (Poly(4-styrenesulfonic-co-maleic acid, sodium salt))

พอลิโฟว์สไตรีนซัลโฟนิคโคมาเลอิกแอซิด หรือกรณีนี้เรียกว่า โคพอลิเมอร์ (Copolymer) ประกอบด้วยสารสองชนิดที่สร้างพันธะร่วมกัน คือ ส่วนที่เป็นสไตรีน และส่วนที่เป็นกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก จัดเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ชนิดที่เป็นประจุลบ เพราะเมื่อละลายน้ำแล้ว จะเกิดการแตกตัวเป็นสองส่วน คือส่วนที่เป็นประจุลบ และส่วนที่เป็นประจุบวก โดยส่วนที่เป็นประจุลบเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ขนาดใหญ่ที่สร้างพันธะโควาเลนต์ร่วมกับประจุลบของซัลเฟต และกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก ส่วนประจุบวกเป็นส่วนที่เป็นอออนบวกของโซเดียมที่เป็นแคตไอออน

พอลิอิเล็กโทรไลต์ชนิดนี้เป็นพอลิเมอร์ที่มีความปลอดภัย โดยเป็นส่วนประกอบหนึ่งในแชมพู และครีมนวดผม และสามารถนำมาใช้ในงานวิจัยได้หลากหลาย โดยเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องกับการทำฟิล์มบาง ซึ่งต้องใช้หลักการที่เกี่ยวข้องกับประจุ โคพอลิเมอร์สามารถละลายในน้ำได้ เพราะจัดเป็นสารมีขั้ว เนื่องจากโดยปกติก่อนการละลายโคพอลิเมอร์จะมีความเป็นกลาง โดยทำให้ประจุลบส่วนที่เป็นกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกเป็นกลาง ด้วยการเติมสารบางอย่างเช่นอออนบวกของไฮโดรเจน ให้ไปดึงดูดกับกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกแล้วเป็นกลาง ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งยังคงเหลือส่วนที่เป็นสไตรีนที่ยังเป็นประจุลบอยู่ และสามารถแตกตัวได้ จึงสามารถละลายในน้ำได้ และกลายเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ชนิดที่เป็นลบ แต่เมื่อเติมตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้วลงไป โคพอลิเมอร์ก็ยังคงละลายได้อยู่ เพราะในโครงสร้างมีวงเบนซีนอยู่จึงละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ โครงสร้างของโคพอลิเมอร์ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 โครงสร้างโมเลกุลของโคพอลิเมอร์ที่มีกลุ่มคาร์บอกซิลิกเป็นกลาง

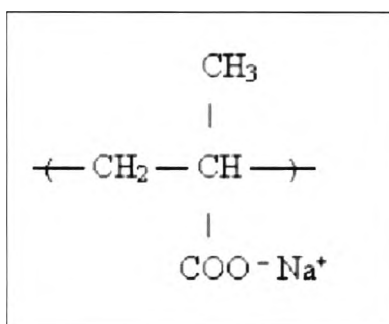


รูปที่ 2.11 โครงสร้างโมเลกุลของโคพอลิเมอร์ชนิดที่มีเกลือโซเดียม

2.2.1.2 พอลิเมทาคริลิกแอซิด-โซเดียมซอลต์ (Poly(methacrylic acid, sodium salt))

พอลิเมทาคริลิกแอซิด-โซเดียมซอลต์ หรือกรณีนี้เรียก พีเอ็มเอ(PMA) เป็นพอลิเมอร์ที่จัดว่ามีประจุเป็นลบ เมื่อละลายก็จะแตกตัวออกมาเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีประจุลบ และเกลือโซเดียม มักนำไปใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบาง ด้วยหลักการที่เกี่ยวข้องกับประจุ เป็นพอลิเมอร์ที่มีความปลอดภัย PMA ประกอบด้วยพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียว จึงมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ Copolymer

กลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกที่มีประจุเป็นลบที่เกิดคิงคูดกับอออนบวกอยู่จะไม่สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เนื่องจากจัดเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์แบบมีขั้ว ขณะที่ตัวทำละลายอินทรีย์มีขั้ว จึงไม่สามารถละลายได้ โครงสร้างของ PMA ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.12

