

ผลของแคลเซียมและซิลิคอนต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกลและความต้านทานการหมอง  
ของโลหะผสมเงิน - ทองแดง



นายวสันต์ คุร์ตนะเวช

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1108-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF CALCIUM AND SILICON ON MICROSTRUCTURE, MECHANICAL PROPERTIES  
AND TARNISH RESISTANCE OF Ag – Cu ALLOYS



Mr. Wasan Kooratanaweich

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering  
Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2004  
ISBN 974-53-1108-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของแคลเซียมและซิลิคอนต่อโครงสร้างจุลภาคสมบัติทางกลและ  
ความต้านทานความหมองของโลหะผสมเงิน-ทองแดง

โดย

นายวสันต์ คุรัตน์เวช

สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการ

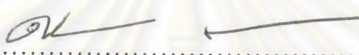
อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร

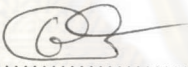
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

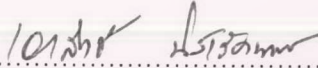
รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต


  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัญศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิฐธร)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุมาลี วงศ์จันทร์)

วสันต์ คุรัตน์เวช : ผลของแคลเซียมและซิลิคอนต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกลและความต้านทานการหมองของโลหะผสมเงิน - ทองแดง. (EFFECTS OF CALCIUM AND SILICON ON MICROSTRUCTURE, MECHANICAL PROPERTIES AND TARNISH RESISTANCE OF Ag – Cu ALLOYS) อ.ที่ปรึกษา: อาจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, อ.ที่ปรึกษาร่วม: รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ; 106 หน้า. ISBN 974-53-1108-1

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาผลของธาตุแคลเซียมที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล สีผิวหลังอบให้ความร้อน ความต้านทานการหมองและการกัดกร่อน เพื่อหาปริมาณธาตุแคลเซียมและซิลิคอนที่เหมาะสมในการหล่อโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ โลหะเงินสเตอร์ลิงที่ทำการทดลองแบ่งเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มแรกเติมแคลเซียม กลุ่มที่สองเติมซิลิคอน กลุ่มที่สามเติมทั้งแคลเซียมและซิลิคอน ธาตุแคลเซียมที่พบในโครงสร้างจุลภาคจะเป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้างเนื้อพื้นที่เป็น Ag – rich phase สูงกว่าในโครงสร้างยูเทคติก (Cu – rich phase) ส่วนธาตุซิลิคอนจะอยู่ใน Cu – rich phase ปริมาณแคลเซียมที่เพิ่มมีผลทำให้ปริมาณโครงสร้างยูเทคติกที่เกิดขึ้น ความต้านทานแรงดึง ความเค้นจุดคราก และความแข็งมีค่าลดลง ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าโลหะผสมที่มีปริมาณแคลเซียมสูง มีความแข็งลดลง ส่วนปริมาณแคลเซียมที่เพิ่มความต้านทานการหมองให้กับโลหะผสมได้ดีคือประมาณ 0.012 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากชั้นฟิล์มของสารประกอบแคลเซียมที่เกิดขึ้น การเติมแคลเซียมที่ปริมาณมากขึ้นมีผลทำให้ความต้านทานการหมองลดลง การเติมซิลิคอนปริมาณมากขึ้นก็เพิ่มความต้านทานการหมองมากขึ้น การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของฟิล์มที่เกิดขึ้นจากเส้นโพเทนชิโอไดนามิกอานอดิกโพลาริเซชัน ซึ่งได้จากการทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิมิตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ พบว่าที่ส่วนผสมที่เติมแคลเซียม 0.012 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีผลในการเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) และลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $I_{corr}$ ) อย่างชัดเจน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา..... วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อนิสิต *An por*  
 สาขาวิชา..... วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *lester นิสารัตนพร*  
 ปีการศึกษา..... 2547..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม *กอบบุญ หล่อทองคำ*

# # 4470524521 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD: STERLING SILVER / INVESTMENT CASTING / MECHANICAL PROPERTIES / TARNISH RESISTANCE / CORROSION RESISTANCE / ELECTROCHEMICAL TECHNIQUE

WASAN KOORATANAWICH : EFFECTS OF CALCIUM AND SILICON ON MICROSTRUCTURE, MECHANICAL PROPERTIES AND TARNISH RESISTANCE OF Ag – Cu ALLOYS. THESIS ADVISOR : EKASIT NISARATANAPORN, Ph.D., THESIS COADVISOR : ASSOC.PROF. GOBBOON LOTHONGKUM ,Ph.D., 106 pp. ISBN 974-53-1108-1.

