



## รายงานฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาโลหะเงินผสมที่เติมอะลูมิเนียม  
เพื่อปรับปรุงสมบัติต้านทานการหมอง

The development on silver alloy with aluminum addition  
for improving Anti-tarnish property

โดย รองศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสาร์ตันพรและคณะ  
ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

30 พฤษภาคม 2561

สัญญาเลขที่ RDG 60T0061

## รายงานฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาโลหะเงินผสมที่เติมอะลูมิเนียม  
เพื่อปรับปรุงสมบัติต้านทานการหมอง

The development on silver alloy with aluminum addition  
for improving Anti-tarnish property

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. รศ. ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร	ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. ดร. สิริวรรณ สกุดตันเจริญชัย	ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชุดโครงการ “การพัฒนาอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม” ปีงบประมาณ 2560

สนับสนุนโดย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานฉบับนี้เป็นของผู้วิจัย วช. - สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

## บทสรุปผู้บริหาร

ตามที่คณะผู้วิจัยได้รับทุนเพื่อสนับสนุนในโครงการวิจัยเรื่อง การพัฒนาโลหะเงินผสมที่เติมอะลูมิเนียม เพื่อปรับปรุงสมบัติต้านทานการหมอง ที่มีระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี ตั้งแต่ 1 พฤษภาคม 2560 ถึง 30 พฤษภาคม 2561 โดยมีวัตถุประสงค์ในการทำวิจัยดังนี้

1. เพื่อศึกษา ผลการเติมอะลูมิเนียม ทองแดงและ สังกะสี ต่อการเปลี่ยนแปลงความต้านทานการหมอง โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของเงินเกรด 935
2. เพื่อหาปริมาณธาตุที่เหมาะสมต่อการผลิต รวมถึงความสามารถการหล่อและ สีผิวสะท้อนของชิ้นงาน เครื่องประดับเงิน เพื่อผลิตในเชิงอุตสาหกรรมได้สะดวก ลดโอกาสการชุบเคลือบผิว
3. เพื่อศึกษาคุณภาพผิวตัวเรือนเงิน มุ่งเน้นในส่วนความต้านทานการหมองสูงและ มีสีผิวสะท้อนเทียบเคียงเงินสเตอร์ลิงผสมทองแดงที่มักเป็นที่ต้องการของตลาด

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ความรู้การผลิตอัลลอยกันหมองที่มีความต้านทานการหมองสูง และมีความเป็นไปได้ในการผลิตในประเทศไทย
2. สถานประกอบการ ที่ร่วมโครงการได้รับความรู้และนำองค์ความรู้ไปผลิตและได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อให้เหมาะสมกับเครื่องมือของสถานประกอบการ
3. ได้เผยแพร่องค์ความรู้จากการวิจัยเพื่อการผลิตจริงและใช้เป็นต้นแบบอัลลอยสำหรับการผลิตในประเทศ

จากจุดประสงค์หลักของงานวิจัยต้องการสร้างอัลลอยเพื่อพัฒนาความต้านทานการหมองด้วยการเติมอะลูมิเนียมสามารถสรุปประเด็นหลักของงานวิจัยได้ตามกลุ่มธาตุหลักในเงินซึ่งแบ่งออกเป็น เงินผสมอะลูมิเนียมและเงินผสมสังกะสีได้ดังนี้

#### 1. กลุ่มเงินผสมอะลูมิเนียม

กลุ่มเงินผสมอะลูมิเนียมสามารถแยกพิจารณาตามธาตุที่เติมได้แก่ ซิลิคอน ทองแดง สังกะสี และ สตรอนเชียม ดังรายละเอียดต่อไปนี้

**ซิลิคอน** : การเติมซิลิคอนในเงินผสมอะลูมิเนียมทำให้เกิดเฟสซิลิคอนสูงซึ่งจะมีปริมาณมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิคอน โดยการเพิ่มซิลิคอนทำให้การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรง (ทั้งความต้านทานแรงดึงสูงสุด และความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก) เปลี่ยนไปบ้าง แต่มีผลลดอัตราการกัดตัวอย่างสูง เนื่องจากเฟสซิลิคอนสูงมีลักษณะเป็นโครงตาข่าย อีกทั้งการเพิ่มปริมาณซิลิคอนจะช่วยเพิ่มความต้านทานการหมอง

และกัดกร่อนในสารละลาย NaCl 1 % ที่การเติมซิลิโคนไม่เกิน 0.5 % แต่เมื่อเติมซิลิโคนที่ 0.8-1 % กลับส่งผลทำให้ค่า DE\* ซึ่งแสดงความหมองที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างชัดเจน

**สตรอนเซียม** : สตรอนเซียมแยกตัวในเงินผสมอะลูมิเนียมได้ดี และมีกรรมตัวกับซิลิโคนและ อะลูมิเนียม ทำให้สมบัติทางกลลดลงทั้งความแข็งแรง (ทั้งความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก) และลดอัตราการยึดซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงและเพิ่มจำนวนของโครงสร้างเฟสที่มีอะลูมิเนียมหรือซิลิโคนสูง ส่งผลให้สามารถเติมได้ในปริมาณต่ำ การเติมสตรอนเซียมในช่วง 0.01% ช่วยลดค่า DE\* เพิ่มความต้านทานการหมอง และลดการกัดกร่อนในสารละลาย NaCl ซึ่งเทียบเคียงได้กับน้ำทะเล แต่จะพบสีผิวหลังหล่อคล้ำขึ้น

**สังกะสี** : การเติมสังกะสีในเงินผสมอะลูมิเนียมทำให้ค่าความแข็งแรง (ทั้งความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก) เพิ่มขึ้น โดยไม่ลดอัตราการยึดตัวเนื่องจาก สังกะสีสามารถละลายในเนื้อพื้นเป็นสารละลายเนื้อเดียวได้ดี อีกทั้งยังลดค่า DE\* เพิ่มความต้านทานการหมอง และลดการกัดกร่อนในสารละลาย NaCl แต่ผิวของโลหะอาจเกิดคราบสีเหลืองคล้ำเมื่อมีการใช้งานในบรรยากาศทั่วไปได้ง่ายโดยเฉพาะในช่วงการเติมสังกะสีที่สูง

**ทองแดง** : โดยทั่วไปแล้วโลหะเงินผสมทองแดงอย่างเดียวจะมีสมบัติทางกลที่สูงเพราะทองแดงเป็นธาตุที่เพิ่มความแข็งแรง ความแข็งให้กับโลหะผสมซึ่งมีผลมาจากโครงสร้างยูเทคติกระหว่างเฟสที่มีเงินสูงและเฟสที่มีทองแดงสูง การเติมทองแดงในเงินผสมอะลูมิเนียมทำให้ค่าความแข็งแรง (ทั้งความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก) เพิ่มขึ้น และลดอัตราการยึดตัวเนื่องจากการเกิดเฟสทองแดงมากขึ้นในโครงสร้างจุลภาค อีกทั้งยังลดค่า DE\* เพิ่มความต้านทานการหมอง และลดการกัดกร่อนในสารละลาย NaCl

## 2. กลุ่มเงินผสมสังกะสี

กลุ่มเงินผสมอะลูมิเนียมสามารถแยกพิจารณาตามธาตุที่เติมได้แก่ สังกะสี ซิลิโคน และ สตรอนเซียม ดังรายละเอียดต่อไปนี้

**สังกะสี** : การเติมสังกะสีทดแทนอะลูมิเนียมทำให้ค่าความแข็งแรง(ทั้งความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก) ลดลง อัตราการยึดตัวเพิ่มขึ้นเนื่องจากความสามารถในการละลายของธาตุสังกะสีในเงินสูงกว่าการละลายของอะลูมิเนียมในเงิน

**ซิลิโคน** : การเติมซิลิโคนในเงินผสมสังกะสีส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงด้านโครงสร้างจุลภาคเนื่องจากการเพิ่มซิลิโคนทำให้ปริมาณของเฟสซิลิโคนเพิ่มสูงและ ทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง เช่นเดียวกับอัตราการยึดตัวที่ลดลง โดยค่า DE\*ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก อีกทั้งยังลดการกัดกร่อนในสารละลาย NaCl

**สตรอนเชียม** : สตรอนเชียมสามารถแยกตัวในเงินผสมสังกะสีได้ดี และมักรวมตัวกับซิลิคอนและอะลูมิเนียมทำให้สมบัติทางกลลดลงทั้งความแข็งแรง แต่เนื่องจากการเติมสตรอนเชียมอยู่ในช่วงต่ำคือ 0.01% ทำให้ความแข็งแรงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนักและ อัตราการยืดตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

จากผลสรุปข้างต้นหากพิจารณาแนวโน้มการเลือกอัลลอยที่มีความต้านทานหมองสูง ทนการกัดกร่อนในสารละลาย NaCl หรือน้ำทะเลได้ดี พบว่ามีโลหะผสมหลายชนิดที่มีพฤติกรรมดังกล่าว ได้แก่ โลหะผสมหมายเลข 12 (2.8 Al0.1Si) 15(2.8Al0.5Si) 16(2.8Al2.47Zn0.86Cu0.09Sn) 18(2.7Zn0.5Si) 19(2.7Zn0.5Si0.09Al0.01Sr) และ 7(2.8Al) ซึ่งมีความต้านทานการหมองที่เปรียบเทียบกับค่า DE\* ดังรูป 2.31 นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับอัลลอยการค้าที่ใช้ในการผลิตเครื่องประดับได้แก่ เงินผสมทองแดง 5 % (Ag5Cu) และ เงินผสมทองแดง 4.7% อะลูมิเนียม 0.1% (Ag4.7Cu0.1Al) ซึ่งเป็นที่นิยมในปัจจุบัน ผลการวิจัยพบว่าอัลลอยทดลองทุกชนิดทั้งกลุ่ม 12 (2.8Al0.1Si) 15(2.8Al0.5Si) 16(2.8Al2.47Zn0.86Cu0.09Sn) 18(2.7Zn0.5Si) 19(2.7Zn0.5Si0.09Al0.01Sr) และ 7(2.8Al) จะมีความต้านทานการหมองที่ดีกว่าโดยมีค่า DE\* ต่ำกว่าอัลลอยการค้าดังกล่าว

## บทคัดย่อภาษาไทย

โครงการวิจัยเรื่อง การพัฒนาโลหะเงินผสมที่เติมอะลูมิเนียม เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านทานการหมอง มีจุดประสงค์โดยรวมเพื่อการพัฒนาคุณภาพเงินกันหมองด้วยการเติมอะลูมิเนียม โดยศึกษาในกลุ่มเงินผสมธาตุรอง 2 กลุ่มคือ เงินผสมอะลูมิเนียมและ เงินผสมสังกะสี ที่ผ่านการเติมธาตุผสมรอง เช่นซิลิคอน สตรอนเซียมและสังกะสี เพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคและ สมบัติทางกล ผลการศึกษาพบว่า การเติมซิลิคอนในเงินผสมทั้ง 2 ชนิด ทำให้เงินมีความต้านทานการหมองด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และทนการกัดกร่อนในสารละลายเกลือเพิ่มขึ้น ปริมาณซิลิคอนควรอยู่ในช่วง 0.1-0.5% ในกรณีของซิลิคอนสูง เฟสซิลิคอนเพิ่มขึ้นในโครงสร้างจุลภาคทำให้ความแข็งแรงและอัตราการยึดตัวลดลงได้ การเติมทองแดงในช่วงไม่เกิน 1 % ทำให้ความต้านทานการหมองด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และทนการกัดกร่อนในสารละลายเกลือลดลงแต่สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ดี การเติมสังกะสีในเงินผสมอะลูมิเนียมช่วยเพิ่มความต้านทานการหมองด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และทนการกัดกร่อนในสารละลายเกลือได้ดี การเติมสตรอนเซียมในเงินผสมสามารถสร้างเฟสที่สองที่มีซิลิคอนหรืออะลูมิเนียมสูงได้ง่ายในลักษณะโครงตาข่าย ดังนั้นควรเติมสตรอนเซียมในปริมาณต่ำ

จากผลสรุปข้างต้นเมื่อพิจารณาแนวโน้มการเลือกอัลลอยที่มีความต้านทานหมองสูง ทนการกัดกร่อนในสารละลาย NaCl หรือน้ำทะเลได้ดี พบว่าโลหะเงินผสมหลายชนิดที่มีพฤติกรรมดังกล่าวได้แก่ โลหะเงินผสมอัลลอยหมายเลข 12 ( $2.8Al0.1Si$ ) 15 ( $2.8Al0.5Si$ ) 16 ( $2.8Al2.47Zn0.86Cu0.09Sn$ ) 18 ( $2.7Zn0.5Si$ ) 19 ( $2.7Zn0.5Si0.09Al0.01Sr$ ) 7 ( $2.8Al$ ) ซึ่งมีความต้านทานการหมองที่เปรียบเทียบกับค่า DE\* ซึ่งพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัลลอยการค้าได้แก่ โลหะเงินผสมทองแดง 5 % ( $Ag5Cu$ ) และ โลหะเงินผสมทองแดง 4.7% และอะลูมิเนียม 0.1% ( $Ag4.7Cu0.1Al$ ) ซึ่งเป็นที่นิยมในการผลิตเครื่องประดับในปัจจุบัน อัลลอยดังที่กล่าวมาทั้ง 6 ชนิดจะมีความต้านทานการหมองที่ดีกว่าโดยมีค่า DE\* ต่ำกว่าอัลลอยการค้า

## Abstract

This research project, named “The development on silver alloy with aluminum addition for improving Anti-tarnish property” was overall aimed to develop the quality of tarnish resistance of silver alloy with adding aluminium. The two groups of silver alloys were studied : silver-aluminium alloys and silver-zinc alloys in which the minor elements such as silicon strontium and zinc were added to improve microstructure and mechanical properties. It was found that silicon in both silver groups increased the tarnish resistance under hydrogen sulfide condition and improve the corrosion resistance to NaCl solution. The appropriate amount of silicon would be in a range of 0.1-0.5% by weight. In case of high silicon, silicon-free or high silicon phase increased and resulted in a reduction in mechanical properties such as strength and elongation. The less than 1%wt amount of copper reduced both tarnish resistance in H<sub>2</sub>S atmosphere and corrosion rate in NaCl solution whereas it provide better strength. Zinc adding in silver-aluminium alloys improves tarnish resistance in H<sub>2</sub>S condition and corrosion resistance in NaCl solution. Strontium decreased strength and mechanical properties. Strontium content would be limited in the range of 0.01-0.02%wt in order to prevent silicon phase network.

In summary, the silver alloy with high anti-tarnish and high corrosion resistance in NaCl solution were concluded in several groups such as 12 (2.8Al0.1Si) 15(2.8Al0.5Si) 16(2.8Al2.47Zn0.86Cu0.09Sn) 18(2.7Zn0.5Si) 19(2.7Zn0.5Si0.09Al0.01Sr) and 7(2.8Al). These alloys had higher tarnish resistance due to lower DE\* value when comparing with commercial silver alloy such as Ag4.7Cu0.1Al and Ag5Cu.

## สารบัญ

หัวข้อ		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		6
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		7
สารบัญ		8
สารบัญตาราง		9
สารบัญภาพ		11
<b>บทที่ 1</b>	<b>บทนำ</b>	
	1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา	15
	1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	16
	1.3 ขอบเขตของการวิจัย	17
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ	17
	1.5 กรอบแนวความคิดของการวิจัยและขั้นตอนการวิจัย	17
	1.6 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง	17
	1.7 วิธีการดำเนินการวิจัย	33
	1.8 แผนงานโครงการ	35
<b>บทที่ 2</b>	<b>ผลการปฏิบัติงานและสรุปผลวิจัย</b>	
	2.1 ผลการปฏิบัติงาน	39
	2.2 ผลการทดลองผลิตต้นเงินและชิ้นงานทดสอบ	49
	2.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด	50
	2.4 การศึกษาสมบัติทางกล	60
	2.5 การศึกษาความต้านทานการหมองและการกัดกร่อน	65
	2.6 สรุปผลการทดลอง	77
<b>บรรณานุกรม</b>		
	บรรณานุกรม	81
<b>ภาคผนวก</b>		
	ก ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้และกิจกรรมที่ดำเนินการมา และผลที่ได้รับตลอดโครงการ	85
<b>ตารางเปรียบเทียบ Output ที่เสนอในข้อเสนอโครงการและได้จริง</b>		
	ตารางเปรียบเทียบ Output ที่เสนอในข้อเสนอโครงการและได้จริง	87

## สารบัญตาราง

		หัวข้อ	หน้า
<b>บทที่ 1</b>			
ตารางที่	1.1	สมบัติทางกายภาพของโลหะที่ผสมอยู่ในเงินสเตอร์ลิง	18
ตารางที่	1.2	แสดงสารประกอบที่สามารถเกิดได้เป็นไปตามความการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 25°C	22
ตารางที่	1.3	แสดงผลค่า DE ที่แตกต่างของเงินที่มีส่วนผสมอัลลอยมากกว่า 1 ชนิดจาก กระบวนการหล่อ	29
ตารางที่	1.4	แผนกิจกรรมหลักที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ รวมทั้งผลลัพธ์ (Output) ที่คาดว่าจะได้รับ	35
ตารางที่	1.5	แผนการดำเนินงานวิจัย	37
<b>บทที่ 2</b>			
ตารางที่	2.1	แสดงส่วนผสมทางเคมี(ก่อนหล่อ)ของเงินสเตอร์ลิง 940	39
ตารางที่	2.2	ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของโลหะผสม 003(95.36%Ag 4.64%Cu), 17-1(93.51%Ag 6.29%Cu 0.2%Al), 17-2(93.51%Ag 6.09%Cu 0.4%Al), 17-3(93.51%Ag 5.89%Cu 0.6%Al) และ 17-4 (93.51%Ag 5.69%Cu 0.8%Al) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 % โดยน้ำหนัก	44
ตารางที่	2.3	ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของโลหะผสม 8(95.88%Ag 4.12%Cu) , 4(96.5%Ag 3.39%Cu 0.11%Al) และ 17(93.7%Ag 5.74%Cu 0.56%Al) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 % โดยน้ำหนัก	45
ตารางที่	2.4	แสดงส่วนผสมเคมีของชิ้นงานทดลองการปรับปรุงโครงสร้างเฟสซิลิคอนด้วย สตรอนเชียม	46
ตารางที่	2.5	แสดงส่วนผสมของชิ้นงานผ่านการหล่อ ในเครื่องหล่อระบบสุญญากาศ omc 1 ที่ อุณหภูมิเข้า 500 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิเทที่ 940-960 องศาเซลเซียส	50
ตารางที่	2.6	ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานกลุ่ม 7(2.8Al), 6(2.8Al3.7Zn), 8(2.8Al0.3Si), 9(2.8Al1Cu) และ 10(2.8Al0.3Sr) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 % โดยน้ำหนัก	72
ตารางที่	2.7	ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของโลหะผสม 12(2.8Al0.1Si), 13(2.8Al0.2Si), 8(2.8Al0.3Si), 15(2.8Al0.5Si ) และ 16(2.8Al2.47Zn0.086Cu0.09Sn) ใน สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 %โดยน้ำหนัก	74
ตารางที่	2.8	ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของโลหะผสมเงิน 12)2.8Al0.1Si 15)2.8Al0.5Si 16)2.8Al2.47Zn0.86Cu0.09Sn 18)2.8Zn0.5Siและ 19)2.8Zn0.5Si 0.09Al0.01Srในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 % โดยน้ำหนัก	75

หัวข้อ		หน้า
ตารางที่	2.9 แสดงต้นทุนการผลิตอัลลอยต่อปริมาณการผลิต 8 กก. ด้วยเตาหลอมระบบสุญญากาศ	79
ตารางที่	2.10 สรุปและเปรียบเทียบผลการดำเนินงาน ในช่วง 12 เดือน	80

## สารบัญภาพ

		หัวข้อ	หน้า
<b>บทที่ 1</b>			
ภาพที่	1.1	แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน-ทองแดง	19
ภาพที่	1.2	แสดงโครงสร้างจุลภาคของเงินผสมทองแดงผ่านการหล่อ	20
ภาพที่	1.3	ผลของสภาพสิ่งแวดล้อมต่อความหนาฟิล์มเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยา	21
ภาพที่	1.4	แสดงการหมอง ( Sulphurization of Silver-Copper 925alloy ) จากการตรวจสอบด้วย วิธี Thioacetamide(TAA) โดยการหมองจะเกิดเพิ่มในบริเวณ Copper rich phase	22
ภาพที่	1.5	แผนภูมิของ Ellingham สำหรับการเกิดออกไซด์ของธาตุต่างๆ	25
ภาพที่	1.6	โครงสร้างจุลภาค (SEM) และแถบฟิล์มพาสซีฟของอินเดียมออกไซด์ (Passive $\text{In}_2\text{O}_3$ ) ใน Ag-In alloy ที่มี In 7 % <sup>l</sup>	26
ภาพที่	1.7	การเปรียบเทียบผิวหลังการหล่อและล้างปุ่ระหว่างเงินสเตอร์ลิงผสมทองแดงสังกะสี และ ซิลิคอน (สองต้นทางซ้าย) กับ เงินสเตอร์ลิงผสมทองแดง ซิลิคอน (สองต้นทางขวา) <sup>l</sup>	26
ภาพที่	1.8	แผนภูมิสมดุลเฟสของเงิน-สังกะสี	27
ภาพที่	1.9	แผนภูมิสมดุลเฟสของเงิน สังกะสี ทองแดง	28
ภาพที่	1.10	แผนภูมิสมดุลเฟสของโลหะผสมเงิน –อะลูมิเนียม	30
ภาพที่	1.11	แสดงผลการทดสอบกันหมองของชิ้นงานทดสอบเงิน950ผสมทองแดงและธาตุกันหมอง ทั้ง 8 ชุด	31
ภาพที่	1.12	แสดงผลการทดสอบความแตกต่างของสีผิว DE(color difference) ของชิ้นงานทดสอบเงิน950ผสมทองแดงและธาตุกันหมอง ทั้ง 8 ชุด	31
ภาพที่	1.13	แสดงผิวชิ้นงานโลหะเงินผสมธาตุต่างๆ หลังการหล่อและขัดเงา	32
ภาพที่	1.14	แสดงตำหนิที่ผิวชิ้นงานเงินหลังขัดประกอบและชุบโรเดียม	32
<b>บทที่ 2</b>			
ภาพที่	2.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความแตกต่างการสะท้อนแสง Color difference (DE*) กับ เวลาในบรรยากาศ $\text{H}_2\text{S}$ (ชั่วโมง)	39
ภาพที่	2.2	แสดงการเปรียบเทียบสีชิ้นงานที่ผ่าน การทดสอบกันหมองในบรรยากาศ $\text{H}_2\text{S}$ ใน 0, 1,2,3 และ 4 ชั่วโมง	40
ภาพที่	2.3	แสดงลักษณะชิ้นงานหลังการรััดเย็นที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงาน 1-10 ผสมอะลูมิเนียม สังกะสี แมกนีเซียม และ ทองแดง	41
ภาพที่	2.3.1	แสดงความแข็งหลังการรััดแปรรูปและอบที่ 750 องศาเซลเซียส 30 และ 60 นาที	42
ภาพที่	2.4	เส้นโพลาริเซชันของโลหะผสม 003(95.36%Ag 4.64%Cu), 17-1(93.51%Ag 6.29%Cu 0.2%Al), 17-2(93.51%Ag 6.09%Cu 0.4%Al), 17-3(93.51%Ag 5.89%Cu 0.6%Al) และ 17-4 (93.51%Ag 5.69%Cu 0.8%Al) ในสารละลาย	44

หัวข้อ		หน้า
	โซเดียมคลอไรด์ 1 % โดยน้ำหนัก	
ภาพที่	2.5 เส้นโพลาริเซชันของโลหะผสม 8 (95.88%Ag 4.12%Cu) , 4 (96.5%Ag 3.39%Cu 0.11%Al) และ 17(93.7%Ag 5.74%Cu 0.56%Al) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 % โดยน้ำหนัก	45
ภาพที่	2.6 แสดงโครงสร้างจุลภาค ที่กำลังขยาย 20 เท่า ของชิ้นงานเงินผสม ซิลิคอน 3.2 % ที่เติมหรือ ไม่เติมดีบุกผสมโซเดียม	46
ภาพที่	2.7 แสดงชิ้นงานทดสอบการปรับปรุงโครงสร้างเฟสซิลิคอนด้วยสตรอนเซียม	47
ภาพที่	2.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบการปรับปรุงโครงสร้างเฟสซิลิคอนด้วยสตรอนเซียม	48
ภาพที่	2.9 แสดงความผสมทางเคมีและลักษณะของมาสเตอร์อัลลอย อะลูมิเนียม ผสม สตรอนเซียม 10% โดยน้ำหนัก	49
ภาพที่	2.10 แสดงมาสเตอร์อัลลอยเงินผสมซิลิคอน 4 %โดยน้ำหนักผ่านการหล่อในเตากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	49
ภาพที่	2.11 แสดงสีผิวของชิ้นงานผ่านการหล่อ ในเครื่องหล่อระบบสุญญากาศ omc 1 ที่อุณหภูมิเบา 500 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิเทที่ 940-960 องศาเซลเซียส	51
ภาพที่	2.12 แสดงผิวฝ้าดำ- แดงหลังหล่อและเงาของเงินผสมทองแดง (950)	53
ภาพที่	2.13 แสดงสีผิวของชิ้นงานหลังหล่อและขัดเงา เปรียบเทียบกับชิ้นงานเงินผ่านการชุบโรเดียม	53
ภาพที่	2.14 แสดงโครงสร้างจุลภาค(BEI)ของชิ้นงานทดสอบที่กำลังขยาย150เท่า	54
ภาพที่	2.15 แสดงโครงสร้างจุลภาค(BEI)ของชิ้นงานทดสอบที่กำลังขยาย500 หรือ 1000เท่า	58
ภาพที่	2.16 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานทดลอง	61
ภาพที่	2.17 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากของชิ้นงานทดลอง	62
ภาพที่	2.18 แสดงค่าอัตราการยืดตัวของชิ้นงานทดลอง	64
ภาพที่	2.19 แสดงลักษณะรอยแตกของชิ้นงาน8(2.8Al0.3Si)	65
ภาพที่	2.20 แสดงสีผิวชิ้นงานทดลองในก๊าซ H <sub>2</sub> S ที่เวลาแตกต่างกัน	67
ภาพที่	2.21 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความแตกต่างสีDE ต่อ เวลาสัมผัสก๊าซH <sub>2</sub> S ที่แตกต่างกัน	69
ภาพที่	2.22 แสดงความสัมพันธ์ของทองแดงต่อค่าความแตกต่างสีDEและเวลาสัมผัสก๊าซH <sub>2</sub> S ที่แตกต่างกัน	69
ภาพที่	2.23 แสดงความสัมพันธ์ของสังกะสีต่อค่าความแตกต่างสีDEและเวลาสัมผัสก๊าซH <sub>2</sub> S ที่แตกต่างกัน	70
ภาพที่	2.24 แสดงความสัมพันธ์ของซิลิคอนต่อค่าความแตกต่างสีDEและเวลาสัมผัสก๊าซH <sub>2</sub> S ที่แตกต่างกัน	70
ภาพที่	2.25 แสดงความสัมพันธ์ของเงินผสมสังกะสีต่อค่าความแตกต่างสีDEและเวลาสัมผัสก๊าซ H <sub>2</sub> S ที่แตกต่างกัน	71
ภาพที่	2.26 แสดงความสัมพันธ์ของเงินผสมอะลูมิเนียมต่อค่าความแตกต่างสีDEและเวลาสัมผัส	71

	หัวข้อ	หน้า
	ก๊าซH <sub>2</sub> S ที่แตกต่างกัน	
ภาพที่	2.27 เส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานกลุ่ม 7(2.8Al), 6(2.8Al3.7Zn), 8(2.8Al0.3Si), 9(2.8Al1Cu) และ 10(2.8Al0.3Sr) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 % โดยน้ำหนัก	73
ภาพที่	2.28 เส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานกลุ่ม 12(2.8Al0.1Si), 13(2.8Al0.2Si), 8(2.8Al0.3Si), 15(2.8Al0.5Si ) และ 16(2.8Al2.47Zn0.086Cu0.09Sn) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 % โดยน้ำหนัก	73
ภาพที่	2.29 เส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานกลุ่ม 12)2.8Al0.1Si 15)2.8Al0.5Si 16)2.8Al2.47Zn0.86Cu0.09Sn 18)2.8Zn0.5Si และ 19)2.8Zn0.5Si0.09Al0.01Srในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 % โดยน้ำหนัก	75
ภาพที่	2.29 แสดงการทดสอบการหมองในบรรยากาศปกติ 15 วัน ของชิ้นงาน12 15 16 18 19	76
ภาพที่	2.30 แสดงตัวอย่างต้นงานที่ผ่านการหล่อและ ล้างปูน กัดกรด ก่อนผลิตเป็นเครื่องประดับ	76
ภาพที่	2.31 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแตกต่างสี DE* สำหรับกลุ่มชิ้นงานทดลอง และเงินที่ได้รับการใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมปัจจุบัน	79

บทที่ 1

---

บทนำ

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การผลิตเครื่องประดับเงินในปัจจุบันมีแนวโน้มการแข่งขันสูง จะพบว่าการส่งออกในช่วง มกราคมถึง กันยายน 2559 พบการส่งออกเครื่องประดับแท้ลดลง 3.03% เครื่องประดับเงิน ลดลง 2.63% (เมื่อเปรียบเทียบกับ ปี 2558 ในช่วงเวลาเดียวกัน ) ผลดังกล่าวเกิดขึ้นจากสภาพเศรษฐกิจของประเทศคู่ค้าหลายประเทศยังไม่สามารถฟื้นตัวได้ รวมถึงการแข่งขันที่เพิ่มขึ้นในกลุ่มประเทศที่มีค่าแรงต่ำกว่าไทย เช่น อินเดีย และ เวียดนาม เป็นต้น อย่างไรก็ตามมูลค่าการส่งออกสินค้ากลุ่มอัญมณีและเครื่องประดับปี 2559 (9เดือนแรก) ยังคงอยู่ในอันดับที่ 3 ของประเทศไทย รองจากกลุ่มการผลิตอุปกรณ์รถยนต์ และ อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ (ข้อมูลจาก สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์, กระทรวงพาณิชย์ ) จากลักษณะข้างต้นทำให้ผู้ประกอบการไทยมีความจำเป็นต้องพัฒนารูปแบบและคุณภาพผลิตภัณฑ์ เพื่อเพิ่มศักยภาพทางการแข่งขันรวมถึงการลดต้นทุนการผลิตและการลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตให้มากที่สุด ในสภาวะการณ์ช่วงดังกล่าวนี้ แม้ว่าการผลิตเครื่องประดับในประเทศไทยจะอาศัยช่างฝีมือที่มีความประณีตสูงและมีประสบการณ์สูงแต่ยังคงขาดวิทยาการทางโลหะวิทยาและความสามารถในการพัฒนาวัสดุใหม่ที่มีความแตกต่างจากประเทศคู่แข่ง นอกจากนี้เทคโนโลยีการผลิตเครื่องประดับส่วนใหญ่ที่นำมาใช้ผลิตสินค้าคุณภาพสูงก็ยังอาศัยเทคโนโลยีจากต่างประเทศ เช่น เครื่องจักรและอัลลอย ทำให้ต้นทุนสูงและยากต่อการปรับเปลี่ยนวิธีการผลิตให้เหมาะสมกับการทำงานและดีไซน์ของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะการใช้อัลลอยนำเข้าจากต่างประเทศพบว่าผู้บริโภครักอัลลอยมักเกิดปัญหาการสื่อสารกับผู้ขายหรือผู้ผลิตอัลลอยถึงพฤติกรรมโลหะนั้น ส่งผลต่อความเข้าใจในการเลือกใช้อัลลอย และคุณสมบัติของอัลลอยแต่ละประเภท อย่างไรก็ตามอัลลอยจากต่างประเทศจะได้รับการพัฒนาด้านคุณสมบัติด้านกันหมองที่มีประสิทธิภาพดีขึ้นแต่ก็ยังมีปัญหาด้านการนำมาใช้งานเพราะในอัลลอยบางประเภทไม่สามารถนำมาหลอมซ้ำได้ เช่น อัลลอยผสมเยอรมันเนียม ในส่วนการพัฒนาอัลลอยเพื่อการผลิตเครื่องประดับ ของไทยนั้น ยังต้องการใช้องค์ความรู้พื้นฐานเพื่อการพัฒนาและ ยังจำเป็นต้องดำเนินไปในแนวทางของการลดต้นทุนการผลิตร่วมกับการเพิ่มคุณภาพ เช่น ความต้านทานการหมองให้สูงร่วมกับการลดต้นทุนตอนการผลิตเช่น ลดเวลาการขัด หรือลดขั้นตอนการชุบ เป็นต้น ดังนั้นประเด็นหลักสำหรับการพัฒนาอัลลอยเพื่อการผลิตในระดับ SME ของไทย ยังคงอยู่ในกลุ่มของการแก้ไขปัญหาคราบดำแดงเนื่องจากผิวออกไซด์ของทองแดงในระหว่างการใช้งาน โดยแนวโน้มการแก้ไขมีหลายแนวทางดังนี้

1. การเพิ่มปริมาณเนื้อเงิน เพื่อลดอัตราการเกิดคราบออกไซด์ของทองแดง โดยจะเพิ่มเงินจาก 93% เป็น 95-97 % โดยการเพิ่มปริมาณเนื้อเงินจะชล่อปัญหาการเกิดคราบออกไซด์ของทองแดงแต่ยังส่งผลลดความแข็งแรงของเงิน ทำให้ชิ้นงานเป็นรอยขีดข่วนง่ายและยังคงเกิดคราบดำจากซิลเวอร์ซัลไฟด์ได้

