

ความต้านทานการหมอง

1. บทนำ

โลหะเงินถือเป็นโลหะที่สามารถสะท้อนแสงได้ 95 % ของแสงที่ตกกระทบ ดังนั้นเมื่อชั้นผิวมีความแวววาวสะท้อนแสงได้ดี จึงมักใช้ทำเครื่องประดับตกแต่ง โลหะเงินเงาที่ใช้ทำเครื่องประดับต้องมีปริมาณเงินไม่น้อยกว่า 92.5 % โดยน้ำหนัก มักเจือด้วยทองแดง เพื่อเพิ่มความแข็งแรง โลหะเงินเงาที่ใช้ไประยะเวลาหนึ่งมักหมองลง การที่โลหะเงินเงาหมองลง เนื่องมาจากเกิดปฏิกิริยาเคมีกับก๊าซหรือสารที่อยู่ในบรรยากาศ หรือเหงื่อของผู้สวมใส่ แล้วเกิดเป็นสารประกอบ ซึ่งส่วนใหญ่คือเงินซัลไฟด์ และมีส่วนน้อยเป็น ซัลเฟต คลอไรด์ ออกไซด์ คาร์บอนเนต หรือคาร์บอนิล สภาพแวดล้อมมีผลต่อความหมองของโลหะเงินเงาเป็นอย่างมาก ได้มีการพัฒนาวิธีการเพื่อให้โลหะเงินเงาหมองช้าลง เช่น การชุบด้วยโลหะเงินบริสุทธิ์ ชุบโรเดียม ชุบสารอินทรีย์กันหมอง หรือพัฒนาโลหะเงินเงา โดยเติมธาตุเจือเพื่อให้เนื้อโลหะเงินเงามีการต้านทานการหมองได้ดีขึ้น การพัฒนาให้โลหะเงินเงาต้านทานการหมองนั้นมีความสำคัญ แต่ที่สำคัญอีกประการหนึ่งการทดสอบ ความต้านทานการหมองและการวัดผลของความหมองที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ยังไม่มีมาตรฐานในการทดสอบและการวัดผล

เนื่องจากโลหะเงินเงาที่ใช้ทำเครื่องประดับมักต้องขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อ จึงต้องเติมธาตุเจือที่ช่วยกำจัดออกซิเจนในน้ำโลหะเหลว เช่น สังกะสี (Zn) หรือฟอสฟอรัส (P) นอกจากนี้ยังเติมทองแดง (Cu) เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และอาจเติมธาตุเจือที่ช่วยปรับปรุงสมบัติเฉพาะด้าน เช่น อินเดียม (In) ที่ช่วยในการต้านทานการหมอง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาพฤติกรรมความต้านทานการหมองของโลหะเงินเงา Ag-Cu-P, Ag-Cu-P-In และ Ag-Cu-Zn-In โดยศึกษาทั้งสภาพหล่อและสภาพอบเป็นเนื้อเดียว

1.1 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของชนิด และปริมาณธาตุเจือที่มีต่อความต้านทานการหมองของโลหะเงินเงาที่ผ่านกระบวนการหล่อ และการอบเป็นเนื้อเดียว

1.2 ขอบเขตการวิจัย

1. โลหะเงินเงาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ Ag-Cu-P, Ag-Cu-P-In และ Ag-Cu-Zn-In
2. ขึ้นทดสอบที่มีส่วนผสมตามที่กำหนดผ่านการหล่อและอบเป็นเนื้อเดียว
3. ทดสอบความต้านทานการหมองด้วยสารเคมีและเคมีไฟฟ้า

1.3 วิธีดำเนินการวิจัย

1. หล่อขึ้นทดสอบโลหะเงินเจือตามส่วนผสมที่กำหนด
2. นำขึ้นทดสอบหล่อส่วนหนึ่งไปอบเพื่อให้ธาตุเจือกระจายอย่างสม่ำเสมอ
3. เตรียมผิวขึ้นทดสอบที่ผ่านการหล่อ และอบเป็นเนื้อเดียว
4. ทดสอบความต้านทานการหมองด้วยสารเคมี โดยใช้สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ และเหนื่อเทียม วัดการสะท้อนแสง และความหยาบผิวของขึ้นทดสอบทั้งก่อนและหลังการทดสอบ
5. ทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเคมีไฟฟ้า
6. ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของขึ้นทดสอบ
7. สรุป และวิเคราะห์ผล

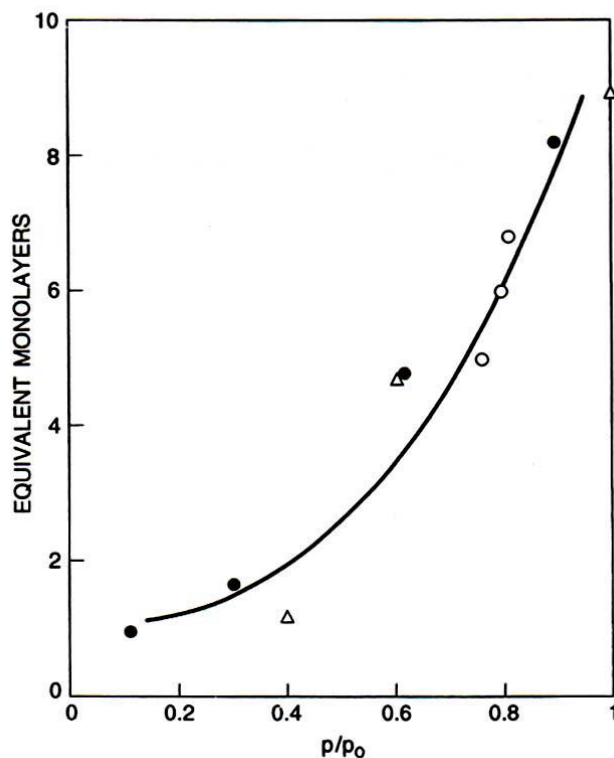
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การกัดกร่อนของโลหะเงินในบรรยากาศ

โลหะเงินและโลหะเงินเจือเกิดปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อมได้คล้ายกัน โลหะเงินจะถูกกัดกร่อนในบรรยากาศก็ต่อเมื่อมีความชื้นอยู่ด้วยเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากความชื้นจะถูกดูดติดที่ผิวโลหะเงินโดยปริมาณความชื้นที่ถูกดูดติดที่ผิวนั้นขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ ดังแสดงในรูปที่ 3-1 ซึ่งแสดงถึงชั้นโมเลกุลของน้ำ (Monolayer) บนผิวโลหะเงินขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ (p/p_0) สามารถแสดงได้ดังสมการ

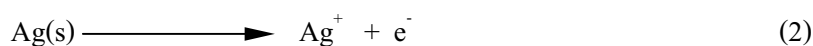
$$\ln(ml) = 2.73 (p/p_0) - 0.366 \quad (1)$$

ml = จำนวนชั้นของ Monolayer ของน้ำที่ถูกดูดติดบนผิวโลหะเงิน พฤติกรรมลักษณะนี้เกิดขึ้นกับโลหะอื่น ๆ เช่นกัน ในบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 90% ที่ผิวโลหะเงินจะมีชั้นของโมเลกุลของน้ำอยู่ 8 ชั้น ถ้ามีโมเลกุลของน้ำที่ผิวมากกว่า 3 ชั้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวเหมือนกับอยู่ในน้ำ ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำลง น้ำจะถูกดูดติดที่ผิวโลหะเงินได้น้อยลง การกัดกร่อนของโลหะเงินจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น



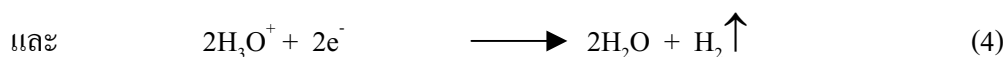
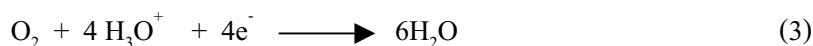
รูปที่ 3-1 ความชื้นสัมพัทธ์มีผลต่อจำนวนชั้นของโมเลกุลของน้ำบนผิวโลหะเงิน โดยประมาณว่าการกระจายตัวของน้ำบนผิวเงินอย่างสม่ำเสมอ⁴

น้ำที่ผิวโลหะเงินมีบทบาทสำคัญต่อการกัดกร่อน เพราะก๊าซหรือมวลสารที่อยู่ในบรรยากาศละลายในน้ำนี้ ทำให้น้ำที่ฤทธิ์กัดกร่อนโลหะเงินได้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะเงิน

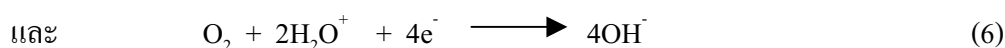
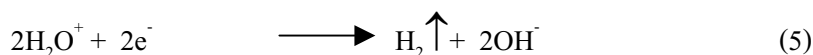


เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือปฏิกิริยาให้อิเล็กตรอนแล้ว ต้องมีปฏิกิริยารีดักชันหรือปฏิกิริยารับอิเล็กตรอน เกิดคู่กันไปด้วย

ปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้น เมื่อสารละลายมีฤทธิ์เป็นกรด คือ



ปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้น เมื่อสารละลายมีฤทธิ์เป็นกลาง คือ



2.2 กลไกการกัดกร่อนของโลหะเงิน

ได้มีการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาการกัดกร่อนของโลหะเงินในบรรยากาศ เพื่อใช้ในการสำรวจแร่ เพราะแร่ที่พบมีสารประกอบเหล่านี้ด้วย พบว่าผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการกัดกร่อนของโลหะเงินเป็นดังตารางที่ 3-1 ซึ่งมีอยู่ 8 ชนิด และบางชนิดไม่พบในธรรมชาติ (ซึ่งก็จะไม่มีชื่อทางธรณีวิทยาด้วย) ในตารางนี้บอกถึงโครงสร้างผลึก สูตรเคมี และการละลายในน้ำ

ตารางที่ 3-1 แร่และผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนของโลหะเงิน⁴

Substance	Hey index no.	Crystal system	Formula	K _{sp}
<i>Metal Oxides</i>				
Silver	1.3	cub.	Ag	2.6×10^{-8}
Silver oxide		cub.	Ag ₂ O	
<i>Sulfides, Sulfite, and Sulfates</i>				
Acanthite	3.2.1	mon.	Ag ₂ S	6.0×10^{-50}
Argentite	3.2.1	cub.	Ag ₂ S	1.5×10^{-14}
Silver sulfite		mon.	Ag ₂ SO ₃	
Silver sulfate		orth.	Ag ₂ SO ₄	1.6×10^{-5}
<i>Chloride and Nitrate</i>				
Chlorargyrite (cerargyrite)	8.3.1	cub.	AgCl	1.8×10^{-10}
Silver nitrate		orth.	AgNO ₃	1.6×10^{-1}

โลหะเงินเจือ 90Ag/10Cu เมื่ออยู่ในบรรยากาศที่มีซัลเฟอร์ (Reduced sulfur atmosphere) จะเกิดเป็น Copper sulfide ที่ผิว ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยา Sulfidation rate ของทองแดงเกิดขึ้นได้เร็วกว่าเงิน แต่ถ้าเป็นโลหะเงินเจือด้วยทอง ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการกัดกร่อนคือ Ag₂S

ถ้าเป็นโลหะเงินเจือสังกะสี ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการกัดกร่อนคือ Ag₂S, ZnO และ ZnS

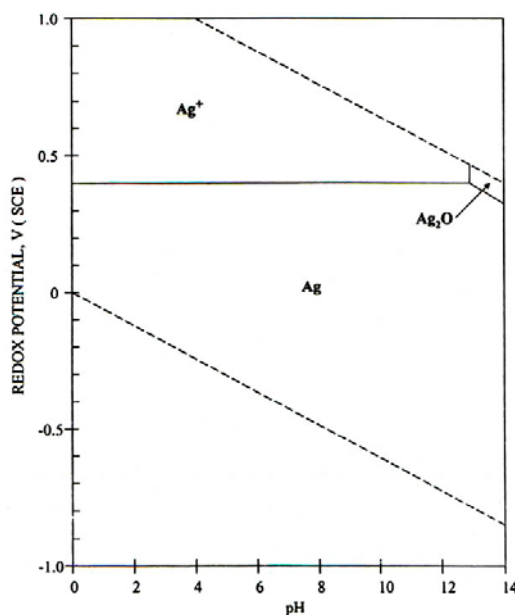
ถ้าเป็นโลหะเงินเจือแพลเลเดียม ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการกัดกร่อนคือ Ag₂S (ถ้าในบรรยากาศมีซัลเฟอร์) และ PdCl₂ หรือ AgCl (ในบรรยากาศที่มีคลอไรด์)

