

ผลของธาตุผสมซิลิคอนและแคลเซียมต่อการลดออกซิเจนในเงินสเตอร์ลิงหลอมเหลวในเตา
อินดักชันที่สภาวะบรรยากาศ



นาย พรหมมินทร์ เจริญยิ่ง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-831-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF SILICON AND CALCIUM ON DEOXIDATION OF STERLING SILVER
MELTS IN INDUCTION FURNACE IN AIR

Mr. Prommintr Charoenying

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

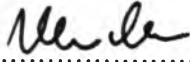
Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-333-831-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของธาตุผสมซิลิกอนและแคลเซียมต่อการลดออกซิเจนใน
เงินสเตอร์ลิงหลอมเหลวในเตาอินดักชันที่สภาวะบรรยากาศ
โดย นาย พรหมมินทร์ เจริญยิ่ง
ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรชัย สมศิริ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร

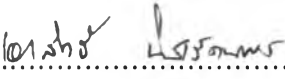
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยอนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรชัย สมศิริ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร)

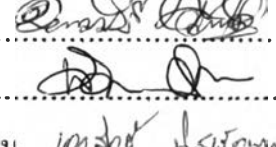

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชาคร จารุพิสิฐธร)

พรหมมินทร์ เจริญยิ่ง : ผลของธาตุผสมซิลิคอนและแคลเซียม ต่อการลดออกซิเจนในเงิน
เงินสเตอร์ลิงหลอมเหลวในเตาอินดัคชัน ที่สภาวะบรรยากาศ (EFFECTS OF SILICON
AND CALCIUM ON DEOXIDATION OF STERLING SILVER MELTS IN
INDUCTION FURNACE IN AIR) อ.ที่ปรึกษา: รศ.ดร. ฉัตรชัย สมศิริ ; อ.ที่ปรึกษาร่วม
: ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร ; 85 หน้า. ISBN 974-333-831-4

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการลดปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ภายในเงินสเตอร์ลิง
หลอมเหลว โดยเติมสารแคลเซียมซิลิไซด์ ($CaSi_2$) 0.1 - 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในเงินสเตอร์ลิง
ขณะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1100 °C ในสภาวะบรรยากาศปกติและทำการกวน 1 นาทีหลังการเติม
แคลเซียมซิลิไซด์ และทำการศึกษาผลของเวลาหลังการกวนด้วย นอกจากนี้ยังตรวจสอบส่วนผสมทาง
เคมี โครงสร้างจุลภาค ความต้านทานต่อการหมอง และความแข็งของชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่ผ่าน
การเติมแคลเซียมซิลิไซด์

การทดลองพบว่า เมื่อเติมแคลเซียมซิลิไซด์ 0.1 %, 0.3% และ 0.5% ที่เวลา 0 นาทีหลังการกวน
ระดับออกซิเจนในเงินสเตอร์ลิงจะลดลงประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ และจากนั้นระดับออกซิเจนจะเปลี่ยน
แปลงไปตามปริมาณการเติมและเวลาหลังการกวน โดยเมื่อเติม 0.1 % ออกซิเจนจะเพิ่มมากขึ้นที่เวลา 6
นาที และเมื่อเติมแคลเซียมซิลิไซด์ 0.3 % พบว่าระดับออกซิเจนมีแนวโน้มคงที่ในช่วงเวลา 0 - 14
นาที ส่วนการเติมแคลเซียมซิลิไซด์ 0.5 % ระดับออกซิเจนจะคงที่ในช่วงเวลา 0 - 9 นาที ซึ่งเป็นช่วง
เวลาที่ซิลิคอนและแคลเซียมลดลง และระดับออกซิเจนจะเพิ่มมากขึ้นหลังจากนั้น ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่
ปริมาณของซิลิคอนและแคลเซียมไม่เปลี่ยนแปลง การละลายของซิลิคอนหลังการเติมแคลเซียมซิลิไซด์
0.1 - 0.2 % จะมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของงานหล่อ โดยทำให้โครงสร้างยูเทคติกเปลี่ยนแปลงไปเป็น
สารละลายของแข็งที่มีลักษณะก้อนกลมมากขึ้นและรวมตัวเป็นกลุ่มที่มีขนาดเล็กกว่ายูเทคติก แต่กระจาย
ตัวอย่างสม่ำเสมอมากขึ้นในเนื้อพื้นทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณการเติมแคลเซียมซิลิไซด์มากขึ้น
เป็น 0.3 - 1.0 % จะเกิด Secondary Solid Solution ที่มีลักษณะรูปร่างเปลี่ยนแปลงจากรูปร่างกลมกลาย
เป็นยาวขึ้น มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งทำให้ความแข็งลดลง ผลการทดสอบการหมองพบว่า ปริมาณของซิลิคอน
ในงานหล่อที่ต่ำที่สุดที่ช่วยต้านทานต่อการหมองคือ 0.012 % โดยน้ำหนัก ส่วนปริมาณการเติมแคลเซียม
ซิลิไซด์และเวลาที่เหมาะสมต่อการเพิ่มความต้านทานการหมองของงานหล่อคือ 0.3 % $CaSi_2$ ที่เวลา 6
นาที และ 0.5 % $CaSi_2$ ที่เวลา 0 นาทีหลังการกวน

