

ผลของอินดิยมต่อสมบัติทางกลและความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิกอน



นายเจษฎา จอกแก้ว

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

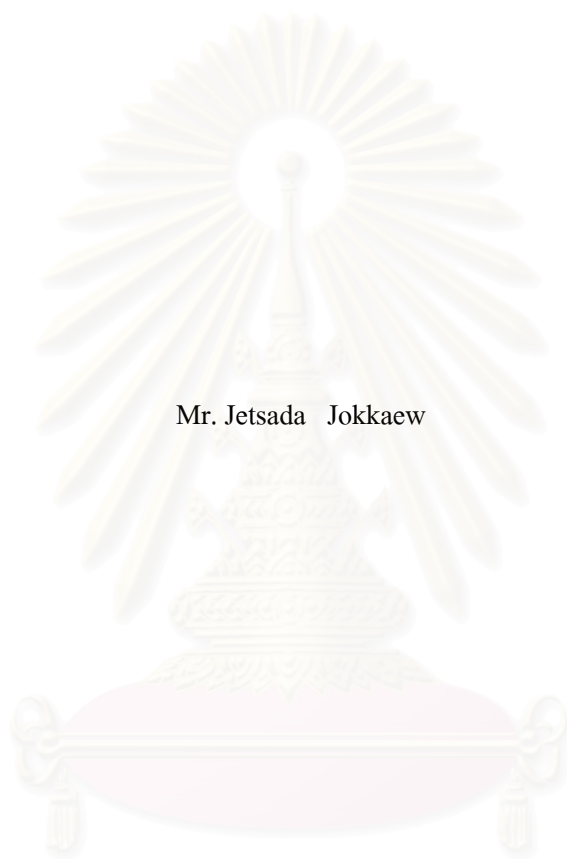
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1212-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF INDIUM ON MECHANICAL PROPERTIES AND TARNISH RESISTANCE OF
SILICON ADDED STERLING SILVER



Mr. Jetsada Jokkaew

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 2001

ISBN 974-03-1212-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของอินเดียมต่อสมบัติทางกล และความต้านทานการหมอง
ของเงินสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิกอน

โดย นาย เกษฎา จอกแก้ว

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร. นัทรชัย สมศิริ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยอนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

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

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. นัทรชัย สมศิริ)

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

เจษฎา จอกแก้ว : ผลของอินเดียมต่อสมบัติทางกล และความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิกอน. (EFFECT OF INDIUM ON MECHANICAL PROPERTIES AND TARNISH RESISTANCE OF SILICON ADDED STERLING SILVER) อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ดร. ฉัตรชัย สมศิริ, 81 หน้า. ISBN 974-03-1212-8.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกล อันได้แก่ความแข็ง, ความต้านทานแรงดึง และความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิงที่มีอินเดียมและซิลิกอนผสมอยู่ในปริมาณแตกต่างกัน โดยทำการเติมอินเดียม และซิลิกอนที่อยู่ในรูปของโลหะผสมทองแดง-ซิลิกอน ซึ่งปรากฏซิลิกอน และอินเดียมเหลืออยู่ในชุดตัวอย่าง 0 - 0.11 % และ 0 - 2.13 % โดยน้ำหนักตามลำดับ โดยทำการหลอมเงินสเตอร์ลิงที่อุณหภูมิ 1373 K ในสภาวะบรรยากาศที่มีก๊าซอาร์กอนคลุมผิวหน้าโลหะอยู่ จากนั้นตัวอย่างที่ได้จึงได้รับการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี, โครงสร้างจุลภาค, สมบัติทางกลและทำการทดสอบการหมองโดยแขวนชิ้นงานไว้ในภาชนะปิดที่มีสารละลายอิมตัวของโซเดียมซัลไฟด์ แล้วนำมาตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสีโดยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

การทดลองพบว่าในเงินสเตอร์ลิงที่มีการผสมเฉพาะอินเดียม (ระหว่าง 1.03 - 2.09 % โดยน้ำหนัก) ไม่ทำให้เงินสเตอร์ลิงมีความต้านทานการหมองสูงขึ้น และยังทำให้ความแข็งและความต้านทานแรงดึงของเงินสเตอร์ลิงลดลงจากการที่ได้ลดสัดส่วนของทองแดงลงโดยเติมอินเดียมลงไปแทนที่ในชุดตัวอย่าง นอกจากนี้ยังพบลักษณะของโครงสร้างที่สองมีการกระจายตัวอยู่ทั่วไปในเนื้อพื้น โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของอินเดียมที่ผสมลงไป แต่สำหรับเงินสเตอร์ลิงที่มีการผสมทั้งซิลิกอนและอินเดียม โดยมีปริมาณซิลิกอนเหลืออยู่ในชุดตัวอย่างระหว่าง 0.09 - 0.11 % และมีอินเดียมผสมอยู่ในปริมาณ 0.53, 1.09, 1.60 และ 2.13 % โดยน้ำหนัก พบว่าเงินสเตอร์ลิงมีความสามารถในการต้านทานการหมองสูงขึ้นตามปริมาณอินเดียมที่ผสมลงไป โดยสูงขึ้น 33 - 40 % เมื่อเทียบกับเงินสเตอร์ลิงธรรมดา (92.5 % สเตอร์ลิง) และสูงขึ้น 31.84 - 38.65 % เมื่อเทียบกับเงินสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิกอน (ซิลิกอน 0.09 - 0.11%) ซึ่งจากการตรวจสอบปริมาณส่วนผสมในโครงสร้างจุลภาคพบอินเดียมและซิลิกอนผสมอยู่ทั้งในเนื้อพื้นและในโครงสร้างที่สองโดยขึ้นอยู่กับปริมาณอินเดียมและซิลิกอนที่เติมลงไป

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา...วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา... 2544.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4170266321 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORDS : INDIUM / TARNISH RESISTANCE / SILICON / STERLING SILVER

JETSADA JOKKAEW : EFFECT OF INDIUM ON MECHANICAL PROPERTIES AND TARNISH RESISTANCE OF SILICON ADDED STERLING SILVER. THESIS ADVISOR : EKASIT NISARATANAPORN, Ph.D., THESIS COADVISOR : ASSOC. PROF. CHATCHAI SOMSIRI, Ph.D., 81 pp. ISBN 974-03-1212-8.

The object of this experiment was to study mechanical properties for instance hardness and tensile strength, and tarnish resistance of sterling silver having 0 to 0.11 % silicon by weight (as from copper – silicon alloy) and 0 to 2.13% indium by weight. The sterling silver melts were prepared in air and argon at 1373 K. The samples were taken for chemical analyses, microstructure, mechanical properties and tarnish resistance testing. The tarnish resistance test were carried out by hanging the samples on a closed chamber containing saturated aqueous of sodium sulfide. The discoloration was evaluated by spectrophotometer.

The results showed that effects of indium added sterling (1.03 – 2.09 % indium) in improving tarnish resistance was not noticeable. In addition, the alloy exhibited lower tensile stress and hardness due to lower copper content. The secondary structure was found to increase in volume and was well dispersed as more indium was added. For sterling silver having silicon 0.09 - 0.11% by weight and indium 0.53, 1.09, 1.60 and 2.13 %, the tarnish resistance of these alloy was found to increase as the amount of indium increased. The tarnish resistance was found to increase 33 – 40 % compared with the common sterling silver (92.50 % sterling silver) and 31.84 – 38.65 % compared with the silicon added sterling silver (0.09 – 0.11 % silicon). EDX revealed that both indium and silicon presented in both the matrix and the secondary structure.

Department.....Metallurgical Engineering..... Student's signature.....

Field of study...Metallurgical Engineering.....Advisor's signature.....

Academic year....2001.....Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจาก อาจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร ที่ให้ความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ให้คำปรึกษาปัญหาในการทำงานวิจัยอย่างใกล้ชิด ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรชัย สมศิริ ที่รับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และอำนวยความสะดวกในด้านจัดสรรทุนสนับสนุนงานวิจัยตลอดมา ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย ที่ให้ความกรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชากร จารพิสิฐธร หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโลหการ ที่ให้ความกรุณาให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยภายในภาควิชาด้วยดีตลอดมา และขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุมาลี วงศ์จันทร์ ที่รับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ พรทวี พึ่งรัมย์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรณู หาญสืบสาย หัวหน้าภาควิชา และอาจารย์ประจำภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่าย และเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความอนุเคราะห์ให้ใช้สถานที่ และเครื่องมือสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ในการวัดค่าสีของชิ้นงาน ขอขอบคุณ คุณเสนีย์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการหล่อเงินสเตอร์ลิง และให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์เครื่องมือต่างๆใน Work Shop ขอขอบคุณเพื่อนๆนิสิตปริญญาโทในภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกๆท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการให้ความรู้ในการเตรียมผิวชิ้นงานตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ และแหล่งค้นคว้าข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัย และขอขอบพระคุณ อาจารย์ ศศิรัตน์ นิสารัตนพร ที่ช่วยอำนวยความสะดวกด้านเงินวิจัย ทุนการศึกษา การใช้เครื่องมือ และสถานที่ทำงานวิจัย

ผู้เขียนขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้สนับสนุนด้านทุนวิจัยแก่ผู้เขียนจนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จด้วยดี และท้ายสุดขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่ให้กำลังใจจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

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..... | 4 |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย..... | 4 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 4 |
| 2. ปริทรรศน์วรรณกรรม..... | 5 |
| 2.1 ความเป็นมาของโลหะเงินและเงินสเตอร์ลิง..... | 5 |
| 2.2 ประโยชน์ของโลหะเงิน..... | 6 |
| 2.3 สมบัติทางกายภาพของโลหะเงิน และโลหะที่ผสมในเงินสเตอร์ลิง..... | 7 |
| 2.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน-ทองแดง..... | 7 |
| 2.5 ความต้านทานการหมองของโลหะเงินผสม..... | 9 |
| 2.6 อินเดียมกับสมบัติการต้านทานการหมองในเงินสเตอร์ลิง..... | 11 |
| 2.7 อินเดียมกับสมบัติทางกลในเงินสเตอร์ลิงผสม..... | 14 |
| 3. ระเบียบวิธีการวิจัย..... | 17 |
| 3.1 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย..... | 17 |
| 3.1.1 เตาหลอมอินดักชั่น และอุปกรณ์หล่อหลอมโลหะ..... | 17 |
| 3.1.2 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ผลการทดลอง..... | 17 |
| 3.2 วัตถุดิบ..... | 17 |
| 3.3 สารเคมี..... | 18 |
| 3.4 ขั้นตอนการทดลอง..... | 18 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|-------|--|----|
| 3.5 | ระเบียบและวิธีการตรวจสอบวิเคราะห์ผล..... | 20 |
| 3.5.1 | การตรวจสอบค่าส่วนผสมทางเคมี..... | 20 |
| 3.5.2 | การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค..... | 21 |
| 3.5.3 | การตรวจวัดค่าความแข็ง..... | 21 |
| 3.5.4 | การตรวจหาจุดหลอมเหลวจากเครื่อง DTA | 21 |
| 3.5.5 | การทดสอบการต้านทานการหมอง..... | 22 |
| 3.5.6 | การทดสอบแรงดึง..... | 22 |
| 4. | รายงานผลการทดลอง..... | 23 |
| 4.1 | ส่วนผสมทางเคมีของเงินสเตอร์ลิงผสมภายหลังจากการหลอมเหลว และช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว..... | 23 |
| 4.2 | ผลสมบัติทางกล..... | 24 |
| 4.2.1 | ผลการทดสอบความแข็ง..... | 25 |
| 4.2.2 | ผลการทดสอบแรงดึง..... | 25 |
| 4.3 | ผลการทดสอบการต้านทานการหมอง..... | 26 |
| 5. | อภิปรายและสรุปผลการทดลอง..... | 27 |
| | อภิปรายผลการทดลอง..... | 27 |
| 5.1 | ส่วนผสมทางเคมี..... | 27 |
| 5.2 | ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว..... | 27 |
| 5.3 | ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค..... | 29 |
| 5.4 | ผลการตรวจสอบขนาดของเดนไดรท์..... | 36 |
| 5.5 | ด้านสมบัติทางกล..... | 36 |
| 5.6 | ผลการทดสอบความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิงผสม..... | 43 |
| 5.7 | การตรวจสอบสมบัติต่างๆของชุดผสมที่หล่อในเตาสู่ญญาภาศ..... | 46 |
| | สรุปผลการทดลอง..... | 47 |
| 6. | วิจารณ์การทดลอง และข้อเสนอแนะ..... | 49 |
| 6.1 | วิจารณ์การทดลอง..... | 49 |
| 6.2 | ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย..... | 50 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|----------------------|------|
| รายการอ้างอิง..... | 51 |
| ภาคผนวก..... | 53 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 81 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 สมบัติทางกายภาพของโลหะที่ผสมอยู่ในเงินสเตอร์ลิง..... | 7 |
| 2.2 อิทธิพลของธาตุผสมที่ใช้เติมในโลหะผสมของเงิน ในการทดลองของ Harigaya..... | 11 |
| 2.3 ค่าพลังงานอิสระของการเกิดปฏิกิริยา Oxidation และ Sulphidation ของธาตุต่างๆ..... | 13 |
| 2.4 ค่าพลังงานอิสระของธาตุต่าง ๆ ในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน..... | 14 |
| 3.1 ค่าความบริสุทธิ์ของวัสดุดิบ..... | 18 |
| 3.2 แสดงส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่ใช้ในการทดลอง..... | 19 |
| 3.3 วิธีการวิเคราะห์ธาตุที่ได้จากการหล่อ..... | 20 |
| 4.1 แสดงผลของส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงและช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว..... | 23 |
| 4.2 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นตัวอย่างก่อนและหลังการหล่อ..... | 24 |
| 4.3 ผลการทดสอบความแข็งของเงินสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิกอนและอินเดียม ในปริมาณแตกต่างกัน..... | 25 |
| 4.4 ผลการทดสอบค่าแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของเงินสเตอร์ลิง แต่ละชุดส่วนผสม..... | 25 |
| 4.5 แสดงค่าความเปลี่ยนแปลงของดี (DE) ของเงินสเตอร์ลิงในแต่ละ ชุดส่วนผสม | 26 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 แผนภาพของ Ellingham แสดงค่า Gibb' Free Energy ของการเกิดออกไซด์ของโลหะที่อุณหภูมิต่าง ๆ..... | 3 |
| 2.1 แผนภูมิสมมูลเฟสของโลหะผสม เงิน-ทองแดง..... | 8 |
| 2.2 โครงสร้างที่ได้จากการหล่อของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ส่วนผสม 92.5%wt.Ag-7.5%wt.Cu..... | 9 |
| 2.3 กราฟระหว่าง UTS. กับ %Reduction in Area เนื่องจาก Cold Work ของเงินสเตอร์ลิงที่ผสม Ge, B เปรียบเทียบกับเงินสเตอร์ลิงมาตรฐาน..... | 15 |
| 2.4 กราฟระหว่าง ค่าความแข็ง (VPH) กับ %Reduction in area เนื่องจาก Cold Work ของเงินสเตอร์ลิงที่ผสม Ge,B เปรียบเทียบกับเงินสเตอร์ลิงมาตรฐาน..... | 15 |
| 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $C^{1/2}$ กับ $\Delta\tau$ ใน Cu-alloy ที่ Solute atom ต่างๆกัน..... | 16 |
| 3.1 เตาอินดักชั่น และอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการหล่อเงินสเตอร์ลิง..... | 18 |
| 3.2 แสดงขั้นตอนทดสอบแรงดึง..... | 22 |
| 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอินเดียมกับช่วงอุณหภูมิ หลอมเหลวสำหรับชุดส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่ไม่มี ซิลิคอนผสมอยู่ | 28 |
| 5.2 ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่มีสัดส่วนของธาตุผสมแตกต่างกันที่กำลังขยายต่าง ๆ..... | 33 |
| 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอินเดียมกับค่าความแข็ง สำหรับชุดส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ผสมซิลิคอน | 36 |
| 5.4 ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณอินเดียมแตกต่างกัน..... | 38 |
| 5.5 ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณซิลิคอนใกล้เคียงกัน (0.09-0.11%wt.) แต่มีปริมาณอินเดียมแตกต่างกัน(0-2.13 %wt.)..... | 39 |
| 5.6 กราฟแสดงค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณซิลิคอนใกล้เคียงกัน (0.09-0.11%wt) กับปริมาณของอินเดียมที่ผสมลงไประหว่าง 0-2.13 %wt..... | 40 |
| 5.7 กราฟแสดงค่า Ultimate Tensile Strength และ Yield Strength ของเงินสเตอร์ลิงที่เติมอินเดียมในปริมาณแตกต่างกันได้แก่ 0,1.09 และ2.0 %wt)..... | 41 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 5.8 กราฟแสดงค่าUltimate Tensile Strength และYield Strength ของเงินสเตอร์ลิงที่มีซิลิกอนผสมอยู่ใกล้เคียงกัน(0.09-0.11%wt.) โดยมีปริมาณอินเดียมที่ผสมอยู่แตกต่างกัน ได้แก่ 0.53, 1.09,1.60, 2.13 %wt | 42 |
| 5.9 ภาพถ่ายแสดงสีผิวชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่เติมอินเดียม 0, 1 และ2 %wt. (มีอยู่ในชิ้นงานจริง 0, 1.03 และ 2.09%wt.) โดยใช้เวลาทดสอบ 1, 2, 3 และ4 ชม.. | 43 |
| 5.10 กราฟแสดงผลการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงของสี (DE) ของชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิง ที่มีการผสมอินเดียม 0, 1.03 และ2 .09 %wt. โดยใช้เวลาทดสอบ 1, 2, 3 และ4 ชั่วโมง..... | 44 |
| 5.11 ภาพถ่ายแสดงสีผิวชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณของซิลิกอนใกล้เคียงกัน(0.09-0.11%wt) แต่มีปริมาณของอินเดียมแตกต่างกันคือ 0, 0.5, 1.0, 1.5 และ2.0%wt (มีอยู่ในชิ้นงานจริง 0, 0.53, 1.03, 1.60 และ 2.13%wt.) โดยใช้เวลาทดสอบ 1, 2, 3 และ4 ชั่วโมง..... | 45 |
| 5.12 กราฟแสดงผลการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงของสี (DE) ของชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณซิลิกอนใกล้เคียงกัน (0.09-0.11%wt.) แต่มีปริมาณของอินเดียมแตกต่างกันคือ 0, 0.53, 1.09, 1.60 และ2.13%wt. โดยใช้เวลาทดสอบ 1, 2, 3 และ4 ชั่วโมง..... | 46 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

เงินสเตอร์ลิงเป็นโลหะเงินผสมที่มีส่วนผสมทางเคมีของธาตุเงินอย่างน้อยที่สุด 92.5% และธาตุอื่นในปริมาณที่เหลือคือ 7.5% เนื่องจากโลหะเงินบริสุทธิ์มีความแข็งต่ำ ความเหนียวสูง จึงไม่เหมาะที่จะนำมาเป็นเครื่องประดับหรือเครื่องใช้ ดังนั้นจึงนิยมใช้เงินสเตอร์ลิงซึ่งมีความแข็งแรงและง่ายต่อการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากธาตุต่างๆ ที่นำมาผสมกับโลหะเงิน เช่น ธาตุนิเกิล คีบิก สังกะสี ทองแดง เป็นต้น โดยธาตุที่นิยมนำมาใช้ผสมมากคือ ทองแดง ซึ่งเป็นโลหะที่สามารถผสมเข้ากันได้ดีกับเงินทำให้โลหะผสมมีความแข็งแรงสูงขึ้น และทองแดงยังมีราคาไม่สูง แต่ทองแดงจะมีปัญหาที่ถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย กลายเป็นคอปเปอร์ออกไซด์ที่ทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์หมองคล้ำลง โดยคอปเปอร์ออกไซด์แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ คิวปรัสออกไซด์ (Cuprous Oxide, Cu_2O) และคิวพริกออกไซด์ (Cupric Oxide, CuO)

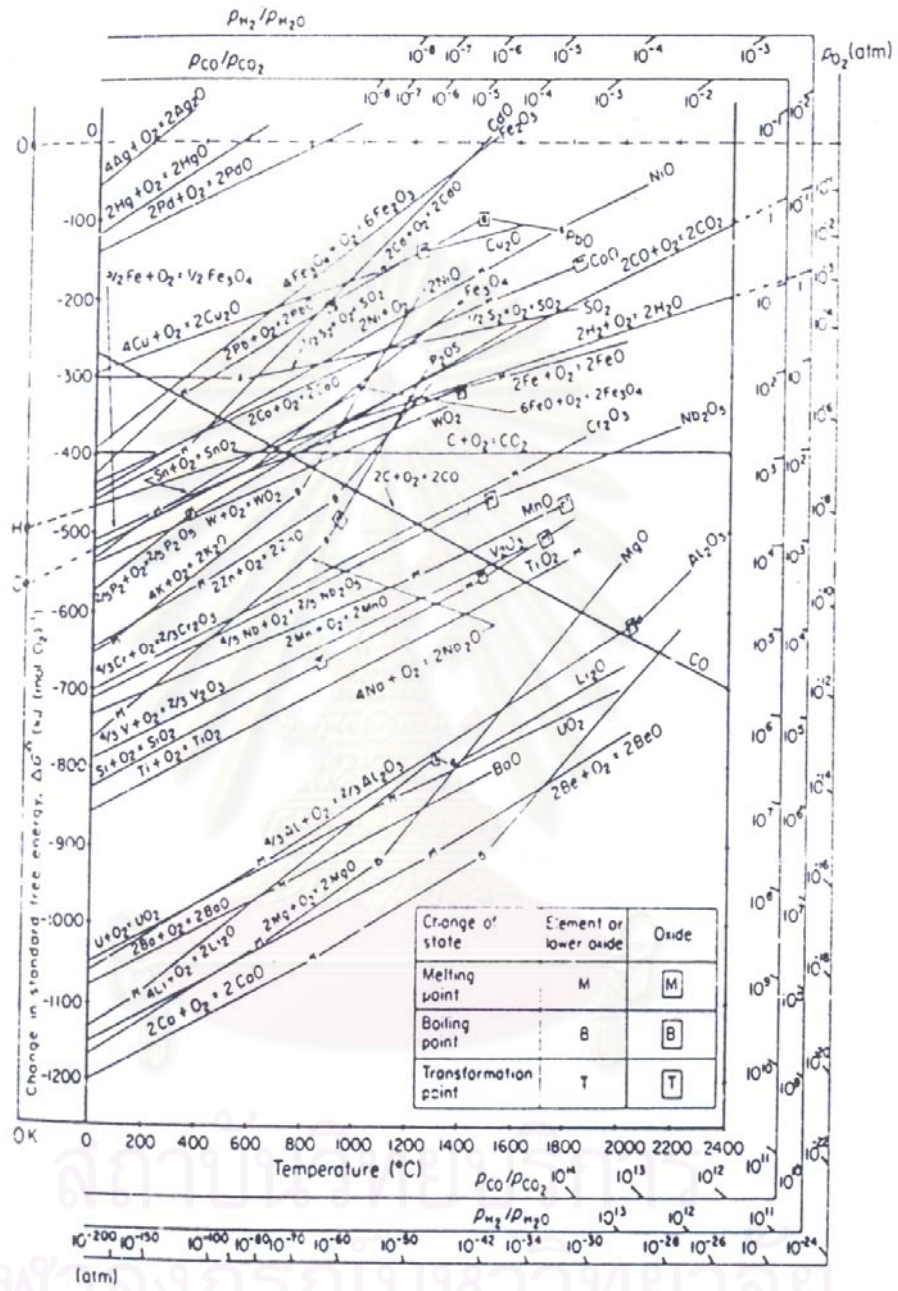
Cuprous Oxide จะมีสีออกแดงอ่อนหรือสีชมพู และเมื่อส่องดูด้วยแสงที่ผ่าน โพรไอลเซอร์ก็จะเห็นเป็นสีแดงเข้ม