2. การชุบเคลือบผิว ด้วย โรเดียม สารประกอบอินทรีย์ โดย ความต้านทานการหมองจะขึ้นอยู่กับชนิดและความหนา รวมถึงความสามารถการยึดเกาะผิวชุบ อย่างไรก็ตามผิวชุบสามารถหลุดลอกเนื่องจากแรงกระแทกหรือขีดข่วนเนื้อโลหะภายในเกิดการหมองได้ อย่างไรก็ตามการชุบเคลือบผิวนั้นต้องการกระบวนการเตรียมผิวที่ละเอียดซึ่งหากดำเนินการไม่ถูกต้องจะทำให้เกิดผิวผุ มีรอยดำเนื่องจากการซึมของกรดที่เป็นน้ำยาชุบ เป็นรอยต่างดำได้ง่าย ทำให้สภาพการใช้งานเครื่องประดับยิ่งแย่รวมไปถึงทำให้คุณภาพของเครื่องประดับลดลงแต่เพิ่มต้นทุนการชุบ ไม่ได้ผลดีต่อการผลิตเครื่องประดับ อีกทั้งประเทศไทยไม่มีการสร้างเทคโนโลยีเพื่อผลิตน้ำยาชุบทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ ยิ่งทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในบางกรณีผู้บริโภคไม่ต้องการเงินที่ผ่านการชุบเคลือบผิว
3. การใช้อัลลอยกันหมอง เป็นธาตุผสมรอง เพื่อเพิ่มความต้านทานการหมอง วิธีการนี้ทำให้ความต้านทานการหมองเพิ่มขึ้นจนไม่จำเป็นต้องชุบผิว โลหะที่นิยมใช้ได้แก่ โลหะมีตระกูล และ โลหะที่มีความสามารถเกิดสนิมหรือฟิล์มออกไซด์ได้ง่ายและเร็ว โดยฟิล์มที่เกิดควรบางและมีสีใสหรือ ขาวอมเหลือง เช่น อะลูมิเนียม ดีบุก สังกะสี อินเดียม แมกนีเซียม เยอรมานเนียม ซิลิคอน ซึ่งออกไซด์เหล่านี้มีสมบัติป้องกันผิวและเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนได้ดี ผู้วิจัยได้มีประสบการณ์ในการดำเนินการทดลองเกี่ยวกับเงินผสมอะลูมิเนียมในโครงการวิจัย (มุ่งเป้า) มาแล้วซึ่งพบว่าอะลูมิเนียมมีส่วนสำคัญในการเพิ่มความต้านทานการหมองอย่างมาก อย่างไรก็ตามความต้านทานการหมองที่ได้จากการเติมอะลูมิเนียมในโครงการดังกล่าวยังมีปริมาณที่ต่ำ จึงเพียงแค่ชะลอให้เงินหมองช้าลงเมื่อเทียบกับไม่เติมอะลูมิเนียม

ในโครงการวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะดำเนินการทดลองใช้อัลลอยกันหมองโดยเติมธาตุผสมรอง เช่น อะลูมิเนียมเพื่อเพิ่มความต้านทานการหมองให้สูงเพิ่มขึ้น และ เน้นการทำงานผลิตทดแทน(โดยใช้ธาตุที่สามารถหาซื้อในประเทศและมีราคาไม่แพง)และ ใช้งานจริงในสถานประกอบการรวมถึงเปรียบเทียบสีผิวของเงินทดลองกับเงินผสมทองแดงที่นิยมใช้ทำเครื่องประดับเนื่องจากมีผิวสวยงามหลังการขัดแต่งแต่หมองง่าย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษา ผลการเติมอะลูมิเนียม ทองแดงและ สังกะสี ต่อการเปลี่ยนแปลงความต้านทานการหมอง โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของเงินเกรด 935
2. เพื่อหาปริมาณธาตุที่เหมาะสมต่อการผลิต รวมถึงความสามารถการหล่อและ สีผิวสะท้อนของชิ้นงานเครื่องประดับเงิน เพื่อผลิตในเชิงอุตสาหกรรมได้สะดวก ลดโอกาสการชุบเคลือบผิว
3. เพื่อศึกษาคูณภาพผิวตัวเรือนเงิน มุ่งเน้นในส่วนความต้านทานการหมองสูงและ มีสีผิวสะท้อนเทียบเคียงเงินสเตอร์ลิงผสมทองแดงที่มักเป็นที่ต้องการของตลาด

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

คณะผู้วิจัยได้สร้าง ต้นแบบอัลลอยเพื่อการพัฒนาความต้านทานการหมอง โดยมีขอบเขตการวิจัยดังแนวทางต่อไปนี้

1. ผลิตอัลลอยต้นแบบจาก ธาตุผสมรองเช่น อะลูมิเนียม สังกะสี ทองแดง เป็นต้น
2. ผลิตชิ้นงานเพื่อศึกษาความต้านทานการหมองด้วย  $\text{Na}_2\text{S}$  และ ตรวจสอบฟิล์มกันหมองด้วยเทคนิค Potentiostatic ในสารละลาย 0.1M NaCl
3. ศึกษาโครงสร้างจุลภาค และ สมบัติทางกลของโลหะเงินผสมอัลลอยต้นแบบ
4. ทดลองการผลิตจริงในสถานประกอบการเพื่อศึกษาผลของอัลลอยและปัญหาที่พบ

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

1. ได้ความรู้การผลิตอัลลอยกันหมองที่มีความต้านทานการหมองสูง และมีความเป็นไปได้ในการผลิตในประเทศไทย
2. สถานประกอบการ ที่ร่วมโครงการได้รับความรู้และนำองค์ความรู้ไปผลิตและได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อให้เหมาะสมกับเครื่องมือของสถานประกอบการ
3. ได้เผยแพร่องค์ความรู้จากการวิจัยเพื่อการผลิตจริงและใช้เป็นต้นแบบอัลลอย

### 1.5 กรอบแนวความคิดของการวิจัยและขั้นตอนการวิจัย

คณะผู้วิจัยมีสมมุติฐาน ธาตุผสมรอง เช่น อะลูมิเนียม ร่วมกับ สังกะสี สามารถเพิ่มความต้านทานการหมอง และ การกัดกร่อน โดยมีแนวโน้มเกิดฟิล์มออกไซด์ขณะสัมผัสอากาศ ลักษณะดังกล่าวทำให้สีเครื่องประดับสวยงาม และไม่จำเป็นต้องชุบเคลือบด้วย โรเดียม หรือ สารประกอบอินทรีย์ โดยยังคงมีสีผิวสะท้อนใกล้เคียงกับ เงินผสมทองแดงที่ผ่านการขัดและ ยังไม่เกิดคราบแดงดำ แต่ชิ้นงานทดลองควรมีความต้านทานการหมองที่ดี และความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ตลอดจนมีการตรวจสอบชั้นฟิล์ม โดยใช้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดSEM, Potentiostatic เพื่อพิจารณาเชิงลึก รวมถึงทดสอบการใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมต่อไป

### 1.6 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

#### โลหะเงินสำหรับเครื่องประดับ

#### ความเป็นมาของโลหะเงินและเงินสเตอร์ลิง

เงินสเตอร์ลิงเป็นโลหะผสมที่มีเงินเป็นธาตุผสมหลัก (Base Metal) ผสมกับทองแดงและธาตุผสมอื่นๆ ตามคำนิยามของมาตรฐานอุตสาหกรรมของไทยใน มอก. 21-2515 เงินสเตอร์ลิง (Sterling Silver)

หมายความว่า โลหะเงินที่มีโลหะชนิดอื่นปนอยู่ไม่เกินร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนักซึ่งทำให้คุณสมบัติที่ดีของเงินไว้คือ ความขาว ความสวยงามเป็นมันวาว และความทนทานต่อการกัดกร่อน (ขึ้นอยู่กับธาตุผสมที่เติมลงไป)

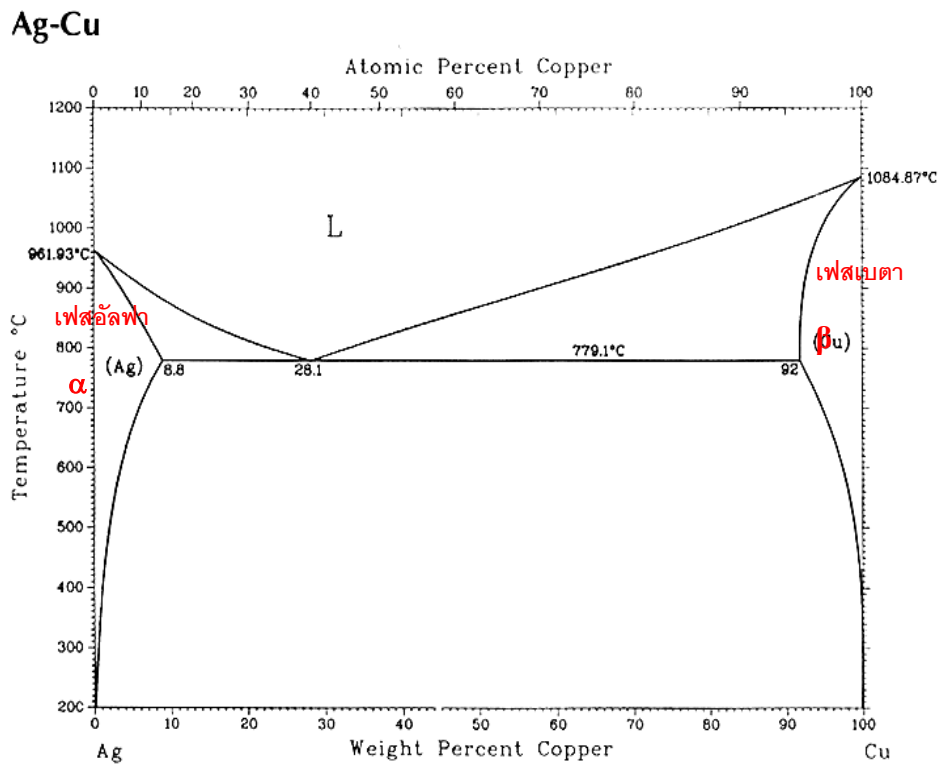
#### 1.6.1 สมบัติทางกายภาพของโลหะเงินและโลหะที่ผสมในเงินสเตอร์ลิง

ตัวอย่างธาตุสำหรับผสมในเงินสเตอร์ลิงเช่นในตารางที่ 9.1 จากสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดสารละลายของแข็งที่มีสมบัติแตกต่างซึ่งสามารถพิจารณาเบื้องต้นจากแผนภูมิสมดุล 2 ธาตุ และจากความแตกต่างนี้ทำให้การผสมธาตุเสริมเอื้อประโยชน์ในการทำงานในรูปแบบที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปมุ่งเน้นการเพิ่มความต้านทานการหมอง และความแข็งแรงของเงินสเตอร์ลิงเป็นหลัก ในสมัยโบราณใช้ทองแดงเป็นอัลลอยแรกในการผลิตเงินสเตอร์ลิง เนื่องจาก เพิ่มความแข็งแรงให้เงิน มีเศษจากการหลอมน้อยและประกายเงางามกว่าธาตุชนิดอื่นเมื่อเปรียบเทียบกับกรหล่อเงินบริสุทธิ์ อย่างไรก็ตาม การเติมทองแดงจะส่งผลเสียเนื่องจากลดความต้านทานการหมองและ เป็นสาเหตุหลักของการเกิด ฝ้าดำฝ้าแดง โดยเฉพาะการนำเศษเก่าที่มีสีคล้ำมาใช้งาน หรือการหล่อที่ใช้เศษเก่าร่วมหลอมที่อุณหภูมิสูงเป็นต้น ดังนั้นการศึกษาระบบธาตุผสมของเงินจะเริ่มต้นใน เงินผสมทองแดงเป็นตัวอย่างแรก ก่อนจะพัฒนาไปยังธาตุกลุ่มอื่นต่อไป

ตารางที่ 1.1 สมบัติทางกายภาพของโลหะที่ผสมอยู่ในเงินสเตอร์ลิง<sup>[1]</sup>

สมบัติ	เงิน	ทองแดง	อะลูมิเนียม	สังกะสี
สัญลักษณ์	Ag	Cu	Al	Zn
เลขอะตอม	47	29	13	30
น้ำหนักอะตอม	196.8665	63.546	26.98	65.39
โครงสร้างผลึกที่ 25°C	FCC	FCC	FCC	HCP
สี	ขาวเงา	แดงเงา	ขาวเงา	ขาวเงา
ความถ่วงจำเพาะ	10.5	8.96	2.375	7.14
ความหนาแน่นที่ 20°C (Kg/m <sup>2</sup> )	10,500	8,960	2,375	7,140
จุดหลอมเหลว ( °C )	960	1,083	660.32	419.6
จุดเดือด ( °C )	2,195	2,600	2519	907
สีสารประกอบออกไซด์	ใส-น้ำตาลดำ	น้ำตาลแดง, ดำ	ขาว-ใส	ขาวอมเหลือง
สีสารประกอบซัลไฟด์	ใส-ดำ	ขาวอมเขียว-ฟ้า, ดำ	-	ใส, ขาวอมเหลือง
สีสารประกอบซัลเฟต	ดำ	ฟ้า เขียว ดำ	ขาว	เหลือง น้ำตาล

## 1.6.2 การพัฒนาโครงสร้างจุลภาคด้วยแผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน-ทองแดง



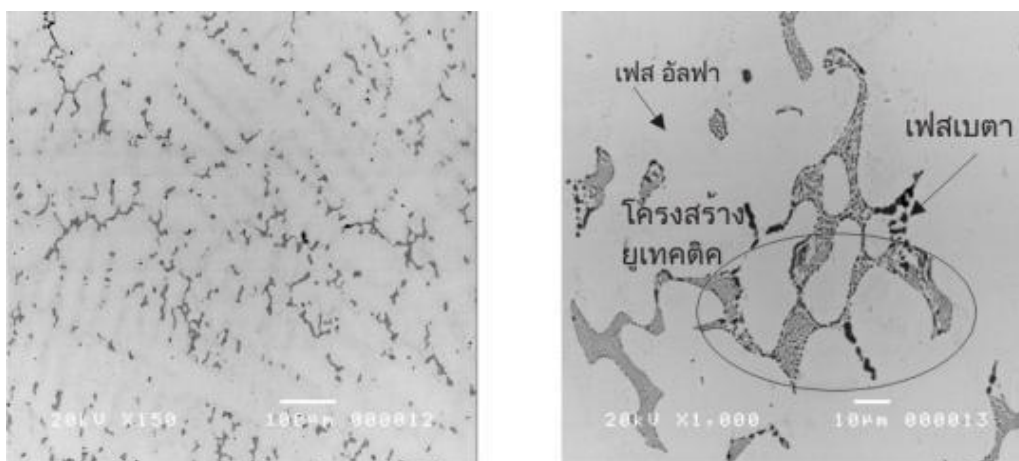
รูปที่ 1.1 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน-ทองแดง

จากรูปที่ 1.1 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน-ทองแดง พบว่าความสามารถในการละลายของทองแดงในเงิน ได้สูงสุด 8.8% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 779.1 °C ให้สารละลายของแข็งเฟสแอลฟา ( $\alpha$  phase) และที่อุณหภูมินี้จะเกิดปฏิกิริยายูเทคติกที่ส่วนผสมทางเคมี เงิน 71.9% ทองแดง 28.1% โดยน้ำหนัก ความสามารถในการละลายดังกล่าวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ส่วนเงินจะสามารถละลายในทองแดงให้สารละลายของแข็งเบต้า ( $\beta$  phase) ได้สูงสุด 8% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิห้องโลหะผสมเงินและทองแดงจะประกอบไปด้วยเฟส 2 เฟส คือ แอลฟาเฟสและเบต้าเฟส

โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิง (เงิน 92.5%) ภายใต้สภาวะสมดุลจะประกอบด้วยสารละลายของแข็ง (Primary Solid Solution) ที่เป็นเนื้อเดียวกัน และโครงสร้างยูเทคติก แต่โดยปกติการแข็งตัวของของโลหะที่ผ่านการหล่อไม่อยู่ในสภาวะสมดุล นั่นคือโครงสร้างภายหลังที่ได้จะประกอบด้วยสารละลายของแข็ง Primary Silver-rich ( $\alpha$  phase) ซึ่งเริ่มเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 896 °C ในลักษณะการแข็งตัวแบบกิ่งไม้ (Dendritic Solidification) ส่วนของเหลวที่เหลืออยู่ขณะเกิดการแข็งตัวจะมีส่วนผสมของทองแดงสูงกว่าของเหลวเริ่มต้น ต่อมา ก็จะเกิดโครงสร้างยูเทคติกที่ประกอบด้วยเฟสแอลฟา  $\alpha$  ผสมกับ เฟสเบต้า  $\beta$  ที่แทรกอยู่ระหว่างกิ่งต่างๆของเดนไดรต์ที่อุณหภูมิ 796°C ดังนั้นเฟสที่เกิดขึ้นทั้งหมดของโลหะเงิน

สเตอร์ลิงหล่อที่อุณหภูมิห้องจะประกอบไปด้วยสารละลายของแข็ง Primary Silver-rich และโครงสร้างยูเทคติกของโลหะเงินและทองแดง ดังรูปที่ 1.2

โครงสร้างจุลภาคของสารละลายของแข็งและโครงสร้างยูเทคติกจากทองแดงผสมเงินนั้น มีประโยชน์ที่เด่นชัด 2 ข้อ คือ 1.สามารถเพิ่มความแข็งแรงหลังการหล่อ ซึ่งสามารถทำได้ในช่วงผลิตเครื่องประดับด้วยการหล่อ 2. สามารถเพิ่มความแข็งแรงจากการหล่อหรือการแปรรูป ผ่านการอบบ่มตกตะกอน โดยการใช้งานจะขึ้นอยู่กับว่าจำเป็นใช้งานแบบใด



ภาพที่ 1.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเงินผสมทองแดงผ่านการหล่อ

ในการพัฒนาเงินสเตอร์ลิงโดยเติมธาตุผสมในเงิน สามารถแบ่งออกได้โดยขึ้นกับจุดประสงค์ต่างๆ คือ

1. เพิ่มความต้านทานการหมอง ได้แก่ สังกะสี อะลูมิเนียม ดีบุก แมกนีเซียม เฮอร์มาเนียม ซิลิคอน
2. เพิ่มความแข็งแรง จากการอบบ่ม ได้แก่ ดีบุก เบริลเลียม อะลูมิเนียม ทองแดง
3. เพิ่มความสามารถการไหลตัว สำหรับการหล่อ และการผลิตน้ำประสานในการเชื่อม ได้แก่ สังกะสี ดีบุก แกลเลียม
4. เพิ่มประสิทธิภาพการผลิต เช่น ลดโอกาสการแตกหลังหล่อของเงินผสมทองแดง ลดจำนวนทางน้ำ และหรือขนาดทางน้ำ

นอกจากนี้โลหะเงินผสมยังสามารถแบ่งตามประเภทการผลิตออกเป็น 2 ประเภท คือ เงินสำหรับการหล่อ และ เงินสำหรับการรีด การผลิตเครื่องประดับเงินสเตอร์ลิงด้วยการหล่อในปัจจุบันยังมีเป้าหมายที่ต้องการมากขึ้นจากอดีต 2 ประการดังนี้

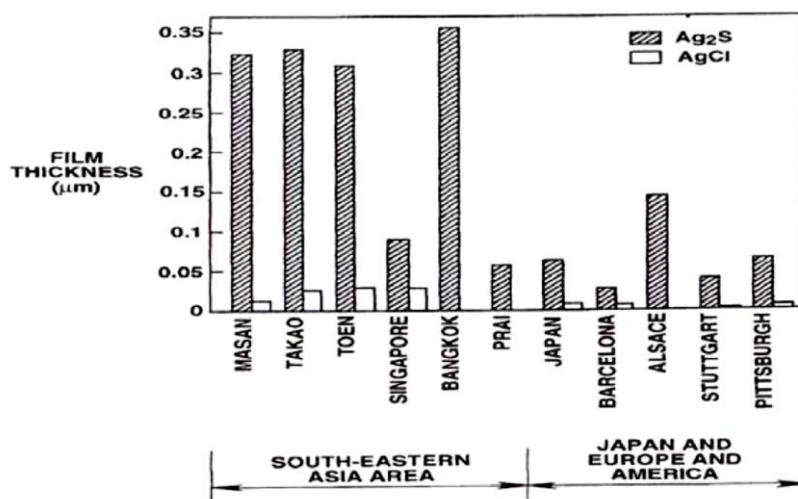
1. การเพิ่มอายุการใช้งานและ ความต้องการดูแลรักษาง่าย
2. การลดระยะเวลาการผลิตรวมถึงลดต้นทุนการผลิตเพื่อส่งเสริมศักยภาพการแข่งขันทางการตลาดในต่างประเทศ

จากลักษณะความต้องการดังกล่าวทำให้มีการพัฒนาการใช้ธาตุผสมหลายชนิด เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ดีขึ้น ธาตุผสมที่ใช้สามารถแบ่งออกเป็นหลายกลุ่ม ทั้งธาตุผสมที่เป็นตัวลดออกซิเจน ธาตุผสมที่เพิ่มคุณสมบัติด้านกลึงไส ฯลฯ

### 1.6.3 ธาตุผสมเพิ่มความต้านทานการหมอง

ธาตุผสมกลุ่มนี้ส่งผลเพิ่มอายุการใช้งานของเครื่องประดับ และทำให้ง่ายต่อการดูแลรักษา โดยทั่วไปการหมองที่เกิดขึ้นที่ผิว (Tarnishing) ของเครื่องประดับ เนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเงินกับสารประกอบที่มีกำมะถัน เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) หรือซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) เป็นต้น ทำให้เกิดสารประกอบซัลไฟด์ของเงินขึ้น ซึ่งพบว่าจะมี  $Ag_2S$  เป็นองค์ประกอบหลัก ในเงินที่มีส่วนผสมของโลหะเงินมากกว่า 83 % เท่านั้นจึงจะเกิดชั้นฟิล์มของ  $Ag_2S$  ได้ ซึ่งสารประกอบของชั้นฟิล์มที่มี ซิลเวอร์ซัลไฟด์ ( $Ag_2S$ ) เป็นองค์ประกอบหลักนั้น จะทำให้ผิวของชิ้นงานเป็นสีน้ำตาล สีน้ำตาลอมเขียว (Greenish-brown) จนถึงสีดำ โดยขึ้นกับชั้นความหนาของฟิล์มที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อมีความชื้นปนอยู่กับ  $SO_2$  ในปริมาณที่เข้มข้นสูงฟิล์มของสารประกอบซัลไฟด์จะมีซิลเวอร์ซัลเฟต ( $Ag_2SO_4$ ) ปนอยู่ด้วย

จากการศึกษาของ Andrea Basso<sup>[2]</sup>(Legor Group SI(Ramous(2), report. JTF2005-Jewelry Technology Forum)) อ้างอิงการศึกษาผลการหมองเนื่องจากการเกิดสารประกอบ ออกไซด์ คลอไรด์ และซัลเฟต เนื่องจากปัจจัยของบรรยากาศ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 1.3 โดยสารประกอบที่สามารถเกิดได้เป็นไปตามความการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 25 °C (298K) –ค่า Free energy of formation as Equilibrium constant at 298K— ในตารางที่ 1.2 รวมถึงการยืนยัน การเกิด sulphurization โดยเฉพาะที่ส่วนของ copper rich phase ในโครงสร้างจุลภาคของ เงินผสมทองแดงเกรด 925 ดังรูป1.4

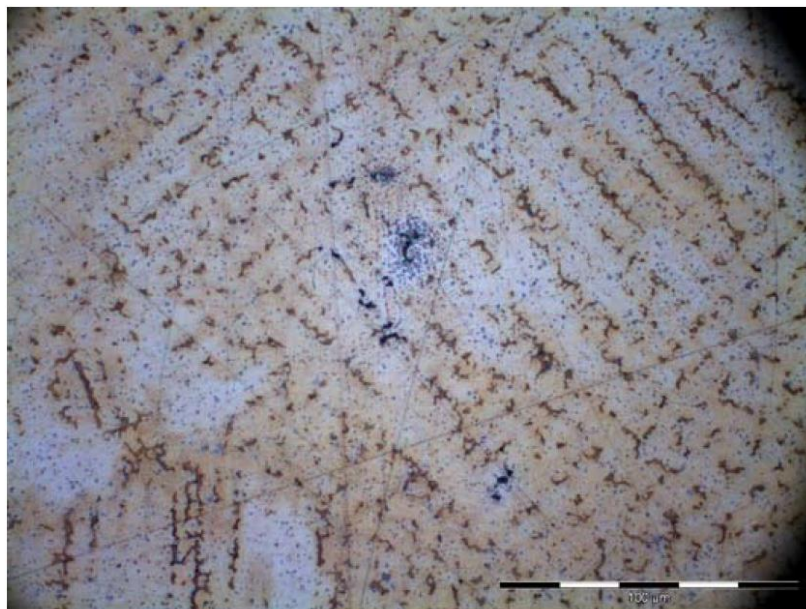


ภาพที่ 1.3 ผลของสภาพสิ่งแวดล้อมต่อความหนาฟิล์มเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยา<sup>[2]</sup>

ตารางที่ 1.2 แสดงสารประกอบที่สามารถเกิดได้เป็นไปตามความการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 25°C<sup>[2]</sup>

*Table 1. - List of the main chemical reactions involved in the tarnishing processes. The second column shows an equilibrium constant, which indicates the tendency of the reaction to occur at a temperature of 25°C. A value of the equilibrium constant that is greater than 1 indicates that the reaction takes place spontaneously. High values of K indicate a high tendency for the reaction to occur. Vice-versa, values of the equilibrium constant below 1 show that the reaction does not tend to occur spontaneously (Source: Davis (8))*

Reaction	Equilibrium constant (K, 25°C)	Compound name	Colour (24)
$2\text{Ag} + \text{H}_2\text{S} + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{Ag}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}$	$6.117 \times 10^{42}$	silver sulphide	black, grey-black
$2\text{Cu} + \text{H}_2\text{S} + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{Cu}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}$	$6.568 \times 10^{50}$	copper sulphide	blue-black
$\text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{Cu}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}$	$8.197 \times 10^{24}$	copper sulphide	blue-black
$\text{GeO}_2 + 2\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{GeS}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	19.36	germanium sulphide	black
$\text{SnO} + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{SnS} + \text{H}_2\text{O}$	$2.89 \times 10^{10}$	stannic sulphide	brown-black, grey
$\text{ZnO} + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{ZnS} + \text{H}_2\text{O}$	$2.292 \times 10^{14}$	zinc sulphide	white
$\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{SiS}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	$6.840 \times 10^{-35}$	silicon sulphide	white or grey
$\text{B}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{B}_2\text{S}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$	$1.761 \times 10^{-59}$	boron sulphide	white-yellow
$\text{Cu} + \text{O}_2 + 2\text{NO}_2 \rightarrow \text{Cu}(\text{NO}_3)_2$	$2.736 \times 10^{37}$	copper nitrate	blue
$\text{Ag} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{AgNO}_2$	$6.426 \times 10^5$	silver nitrite	yellow-grey
$\text{Ag} + 0.5\text{SO}_2 + 0.25 \text{O}_2 \rightarrow 0.5 \text{Ag}_2\text{SO}_3$	$5.682 \times 10^9$	silver sulphite	
$\text{Cu} + 0.5\text{SO}_2 + 0.5\text{O}_2 \rightarrow 0.5\text{Cu}_2\text{SO}_4$	$1.117 \times 10^{31}$	copper sulphate	green
$2\text{Ag} + \text{Cl}_2 \rightarrow 2\text{AgCl}$		silver chloride	white



รูปที่ 1.4 แสดงการหมอง ( Sulphurization of Silver-Copper 925alloy ) จากการตรวจสอบด้วย วิธี Thioacetamide(TAA) โดยการหมองจะเกิดเพิ่มในบริเวณ Copper rich phase<sup>[2]</sup>

อัลลอยเงินกันหมองถือว่าเป็นอัลลอยกลุ่มแรกของการพัฒนาอัลลอยสำหรับการเพิ่มธาตุผสมอื่น นอกเหนือจากทองแดง จากที่ทราบกันดีว่าการเติมทองแดงในเงินทำให้เพิ่มความแข็งแรงตั้งแต่การหล่อ ด้วยทองแดงสร้างสารละลายของแข็งในเงินผสม รวมถึงการเติมทองแดงทำให้เงินมีความเงางามและมี

ประกายสะท้อนที่สวยงามมากกว่าธาตุกลุ่มอื่น แต่การเติมทองแดงทำให้เงินหมองอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะในสถานะที่มีความชื้นและร้อนร่วมกับบรรยากาศที่มีมลพิษของซัลเฟอร์ เช่น ไอเสียร์ยอนด์ การหมองเร็วที่พบเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาของธาตุหลักในเครื่องประดับ ได้แก่ ทองแดงเกิดปฏิกิริยากับอากาศ ได้  $\text{CuO}$  และ  $\text{Cu}_2\text{O}$  รวมถึงทองแดงทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ ได้สารประกอบ  $\text{CuS}$  ได้ง่าย ร่วมกับการเกิด  $\text{Ag}_2\text{S}$  ในบรรยากาศที่มีซัลเฟอร์มาก

ดังนั้นการพัฒนาอัลลอยในกลุ่มแรกนี้จะเริ่มต้นจากธาตุที่หาง่ายและมีความเป็นไปได้ในการผลิตได้ก่อนเช่น สังกะสี ดีบุก และ ซิลิคอน

ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ เงินสเตอร์ลิงที่มีทองแดงผสมอยู่จะมีการหมองที่ผิวในอัตราที่เร็วกว่าเงินบริสุทธิ์ซึ่ง Vinal และ Schramm<sup>[3]</sup> พบว่า อัตราการหมองของเงินสเตอร์ลิงจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณทองแดงที่ผสมอยู่ เนื่องจากการเกิดออกซิเดชันของทองแดง ทำให้เกิดความหมองเพิ่มขึ้นโดย คอปเปอร์ออกไซด์ ( $\text{CuO}$ ) ที่มีสีเทาดำ และ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่มีสีชมพูแดง หรือที่รู้จักกันในชื่อ ฝ้าดำฝ้าแดง ดังนั้นจึงได้มีการเติมธาตุบางตัว เช่น สังกะสี ดีบุก ซิลิคอน อะลูมิเนียม พัลลาเดียมและอินเดียม เพื่อให้มีการสร้างฟิล์มออกไซด์ของธาตุเหล่านี้ และสามารถป้องกันการหมองได้ โดยหน่วงการทำปฏิกิริยาของเงินกับสารประกอบที่มีกำมะถัน

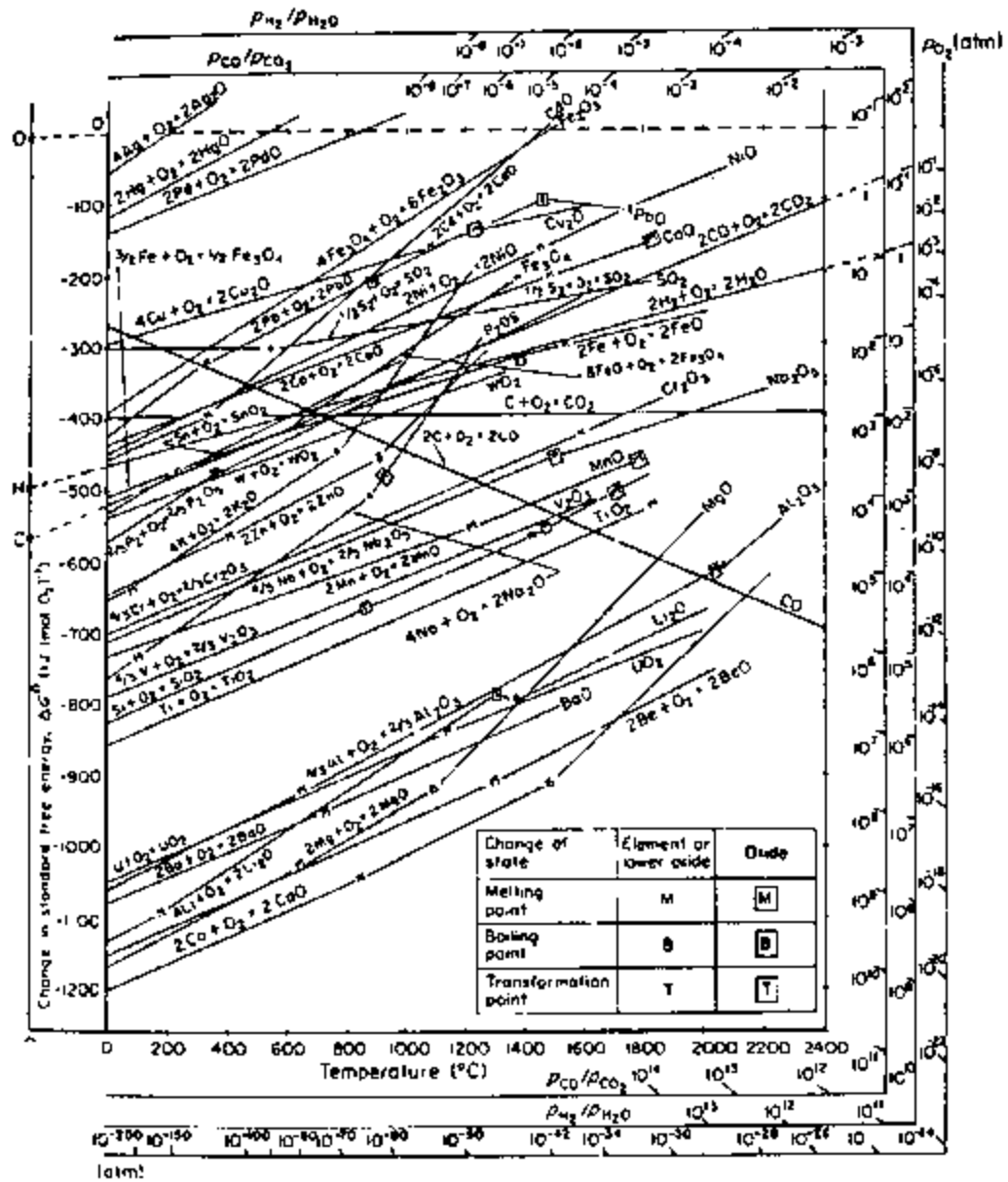
กลไกการเกิดออกไซด์บนผิวโลหะโดยอาศัยความสามารถในการเกิดออกไซด์ของธาตุผสมที่ดีกว่าธาตุหลักในโลหะผสมนี้เรียกว่า Selective Oxidation โดยถ้าออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนผิวนั้นมีความหนาพอ และไม่มีช่องว่างพอที่จะเกิดออกไซด์ของธาตุหลัก (Main Oxidation) ภายหลังได้ รวมถึงสีผิวออกไซด์ฟิล์มเป็นสีขาวเป็นหลัก ซึ่งหมายความว่าออกไซด์นั้นสามารถคลุมผิวได้ทั้งหมดจึงเรียกออกไซด์ฟิล์มที่เกิดขึ้นนั้นว่าเป็นชั้นฟิล์มป้องกันผิว (Protective Layer) ซึ่งชั้นของออกไซด์ (Oxide Layer) จะต้องมีแรงดึงผิวมาก มีความแข็งแรงและเสถียรภาพสูง ทนทานต่อการแพร่ผ่านของออกซิเจน หรือซัลเฟอร์ได้ดี ความสามารถในการแพร่ผ่านของไอออนบวกและไอออนลบต่ำ สำหรับเงินสเตอร์ลิงพบว่าธาตุผสมหลายตัวมีคุณสมบัติในการสร้างฟิล์มออกไซด์ ดังกล่าว เช่น อะลูมิเนียม เฮอร์มาเนียม แมกนีเซียม และซิลิคอนเป็นต้น ทำให้สามารถป้องกันอากาศและซัลเฟอร์ได้ดี

