



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การป้องกันการหมองของเครื่องประดับเงินด้วยอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตร
Tarnish Protection of Silver Jewelry by Gold Nanoparticles

รศ.ดร. พิมพ์ทอง ทองนพคุณ

ดร. เมธินี จามกระโทก

ดร. พร้อมพงศ์ เพียรพิณิชธรรม

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2558A10802307

สัญญาเลขที่ 148/2558

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การป้องกันการหมองของเครื่องประดับเงินด้วยอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตร
Tarnish Protection of Silver Jewelry by Gold Nanoparticles

รศ.ดร. พิมพ์ทอง ทองนพคุณ

ดร. เมธินี จามกระโทก

ดร. พร้อมพงศ์ เพียรพิณีธรรม

คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา

คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรกฎาคม 2559

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 148/2558 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยงานต้นสังกัด คณะอัญมณี และคณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี ในการอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการเคมีและห้องปฏิบัติการทำเครื่องประดับ และขอขอบคุณ หน่วยปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการและเครื่องมือวิเคราะห์วิจัย รวมถึงศูนย์กล้องจุลทรรศน์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือ Scanning Electron Microscope รวมถึงขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัยทุกคนที่ช่วยทำงานวิจัยในโครงการนี้ให้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัย

บทคัดย่อ

การป้องกันการหมองของเครื่องประดับเงินด้วยอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตร

Tarnish Protection of Silver Jewelry by Gold Nanoparticles

รศ.ดร.พิมพ์ทอง ทองนพคุณ^{*1}, ดร.เมธิณี จามกระโทก², ดร.พร้อมพงศ์ เพียรพินิจธรรม³

¹หน่วยวิจัยอัญมณีและเครื่องประดับ คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

โทรศัพท์ 0-3931-0000 โทรสาร 0-3931-128 E-mail: pimthong@buu.ac.th

²คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

โทรศัพท์ 0-3931-0000 โทรสาร 0-3931-128 E-mail: matinee@buu.ac.th

³หน่วยวิจัยอุปกรณ์รับรู้ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โทรศัพท์ 0-2218-7585 โทรสาร 0-2218-7585 E-mail: prompong@chula.ac.th

บทคัดย่อ

เงินเป็นโลหะมีค่าสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ เครื่องประดับเงินเมื่อสัมผัสอากาศจะเกิดการหมองเนื่องจากเงินทำปฏิกิริยากับอนุภาคซัลเฟอร์ ดังนั้นกรรมวิธีปรับปรุงผิวและการเคลือบผิวเพื่อป้องกันการหมองของเงินจึงถูกพัฒนาขึ้นหลากหลายวิธี อย่างไรก็ตามแต่ละวิธีมีข้อจำกัดและข้อเสียแตกต่างกัน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตรและแผ่นทองคำระดับไมโครเมตรสำหรับการเคลือบผิวเพื่อป้องกันการหมองของโลหะเงิน ในงานวิจัยนี้ อนุภาคทองคำระดับนาโนเมตรและแผ่นทองคำระดับไมโครเมตรถูกสังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการทางเคมี รวมถึงศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดอนุภาคของทองที่สังเคราะห์ได้ กระบวนการเคลือบอนุภาคทองหลายชั้นทำได้โดยเทคนิคการเคลือบแบบจุ่มอย่างง่ายในสารละลายทองคำที่ละลายในเอทิลีนไกลคอล การศึกษาความสามารถในการต้านทานการหมองของเงินที่ผ่านการเคลือบทดสอบภายใต้สภาวะสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ การตรวจวัดค่าสีเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสีภายหลังการเคลือบด้วยทองและการทดสอบกันหมองใช้ระบบมาตรฐาน CIELAB ด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ ผลการวิจัยพบว่าการเคลือบผิวเงินด้วยอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตรและแผ่นทองคำระดับไมโครเมตรมีประสิทธิภาพ เมื่อเคลือบแล้วมองไม่เกิดการเปลี่ยนสีด้วยตาเปล่า และสามารถต้านทานการหมองของเงินได้ เทคนิคที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ไม่เพียงแต่มีประโยชน์ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับเงินเท่านั้น แต่อาจสามารถประยุกต์เพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมโลหะอื่นได้อีกด้วย

Abstract

Silver is a promising precious metal for jewelry industry. The silver jewelry findings exposed to air will tarnish because it comes into contact with sulfur particles in atmospheres. Therefore, surface treatments and coating methods were developed to protect tarnishing of silver. However, the methods still have several limitations and disadvantages. The objective of this research was to develop gold nanoparticles and gold microplates for surface coating and tarnish resistance of silver. In this study, the gold nanoparticles and gold microplates were synthesized by chemical reduction methods and influence of the synthesis parameters on the particle sizes was examined in detail. Multilayer coating of gold particles were performed by a simple dip coating method to produce the gold film using a gold coating solution, which disperses gold particles in ethylene glycol solution. An investigation on the anti-tarnish properties of the coated silvers was performed under sodium sulphide solution. To specify the color change after multilayer coatings of gold particles and tarnishing test, the color measurement were determined according to the Commission Internationale d' Eclairage (CIELAB) standard by UV-visible spectrometer. Finally, it was found that the silver coatings with gold nanoparticles and microplates are efficient, invisible and against tarnishing. The developed techniques in this research not only utilized for silver jewelry industry but also may apply for other metal industrial developments.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการงาน	1
1.2 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	2
1.2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของทองคำ	2
1.2.2 คุณสมบัติของอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตร	4
1.2.3 กระบวนการสังเคราะห์อนุภาคทองคำในระดับนาโนเมตรและไมโครเมตร	8
1.2.2 ระบบการวัดสี	10
1.2.4 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย	16
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	21
1.5 ขอบเขตของโครงการวิจัย	21
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	21
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย	22
2.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	22
2.2 การสังเคราะห์อนุภาคทองคำ	22
2.3 การเคลือบทองคำนาโนลงบนแผ่นเงิน	25
2.4 การทดสอบการต้านทานการหมอง	27
2.5 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล เนียร์ไออาร์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible NIR Spectrophotometer)	27
2.6 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 การวัดขนาดอนุภาคด้วยโปรแกรม Image J	27
2.8 การวิเคราะห์สีด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพา	28
บทที่ 3 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	30
3.1 ผลการสังเคราะห์อนุภาคทอง	30
3.1.1 การสังเคราะห์อนุภาคทองคำระดับนาโนเมตร (Gold nanoparticles)	30
3.1.2 การสังเคราะห์ทองคำแบบแผ่นขนาดไมครอน (Gold Microplate)	30
การทดลองที่ 1 การศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นสารละลาย ทองคำ	20
การทดลองที่ 2 การศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของพอลิวินิลไพร์โรลิโดน	35
การทดลองที่ 3 การศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นเอทิลีนไกลคอล	42
3.2 การวิเคราะห์การอนุภาคทองคำหลังการเคลือบด้วยเทคนิค SEM	46
3.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีภายหลังการเคลือบด้วยอนุภาคทอง	48
3.4 ผลการทดสอบการต้านทานการหมอง (Tarnish Resistance Test)	53
บทที่ 4 สรุปผลการวิจัย	62
4.1 สรุปผลการวิจัย	62
4.2 ข้อเสนอแนะ	62
4.2.1 ข้อเสนอแนะด้านกระบวนการผลิต	62
4.2.2 การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์	63
4.2.3 ข้อจำกัดของงานวิจัยและข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อในอนาคต	63
บรรณานุกรม	64

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและอะตอมของทองคำ	3
2.1 สภาวะการทดลองในการสังเคราะห์อนุภาคทองคำ	24
2.2 สภาวะที่ใช้ในการทดลองเคลือบผิวและกันหมองของแผ่นเงิน	26
3.1 ผลการวัดสีก่อนและหลังการเคลือบด้วยอนุภาคทองคำ	49
3.2 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าสีจากการเคลือบแผ่นเงินด้วยอนุภาคทองคำ	52
3.3 ภาพชิ้นงานที่เคลือบทองคำที่ผ่านการทดสอบกันหมองด้วย Na_2S ณ เวลาต่างกัน	54
3.3 ค่าสีที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยทองคำก่อนและหลังการทดสอบกันหมอง	55
3.4 สรุปการเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการกันหมอง	59

สารบัญรูป

รูป		หน้า
1.1	สีและขนาดของอนุภาคทองคำในระดับนาโนเมตร ขนาดเล็กที่สุด 2 นาโนเมตร (ใส่ไม่มีสี) ถึงขนาด 150 นาโนเมตร (สีน้ำเงิน)	5
1.2	ลักษณะการสั่นของอิเล็กตรอนอิสระในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (มุมซ้ายบน) ขึ้นอยู่กับรูปร่างของอนุภาคที่ต่างกัน, รูปร่างทรงกลม (กลางซ้าย) หรือไม่เป็นทรงกลม (ล่างซ้าย) มีลักษณะการดูดกลืนแสงของเซอร์เฟส พลาสมอน เรโซแนนซ์ที่แตกต่างกัน (ด้านขวา)	5
1.3	รูปร่างที่แตกต่างกันของทองคำในมิติต่างๆ (1) 0 มิติ มีรูปร่างแบบทรงกลมและแบบกลุ่ม (2) 1 มิติ มีรูปร่างแบบเส้นใย เส้นลวดและแบบแท่ง (3) 2 มิติ มีรูปร่างแบบฟิล์ม แบบแผ่นและแบบตาข่าย (4) 3 มิติ เป็นรูปร่างที่ประกอบรวมกันเป็นวัสดุนาโน	6
1.4	ภาพถ่าย SEM อนุภาคทองคำที่มีรูปร่างเป็นแผ่นแบบสามเหลี่ยม (A) หกเหลี่ยม (B) และแบบสามเหลี่ยมถูกตัดทอน (C)	7
1.5	แผนภาพแสดงการทำปฏิกิริยาของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยวิธีการทางเคมี ช่วงแรกเป็นช่วงของการรีดิวซ์จาก Au^{3+} ไปเป็น Au^0 จากนั้นเข้าสู่ช่วงที่สองของการเกิดปฏิกิริยา คือช่วงการเติบโตของผลึกในทิศทางที่แตกต่างกัน นำไปสู่ขนาดและรูปร่างของอนุภาคที่แตกต่างกัน	9
1.6	การโตของผลึกในทิศทางที่แตกต่างกัน ส่งผลให้อนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้มีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกัน	10
1.7	สีสั่นและโครมาในระบบมันเชลล์ ที่ค่า value ที่กำหนด	12
1.8	(ก) Munsell Book (ข) Munsell Tree และ (ค) ตัวอย่างการเทียบสีวัสดุกับ Munsell book	12
1.9	ฟังก์ชันการปรับเทียบสี \bar{x} , \bar{y} และ \bar{z}	14
1.10	แผนภาพแสดงการหาค่า tristimulus values	14
1.11	แผนภูมิโครมาทิกซี้ xy ที่มุมมอง 2 องศาตัวช่วยเสถียรที่ใช้สังเคราะห์ (PVP)	14
1.12	การแสดงค่าความสว่างและสีสั่นด้วยกราฟ 3 มิติ	15
2.1	อนุภาคทองคำระดับนาโนเมตรเป็นสารละลายคอลลอยด์สีแดง	23
2.2	สารละลายทองคำ (ก), ขณะทำการสังเคราะห์จะตกตะกอนลงมาเป็นเกร็ดทอง (ข) และตะกอนทองคำที่ได้จากการสังเคราะห์ (ค)	25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
2.3	คำสั่งตั้งค่าความยาว (Set scale) สำหรับการตั้งค่าความยาวของขนาดอนุภาค	28
2.4	การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิคการสะท้อนด้วยเครื่องยูวีวิสซิเบิลแบบพกพา	29
3.1	สารละลายทองคำขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรเป็นคอลลอยด์ของอนุภาคสีแดง (ขวา) และทองคำระดับไมโครเมตร (ซ้าย)	30
3.2	วิธีเบิล-เนียร์โฮอาร์สเปกตรัมของแผ่นทองคำที่สังเคราะห์ด้วยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายทองคำ	31
3.3	ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยายต่างๆ ของอนุภาคทองคำที่สังเคราะห์โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายทองคำที่แตกต่างกัน 3 ความเข้มข้นคือ (ก) 0.2 M (ข) 0.4 M และ (ค) 0.7 M	33
3.4	สมการแสดงการแตกตัวของ $Au^{(3+)}$ และการเกิด Au^0	34
3.5	รูปร่างของแผ่นทองคำที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อความเข้มข้นของสารละลายทองคำที่ใช้เป็นสารตั้งต้นเพิ่มขึ้น	34
3.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของแผ่นทองคำที่ได้จากการสังเคราะห์ในการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับความเข้มข้นของสารละลายทองคำที่ใช้ในการสังเคราะห์ (ความเข้มข้นของพอลิวินิลไพร์โรลิโดนและเอทิลีนไกลคอลคงที่)	35
3.7	วิธีเบิล-เนียร์โฮอาร์สเปกตรัมของแผ่นทองคำที่สังเคราะห์ด้วยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของพอลิวินิลไพร์โรลิโดน	36
3.8	ภาพถ่าย SEM ของแผ่นทองคำที่สังเคราะห์โดยใช้ความเข้มข้นของพอลิวินิลไพร์โรลิโดน ที่แตกต่างกัน	38
3.9	ลักษณะของสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ที่รวมตัวกลายเป็นไมเซลล์ล้อมรอบอนุภาคของโลหะ	39
3.10	ลักษณะโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวที่รวมตัวกลายเป็นไมเซลล์และสายโซ่ยาว โดยจะหันด้านที่เป็นไมเซลล์เข้าล้อมรอบอนุภาคของโลหะไว้	39
3.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของแผ่นทองคำที่ได้จากการสังเคราะห์ที่ได้ในการทดลองที่ 2 เปรียบเทียบกับความเข้มข้นของพอลิวินิลไพร์โรลิโดนที่แตกต่างกัน	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
3.12	โครงสร้างที่เป็นสายโซ่ยาวของพอลิวินิลไพร์โรลิโดนที่มี OH เป็นองค์ประกอบ	41
3.13	วิธีเบล-เนียร์ไออาร์สเปกตรัมในช่วงการดูดกลืนแสงของทองคำที่สังเคราะห์ด้วยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอล 3 ความเข้มข้น	42
3.14	ภาพถ่าย SEM ของแผ่นทองคำที่สังเคราะห์ในการทดลองที่ 3 โดยใช้ความเข้มข้นของเอทิลีน ไกลคอลต่างกัน (ก) 6.00 M (ข) 12.00 M และ (ค) 18.00 M	43
3.15	โครงสร้างของเอทิลีนไกลคอลที่มี Hydroxyl Group (OH) เป็นองค์ประกอบที่ปลายทั้งสองด้าน	44
3.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของแผ่นทองคำที่ได้จากการสังเคราะห์ที่ 3 กับความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลที่แตกต่างกัน (ความเข้มข้นของสารละลายทองคำและพอลิวินิลไพร์โรลิโดนคงที่)	45
3.17	ภาพถ่าย SEM ของแผ่นโลหะเงินที่ไม่ผ่านการเคลือบด้วยอนุภาคทองคำ	46
3.18	ภาพถ่าย SEM ของการเคลือบด้วยทองคำระดับนาโนเมตรแบบ 2 และ 5 ชั้น (SN2-H และ SN5-H) และการเคลือบด้วยทองคำแบบแผ่นขนาดไมโครเมตรแบบ 2 ชั้น และ 5 ชั้น (SM2-H และ SM5-H) ตามลำดับ	47
3.19	ตัวอย่างชิ้นงานเงินที่ไม่ผ่านการเคลือบด้วยอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตร (gold nanoparticles) (ซ้าย) และแผ่นทองคำระดับนาโนเมตร (gold microplate) (ขวา)	48
3.20	ชิ้นงานเงินที่ไม่ผ่านการเคลือบ (S0) และที่ไม่ผ่านการเคลือบด้วยทองคำระดับนาโนเมตรและไม่โครเมตร ชนิดมีการทำ Pretreatment และไม่ผ่านการทำ Pretreatment	48
3.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสว่าง (L^*) ของตัวอย่างแผ่นเงินก่อนและหลังการเคลือบด้วยสถานะต่างกัน	50
3.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า a^* ของตัวอย่างแผ่นเงินก่อนและหลังการเคลือบด้วยสถานะต่างกัน	51
3.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า b^* ของตัวอย่างแผ่นเงินก่อนและหลังการเคลือบด้วยสถานะต่างกัน	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
3.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า L^* ของตัวอย่างแผ่นเงินทุกสภาวะที่ผ่านการทดสอบการกันหมอง	56
3.25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า a^* ของตัวอย่างแผ่นเงินทุกสภาวะที่ผ่านการทดสอบการกันหมอง	56
3.26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า b^* ของตัวอย่างแผ่นเงินทุกสภาวะที่ผ่านการทดสอบการกันหมอง	57
3.27	ค่าความแตกต่างของสี (ΔE) ในแต่ละสภาวะการทดลองเปรียบเทียบก่อนและหลังการทดสอบกันหมอง	61
3.28	การทดสอบการกันหมองของแหวนเงินที่ผ่านการเคลือบทองระดับนาโนเมตร	61

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

เครื่องประดับเงินเป็นเครื่องประดับที่ได้รับความนิยม และเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญในตลาดอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของประเทศไทยมาโดยตลอด อย่างไรก็ตาม การสวมใส่เครื่องประดับเงินประสบกับปัญหาหนึ่งที่ทำให้คุณค่าเครื่องประดับเงินลดลงมาหาทำการสวมใส่เป็นเวลานานคือ ความหมองของเครื่องประดับเงิน ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญและทำให้มีการวิจัยเพื่อพัฒนาเทคนิคและวิธีการด้านการหมองของเงินมาอย่างต่อเนื่อง โลหะเงินทิ้งไว้ในอากาศจะเกิดการหมองได้เนื่องจากเงินจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศ ทำให้เกิดเป็นฟิล์มบางเคลือบผิวชิ้นงานเงิน สดความแวววาว หรือเรียกว่าทำให้เกิดการหมองของเงิน นอกจากนี้เงินสเตอร์ลิงซึ่งมีส่วนประกอบของทองแดงเพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงของเครื่องประดับเงินนั้น การหมองของเงินสเตอร์ลิงอาจเกิดจากทองแดงที่เป็นส่วนประกอบซึ่งเกิดออกซิเดชันได้ง่ายอีกด้วย อุตสาหกรรมการทำเครื่องประดับเงินจึงจำเป็นต้องหาวิธีกันหมองหรือต้านทานการหมองของเงินที่มีประสิทธิภาพเพื่อช่วยยืดอายุความงามของเครื่องประดับเงินสำหรับสวมใส่ในชีวิตประจำวัน การทำโลหะอัลลอยด์ที่มีส่วนผสมของทองหรือโลหะชนิดอื่นๆ เป็นทางเลือกในการผลิตให้เงินลดการหมองลง แต่ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการผลิตสูง อันเกิดจากราคาของโลหะมีค่าที่นำมาผสมเป็นอัลลอยด์และกระบวนการหลอมโลหะ

การศึกษาการกันหมองของเงินมีมายาวนาน แต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสีย และข้อจำกัดแตกต่างกัน กรรมวิธีการป้องกันการหมองของเงินแบ่งออกเป็น 5 วิธีใหญ่ๆ ได้แก่

1. การป้องกันการหมองด้วยสารละลายโครเมต (Chromate based anti-tarnish) โดยการใช้วิธีการแช่หรือการชุบเคลือบไฟฟ้าชิ้นงานเงินด้วยสารละลายโครเมต จะทำให้มีฟิล์มบางเคลือบอยู่บนผิว ปกป้องผิวเงิน ไม่ให้ทำปฏิกิริยากับอากาศ ป้องกันการหมองได้ระยะเวลาหนึ่ง ข้อดีคือทำได้ง่าย ราคาถูก แต่ข้อเสียคือ ฟิล์มโครเมตมีความเสถียรน้อย และโครเมตเป็นสารที่เป็นพิษและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้ในกระบวนการกันหมองด้วยโครเมต จำเป็นต้องมีกรรมวิธีในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการนี้

2. การป้องกันการหมองด้วยสารละลายไทออล (Thio based anti-tarnish) จะใช้สารพวก emulsified thio-compound กระบวนการเคลือบผิวจะใช้วิธีการจุ่มชิ้นงานลงในสารละลาย ซึ่งเป็นกระบวนการที่สะดวก แต่มีข้อเสียที่อ่างชุบและน้ำล้างต้องถูกบำบัด เนื่องจากเป็นสารที่ทำให้น้ำเสีย

3. การเคลือบผิวด้วยฟิล์มออกไซด์ของโลหะ (Oxide layers) จะใช้ออกไซด์ฟิล์มของโลหะในแถว 3 ถึง 5 ในตารางธาตุ เช่น Al, Be, Zr, Mg, Ti และ Nb กระบวนการเคลือบทำได้หลายวิธีเช่น sputtering หรือ cathodic reduction ของสารละลายไอออนโลหะเหล่านี้ ตัวอย่างเช่นการเคลือบฟิล์ม Nb_2O_5 หรือ Al_2O_3 ที่ต้องหนาระดับไมครอน จึงป้องกันการหมองได้ แต่ข้อเสียคือฟิล์มมีการเปลี่ยนสีได้ ไม่สามารถป้องกันรอยขีดข่วนได้ เป็นรอยได้ง่าย และราคาในการผลิตแพง

4. การเคลือบด้วยแลคเกอร์ (Lacquer coatings) ซึ่งนิยมทำในอดีต แต่ปัจจุบันมีการนำเรซินมาใช้เคลือบผิว ข้อเสียอยู่ที่ตัวทำละลายของแลคเกอร์หรือเรซิน มีผลต่อสีของชิ้นงานเงิน ทำให้เงินมีสีเปลี่ยนไป และยากต่อการล้างแลคเกอร์ออกหากต้องทำการปรับปรุงชิ้นงานในครั้งต่อไป

5. การเคลือบด้วยชั้นฟิล์มโลหะ (Metal layer) จะใช้วิธี Electrodeposition ของโลหะเช่น โรเดียม ทอง พาลาเดียม เพื่อให้ป้องกันการหมองได้ระยะเวลายาวนาน แต่เนื่องจากการเคลือบด้วยโลหะมีค่าด้วยกรรมวิธีเฉพาะนี้เองทำให้ต้องมีค่าใช้จ่ายในการเคลือบราคาสูง และบางครั้งการเคลือบหนาจะทำให้สีของชิ้นงานเงินเปลี่ยนไป

เนื่องด้วยข้อจำกัดในการป้องกันการหมองของเงินที่กล่าวมาแล้วข้างต้น และความจำเป็นที่ต้องต้านทานการหมองของเงินในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ทำให้งานวิจัยด้านกันหมองของเงินยังเป็นที่ยอมรับและจำเป็นในการพัฒนาต่อไปในระดับนานาชาติ

ทองคำเป็นโลหะมีค่าที่สีเหลืองทอง มีความแวววาวอยู่เสมอ ทองคำไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ดังนั้นเมื่อสัมผัสสู่อากาศสีของทองจะไม่หมองและไม่เกิดสนิม ทองคำบริสุทธิ์ไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ทนต่อการผุกร่อนและไม่เกิดสนิมกับอากาศ คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ทองเป็นโลหะชนิดหนึ่งที่นำมาผสมกับโลหะเงินเพื่อทำเป็นอัลลอยด์ เพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติในเรื่องป้องกันการหมองของเงิน แต่หากใช้ในปริมาณมากจะทำให้มีราคาสูง คณะนักวิจัยเป็นผู้มีประสบการณ์ด้านการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเมตรถึงไมโครเมตรของโลหะมีค่า (ได้แก่ เงิน ทองคำ ทองแดง เป็นต้น) คณะนักวิจัยจึงมีแนวคิดในการนำอนุภาคทองคำที่มีความบางระดับนาโนเมตรมาทำการเคลือบบนผิวโลหะเงิน เพื่อช่วยต้านทานการกันหมองของเงิน และอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตรจะมีอุณหภูมิเผาผนึกต่ำกว่าทองระดับไมโครเมตร สามารถนำมาทำการเคลือบหรือเผาผนึกเงินที่อุณหภูมิต่ำได้ นอกจากนี้ แม้ว่าจะใช้โลหะทองซึ่งมีราคาสูงมาทำการเคลือบบนโลหะเงิน แต่เนื่องจากโลหะทองขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรนี้จะมีขนาดเล็กและมีความบางมาก การเคลือบชิ้นงานจะใช้อนุภาคทองระดับนาโนเมตรในปริมาณน้อยมากๆ จึงทำให้ค่าใช้จ่ายในเคลือบต่อชิ้นงานไม่สูง และทองไม่มีความเป็นพิษจึงไม่เป็นอันตรายต่อผู้สวมใส่ โครงการวิจัยนี้นำเสนอกรรมวิธีการสังเคราะห์โลหะทองให้ได้ขนาดที่เหมาะสมในการนำไปเคลือบผิวชิ้นงานเงิน และกรรมวิธีการเคลือบผิวด้วยอนุภาคทองคำดังกล่าว ซึ่งกรรมวิธีนี้นำไปประยุกต์ใช้ในการเคลือบลงผิวเครื่องประดับเงินจะเป็นประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมเครื่องประดับเป็นอย่างมาก

1.2 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

1.2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของทองคำ

ทองคำ (Gold) คือ ธาตุลำดับที่ 79 ตามตารางธาตุ มี Au เป็นสัญลักษณ์ธาตุ จากชื่อของทองคำที่มาจากภาษาละตินว่า “aurum” ทองคำเป็นโลหะแข็งสีเหลือง คุณสมบัติที่โดดเด่นของทองคำคือเป็นโลหะทรานซิชันที่มีความเหนียว อ่อนนุ่ม สามารถยืดหรือตีเป็นแผ่นได้ คุณสมบัติอีกหนึ่งประการของทองคำคือ ทองคำไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีส่วนใหญ่และมีความสามารถในการต้านทาน

การเกิดสนิมได้ดีเยี่ยม ทองคำไม่ละลายในกรดชนิดใด แต่ละลายได้ช้าๆ ในกรดผสมระหว่างกรดเกลือ (Hydrochloric acid) และกรดดินประสิว (Nitric acid) คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติของอะตอมของทองคำ โดยสรุปแสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและอะตอมของทองคำ (ทองคำ, 2554: ออนไลน์)

คุณสมบัติทั่วไป	
ชื่อ (ไทย, อังกฤษ)	ทอง, Gold
สัญลักษณ์	Au
เลขอะตอม	79
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชัน
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	[Ar] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ¹
การจัดเรียงอิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2 8 18 32 18 1
คุณสมบัติทางกายภาพ	
สถานะ	ของแข็ง
จุดหลอมเหลว	1064.18 °C
จุดเดือด	2856 °C
ความร้อนจำเพาะ	25.418 J/(mol.k)
คุณสมบัติของอะตอม	
โครงสร้างผลึก	ลูกบาศก์
รัศมีอะตอม	135 pm
รัศมีอะตอม (คำนวณ)	174 pm
รัศมีโควาเลนต์	144 pm
รัศมีแวนเดอร์วาลส์	166 pm
คุณสมบัติอื่นๆ	
ความแข็งของโมลส์	2.5

จุดเด่นของโลหะทองคำคือมีสีเหลืองสว่างเสมอ มีความแวววาว เปล่งปลั่งจนตลอดอายุการใช้งานของทองคำเนื่องจากทองคำไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศจึงไม่เกิดการหมองได้ง่าย และไม่เปราะบางโคลง่ายๆ เหมือนโลหะชนิดอื่น ทองคำเป็นโลหะที่ได้รับความนิยมในการนำมาทำเป็นเครื่องประดับ ทั้งนี้เพราะทองคำถือเป็นโลหะชนิดเดียวในโลกที่ครบถ้วนไปด้วยคุณสมบัติพื้นฐาน 4 ประการนั้นคือ

1. ความงามมันวาว (Luster) ด้วยสีสันทึ่สวยงามตามธรรมชาติของทองคำผสมผสานกับความมันวาวจึงทำให้ทองคำได้รับความนิยมในวงการเครื่องประดับมาโดยตลอด
2. ความคงทน (Durable) เนื่องจากทองคำไม่ขึ้นสนิม ไม่หมอง ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีส่วนใหญ่และไม่ผุกร่อน
3. ความหายาก (Rarity) ทองคำเป็นแร่ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติในปริมาณน้อย จึงทำให้เป็นธาตุที่หายาก และการทำเหมืองทองคำต้องทำการถลุงหินเป็นจำนวนหลายสิบล้านและขุดลึกลงไปหลายสิบลเมตร เพื่อให้ได้ทองคำเพียงหนึ่งออนซ์ (31.167 กรัม)
4. ความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ (Reuseable) เนื่องจากทองคำเป็นโลหะที่มีความอ่อนนุ่มและมีความเหนียว จึงนำมาขึ้นรูปได้ง่าย และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยการทำให้บริสุทธิ์แล้วนำไปหลอม

ทองคำ นอกจากจะนิยมใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับแล้ว ยังถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลายแขนง อาทิเช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมอวกาศและอากาศยาน วงการแพทย์และทันตกรรม เป็นต้น

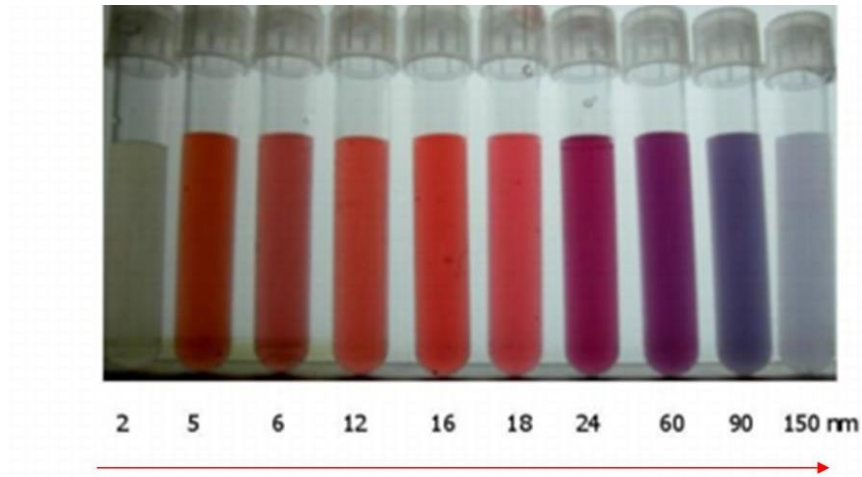
1.2.2 คุณสมบัติของอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตร

ทองคำ เป็นโลหะที่มีคุณสมบัติที่โดดเด่นและถูกนำมาประยุกต์ในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย การพัฒนากระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีของทองคำให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงในระดับนาโนเมตรด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบันจึงเอื้ออำนวยในการใช้ประโยชน์ของทองคำให้หลากหลายยิ่งขึ้น เนื่องจากทองคำที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรจะมีคุณสมบัติ และความสามารถนำไปใช้งานที่แตกต่างจากทองคำโดยทั่วไป จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของโลหะทองคำให้สูงขึ้นด้วย (Jiejun Zhu et al., 2011), (Ying Chen et al., 2005)

อนุภาคทองคำระดับนาโนเมตร จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากทองคำทั่วไป ในด้านต่างๆ อาทิเช่น ขนาด สี และรูปร่าง ถือเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของทองคำในระดับนาโนเมตร

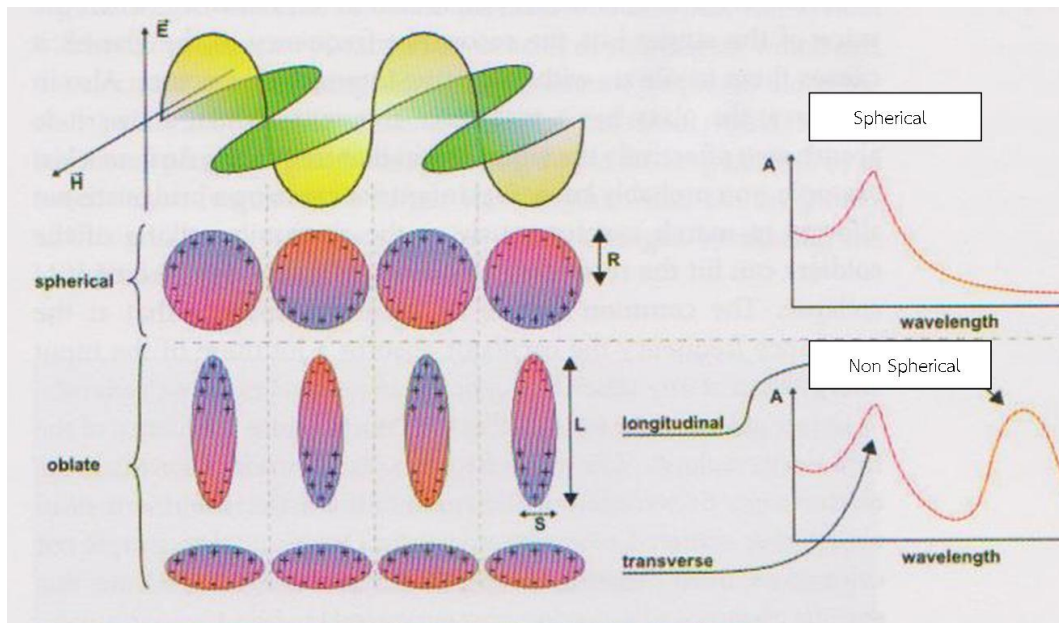
1. สีและคุณสมบัติทางแสง

ทองคำขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรจะมีสีที่แตกต่างจากทองคำโดยทั่วไปที่มีสีเหลืองเนื่องมาจากการดูดกลืนแสงในช่วงสีน้ำเงิน แต่ทองคำอนุภาคระดับนาโนเมตรมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าขนาดของความยาวคลื่นแสงที่มาตกกระทบ จึงทำให้เกิดเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า เซอร์เฟส พลาสมอน เรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance, SPR) ซึ่งทำให้ทองคำที่มีอนุภาคระดับนาโนเมตรดูดกลืนแสงในช่วงสีเขียว (ประมาณ 520 นาโนเมตร) ส่งผลทำให้อนุภาคทองคำระดับนาโนเมตรมีสีแดงจนถึงม่วงและสีฟ้า ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค โดยอนุภาคทองคำที่มีขนาดเล็กที่สุดจะมีสีแดง และจะเรียงลำดับขึ้นมาเรื่อยๆ จนถึงสีม่วง สีฟ้า และเป็นสีเหลืองทอง (Ludovico Cademartiri and Geoffrey A. Ozin, 2009) แสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 สีและขนาดของอนุภาคทองคำในระดับนาโนเมตร ขนาดเล็กที่สุด 2 นาโนเมตร (ใสไม่มีสี) ถึงขนาด 150 นาโนเมตร (สีน้ำเงิน)

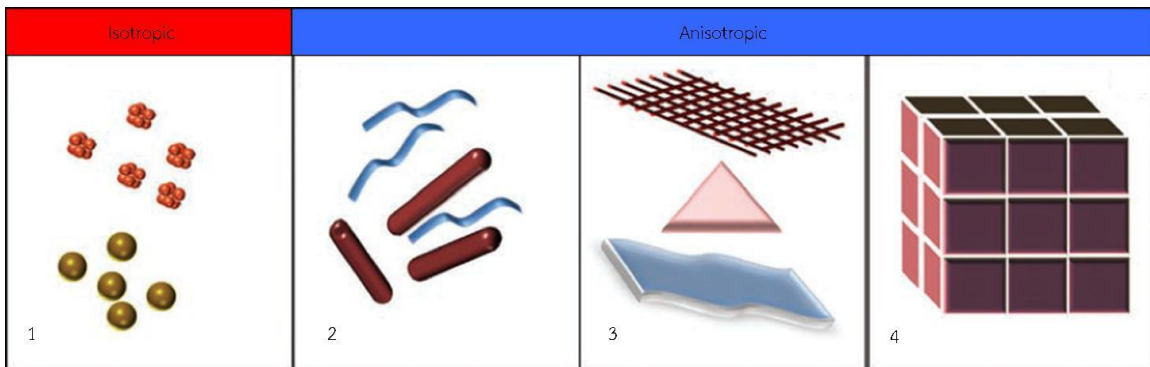
([nano optical materials](#), 2011: online)



รูปที่ 1.2 ลักษณะการสั่นของอิเล็กตรอนอิสระในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (มุมซ้ายบน) ขึ้นอยู่กับรูปร่างของอนุภาคที่ต่างกัน, รูปร่างทรงกลม (กลางซ้าย) หรือไม่เป็นทรงกลม (ล่างซ้าย) มีลักษณะการดูดกลืนแสงของเซอร์เฟส พลาสมอน เรโซแนนซ์ที่แตกต่างกัน (ด้านขวา)

(Ludovico Cademartiri and Geoffrey A. Ozin, 2009)

ปรากฏการณ์เซอ์เฟส พลาสมอน เรโซแนนซ์ เป็นปรากฏการณ์การสั่นของอิเล็กตรอนอิสระ (Electron Cloud) ที่อยู่โดยรอบอะตอมของโลหะ เกิดจากการที่อะตอมของโลหะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นของเรโซแนนซ์ บริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยมีลักษณะการสั่นแบบพร้อมเพรียงกันซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของวัสดุ ลักษณะของพีคและความกว้างของพีคเซอ์เฟส พลาสมอน เรโซแนนซ์ จะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อม เช่น ขนาดและรูปร่างของอนุภาค ประเภทของวัสดุ และสภาพแวดล้อมของวัสดุชนิดนั้นๆ อนุภาคทองคำในระดับนาโนเมตรที่มีรูปร่างเป็นทรงกลม (Sphere) จะพบพีคการดูดกลืนแสงของเซอ์เฟส พลาสมอน เรโซแนนซ์ในช่วง 510-540 นาโนเมตร เพียงพีคเดียว แตกต่างจากอนุภาคทองคำในระดับนาโนเมตรที่มีรูปร่างไม่เป็นทรงกลม จะพบพีคการดูดกลืนแสงของเซอ์เฟส พลาสมอน เรโซแนนซ์ สองพีคโดยพีคที่หนึ่งมีตำแหน่งการดูดกลืนแสงเช่นเดียวกับอนุภาคทองคำที่เป็นทรงกลม และอีกหนึ่งพีคจะเลื่อนไปทางตำแหน่งที่มีความยาวคลื่นสูงกว่า (Red Shift) แสดงดังรูปที่ 1.2



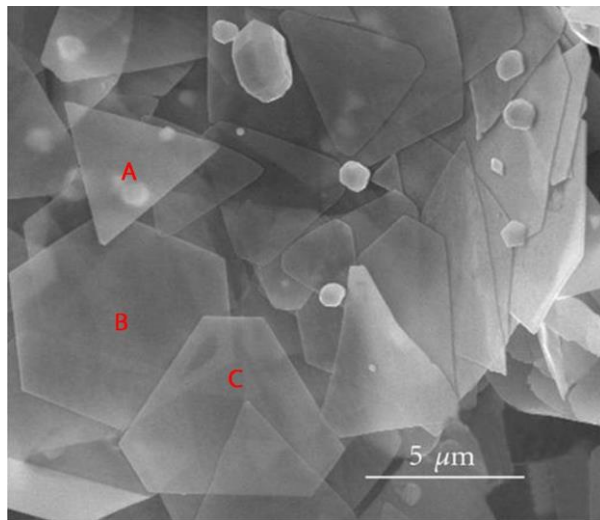
รูปที่ 1.3 รูปร่างที่แตกต่างกันของทองคำในมิติต่างๆ (1) 0 มิติ มีรูปร่างแบบทรงกลมและแบบกลุ่ม (2) 1 มิติ มีรูปร่างแบบเส้นใย เส้นลวดและแบบแท่ง (3) 2 มิติ มีรูปร่างแบบฟิล์ม แบบแผ่นและแบบตาข่าย (4) 3 มิติ เป็นรูปร่างที่ประกอบรวมกันเป็นวัสดุนาโน (Panikkanvalappil R. Sajanlal et al., 2010)

2. ขนาดและรูปร่างของทองคำอนุภาคระดับนาโนเมตร

ขนาดและรูปร่างของอนุภาคทองคำมีผลต่อการดูดกลืนแสงของเซอ์เฟส พลาสมอน เรโซแนนซ์ ทองคำอนุภาคระดับนาโนเมตรมีความซับซ้อนและความหลากหลายของรูปร่างที่ยากแก่การอธิบาย นักวิจัยจึงแบ่งประเภทรูปร่างของวัสดุนาโนไว้ 2 ประเภทคือ (1) รูปร่างแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) หรือ 0 มิติ เช่น อนุภาคทรงกลม (Sphere) และแบบกลุ่ม (Cluster) และ (2) คือรูปร่างแบบแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic) ซึ่งประกอบไปด้วยรูปร่างแบบ 1 มิติ เช่น รูปร่างแบบเส้นใย (Fiber) เส้นลวด (Wire) และแบบแท่ง (Rod) รูปร่างแบบ 2 มิติ เช่น รูปร่างแบบฟิล์ม (Film) แบบแผ่น (Plate) และแบบตาข่าย (Network) และรูปร่างแบบ 3 มิติ ซึ่งเป็นรูปร่างที่ประกอบรวมกันเป็นวัสดุนาโน (Nanomaterials) แสดงดังรูปที่ 1.3 โดยอนุภาคของทองคำที่มีขนาดเล็กที่สุดจะอยู่ในรูปร่างที่เป็น

ทรงกลม (Sphere) และเมื่อขนาดเพิ่มขึ้นรูปร่างของทองคำจะเปลี่ยนตามไปด้วย โดยรูปร่างที่แตกต่างกันนั้นส่งผลทำให้ทองคำอนุภาคระดับนาโนเมตรมีคุณสมบัติและการประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกันตามไปด้วย (Panikkanvalappil R. Sajanlal et al., 2010)

งานวิจัยนี้จะศึกษาอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตรทรงกลมและอนุภาคทองคำที่มีรูปร่างแบบแผ่นซึ่งสามารถแยกย่อยออกไปได้อีกหลายรูปร่าง หลายเหลี่ยม เช่น สามเหลี่ยม (Triangular) หกเหลี่ยม (Hexagonal) รูปร่างคล้ายสามเหลี่ยมถูกตัดทอน (Truncated Triangular) ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 1.4 เป็นต้น ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อรูปร่างของทองคำอนุภาคในระดับนาโนเมตรนั้น ยังไม่มีการอธิบายไว้อย่างชัดเจน จึงยังเป็นที่น่าสนใจในการศึกษาต่อไป



รูปที่ 1.4 ภาพถ่าย SEM อนุภาคทองคำที่มีรูปร่างเป็นแผ่นแบบสามเหลี่ยม (A) หกเหลี่ยม (B) และแบบสามเหลี่ยมถูกตัดทอน (C) (Changshun Wang et al., 2010)

3. การประยุกต์ใช้งานอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตร

เนื่องจากขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันของทองคำอนุภาคในระดับนาโนเมตร ส่งผลให้คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของอนุภาคทองคำในระดับนาโนเมตรเหล่านั้นแตกต่างกันตามไปด้วย จึงทำให้การประยุกต์ใช้งานมีความหลากหลายเป็นอย่างมาก ด้วยเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าไปอย่างไม่หยุดยั้ง ทำให้นาโนเทคโนโลยีในปัจจุบันถูกพัฒนาไปอย่างต่อเนื่อง และเป็นเทคโนโลยีที่เชื่อว่าจะสามารถยืดอายุมนุษย์ให้ยืนยาวขึ้น ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตร เช่น

- ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) อนุภาคระดับนาโนเมตรมีอัตราส่วนพื้นผิวต่อปริมาตร (Surface to volume ratio) สูงมาก ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ทุกๆ ไป โดยทั่วไปทองคำอนุภาคระดับนาโนเมตรใช้ในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาของสารอินทรีย์ (Fars K. Alanazi et al., 2010)

- ชีววิทยาและการแพทย์ (Biology and Medicine) ในทางการแพทย์ทองคำอนุภาคระดับนาโนเมตรมีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการรักษาโรคมะเร็ง ด้วยคุณสมบัติการดูดกลืนแสงของ เซอร์เฟสพลาสมอน เรโซแนนซ์ อิเล็กตรอนเมื่อถูกกระตุ้นจากสภาวะพื้นขึ้นสู่สภาวะเร้า จะปลดปล่อยพลังงานในรูปของความร้อนเพื่อกลับสู่สภาวะพื้นตามเดิม โดยพลังงานความร้อนที่ปลดปล่อยออกมานั้นมีอุณหภูมิสูงถึง 100 องศาเซลเซียส ซึ่งมากพอที่จะสามารถทำลายเซลล์มะเร็งได้ (Panikkanvalappil R. Sajanalal et al., 2010) นอกจากนี้ยังใช้ในการเป็นไบโอเซ็นเซอร์ (Biosensor) ตรวจการตั้งครวมและดีเอ็นเอ (DNA) โดยอาศัยหลักการการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกันของปรากฏการณ์เซอร์เฟสพลาสมอน เรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance) (Jessica Winter, 2007)

- อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic) เนื่องจากทองคำอนุภาคในระดับนาโนเมตรมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าดีเยี่ยม อะตอมของทองคำถูกล้อมรอบด้วยอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระทำให้มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับอะตอมอื่นๆ ทำให้ทองคำอนุภาคระดับนาโนเมตรเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (Jessica Winter, 2007)

1.2.3 กระบวนการสังเคราะห์อนุภาคทองคำในระดับนาโนเมตรและไมโครเมตร

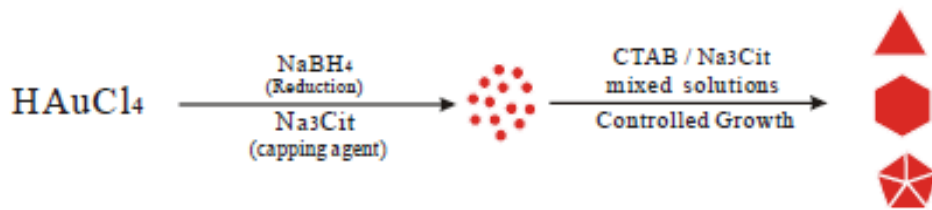
บทความวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์อนุภาคทองคำระดับนาโนเมตร พบว่ามีวิธีการสังเคราะห์ ประกอบด้วย 3 วิธีการหลักๆ ดังนี้

1. วิธีการสังเคราะห์ทางกายภาพ (Physical Synthesis Method) เป็นวิธีการสังเคราะห์ด้วยการใช้เลเซอร์ความยาวคลื่น 266 นาโนเมตร ยิงไปที่สารตั้งต้นทองคำ ภายใต้สภาวะแก๊สเฉื่อย อนุภาคทองคำจะถูกทำให้มีขนาดเล็กอย่างรวดเร็วเป็นอนุภาคในระดับนาโนเมตร ข้อดีของการสังเคราะห์ด้วยวิธีการนี้คือ อนุภาคของทองคำที่ได้จากการสังเคราะห์มีขนาดใกล้เคียงกันทั้งหมด แต่มีข้อจำกัดตรงที่เครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์มีราคาสูง (Fars K. Alanazi et al., 2010)

2. วิธีการทางชีวภาพ (Biological Synthesis Method) เป็นวิธีการสังเคราะห์ที่กำลังได้รับการพัฒนาวิธีการทางชีวภาพเป็นการสังเคราะห์ที่ใช้ต้นทุนต่ำ ใช้เวลาน้อย และค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ไม่สูงมากนัก ไม่จำเป็นต้องใช้สารที่เป็นพิษ ทำให้กระบวนการผลิตและผลผลิตที่ได้ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น Javad Karimi andeani และคณะ ทำการสังเคราะห์อนุภาคทองคำในระดับนาโนเมตร โดยใช้สารสกัดจากดอก *Achillea wilhelmsii* ผลการวิจัยพบว่าสามารถสังเคราะห์ทองคำที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 70 นาโนเมตร ได้เป็นผลสำเร็จ (Javad Karimi Andeani, 2011)

3. วิธีการสังเคราะห์ทางเคมี (Chemical Synthesis Method) เป็นวิธีการสังเคราะห์ที่ได้รับการนิยมน้อยกว่าแพร่หลายมากที่สุด เนื่องจากได้อนุภาคทองคำที่มีความหลากหลายของขนาดและรูปร่างเป็นอย่างมาก โดยหลักการเบื้องต้นของการสังเคราะห์ด้วยวิธีการนี้ จะเริ่มต้นจากสารตั้งต้นเกลือทอง (HAuCl₄) ซึ่งเป็น Au³⁺ ทำปฏิกิริยากับตัวรีดิวซ์ เช่น ก๊าซไฮโดรเจน (H₂) ซิเตรต (Citrate), โบโรไฮไดรต์ (ABH₄) ไฮดราซีน ไฮเดรต (N₂H₄·2H₂O) และแอลกอฮอล์ (Alcohol) เป็นต้น เมื่อทำปฏิกิริยากัน

แล้ว Au^{3+} จะรับอิเล็กตรอนทำให้ประจุลดลงกลายเป็น Au^0 แสดงดังรูปที่ 1.5 เมื่อได้อนุภาคทองคำที่ไม่มีประจุ จะเข้าสู่ขั้นตอนที่สองของการเกิดปฏิกิริยา คือขั้นตอนการโตของผลึก ในขั้นตอนนี้ การควบคุมทิศทางการโตของผลึกที่แตกต่างกันจะมีผลมาจากตัวช่วยเสถียรที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีปัจจัยควบคุมหลากหลายประการที่อาจส่งผลต่อการโตของผลึก โดยจากการศึกษาทดลองยังไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าปัจจัยใดที่มีผลโดยตรงต่อการควบคุมทิศทางการโตของผลึกและมีผลต่อขนาดและรูปร่างของผลึกของอนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้ (Tapan K. Sau et al., 2001), (Hong, Ru Xiu, and Dai Wen, 2003), (Marek Grzelczak et al., 2008), (Sook Young Moon et al., 2009), (Caixia Kan et al., 2010), (Jiejun Zhu et al., 2011)



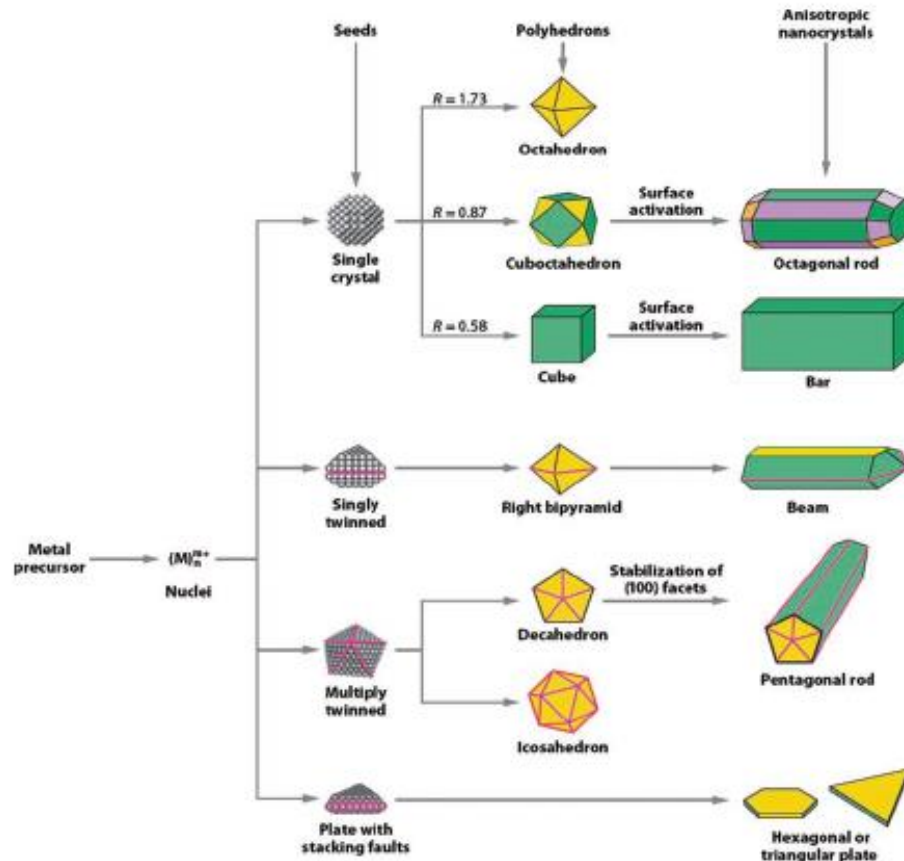
รูปที่ 1.5 แผนภาพแสดงการทำปฏิกิริยาของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยวิธีการทางเคมี ช่วงแรกเป็นช่วงของการรีดิวซ์จาก Au^{3+} ไปเป็น Au^0 จากนั้นเข้าสู่ช่วงที่สองของการเกิดปฏิกิริยา คือ ช่วงการเติบโตของผลึกในทิศทางที่แตกต่างกัน นำไปสู่ขนาดและรูปร่างของอนุภาคที่แตกต่างกัน (Hong Yuan et al., 2003)

ปัจจัยควบคุมในกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีที่แตกต่างกัน ส่งผลต่ออนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งแตกต่างกัน ดังนี้ (Hayat M.A., 1989)

1. ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดอนุภาคโดยรวมเฉลี่ย ได้แก่ ความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ (Reductant Concentration) อัตราในการคนสารละลาย (Stirring Rate) และอุณหภูมิ
2. ปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ได้แก่ อัตราการเติมตัวรีดิวซ์ลงในสารตั้งต้นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา อัตราการคนสารละลาย
3. ปัจจัยที่มีผลความเสถียรของปฏิกิริยา ได้แก่ ส่วนประกอบของสารละลายในปฏิกิริยา

ปัจจุบันมีการดัดแปลงการสังเคราะห์ทองคำอนุภาคในระดับนาโนเมตรด้วยกระบวนการที่หลายหลายเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ เช่น กระบวนการสังเคราะห์แบบ Seed-Mediated Growth เป็นกระบวนการสังเคราะห์ด้วยการฉายรังสีเพื่อทำให้เกิดเป็นอนุภาคของทองคำขนาดเล็ก ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นแกนผลึก (Seed) จากนั้นผลึกจะโตในทิศทางที่แตกต่างกัน ได้เป็นอนุภาคทองคำที่มีรูปร่างและขนาดที่แตกต่างกัน อีกหนึ่งวิธีที่ได้รับความนิยมในการสังเคราะห์ทางเคมี ได้แก่ กระบวนการสังเคราะห์ที่เรียกว่า Polyol Synthesis เป็นการสังเคราะห์ที่ใช้แอลกอฮอล์ เช่น โพลีเอทิลีน ไกลคอล (Poly Ethylene Glycol) เป็นตัวรีดิวซ์ที่อุณหภูมิสูง จากนั้นจะเติมตัวช่วยเสถียรเพื่อให้เกิดการโต

ของผลึกไปในทิศทางต่างๆ ส่งผลให้ได้เป็นทองคำที่มีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 1.6 แสดงลักษณะของการโตของผลึกตามทิศทางที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลให้อนุภาคทองคำในระดับนาโนเมตรที่ได้มีลักษณะที่แตกต่างกันตามไปด้วย



รูปที่ 1.6 การโตของผลึกในทิศทางที่แตกต่างกัน ส่งผลให้อนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้มีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกัน (Panikkanvalappil R. Sajanlal et al., 2010)

1.2.2 ระบบการวัดสี (พิมพ์ทอง, 2555)

การตรวจสอบการต้านทานการหมองในงานวิจัยนี้ จะทำการวัดสีที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการหมองโดยการนำตัวอย่างแผ่นเงินที่ไม่ผ่านและผ่านการเคลือบกันหมองด้วยอนุภาคทองคำมาทดสอบการหมองภายใต้สภาวะของไอของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์อิ่มตัว ดังนั้นการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสีที่เปลี่ยนไปจากการหมองจำเป็นต้องใช้เครื่องมือตรวจสอบสีที่มีความแม่นยำเป็นตัวเปรียบเทียบ จึงต้องทำความเข้าใจกับระบบการวัดสีที่ใช้ ดังนี้

ระบบการวัดสีมีหลายระบบ ในการวัดสีในงานวิจัยนี้จะใช้ระบบ CIELAB แต่เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้นงานวิจัยนี้จะนำเสนอ ระบบการวัดสีที่นิยมใช้และรู้จักกันกว้างขวาง 2 ระบบ คือ ระบบ Munsell ซึ่งเป็นระบบที่นิยมใช้ทั่วไป และ ระบบ CIE ที่บอกความแตกต่างของสีได้ละเอียดระดับตัวเลข ที่เหมาะสมกับการทำงานระดับงานวิจัย ดังนี้ (พิมพ์ทอง, 2552)

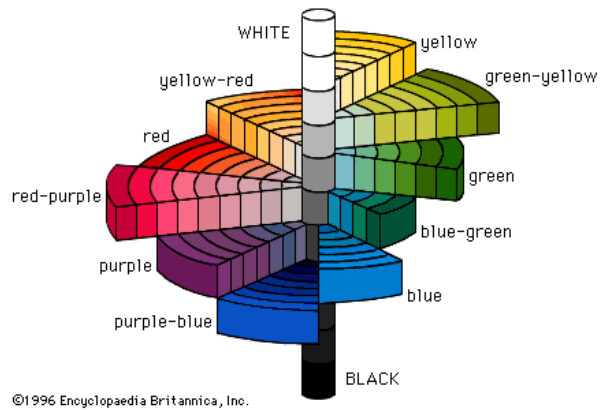
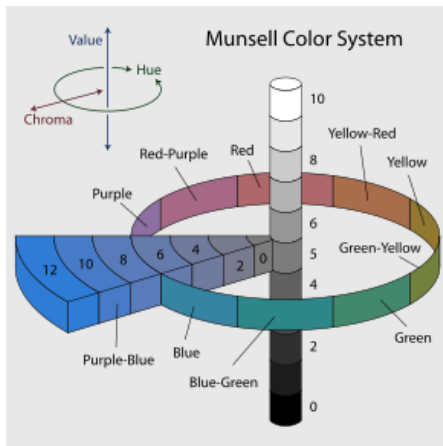
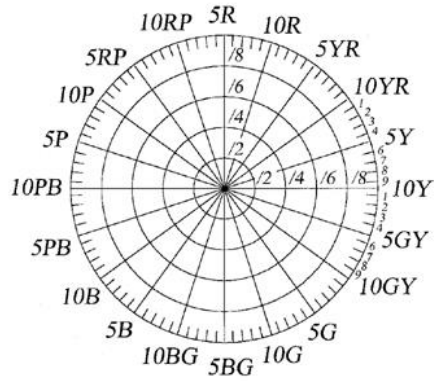
1. ระบบ Munsell เป็นระบบที่มีมานาน เกิดขึ้นโดยครูสอนศิลปะชาวอเมริกัน ชื่อ อัลเบิร์ต เอช มันเซลล์ (Albert H. Munsell) ได้พัฒนาการสื่อสารระบบการจัดลำดับสีขึ้น มันเซลล์ได้ผลิตแถบสีต่างๆ ขึ้นมาเพื่ออธิบายความแตกต่างของสีอย่างเป็นระบบ อาศัยการดูด้วยสายตามนุษย์ในการแยกความแตกต่างของสีจากคุณสมบัติการมองเห็นสีที่ต่างกัน การจัดเรียงสีของระบบ Munsell แบ่งออกเป็น 3 ทิศทางของ 3 มิติ คือ

1.1 สีสีน (hue) คือ สีที่ปรากฏในการมองเห็น เป็นสีของวัตถุที่สะท้อนเข้าตา เช่น สีแดง ม่วง เขียวเป็นสมบัติที่จำแนกกลุ่มสี ซึ่งจัดแบ่งเป็น 5 สีหลัก ได้แก่ R-แดง Y-เหลือง G-เขียว B-น้ำเงิน และ P-ม่วง ซึ่งจะกำหนดความต่างของสีสีนรอบวงกลมสี 360 องศา ดังรูปที่ 1.7

1.2 ความอิ่มตัวสี (chroma) บอกถึงความเป็นสี เทียบได้กับปริมาณเนื้อสี สีที่มีความอิ่มตัวมาก ปริมาณเนื้อสีจะมากด้วย หรืออาจบอกความสดของสี สีสดจะมีความอิ่มตัวมากกว่าสีอ่อนหรือสีจาง

1.3 ความสว่าง (lightness) คือ ความสว่างของสีที่เกิดจากการสะท้อนแสง ทำให้สามารถแยกความแตกต่างระหว่างสีสว่างและสีมืด ซึ่งความหมายนี้อาจใช้คำต่างๆ ใช้วิธีการไม่เหมือนกัน เช่น ช่างศิลป์ใช้วิธีผสมสีขาวเพื่อให้สีสว่างขึ้น เรียกว่า tint หรือภาษาไทยใช้คำว่า นวล ในทางตรงข้ามเมื่อต้องการให้สีคล้ำขึ้นก็ผสมสีด้วยสีดำ เรียกว่า shade ภาษาไทยนิยมเรียกทับศัพท์ว่า เฉดสี (พรทิว ฝรั่งมี, มิตชูโอะ อิเคดะ สีและการเห็นสี 2551)

ตัวอย่างรูปแบบการจัดปริภูมิสี (color space) หรือระบบสีของมันเซลล์แสดงดังรูปที่ 1.7 ลักษณะเด่นของระบบนี้คือ มีความแตกต่างของสีที่สม่ำเสมอตามความรู้ของคนที่แสดงในทุกแกนทั้งแกน สีสีน ความสว่าง และความอิ่มตัว และแต่ละแกนเป็นอิสระต่อกัน อย่างไรก็ตามระบบนี้เป็นระบบที่ต้องอาศัยการมองเห็นด้วยสายตามนุษย์ทำให้ต้องอาศัยประสบการณ์และความคิดของมนุษย์ในการวัดสี ระบบนี้มักนิยมใช้ในทางอุตสาหกรรม เช่น สีผ้า สีรถยนต์ รวมถึงการเทียบสีของอัญมณีในห้องปฏิบัติการอัญมณีด้วย การจัดระบบสีมันเซลล์ได้ถูกรวบรวมเป็นสมุดสี ที่เรียกว่า Munsell book หรือ Munsell Tree เพื่อใช้ในการเทียบสีวัตถุ โดยการนำวัตถุมาเทียบกับสีที่มีอยู่ในสมุดตัวอย่าง Munsell book แสดงดังรูป 1.8



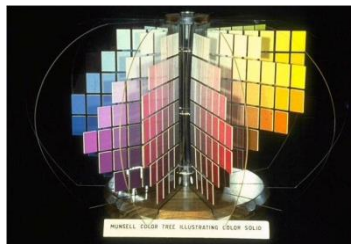
รูปที่ 1.7 สีเส้นและโครมาในระบบมันเซลล์ ที่ค่า value ที่กำหนด

ที่มา: ภาพบน <http://spie.org/x33063.xml>

ภาพล่าง http://en.wikipedia.org/wiki/Munsell_color_system



ก



ข



ค

รูปที่ 1.8 (ก) Munsell Book (ข) Munsell Tree และ (ค) ตัวอย่างการเทียบสีวัสดุกับ Munsell

book ที่มา: (ก) <http://www.igl.net.au/munsellcolorgrading.php>

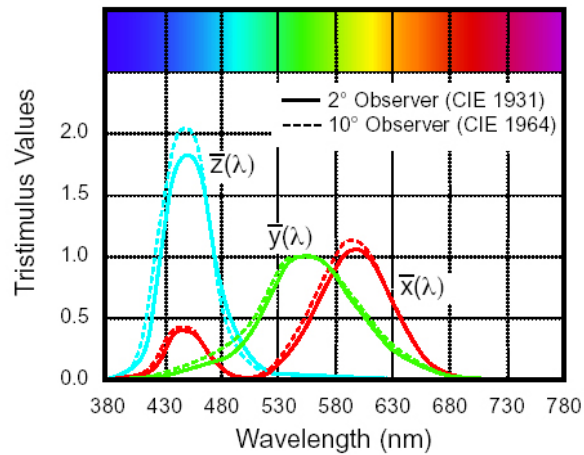
(ข) และ (ค) <http://www.jaimetreadwell.com/Dccc-Munsell-color-chart-system.htm>

2. ระบบ CIE เป็นระบบที่ Commission International de l'Eclairage (CIE) พัฒนาขึ้น โดยวัดค่าสีออกมาเป็นตัวเลข ใช้กับเครื่องมือที่เรียกว่า colorimeter และ spectrometer โดยไม่ต้องอาศัยประสบการณ์การวัดสีหรือความคิดมนุษย์เหมือนระบบ Munsell การวัดสีระบบนี้จึงมีข้อดีที่ไม่ขึ้นกับการมองเห็นของบุคคล ระบบ CIE แบ่งเป็น 2 ระบบ ได้แก่ CIE tristimulus color space และ CIE $L^*a^*b^*$ สำหรับการวัดสีบนพื้นผิวและแสงสี จะใช้เครื่องมือวัดสีที่มีหลักการทำงานที่ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบสำคัญ คือ