Cupric Oxide จะมีสีออกน้ำตาล และเกิดเมื่อออกซิเจนมีปริมาณเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับ Cuprous Oxide ออกไซด์ชนิดนี้จะมีคุณสมบัติสูง ในขณะที่ Cuprous Oxide สามารถถูกรีดิวซ์กลายเป็นโลหะทองแดงได้โดยใช้คาร์บอนหรือไฮโดรเจน ในทางตรงกันข้าม Cuprous Oxide จะถูกออกซิไดซ์กลายเป็น Cupric Oxide ในบรรยากาศแบบ ออกซิไดซ์

มลทินของคอปเปอร์ออกไซด์เหล่านี้จะเกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ และจะก่อให้เกิดปัญหาอย่างมากเมื่อมลทินเหล่านี้อยู่ใกล้ผิวงาน ซึ่งเป็นจุดที่เห็นได้ชัดหลังการขัดละเอียด นอกจากนี้ยังพบชั้นบางๆ ของคอปเปอร์ออกไซด์ ในบางกรณีที่มีรูพรุนเนื่องจากการหดตัว (Shrinkage Porosity) ซึ่งสามารถเห็นได้ที่ผิวหลังการขัดละเอียดเป็นจุดสีเทาๆ ซึ่งจุดเหล่านี้ปกติจะอยู่ลึกเกินกว่าที่สามารถขัดออกไปได้ ในบางกรณีเมื่อเงินสเตอร์ลิงหลอมเหลวไม่ได้ทำการป้องกันการเกิดออกไซด์ไว้ เช่นหลอมในสภาวะบรรยากาศ ,ระยะเวลาหลอมนานเกินไป หรือให้ความร้อนสูงเกินไป (Overheat) การเกิด คอปเปอร์ออกไซด์ จะเกิดอย่างรุนแรง จนกระทั่งผิวของโลหะเงินหลอมเหลว กลายเป็นผิวเหนียวเกาะแน่น (Tenacious Skin) และผิวคอปเปอร์ออกไซด์นี้จะลดความสามารถในการไหลของโลหะ (Fluidity) นั่นคือก่อให้เกิดความคลาเยียดต่างๆ ในงานหล่อเสียไป หรือทำให้น้ำโลหะไหลไม่เต็มแบบหล่อได้

การป้องกันปัญหาการเกิดคอปเปอร์ออกไซด์และการละลายของออกซิเจนซึ่งทำให้เกิดความพรุนในระหว่างการหล่อขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ สามารถดำเนินการได้โดยการป้องกันไม่ให้ น้ำโลหะสัมผัสกับบรรยากาศที่มีออกซิเจน โดยใช้กรรมวิธีการหลอมโลหะในระบบสุญญากาศ หรือทำการหลอมโลหะในบรรยากาศที่คลุมผิวด้วยก๊าซเฉื่อย หรือใช้เปลวไฟแบบรีดิวซิ่ง (Reducing Flame) คลุมผิวทันทีที่เทลงในแบบ ซึ่งแม้ว่าจะได้ผลดีทั้ง 3 วิธี แต่มีข้อจำกัดต่างกันคือ การหลอมในระบบสุญญากาศต้องลงทุนสูงมาก เพราะใช้เทคโนโลยีขั้นสูง ส่วนการหลอมในบรรยากาศที่มีก๊าซเฉื่อยนั้นอาจป้องกันได้ไม่สมบูรณ์นัก นอกจากนี้ยังได้มีการลดก๊าซออกซิเจน (Degassing) โดยการเติมธาตุผสมบางอย่างลงในโลหะหลอมเหลวเพื่อทำหน้าที่รวมตัวกับออกซิเจน แล้วสามารถลอยตัวออกจากน้ำโลหะได้ดี ซึ่งง่ายต่อการปฏิบัติ และน่าสนใจสำหรับการศึกษาวิจัย โดยเมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการเกิดออกไซด์ของธาตุที่น่าจะไล่ก๊าซได้จากแผนภูมิของ Ellingham ดังรูปที่ 1.1 นั้นจะเห็นว่าธาตุที่สามารถรวมตัวกับออกซิเจนได้ดีกว่าทองแดงและเงินมีหลายชนิด เช่นธาตุแมกนีเซียม อลูมิเนียม แมงกานีส ซิลิคอนฯ ซึ่งมีความสามารถในการเกิดออกไซด์ได้สูงมาก และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับกรรมวิธีการไล่ก๊าซออกจากโลหะผสมชนิดอื่น เช่นในการผลิตเหล็กนิยมนิยมเติมธาตุซิลิคอนที่อยู่ในรูปของเฟอร์โรซิลิคอนซึ่งได้ผลดี ดังนั้นด้วยเหตุผลเดียวกันนี้ ซิลิคอนน่าจะเป็นตัวไล่ก๊าซออกซิเจนได้ในโลหะเงินสเตอร์ลิง และควรอยู่ในรูปของสารประกอบซิลิไซด์มากกว่า เพราะธาตุซิลิคอนบริสุทธิ์มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าเงินสเตอร์ลิงทำให้ยากต่อการหลอมเข้าด้วยกัน

จากปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งของเงินสเตอร์ลิงที่ผสมทองแดง คือผิวของผลิตภัณฑ์จะหมองง่ายโดยเฉพาะเมื่อสัมผัสกับบรรยากาศที่มีซัลไฟด์สูง ดังนั้นในการแก้ไขที่ผ่านมา ผู้ผลิตเครื่องประดับมักจะแก้ปัญหาด้วยการใช้กรรมวิธีการชุบผิวโลหะเงินด้วยทอง แพลตตินัม หรือชุบน้ำยากันหมอง นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยหลายท่านได้พยายามผสมโลหะเงินสเตอร์ลิงกับธาตุผสมต่างๆ เพื่อให้ได้เงินสเตอร์ลิงที่มีคุณสมบัติทนต่อการหมองคล้ำ (Tarnishing Resistance Sterling) ได้ดี เช่นในงานวิจัยของ Hiroshi Harigaya กับ Kazutomo Kasai ที่ได้ทำการทดลอง โดยพบว่าเงินสเตอร์ลิงที่ผสมอินเดียม 0.5 – 12 % โดยน้ำหนักสามารถทำให้ต้านทานการหมองได้ดีขึ้น และจากงานวิจัยการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติโลหะเงินเจือ ของ ผศ. สมนึก วัฒนศรียกุล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ พบว่าธาตุที่สามารถทำให้เงินสเตอร์ลิงต้านทานการหมองได้ดีขึ้น ได้แก่ ดิบุก (เติมได้ถึง 7 %) ,สังกะสี (เติมได้ 2%) ,อินเดียม (เติมได้ 9%) และซิลิคอน (เติมได้ 1.5%) แต่ ซิลิคอนที่ผสมเกินกว่า 0.2 % จะทำให้โลหะผสมมีความเปราะมาก ดังนั้นจากการวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะศึกษาถึง ผลของธาตุอินเดียมและซิลิคอนที่มีต่อความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิง รวมทั้งสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิงผสมที่ได้จากการเติม อินเดียม และซิลิคอนลงไปด้วย



รูปที่ 1.1 แผนภาพของ Ellingham แสดงค่า Gibb's Free Energy ของการเกิดออกไซด์ของโลหะที่อุณหภูมิต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของการทดลอง

1. เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิงที่มีซิลิคอนผสมอยู่ ก่อนและหลังเติมอินเดียมในปริมาณต่างๆ กัน
2. เพื่อศึกษาความสามารถด้านการต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิงที่มีซิลิคอนผสมอยู่ ก่อนและหลังเติมอินเดียมในปริมาณต่างๆ กัน
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอินเดียมที่มีผลต่อจุดหลอมเหลวของเงินสเตอร์ลิง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. หลอมเงินสเตอร์ลิงที่ผสมและไม่ผสมซิลิคอน (ในรูปของ CuSi) โดยใช้เตาอินดักชันในสถานะที่มีการคลุมผิวโลหะหลอมเหลวด้วยก๊าซอาร์กอน โดยเงินสเตอร์ลิงที่มีซิลิคอนผสมอยู่ จะทำการเติมอินเดียมในปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักต่างๆ กันคือ 0.5% ,1.0% , 1.5% และ 2.0% และเงินสเตอร์ลิงที่ไม่มีซิลิคอนผสมอยู่ จะทำการเติมอินเดียมในปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนัก 1.0% ,2.0% และไม่เติมอินเดียม
2. ศึกษาส่วนผสมทางเคมี, โครงสร้างจุลภาคเมื่อเติมอินเดียม
3. ศึกษาอิทธิพลของอินเดียมในเงินสเตอร์ลิงต่อสมบัติทางกลได้แก่ ความแข็ง ความต้านแรงดึง
4. ทดสอบความสามารถด้านการต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิงที่มีการผสมและไม่ผสมอินเดียม
5. ตรวจสอบ DTA (Differential Thermal Analysis) เพื่อหาจุดหลอมเหลวของเงินสเตอร์ลิงหลังเติมอินเดียมในปริมาณสัดส่วน โดยน้ำหนักต่างๆ คือ 0.5% ,1.0% ,1.5% และ 2.0%

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงความสามารถด้านการต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากการเติมอินเดียมที่ส่วนผสมต่างๆ
2. ทราบถึงสมบัติทางกล เช่น ความแข็ง ความต้านทานแรงดึง ของเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากการเติมอินเดียมที่ส่วนผสมต่างๆ
3. ทราบถึงผลของอินเดียมที่มีต่อจุดหลอมเหลวของเงินสเตอร์ลิง

บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรม

2.1 ความเป็นมาของโลหะเงินและเงินสเตอร์ลิง

เงินสเตอร์ลิงเป็นโลหะผสมที่มีเงินเป็นธาตุผสมหลัก (Base Metal) ผสมกับทองแดงและธาตุผสมอื่นๆ ตามคำนิยามของมาตรฐานอุตสาหกรรมของไทยใน มอก. 21-2515 เงินสเตอร์ลิง (Sterling Silver) หมายความว่า โลหะเงินที่มีโลหะชนิดอื่นปนอยู่ไม่เกินร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนักซึ่งทำให้คุณสมบัติที่ดีของเงินไว้คือ ความขาว ความสวยงามเป็นมันวาว และความทนทานต่อการกัดกร่อน ซึ่งปรากฏหลักฐานการกำหนดมาตรฐานของเงินสเตอร์ลิง เป็นครั้งแรกจากกฎของราชสำนักอังกฤษที่ได้กำหนดมาตรฐานในการผลิตเครื่องใช้ที่ทำจากเงินสเตอร์ลิงว่า “Each pound tray of Sterling Silver must contain 11 troy ounces, 2 dwt. Of fine Silver”*

อักษรย่อของโลหะเงินคือ Ag ซึ่งมาจากภาษาละติน Argentum โดยโลหะเงินถูกค้นพบมานานแล้วคือประมาณ 4,000 ปี ก่อนคริสตกาล แต่ยังไม่พบหลังทองคำและทองแดง ซึ่งการผลิตโลหะเงินจำนวนมากพบ่าเกิดขึ้นเมื่อประมาณ 500 ปี ก่อนคริสตกาล โดยชาวกรีกในอาณาจักรโรมัน ได้ใช้โลหะเงินเป็นเหรียญกษาปณ์ที่ใช้เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนสินค้า และส่วนหนึ่งนำไปทำเป็นเครื่องประดับ ต่อมาช่วงปี ค.ศ. 800 ถึง 1,500 การผลิตเงินส่วนใหญ่อยู่บริเวณยุโรปกลาง และประเทศอังกฤษ จนต่อมาเริ่มมีการผลิตเงินสเตอร์ลิงขึ้นซึ่งเป็นที่นิยมกันมาก และใช้แทนเงินบริสุทธิ์ในการผลิตเหรียญกษาปณ์จนกลายเป็นเงินมาตรฐาน (Standard Silver) ต่อมาได้แพร่หลายมากขึ้น และสามารถผลิตเครื่องมือเครื่องใช้ได้ดี ตลอดจนมีผู้ทดลองทำเครื่องประดับด้วยเงินสเตอร์ลิง ก็ปรากฏว่าเป็นที่นิยมเช่นกัน เพราะยังคงมีความสวยงามไม่ต่างจากการใช้เงินบริสุทธิ์มากนักแต่มีสมบัติทางกลที่ดี

ปัจจุบันการผลิตโลหะเงินได้จากการถลุงสินแร่ตะกั่ว และสังกะสีที่มีโลหะเงินผสม โดยมีการผลิตโลหะเงินจากสินแร่ประมาณ 12,000 ตัน / ปี และจนถึงปัจจุบันมีการผลิตโลหะเงินมาแล้วทั้งหมดประมาณ 1,000,000 ตัน

หมายเหตุ* 1 pound troy = 12 troy ounces

1 troy ounce = 20 dwt (penny weight)

2.2 ประโยชน์ของโลหะเงิน

ในสมัยก่อนได้มีการใช้โลหะเงินในการผลิตเหรียญกษาปณ์ และต่อมาได้ใช้ทำเครื่องประดับทั้งในรูปของแหวน สร้อยต่างๆ และใช้ทำเครื่องเรือนเครื่องใช้ในโต๊ะอาหารเช่น ช้อน ส้อม ทั้งในประเภทเป็นเงินสเตอร์ลิง หรือการชุบเงิน เพราะเงินเป็นวัสดุที่สามารถนำมาชุบได้ นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมภาพถ่าย ตลอดจนใช้ในทางทันตกรรม เช่น เงินอมัลกัม (Silver Amalgam) ทำแผ่นเคลือบเครื่องมือทางเคมีและถ่ายภาพ ใช้เป็นวัสดุทางไฟฟ้าเช่นทำหน้าคอนแทกไฟฟ้า หรือใช้เป็น Bearing Metal ในส่วนที่เรียกว่า Babbitt ซึ่งใช้เงินผสมแคดเมียมโดยมีเงินผสมอยู่ไม่เกิน 5%

ในประเทศไทยพบว่า มีแนวโน้มการผลิตเครื่องประดับเงินเพื่อการส่งออกสูงมากขึ้นทุกปี โดยเฉพาะในปี พ.ศ. 2541 มีมูลค่าการส่งออกสูงถึงร้อยละ 43.7* ของเครื่องประดับและอัญมณีทุกชนิด ดังนั้นจากความสำคัญของเงินสเตอร์ลิงที่มีต่อเศรษฐกิจในด้านการส่งออกและบริโภคภายในประเทศ จึงสมควรอย่างยิ่งที่ภาครัฐบาลต้องตระหนักและให้ความสำคัญในการส่งเสริมการลงทุนผลิตเครื่องประดับเงินสเตอร์ลิง ส่วนปัญหาด้านคุณภาพนั้นจำเป็นต้องมีการวิจัยและพัฒนาปรับปรุงอย่างมากเพื่อแก้ไขปัญหาให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ดีมีคุณภาพสูง จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่างานวิจัยเชิงคุณภาพของเงินสเตอร์ลิงมีน้อยมาก ทำให้การพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตภายในประเทศเจริญก้าวหน้าช้ากว่าต่างประเทศ แม้จะมีการทดลองวิจัยเฉพาะภายในกิจการอยู่บ้าง แต่ไม่ปรากฏว่าผลงานการวิจัยเหล่านั้นได้เผยแพร่สู่สาธารณชนให้ทราบมากเท่าที่ควร การพัฒนาจึงเป็นไปในลักษณะที่ไม่ก้าวหน้ามากนัก ผู้ประกอบการต้องอาศัยประสบการณ์เป็นหลักในการผลิตสู่ตลาด การวิจัยนี้จึงมุ่งความสนใจไปที่การแก้ปัญหาค่าคุณภาพของการผลิตงานหล่อด้วยเงินสเตอร์ลิง อันได้แก่ปัญหาการเกิดฟองอากาศ หรือรูพรุนในชิ้นงานหล่อ ปัญหาการหมอง และปัญหาค่าคุณภาพทางกลของเงินสเตอร์ลิง เช่นมีความนิ่มเกินไป และความต้านทานแรงดึงน้อย จึงได้มีการทดลองใช้อินเดียม และซิลิกอน ผสมลงในเงินสเตอร์ลิง และทำการหล่อในบรรยากาศที่มีก๊าซอาร์กอน เพื่อศึกษาถึงคุณภาพของเงินสเตอร์ลิงที่ผสมกับธาตุเหล่านี้ ในการแก้ปัญหาดังที่กล่าวมาข้างต้น

หมายเหตุ : ที่มาจากศูนย์สถิติการพาณิชย์ โดยความร่วมมือของกรมศุลกากร

2.3 สมบัติทางกายภาพของโลหะเงินและโลหะที่ผสมในเงินสเตอร์ลิง

ในตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติทางกายภาพของเงิน และของโลหะที่ใช้ผสมในงานวิจัยนี้ได้แก่ ทองแดง อินเดียม และซิลิกอน ดังนี้

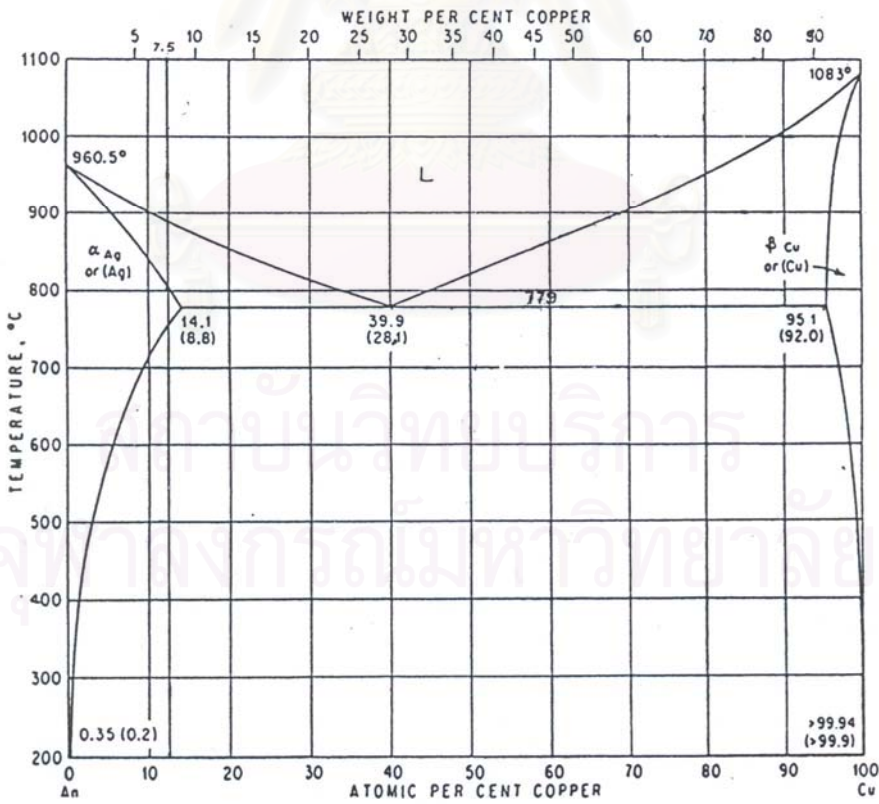
ตาราง 2.1 สมบัติทางกายภาพของโลหะที่ผสมอยู่ในเงินสเตอร์ลิง

| สมบัติ | เงิน | ทองแดง | อินเดียม | ซิลิกอน |
|---|----------|--------|---------------|---------------|
| สัญลักษณ์ | Ag | Cu | In | Si |
| เลขอะตอม | 47 | 29 | 49 | 14 |
| น้ำหนักอะตอม | 196.8665 | 63.546 | 114.82 | 28.086 |
| โครงสร้างผลึกที่ 25C | FCC. | FCC. | FC.Tetragonal | Diamond Cubic |
| สี | ขาวเงา | แดงเงา | ขาวขุ่น | ดำ |
| ความถ่วงจำเพาะ | 10.5 | 8.96 | 7.31 | 2.33 |
| ความหนาแน่นที่ 20° C (Kg/m ²) | 10,500 | 8,960 | 7,310 | 2,330 |
| จุดหลอมเหลว (°C) | 960 | 1,083 | 156.2 | 1,423 |
| จุดเดือด(°C) | 2,195 | 2,600 | 2,000 | 2,355 |