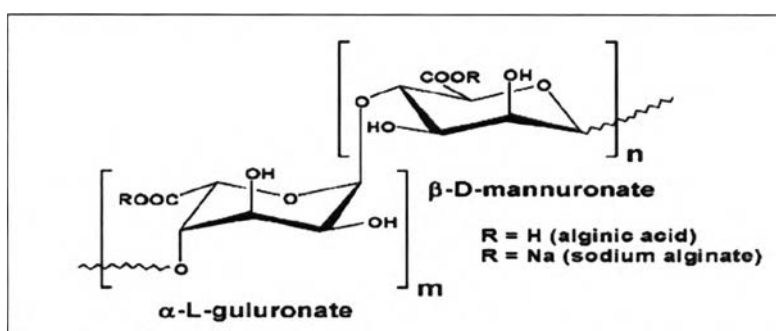


รูปที่ 2.12 โครงสร้างโมเลกุลของ PMA ที่มีเกลือโซเดียม

2.2.1.3 Alginate

แอลจินเตเป็นพอลิเมอร์ตามธรรมชาติที่ผลิตมาจากสาหร่าย ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสาหร่ายสีน้ำตาล ชื่อว่า ลามินาเรีย(Laminaria) พบตามแนวปะการังในทะเล และชายฝั่ง มีสายโซ่ยาวที่ประกอบด้วยกรด 2 ชนิด คือ α -L-guluronate และ β -D-mannuronate เนื่องจากสาหร่ายแต่ละที่บนโลก มักมีลักษณะแตกต่างกันตามภูมิประเทศ Alginate จึงมีลักษณะแตกต่างกันด้วย คือจะมีสัดส่วนขององค์ประกอบที่เป็นกรดสองส่วนข้างต้น แตกต่างกัน

Alginate มีความปลอดภัย เพราะมาจากธรรมชาติ การเป็นส่วนประกอบของสาหร่าย ทำให้มักนำไปใช้ในด้านอาหารสัตว์ ด้านอุตสาหกรรมการผลิตยา อุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับการพิมพ์ภาพบนเส้นใย เนื่องจาก Alginate มีสมบัติไม่ทำปฏิกิริยากับสีย้อม และเมื่อใช้งานแล้ว สามารถล้างออกไปได้ง่าย ทางด้านการผลิตอาหาร มีการนำ Alginate มาทำเป็นน้ำหวานที่มีความหนืด และส่วนที่ใช้ราดบนไอศกรีม นอกจากนี้ก็ยังมี การนำ Alginate มาใช้ในการวิจัย โดยเฉพาะเกี่ยวกับการพัฒนาฟิล์มบาง Alginate ที่มีเกลือโซเดียมจัดเป็นสารมีขั้ว จึงสามารถละลายในน้ำได้ แล้วแตกตัวเป็น Alginate ที่มีประจุเป็นลบ กับเกลือโซเดียม ดังนั้น Alginate จัดเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุเป็นลบ เป็นสารมีขั้ว เพราะมีประจุ จึงไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ แต่ละลายน้ำได้



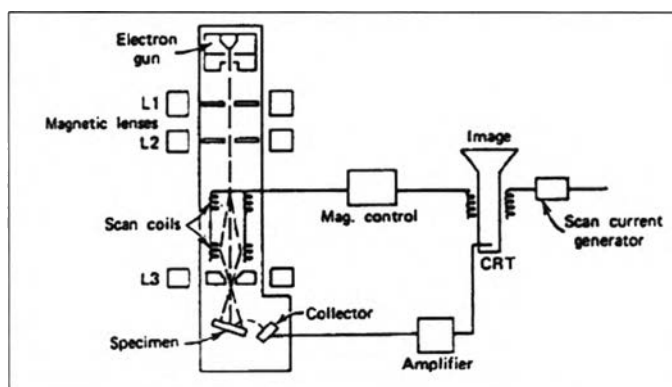
รูปที่ 2.13 โครงสร้าง โมเลกุลของ Alginate

2.3 การตรวจวัดสมบัติของอนุภาค

2.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด(Scanning electron microscope, SEM)^[16]

เป็นกล้องชนิดที่ใช้สำหรับส่องดูลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง หลักการคือ มีการบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวของชิ้นงาน แล้วแสดงผลบนจอ จะเห็นว่ากล้องชนิดนี้มีการทำงานคล้ายโทรทัศน์ ระบบของ SEM ไปเป็นไปตามรูปที่ 2.14 โดยลำอิเล็กตรอนจากปืนอิเล็กตรอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยๆ ถูกบังคับด้วยเลนส์แม่เหล็กให้สแกน(scan) บนผิวชิ้นงานเป็นสี่เหลี่ยม

จัดไว้ โดยในเวลาเดียวกันที่เหล็มนี่ก็ถูกสแกนบนหลอดรังสีคาโทด(cathode-ray tube, CRT) ทำให้ผิวของชิ้นงานปล่อยอิเล็กตรอนที่พลังงานต่ำออกมาเมื่อได้รับลำอิเล็กตรอน ความเข้มเป็นฟังก์ชันกับมุมของลำอิเล็กตรอนที่ทำกับผิวของชิ้นงาน และจะปรับเปลี่ยนไปตามสัดส่วนกับจำนวนของอิเล็กตรอนพลังงานต่ำที่ถูกปล่อยออกมาจากผิวชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดภาพของลักษณะพื้นผิวบนหลอดรังสีคาโทดเมื่อที่เหล็มนี่ถูกสแกน ก็จะเห็นภาพและถ่ายรูปได้ ขณะที่ TEM ทำให้เกิดภาพของชิ้นงานโดยตรง แต่ SEM จะให้ภาพของชิ้นงานทางอ้อม การจะได้ภาพละเอียดที่สุดมีค่าเท่ากับขนาดของลำอิเล็กตรอน ดังนั้นจึงต้องการลำอิเล็กตรอนที่เล็กที่สุด เนื่องจากว่าเป็นการส่องแบบกวาดจึงไม่จำเป็นต้องเตรียมชิ้นงานที่บางมาก ในบางครั้งอาจพบ SEM ที่ใช้เลนส์แค่ 2 เลนส์เท่านั้น แต่ปกติจะมี 3 เลนส์ โดยสองเลนส์แรกเป็นฟังก์ชันกับเลนส์ที่ 3 ในการบีบลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กลงเหลือ 10 นาโนเมตร(100 อังสตรอม) กำลังขยายมีค่าเท่ากับความกว้างของที่เหล็มนบนหลอดรังสีคาโทดหารด้วยความกว้างของที่เหล็มนบนชิ้นงานตัวอย่าง ความกว้างของที่เหล็มนบนรังสีคาโทดจะมีค่าคงที่บนหลอดรังสีคาโทด ขณะที่ความกว้างของที่เหล็มนที่อยู่ผิวชิ้นงานจะถูกควบคุมด้วยกระแสที่ขดลวดสแกน