2.3 สารประกอบที่อาจเกิดขึ้นได้

- ออกไซด์และคาร์บอเนต

จากแผนภูมิ E-pH ในรูปที่ 3-2 จะเห็นว่าเงินเป็นโลหะที่มีตระกูล ในบรรยากาศที่แห้ง โลหะเงินเกิดออกไซด์น้อยมาก ที่อุณหภูมิห้อง และความดันปกติ แต่ถ้าอยู่ในบรรยากาศที่ชื้นหรือเปียก จะเกิดออกไซด์ Ag₂O ที่เสถียรได้ก็ต่อเมื่ออยู่ที่ pH สูง และในสถานะที่มีสารออกซิไดซ์เซอร์ที่รุนแรงเท่านั้น (หรือเกิดที่ศักย์ไฟฟ้าสูง) ซึ่งสถานะเช่นนี้ไม่พบในสถานะปกติในบรรยากาศ ดังนั้นถ้าโลหะเงินอยู่ในบรรยากาศจะเกิดออกไซด์ที่ผิวได้น้อยมาก

ในบรรยากาศที่มี CO_2 (ซึ่งปกติในบรรยากาศมีอยู่มากพอ) CO_2 นี้จะละลายในน้ำที่ถูกดูดซับที่ผิวเงินได้เป็นกรดอ่อน แล้วทำปฏิกิริยากับเงินได้เป็น Silver carbonate ซึ่งละลายน้ำได้ดี แต่ถ้าอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นด่างแก่ จะเกิดเป็นผลึกของ Silver carbonate

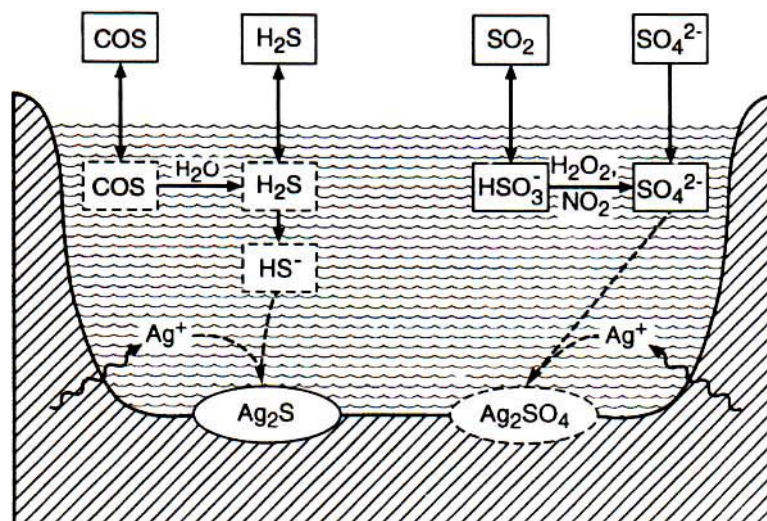


รูปที่ 3-2 แผนภูมิ E-pH ของโลหะเงินที่ 25 °C⁴

- ซัลไฟด์ และซัลเฟต

เนื่องจากที่ผิวโลหะเงินที่ถูกกัดกร่อนจะมี Ag_2S (Acanthite) เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นได้มีการศึกษาถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาและกระบวนการที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิด Reduce sulfur, HS^- , ในบรรยากาศ) ทำปฏิกิริยากับโลหะเงิน นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาถึงสารที่มีซัลเฟอร์ที่สามารถทำปฏิกิริยากับเงินได้ เช่น Carbonyl sulfide (COS), Organic sulfides และ Flowers of sulfur โดยที่ H_2S และ COS อาจพบได้ในบรรยากาศภายในอาคาร Organic sulfur พบน้อย และ flowers of sulfur ไม่พบทั้งในอาคารและนอกอาคาร

รูปที่ 3-3 แสดงถึงสารประกอบที่มีซัลเฟอร์ ทำปฏิกิริยากับโลหะเงิน การเกิด Ag_2S เกิดจากในบรรยากาศในอาคารมี Reduce sulfur สารที่เป็นสาเหตุใหญ่ คือ HS^- (Reduced sulfur) โดยที่ HS^- นี้ อาจเกิดจาก H_2S หรือ COS อยู่ในสารละลาย HS^- อาจเกิดปฏิกิริยากับไอออนของเงิน (Ag^+) ที่ละลายลงมาในสารละลาย หรือไปดูดซับที่ผิวโลหะเงินก่อน แล้วทำปฏิกิริยาต่อไปได้เป็น Ag_2S



รูปที่ 3-3 ภาพแสดงกระบวนการที่โลหะเงินอาจเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนในบรรยากาศ⁴

จากรูปที่ 3-3 น้ำที่อยู่บนผิวเงิน ซึ่งอาจเกิดจากไอน้ำที่ควบแน่นมาเกาะที่ผิว หรืออนุภาคฝุ่นที่สามารถดูดความชื้นได้เกาะที่ผิวเงิน ให้ผลเหมือนกัน คือ มีน้ำอยู่ที่ผิวเงิน ไอออนของโลหะเงิน (Ag^+) ละลายจากโลหะเงินลงมาในน้ำหรือสารละลายที่ผิว แล้วเกิดปฏิกิริยาต่อไป สารที่อยู่ในกรอบสี่เหลี่ยมผืนผ้า คือสารที่อยู่ในสารละลาย และที่อยู่ในกรอบวงรีคืออนุภาคของแข็งที่ตกตะกอนออกมา ส่วนสารที่อยู่ในกรอบสี่เหลี่ยมประ และวงรีประ เป็นสารที่คาดว่าจะเกิดขึ้น แต่ยังไม่มีการยืนยันจากการทดลอง เช่นเดียวกัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นถ้าเป็นลูกศรเส้นประ แสดงถึงกลไกยังไม่มีการยืนยันที่แน่นอน

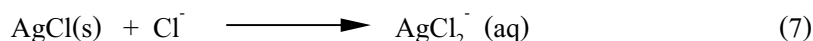
ในบรรยากาศ ออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ไม่ได้เกิดจาก Reduced sulfur แต่ออกซิไดซ์ซัลเฟอร์เกิดจาก ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และอนุภาคของซัลเฟตในบรรยากาศ โดยจะเกิดปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) หรือ โอโซน (O_3) ก็สามารถเกิดเป็นเงินซัลเฟต หรือไบซัลเฟตได้

จากการทดลองพบว่า เงินจะไวหรือเกิดปฏิกิริยากับ H_2S และ COS ได้เร็วกว่า (One order of magnitude) ทำปฏิกิริยากับ SO_2 การที่เกิดเป็นเงินซัลเฟตได้นั้นต้องมี SO_2 อยู่ในอากาศชั้น เป็นปริมาณมาก คือ ประมาณ 2-3 เท่าของปริมาณ SO_2 ที่พบในบรรยากาศปกติ

การเกิดเป็นเงินซัลไฟได้นั้น ต้องมีออกซิไดซ์เซอร์ในสภาวะแวดล้อมด้วย เช่น O_3 , NO_2 และ Cl_2

- คลอไรด์

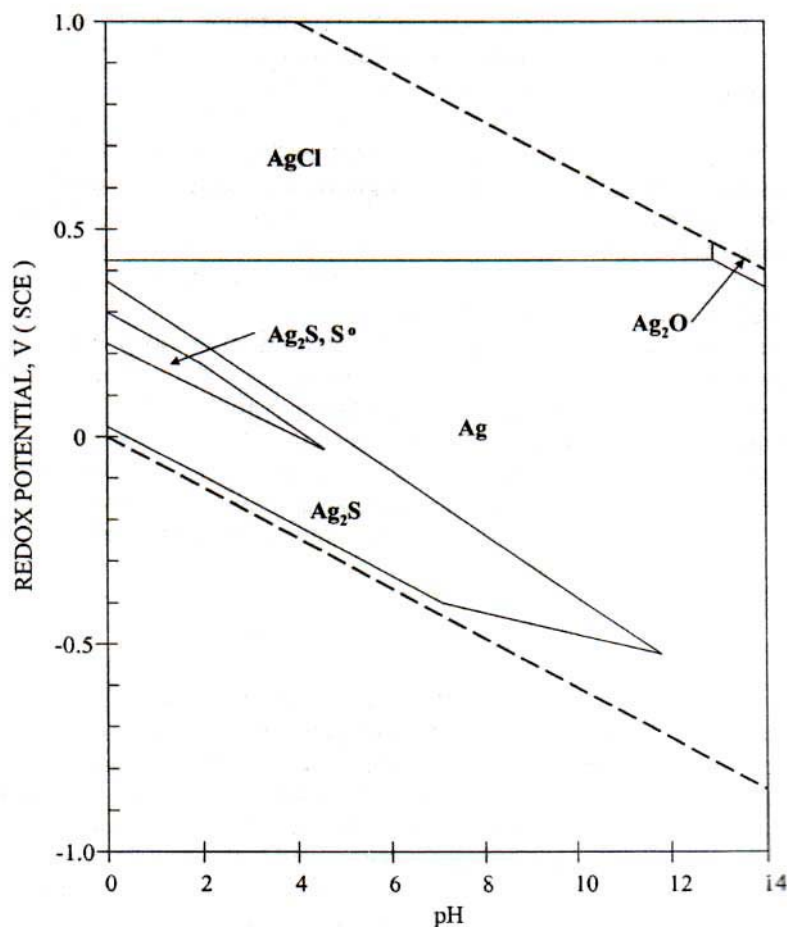
เมื่อในบรรยากาศมีคลอรีน (Cl_2) ซึ่งละลายน้ำได้ HCl หรืออนุภาคที่มีคลอไรด์อยู่เกาะติดที่ผิวโลหะเงิน คลอไรด์จะทำปฏิกิริยากับโลหะเงินได้สารประกอบเชิงซ้อนของ AgCl หรือถ้าในน้ำที่ผิวโลหะเงินมีคลอไรด์อยู่จะเกิดเป็น AgCl เมื่อน้ำระเหยไปหมด จะเหลือ AgCl เกาะติดที่ผิวเงิน AgCl ละลายได้ในกรดไนตริกเข้มข้น หรือกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น ดังนั้นหากในน้ำที่ผิวเงินมี Cl^- ก็จะเกิดเป็น AgCl แต่เมื่อน้ำค่อย ๆ ระเหยไป จะทำให้ความเข้มข้นของ Cl^- เพิ่มมากขึ้น จนอาจเกิดปฏิกิริยา



- สารที่มีไนโตรเจน

โดยทั่วไปโลหะเงินเกิดปฏิกิริยากับ NO_2 ได้น้อยมาก และจะทำปฏิกิริยากับแอมโมเนีย (NH_3) เข้มข้นได้น้อยเช่นกัน

จากแผนภูมิ E-pH สามารถระบุการกัดกร่อนของโลหะเงินดังแสดงในรูปที่ 3-4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าโลหะเงินบริสุทธิ์, Ag_2S และ AgCl มีเสถียรภาพดี เนื่องจากเสถียรในบริเวณกว้าง ทั้งนี้เนื่องมาจากน้ำที่อยู่ในบรรยากาศที่ต้องสัมผัสกับอากาศและฝุ่นละอองจะมี Redox potential ประมาณ 0.2-0.3 โวลต์ ในช่วง pH 2-6 ดังนั้นที่ผิวเงินที่เกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อน จะพบ Ag_2S และโลหะบางส่วนอาจไม่เกิดปฏิกิริยา แต่ถ้าสภาวะที่สารละลายมีฤทธิ์ออกซิไดซ์ที่รุนแรง จะพบ AgCl ที่ผิวเงินได้ด้วย จากรูปที่ 3-4 จะเห็นได้ว่าจะไม่พบ Ag_2CO_3 , Ag_2SO_4 หรือ Ag_2O เลย