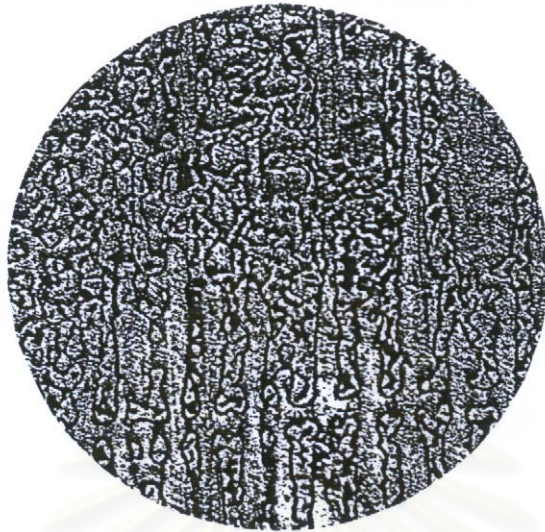
2.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน-ทองแดง

แผนภูมิสมดุลเฟสของระบบ เงิน-ทองแดง ดังรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าโลหะผสมของทั้งสองธาตุนี้จะไม่สามารถเกิดการละลาย ในสภาวะของแข็งแบบสมบูรณ์ แม้ว่าโลหะทั้งสองจะมีระบบโครงสร้างผลึกเป็นแบบเดียวกัน (FCC.) โดยที่โครงสร้างผลึกของเงินสามารถรองรับอะตอมของทองแดงได้ในปริมาณน้อย และในขณะเดียวกันความสามารถในการละลายก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิ 779 °C ปริมาณของทองแดงที่สามารถละลายในเงินจะเพิ่มขึ้นสูงสุดมีค่าเท่ากับปริมาณทองแดง 8.8 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ในขณะที่เดียวกันปรากฏการณ์เดียวกันนี้ก็เกิดขึ้นกับการละลายของเงินในทองแดงโดยเกิดขึ้นสูงสุดที่ปริมาณของเงิน 7.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยที่สารละลายของแข็งที่มีเงินละลายอยู่มาก (Ag-rich Solid Solution) จะกำหนดสัญลักษณ์เป็น α - phase และสารละลายของแข็งที่มีทองแดงละลายอยู่มาก (Cu-rich Solid Solution) จะกำหนดสัญลักษณ์เป็น β - phase ซึ่งสารละลายของแข็งทั้ง 2 ดังกล่าวจะถูกจัดเป็น สารละลายของแข็งชนิดละลายได้บางส่วน (Partial Solid Solution)

สำหรับเงินสเตอร์ลิงซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ของทองแดงผสมอยู่ 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยหนักนั้นเมื่อมองตาม แผนภูมิรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าในสภาพสมดุลเมื่อปล่อยให้เกิดการแข็งตัวจะไม่พบโครงสร้างแบบ ยูเทคติก เนื่องจากส่วนผสมของทองแดงมีน้อยกว่า 8.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่เนื่องจากการแข็งตัวของงานหล่อไม่อยู่ในสภาวะสมดุล ทำให้โครงสร้างที่ได้ประกอบไปด้วย Primary Phase ซึ่งเป็น α - phase ที่อุณหภูมิประมาณ 896 °C โครงสร้างนี้จะมีส่วนผสมของทองแดงอยู่น้อยกว่าสภาพสมดุล ซึ่งในลักษณะการแข็งตัวแบบกิ่งไม้ (Dendritic Solidification) ของเหลวที่เหลืออยู่ขณะเกิดการแข็งตัวตอนต้นนี้จะมีส่วนผสมของทองแดงสูงกว่าของเหลวเริ่มต้น สุดท้ายจะเกิดโครงสร้างแบบยูเทคติกที่ประกอบด้วย α - phase ที่มีทองแดงละลายอยู่สูงสุด 8.8% wt. ผสมกับ β - phase ที่เป็น สารละลายของแข็งที่มีทองแดงละลายอยู่มาก ดังนั้นโครงสร้างรวมหลักหลังการแข็งตัวสิ้นสุดที่อุณหภูมิ 796 °C จะมียูเทคติกแทรกอยู่ระหว่างกิ่งต่าง ๆ ของเดนไดรต์จนเกิดความแตกต่างของส่วนผสมทองแดง ระหว่างยูเทคติกและเดนไดรต์อย่างมาก ถึงกระนั้นภายในโครงสร้างแบบเดนไดรต์เองก็พบว่าการกระจายทองแดงในเดนไดรต์จะไม่สม่ำเสมอ ด้านในสุดจะมีทองแดงน้อยที่สุด 2.35% wt. และด้านนอกสุดจะมีทองแดงมากที่สุดโดยด้านที่ติดกับยูเทคติกจะมีทองแดงถึง 28.1% wt.



รูปที่ 2.1 แผนภูมิมวลเฟสของโลหะผสมเงิน - ทองแดง



รูปที่ 2.2 โครงสร้างที่ได้จากการหล่อของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ส่วนผสม 92.5% wt. Ag-7.5% wt. Cu

2.5 ความต้านทานการหมองของโลหะเงินผสม

การหมองที่เกิดขึ้นที่ผิว (Tarnishing) เกิดขึ้นเนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเงินกับสารประกอบที่มีกำมะถัน เช่น H_2S หรือ SO_2 เป็นต้น ทำให้เกิดสารประกอบซัลไฟด์ของเงินขึ้น ซึ่งพบว่าจะมี Ag_2S เป็นองค์ประกอบหลัก โดยจากการศึกษาของ Raub⁽¹⁾ พบว่าในเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมของโลหะเงินมากกว่า 83 % เท่านั้นจึงจะเกิดชั้นฟิล์มของ Ag_2S ได้ ซึ่งสารประกอบของชั้นฟิล์มที่มี Ag_2S เป็นองค์ประกอบหลักนั้น จะทำให้ผิวของชิ้นงานเป็นสีน้ำตาล สีน้ำตาลอมเขียว (Greenish-brown) จนถึงสีดำโดยขึ้นกับชั้นความหนาของฟิล์มที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ Price และ Thomas⁽²⁾ ยังพบว่า เมื่อมีความชื้นปนอยู่กับ SO_2 ในปริมาณที่เข้มข้นสูงฟิล์มของสารประกอบซัลไฟด์จะมีซัลเฟต (Ag_2SO_4) ปนอยู่ด้วย

ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ เงินสเตอร์ลิงจะมีการหมองที่ผิวในอัตราที่เร็วกว่าเงินบริสุทธิ์ ซึ่ง Vinal และ Schramm⁽³⁾ พบว่า อัตราการหมองของเงินสเตอร์ลิงจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณทองแดงที่ผสมอยู่ เนื่องจากการเกิดออกซิเดชันของทองแดง ทำให้เกิดความหมองเพิ่มขึ้นโดย CuO ที่มีสีเทาดำ และ Cu_2O ที่มีสีแดง ดังนั้นจึงได้มีการเติมธาตุบางตัว เช่น สังกะสี ดีบุก ซีลีคอน อลูมิเนียม พัลลาเดียม และ อินเดียม เป็นต้น เพื่อให้มีการสร้างฟิล์มออกไซด์ของธาตุเหล่านี้ และสามารถป้องกันการหมองได้ โดยไปหน่วงการทำปฏิกิริยาของเงินกับสารประกอบที่มีกำมะถัน

กลไกการเกิดออกไซด์บนผิวโลหะโดยอาศัยความสามารถในการเกิดออกไซด์ของธาตุผสมที่ดีกว่าธาตุหลักในโลหะผสมนี้เรียกว่า Selective Oxidation โดยถ้าออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนผิวนั้นมีความหนาพอ และไม่มีช่องว่างพอที่จะเกิดออกไซด์ของธาตุหลัก (Main Oxidation) ภายหลังได้ เรียกว่าออกไซด์นั้นสามารถคลุมผิวได้ทั้งหมดจึงเรียกออกไซด์ฟิล์มที่เกิดขึ้นนั้นว่าเป็นชั้นฟิล์มป้องกันผิว (Protective Layer) ซึ่งชั้นของออกไซด์ (Oxide Layer) จะต้องมีแรงดึงผิวมาก มีความแข็งแรงและเสถียรภาพสูง ทนทานต่อการแพร่ผ่านของออกซิเจน หรือซัลเฟอร์ได้ดี ความสามารถในการแพร่ผ่านของไอออนบวกและไอออนลบต่ำ สำหรับเงินสเตอร์ลิงพบว่าธาตุผสมหลายตัวมีคุณสมบัติในการสร้างฟิล์มออกไซด์ ดังกล่าว เช่น อลูมิเนียมและซิลิคอนเป็นต้น ทำให้สามารถป้องกันอากาศและซัลเฟอร์ได้ดี

โดยสรุปการป้องกันไม่ให้เงินสเตอร์ลิงสัมผัสกับอากาศจนเกิดการหมองทำได้ ดังนี้

- 1) เคลือบผิวเงินสเตอร์ลิงด้วยโลหะที่ทนการหมองได้ดี
- 2) หุ้มห่อผิว หรือควบคุมบรรยากาศไม่ให้มีซัลเฟอร์
- 3) ผสมด้วยธาตุผสมที่ช่วยให้ทนการหมองได้ดี

สำหรับวิธีการกำจัดฟิล์มของการหมองสามารถทำได้โดย การเผาที่อุณหภูมิ 350 – 600 °C หรือการทำ Electrolysis ในกรณีที่เป็นฟิล์มบาง ๆ แต่ถ้าฟิล์มของภาพหมองมีความหนามากจะต้องใช้วิธีขัดละเอียดจึงจะสามารถกำจัดออกได้

กระบวนการทดสอบการหมองของโลหะเงินหรือเงินสเตอร์ลิงตามระบบของ CIE Lab System นั้นเป็นการวัดค่าความสว่าง L (Lightness) ค่าสีแดง-เขียว คือค่า a และค่าสีน้ำเงิน-เหลือง คือ b โดยอาศัยหลักการสะท้อนแสง จากผิวนอกของวัตถุ แล้ววัดด้วยเครื่องวัดระดับสีที่เรียกว่า Spectro photo meter การเปลี่ยนแปลงของค่าที่วัดได้จะเป็นดัชนีวัดการหมองที่เกิดขึ้นกับโลหะผสมขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง คือ สภาพแวดล้อม บรรยากาศ อุณหภูมิ ความละเอียดของผิวโลหะ ความชื้นสัมพัทธ์ ส่วนผสม และโครงสร้างของโลหะผสม เนื่องจากการเกิดการหมองเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน และง่ายต่อการแปรตามส่วนผสมและตัวกลางที่เปลี่ยนไป

ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีสามารถวิเคราะห์ ด้วยสายตาได้โดยตรง แต่เมื่อต้องการทราบค่าที่บอกเชิงปริมาณก็สามารถใช้เครื่องวัดค่าสี โดยใช้หลักการวัดค่า L, a และ b จากนั้นคำนวณหาค่าความเปลี่ยนแปลงของสีเทียบกับค่ามาตรฐานหรือค่าสีของชิ้นงานก่อนการทดสอบตามสมการ

$$DE^2 = (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)$$

เมื่อ $\Delta L = L_2 - L_1$, $\Delta a = a_2 - a_1$, $\Delta b = b_2 - b_1$

โดยค่า L_1, L_2 คือ ค่าความสว่าง ของชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบ

a_1, a_2 คือ ค่าสีแดง - เขียว ของชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบ

b_1, b_2 คือ ค่าสีน้ำเงิน-เหลือง ของชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบ

ค่า DE ที่วัดได้นี้เป็นค่าทางเวกเตอร์ มีความหมายโดยรวมของค่าสีที่เปลี่ยนไป (ดูภาคผนวก)^(ก)

2.6 อินเดียมกับสมบัติการต้านทานการหมองในเงินสเตอร์ลิงผสม

ได้มีนักวิจัยหลายท่านที่ทำการวิจัยเกี่ยวกับสมบัติการต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิง โดยมีอินเดียมเป็นส่วนผสม เนื่องจากอินเดียมเป็นโลหะที่สามารถละลายในเงินได้ดี มีสีเทาเงินและมีจุดหลอมเหลวต่ำ โดย Dr. Murray ⁽⁴⁾ เป็นผู้ริเริ่มใช้อินเดียมผสมในผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเงินพบว่าสามารถต้านทานการหมองดีขึ้น

Daniel Davitz ⁽⁵⁾ ทำการทดลองหลอมเงินสเตอร์ลิง โดยพบว่าเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมโดยน้ำหนักเป็น 92.5%Ag – 2% Cu – 5% Pd – 0.5 % In จะได้คุณภาพของเงินสเตอร์ลิงที่ดีโดยอินเดียมกับพัลลาเดียมช่วยในด้านต้านทานการหมอง คุณสมบัติในการหล่อขึ้นรูป โดยแบบหล่อที่ได้ไม่แตกเปราะง่าย

Zamejski ,Marek R ⁽⁶⁾ ทำการทดลองหลอมเงินสเตอร์ลิงผสม โดยแปรผันสัดส่วนของธาตุผสม อินเดียม / ทองแดง / โมลิบดีนัม จนได้ชุดส่วนผสมโดยน้ำหนักที่ได้คุณภาพดีที่สุดคือ 93% Ag – 4.99% Cu – 2% In และ 0.01 % Mo ซึ่งได้อุณหภูมิในการหล่อต่ำที่สุดคือ 1050 °C ถึง 1201 °C พร้อมทั้งลักษณะพื้นผิวที่ดี สามารถลดความพรุณได้ แต่การทดลองของ Zamejski ไม่ได้กล่าวถึงความสามารถในการต้านทานการหมองของธาตุผสม

Harigaya et al. ⁽⁷⁾ ได้ทดลองหลอมโลหะผสมของเงิน โดยทำการแปรผันค่าส่วนผสมต่างๆ โดยน้ำหนักดังนี้คือ 4 - 10% Sn ,0.5 – 12% In ,0.1- 5% Zn และส่วนผสมที่เหลือเป็นเงิน จากนั้นทำการทดสอบการหมองของโลหะผสมของเงิน โดยวางแต่ละชุดทดสอบไว้ในบรรยากาศของไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) ซึ่งอิทธิพลของธาตุผสมดังกล่าวต่อการหมอง แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 อิทธิพลของธาตุผสมที่ใช้เติมในโลหะผสมของเงินในการทดลองของ Harigaya

| ธาตุผสม | ผลดี | ผลเสีย |
|---------|---|--|
| Sn | 0.4 – 10% wt. เป็นตัวกันหมองโดยหน่วงการเกิด Silver Sulfide และให้คุณสมบัติทางกลดีขึ้น | เกินกว่า 10 % wt จะทำให้สีของเงินผสมเปลี่ยนเป็นสีเทา |
| In | 0.5 - 12 % wt. จะทำให้กันหมองดีขึ้น และสามารถละลายเข้ากับเงินได้ดี | เกินกว่า 12 % จะทำให้เงินผสมมีสีเหลือง |
| Zn | 0.1 – 5 % wt. จะเป็นตัวลดออกซิเจนที่ดี ด้านทานการหมองของเงินได้ดีขึ้น | เกินกว่า 5% wt. ทำให้เงินผสมมีสีเทา |

นอกจากนี้ Davitz Daniel ⁽⁸⁾ 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 ผลึกภัณฑ์ที่ได้จะมีความต้านทานการหมองและการกัดกร่อนได้ดี และมีความแข็งแรงไม่เปราะง่ายโดยนิกเกิลจะมีคุณสมบัติในการทำให้เกรนมีขนาดเล็กละเอียด และป้องกันการเปราะที่เกิดขึ้นหลังการหล่อเงินสเตอร์ลิง เนื่องจาก Davitz ต้องการลดปริมาณของทองแดงเพื่อให้ผลึกภัณฑ์สามารถต้านทานการหมองดีขึ้น จึงได้ใช้สังกะสีและอินเดียมเติมลงไปแทนสัดส่วนเดิมของทองแดง และนำไปทดลองการหมองด้วยบรรยากาศของก๊าซ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พร้อมกับนำไปทดสอบ Corrosion ด้วย บรรยากาศของคลอไรด์ ซึ่งพบว่าได้ผลึกภัณฑ์ที่มีความสามารถในการต้านทานการหมอง และการกัดกร่อน ดีที่สุด พร้อมทั้งมีความแข็งแรงสูง โดยมีส่วนผสมของธาตุต่าง ๆ เป็นดังนี้

| | |
|----------------|-----------------|
| Ag | 92.5% by weight |
| Zn | 6.57% by weight |
| Cu | 0.25% by weight |
| Ni | 0.25% by weight |
| Metal Silicate | 0.18% by weight |
| In | 0.25% by weight |

โดยพบว่ามีค่าความแข็งอยู่ที่ 160 Brinell เมื่อผ่านการ heat treated ในเตาที่อุณหภูมิ 454°C แล้ว Quench, มีค่า Elongation 15% - 28%

T.K. Vaidyanathan and A. Prasad ⁽⁹⁾ ได้ทำการทดลองความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน และต้านทานการหมอง ของโลหะผสมของเงินที่มีอินเดียมเป็นส่วนผสมตั้งแต่ 5 – 20% โดยน้ำหนัก โดยวัดค่าความต้านทานการกัดกร่อนโดยใช้วิธี Potentiodynamic anodic Polarization ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1% ,ค่า PH=7 และวัดค่าความสารณในการต้านทานการหมอง โดยวิธีเดียวกันแต่ใช้สารละลาย 0.5% Na₂S ,ค่า PH=12 แทน พบว่าโลหะผสมของเงินที่มีอินเดียมเป็นส่วนประกอบตั้งแต่ 5 - 20% โดยน้ำหนัก ไม่มีผลต่อความสารณในการต้านทานการกัดกร่อน แต่มีความสามารถในการต้านทานการหมอง ซึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณของอินเดียมตั้งแต่ 20% ขึ้นไป นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองเงินผสมที่มีทั้งอินเดียมและพัลลาเดียม (Pd) เป็นส่วนผสมพบว่า พัลลาเดียม จะช่วยทำให้ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนและการหมองของโลหะผสมของเงินดังกล่าวดีขึ้น

จากการศึกษาของนักวิจัยหลายท่าน ๆ ในการที่นำธาตุต่าง ๆ มาผสมลงในโลหะผสมของเงินเพื่อให้ผลึกภัณฑ์ที่ได้มีความสามารถในการต้านทานการหมองได้ดีขึ้นนั้น สิ่งนี้นักวิจัยหลาย ๆ ท่านได้คำนึงถึงคือ การที่ต้องการลดสัดส่วนของทองแดงในโลหะผสมของเงินลง เนื่องจากเป็นต้นเหตุสำคัญที่ทำให้ผลึกภัณฑ์มีการหมองได้ง่าย โดย Vinal และ Schramm ⁽³⁾ ได้ทำการศึกษาพบว่า

rate of tarnishing ของเงินสเตอร์ลิง จะแปรผันโดยตรงกับสัดส่วนปริมาณของทองแดงในเงินสเตอร์ลิง ดังนั้นจึงได้พิจารณาในการหาธาตุหลายชนิดผสมลงไปเพื่อให้เกิดการสร้างสารประกอบออกไซด์ของธาตุผสมเป็นชั้นฟิล์มป้องกันการเกิดสารประกอบออกไซด์ทองแดงหรือสารประกอบซัลไฟด์ของเงินซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในบรรยากาศทั่วไป โดยเฉพาะถ้ามีปริมาณของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ร่วมอยู่ด้วย โดยความสามารถในการเกิดออกไซด์และซัลไฟด์ของธาตุต่าง ๆ สามารถเปรียบเทียบได้จากค่าพลังงานอิสระ (Gibbs Free Energy) ดังแสดงไว้ตามตารางที่ 2.3

ตาราง 2.3 * ค่าพลังงานอิสระของการเกิดปฏิกิริยา Oxidation และ Sulphidation ของธาตุต่างๆ

| Reaction | ΔG° (Joule/mole) | Range (°C) |
|--|---------------------------------|--------------|
| 1. $2 \text{ Ag} + \frac{1}{2} \text{ O}_2 = \text{ Ag}_2\text{O}$ | $- 30,540 + 66.1 \text{ T}$ | 25 |
| 2. $2 \text{ Ag} + \frac{1}{2} \text{ S}_2 = \text{ Ag}_2\text{S}$ | $- 161,300 + 168.6 \text{ T}$ | 25 – 830 m |
| 3. $2 \text{ Cu} + \frac{1}{2} \text{ O}_2 = \text{ Cu}_2\text{O}$ | $- 160,400 + 71.25 \text{ T}$ | 25 – 1,085 |
| 4. $\text{ Cu} + \frac{1}{2} \text{ O}_2 = \text{ CuO}$ | $- 152,300 + 85.4 \text{ T}$ | 25 – 1,086 |
| 5. $\text{ Cu} + \frac{1}{2} \text{ S}_2 = \text{ CuS}$ | $- 115,600 + 76.0 \text{ T}$ | 25 – 430 |
| 6. $2 \text{ In(l)} + 3/2 \text{ O}_2 = \text{ In}_2\text{O}_3$ | $- 919,000 + 309.4 \text{ T}$ | 157 – 1,910 |
| 7. $\text{ In(l)} + 1/2 \text{ O}_2 = \text{ InS}$ | $- 155,000 + 60.7 \text{ T}$ | 692 – 1,500 |
| 8. $2 \text{ In(l)} + 3/2 \text{ S}_2 = \text{ In}_2\text{S}_3$ | $- 544,000 + 286.0 \text{ T}$ | 157 – 900 |
| 9. $\text{ Si} + \text{ O}_2 = \text{ SiO}_2$ | $- 907,000 + 176.0 \text{ T}$ | 25 – 1,412 |

*หมายเหตุ : สารประกอบหรือธาตุในตาราง 2.3 ปกติอยู่ในสถานะของแข็งยกเว้น O_2 , S_2 จะอยู่ในสถานะก๊าซ ,m แทน จุดหลอมเหลว (melting point)

ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะโลหะผสมของเงินที่มี ทองแดง, ซิลิกอน, และอินเดียม เป็นส่วนผสมเท่านั้น ซึ่งหากพิจารณาตามตารางที่ 2.3 พบว่าในสถานะที่มีกำมะถัน ในบรรยากาศที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) โอกาสในการเกิดสารประกอบ $\text{ Ag}_2\text{S}$ และ CuS จะมีมากเนื่องจากมีค่า ΔG° ต่ำมาก (-111.25 kJ/ mole S_2 และ -92.95 kJ / mole S_2 ตามลำดับ) เนื่องจากสารประกอบ ซัลไฟด์ของธาตุอื่นมีปริมาณน้อย ดังนั้นจึงทำการพิจารณาการหมองที่เกิดจากสารประกอบ $\text{ Ag}_2\text{S}$ เป็นหลัก นอกจากนี้ CuO , $\text{ Cu}_2\text{O}$ และ CuS ก็สามารถเกิดขึ้นที่อุณหภูมิของห้องด้วย จึงต้องพิจารณาสารประกอบออกไซด์ของธาตุผสมที่จะสามารถป้องกันการหมองได้ โดยจากตารางที่ 2.3 พบว่า SiO_2 สามารถเกิดขึ้นได้ที่มีอุณหภูมิห้อง และมีค่า ΔG° ต่ำกว่าสารประกอบ $\text{ Ag}_2\text{S}$, CuO , $\text{ Cu}_2\text{O}$ มาก ซึ่งจะทำให้เกิดการสร้างชั้นเคลือบของฟิล์มซิลิกา ขึ้นมาป้องกันการปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้เกิดการหมองต่อไปได้

สำหรับค่าพลังงานอิสระในการทำปฏิกิริยากับ O_2 ที่อุณหภูมิ 25 °C, 200 °C และ 800 °C ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าพลังงานอิสระของธาตุต่าง ๆ ในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน

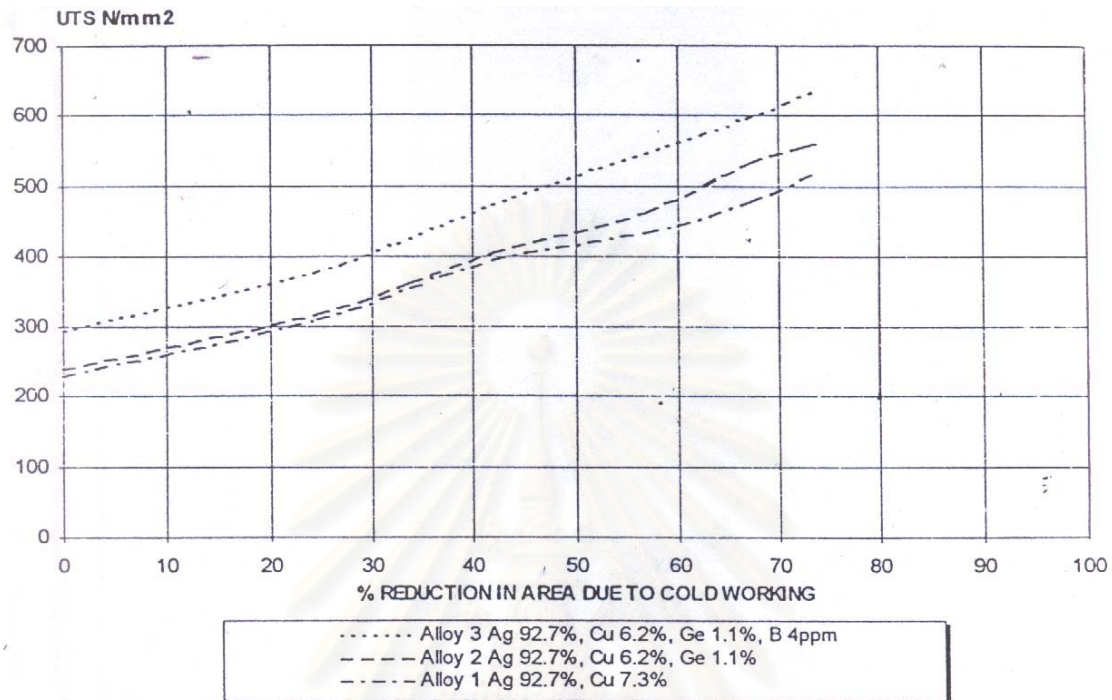
| ธาตุ | ปฏิกิริยา | ρG° (kJ./mole O ₂) | | |
|------|--|---|---------|---------|
| | | 25 °C | 200 °C | 800 °C |
| Ag | $4 \text{ Ag} + \text{O}_2 = 2 \text{ Ag}_2\text{O}$ | - 21.68 | - | - |
| Cu | $4 \text{ Cu} + \text{O}_2 = 2 \text{ Cu}_2\text{O}$ | -278.33 | -253.40 | -167.89 |
| In | $4/3 \text{ In} + \text{O}_2 = 2/3 \text{ In}_2\text{O}_3$ | - | -515.10 | -391.34 |
| Si | $\text{Si} + \text{O}_2 = \text{SiO}_2$ | -854.55 | -823.75 | -718.15 |

หากพิจารณาที่อุณหภูมิห้องแล้ว จะเห็นได้ว่าสารประกอบออกไซด์ In_2O_3 จะมีโอกาสเกิดได้ยากเมื่อเทียบกับออกไซด์ของเงิน และทองแดง แต่สำหรับสารประกอบออกไซด์ของซิลิคอนจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้มากที่สุด เนื่องจากมีค่าพลังงานอิสระต่ำที่สุดนั่นเอง ซึ่งเป็นสิ่งที่สามารถอ้างอิงได้ว่าในเงินสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิคอนและอินเดียม จะมีความสามารถในการต้านทานการหมองจากฟิล์มออกไซด์ของซิลิคอนในสภาวะบรรยากาศหรือมีกำมะถันเจือปนอยู่ที่อุณหภูมิห้อง แต่ทั้งนี้ไม่ได้หมายความว่าอินเดียมจะไม่มีผลต่อความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิง เพียงแต่อินเดียมอาจไปรวมตัวกับธาตุอื่น ๆ กลายเป็นเฟสที่ช่วยยับยั้งหรือหน่วงปฏิกิริยา Oxidation หรือ Sulphidation ทำให้สามารถป้องกันการหมองของเงินสเตอร์ลิงได้ดีขึ้น ซึ่งต้องมีการศึกษาต่อไปถึงสมมุติฐานดังกล่าว

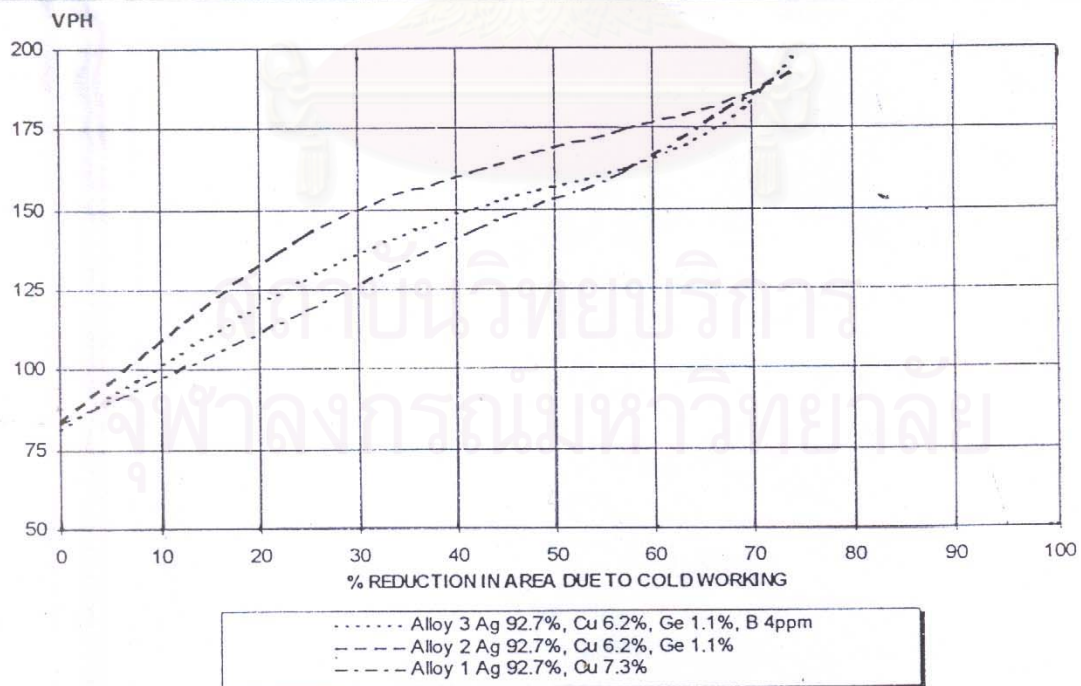
2.7 อินเดียมกับสมบัติทางกลในเงินสเตอร์ลิงผสม

ในการศึกษาถึงการปรับปรุงคุณภาพในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเงินสเตอร์ลิงนั้น ประการหนึ่งซึ่งมีการพัฒนากันมานานอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน คือ การที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติทางกลดีขึ้น เช่น ความแข็งแรง, การที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่นิ่มหรือเปราะจนเกินไป โดยธาตุที่นำมาผสมลงไปในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเงิน อันดับแรก ๆ ได้แก่ ทองแดง ซึ่งจะทำได้สมบัติทางกลดีขึ้น ตามความต้องการแต่เนื่องจากทองแดง จะมีข้อด้อยตรงที่ถ้าผสมในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้เงินสเตอร์ลิงมีสีหมองลงเนื่องจากออกไซด์ของทองแดง และสีของทองแดงเอง ดังนั้นจึงมีแนวความคิดที่จะลดปริมาณของทองแดงลงโดยมีการเติมธาตุอื่นลงไปแทนที่โดยไม่ทำให้สีของผลิตภัณฑ์มีความหมองหรือมีสีไม่สวยงาม แต่ยังคงสมบัติทางกลที่ดีอยู่ ได้แก่ ธาตุ นิกเกิล, โบรอน, เจอมาเนียม, ซิลิคอน, อลูมิเนียม, แมงกานีส เป็นต้น ตัวอย่างเช่น เงินสเตอร์ลิงที่ผสมเจอมาเนียมและโบรอน จะมีค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความแข็ง สูงกว่า เงินสเตอร์ลิงมาตรฐาน (ในที่นี้กำหนดเป็น 92.7%Ag, 7.3%Cu) ดังกราฟในรูปที่ 2.3 และ 2.4 ซึ่งได้จากการหล่อเงินสเตอร์ลิงผสมแบบ Continuous Casting ให้ได้ Ingot เป็น แท่งกลม (rod) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มม. โดยเตรียมส่วนผสมในการหล่อเงินสเตอร์ลิงแตกต่างกันดังรูปที่ 2.3 และ 2.4 จากนั้นจึงนำมาตัดทำ

Specimens เพื่อทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง และค่าความแข็ง นอกจากนี้ยังพบว่าหากนำชิ้นทดสอบไปทำ cold work ก็จะทำให้มีความแข็งแรงสูงมากขึ้นอีก

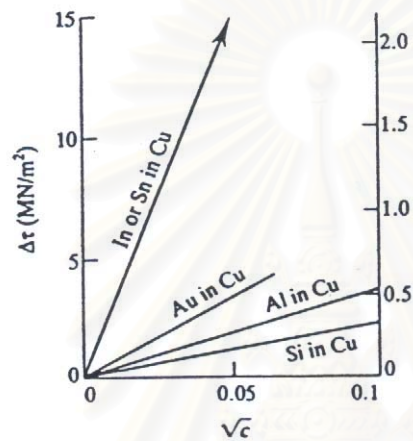


รูปที่ 2.3 กราฟระหว่าง UTS. กับ % Reduction in Area เนื่องจาก Cold Work เงินสเตอร์ลิงที่ผสม Ge, B เปรียบเทียบกับเงินสเตอร์ลิงมาตรฐาน



รูปที่ 2.4 กราฟระหว่าง ค่าความแข็ง (VPH) กับ % Reduction in Area เนื่องจาก Cold Work ของเงินสเตอร์ลิงที่ผสม Ge, B เปรียบเทียบกับเงินสเตอร์ลิงมาตรฐาน

สำหรับอินเดียมนั้น เคยมีการศึกษาโดย Charles E.T. White⁽⁴⁾ พบว่าได้มีการใช้อินเดียมผสมลงในโลหะประสานที่มีธาตุดีบุก - ตะกั่วผสมอยู่ ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และนอกจากนี้ R.L. Fleisher⁽¹⁰⁾ ได้มีการศึกษาถึงการใช้อินเดียมเติมลงไปในสารละลายของแข็งของทองแดงเพื่อจุดประสงค์ในการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ทำให้แปรรูปได้ยาก เป็นผลให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง Flow Stress กับรากที่สองของความเข้มข้นของอะตอมที่เติมลงในสารละลายของแข็งของทองแดง พบว่าจะแปรผันตามกัน ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $C^{1/2}$ กับ $\Delta\tau$ ใน Cu - alloy ที่ Solute atom ต่าง ๆ กัน

แต่ทั้งนี้ยังไม่มีการศึกษาถึงผลของอินเดียมในเงินสเตอร์ลิงต่อสมบัติทางกล ซึ่งอินเดียมอาจจะทำให้เงินสเตอร์ลิงมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น หรืออาจเกิดอินคลูชันทำให้ความแข็งแรงลดลงได้ ซึ่งในการวิจัยนี้ จะได้ทำการศึกษาต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 เตาหลอมอินดักชัน และอุปกรณ์หล่อหลอมโลหะ

- 3.1.1.1 เตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction Furnace) พร้อมเครื่องระบายความร้อน ด้วยน้ำไหลเวียนภายในแบบระบบปิด
- 3.1.1.2 เทอร์โมคัปเปิลชนิด R-Type วัดอุณหภูมิช่วง 700 – 1700 °C
- 3.1.1.3 เป้าหลอมกราไฟต์ขนาดปริมาตร 620 ลูกบาศก์เซนติเมตร (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และความลึก 13 เซนติเมตร)
- 3.1.1.4 แท่งกราไฟต์กวนน้ำโลหะ
- 3.1.1.5 แบบหล่อโลหะสำหรับหล่อชิ้นงานเป็นแท่งทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร
- 3.1.1.6 เตอบไฟฟ้า
- 3.1.1.7 ถังก๊าซ อาร์กอน พร้อมเกจวัดความดัน และหัวพ่น จำนวน 2 ชุด โดยชุดแรกใช้กับเตอบไฟฟ้า เพื่อลดการเกิดออกไซด์ของผิวแบบหล่อ ส่วนอีกชุดหนึ่งใช้สำหรับพ่นก๊าซอาร์กอนลงในเป้าหลอมกราไฟต์ เพื่อคลุมผิวน้ำโลหะ ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ของธาตุต่าง ๆ ในน้ำโลหะ

3.1.2 เครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลอง

- 3.1.2.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)
- 3.1.2.2 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope) และ EDX
- 3.1.2.3 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Tensile Test)
- 3.1.2.4 เครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers Hardness Tester)
- 3.1.2.5 เครื่องวัดค่าสีบนผิววัสดุสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

3.2 วัสดุดิบ

วัสดุดิบที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แก่ เงิน ทองแดง อินเดียม และซิลิคอนซึ่งอยู่ในรูปของผงโลหะผสมของทองแดงกับซิลิคอน ซึ่งมีสัดส่วนของซิลิคอนต่อทองแดงเป็น 30 : 70 %wt. สำหรับโลหะที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าตามบริษัทผู้จัดตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบ

| ชนิดของโลหะ | ค่าความบริสุทธิ์ | ลักษณะของวัตถุดิบ |
|---------------|------------------|-------------------|
| เงิน (Ag) | 99.99 | เม็ดโลหะ |
| ทองแดง (Cu) | 99.99 | เม็ดโลหะ |
| ซิลิคอน (Si) | 99.99 | ผง |
| อินเดียม (In) | 99.99 | เม็ดโลหะ |

3.3 สารเคมี

3.3.1 แอลกอฮอล์

3.3.2 แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH)

3.3.3 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

3.3.4 น้ำกลั่น

3.3.5 โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S)



รูปที่ 3.1 เตาอินดักชั่น และอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับหล่อเงินสเตอร์ลิง

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 เตรียมส่วนผสมของโลหะที่จะทำการหลอม ทำการจัดแบ่งเป็นชุด ๆ โดยมีส่วนผสมแตกต่างกันและมีน้ำหนักรวมเท่ากันคือ 300 กรัม ซึ่งมีส่วนผสมดังตารางที่ 3.2 ดังนี้

ตารางที่ 3.2 แสดงส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่ใช้ในการทดลอง

| หมายเลขชุด | ส่วนผสม (%wt.) | | | |
|------------|----------------|--------|---------|----------|
| | เงิน | ทองแดง | ซิลิกอน | อินเดียม |
| 1 | 92.5 | 7.5 | - | - |
| 2 | 92.5 | 7.0 | 0.5 | - |
| 3 | 92.5 | 6.5 | 0.5 | 0.5 |
| 4 | 92.5 | 6.0 | 0.5 | 1.0 |
| 5 | 92.5 | 5.5 | 0.5 | 1.5 |
| 6 | 92.5 | 5.0 | 0.5 | 2.0 |
| 7 | 92.5 | 6.5 | - | 1.0 |
| 8 | 92.5 | 5.5 | - | 2.0 |
| 9 | 92.5 | 5.0 | 0.5 | 2.0 |

โดยส่วนผสมในชุดที่ 6 และ 9 จะเหมือนกัน แต่กรรมวิธีในการหล่อต่างกันคือ ในชุดที่ 9 จะนำไปหลอมในเตาหลอมสูญญากาศ ซึ่งทำแบบหล่อเป็นดินเทียนแยกต่างหาก ส่วนชุดที่ 6 จะหลอมในเตาอินดักชั่น โดยมีก๊าซอาร์กอนคลุมผิวโลหะ หลอมเหลวอยู่ เช่นเดียวกับส่วนผสมในชุดอื่นที่เหลือ

3.4.2 ตั้งค่าอุณหภูมิเตาหลอมไว้ที่ 1100 °C เมื่ออุณหภูมิขึ้นถึงประมาณ 600 °C ทำการเทเม็ดโลหะเงินและทองแดงรวมกันในเบ้าหลอมกราไฟต์ สำหรับส่วนผสมที่มีซิลิกอนหรือ อินเดียมให้เทโลหะดังกล่าวเมื่อโลหะเงินและทองแดงหลอมละลายแล้ว

3.4.3 เมื่อส่วนผสมหลอมละลายเข้าด้วยกันดีแล้ว รอจนกว่าอุณหภูมิลดลงมาถึง 1100 °C แล้วรับนำแบบหล่อออกมาจากเตาอบ แล้วเทน้ำโลหะลงในแบบหล่อ

3.4.4 นำชิ้นงานหล่อซึ่งมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 150 เซนติเมตร มาตัดแบ่ง เพื่อทดสอบ การหมอง, ทดสอบหาจุดหลอมเหลวจากเครื่อง DTA, ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และอิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ,ทดสอบแรงดึง ,วัดค่าความแข็ง และวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี

3.4.5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

3.5 ระเบียบ และวิธีการตรวจสอบวิเคราะห์ผล

3.5.1 การตรวจสอบค่าส่วนผสมทางเคมี

วิธีการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 วิธีการวิเคราะห์ธาตุที่ได้จากการหล่อ

| ธาตุ | วิธีการวิเคราะห์ | สถานที่วิเคราะห์ |
|------|------------------|---|
| Ag | ตรีเตรท | ป. Dmc ² Metal (Thailand) Ltd. |
| Cu | AA | ป. Dmc ² Metal (Thailand) Ltd. |
| In | AA | ป. Dmc ² Metal (Thailand) Ltd. |
| Si | AA | กรมวิทยาศาสตร์บริการ |

3.5.1.1 การวิเคราะห์ปริมาณของเงิน โดยวิธีตรีเตรทตามมาตรฐาน ISO 11427

1. ตัดชิ้นงานตัวอย่างให้มีขนาดเล็กที่สุดเพื่อให้ง่ายต่อการทำลายด้วยกรดจนได้ปริมาณ 0.1 กรัม
2. ละลายโลหะตัวอย่างด้วยกรดไนตริกที่ผสมน้ำในอัตราส่วน 1:1 โดยใช้อุณหภูมิ 70 °C เงินจะทำปฏิกิริยากับไนเตรท เป็นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท
3. ทำการตรีเตรทเพื่อหาปริมาณของเงินในสารละลาย โดยใช้โพแตสเซียมโบรไมด์ (KBr) จนเริ่มเกิดตะกอนของเงินโบรไมด์ (AgBr) แล้วคำนวณหาปริมาณของ KBr ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา
4. ใช้หลักการไฟฟ้าเคมี โดยมีอิเล็กโตรด Ag/AgBr ใช้ตรวจสอบการเกิด AgBr (Automatic Titrant) กรณีตรีเตรทแบบธรรมดาใช้สารละลายโพแตสเซียมไซยาไนด์ (KSCN) เข้มข้น 10 กรัม ต่อลิตร ผสมด้วยเฟอร์ริกอัลลัม 2-3 หยดสำหรับใช้เป็นอินดิเคเตอร์ ที่จะทำให้เห็นจุดเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีในสารละลาย (N-Spot) เป็นสีชมพูอ่อนเกือบขาว
5. ใช้สารละลายมาตรฐาน AgBr ในการทดสอบเปรียบเทียบกับตะกอนที่เกิดขึ้นหลังการตรีเตรท กรณีทำการตรีเตรทแบบอัตโนมัติ

3.5.1.2 การวิเคราะห์ปริมาณของธาตุผสม Cu, In, Si ด้วยวิธี Atomic Absorbion Spectroscopy)