ก. แหล่งกำเนิดแสง ซึ่งต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ แต่ละแหล่งกำเนิดแสงจะมีผลต่อค่าของสีที่มองเห็น โดยแต่ละแหล่งกำเนิดแสงจะมีอุณหภูมิสี (color temperature) ต่างกัน แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ที่ใช้ในเครื่องวัดสีมีหลายชนิด เช่น หลอดไฟทังสเตน หลอดฟลูออเรสเซนต์ หลอดไฟซีนอนอาร์ค ฯลฯ สำหรับการเปรียบเทียบสีมักจะใช้แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ ที่เรียกว่า Illuminant D65 ซึ่งจะมีลักษณะแสงเหมือนแสงแดดตอนกลางวัน (ตัวเลข 65 แทนอุณหภูมิสี 6500 K)

ข. วัตถุสี เช่น ผ้า เส้นใย อัญมณี สีรถยนต์ ซึ่งวัตถุเหล่านี้จะดูดกลืนแสงบางส่วน และสะท้อนแสงบางส่วนเข้าสู่สายตาผู้วัดและสู่เครื่องวัดสี

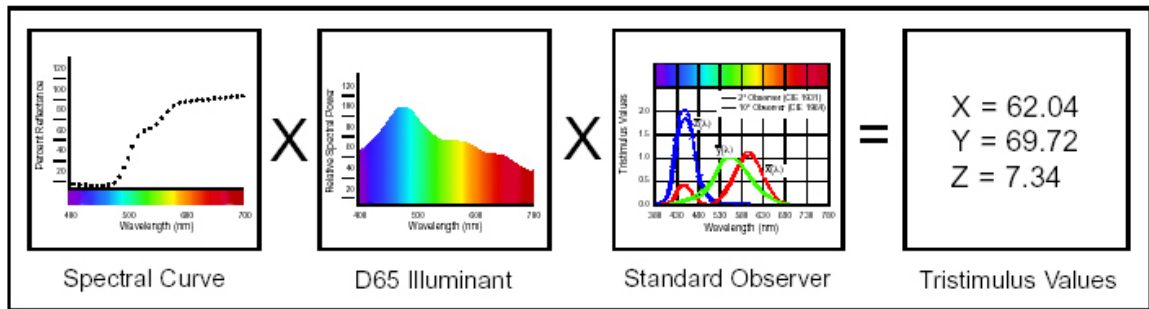
ค. เครื่องมือ หรืออุปกรณ์วัดสี (ความยาวคลื่นจาก 400 นาโนเมตร (สีม่วง) ถึง 700 นาโนเมตร (สีแดง) ซึ่งต้องสอดคล้องกับการมองเห็นของสายตามนุษย์ด้วยสามสี คือ แดง น้ำเงิน เขียว ดังรูป 1.9 สำหรับระบบ CIE จะมีการวัดสีที่มุม 2° และ 10° ที่เรียกว่า ระบบ 2° CIE standard observer 1964 และ มาตรฐาน 10° CIE standard Observer 1964 ซึ่งระบบ มาตรฐาน 10° CIE standard Observer 1964 จะตอบสนองกับตาในช่วงแสงสีเขียวน้ำเงินมากกว่า ดังรูปที่ 1.10 จากนั้นเมื่อนำผลของทั้ง 2 องค์ประกอบมารวมกัน จะได้ค่าที่เรียกว่า tristimulus value จะแสดงเป็น X, Y, Z (ดังรูปที่ 3.28) โดยจะระบุถึงสีแดง เขียว และน้ำเงิน ตามลำดับ ระบบ CIE tristimulus color space จะอธิบายการ coordinate ของ 2 แกน ออกมาเป็นรูปสามเหลี่ยมเกือกม้า ดังรูปที่ 1.11 ส่วนกลางของรูปจะแสดงสีขาที่เกิดขึ้นจากการรวมกันของแสงสี แต่ระบบนี้ยังขาดความสัมพันธ์ระหว่างสีที่มองเห็น จึงมีการพัฒนาเป็นระบบ CIE $L^*a^*b^*$



CIE 2° and 10° Standard Observers

รูปที่ 1.9 ฟังก์ชันการปรับเทียบสี \bar{x} , \bar{y} และ \bar{z}

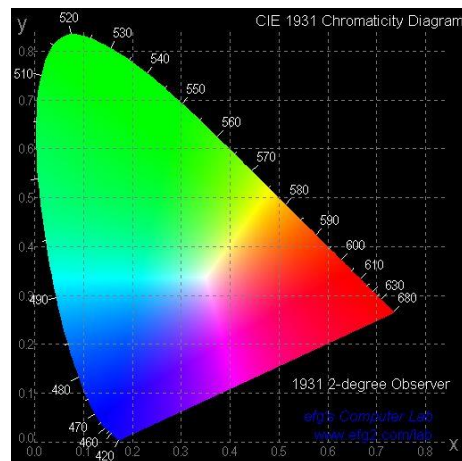
ที่มา: <http://chalemchai124.exteen.com>



Tristimulus values

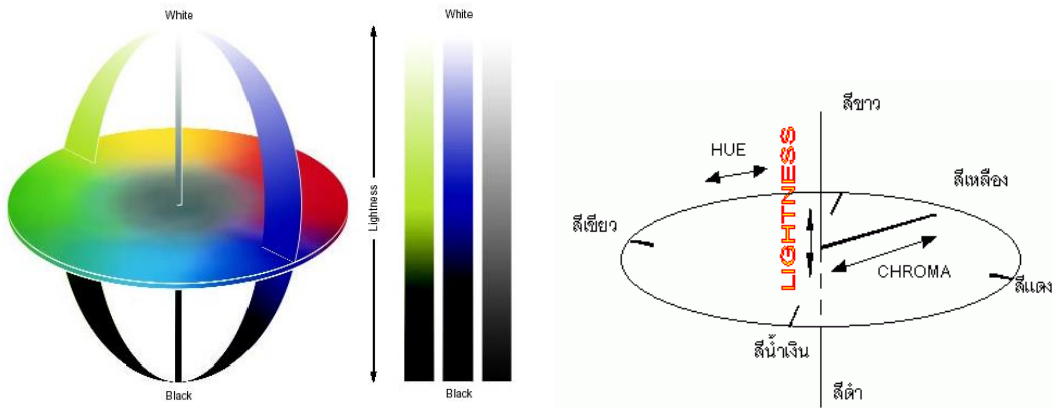
รูปที่ 1.10 แผนภาพแสดงการหาค่า tristimulus values

ที่มา: <http://chalemchai124.exteen.com>



รูปที่ 1.11 แผนภูมิโครมาติซิตี xy ที่มุมมอง 2 องศา

ที่มา: <http://www.efg2.com/Lab/Graphics/Colors/Chromaticity.htm>



รูปที่ 1.12 การแสดงค่าความสว่างและสีด้วยกราฟ 3 มิติ
ที่มา: <http://chalemchai124.exteen.com>

ระบบ CIE $L^*a^*b^*$ เป็นวิธีการวัดสีที่แสดงค่าที่แปลผลได้ง่าย ด้วยหลักการของ color space คือสามารถบอกความแตกต่างของสี (hue) ของวัตถุได้เป็นตัวเลข ด้วยกราฟสามมิติดังรูปที่ 1.12 โดยกำหนดให้ค่า L^* เป็นค่าความสว่าง (lightness) มีค่าตั้งแต่ 0-100 ถ้าค่า L^* มาก แสดงว่าชิ้นงานสว่างมาก แกน a^* เปรียบเทียบระหว่างสีแดงและเขียว ถ้า a^* มีค่าเป็น + สีของวัตถุจะไปในทิศทางสีแดง ถ้าเป็น - สีจะไปในทิศทางของสีเขียว ส่วนแกน b^* เปรียบเทียบระหว่างสีเหลืองกับสีน้ำเงินมีค่าเป็น + สีของวัตถุจะไปในทิศทางสีเหลือง ถ้าเป็น - สีจะไปในทิศทางของสีน้ำเงิน

นอกจากนั้น ระบบ CIE ยังกำหนดค่าที่แสดงความต่างของสีวัตถุ หรือแสดงความคลาดเคลื่อนของการวัดให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยเทียบความแตกต่างของสีได้จากค่า total colour difference หรือ ΔE ซึ่งหาได้จากความแตกต่างของค่า L, a และ b ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta E = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$$

แม้ว่าระบบนี้จะมีข้อเสียที่ต้องใช้เครื่องมือเป็นตัววัด แต่ข้อดีคือค่าที่ออกมาจากระบบ CIE วัดออกมาเป็นตัวเลข ไม่ต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้สังเกต จึงทำให้เป็นระบบการวัดสีที่เป็นมาตรฐานสากล และประโยชน์ที่สำคัญคือสามารถบอกความแตกต่างเพียงเล็กน้อยของสีได้ แม้ชิ้นงานสีจะซีดไปแล้ว แต่ยังมีตัวเลขบอกค่าสีได้ ทำให้สามารถผสมสีซ้ำได้ สามารถนำไปคำนวณสูตรหรือทำนายสูตรการผสมสีได้ อีกทั้งยังลดปัญหาการมองสีของต่างบุคคล จึงมักนิยมใช้ในทางอุตสาหกรรม และการงานวิจัยนี้จะใช้ระบบการวัดสี CIE เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีจากการหมองของโลหะเงิน

1.2.4 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย

กรอบแนวคิดของโครงการวิจัยนี้คือ พัฒนาการป้องกันการหมองของโลหะเงินด้วยอนุภาคทอง ซึ่งเป็นโลหะที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาในอากาศ และหากใช้ทองปริมาณน้อยมากและบางมากระดับนาโนเมตรจะทำให้ค่าใช้จ่ายไม่สูงและคุ้มค่าแก่การนำไปผลิตจำหน่าย โดยการวิจัยมีแนวคิดของการวิจัยที่ต้องคำนึงถึงได้แก่ ชนิดของโลหะที่นำมาป้องกันการหมอง ขนาดอนุภาคทองคำที่เหมาะสม ความสามารถในการป้องกันการหมอง กรรมวิธีการเคลือบ ความหนาของการเคลือบ (coating) ความทนทานของการเคลือบ ความสะดวกและง่ายในการผลิตหรือเคลือบผิวชิ้นงาน ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และราคาในการผลิตที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรม แต่ละหัวข้อมีแนวคิดดังนี้

การเลือกใช้ทองคำเพื่อกันหมอง: ทองคำเป็นโลหะสีเหลืองทองมันวาวเนื้ออ่อนนุ่ม มีความแวววาวอยู่เสมอ ทองคำไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ดังนั้นสีของทองจะไม่หมองและไม่เกิดสนิมหากสัมผัสอากาศ ทองคำบริสุทธิ์จะไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ทนต่อการผุกร่อนและไม่เกิดสนิมกับอากาศ คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ทองเป็นโลหะชนิดหนึ่งที่น่ามาผสมกับโลหะเงินเพื่อทำเป็นอัลลอยด์ เพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติในเรื่องป้องกันการหมองของเงิน ในขณะที่โลหะชนิดอื่นๆ ที่นำมาผสมเพื่อผลิตอัลลอยด์จะทำหน้าที่แตกต่างกันไป

ในอดีตการทำโลหะอัลลอยด์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติที่ดีให้เงินนั้น ทั้งด้านกันหมอง ความแข็ง จะต้องใช้โลหะในปริมาณมากเข้ามาช่วย และใช้กรรมวิธีหลอมโลหะทุกชนิดรวมกัน เนื่องจากทุกตัวมีจุดหลอมเหลวสูง จึงต้องอาศัยการหลอมโลหะ ทำให้ต้องมีกรรมวิธีที่ยุ่งยาก และต้นทุนการผลิตสูง สำหรับการป้องกันการหมองของเครื่องประดับเงินจะใช้กรรมวิธีดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อความสำคัญและที่มาของปัญหา ซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีข้อเสียต่างกัน แต่จะเห็นได้ว่าวิธีส่วนใหญ่จะใช้การเคลือบฟิล์มบางซึ่งเมื่อทิ้งไว้ในระยะเวลาอันนานขึ้นจะมีผลกับสีของฟิล์มที่เปลี่ยนไป ทอง เป็นโลหะชนิดหนึ่งซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษในการป้องกันการกันหมองได้ แต่เนื่องจากมีราคาแพง และการกันหมองด้วยทองโดยกรรมวิธีในอดีตต้องใช้โลหะทองในปริมาณมากจึงทำให้ค่าใช้จ่ายในกระบวนการกันหมองต่อชิ้นงานแพงมาก หากสามารถนำทองซึ่งเป็นโลหะที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีมาทำการเคลือบผิวบนโลหะเงินได้ โดยใช้ทองในปริมาณน้อยมาก จะสามารถต้านทานการหมองของเงินได้ และลดค่าใช้จ่ายในการชุบเพื่อป้องกันการหมองของเงินได้อีกด้วย

อนุภาคทองระดับนาโนเมตร การสังเคราะห์ทองขนาดเล็กระดับนาโนเมตรถึงไมโครเมตร มีการศึกษามายาวนาน งานวิจัยส่วนใหญ่จะนำอนุภาคทองคำขนาดเล็กเหล่านี้ไปทำเซ็นเซอร์ ใช้ในด้านชีวเคมี และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ยังไม่มีการนำทองระดับนาโนเมตรมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ ทางคณะนักวิจัยได้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์อนุภาคเงินและทองแดงระดับนาโนเมตรในการทำโครงการนวัตกรรมการขึ้นรูปเครื่องประดับเงินและทองแดงจากนาโนซิลเวอร์เคลย์และคอปเปอร์เคลย์มาก่อน จากการทำวิจัยดังกล่าวทำให้พบว่าหากทำการทดลองสังเคราะห์ทองระดับนาโนเมตรได้เองจะลดราคาการผลิตทองได้ และการใช้ทองที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะทำให้การกระจายตัวระหว่างการเคลือบเกิดได้ดี จากการวิจัยเพื่อทำการตกแต่งผิวชิ้นงาน

เครื่องประดับเงินพบว่า การทาทองปริมาณน้อยลงบนผิวชิ้นงานเงินแล้วนำไปเผา จะทำให้การเกาะติดของทองและเงินมีการเกาะติดที่ดี ไม่หลุดง่ายเหมือนการเคลือบด้วยฟิล์มบางด้วยการเกาะติดทางกายภาพเพียงอย่างเดียว และหากเคลือบในปริมาณไม่มากจะไม่ทำให้สีของชิ้นงานเงินเปลี่ยน ดังนั้นคณบดีวิจัยจึงมีสมมติฐานและแนวคิดในการพัฒนาอนุภาคทองระดับนาโนเมตรเพื่อป้องกันการกันมองของเครื่องประดับเงิน

การสังเคราะห์ทองให้ได้ขนาดอนุภาคแตกต่างกันนั้นขึ้นอยู่กับอิทธิพลของหลายปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายทอง ชนิดและความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์และสารช่วยเสถียร (stabilizer) อุณหภูมิในการสังเคราะห์ การกวนสารละลาย เป็นต้น ซึ่งปัจจัยทั้งหมดจะส่งผลกระทบต่อขนาดและรูปร่างของอนุภาคทองคำ ซึ่งมีได้ทั้ง ทรงกลม แท่ง (rod) เส้น (wire) แผ่นทรงกลม แผ่นสามเหลี่ยม แผ่นห้าเหลี่ยม และแผ่นหกเหลี่ยม และอื่นๆ แต่ละขนาดและรูปร่างจะเหมาะกับบทประยุกต์แตกต่างกัน อนุภาคทรงกลมจะมีขนาดเล็กและสามารถกระจายตัวได้ดี สีของทองขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค ในขณะที่อนุภาคที่ใหญ่ขึ้นมาในระดับแผ่นสามเหลี่ยมและหกเหลี่ยมนั้น มีความหนาของทองระดับเป็นนาโนเมตร แต่มีความกว้างระดับไมโครเมตร จะเห็นประกายของทองแวววาว แต่หากมีขนาดใหญ่จนเกินไปอนุภาคทองจะมีน้ำหนักมาก ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคอาจไม่ดีเท่าระดับนาโนเมตรที่มีขนาดเป็นทรงกลม ดังนั้นการเลือกใช้ขนาดอนุภาคจึงสำคัญต่อการทำสารละลายทองเพื่อการจุ่มเคลือบในการกันมอง แนวคิดของโครงการจึงต้องการทดลองหาขนาดอนุภาคที่เหมาะสมในการทำเป็นสารละลายทองสำหรับกันมอง

สาเหตุที่ต้องทำให้มีอนุภาคของทองขนาดเล็กเนื่องจาก หากขนาดของอนุภาคลดลง ทองจะมีอุณหภูมิในการเผาผนึกและจุดหลอมเหลวลดลง (ทองมีจุดหลอมเหลว 1064 องศาเซลเซียส หากทำการเผากับเงินจะทำให้เงินหลอมได้เนื่องจากเงินมีจุดหลอมเหลวเพียง 960 องศาเซลเซียส ดังนั้นเราจึงต้องใช้ทองที่มีขนาดเล็กเพื่อลดอุณหภูมิในการเผาผนึกและจุดหลอมเหลวลดลง ทองระดับนาโนเมตรมีจุดหลอมเหลวลดลงต่ำกว่าหนึ่งร้อยองศา จากมีผู้ศึกษามาสามารถเริ่มเผาผนึกได้ตั้งแต่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค เพื่อให้หลังการเคลือบ เราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเกาะติดได้ด้วยการเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของเงิน

กรรมวิธีการเคลือบผิวชิ้นงาน (การปรับสภาพผิวเงิน และการเผาชิ้นงาน) การเกาะติดด้วยฟิล์มด้วยวิธีทั่วไป จะมีปัญหาเรื่องการทำให้ฟิล์มบาง หรือหนา แล้วสีชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลง และมีปัญหาเรื่องการยึดเกาะระหว่างฟิล์มบางและชิ้นงานเงิน ดังนั้นแนวคิดหนึ่งของโครงการนี้คือ ศึกษาเรื่องความเข้มข้นของสารละลายทอง ความหนาของการเคลือบ การปรับสภาพผิวชิ้นงานก่อนการเคลือบด้วยอนุภาคทอง ซึ่งอาจต้องทำการนำไปแช่ในกรดอ่อนเพื่อให้ผิวชิ้นงานเงินเป็นบวก ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพในการเกาะติดระหว่างอนุภาคทองที่สังเคราะห์ขึ้นซึ่งมีผิวเป็นลบ หรืออาจใช้กรรมวิธีใช้สารช่วยยึดติดประเภทอื่น หลังจากนั้นต้องนำไปศึกษาอุณหภูมิในการเผาระหว่างอนุภาคทองระดับนาโนเมตร เพื่อดูว่าอนุภาคทองสามารถยึดติดได้ดีบนผิวเงินหรือไม่ และทำให้การเปลี่ยนสีของผิวเงิน

เปลี่ยนไปหรือไม่ เป็นการเพิ่มความทนทานของการยึดเกาะระหว่างทองคำกับเงิน ให้ชิ้นงานที่เคลือบและเผาแล้วมีความคงทนใช้งานได้นาน

นวัตกรรมการใช้สารละลายหรือคอลลอยด์ของอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตรในการกันหมองเงิน และการเคลือบให้สีทองบนเงินในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ จากการศึกษาที่ผ่านมา ยังไม่มีการนำโลหะทองคำระดับนาโนเมตรมาเพื่อทำการกันหมองเงินหรือใช้ในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ ดังนั้นหากโครงการนี้ได้รับการสนับสนุนและประสบความสำเร็จจะเป็นการสร้างนวัตกรรมใหม่ในวงการอัญมณีและเครื่องประดับ โดยต้นทุนการผลิตจะไม่สูง เนื่องจากจะเริ่มสังเคราะห์อนุภาคทองคำจากเม็ดโลหะทองคำ ไม่ได้สั่งซื้อเกลือทองคำจากต่างประเทศ หากนำมาคำนวณปริมาณทองคำขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรต่อการชุบเคลือบชิ้นงานหนึ่งชิ้นจะมีราคาต่ำมาก เนื่องจากใช้ความเข้มข้นของสารละลายทองคำต่ำนั่นเอง นอกจากนี้ หากต้องการได้ชิ้นงานที่แปลกใหม่มีประกายทองเคลือบชิ้นงานอยู่ สามารถทำการเคลือบชิ้นงานด้วยสารละลายทองคำที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรได้ ซึ่งหากเคลือบหนาจะเห็นประกายทองชัดเจน ช่วยเพิ่มรูปแบบผลิตภัณฑ์ชิ้นงานที่น่าสนใจมากขึ้น อีกทั้งราคาไม่สูง ได้ต้นแบบเครื่องประดับรูปแบบใหม่เกิดขึ้นเพื่อให้ผู้สนใจ ผู้ประกอบการ หรือช่างฝีมือแรงงานไทย ได้นำไปพัฒนาต่อไปได้ในอนาคต

1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.3.1 การสังเคราะห์อนุภาคทองคำ

การสังเคราะห์ทองคำขนาดอนุภาคตั้งแต่ นาโนเมตรถึงไมโครเมตรสามารถทำได้หลายวิธี โดยสารตั้งต้นทองคำจะใช้เกลือทองคำ HAuCl_4 และใช้ตัวรีดิวซ์และสารช่วยเสถียรต่างกัน ความเข้มข้นและชนิดของสารเคมีดังกล่าวจะทำให้ได้อนุภาคทองคำขนาด รูปร่าง สี แตกต่างกัน อนุภาคทองคำแต่ละชนิดจะเหมาะกับบทประยุกต์ที่ต่างกัน การศึกษาการสังเคราะห์ทองคำขนาดอนุภาคต่างๆ ได้มีผู้วิจัยมาอย่างต่อเนื่อง ดังนี้

G. Frens ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคทองคำทรงกลมขนาดต่างๆ กัน โดยการสังเคราะห์ด้วยสารละลายเกลือทองคำ HAuCl_4 10^{-2} % wt และ 1 % โซเดียมซิเตรท ($\text{Na}_3\text{-citrate}$) ที่ความเข้มข้นต่างกัน จะได้ขนาดของอนุภาคทองคำแตกต่างกัน สีของอนุภาคทองคำต่างกัน

Caixia Kan และคณะ ศึกษาการสังเคราะห์ single-crystalline gold microplate และผลของ thermal stability โดยทำการสังเคราะห์ทองคำจากสารละลายของเกลือเงิน 0.2 M HAuCl_4 และ poly(vinylpyrrolidone) (PVP) ใน ethylene glycol ทำการให้ความร้อนระหว่างการสังเคราะห์ที่ 150 องศาเซลเซียส อนุภาคทองคำที่ได้จะมีความหนาในระดับนาโนเมตร และกว้างไมโครเมตร อนุภาคทองคำเป็นแผ่นทั้งสามเหลี่ยม ห้าเหลี่ยม และหกเหลี่ยมปนกัน อนุภาคดังกล่าวสามารถเริ่ม

หลอมได้ที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าจุดหลอมเหลวทองมาก (ทองมีจุดหลอมเหลวประมาณ 1064 องศาเซลเซียส)

Tian Tang และ Ian W. Hamley ทดลองสังเคราะห์ทองแผ่นขนาดไมครอนและนาโนเมตรโดยการสังเคราะห์ด้วย polyol ที่อุณหภูมิสูง ใช้ propanediol เป็น medium และ reducing agent ใช้ PVP เป็น stabilizer ภายใต้สภาวะที่ต่างกันจะได้ขนาดอนุภาคของทองแตกต่างกันตั้งแต่นาโนเมตร ถึงไมโครเมตร รูปร่างอนุภาคทองจะแตกต่างกันด้วย ตั้งแต่สามเหลี่ยม ห้าเหลี่ยม และทรงกลม ผลการทดลองพบว่า PVP มีผลต่อการสังเคราะห์

Zhirui Guo และคณะ ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคทองขนาดไมโครเมตรหาระดับนาโนเมตร (10 nm) ด้วย $\text{HAuCl}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ และ aniline ใน ethylene glycol อนุภาคทองส่วนใหญ่ที่ได้มีขนาดสูงสุดเกือบ 15 ไมครอน มีรูปร่างส่วนใหญ่เป็นแผ่นสามเหลี่ยมขนาดไมครอน ปนกับทรงกลมขนาดนาโนเมตร

1.3.2 การป้องกันการหมองของโลหะเงิน

การลดปัญหาเรื่องการหมองของเครื่องประดับเงินมีการศึกษาอย่างยาวนาน ทั้งการผสมโลหะชนิดอื่นลงในอัลลอยด์กลายเป็นเงินสเตอร์ลิง เพื่อช่วยยืดอายุการให้เงินไม่หมอง แต่จะเป็นการผสมโลหะลงในระหว่างกระบวนการหล่ออัลลอยด์ ทำให้ต้องใช้โลหะอื่นๆ ในปริมาณมาก อาจใช้ต้นทุนในการผลิตสูง หลังจากนั้นมีการศึกษาการกันหมองเงินด้วยการเคลือบฟิล์มโลหะ โคโรเมท แลสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ เพื่อป้องกันการกันหมองของเงิน ได้แก่

J J McEwan และคณะ ทำการทดลองกันหมองของเงินและเงินอัลลอยด์ด้วยการเคลือบผิวเงินด้วยแลคเกอร์ การชุบไฟฟ้าด้วยโรเดียม การชุบไฟฟ้าด้วยพาลาเดียม และการทำ self-assembled monolayer (SAM) ของ Hexadecanethiol การชุบโรเดียมที่ความหนา 0.15 ไมโครเมตร ด้วยสารละลาย rhodium sulphate-sulphuric acid ชุบพาลาเดียมหนา 0.15 ไมโครเมตร ด้วยสารละลาย $\text{Pd}(\text{NH}_3)_2\text{Cl}_2$ แอมโมเนียมคลอไรด์ และแอมโมเนียมซัลเฟต ข้อดีของการชุบพาลาเดียมคือราคาถูกกว่าการชุบโรเดียม การเคลือบด้วย Hexadecanethiol ทำโดยการเตรียมผิวเงินด้วย 10% sulphuric acid ที่ 25 องศาเซลเซียส 1 นาที แล้วจึงทำการแช่ลงใน 95% Hexadecanethiol การเคลือบด้วยแลคเกอร์ทำโดยการสเปรย์ผิวชิ้นงาน หนา 4.5 ไมครอน หลังจากนั้นทดสอบความสะท้อนแสงและสีของผิวเงินที่เปลี่ยนไปหลังการเคลือบผิว และทดสอบกันหมอง ผลการทดลองพบว่าการชุบไฟฟ้าของโลหะทั้ง 2 ชนิดทำให้สีของเงินเปลี่ยนไป แต่การทดลองป้องกันการหมองของสารทุกชนิดที่ทดลองสามารถเพิ่มระยะเวลาการหมองของเงินและอัลลอยด์เงินได้

T. Frey และ M. Kogel ศึกษาการป้องกันการหมองของเงินด้วยวิธี plasmopolymer coating ซึ่งพัฒนากรรมวิธีการเคลือบผิวโดย Fraunhofer Institute (IFAM) โดยใช้แก๊สออกซิเจน ไฮโดรเจน เอทิลีน และ เฮกซะเมทิลไดไซโลเซน (hexamethyldisiloxane) เวลาในการทำ 15 นาที ความหนา 10-30 นาโนเมตร ก่อนทำการเคลือบต้องทำความสะอาดผิวหน้าเพื่อไม่ให้มีฝุ่นด้วยการแช่ในอ่างอัลตราโซนิก (ultrasonic bath) ผลการทดลองสามารถป้องกันการหมองได้โดยสีของชิ้นงานเงินไม่เปลี่ยนสี

E. Nisaratanaporn และคณะ ศึกษาโครงสร้างจุลภาค คุณสมบัติทางกายภาพ การต้านการหมองของเงินสเตอร์ลิงด้วยการเติมแมงกานีสลงในส่วนผสมอัลลอยด์ โดยใช้แมงกานีสความเข้มข้นตั้งแต่ 0-3% wt ทดสอบการหมองด้วยสารละลายอิมัลชันโซเดียมซัลไฟด์นาโนไฮเดรต ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสีจากการหมองด้วย CIELAB ผลการเติมแมงกานีสพบว่า จะช่วยให้เงินหมองช้าลงกว่าเงินสเตอร์ลิงที่ได้เติม เนื่องจากแมงกานีสจะไปลดจุดยุทธศาสตร์ของทองแดงที่เป็นส่วนผสมในเงินสเตอร์ลิง

US Patent 4,775,511 พัฒนาอัลลอยด์เงินได้แก่ เงิน-ทองแดง และ เงิน-ทอง และ เงิน-ทองแดง-ทอง โดยการเติม Cr, Ta, Al, Ti หรือ Th ลงไปในปริมาณรวม 1.5 % ซึ่งธาตุเหล่านี้จะเกิดเป็นฟิล์มออกไซด์ที่ผิวหน้าเงินซึ่งทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ได้ดีกว่าเงินทำให้ไม่เกิดการหมองรวดเร็ว สำหรับอัลลอยด์เงิน-ทองแดง จะใส่ Al และ Cr ประมาณ 0.5%wt สำหรับอัลลอยด์ทอง-ทองแดง-ทอง จะใส่ Cr 0.4% wt และใส่ 0.75%Ti, 1.25% Th หรือ 1.5 % Ta เพิ่มลงไปด้วย ซึ่งสามารถป้องกันการหมองของเงินสเตอร์ลิงได้

US Patent 5,817,195 และ US Patent 5,817,195 อธิบายการกันหมองของเงินโดยการทำอัลลอยด์ที่มี 6.57%Zn, 0.25% Cu, 0.25%Ni, 0.25 In และ 0.18% metal silicate โดย Zn จะทำหน้าที่ป้องกันการหมองแทน Cu และ Ni เพิ่มความแข็งแรงและความเปราะของเงินได้

US Patent 3,925,073 Edward Louis Kohn ได้พัฒนาอัลลอยด์ของโลหะผสม เงิน และทอง เพื่อลดการหมองของเงินในกระบวนการผลิตอุตสาหกรรม โดยผสมทอง 25-30 % wt และเงิน 45-71 %wt ทองแดง 3-25% wt และ สังกะสี 0-5% อัลลอยด์ดังกล่าวจะหมองช้ากว่าเงินบริสุทธิ์ แต่จะเห็นได้ว่าการใส่ทองเข้าไปในปริมาณมากและต้องทำการหลอมโลหะทั้งหมดออกมาเป็นอัลลอยด์เพื่อลดการหมอง

US Patent 4,255,191 Rudolf Kropp พัฒนาอัลลอยด์ผสมทอง-เงิน ให้ต้านทานการหมองได้ดีขึ้นโดยการเพิ่มปริมาณทองเข้าไปในอัลลอยด์ โดยมีทอง 33-48% แพททินัม 0-5 % พาลาเดียม 1-10% อิริเดียมหรือรูเทเนียม 0-0.2% ทองแดง 3-9% สังกะสี 1-6% ดีบุก 0.5-4% และ อินเดียม 2.5-10% แต่สีของอัลลอยด์ผสมนี้มีสีทองที่เด่นชัด

1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

ศึกษาและพัฒนากรรมวิธีการป้องกันการหมองของเครื่องประดับเงินโดยการเคลือบด้วยอนุภาคทองคำบางระดับนาโนเมตร

1.5 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ศึกษากรรมวิธีการสังเคราะห์อนุภาคทองระดับนาโนเมตร และขนาดของอนุภาคทองที่เหมาะสมในการทำเป็นสารละลายในการเคลือบบนผิวชิ้นงานเงิน
2. ศึกษากรรมวิธีการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยอนุภาคทองระดับนาโนเมตรลงบนแผ่นชิ้นงานเงิน
3. ทดสอบการเปลี่ยนสีของแผ่นชิ้นงานเงินจากการเคลือบอนุภาคทองระดับนาโนเมตร
4. ทดสอบการกันหมองของแผ่นชิ้นงานเงินที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตร
5. ประยุกต์ใช้กรรมวิธีการเคลือบชิ้นงานด้วยอนุภาคทองระดับนาโนเมตรกับชิ้นงานต้นแบบเครื่องประดับเงิน
6. นำเสนอผลงานวิจัย หรือสรุปผลการวิจัยเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ผ่านทางเว็บไซต์หน่วยงาน หรือการประชุมสัมมนาวิชาการ หรือตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. องค์ความรู้เกี่ยวกับการสังเคราะห์อนุภาคทองคำระดับนาโนเมตรและไมโครเมตรในขนาดและรูปร่างต่างๆ และองค์ความรู้ด้านการกันหมองเงิน
2. การป้องกันการหมองของโลหะเงินด้วยอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตรหรือไมโครเมตร
3. การเผยแพร่ผลงานวิจัยในวารสารวิชาการหรือในการประชุมวิชาการ