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม


3971163021 MAJOR : METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORDS : STERLING SILVER MELTS / DEOXIDATION / TARNISHING / CALCIUM SILICIDE / CASTING

PROMMINTR CHAROENYING : EFFECTS OF SILICON AND CALCIUM ON DEOXIDATION OF STERLING SILVER MELTS IN INDUCTION FURNACE IN AIR. THESIS ADVISER : ASSOC. PROF. CHATCHAI SOMSIRI, Ph.D. ; THESIS COADVISER : Dr. EKASIT NISARATANAPORN, 85 pp. ISBN 974-333-831-4.

Deoxidation of sterling silver melts by addition of calcium silicide 0.1 -1.0 % by weight at 1100 °C in air were investigated. After one minute of stirring, samples were taken for chemical analysis and oxygen content, microstructure analysis, hardness testing and tarnishing test of the cast.

The results showed that more than 90 percents of initial oxygen level was reduced at the end of stirring when treated with 0.1 %, 0.3 % and 0.5 % of calcium silicide after which the oxygen varied as weight percent of calcium silicide and time after stirring. When the melts were treated with 0.1 % the oxygen increased at time of 6 minutes and when treated with 0.3 % the oxygen was found that to be stabilized during 0 -14 minutes. When treated with 0.5 % of calcium silicide the oxygen was found that to be stabilized during 0 -9 minutes, while silicon and calcium decreased and after which the level of oxygen increased, while silicon and calcium also stabilized. Effect of silicon on microstructure of sterling casting after treated with 0.1 – 0.2 wt % of calcium silicide the secondary solid solution that disperse in the matrix changed from eutectic to smaller groups of spherical solid solution and more evenly distributed. The hardness of casting was found to be increased. When treated with 0.3 – 1.0 wt % of calcium silicide the secondary solid solution changed from spherical to longer and larger particle that decreased the hardness of the casting. Tarnishing test results indicated that the minimum level of silicon in casting which increased tarnishing resistance of casting was 0.012 wt %. Optimum conditions to improve the tarnishing resistance of the casting were attained when the melts were treated with 0.3 % at time of 6 minutes and 0.5 % of calcium silicide at time of 0 minute after stirring.

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิติต 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยความช่วยเหลือจากรองศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรชัย สมศิริ ที่ให้ความกรุณาต้อนรับเป็นที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ให้การปรึกษาปัญหางานวิจัยอย่างดีเสมอมา ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร ที่รับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยอย่างใกล้ชิด ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย ที่ให้ความกรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยภายในภาควิชาด้วยดีตลอดมา ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاعر จารุพิสิฐธร ที่ช่วยให้คำแนะนำแนวทางการทำงานวิจัย และรับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ พรทิวี พึ่งรัศมี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรณู หาญสืบสาย หัวหน้าภาควิชา และอาจารย์ประจำภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความอนุเคราะห์ให้ใช้สถานที่และเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ในการวัดค่าสีของชิ้นงาน ขอขอบคุณคุณรุ่งวิทย์ เต็มพิริยเวช ที่ให้ความเอื้อเฟื้อบริจาคเตาอินดักชันและให้บริการด้านอุปกรณ์ที่จำเป็น ขอขอบคุณคุณสมคิด ทองศิลาที่ให้ความช่วยเหลือแนะนำการทำอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย และคุณกัลยาณี ลิเส็งที่ให้ความช่วยเหลือด้านการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ขอขอบคุณคุณวิมา ขลังธรรมเนียม ที่ช่วยวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนในเงินสเตอร์ลิง ขอขอบคุณสาริษย์ นิสิตปริญญาโทที่ช่วยวิเคราะห์ผิวด้วย XPS ขอขอบคุณคุณอภิชัย ฤควิรุฬห์ เพื่อนผู้เรียนปริญญาเอกที่ช่วยจัดหาเอกสารงานวิจัยจากต่างประเทศ ขอขอบคุณครูศิริรัตน์ นิสารัตนพร คุณนิรมล ลพหกล้า และเจ้าหน้าที่หน้าภาควิชาที่ช่วยอำนวยความสะดวกด้านเงินทุนวิจัย ทุนการศึกษา และการใช้เครื่องมือและสถานที่ทำงานวิจัย