รูปที่ 3-4 แผนภูมิ E-pH ของโลหะเงิน แสดงถึงสารประกอบที่อาจเกิดขึ้น⁴

2.4 คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะเงินที่ถูกกัดกร่อน (Physical characteristics of silver corrosion)

อัตราการกัดกร่อนของเงินในบรรยากาศภายในอาคาร ชายทะเล ในเมือง และในอุตสาหกรรม แสดงไว้ในตารางที่ 3-2 เมื่อโลหะเงินถูกกัดกร่อน หรือทำปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อมทำให้มีน้ำหนักเพิ่มขึ้น อัตราการกัดกร่อนของโลหะเงินในบรรยากาศภายในอาคาร ชายทะเล และอุตสาหกรรม มีค่าใกล้เคียงกับ อลูมิเนียมในสภาพบรรยากาศเดียวกัน อย่างไรก็ตาม อัตราการกัดกร่อนจะต่ำกว่าสังกะสี พอลิเมอร์ และต่ำกว่าเหล็กมากเมื่ออยู่ในสภาพบรรยากาศเดียวกัน บรรยากาศที่ควบคุมความชื้นให้อยู่ในระดับต่ำ และกรองฝุ่นละออง จะทำให้อัตราการกัดกร่อนของโลหะเงินต่ำกว่าด้วย แต่ถ้าสภาพบรรยากาศในอากาศที่ไม่มีการควบคุมความชื้น อัตราการกัดกร่อนของโลหะเงินมีค่าสูง และในบรรยากาศอุตสาหกรรมที่มีสภาพกัดกร่อนรุนแรง โลหะเงินก็ถูกกัดกร่อนได้มากเช่นกัน

เมื่อโลหะเงินถูกกัดกร่อนเกิดผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเป็นฟิล์มปกคลุมที่ผิว แต่ฟิล์มที่เกิดขึ้นมักเกิดไม่สม่ำเสมอ แต่ถ้าเกิดเป็นชั้นของเงินซัลไฟด์ ฟิล์มที่เกิดขึ้นอาจจะติดแน่นหรือไม่ก็ได้ โดยทั่วไปถ้าโลหะเงินเกิดการกัดกร่อนในบรรยากาศ มักไม่สม่ำเสมอ

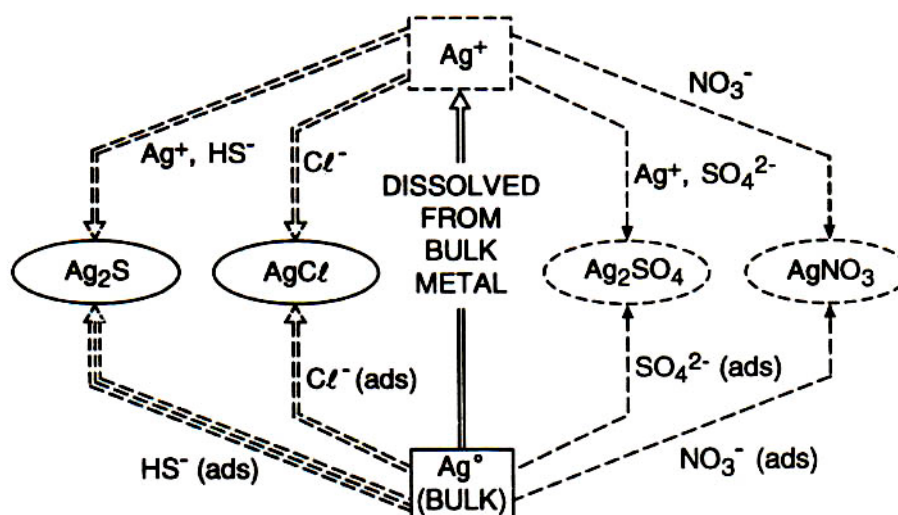
พฤติกรรมการกักตร่อนของโลหะในบรรยากาศนั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับสภาพบรรยากาศแล้ว ยังต้องพิจารณาถึงตำแหน่งบนโลหะที่เป็นจุดเริ่มต้นของการกักตร่อนที่ผิวด้วย เช่น สภาพที่อาจทำให้มีน้ำตกค้างอยู่ได้นาน หรือสภาพผิวที่ทำให้น้ำเกาะอยู่ หรือเปียกผิวได้ดี

ตารางที่ 3-2 อัตราการกักตร่อนของโลหะเงินในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ⁴

Locale	Number of sites	Median value (ng/(cm ² ·hr))	Range (ng/(cm ² ·hr))
Indoor	57	310	5-730
Marine	1	97	—
Urban	11	82	67-192
Industrial	4	410	80-1270

2.5 การเกิดปฏิกิริยา

รูปที่ 3-5 แสดงถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น เมื่อโลหะเงินเกิดการกักตร่อน



รูปที่ 3-5 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขณะที่เงินเกิดการกักตร่อน⁴

จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาการกักตร่อนของโลหะเงินในบรรยากาศ จึงต้องสนใจว่าสารที่ทำให้โลหะเงินเกิดการกักตร่อนคืออะไร และมาจากแหล่งใด เช่น Ag_2S (Acanthite) เกิดจากโลหะเงินทำปฏิกิริยา H_2S หรือ COS (Carbonyl sulfide) ซึ่งแหล่งของสารทั้ง 2 นี้ มาจากโรงงานผลิตกระดาษ, โรงกลั่นน้ำมัน, โรงบำบัดน้ำเสีย, การหมัก หรือเน่าของผัก หรือ ภูเขาไฟ ซึ่งแม้จะเป็นแหล่งจากบรรยากาศภายนอก แต่สารเหล่านี้สามารถถูกพาเข้ามาในภายในอาคารได้เช่นกัน

ส่วนแหล่งของ H_2S ที่มักพบในอาคารมาจากก๊าซที่ปล่อยออกมาจากถังกระดาษ และ การปรุงอาหาร

โครงการการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของโลหะเงินเพื่อการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ

รศ.สมนึก วัฒนศรีกุล ผศ.ศิริพร ดาวพิเศษ อ.สุรัตน์ วรรณศรี

ก๊าซคลอรีนและอนุภาคคลอรีน ที่อยู่ในบรรยากาศนอกอาคารนั้นมาจาก การเผาไหม้ของถ่านหิน การระเหยของน้ำทะเล และภูเขาไฟ แหล่งคลอรีนภายในอาคารมาจากสารเคมีที่ใช้ทำความสะอาด หรือการสลายตัวอย่างช้า ๆ ของ PVC ที่ใช้เป็นฉนวน อย่างไรก็ตาม อนุภาคคลอรีน กัดกร่อนโลหะเงินได้มากกว่าก๊าซคลอรีน

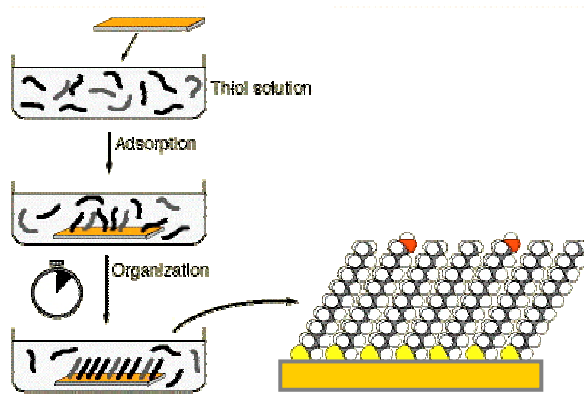
โดยสรุป เมื่อโลหะเงินอยู่ในบรรยากาศเกิดการกัดกร่อน แล้วเกิดเป็นฟิล์มปกคลุมผิวอยู่นั้น ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการกัดกร่อน ประกอบด้วย Ag_2S เป็นส่วนใหญ่ และมี AgCl บ้าง หากในสภาพแวดล้อมมีคลอรีนสูง โลหะผสมเงินก็มีพฤติกรรมคล้ายกับโลหะเงิน ยกเว้นว่าธาตุเงินที่เติมในโลหะเงินนั้นมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่า

โลหะเงินต่างจากโลหะอื่น คือ เมื่อเกิดการกัดกร่อนแล้ว จะไม่เกิดเป็นสารประกอบพวกคาร์บอนेट, ซัลเฟต หรือไนเตรท แต่ถ้าอยู่ในบรรยากาศที่ทำให้โลหะเงินเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนได้ เช่น สารประกอบที่มีซัลเฟอร์ แม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อย ก็สามารถทำให้โลหะเงินเกิดการกัดกร่อนได้เช่นกัน ดังนั้นการป้องกันผิวโลหะเงิน หรือการทำความสะอาดเป็นครั้งคราวมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการทำให้โลหะเงินยังคงสภาพผิวไว้ได้

2.6 การสร้างฟิล์มของไฮโดรคาร์บอนบนผิวโลหะเงิน เพื่อป้องกันการหมอง (SAM)

SAM (Self-assembled monolayer) เป็นวิธีการสร้างฟิล์มของ Organomercaptans (thiols)⁷ เพื่อป้องกันผิวของทอง ทองแดง และเงิน ฟิล์มของ SAM ประกอบด้วยโมเลกุลยาวของไฮโดรคาร์บอน โดยที่ปลายด้านหนึ่งติดที่ผิวโลหะ ส่วนปลายอีกด้านเรียงตัวกันดังรูปที่ 3-6 ซึ่งวิธีการนี้ใช้ในการป้องกันการหมองของชิ้นส่วน Semiconductor ปัจจุบันได้ใช้กับโลหะเงินในงานเครื่องประดับ โดยไม่มีผลต่อความเงามัน

ได้มีการพัฒนาการใช้ฟิล์ม SAM บนผิววัสดุหลายชนิด ฟิล์มที่เกิดขึ้นนั้นมีความหนา 2-3 นาโนเมตร สำหรับโลหะเงินเจือปนใช้ Alkanethiols หรือ Alkylmercaptans (เป็นสารไฮโดรคาร์บอน ที่ปลายด้านหนึ่งเป็นซัลเฟอร์) เมื่อโลหะเงินจุ่มในสารละลายของ thiols ซัลเฟอร์ที่ปลายด้านหนึ่งของโมเลกุลจะเกิดพันธะกับผิวโลหะในขณะที่ปลายอีกด้านหนึ่งจะจัดเรียงตัวชี้ไปทางตรงข้ามกับผิวโลหะ และเรียงตัวกันอย่างใกล้ชิดแน่นพอที่จะเกิดแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุล ดังรูปที่ 3-6 ฟิล์มนี้มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า เพราะมีความหนาเพียง 2 นาโนเมตร ซึ่งเหมาะสำหรับงานเครื่องประดับ นอกจากนี้ ถ้าใช้ขนาดความยาวของโมเลกุลที่เหมาะสม ฟิล์ม thiols นี้สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ เพราะโมเลกุลของ thiols สามารถเคลื่อนที่ไปบนผิวโลหะได้



รูปที่ 3-6 วิธีการสร้างฟิล์มของ Organomercaptans (thiols)
เพื่อป้องกันผิวของโลหะเงินเจือ

3. การทดลอง

3.1 ขั้วทดสอบ

3.1.1 ส่วนผสมทางเคมี

ขั้วทดสอบที่ใช้ในการทดลองนี้มี 3 กลุ่ม คือ

Ag-Cu-P มี 5 ส่วนผสม

Ag-Cu-P-In มี 3 ส่วนผสม

Ag-Cu-Zn-In มี 8 ส่วนผสม

ส่วนผสมของขั้วทดสอบที่กำหนดดังแสดงในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 ส่วนผสมที่กำหนดขึ้น เพื่อใช้ในการหล่อขั้วทดสอบ