บทที่ 2

วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

1. เกลือทองคำ (Gold (III) chloride hydrate, HAuCl_4)
2. พอลิวินิลไพร์โรลิโดน (Polyvinylpyrrolidone, PVP)
3. เอทิลีน ไกลคอล (Ethylene glycol, EG)
4. โซเดียมซัลไฟด์ (Sodium sulphide, $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$)
5. น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water, DI Water)

เครื่องมือ เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง ประกอบด้วย

1. เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible NIR Spectrophotometer) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น U-4100 UV-Visible NIR Spectrophotometer ใช้สำหรับการวิเคราะห์แถบการดูดกลืนแสงและสะท้อนแสงของอนุภาคทองคำและแผ่นทองคำ
2. ยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพา รุ่น USB4000-UV-VIS Portable UV-Vis Spectrometer Ocean Optic เพื่อการวัดการเปลี่ยนแปลงของสีก่อนและหลังกันหมองบนชิ้นงานโลหะเงิน
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6150A ใช้สำหรับการวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างของอนุภาคทองคำที่ได้จากการสังเคราะห์และการเกาะติดของทองคำบนชิ้นงานเงิน

2.2 การสังเคราะห์อนุภาคทองคำ

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง อันประกอบไปด้วย สารละลายทองคำ (Gold (III) chloride hydrate, HAuCl_4) ตัวรีดิวซ์ 2 ชนิด ได้แก่ โซเดียมซิเตรต (Sodium citrate) และ พอลิไวนิลไพร์โรลิโดน (Polyvinylpyrrolidone, PVP) ตัวช่วยเสถียร (stabilizer) คือเอทิลีนไกลคอล (Ethylene, EG) ที่มีผลต่อขนาดและรูปร่างของอนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้ โดยแบ่งการสังเคราะห์ออกเป็นวิธีการทดลองต่างๆ ดังนี้

การทดลองที่ 1 การสังเคราะห์ทองคำอนุภาคระดับนาโนเมตรด้วยโซเดียมซิเตรต

กระบวนการสังเคราะห์ทองคำอนุภาคระดับนาโนเมตรทำได้โดยเตรียมสารละลายทองคำของ HAuCl_4 ความเข้มข้น 10 mM แล้วนำไปต้มให้สารละลายอุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมซิเตรต ความเข้มข้น 1.5% ผสมกับสารละลายเกลือทองอย่างรวดเร็วพร้อมทั้ง

คนตลอดเวลา จะได้สารละลายคอลลอยด์สีแดงของอนุภาคทองคำขนาดนาโนเมตร หรือ Gold nanoparticles รูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 อนุภาคทองคำระดับนาโนเมตรเป็นสารละลายคอลลอยด์สีแดง

การทดลองที่ 2 การสังเคราะห์ทองคำแบบ Gold Microplate

การทดลองสังเคราะห์ทองคำที่เรียกว่า Gold Microplate คืออนุภาคทองคำที่มีความกว้างระดับไมโครเมตรและหนาระดับนาโนเมตร เพื่อนำทองชนิดนี้ไปเคลือบกันหมองเพิ่มเติมจากการเคลือบด้วยทองคำอนุภาคนาโนเมตร (Gold nanoparticles) ในการทดลองที่ 1 เนื่องจากมีสมมติฐานว่าการที่อนุภาคทองคำมีกว้างระดับไมครอน จะช่วยให้การปกปิดพื้นผิวชิ้นงานทำได้ดีกว่า และทองคำชนิดนี้มีความหนาระดับนาโนเมตร อาจช่วยให้กระบวนการให้ความร้อนหรือกระบวนการอื่นๆ ในการเคลือบใช้พลังงานต่ำลง ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาว่า ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้นใดมีผลต่อการทำให้ทองคำที่สังเคราะห์ได้เป็น Gold microplate ได้ จึงต้องทดลองขั้นตอนย่อยอิทธิพลของสารตั้งต้นที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคทองคำชนิดนี้ โดยแบ่งเป็นขั้นตอนดังนี้

การทดลองที่ 2.1 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายทองคำที่มีผลต่ออนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้ โดยทำการสังเคราะห์ด้วยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายทองคำ 3 ความเข้มข้น โดยใช้ตัวรีดิวซ์ที่อ่อนลงคือ PVP ซึ่งใช้ความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์และตัวช่วยเสถียรคงที่ สภาวะการทดลองที่ใช้ แสดงดังตารางที่ 2.1

การทดลองที่ 2.2 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของตัวช่วยเสถียรที่มีผลต่ออนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้ โดยทำการสังเคราะห์ด้วยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวช่วยเสถียรคือ เอทิลีนไกลคอล 3 ความเข้มข้น โดยแต่ละความเข้มข้นใช้ความเข้มข้นของสารละลายทองคำและตัวรีดิวซ์คือ พอลิไวนิลไพร์โรลิโดน คงที่ สภาวะการทดลองที่ใช้ แสดงดังตารางที่ 2.1

การทดลองที่ 2.3 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ที่มีผลต่ออนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้ โดยทำการสังเคราะห์ด้วยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์คือ พอลิไวนิลไพร์โรลิโดน 3 ความเข้มข้น โดยแต่ละความเข้มข้นใช้ความเข้มข้นของสารละลายทองคำและตัวช่วยเสถียรคือ เอทิลีนไกลคอลคงที่ สภาวะการทดลองที่ใช้ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สภาวะการทดลองในการสังเคราะห์อนุภาคทองคำ

การทดลองที่	สารละลายทองคำ (HAuCl ₄)		โซเดียมซิเตรท 1.5%	PVP		EG			อุณหภูมิ (°C)
	ความเข้มข้น (M)	ปริมาตร (mL)		ความเข้มข้น (mM)	น้ำหนัก (g)	ความเข้มข้น (M)	ปริมาตร (mL)		
							EG	DI Water	
1	0.001	1.00	1	-	-	-	-	-	90
2.1	0.20	1.00	-	0.35	0.04	18.00	3.00	0.00	120
	0.40	1.00	-	0.35	0.04	18.00	3.00	0.00	120
	0.70	1.00	-	0.35	0.04	18.00	3.00	0.00	120
2.2	0.20	1.00	-	0.35	0.04	18.00	3.00	0.00	120
	0.20	1.00	-	0.70	0.08	18.00	3.00	0.00	120
	0.20	1.00	-	1.40	0.16	18.00	3.00	0.00	120
2.3	0.20	1.00	-	1.40	0.16	6.00	1.00	2.00	120
	0.20	1.00	-	1.40	0.16	12.00	2.00	1.00	120
	0.20	1.00	-	1.40	0.16	18.00	3.00	0.00	120

กรรมวิธีในการสังเคราะห์แผ่นทองคำแบบ Microplate การทดลองที่ 2 มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมสารตั้งต้นของสารละลายทองคำโดย ปิเปตต์สารละลายทองคำ (Gold (III) chloride hydrate) ความเข้มข้น 0.20 M, 0.40 M และ 0.70 M (ตามสภาวะการทดลองที่กำหนดไว้แสดงดังตาราง 3.1) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ แสดงดังรูป 2.2 (ก) จากนั้นปิเปตเอทิลีนไกลคอล (EG) ปริมาตร 6 มิลลิลิตร ลงในสารละลายทอง แล้วนำสารละลายไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส พร้อมคนช้าๆ ด้วยเครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน (Hotplate Stirrer)
2. เตรียมสารละลายตัวรีดิวส์ โดยการชั่งพอลิไวนิลไพร์โรลิโดน 0.16 กรัม (1.40 mM) เติมนลงในเอทิลีนไกลคอลที่เตรียมไว้ปริมาตร 3 มิลลิลิตร แล้วคนให้เข้ากัน
3. การสังเคราะห์ทำโดยเติมสารละลายที่ได้ในข้อที่ 2 ช้าๆ ด้วยหลอดหยดสาร ลงในสารละลายทองคำที่คนพร้อมให้ความร้อนไว้ในข้อที่ 1 เมื่อสารทำปฏิกิริยากันสารละลายทองคำจะมีสีจางลงและเริ่มเกิดเป็นตะกอนทองคำ แสดงดังรูป 2.2 (ข) ให้ความร้อนพร้อมคนสารละลายผสมช้าๆ ต่อไปจนได้เป็นตะกอนของทองคำ ซึ่งตกตะกอนอยู่ในตัวทำละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์ แสดงดังรูป 2.2 (ค)

4. ล้างแผ่นทองคำที่สังเคราะห์ได้ด้วยน้ำปราศจากไอออนสลับกับเมทิลแอลกอฮอล์ จนได้เป็นตะกอนทองคำที่ละลายอยู่ในสารละลายใสไม่มีสี
5. การทดลองที่ 2.2 และ 2.3 ทำการสังเคราะห์ด้วยกรรมวิธีเช่นเดียวกันนี้ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายทองคำ ตัวช่วยเสถียรและตัวรีดิวซ์ที่ต่างกันอย่างสิ้นเชิงตามสภาวะการทดลองที่ตั้งไว้ แสดงดังตารางที่ 2.1



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.2 สารละลายทองคำ (ก), ขณะทำการสังเคราะห์จะตกตะกอนลงมาเป็นเกร็ดทอง (ข) และตะกอนทองคำที่ได้จากการสังเคราะห์ (ค)

2.3 การเคลือบทองคำลงบนแผ่นเงิน

การทดสอบการเคลือบทองคำบนแผ่นเงินทำได้โดยเตรียม ชิ้นงานแผ่นเงินขนาดประมาณ กว้าง x ยาว เท่ากับ 1 เซนติเมตร x 1 เซนติเมตร เตรียมชิ้นงานสภาวะละ 3 ชิ้น ขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ ทำความสะอาดผิวด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ทำชิ้นงานไทเทเนียม (กรณีศึกษาการเตรียมผิว (Pre-treatment) ก่อนเคลือบชิ้นงาน ให้ทำการแช่แผ่นเงินในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ก่อน แล้วนำชิ้นงานไปเคลือบอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตรด้วยเทคนิคการเคลือบแบบจุ่ม (Dip coating technique) หลังการเคลือบครั้งแรก ให้รอให้ชิ้นงานแห้ง แล้วทำการเคลือบซ้ำเป็น 2 ชั้น และ 5 ชั้น ตามลำดับ และทำการทดลองดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สภาวะที่ใช้ในการทดลองเคลือบผิวและกันหมองของแผ่นเงิน

สภาวะ ที่	รหัส ตัวอย่าง	Gold Nano- particles (N)	Gold Microplate (M)	จำนวนชั้นการ เคลือบอนุภาค ทอง	Pre- treatment (P)	Heat Treatment (H)	Tarnish Resistance Test (T)
1	S0	-	-	0	-	-	-
2	SN2	✓	-	2	-	-	-
3	SN5	✓	-	5	-	-	-
4	SM2	-	✓	2	-	-	-
5	SM5	-	✓	5	-	-	-
6	S0-T	-	-	0	-	-	✓
7	SN2-T	✓	-	2	-	-	✓
8	SN2-T	✓	-	5	-	-	✓
9	SM2-T	-	✓	2	-	-	✓
10	SM5-T	-	✓	5	-	-	✓
11	SN2-H	✓	-	2	-	✓	-
12	SN2-HT	✓	-	2	-	✓	✓
13	SM2-H	-	✓	2	-	✓	-
14	SM2-HT	-	✓	2	-	✓	✓
15	SN5-H	✓	-	5	-	✓	-
16	SN5-HT	✓	-	5	-	✓	✓
17	SM5-H	-	✓	5	-	✓	-
18	SM5-HT	-	✓	5	-	✓	✓
19	SN2-PH	✓	-	2	✓	✓	-
20	SN2-PHT	✓	-	2	✓	✓	✓
21	SM2-PH	-	✓	2	✓	✓	-
22	SM2-PHT	-	✓	2	✓	✓	✓
23	SN5-PH	✓	-	5	✓	✓	-
24	SN5-PHT	✓	-	5	✓	✓	✓
25	SM5-PH	-	✓	5	✓	✓	-
26	SM5-PHT	-	✓	5	✓	✓	✓

*หมายเหตุ ชื่อตัวอย่างมาจากตัวอย่างในหัวข้อตาราง และการทดลองแต่ละกระบวนการ โดย S หมายถึง แผ่นเงิน M หมายถึง Gold Microplate และ N หมายถึง Gold Nanoparticles

2.4 การทดสอบการต้านทานการหมอง

การทดสอบความหมอง ทำได้โดยทำความสะอาดผิวชิ้นงานแผ่นเงินด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ทำชิ้นงานให้แห้ง หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปอังด้วยไอสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ (Sodium Sulfide, $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$) เข้มข้น 0.1% ที่อุณหภูมิห้อง เป็น เวลา 5, 10, 15, 30 และ 60 นาที เนื่องจากเป็นการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจน ตรวจวัดและเปรียบเทียบได้ง่ายเริ่มที่ เวลา 30 นาที ภายหลังจากทดสอบกันหมองจะทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงของสีตามมาตรฐาน Commission International d' Eclairage (CIELAB) ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลแบบพกพารุ่น USB4000 - Ocean Optics UV-VIS Portable miniature spectrometer

2.5 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล เนียร์ไออาร์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible NIR Spectrophotometer)

การวิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล เนียร์ไออาร์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ จะนำมาวิเคราะห์สารละลายทองคำที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสง (Absorbance) ด้วยความเร็วในการสแกน 1200 นาโนเมตรต่อนาที การวิเคราะห์ด้วยยูวี-วิสิเบิล เนียร์ไออาร์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันว่าตะกอนที่สังเคราะห์ได้เป็นตะกอนของทองคำที่มีลักษณะเป็น Microplate

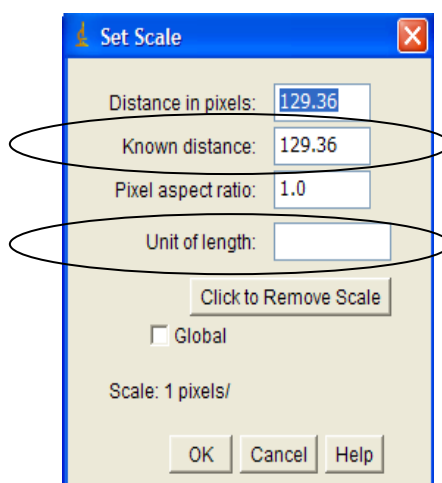
2.6 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

ขนาดอนุภาคทองและการเกาะติดของอนุภาคทองบนแผ่นเงินตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) รุ่น JEOL JSM-6510A Scanning Electron Microscope ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด ทำได้โดยเตรียมแผ่นกระจกสไลด์ขนาดความกว้างและความยาวไม่เกิน 1 เซนติเมตร นำแผ่นทองคำที่ผ่านการล้างเรียบร้อยแล้วมาหยดลงบนกระจกสไลด์ที่เตรียมไว้ หยดซ้ำ 2-3 ชั้น รอให้แห้ง นำแผ่นสไลด์ไปตรวจวัดด้วยสัญญาณแบบอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron, SE) ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 5-10 กิโลโวลต์ ภายหลังจากเคลือบแผ่นทองคำระดับนาโนเมตรลงบนแผ่นเงินทดสอบ และวิธีทำเช่นเดียวกัน โดยการวัดขนาดอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตรใช้โปรแกรม Image J

2.7 การวัดขนาดอนุภาคด้วยโปรแกรม Image J

1. เปิดโปรแกรม Image J
2. เปิดภาพถ่ายที่ต้องการวัดขนาดอนุภาค
3. เลือกเส้นตรง ลากเส้นตรงบริเวณขนาดของรูปภาพ จะปรากฏเป็นเส้นสีเหลือง

4. ตั้งค่าขนาด (Set scale) โดยการเลือก วิเคราะห์ (Analyze) เลือกตั้งค่าขนาด (Set Scale) จะปรากฏหน้าต่างแสดงดังรูปที่ 2.4 แล้วทำการเปลี่ยนความยาวตรงช่องระยะทางที่ทราบค่า (Known distance) เป็นความยาวของความยาวที่ลากเส้นตรงไว้
5. เปลี่ยนหน่วยของความยาวตรงหน่วยของความยาว (Unit of length) เป็นหน่วยความยาวของความยาวของภาพ เช่น nanometer หรือ micrometer เป็นต้น
6. เลือกเครื่องหมายถูกตรง Global เลือก ตกลง
7. วัดขนาดอนุภาคด้วยการลากเส้น (Polygon) รอบอนุภาคที่ต้องการวัดขนาด จากนั้นเลือก วิเคราะห์ (Analyze) แล้วเลือก (Measure) จะขึ้นหน้าผลลัพธ์ที่แสดงพื้นที่ของอนุภาคที่ทำกรวัด
8. ทำการบันทึกข้อมูล ด้วยการเลือกไฟล์แล้วเลือกบันทึกเป็น



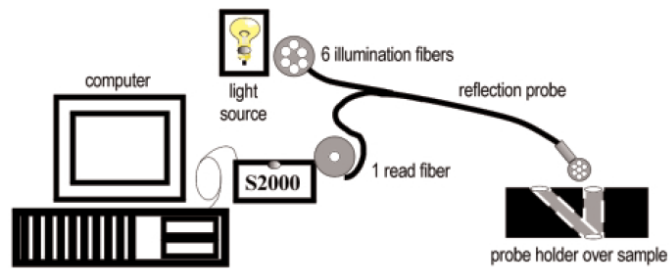
รูปที่ 2.3 คำสั่งตั้งค่าความยาว (Set scale) สำหรับการตั้งค่าความยาวของขนาดอนุภาค

2.8 การวิเคราะห์สีด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพา

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีก่อนและหลังกันหมองของแผ่นเงิน ใช้เครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพา รุ่น USB4000-UV-VIS Portable miniature spectrometer ของ Ocean Optics การวิเคราะห์สีทำได้โดยการใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสะท้อน (ตั้งรูป) โดยใช้สายไฟเบอร์ออฟติกแบบสามขา เลือก Color measurement Mode ใช้ระบบการวัดสี CIE L*a*b* ตั้งค่าความยาวคลื่น 400-800 nm Observer 2° แต่ละสภาวะใช้ชิ้นงาน 3 ชิ้นงาน แต่ละชิ้นงานจะวัดค่าสีอย่างน้อย 3 ตำแหน่ง แล้วนำค่ามาเฉลี่ย การทดลองเพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่นเงินจะทำการวัด 3 ครั้งได้แก่

1. สีของแผ่นเงินก่อนการเคลือบด้วยทองทั้ง 2 ชนิด
2. สีของแผ่นเงินที่เปลี่ยนไปภายหลังการเคลือบด้วยทองทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ gold nanoparticle และ gold microplate
3. สีของแผ่นเงินที่ผ่านการเคลือบด้วยทองแล้วและนำไปทำการทดสอบการต้านทานการหมอง (Tarnishing Test)

Reflection Setup



รูปที่ 2.4 การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิคการสะท้อนด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลแบบพกพา
ที่มา: Operating Manual and User's Guide S2000 Miniature Fiber Optic Spectrometers
and Accessories, Ocean Optics B.V. Europe, 2005
http://oceanoptics.com/wp-content/uploads/S2000_Operating_Manual2.pdf

บทที่ 3

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลการสังเคราะห์อนุภาคทอง

3.1.1 การสังเคราะห์อนุภาคทองคำระดับนาโนเมตร (Gold nanoparticles)

การสังเคราะห์อนุภาคทองคำระดับนาโนเมตรโดยใช้โซเดียมซิเตรทเป็นตัวรีดิวซ์ ได้ผลเป็นสารละลายคอลลอยด์สีแดงขนาดนาโนเมตรของอนุภาคทองขนาดประมาณ 30-50 nm ดังรูปที่ 3.1 หลังจากนั้นเตรียมสารละลายของทองคำขนาดนาโนเมตรนี้สำหรับเคลือบบนแผ่นเงินเพื่อทดสอบการกันหมองในหัวข้อต่อไป แต่เนื่องจากอนุภาคทองคำเป็นสารแขวนลอยไม่ตกตะกอน ทำให้นักวิจัยได้ทดลองทำการสังเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อให้ได้อนุภาคทองคำที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยคาดว่าจะประโยชน์ในการเคลือบชิ้นงานเงิน โดยการเปลี่ยนตัวรีดิวซ์ในการสังเคราะห์จากโซเดียมซิเตรทเป็นพอลิไวนิลไพโรรีโดน ผลการทดลองดังข้อ 3.1.2



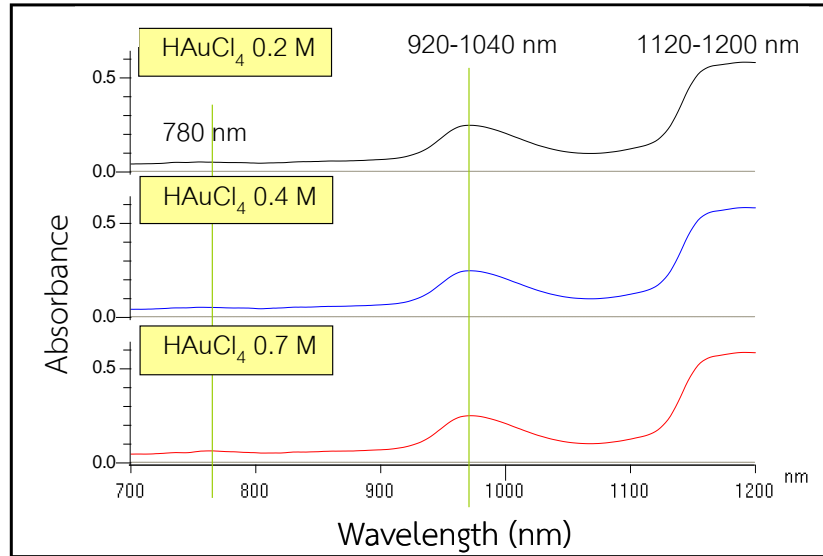
รูปที่ 3.1 สารละลายทองคำขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรเป็นคอลลอยด์ของอนุภาคสีแดง (ขวา) และทองคำระดับไมโครเมตร (ซ้าย)

3.1.2 การสังเคราะห์ทองคำแบบแผ่นขนาดไมครอน (Gold Microplate)

การทดลองที่ 1 การศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของสารละลายทองคำ

การทดลองที่ 1 เป็นการสังเคราะห์แผ่นทองคำโดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายทองคำที่ใช้ในการสังเคราะห์ 3 ความเข้มข้น โดยใช้ความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์และความเข้มข้นของตัวช่วยเสถียรคงที่ ผลการทดลองพบว่าเมื่อสารละลายทองคำสีเหลืองทองนั้นหลังจากทำการสังเคราะห์ จะมีเกล็ดทองตกตะกอนหรือมีลักษณะเป็นแผ่น หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วย ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล เนียร์ไออาร์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เพื่อวิเคราะห์ตะกอนแผ่นทองคำพร้อมสารละลายที่ได้จาก

การสังเคราะห์ โดยทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสง (Absorbance) ในช่วงความยาวคลื่น 700-1200 นาโนเมตร ผลวิลิเบิลสเปกตรัมสามารถแบ่งการดูดกลืนเป็น 3 ช่วง ได้แก่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 780 นาโนเมตร ช่วงที่สองมีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 920-1040 นาโนเมตร และช่วงที่ 3 มีการดูดกลืนสูงสุดในช่วง 1120-1200 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วิลิเบิล-เนียร์ไออาร์สเปกตรัมของแผ่นทองคำที่สังเคราะห์ด้วยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายทองคำ

ผลของวิลิเบิลเนียร์ไออาร์สเปกตรัมแสดงการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 780 นาโนเมตร นั้น ตรงกับการดูดกลืนแสงของทองคำที่มีลักษณะเป็นแผ่น (Plate) แต่มีความบางในระดับนาโนเมตร (Hong Yuan et al., 2003) ส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 920-1040 นาโนเมตร เป็นการดูดกลืนแสงของอนุภาคทองคำที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางที่มีรูปร่างเป็นแบบสามเหลี่ยม (Flat Triangular) (Ying Chen et al., 2005) และในช่วงที่มีการดูดกลืนแสงประมาณ 1120-1200 นาโนเมตร นั้น เป็นการดูดกลืนแสงของอนุภาคทองคำที่มีรูปร่างเป็นแบบสามเหลี่ยมที่มีความบางและเป็นอนุภาคในระดับนาโนเมตร (Flat Triangular Nanoparticles) (Panikkanvalappil R. Sajanlal et al., 2011) ดังนั้นจากผลของวิลิเบิล เนียร์ไออาร์สเปกตรัมสามารถ ยืนยันได้ว่าอนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้เป็นอนุภาคที่มีความบางในระดับนาโนเมตรและมีความกว้างในระดับไมโครเมตร

การศึกษาขนาดของแผ่นทองคำภายหลังการสังเคราะห์ ได้นำสารละลายมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออนสลับกับเมทิลแอลกอฮอล์ รอให้แห้งจะได้เป็นแผ่นสีทองขนาดเล็ก แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3.3 และนำภาพถ่าย SEM ไปหาขนาดอนุภาคด้วยโปรแกรม Image J

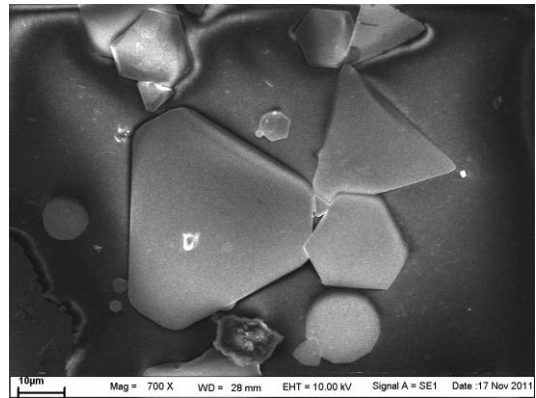
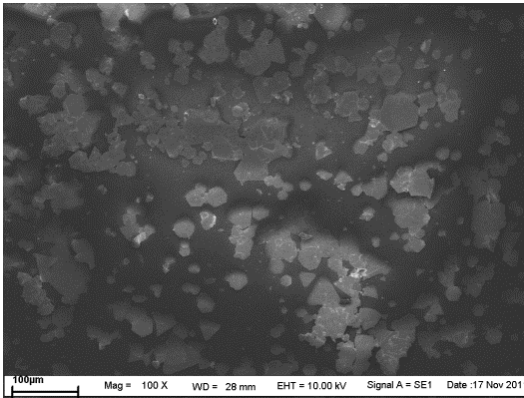
รูปร่างของแผ่นทองคำที่สังเคราะห์ได้ในสภาวะนี้ เมื่อนำไปตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด พบว่ามีลักษณะเป็นแผ่น ไม่เป็นทรงเหลี่ยมหรือกลมแบบอนุภาคทองคำ

ระดับนาโนเมตร เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายทองคำในการสังเคราะห์ให้สูงขึ้น รูปร่างของทองคำมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไป โดยเมื่อความเข้มข้นของสารละลายทองคำที่ 0.2 M รูปร่างของอนุภาคทองคำมีความหลากหลายทั้งรูปร่างแบบสามเหลี่ยม (Triangular), สามเหลี่ยมถูกตัดทอน (Truncated Triangular), วงกลม (Circular) และ หกเหลี่ยม (Hexagonal) แสดงดังรูป 3.2 (ก) และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายทองคำเพิ่มขึ้นเป็น 0.4 M พบว่ารูปร่างของแผ่นทองคำยังคงมีความหลากหลาย ทั้งสามเหลี่ยม สามเหลี่ยมถูกตัดทอน หกเหลี่ยมและวงกลม แต่มีแนวโน้มว่าแผ่นทองคำที่มีรูปร่างสามเหลี่ยมมีปริมาณลงและมีแผ่นทองคำที่มีรูปร่างแบบสามเหลี่ยมถูกตัดทอนรวมไปถึงหกเหลี่ยมมากขึ้น แสดงดังรูป 3.3 (ข) และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายทองคำเป็น 0.7 M พบว่ารูปร่างของแผ่นทองคำที่สังเคราะห์ได้ส่วนใหญ่จะเป็นแบบหกเหลี่ยมและสามเหลี่ยมถูกตัดทอนและมีรูปร่างแบบสามเหลี่ยมและวงกลมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 3.3 (ค) โดยในทุกสภาวะการทดลองนี้ แผ่นทองมีความกว้างระดับไมครอนหรือไมโครเมตร ตั้งแต่ระดับ 10 – 50 ไมครอน แต่แผ่นทองมีความบางมาก ซึ่งจะทำให้การศึกษาในหัวข้อถัดไป ดังนั้นถือว่าทองที่สังเคราะห์ได้ในสภาวะการทดลองและความเข้มข้นสารตั้งต้นนี้เป็นแบบ Gold Microplate

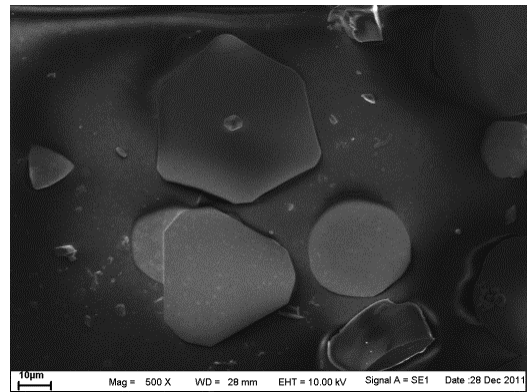
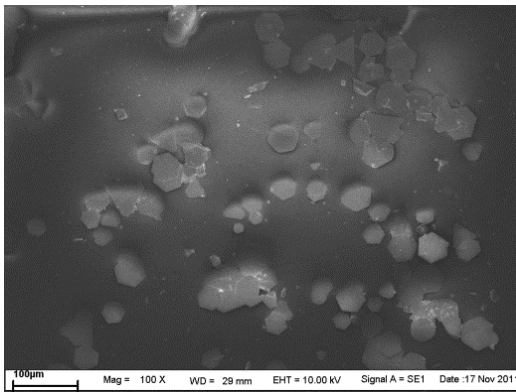
การศึกษาค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับเรื่องการสังเคราะห์โลหะมีค่าที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตรและไมโครเมตร กล่าวว่าการสังเคราะห์จะประกอบด้วยขั้นตอนหลักของการเกิดปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน ได้แก่ กระบวนการเกิดนิวเคลียส (Nucleation Process) และกระบวนการรวมตัวกันของนิวเคลียส (Cluster Growth) โดยกระบวนการเกิดนิวเคลียสจะเริ่มจากการที่สารตั้งต้นของการเกิดปฏิกิริยา สำหรับการทดลองนี้สารละลายโลหะตั้งต้น คือ HAuCl_4 ถูกรีดิวซ์จาก Au^{3+} กลายเป็น Au^0 แสดงดังสมการในรูปที่ 3.4 สมการที่ (1) - (6) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายทองคำสูงขึ้น จึงมีปริมาณไอออนทองคำ (Au^{3+}) สำหรับการทำปฏิกิริยาสูงตามไปด้วย โดยปริมาณการเกิดนิวเคลียสจะขึ้นกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate of Reaction) ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารตั้งต้น (Susie Eustis et al., 2005), (Panikkanvalappil R. Sajanlal et al., 2011)

ดังนั้นรูปร่างของทองคำที่สังเคราะห์ได้เปลี่ยนแปลงไปเมื่อความเข้มข้นของสารละลายทองคำเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้น HAuCl_4 สูง จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงตามไปด้วย นั่นหมายถึงปฏิกิริยาการเกิดเป็นนิวเคลียสของอะตอมของทองคำ จะเกิดขึ้นได้ง่ายและส่งผลทำให้ได้นิวเคลียส (Au^0) ปริมาณมาก ในทางกลับกัน ถ้าความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่ำ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดได้ยากกว่า ทำให้ได้นิวเคลียสปริมาณน้อย โดยนิวเคลียส Au^0 ที่เกิดขึ้น จะรวมตัวกันเกิดเป็นอนุภาคทองคำที่มีรูปร่างและขนาดที่แตกต่างกัน