The objective of this research is to investigate the effect of calcium and silicon in 92.5%Ag – Cu alloys on their microstructure, mechanical properties, surface color, and tarnish and corrosion resistance. This is ultimately to determine the suitable calcium and silicon content of sterling silver alloy for the jewelry industry. The experimental alloys are divided into 3 groups, first group is contain only calcium, second group is contain only silicon and the last one is contain both of calcium and silicon. The microstructure of 92.5%Ag – Cu alloys consists of both silver – rich solid solution, as a matrix, and eutectic structure. The amount of calcium found in the matrix is higher than those in the eutectic structure but the amount of silicon found in Cu – rich phase. By increasing calcium content, the amount of eutectic structure, and therefore, tensile and yield strength and hardness of the alloys were decreasing. The tarnish resistance was found to be improved when the amount of calcium was small (0.012%Ca) and the tarnish films were studied quantitatively using a spectrophotometer. Potentiodynamic anodic polarization technique was applied to measure the corrosion potentials ( $E_{corr}$ ) and corrosion current density ( $I_{corr}$ ). In 1% sodium chloride solution saturated with hydrogen sulfide ( $H_2S$ ), the amount of calcium at 0.012%Ca not only promoted the noble shift in corrosion potentials but also reduced corrosion current density.

Department.....	Metallurgical Engineering.....	Student's signature.....	Wasan Kooratanawich
Field of study	Metallurgical Engineering.....	Advisor's signature.....	Ekasit Nisaratana
Academic year.....	2004.....	Co-advisor's signature.....	Gobboon Lothongkum

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจาก อาจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสาร์ตนพร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และ ข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ ที่รับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ขอขอบพระคุณภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ในการวัดค่าสีของชิ้นงาน ขอขอบคุณท่าน อาจารย์ เจ้าหน้าที่ และเพื่อนๆ นิสิตปริญญาโทในภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน ที่ให้ความรู้ คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ ความช่วยเหลือต่างๆ จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ซึ่งให้การสนับสนุนทุนวิจัยจนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณบิดา มารดา เพื่อนร่วมงาน และ เพื่อนทุกคนที่ให้กำลังใจเสมอมาจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1	
บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2	
ปริทรรศน์วรรณกรรม.....	5
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเงินและเงินสเตอร์ลิง.....	5
2.1.1 โลหะเงิน.....	5
2.1.2 โลหะผสมเงินสเตอร์ลิง.....	5
2.2 สมบัติทางกายภาพของโลหะเงินและโลหะที่ใช้ผสมในเงินสเตอร์ลิง.....	6
2.3 สมบัติทางเคมี.....	7
2.4 วิธีวัดความสามารถในการต้านทานความหมอง.....	7
2.4.1 การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิว.....	7
2.4.2 การตรวจสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า.....	8
2.5 แผนภูมิสมดุลเฟสของโลหะเงินผสม.....	12
2.5.1 แผนภูมิสมดุลเฟสของระบบเงิน – ทองแดง.....	12
2.5.2 แผนภูมิสมดุลเฟสของระบบเงิน – ซิลิคอน.....	13
2.5.3 แผนภูมิสมดุลเฟสของระบบเงิน – แคลเซียม.....	14
2.5.4 แผนภูมิสมดุลเฟสของระบบแคลเซียม – ทองแดง.....	15
2.5.5 แผนภูมิสมดุลเฟสของระบบทองแดง – ซิลิคอน.....	16
2.5.6 แผนภูมิสมดุลเฟสของระบบซิลิคอน – แคลเซียม.....	17
2.6 สมบัติทางกลของโลหะเงินผสม.....	18