จากการศึกษาของ Carrano<sup>[4]</sup> ใน US Pat No. 6,139,652 พบว่า เงินสเตอร์ลิงจำเป็นต้องมีฟิล์มออกไซด์ของธาตุอย่างน้อย 1 ชนิดขึ้นไปเพื่อปรับปรุงสมบัติต้านทานการหมองที่มักเกิดจากออกไซด์ของทองแดงที่มักผสมเป็นธาตุหลัก โดยธาตุที่นิยมเติมได้แก่ อะลูมิเนียม พลวง แคดเมียม ซิลิคอน ไทเทเนียม สังกะสีและธาตุที่กล่าวมาบางตัวสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับเงินสเตอร์ลิงโดยการอบชุบความร้อน สำหรับการเติมธาตุกันหมองมากกว่า 1 ชนิดนั้นสามารถสร้างฟิล์มออกไซด์เชิงซ้อนทำให้ สีฟิล์มที่เกิดขึ้นไม่เหลืองเข้มจนเกินไปส่งผลต่อการสะท้อนสีของเงิน รวมถึงสามารถสร้างฟิล์มได้ตลอดเวลา แม้ฟิล์มที่ผิวถูกทำลายไปก็ตาม

US, Pat. No. 4,973,446 โดย Bernhard<sup>[5]</sup> กล่าวถึงการปรับปรุงสมบัติทางกลของเงิน ได้แก่ การลดขนาดเกรน และลดการเกิดรูพรุนเนื่องจากการกักเก็บออกซิเจนสามารถทำได้โดยใช้ธาตุผสม นอกจากนี้ยังพบว่าธาตุผสมช่วยลดฝ้าสีต่างๆ โดยอัลลอยที่ใช้มีส่วนประกอบของ ซิลิคอน โบรอน สังกะสี ทองแดง ดีบุก และ อินเดียม จากแนวทางที่กล่าวมาทำให้สามารถพิจารณาลักษณะการเกิดสร้างสารประกอบออกไซด์ของโลหะชนิดต่างๆที่สัมพันธ์กับค่าพลังงานอิสระของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน สิ่งนี้สามารถอธิบายโดยใช้แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานอิสระสำหรับการเกิดปฏิกิริยากับอุณหภูมิ (Ellingham Diagram)<sup>[7]</sup> ดังรูปที่ 1.5 ค่าพลังงานอิสระของการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำเช่นดีบุกแสดงถึงความเป็นไปได้ในการเกิดสารประกอบออกไซด์ที่ง่ายขึ้นโดยการเกิดสามารถเกิดทับซ้อนกันได้ในลักษณะฟิล์มเชิงซ้อนนั่นเอง

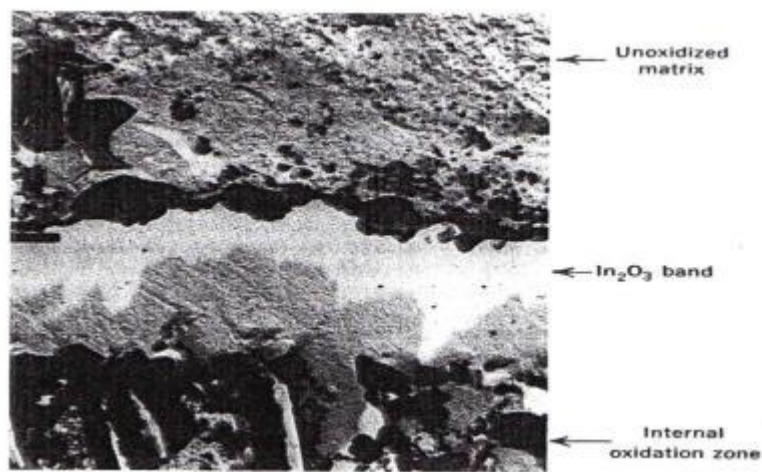
จากการศึกษาของ Croce; Scott M.<sup>[6]</sup> ใน US, Pat. No. 6,841,012 และ ผลการวิจัยในหัวข้อ ผลของอินเดียมต่อสมบัติทางกลและความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิงผสมซิลิคอน โดย เจษฎา จอกแก้ว<sup>[7]</sup> พบว่า การเติม ซิลิคอน 0-0.1% อินเดียม 0-0.2% ร่วมกับสังกะสี 0-5% และ ดีบุก 0-2% โดยน้ำหนัก ส่งผลส่งเสริมความต้านทานการหมองอีกทั้งสามารถสร้างผิวงานหลังหล่อและล้างปูนที่มีความขาวสวยงามกว่าการเติมธาตุเพียง 1 ชนิด เช่นการเติมเฉพาะทองแดงในเงิน เป็นต้น สำหรับการเติมอินเดียมนั้นจำเป็นต้องเติมร่วมกับซิลิคอนและทองแดง กล่าวคือเป็นกลุ่มอัลลอยทองแดงผสมหลัก ซึ่งพบว่าถ้าเติมโดยไม่สุญหายจะให้ผลดีดังกล่าวแต่จำเป็นต้องควบคุมปริมาณและธาตุคู่ควบที่เติมให้เหมาะสมด้วย

จากข้อมูลข้างต้นที่ได้มาทำให้สามารถสรุปได้ว่าธาตุผสมที่เพิ่มความต้านทานการหมอง ได้แก่ สังกะสี ดีบุก ซิลิคอน อินเดียม ในกรณีของธาตุอินเดียมเมื่อเติมเข้าไปในโลหะเงินถึง 7% ก็สามารถสร้างชั้นสารประกอบอินเดียมออกไซด์ที่มีสีขาวเกิดขึ้นและมีเสถียรภาพสูง ฟิล์มออกไซด์ดังกล่าวสามารถเกิดที่อุณหภูมิสูงได้ดี ดังรูปที่ 1.6 ฟิล์มออกไซด์นี้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องกลายเป็นชั้นฟิล์มที่สามารถป้องกันไม่ให้ออกซิเจนมาสัมผัสกับเนื้อโลหะชั้นในได้อีกต่อไป หลักการนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับการเติมโครเมียมและนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งในช่วงการใช้งานหากมีการกะเทาะหลุดออกของชั้นฟิล์มจนมีเนื้อโลหะสัมผัสกับอากาศ จะทำให้ชั้นฟิล์มสามารถสร้างขึ้นได้ใหม่ตลอดเวลา ทำให้โลหะไม่เกิดสนิมหรือ ในกรณีของเงินดูเหมือนไม่เกิดการหมองนั่นเอง



รูปที่ 1.5 แผนภูมิของ Ellingham สำหรับการเกิดออกไซด์ของธาตุต่างๆ<sup>[8]</sup>

รูปที่ 1.5 แสดงความเป็นไปได้ในการเกิดสนิม ซึ่งในมุมมองนี้จะเป็นการเกิด ฟิล์มสนิมป้องกัน (protective film) โดยพบว่าที่อุณหภูมิห้องจะมีความเป็นไปได้ในการเกิดสนิมจากง่ายไปยากคือ  $Ca > Li > Ba > Al > Ti > Si > V > Cr > Zn > P > Fe > Sn > Co > Pb$  ตามลำดับซึ่งก็จะพบว่า ฟิล์มสนิมป้องกันที่น่าจะได้ผลดี และมีสีขาวใสถึงขาวอมเหลือง ได้แก่ ฟิล์มสนิมป้องกันของ Si Al Ti Cr Zn Ba Ca Sn อย่างไรก็ตามการเลือกธาตุสำหรับการผลิตจะต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ในการเกิดสารละลายของแข็ง จุดหลอมเหลว การสร้างสารประกอบเชิงโลหะ ต่อไป



รูปที่ 1.6 โครงสร้างจุลภาค (SEM) และแถบฟิล์มพาสซีฟของอินเดียมออกไซด์ (Passive In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ใน Ag-In alloy ที่มี In 7 %<sup>[9]</sup>

ในการศึกษาข้อมูลของคณะวิจัยโครงการ “โครงการผลิตอัลลอยผสมอินเดียมและซิลิคอนเพื่ออุตสาหกรรมเครื่องประดับเงิน” โดย ผศ. ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพรและคณะ<sup>[10]</sup> พบผลการต้านทานการหมองจากผิวหลังการหล่อ กล่าวคือ เงินสเตอร์ลิงที่มีความต้านทานการหมองสูงซึ่งมักผสมด้วยทองแดง สังกะสี ดีบุกและซิลิคอน จะมีผิวหลังการหล่อและล้างปูนที่ขาวสะอาดกว่าอัลลอยที่เติมทองแดง-ซิลิคอน ดังรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 การเปรียบเทียบผิวหลังการหล่อและล้างปูนระหว่างเงินสเตอร์ลิงผสมทองแดงสังกะสี และ ซิลิคอน (สองต้นทางซ้าย) กับ เงินสเตอร์ลิงผสมทองแดง ซิลิคอน (สองต้นทางขวา)<sup>[10]</sup>

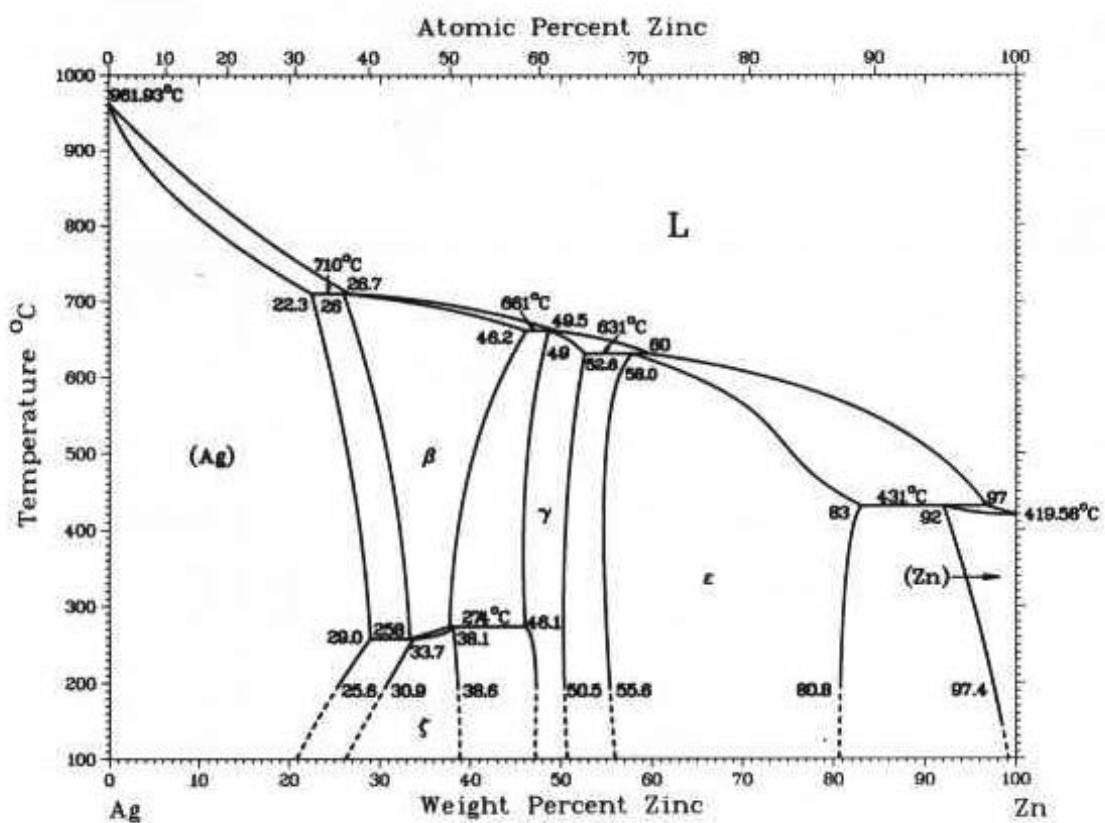
### สังกะสี

ทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะผสมลดลง เนื่องจากสังกะสีมีจุดหลอมเหลวที่ประมาณ 419.6 °C และเพิ่มความสว่างความขาวให้โลหะผสมเนื่องจากอะตอมสังกะสีจะเข้าไปแทนที่อะตอมทองแดงและเงิน อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลของโลหะหลอมเหลวขณะหล่อสังกะสียังถูกนำไปใช้เป็นตัวกันหมองได้ด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ธาตุสังกะสียังทำหน้าที่เป็น Flux และตัวลดการเกิดออกซิไดซ์ (Deoxidizer) ในการหล่อ

หลอม ลดการกักเก็บฟองอากาศในเนื้อเงิน อย่างไรก็ตามการใช้สังกะสีผสมในเนื้อเงินมากเกินไปจะส่งผลต่อการเปลี่ยนประกายสีสะท้อนของผิวเงินจากขาวสว่างในเงินผสมทองแดงเป็นเงินสีขาวประกายเหลืองและเกิดคราบเหลืองที่ผิวได้ง่ายในชิ้นงานที่ใช้งานมาระยะหนึ่ง

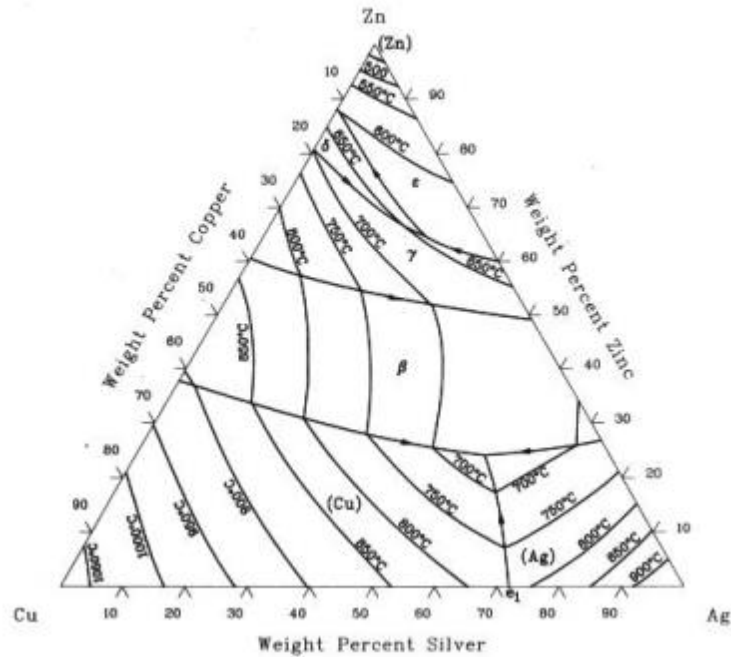
ในมุมมองของช่างหล่อมักอธิบายว่า สังกะสีทำให้น้ำเงินหลอมเหลวไหลตัวได้ดี เรียกว่า ชิงค์ระเบิด อย่างไรก็ตาม สังกะสีทำให้เงินผสมทองแดงมีประกายเหลืองและมีคราบเหลืองที่ผิวได้เร็วเนื่องจากสารประกอบออกไซด์ของสังกะสีมีสีขาวอบเหลือง สังกะสียังสามารถเติมในเงินได้มากถึง 20% โดยน้ำหนักที่ 100 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 1.8 ลักษณะดังกล่าวทำให้เงินที่เติมสังกะสีจะยึดตัวและแปรรูปได้ดี เหมาะกับการผลิตเงินสำหรับการแปรรูป

## Ag-Zn



รูปที่ 1.8 แผนภูมิสมดุลเฟสของเงิน-สังกะสี<sup>(11)</sup>

### Ag-Cu-Zn liquidus projection [88Pet]



รูปที่ 1.9 แผนภูมิสมดุลเฟสของเงิน สังกะสี ทองแดง

รูปที่ 1.9 บ่งบอกการละลายและจุดหลอมเหลวที่เป็นไปได้ในการผสมธาตุ โดยกรณีเงินเกรด 950 มีจุดหลอมเหลวในช่วงประมาณ 870 - 910 องศาเซลเซียส

ในการผลิตอัลลอยเงินผสมสังกะสี และทองแดง ในส่วนผ่านการหล่อขึ้นรูป(อัลลอยสำหรับการหล่อ) พบว่า การเติมสังกะสีร่วมกับทองแดงทำให้ผิวเหลืองบางลง ดังรูปที่ 1.7 แต่ต้องจำกัดปริมาณสังกะสี และสามารถใช้ประโยชน์ด้านการผลิตชิ้นงานที่ต้องการลวดลายซับซ้อน ร่วมกับมีคราบผิวหล่อบางมาก เช่นงานหล่อมุ้งลวด งานบางมีลวดลาย และงานที่ต้องการขีดผิวน้อยหรือให้ผิวสำเร็จจากการร่อนเงาก่อนนำไปชุบเป็นต้น

นอกจากนี้ Davitz Daniel<sup>[12]</sup> ยังได้ทำการวิจัยพบว่า เงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมโดยน้ำหนักของ 0.25-0.5 % Ni ,0-0.5% In ,0.1-0.25 % Si ,0.25-1% Cu ,0.1-0.25 % Metal Silicate และ 5.75-7.5 %Zn โดยทำการหลอมที่อุณหภูมิ 900-960°C ผลลัพธ์ที่ได้จะมีความต้านทานการหมองและการกัดกร่อนได้ดี และมีความแข็งแรงไม่เปราะง่ายโดยนิกเกิลจะมีคุณสมบัติในการทำให้เกรนมีขนาดเล็กละเอียด และป้องกันการเปราะที่เกิดขึ้นหลังการหล่อเงินสเตอร์ลิง แต่นิกเกิลมีผลทำให้เกิดการแพ้ซึ่งในปัจจุบันประเทศในกลุ่มยุโรปมีระเบียบห้ามใช้นิกเกิลในเครื่องประดับ เนื่องจาก Davitz<sup>[12]</sup> ต้องการลดปริมาณของทองแดงเพื่อให้ผลิตภัณฑ์สามารถต้านทานการหมองดีขึ้น จึงได้ใช้สังกะสีและอินเดียมเติมลงไปแทนสัดส่วนเดิมของทองแดง และนำไปทดลองการหมองด้วย บรรยากาศของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พร้อมกับนำไปทดสอบความทนทานต่อการผุกร่อนด้วย บรรยากาศของคลอไรด์ ผลที่ได้คือผลิตภัณฑ์มีความสามารถในการต้านทานการหมองและ

การกัดกร่อนดีที่สุดพร้อมทั้งมีความแข็งแรงสูง โดยมีส่วนผสมของธาตุต่าง ๆ ประกอบด้วย 92.5% Ag 6.57% Zn 0.25% Cu 0.25% Ni 0.18% Metal Silicate 0.25% In ซึ่งงานมีค่าความแข็งอยู่ที่ 160 Brinell และเมื่อนำไปผ่านการอบด้วยความร้อนในเตาที่อุณหภูมิ 454°C แล้ว จุ่มเย็น (Quench) จะได้ค่าความสามารถในการยืดตัว (%Elongation) เท่ากับ 15% - 28%

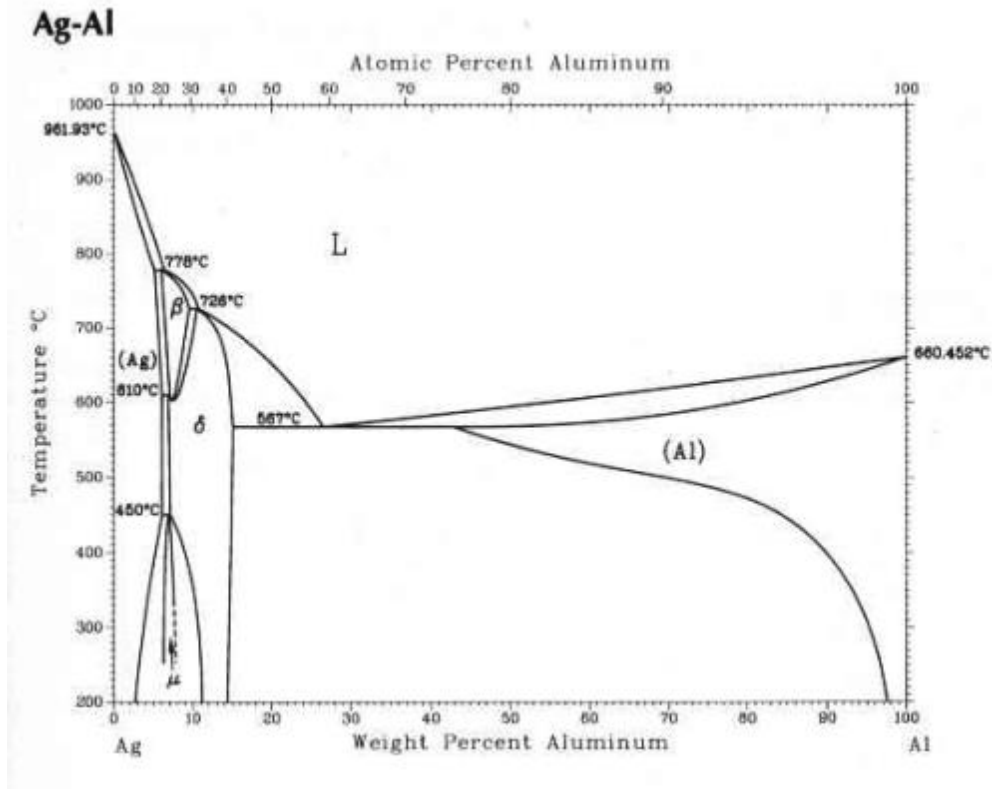
### อะลูมิเนียม และแมกนีเซียม

เป็นกลุ่มธาตุต้องห้ามสำหรับการเติมในเหล็ก และ เงิน เนื่องจากสามารถเกิดสนิมออกไซด์ได้ง่ายทำให้น้ำโลหะหลอมเหลวหนืดและมีผลอย่างมากต่อการไหลตัวและการหล่อ ทำให้หล่อไม่เต็ม เกิดคราบสนิมโลหะ ขวางการเย็นตัวและหล่อไม่ครบแบบ (Misrun หรือ cold-shut) อย่างไรก็ตามการเติมอะลูมิเนียมและแมกนีเซียมในเงินผสมจะส่งผลต่อการเติมความต้านทานการหมองอย่างมากดังตารางที่ 1.3 รวมถึงการสร้าง Protective film คล้ายกับในเหล็กกล้าไร้สนิมจะเกิดได้ดี

ตารางที่ 1.3 แสดงผลค่า DE ที่แตกต่างของเงินที่มีส่วนผสมอัลลอยมากกว่า 1 ชนิดจากกระบวนการหล่อ<sup>(13)</sup>

Alloy No.	Composition									Properties			
	%Ag	%Cu	%Zn	%Sn	%Li	%Si	%Ge	%B	Total	VHNwq*	Tarnish Rate	DE**	VHNht***
1	92.70	7.30	0	0	0	0	0	0	100.00	75	5.0	30-40	100
2	92.70	7.23	0	0	0	0.07	0	0	100.00	75	5.0	30-40	75
3	92.50	5.47	1.79	0	0	0	0.24	0	100.00	75	5.0	30-40	120
4	92.50	4.66	2.23	0.51	0	0.10	0	0	100.00	65	3.5	20-24	115
5	92.50	2.96	4.40	0	0	0.14	0	0	100.00	59	4.0	25-29	75
6	92.50	2.00	5.36	0	0	0.14	0	0	100.00	55	3.5	20-24	80
7	92.50	1.43	5.94	0	0	0.14	0	0	100.00	55	3.0	14-19	75
8	92.70	6.40	0	0.85	0.05	0	0	0	100.00	70	4.0	25-29	130
9	93.40	6.20	0	0.32	0.08	0	0	0	100.00	56	4.0	25-29	120
10	93.35	5.70	0	0.85	0.10	0	0	0	100.00	55	4.0	25-29	130
11	93.25	5.70	0	0.85	0.20	0	0	0	100.00	56	4.0	25-29	138
12	93.15	5.70	0	0.85	0.30	0	0	0	100.00	58	4.0	25-29	140
13	92.70	5.40	1.00	0.85	0.05	0	0	0	100.00	71	4.0	25-29	155
14	92.60	5.25	0.65	0.85	0.05	0.10	0.50	0	100.00	70	3.0	14-19	135
15	92.60	5.25	0.70	0.85	0.05	0.05	0.50	0	100.00	70	3.0	14-19	140
16	92.70	5.00	0.20	0.85	0.05	0	1.20	0	100.00	60	4.0	25-29	125
17	92.70	5.00	0.70	0.85	0.05	0.20	0.50	0	100.00	60	3.0	14-19	125
18	92.70	5.00	0.90	0.85	0.05	0.50	0	0	100.00	66	3.5	20-24	130

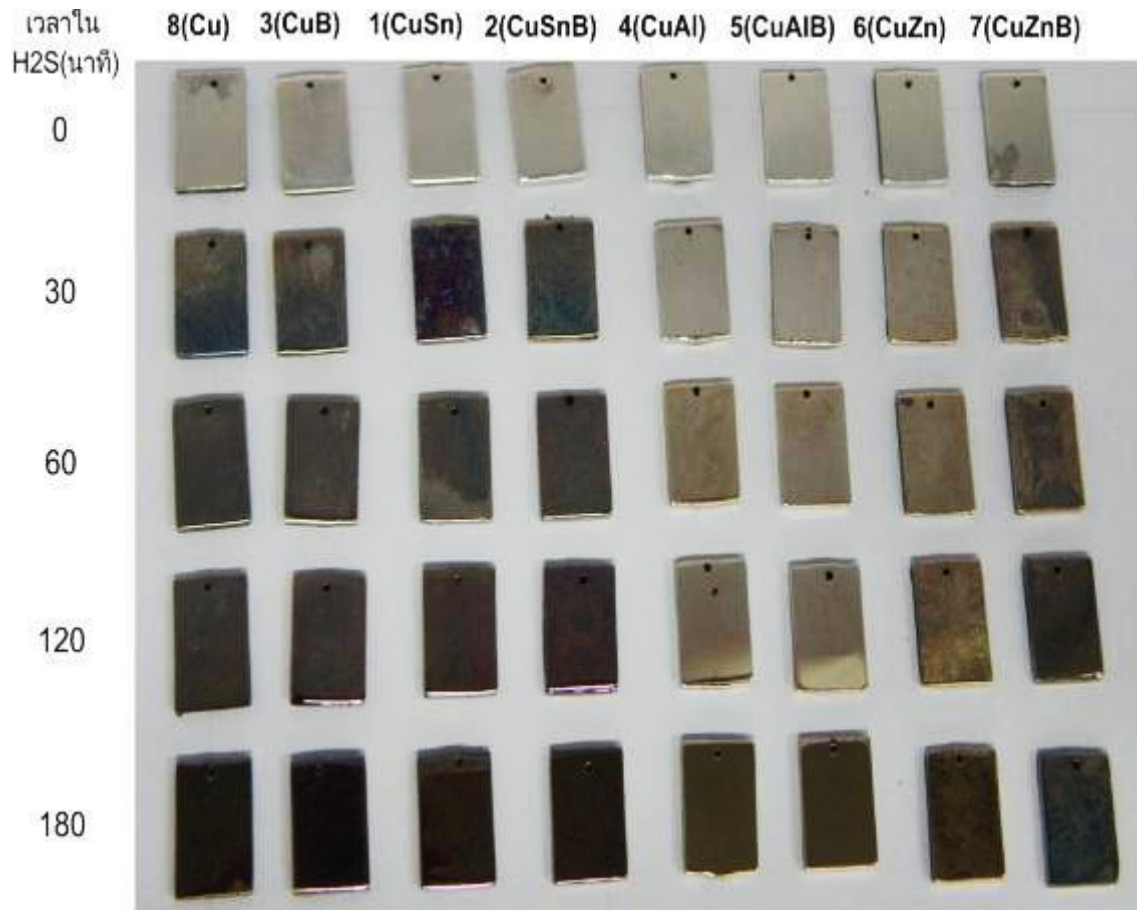
จากการพิจารณา การละลายของอะลูมิเนียม พบแนวโน้มการละลายของอะลูมิเนียมที่สูง ทำให้มีแนวโน้มการละลายของธาตุในเนื้อโครงสร้างพื้นฐานเงินส่งผลให้ต้านทานการหมองได้ดีดังรูปที่ 1.10 และตารางที่ 1.3



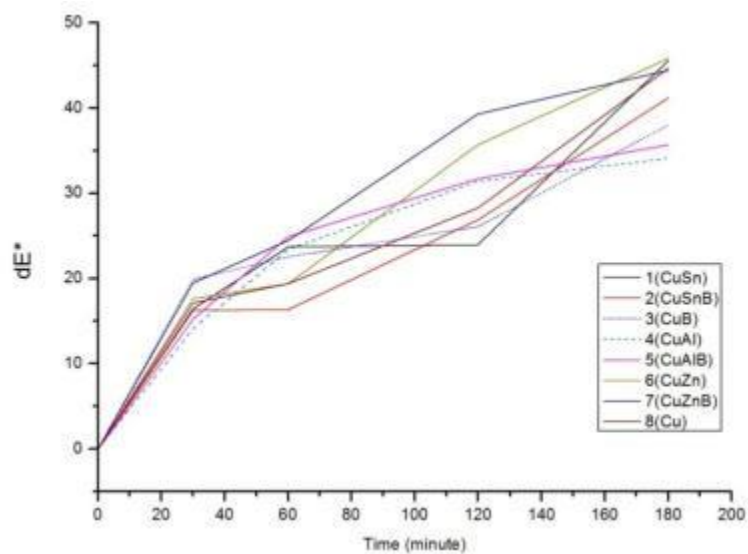
รูปที่ 1.10 แผนภูมิสมดุลเฟสของโลหะผสมเงิน - อะลูมิเนียม<sup>(11)</sup>

จากโครงการวิจัย “การปรับปรุงขนาดเกรนและความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิง 950 ด้วยสารประกอบซิลิโคน” โดย ผศ.ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร และ คณะ<sup>[14]</sup> ได้ศึกษาพฤติกรรมการหมองของเงินผสมทองแดงและธาตุกันหมองเกรด 950 พบว่า เงินผสมทองแดงร่วมกับ อะลูมิเนียม 0.11% ซึ่งงานหมายเลข 4(CuAl)- มีความต้านทานการหมองสูงในบรรยากาศ  $H_2S$  จนถึง 3 ชั่วโมง ดังรูปที่ 1.11 และ 1.12 อีกทั้งยังลดคราบออกไซด์ที่ผิวหลังหล่อและขัดเงา ได้ดี ดังรูปที่ 1.13

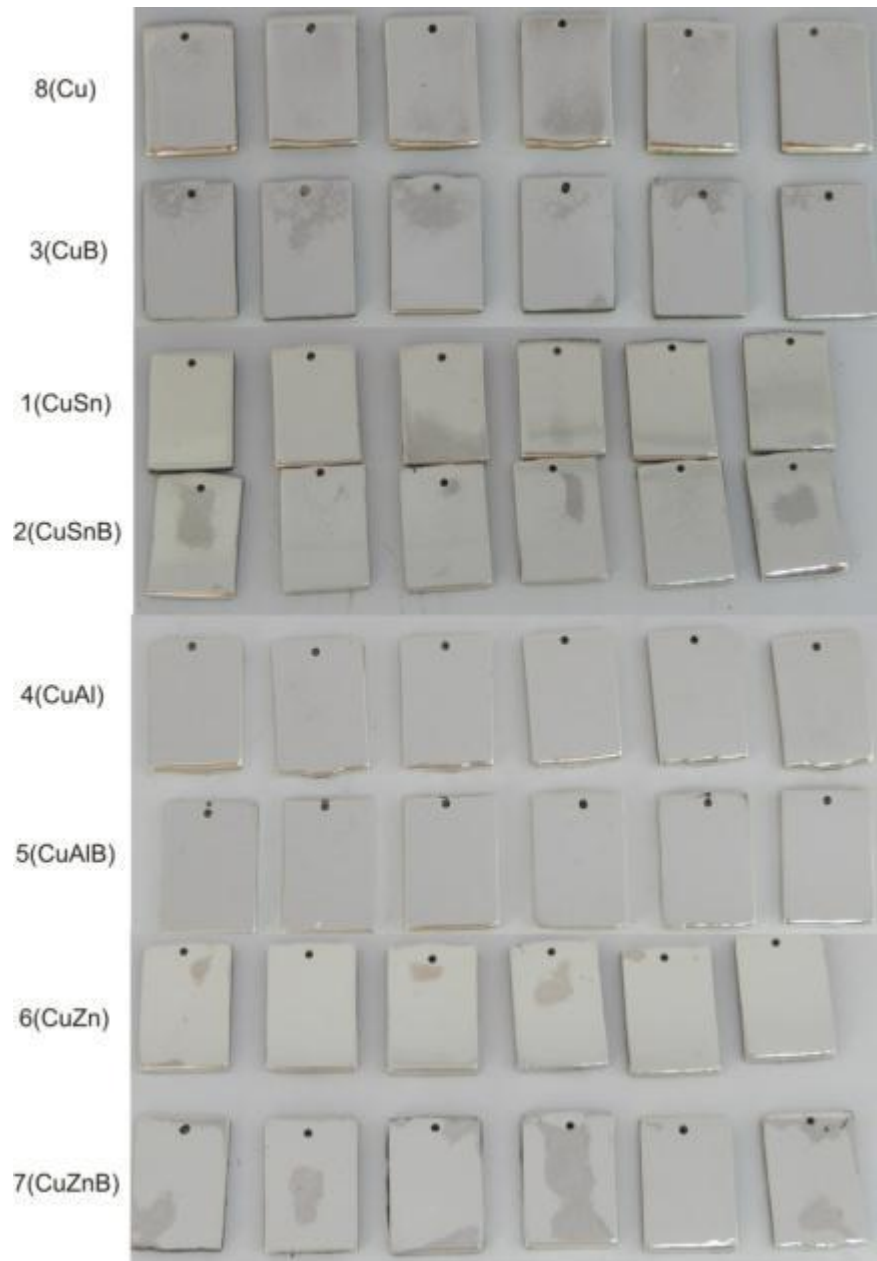
จากข้อมูลเบื้องต้นของสถานประกอบการที่พร้อมจะเข้าร่วมพบว่า ทางบริษัทได้ร่วมกับจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทดลองโลหะเงินผสมทองแดง ดีบุก อะลูมิเนียม และสังกะสี ซึ่งได้ผลความต้านทานการหมองดี และขอนำไปใช้ในรูปอนุสิทธิบัตร เลขที่ 1203000305 อ้างอิงการผลิตเงินอัลลอยต้านทานการหมองสูงไม่เปลี่ยนสีโดยง่าย โดยผลิตเงินเกรด 92.5-94 % ผสม สังกะสี 2-5% อะลูมิเนียม 2.2-2.9% ดีบุก แมกนีเซียม และทองแดงไม่เกิน 0.5 % แต่ยังมีปัญหาในการผลิตตัวเรือนเงินผสมเนื่องจาก เงินผสมมีฟิล์มสีเหลืองใสสะท้อนแสงทำให้ไม่สวยงามเท่ากับเงินผสมทองแดงหลังการขัดสำเร็จ ส่งผลเพิ่มการชุบโรเดียมซึ่งมักให้ผิวที่ไม่สวยงามหากเตรียมผิวขัดไม่ดีดังรูปที่ 1.14 โดยเฉพาะบริเวณซอกมุม และ เงินมีความนิ่มสูง ยากแก่การขัด ทำให้มีความต้องการการพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อลดขั้นตอนการผลิตและลดต้นทุนต่อไป