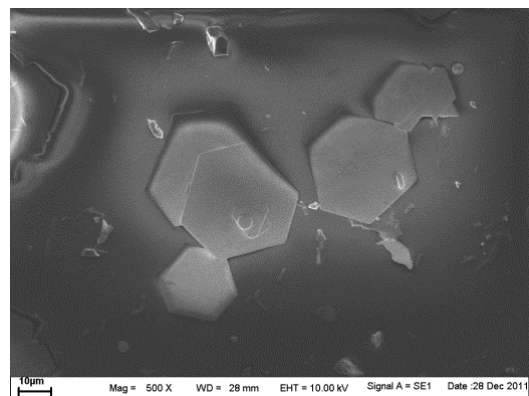
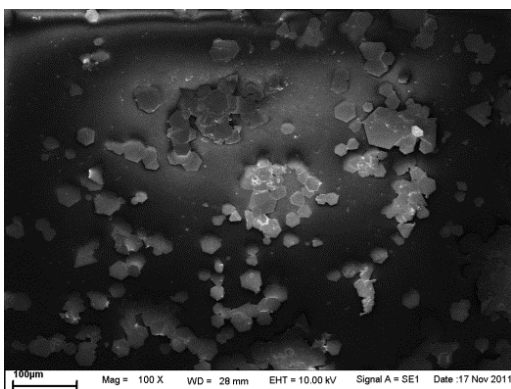
(ก) 0.2 M



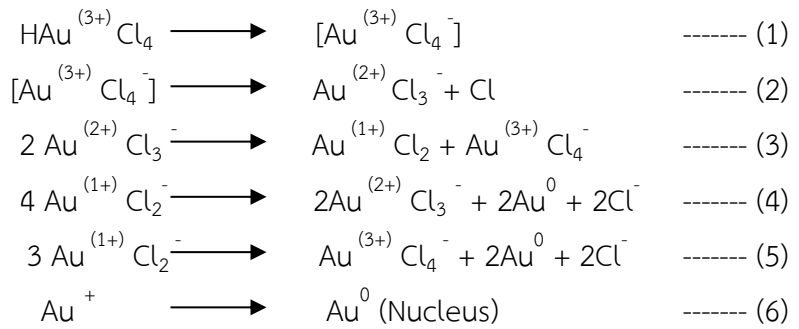
(ข) 0.4 M



(ค) 0.7 M

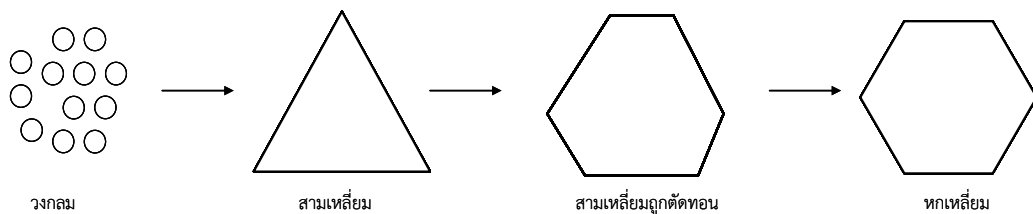


รูปที่ 3.3 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยายต่างๆ ของอนุภาคทองคำที่สังเคราะห์โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายทองคำที่แตกต่างกัน 3 ความเข้มข้นคือ (ก) 0.2 M (ข) 0.4 M และ (ค) 0.7 M



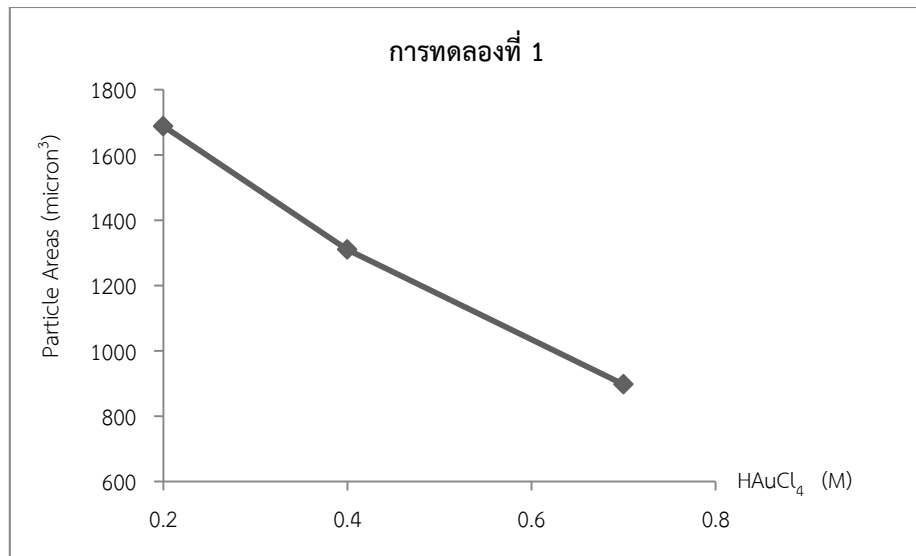
รูปที่ 3.4 สมการแสดงการแตกตัวของ Au⁽³⁺⁾ และการเกิด Au⁰ (Susie Eustis et al., 2005)

ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายทองคำที่ใช้ในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้น รูปร่างของแผ่นทองคำระดับไมครอนจะมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปในทิศทางที่มีเหลี่ยมมากขึ้น ดังรูปที่ 3.5 เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายทองคำสูง ปฏิกิริยาจะเกิดได้เร็วจึงทำให้การรวมตัวกันของนิวเคลียสนิวเคลียสแนวโน้มที่จะรวมตัวเป็นรูปร่างที่มีหลายเหลี่ยมทั้งหกเหลี่ยมและสามเหลี่ยมถูกตัดทอนในทางตรงกันข้าม เมื่อความเข้มข้นของสารละลายทองคำต่ำ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ช้า จึงทำให้การรวมตัวกันของนิวเคลียสจะรวมตัวเป็นรูปร่างแบบวงกลมหรือสามเหลี่ยมมากกว่าที่จะรวมตัวเป็นรูปร่างแบบหลายเหลี่ยม (Yujie Xiong et al., 2006)



รูปที่ 3.5 รูปร่างของแผ่นทองคำที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อความเข้มข้นของสารละลายทองคำที่ใช้เป็นสารตั้งต้นเพิ่มขึ้น

การศึกษาขนาดของอนุภาคทองคำจากการนำภาพถ่าย SEM ไปหาขนาดอนุภาคด้วยโปรแกรม Image J นั้น พบว่าแผ่นทองคำที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 1 นี้มีความกว้างของแผ่นทองคำเฉลี่ยในระดับไมโครเมตร เมื่อความเข้มข้นของสารละลายทองคำตั้งต้นเพิ่มขึ้น ขนาดความกว้างของแผ่นทองคำที่สังเคราะห์ได้จะมีแนวโน้มลดลง ซึ่งแผ่นทองคำที่สังเคราะห์ได้มีหลายรูปร่าง ดังนั้นจึงสรุปข้อมูลเป็นเชิงพื้นที่ (particle area) ได้ดังกราฟในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของแผ่นทองคำที่ได้จากการสังเคราะห์ในการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับความเข้มข้นของสารละลายทองคำที่ใช้ในการสังเคราะห์ (ความเข้มข้นของพอลิวินิลไพร์โรลิโดนและเอทิลีนไกลคอลคงที่)

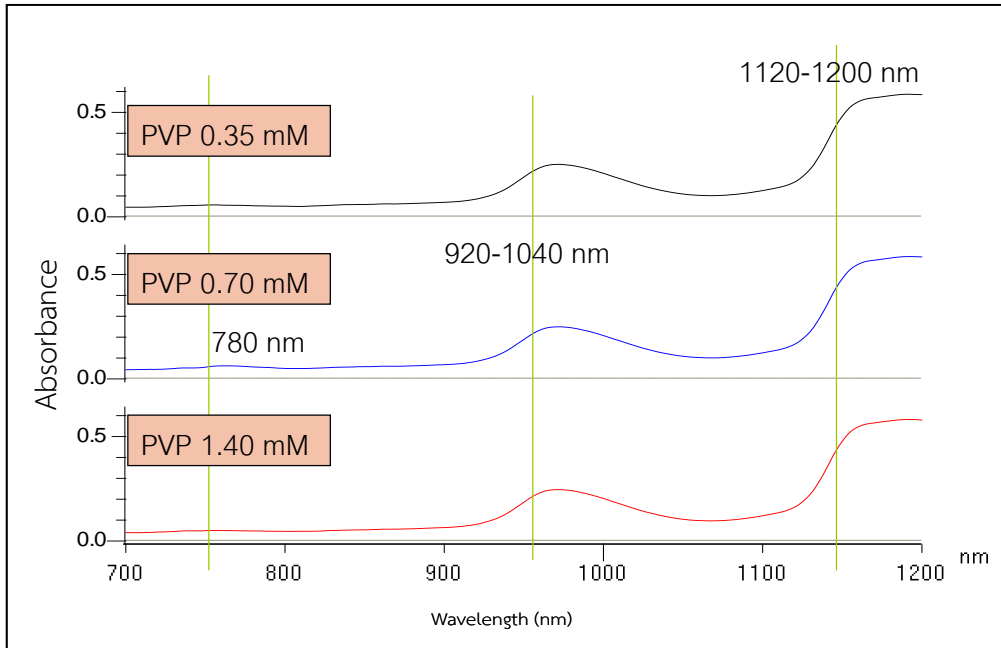
รูปที่ 3.6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายทองคำเพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มข้นของพอลิ-วินิลไพร์โรลิโดนและเอทิลีนไกลคอล ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวช่วยเสถียรและตัวรีดิวซ์นั้นคงที่ ขนาดของอนุภาคทองคำจะลดลง เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายทองคำสูงทำให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูง นั่นหมายถึงปฏิกิริยาการเกิดเป็นนิวเคลียสของอะตอมของทองคำที่เกิดขึ้นได้มากส่งผลให้ได้นิวเคลียส (Au^0) ปริมาณมาก เมื่อเข้าสู่ขั้นตอนการรวมตัวของนิวเคลียส การทำปฏิกิริยาในช่วงการรวมตัวของนิวเคลียสจะเกิดได้เร็วจึงทำให้รวมตัวได้เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ในทางกลับกัน ถ้าความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่ำ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดได้ช้าและน้อยกว่า ทำให้ได้นิวเคลียสปริมาณน้อย อัตราการทำปฏิกิริยาการรวมตัวจะเกิดขึ้นได้ช้าส่งผลให้ได้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ (Susie Eustis et al., 2005)

ดังนั้นจากผลของสเปกตรัมในช่วงวิสิเบิลเนียร์ไออาร์ของแผ่นทองคำในการทดลองนี้ที่มีการดูดกลืนแสงของทองคำระดับนาโนเมตรนั้น เมื่อรวมกับผลของภาพถ่าย SEM ซึ่งพบว่าแผ่นทองคำมีความกว้างระดับไมโครเมตร ทำให้ยืนยันได้ว่าอนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้มีความบางระดับนาโนเมตร และมีความกว้างระดับไมโครเมตร ซึ่งในที่นี้จะขอเรียกต่อไปว่า Gold Microplate

การทดลองที่ 2 การศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของพอลิวินิลไพร์โรลิโดน

ผลการทดลองที่ 2 เป็นการสังเคราะห์ทองคำด้วยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของพอลิ-วินิลไพร์โรลิโดน 3 ความเข้มข้น โดยแต่ละความเข้มข้นใช้ความเข้มข้นของสารละลายทองคำคงที่ ที่ความเข้มข้น 0.2 M และเอทิลีนไกลคอล คงที่ ที่ความเข้มข้น 18.00 M พบว่าได้สารละลายเป็นเกล็ดทองคำหรือทองคำลักษณะแผ่นขนาดเล็กมากเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 โดยการศึกษาขนาดอนุภาคด้วย

เครื่องยูวี-วิสิเบิล เนียร์อินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์พบว่าได้สเปกตรัมที่มีการดูดกลืนแสงแบ่งเป็น 3 ช่วงเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 คือ ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 780 นาโนเมตร 920-1040 นาโนเมตร และ 1120-1200 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วิสิเบิล-เนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นทองคำที่สังเคราะห์ด้วยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของพอลิวินิลไพร์โรลิโดน

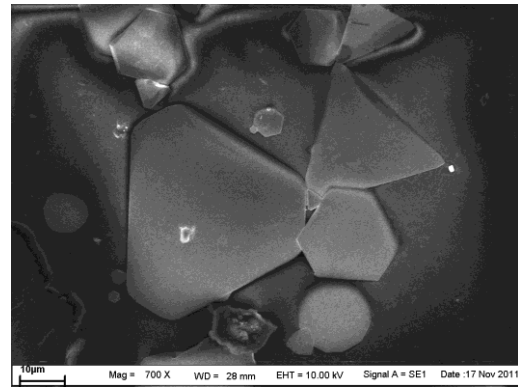
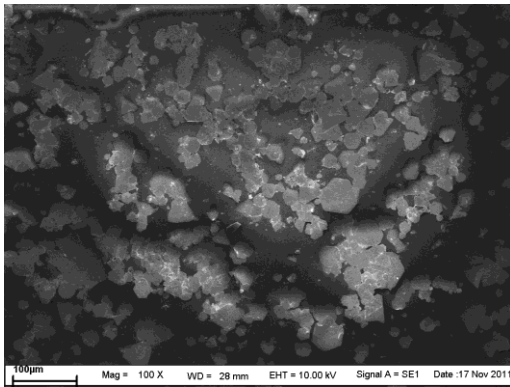
ผลของสเปกตรัมแผ่นทองคำที่มีการดูดกลืนแสง 3 ช่วง คือที่ความยาวคลื่นประมาณ 780, 920-1040 และ 1120-1200 นาโนเมตร ตามลำดับนี้สัมพันธ์กับการดูดกลืนแสงของอนุภาคทองคำที่มีลักษณะเป็นแผ่นรูปร่างและขนาดต่างๆ กัน (Hong et al., 2003) (Ying et al., 2005) (Panikkanvalappil et al., 2011) ผลการทดลองนี้จึงสามารถยืนยันได้ว่าอนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองนี้เป็นอนุภาคแผ่นทองคำที่มีความบางในระดับนาโนเมตร

เมื่อนำสารละลายของแผ่นทองคำนี้มาทำให้แห้งด้วยกระบวนการเดียวกับการทดลองที่ 1 จึงนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) พบว่าที่ความเข้มข้นของพอลิวินิลไพร์โรลิโดนเท่ากับ 0.35 mM อนุภาคทองคำที่ได้จากการสังเคราะห์จะมีรูปร่างหลากหลายทั้งวงกลม สามเหลี่ยม สามเหลี่ยมกุดตัดทอนและหกเหลี่ยม โดยมีรูปร่างแบบสามเหลี่ยมและสามเหลี่ยมกุดตัดทอนปริมาณมากกว่าวงกลมและหกเหลี่ยม และเหลี่ยมมุมของแผ่นทองคำจะมีลักษณะค่อนข้างโค้งมน แสดงดังรูปที่ 3.8 (ก) และเมื่อความเข้มข้นของพอลิวินิลไพร์โรลิโดน เพิ่มขึ้นเป็น 0.70 mM ดังรูปที่ 3.8 (ข) รูปร่างของแผ่นทองคำที่ได้จากการสังเคราะห์ยังคงมีรูปร่างหลากหลาย แต่พบรูปร่างแบบหกเหลี่ยมมีปริมาณมากขึ้นและมากพอๆ กับรูปร่างแบบสามเหลี่ยมกุดตัดทอน แต่แผ่นทองคำที่มีรูปร่างแบบ

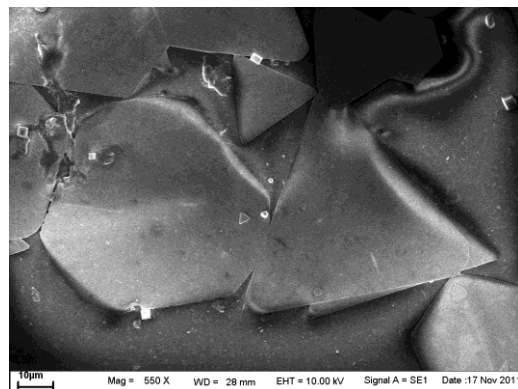
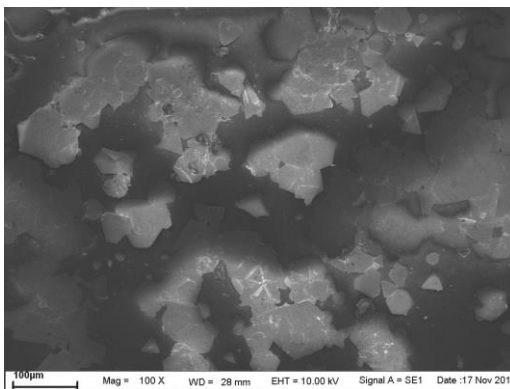
สามเหลี่ยมและวงกลมมีน้อยลง โดยที่รูปร่างของอนุภาคทองคำที่ความเข้มข้นนี้ มีความคมชัดของเหลี่ยมมุมมากกว่าแผ่นทองคำที่สังเคราะห์โดยใช้ความเข้มข้นของพอลิวินิลไพร์โรลิโดนที่ความเข้มข้น 0.35 mM และ 1.40 mM และสำหรับการสังเคราะห์ด้วยความเข้มข้นของพอลิวินิลไพร์โรลิโดน 1.40 mM ดังรูปที่ 3.8 (ค) พบว่ารูปร่างของอนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้ทั้งวงกลม สามเหลี่ยม สามเหลี่ยม ถูกตัดทอนและหกเหลี่ยมมีปริมาณใกล้เคียงกัน แผ่นของทองคำทุกรูปร่างมีความโค้งมนมากที่สุดเมื่อเทียบกับอีก 2 สภาวะก่อนหน้านี้ โดยจะสังเกตได้ว่าทุกๆ ความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปของพอลิวินิลไพร์โรลิโดน ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอนุภาคเท่าใดนัก เนื่องจากอนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้จากทุกสภาวะการทดลองในการทดลองที่ 2 รูปร่างของอนุภาคทองคำมีความหลากหลายทั้งวงกลม สามเหลี่ยม สามเหลี่ยมถูกตัดทอนและหกเหลี่ยม แต่สิ่งที่แตกต่างกันของแต่ละสภาวะการทดลองนั้นคือความคมและความโค้งมนของเหลี่ยมมุมเท่านั้น

การทดลองที่ 2 นี้ กำหนดให้ความเข้มข้นของสารละลายทองคำและเอทิลีนไกลคอลคงที่ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจึงขึ้นอยู่กับอิทธิพลของพอลิวินิลไพร์โรลิโดน ข้อมูลในงานวิจัยที่เคยศึกษามาก่อน พบว่าโดยปกติแล้วพอลิวินิลไพร์โรลิโดนจะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยเสถียรสำหรับการสังเคราะห์อนุภาคโลหะ เนื่องจากตัวมันเองมีคุณสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ที่มีโครงสร้างด้านหนึ่งชอบน้ำ (Hydrophilic) และอีกด้านหนึ่งไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) แต่โครงสร้างของพอลิวินิลไพร์โรลิโดน มีหมู่ Hydroxyl Group (OH) เป็นองค์ประกอบอยู่ที่ปลายด้านหนึ่งของโครงสร้าง จึงทำให้มีคุณสมบัติในการเป็นตัวรีดิวซ์อย่างอ่อนได้ด้วยและจากการศึกษาเรื่องความโค้งมนและความมีเหลี่ยมมุมของอนุภาคโลหะที่สังเคราะห์ได้ด้วยกระบวนการต่างๆ พบว่าตัวช่วยเสถียรที่มีคุณสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น ที่เหมาะสมจะมีการจับตัวกันกลายเป็นโครงสร้างที่เรียกว่าไมเซลล์ (Micelles) ซึ่งสามารถเข้าไปล้อมรอบอนุภาคของโลหะไว้ โดยลักษณะการเข้าล้อมอนุภาคของโลหะนั้น จะส่งผลต่อลักษณะความโค้งมนและความคมของอนุภาคโลหะที่สังเคราะห์ได้แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ (Paschalis Alexandridis, 2011), (S.K. Mehta and Savita Chaudhary, 2010), (S. Mecking, 2004) (Jayashri Sarkar et al., 2008) การทำนายลักษณะโครงสร้างการจัดเรียงตัวของไมเซลล์แสดงดังรูปที่ 3.9 และ 3.10 ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของพอลิวินิลไพร์โรลิโดนที่ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยเสถียร มีปริมาณเพิ่มขึ้น จะไปทำให้ความเป็นเหลี่ยมมุมของผลึก (Crystal Facets) ลดลง จึงทำให้อนุภาคของโลหะที่สังเคราะห์ได้มีความโค้งมน (Marek Grzelczak et al., 2008)

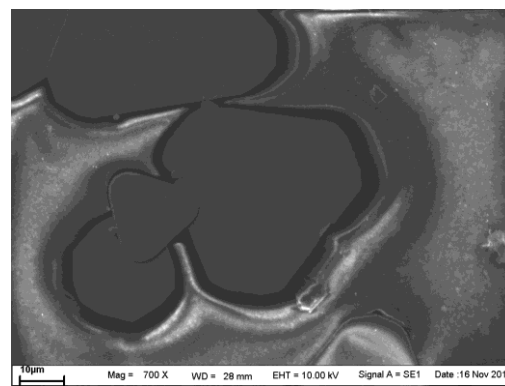
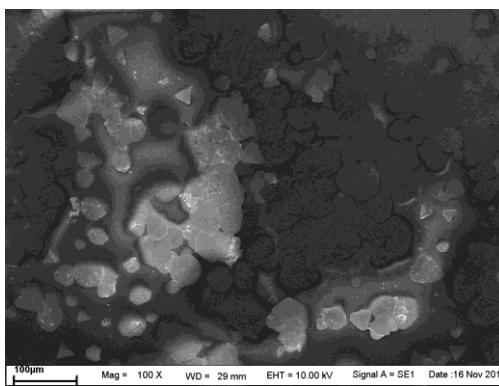
(ก) 0.35 mM



(ข) 0.70 mM

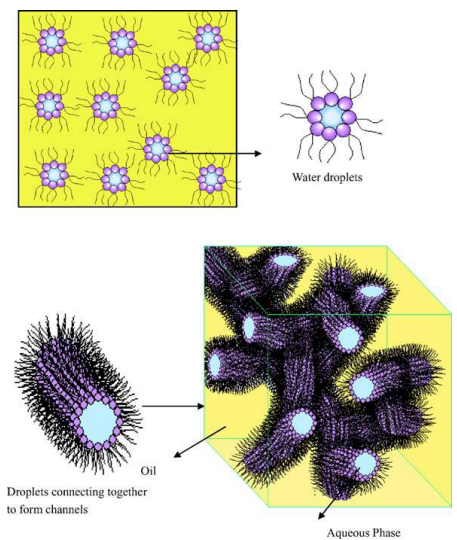


(ค) 1.40 mM

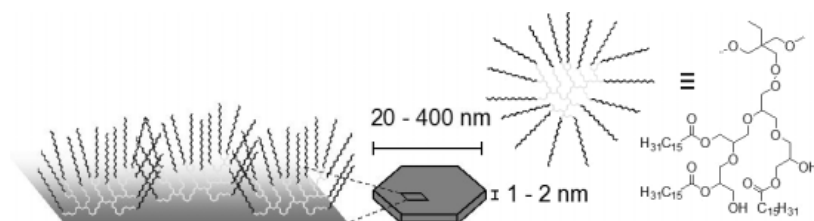


รูปที่ 3.8 ภาพถ่าย SEM ของแผ่นทองคำที่สังเคราะห์โดยใช้ความเข้มข้นของพอลิวินิลไพโรลิโดน ที่แตกต่างกัน

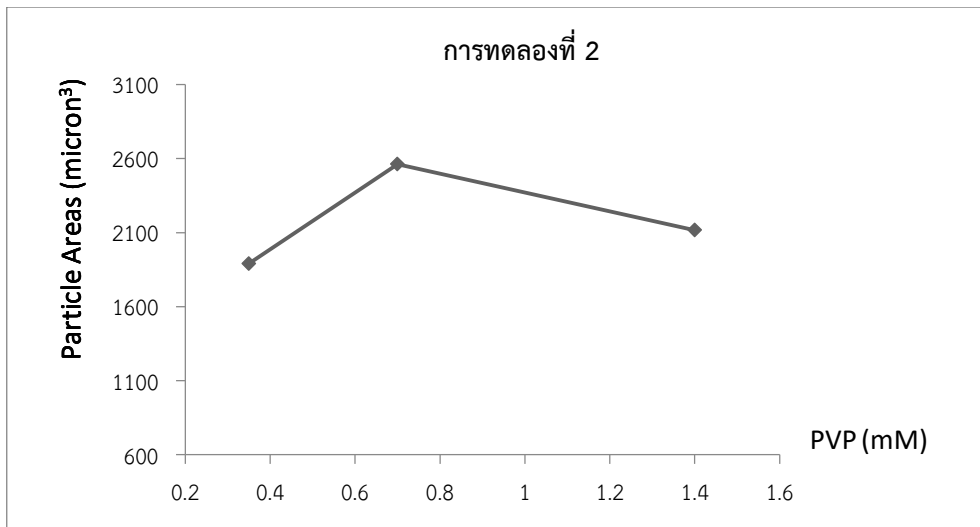
สำหรับผลการทดลองที่ 2 มีสมมติฐานว่าความเข้มข้นของพอลิวินิลไพร์โรลิโดนที่มีความเข้มข้นน้อยที่สุดคือ 0.35 mM พอลิวินิลไพร์โรลิโดนไม่สามารถรวมตัวกลายเป็นไมเซลล์ที่สมบูรณ์ได้ จึงทำให้อันหนึ่งเป็นโครงสร้างแบบไมเซลล์และอีกด้านหนึ่งจะเป็นโครงสร้างแบบสายโซ่ยาว (Chain) โดยที่สายโซ่ยาวนี้จะไปขัดขวางการรวมตัวกันของอนุภาคทองคำ ทำให้อนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้ที่สภาวะการทดลองนี้มีลักษณะโค้งมนและมีขนาดเล็ก แต่เมื่อความเข้มข้นของพอลิวินิลไพร์โรลิโดน 0.7 mM พอลิวินิลไพร์โรลิโดนอาจทำหน้าที่เป็นตัวช่วยเสถียรได้มากขึ้นจึงทำให้สามารถจับตัวกันเป็นโครงสร้างแบบไมเซลล์ที่สมบูรณ์และมีปริมาณของสายโซ่ยาวที่จะไปขัดขวางการรวมตัวกันของอนุภาคทองคำน้อยลง จึงทำให้อนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้จากสภาวะการทดลองนี้มีความคมของเหลี่ยมมุมที่ชัดเจนขึ้นและมีขนาดใหญ่ แต่เมื่อความเข้มข้นของพอลิวินิลไพร์โรลิโดนเป็น 1.40 mM พอลิวินิลไพร์โรลิโดนอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างความเป็นไมเซลล์อีกครั้ง ทำให้ที่สภาวะการทดลองนี้แผ่นทองคำที่สังเคราะห์ได้มีความโค้งมนและมีขนาดเล็ก และเนื่องจากเป็นสภาวะการทดลองที่พอลิวินิลไพร์โรลิโดนมีความเข้มข้นสูงที่สุดคือ 1.4 mM จึงทำให้ได้อนุภาคที่มีความโค้งมนมากที่สุด



รูปที่ 3.9 ลักษณะของสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ที่รวมตัวกลายเป็นไมเซลล์ล้อมรอบอนุภาคของโลหะ (Jayashri Sarkar et al., 2008)



รูปที่ 3.10 ลักษณะโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวที่รวมตัวกลายเป็นไมเซลล์และสายโซ่ยาว โดยจะหันด้านที่เป็นไมเซลล์เข้าล้อมรอบอนุภาคของโลหะไว้ (Marek Grzelczak et al., 2008)



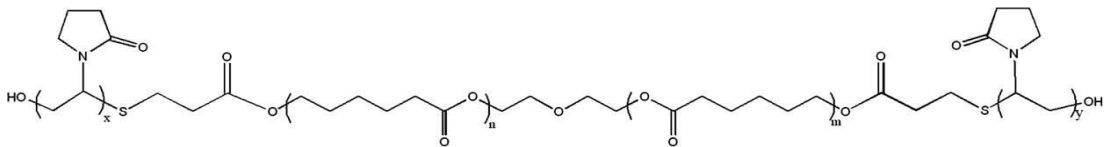
รูปที่ 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของแผ่นทองคำที่ได้จากการสังเคราะห์ที่ได้ในการทดลองที่ 2 เปรียบเทียบกับความเข้มข้นของพอลิวินิลไพร์โรลิโดนที่แตกต่างกัน

สำหรับการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยเทคนิค SEM และหาค่าเฉลี่ยของความกว้างและพื้นที่แผ่นทองคำที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 2 ด้วยโปรแกรม Image J แล้วนำค่าที่ได้มาพลอตกราฟ แสดงดังรูปที่ 3.11 จากกราฟพบว่าที่ความเข้มข้นของพอลิวินิลไพร์โรลิโดนต่ำที่สุด ขนาดของอนุภาคทองคำมีขนาดเล็กที่สุด แต่เมื่อความเข้มข้นของพอลิวินิลไพร์โรลิโดนเพิ่มสูงขึ้นเป็น 0.70 mM ในขณะที่ความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอล คงที่ อนุภาคทองคำมีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นแสดงว่าในขั้นตอนนี้ขนาดของอนุภาคทองคำที่เปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของพอลิวินิลไพร์โรลิโดนเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น

เนื่องด้วยกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคโลหะจะประกอบด้วยขั้นตอนหลักของการเกิดปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน ได้แก่ กระบวนการเกิดนิวเคลียส (Nucleation Process) และกระบวนการรวมตัวกันของนิวเคลียส (Cluster Growth) โดยกระบวนการเกิดนิวเคลียสจะเริ่มจากการที่สารตั้งต้นของการเกิดปฏิกิริยา สำหรับการทดลองนี้คือ HAuCl_4 จะถูกรีดิวซ์จาก Au^{3+} กลายเป็น Au^0 ดังสมการในรูปที่ 3.4 สมการที่ (1) - (6) Au^{3+} จะถูกรีดิวซ์จนกลายเป็น Au^0 ขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate of Reaction) ของนิวเคลียสและจะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายทองคำซึ่งเป็นสารตั้งต้นของการเกิดปฏิกิริยา และความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ที่ใช้ ถ้าความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์มากจะเกิดการแตกตัวเป็นนิวเคลียสได้เร็วกว่าที่ความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ต่ำๆ ซึ่งจะส่งผลต่อปริมาณนิวเคลียสที่เกิดขึ้นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยานั้นคือความเข้มข้นของตัวช่วยเสถียร ถ้าความเข้มข้นของตัวช่วยเสถียรมากจะไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาส่งผลทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ช้า และได้ปริมาณนิวเคลียสของทองคำน้อย

การทดลองที่ 2 กำหนดให้ความเข้มข้นของสารละลายทองคำและความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลนั้นคงที่ ดังนั้นปัจจัยที่จะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของพอลิวินิลไพร์โรลิโดน ที่แตกต่างกัน โดยปกติแล้วพอลิวินิลไพร์โรลิโดนจะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยเสถียร แต่ด้วยความที่มี

โครงสร้างเป็นสายโซ่ยาวและมีหมู่ Hydroxyl Group (OH) เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย แสดงดังรูปที่ 3.12 ตัวย่อจึงทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ได้แต่เป็นตัวรีดิวซ์อย่างอ่อน (Yujie Xiong et al., 2006) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าพอลิวินิลไพร์โรลิโดนมีผลต่อการเกิดนิวเคลียสที่แตกต่างกัน โดยที่ความเข้มข้นพอลิวินิลไพร์โรลิโดน 0.35 mM แผ่นทองคำที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเล็ก เป็นผลมาจากการที่มีปริมาณนิวเคลียสของทองคำเกิดขึ้นได้มาก โดยในสภาวะการทดลองนี้ คาดการณ์ว่าพอลิวินิลไพร์โรลิโดนทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ร่วมกับเอทิลีนไกลอล จึงทำให้ Au^{3+} ถูกรีดิวซ์เป็น Au^0 เกิดขึ้นเร็วและได้ปริมาณนิวเคลียสของทองคำมาก ทำให้ในขั้นตอนการรวมตัวกันของนิวเคลียสเกิดขึ้นได้เร็วตามไปด้วย จึงส่งผลให้ได้อนุภาคทองคำที่มีขนาดเล็ก เมื่อความเข้มข้นของพอลิวินิลไพร์โรลิโดนเป็น 0.70 mM แผ่นทองคำส่วนมากที่สังเคราะห์ได้มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ได้ค่าพื้นที่มากขึ้น คาดว่าที่สภาวะการทดลองนี้พอลิวินิลไพร์โรลิโดน มีอิทธิพลในการเป็นตัวช่วยเสถียรมากกว่าที่จะเป็นตัวรีดิวซ์ (ยืนยันได้ตรงกับการที่ในความเข้มข้นนี้ความเป็นไมเซลล์สมบูรณ์ เพราะว่าเป็นตัวช่วยเสถียรได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้นนี้) เนื่องจากตัวช่วยเสถียรจะไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาในช่วงการเกิดนิวเคลียสทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ยากและได้ปริมาณนิวเคลียสของทองคำน้อยทำให้เมื่อถึงขั้นตอนของการรวมตัวกันของนิวเคลียสจึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ช้าและรวมตัวกันได้เป็นอนุภาคขนาดใหญ่ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของพอลิวินิลไพร์โรลิโดนเป็น 1.40 mM แผ่นทองคำที่สังเคราะห์ได้กลับมีขนาดเล็กลงหรือมีพื้นที่เฉลี่ยที่ได้ลดลง อาจเกิดจากที่สภาวะนี้พอลิวินิลไพร์โรลิโดน ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ร่วมกับเอทิลีนไกลคอล อีกครั้ง ทำให้ Au^{3+} ถูกรีดิวซ์ได้เร็ว ได้ปริมาณนิวเคลียสมาก เมื่อปริมาณนิวเคลียสมากจึงทำให้การรวมตัวเกิดขึ้นได้เร็ว อนุภาคทองคำที่ได้จึงมีขนาดเล็ก