1. ชั่งตัวอย่างไว้ปริมาณ 0.3 กรัม ละลายในกรดไนตริกเข้มข้นจำนวน 10 มิลลิลิตร

2. ทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง จนละลายหมด แล้วใส่ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ออกให้หมดจากนั้นผสมน้ำให้ได้ปริมาตรรวม 50 มิลลิลิตร
3. จากนั้นทำการวิเคราะห์ปริมาณของ ทองแดง ,อินเดียม ,ซิลิคอนโดยนำไปเผาด้วย air-acetylene โดยใช้ความร้อนประมาณ $6,000\text{ }^\circ\text{C}$ เพื่อให้สารทดสอบเกิดการแตกตัวเป็นอะตอม แล้วทำการกระตุ้นอะตอมให้เข้าสู่สภาวะ excited state เพื่อให้เกิดการคายพลังงานออก
4. วัดค่าพลังงานที่คายออกมาเทียบกับตอนเริ่มต้น จะทำให้ทราบพลังงานส่วนที่ถูกดูดกลืนไป แล้วนำค่าที่ได้มาเทียบกับค่ามาตรฐานของเครื่องมือ จะทำให้ทราบว่าชิ้นงานที่นำมาทดสอบมีส่วนผสมของโลหะที่ต้องการทราบเป็นปริมาณเท่าใด

3.5.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

- 3.5.2.1 เตรียมชิ้นงานโดยการตัดชิ้นงานหล่อ แล้วเตรียมผิวโดยการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 ,600 ,800 ,1000 และ 1200 แล้ว Polishing ด้วยผงเพชรขนาด 9 ,6 ,3 ,1 และ 1/4 ไมครอน ตามลำดับ ล้างคราบสกปรกด้วยน้ำและอัลกอลกอฮอล์ เป่าให้แห้งจากนั้นนำไปกัดผิวชิ้นงานด้วยกรด H_2O_2 50% + NH_4OH 25% + H_2O 25% โดยปริมาตรประมาณ 10 – 30 วินาที
- 3.5.2.2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง แล้วถ่ายรูปโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขนาด 100 และ 200 เท่า
- 3.5.2.3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) พร้อมกับตรวจสอบปริมาณของธาตุผสมในเฟสหรือโครงสร้างที่พบด้วย EDX

3.5.3 การตรวจวัดค่าความแข็ง

- 3.5.3.1 ขัดชิ้นงานให้ได้ระนาบและขนานกันทั้ง 2 ด้านกระดาษทรายจนถึงเบอร์ 1200 แล้วขัดละเอียดด้วยผงเพชรขนาด 9, 6, 3, 1, และ 1/4 ไมครอนตามลำดับ
- 3.5.3.2 วัดค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ด้วยน้ำหนักกด 1 กิโลกรัม วัดระยะอินเดนท์ทั้ง 2 แกนโดยเครื่องจะคำนวณค่าความแข็งเป็นหน่วยวิกเกอร์ (HV) ในการวัดให้วัดตามหน้าตัดขวางของชิ้นงาน ห่างจากด้านริมของชิ้นงาน 2 มม. และวัดรอยต่อไปห่างจากรอยแรกทุก ๆ 2 มม. จำนวนทั้งหมด 5 รอย ต่อ 1 ตัวอย่าง แล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยหาค่าความแข็งของชิ้นงานนั้น ๆ ต่อไป

3.5.4 การตรวจหาจุดหลอมเหลวจากเครื่อง DTA (Differential Thermal Analysis)

นำตัวอย่างชิ้นงานไปตัดให้มีขนาดเล็ก ๆ จากนั้นนำไปตะไบให้ได้น้ำหนักประมาณ 200 มิลลิกรัม แล้ววางไว้ในเครื่อง DTA บรรยากาศไนโตรเจน โดยให้ความร้อนด้วยอัตรา $10\text{ }^\circ\text{C}$ ต่อนาที โดย DTA จะเป็นเทคนิคที่ใช้วัดความ

แตกต่างของอุณหภูมิระหว่างชั้นตัวอย่างกับวัสดุอ้างอิง ซึ่งใช้ อะลูมินา โดย
ถูกวัดในรูปแบบฟังก์ชันของอุณหภูมิเพื่อวัดหาจุด Liquidus และ Solidus ได้

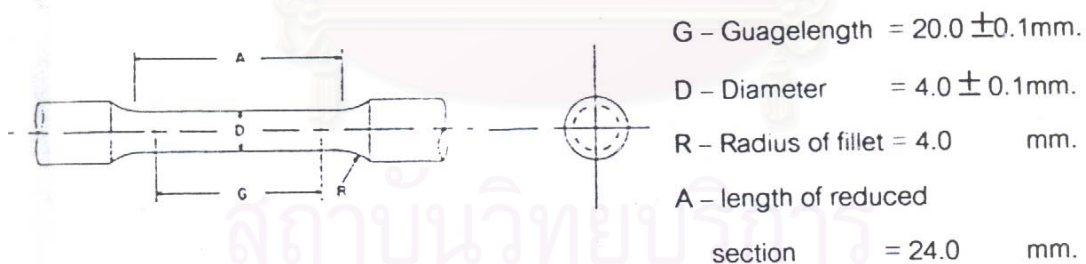
3.5.5 การทดสอบการต้านทานการหมอง

- 3.5.5.1 ตัดชิ้นงานหล่อขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้นต่อหนึ่งตัวอย่าง
แล้วขัดผ้าฝ้ายหน้าตัดทั้ง 2 ด้าน ด้วยกระดาษทราย เบอร์ 400, 600, 800, 1000,
และ 1200 ตามลำดับ
- 3.5.5.2 ชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนการทดสอบ และวัดค่าความสว่าง L และค่าสี a,b ก่อน
การทดสอบ ด้วยเครื่อง Spectrophotometer GRETAG – SPM 50 มุม 2 องศา,
D65A
- 3.5.5.3 แขนงชิ้นงานไว้เหนือสารละลายอิมิตัวของโซเดียมซัลไฟด์ในภาชนะมีฝาปิด
เป็นเวลา 1 , 2 ,3 และ 4 ชั่วโมง
- 3.5.5.4 นำชิ้นงานหลังการทดสอบการหมอง ไปชั่งน้ำหนัก แล้ววัดค่าความสว่าง
และค่าสีของชิ้นงาน
- 3.5.5.5 นำค่าต่างๆ ที่ได้มาคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงของสีผิวชิ้นงานของแต่ละชุด
ตัวอย่างแล้วนำมาสรุปผล

3.5.6 การทดสอบแรงดึง

ตัดชิ้นงานแล้วนำไปกลึงทำ Specimens ให้มีขนาดตามมาตรฐาน ASTM E8M – 96 ดังรูป

ที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงชิ้นทดสอบแรงดึง

นำชิ้นทดสอบแรงดึงของแต่ละชุดส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิง มาทำการทดสอบแรงดึงเพื่อ
หาค่าต่าง ๆ คือ ค่าแรงดึงสูงสุด ,ค่าแรงดึงที่จุดคราก และเปอร์เซ็นต์การเสียรูปหรือยืดตัวมาทำการ
เปรียบเทียบ และสรุปผล

บทที่ 4

รายงานผลการทดลอง

4.1 ส่วนผสมทางเคมีของเงินสเตอร์ลิงผสมภายหลังจากการหลอม และช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว

ในการหลอมได้ผลของส่วนผสมดังตารางที่ 4.1 และวัดช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวโดยใช้เครื่อง DTA ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางเดียวกัน

ตารางที่ 4.1 แสดงผลของส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงและช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว

| หมายเลข ชุด | เงิน (wt.%) | ทองแดง (wt.%) | ซิลิกอน (wt.%) | อินเดียม (wt.%) | จุดหลอม เหลว (°C) | จุดที่เริ่มมีการ ไหลตัว (°C) |
|----------------|----------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|------------------------------------|
| 1 | 92.39 | 6.90 | - | - | 853.8 | 917.0 |
| 2 | 92.57 | 6.26 | 0.11 | - | 858.7 | 908.5 |
| 3 | 92.32 | 5.57 | 0.09 | 0.53 | 856.2 | 907.4 |
| 4 | 92.55 | 5.16 | 0.09 | 1.09 | 865.9 | 909.7 |
| 5 | 92.62 | 4.23 | 0.10 | 1.60 | 856.5 | 911.3 |
| 6 | 92.11 | 3.76 | 0.11 | 2.13 | 876.7 | 915.2 |
| 7 | 92.56 | 5.88 | - | 1.03 | 859.4 | 903.8 |
| 8 | 92.58 | 5.17 | - | 2.09 | 850.2 | 902.0 |

จากตารางข้างต้น จะเห็นว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงผสมในแต่ละชุดส่วนผสม จะมีอุณหภูมิ ณ จุดหลอมเหลวในช่วงระหว่าง 850 – 876 °C และมีอุณหภูมิ ณ จุดหลอมเหลวสมบูรณ์ในช่วงระหว่าง 902 – 917 °C ซึ่งผลจากการวัดค่าจุดหลอมเหลวดังกล่าวจะได้กล่าวในหัวข้อการอภิปรายผลการทดลองต่อไป

ตารางที่ 4.2 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นตัวอย่างก่อนและหลังการหล่อ

| หมายเลขชุด | % โดยน้ำหนักส่วนผสมก่อนการหล่อ | | | | % โดยน้ำหนักส่วนผสมหลังการหล่อ | | | |
|------------|--------------------------------|------|------|------|--------------------------------|------|------|------|
| | Ag | Cu | Si | In | Ag | Cu | Si | In |
| 1 | 92.50 | 7.50 | - | - | balance | 6.90 | - | - |
| 2 | 92.50 | 7.00 | 0.50 | - | balance | 6.26 | 0.11 | - |
| 3 | 92.50 | 6.50 | 0.50 | 0.50 | balance | 5.57 | 0.09 | 0.53 |
| 4 | 92.50 | 6.00 | 0.50 | 1.00 | balance | 5.16 | 0.09 | 1.09 |
| 5 | 92.50 | 5.50 | 0.50 | 1.50 | balance | 4.23 | 0.10 | 1.60 |
| 6 | 92.50 | 5.00 | 0.50 | 2.00 | balance | 3.76 | 0.11 | 2.13 |
| 7 | 92.50 | 6.50 | - | 1.00 | balance | 5.88 | - | 1.03 |
| 8 | 92.50 | 5.50 | - | 2.00 | balance | 5.17 | - | 2.09 |

จากตารางที่ 4.2 สังเกตได้ว่า เงินสเตอร์ลิงบางชุดตัวอย่างจะมี % สัดส่วนโดยน้ำหนักของธาตุต่าง ๆ ในส่วนผสมเช่น Ag, Cu, In ภายหลังกการหลอมมากขึ้นกว่าก่อนที่จะทำการหล่อ ทั้งนี้เนื่องจากสัดส่วนของซิลิกอนภายหลังกการหลอมมีค่าลดลงมากถึง 0.39 – 0.41 % wt. โดยเหลือเพียง 0.09 – 0.11 % wt. จากเดิมที่เติมในชุดตัวอย่างที่ได้ผสมซิลิกอน 0.5% wt.

4.2 ผลสมบัติทางกล

4.2.1 ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness)

ทดสอบความแข็งโดยเครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ ใช้น้ำกด 1 กิโลกรัมเวลาทดสอบ 10 วินาที ได้ผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความแข็งของเงินสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิกอนและอินเดียมปริมาณต่างๆกัน

| หมายเลขชุด | %โดยน้ำหนักของส่วนผสมหลังการหล่อ | | | | ค่าความแข็ง (HV) |
|------------|----------------------------------|------|------|------|------------------|
| | Ag | Cu | Si | In | |
| 1 | balance | 6.90 | - | - | 58.1 |
| 2 | balance | 6.26 | 0.11 | - | 80.4 |
| 3 | balance | 5.57 | 0.09 | 0.53 | 76.8 |
| 4 | balance | 5.16 | 0.09 | 1.09 | 72.7 |
| 5 | balance | 4.23 | 0.10 | 1.60 | 66.0 |
| 6 | balance | 3.76 | 0.11 | 2.13 | 62.3 |
| 7 | balance | 5.88 | - | 1.03 | 55.7 |
| 8 | balance | 5.17 | - | 2.09 | 53.1 |

4.2.2 ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง ระบบอัตโนมัติ ขนาด 150 kN รุ่น series IX

U. Instron Corporation โดยกำหนด Tension Speed 5.00 mm./min ได้ผลดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบค่าแรงดึงและ%การยืด ตัวของ เงินสเตอร์ลิงแต่ละชุดส่วนผสม

| หมายเลขชุด | สัดส่วนธาตุที่พิจารณา | | Ultimate Stress (MPa) | 0.2% Offset Yield St(MPa) | % Elongation |
|------------|-----------------------|-----------|-----------------------|---------------------------|--------------|
| | Si (%wt.) | In (%wt.) | | | |
| 1 | - | - | 137.836 | 92.375 | 6.0 |
| 2 | 0.11 | - | 240.693 | 67.180 | 2.5 |
| 3 | 0.09 | 0.53 | 210.610 | 107.642 | 9.0 |
| 4 | 0.09 | 1.09 | 195.413 | 90.559 | 5.0 |
| 5 | 0.10 | 1.60 | 177.148 | 88.853 | 5.0 |
| 6 | 0.11 | 2.13 | 146.813 | 74.615 | 3.0 |
| 7 | - | 1.03 | 134.156 | 126.076 | 10.0 |
| 8 | - | 2.09 | 118.700 | 84.808 | 5.0 |

4.3 ผลการทดสอบการต้านทานการหมอง

ทำการตัดชิ้นงานขึ้นตัวอย่างที่ได้จากการหล่อเงินสเตอร์ลิงในแต่ละส่วนผสม ๆ ละ 4 ชิ้น ขนาดชิ้นละ 1 มม. ขัดจนถึงเบอร์ 1200 แล้วนำมาเจาะรู แขนงไว้ในภาชนะปิดที่ใส่สารละลายอิมมัวของ Na_2S เพื่อให้ขึ้นทดสอบอยู่ในบรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยทดสอบในช่วงเวลาแตกต่างกันคือ 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง แล้วนำมาวัดค่าสีโดยใช้เครื่อง Spectrophotometer ได้ค่าดัง ตารางที่ 4.5 ดังนี้

ตารางที่ 4.5 ค่า DE ของเงินสเตอร์ลิงในแต่ละส่วนผสม ที่เวลาทดสอบต่าง ๆ กัน

| หมายเลขชุด | สัดส่วนธาตุที่พิจารณา | | ค่า DE | | | |
|------------|-----------------------|-----------|--------|-------|-------|-------|
| | Si (wt.%) | In (wt.%) | 1ชม. | 2ชม. | 3ชม. | 4ชม. |
| 1 | - | - | 14.12 | 24.73 | 30.05 | 30.77 |
| 2 | 0.11 | - | 13.79 | 24.10 | 28.70 | 30.24 |
| 3 | 0.09 | 0.53 | 13.35 | 23.22 | 25.05 | 29.98 |
| 4 | 0.09 | 1.09 | 12.69 | 23.04 | 25.01 | 28.23 |
| 5 | 0.10 | 1.60 | 11.48 | 13.24 | 13.73 | 26.45 |
| 6 | 0.11 | 2.13 | 8.46 | 8.66 | 13.49 | 20.61 |
| 7 | - | 1.03 | 18.71 | 31.89 | 33.73 | 34.40 |
| 8 | - | 2.09 | 22.51 | 33.64 | 36.14 | 38.11 |

หมายเหตุ : ค่า DE คือค่าที่แสดงความแตกต่างระหว่างวัตถุ 2 ชิ้นที่มีการเปรียบเทียบค่าสีกัน

โดยคำนวณได้จากสูตร $DE^2 = (L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2$

- โดยที่
- 1.) ตัวเลข 1 หมายถึง ชิ้นงานก่อนที่ทำการทดสอบการหมอง
 - 2.) ตัวเลข 2 หมายถึง ชิ้นงานหลังจากทำการทดสอบการหมอง
 - 3.) ค่า L หมายถึงค่าLightness โดยค่า $L=0$ คือ มีดมืดมาก, $L=100$ คือสว่างมาก
 - 4.) ค่า a หมายถึง ค่าสีแดง - เขียว

โดยที่ ถ้าสีแดง ค่า b จะมีค่าเป็นบวกตั้งแต่ 0 ถึง 100

ถ้าสีเขียวค่า b จะมีค่าเป็นลบตั้งแต่ - 100 ถึง 0

- 5.) ค่า b หมายถึง ค่าสีเหลือง - น้ำเงิน

โดยที่ ถ้าสีเหลือง ค่า b จะมีค่าเป็นบวกตั้งแต่ 0 ถึง 100

ถ้าสีน้ำเงิน ค่า b จะมีค่าเป็นลบตั้งแต่ - 100 ถึง 0

โดยกรณีนี้นำมาประยุกต์ใช้กับการวัดความแตกต่างของสีจากวัตถุเดียวกัน แต่มีสีเปลี่ยนแปลงไป เช่นการหมองของเงินสเตอร์ลิงผสมซึ่งรายละเอียดได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก

อภิปรายและสรุปผลการทดลอง

อภิปรายผลการทดลอง

5.1 ส่วนผสมทางเคมี

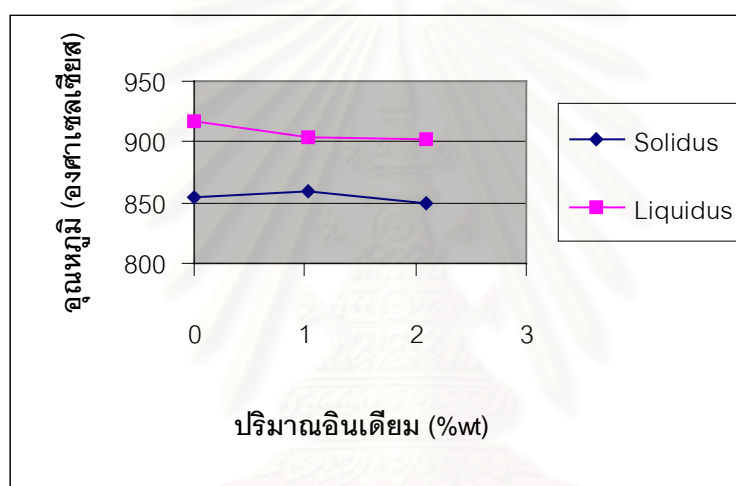
ผลของส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 4.2 ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างก่อนทำการหลอมและหลังทำการหลอม จะเห็นได้ว่าการสูญเสียของซิลิกอนในปริมาณที่สูง สำหรับชุดส่วนผสมที่ได้มีการเติมซิลิกอน 0.5 % โดยน้ำหนัก เนื่องจากสูญเสียปริมาณของซิลิกอนที่ออกไปในรูปของ slag หรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน กับอากาศที่อยู่โดยรอบขณะทำการหล่อ ทำให้ปริมาณของซิลิกอนเหลืออยู่น้อยกว่าที่ควรจะเป็น โดยปรากฏเหลือซิลิกอนเพียง 0.09 - 0.11 % โดยน้ำหนักเท่านั้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการสูญเสียปริมาณซิลิกอนด้วย เช่นเวลาที่ใช้ในการหลอม และอุณหภูมิที่ใช้หลอม เนื่องจากซิลิกอนมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่าเงิน (1410 °C) ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิในการหลอมสูงกว่าการหลอมเงินปกติ และใช้เวลานานกว่าจึงจะเกิดการหลอมละลายเข้าด้วยกันกับส่วนผสมอื่นในเงินสเตอร์ลิง ทำให้มีแนวโน้มที่ซิลิกอนจะทำปฏิกิริยากับอากาศภายนอก รวมทั้งธาตุอื่นเกิดเป็นตะกรันหรือ slag มากยิ่งขึ้น และทำให้สัดส่วนโดยน้ำหนักของธาตุอื่นๆที่เหลือภายหลังการหลอมมีปริมาณที่สูงขึ้นเล็กน้อย เมื่อเทียบกับชุดส่วนผสมเดียวกันก่อนทำการหล่อ เช่นในชุดส่วนผสม 5.57 % Cu – 0.09 % Si – 0.53 % In – balance of Ag ซึ่งมีปริมาณของ In ก่อนทำการหล่อเท่ากับ 0.5 % wt. แต่ภายหลังการหล่อแล้วปรากฏปริมาณของ In เท่ากับ 0.53 % wt.