รูปที่ 1.11 แสดงผลการทดสอบกันหมองของชิ้นงานทดสอบเงิน950ผสมทองแดงและธาตุกันหมอง ทั้ง 8 ชุด [14]



รูปที่ 1.12 แสดงผลการทดสอบความแตกต่างของสีผิว DE(color difference) ของชิ้นงานทดสอบเงิน950ผสมทองแดงและธาตุกันหมอง ทั้ง 8 ชุด [14]



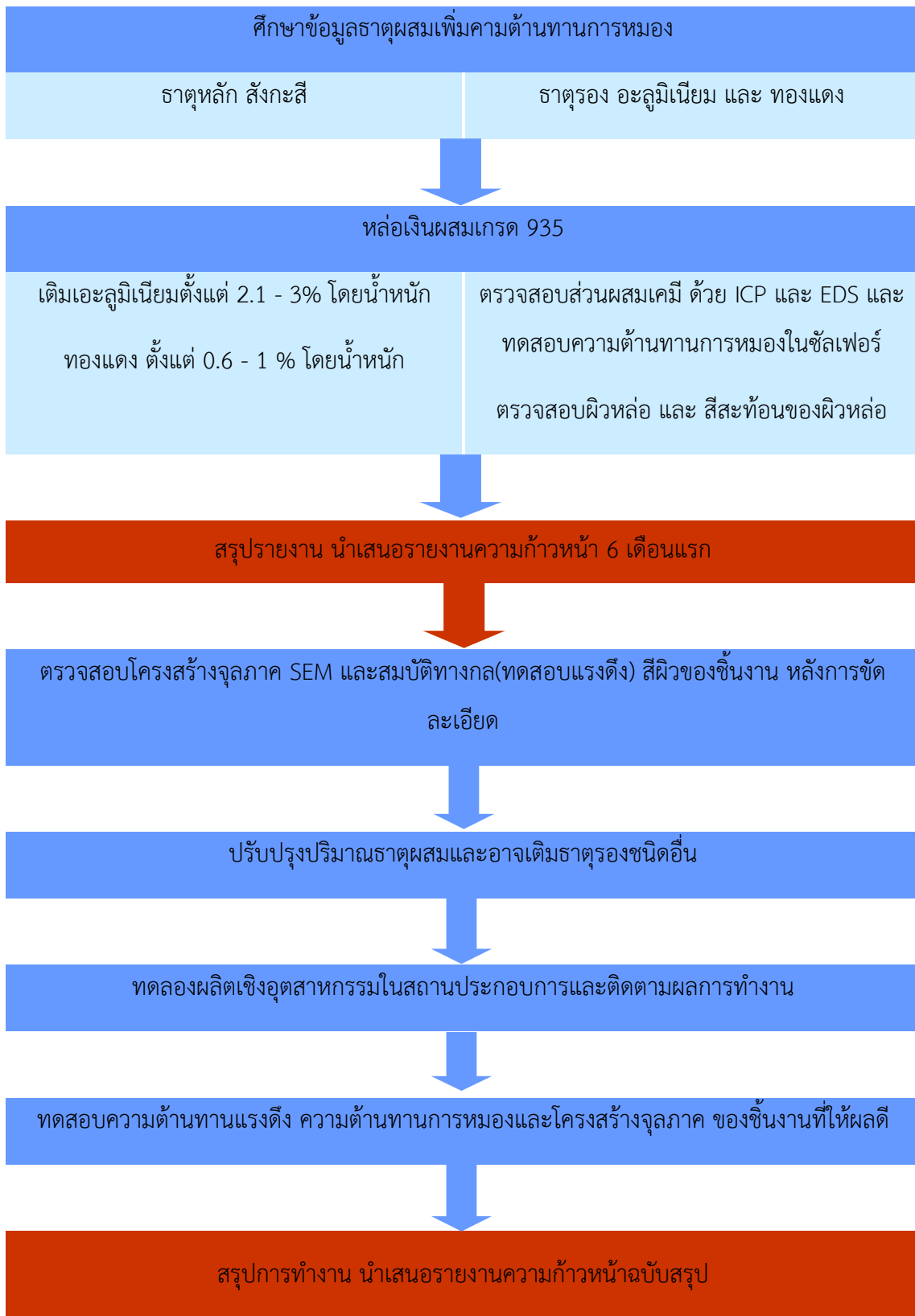
รูปที่ 1.13 แสดงผิวชิ้นงานโลหะเงินผสมธาตุต่างๆ หลังการหล่อและขัดเงา<sup>[14]</sup>



รูปที่ 1.14 แสดงตำหนิที่ผิวชิ้นงานเงินหลังขัดประกอบและชุบโรเดียม

## 1.7 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. เตรียมวัตถุดิบที่มีธาตุผสมรองเช่น อะลูมิเนียมและทองแดง ต่อเงิน มุ่งประเด็นไปที่เพิ่มความต้านทานการหมอง
2. เลือกธาตุหลัก สังกะสี และธาตุรอง (Minor alloy) คือ อะลูมิเนียมและทองแดง
3. หล่อต้นโลหะเงินผสมเกรด 935 โดยมีช่วงการเติมอะลูมิเนียม ตั้งแต่ 2.1-3% โดยน้ำหนักทองแดง ตั้งแต่ 0.6-1% ที่เหลือเป็น สังกะสี โดยดำเนินการหล่อให้ได้ชิ้นงานทดสอบการหมอง การหดตัวและ ชิ้นงานทดสอบแรงดึง
4. ตรวจสอบส่วนผสมเคมี ด้วย ICP และ EDS เพื่อหาปริมาณธาตุผสมในเนื้อโลหะเงิน
5. สรุปรายงานความก้าวหน้า และนำเสนอรายงานความก้าวหน้าในช่วง 6 เดือนแรก
6. หล่อและ ตรวจสอบผลการหล่อ-สีผิว และ ลักษณะผิวหลังขัดละเอียด
7. นำชิ้นงานทดสอบความต้านทานการหมองในบรรยากาศ ซัลเฟอร์ และ คลอไรด์ ทดสอบแรงดึง
8. ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและผิวหมองด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ ตรวจสอบพฤติกรรมหมองด้วย เทคนิคPotentiostat เพื่อศึกษากลไกการเพิ่มความต้านทานการหมอง
9. ทดลองผลิตอัลลอยและเงินในระดับอุตสาหกรรมในสถานประกอบการและติดตามผลการทำงาน
10. สรุปผลการวิจัยและนำเสนอรายงานการวิจัยทั้งหมด โดยมีแผนผังแสดงรายละเอียดการทำงานดังภาพต่อไปนี้



## 1.8 แผนงานโครงการ

ตารางที่ 1.4 แผนกิจกรรมหลักที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ รวมทั้งผลลัพธ์ (Output) ที่คาดว่าจะได้รับ

วัตถุประสงค์	กิจกรรมหลัก	กิจกรรมรอง	ช่วง ระยะเวลา ดำเนินการ	จำนวน วันที่ใช้	ผู้รับผิดชอบ
1.เพื่อศึกษา ผลการ เติม อะลูมิเนียม ทองแดงและ สังกะสี ต่อการเปลี่ยนแปลง ความต้านทานการ หมอง โครงสร้าง จุลภาค และสมบัติ ทางกลของเงินเกรด 935	1. รวบรวม ข้อมูลผลธาตุ ผสมและแนว ทางการหล่อ	1.รวบรวม ข้อมูลของธาตุ ผสม  1.1.2 รวบรวม วิธีการเตรียม โลหะผสม เพื่อผลิตอัล ลอยก่อนการ หล่อเงินเตอร์ ลิง	เดือนที่ 1       เดือนที่ 1	25       25	รศ.ดร.เอก สิทธิ์  และ ผู้ช่วย วิจัย       รศ.ดร.เอก สิทธิ์  และ ผู้ช่วย วิจัย
	1.2 จัดสร้าง โลหะผสมเพื่อ ผลิตอัลลอยและ หล่อต้นเงิน สเตอร์ลิง935	-	เดือนที่ 2-5	80	รศ.ดร.เอก สิทธิ์  และ ผู้ช่วย วิจัย

<p>2.เพื่อหาปริมาณธาตุที่เหมาะสมต่อการผลิตและ สีส้มสะท้อนของชิ้นงานเครื่องประดับเงินเพื่อผลิตในเชิงอุตสาหกรรมได้สะดวก</p>	<p>2.1 วิเคราะห์ผลธาตุผสมต่อความต้านทานการหมองสมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเงิน</p>	<p>2.1รวบรวมผลสีผิวต้นเงิน ความต้านทานการหมองสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค</p>	<p>เดือนที่ 3-5</p>	<p>75</p>	<p>รศ.ดร.เอกสิทธิ์ และ ผู้ช่วยวิจัย</p>
<p>3. เพื่อศึกษาคุณภาพผิวตัวเรือนเงินมุ่งเน้นในส่วนความต้านทานการหมองสูงและมีสีผิวสะท้อนเทียบเคียงเงินสเตอร์ลิงผสมทองแดงที่มักเป็นที่ต้องการของตลาด</p>	<p>3.1 ปรับปรุงส่วนและวิเคราะห์ผลธาตุผสมต่อความต้านทานการหมองและมีสีผิวสะท้อนเทียบเคียงเงินสเตอร์ลิงผสมทองแดง</p>	<p>3.1.1รวบรวมผลอัลลอยและทดสอบการใช้งานระดับอุตสาหกรรมและสรุปผลงานวิจัยทั้งหมด</p>	<p>เดือนที่ 6-12</p>	<p>100</p>	<p>รศ.ดร.เอกสิทธิ์ และ ผู้ช่วยวิจัย</p>

ตารางที่ 1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาการดำเนินการ เดือนที่												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. รวบรวมข้อมูลผลธาตุผสม รองต่อความต้านทานการหมอง	←→												
2. จัดสร้างโลหะผสมเพื่อ ผลิตอัลลอยและหล่อต้นเงิน สเตอร์ลิง935		←→											
3. วิเคราะห์ผลธาตุผสม ต่อ ความต้านทานการหมอง สมบัติทางกล และโครงสร้าง จุลภาคของชิ้นงานเงิน			←→										
5. รวบรวมผลสีผิวต้นเงิน ความ ต้านทานการหมอง สมบัติทาง กล และโครงสร้างจุลภาคของ ชิ้นงานเงิน								←→					
6. ทดสอบการใช้งานระดับ อุตสาหกรรมและสรุปผล งานวิจัยทั้งหมด									←→				

## บทที่ 2

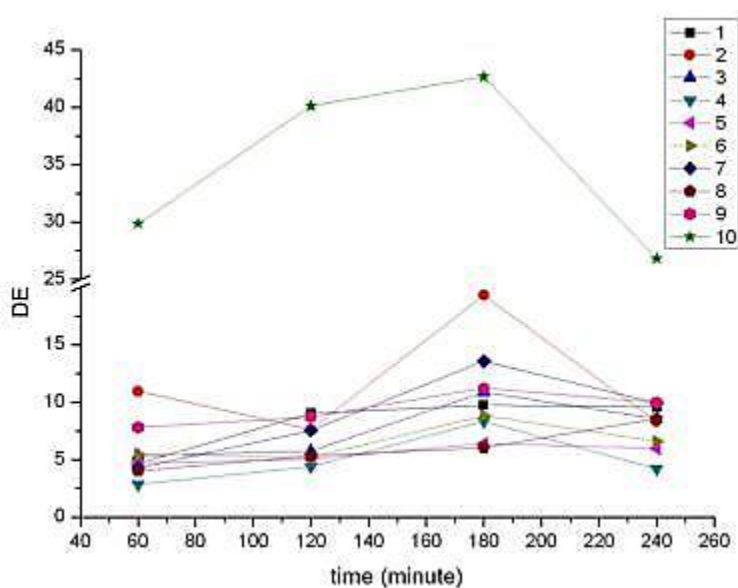
---

# ผลการปฏิบัติงาน และสรุปผลการวิจัย

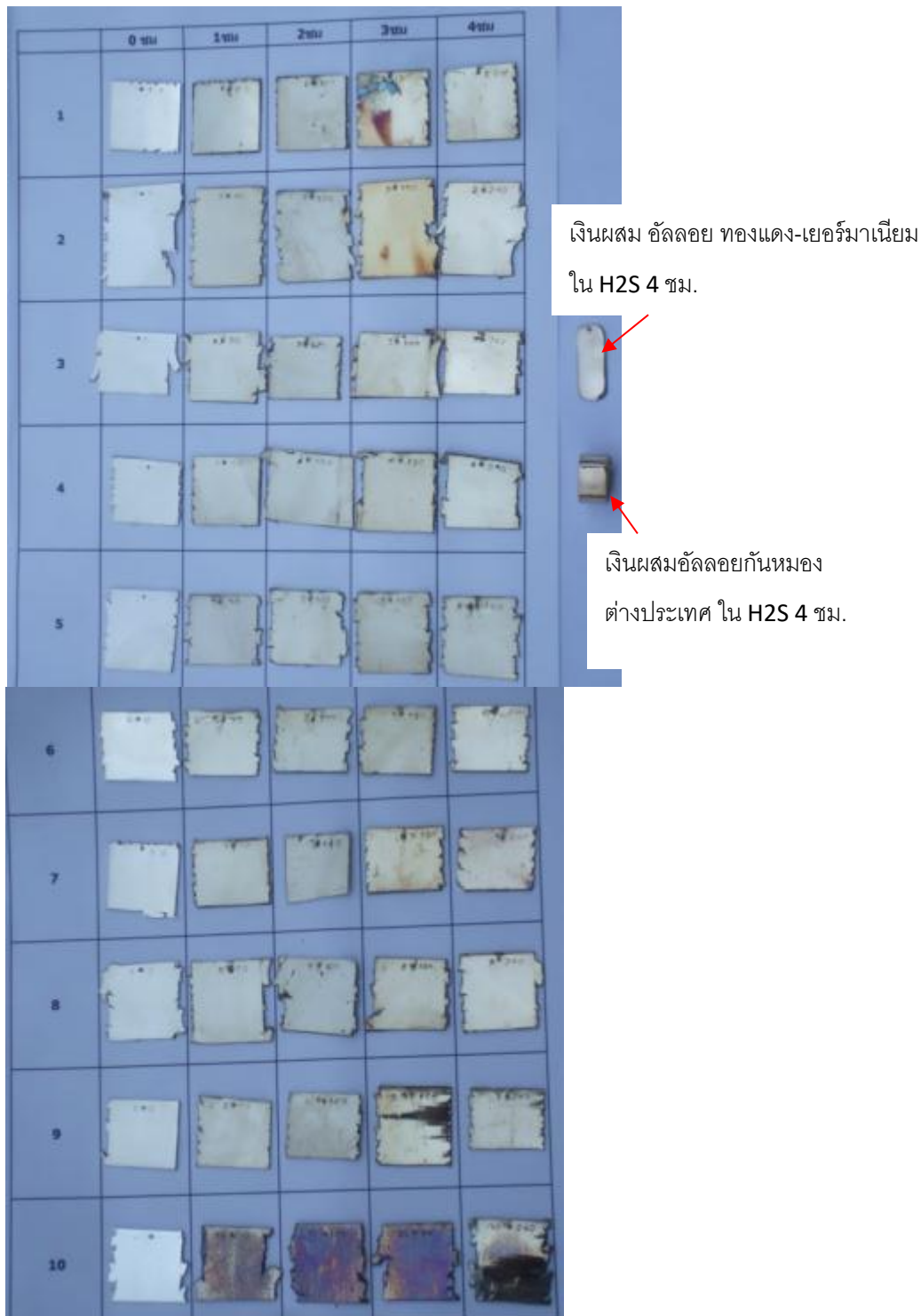
## 2.1 ผลการปฏิบัติงาน

ในช่วงแรกของการรวบรวมข้อมูล คณะผู้วิจัยได้ศึกษาผลของ อะลูมิเนียม ต่อความต้านทานการหมอง โดยจากโครงการเตรียมเงินผสมเกรด 950 ที่มีสมบัติกันหมองสูง จาก สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุแห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าการเติม อะลูมิเนียม 2.2 – 2.8% โดยน้ำหนัก และ สังกะสี 2.3-3.5% โดย น้ำหนักจะทำให้ความต้านทานการหมองเพิ่มขึ้น โดยจากการทดสอบในบรรยากาศ  $H_2S$  จะพบว่ามีความ ต้านทานการหมองเพิ่มขึ้นในทุกกลุ่ม ตั้งแต่ อะลูมิเนียม 2.2 – 2.8% โดยน้ำหนัก และ สังกะสี 2.3-3.5% ดัง รูปที่ 2.1 โดยพบว่าผิวในอัลลอยกลุ่มนี้จะมีเพียงสีผิวเหลือง-น้ำตาลหลังการทดสอบการหมองใน  $H_2S$  เท่านั้น (ดังรูปที่2.2)ซึ่งสามารถทดสอบการหมองได้ดีเทียบเท่ากับเงินผสมเยอรมาเนียมและอัลลอยทางการค้าจากต่างประเทศ ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนผสมทางเคมี(ก่อนหล่อ)ของเงินสเตอร์ลิง 940 (ที่มาจากผลงานข้างต้น)

รายการ	2.2Al 0.3Sn 0.2Mg 3.5Zn	2.2Al 0.3Sn 2.3Zn	2.2Al 3.8Zn	2.5Al 0.3Sn 3Zn 0.2Mg	2.5Al 1.5Sn3 Zn	2.5Al 3.5Zn	2.8Al 0.3Sn 0.2Mg 2.7Zn	2.8Al 1.5Sn 1.7Zn	2.8Al 3.2Zn	6Cu
รหัสชิ้นงาน	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
สังกะสี	3.5	2.3	3.8	3	3	3.5	2.7	1.7	3.2	-
ทองแดง	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6
อะลูมิเนียม	2.2	2.2	2.2	2.5	2.5	2.5	2.8	2.8	2.8	-
แมกนีเซียม	0.2	-	-	0.2	-	-	0.2	-	-	-
ดีบุก	0.3	0.3	-	0.3	1.5	0.00	0.3	1.5	-	-



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความแตกต่างการสะท้อนแสง Color difference ( $DE^*$ ) กับ เวลาในบรรยากาศ  $H_2S$ (ชั่วโมง)(ผลงานของคณะผู้วิจัยที่ดำเนินการที่สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาฯ)



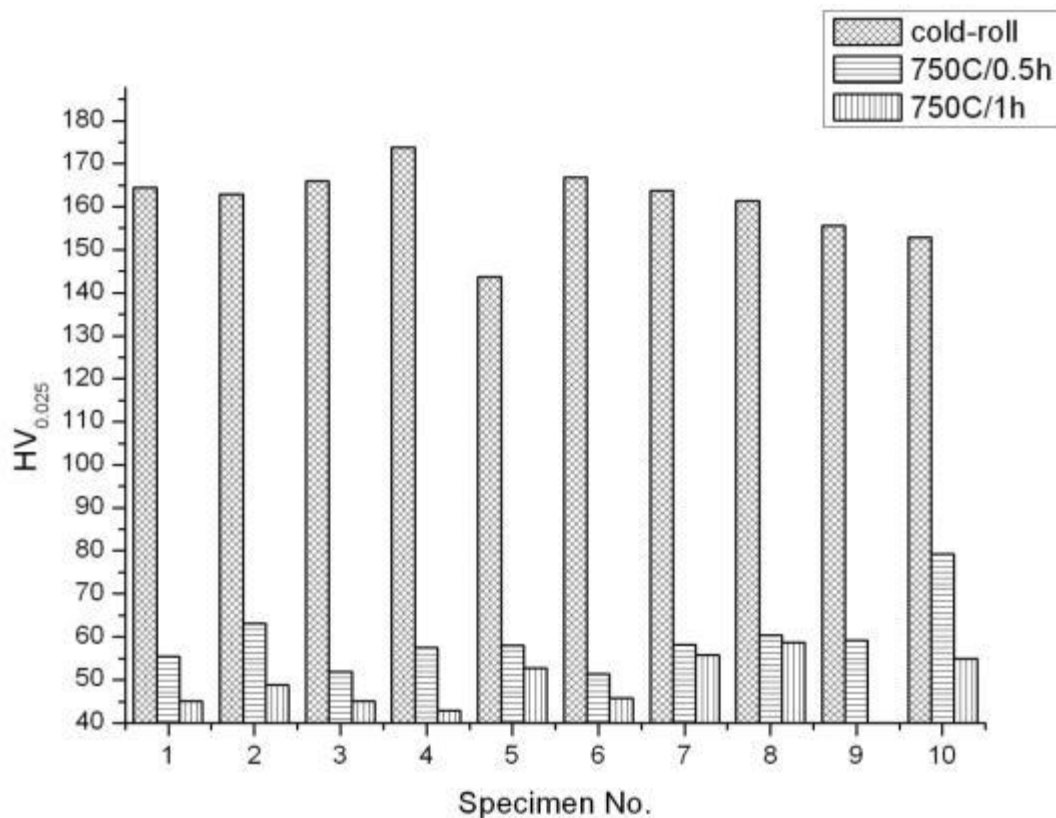
รูปที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบสีชิ้นงานที่ผ่าน การทดสอบกันหมองในบรรยากาศ  $H_2S$  ใน 0, 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง(ผลงานของคณะผู้วิจัยที่ดำเนินการที่สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาฯ)

ความสามารถในการแปรรูปได้ดี ดังรูปที่ 2.3 เนื่องจากหากพิจารณาเฟสไดอะแกรมของ Ag-Al และ Ag-Zn จะพบว่า สังกะสี และ อะลูมิเนียม สร้างสารละลายของแข็งในเงินได้ดี ดังรูป 1.10 และ 1.8



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะชิ้นงานหลังการรีดเย็นที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงาน 1-10 ผสม อะลูมิเนียม สังกะสี แมกนีเซียม และ ทองแดง(ผลงานของคณะผู้วิจัยที่ดำเนินการที่สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาฯ)

เนื่องจากชิ้นงานผ่านการเทรียงและรีดลดขนาดจากความหนา 20 มม. ไปสู่ 1.7 มม. โดยมีอัตราการลดขนาดที่ 91.5 % พบว่า อัลลอยกลุ่มที่ 10 ผสมทองแดง สามารถเกิดปัญหาในการรีดแปรรูปได้ง่ายสังเกตจากการแตกของขอบข้างชิ้นงานลักษณะดังกล่าวทำให้ผิวหลังรีดไม่สวยงาม และผิวขรุขระไม่สม่ำเสมอ ภายหลังจากการแปรรูปพบว่าชิ้นงานส่วนใหญ่มีความแข็งเพิ่มขึ้นโดยมีความแข็งเพิ่มขึ้นในช่วง 143-174  $HV_{0.025}$  ส่วนเงินผสมทองแดง(ชิ้นงานที่ 10)มีความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 153  $HV_{0.025}$  ภายหลังจากการอบอ่อนที่ 750 องศาเซลเซียส 30 นาทีและ 60 นาที พบว่า ค่าความแข็งจะลดลงจากช่วง 143-174  $HV_{0.025}$  เป็น 51-63  $HV_{0.025}$  (สำหรับการอบ 750 องศาเซลเซียส 30 นาที) และ 39.6-58.65  $HV_{0.025}$  (สำหรับการอบ 750 องศาเซลเซียส 60 นาที)



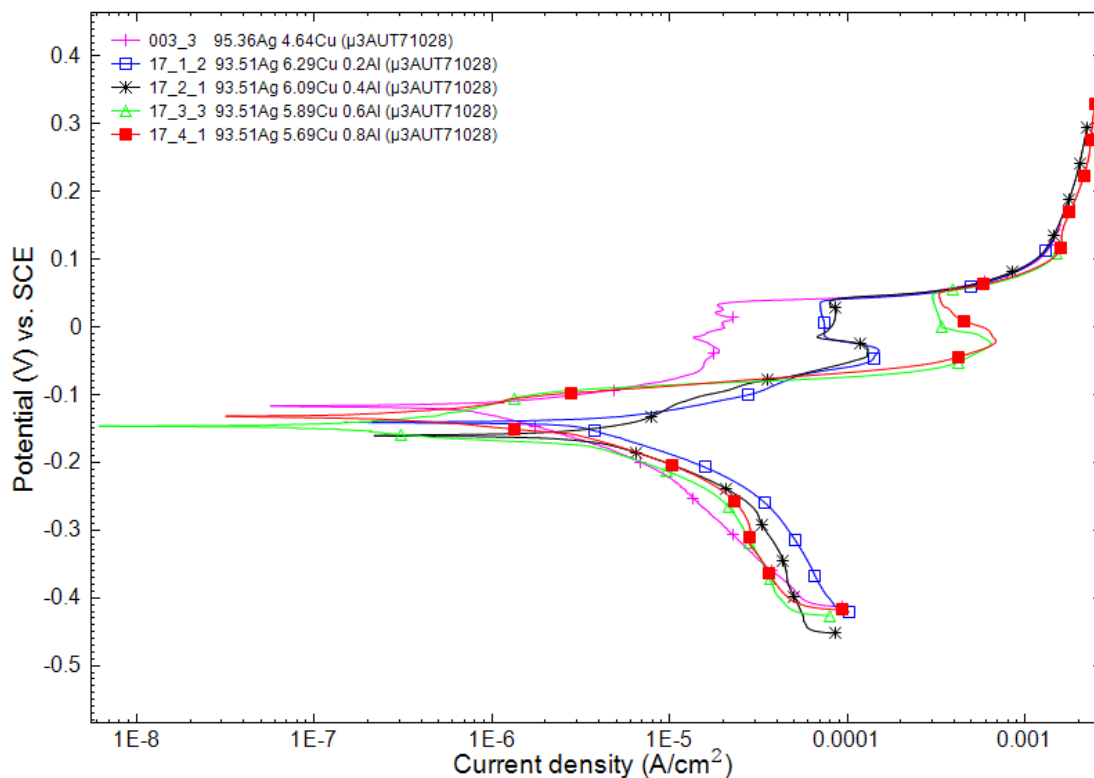
รูปที่ 2.3.1 แสดงความแข็งหลังการรีดแปรรูปและอบที่ 750 องศาเซลเซียส 30 และ 60 นาที (ผลงานของคณะผู้วิจัยที่ดำเนินการที่สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาฯ)

ผลการศึกษาข้างต้น พบว่าเงินผสมอะลูมิเนียม 2.2-2.8 % และ สังกะสี 3.2-3.8 % สามารถผลิตเป็นตัวเรือนเครื่องประดับโดยยังสามารถเลือกวิธีผลิตทั้งจากการหล่อและ การรีดแปรรูป

จากผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับการพิจารณาการเติมธาตุตั้งสิทธิบัตร US. Patent No. 20 06/0045792 ดังตารางที่ 1.3 พบว่าการเติม สังกะสี และดีบุก ร่วมกับ ทองแดงจะส่งผลลด Tarnish rate (อัตราการหมอง) ลงจาก 5 เป็น 3.5-4 นอกจากนี้ อะลูมิเนียมยังลดการหมองของชิ้นงานดังภาพ 1.11 และ 1.12 อย่างไรก็ตามการเติม ทองแดงในอัลลอยจำเป็นต้องระวังการเกิดฝ้าดำแดง เนื่องจากทองแดง

จากผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับการพิจารณาการเติมธาตุตั้งสิทธิบัตร US. Patent No. 20 06/0045792 ดังตารางที่ 1.3 พบว่าการเติม สังกะสี และดีบุก ร่วมกับ ทองแดงจะส่งผลลด Tarnish rate (อัตราการหมอง) ลงจาก 5 เป็น 3.5-4 นอกจากนี้ อะลูมิเนียมยังลดการหมองของชิ้นงานดังภาพ 1.11 และ 1.12 อย่างไรก็ตามการเติมทองแดงในอัลลอยจำเป็นต้องระวังการเกิดฝ้าดำแดงอันเป็นผลมาจากปฏิกิริยาทองแดงกับออกซิเจนในช่วงการหล่อหลอมและการสัมผัสบรรยากาศทั่วไปดังเช่นการหมองในสภาวะการใช้งานเครื่องประดับเงินทั่วไป

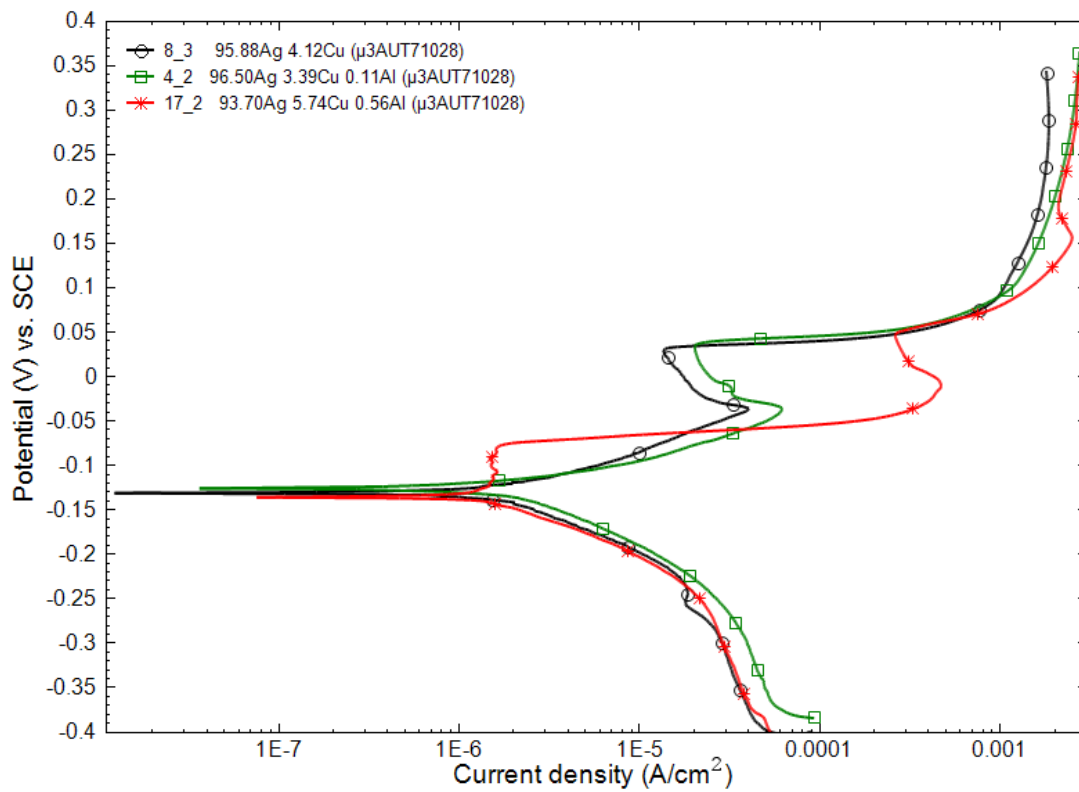
ผลจากความต้านทานการหมองสูงของเงินผสมอะลูมิเนียมทำให้คณะผู้วิจัยสนใจศึกษาการเกิดฟิล์มที่ผิวของเงินด้วยใช้เครื่อง Potentiostat โดยทำการวิเคราะห์ค่าศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยศึกษาปริมาณส่วนผสมของอะลูมิเนียมในเงินผสมทองแดงเกรด 935 จำนวน 5 ชิ้นงานทดสอบ คือ 0, 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 %Al โดยน้ำหนัก ประกอบด้วย กลุ่มชิ้นงาน 003(95.36%Ag 4.64%Cu), กลุ่มชิ้นงาน 17-1(93.51%Ag 6.29%Cu 0.2%Al), กลุ่มชิ้นงาน 17-2(93.51%Ag 6.09%Cu 0.4%Al), กลุ่มชิ้นงาน 17-3(93.51%Ag 5.89%Cu 0.6%Al) และ กลุ่มชิ้นงาน 17-4 (93.51%Ag 5.69%Cu 0.8%Al) พบว่าลักษณะเส้นโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นแสดงถึงการสร้างฟิล์มพาสซีฟในโลหะเงินทั้ง 5 ส่วนผสมข้างต้น ที่ช่วงศักย์ไฟฟ้า -0.035 ถึง -0.050 V แสดงในรูปที่ 2.4 ชิ้นงานทุกชิ้นมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม ( $E_{pit}$ ) ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.033 – 0.050 V ส่วนความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มพาสซีฟ ( $I_p$ ) พบว่า ชิ้นงาน 003 ซึ่งไม่มีการเติม Al เป็นธาตุผสมนั้น มีค่าน้อยกว่าชิ้นงานอื่นอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่า สามารถปกป้อง และ/หรือ มีความแข็งแรงของฟิล์มสูงกว่าชิ้นงานอื่น โดยเมื่อ %Al เพิ่มขึ้น และ %Cu ลดลง มีแนวโน้มทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลง และยังพบว่า เมื่อ %Al เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นของกระแสในช่วงพาสซีฟเพิ่มขึ้นด้วย โดยชิ้นงานโลหะเงินผสมทองแดงและอะลูมิเนียมที่ 0.6% เป็นตัวแทนของชิ้นงานที่นำมาใช้ในการศึกษาต่อ นอกจากนี้ในรูปที่ 2.5 ยังแสดงให้เห็นว่า ลักษณะเส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินผสมทองแดง 8 (95.88%Ag 4.12%Cu) โลหะเงินผสมทองแดงและอะลูมิเนียม 4 (96.5%Ag 3.39%Cu 0.11%Al), 17 (93.7%Ag 5.74%Cu 0.56%Al) แสดงถึงการสร้างฟิล์มพาสซีฟเช่นกัน ที่ช่วงศักย์ไฟฟ้า -0.036 ถึง -0.009 V และการเพิ่ม %Al ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของกระแสในช่วงพาสซีฟเพิ่มขึ้นด้วย ผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลในรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่า อะลูมิเนียมสามารถเป็นธาตุผสมที่ช่วยลดอัตราการกัดกร่อนได้