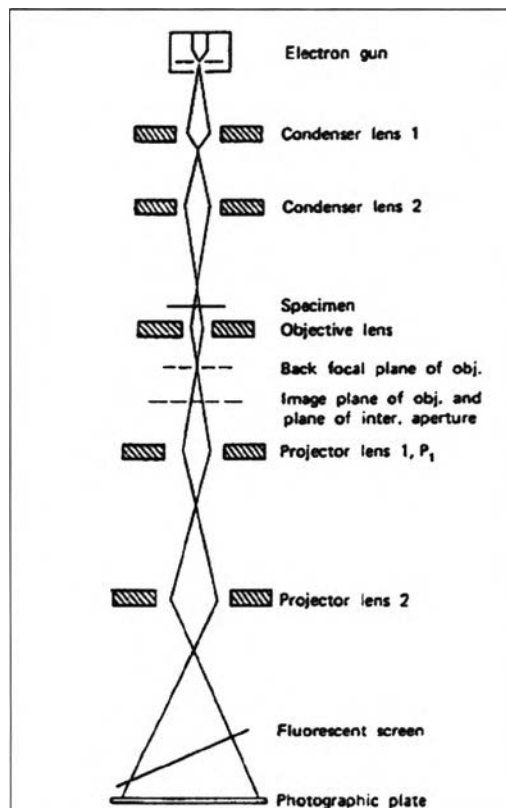


รูปที่ 2.14 รายละเอียดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด(SEM)

2.3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน(Transmission electron microscope, TEM)^[16]

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดหนึ่งที่ทำให้ภาพขยายของชิ้นงาน จากการที่ชิ้นงานได้รับลำอิเล็กตรอนส่องทะลุผ่านชิ้นงานโดยตรง ลำอิเล็กตรอนนี้จะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์(potential voltage) ทำให้เกิดลำอิเล็กตรอนที่มีความยาวคลื่นเดียว คือ ประมาณ $\lambda = \sqrt{150/V}$ โดยที่ λ คือความยาวคลื่นมีหน่วยเป็นอังสตรอม และ V คือ ความต่างศักย์มีหน่วยเป็นโวลต์ นั่นคืออิเล็กตรอนจะถูกปรับโดยสนามไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็ก กล้องชนิดนี้จึงใช้เลนส์แบบแม่เหล็ก โดยความยาวโฟกัสของเลนส์สามารถถูกเปลี่ยนได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงกระแสในม้วนทองแดงที่สร้างสนามแม่เหล็ก ทั้งนี้ระบบของ

กล้องชนิดนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.15 มีการทำงานดังนี้คือ ลำอิเล็กตรอนจะออกมาจากปืนอิเล็กตรอน ผ่านเลนส์รวมแสง(condenser lens) 2 ตัว เลนส์เหล่านี้จะถูกปรับเพื่อที่จะโฟกัสลำอิเล็กตรอนบนชิ้นงาน และจะควบคุมขนาดของลำอิเล็กตรอนบนชิ้นงานทดสอบ จากนั้นจะมีการปรับความยาวโฟกัสของเลนส์วัตถุ(objective lens) เพื่อที่จะสร้างภาพขยายของชิ้นงานทดสอบ ในระนาบของช่องตรงกลาง(plane of intermediate aperture) หน้าทีของเลนส์โปรเจกเตอร์(projector lens) ทั้งสองคือ ขยายภาพที่ได้จากเลนส์วัตถุลงบนฉากเรืองแสง(fluorescent screen) เกิดภาพขยายที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าบนระนาบรูปถ่าย(photographic plate) สิ่งสำคัญคือ ในTEMต้องประกอบด้วยเลนส์รวมแสงที่จะรวมลำอิเล็กตรอนให้ลงไปชิ้นงานเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กๆ เลนส์วัตถุที่มีหน้าที่ขยายภาพให้ใหญ่ขึ้น และสุดท้ายคือเลนส์โปรเจกเตอร์ที่จะขยายภาพให้เป็นแบบที่ต้องการบนจอต่อมา กำลังขยายของอุปกรณ์นี้แปรผกผันกับความยาวคลื่นของลำรังสี คือเมื่อใช้ลำอิเล็กตรอนที่มีความยาวคลื่นน้อย ก็จะมีกำลังขยายสูง ชิ้นงานสำหรับตรวจสอบด้วย TEM นี้จะต้องบางมาก จึงจะทำให้ลำอิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านได้ กล้องชนิดนี้เป็นแบบใช้ส่องดูภาพตัดขวางของชิ้นงาน