ผู้เขียนขอขอบคุณ สำนักงานส่งเสริมและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ได้สนับสนุนด้านทุนวิจัยตลอดจนทุนการศึกษาแก่ผู้เขียนจนกระทั่งงานสำเร็จด้วยดี

ขอขอบคุณคุณอาทิตย์ เจริญยิ่ง คุณแม่สุภิญญา และคุณมงคล สุรวฒินธรรมที่ทำให้กำลังใจและอำนวยความสะดวกในเรื่องเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับพิมพ์รายงานจนสำเร็จเรียบร้อย ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่ทำให้กำลังใจจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญรูป	ญ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
2. ปรีทรรศน์วรรณกรรม	6
2.1 เงินสเตอร์ลิง	6
2.2 การวัดออกซิเจนในโลหะหลอมเหลวด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี	8
2.3 การละลายของออกซิเจนและการเกิดออกไซด์	10
2.4 การลดก๊าซออกซิเจนในโลหะเงินผสม.....	17
2.5 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน-ทองแดง	22
2.6 ความต้านทานต่อการหมองของเงินผสม	23
3. กระบวนการดำเนินงานวิจัย	27
3.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	27
3.1.1 เตาหลอมอินดักชันและอุปกรณ์หล่อหลอมโลหะ	27
3.1.2 เครื่องมือวัดออกซิเจนในโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง.....	27
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	27

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.2 วัตถุประสงค์ที่ใช้.....	28
3.3 สารเคมี.....	28
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	29
3.4.1 กรรมวิธีการหลอมเพื่อวัดออกซิเจนในน้ำโลหะ.....	29
3.4.2 กรรมวิธีการหลอมเพื่อทดสอบคุณสมบัติอื่น ๆ	30
3.5 วิธีการตรวจวัดออกซิเจน การวิเคราะห์ชิ้นงานตัวอย่างและการทดสอบ คุณสมบัติของชิ้นงานหล่อ.....	30
3.5.1 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสม.....	30
3.5.2 วิธีการวัดออกซิเจนในโลหะหลอมเหลว.....	31
3.5.3 วิธีการวัดออกซิเจนด้วยวิธีใช้เครื่องวิเคราะห์ออกซิเจน	32
3.5.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	32
3.5.5 การทดสอบวัดความแข็ง	33
3.5.6 การทดสอบความต้านทานการหมอง	33
3.5.7 การวิเคราะห์ผิวด้วยเครื่องวิเคราะห์ผิววัสดุ	33
4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์	35
4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณซิริคอนและแคลเซียมในเงินสเตอร์ลิง	35
4.2 การวัดปริมาณออกซิเจนในเงินสเตอร์ลิง.....	38
4.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	41
4.4 ผลการทดสอบวัดความแข็ง	47
4.5 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการหมองของเงินผสม.....	49
5 อภิปราย และสรุปผลการทดลอง	60
6 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย	64
รายการอ้างอิง	66
ภาคผนวก	69
ประวัติผู้เขียน	86

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ข้อมูลสถิติการส่งออกอัญมณีและเครื่องประดับของประเทศไทย	7
2.2	ผลของอุณหภูมิและความดันต่อการละลายออกซิเจนในเงินหลอมเหลว	12
2.3	แสดงผลของความดันออกซิเจนต่อการละลายของออกซิเจนในโลหะเงินที่ 970 °C.....	13