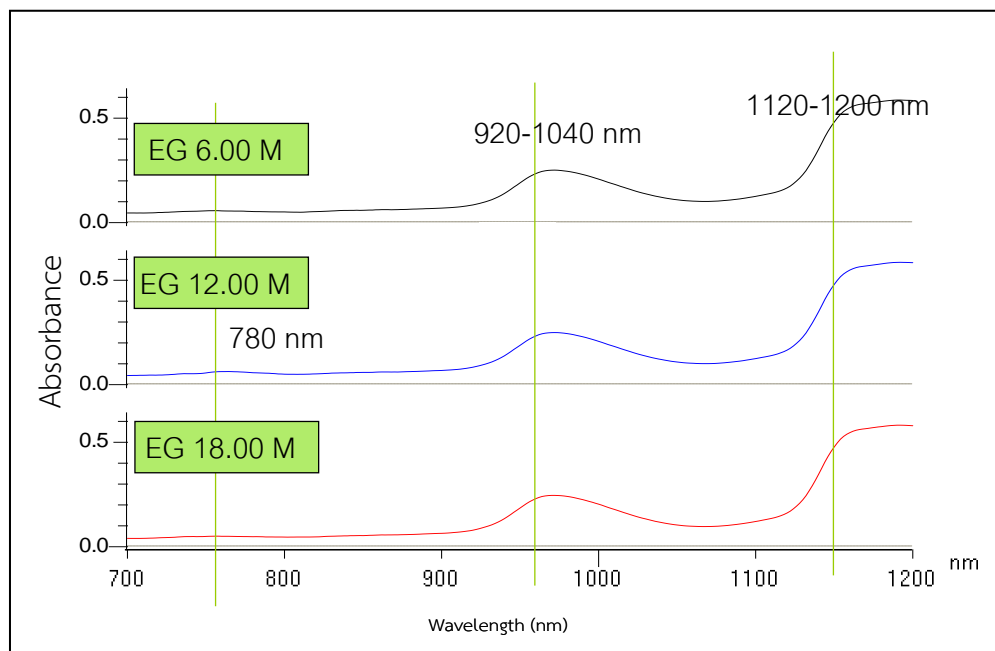
รูปที่ 3.12 โครงสร้างที่เป็นสายโซ่ยาวของพอลิวินิลไพร์โรลิโดนที่มี OH เป็นองค์ประกอบ

(Angel Leiva et al., 2009]

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า พอลิวินิลไพร์โรลิโดนสามารถทำหน้าที่เป็นได้ทั้งตัวรีดิวซ์และตัวช่วยเสถียร การควบคุมขนาดของอนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้จึงขึ้นอยู่กับอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างพอลิวินิลไพร์โรลิโดนและเอทิลีนไกลคอลที่ใช้ในการสังเคราะห์ แต่ยังคงส่งผลให้แผ่นทองคำที่สังเคราะห์ได้ในทดลองที่ 2 นี้ยังคงเป็นแบบ Gold Microplates

การทดลองที่ 3 การศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอล

การทดลองที่ 3 เป็นการสังเคราะห์ทองคำด้วยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอล 3 ความเข้มข้น และใช้ความเข้มข้นของสารละลายทองคำคงที่ ที่ความเข้มข้น 0.2 M และพอลิไวนิลไพร์โรลิโดนคงที่ ที่ความเข้มข้น 1.40 mM ผลการศึกษาขนาดอนุภาคแผ่นทองคำที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 3 ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล เนียร์ไออาร์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.13 สเปกตรัมแสดงการดูดกลืนแสงแบ่งเป็น 3 ช่วง เช่นเดียวกับ 2 การทดลองแรก คือที่ความยาวคลื่นประมาณ 780 นาโนเมตร 920-1040 นาโนเมตร และ 1120-1200 นาโนเมตร โดยทั้ง 3 ช่วงความยาวคลื่นนั้นแสดงให้เห็นว่าอนุภาคทองคำที่สังเคราะห์มีลักษณะเป็นแผ่นบางในระดับนาโนเมตรและมีรูปร่างเป็นแบบสามเหลี่ยม (Hong et al., 2003) (Ying et al., 2005) (Panikkanvalappil et al., 2011)

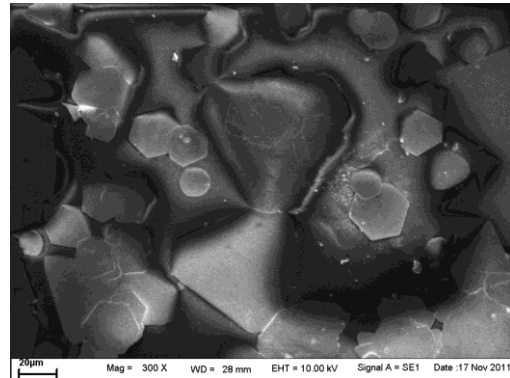
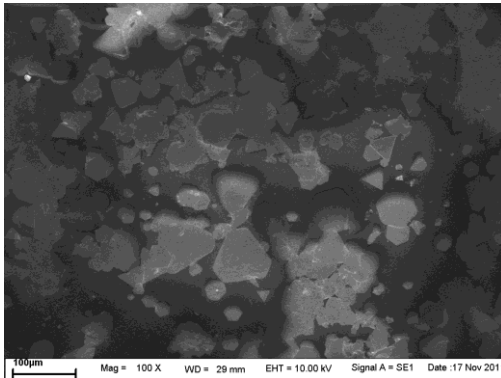


รูปที่ 3.13 วิสิเบิล-เนียร์ไออาร์สเปกตรัมในช่วงการดูดกลืนแสงของทองคำที่สังเคราะห์ด้วยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอล 3 ความเข้มข้น

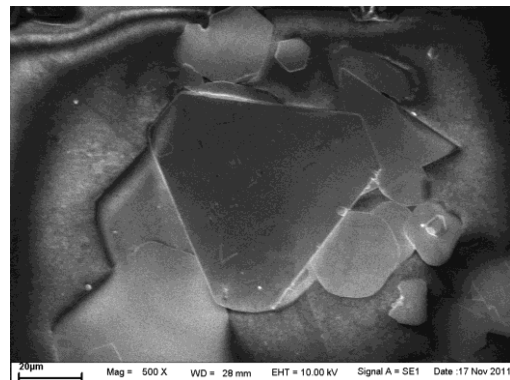
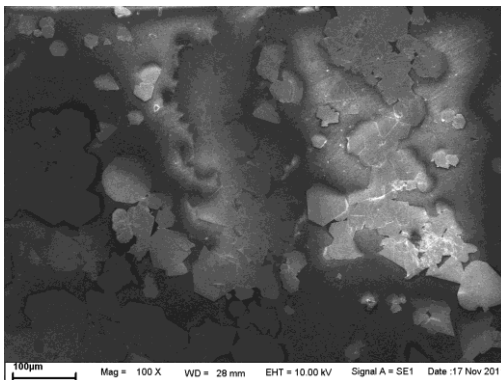
การวิเคราะห์รูปร่างแผ่นทองคำที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด พบว่าที่ความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอล เท่ากับ 6.00 M รูปร่างของอนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้มีรูปร่างที่หลากหลายทั้งวงกลม สามเหลี่ยม สามเหลี่ยมถูกตัดทอนและหกเหลี่ยม และมีจำนวนรูปร่างต่างๆ เหล่านี้มีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน โดยรูปร่างเหล่านี้จะแสดงลักษณะโค้งมนที่มุม ดังรูปที่ 3.14 (ก) และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลในการสังเคราะห์เป็น 12.00 M จะได้รูปร่างของแผ่นทองคำที่หลากหลายทั้งวงกลม สามเหลี่ยม สามเหลี่ยมถูกตัดทอนและหกเหลี่ยมเช่นกัน โดยมีปริมาณแต่ละรูปร่างที่ใกล้เคียงกัน แต่แผ่นไมโครเพลทของทองคำที่สภาวะการทดลองนี้มีความคม

ของเหลี่ยมมุมมากที่สุด ดังรูปที่ 3.14 (ข) และเมื่อความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลเพิ่มขึ้นเป็น 18.00 M รูปร่างของอนุภาคทองคำยังคงมีความหลากหลายเช่นเดิม แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือ อนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้จากสภาวะการทดลองนี้เหลี่ยมมุมของอนุภาคมีความโค้งมนมากจนเกือบกลายเป็นวงกลม แสดงดังรูปที่ 3.14 (ค)

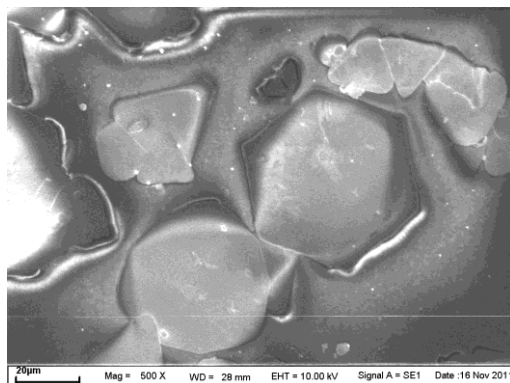
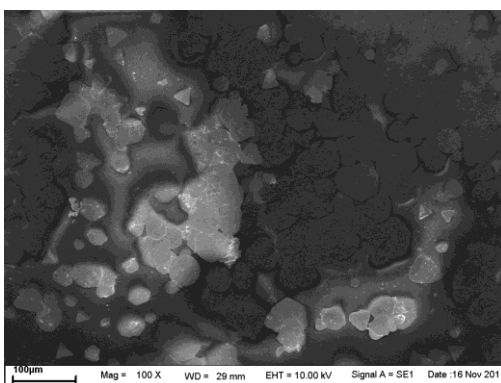
(ก) 6.00 M



(ข) 12.00 M

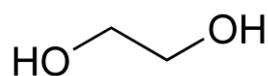


(ค) 18.00 M



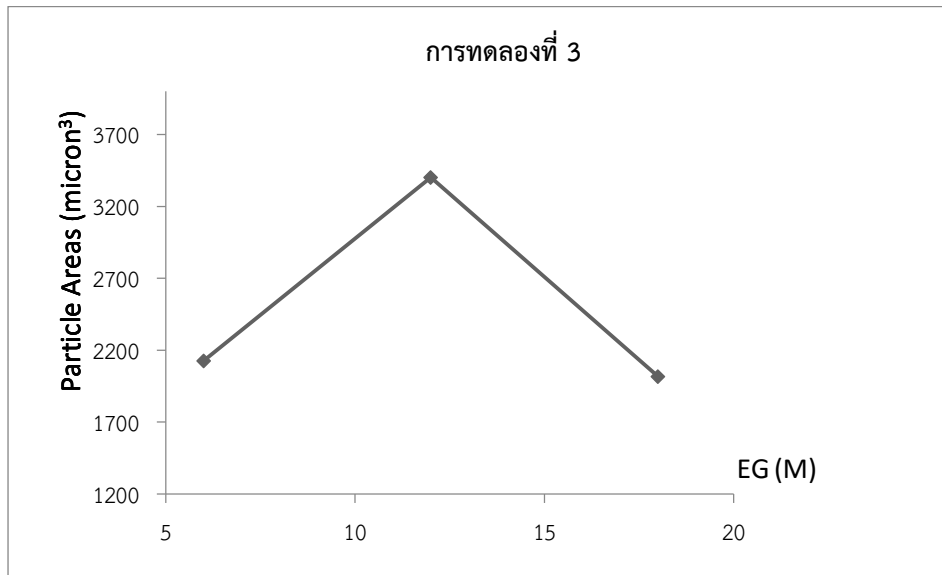
รูปที่ 3.14 ภาพถ่าย SEM ของแผ่นทองคำที่สังเคราะห์ในการทดลองที่ 3 โดยใช้ความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลต่างกัน (ก) 6.00 M (ข) 12.00 M และ (ค) 18.00 M

การสังเคราะห์อนุภาคโลหะโดยทั่วไปจะใช้เอทิลีนไกลคอลในการเป็นตัวรีดิวซ์ เนื่องด้วยโครงสร้างของมันเองที่มีหมู่ Hydroxyl Group (OH) เป็นองค์ประกอบ จึงทำให้มีคุณสมบัติในการเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดี แสดงดังรูปที่ 3.15 คุณสมบัติของเอทิลีน ไกลคอล เป็นสารละลายที่มีความหนืดสูงจึงทำให้สามารถทำหน้าที่ขัดขวางการรวมตัวกันของอนุภาคคล้ายการเป็นตัวช่วยเสถียรด้วยเช่นกัน สามารถเข้าไปขัดขวางการรวมตัวของไมเซลล์ ทำให้การเกิดไมเซลล์ไม่สมบูรณ์ อาจส่งผลให้อนุภาคโลหะหรือแผ่นทองที่สังเคราะห์ได้มีความโค้งมน ในทางตรงกันข้าม ถ้าเอทิลีนไกลคอลที่ใส่ในการสังเคราะห์มีปริมาณน้อยจะไม่มีผลต่อการเกิดไมเซลล์ จะทำให้แผ่นทองที่สังเคราะห์ได้มีรูปร่างชัดเจน



รูปที่ 3.15 โครงสร้างของเอทิลีนไกลคอลที่มี Hydroxyl Group (OH) เป็นองค์ประกอบที่ปลายทั้งสองด้าน ([Ethylene glycol](#), 2012: online)

การทดลองที่ 3 แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอล มีผลต่อรูปร่างของอนุภาคที่ได้แตกต่างกันดังนี้ ที่ความเข้มข้นเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 6.00 M อนุภาคทองคำมีความโค้งมน จึงคาดการณ์ว่าที่สภาวะการทดลองนี้พอลิวิลไนไฟโรโรลิโดนทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ร่วมกับเอทิลีนไกลคอล ทำให้มีความเป็นตัวช่วยเสถียรลดลง การรวมตัวเป็นไมเซลล์ทำได้ไม่สมบูรณ์และมีสายโซ่ยาวที่จะไปขัดขวางการรวมตัวของอนุภาคทั้งจากพอลิวิลไนไฟโรโรลิโดนร่วมกับความหนืด ของเอทิลีนไกลคอล ด้วยปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ทำให้อนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้มีความโค้งมนและมีขนาดเล็ก แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลไปเป็นที่ความเข้มข้น 12.00 M พอลิวิลไนไฟโรโรลิโดนกลับไปทำหน้าที่เป็นตัวช่วยเสถียรอีกครั้ง เมื่อความเข้มข้นตัวช่วยเสถียรเพิ่มขึ้น ความสามารถในการรวมตัวกันของไมเซลล์ทำได้สมบูรณ์ จึงทำให้แผ่นทองคำที่สังเคราะห์ได้ที่สภาวะการทดลองนี้ มีความเป็นเหลี่ยมมุมชัดเจนและมีขนาดใหญ่ เนื่องจากสายโซ่ยาวที่จะไปขัดขวางการรวมตัวของอนุภาคมีน้อย เพราะสามารถรวมตัวกันกลายเป็นไมเซลล์ที่สมบูรณ์ได้ และเมื่อพิจารณาความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอล 18.00 M แผ่นทองคำที่สังเคราะห์ได้กลับมีความโค้งมนและมีขนาดเล็กที่สุด อาจเนื่องจากสภาวะการทดลองนี้พอลิวิลไนไฟโรโรลิโดน ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ร่วมกับเอทิลีนไกลคอลจึงทำให้ความเป็นตัวช่วยเสถียรลดลง เมื่อความเป็นตัวช่วยเสถียรลดลงการรวมตัวกันของไมเซลล์จึงทำได้ไม่สมบูรณ์มากนัก ร่วมกับที่สภาวะการทดลองนี้เอทิลีนไกลคอลมีความเข้มข้นและมีความหนืดสูง จึงส่งผลให้ไปขัดขวางการรวมตัวของอนุภาคทองคำ ทำให้ลักษณะแผ่นทองที่สังเคราะห์ได้ที่สภาวะการทดลองนี้มีขนาดเล็กที่สุดและรูปร่างเหลี่ยมไม่ชัดเจนหรือมีลักษณะมน ผลการวัดขนาดและพื้นที่ของแผ่นทองคำจากการนำภาพถ่าย SEM ไปหาขนาดอนุภาคด้วยโปรแกรม Image J แล้วนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟ แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของแผ่นทองคำที่ได้จากการสังเคราะห์ที่ 3 กับความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลที่แตกต่างกัน (ความเข้มข้นของสารละลายทองคำและพอลิวินิลไพร์โรลิโดนคงที่)

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.16 จะเห็นได้ชัดเจนว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอล มีผลต่อขนาดของอนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้ จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นว่า ขนาดของอนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้นั้นเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาหลัก 2 ขั้นตอน ได้แก่ กระบวนการเกิดนิวเคลียสและการรวมตัวกันของนิวเคลียส โดยกระบวนการเกิดนิวเคลียสจะขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นนั้น สำหรับการทดลองที่ 3 นี้ เอทิลีนไกลคอลทำหน้าที่เป็นทั้งตัวรีดิวซ์และตัวช่วยเสถียรเช่นเดียวกับพอลิวินิลไพร์โรลิโดน จึงส่งผลให้ในแต่ละสภาวะการทดลองเอทิลีนไกลคอล สามารถแสดงบทบาทแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเข้มข้น เมื่อใช้ เอทิลีนไกลคอล 6.00 M ร่วมกับพอลิวินิลไพร์โรลิโดน ปฏิกิริยาการเกิดนิวเคลียสจะเกิดขึ้นได้เร็วและได้ปริมาณนิวเคลียสของ Au^0 มาก เพราะเอทิลีนไกลคอลทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์สมบูรณ์ เมื่อถึงขั้นตอนของการรวมตัวกันของนิวเคลียสปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เร็วจึงทำให้สามารถรวมตัวกันได้เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลเป็น 12.00 M ขนาดและพื้นที่ของแผ่นทองคำโดยเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นโดยอาจเกิดจากในขั้นตอนนี้เอทิลีนไกลคอล ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์และพอลิวินิลไพร์โรลิโดนทำหน้าที่เป็นตัวช่วยเสถียร เนื่องจากทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์เพียงตัวเดียวทำให้ความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ต่ำจึงทำให้ในขั้นตอนของการเกิดนิวเคลียสได้นิวเคลียสของทองคำน้อยส่งผลต่อเนื่องไปยังขั้นตอนของการรวมตัวกันของนิวเคลียส เมื่อปริมาณนิวเคลียสของทองคำน้อยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ช้า ผลการรวมตัวกันจะได้แผ่นทองคำที่มีขนาดใหญ่ แต่เมื่อความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลสูงมากเป็น 18.00 M ขนาดหรือพื้นที่ของแผ่นทองคำโดยเฉลี่ยกลับมีค่าลดลงแสดงว่าที่สภาวะการทดลองนี้ทั้งเอทิลีนไกลคอลและ

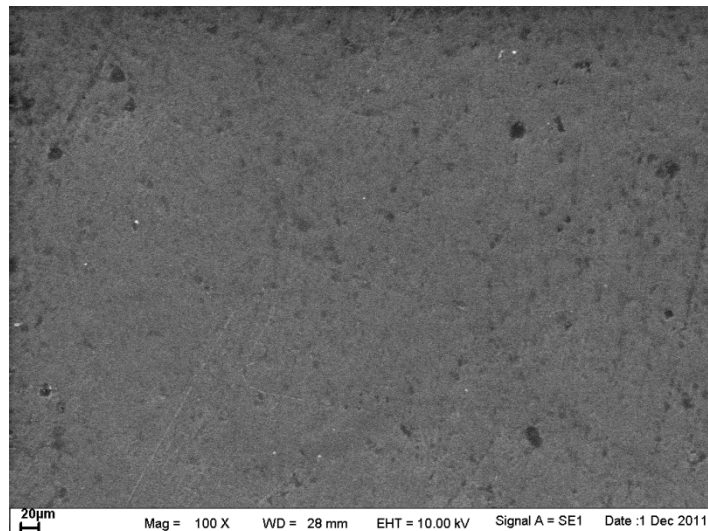
พอลิวิลินไพโรไลโดนทำหน้าที่ตัวรีดิวซ์ร่วมกัน เมื่อมีความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์สูง จะได้นิวเคลียสของทองคำปริมาณมาก เมื่อถึงขั้นตอนของการรวมตัวกันของนิวเคลียสปริมาณมากจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น จึงทำให้ได้แผ่นทองคำที่มีขนาดเล็ก

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเอทิลีนไกลคอลสามารถทำหน้าที่เป็นได้ทั้งตัวรีดิวซ์และตัวช่วยเสถียร การควบคุมขนาดของอนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้จึงขึ้นอยู่กับอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเอทิลีนไกลคอล และพอลิวิลินไพโรไลโดนที่ใช้ในการสังเคราะห์

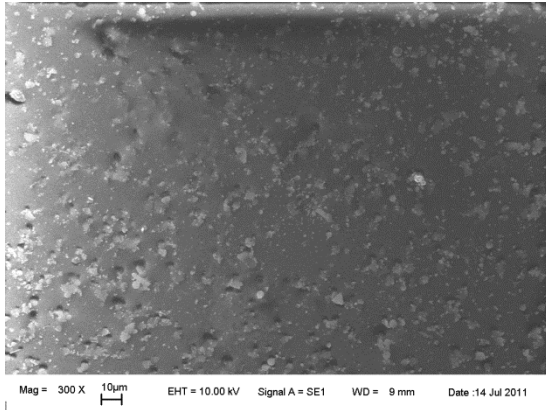
การทดลองทั้ง 3 สภาวะนี้สรุปได้ว่าสามารถสังเคราะห์แผ่นทองคำขนาดไมครอน (Gold microplate) ได้ทุกสภาวะ โดยขนาดและรูปร่างของแผ่นทองคำที่ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นทั้ง 3 ชนิดได้แก่ สารละลายทอง เอทิลีนไกลคอล และพอลิวิลินไพโรไลโดน ซึ่งในการทดลองที่จะนำแผ่นทองคำระดับไมครอนนี้ไปเคลือบเพื่อกันหมองขึ้นงานเงิน จะเลือกใช้ความเข้มข้นในสภาวะของการทดลองที่ 1 เนื่องจากได้แผ่นทองคำที่มีขนาดเล็กที่สุด และมีลักษณะการกระจายตัวของแผ่นทองคำมากที่สุด

3.2 การวิเคราะห์การอนุภาคทองคำหลังการเคลือบด้วยเทคนิค SEM

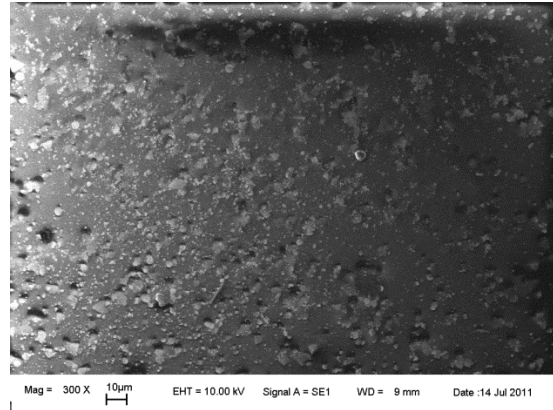
ภายหลังการเคลือบอนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้ลงบนแผ่นเงิน แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 200-400 องศาเซลเซียส จะช่วยให้การเกาะติดของทองบนชิ้นงานเงินดีขึ้น ไม่หลุดลอกภายหลังการทดสอบโดยการชุบและการลอก หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ผลการทดลองเปรียบเทียบกับก่อนและหลังการเคลือบแสดงดังรูปที่ 3.17 และ 3.18



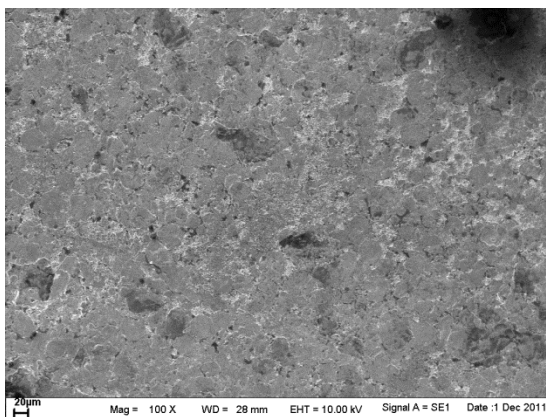
รูปที่ 3.17 ภาพถ่าย SEM ของแผ่นโลหะเงินที่ไม่ผ่านการเคลือบด้วยอนุภาคทองคำ



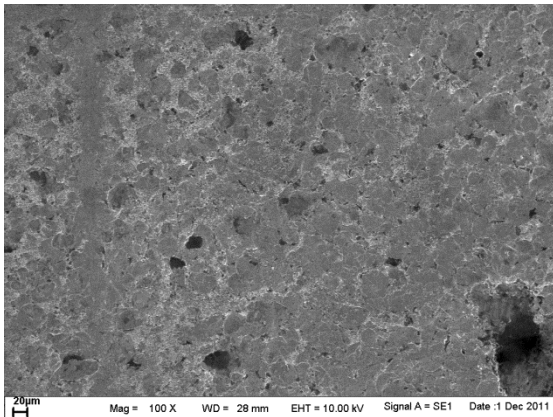
ก. SN2-H



ข. SN5-H



ค. SM2-H



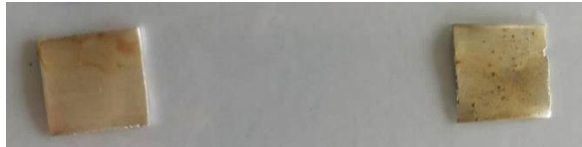
ง. SM5-H

รูปที่ 3.18 ภาพถ่าย SEM ของการเคลือบด้วยทองคำระดับนาโนเมตรแบบ 2 และ 5 ชั้น (SN2-H และ SN5-H) และการเคลือบด้วยทองคำแบบแผ่นขนาดไมโครเมตรแบบ 2 ชั้น และ 5 ชั้น (SM2-H และ SM5-H) ตามลำดับ

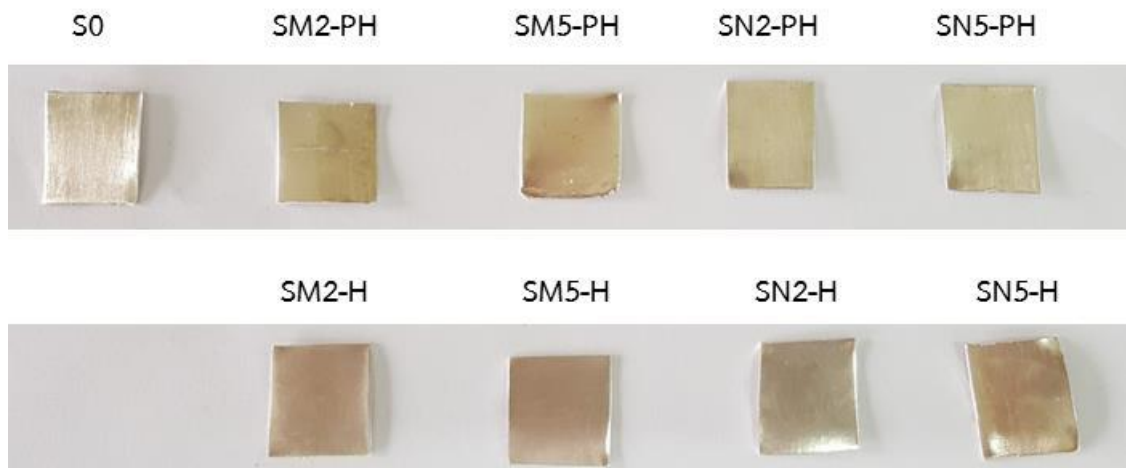
ผลการทดลองวิเคราะห์แผ่นเงินด้วยเทคนิค SEM แผ่นเงินที่ยังไม่ผ่านการเคลือบดังรูป 3.17 ไม่มีอนุภาคใดๆ อยู่ที่ผิว เมื่อนำแผ่นงานเงินไปทำการเคลือบด้วยอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตรและไมโครเมตรจะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 3.18 จากรูปสังเกตได้ว่าเมื่อมีการเคลือบอนุภาคทองคำขนาดนาโนเมตรและให้ความร้อนที่ผิว ลักษณะชิ้นงานเงินจะมีเหมือนเกร็ดทองคำอยู่บนผิวหน้า โดยการเคลือบอนุภาคทองคำขนาดนาโนเมตร แค่ 2 ชั้น ทองคำจะยังไม่เต็มพื้นผิวของเงิน แต่การเคลือบอนุภาคทองคำขนาดนาโนเมตร 5 ชั้น จะมีลักษณะปิดผิวชิ้นงานเงินได้มากกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเคลือบแผ่นเงินด้วยทองคำแผ่นขนาดระดับไมโครเมตรหรือ gold microplates ผลการทดลองแสดงดังรูป 3.18(ค) และ 3.18 (ง) นั้น มีอนุภาคทองคำแบบแผ่นปิดผิวชิ้นงานแผ่นเงินได้มากกว่า แม้จะทำการเผาชิ้นงานแล้วยังแสดงลักษณะแผ่นแบบกลมและหกเหลี่ยมอยู่บ้างบนผิวชิ้นงาน และการเคลือบแบบ 2 ชั้นและ 5 ชั้น มีการปกปิดผิวชิ้นงานดีเช่นกัน

3.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีภายหลังการเคลือบด้วยอนุภาคทอง

เมื่อนำชิ้นงานแผ่นเงินไปทำการเคลือบด้วยอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตร (gold nanoparticles) และการเคลือบด้วยทองคำลักษณะแผ่นขนาดไมโครเมตร (gold microplates) แล้วรอให้แห้งจะได้ชิ้นงานตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.19 ซึ่งจะมองเห็นเป็นเกร็ดสีทองหรือสีแดงปริมาณเล็กน้อยที่ผิวหน้าชิ้นงาน หลังจากนั้นเมื่อนำชิ้นงานไปให้ความร้อนเพื่อให้อนุภาคทองคำพ่นติดกับแผ่นเงินจะทำให้สีทองของ gold microplate และสีแดงของ gold nanoparticles หายไป ลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบแล้วให้ความร้อนแล้วนั้น แสดงดังรูปที่ 3.20 ซึ่งชิ้นงานจะมีลักษณะสีคล้ายกับแผ่นเงินที่ไม่ผ่านการเคลือบ หลังจากชิ้นงานผ่านการให้ความร้อน ผิวชิ้นงานจะขาวขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากแผ่นเงินเกิดออกไซด์ ดังนั้นจึงนำแผ่นเงินที่ผ่านการเคลือบด้วยทอง และให้ความร้อนแล้วไปทำการขัดด้วยเครื่องขัดเพิ่ม เพื่อขัดออกไซด์ออกจากผิวหน้าชิ้นงานก่อนนำชิ้นงานไปทำการวัดการเปลี่ยนแปลงสีและทดสอบกันหมองต่อไป



รูปที่ 3.19 ตัวอย่างชิ้นงานเงินที่ผ่านการเคลือบด้วยอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตร (gold nanoparticles) (ซ้าย) และแผ่นทองคำระดับนาโนเมตร (gold microplate) (ขวา)



รูปที่ 3.20 ชิ้นงานเงินที่ไม่ผ่านการเคลือบ (S0) และที่ผ่านการเคลือบด้วยทองคำระดับนาโนเมตรและไมโครเมตร ชนิดมีการทำ Pretreatment และ ไม่ผ่านการทำ Pretreatment

เนื่องจากสีภายหลังการเคลือบไม่สามารถแยกความแตกต่างได้ชัดเจนด้วยตา ดังนั้น จึงนำชิ้นงานก่อนการเคลือบและที่ผ่านการเคลือบในสภาวะต่างๆไปทำการวัดสีและการเปลี่ยนแปลงสีด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลแบบพกพา หลังจากนั้นได้นำค่าเฉลี่ยจากการวัดมาวิเคราะห์ผล ผลการทดลองได้ผลดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการวัดสีก่อนและหลังการเคลือบด้วยอนุภาคทองคำ