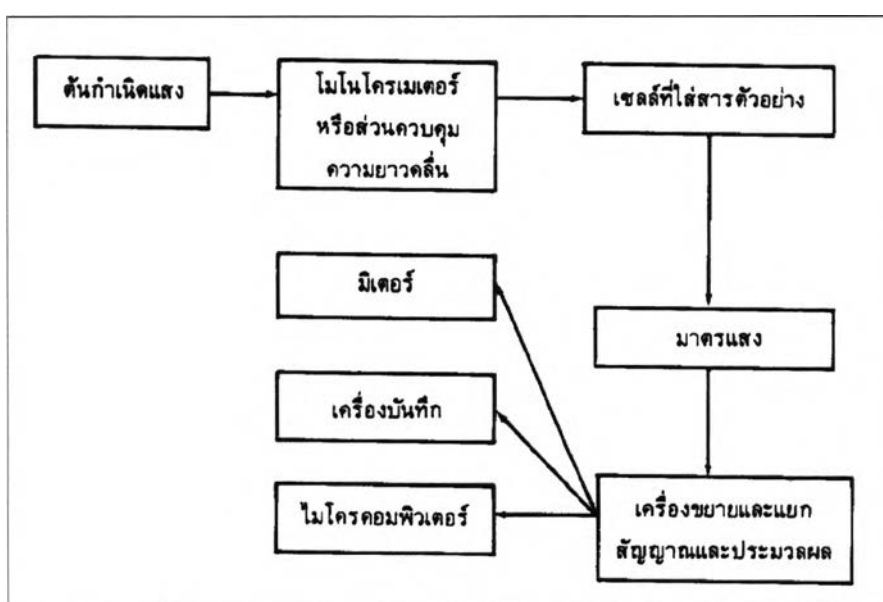


รูปที่ 2.15 รายละเอียดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

2.3.3 อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-vis spectroscopy หรือ Ultraviolet and Visible Spectroscopy)⁽¹⁷⁾

เป็นอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ในเชิงคุณภาพ และปริมาณที่มีความถูกต้องแม่นยำ และมีสภาพไว(sensitive) สูง ใช้สำหรับวิเคราะห์สารเคมีที่มีการดูดกลืนแสงหรือรังสีในช่วงอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิล โดยมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 190-800 นาโนเมตร ของสารเคมีนั้น ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์(organic compound) หรือ สารประกอบเชิงซ้อน(complex compound) หรือ สารอนินทรีย์(inorganic compound) ทั้งชนิดที่มีสี และไม่มีสี การวิเคราะห์อาจอยู่ในรูปของธาตุหรือโมเลกุลก็ได้ ถ้าสารนั้นมีสี สารที่มีสีนั้นจะดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิล โดยอาจเรียกเทคนิคนี้ว่า คัลเลอร์ิเมตรี ก็ได้

หลักการคือเมื่อมีลำแสงที่ต่อเนื่อง(continuous beam of radiation) ผ่านเข้าไปในวัตถุใสจะพบว่าแสงบางส่วนนั้นจะถูกดูดกลืน บางส่วนเกิดการสะท้อน บางส่วนเกิดการกระเจิง และบางส่วนผ่านทะลุออกไป ถ้าให้แสงที่ทะลุออกไปผ่านเข้าไปที่ปริซึมจะพบว่ามีสเปกตรัมส่วนหนึ่งหายไป ส่วนที่หายไปเรียกว่า สเปกตรัมที่ถูกดูดกลืน(absorption spectrum) และการที่พลังงานถูกดูดกลืนไปทำให้โมเลกุลหรืออะตอมเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะพื้น(ground state) ไปยังสถานะกระตุ้น(excited state) เครื่องมือนี้จะแสดงผลออกมาในรูปของแถบสเปกตรัมที่แกนดั่งคือความเข้มของการดูดกลืน และแวนอนคือความยาวคลื่น อนุภาคโลหะที่มีขนาดเล็กระดับนาโนมักจะมีแถบการดูดกลืน หรือสเปกตรัมเฉพาะตัว ซึ่งไม่สามารถพบได้ในโลหะที่มีขนาดใหญ่ จึงใช้เส้นสเปกตรัมนี้เป็นตัวกำหนดชนิดของโลหะได้ เช่น อนุภาคเงินนาโนจะมีเส้นสเปกตรัมที่ตำแหน่งประมาณ 430 นาโนเมตร เป็นต้น เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปีประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 องค์ประกอบของเครื่องสเปกโทรสโกปี