แต่เนื่องจากเราต้องการศึกษาถึงอิทธิพลของอินเดียมที่มีผลต่อสมบัติด้านต่างๆของเงินสเตอร์ลิง คือสมบัติทางกล สมบัติด้านการต้านทานการหมอง และผลต่อจุดหลอมเหลวของเงินสเตอร์ลิง ดังนั้นเราจึงต้องทำการเปรียบเทียบโดยที่คงส่วนผสมของธาตุอื่น ๆ ที่เหลือให้คงที่เช่นเงินทองแดง และซิลิกอน

5.2 ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว

จากตารางที่ 4.1 ทราบได้ว่า ผลของอินเดียมต่อจุดหลอมเหลวของเงินสเตอร์ลิงผสมไม่สามารถสรุปผลการตรวจสอบได้อย่างแน่ชัด โดยหากทำการเปรียบเทียบระหว่างชุดส่วนผสมที่มีปริมาณส่วนผสมของเงินและทองแดงใกล้เคียงกัน แต่มีการผสมปริมาณอินเดียมแตกต่างกันไป จะเห็นได้ว่าจุดหลอมเหลว (จุด solidus) ของเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากชุดส่วนผสมทั้ง 3 ชุด มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งไม่สามารถสรุปถึงความแตกต่างได้อย่างชัดเจน เนื่องจากปริมาณของอินเดียมที่เติมลงไปมีปริมาณที่น้อย จึงไม่สามารถสังเกตเห็นถึงความเปลี่ยนแปลงของจุดหลอมเหลวของแต่ละชุดส่วนผสมได้ชัดเจน ซึ่งโดย

ทั่วไปเงินสเตอร์ลิง (92.5 % Ag – 7.5 % Cu) จะมีค่า Liquidus อยู่ระหว่าง 810 – 890 °C โดยการประมาณจากแผนภูมิสมมูล 2 เฟส (Ag –Cu) ในรูปที่ 2.1 แต่เนื่องจากการทดลองทำการหล่อไม่สามารถควบคุมให้การแข็งตัวของน้ำโลหะเป็นไปอย่างสมมูลได้ ผลจึงทำให้เงินสเตอร์ลิงมีค่า Liquidus ระหว่าง 853.8 – 917 °C และมีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวเท่ากับ 63.2°C ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสถานะสมมูล และเมื่อพิจารณาที่จุดหลอมเหลวสมบูรณ์ หรือ Liquidus จะพบว่า ชุดส่วนผสม 5.88 % Cu – 1.03 % In – balance of Ag และ ชุดส่วนผสม 5.17 % Cu – 2.09 % In – balance of Ag ที่ผสมอินเดียม 1.03 และ 2.09 % wt. ตามลำดับ จะมีจุดหลอมเหลวสมบูรณ์ต่ำกว่า ชุดส่วนผสม 6.09 % Cu – balance of Ag ซึ่งเป็นเงินสเตอร์ลิงธรรมดา โดยสามารถสังเกตความแตกต่างได้อย่างชัดเจน ดังกราฟรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอินเดียมกับช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว สำหรับชุดส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่ไม่มีปริมาณซิลิคอนผสมอยู่

จากกราฟรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่า จุดหลอมเหลวของชุดส่วนผสมที่มีอินเดียมผสมอยู่ 0 - 2.09 % wt. จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่สำหรับถ้าพิจารณาจุดหลอมเหลวสมบูรณ์กับชุดส่วนผสมชุดดังกล่าวจะพบความแตกต่างกันอย่างชัดเจน กล่าวคือปริมาณของอินเดียมตั้งแต่ 1.03 % wt. ขึ้นไป จะมีผลทำให้เงินสเตอร์ลิงมีอุณหภูมิ ณ จุดหลอมเหลวสมบูรณ์ (Liquidus) ลดลง โดยแปรผกผันกับปริมาณของอินเดียมที่เติมลงไป หมายถึงว่าหากมีการเติมอินเดียมลงในเงินสเตอร์ลิงมากขึ้น จะส่งผลให้อุณหภูมิ ณ จุดหลอมเหลวสมบูรณ์ลดลงยิ่งขึ้น สิ่งนี้ทำให้ทราบถึงสมบัติของอินเดียมที่มีต่อเงินสเตอร์ลิงประการหนึ่งคือ อินเดียมจะมีผลต่อการไหลตัวของโลหะหลอมเหลวขณะทำการหล่อ โดยถ้ามีการเติมอินเดียมในปริมาณ 1.03 % wt. ขึ้นไปจะส่งผลให้จุดที่เริ่มมีการไหลตัว (Liquidus) ของเงินสเตอร์ลิงผสมมีค่า

ลดลง ทำให้สามารถลดอุณหภูมิในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ ซึ่งจะเป็นการประหยัดต้นทุนในการผลิตได้เป็นอย่างดี

แต่สำหรับชุดส่วนผสมที่มีซิลิกอนเป็นส่วนผสมจะพบว่า ชุดส่วนผสมดังกล่าวที่มีปริมาณของซิลิกอนใกล้เคียงกัน (0.09 - 0.11 % wt.) เมื่อมีการเติมอินเดียมลงไปปริมาณแตกต่างกันในแต่ละชุดส่วนผสม ผลที่ได้จะมีจุดหลอมเหลวไม่ต่างกันมากนัก แต่จะมีจุดหลอมเหลวสมบูรณ์ซึ่งมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับชุดส่วนผสมที่มีการเติมซิลิกอนแต่ไม่เติมอินเดียม โดยสังเกตพบเมื่อตั้งเตาที่มีการผสมอินเดียมตั้งแต่ 0.53 % wt ขึ้นไป แต่ค่าของอุณหภูมิ ณ จุดหลอมเหลวสมบูรณ์จะมีค่าไม่แตกต่างกันนัก (2 - 3 °C) สำหรับชุดส่วนผสมที่มีอินเดียมผสมอยู่ 0.53 - 1.60 % wt. กล่าวคือสำหรับเงินสเตอร์ลิงที่มีซิลิกอนผสมอยู่ระหว่าง 0.09 - 0.11 % wt เมื่อมีการเติมอินเดียมลงไปด้วยอัตราส่วนผสมระหว่าง 0.53 - 1.60 % wt. จะมีผลต่อจุดหลอมเหลวและจุดหลอมเหลวสมบูรณ์ของเงินสเตอร์ลิงน้อยมาก เมื่อเทียบกับชุดส่วนผสมที่ไม่มีการเติมอินเดียมแต่เติมซิลิกอนในปริมาณใกล้เคียงกัน (0.09 - 0.11 % wt.) คือมีค่าอุณหภูมิหลอมเหลวระหว่าง 907 - 911 °C แต่เมื่อเทียบกับเงินสเตอร์ลิงธรรมดา (ชุดส่วนผสม 6.09 % Cu - balance of Ag) พบว่า ชุดส่วนผสมที่มีอินเดียมผสมอยู่ 0.53 - 1.60 % wt. จะมีจุดหลอมเหลวสมบูรณ์ต่ำกว่า และสำหรับชุดส่วนผสม 3.76 %Cu - 0.11 %Si - 2.13 %In - balance of Ag ที่มีอินเดียมผสมอยู่ 2.13 % จะมีจุดหลอมเหลวสูงขึ้นเมื่อเทียบกับชุดอื่น ๆ โดยเฉพาะชุดส่วนผสมที่เป็นเงินสเตอร์ลิงธรรมดาพบว่า ชุดส่วนผสม 3.76 %Cu - 0.11 %Si - 2.13 %In - balance of Ag มีค่าจุดหลอมเหลวสูงขึ้นมา ซึ่งข้อมูลนี้ยังไม่สามารถยืนยันผลการตรวจสอบได้ เนื่องจากมีค่าไม่สอดคล้องกับการทดลองของ Wood และ Lipowitz⁽⁴⁾ ซึ่งพบว่า การเติมธาตุอินเดียมในโลหะผสมส่วนใหญ่ จะช่วยให้ลดจุดหลอมเหลวของโลหะผสมนั้นได้ แต่ถึงแม้ Wood จะไม่ได้กล่าวถึงเงินสเตอร์ลิงก็ตามแต่จากการตรวจสอบชุดส่วนผสมอื่นๆก็จะมีแนวโน้มเป็นไปตามที่ Wood กล่าวไว้ทั้งสิ้น ยกเว้นแต่ชุดส่วนผสม 3.76 %Cu - 0.11 %Si - 2.13 %In - balance of Ag เท่านั้น ซึ่งจุดสังเกตอีกอย่างหนึ่งสำหรับชุดส่วนผสมนี้ก็คือว่า ปริมาณส่วนผสมของซิลิกอน จะเท่ากับ 0.11% wt. ซึ่งแม้จะมีค่าใกล้เคียงกันกับชุดส่วนผสมอื่นๆที่ผสมของซิลิกอน แต่ก็มีค่าสูงที่สุด ซึ่งสิ่งนี้อาจมีผลทำให้ค่าจุดหลอมเหลวไม่เป็นไปตามที่คาดไว้ได้เช่นกัน

5.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

จากรูปที่ 5.2 ซึ่งได้จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโดยยังไม่ได้ทำการกัดกรดพบว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากการผสมซิลิกอนและอินเดียมในปริมาณต่าง ๆ กัน โดยผ่านกระบวนการหล่อขึ้นรูปในสภาวะบรรยากาศมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ ซึ่งหากพิจารณาการกระจายตัวของเฟสต่างๆที่สังเกตได้จากภาพกำลังขยายเท่ากัน ($\times 100$) พบว่าในเงินสเตอร์ลิงธรรมดาที่ไม่มีการผสมซิลิกอนและอินเดียม (ชุดส่วนผสม 6.9 % Cu - balance of Ag) (รูป 5.2) จะปรากฏโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนผสมหลัก 2 เฟส คือ โครงสร้างพื้น (Matrix) ที่เป็น

Ag rich – Solid Solution (α -phase) โดยจาก EDX (ในภาคผนวก จ) พบว่าสัดส่วนโดยน้ำหนักของ Ag : Cu เป็น 94.08 % : 5.92 % ซึ่งจะเป็นบริเวณภายใน Dendrite ที่เป็นแถบสีขาวในรูป 5.2 (ก) ส่วนเฟสที่ปรากฏเป็นแถบสีเทาบริเวณช่องว่างระหว่าง Dendrite คือ เฟสยูเทคติก ซึ่งประกอบด้วย Ag rich – Solid Solution (α - phase) กับ Cu rich – Solid Solution (β - phase) นอกจากนี้ จากภาพกำลังขยายที่มากขึ้น (x 3500) จากรูปที่ 5.2 (ข) จะพบ Secondary Structure ที่มีลักษณะเป็นก้อนสีดำกระจายอยู่บ้างเล็กน้อย ซึ่งปรากฏอยู่บริเวณขอบนอกของ Dendrite arms ซึ่งพบปริมาณของธาตุต่าง ๆ ใน Particle ดังกล่าวจาก EDX ดังนี้คือ Ag : Cu = 71.86 : 28.14 % wt. โดยสังเกตว่าจะมีปริมาณของทองแดงผสมอยู่สูงกว่าบริเวณอื่น และจากกำลังขยายที่สูงขึ้นนี้จะสังเกตเห็นลักษณะของ Irregular Eutectics ที่มีลักษณะเป็นแถบสีขาวสลับดำที่มีลักษณะการวางตัวกระจกระบายโดยมีทิศทางขึ้นกับ Solid Phase ที่มีการแข็งตัวบริเวณดังกล่าว นอกจากนี้ยังพบ Interdendritic Shrinkage กระจายอยู่เล็กน้อยโดยเฉพาะด้านล่างของรูป 5.2 (ก)

สำหรับเงินสเตอร์ลิงจากชิ้นงานหล่อที่ได้มีการผสมซิลิคอนหรือ อินเดียม หรือทั้งสองธาตุ จะพบลักษณะโครงสร้างเป็นเดนไดรต์เช่นเดียวกับกรณีของเงินสเตอร์ลิงธรรมดา แต่จะสังเกตพบปริมาณของ Secondary Structure ที่มีการกระจายตัวหนาแน่นกว่าอย่างชัดเจน โดยมีขนาดและรูปร่างต่างๆในแต่ละชิ้นตัวอย่างที่มีปริมาณของธาตุผสมที่แตกต่างกัน โดยสามารถพิจารณาได้ดังนี้

5.3.1 กลุ่มของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากการหล่อชนิดที่ผสมซิลิคอน 0.11 % wt. ได้แก่ชุดส่วนผสม 6.26 % Cu – 0.11 % Si – balance of Ag พบว่าโครงสร้างพื้น (Matrix) เป็น Ag rich – Solid Solution ซึ่งปรากฏอยู่บริเวณภายใน Dendrite ที่เป็นแถบสีขาว ดังรูป 5.2 (ค) ซึ่งจาก EDX พบปริมาณสัดส่วนของธาตุ ๆ ดังนี้ คือ Ag : Cu : Si = 95.79 : 4.16 : 0.05 % wt. และสังเกตได้ว่าปริมาณของ Secondary Structure จะพบมากกว่าในเงินสเตอร์ลิงธรรมดา โดยมีรูปร่างแตกต่างกัน (Irregular Shape) ซึ่งจากการทำ EDX ที่ภายในบริเวณที่เป็นสีดำที่มีรูปร่างโค้งยาวดังรูป 5.2 (ง) จะพบปริมาณสัดส่วนของธาตุต่างๆเป็น Cu : Ag : Si = 92.49 : 2.93 : 4.58 % wt. โดยสังเกตว่าจะมีปริมาณของทองแดงผสมอยู่สูงเป็นหลักคือ 92.49 % และมีปริมาณของซิลิคอนสูงกว่าบริเวณที่เป็นโครงสร้างพื้นมาก แสดงว่าซิลิคอนที่มีปริมาณสูงนี้สามารถรวมตัวกับทองแดงโดยอยู่ภายใน Secondary Structure ได้มากกว่าในสารละลายของเงิน (α - phase)

5.3.2 กลุ่มของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากการหล่อชนิดที่ผสมซิลิกอนในปริมาณใกล้เคียงกัน (0.09 – 0.11 % wt.) และผสมธาตุอินเดียมในปริมาณต่าง ๆ กัน (0.53 – 2.13 %wt.)

5.3.2.1 ชิ้นงานสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิกอน 0.09%wt. และอินเดียม 0.53 %wt. ได้แก่ชุดส่วนผสม 5.57 % Cu – 0.09 % Si – 0.53 % In – balance of Ag จากรูปที่ 5.2 (จ) พบว่ามีการกระจายตัวของ Secondary Structure อยู่ทั่วไป คล้าย ๆ กับของชุดส่วนผสม 6.26 % Cu – 0.11 % Si – balance of Ag ที่มีการเติมเฉพาะซิลิกอน โดยมีรูปร่างของ Secondary Structure เป็น Irregular Shape และจาก EDX พบปริมาณของธาตุผสมต่าง ๆ ใน Matrix (แถบขาว) เป็น Ag : Cu : Si = 96.82 : 3.52 : 0.11 %wt. ส่วน In ปรากฏอยู่น้อยมากจนไม่น่ามาคิดและจากลักษณะ Secondary Structure ดังที่รูปที่ 5.2 (จ) จะเห็นโครงสร้างยูเทคติกอยู่ภายใน ซึ่งเมื่อตรวจสอบปริมาณธาตุผสมภายในโครงสร้างที่พบดังกล่าวจาก EDX พบว่ามีสัดส่วนของธาตุผสม Ag : Cu : Si = 73.09 : 27.35 : 0.06 %wt. โดย In มีปริมาณน้อยมาก ซึ่งพบว่ามีปริมาณของทองแดงสูงกว่า และมีปริมาณของซิลิกอนน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ Matrix

5.3.2.2 ชิ้นงานสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิกอน 0.09 % wt. และอินเดียม 1.09 % wt. ได้แก่ชุดส่วนผสม 5.16 % Cu – 0.09 % Si – 1.09 % In – balance of Ag จากรูปที่ 5.2 (ข) พบว่ามีการกระจายตัวของ Secondary Structure อยู่ทั่วเนื้อพื้น (Matrix) และจาก EDX พบปริมาณของธาตุผสมต่าง ๆ ใน Matrix (แถบขาว) เป็น Ag : Cu : Si = 96.24 : 3.65 : 0.12 %wt ส่วน In ปรากฏอยู่น้อยมาก และจาก Secondary Structure ที่ปรากฏดังรูปที่ 5.2 (ข) บริเวณที่เป็นก้อนกลมสีดำนั้นจาก EDX พบว่ามีสัดส่วนของธาตุผสม Cu : Ag : Si : In = 51.79 : 44.55 : 3.53 : 0.13 % wt. ซึ่งพบว่าจะมีปริมาณของทองแดง, ซิลิกอน และอินเดียม มากกว่าที่ปรากฏอยู่ใน Matrix

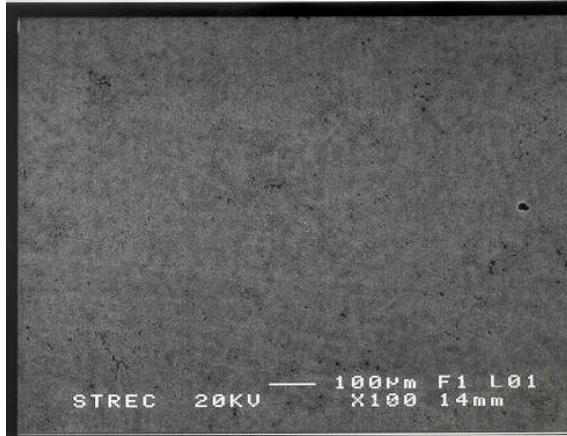
5.3.2.3 ชิ้นงานสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิกอน 0.10 % wt. และอินเดียม 1.60 % wt. ได้แก่ชุดส่วนผสม 4.23 % Cu – 0.10 % Si – 1.6 % In – balance of Ag จากรูปที่ 5.2 (ฉ) พบว่า Secondary Structure กระจายตัวอยู่อย่างหนาแน่นทั่วเนื้อพื้น จาก EDX พบปริมาณของธาตุผสมใน Matrix (แถบขาว) เป็น Ag : Cu : Si : In = 94.72 : 3.50 : 0.06 : 1.71 % wt. และจาก Secondary Structure ที่ปรากฏอยู่ดังรูปที่ 5.2 (ฉ) จาก EDX ตรวจสอบปริมาณธาตุผสมบริเวณก้อนสีดำนี้อาจได้ Ag : Cu : Si : In = 55.48 : 40.96 : 1.79 : 1.77 %wt.

5.3.2.4 ชิ้นงานสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิกอน 0.11 % wt. และอินเดียม 2.13 % wt. ได้แก่ชุดส่วนผสม 3.76 % Cu – 0.11 % Si – 2.13 % In – balance of Ag จากรูปที่ 5.2 (ง) พบว่า Secondary Structure มีการกระจายตัวอยู่ในปริมาณคล้ายๆกับกรณีชิ้นงานที่ผสมอินเดียม 1.60 %wt. จาก EDX พบปริมาณของธาตุผสมใน Matrix (แถบขาว) เป็น Ag : Cu : Si : In = 93.55 : 4.85 : 0.15 : 1.45 % wt. และจากภาพกำลังขยายสูง ๆ (x 3500) ดังรูปที่ 5.2 (ง) พบว่าใน Secondary Structure จะปรากฏโครงสร้างของยูเทคติกอยู่ภายใน โดยจาก EDXพบว่า บริเวณแถบขาว ๆ ในยูเทคติกมีปริมาณสัดส่วนของธาตุผสม Ag : Cu : Si : In = 93.22 : 4.33 : 0.08 : 2.37 % wt. และบริเวณที่เป็นแถบดำ ๆ ในยูเทคติกมีปริมาณสัดส่วนของธาตุผสม Ag : Cu : Si : In = 58.60 : 38.14 : 1.19 : 2.17 % wt.

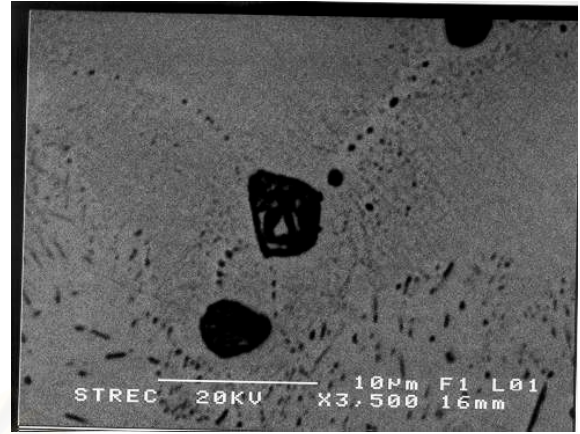
5.3.3 กลุ่มของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากการหล่อชนิดที่ผสมเฉพาะอินเดียม

5.3.3.1 ชิ้นงานสเตอร์ลิงที่ผสมอินเดียม 1.03 %wt. ได้แก่ชุดส่วนผสม 5.88 % Cu – 1.03 % In – balance of Ag จากรูปที่ 5.2 (ฐ) พบว่า Secondary Structure มีการกระจายตัวอยู่ทั่วไปอย่างหนาแน่น จาก EDX ตรวจสอบปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างพื้น (Matrix) พบว่ามีสัดส่วนของธาตุผสม Ag : Cu : In = 94.63 : 5.11 : 0.26 %wt. และจากกำลังขยายสูง ๆ ดังรูปที่ 5.2 (ฑ) พบว่าลักษณะรูปร่างของ Secondary Structure จะมีทั้งแบบยาวรีและค่อนข้างกลม โดยมีโครงสร้างยูเทคติกอยู่ภายใน และจาก EDX พบว่าปริมาณสัดส่วนของธาตุผสมบริเวณที่เป็นแถบสีดำ Ag : Cu : In = 60.83 : 38.73 : 0.44 %wt.