บทที่ 3

2.7 การเกิดความหมองที่ผิว.....	19
2.8 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินผสม.....	20
ระเบียบวิธีการวิจัย.....	21
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	21
3.1.1 อุปกรณ์ในการทำแม่พิมพ์ยาง.....	21
3.1.2 อุปกรณ์ในการหล่อเทียนและติดต้น.....	21
3.1.3 อุปกรณ์ในการทำแม่พิมพ์ปูนหล่อและอบเผา.....	21
3.1.4 อุปกรณ์หล่อและหลอมเพื่อเตรียม Master Alloy ทองแดงและ ซิลิคอน.....	21
3.1.5 อุปกรณ์หล่อและหลอมเพื่อเตรียม Master Alloy ของทองแดงและ แคลเซียม.....	22
3.1.6 อุปกรณ์ในการตรวจสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า.....	22
3.1.7 เครื่องมือวิเคราะห์.....	22
3.2 วัตถุประสงค์.....	23
3.3 สารเคมี.....	23
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	24
3.5 ระเบียบและวิธีการตรวจสอบ.....	26
3.5.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	26
3.5.2 การวิเคราะห์ปริมาณของธาตุเงินและทองแดงด้วยเครื่องมือ Atomic Absorption Spectroscopy.....	26
3.5.3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุแคลเซียมและซิลิคอน ด้วยเครื่องมือ ICP.....	27
3.5.4 การตรวจวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์.....	27
3.5.5 การทดสอบแรงดึง.....	28
3.5.6 การทดสอบความต้านทานการหมอง.....	28
3.5.7 การตรวจสอบสีผิวหลังจากการอบให้ความร้อน.....	29
3.5.8 การทดสอบการกัดกร่อนของฟิล์มที่เกิดขึ้นหลังการเติมธาตุผสม ซิลิคอนและแคลเซียม ด้วยขบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยเทคนิค โพเทนชิโอดนามิก.....	29
3.5.9 แผนภูมิกระบวนการทดลอง.....	31



บทที่ 4	รายงานผลการทดลอง.....	32
	4.1 ผลที่ได้จากการหลอมและหล่อ.....	32
	4.2 ส่วนผสมทางเคมี.....	32
	4.3 ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางกลในสภาพหลังการหล่อขึ้นรูป (as-cast).....	34
	4.3.1 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์.....	34
	4.3.2 ผลการทดสอบแรงดึง.....	35
	4.4 ผลการตรวจสอบสีผิวหลังทำการอบให้ความร้อน.....	36
	4.5 ผลการทดสอบความต้านทานการหมอง.....	39
	4.6 ผลการทดสอบการกัดกร่อนของฟิล์มด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า โดยวิธี โพเทนชิโอสแตติก.....	43
บทที่ 5	อภิปรายผลการทดลอง.....	45
	5.1 ผลจากการหลอมและหล่อ.....	45
	5.2 ส่วนผสมทางเคมี.....	45
	5.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	46
	5.4 ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางกลในสภาพหลังการหล่อขึ้นรูป.....	59
	5.4.1 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์.....	59
	5.4.2 ผลการทดสอบแรงดึง.....	62
	5.5 ผลการตรวจสอบสีผิวหลังอบให้ความร้อน.....	65
	5.6 ผลการทดสอบความต้านทานการหมอง.....	66
	5.7 ผลจากการทดสอบการกัดกร่อนของฟิล์มด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า โดยวิธี โพเทนชิโอสแตติก.....	69
บทที่ 6	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	75
	6.1 สรุปผลการทดลอง.....	75
	6.2 ข้อเสนอแนะ.....	76
รายการอ้างอิง.....		77
ภาคผนวก.....		79
	ภาคผนวก ก.....	80
	ภาคผนวก ข.....	83

ภาคผนวก ค.....	89
ภาคผนวก ง.....	91
ภาคผนวก จ.....	98
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	106