ขั้นตอนการวิเคราะห์โดยใช้ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี

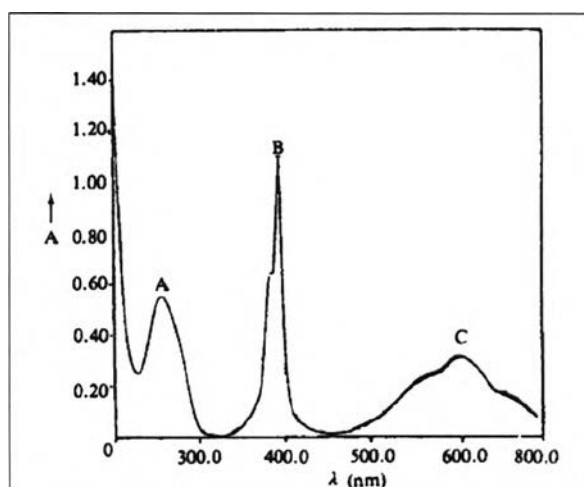
1. ศึกษาการเตรียมสารละลายตัวอย่าง โดยเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสม คือ ตัวทำละลายจะต้องไม่มีการดูดกลืนแสงในช่วงเดียวกับสารตัวอย่าง โมเลกุลไม่ควรมีระบบคอนจูเกต(conjugated system)

2. ใช้สภาวะเครื่องมือให้ถูกต้องคือ หลอดกำเนิดแสงที่ใช้อาจเป็นหลอดทั้งสแตน หรือหลอดยูวี (UV-lamp) หรือหลอดควิเทอริยม และการเลือกใช้สลิทที่ถูกต้อง

3. ศึกษาแอมพลิจูดสเปกตรัม โดยสแกน(scan) ค่าแอมพลิจูดกับความยาวคลื่นจากสเปกตรัม ซึ่งจะช่วยให้รู้ว่าควรเลือกความยาวคลื่นสูงสุด(λ_{max}) ที่ความยาวคลื่นเท่าใด ดังรูปที่ 2.17 แสดงว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสง(peak) B ดีที่สุดที่จะใช้วัดค่าแอมพลิจูด

4. ศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลทำให้แอมพลิจูดเปลี่ยนแปลงได้ เช่น ตัวทำละลายที่ใช้ ค่าความเป็นกรดต่างซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมาก โดยเฉพาะสารอินทรีย์ที่อยู่ในช่วงวิสิเบิล หรือสารที่ทำให้เกิดสี นอกจากนี้ต้องตรวจสอบตัวรบกวนที่จะมีผลต่อค่าแอมพลิจูด และกรณีที่ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน ควรจะศึกษาถึงความเสถียรของสารประกอบเชิงซ้อน และเวลาที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณืที่เป็นผลจากการเติมสารละลายที่มากเกินไป

5. ถ้าจะวิเคราะห์หาปริมาณ ต้องเตรียมสารละลายมาตรฐานให้มีความเข้มข้นต่างๆ เพื่อทำการกราฟปรับมาตรฐาน



รูปที่ 2.17 ยูวี-วิสิเบิลสเปกตรัมของสารตัวอย่าง

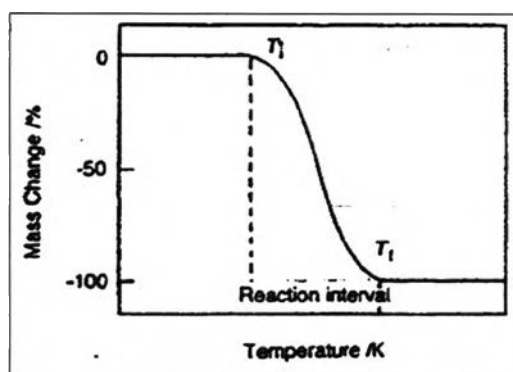
2.3.4 การวิเคราะห์ความถ่วงจำเพาะเชิงความร้อน(Thermogravimetric Analysis, TGA)¹⁸⁾

เป็นเครื่องมือสำหรับตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงมวลของตัวอย่าง ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิหรือกับเวลา เช่น ในการเกิดการสลายตัว(decomposition) การออกซิเดชัน(oxidation) และการระเหย

(vaporization) เป็นต้น แต่ปรากฏการณ์ทางความร้อนที่เกิดขึ้นในบางกรณี อาจไม่มีส่วนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมวลเสมอไป เช่น การหลอมเหลว(melting) การตกผลึก(crystallization) เป็นต้น ส่วนใหญ่มักใช้วิเคราะห์การสลายตัว และความเสถียรทางความร้อน(thermal stability) ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน และใช้ตรวจสอบจลศาสตร์เชิงเคมีกายภาพ(physicochemical) ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานตัวอย่าง

เส้นโค้ง TG

ผลการวิเคราะห์มักแสดงออกมาด้วย กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงมวล (mass change, Δm) ในหน่วยเปอร์เซ็นต์กับอุณหภูมิ หรือเวลา ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.18 อุณหภูมิ T_i หรือ procedural decomposition temperature จะแสดงอุณหภูมิต่ำสุดที่เป็นระยะเริ่มต้น(onset) ของการเปลี่ยนแปลงมวลที่สามารถวัดได้ ส่วน T_f หรือ final temperature ซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำสุดที่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมวลได้อย่างสมบูรณ์