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 (ก) โพรงก๊าซ (ข) โพรงจากการหดตัวของน้ำโลหะ	2
1.2 แผนภาพของ Ellingham แสดงค่า Gibb's Free Energy ของการเกิดออกไซด์ ของโลหะที่อุณหภูมิต่าง ๆ	4
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า cmf ที่วัดได้ด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีกับปริมาณออกซิเจน จากการคำนวณด้วยสมการ [1] ที่อุณหภูมิ 1100 และ 1200 °C	9
2.2 การละลายของออกซิเจนในโลหะเงินหลอมเหลวที่ 980 °C ที่เป็นฟังก์ชันของความดันออกซิเจน.....	10
2.3 เส้นแสดงการแปรเปลี่ยน ค่าคงที่สมดุล (K) ตามความดันของออกซิเจนและ อุณหภูมิ.....	10
2.4 แสดงผลการทดลองที่ 980 °C ไม่มีการกวนในสภาพบรรยากาศ 0 – 20 cm Hg	11
2.5 แผนภูมิสมดุลของระบบ Ag-O แสดงการละลายของออกซิเจนที่ความดัน ออกซิเจน 1 บรรยากาศ.....	12
2.6 การละลายของออกซิเจนในของแข็งทองแดงตามอุณหภูมิ	13
2.7 แผนภูมิสมดุล Cu-O.....	14
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนที่ถูกละลาย และเวลาที่สังเกตได้.....	14
2.9 แสดงการดูดออกซิเจนของโลหะผสม ในระบบ Ag-Cu ที่อุณหภูมิ 1150 °C.....	15
2.10 ผลของทองแดงต่อค่า Activity Interaction Coefficient ของออกซิเจนในระบบ Ag-Cu ที่ความดันออกซิเจน 9 mm-Hg	16
2.11 ผลของอุณหภูมิต่อค่า Coefficient ของออกซิเจนกับทองแดงในโลหะเงิน หลอมเหลว	16
2.12 การแปรเปลี่ยนค่า Activity coefficient ของออกซิเจน ตามสัดส่วนโดยอะตอมของ เงินในระบบโลหะผสม Ag-Cu-O.....	17
2.13 กราฟที่พลอตจาก Isoactivity lines ที่ 1030 °C ของระบบ Ag-Cu-O ที่ปริมาณ ทองแดงน้อย ๆ (silver- rich corner)	18
2.14 ผลของธาตุผสม(M% wt) ในระบบ Ag-M-O ต่อ การละลายของออกซิเจนในเงิน ที่ความดันออกซิเจน 1 atm	19