กลุ่ม	ขั้วทดสอบที่	ส่วนผสม (%)				
		Ag	Cu	Zn	P	In
Ag-Cu-P	P 1	94.90	5.00	-	0.10	-
	P 2	94.80	5.00	-	0.20	-
	P 3	94.70	5.00	-	0.30	-
	P 4	94.60	5.00	-	0.40	-
	P 5	94.50	5.00	-	0.50	-
Ag-Cu-P-In	P In 1	93.90	5.00	-	0.10	1.00
	P In 2	93.80	5.00	-	0.20	1.00
	P In 3	93.70	5.00	-	0.30	1.00
Ag-Cu-Zn-In	Zn In 01	93.90	5.00	1.00	-	0.10
	Zn In 02	93.80	5.00	1.00	-	0.20
	Zn In 03	93.70	5.00	1.00	-	0.30
	Zn In 04	93.60	5.00	1.00	-	0.40
	Zn In 05	93.50	5.00	1.00	-	0.50
	Zn In 10	93.00	5.00	1.00	-	1.00
	Zn In 15	92.50	5.00	1.00	-	1.50
	Zn In 20	92.00	5.00	1.00	-	2.00

3.1.2 การหล่อและกรรมวิธีทางความร้อน²

ขั้วทดสอบที่มีส่วนผสมดังตารางที่ 3-3 หล่อโดยใช้หัวเทอร์ช และการหล่อเหวี่ยงแบบ Lost-Wax Process ขั้วทดสอบที่ได้จากการหลอมหล่อมีลักษณะดังรูปที่ 3-7

โครงการการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของโลหะเงินเพื่อการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ

รศ.สมนึก วัฒนศรีกุล ผศ.ศิริพร ดาวพิเศษ อ.สุรัตน์ วรรณศรี



รูปที่ 3-7 แสดงชิ้นทดสอบที่ได้จากการหล่อ

ชิ้นทดสอบที่ได้จากหล่อ ทุกส่วนผสมจำนวนหนึ่ง นำมาอบเป็นเนื้อเดียว เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างจากเดนไดรต์เป็นเกรนโคย

- เปิดเตาจนร้อนถึงอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส
- เปิดก๊าซไนโตรเจน ในอัตรา 10 ลิตรต่อนาที
- เมื่ออุณหภูมิ ถึง 780 องศาเซลเซียส นำชิ้นทดสอบเข้าเตาอบ
- อบที่อุณหภูมิ 780 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที จากนั้นนำชิ้นงานออกจากเตาแล้วจุ่มน้ำ

ทันที

3.1.3 การเตรียมผิวชิ้นทดสอบ

การเตรียมผิวชิ้นทดสอบ มีการเตรียมผิว 3 วิธีดังนี้

3.1.3.1 การเตรียมผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทราย เพื่อใช้ทดสอบด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

- ขัดชิ้นทดสอบสภาพหล่อ และอบเป็นเนื้อเดียว ด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 240, 360, 500, 800, 1000 และ 1500 ตามลำดับ
- ล้างด้วยน้ำกลั่นในเครื่องอัลตราโซนิก
- ล้างด้วยอะซิโตน แล้วเป่าด้วยลมร้อนให้แห้ง

3.1.3.2 การเตรียมผิวด้วยการขัดเงา เพื่อทดสอบด้วยสารเคมี

- เตรียมผิวชิ้นทดสอบ แล้วนำมาขัดยาขัด ด้วยล้อยผ้าหยาบ
- ล้างด้วยสารละลายเกลือโซเดียม ความเข้มข้น 60 กรัม/ลิตร ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นล้างในน้ำ ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 5 นาที ทำให้แห้งด้วยลมร้อน
- ขัดชิ้นทดสอบยาแดง ด้วยล้อยผ้าขนละเอียด
- ล้างในสารละลายเกลือโซเดียม ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

ขั้นตอนการเตรียมผิวด้วยการขัดเงา แสดงไว้ในรูปที่ 3-8

หมายเหตุ สารละลายที่ใช้ล้างยาขัดยาแดงออกจากชิ้นทดสอบใช้ร่วมกันได้ แต่ถ้าสกปรกมากต้องเปลี่ยนใหม่ ควรใส่ถุงมือขณะล้าง

- จุ่มชิ้นทดสอบในสารละลายกรดซัลฟริก 10% เป็นเวลา 5 นาที แล้วล้างในน้ำกลั่นอีก 2 ครั้ง ในเครื่องอัลตราโซนิก แล้วทำให้แห้งด้วยลมร้อน

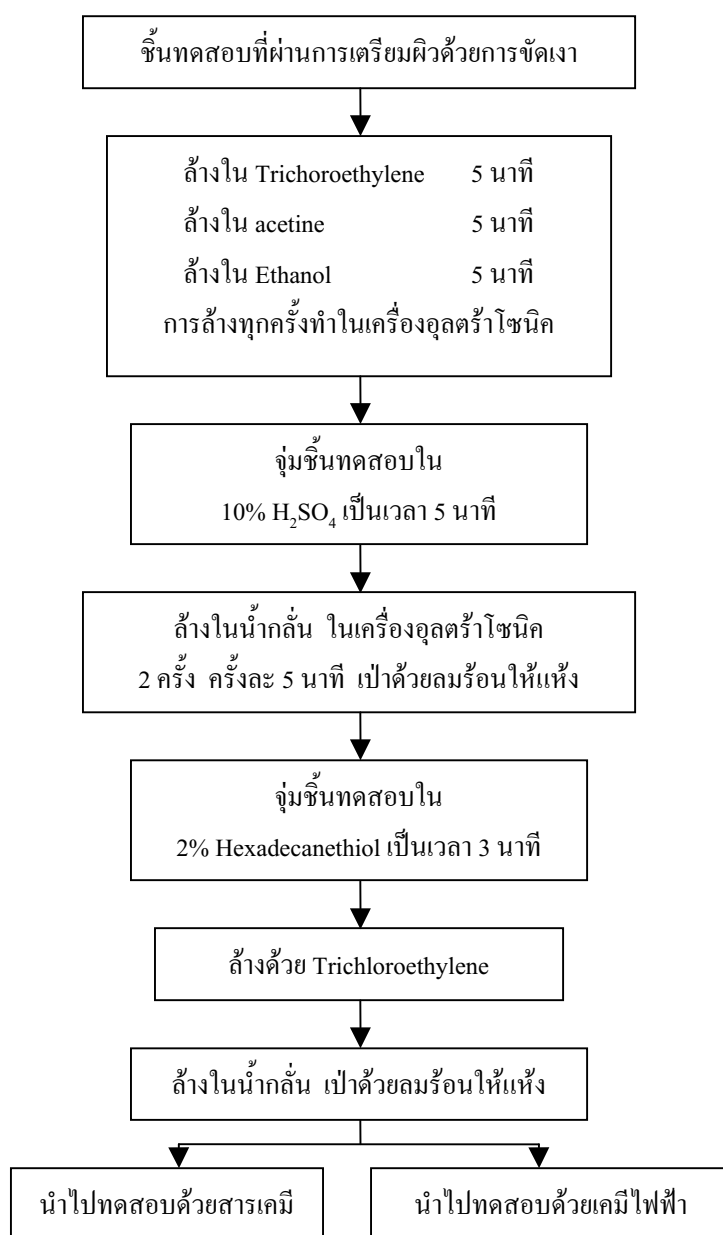
- จุ่มชิ้นทดสอบใน 2% Hexadecanethiol (ใน Trichloroethylene) เป็นเวลา 3 นาที

- ล้างด้วย Trichloroethylene เป่าด้วยลมร้อนให้แห้ง

- ล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วทำให้แห้งด้วยลมร้อน

ขั้นตอน การเตรียมผิวด้วย SAM แสดงไว้ในรูปที่ 3-9

หมายเหตุ ควรให้ชิ้นทดสอบแห้งสนิทก่อน นำไปทดสอบ



รูปที่ 3-9 แสดงขั้นตอนการเตรียมผิวด้วย SAM

3.2 การทดสอบ

การทดสอบความต้านทานการหมองทำได้ 2 วิธี

- การทดสอบด้วยสารเคมี
- การทดสอบด้วยเคมีไฟฟ้า

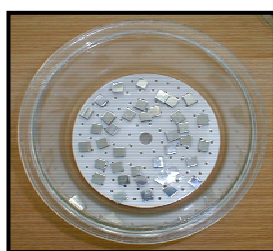
3.2.1 การทดสอบความหมองด้วยสารเคมี

การทดสอบด้วยสารเคมีทำได้ 2 วิธีคือ

3.2.1.1 การทดสอบในบรรยากาศของเหงื่อเทียม

ขั้นตอนที่ผ่านการหล่อและอบเป็นเนื้อเดียว เมื่อผ่านการเตรียมผิวโดยขัดเงา และเตรียมผิวด้วย SAM แล้วนำมาวางในบรรยากาศของเหงื่อเทียมในภาชนะปิด ดังรูปที่ 3-10 โดยเหงื่อเทียมมีส่วนผสมดังนี้

โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride)	20.0 กรัมต่อลิตร
แอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium Chloride)	17.5 กรัมต่อลิตร
ยูเรียหรือคาร์บาไมด์ (Urea or Carbamide)	5.0 กรัมต่อลิตร
กรดอะซิติก (Acetic Acid)	2.5 กรัมต่อลิตร
กรดแลคติก (Lactic Acid)	15.0 กรัมต่อลิตร
กรดไพรูวิก (Pyruvic Acid)	2.5 กรัมต่อลิตร
กรดบิวทิริก (Butyric Acid)	5.0 กรัมต่อลิตร
ปรับค่า pH ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ได้ pH 4.7	

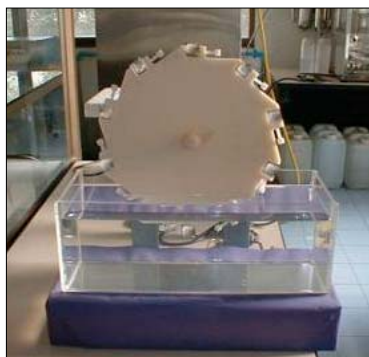


รูปที่ 3-10 แสดงการวางชิ้นทดสอบในบรรยากาศเหงื่อเทียม 12 วัน

3.2.1.2 การทดสอบด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟด์^(1,5,6)

เตรียมสารละลายโดยใช้สารละลายของโซเดียมซัลไฟด์ความเข้มข้น 25 ppm นำชิ้นทดสอบที่ผ่านการเตรียมผิวมาเรียบร้อยแล้ว มาประกอบบนเครื่องทดสอบแสดงดังรูปที่ 3-11 โดยเครื่องทดสอบนี้ หมุนด้วยความเร็วรอบ 12 รอบต่อนาทีและชิ้นทดสอบจุ่มในสารละลายเป็นเวลา 1.5 วินาที และให้สัมผัสอากาศ 3.5 วินาที สลับกันเป็นวงรอบ เวลาที่ทดสอบทั้งหมด 30 นาที เสร็จแล้วนำชิ้นทดสอบ

ออกจากสารละลายล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วล้างด้วยแอลกอฮอล์เพื่อไล่คราบน้ำกลั่น เป่าให้แห้ง บันทึกภาพ ขึ้นทดสอบด้วยกล้องดิจิทัล และเครื่องวัดค่าความสะท้อนแสงและทำการวัดค่าความหยาบผิว



(ก)



(ข)

รูปที่ 3-11 แสดงการจุ่มแซ่ขึ้นทดสอบในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