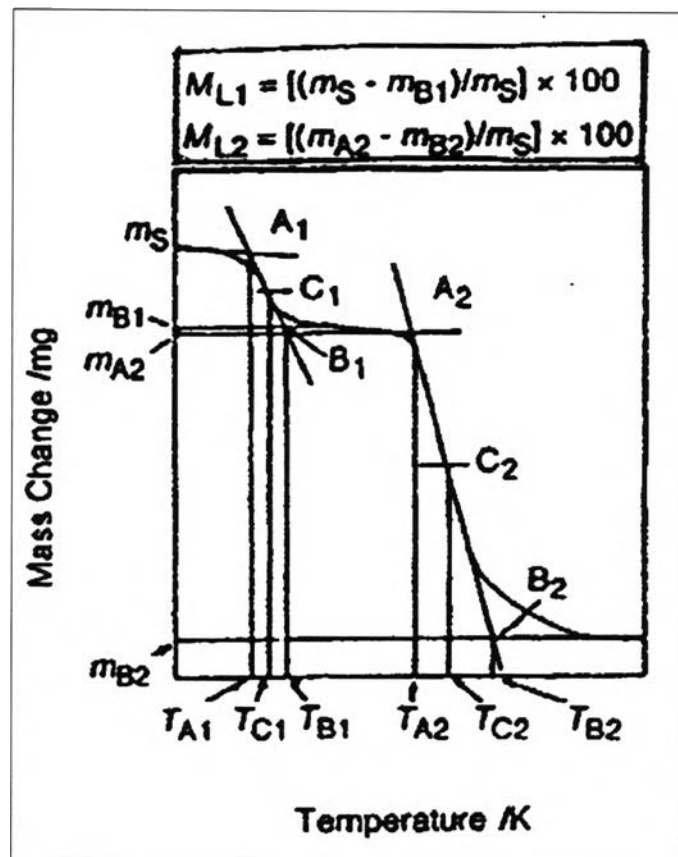
รูปที่ 2.18 ภาพเส้นโค้ง TG แบบขั้นเดียว(single-stage)

สามารถคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลตามมาตรฐาน (the international Standard Organization, ISO) ดังตัวอย่าง ที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.19 โดยให้จุด A_1 เป็นจุดตัดระหว่างเส้นตรงที่บอกน้ำหนักตั้งต้น กับเส้นความชันที่มีการเปลี่ยนแปลง และ B_1 เป็นจุดตัดระหว่างเส้นความชันกับเส้นความชันที่น้อยที่สุดหลังจากมวลลดลงอย่างสมบูรณ์ และจุด C_1 เป็นจุดตัดระหว่างเส้นที่ลากตามแนวนอนที่อยู่กึ่งกลางระหว่าง A_1 กับ B_1 บนเส้นโค้ง TG ซึ่งเรียกว่าจุดกึ่งกลาง(mid-point)และเส้นโค้งถัดมาก็พิจารณาแบบเดียวกัน การคำนวณจะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$M_{L1} = [(m_s - m_{B1}) / m_s] \times 100$$

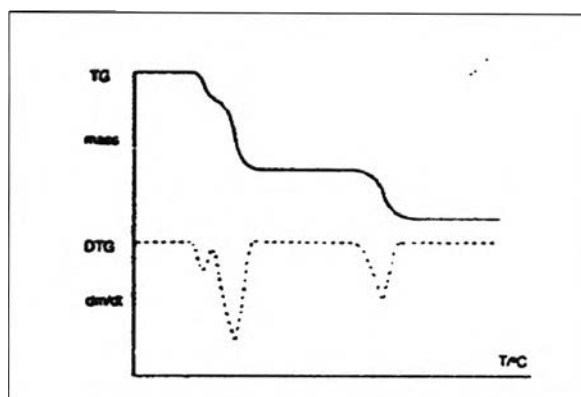
$$M_{L2} = [(m_{A2} - m_{B2}) / m_s] \times 100$$

โดยที่	M_{L1} และ M_{L2}	คือ อัตราการสูญเสียน้ำหนัก (the rate of mass loss)
	M_S	คือ มวลตั้งต้นของเส้น โคง้ที่ 1
	M_{B1}	คือ มวลที่ลดลงอย่างสมบูรณ์ในเส้น โคง้ที่ 1
	M_{A2}	คือ มวลตั้งต้นของเส้น โคง้ที่ 2
	M_{B2}	คือ มวลที่ลดลงอย่างสมบูรณ์ในเส้น โคง้ที่ 2



รูปที่ 2.19 เส้น โคง้ TG แบบหลายขั้น(multi-stage)

จากกราฟ มักมีเส้นโค้งที่เรียกว่า derivative TG curve หรือ DTG ซึ่งเป็นกราฟของมวลที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ (dm/dT) ดังรูปที่ 2.20 โดยที่จุดกลับของส่วน โคง้บนในการเปลี่ยนแปลงของมวลในเส้น โคง้ TG จะเป็นค่าต่ำสุดในเส้นโค้ง DTG ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงที่มากที่สุด ส่วนในช่วงที่ไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงของมวล ค่าใน DTG จะเป็นศูนย์