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.15	ผลของธาตุผสม(M wt%) ในระบบ Cu-M-O ต่อ ค่าคงที่สมดุล K_m ของระบบ..... 20
2.16	สมดุลของออกซิเจน และฟอสฟอรัสในทองแดงหลอมเหลวในสมดุลของ Copper Phosphate Slag..... 21
2.17	การเปลี่ยนแปลงค่า Activity Coefficient ของออกซิเจนในทองแดงตาม ปริมาณของฟอสฟอรัส..... 21
2.18	การเปลี่ยนแปลงค่า Activity Coefficient ของออกซิเจนในทองแดงตาม ปริมาณของออกซิเจน..... 21
2.19	การเปลี่ยนแปลงค่า Activity Coefficient ของออกซิเจนในทองแดงตาม ปริมาณของซิลิคอน..... 21
2.20	ก) แผนภูมิสมดุลเฟสของ โลหะผสมเงิน-ทองแดง..... 22 ข) โครงสร้างของ โลหะเงินผสมทองแดงที่สภาวะสมดุลส่วนผสม 10% Cu และ 28 % Cu..... 22
3.1	เตาอินดักชัน และอุปกรณ์พร้อมเครื่องระบายความร้อนแบบ ไทลเวียนภายใน..... 28
3.2	แผนภูมิกระบวนการทดลอง 34
4.1	กราฟแสดงปริมาณการละลายของธาตุซิลิคอน , แคลเซียมและออกซิเจน ในงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการเติมแคลเซียมซิลิไซด์ปริมาณต่างๆ และทำการหล่อ ณ เวลา 0 นาที หลังการกวน 35
4.2	กราฟแสดงปริมาณการละลายของธาตุซิลิคอน , แคลเซียมและออกซิเจน ในงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการเติมแคลเซียมซิลิไซด์ในปริมาณต่างๆ กันและทำการหล่อ ณ เวลา 6 นาทีหลังการกวน 36
4.3	กราฟแสดงการละลายของซิลิคอน ,แคลเซียมและออกซิเจนในงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่เติม 0.3 % แคลเซียมซิลิไซด์ที่ เวลาต่างๆหลังการกวน 37
4.4	กราฟแสดงการละลายของซิลิคอน,แคลเซียมและออกซิเจนในงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่เติม 0.5 % แคลเซียมซิลิไซด์ที่ เวลาต่างๆหลังการกวน 37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5	กราฟแสดงปริมาณออกซิเจนที่ละลายในเงินสเตอร์ลิงที่ไม่เติมแคลเซียมซิลิไซด์จากการชักตัวอย่าง (สภาพของแข็ง) และการวัดค่า Emf (ในสภาพของเหลว) ที่เวลาต่าง ๆ นับตั้งแต่อุณหภูมิเริ่มคงที่ 1100 C 39
4.6	ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในงานหล่อเงินสเตอร์ลิงในสภาพงานหล่อหลังจากที่ผ่านการ เติมแคลเซียมซิลิไซด์ 0.1,0.3,0.5 wt% ที่เวลาต่าง ๆ หลังการกวน 39
4.7	ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในเงินสเตอร์ลิงที่เวลาการหลอมต่าง ๆ ของการเติม 0.5 %CaSi ₂ จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีชักตัวอย่างเปรียบเทียบกับ การวัดค่า Emf 40
4.8	โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากการเติมแคลเซียมซิลิไซด์ใน ปริมาณต่างกัน เมื่อใช้เวลา 0 นาทีหลังการกวน เวลา 0 นาที (0.018 % Si)..... 42
4.9	โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่ได้ภายหลังจากการเติมแคลเซียม- ซิลิไซด์ 0.3% ที่เวลาต่างๆ หลังการกวน..... 44
4.10	โครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากการเติมแคลเซียมซิลิไซด์ 0.5 % ที่เวลาต่าง ๆ หลังการกวน 45
4.11	พิกของธาตุผสมที่ละลายใน โครงสร้างที่เกิดขึ้นของเงินสเตอร์ลิงที่ไม่เติม และเติม แคลเซียมซิลิไซด์ ปริมาณต่าง ๆ กันและทำการหล่อที่เวลา 0 นาที หลังการกวน..... 46
4.12	กราฟแสดงค่าความแข็งของงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่เปลี่ยนไปตามปริมาณการเติม แคลเซียมซิลิไซด์ปริมาณ 0.1 – 1.0 % 47
4.13	กราฟแสดงค่าความแข็งที่เปลี่ยนไปตามเวลาการหลอมของเงินสเตอร์ลิงที่เติมด้วย 0.3 % และ 0.5 % แคลเซียมซิลิไซด์ 48
4.14	(ก) ชิ้นงานหรือเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการเติมแคลเซียมซิลิไซด์ 0.3 % ที่เวลา 0, 3, 6, 9, 14นาที หลังการกวน ตามลำดับจากซ้ายไปขวา 50
4.14	(ข) ชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการเติมแคลเซียมซิลิไซด์ 0.5 % ที่เวลา 3, 6, 9, 14 นาที หลังการกวน 50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 (ค) ชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่เติมแคลเซียมซิลิไซด์ 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 และ 1.0 % ที่เวลาหลังการกวน 0 นาที เรียงจากด้านบนลงด้านล่าง	51