ก) เครื่องมือที่ใช้ทดสอบสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

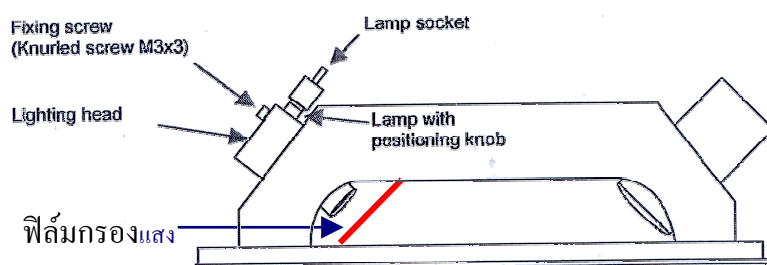
ข) การติดตั้งชิ้นงาน

3.2.1.3 การวัดค่าการสะท้อนแสง

เนื่องจากชิ้นทดสอบมีความมันวาวมาก ซึ่งมีค่ามากกว่า 1,200 หน่วย ซึ่งเกินช่วงที่เครื่องวัดค่าการสะท้อนแสงสามารถวัดได้จึงต้องใส่ฟิล์มกรองแสงเพื่อให้แสงลดลงร้อยละ 50 โดยใช้ฟิล์มยี่ห้อ HI-KOOL 50% แสดงดังรูปที่ 3-12 ข โดยมีขั้นตอนดังนี้ คือ ทำการสอบเทียบ (Calibration) เครื่องวัดการสะท้อนแสง ดังรูปที่ 3-12 ก ด้วยชิ้นมาตรฐานที่มาพร้อมกับเครื่อง โดยมีค่าการสะท้อนแสงมาตรฐานอยู่ที่ 95.1 หน่วย และทำการวัดค่าการสะท้อนแสงชิ้นมาตรฐานโดยวัดได้ค่า 45 หน่วย ซึ่งค่าลดลงจริงร้อยละ 48 และนำชิ้นทดสอบมาวัดการสะท้อนแสง



(ก)



(ข)

รูปที่ 13-2 แสดงเครื่องมือวัดค่าการสะท้อนแสง

ก) ชุดทดสอบวัดค่าการสะท้อนแสง

ข) การติดตั้งฟิล์มกรองแสง

3.2.1.4 การวัดความหยาบผิว

ทำการ Calibration เครื่องวัดความหยาบดังรูปที่ 3-13 ผิวด้วยชิ้นงานมาตรฐานที่มาพร้อมกับเครื่อง และนำชิ้นทดสอบมาวัดความหยาบผิว



รูปที่ 3-13 แสดงเครื่องมือที่ใช้วัดความหยาบผิว

3.2.2 วิธีทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

นำชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมผิวมาติดตั้งเข้ากับชุดทดสอบเคมีไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3-14 โดยใช้เทคนิค ดังนี้

ก) เทคนิคการวัดศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน โดยเวลาที่ใช้ในการทดสอบ 15 นาที

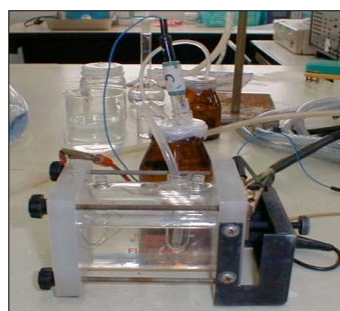
ข) เทคนิคโพเทนทิโอดินามิก โดยตั้งค่าทดสอบ ดังนี้

Scan Rate	100 มิลลิโวลต์ต่อนาที
ศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นต่ำกว่าศักย์ที่ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน	100 มิลลิโวลต์
ศักย์ไฟฟ้าสูงสุด	600 มิลลิโวลต์
สารละลายโซเดียมคลอไรด์	0.01 โมลต่อลิตร
ขั้วอ้างอิง	Ag/AgCl
ความหนาแน่นโลหะเงิน	10.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

นำชิ้นทดสอบออกจากสารละลายล้างด้วยน้ำกลั่นและแอลกอฮอล์เพื่อไล่คราบน้ำกลั่น เป่าให้แห้ง นำมา ตรวจสอบด้วยสายตาและบันทึกภาพชิ้นทดสอบด้วยกล้องดิจิทัล



(ก)



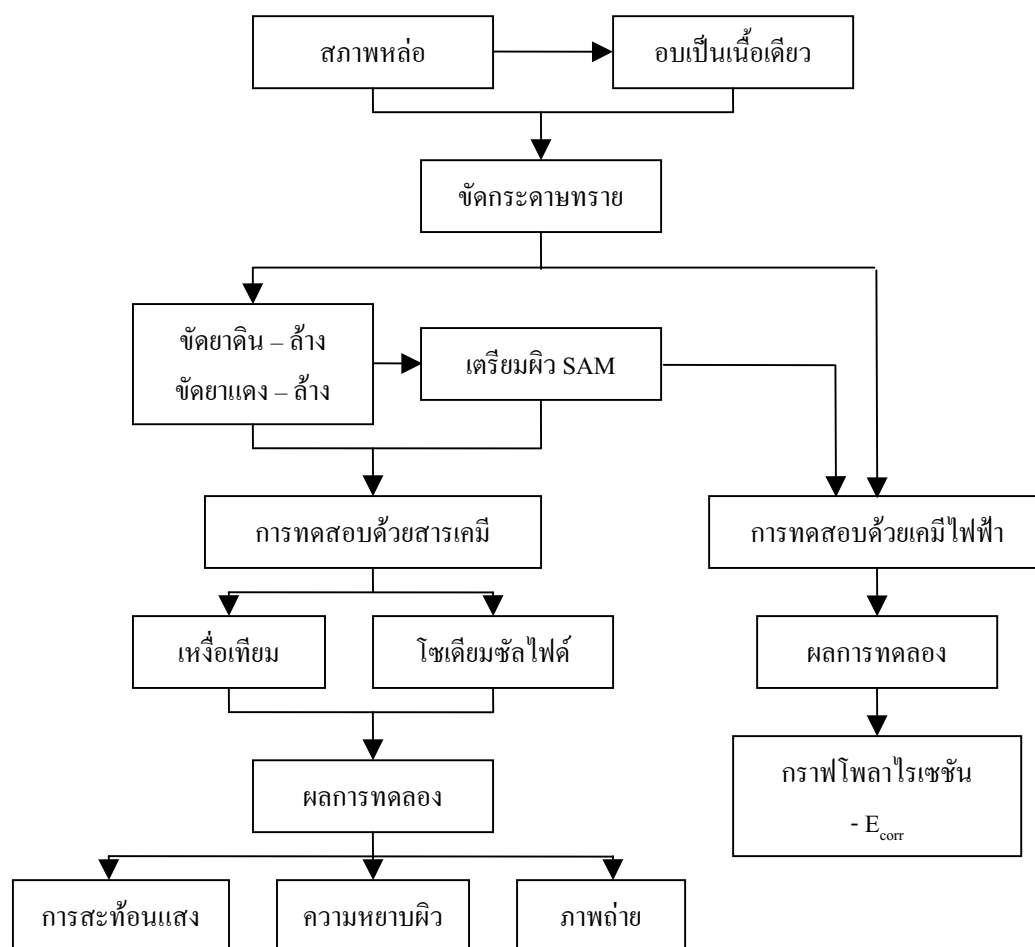
(ข)

รูปที่ 3-14 แสดงการทดสอบด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

ก) ชุดทดสอบวิธีเคมีไฟฟ้า

ข) เซลล์ทดสอบ เคมีไฟฟ้า

การทดสอบด้วยสารเคมีและเคมีไฟฟ้า แสดงไว้ในรูปที่ 3-15



รูปที่ 3-15 แสดงการทดสอบขั้นทดสอบทั้งหมด

4. ผลการทดลอง

ผลการทดลองประกอบด้วย

- การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นทดสอบ
- ผลการทดสอบด้วยสารเคมี
 - การสะท้อนแสง
 - ความหยาบผิว
 - ภาพถ่ายชิ้นทดสอบ
- ผลการทดสอบด้วยเคมีไฟฟ้า
 - ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (E_{corr})

4.1 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นทดสอบ

ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมแสดงไว้ในตารางที่ 3-4 ธาตุเจือที่มีอยู่จริงในชิ้นทดลองนั้นแตกต่างไปจากที่วางแผนไว้บ้าง

ตารางที่ 3-4 ส่วนผสมทางเคมีของชั้นทดสอบที่ได้จากการวิเคราะห์

กลุ่ม	ชั้นทดสอบที่	ส่วนผสมทางเคมี (%)				
		Ag	Cu	Zn	P	In
Ag-Cu-P	P 1	94.441	5.550	-	0.009	-
	P 2	94.688	5.289	-	0.023	-
	P 3	94.666	5.312	-	0.022	-
	P 4	93.887	5.946	-	0.167	-
	P 5	93.834	6.078	-	0.088	-
Ag-Cu-P-In	P In 1	93.922	5.129	-	0.018	0.931
	P In 2	93.229	5.700	-	0.074	0.997
	P In 3	92.786	6.122	-	0.097	0.995
Ag-Cu-Zn-In	Zn In 01	93.85	5.24	0.942	-	0.016
	Zn In 02	93.81	5.21	0.85	-	0.136
	Zn In 03	93.59	5.23	0.993	-	0.188
	Zn In 04	93.36	5.24	1.18	-	0.225
	Zn In 05	93.65	4.96	1.16	-	0.220
	Zn In 1.0	93.44	4.91	0.902	-	0.745
	Zn In 1.5	93.44	4.56	0.783	-	1.220
	Zn In 2.0	92.65	4.75	0.864	-	1.690

4.2 ผลการทดสอบด้วยสารเคมี

4.2.1 ผลการทดสอบด้วยเหงื่อเทียม

การสะท้อนแสงและความหยาบผิว จากชั้นทดสอบทั้งสภาพหล่อและอบเป็นเนื้อเดียว ที่เตรียมผิวโดยการขัดเงาและสร้างฟิล์ม แสดงไว้ในตารางที่ 3-5 และ 3-6 ตามลำดับ ส่วนกราฟการสะท้อนแสงและความหยาบผิวของชั้นทดสอบ แสดงไว้ในรูปที่ 3-16, 3-17, 3-18 และ 3-19

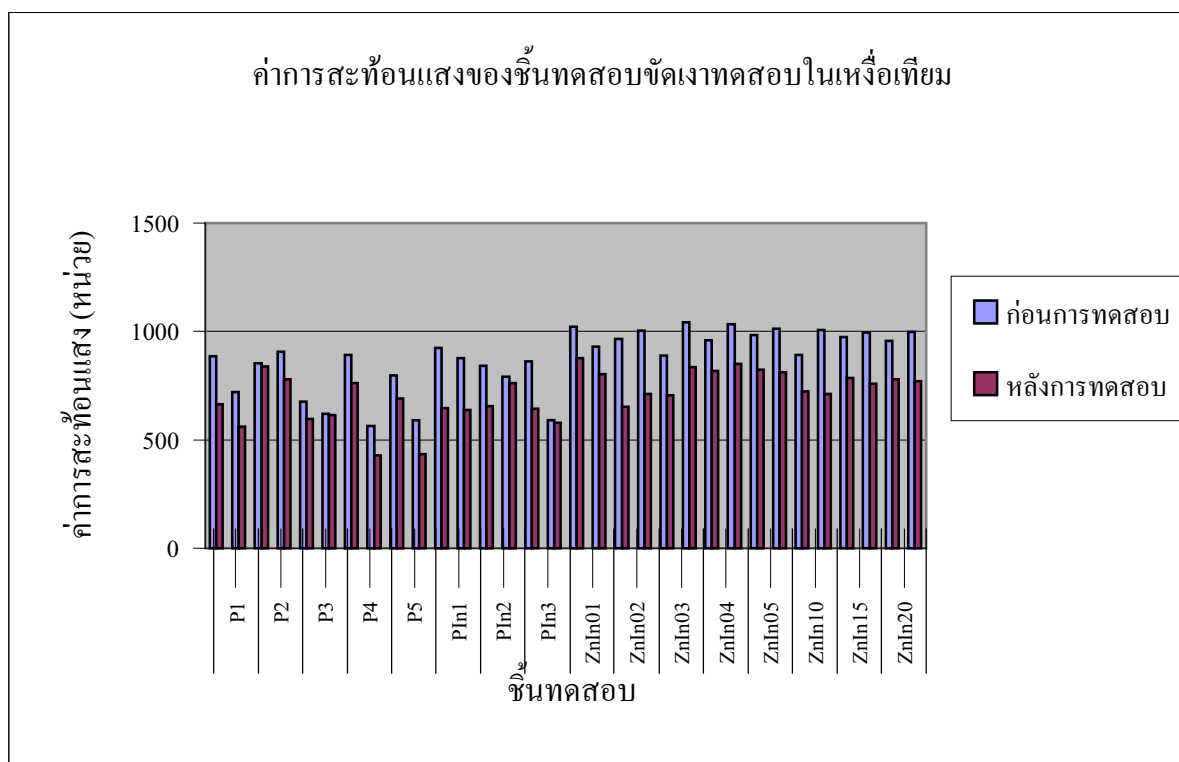
หมายเหตุ ชั้นทดสอบที่ผ่านการเตรียมผิวด้วย SAM เมื่อชั้นทดสอบผ่านการจุ่มในกรดซัลฟูริกแล้วทำให้แห้ง จึงวัดการสะท้อนแสงและความหยาบผิว ทั้งนี้เพราะหากวัดหลังจากเสร็จสิ้นวิธีการเตรียมผิว อาจทำให้ชั้นของฟิล์มเสียหายได้