รูปที่ 2.20 เส้นทีบเป็นเส้นโค้ง TG ส่วนเส้นแบบจุดเป็นเส้นโค้ง DTG

2.4 ทฤษฎีการมองเห็นสีเบื้องต้น

โดยปกติ การมองเห็นสีได้ต้องประกอบด้วยปัจจัย 3 อย่าง ดังนี้คือ แหล่งกำเนิดแสง วัตถุสี และสายตาของมนุษย์ มีกระบวนการดังนี้คือ แสงจากแหล่งกำเนิดจะส่องกระทบวัตถุสี แล้วสะท้อนเข้ามา โดยแสงที่ส่องมาที่วัตถุ หรืออนุภาคจะทำให้เกิดการสั่นของอิเล็กตรอนบนอนุภาค เนื่องจากรับพลังงานมาจากแสงด้วยการดูดกลืนไว้ที่ความยาวคลื่นแสงหนึ่ง พลังงานที่มากพอจะทำให้อิเล็กตรอนเกิดการสั่น (Surface Plasmon Resonance) แล้วจะปลดปล่อยพลังงานส่วนที่ไม่ได้ดูดกลืนไว้ออกมา เป็นแสงที่ความยาวคลื่นหนึ่ง ขึ้นอยู่กับรูปร่าง ขนาด ความหนาแน่นของอนุภาคนั้นๆ แล้วไปกระตุ้นให้เกิดการทำงานของเซลล์เรตินาที่ประกอบด้วย rods ที่มีความไวแสง แต่ไม่ก่อให้เกิดสี และ cones ที่ไวต่อแสง 3 สี คือ แดง เขียว และน้ำเงิน ให้ส่งสัญญาณไปที่สมองเพื่อวิเคราะห์สี

ต่อไปนี้จะอธิบายแหล่งกำเนิดแสงที่น่าสนใจดังนี้

แหล่งกำเนิดแสง(Light source)^[19]

แหล่งกำเนิดแสงมี 2 แหล่ง คือ แหล่งกำเนิดแสงตามธรรมชาติ และแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 แหล่งกำเนิดแสงตามธรรมชาติ

แหล่งกำเนิดแสงตามธรรมชาติที่ใหญ่ที่สุด คือ แสงอาทิตย์ ซึ่งก่อนที่จะส่งมาถึงโลก จะเกิดการกระเจิงของแสง หรือถูกดูดกลืนบางส่วนไว้โดยชั้นโอโซน ส่วนที่ผ่านมาถึงโลกประกอบด้วยแสงที่มีหลายความยาวคลื่นเรียงจากความยาวคลื่นน้อยไปหามาก ดังนี้คือ แสงส่วนที่อยู่ใกล้กับแสงที่สามารถมองเห็นได้ (near-visible light) แสงที่สามารถมองเห็นได้ (visible light) และแสงใกล้อินฟราเรด (near-infrared light) ส่วนแสงที่อยู่ใกล้กับแสงที่สามารถมองเห็นได้คือ แสงอัลตราไวโอเล็ต หรือแสง

ยูวี ซึ่งแบ่งเป็น 3 ส่วน คือส่วนที่เป็นรังสี UV-C มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 200-280 นาโนเมตร โดยชั้นโอโซนสามารถกรองไว้ได้หมด ส่วนรังสี UV-B มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 280-320 นาโนเมตร ซึ่งชั้นโอโซนสามารถกรองได้เป็นส่วนใหญ่ แต่ไม่หมด และรังสี UV-A มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 320-400 นาโนเมตร โดยชั้นโอโซนสามารถกรองได้เล็กน้อย แสงในกลุ่มที่ไม่สามารถมองเห็นได้นี้แม้ว่าจะเป็นช่วงแคบ แต่ก็มีพลังงานสูงมาก เพราะมีความยาวคลื่นน้อย ความถี่จึงสูง โดยแสงที่สามารถมองเห็นได้มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 นาโนเมตร^[19] แสงที่มองเห็นเป็นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะผ่านบรรยากาศชั้นโอโซนมาถึงโลกประมาณ 43 เปอร์เซ็นต์ ส่วนแสงใกล้อินฟราเรดมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 700-1000 นาโนเมตร มีประมาณ 49-50 เปอร์เซ็นต์ แสงที่มีพลังงานมากคือ แสงที่มีความยาวคลื่นน้อย และมีความถี่สูง

แสงที่มองเห็นได้แต่ละความยาวคลื่นจะมีสีแตกต่างกัน ดังนี้คือ

ความยาวคลื่น 400-430 นาโนเมตร	เป็นแสง	สีม่วง
ความยาวคลื่น 430-460 นาโนเมตร	เป็นแสง	สีน้ำเงิน
ความยาวคลื่น 460-500 นาโนเมตร	เป็นแสง	สีเขียวแกมน้ำเงิน
ความยาวคลื่น 500-530 นาโนเมตร	เป็นแสง	สีเขียว
ความยาวคลื่น 530-570 นาโนเมตร	เป็นแสง	สีเขียวแกมเหลือง
ความยาวคลื่น 570-590 นาโนเมตร	เป็นแสง	สีเหลือง
ความยาวคลื่น 590-620 นาโนเมตร	เป็นแสง	สีส้ม
ความยาวคลื่น 620-700 นาโนเมตร	เป็นแสง	สีแดง