5.3.3.2 ชิ้นงานสเตอร์ลิงที่เติมอินเดียม 2.0 % ได้แก่ชุดส่วนผสม 5.17 %Cu – 2.09 %In – balance of Ag) จากรูปที่ 5.2 (ฒ) พบว่าการกระจายตัวของ Secondary Structure ค่อนข้างหนาแน่น โดยมีขนาดเล็กละเอียด จากการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมโดย EDX ที่โครงสร้างพื้น (Matrix) พบว่ามีสัดส่วนของธาตุผสม Ag : Cu : In = 94.83 : 4.08 : 1.09 %wt. และจากกำลังขยายสูง ๆ ดังรูปที่ 5.2 (ณ) พบ Secondary Structure ที่มีลักษณะกลมปรากฏ โครงสร้างยูเทคติกอยู่ภายใน โดยมีปริมาณสัดส่วนของธาตุต่างๆบริเวณที่เป็นแถบสีดำ Ag : Cu : In = 62.91 : 35.77 : 1.32 % wt. โดยพบว่าปริมาณสัดส่วนของทองแดงและอินเดียมมีอยู่สูงกว่าโครงสร้างพื้น



5.2 (ก)

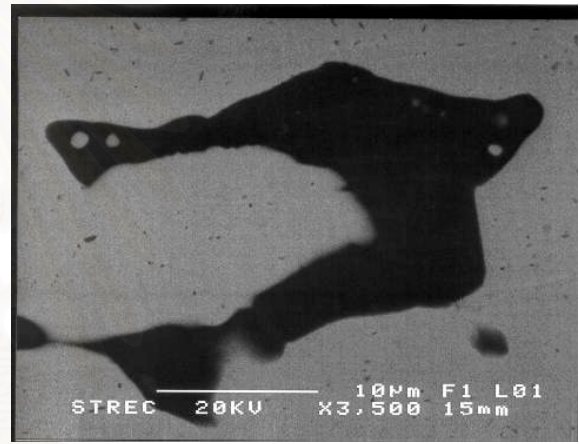


5.2 (ข)

ชุดส่วนผสม 6.9%Cu – balance of Ag

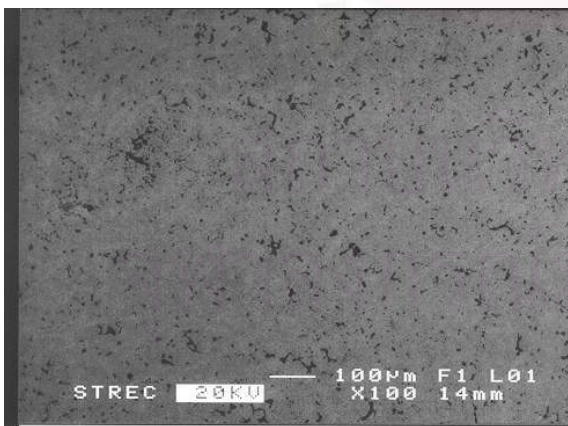


5.2 (ค)

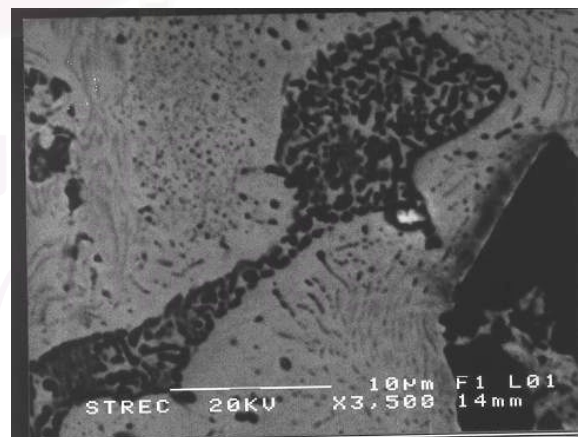


5.2 (ง)

ชุดส่วนผสม 6.26%Cu-0.11%Si– balance of Ag



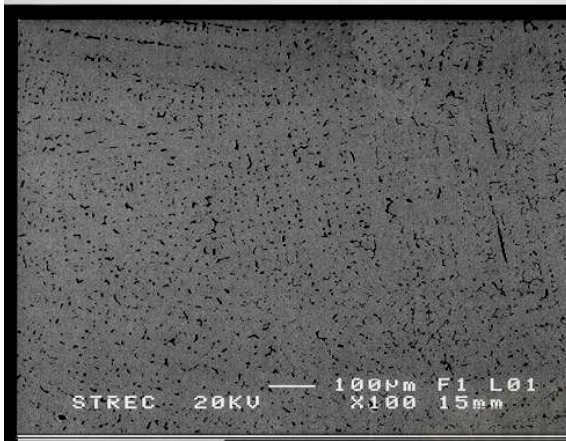
5.2 (จ)



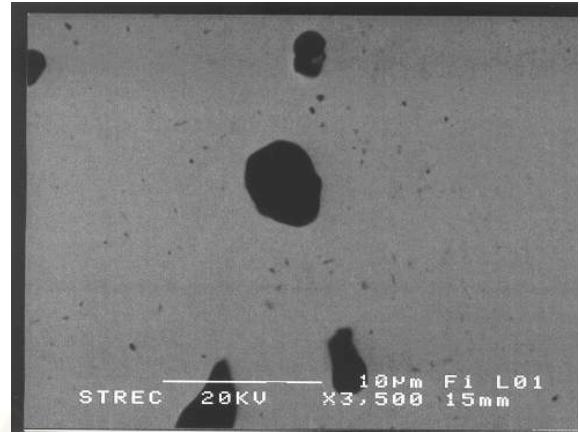
5.2 (ฉ)

ชุดส่วนผสม 5.57%Cu-0.09%Si-0.53%In– balance of Ag

รูปที่ 5.2 ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงของแต่ละชุดส่วนผสมที่กำลังขยายต่างๆ

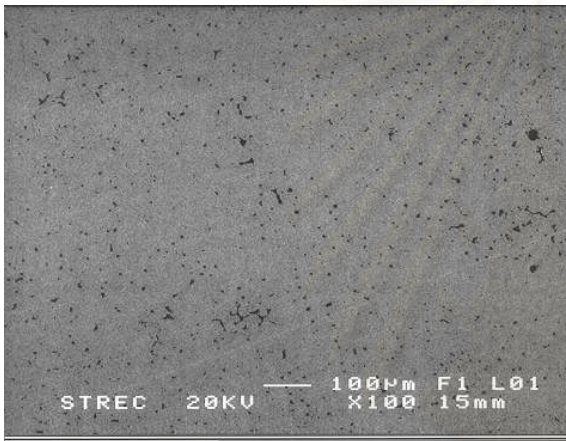


5.2 (ซ)

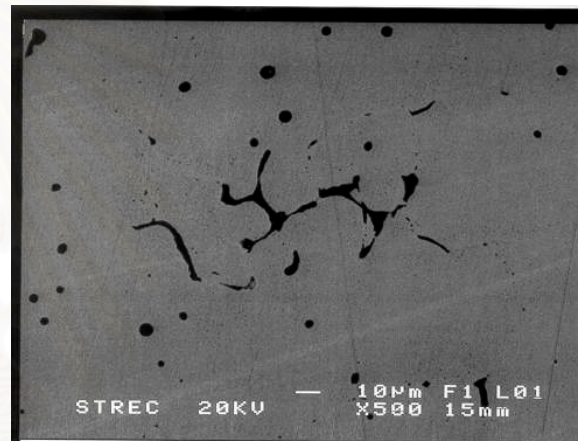


5.2 (ซ)

ชุดส่วนผสม 5.16%Cu-0.09%Si-1.09%In – balance of Ag

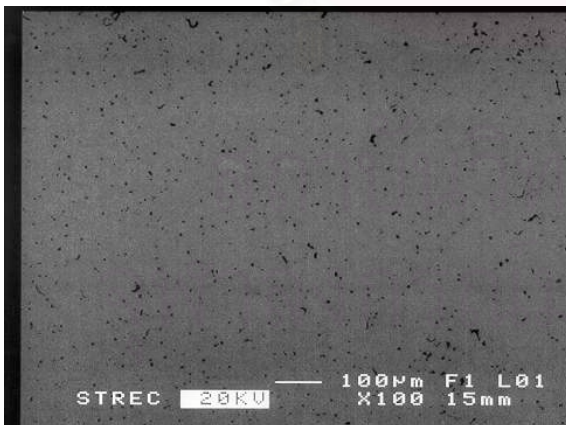


5.2 (ฅ)

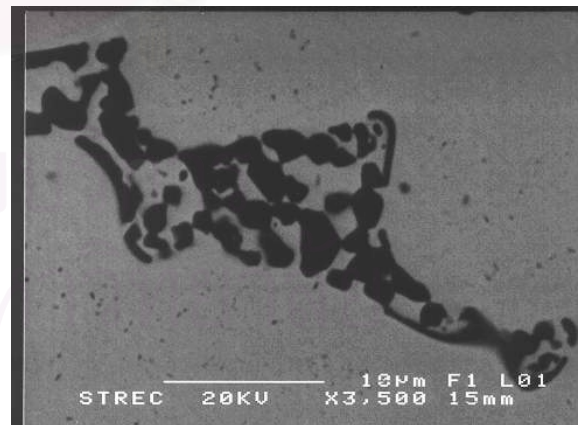


5.2 (ฅ)

ชุดส่วนผสม 4.23%Cu-0.10%Si-1.60%In – balance of Ag



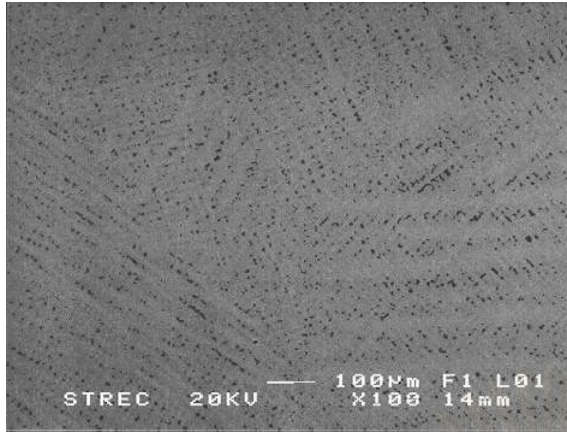
5.2 (ฎ)



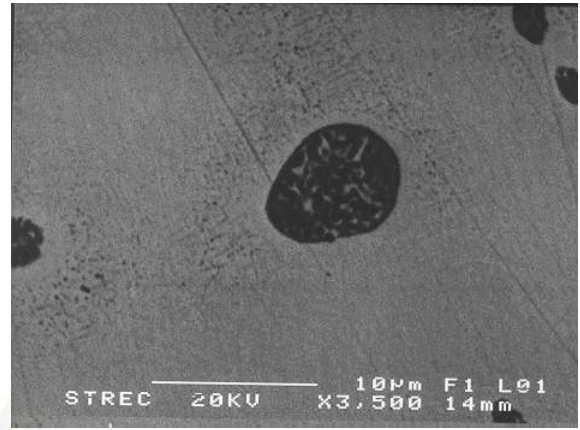
5.2 (ฎ)

ชุดส่วนผสม 3.76%Cu-0.11%Si-2.13%In – balance of Ag

รูปที่ 5.2 (ต่อ) ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงของแต่ละชุดส่วนผสมที่กำลังขยายต่างๆ

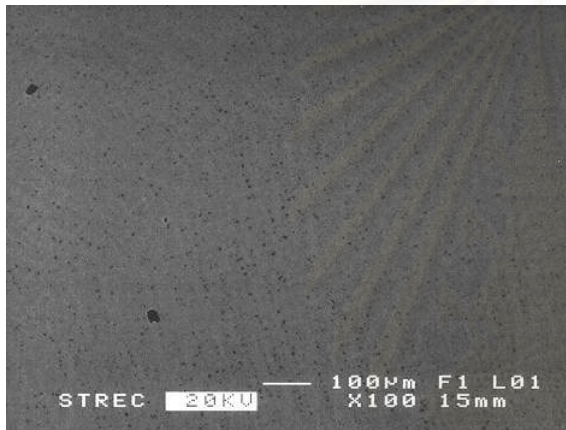


5.2 (จ)

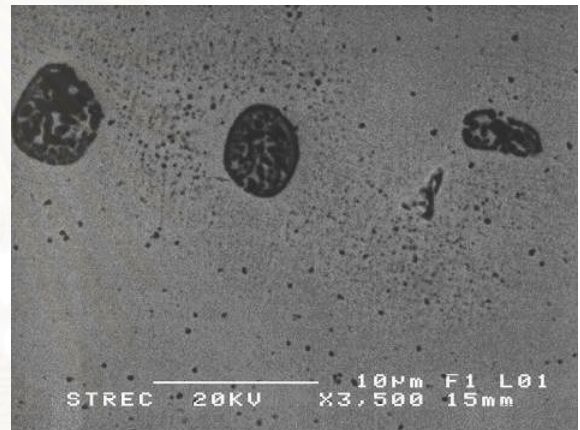


5.2 (ข)

ชุดส่วนผสม 5.88%Cu-1.03%In – balance of Ag

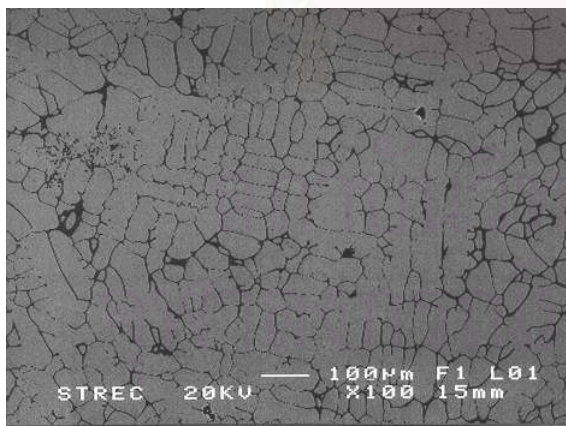


5.2 (ค)

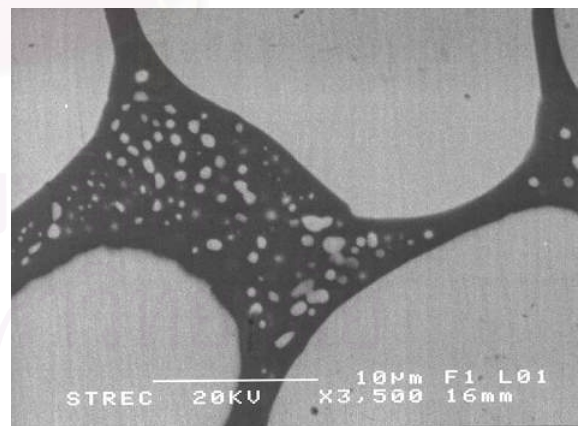


5.2 (ง)

ชุดส่วนผสม 5.17%Cu-2.09%In – balance of Ag



5.2 (ด)



5.2 (ต)

ชุดส่วนผสม 5.13%Cu-0.44%Si-2.12%In – balance of Ag

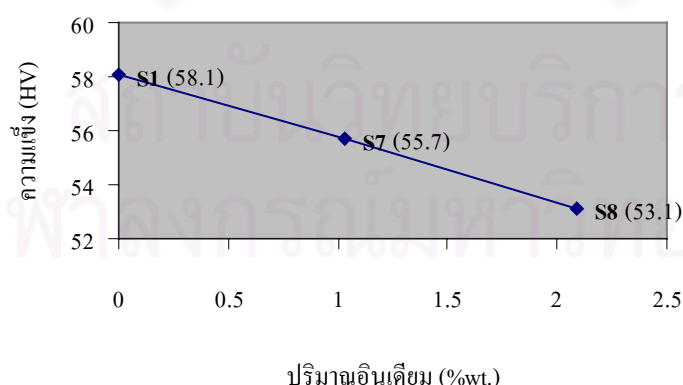
รูปที่ 5.2 (ต่อ) ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงของแต่ละชุดส่วนผสมที่กำลังขยายต่างๆ

5.4 ผลการตรวจสอบขนาดของเดนไดรต์

จากรูปที่ ข 1 – ข 2 ในภาคผนวก ข ซึ่งได้จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากการผสมซิลิคอนและอินเดียมในปริมาณต่างๆกันโดยใช้สารละลาย H_2O_2 25 % + NH_2OH 25 % + H_2O 50 % ในการกัดเพื่อให้เห็นโครงสร้างของเดนไดรต์ได้ชัดเจนขึ้น ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์ขนาดของเดนไดรต์ที่ปรากฏ เพื่อนำมาใช้อธิบายถึงสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิงในแต่ละชุดส่วนผสมได้ โดยหากพิจารณาชุดส่วนผสมที่เป็นเงินสเตอร์ลิงธรรมดา ได้แก่ชุดส่วนผสม 6.9 % Cu – balance of Ag เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับชุดส่วนผสมที่มีการผสมซิลิคอนลงไปด้วยได้แก่ชุดส่วนผสม 6.26 % Cu - 0.11 % Si – balance of Ag พบว่ามีขนาดของเดนไดรต์ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ ข 1 และหากทำการเปรียบเทียบระหว่างชุดตัวอย่างที่เป็นเงินสเตอร์ลิงธรรมดา คือ ชุดส่วนผสม 6.9 % Cu – balance of Ag) กับชุดส่วนผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีการเติมอินเดียมได้แก่ ชุดส่วนผสม 5.88 % Cu – 1.03 % In – balance of Ag) และชุดส่วนผสม 5.17 % Cu – 2.09 % In – balance of Ag) พบว่าขนาดของเดนไดรต์จะมีขนาดใกล้เคียงกัน และถ้าหากทำการเปรียบเทียบระหว่างชุดส่วนผสมที่มีการเติมทั้งซิลิคอนและอินเดียมกับชุดส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่เติมเฉพาะซิลิคอน โดยคิดเทียบจากปริมาณซิลิคอนที่เหลืออยู่ใกล้เคียงกัน (0.09 – 0.11%) พบว่าขนาดของเดนไดรต์จะมีขนาดใกล้เคียงกันเช่นกัน

5.5 ด้านสมบัติทางกล

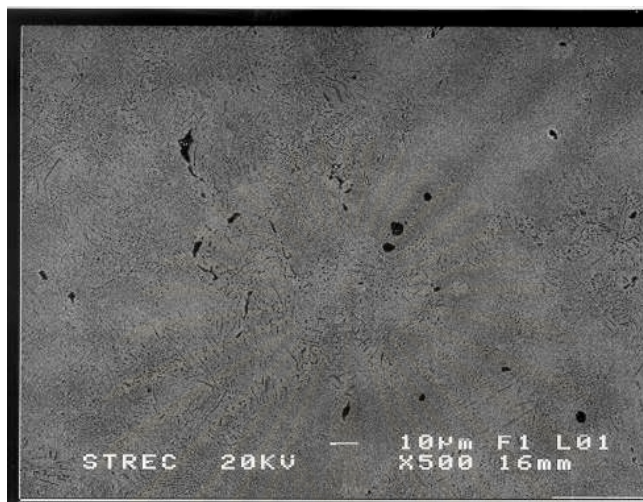
ในการทดลองครั้งนี้ได้ศึกษาสมบัติทางกล คือค่าความแข็ง และความต้านทานแรงดึงโดยจากข้อมูลในตารางที่ 4.3 นำมาวิเคราะห์ค่าความแข็งที่ได้โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนปริมาณของอินเดียมในเงินสเตอร์ลิงกับค่าความแข็งดังรูปที่ 5.3



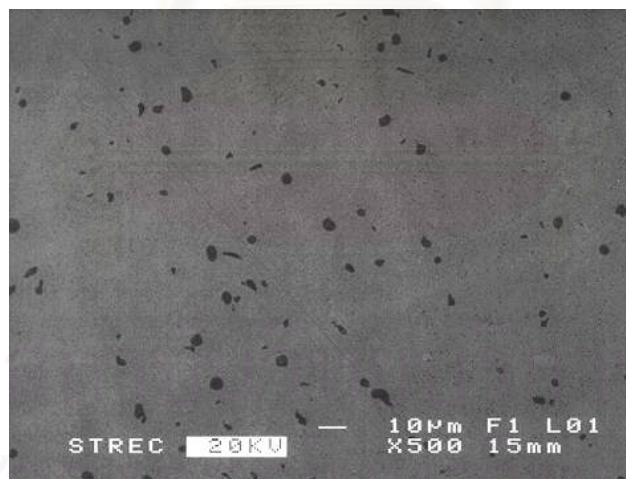
รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอินเดียม 0 – 2.09 %wt. กับค่าความแข็ง สำหรับชุดส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่ไม่เติมซิลิคอน

จากรูปที่ 5.3 พบว่า ค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิง (ที่ไม่เติมซิลิคอน) จะแปรผกผันกับปริมาณอินเดียมที่เติมลงไป กล่าวคือเงินสเตอร์ลิงจะมีความแข็งลดลง ตามปริมาณของอินเดียมที่ผสมลงไปในช่วงระหว่าง 0 – 2.09 % โดยน้ำหนัก เนื่องจากได้ลดสัดส่วนของทองแดงในการหล่อลงจากการเติมอินเดียมลงไปแทนที่ พร้อมกันนั้นทองแดงในเนื้อพื้นได้แยกตัวออกมารวมตัวกับอินเดียมใน Secondary Structure มากขึ้นจึงทำให้เงินสเตอร์ลิงมีความแข็งลดลง ซึ่งหากพิจารณาถึงโครงสร้างจุลภาคจะสังเกตได้ว่าสัดส่วนผสมเงินสเตอร์ลิงธรรมดาที่ไม่ผสมซิลิคอน (6.09 %Cu – balance of Ag) เมื่อเทียบกับสัดส่วนผสมที่ไม่ผสมซิลิคอนแต่ผสมอินเดียม พบว่าผลของการเติมอินเดียมที่ไม่เท่ากันจะทำให้เกิด Solid Solution ที่มีปริมาณทองแดงและอินเดียมละลายอยู่ต่างกัน ซึ่งมีผลโดยตรงต่อขนาดรูปร่างและการกระจายตัวของ Secondary Structure ในเนื้อพื้น จากการพิจารณาข้อมูลดังกล่าวกับค่าความแข็งที่วัดได้ สามารถอธิบายได้จากรูปที่ 5.4 โดยสัดส่วนผสมที่เป็นเงินสเตอร์ลิงธรรมดาซึ่งไม่เติมธาตุอินเดียมนั้น จะมีส่วนที่เป็นโครงสร้าง ยูเทคติกกระจายตัวอยู่ทั่วไปในเนื้อพื้น นอกจากนี้ยังพบ Secondary Structure กระจายตัวอยู่บ้างแต่ไม่หนาแน่น ซึ่งจากการตรวจสอบปริมาณของธาตุผสมโดย EDX จะพบว่า Particle เหล่านี้จะมีปริมาณของทองแดงมากกว่าเนื้อพื้น คือมีสัดส่วนของ Ag : Cu เท่ากับ 71.86 : 5.92 % wt. เท่านั้น ซึ่งเชื่อได้ว่า Secondary Structure เหล่านี้จะมีส่วนสำคัญที่ทำให้โครงสร้างที่ได้มีความแข็งเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนที่มีการเติมอินเดียมลงไปได้แก่สัดส่วนผสม 5.88%Cu -1.03%In – balance of Ag และสัดส่วนผสม 5.17%Cu - 2.09%In – balance of Ag สามารถพบ Secondary Structure มีลักษณะกระจายตัวทั่วไปในเนื้อพื้นเช่นกัน แต่จากการใช้ EDX ตรวจสอบส่วนผสมของธาตุต่าง ๆ ใน Secondary Structure ดังกล่าวพบว่า จะมีปริมาณของอินเดียมและทองแดงสูงกว่าในเนื้อพื้นซึ่งกลับทำให้เงินสเตอร์ลิงมีความแข็งลดลงเนื่องจากทองแดงถูกแยกตัวออกมาอยู่ใน Secondary Structure มากขึ้นตามปริมาณอินเดียมที่ผสมลงไป โดยสำหรับสัดส่วนผสม 5.88 % Cu – 1.03 % In – balance of Ag จะมีสัดส่วนธาตุผสมใน Secondary Structure จาก EDX เป็น Ag : Cu : In เท่ากับ 60.83 : 28.73 : 0.44 % wt. ส่วนสัดส่วนผสม 5.17 % Cu – 2.09 % In – balance of Ag จะมีสัดส่วนของธาตุผสมใน Secondary Structure จาก EDX เป็น Ag : Cu : In เท่ากับ 62.91 : 35.77 : 1.32 %wt และหากเปรียบเทียบขนาดของเดนไดรต์จะพบว่ามิขนาดไม่ต่างกัน เนื่องจากอินเดียมมีปริมาณไม่มากพอที่จะเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจน สำหรับสัดส่วนผสมที่มีการเติมซิลิคอนลงไปได้แก่สัดส่วนผสม 6.26 % Cu - 0.11 % Si – balance of Ag จะพบปริมาณของ Secondary Structure มีการกระจายตัวอย่างหนาแน่นมากขึ้นเมื่อเทียบกับสัดส่วนที่เป็นเงินสเตอร์ลิงธรรมดา และจาก EDX พบว่า Secondary Structure เหล่านี้ จะมีปริมาณของทองแดงละลายอยู่มาก(เป็น Cu – rich phase) โดยมีสัดส่วนของ Cu : Ag : Si เป็น 92.94 : 2.93 : 4.58 % wt. ซึ่งจะเห็นได้จากสีของ Secondary Structure เหล่านี้จะเป็นสีออกแดงคล้ำซึ่งเป็นสีของทองแดงที่เป็นส่วนผสมหลัก ทำให้โครงสร้างที่ได้มีความแข็งแรงสูงและจากขนาดของเดนไดรต์พบว่าสัดส่วนผสมที่มีการเติมซิลิคอนลงไปจะมีขนาดเดนไดรต์ใกล้

เทียบกับจุดส่วนผสมที่เป็นเงินสเตอร์ลิงธรรมดา ซึ่งแสดงว่าความแข็งแรงของเงินสเตอร์ลิงเป็นผลจากปริมาณของทองแดงและซิลิกอนที่ละลายอยู่ใน Solid Solution และ Secondary Structure เท่านั้น

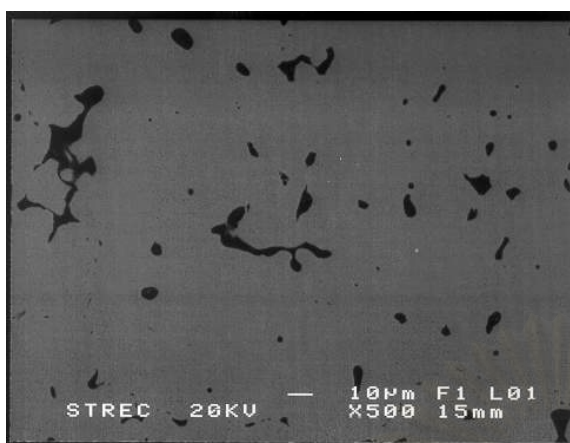


ก) ไม่ผสมอินเดียม

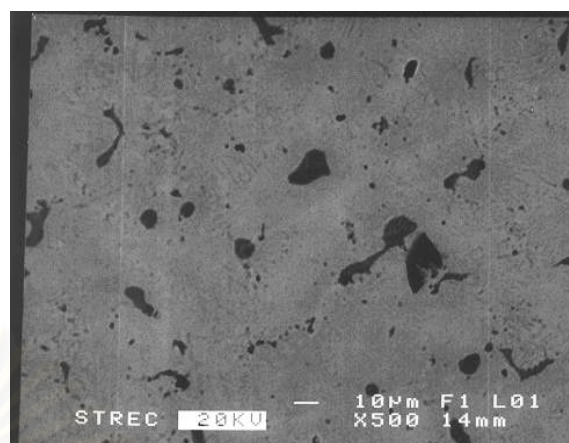


ข) ผสมอินเดียม 2.09%wt.