ตารางที่ 3-5 การสะท้อนแสงจากการวิเคราะห์

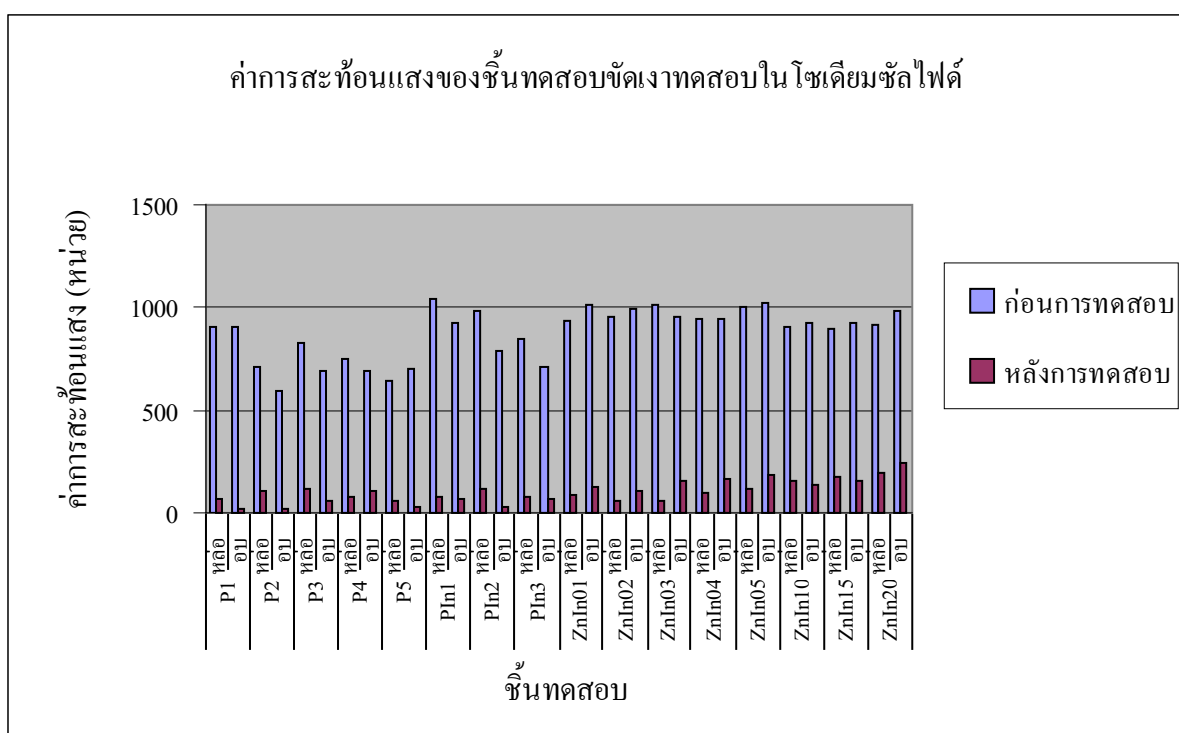
การสะท้อนแสง (หน่วย)		ชุดเงา								SAM							
		เหลืองเทียม				Na ₂ S				เหลืองเทียม				Na ₂ S			
		หล่อ		อบ		หล่อ		ก่อน	หลัง	หล่อ		ก่อน	หลัง	หล่อ		ก่อน	หลัง
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง			ก่อน	หลัง			ก่อน	หลัง		
Ag-Cu-P	P1	886	664	720	560	902	69	901	19	922	715	598	540	579	544	792	765
	P2	854	840	907	781	713	106	593	23	954	941	854	804	838	718	490	418
	P3	677	597	619	615	830	118	688	60	532	449	555	376	442	320	490	334
	P4	891	762	563	428	746	75	692	106	741	722	484	480	753	612	626	445
	P5	797	692	592	435	638	54	700	29	675	659	640	539	532	521	457	366
Ag-Cu-P-In	Pln1	924	646	878	638	1040	82	921	66	810	840	802	775	819	726	699	610
	Pln2	843	656	791	763	981	116	790	34	898	821	930	945	886	843	703	619
	Pln3	862	644	592	580	845	77	712	68	644	575	542	479	973	880	502	460
Ag-Cu-Zn-In	Znln01	1023	878	929	802	934	91	1010	125	882	690	931	893	898	868	1053	1006
	Znln02	966	654	1003	712	957	54	996	111	896	808	900	806	962	914	965	916
	Znln03	889	707	1041	835	1012	54	952	153	991	947	949	904	972	938	791	788
	Znln04	959	817	1032	851	949	93	942	167	957	775	900	852	974	951	932	902
	Znln05	982	823	1014	812	1002	120	1018	182	866	776	806	794	938	887	954	936
	Znln1.0	892	724	1008	711	910	159	926	137	824	688	719	671	869	758	831	758
	Znln1.5	974	786	994	759	895	175	921	159	818	721	704	651	982	913	804	736
	Znln2.0	958	781	998	772	918	193	981	241	965	865	707	675	960	904	943	844

ตารางที่ 3-6 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบ

ความหนาแน่นผิว Ra (ไม่ครอน)		ขีดเงา						SAM									
		เหลืองเทียม			Na2S			เหลืองเทียม			Na2S						
		หล่อ		อบ		หล่อ		อบ		หล่อ		อบ					
ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง		
Ag-Cu-P	P1	0.035	0.045	0.035	0.04	0.07	0.07	0.05	0.06	0.045	0.09	0.045	0.085	0.025	0.04	0.035	0.045
	P2	0.035	0.04	0.04	0.04	0.065	0.07	0.035	0.065	0.035	0.035	0.035	0.035	0.022	0.035	0.055	0.06
	P3	0.035	0.04	0.04	0.045	0.07	0.075	0.027	0.04	0.035	0.065	0.05	0.065	0.06	0.065	0.035	0.04
	P4	0.035	0.035	0.035	0.035	0.04	0.045	0.017	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.025	0.04	0.035	0.045
	P5	0.035	0.035	0.035	0.035	0.04	0.045	0.015	0.035	0.035	0.045	0.035	0.035	0.035	0.057	0.035	0.035
Ag-Cu-P-In	Pln1	0.035	0.04	0.04	0.05	0.035	0.04	0.035	0.055	0.035	0.035	0.035	0.035	0.04	0.052	0.035	0.04
	Pln2	0.035	0.035	0.035	0.04	0.04	0.045	0.035	0.055	0.035	0.035	0.035	0.035	0.065	0.065	0.035	0.035
	Pln3	0.04	0.04	0.035	0.04	0.04	0.05	0.017	0.04	0.035	0.04	0.035	0.035	0.06	0.065	0.035	0.035
Ag-Cu-Zn-In	Zln01	0.03	0.04	0.035	0.035	0.035	0.035	0.03	0.035	0.035	0.035	0.043	0.035	0.035	0.04	0.035	0.035
	Zln02	0.03	0.045	0.035	0.035	0.03	0.035	0.03	0.035	0.035	0.035	0.04	0.038	0.035	0.035	0.038	0.04
	Zln03	0.035	0.045	0.033	0.035	0.03	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
	Zln04	0.03	0.04	0.035	0.035	0.03	0.04	0.03	0.04	0.035	0.035	0.048	0.048	0.035	0.035	0.03	0.035
	Zln05	0.035	0.04	0.04	0.035	0.035	0.035	0.035	0.04	0.035	0.035	0.043	0.038	0.03	0.04	0.04	0.04
	Zln1.0	0.035	0.045	0.038	0.038	0.03	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
	Zln1.5	0.03	0.04	0.04	0.035	0.03	0.035	0.035	0.04	0.03	0.03	0.04	0.048	0.03	0.035	0.035	0.035
	Zln2.0	0.03	0.035	0.035	0.04	0.035	0.035	0.03	0.04	0.035	0.035	0.038	0.038	0.03	0.035	0.035	0.038



(ก)

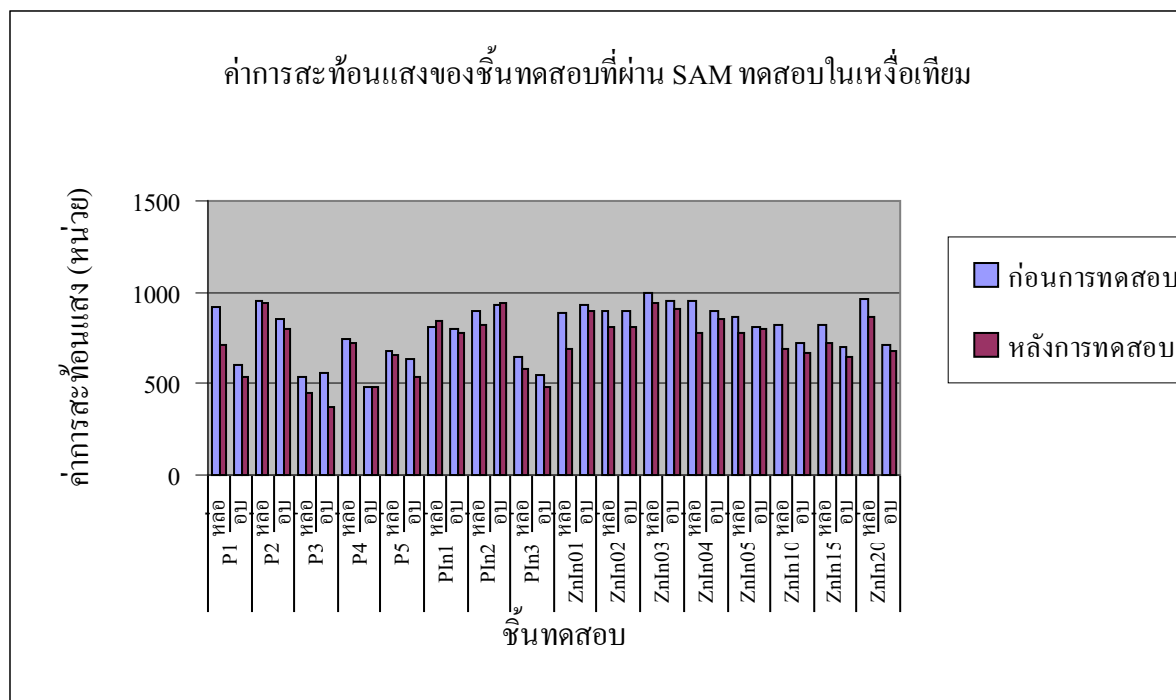


(ข)