รูปที่ 2.4 เส้นโพลาริเซชันของโลหะผสม 003(95.36%Ag 4.64%Cu), 17-1(93.51%Ag 6.29%Cu 0.2%Al), 17-2(93.51%Ag 6.09%Cu 0.4%Al), 17-3(93.51%Ag 5.89%Cu 0.6%Al) และ 17-4 (93.51%Ag 5.69%Cu 0.8%Al) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 % โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2.2 ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของโลหะผสม 003(95.36%Ag 4.64%Cu), 17-1(93.51%Ag 6.29%Cu 0.2%Al), 17-2(93.51%Ag 6.09%Cu 0.4%Al), 17-3(93.51%Ag 5.89%Cu 0.6%Al) และ 17-4 (93.51%Ag 5.69%Cu 0.8%Al) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 % โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ส่วนผสมทางเคมี	Corrosion parameter				
		$E_{corr}$ (V)	$I_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	Corrosion rate (mm/year)	$E_{pit}$ (V)	$I_p$ ( $\mu A/cm^2$ )
003	95.36Ag 4.64Cu	-0.115	1.0512	0.000338	0.033	18.39
17-1	93.51Ag 6.29Cu 0.2Al	-0.142	34.9830	0.011889	0.038	70.13
17-2	93.51Ag 6.09Cu 0.4Al	-0.158	25.2560	0.008662	0.036	78.67
17-3	93.51Ag 5.89Cu 0.6Al	-0.147	0.3536	0.000123	0.049	301.45
17-4	93.51Ag 5.69Cu 0.8Al	-0.131	0.4813	0.000171	0.050	325.71

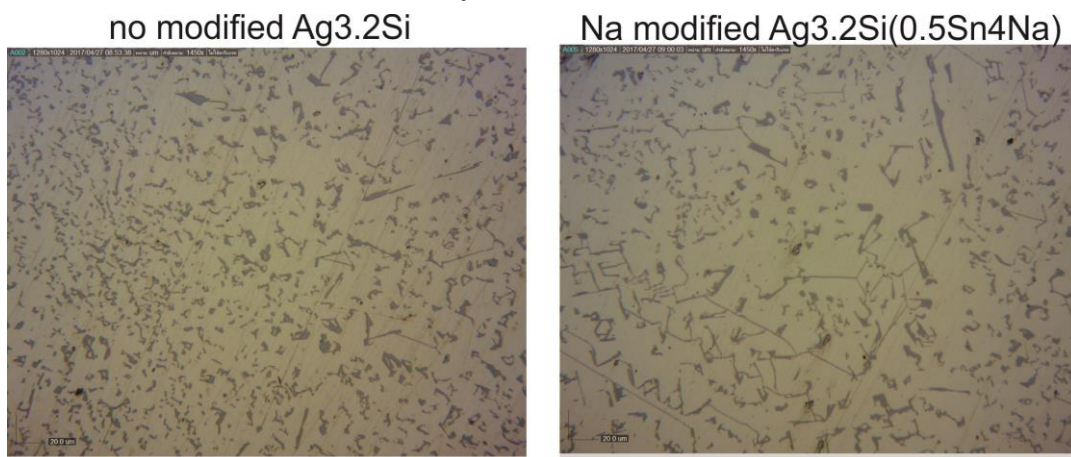


รูปที่ 2.5 เส้นโพลาริเซชันของโลหะผสม 8 (95.88%Ag 4.12%Cu) , 4 (96.5%Ag 3.39%Cu 0.11%Al) และ 17(93.7%Ag 5.74%Cu 0.56%Al) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 % โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2.3 ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของโลหะผสม 8(95.88%Ag 4.12%Cu) , 4(96.5%Ag 3.39%Cu 0.11%Al) และ 17(93.7%Ag 5.74%Cu 0.56%Al) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 % โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ส่วนผสมทางเคมี	Corrosion parameter				
		$E_{corr}$ (V)	$I_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Corrosion rate (mm/year)	$E_{pit}$ (V)	$I_p$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
8	95.88Ag 4.12Cu	-0.132	8.9365	0.002842	0.032	13.75
4	96.50Ag 3.39Cu 0.11Al	-0.124	9.1309	0.002875	0.036	20.18
17	93.70Ag 5.74Cu 0.56Al	-0.132	10.5730	0.003659	0.049	263.96

จากการศึกษาที่ผ่านมาทำให้นักวิจัยมีความสนใจผลิตชิ้นงานในส่วนผสม อะลูมิเนียม 2.8 % ร่วมกับการเติม สังกะสี ทองแดง ซิลิคอน และสตรอนเชียม โดยได้นำมาสเตอร์อัลลอยอะลูมิเนียม ผสม สตรอนเชียม 10 % โดยน้ำหนัก (ดังรายละเอียดในรูป 2.7) และ โลหะโซเดียมมาใช้ในการทดลอง โดยเริ่มการทดสอบ กลไกการทำให้เฟสซิลิคอนในเงิน เล็กกลงที่ เรียกว่า modification ซึ่งอาศัยหลักการลดจุดยูเทคติกและการเลื่อนจุดยูเทคติกมาทางซ้ายของเฟสไดอะแกรม ดังที่มักพบใน อะลูมิเนียมผสมซิลิคอนที่มักพบmodification ด้วยโซเดียม และ สตรอนเชียม เป็นหลัก คณะวิจัยได้ทดลองหล่อ เงินผสม ซิลิคอน 4 % (ดังรูป 2.8) และ เติม ดีบุกผสมโซเดียม 4 % ในปริมาณ 0.5 % โดยน้ำหนักพบว่าได้ผลโครงสร้างดังรูปที่ 2.6 ซึ่งพบว่าเฟสที่มีซิลิคอนสูง (สีเข้ม) มีขนาดใหญ่และปลายแหลม ทำให้จำเป็นต้องทดลองปรับปรุงวิธีการหล่อเพื่อลดแนวโน้มการสูญเสียธาตุปรับปรุงเฟสเช่นโซเดียม หรือ สตรอนเชียม รวมถึงยกเลิกการเติมดีบุก และ ทำการทดลองนำ อะลูมิเนียมผสมสตรอนเชียม 10% โดยน้ำหนัก (รูป 2.9) มาใช้ปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคต่อไป

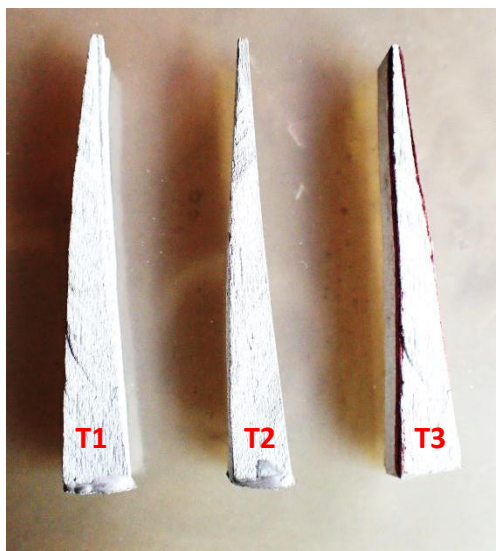


รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างจุลภาค ที่กำลังขยาย 20 เท่า ของชิ้นงานเงินผสม ซิลิคอน 3.2 % ที่เติมหรือไม่เติม ดีบุกผสมโซเดียม

ในการปรับปรุงโครงสร้างด้วย อะลูมิเนียมผสมสตรอนเชียม 10% โดยน้ำหนัก คณะวิจัยได้ทดลองการผลชิ้นงานเงินผสมซิลิคอน 4 % เพื่อปรับโครงสร้างโดยผลิตชิ้นงาน 3 ชิ้นดังรูป 2.7 มีส่วนผสมเคมี ดังตารางที่ 2.4

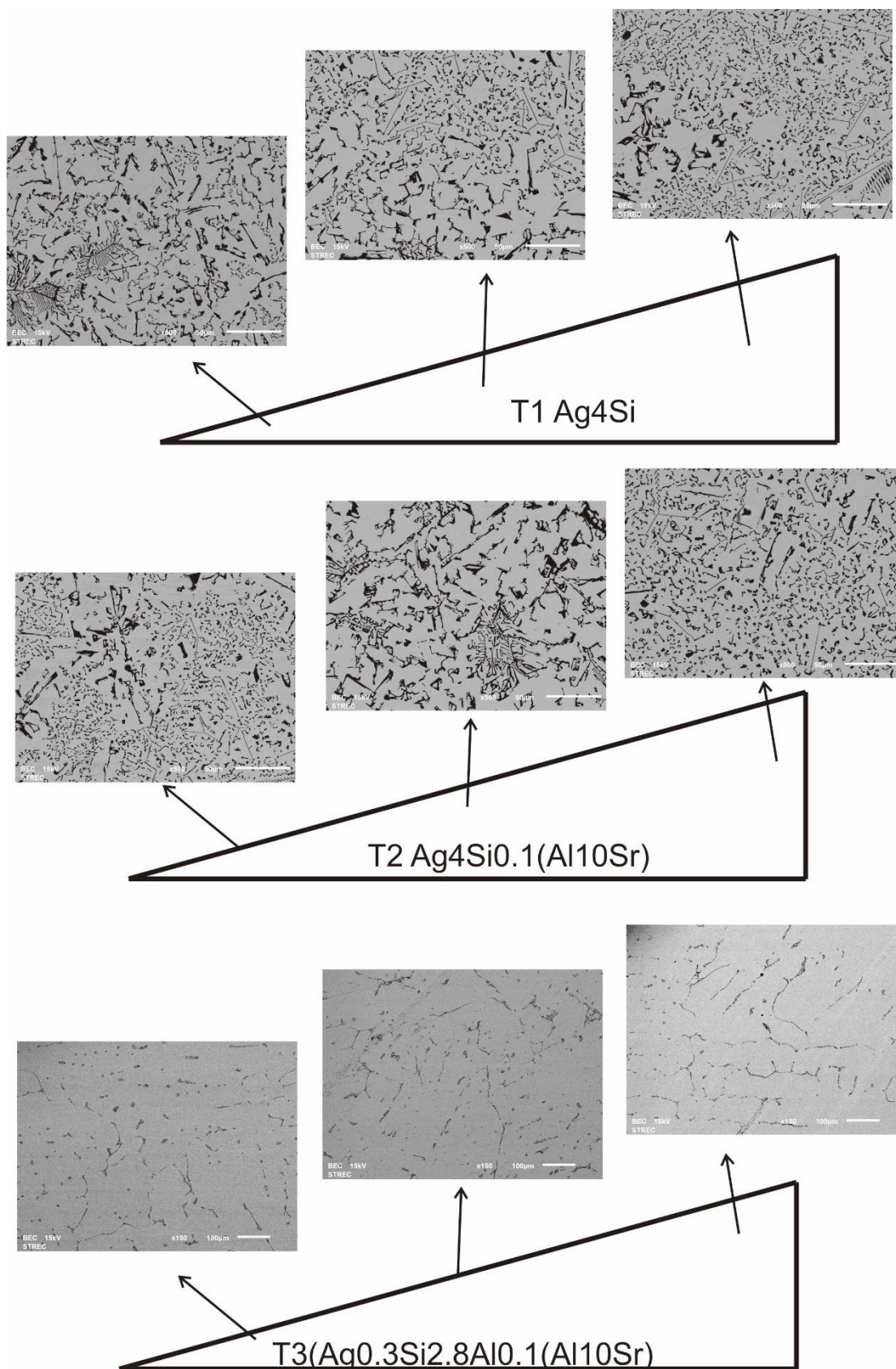
ตารางที่ 2.4 แสดงส่วนผสมเคมีของชิ้นงานทดลองการปรับปรุงโครงสร้างเฟสซิลิคอนด้วยสตรอนเชียม

ชิ้นงาน	ส่วนผสม (%wt)			
	Ag	Al	Si	Al10Sr
T1	bal	-	4	-
T2	bal	-	4	0.1
T3	bal	2.8	0.3	0.1



รูปที่ 2.7 แสดงชิ้นงานทดสอบการปรับปรุงโครงสร้างเฟสซิริโคนด้วยสตรอนเซียม

จากผลโครงสร้างจุลภาคในรูป 2.8 แสดงให้เห็นว่า สตรอนเซียมไม่สามารถปรับปรุงหรือลดขนาดของเฟสซิริโคนได้ ดังจะพบว่า โครงสร้างการกระจายตัวและขนาดของเฟสทั้งสองมีไม่แตกต่างกันระหว่างบริเวณเดียวกันสำหรับการเปรียบเทียบในชิ้นงาน T1: T2 แม้ว่า จะพบเห็นการกระจายตัวของเฟสที่มีขนาดแตกต่างกัน แต่ไม่มีโครงสร้างที่มีความละเอียดและเล็กมากดังที่มักพบเห็นในโครงสร้างการปรับปรุงด้วยสตรอนเซียมในอะลูมิเนียมซิริโคน และแม้คณะผู้วิจัยจะทดลองในกลุ่มส่วนผสมเป้าหมาย T3  $Ag_0.3Si_2.8Al_0.1(Al_{10}Sr)$  ก็ยังคงไม่พบความแตกต่างในแต่ละบริเวณของชิ้นงานซึ่งมีการเย็นตัวที่ไม่เท่ากันเนื่องจากรูปเล่มที่พบจะมีปลายที่เย็นตัวเร็วและฐานที่มีการเย็นตัวช้า อย่างไรก็ตามคณะผู้วิจัยยังคงเติมโลหะผสมอะลูมิเนียม ร่วมกับสตรอนเซียม 10 % นี้ในอัลลอยทดลองต่อไปเพื่อศึกษาผลที่อาจเป็นประโยชน์ในการพัฒนาอัลลอยในอนาคต



รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบการปรับปรุงโครงสร้างเฟสซิลิคอนด้วยสตรอนเชียม

## CERTIFICATE OF QUALITY

## 质 检 单

CHANGSHACHINA February 21, 2017  
日期: 2017 年 02 月 21 日

THIS IS TO CERTIFY THE QUALITY AS FOLLOWS:  
兹证明此批货物质量如下:

PRODUCT BATCH NUMBER: HB20170221032  
产品批号: HB20170221032

DESCRIPTION OF GOODS	货物描述	Shape 形状					TOTAL NET WEIGHT 总重
Al-Sr alloy 10%	铝铈合金	Ingot 锭状					2500kgs /2500 公斤
标准%:	Sr 10-11	Fe <0.20	Ca <0.10	Si <0.20	Mg <0.30	Ba <0.20	Al remainder
实测%:	10.30	0.12	0.014	<0.20	<0.01	0.016	remainder



รูปที่ 2.9 แสดงความผสมทางเคมีและลักษณะของมาสเตอร์อัลลอย อะลูมิเนียม ผสม สตรอนเชียม 10% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 2.10 แสดงมาสเตอร์อัลลอยเงินผสมซิลิคอน 4 %โดยน้ำหนักผ่านการหล่อในเตากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

## 2.2 ผลการทดลองผลิตต้นเงินและชิ้นงานทดสอบ

จากผลการศึกษาข้างต้น ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาในส่วนผสมที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตโดยมุ่งประเด็นที่ การเติม อะลูมิเนียม และ สังกะสี ที่มีการใช้งานอยู่แล้วและสามารถผลิตใช้เองได้ในโรงงาน โดย

ทดลองผลิตส่วนผสมโดยใช้สัดส่วนเนื้อเงินที่ 93.5% โดยน้ำหนักร่วมกับมาสเตอร์อัลลอยที่มีซิลิคอนและ สตรอนเชียมข้างต้น โดยใช้ส่วนผสมเริ่มต้นและหลังผลิต ดังตารางที่ 2.5 ผ่านการหล่อ ในเครื่องหล่อระบบ สูญญากาศ omc 1 ที่อุณหภูมิเบา 500 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิเทที่ 940-960 องศาเซลเซียส และมีสี ผิวชิ้นงานอมเหลืองหรือ อมเทาเนื่องจากคราบออกไซด์ดังรูปที่ 2.11และมีผิวชิ้นงาน(หลังขัดเงา)สีขาวอมเทา เทียบเคียงกับสีชิ้นงานเงินชุบโรเดียมดังรูปที่ 2.13 แต่ยังคงทดสอบการเปลี่ยนสีขณะใช้งานและความ ต้านทานการหมองเนื่องจากสัมผัสสารประกอบซัลเฟอร์ต่อไป

ตารางที่ 2.5 แสดงส่วนผสมของชิ้นงานผ่านการหล่อ ในเครื่องหล่อระบบสูญญากาศ omc 1 ที่อุณหภูมิเบา 500 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิเทที่ 940-960 องศาเซลเซียส (ส่วนผสมหลังตรวจสอบด้วย EDS)

ชิ้นงานที่	Al %wt		Si %wt		Zn % wt		Cu %wt		Sr %wt		Sn%wt	
	ก่อน หลอม	หลังหลอม	ก่อน หลอม	หลังหลอม	ก่อน หลอม	หลัง หลอม	ก่อน หลอม	หลังหลอม	ก่อน หลอม	หลัง หลอม	ก่อน หลอม	หลัง หลอม
6. 2.8Al3.7Zn	2.8	2.64	-		3.7	2.67	-		-		-	
7. 2.8Al	2.8	2.59	-		-		-		-		-	
8. 2.8Al0.3Si	2.8	2.41	0.3	0.54	-		-		-		-	
9. 2.8Al1Cu	2.8	2.73	-		-		1	1.34	-		-	
10. 2.8Al0.3Sr	2.8	2.54	-		-		-		0.3	0.16	-	
11. 2.4Al0.4Si 0.16Sr	2.4	2.2	0.4	0.59	-		-		0.16	0.18	-	
12. 2.8Al0.1Si	2.8	2.53	0.1	0.19	-		-		-		-	
13. 2.8Al0.2Si	2.8	2.69	0.2	0.36	-		-		-		-	
14. 2.8Al0.4Si	2.8	2.61	0.4	0.74	-		-		-		-	
15. 2.8Al0.5Si	2.8	2.52	0.5	0.84	-		-		-		-	
16. 2.8Al2.47Zn0.86 Cu0.09Sn	2.8	2.5	-	-	2.47	2.64	0.86	0.89	-	-	0.09	0.12
17. 0.3Si0.09Al 0.01Sr	0.09	0.1	0.3	0.51	-	-	-	-	0.01	0.004	-	-
18. 2.7Zn0.5Si	-	-	0.5	0.99	2.7	2.98	-	-	-	-	-	-
19. 2.7Zn0.5Si0.58Al 0.062Sr	0.58	0.48	0.5	0.66	2.7	2.17	-	-	0.062	0.24	-	-
20. 2.7Zn0.8Si	-	-	0.8	0.99	2.7	2.05	-	-	-	-	-	-
21. 2.7Zn0.8Si0.09Al 0.01Sr	0.09	0.12	0.8	1.05	2.7	2.56	-	-	0.01	0.19	-	-
22. 2.7Zn1Si			1	1.39	2.7	2.72	-	-	-	-	-	-
24. 2.7Al0.8Si	2.7	2.46	0.8	1.23	-	-	-	-	-	-	-	-
25. 2.79Al0.8Si 0.01Sr	2.79	2.44	0.8	1.51	-	-	-	-	0.01	0.38	-	-
26. 2.7Al1Si	2.7	2.79	1	1.98	-	-	-	-	-	-	-	-
27. 2.79Al1Si0.01Sr	2.79	2.53	1	1.95	-	-	-	-	0.01	0.3	-	-
40. 4.6Cu	-	-	-	-	-	-	4.6	5.17	-	-	-	-



รูปที่ 2.11 แสดงสีผิวของชิ้นงานผ่านการหล่อ ในเครื่องหล่อระบบสุญญากาศ omc 1 ที่อุณหภูมิเบา 500 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิเทที่ 940-960 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.11 แสดงสีผิวของชิ้นงานผ่านการหล่อ ในเครื่องหล่อระบบสูญญากาศ omc 1 ที่อุณหภูมิเข้า 500 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิเทที่ 940-960 องศาเซลเซียส(ต่อ)

จากรูป 2.9 แสดงถึงแนวโน้มการเติมอะลูมิเนียมและสังกะสี ทำให้ผิวหลังหล่อ-ล้างปูน สะอาดมีคราบออกไซด์น้อยลง ส่วนชิ้นงานเติมสตรอนเซียมและหรือซิลิคอน จะมีคราบออกไซด์มากขึ้น ส่งผลให้เพิ่มเวลาการทำความสะอาดล้างกรด และ ลดความละเอียดของลวดลาย อย่างไรก็ตามความหนาชั้นคราบออกไซด์ของชิ้นงานทุกส่วนผสมยังคงหนาน้อยชิ้นงานเงินผสมทองแดงที่มักพบว่า มีคราบออกไซด์หนา บางครั้งพบคราบฝ้าดำ-แดง เกาะติดหลังขัดแต่งดังภาพที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงผิวฝ้าดำ-แดงหลังหล่อและเงาของเงินผสมทองแดง (950)

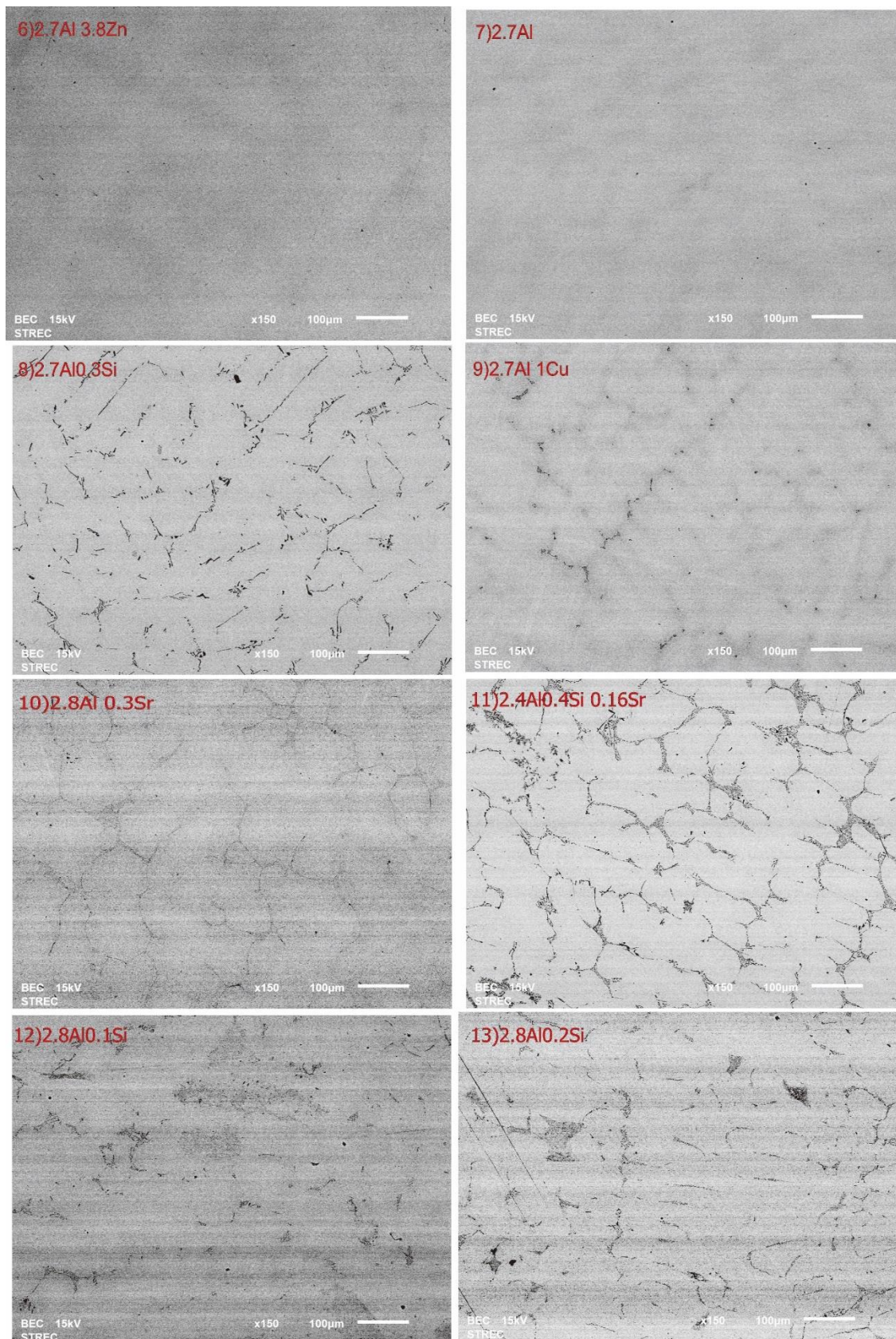


รูปที่ 2.13 แสดงสีผิวของชิ้นงานหลังหล่อและขัดเงา เปรียบเทียบกับชิ้นงานเงินผ่านการชุบ โรเดียม

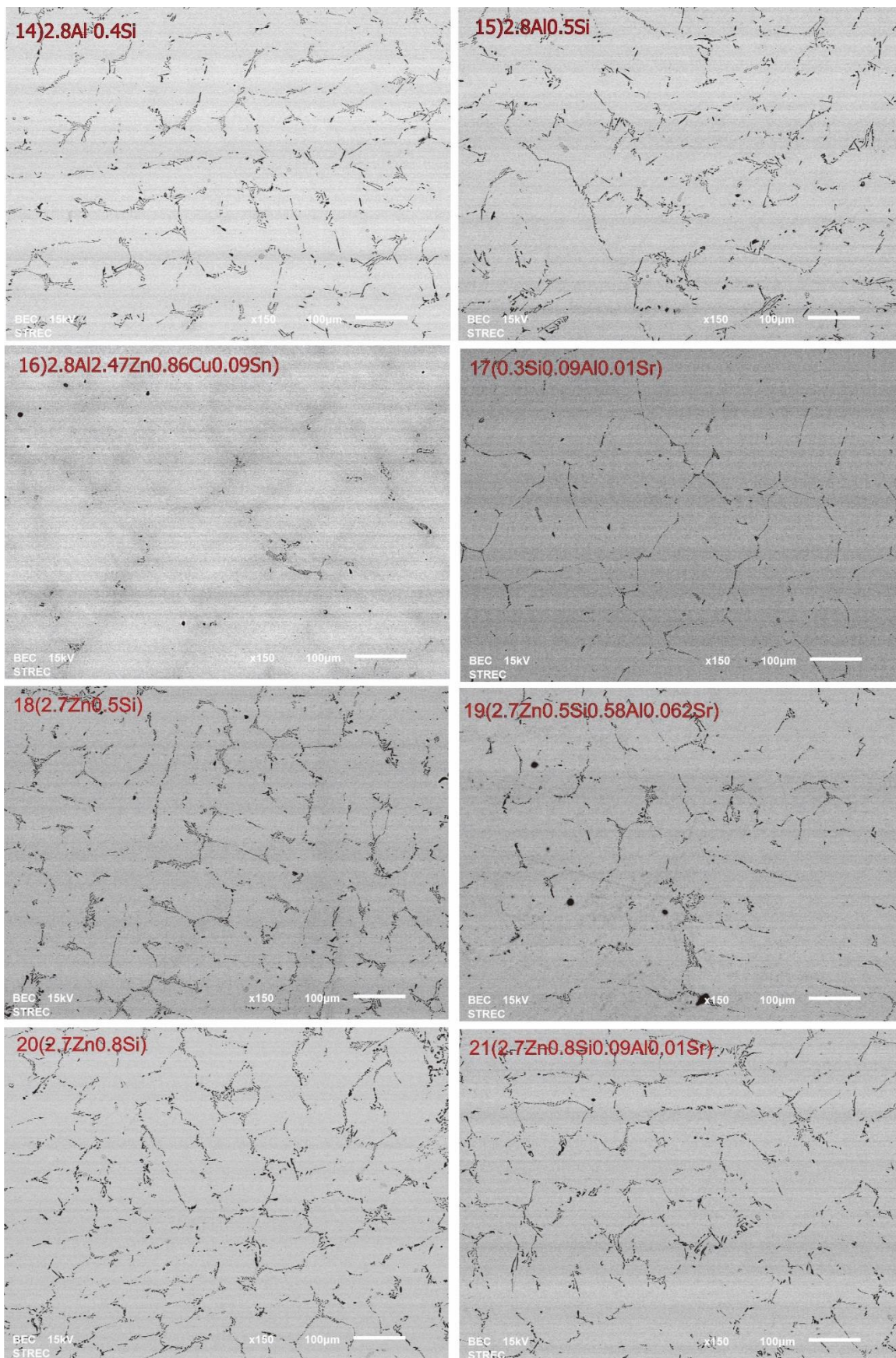
### 2.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคด้วย กล้องจุลทรรศน์แบบสะท้อนแสง

ภายหลังการหล่อ ชิ้นงานทดสอบตั้งส่วนผสมเคมีตามตารางที่ 2.4 ต้นเงินได้ถูกตัดบริเวณฐานต้นเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในส่วนที่เย็นตัวสุดท้าย โดยตัดเตรียมตัวอย่างที่ความหนา 4-5 มิลลิเมตร ขัดด้วย

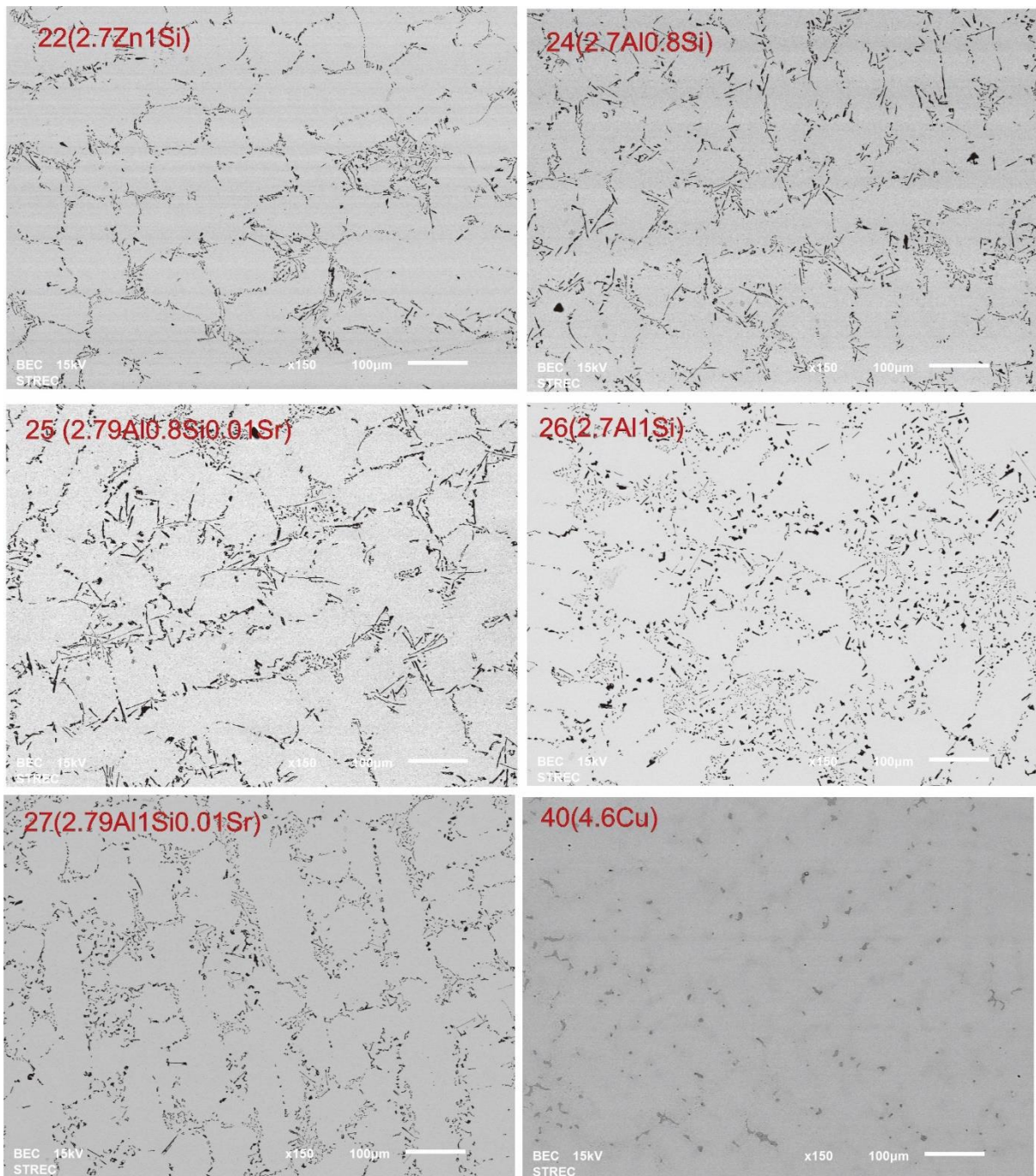
กระดาษทรายเบอร์150 ถึง เบอร์ 2000 mesh และผงเพชร 6, 3, 1, ¼ ไมครอน ตามลำดับได้ผลการศึกษาดังรูปที่ 2.14 (ที่กำลังขยาย 150เท่า ) และ รูปที่ 2.15 (ที่กำลังขยาย 500เท่า)



รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างจุลภาค(BEI)ของชิ้นงานทดสอบที่กำลังขยาย150เท่า



รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างจุลภาค(BEI)ของชิ้นงานทดสอบที่กำลังขยาย150เท่า(ต่อ)

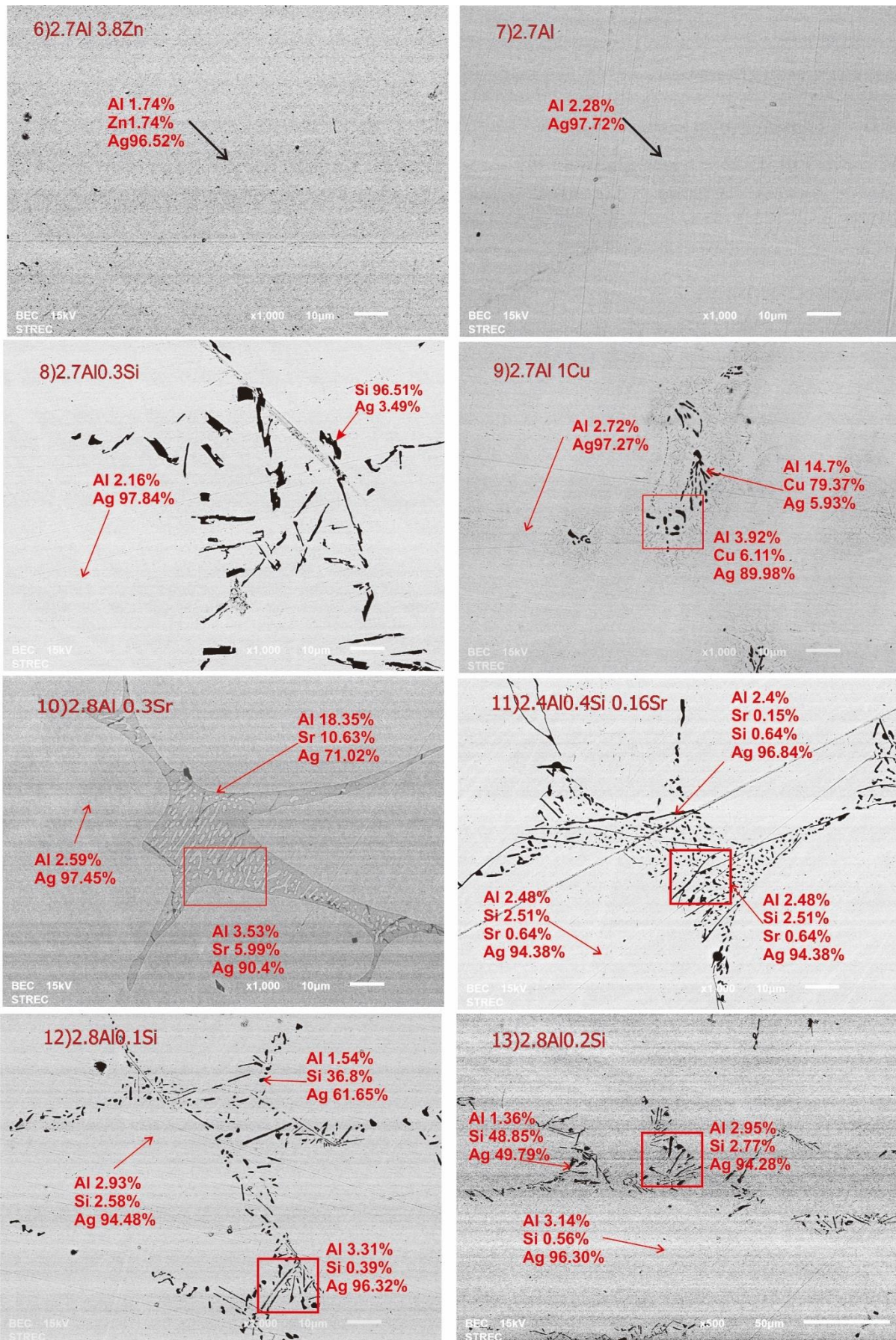


รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างจุลภาค(BEI)ของชิ้นงานทดสอบที่กำลังขยาย150เท่า(ต่อ)

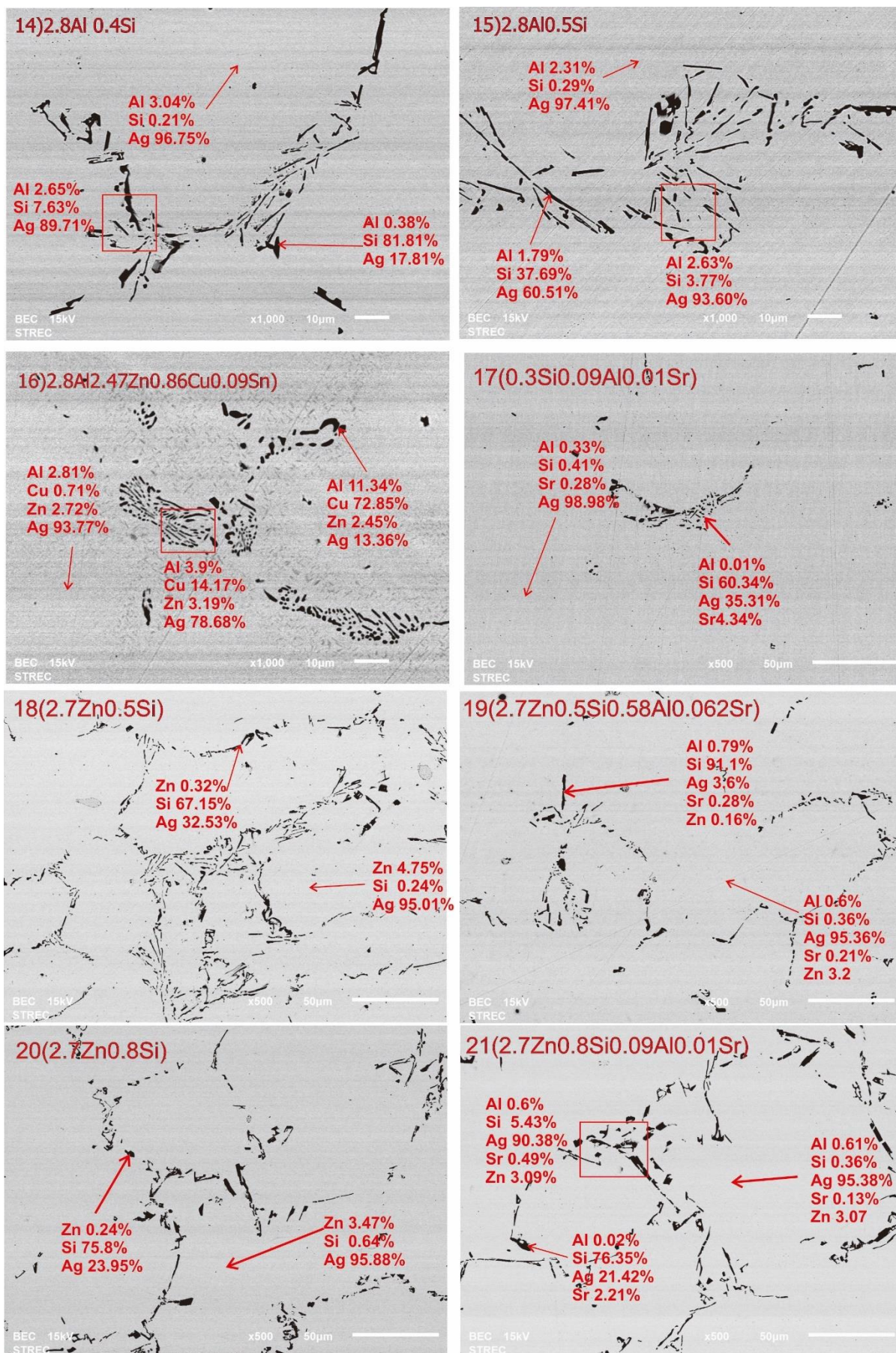
จากรูป 2.12 แสดงการเติม อะลูมิเนียมและสังกะสี ยังคงสร้างสารละลายของแข็งเนื้อเดียว ไม่เกิดเฟสที่สองขึ้น (สอดคล้องกับรูป 1.8 และ 1.10) ลักษณะดังกล่าวทำให้อัตราการยึดตัวของโลหะผสมมีค่าสูงขึ้น สอดคล้องกับผลการทดสอบแรงดึงในรายงานส่วนต่อไป ซึ่งแตกต่างจากการเติมซิลิคอนร่วมกับสตรอนเชียม ที่ จะพบโครงตาข่ายระหว่างแกนเดนไดรฟ์เพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดและส่งผลต่อสมบัติทางกล เช่น อัตราการยึดตัวที่ ลดลง รวมถึงความแข็งแรงและลักษณะรอยแตกหักที่เปลี่ยนไปซึ่งจะมีการอธิบายต่อไป สำหรับส่วนผสมเคมี ของเฟสที่พบยังจำเป็นต้องทดสอบด้วย Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) และ การพิจารณาเฟสยัง

ต้องทำเพิ่มเติมด้วยการวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่คณะผู้วิจัยได้วางแผนดำเนินการต่อไป

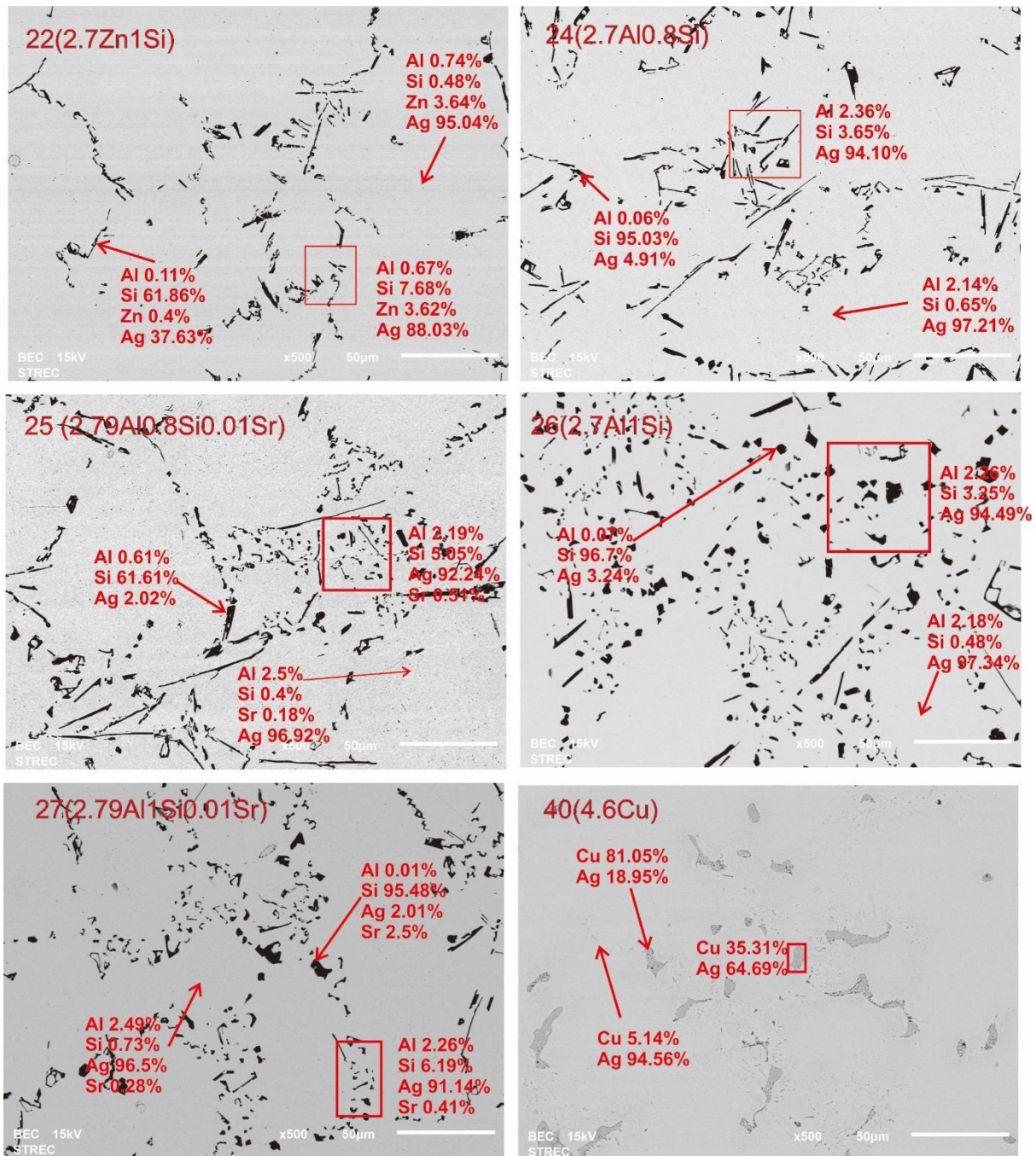
จากรูปที่ 2.14 และ 2.15 แสดงให้เห็นแนวโน้มการเติมธาตุบางกลุ่มส่งเสริมการเกิดเฟสที่มีลักษณะโครงตาข่าย ได้แก่ ซิลิคอน สตรอนเซียม ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงในเฟสไดอะแกรมของเงิน-ซิลิคอน ที่มักพบการแยกเฟสและเกิดโครงสร้างโครงตาข่าย ที่พบได้ง่ายในกลุ่ม  $8(2.8AlO.3Si)$ ,  $11(2.4AlO.4Si\ 0.16Sr)$ ,  $12(2.8AlO.1Si)$ ,  $13(2.8AlO.2Si)$ ,  $14(2.8AlO.4Si)$  และ  $15(2.8AlO.5Si)$  ซึ่งลักษณะดังกล่าวมีแนวโน้มทำให้สมบัติทางกล ลดลงดังจะพบการศึกษาช่วงต่อไป การเพิ่มปริมาณซิลิคอนในเงินผสมอะลูมิเนียมส่งผลให้รูปร่างของเฟสที่สอง (ซิลิคอนสูง) เปลี่ยนแปลงไปโดยมีลักษณะแบบกิ่งไม้ที่มีแขนยาวออกไปมากขึ้นและมีปริมาณซิลิคอนสูงขึ้น ดังชิ้นงาน  $12(2.8AlO.1Si)$   $13(2.8AlO.2Si)$   $8(2.8AlO.3Si)$   $14(2.8AlO.4Si)$   $15(2.8AlO.5Si)$  การเพิ่มสตรอนเซียมในรูปของ อะลูมิเนียมผสมสตรอนเซียม 10% ในเงินผสมสังกะสีและ เงินผสมอะลูมิเนียม ทำให้ อะลูมิเนียมและ สตรอนเซียมละลายในเฟสซิลิคอนและโครงสร้างพื้นฐานได้ในปริมาณหนึ่งซึ่งมีความเป็นไปได้ในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานการหมองและ สมบัติทางกลโดยสามารถพิจารณาได้จาก ชิ้นงานกลุ่มเปรียบเทียบ  $24(2.7AlO.8Si):25(2.79AlO.8SiO.01Sr)$   $26(2.7Al1Si):27(2.79Al1SiO.01Sr)$   $18(2.7Zn0.5Si):19(2.7Zn0.5SiO.058AlO.062Sr)$   $20(2.7Zn0.8Si):21(2.7Zn0.8SiO.09AlO.01Sr)$



รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างจุลภาค(BE)ของชิ้นงานทดสอบที่กำลังขยาย 500 หรือ 1000 เท่า



รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างจุลภาค(BEI)ของชิ้นงานทดสอบที่กำลังขยาย 500 หรือ 1000 เท่า(ต่อ)

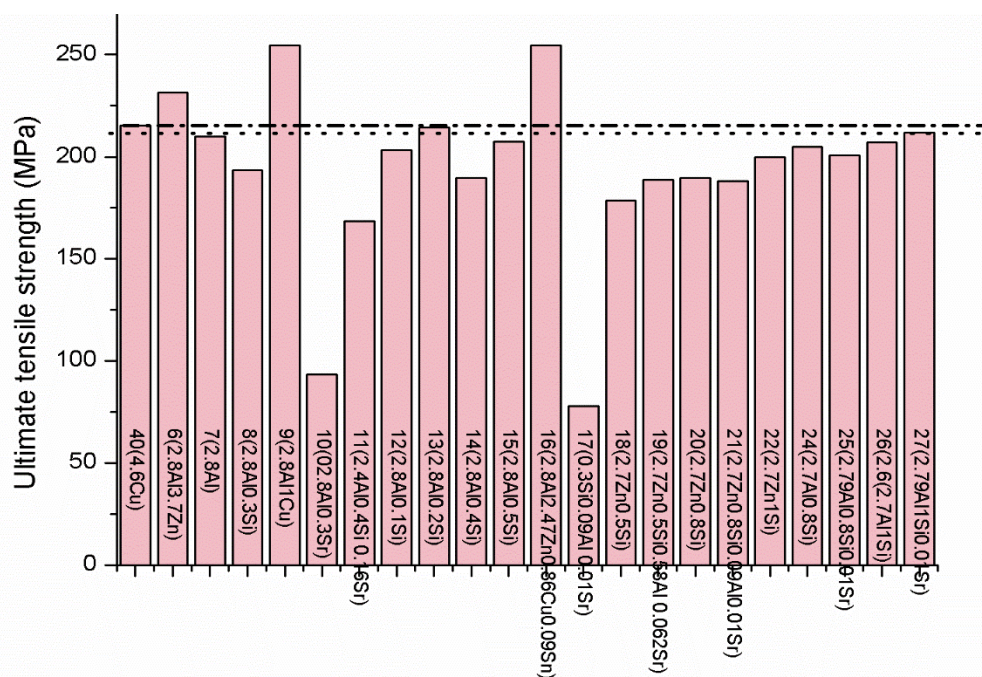


รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างจุลภาค(BEI)ของชิ้นงานทดสอบที่กำลังขยาย500 หรือ 1000เท่า(ต่อ)

## 2.4 การศึกษาสมบัติทางกล

การศึกษาสมบัติทางกลสำหรับชิ้นงานหล่อที่ผลิตได้นั้น ทางคณะผู้วิจัยได้ศึกษาด้วยการทดสอบแรงดึงเป็นหลักเพื่อแสดงให้เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงของการเติมธาตุต่อค่าสมบัติทางกลของวัสดุทดลอง โดยผลิตชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM E8-96 โดยทดสอบในสภาวะ strain rate ที่  $6.25 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  ด้วยแรงดึงสูงสุดที่ 10 KN อนุกรมนี้ห้อง ซึ่งมีผลสมบัติทางกล ดังรูปที่ 2.16 - 2.18

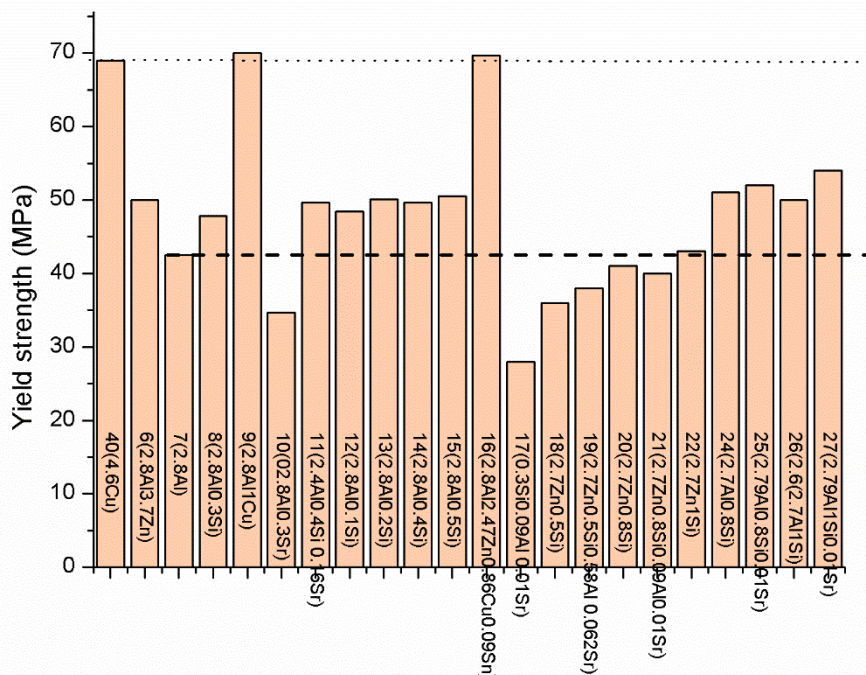
จากรูป 2.16-2.18 พบว่า การเพิ่มซิลิคอน (ดังการเปรียบเทียบกลุ่ม 8(2.8Al0.3Si) ,12(2.8Al0.1Si), 13(2.8Al0.2Si), 14(2.8Al0.4Si) และ 15(2.8Al0.5Si)) ไม่ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด(Ultimate tensile strength, UTS) และ ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก(Yield Strength, YS)ลดลง แต่กลับทำให้ อัตราการยืดตัว(Elongation%) ลดลงอย่างชัดเจน การเติมสตรอนเชียมและ ซิลิคอนร่วมกับสตรอนเชียม (กลุ่มชิ้นงาน 10(2.8Al0.3Sr) 11(2.4Al0.4Si 0.16Sr)) จะพบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกับการเพิ่มซิลิคอน คือ ไม่ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด(Ultimate tensile strength, UTS) และ ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก(Yield Strength, YS)ลดลง แต่กลับทำให้ อัตราการยืดตัว(Elongation%) ลดลงอย่างชัดเจนอันน่าจะมาจากการเกิดเฟสโครงตาข่าย(จากการเติมซิลิคอนและสตรอนเชียม)ในรูป 2.12 และ 2.13 โดยกลุ่มชิ้นงาน 10(2.8Al0.3Sr) ที่มีอัตราการยืดตัวต่ำที่สุดที่ 6.7 % ซึ่งแตกต่างจะชิ้นงานกลุ่ม 6(2.8Al 3.7Zn) ที่มีการเติมสังกะสี 3.7 % ที่มีอัตราการยืดตัวสูงที่สุดที่ 90.23 % กรณีในกลุ่ม 16(2.8Al2.47Zn0.86Cu0.09Sn) ซึ่งมีทองแดง สังกะสี และดีบุกส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้นมากกว่า กลุ่ม 9 (2.8Al 1Cu) เล็กน้อย และมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมากกว่า กลุ่ม 40(4.6Cu) จากข้อมูลข้างต้นทำให้สามารถสรุปได้ว่าการเติมทองแดง ลงในเงินผสมอะลูมิเนียมเป็นหลักส่งผลเพิ่มความแข็งแรง (ความต้านทานแรงดึงสูงสุด)โดยการเติมทองแดงในช่วง 0.86-1 % ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้นในช่วง 16% สำหรับการเติมสังกะสีที่ 3.7% (กลุ่ม 6 2.8Al3.7Zn) ทำให้ ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้น ประมาณ 8% กรณีของกลุ่มที่มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดมากกว่าเงินผสมทองแดง 40(4.6Cu) ได้แก่ 6(2.8Al3.7Zn) 9(2.8Al1Cu) 16(2.8Al2.47Zn0.86Cu0.09Sn) และกลุ่มที่มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดใกล้เคียงเงินผสมทองแดง 40(4.6Cu) ได้แก่ 13(2.8Al0.2Si) 7(2.8Al) 27(2.79Al1Si0.01Sr)



รูปที่ 2.16 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานทดลอง

การเติมซิลิคอนในเงินผสมสังกะสี ในกลุ่ม 18(2.7Zn0.5Si) 19.(2.7Zn0.5Si0.58Al0.062Sr) 20(2.7Zn0.8Si) 21(2.7Zn0.8Si0.09Al0.01Sr) 22(2.7Zn1Si) ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 178.7 ไปอยู่ในช่วง 188.1-200 MPa

ส่วนการเติมซิลิคอนช่วง 0.1-1%ในกลุ่มเงินผสมอะลูมิเนียมเช่นกลุ่ม 8(2.8Al0.3Si) 12(2.8Al0.1Si) 13(2.8Al0.2Si) 14(2.58Al0.4Si) 15(2.8Al0.5Si) 24(2.8Al0.8Si) 26(2.8Al1Si) มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดไม่แน่นอนกล่าวคือ ในช่วงซิลิคอน 0.1-0.2% ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้น ช่วงซิลิคอน 0.3-0.4% มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดลดลงเล็กน้อยแต่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้น ในช่วงซิลิคอน0.5% ส่วนในช่วง ซิลิคอน 0.8-1 % มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดไม่แตกต่างกับการเติมซิลิคอน0.5% ในเงินผสมอะลูมิเนียมการเติมอะลูมิเนียมในเงินมีแนวโน้มเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมากกว่าการเติมสังกะสี เมื่อนำกลุ่ม 15(2.8Al0.5Si) และ 18(2.8Zn0.5Si) 20(2.7Zn0.8Si) และ 24(2.8Al0.8Si) มาเปรียบเทียบ แม้ว่าทั้งสังกะสีและอะลูมิเนียมจะสร้างสารละลายของแข็งที่ดี แต่ถ้าพิจารณาปริมาณการสร้างสารละลายของแข็งจะพบความแตกต่างของการละลายโดยอะลูมิเนียมมีการสร้างสารละลายของแข็งที่ปริมาณอะลูมิเนียมต่ำกว่าการเติมสังกะสี สำหรับการเติมสตรอนเชียมในเงินผสมสังกะสีหรืออะลูมิเนียมส่งผลลดค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด โดยการลดลงของค่าความแข็งแรงดังกล่าวสอดคล้องกับปริมาณสตรอนเชียมที่เพิ่มขึ้นทำให้อนุมาณได้ถึงการเติมสตรอนเชียมจำเป็นต้องใช้ในปริมาณน้อยเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการลดค่าความแข็งแรงดังกล่าว



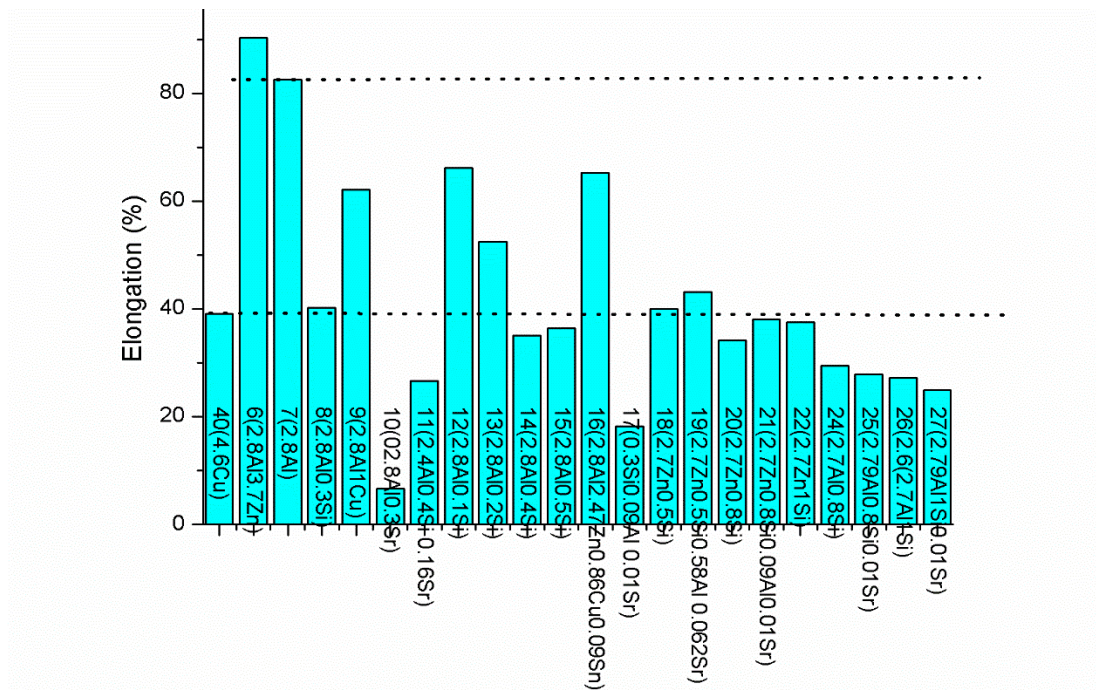
รูปที่ 2.17 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากของชิ้นงานทดลอง

ในการพิจารณาความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากสามารถแบ่งพิจารณาตามธาตุที่ได้เติมในเงินผสม ได้แก่ ทองแดง สังกะสี ซิลิคอน สตรอนเชียม ดังนี้

1. การเติมทองแดงในเงินผสมกลุ่ม 40(4.6Cu) 9(2.8Al1Cu) และ 16(2.8Al2.47Zn0.96Cu0.09Sn) พบว่าให้ค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากที่สูงใกล้เคียงกันเนื่องมาจากอิทธิพลของธาตุทองแดง ส่วนโลหะเงินผสมหมายเลข 7(2.8Al) และ 18(2.8Zn0.5Si) ที่ไม่มีการเติมทองแดงจะให้ค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากที่ต่ำลง ประมาณ 50 % ซึ่งเป็นไปได้จากการสร้างเฟสที่มีทองแดงผสมสูงที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณทองแดงมากขึ้น โดยเมื่อพิจารณาในกลุ่ม 40(4.6Cu) : 9(2.8Al1Cu) : 16(2.8Al2.47Zn0.96Cu0.09Sn) ทองแดงยังมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงอย่างสูงแม้ว่าจะเติมเพียง 1% ส่วนสังกะสีและดีบุกก็ส่งผลต่อการเพิ่มสมบัตินี้เพียงเล็กน้อย

2. การเติมซิลิคอนในเงินผสมสังกะสีหรือ อะลูมิเนียมพบว่าการเพิ่มซิลิคอนจาก 0.1-1 % โดยน้ำหนักในเงินผสมอะลูมิเนียมหรือสังกะสีทำให้มีค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากเพิ่มขึ้นแต่ไม่มากนักและไม่พบว่ามีความสัมพันธ์ผันแปรกันกับปริมาณซิลิคอนที่เพิ่มขึ้น ดังการเปรียบเทียบ กลุ่มชิ้นงาน 8(2.8Al0.3Si) : 12(2.8Al0.1Si) : 13(2.8Al0.2Si) : 14(2.58Al0.4Si) : 15(2.8Al0.5Si) : 24(2.8Al0.8Si) : 26(2.8Al1Si) และ 18(2.8Zn0.5Si) : 20(2.8 Zn0.8Si) : 20(2.8Zn1Si)

3. การเติมสังกะสีในเงินผสม โดยภาพรวมจะพบว่าเมื่อผลต่อความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการเติมอะลูมิเนียม สิ่งนี้เห็นได้ชัดเจนจากการเปรียบเทียบกลุ่ม 15(2.8Al0.5Si) : 18(2.8Zn0.5Si) และ 20(2.7Zn0.8Si) : 24(2.8Al0.8Si) เมื่อพิจารณาการเติมสังกะสีหรือ อะลูมิเนียมในปริมาณที่เท่ากันพบว่าการเติมสังกะสีในเงินทำให้เงินมีค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากน้อยกว่าเงินที่ผสมอะลูมิเนียมในปริมาณเท่ากันเช่น กลุ่ม 15(2.8Al0.5Si) : 18(2.8Zn0.5Si) และ 20(2.7Zn0.8Si) : 24(2.8Al0.8Si) การเติมสตรอนเซียมลดค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก ดังเช่นการเปรียบเทียบกลุ่ม 7(2.8Al) : 10(2.8Al0.3Sr) พบว่าค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากลดลง ประมาณ 15 MPa และ ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดลดลง 110 MPa ซึ่งสอดคล้องกันการเกิดเฟสที่มีปริมาณ อะลูมิเนียมและ สตรอนเซียมสูงที่เพิ่มมากขึ้นดังรูป 2.15 สำหรับในกลุ่มเงินผสมสังกะสี/อะลูมิเนียม ร่วมกับซิลิคอนเมื่อเติมสตรอนเซียม 0.01% พบว่ามีค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วง 1-4 MPa โดยพบเฟสที่สองที่แยกตัวจากโครงสร้างพื้นฐานจะมีสตรอนเซียมผสมอยู่เล็กน้อยร่วมกับซิลิคอนและอะลูมิเนียมดังรูป 2.15