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สมบัติทางกายภาพของธาตุต่างๆ.....	6
2.2 ค่าพลังงานอิสระของการเกิดปฏิกิริยา Oxidation และ Sulphidation ของธาตุต่างๆ.....	19
3.1 แสดงส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่ใช้ในการทดลอง.....	25
4.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมก่อนและหลังการหล่อ.....	32
4.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของปริมาณแคลเซียมและซิลิคอนที่ใช้ในการหล่อ ปริมาณที่เหลืออยู่จริงและปริมาณที่สูญเสียไปหลังจากการหล่อ.....	33
4.3 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยแบบวิกเกอร์ (HV) เปรียบเทียบกับปริมาณส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสม.....	34
4.4 แสดงผลการทดสอบแรงดึงของโลหะผสม.....	35
4.5 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิว (DE*) ของโลหะผสม.....	39
4.6 แสดงค่า $E_{corr}$ , $E_{pp}$ , $E_p$ , $I_{corr}$ และ Corrosion Rate ที่วัดได้จากเส้นโพลาริเซชันของชิ้นทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอิมิตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	44
ข แสดงปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แคลเซียม - ซิลิคอน ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM).....	83
ค ความยาวเส้นทแยงมุม 2 ด้าน ( $d_1$ และ $d_2$ ) และความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness; HV) ของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แคลเซียม - ซิลิคอน.....	89

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ

หน้า

1.1	แผนภาพ Ellingham แสดงค่า Gibb's Free Energy ของการเกิดออกไซด์ของโลหะที่อุณหภูมิต่างๆ.....	2
2.1	วิธีการหาค่า $E_{\text{corr}}$ และ $I_{\text{corr}}$ จากเส้นโพลาริเซชัน.....	8
2.2	แสดงส่วนต่างๆ ของเส้นโพลาริเซชัน.....	9
2.3	เซลล์ที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้า.....	10
2.4	เครื่องโพเทนชิโอสแตทที่ใช้วัดเส้นโพลาริเซชัน.....	11
2.5	ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิดต่าง ๆ.....	11
2.6	แผนภูมิสมดุลเฟสของโลหะผสมเงิน – ทองแดง.....	12
2.7	แผนภูมิสมดุลเฟสของโลหะผสมเงิน – ซิลิคอน.....	13
2.8	แผนภูมิสมดุลเฟสของโลหะผสมเงิน – แคลเซียม.....	14
2.9	แผนภูมิสมดุลเฟสของโลหะผสมแคลเซียม – ทองแดง.....	15
2.10	แผนภูมิสมดุลเฟสของโลหะผสมทองแดง – ซิลิคอน.....	16
2.11	แผนภูมิสมดุลเฟสของธาตุผสมซิลิคอน – แคลเซียม.....	17
2.12	คุณสมบัติต่างๆ ของโลหะผสมเงิน – ทองแดง.....	18
2.13	แผนภูมิสมดุลและโครงสร้างจุลภาคจากการหล่อของโลหะผสมเงิน – ทองแดง.....	20
3.1	แสดงชิ้นงานทดสอบแรงดึง.....	28
3.2	แผนภูมิกระบวนการทดลอง.....	31
4.1	ภาพแสดงผลของธาตุแคลเซียมที่มีต่อลักษณะสีผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงหลังจากการอบให้ความร้อน.....	36
4.2	ภาพแสดงผลของธาตุซิลิคอนที่มีต่อลักษณะสีผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงหลังจากการอบให้ความร้อน.....	37
4.3	ภาพแสดงผลของธาตุแคลเซียมและซิลิคอนที่มีต่อลักษณะสีผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงหลังจากการอบให้ความร้อน.....	38
4.4	ภาพแสดงลักษณะชิ้นงานที่ผสมแคลเซียมหลังทดสอบความต้านทานการกันหมอง.....	40
4.5	ภาพแสดงลักษณะชิ้นงานที่ผสมซิลิคอนหลังทดสอบความต้านทานการกันหมอง.....	41
4.6	ภาพแสดงลักษณะชิ้นงานที่ผสมแคลเซียมและซิลิคอนหลังทดสอบความต้านทานการกันหมอง.....	42