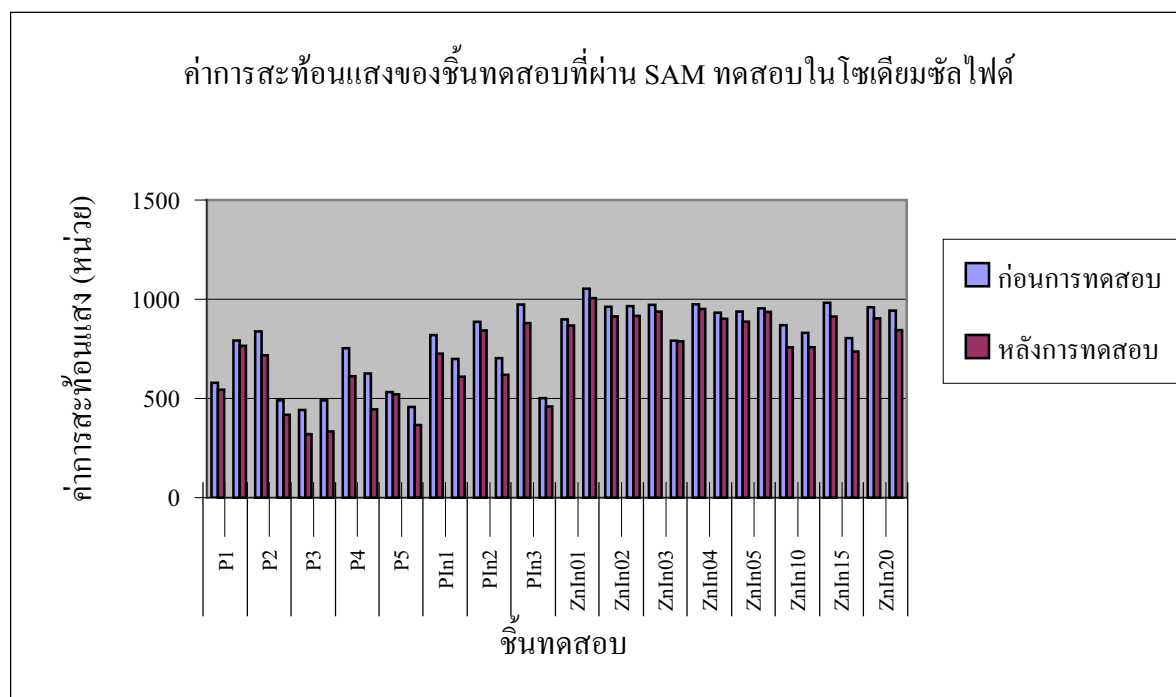
รูปที่ 3-16 การสะท้อนแสงของชั้นทดสอบขี้เถ้าที่ผ่านการทดสอบใน

ก) เหงือเทียม

ข) โซเดียมซัลไฟด์

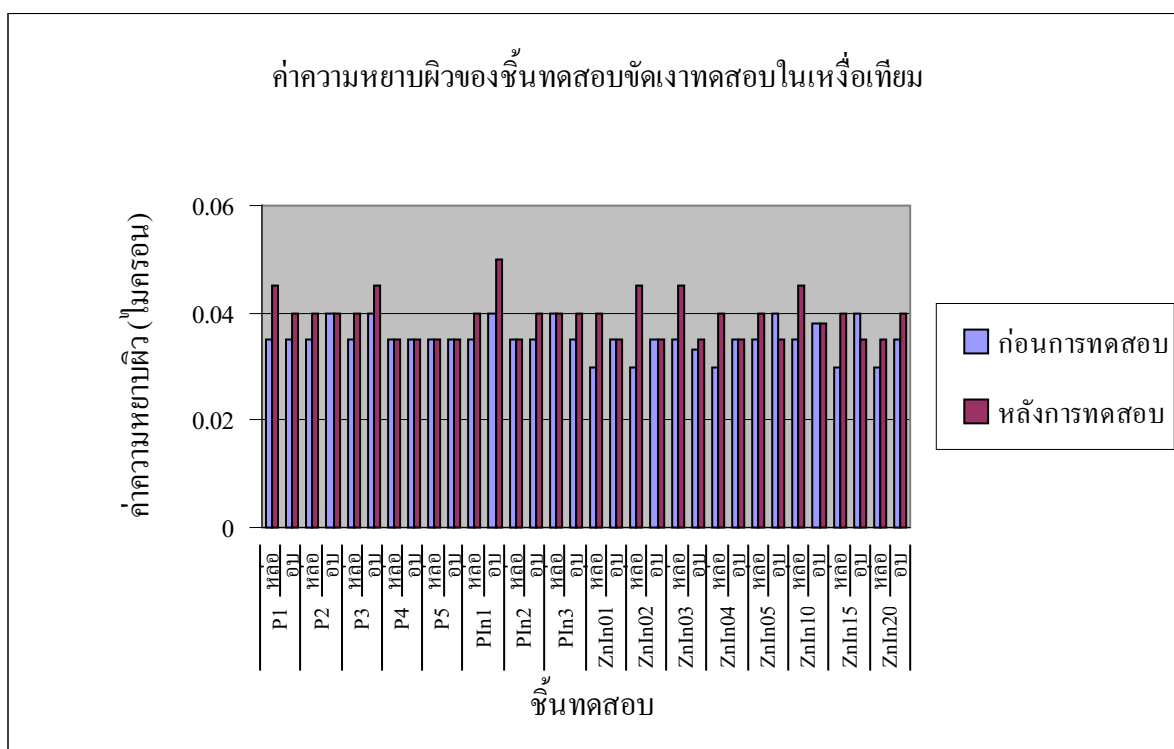


(ก)

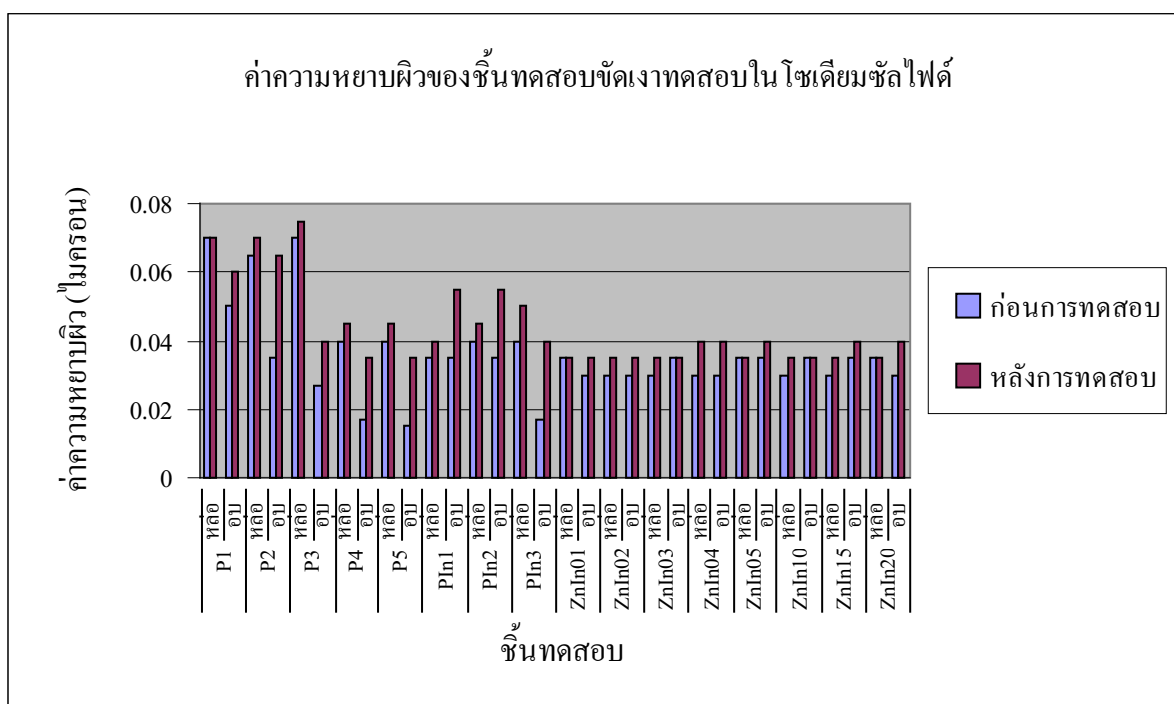


(ข)

รูปที่ 13-7 การสะท้อนแสงของชั้นทดสอบที่สร้างฟิล์ม SAM ที่ผิว ที่ผ่านการทดสอบใน
 ก) เหงื่อเทียม ข) โซเดียมซัลไฟด์



(ก)

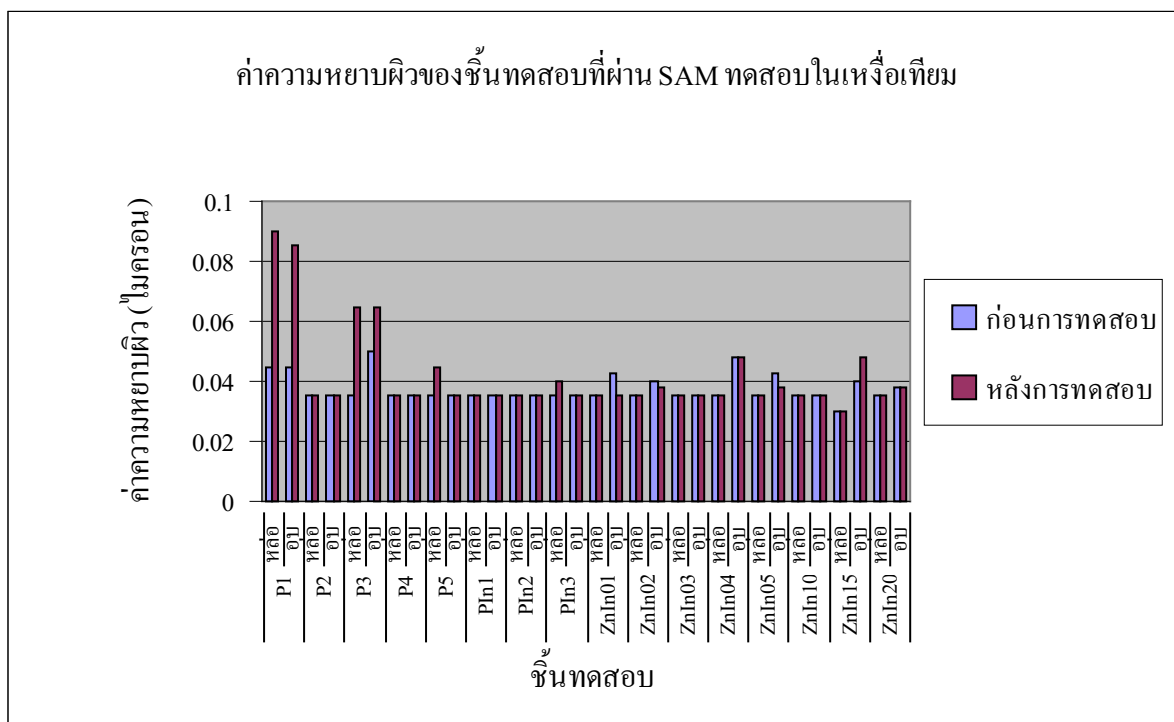


(ข)