4.14 (ง) ชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่เติมแคลเซียมซิลิไซด์ 0.1, 0.2, 0.5, 0.75 และ 1.0 % ที่เวลา 6 นาที เรียงจากด้านซ้ายมือมายังขวามือ	51
4.15 พิกซ์ของธาตุที่พบบนผิวของชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่ทำการหล่อ ณ เวลา 0 นาที หลังการกวน และผ่านการเติมแคลเซียมซิลิไซด์ 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 และ 1.0 % โดยน้ำหนัก เรียงลำดับจากบนลงล่าง	52
4.16 พิกซ์ของซัลเฟอร์ที่วิเคราะห์พบบนผิวที่ทำการเตรียม โดยการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 แล้วทำการทดสอบการหมองในบรรยากาศที่มีซัลเฟอร์เข้มข้นสูง	53
4.17 พิกซ์ของออกซิเจนที่วิเคราะห์พบบนผิวชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการเติมแคลเซียมซิลิไซด์ปริมาณที่ต่างๆ กันและทำการเตรียมด้วยการขัดกระดาษทรายเบอร์ 600ก่อนทำการทดสอบการหมอง.....	54
4.18 ภาพถ่ายชิ้นงานที่เติมแคลเซียมซิลิไซด์ปริมาณ 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0 % ที่ผ่านการทดสอบการหมองโดยใช้เวลาทดสอบ 0.5-3 ชั่วโมง เตรียมผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 (เวลา 0 นาทีหลังการกวน.....	55
4.19 ผลการวัดค่าสีของชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่ทำการเติม CaSi ₂ ปริมาณต่างๆ กัน และทำการหล่อ ณ เวลา 0 นาทีหลังการกวนผ่านการทดสอบการหมองจากการเตรียมผิวด้วยการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 แล้วทำการทดสอบการหมองในบรรยากาศที่มีซัลไฟด์เข้มข้นสูงเหนือสารละลายโซเดียมซัลเฟต.....	56
4.20 ภาพถ่ายหลังการทดสอบการหมองโดยใช้เวลาทดสอบ 0.5 - 2 ชั่วโมง ของชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการเติม 0.3 % แคลเซียมซิลิไซด์ และทำการหล่อ ณ เวลา ต่างๆ หลังการกวน.....	57
4.21 ผลการคำนวณค่าสีที่เปลี่ยนแปลงหลังการทดสอบการหมองของชิ้นงานหล่อเงิน สเตอร์ลิงที่ผ่านการเติมแคลเซียมซิลิไซด์ 0.3 % หลังทำการหล่อ ณ เวลา ต่างๆ หลังการกวน	57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22	ผลการคำนวณค่าความสว่างที่ลดลงหลังทดสอบการหมองของชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการเดิมแคลเซียมซัลไฟด์ 0.3 % หลังทำการหล่อ ณ เวลาต่างๆ หลังการกวน 58
4.23	แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของสีที่วัดได้หลังการทดสอบการหมองของชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่ทำการเดิมแคลเซียมซัลไฟด์ 0.5 % และทำการหล่อ ณ เวลาต่างๆ หลังการกวน(เตรียม โดยการฉีดกระดาศทรายเบอร์ 600 เวลาทดสอบ 0.5, 1, 2 ชั่วโมง) 59
4.24	แสดงค่าสีที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณซิลิคอนหลังการทดสอบการหมองของชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่ทำการเดิมแคลเซียมซัลไฟด์ที่สภาวะต่างกัน (เตรียม โดยการฉีดกระดาศทรายเบอร์ 600 เวลาทดสอบ 0.5, 1, 2 ชั่วโมง) 59
5.1	กราฟแสดงปริมาณซิลิคอนที่ใช้เดิม เปรียบเทียบกับซิลิคอนที่ละลายในเนื้อโลหะ และปริมาณที่เกิดการสูญเสียไปในระหว่างทำการหลอมที่เวลา 0 นาที หลังการกวน 61
5.2	กราฟแสดงปริมาณแคลเซียมที่ใช้เดิม เปรียบเทียบกับแคลเซียมที่ละลายในเนื้อโลหะ และปริมาณที่ เกิดการสูญเสียไปในระหว่างทำการหลอมที่เวลา 0 นาที หลังการกวน..... 61
5.3	กราฟแสดงปริมาณซิลิคอนที่ใช้เดิม เปรียบเทียบกับซิลิคอนที่ละลายในเนื้อโลหะ และปริมาณที่เกิดการสูญเสียไปในระหว่างทำการหลอมที่เวลา 6 นาที หลังการกวน 62
5.4	กราฟแสดงปริมาณแคลเซียมที่ใช้เดิม เปรียบเทียบกับแคลเซียมที่ละลายในเนื้อโลหะ และปริมาณที่ เกิดการสูญเสียไปในระหว่างทำการหลอมที่เวลา 6 นาที หลังการกวน 62