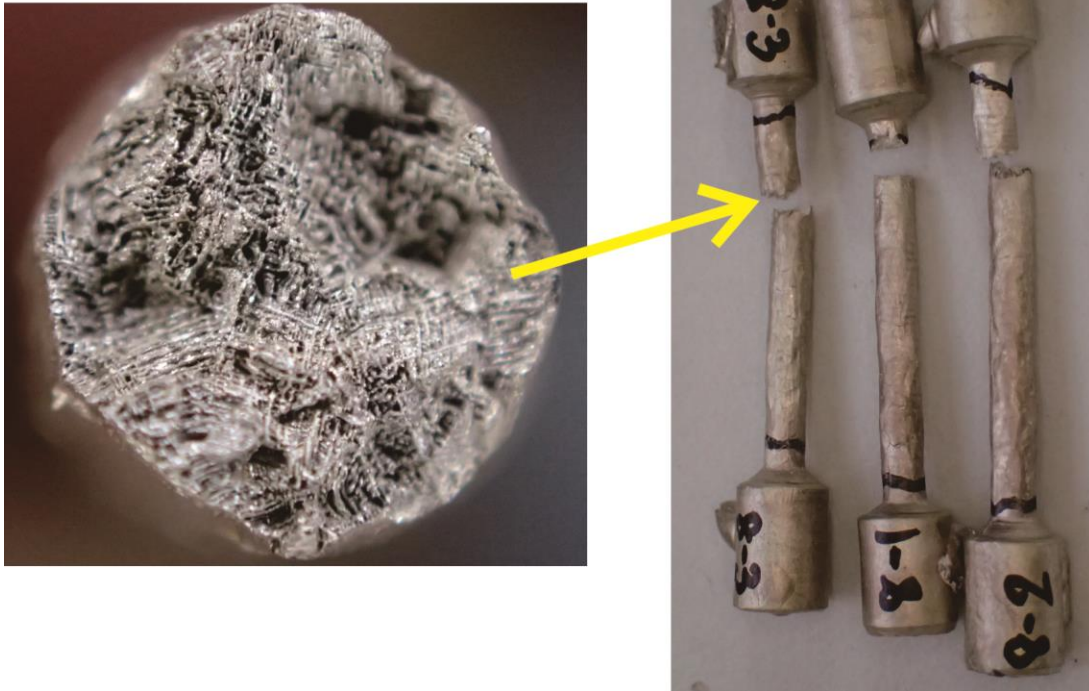


รูปที่ 2.18 แสดงค่าอัตราการยืดตัวของชิ้นงานทดลอง

การเติมสังกะสี ในเงินผสมอะลูมิเนียมจะส่งเสริมสมบัติทางกล ทั้งอัตราการยืดตัว และความแข็งแรง โดยไม่เกิดการแยกเฟสเนื่องจากสังกะสีและอะลูมิเนียมสามารถละลายในเงินได้ในปริมาณมาก โดยการเติมสังกะสี 3.7 %โดยน้ำหนักสามารถความต้านทานแรงดึงสูงสุดจากชิ้นงานกลุ่ม 7) 2.8Al ที่ 210MPa เป็น 231.5 MPa(ในชิ้นงาน 6) 2.8Al(3.7Zn) หรือการเติมสังกะสีร่วมกับทองแดงและดีบุกในชิ้นงาน 16)2.8Al(2.47Zn0.86Cu0.09Sn) ที่มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่ 254.4 MPa ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่าชิ้นงานกลุ่ม 6)2.8Al(3.7Zn) และ 16)2.8Al(2.47Zn0.86Cu0.09Sn) ไม่พบการแยกตัวของเฟสที่เข้ม แต่การเติมธาตุดังกล่าวอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างพื้นฐานเนื่องจากการสร้างสารละลายของแข็งเนื้อเดียวได้

การเติมทองแดงในเงินผสมอะลูมิเนียม( 8)2.8Al(1Cu) ช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึงสูงสุดและ ความต้านทานแรงดึงจนจุดคราก แต่ลดอัตราการยืดตัวลงเหลือ 40% หรือลดลงประมาณ 50%ของอัตราการยืดตัวของเงินผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7) 2.8Al ดังรูป 2.16-2.18

การเติมซิลิคอนและสตรอนเชียมทำให้อัตราการยืดตัวลดลง และ ยังส่งผลสร้างรอยแตกแบบเปราะ คล้ายการแตกหลังการหล่อหรือการฉีดขาดขณะร้อน(ดังรูปที่ 2.19)ซึ่งเกี่ยวเนื่องกับการเกิดเฟสโครงตาข่ายในรูป 2.14-2.15



รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะรอยแตกของชิ้นงาน $8(2.8Al0.3Si)$

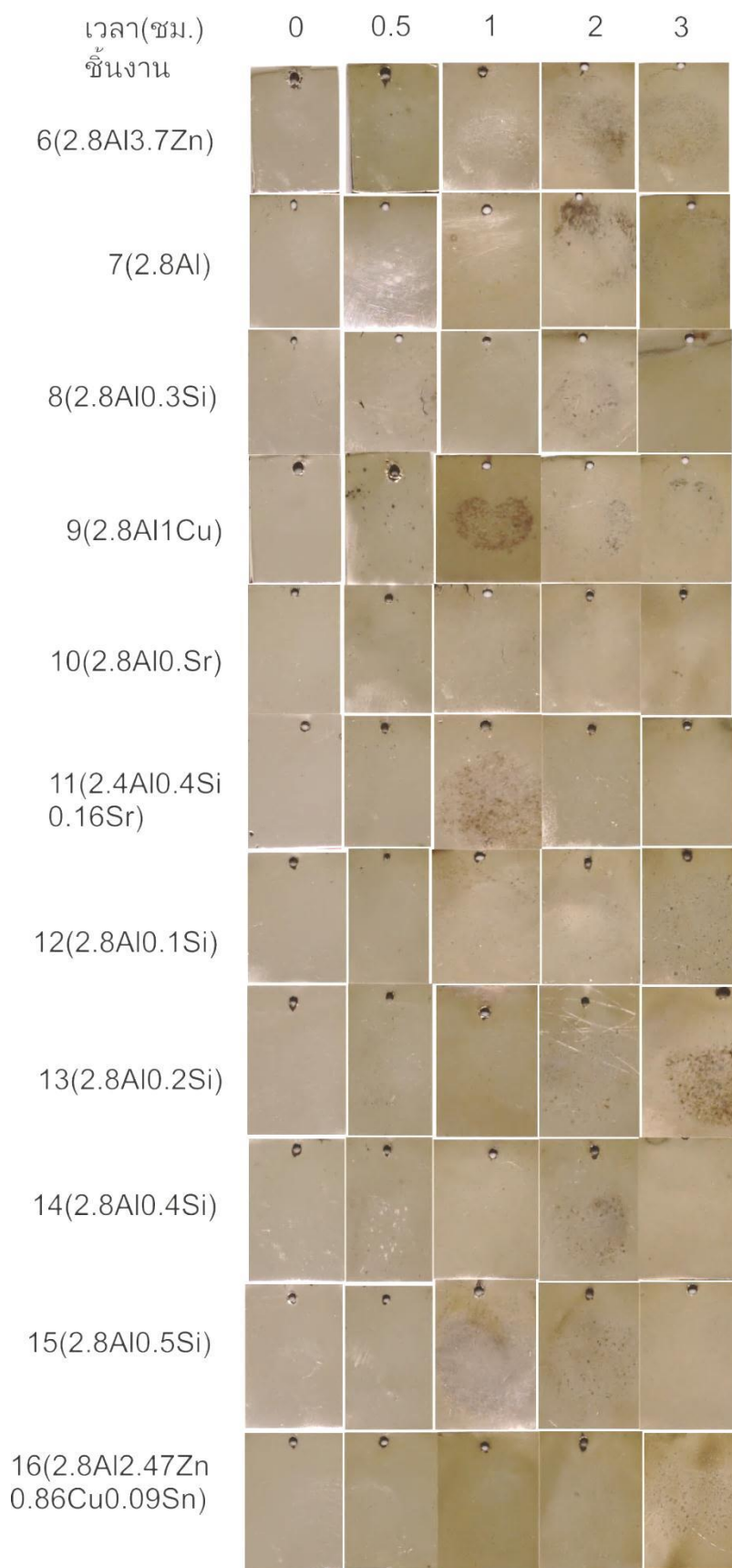
## 2.5 การศึกษาความต้านทานการหมองและการกัดกร่อน

การศึกษาความต้านทานการหมองและความต้านทานการกัดกร่อนนั้น คณะผู้วิจัยได้พิจารณาแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนโดยขึ้นกับวิธีการทดลอง ส่วนแรกเป็นการศึกษาความต้านทานการหมองในบรรยากาศก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งให้สภาวะเริ่มต้นเป็นสารประกอบโซเดียมซัลไฟด์ และทดลองนำชิ้นงานทดสอบในระบบดังกล่าว เป็นเวลา 0 0.5 1 2 และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยพบว่า ลักษณะสีผิวชิ้นงานหลังขัดเงา ที่ผ่านระบบทดสอบมีสีออกเหลืองเข้ม ดังรูป 2.20 และมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิว ดังรูป 2.21

ในการพิจารณาในภาพรวมพบว่าการเติมทองแดง สังกะสี สตรอนเชียมและ ซิลิคอน ในเงินผสมอะลูมิเนียมช่วยลดอัตราการหมองเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยกลุ่มให้ผลดีที่สุดคือ โลหะเงินผสม  $2\ 2\ (2.7Zn1Si)$   $19(2.7Zn0.8Si0.585Al0.062Sr)$   $21(2.7Zn0.8Si0.09Al0.01Sr)$   $20(2.7Zn0.5Si)$   $12(2.8Al0.1Si)$  ตามลำดับ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเงินผสมสังกะสี มากกว่า เงินผสมอะลูมิเนียม อย่างไรก็ตามการทดสอบในบรรยากาศปกติและในสารละลาย  $NaCl\ 1\ %$  ด้วยเทคนิค Potentiostatic กลับพบว่าเงินผสมสังกะสีมีแนวโน้มเกิดการกัดกร่อนมากกว่าเงินผสมอะลูมิเนียม ในการพิจารณาผลของทองแดงพบว่าการเติมทองแดงทำให้ค่า  $DE^*$  เพิ่มขึ้น ความต้านทานการหมองลดลง รวมถึงเมื่อเติมทองแดงเพิ่มขึ้น ค่า  $DE^*$  เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว สอดคล้องกับการแยกตัวของเฟสที่สองที่มีทองแดงสูงที่มีเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้การหมองจะเกิดได้เร็วขึ้นดังรูป 2.22

รูป 2.23 แสดงผลของสังกะสีต่อเงินผสมที่มีอะลูมิเนียมหรือสังกะสี พบว่า เมื่อเพิ่มสังกะสีทำให้ค่า  $DE^*$  เพิ่มขึ้นมีความต้านทานการหมองลดลงดังการเปรียบเทียบในกลุ่ม 7(2.7Al): 6(2.8Al3.7Zn): 18(2.7Zn0.5Si)

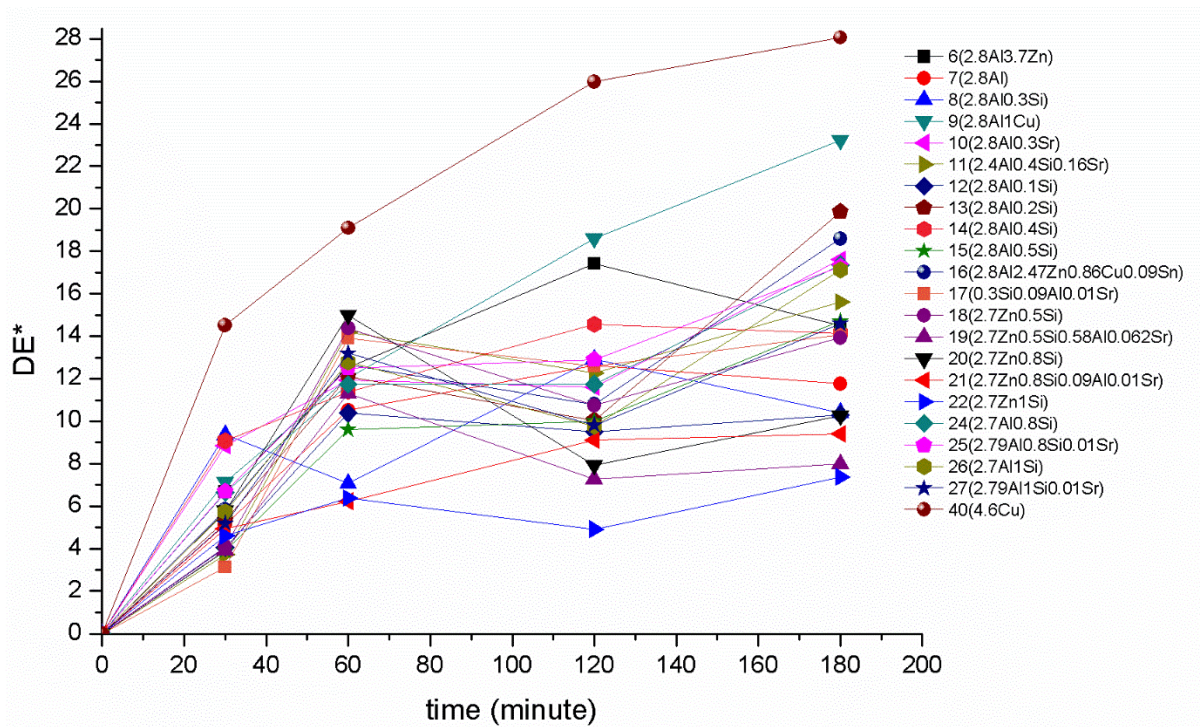
รูป 2.22 แสดงผลของซิลิคอนในเงินผสมต่อการเปลี่ยนแปลงค่า  $DE^*$  โดยสามารถแบ่งได้ตามกลุ่มธาตุผสมรองคือ กลุ่มเงินผสมสังกะสี และ กลุ่มเงินผสมอะลูมิเนียม ในกลุ่มเงินผสมสังกะสี เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิคอนทำให้ค่า  $DE^*$  และความต้านทานการหมองเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณากลุ่มเงินผสมอะลูมิเนียมการเพิ่มปริมาณซิลิคอน (ในช่วง 0-0.5%) ทำให้ค่า  $DE^*$  ลดลงและความต้านทานการหมองเพิ่มขึ้น ส่วนการเติมซิลิคอนในช่วง 0.8-1% พบว่าการเพิ่มปริมาณซิลิคอนทำให้ค่า  $DE^*$  เพิ่มขึ้นและความต้านทานการหมองลดลงซึ่งมีความเป็นไปได้ในการละลายของซิลิคอนในเฟสเนื้อพื้นไม่เพิ่มขึ้นแต่กลับเกิดการแยกตัวของซิลิคอนเกิดเป็นเฟสซิลิคอนมากขึ้นมาเมื่อปริมาณซิลิคอนสูงขึ้น เฟสเหล่านี้คณะผู้วิจัยได้อธิบายไว้ในส่วนเนื้อหาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมแล้ว เฟสซิลิคอนดังกล่าวอาจจะเป็นเฟสที่ส่งผลให้สีของเนื้อโลหะเปลี่ยนเป็นสีอมเทา และยังสามารถมีผลต่อการต้านทานการหมองในเนื้อโลหะ ดังนั้นปริมาณซิลิคอนในโลหะเงินผสมที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 0.5% โดยน้ำหนัก



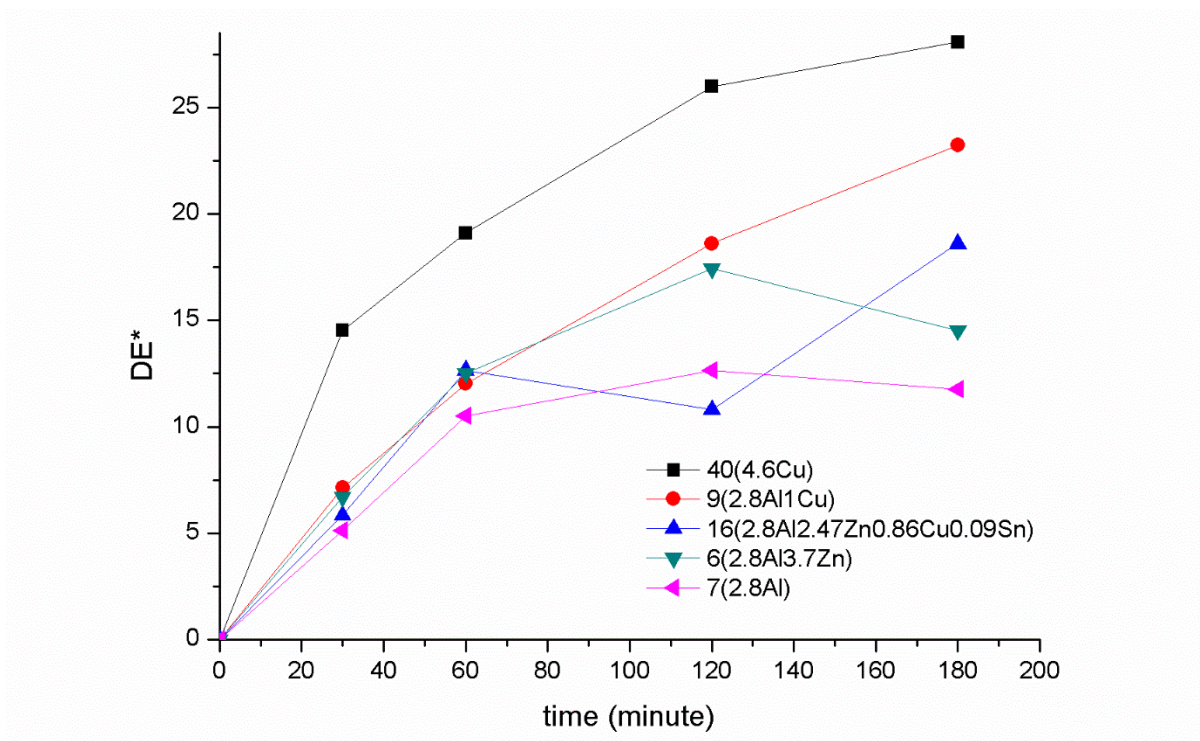
รูปที่ 2.20 แสดงสีผิวชั้นงานทดลองในก๊าซ  $H_2S$  ที่เวลาแตกต่างกัน



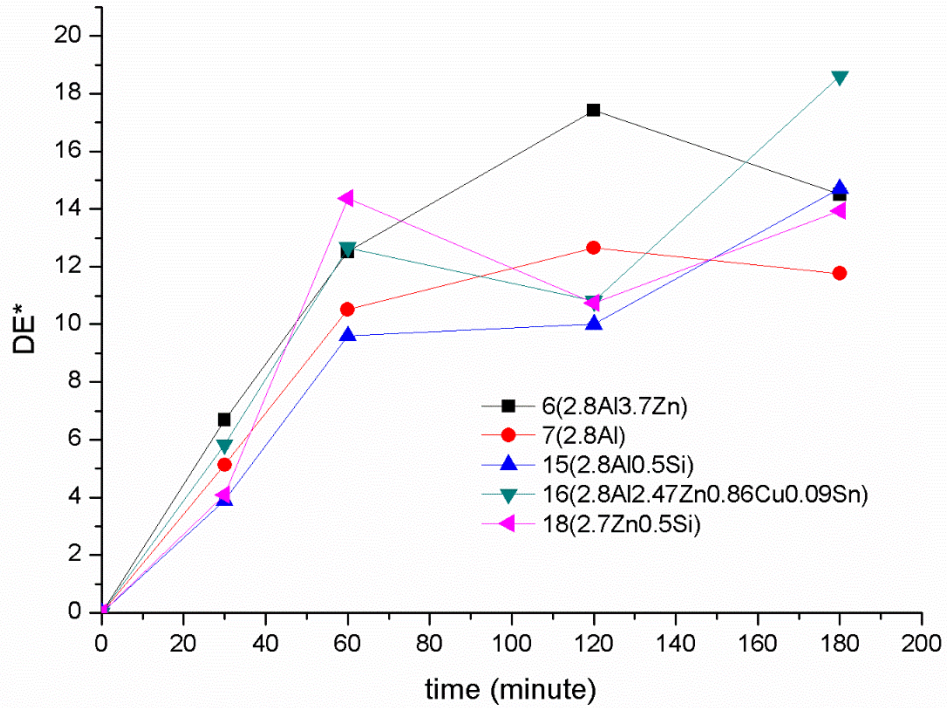
รูปที่ 2.20 แสดงสีผิวชิ้นงานทดลองในก๊าซ  $H_2S$  ที่เวลาแตกต่างกัน(ต่อ)



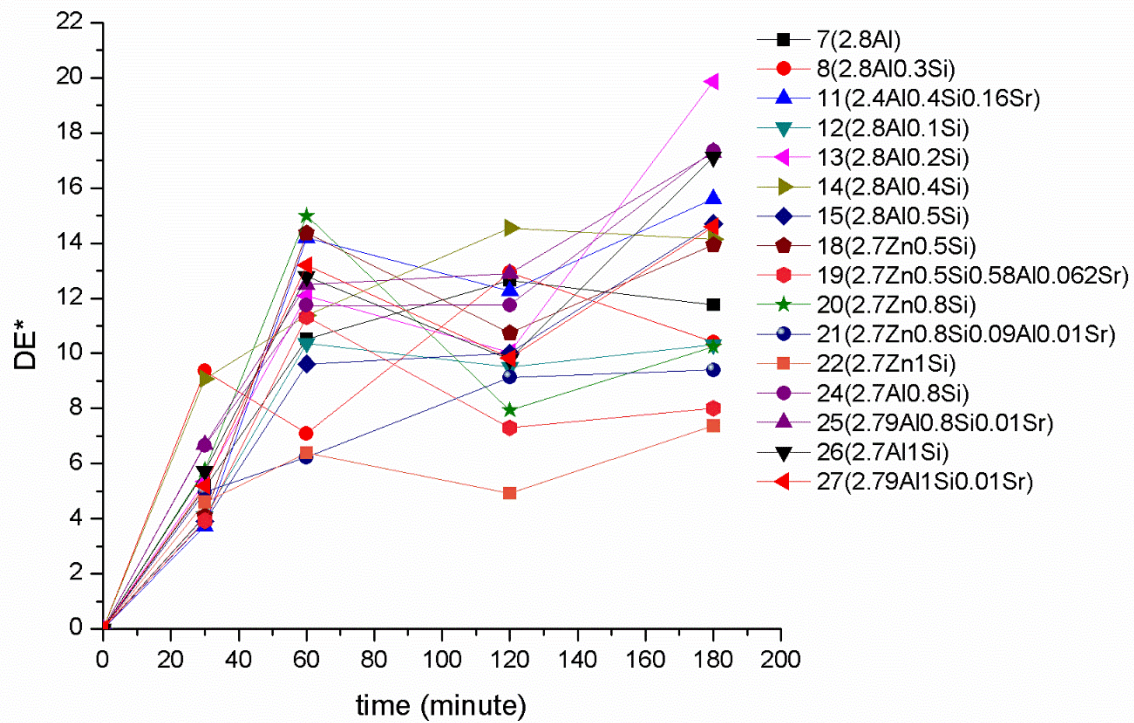
รูปที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความแตกต่างสี DE ต่อ เวลาสัมผัสก๊าซ  $H_2S$  ที่แตกต่างกัน



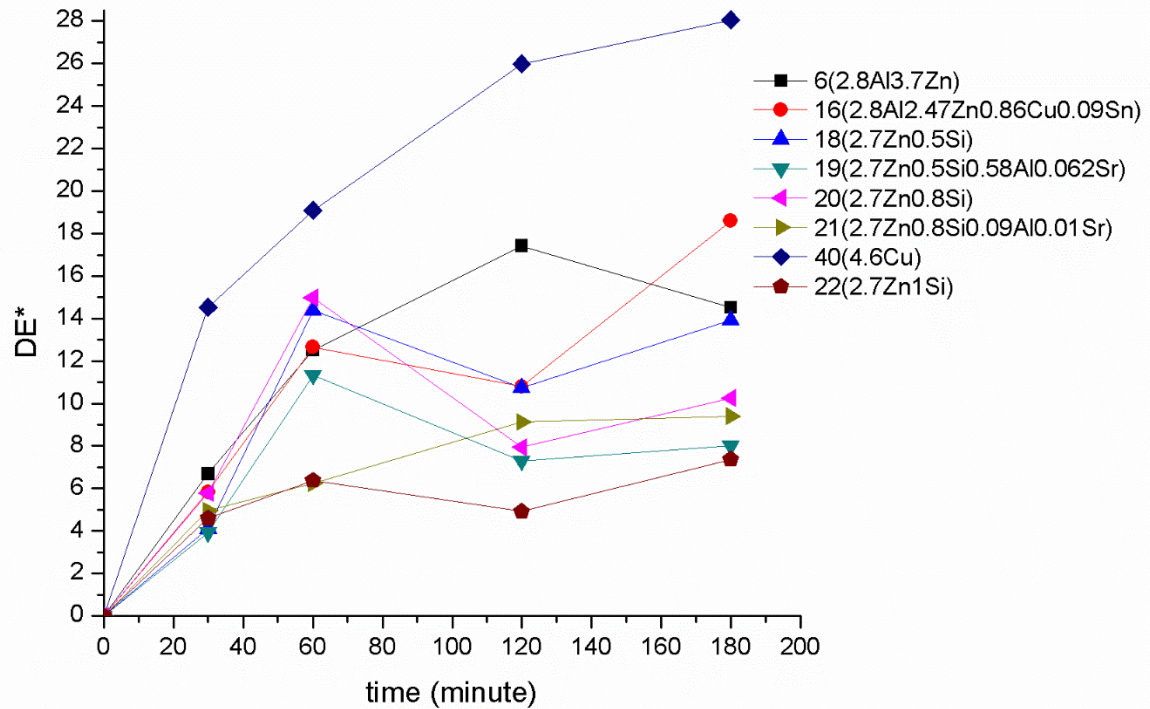
รูปที่ 2.22 แสดงความสัมพันธ์ของทองแดงต่อค่าความแตกต่างสี DE และเวลาสัมผัสก๊าซ  $H_2S$  ที่แตกต่างกัน



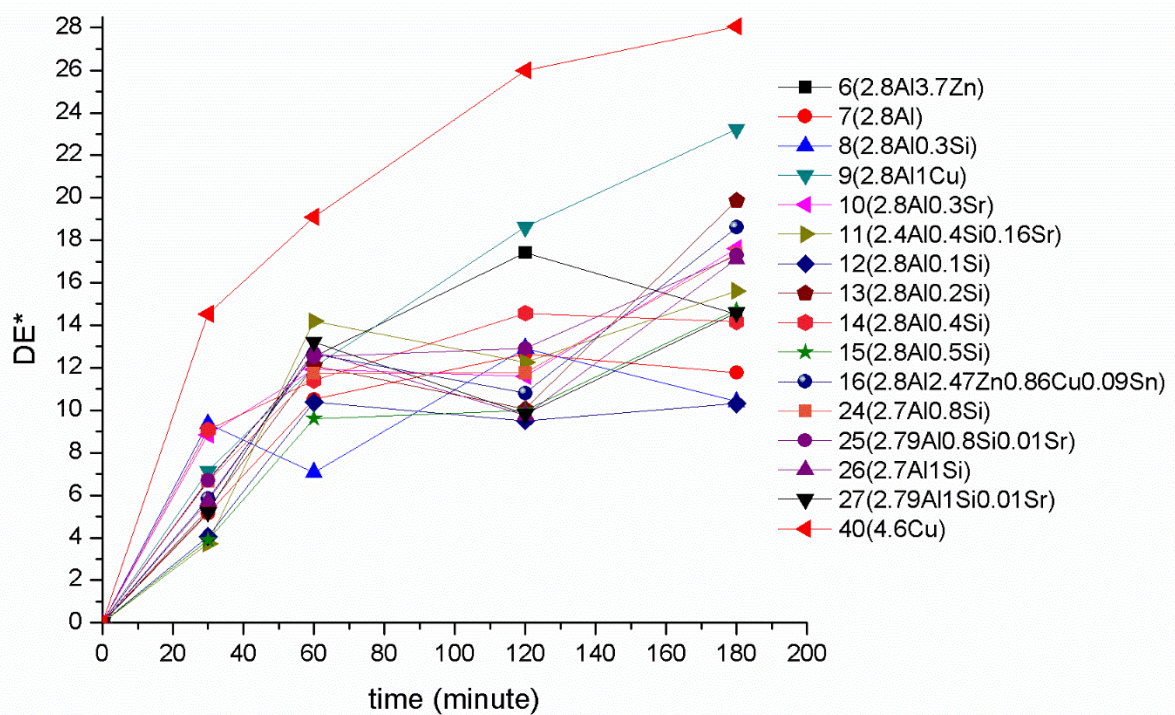
รูปที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ของสังกะสีต่อค่าความแตกต่างสี DE และเวลาสัมผัสก๊าซ  $H_2S$  ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.24 แสดงความสัมพันธ์ของซิลิคอนต่อค่าความแตกต่างสี DE และเวลาสัมผัสก๊าซ  $H_2S$  ที่แตกต่างกัน



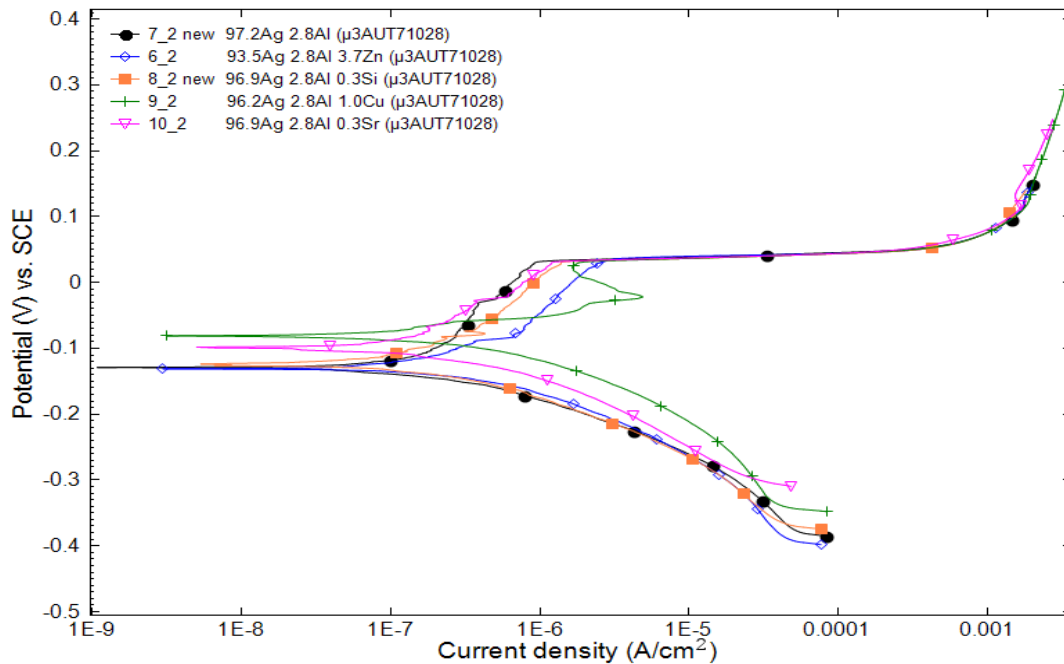
รูปที่ 2.25 แสดงความสัมพันธ์ของเงินผสมสังกะสีต่อค่าความแตกต่างสี DE และเวลาสัมผัสก๊าซ  $H_2S$  ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.26 แสดงความสัมพันธ์ของเงินผสมอะลูมิเนียมต่อค่าความแตกต่างสี DE และเวลาสัมผัสก๊าซ  $H_2S$  ที่แตกต่างกัน

ส่วนที่ 2 เป็นการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนโดยใช้เครื่อง Potentiostat ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 % โดยน้ำหนัก โดยแบ่งชิ้นงานออกเป็น 2 กลุ่มย่อย คือ กลุ่มที่ 1 ชิ้นงานเบอร์ 7(2.8Al),

6(2.8Al3.7Zn), 8(2.8Al0.3Si), 9(2.8Al1Cu) และ 10(2.8Al0.3Sr) โดยพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเส้น โพล่าไรเซชันของโลหะผสมเงินตามรูปที่ 2.27 และตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.27 เส้นโพล่าไรเซชันของชิ้นงานกลุ่ม 7(2.8Al), 6(2.8Al3.7Zn), 8(2.8Al0.3Si), 9(2.8Al1Cu) และ 10(2.8Al0.3Sr) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 % โดยน้ำหนัก

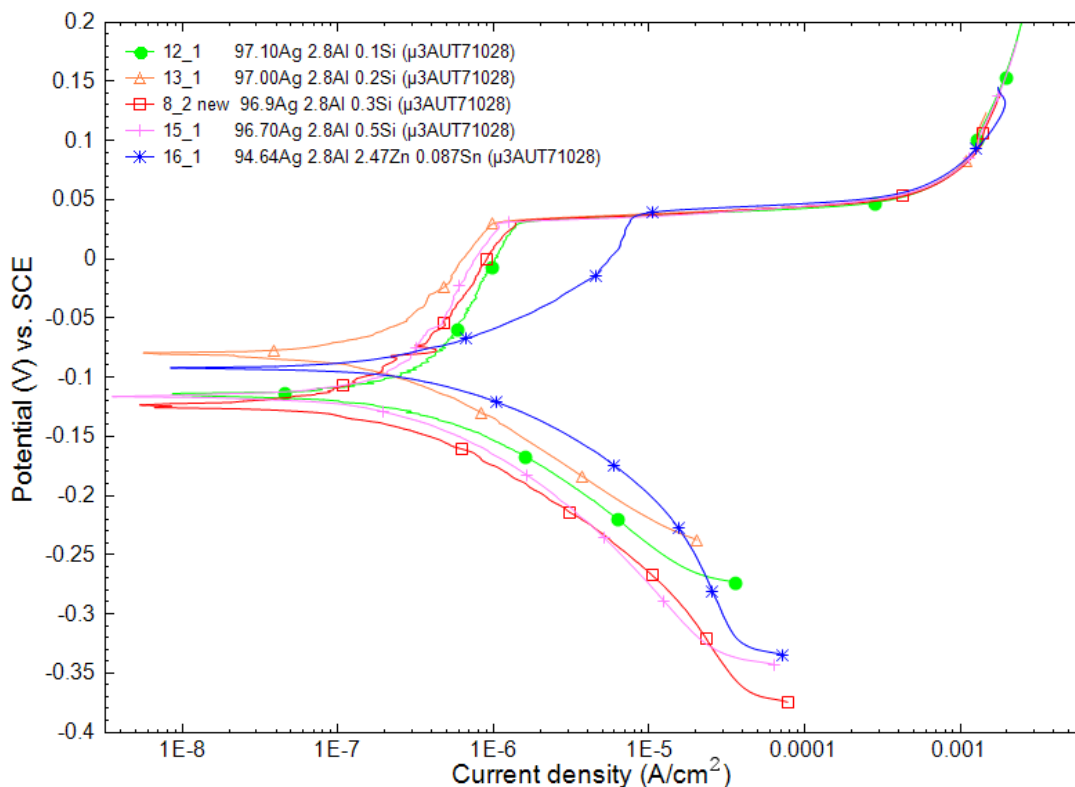
ตารางที่ 2.6 ค่าจากเส้นโพล่าไรเซชันของชิ้นงานกลุ่ม 7(2.8Al), 6(2.8Al3.7Zn), 8(2.8Al0.3Si), 9(2.8Al1Cu) และ 10(2.8Al0.3Sr) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 % โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ส่วนผสมทางเคมี	Corrosion parameter				
		$E_{corr}$ (V)	$I_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Corrosion rate (mm/year)	$E_{pit}$ (V)	$I_p$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
7	97.2Ag 2.8Al	-0.132	0.3602	0.000136	0.032	0.95
6	93.5Ag 2.8Al 3.7Zn	-0.132	0.1173	0.000047	0.036	2.88
8	96.9Ag 2.8Al 0.3Si	-0.125	0.1157	0.000044	0.030	1.37
9	96.2Ag 2.8Al 1.0Cu	-0.082	0.1310	0.000050	0.031	1.80
10	96.9Ag 2.8Al 0.3Sr	-0.102	0.3300	0.000126	0.032	1.23