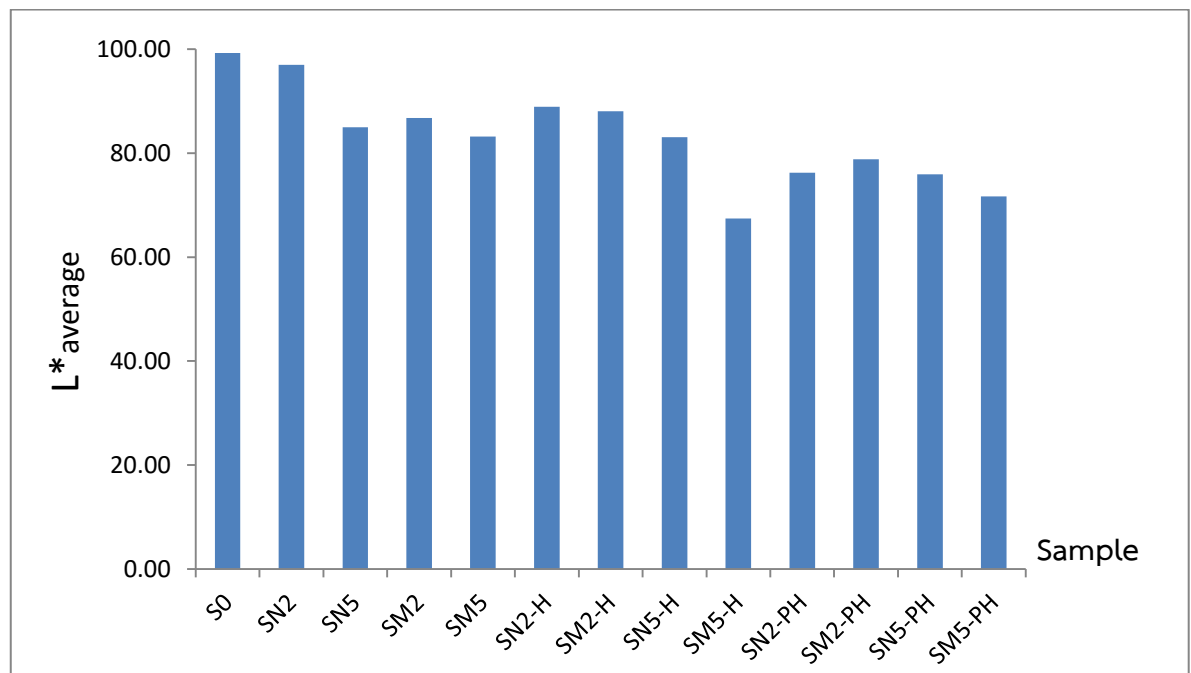
รหัสตัวอย่าง	L*					a*					b*				
	L*1	L*2	L*3	L*เฉลี่ย	SD	a*1	a*2	a*3	a*เฉลี่ย	SD	b*1	b*2	b*3	b*เฉลี่ย	SD
S0	100.80	98.20	99.30	99.43	1.31	6.10	6.30	7.00	6.47	0.47	1.40	1.60	2.00	1.67	0.31
SN2	99.80	90.10	97.00	95.63	4.99	15.70	21.10	19.00	18.60	2.72	9.70	4.50	6.40	6.87	2.63
SN5	88.90	93.00	85.00	88.97	4.00	14.40	13.70	15.10	14.40	0.70	6.70	7.80	8.80	7.77	1.05
SM2	83.00	85.30	86.80	85.03	1.91	18.00	10.50	13.10	13.87	3.81	2.30	2.70	1.90	2.30	0.40
SM5	82.00	80.60	83.20	81.93	1.30	13.40	12.00	12.40	12.60	0.72	6.90	7.20	7.80	7.30	0.46
SN2-H	95.70	80.30	90.80	88.93	7.87	14.00	15.20	14.20	14.47	0.64	10.90	7.00	9.80	9.23	2.01
SM2-H	85.10	91.10	88.00	88.07	3.00	17.40	10.60	12.90	13.63	3.46	10.00	11.00	13.70	11.57	1.91
SN5-H	87.90	73.90	87.40	83.07	7.94	15.20	10.20	12.10	12.50	2.52	11.90	10.20	13.60	11.90	1.70
SM5-H	67.20	63.50	71.60	67.43	4.06	14.50	14.20	15.80	14.83	0.85	13.40	14.20	12.50	13.37	0.85
SN2-PH	77.90	68.70	82.10	76.23	6.85	9.50	9.60	10.20	9.77	0.38	8.80	5.90	7.70	7.47	1.46
SM2-PH	81.20	71.50	83.80	78.83	6.48	8.50	12.70	11.40	10.87	2.15	13.00	17.00	16.00	15.33	2.08
SN5-PH	77.90	89.00	61.00	75.97	14.10	10.30	13.20	15.20	12.90	2.46	29.00	23.40	23.50	25.30	3.20
SM5-PH	80.80	68.10	66.20	71.70	7.94	13.70	12.60	13.30	13.20	0.56	34.20	34.20	32.30	33.57	1.10

การพิจารณาผลการทดลองในตารางที่ 3.1 พบว่า S0 คือแผ่นเงินที่ยังไม่ผ่านการเคลือบของนำมาทำการวัดสีและความสว่าง พบว่าได้ค่า L* เฉลี่ย 99.43 และ a* และ b* เฉลี่ย 6.47 และ 1.62 ตามลำดับ แสดงว่าชิ้นงานมีการสะท้อนแสงดีมาก และติดสีออกแดงเหลืองเล็กน้อย (a* และ b* เป็นบวก) เมื่อพิจารณาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) การวัดสีในแต่ละตำแหน่งของผิวหน้าแผ่นเงินมีค่าสีแตกต่างกันไม่มาก เมื่อนำตัวอย่างไปทำการเคลือบด้วยทองคำระดับนาโนเมตรแบบการเคลือบ 2 ชั้น (SN2) และ 5 ชั้น (SN5) สีของแผ่นเงินเปลี่ยนไปเล็กน้อย ค่าความสว่างลดลงและค่า a* และ b* สูงขึ้น และการวัดแต่ละตำแหน่งมีค่าสีแต่ละตำแหน่งต่างกันค่อนข้างมาก (สังเกตจากค่า SD) เมื่อเทียบแล้วแผ่นเงินที่เคลือบด้วยทองคำระดับนาโนเมตรแบบการเคลือบ 2 ชั้น (SN2) มีค่า SD สูงกว่า SN5 อาจเกิดจากการเคลือบ 2 ชั้น ไม่สม่ำเสมอ ทำให้ได้ค่าความแตกต่างของสีแต่ละจุดที่วัดมีค่ามาก

เมื่อพิจารณาการเคลือบทองชนิด microplate พบว่าได้ความสว่างลดลงกว่าแบบการเคลือบชนิดอนุภาคนาโนเมตร (nanoparticles) แต่ผลความต่างสีในแต่ละบริเวณ (SD) น้อยกว่า แสดงว่ามาเคลือบทองแบบแผ่น microplate นี้ได้ผิวหน้าที่สม่ำเสมอกว่าและอาจปกปิดผิวชิ้นงานเงินได้ดีกว่า โดยการเคลือบชนิด 5 ชั้น (SM5) จะมีค่าความสว่างน้อยกว่าแบบ 2 ชั้น (SM2) แต่การเคลือบแบบ 5 ชั้น

จะส่งผลให้ชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงไปทางสีเหลืองเพิ่มมากขึ้น สังเกตได้จากค่า b^* ที่แสดงถึงสีเหลืองมีสูงขึ้น เพื่อให้พิจารณาความแตกต่างได้เข้าใจง่ายขึ้น การเปลี่ยนแปลงสีของแผ่นเงินที่ผ่านการเคลือบแต่ละสถานะ มีค่า L^* a^* และ b^* ที่ต่างกัน ดังรูปที่ 3.21, 3.22 และ 3.23 ตามลำดับ

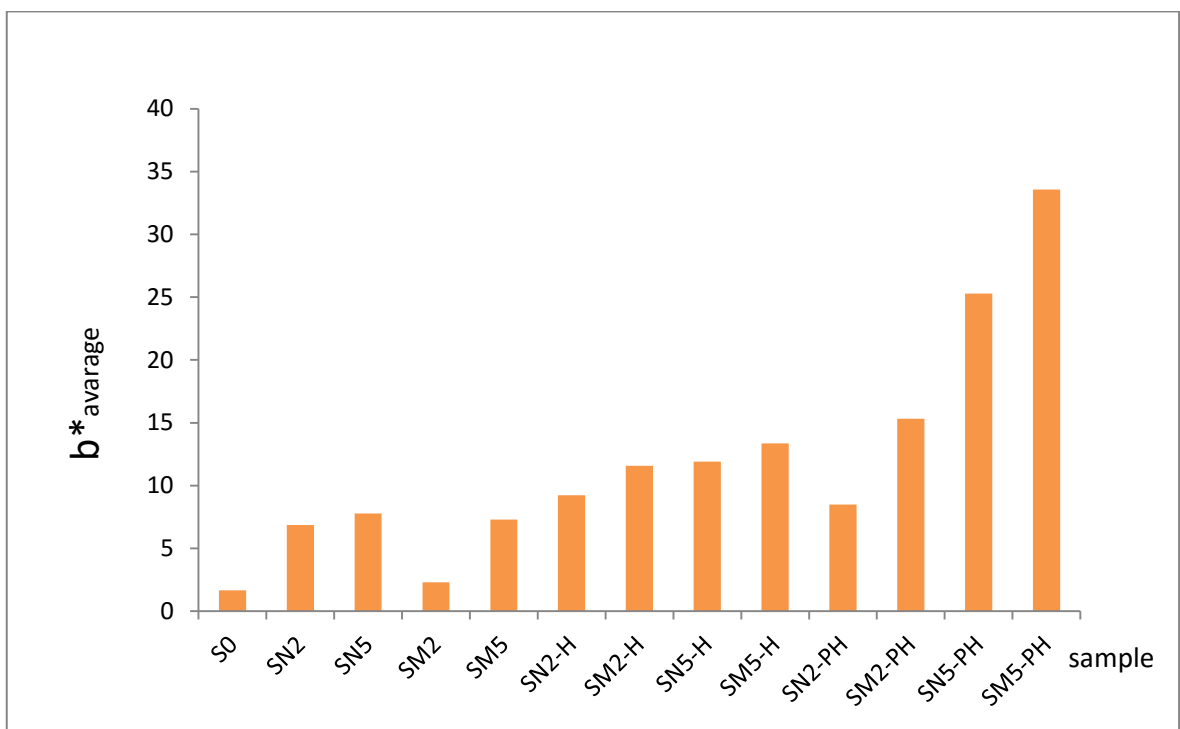
เมื่อทำการเคลือบทองเสร็จแล้วได้นำมาเผาให้ความร้อน เพื่อให้ทองที่เคลือบ ติดผิวชิ้นงานเงินและคงทนถาวรขึ้น หลังจากทำการให้ความร้อนแล้วได้นำมาวัดการเปลี่ยนแปลงสีอีกครั้ง ผลในตารางที่ 3.2 พบว่า ทั้งชิ้นงานที่เคลือบด้วยอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตรแบบ 2 ชั้น (SN2-H) และ 5 ชั้น (SN5-H) รวมถึงชิ้นงานที่เคลือบด้วยทองคำแบบ microplates แบบ 2 ชั้น (SM2-H) และ 5 ชั้น (SM5-H) นั้น ทุกชิ้นงานมีความสว่างลดลงเล็กน้อยและมีสีเหลืองสูงขึ้น เนื่องจากอนุภาคทองได้ผนึกกันเป็นทองคำติดผิวชิ้นงาน เพื่อให้มีการเกาะติดของอนุภาคทองดีขึ้น ได้ทำการทดลองปรับผิวหน้าชิ้นงานโดยการทำ Pretreatment ด้วยการแช่ในไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ก่อนนำไปทำการเคลือบผิว หลังจากนั้นจึงนำไปวัดสี พบว่าทั้งการทำ Pretreatment ก่อนการเคลือบด้วยอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตร (nanoparticles) แบบ 2 ชั้น (SN2-PH) และ 5 ชั้น (SN5-PH) รวมถึงชิ้นงานที่เคลือบด้วยทองคำแบบ microplates แบบ 2 ชั้น (SM2-PH) และ 5 ชั้น (SM5-PH) นั้น ให้ผลเช่นเดียวกัน โดยการเคลือบด้วยทองคำ microplates ให้สีเหลืองมากกว่าการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนเมตร การวิเคราะห์เทียบค่าการเปลี่ยนแปลงสีก่อนและหลังการเคลือบด้วยอนุภาคทองคำ แสดงดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสว่าง (L^*) ของตัวอย่างแผ่นเงินก่อนและหลังการเคลือบด้วยสถานะต่างกัน



รูปที่ 3.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า a^* ของตัวอย่างแผ่นเงินก่อนและหลังการเคลือบด้วยสภาวะต่างกัน



รูปที่ 3.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า b^* ของตัวอย่างแผ่นเงินก่อนและหลังการเคลือบด้วยสภาวะต่างกัน

เมื่อพิจารณาค่า a^* และ b^* ที่มีค่าเป็นบวกมากขึ้นเมื่อทำการเคลือบชิ้นงาน แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงมีค่าไปทางสีแดงและเหลืองตามลำดับ แสดงว่าภายหลังการเคลือบด้วยทองคำชิ้นงานจะมีค่าไปทางสีทองจากแผ่นทองคำบนผิวหน้าที่เคลือบอยู่แม้จะไม่สามารถสังเกตได้ชัดเจนด้วยตาเปล่าดังรูป 3.20 ก็ตาม โดยการเคลือบด้วยทองขนาดนาโนเมตรจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีแดงมาก และการเคลือบด้วยทองแบบแผ่นขนาดไมโครเมตรจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปทางสีเหลืองมาก ซึ่งอาจเกิดจากลักษณะของอนุภาคทองคำเอง และแสดงให้เห็นว่าการเคลือบด้วยทองค่าแบบแผ่นระดับไมโครเมตรเมื่อมีการเคลือบจำนวนชิ้นมากขึ้นและเกิดการทำให้ Pretreatment ยิ่งจะทำให้การเกาะติดของทองบนชิ้นงานเกิดได้มาก ส่งผลให้สีของชิ้นงานหลังเคลือบทองที่ผ่านการเคลือบและทำ Pretreatment ยิ่งให้สีเหลืองทองมาก เพื่อให้ทำความเข้าใจการเปลี่ยนแปลงได้ง่ายขึ้น ได้สรุปการเปลี่ยนแปลงค่าสีแต่ละสภาวะได้ดังตารางที่ 3.2

การเปรียบเทียบความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงสีใน 2 สภาวะ จะศึกษาได้จากค่า ΔE ตารางที่ 3.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าสีของ 2 สภาวะ โดยคำนวณจากตารางที่ 3.1 เพื่อให้วิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงสีแต่ละสภาวะได้ชัดเจนขึ้น ผลการเปรียบเทียบสีที่ต่างกันระหว่างผิวชิ้นงานเงินกับผิวเงินที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยทองคำ พบว่า ทุกสภาวะมีความสว่างลดลง (ΔL^* เป็นลบ) และชิ้นงานส่วนใหญ่มีค่าความต่างของสีแดง (Δa^*) และสีเหลือง สูงขึ้น (Δb^*) เนื่องจากส่วนใหญ่มีค่าเป็นบวก (Δa^* และ Δb^* เป็นบวก)

ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าสีจากการเคลือบแผ่นเงินด้วยอนุภาคทองคำ













































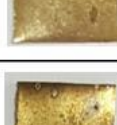









การเปรียบเทียบที่	ความแตกต่างของสี 2 สภาวะ	ข้อมูลจากตัวอย่าง	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE
A	สีของแผ่นเงินที่เคลือบทอง nanoparticles 2 ชั้นเทียบกับแผ่นเงิน	SN2-S0	-3.80	12.13	5.20	13.74
B	สีของแผ่นเงินที่เคลือบทอง nanoparticles 5 ชั้นเทียบกับแผ่นเงิน	SN5-S0	-10.47	7.93	6.10	14.48
C	ความแตกต่างของสี ทอง nanoparticles ที่เคลือบ 5 ชั้นและ 2 ชั้น	SN5-SN2	-6.67	-4.20	0.90	7.93
D	สีของแผ่นเงินที่เคลือบทอง gold microplates 2 ชั้นเทียบกับแผ่นเงิน	SM2-S0	-14.40	7.40	0.63	16.20
E	สีของแผ่นเงินที่เคลือบ gold microplates 5 ชั้นเทียบกับแผ่นเงิน	SM5-S0	-17.50	6.13	5.63	19.38
F	ความแตกต่างของสี gold microplates ที่เคลือบ 5 ชั้นและ 2 ชั้น	SM5-SM2	-3.10	-1.27	5.90	6.78

เมื่อเทียบความต่างของสีระหว่างการเคลือบ 2 ชั้นและ 5 ชั้น พบว่าการเคลือบ 5 ชั้นให้สีเหลืองมากกว่า เมื่อเทียบกับแผ่นเงินที่ไม่เคลือบ และการเคลือบด้วยทองแบบ microplates จะให้ความแตกต่างของสี (ΔE) มากกว่าการเคลือบแบบทอง nanoparticles แสดงว่าการเคลือบแบบทอง microplates อาจปกปิดผิวหน้าเงินได้ดีกว่า เมื่อเทียบกับจำนวนชั้นการเคลือบเท่ากัน การกระจายตัวของการเคลือบด้วย nanoparticles อาจดีกว่าแต่จำนวนชั้นการเคลือบน้อยทำให้ปกปิดผิวชิ้นงานได้ไม่ดีเท่าการเคลือบด้วย microplates ปริมาณอนุภาคของ nanoparticles ในการเรียงผนึกตัวกันจึงเกิดขึ้นได้น้อยทำให้ได้สีเหลืองทองน้อยกว่าการเคลือบด้วยทอง microplates อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติการกันหมองจะศึกษาในหัวข้อถัดไป

3.4 ผลการทดสอบการต้านทานการหมอง (Tarnish Resistance Test)

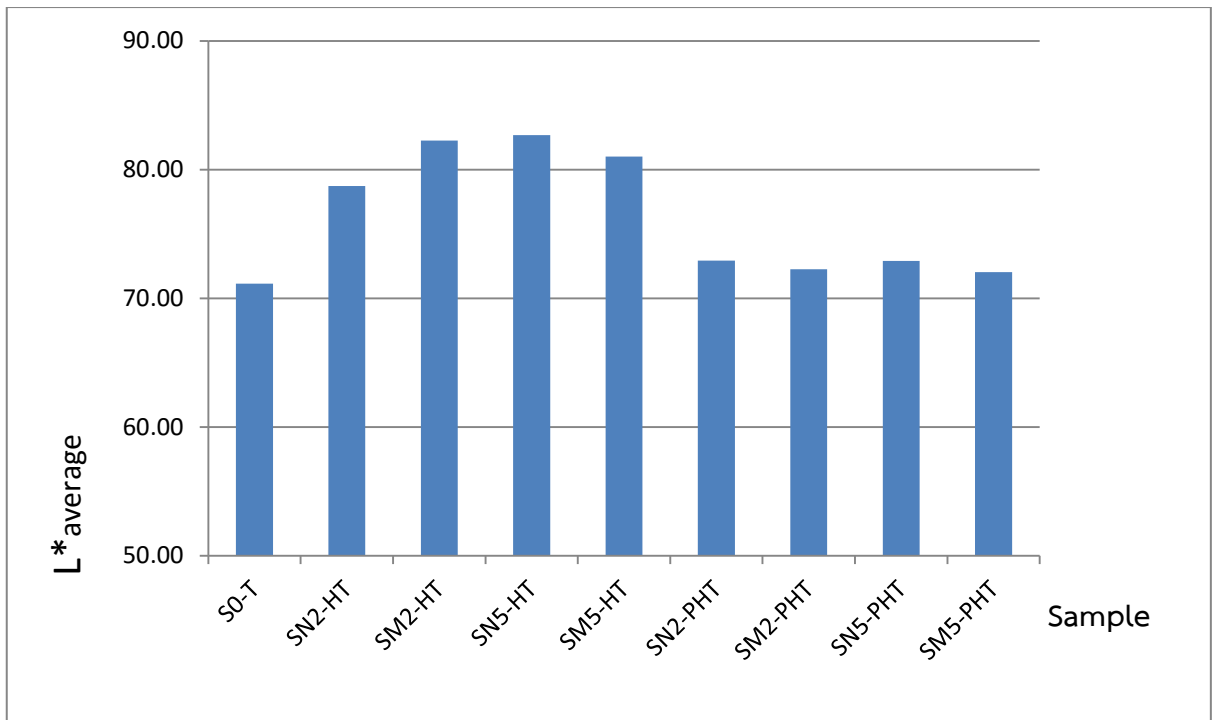
เมื่อนำชิ้นงานเงินเคลือบด้วยทองคำที่สังเคราะห์ได้แบบอนุภาคนาโนเมตรและแบบแผ่นทองคำขนาดไมครอนแล้ว ได้นำแผ่นเงินที่เคลือบมาทดสอบการต้านทานการหมองด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ ในเวลาที่ต่างกัน ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3.3 จากรูปในตารางจะเห็นว่าก่อนการทดสอบการกันหมอง สีของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบทองชนิดต่างๆ อาจสังเกตความต่างไม่ได้ด้วยตาเปล่า แต่เมื่อนำไปทดสอบการหมองในเวลาต่างๆ กัน สีของชิ้นงานในแต่ละสภาวะมีการเปลี่ยนแปลงต่างกัน โดยเมื่อเวลาในการทดสอบภายใต้ไอโซเดียมซัลไฟด์เพิ่มขึ้น ชิ้นงานทุกสภาวะจะมีสีเข้มขึ้นหรือเกิดการหมองจากการที่เงินทำปฏิกิริยากับไอซัลเฟอร์ ทำให้ผิวเงินดำขึ้นนั่นเอง และชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบคือ S0 นั้น เมื่อทดสอบเป็นเวลานาน 60 นาทีเท่ากับสภาวะที่ผ่านการเคลือบผิว ชิ้นงาน S0 จะมีสีดำมากที่สุด เห็นได้ว่าการเคลือบด้วยแผ่นทองคำระดับไมครอนและทองคำอนุภาคระดับนาโนเมตรสามารถต้านทานการหมองได้ดีกว่า คือมีสีเข้มน้อยกว่า ณ เวลาทดลองเดียวกัน นอกจากนี้การเคลือบด้วยทองระดับนาโนเมตรจะให้สีที่สม่ำเสมอกว่า แสดงว่าการเคลือบติดได้สม่ำเสมอเรียกว่า สอดคล้องกับภาพในการทดลองวิเคราะห์ผิวด้วยเครื่อง SEM แต่สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการทำ Pretreatment ก่อนการเคลือบผิวนั้น แม้ชิ้นงานจะกันหมองได้ดีที่สภาวะเวลา 60 นาที แต่ภายในเวลาอันสั้นกว่า ชิ้นงานมีความเข้มสีมากกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทำ Pretreatment เพื่อให้การเปรียบเทียบความต่างของสีชัดเจนที่สุด จึงได้ทำการต้านทานการหมองด้วยเวลา 30 นาที มาวัดค่าสีที่เปลี่ยนไปของแผ่นเงินที่เคลือบด้วยทองคำต่างกัน ผลการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 3.4 และการเปรียบเทียบค่าสี L^* a^* และ b^* ที่เปลี่ยนไปของชิ้นงานเงินที่ผ่านการกันหมองทุกสภาวะแสดงดังรูปที่ 3.24, 3.25 และ 3.26 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.3 ภาพชิ้นงานที่เคลือบทองคำที่ผ่านการทดสอบกันหมองด้วย Na_2S ณ เวลาต่างกัน

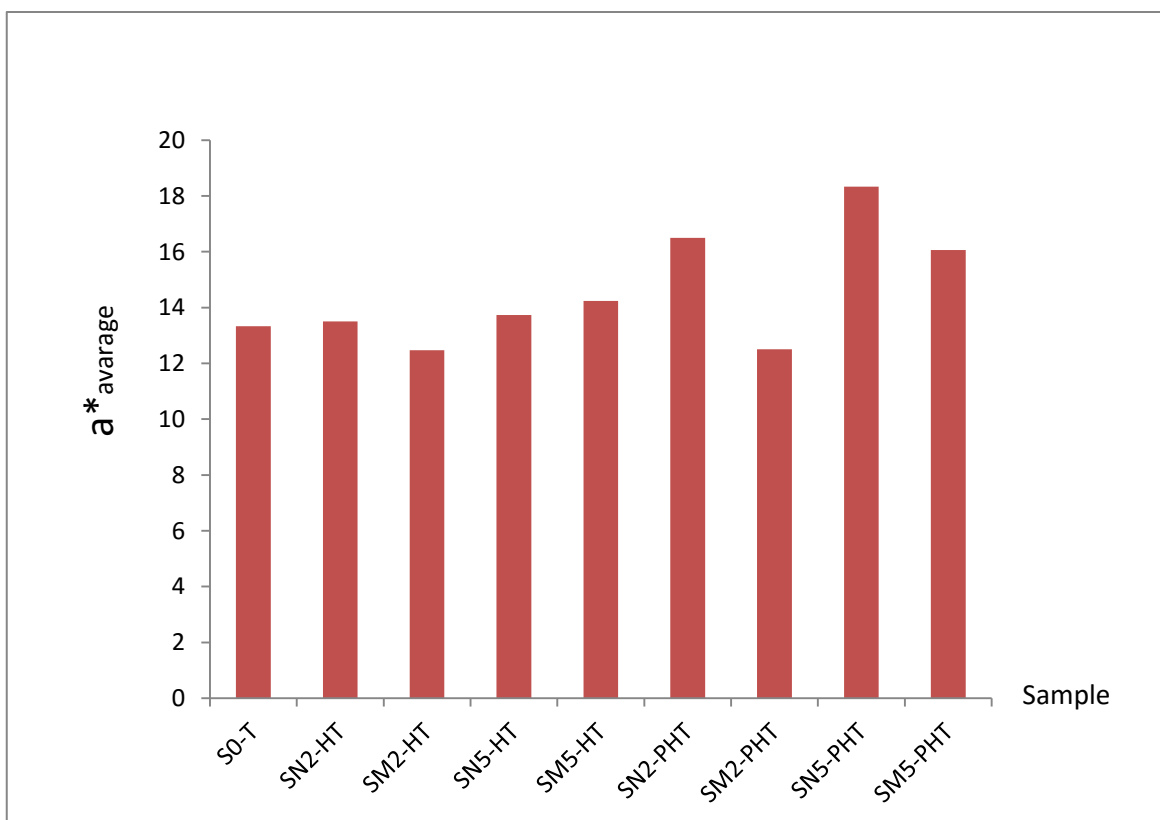
รหัส ตัวอย่าง	เวลา (นาที)					
	0	5	10	15	30	60
S0						
SM2H						
SM5H						
SN2H						
SN5H						
SM2-PH						
SM5-PH						
SN2-PH						
SN5-PH						

ตารางที่ 3.4 ค่าสีที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยทองคำก่อนและหลังการทดสอบกันหมอง

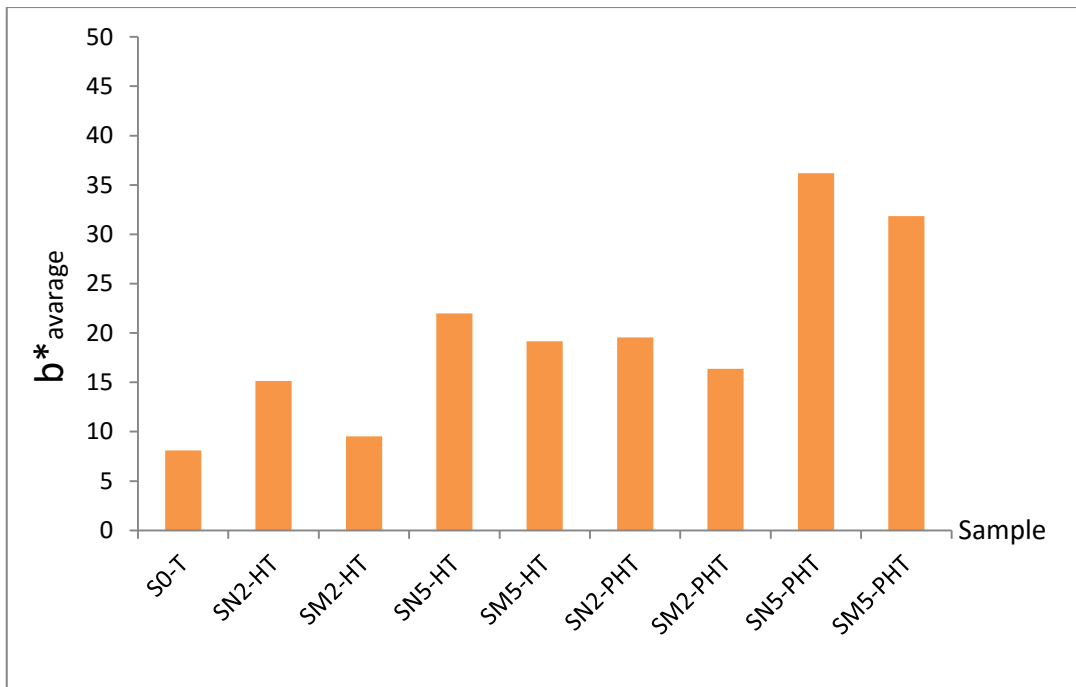
	รหัส ตัวอย่าง	L*					a*					b*				
		L*1	L*2	L*3	L*เฉลี่ย	SD	a*1	a*2	a*3	a*เฉลี่ย	SD	b*1	b*2	b*3	b*เฉลี่ย	SD
1	S0	100.80	98.20	99.30	99.43	1.31	6.10	6.30	7.00	6.47	0.47	1.40	1.60	2.00	1.67	0.31
2	SN2	99.80	90.10	97.00	95.63	4.99	15.70	21.10	19.00	18.60	2.72	9.70	4.50	6.40	6.87	2.63
3	SN5	88.90	93.00	85.00	88.97	4.00	14.40	13.70	15.10	14.40	0.70	6.70	7.80	8.80	7.77	1.05
4	SM2	83.00	85.30	86.80	85.03	1.91	18.00	10.50	13.10	13.87	3.81	2.30	2.70	1.90	2.30	0.40
5	SM5	82.00	80.60	83.20	81.93	1.30	13.40	12.00	12.40	12.60	0.72	6.90	7.20	7.80	7.30	0.46
6	S0-T	70.00	68.30	75.10	71.13	3.54	11.30	15.50	13.20	13.33	2.10	7.70	8.80	7.80	8.10	0.61
7	SN2-T	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd
8	SN2-T	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd
9	SM2-T	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd
10	SM5-T	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd	cd
11	SN2-H	95.70	80.30	90.80	88.93	7.87	14.00	15.20	14.20	14.47	0.64	10.90	7.00	9.80	9.23	2.01
12	SN2-HT	87.30	78.50	70.40	78.73	8.45	15.00	10.20	15.30	13.50	2.86	17.00	13.20	15.20	15.13	1.90
13	SM2-H	85.10	91.10	88.00	88.07	3.00	17.40	10.60	12.90	13.63	3.46	10.00	11.00	13.70	11.57	1.91
14	SM2-HT	78.60	80.90	87.30	82.27	4.51	12.80	13.60	11.00	12.47	1.33	10.50	10.60	7.50	9.53	1.76
15	SN5-H	87.90	73.90	87.40	83.07	7.94	15.20	10.20	12.10	12.50	2.52	11.90	10.20	13.60	11.90	1.70
17	SM5-H	67.20	63.50	71.60	67.43	4.06	14.50	14.20	15.80	14.83	0.85	13.40	14.20	12.50	13.37	0.85
18	SM5-HT	84.00	76.70	82.30	81.00	3.82	11.10	16.50	15.10	14.23	2.80	13.80	23.00	20.70	19.17	4.79
19	SN2-PH	77.90	68.70	82.10	76.23	6.85	9.50	9.60	10.20	9.77	0.38	8.80	9.00	7.70	8.50	0.70
20	SN2-PHT	76.80	82.00	60.00	72.93	11.50	15.30	14.80	19.40	16.50	2.52	29.20	13.01	16.50	22.93	8.52
21	SM2-PH	81.20	71.50	83.80	78.83	6.48	8.50	12.70	11.40	10.87	2.15	13.00	17.00	16.00	15.33	2.08
22	SM2-PHT	76.10	73.00	67.70	72.27	4.25	11.30	14.40	11.80	12.50	1.66	12.30	19.00	17.80	16.37	3.57
23	SN5-PH	77.90	89.00	61.00	75.97	14.10	10.30	13.20	15.20	12.90	2.46	29.00	23.40	23.50	25.30	3.20
24	SN5-PHT	72.70	80.00	66.00	72.90	7.00	18.20	17.60	19.20	18.33	0.81	32.00	39.40	37.20	36.20	3.80
25	SM5-PH	80.80	68.10	66.20	71.70	7.94	13.70	12.60	13.30	13.20	0.56	34.20	34.20	32.30	33.57	1.10