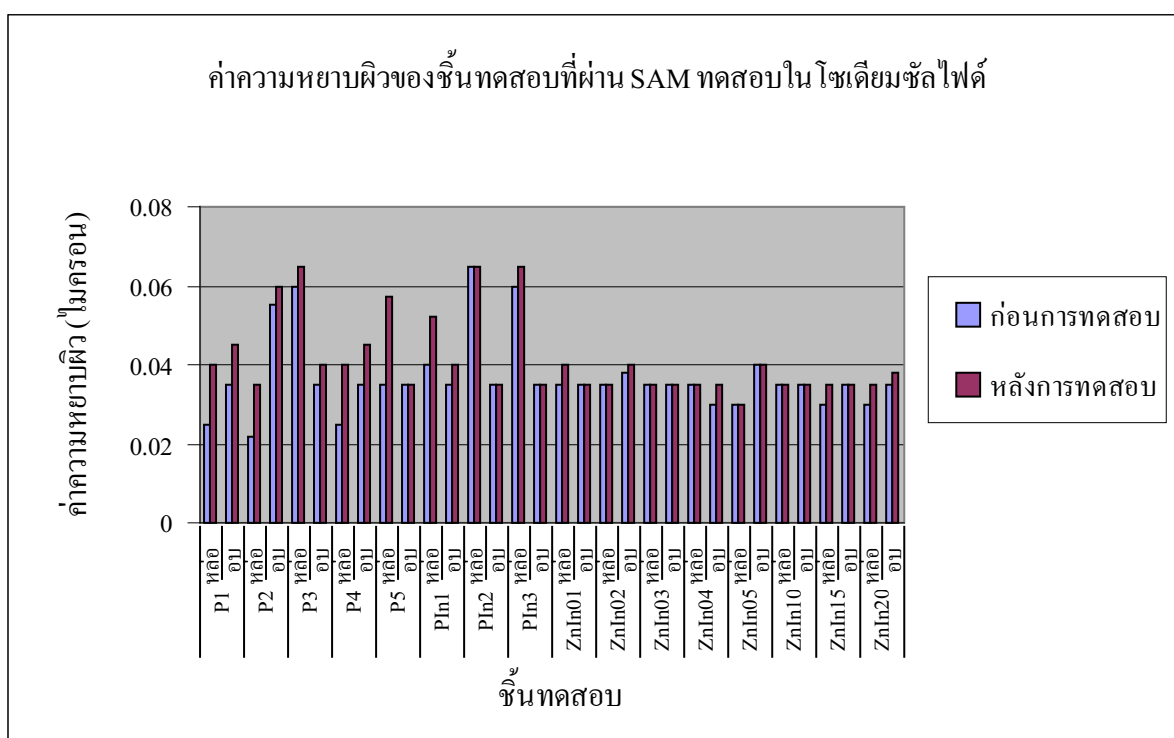
รูปที่ 3-18 ความหยาบผิวของชั้นทดสอบขัดเงาที่ผ่านการทดสอบใน

ก) เหงือเทียม

ข) โซเดียมซัลไฟด์



(ก)



(ข)

รูปที่ 3-19 ความหนาแน่นผิวของชั้นทดสอบที่สร้างฟิล์ม SAM ที่ผิว ที่ผ่านการทดสอบใน

ก) เหงื่อเทียม

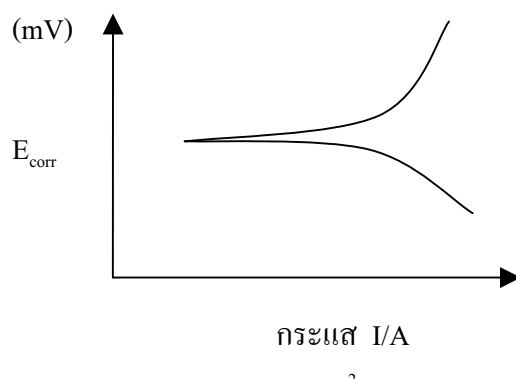
ข) โซเดียมซัลไฟด์

โครงการการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของโลหะเงินเพื่อการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ

รศ.สมนึก วัฒนศรีกุล ผศ.ศิริพร ดาวพิเศษ อ.สุรัตน์ วรรณศรี

4.3 ผลการทดสอบด้วยเคมีไฟฟ้า

จากการทดสอบขั้นตอนทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์ ได้กราฟโพลาริเซชัน ดังรูปที่ 3-20 และจากกราฟนี้ ทำให้ทราบค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (E_{corr}) ดังรูปที่ 3-20 ซึ่งค่า E_{corr} นี้ หากมีค่าต่ำ หมายความว่าโลหะเงินเจือเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย

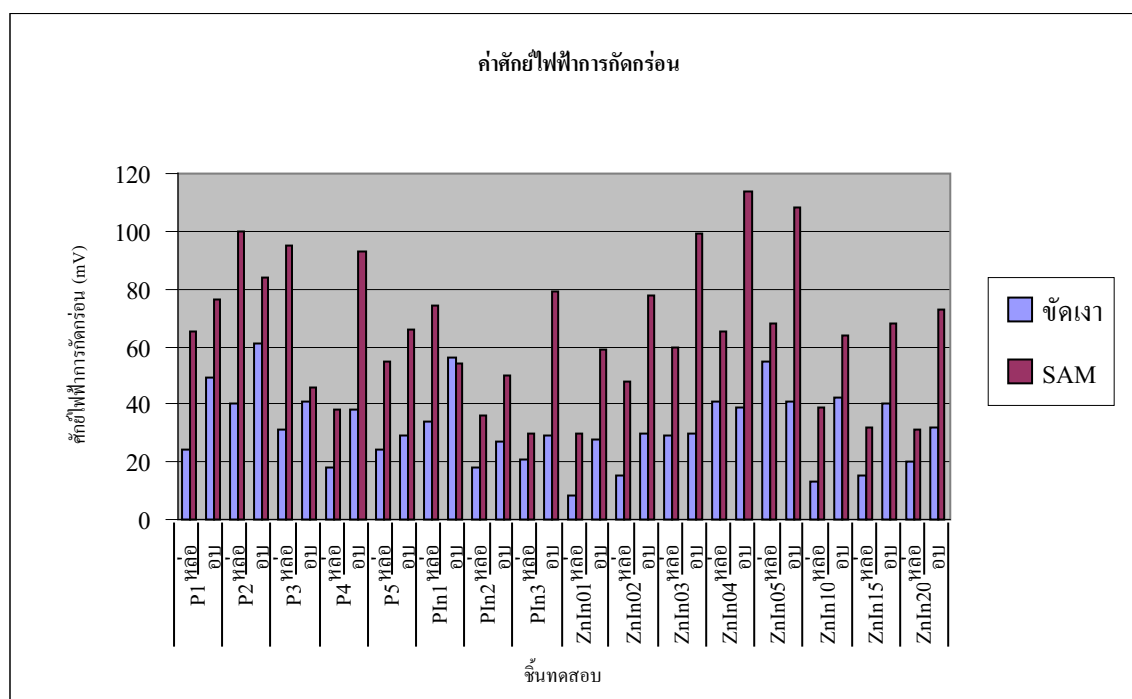


รูปที่ 3-20 กราฟโพลาริเซชันที่ได้จากการทดลอง ขั้นตอนทดสอบด้วยเคมีไฟฟ้า

ขั้นตอนทดสอบขัดเงา และสร้างฟิล์ม SAM เมื่อผ่านการทดสอบด้วยเคมีไฟฟ้า แล้วได้ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน ดังแสดงในตารางที่ 3-7 และกราฟศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน แสดงในรูปที่ 3-21

ตารางที่ 7 ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน E_{corr}

กลุ่ม	ขั้นตอนทดสอบ	ศักย์ไฟฟ้า E_{corr} (mV)			
		หล่อ		อบ	
		ขัดเงา	SAM	ขัดเงา	SAM
Ag-Cu-P	P 1	24	65	49	76
	P 2	40	100	61	84
	P 3	31	95	41	46
	P 4	18	38	38	93
	P 5	24	55	29	66
Ag-Cu-P-In	P In 1	34	74	56	54
	P In 2	18	36	27	50
	P In 3	21	30	29	79
Ag-Cu-Zn-In	Zn In 01	8	30	28	59
	Zn In 02	15	48	30	78
	Zn In 03	29	60	30	99
	Zn In 04	41	65	39	114
	Zn In 05	55	68	41	108
	Zn In 10	13	39	42	64
	Zn In 15	15	32	40	68
	Zn In 20	20	31	32	73

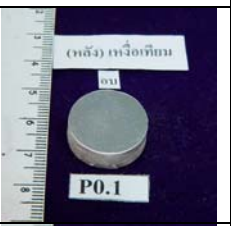
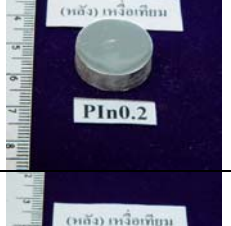


รูปที่ 21 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบ สภาพหล่อและอบที่ผ่านการขัดเงา และสร้างฟิล์ม SAM

4.4 ภาพถ่ายชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบด้วยสารเคมี

ภาพถ่ายชิ้นทดสอบสภาพหล่อและสภาพอบเป็นเนื้อเดียว ที่ผ่านการขัดมัน และสร้างฟิล์ม SAM เมื่อผ่านการทดสอบด้วยสารเคมี คือเหงื่อเทียม และโซเดียมซัลไฟด์แล้ว เปรียบเทียบกับ ภาพถ่ายของชิ้นทดสอบก่อนทดสอบ แสดงไว้ในตารางที่ 8

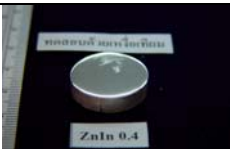
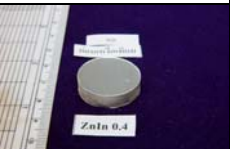
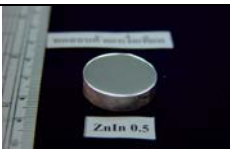
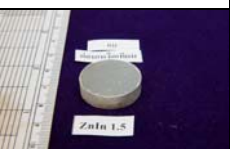
ตารางที่ 8 ภาพถ่ายชิ้นทดสอบขัดเงา ที่ผ่านการทดสอบด้วยเหงือเทียม

ชิ้นงาน	หล่อ		อบ	
	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ
P1				
P2				
P3				
P4				
P5				
PIIn0.1				
PIIn0.2				
PIIn0.3				

โครงการการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของโลหะเงินเพื่อการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ

รศ.สมนึก วัฒนศรีกุล ผศ.ศิริพร ดาวพิเศษ อ.สุรัตน์ วรรณศรี

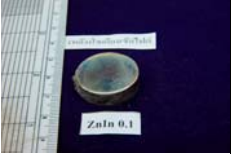
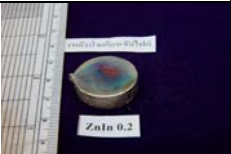
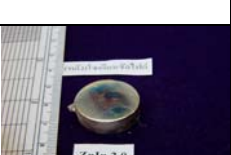
ตารางที่ 8 (ต่อ) ภาพถ่ายชิ้นทดสอบขัดเงา ที่ผ่านการทดสอบด้วยเหงือเทียม

ชิ้นงาน	หล่อ		อบ	
	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ
ZnIn01				
ZnIn02				
ZnIn03				
ZnIn04				
ZnIn05				
ZnIn1.0				
ZnIn1.5				
ZnIn2.0				

ตารางที่ 9 ภาพถ่ายชิ้นทดสอบขัดเงา ที่ผ่านการทดสอบด้วยโซเดียมซัลไฟด์

ชิ้นงาน	หล่อ		อบ	
	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ
P1				
P2				
P3				
P4				
P5				
PIn0.1				
PIn0.2				
PIn0.3				

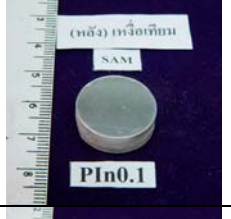
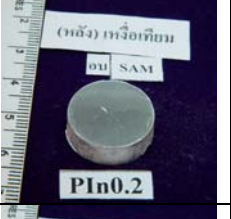
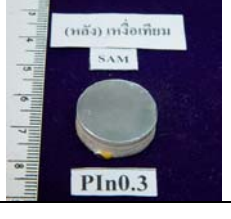
ตารางที่ 9 (ต่อ) ภาพถ่ายขึ้นทดสอบขัดเงา ที่ผ่านการทดสอบด้วยโซเดียมซัลไฟด์

ชิ้นงาน	หล่อ		อบ	
	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ
ZnIn01				
ZnIn02				
ZnIn03				
ZnIn04				
ZnIn05				
ZnIn1.0				
ZnIn1.5				
ZnIn2.0				

โครงการการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของโลหะเงินเพื่อการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ

รศ.สมนึก วัฒนศรีกุล ผศ.ศิริพร ดาวพิเศษ อ.สุรัตน์ วรรณศรี

ตารางที่ 10 ภาพถ่ายชิ้นทดสอบที่สร้างฟิล์ม SAM ที่ผ่านการทดสอบด้วยเหงือเทียม

ชิ้นงาน	หล่อ		อบ	
	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ
P1				
P2				
P3				
P4				
P5				
PIn0.1				
PIn0.2				
PIn0.3				

โครงการการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของโลหะเงินเพื่อการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ

รศ.สมนึก วัฒนศรีกุล ผศ.ศิริพร ดาวพิเศษ อ.สุรัตน์ วรรณศรี