จากผลการทดสอบ พบว่า การเติมธาตุผสม Zn, Si, Cu หรือ Sr ในโลหะผสมเงินอะลูมิเนียมทำให้ อัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานลดลง โดยชิ้นงานกลุ่ม 8(2.8Al0.3Si) ซึ่งเติมธาตุผสม Si มีอัตราการกัดกร่อน น้อยที่สุด เท่ากับ 0.000044 mm/year ในการทดสอบชิ้นงาน 9(2.8Al1Cu) นั้น พบว่า มีค่าศักย์ไฟฟ้าการ กัดกร่อนสูงที่สุด และเส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานแสดงการสร้างฟิล์มขึ้น โดยมีค่าศักย์ไฟฟ้าพาสซีเวชันปฐม ภูมิ ( $E_{pp}$ ) เท่ากับ -0.021 V ชิ้นงานในกลุ่มนี้ทุกชิ้นมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม ( $E_{pit}$ ) ไม่แตกต่างกัน มากนัก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.030 – 0.036 V

ในชิ้นงานทดสอบหมายเลข 7(2.8Al) 6(2.8Al3.7Zn) และ 8(2.8Al0.3Si) มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัด กร่อน ( $E_{corr}$ ) ที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง -0.132 ถึง -0.125 V และมีค่าอัตราการกัดกร่อนเรียงลำดับ จากน้อยไปมาก คือชิ้นงานกลุ่ม 8, 6 และ 7 ตามลำดับ โดยเส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานทั้ง 3 แสดงการเกิด metastable pit ขึ้น ทั้งนี้ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม ( $E_p$ ) ของชิ้นงาน 6(2.8Al 3.7Zn), 7(2.8Al), 8(2.8Al 0.3Si) และ 9(2.8Al 1Cu) มีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 0.030-0.036 V

ชิ้นงานในการพิจารณาอีกกลุ่มที่ 2 คือ 12(2.8Al0.1Si) 13(2.8Al0.2Si) และ 8(2.8Al0.3Si), 15(2.8Al0.5Si) และ 16(2.8Al2.47Zn0.086Cu0.09Sn) โดยพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงค่าจากเส้นโพลาริเซชันของโลหะผสม ดังแสดงในรูปที่ 2.28 และ ตารางที่ 2.7



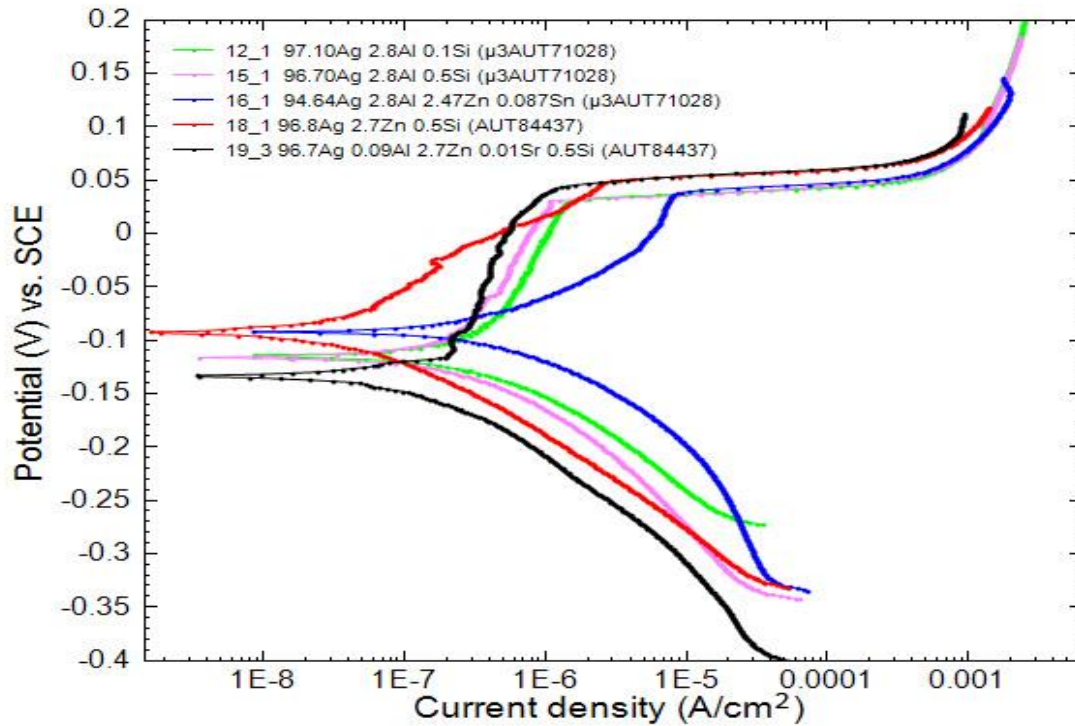
รูปที่ 2.28 เส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานกลุ่ม 12(2.8Al0.1Si), 13(2.8Al0.2Si), 8(2.8Al0.3Si), 15(2.8Al0.5Si) และ 16(2.8Al2.47Zn0.086Cu0.09Sn) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 % โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2.7 ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของโลหะผสม 12(2.8Al0.1Si), 13(2.8Al0.2Si), 8(2.8Al0.3Si), 15(2.8Al0.5Si) และ 16(2.8Al2.47Zn0.086Cu0.09Sn) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 % โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ส่วนผสมทางเคมี	Corrosion parameter				
		$E_{corr}$ (V)	$I_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Corrosion rate (mm/year)	$E_{pit}$ (V)	$I_p$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
12	97.1Ag 2.8Al 0.1Si	-0.119	0.1623	0.000062	0.031	1.49
13	97.0Ag 2.8Al 0.2Si	-0.091	0.0745	0.000028	0.028	0.97
8	96.9Ag 2.8Al 0.3Si	-0.125	0.1157	0.000044	0.030	1.37
15	96.7Ag 2.8Al 0.5Si	-0.118	0.0708	0.000027	0.028	1.05
16	93.78Ag 2.8Al 2.47Zn 0.86Cu 0.09Sn	-0.093	0.1095	0.000044	0.038	8.09

ผลการทดสอบ พบว่า โลหะผสมเงินกลุ่ม 15 (2.8Al0.5Si) มีอัตราการกัดกร่อนต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 0.000028 mm/year ทั้งนี้ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม ( $E_{pit}$ ) ของชิ้นงานทุกชิ้นมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.028-0.038 V จากตารางที่ 2.6 พบว่า เมื่อ % Si เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้อัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมเงินลดลง โดยศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มของชิ้นงานกลุ่มนี้ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยค่าความหนาแน่นของกระแสในช่วงพาสซีฟ ซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงของฟิล์มพาสซีฟเรียงตามลำดับจากมากไปน้อยคือ ชิ้นงาน 13(2.8Al0.2Si) > ชิ้นงาน 15(2.8Al0.5Si) > ชิ้นงาน 8(2.8Al0.3Si) > ชิ้นงาน 12(2.8Al0.1Si) > ชิ้นงาน 16(2.8Al2.47Zn0.86Cu0.09Sn) ตามลำดับ

การเปรียบเทียบสีผิวและการทดสอบการหมองในบรรยากาศ  $\text{H}_2\text{S}$  ดังรูป 2.29 และตาราง 2.8 ทำให้สามารถเปรียบเทียบส่วนผสมเงินที่เหมาะสมในการพิจารณาความต้านทานการหมองสูง ได้แก่ 12)2.8Al0.1Si 15)2.8Al0.5Si 16)2.8Al2.47Zn0.09Sn 18)2.7Zn0.5Si และ 19) 2.7Zn0.5Si0.09Al0.01Sr เมื่อพิจารณาผลการทดสอบในบรรยากาศ  $\text{H}_2\text{S}$  พบว่า การเติมซิลิคอนเกิน 0.5% ทำให้อัตราการเปลี่ยนสี  $\text{DE}^*$  มีค่ามากขึ้น ซึ่งแสดงถึงผลที่ไม่พึงประสงค์ในการใช้งาน ซึ่งมีความเป็นไปได้จากการแยกตัวของเฟสที่ประกอบด้วยซิลิคอนในปริมาณสูงที่เพิ่มมากขึ้นอันจะส่งผลต่อการละลายของซิลิคอนในโครงสร้างพื้นฐานเงินที่ลดลง ทำให้การหมองเพิ่มขึ้นตามค่า  $\text{DE}^*$  ที่มากขึ้น



รูปที่ 2.29 เส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานกลุ่ม 12)2.8Al0.1Si 15)2.8Al0.5Si 16)2.8Al2.47Zn0.86Cu0.09Sn 18)2.8Zn0.5Si และ 19)2.8Zn0.5Si0.09Al0.01Sr ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 % โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2.8 ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของโลหะผสมเงิน 12)2.8Al0.1Si 15)2.8Al0.5Si 16)2.8Al2.47Zn0.86Cu0.09Sn 18)2.8Zn0.5Si และ 19)2.8Zn0.5Si0.09Al0.01Sr ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 % โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ส่วนผสมทางเคมี	Corrosion parameter				
		$E_{corr}$ (V)	$I_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Corrosion rate (mm/year)	$E_{pit}$ (V)	$I_p$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
12	97.1Ag 2.8Al 0.1Si	-0.119	0.1623	0.000062	0.031	1.49
15	96.7Ag 2.8Al 0.5Si	-0.118	0.0708	0.000027	0.028	1.05
16	93.78Ag 2.8Al 2.47Zn 0.86Cu 0.09Sn	-0.093	0.1095	0.000044	0.038	8.09
18	96.8Ag 2.7Al 0.5Si	-0.093	0.0409	0.000013	0.048	2.72
19	96.7Ag 0.09Al 0.5Si 2.7Zn 0.01Sr	-0.131	0.0311	0.000010	0.044	1.25

ผลการทดสอบ พบว่า โลหะผสมเงิน 12 (2.8Al0.1Si) มีอัตราการกัดกร่อนสูงที่สุดสำหรับชิ้นงานชุดนี้ โดยมีค่าอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.000062 mm/year ทั้งนี้ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม ( $E_{pit}$ ) ของ

ชิ้นงาน 18 มีค่าสูงกว่าชิ้นงานอื่น โดยพบว่า เมื่อ % Si เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้อัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมเงินลดลง ดังที่พบจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน 12(2.8Al0.1Si) และ 15(2.8Al0.5Si) การเติม อะลูมิเนียมร่วมกับสังกะสีตั้งชิ้นงาน 16(2.8Al2.47Zn0.86Cu0.09Sn) ทำให้อัตราการกัดกร่อนสูงขึ้น ในการพิจารณาชิ้นงานที่มีการเติม สังกะสีในปริมาณที่เท่ากับการเติมอะลูมิเนียมตั้งการเปรียบเทียบชิ้นงาน 15(2.8Al0.5Si) และ 18(2.8Zn0.5Si) จะพบว่าการเติมสังกะสี ลดอัตราการกัดกร่อนได้ดีกว่าการเติมอะลูมิเนียมสำหรับบรรยากาศการทดสอบในน้ำเกลือ อย่างไรก็ตามการทดสอบดังกล่าวใช้เป็น การอ้างอิงในสถานะการทดสอบในน้ำเกลือหรือบรรยากาศที่มี NaCl เท่านั้นซึ่งยังไม่สามารถจำลองสถานะการ ใช้งานจริงได้ทั้งหมด และจากการศึกษาในสถานะบรรยากาศปกติที่มีมลภาวะสูงกลับพบว่าชิ้นงานที่มีสังกะสี 2.8% กลับเกิดการหมองคล้ำในเวลารวดเร็วกว่าชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียม 2.8% ดังรูปการทดลองการหมองใน บรรยากาศปกติที่เวลา 15 วัน พบว่าชิ้นงานมีสีคล้ำอมน้ำตาลดังรูป 2.30 จากการทดลองการหมองที่นานกว่า 3 สัปดาห์พบว่า ชิ้นงาน 18(2.8Zn0.5Sn) และ 19(2.8Zn0.5Si0.58Al0.062Sr) มักเกิดคราบรีวิไซด์ดำเข้มที่ผิว ชัดเจนส่วน ชิ้นงานเงินผสมอะลูมิเนียมจะพบเพียงผิวสีพื้นที่เข้มเหลืองมากขึ้นแต่ไม่พบคราบรีวิไซด์ดำ



รูป 2.30 แสดงการทดสอบการหมองในบรรยากาศปกติ 15 วัน ของชิ้นงาน 12 15 16 18 19

ในการทดลองผลิตชิ้นงานจริงนั้นคณะผู้วิจัยได้ผลิตชิ้นงานสินค้าที่สถานประกอบการจัดจำหน่ายขึ้น โดยตรวจสอบการปฏิบัติงาน และ ศึกษาผลการทำงานจริงตั้งแต่กระบวนการหล่อ และ ผลิตตัวเรือนด้วยอัลลอย 15(2.8Al0.5Si) ซึ่งให้ผลดังแสดงในรูปที่ 2.31 และได้ผลิตเป็นชิ้นงานสำเร็จต่อไป



รูป 2.31 แสดงตัวอย่างต้นงานที่ผ่านการหล่อและ ล้างปูน กัดกรด ก่อนผลิตเป็นเครื่องประดับ

## 2.6 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาข้างต้น เมื่อชี้เฉพาะในแต่ละส่วนจะพบว่ามียารละเอียดย่อยมาก อย่างไรก็ตาม จุดประสงค์หลักของงานวิจัยต้องการสร้างอัลลอยเพื่อพัฒนาความต้านทานการหมองด้วยการเติมอะลูมิเนียม ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาตัวอย่างทั้งหมดและคำนึงถึงความเป็นไปได้และ ตัดปัจจัยแยกย่อยที่ไม่สำคัญออกไป โดยสามารถสรุปประเด็นหลักของงานวิจัยได้ตามกลุ่มธาตุหลักในเงินซึ่งแบ่งออกเป็น เงินผสมสังกะสี และ เงินผสมอะลูมิเนียมได้ดังนี้

### 1. กลุ่มเงินผสมอะลูมิเนียม

สำหรับกลุ่มเงินผสมอะลูมิเนียมสามารถแยกพิจารณาตามธาตุที่เติมได้แก่ ซิลิคอน ทองแดง สังกะสี และ สตรอนเชียม ดังรายละเอียดต่อไปนี้

**ซิลิคอน** : การเติมซิลิคอนในเงินผสมอะลูมิเนียมทำให้เกิดเฟสซิลิคอนสูงซึ่งจะมีปริมาณมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิคอน โดยการเพิ่มซิลิคอนทำให้การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรง(ทั้งความต้านทานแรงดึงสูงสุด และ ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก)ไม่เปลี่ยนไปมากนัก และจะลดอัตราการกัดตัวอย่างมีนัยยะเนื่องจากเฟสซิลิคอนสูงมีลักษณะเป็นโครงตาข่าย อีกทั้งการเพิ่มปริมาณซิลิคอนจะช่วยเพิ่มความต้านทานการหมองและกัดกร่อนในสารละลาย NaCl 1 % ที่การเติมซิลิคอนไม่เกิน 0.5 % ส่วนในการเติมซิลิคอนที่ 0.8-1 % จะทำให้ค่า DE\* ซึ่งแสดงความหมองที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างชัดเจน

**สตรอนเชียม** : สตรอนเชียมสามารถแยกตัวในเงินผสมอะลูมิเนียมได้ดี และมักรวมตัวกับซิลิคอนและ อะลูมิเนียมทำให้สมบัติทางกลลดลงทั้งความแข็งแรง(ทั้งความต้านทานแรงดึงสูงสุดและ ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก)และ อัตราการกัดซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงและเพิ่มจำนวนของโครงสร้างเฟสที่มี อะลูมิเนียมหรือ ซิลิคอนสูง ทำให้สามารถเติมได้ในปริมาณต่ำ ซึ่งพบว่าการเติมสตรอนเชียมในช่วง 0.01%ช่วยลดค่า DE\*/เพิ่มความต้านทานการหมอง และลดการกัดกร่อนในสารละลาย NaCl ซึ่งเทียบเคียงได้กับน้ำทะเล แต่จะพบผิวหลังหล่อที่มีสีคล้ำขึ้น

**สังกะสี** : การเติมสังกะสีในเงินผสมอะลูมิเนียมทำให้ค่าความแข็งแรง(ทั้งความต้านทานแรงดึงสูงสุดและ ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก)เพิ่มขึ้น โดยไม่ลดอัตราการกัดตัวเนื่องจาก สังกะสีสามารถละลายใน โครงสร้างพื้นฐานได้ดี อีกทั้งยังลดค่า DE\*/เพิ่มความต้านทานการหมอง และลดการกัดกร่อนใน สารละลาย NaCl แต่อาจเกิดคราบสีเหลืองคล้ำเมื่อมีการใช้งานในบรรยากาศทั่วไปได้ง่ายโดยเฉพาะ ในช่วงการเติมสังกะสีที่สูง

**ทองแดง** : การเติมทองแดงในเงินผสมอะลูมิเนียมทำให้ค่าความแข็งแรง(ทั้งความต้านทานแรงดึงสูงสุด และ ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก)เพิ่มขึ้น และลดอัตราการกัดตัวเนื่องจาก การแยกตัวของเฟส ทองแดงสูงจากโครงสร้างพื้นฐานได้ดี อีกทั้งยังลดค่า DE\*/เพิ่มความต้านทานการหมอง และลดการกัด

กร่อนในสารละลาย NaCl อีกทั้งยังเพิ่มค่า DE\*/ลดความต้านทานการหมอง และเพิ่มการกัดกร่อนในสารละลาย NaCl

## 2. กลุ่มเงินผสมสังกะสี

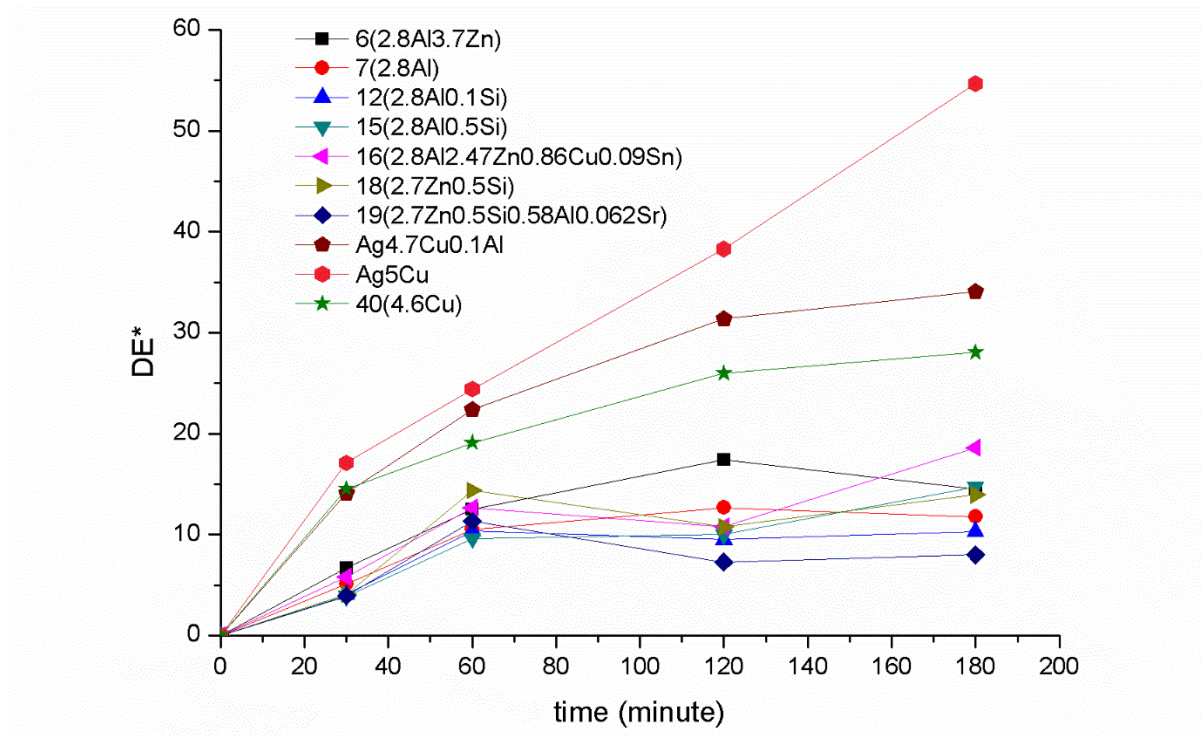
สำหรับกลุ่มเงินผสมอะลูมิเนียมสามารถแยกพิจารณาตามธาตุที่เติมได้แก่ สังกะสี ซิลิคอน และ สตรอนเชียม ดังรายละเอียดต่อไปนี้

**สังกะสี** : การเติมสังกะสีทดแทนอะลูมิเนียมทำให้ค่าความแข็งแรง(ทั้งความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก)ลดลง อัตราการยึดตัวเพิ่มขึ้นเนื่องจากแนวโน้มการละลายของแข็งของเงินร่วมกับสังกะสีมีมากกว่าการผสมของเงินกับอะลูมิเนียม

**ซิลิคอน** : การเติมซิลิคอนในเงินผสมสังกะสีส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงด้านโครงสร้างจุลภาคเนื่องจากการเพิ่มซิลิคอนทำให้เกิดการแยกตัวของเฟสซิลิคอนสูงและ ทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง เช่นเดียวกับอัตราการยึดตัวที่ลดลง โดยค่า DE\*ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก อีกทั้งยังลดการกัดกร่อนในสารละลาย NaCl

**สตรอนเชียม** : สตรอนเชียมสามารถแยกตัวในเงินผสมสังกะสีได้ดี และมักรวมตัวกับซิลิคอนและอะลูมิเนียมทำให้สมบัติทางกลลดลงทั้งความแข็งแรง แต่เนื่องจากการเติมสตรอนเชียมอยู่ในช่วงต่ำคือ 0.01% ทำให้ความแข็งแรงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนักและ อัตราการยึดตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

จากผลสรุปข้างต้นหากพิจารณาแนวโน้มการเลือกอัลลอยที่มีความต้านทานหมองสูง ทนการกัดกร่อนในสารละลาย NaCl หรือน้ำทะเลได้ดี จะพบว่ามียหลายกลุ่มที่มีพฤติกรรมดังกล่าวได้แก่ โลหะเงินผสมอัลลอยหมายเลขที่ 12 (2.8Al0.1Si) 15(2.8Al0.5Si) 16(2.8Al2.47Zn0.86Cu0.09Sn) 18(2.7Zn0.5Si) 19(2.7Zn0.5Si0.09Al0.01Sr) 7(2.8Al) ซึ่งมีความต้านทานการหมองที่เปรียบเทียบกับค่า DE\*ดังรูป 2.31 ซึ่งพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัลลอยการค้าได้แก่ เงินผสมทองแดง 5 % (Ag5Cu) และ เงินผสมทองแดง4.7%อะลูมิเนียม 0.1% (Ag4.7Cu0.1Al) ซึ่งเป็นที่นิยมในการผลิตเครื่องประดับในปัจจุบัน อัลลอยทดลองกลุ่ม 12 (2.8Al0.1Si) 15(2.8Al0.5Si) 16(2.8Al2.47Zn0.86Cu0.09Sn) 18(2.7Zn0.5Si) 19(2.7Zn0.5Si0.09Al0.01Sr) 7(2.8Al) ทุกตัวดังกล่าวจะมีความต้านทานการหมองที่ดีกว่าโดยมีค่า DE\*ต่ำกว่าอัลลอยการค้า ดังรูป 2.31



รูป 2.32 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแตกต่างสี DE\* สำหรับกลุ่มชิ้นงานทดลองและเงินที่ได้รับการใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมปัจจุบัน

### การพิจารณาด้านความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์

ในการพิจารณาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ คณะผู้วิจัยได้พิจารณาจาก การทดลองผลิตอัลลอยที่ปริมาณ 8 กก. โดยมีต้นทุนการผลิตอัลลอยแต่ละชนิดดังตารางที่ 2.9 โดยเป็นการแสดงต้นทุนการผลิตอัลลอยต่อปริมาณการผลิต 8 กก. ด้วยเตาหลอมระบบสุญญากาศคลุมบรรยากาศด้วย ไนโตรเจน ใช้เวลาการผลิตเฉลี่ย 1 ชม./ครั้ง ทั้งนี้ผู้ผลิตต้องพิจารณาตามความเหมาะสมในการผลิตและการใช้งานเป็นหลักและจำเป็นต้องระวังธาตุสูญหายง่ายเช่น สตรอนเซียม สูญเสียจากการผลิต

ตารางที่ 2.9 แสดงต้นทุนการผลิตอัลลอยต่อปริมาณการผลิต 8 กก. ด้วยเตาหลอมระบบสุญญากาศ

รายละเอียดการผลิต	กลุ่ม อะลูมิเนียม สังกะสี	กลุ่ม อะลูมิเนียม เต็ม ซิลิคอน	กลุ่ม อะลูมิเนียม เต็มซิลิคอน สตรอนเซียม
ค่าไฟฟ้า	40	40	40
ค่าอุปกรณ์และเบ้าหลอม	200	200	200
สังกะสี/อะลูมิเนียม	1000	850	850
อะลูมิเนียมสตรอนเซียม	-	250	250
สารประกอบซิลิคอน	-	-	260
รวม(ต่อ 8 กก)	1260	1350	1600

เมื่อเปรียบเทียบกับราคาอัลลอยการค้ำในท้องตลาดพบว่าราคาอัลลอยการค้ำสูงมากในช่วง 1000-2300 บาท ต่อ กก. ในขณะที่ อัลลอยที่แนะนำการผลิตหากผลิตใช้เองจะมีราคาในช่วง 170-200 บาท ต่อ กก. ซึ่งลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มศักยภาพการทำงานได้ดี แต่จำเป็นต้องปรับพฤติกรรมการผลิตให้เหมาะสม เนื่องจากอัลลอยที่ใช้จะมีความนิ่มและ เหนียวทำให้ขัดเงายากกว่า เงินผสมทองแดงปกติหรืออัลลอยการค้ำจากต่างประเทศทั่วไป

ตารางที่ 2.10 แสดงผลการเปรียบเทียบการปฏิบัติงานในช่วง 12 เดือนเปรียบเทียบกับขั้นตอนการดำเนินงานที่ได้ระบุไว้

ตารางที่ 2.10 สรุปและเปรียบเทียบผลการดำเนินงาน ในช่วง 12 เดือน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาการดำเนินการ เดือนที่												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. รวบรวมข้อมูลผลธาตุผสม รองต่อความต้านทานการหมอง	←→												
2. จัดสร้างโลหะผสมเพื่อ ผลิตอัลลอยและหล่อต้นเงิน สเตอร์ลิง 935		←→											
3. วิเคราะห์ผลธาตุผสม ต่อ ความต้านทานการหมอง สมบัติทางกล และโครงสร้าง จุลภาคของชิ้นงานเงิน			←→										
5. รวบรวมผลสีผิวต้นเงิน ความ ต้านทานการหมอง สมบัติทาง กล และโครงสร้างจุลภาคของ ชิ้นงานเงิน								←→					
6. ทดสอบการใช้งานระดับ อุตสาหกรรมและสรุปผล งานวิจัยทั้งหมด									←→				

# บรรณานุกรม

---

## บรรณานุกรม

1. Pradyot P. Handbook of Inorganic Chemicals, 2002, pp. 253, 271, 275, 276, 313, 318, 818 , 822, 826, 833, 842, 845, 935, 940, 941, 991, 992
2. Andrea Basso. report. JTF2005-Jewelry Technology Forum,2005
3. Vinal, G.W. and Schramm G.M. Metal Industry (N.T.). 1934, pp 1,15,22,100,151,231
4. Carrano V Richard, and Mondillo A Ronald. Tarnish-resistant Hardenable Fine Silver Alloys. US. Patent No. 6,139,652 , Date Oct. 31, 2000
5. Bernhard Melvin, and Sivertson T. Jame. Silver Alloy Compositions. US. Patent No. 4,973,446, Date Nov. 27, 1990
6. Croce; Scott M. Anti-Tarnish Silver Alloy. US. Patent No.6,841,012 , Date Nov. 27,1990
7. เจษฎา จอกแก้ว, ผลของอินเดียมต่อสมบัติทางกลและความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิคอน, สาขาวิศวกรรมโลหการ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2544 :หน้า 48
8. Moore, J.J., Chemical Metallurgy, Butterworth Heinemann, 1990, p85
9. Per Kofstad, Internal Oxidation, High Temperature Oxidation of Metal, Jonh Willey & Sons.Inc, 1966, p291
10. ผศ.ดร. เอกสิทธิ์ และ คณะ , การปรับปรุงคุณภาพเงินสเตอร์ลิงโดยการเติมธาตุซิลิคอน, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2550
11. Hugh Baker, Hiroaki Okamoto, ASM Handbook Volume 3 Alloy Phase Diagram. ASM International , 1992 , pp 2.31,2.37,2.40 2.85,2.121,2.148
12. Daniel Davitz. Silver Colored Alloy with low alloy percentage of Ni and Cu. US. Patent No. 5, 187, 195. Date Oct. 6, 1998
13. Dwarika P.A., Sterling Silver Alloy Composition of Exception and Reversible Hardness and Enhanced Tarnish Resistance. US Patent No. 2006/0045792 A1. Date. Mar. 2. 2006
14. ผศ.ดร. เอกสิทธิ์ และ คณะ , การปรับปรุงขนาดเกรนและความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิง950 ด้วยสารประกอบซิลิคอน, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2557

ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ ต่อ สกว.  
ไม่มีข้อคิดเห็นใดๆ

ลงนาม.....

(หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน)

วันที่ 29 พฤษภาคม 2561

## ภาคผนวก



ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับตลอดโครงการ

วัตถุประสงค์โครงการ	กิจกรรมที่วางแผน	กิจกรรมที่ดำเนินการ	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ	
<p>1. เพื่อศึกษา ผลการเติม อะลูมิเนียม ทองแดงและสังกะสี ต่อการเปลี่ยนแปลงความต้านทานการหมอง โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของเงินเกรด 935</p> <p>2. เพื่อหาปริมาณธาตุที่เหมาะสมต่อการผลิตและ สีผิวสะท้อนของชิ้นงานเครื่องประดับเงิน เพื่อผลิตในเชิงอุตสาหกรรมได้สะดวก</p> <p>3. เพื่อศึกษาคุณภาพผิวตัวเรือนเงิน มุ่งเน้นในส่วนความต้านทานการหมองสูงและ มีสีผิวสะท้อนเทียบเคียงเงินสเตอร์ลิงผสมทองแดงที่มักเป็นที่ต้องการของตลาด</p>	รวบรวมข้อมูลผลธาตุผสมรองต่อความต้านทานการหมอง	เก็บข้อมูลธาตุผสมรองต่อความต้านทานการหมอง	<p>1. ข้อมูลธาตุผสมรองต่อการหมองของเงินผสม</p> <p>2. ได้ผลิตอัลลอยที่มีความต้านทานการหมองสูงกว่าเงินอัลลอยที่นิยมใช้ทั่วไป</p> <p>3. ได้แนวทางการผลิตอัลลอยเพิ่มปรับปรุงการผลิตภายในประเทศไทย</p>	
	จัดสร้างโลหะผสมเพื่อผลิตอัลลอยและหล่อต้นเงินสเตอร์ลิง 935	หล่อต้นเงินสเตอร์ลิง 935		
	วิเคราะห์ผลธาตุผสม ต่อความต้านทานการหมอง สมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของชิ้น งานเงิน	ตรวจสอบส่วนผสมเคมี ความต้านทานการหมอง สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค		
	รวบรวมผลสีผิวต้นเงิน ความต้านทานการหมอง สมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเงิน	รวบรวมผลสีต้นเงิน ความต้านทานการหมอง สมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเงิน		
	ทดสอบการใช้งานระดับอุตสาหกรรมและสรุปผลงานวิจัยทั้งหมด	ทดสอบการใช้งานและ สรุปผลการวิจัยทั้งหมด		

สัญญาเลขที่ RDG60T0061

การพัฒนาโลหะเงินผสมที่เติมอะลูมิเนียม เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านทานการหมอง  
สรุปรายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 3

ตาราง เปรียบเทียบ Output ที่เสนอในข้อเสนอโครงการและที่ดำเนินการได้จริงในรอบ 12 เดือน

Output		ในกรณีล่าช้า (ผลสำเร็จไม่ถึง 100%) ให้ท่านระบุสาเหตุและการแก้ไขที่ท่านดำเนินการ
กิจกรรมในข้อเสนอโครงการ	ผลสำเร็จ (%)	
1.รวบรวมข้อมูลผลธาตุผสมรองต่อความต้านทานการหมอง	100%	ระบุเหตุผลที่ล่าช้า .....
2.จัดสร้างโลหะผสมเพื่อผลิตอัลลอยและหล่อต้นเงินสเตอร์ลิง935	100%	-
3.วิเคราะห์ผลธาตุผสม ต่อความต้านทานการหมอง สมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเงิน	100%	-
4.ปรับปรุงส่วน และวิเคราะห์ผลธาตุผสม ต่อความต้านทานการหมองและ มีสีผิวสะท้อนเทียบเคียงเงินสเตอร์ลิงผสมทองแดง	100%	ระบุเหตุผลที่ล่าช้า .....

ลงนาม.....

(หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน)

วันที่ 29 พฤษภาคม 2561

ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ ต่อ สกว.

- ประชุม...กลุ่ม..... จำนวน ..24... ครั้ง
- ..นักวิจัยพบผู้ประกอบการ จำนวน ประมาณ 12 ครั้ง...
- .....

ลงนาม.....

(หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน)

วันที่. 29 พฤษภาคม 2561