2.4.2 แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์

แหล่งกำเนิดแสงนี้มีหลายแบบ ดังนี้คือ

2.4.2.1 หลอดไฟอินแคนเดสเซนต์(Incandescence)

แสงนี้เกิดจากโลหะทองเหลืองได้รับความร้อน แล้วปล่อยรังสีอินฟราเรดออกมาจึงร้อนมาก โลหะจะเปลี่ยนสีจากแดง เป็นสีแดงสด สีเหลือง และสีฟ้า ตามลำดับ สีที่เห็นขึ้นกับอุณหภูมิของโลหะ โดยความยาวคลื่นของแสงจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของโลหะเพิ่มขึ้น

2.4.2.2 หลอดไฟทังสเตน(Tungsten Filament Lamp)

หลอดไฟทังสเตน เป็นชนิดเดียวกับหลอดไฟชนิดมีไส้ มีลักษณะเป็นหลอดกลม แบ่งชนิดตามกำลังไฟฟ้าได้หลากหลาย เช่น 25, 40 และ 60 วัตต์ เป็นต้น แสงนี้ เกิดจากการที่ลวดทังสเตนได้รับ

ความร้อนด้วยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในหลอดแก้วที่มีก๊าซเฉื่อย หรือมีการลดความดันอากาศลง เพื่อให้หลอดทั้งสแตนเกิดการออกซิเดชันน้อยที่สุด เมื่อหลอดร้อนจะทำให้เกิดพลังงานแสงออกมาที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 นาโนเมตร โดยมีการกระจายพลังงานอย่างสม่ำเสมอ แสงจากหลอดจะมีสีเหลืองมากกว่าแสงอาทิตย์ หลอดชนิดนี้มีข้อเสียคือ เมื่อได้รับความร้อนแล้ว ไอระเหยของทั้งสแตนจะไปเกาะติดที่ผนังด้านในของหลอดแก้ว ทำให้หลอดแก้วดำขึ้นเรื่อยๆ และความสว่างก็จะลดลงเรื่อยๆ เมื่อใช้ไปนานๆ

2.4.2.3 หลอดไฟทั้งสแตน-ฮาโลเจน(Tungsten-Halogen Lamp)

ส่วนใหญ่เรียกหลอดฮาโลเจน เพราะมีก๊าซฮาโลเจน เช่น ไอโอดีน หรือโบรมีน อยู่ในหลอด ปริมาณเล็กน้อย ซึ่งเป็นการพัฒนามาจากหลอดไฟทั้งสแตน ที่มีปัญหาหลอดดำ และความสว่างลดลง เนื่องจากไอระเหยของทั้งสแตน สำหรับกรณีนี้ ไอทั้งสแตนจะไปรวมตัวกับก๊าซฮาโลเจนกลายเป็นทั้งสแตนเฮไลด์ แทนที่จะไปเกาะผนังหลอด เมื่อทั้งสแตนเฮไลด์มากระทบกับหลอดทั้งสแตน ทั้งสแตนเฮไลด์ก็จะแยกตัว คือ ทั้งสแตนจะไปเกาะที่ไส้หลอด ส่วนฮาโลเจนก็จะเป็นก๊าซหมุนเวียนอยู่ในหลอด หลอดจึงไม่ดำ หลอดชนิดนี้มีอายุการใช้งานนาน แสงที่ได้มีการกระจายพลังงานสม่ำเสมอ

2.4.2.4 หลอดฟลูออเรสเซนต์(Fluorescence Lamp)

เป็นหลอดที่ภายในบรรจุไอปรอทอยู่ แสงเกิดจากการที่ไอปรอทแผ่รังสีที่มีความยาวคลื่นในช่วงแสงยูวี และแสงที่มองเห็นได้ โดยแสงที่บางความยาวคลื่นจะส่องผ่านผงฟลูออเรสเซนต์ที่เคลือบด้านในหลอดออกไป ส่วนรังสียูวีจะถูกผงฟลูออเรสเซนต์ดูดไว้ และปล่อยพลังงานออกมาในช่วงที่แสงมองเห็นได้

2.4.2.5 หลอดไฟซีนอนอาร์ค(Xenon Arc Lamp)

หลอดไฟชนิดนี้ให้แสงด้วยการปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซ ทำให้เกิดแสงที่มีการกระจายพลังงานอยู่ในช่วงยูวี และอินฟราเรด ถ้ากรองแสงลดยูวีอย่างสม่ำเสมอ พร้อมกับกรองความร้อนเพื่อลดรังสีอินฟราเรดให้ต่ำ จะทำให้หลอดชนิดนี้กลายเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ใกล้เคียงกับแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานของ CIE D65(เป็นระบบวัดสี ที่ไม่ต้องอาศัยประสบการณ์ หรือความคิดมนุษย์ โดยจะวัดสีออกมาเป็นตัวเลข) หรือแสงแดดในตอนกลางวัน