รูปที่ 3.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า L* ของตัวอย่างแผ่นเงินทุกสภาวะที่ผ่านการทดสอบการกันหมอง



รูปที่ 3.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า a* ของตัวอย่างแผ่นเงินทุกสภาวะที่ผ่านการทดสอบการกันหมอง



รูปที่ 3.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า b^* ของตัวอย่างแผ่นเงินทุกสถานะที่ผ่านการทดสอบการกันหมอง

ตารางที่ 3.4 แสดงผลการทดลองทั้งหมดเพื่อเปรียบเทียบค่าสีที่วัดได้ ก่อนและหลังการทดสอบการกันหมอง ผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานเงินที่ทำการเคลือบผิวแล้วไม่ว่าจะเป็นการเคลือบด้วยอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตร (SN2, SN5) หรือแผ่นทองระดับไมครอน (SM2, SM5) หากไม่ทำการให้ความร้อน เมื่อนำไปทำการทดสอบกันหมอง สารเคมีที่เป็นตัวทำละลายในการเคลือบทองจะทำปฏิกิริยากับไอของโซเดียมซัลไฟด์ทำให้เกิดการหมองอย่างรวดเร็ว และแผ่นทองจะหลุดร่อนออกมาได้ง่าย เนื่องจากอนุภาคไม่ได้ผนึกกับผิวเงิน หากทำการแช่น้ำหรือขัดชิ้นงาน อนุภาคทองจะหลุดลอกออกมาจากชิ้นงาน จึงควรทำชิ้นงานไปทำการเผาให้ความร้อนเพื่อให้สารเคมีที่เป็นตัวทำละลายละลายตัว เมื่อนำชิ้นงานไปให้ความร้อนแล้วจึงนำมาทดสอบการกันหมอง

ผลการวัดสีของการเคลือบด้วยอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตรแล้วผ่านการให้ความร้อน (SN2-H, SN5-H) และแผ่นทองระดับไมครอน (SM2-H, SM5-H) เมื่อนำมาทดสอบการกันหมองด้วยโซเดียมซัลไฟด์ พบว่าการเคลือบด้วยทองที่จำนวนชั้นมากจะทำให้สามารถกันหมองได้มาก เพราะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีน้อย ค่า L^* มีค่าไม่ต่างจากก่อนทำการทดสอบกันหมอง และ สำหรับค่า a^* และ b^* การเคลือบจำนวนชั้นมากจะทำให้เกิดสีเหลืองมากกว่า อาจเป็นเพราะมีปริมาณทองที่ผิวหน้ามากกว่า ซึ่งส่งผลกับสีที่วัดหลังทดสอบการกันหมอง และชิ้นงานที่เคลือบด้วยทองแผ่นระดับไมครอนหรือ gold microplates ที่ผ่านการให้ความร้อนไม่ว่าจะเคลือบ 2 ชั้น (SM2-HT) หรือ 5 ชั้น (SM5-HT) ก็ตาม จะสามารถกันหมองได้มากกว่าการเคลือบด้วยอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตร (gold nanoparticles) แบบ 2 ชั้น (SN2-HT) และ 5 ชั้น (SN5-HT) เมื่อเทียบกับการนำชิ้นงานไปผ่านการปรับปรุงผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนการนำไปเคลือบผิวและทดสอบกันหมองนั้น พบว่าความแตกต่างของสีที่ได้กับชิ้นงาน

ที่ไม่ได้ผ่านการทำ pretreatment มีค่าไม่ต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของการกั้นหมองระหว่างแผ่นเงินที่เคลือบด้วย gold nanoparticles และ gold microplates พบว่า การค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดสีของการเคลือบด้วย gold nanoparticles มีสูงกว่ามาก แสดงว่าการเคลือบด้วย gold nanoparticles อาจไม่สม่ำเสมอเรียบปิดทับทั่วบริเวณผิวหน้าแผ่นเงิน ทำให้ค่าที่วัดแต่ละตำแหน่งบนแผ่นเงินที่นำมาทดสอบมีค่าต่างกันมาก ส่งผลต่อค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐานทำให้มีค่าสูง

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.24 ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบด้วยโลหะทอง เมื่อนำมาผ่านการต้านทานการหมอง จะมีค่า L^* ลดลง และมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับทุกสถานะ แสดงว่าชิ้นงานมีความสว่างน้อยที่สุดหรือมีความหมองมากที่สุด แต่เมื่อนำชิ้นงานไปผ่านการเคลือบด้วยทองขนาดนาโนเมตรและไมโครเมตรพบว่า เมื่อผ่านการเคลือบแล้วผ่านการทดสอบการหมองจะให้ค่าความสว่างที่ยังมีค่าสูงมากอยู่ แต่เมื่อนำชิ้นงานไปผ่านการ Pretreatment ก่อนการเคลือบ ความสว่างจะมีค่าลดลงแต่ก็ยังมีความสูงกว่ชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการเคลือบด้วยทอง แสดงว่าไม่ว่าจะผ่านการ Pretreatment หรือไม่ก็ตาม ทองคำทั้งสองขนาดที่เคลือบบนแผ่นเงินจะสามารถช่วยกั้นหมองของแผ่นเงินได้ทำให้มีความสว่างคงอยู่เกือบเท่าค่าเดิม

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.25 และ 3.26 คือค่าเฉลี่ยของ a^* เป็นบวกที่แสดงค่าสีแดง และ b^* เป็นบวกที่แสดงค่าสีเหลือง พบว่าเมื่อนำชิ้นงานไปเคลือบด้วยทองขนาดนาโนเมตรชิ้นงานจะค่อนข้างเปลี่ยนไปทางสีแดง แต่เมื่อนำทองคำแผ่นระดับไมโครเมตรมาทำการเคลือบ ชิ้นงานจะมีความเป็นสีเหลือง หรือมีค่า b^* มากที่สุด แสดงว่าชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการหมองจะให้สีเหลืองมาก แต่อาจเนื่องจากสีของอนุภาคทองคำเองด้วย เนื่องจากเมื่อผ่านการเคลือบด้วยทองจำนวนชิ้นมากและขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตร ชิ้นงานเองจะมีสีเหลืองมากเช่นกัน (ดังผลการทดลองในหัวข้อ 3.3) เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นได้สรุปการเปรียบเทียบชิ้นงานก่อนและหลังเผาในแต่ละสถานะไว้ได้ผลดังตารางที่ 3.5

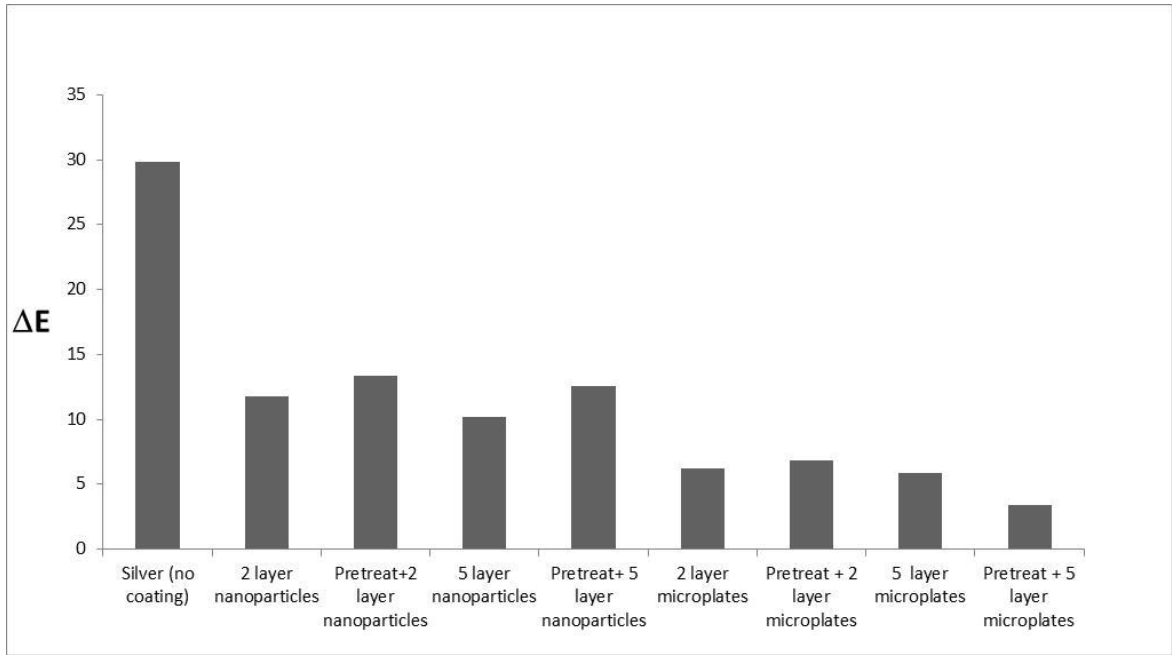
ตารางที่ 3.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของสีในแต่ละสถานะ การเปรียบเทียบสถานะ H คือการนำค่าสีของแผ่นเงินที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบด้วยทอง มาทดสอบกั้นหมองและวัดสีเทียบกับแผ่นเงินบริสุทธิ์ พบว่ามีค่าความสว่างลดลงอย่างมากถึง -28.30 และมีการเปลี่ยนแปลงของสีคือไปเปลี่ยนไปทางสีแดงและเหลืองมาก จนทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี สูงถึง 29.82

ตารางที่ 3.5 สรุปการเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการกันหมอง

การเปรียบเทียบที่	ความแตกต่างของสี 2 สภาวะ	ข้อมูลจากตัวอย่าง	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE
H	แผ่นเงินทดสอบกันหมอง กับแผ่นเงินเริ่มต้น	(S0-T)-S0	-28.30	6.87	6.43	29.82
I	แผ่นเงินเคลือบโลหะทอง Nanoparticles 2 ชั้น โดยไม่ทำ Pretreatment เทียบก่อนและหลังการหมอง	(SN2-HT)-(SN2-H)	-10.20	-0.97	5.90	11.82
J	แผ่นเงินเคลือบโลหะทอง Nanoparticles 5 ชั้น โดยไม่ทำ Pretreatment เทียบก่อนและหลังการหมอง	(SN5-HT)-(SN5-H)	-0.40	1.23	10.10	10.18
K	แผ่นเงินเคลือบโลหะทอง Nanoparticles 2 ชั้น ทำ Pre-treatment เทียบก่อนและหลังการหมอง	(SN2-PHT)-(SN2-PH)	-3.30	6.73	11.07	13.37
L	แผ่นเงินเคลือบโลหะทอง Nanoparticles 5 ชั้น ทำ Pre-treatment เทียบก่อนและหลังการหมอง	(SN5-PHT)-(SN5-PH)	-3.07	5.43	10.90	12.56
M	แผ่นเงินเคลือบโลหะทอง Micro-plate 2 ชั้น โดยไม่ทำ Pre-treatment เทียบก่อนและหลังการหมอง	(SM2-HT)-(SM2-H)	-5.80	-1.17	-2.03	6.26
N	แผ่นเงินเคลือบโลหะทอง Micro-plate 5 ชั้น โดยไม่ทำ Pre-treatment เทียบก่อนและหลังการหมอง	(SM5-HT)-(SM5-H)	-0.40	-0.60	5.80	5.84
O	แผ่นเงินเคลือบโลหะทอง Micro-plate 2 ชั้น ทำ Pre-treatment เทียบก่อนและหลังการหมอง	(SM2-PHT)-(SM2-PH)	-6.57	1.63	1.03	6.85
P	แผ่นเงินเคลือบโลหะทอง Micro-plate 5 ชั้น ทำ Pre-treatment เทียบก่อนและหลังการหมอง	(SM5-PHT)-(SM5-PH)	0.33	2.87	-1.73	3.37

การเคลือบผิวด้วยทองคำอนุภาคระดับนาโนเมตร (gold nanoparticles) พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงสีก่อนและหลังผ่านการกั้นหมองมีค่าต่างกันไม่สูงเท่าสภาวะ H โดยการเคลือบจำนวนชั้นที่มากกว่าจะกั้นหมองได้มากกว่าเนื่องจากค่าการเปลี่ยนแปลงสีต่างกันน้อยกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดจากการเคลือบผิวด้วยทองคำแบบเป็นแผ่นความกว้างไมโครเมตรนั้น พบกว่า หากเคลือบด้วยทองคำแบบ microplate จะทำให้กั้นหมองได้ดีกว่า เนื่องจากค่าการเปลี่ยนแปลงสีมีน้อยกว่ามาก โดยเฉพาะการเคลือบแบบการทำ Pretreatment จะทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีก่อนและหลังการทดสอบกั้นหมองมีน้อยที่สุด แต่การเคลือบปริมาณชั้นมากอาจส่งผลให้ผิวชั้นงานมีสีเหลืองจากอนุภาคทองคำมากเกินไปได้ การเปรียบเทียบสภาวะที่แผ่นเงินผ่านการทำ pretreatment กับการไม่ผ่านการทำ pretreatment ของ gold microplate นั้น พบว่าค่าที่ได้ต่างกันไม่มากนัก ดังนั้นไม่จำเป็นต้องผ่านการ pretreatment

อย่างไรก็ตาม การศึกษาการกั้นหมองทั้งหมดพบว่าแผ่นเงินที่เคลือบด้วยทองคำไม่ว่าจะกรณีใดก็ตามจะมีค่าความแตกต่างของสีน้อยกว่าแผ่นเงินที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวแล้วนำไปทดสอบการกั้นหมองจึงสามารถสรุปได้ว่าการเคลือบผิวหน้าแผ่นเงินด้วยอนุภาคทองคำช่วยให้เงินหมองน้อยลงได้ แต่จากกระบวนการทดลองพบว่า การเคลือบด้วยทองคำแบบ microplate ทำได้สะดวกกว่าและกั้นหมองได้มากกว่าเมื่อเคลือบด้วยจำนวนชั้นเท่ากัน จึงประหยัดเวลาในการเคลือบมากกว่า จำนวนครั้งที่ใช้ในการเคลือบน้อยกว่า แต่การเคลือบด้วยทองคำระดับนาโนเมตรจะสามารถเคลือบได้เรียกว่าสม่ำเสมอกว่า ซึ่งอาจจะสะดวกในการนำไปประยุกต์ในระดับอุตสาหกรรมได้ ในการวิจัยนี้ได้ทดลองเปรียบเทียบการเคลือบผิวแหวนเงินด้วยทองคำระดับนาโนเมตร เปรียบเทียบกับแหวนเงินที่ไม่ผ่านการเคลือบด้วยทองคำ ผลการทดสอบการต้านทานการหมองเป็นเวลา 15 นาทีด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ แสดงดังรูปที่ 3.28 ซึ่งจะเห็นได้ว่า แหวนเงินที่ผ่านการเคลือบด้วยทองคำระดับนาโนเมตรนั้น มีการหมองน้อยกว่า หรือมีสีเข้มน้อยกว่าเงินที่ไม่ผ่านการเคลือบนั่นเอง



รูปที่ 3.27 ค่าความแตกต่างของสี (ΔE) ในแต่ละสภาวะการทดลองเปรียบเทียบก่อนและหลังการทดสอบกันหมอง



ก. ซ้าย: แหวนเงินไม่เคลือบ และ ขวา: แหวนเงินเคลือบทองคำนาโนก่อนทดสอบการกันหมอง



ข. ซ้าย: แหวนเงินไม่เคลือบหลังทดสอบกันหมอง และ ขวา: แหวนเงินเคลือบหลังทดสอบกันหมอง

รูปที่ 3.28 การทดสอบการกันหมองของแหวนเงินที่ผ่านการเคลือบทองคำระดับนาโนเมตร

บทที่ 4

สรุปผลการวิจัย

4.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถทำการสังเคราะห์อนุภาคทองคำที่มีความบางในระดับนาโนเมตรและมีขนาดระดับไมโครเมตรและนำไปเคลือบบนแผ่นเงินเพื่อต้านทานการหมองของแผ่นเงิน โดยยืนยันขนาดของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้จากภาพถ่าย SEM และความบางของอนุภาคได้จากผลของวิสิเบิล เนียร์ไออาร์ สเปกตรัม การศึกษาในช่วงความเข้มข้นในงานวิจัยนี้ สรุปได้ว่ารูปร่างและขนาดอนุภาคของแผ่นทองคำที่สังเคราะห์ได้มีความหลากหลายทั้งวงกลม สามเหลี่ยม สามเหลี่ยมถูกตัดทอน ห้าเหลี่ยม และหกเหลี่ยม ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอัตราส่วนของสารละลายทองคำ ตัวช่วยเสถียรและตัวรีดิวซ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ อย่างไรก็ตามอนุภาคทองคำทั้งสองประเภทจะนำมาใช้ทดสอบต้านทานการหมองเงิน โดยการเคลือบด้วยจำนวนชั้นต่างกันและให้ความร้อนเพื่อให้ทองคำติดผิวเงินได้ดีขึ้นและไม่หลุดลอก

ผลการวิจัยพบว่าการนำอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตรและแผ่นทองคำระดับไมโครเมตรมาเคลือบบนโลหะเงินสามารถต้านทานการหมองของโลหะเงินได้ ความสว่างของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบด้วยทองคำมีการเปลี่ยนไปน้อยกว่าชิ้นงานเงินที่ไม่ผ่านการเคลือบใดๆ ซึ่งจะมีความหมองและการเปลี่ยนสีอย่างมาก นอกจากนี้จำนวนชั้นการเคลือบมีผลต่อการต้านทานการหมอง การเคลือบด้วยอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตรจำนวนชั้นการเคลือบต่ำจะไม่สามารถต้านทานการหมองได้ดีเท่าการเคลือบด้วยอนุภาคแผ่นทองคำระดับไมโครเมตร แต่หากทำการเคลือบด้วยอนุภาคแผ่นทองคำระดับไมโครเมตรจำนวนชั้นมาก อาจทำให้สีของเงินเปลี่ยนไปเป็นสีทองมากเกินไปซึ่งไม่เหมาะสมเช่นกัน บทประยุกต์การเคลือบชิ้นงานเงินด้วยอนุภาคทองคำที่สังเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้นอกจากจะสามารถนำไปเคลือบบนชิ้นงานเครื่องประดับได้ ยังสามารถมีส่วนช่วยในการนำไปใช้ในการเคลือบวัสดุอื่นเพื่อกันหมองในอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้เช่นกัน

4.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะด้านกระบวนการผลิต

1. ขั้นตอนของการสังเคราะห์ การเติมสารละลายผสมระหว่างพอลิวินิลไพร์โรลิโดนและเอทิลีนไกลคอล ลงในสารละลายทองคำที่ให้ความร้อนพร้อมคนไว้ ควรเติมสารละลายอย่างช้าๆ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดสารละลายผสมจับตัวเป็นก้อน
2. การควบคุมอุณหภูมิในการสังเคราะห์มีผลต่อขนาดของอนุภาคทองคำที่ได้ จึงควรควบคุมให้เหมาะสมตลอดการทดลอง

การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

1. กรรมวิธีการเคลือบและป้องกันการหมองด้วยอนุภาคทองคำสามารถนำไปใช้ได้ทั้งอุตสาหกรรมเครื่องประดับเงินและโลหะอื่นๆ ที่ต้องการป้องกันการหมองของโลหะ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่จำเป็นในการต้านทานการหมองโลหะที่มีราคาแพง และด้วยขนาดอนุภาคขนาดเล็กมากของทองคำ ราคาในการผลิตและการเคลือบไม่สูงมากเนื่องจากใช้ปริมาณทองคำน้อยมาก น่าจะคุ้มค่าการลงทุน ดังนั้นในเชิงการนำไปใช้ระดับอุตสาหกรรมควรคำนึงถึงความคุ้มค่าของชิ้นงานและวิธีการเคลือบที่สามารถทำได้ในปริมาณมาก เพื่อให้ทำให้ง่ายขึ้นและลดต้นทุนการผลิตได้
2. งานวิจัยนี้ได้องค์ความรู้เพิ่มเติมในเรื่องปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคทองคำในระดับนาโนเมตรและไมโครเมตรซึ่งสามารถนำอนุภาคแผ่นทองคำที่สังเคราะห์ได้จากงานวิจัยไปประยุกต์ในด้านอื่นๆ เช่น การทาเคลือบบนเครื่องประดับเพื่อตกแต่งผิว หรือการนำไปผลิตเป็นทองคำที่สามารถปั้นขึ้นรูปได้ด้วยมือที่เรียกว่า Gold clay เป็นต้น

ข้อจำกัดของงานวิจัยและข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อในอนาคต

1. งานวิจัยในอนาคตควรศึกษาเพื่อต้านทานการหมองเงินสเตอร์ลิงค์ หรืออัลลอยด์ของโลหะอื่นๆ เนื่องจากเป็นโลหะที่ได้รับความนิยมในการใช้เป็นเครื่องประดับ
2. ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้คือ ยังเป็นงานวิจัยใน Lab scale หรือห้องปฏิบัติการ แม้ผลการทดสอบกับชิ้นงานเงินและต้นแบบเครื่องประดับพบว่าการเคลือบโลหะเงินด้วยอนุภาคทองคำจะมีประสิทธิภาพต่อการต้านทานการหมองได้จริง ในอนาคตควรศึกษากรรมวิธีการผลิตในระดับอุตสาหกรรมร่วมกับบริษัทหรือผู้ประกอบการจริง เพื่อจะได้ทราบปัญหาและแนวทางแก้ไขในการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรม

บรรณานุกรม

- “ทองคำ.” (2557) [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา th.wikipedia.org/wiki/ทองคำ. (28 มกราคม 2557)
- สมาคมผู้ค้าทองคำ. (2557). “คุณสมบัติและประโยชน์.” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา www.goldtraders.or.th (12 ธันวาคม 2557)
- พิมพ์ทอง ทองนพคุณ. (๒๕๕๕) **หลักการสเปกโทรสโกปีด้านการวิเคราะห์และบทประยุกต์สำหรับการวิเคราะห์อัญมณี**, คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา, ๒๔๓ หน้า.
- พิมพ์ทอง ทองนพคุณ. (๒๕๕๒) **เอกสารประกอบการสอนวิชา ๒๗๒๓๕๖ เคมีวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ คณะอัญมณี** มหาวิทยาลัยบูรพา
- มาตรฐานการส่องสว่างของ CIE. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://chalemchai124.exteen.com> (25 มกราคม 2557)
- Angel L., Csar S., Caterina Q., Alejandro T., Francisco J., Espinoza-B., Marcela U., Ligia G., Deodato R. (2009). Gold-copolymer nanoparticles: Poly(ϵ -caprolactone)/ poly(N-vinyl-2-pyrrolidone) Biodegradable triblock copolymer as stabilizer and reductant. *European Polymer Journal* 45. 3035–3042.
- Chaloupka. A., et al, (2010) Influence of substrate on properties of gold nanolayers, *Materials Letters*, 64, 1316-1318.
- Caixia K., Changshun W., Jiejun Z., and Hongchen L. (2010). Formation of gold and silver nanostructures within polyvinylpyrrolidone (PVP) gel. *Journal of Solid State Chemistry* 183. 858–865.
- Changshun W., Caixia K., Jiejun Z., Xiaoling Z., Xiangfu W., Hongchen L., Daning S. (2010). Synthesis of High-Yield Gold Nanoplates: Fast Growth Assistant with Binary Surfactants. *Journal of Nanomaterials*. 140-149.
- Chromaticity Diagrams . (2015) [online]. Available <http://www.efg2.com/Lab/Graphics/Colors/Chromaticity.htm> (20 February 2015)
- Daniel Davitz, “Tarnish resistant gold colored alloy with enhanced gold color”, US patent 4,948,557, 1990
- Daniel Davitz and Glenview, “Silver colored alloy with low percentage of nickel and copper”, US Patent 5,817,195, 1998.

- Dung The N., Dong-Joo K., Myoung Gi S., Kyo-Seon K. (2010). Experimental measurements of gold nanoparticle nucleation and growth by citrate reduction of HAuCl_4 . *Advanced Power Technology* 21, 111-118.
- Edward Louis Kohrn and Seymour Gllobus, "Gold/Silver Alloys", US Patent 3,925,073, 1975
- Ethylene glycol.(2015) [online]. Available <http://en.wikipedia.org/wiki/EthyleneGlycol> (12 January 2015).
- Fars K.A, Awwad A.R., Ibrahim A.A. (2010). Biopharmaceutical applications of nanogold. *Saudi Pharmaceutical Journal*. 18, 179-183.
- Frens, G. (1973) Controlled Nucleation for the regulation of the particle size in monodisperse gold suspensions, *Nature Physical Science*, 241, 20-22.
- Frey, T., Kogel, M. (2003) Tarnish protection of silver jewels by plasmopolymer coating, *Surface and Coating Technology*, 173-174
- Guo. Z., et al, (2006) Facile synthesis of micrometer-sized gold nanoplates through an aniline-assisted route in ethylene glycol solution, *Colloids and Surface A: Physicochem. Eng. Aspects*, 278, 33-38.
- Hayat M.A. (1989). Colloidal Gold: Principle, Method, and Applications. *Academic Press San Diego*. Vol.1, 902-904.
- Hong Y., Ru Xiu C., and Dai W.P. (2003). A Simple Approach to Control the Growth of Non-spherical Gold Nanoparticles. *Chinese Chemical Letters*, Vol. 14, No. 11, 1163 – 1166.
- Javad K.A., Hojjatollah K., Sasan M., and Afsaneh S. (2011). Biosynthesis Of Gold Nanoparticles Using Dried Flowers Extract of *Achillea Wilhelmsii* Plant. *Journal of Nanomaterials and Biostructures*. 1011-1017.
- Jayashri S., Ganpathiraman R., and Vijay J. (2008). Directed Synthesis of Micro-Sized Nanoplates of Gold from a Chemically Active Mixed Surfactant Mesophase. *Adv. Polym. Sci.* 218: 235-249.
- Jessica W. (2007). Gold Nanoparticle Biosensor. *University of Wisconsin Materials Research Science and Engineering Center*. 1-5.

- Jiejun Z., Caixia K., Hongchen L., Yanli C., Xiaolong D., Jianguo W. (2011) Synthesis and growth mechanism of gold nanoplates with novel shapes. *Journal of Crystal Growth*, 321, 124–130.
- Juh-Tzeng Lue. (2000) A review of characterization and physical property studies of metallic nanoparticles. *Journal of Physical and Chemistry of Solids*, 62, 1599-1612.
- Kan, C., Zhu, X., Wang, G. (2006) Single-crystalline Gold Microplate: Synthesis, Characterization, and Thermal Stability”, *J. Phys. Chem. B*, 110, 4651-4656.
- Kazuyuki H., Rie S., Takeshi M., Kiyohisa T., Takahiro H., Hideyuki Y., Hirufumi N., Nobuyuki N. (2008). Size distribution of gold nanoparticles covered with thiol-terminated cyanobiphenyl-type liquid crystal molecules studied with small-angle X-ray scattering and TEM. *Chemical Physics Letters*, 460, 173–177.
- Konica Minolta. Color Measurement. (2015) [online]. Available <http://www.konicaminolta.com/instruments/products/color-measurement/index.html>
- Kono. W., et al, “Method of sulfide tarnish inhibiting of silver-copper, silver-gold, and silver copper gold alloy”, US Patent 4,775,511, 1988.
- Lihua P., Koichi M., Motonari A. (2004). Formation Process of Two-Dimensional Networked Gold Nanowires by Citrate Reduction of AuCl_4^- and the Shape Stabilization. *Langmuir* (2004), 20, 7837-7843.
- Ludovico Cademarrin and Geoffrey A. Ozin. (2009). Concepts of Nanochemistry. Weinheim: WHEY-VCH GmbH & Co.KCaA.
- Materials World. (2003) “Gold - Applications and Developments in the Electronics, Biomaterials and Catalysis.” [online]. Available www.azom.com (20 February 2003)
- Marek G., Jorge P., Paul M., and Luis M. (2008). Shape control in gold nanoparticle synthesis. *Chem. Soc. Rev.* 37, 1783–1791.
- McEwan, J. J., Scott M., Goodwin, F.E. “Coatings to retard the formation of tarnish on silver and silver alloys”, The south African Institute of Mining and Metallurgy 8th International Corrosion Conference.
- Mecking, S.; Schlotterback, U.; Aymonier, C.; Thomann, R.; Hofmeister, H.; Tromp M. and Richtering, W. (2004). Shape-Selective Synthesis of Palladium Nanoparticles Stabilized by Highly Branched Amphiphilic Polymers. *Adv. Funct. Mater.* 14, No. 10, 999-1004.

Mehta S.K., Savita C. (2010). Surfactants: A Promising Building Block in Nanoparticle Synthesis. *SciTopics*.

Munsell color chart system. (2014) [online]. Available <http://www.jaimetreadwell.com/Dccc-Munsell-color-chart-system.htm> (24 February 2014)

Munsell Color System. (2014) [online]. Available http://en.wikipedia.org/wiki/Munsell_color_system (24 February 2014)

Munsell System (2015) [online]. Available: http://spie.org/publications/pm105_53_munsell_system (20 February 2015)

Munsell book of colour, Glossy collection, Independent Gemmological Laboratory (2009) [online]. Available <http://www.igl.net.au/munsellcolorgrading.php> (20 March 2009)

Nisaratanaporn, E., et al. (2007) Study on the microstructure, mechanical properties, tarnish and corrosion resistance of sterling silver alloyed with manganese, *Materials Science and Engineering A*, 445-446.

Nano Werk. (2010). "Gold Applications." [online]. Available <http://www.nanowerk.com>. (27 October 2010)

Nano Optical materials. (2011). "Surface plasmon resonance." [online]. Available <http://www.nanoopticalmaterials.com/archives/986>. (9 December 2011)

Panikkanvalappil R.S., Theruvakkattil S.S., Akshaya K.A., and Thalappil P. (2011). Anisotropic nanomaterials: structure, growth, assembly, and functions. *Nano Reviews*. 2: 5883.

Rudolf Kropp. et al, "Gold-silver alloys with good tarnish resistance for the dental art" US Patent 4,255,191, 1981.

Schmidbauer H., Cronje S., Djordjevic B., Schuster O., (2005) Understanding gold chemistry through relativity, *Chemical Physics*, 311, 151-161.

Sravani G., Michael S.W. (2011). Nanotechnology: A guide to Nano-Objects. American Institute of Chemical Engineers (AIChE). 28-32.

Sook Y.M., Takafumi K., Tohru S. (2009). CTAB-Assisted Synthesis of Size- and Shape-Controlled Gold Nanoparticles in SDS Aqueous Solution. *Materials Letters*, 63. 2038–2040.

- Susie E., Hsan-Yin H., and Mostafa A.E. (2005). Gold Nanoparticle Formation from Photochemical Reduction of Au³⁺ by Continuous Excitation in Colloidal Solutions. A Proposed Molecular Mechanism. *J. Phys. Chem. B.*, Vol. 109, No. 11.
- Tang, T., Hamley, W., (2009) Multiple morphologies of gold nanoparticles by high temperature polyol syntheses, *Colloids and Surface A: Physicochem. Eng. Aspects*, 336, 1-7.
- Tapan K.S., Anjali P., N.R. Jana, Z.L. Wang and Tarasankar P. (2001). Size controlled synthesis of nanoparticles using photochemically prepared seed particles. *Journal of Nanoparticles Research*, 3, 257-261.
- Yujie X., Isao W., Jingyi C., Honggang C., Zhi-Yuan L., Younan X. (2006). Poly (vinyl pyrrolidone): A Dual Functional Reductant and Stabilizer for the Facile Synthesis of Noble Metal Nanoplates in Aqueous Solution. *Langmuir*, 8563-8570.
- Yadong Y., Zhi-Yuan L., Ziyi Z., Byron G., Younan X., Sagar V. (2002). Synthesis and characterization of stable aqueous dispersions of silver nanoparticles through the Tollens process. *J. Mater. Chem.* 12, 522–527.
- Ying C., Xin G., Cha-Geng N., Zhi-Yuan J., Zhao-Xiong X., Chang-Jian L. (2005). Shape controlled growth of gold nanoparticles by a solution synthesis. *Chem. Commun.*, 4181–4183.