## ภาพประกอบ

## หน้า

5.1	ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยายต่างๆ.....	50
5.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมและซิลิคอนในโลหะเงินสเตอร์ลิงกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์.....	59
5.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมและซิลิคอนในโลหะเงินสเตอร์ลิงกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์.....	60
5.4	ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม ในสภาพหล่อขึ้นรูป ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 200 เท่า หลังการกัดด้วยสารละลาย.....	62
5.5	กราฟแสดงผลของธาตุแคลเซียมในโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความเค้นจุดคราก.....	63
5.6	กราฟแสดงผลของธาตุซิลิคอนในโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความเค้นจุดคราก.....	63
5.7	กราฟแสดงผลความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความเค้นจุดครากของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผสมทั้งธาตุแคลเซียมและซิลิคอน.....	64
5.8	กราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผสมธาตุแคลเซียม.....	67
5.9	กราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผสมธาตุซิลิคอน.....	67
5.10	กราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผสมทั้งธาตุแคลเซียมและธาตุซิลิคอน.....	68
5.11	แสดงการหาค่า $E_{corr}$ , $E_{pp}$ , $E_p$ , $I_p$ และ $I_{corr}$ จากจุดตัดระหว่างเส้นโค้งคาโทดิกและเส้นโค้งอโนดิก.....	69
5.12	ผลของธาตุแคลเซียมในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า $E_{corr}$ , $E_{pp}$ และ $E_p$ ในสารละลายไซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	70
5.13	ผลของธาตุซิลิคอนในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า $E_{corr}$ , $E_{pp}$ และ $E_p$ ในสารละลายไซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	71
5.14	ผลของทั้งธาตุแคลเซียมและซิลิคอนในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า $E_{corr}$ , $E_{pp}$ และ $E_p$ ในสารละลายไซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	71

## ภาพประกอบ

## หน้า

5.15	ผลของธาตุแคลเซียมและซิลิคอนในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า $I_p$ ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิมมัลด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส .....	72
5.16	ผลของการเติมทั้งธาตุแคลเซียมและซิลิคอนในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า $I_p$ ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิมมัลด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส .....	72
5.17	ผลของธาตุแคลเซียมและซิลิคอนในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่าอัตราการกัดกร่อน ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิมมัลด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส .....	73
5.18	ผลของการเติมทั้งธาตุแคลเซียมและซิลิคอนในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงต่อค่าอัตราการกัดกร่อนในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิมมัลด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส .....	73
ก1	ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แคลเซียม - ซิลิคอน ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสดงกำลังขยาย 500 เท่า .....	80
ข1	กราฟแสดงผลจากการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่มีแคลเซียมและซิลิคอนผสม ด้วย EDX .....	84
ข2	กราฟแสดงผลจากการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผสมแคลเซียม ด้วย EDX .....	85
ข3	กราฟแสดงผลจากการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิคอน ด้วย EDX .....	86
ข4	กราฟแสดงผลจากการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผสมแคลเซียมและซิลิคอน ด้วย EDX .....	87
ง1-1	เส้นโพลาไรเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่มีแคลเซียมและซิลิคอนผสม ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส .....	91
ง1-2	เส้นโพลาไรเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแคลเซียม 0.012 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส .....	91
ง1-3	เส้นโพลาไรเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแคลเซียม 0.025 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส .....	92

ง1-4	เส้นโพราไรเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแคลเซียม 0.063 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	92
ง1-5	เส้นโพราไรเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแคลเซียม 0.09 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	93
ง1-6	เส้นโพราไรเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณซิลิคอน 0.014 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใน สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	93
ง1-7	เส้นโพราไรเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณซิลิคอน 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	94
ง1-8	เส้นโพราไรเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณซิลิคอน 0.08 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	94
ง1-9	เส้นโพราไรเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณซิลิคอน 0.165 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	95
ง1-10	เส้นโพราไรเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแคลเซียม 0.015 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และซิลิคอน 0.060 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	95
ง1-11	เส้นโพราไรเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแคลเซียม 0.038 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และซิลิคอน 0.062 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	96
ง1-12	เส้นโพราไรเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแคลเซียม 0.102 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และซิลิคอน 0.068 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	96
ง2	ภาพแสดงชิ้นงานโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แคลเซียม - ซิลิคอน หลังการ ทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนโดยเทคนิคเคมีไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิมิตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	97
จ	รายงานผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แคลเซียม - ซิลิคอน ด้วยวิธีทดสอบ Inductively Coupled Plasma (ICP).....	98