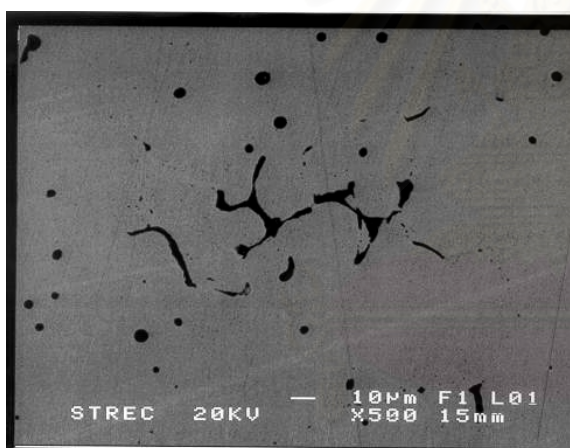
รูปที่ 5.4 ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณอินเดียมแตกต่างกัน



ก) Sterling + Si 0.11%wt.



ข) Sterling + Si 0.09%wt. + In 0.53%wt.



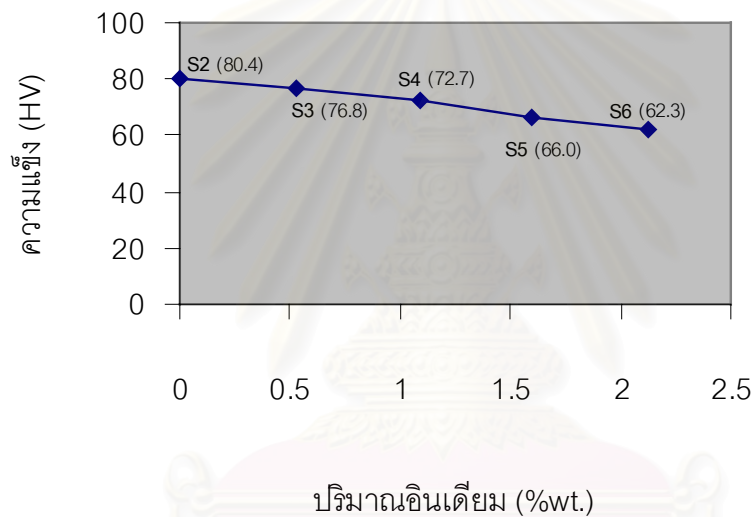
ค) Sterling + Si 0.10%wt. + In 1.60%wt.



ง) Sterling + Si 0.11%wt. + In 2.13%wt.

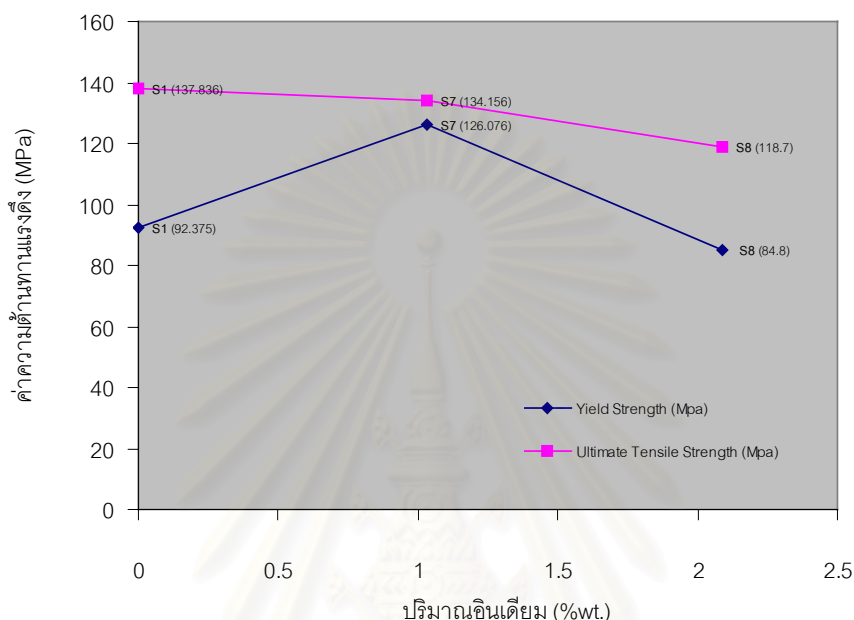
รูปที่ 5.5 ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณซิลิคอนใกล้เคียงกัน (0.09 – 0.11 % wt.) แต่มีปริมาณอินเดียมแตกต่างกัน (0 – 2.13 % wt.)

ส่วนชุดส่วนผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีการเติมทั้งอินเดียมและซิลิกอนเมื่อเทียบกับชุดส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่เติมเฉพาะซิลิกอน โดยคิดที่ปริมาณซิลิกอนที่เหลืออยู่ใกล้เคียงกัน (0.09- 0.11% wt.) ดังรูปที่ 5.5 พบว่าค่าความแข็งลดลงตามปริมาณอินเดียมที่ผสมลงไปในช่วงระหว่าง 0 – 2.13 % wt. เนื่องจากการลดสัดส่วนปริมาณของทองแดงในการหล่อลงจากการเติมอินเดียมลงไปแทนที่ และจากการที่ทองแดงและซิลิกอนได้แยกตัวออกไปอยู่ใน Secondary Structure ที่มีการกระจายตัวอย่างหนาแน่นมากขึ้นตามปริมาณของอินเดียมที่ผสมลงไปดังกราฟรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิกอนในปริมาณใกล้เคียงกัน (0.09-0.11% wt.) กับปริมาณของอินเดียมที่ผสมลงไประหว่าง 0 –2.13 % wt.

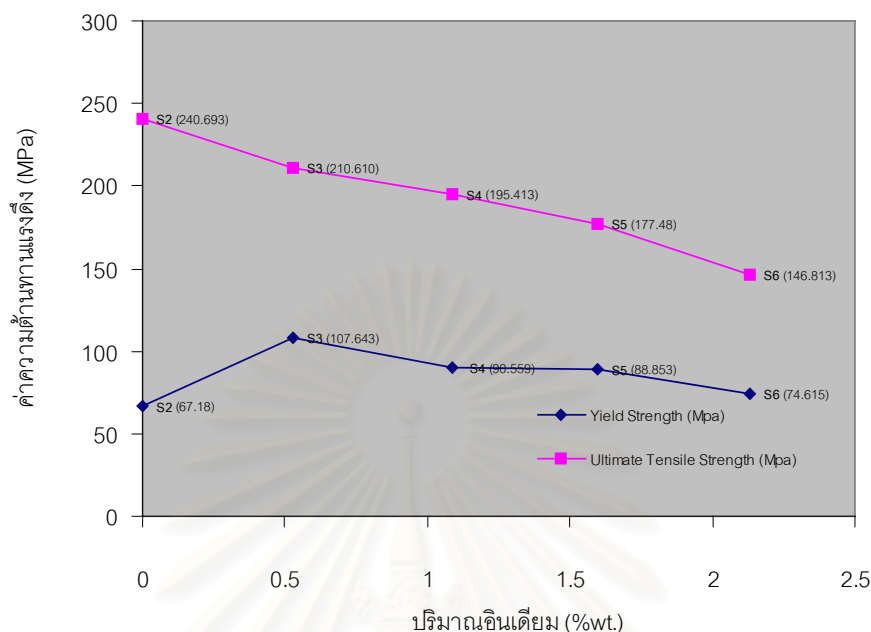
ทางด้านความต้านทานแรงดึงนั้นสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับ กรณีของค่าความแข็ง โดยเมื่อเปรียบเทียบ ระหว่างเงินสเตอร์ลิงธรรมดา กับเงินสเตอร์ลิง ที่มีการเติม อินเดียมจะ ได้ความสัมพันธ์ ระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก กับ ปริมาณอินเดียมที่เติม ดัง กราฟรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงค่า Ultimate Tensile Strength และ Yield Strength ของเงินสเตอร์ลิงที่เติมอินเดียมในปริมาณแตกต่างกันได้แก่ 0, 1.09 และ 2.13 %wt.

จากกราฟรูปที่ 5.7 สังเกตได้ว่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการผสมอินเดียมมากขึ้น แต่สำหรับความต้านทานแรงดึงที่จุดครากมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณอินเดียมที่ผสมในช่วงระหว่าง 1.03 – 2.09 % wt. แต่พบว่าชุดผสมที่ไม่ผสมอินเดียมค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดครากกลับมีค่าน้อยกว่าชุดผสมที่ผสมอินเดียม ซึ่งยังไม่สามารถหาสาเหตุได้ สำหรับชุดส่วนผสมที่มีการเติมอินเดียม 1.03 % จนถึง 2.09 % พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก มีค่าลดลงตามปริมาณของอินเดียมที่ผสมอยู่

สำหรับชุดส่วนผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีการเติมอินเดียมและซิลิกอน สามารถนำมาเปรียบเทียบกับเงินสเตอร์ลิงที่มีการเติมเฉพาะซิลิกอน โดยคิดปริมาณของซิลิกอนที่เหลืออยู่ใกล้เคียงกัน (0.09 – 0.11 % wt.) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุด และความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก กับปริมาณอินเดียมที่ผสมต่างกัน ในชุดส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่มีซิลิกอนผสมอยู่ใกล้เคียงกันได้ดังกราฟรูปที่ 5.8

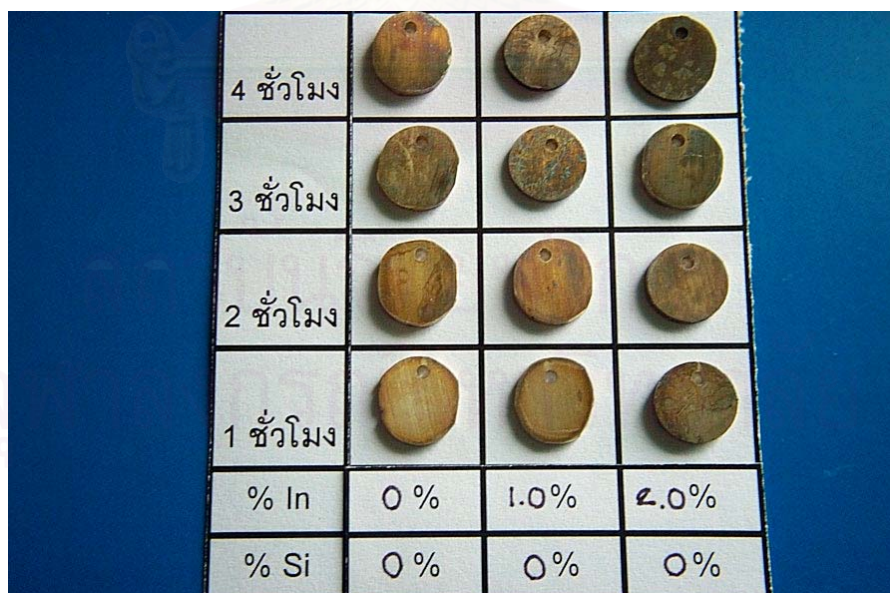


รูปที่ 5.8 กราฟแสดงค่า Ultimate Tensile Strength และ Yield Strength ของเงินสเตอร์ลิง ที่มีซิลิกอนผสมอยู่ใกล้เคียงกัน (0.09 – 0.11%wt) โดยมีปริมาณอินเดียมที่ผสมอยู่แตกต่างกันได้แก่ 0.53, 1.09, 1.60 และ 2.13 % wt.

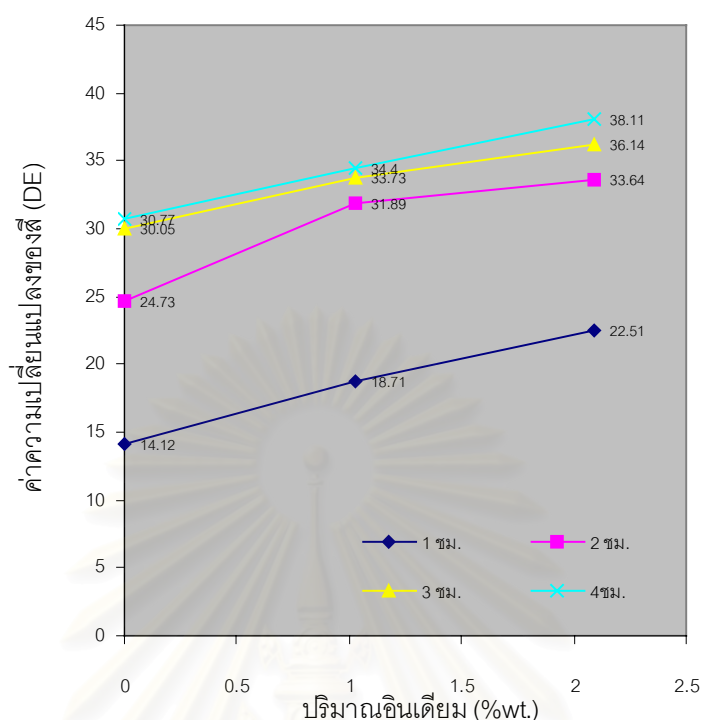
จากกราฟรูปที่ 5.8 สำหรับชุดส่วนผสมที่มีซิลิกอนผสมอยู่ใกล้เคียงกัน (0.09 – 0.11%wt.) แต่มีปริมาณอินเดียมแตกต่าง สังเกตได้ว่า ความต้านทานแรงดึงสูงสุดจะมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณอินเดียมที่ผสมลงไประหว่าง 0 – 2.13 % เนื่องจากการลดสัดส่วนปริมาณของทองแดงในการหล่อลงจากการเติมอินเดียมลงไปแทนที่ และจากการที่ทองแดงและซิลิกอนได้แยกตัวออกไปอยู่ใน Secondary Structure ที่มีการกระจายตัวอย่างหนาแน่นมากขึ้นตามปริมาณของอินเดียมที่ผสมลงไป สำหรับความต้านทานแรงดึงที่จุดคลากมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณอินเดียมที่เพิ่มขึ้นในช่วงระหว่าง 0.53 - 2.13 % wt. แต่พบว่าในชุดส่วนผสม 6.26 % Cu – 0.11 % Si – balance of Ag มีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคลากน้อยกว่าชุดส่วนผสมอื่นซึ่งยังไม่สามารถหาสาเหตุได้

5.6 ผลการทดสอบความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิงผสม

ชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่ได้มีการผสมซิลิกอนและอินเดียมในปริมาณต่าง ๆ กัน เมื่อนำมาทำการเตรียมผิวด้วยการขัดด้วยกระดาษทราย ตั้งแต่เบอร์ 400 จนถึงเบอร์ 1200 และใช้เวลาทดสอบการหมองต่างกัน คือ 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานหล่อที่ทำการทดสอบจะมีสีต่างกัน ดังรูปที่ 5.9 ได้แสดงให้เห็นความแตกต่างของสีผิวชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงที่มีการผสมอินเดียมในปริมาณแตกต่างกันระหว่าง 0 - 2.09 % wt. พบว่าความสามารถในการต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิงจะลดลงตามปริมาณของอินเดียมที่ผสมลงไป ในปริมาณระหว่าง 0 - 2.09 % wt. จากกราฟรูปที่ 5.10 ทั้งนี้จากการวิเคราะห์จากโครงสร้างจุลภาค จะสังเกตเห็นปริมาณของ Secondary Structure กระจายตัวอยู่ทั่วเนื้อพื้น โดยที่ Secondary Structure เหล่านี้จะมีการกระจายตัวอย่างหนาแน่นสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชุดส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงธรรมดาที่ไม่ผสมอินเดียม และจาก EDX พบว่าใน Secondary Structure เหล่านี้ จะมีส่วนผสมของทองแดง และอินเดียมในระหว่าง 25.98 – 38.73 % wt. และ 0.44 - 1.32 % wt. ตามลำดับ ซึ่งผลของทองแดงที่มีอยู่สูงใน Secondary Structure นี้เองทำให้ความสามารถในการป้องกันการหมองของชิ้นงานลดลง เนื่องจากโครงสร้างที่มีทองแดงอยู่ในปริมาณที่สูงนี้จะไวต่อการเกิดปฏิกิริยา Oxidation และ Sulphidation มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานจากชุดส่วนผสมที่เป็นเงินสเตอร์ลิงธรรมดา (6.90 % Cu – balance of Ag) ขณะที่หากใช้ EDX ตรวจสอบปริมาณของธาตุผสมในเนื้อพื้น จะปรากฏปริมาณของเงินและทองแดงใกล้เคียงกันในชุดส่วนผสมที่มีการผสมปริมาณของอินเดียม 0 – 2.09 % wt. รวมทั้งในเงินสเตอร์ลิงธรรมดาเช่นกัน



รูปที่ 5.9 ภาพถ่ายแสดงสีผิวชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่เติมอินเดียม 0, 1 และ 2 %wt. (มีอยู่จริงในชิ้นงาน 0, 1.03 และ 2.09 ตามลำดับ) โดยใช้เวลาทดสอบ 1, 2, 3 และ 4 ชม.

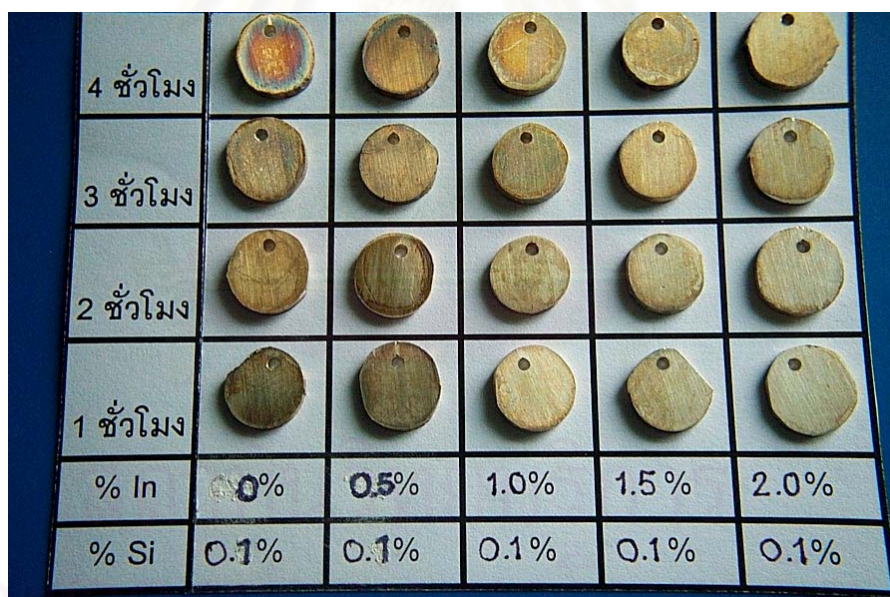


รูปที่ 5.10 กราฟแสดงผลการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงของสี (DE) ของชิ้นงานเงิน สเตอร์ลิงที่มีการผสมอินเดียม 0, 1.03 และ 2.09% wt. โดยใช้เวลาทดสอบ 1, 2, 3 และ 4 ชม.

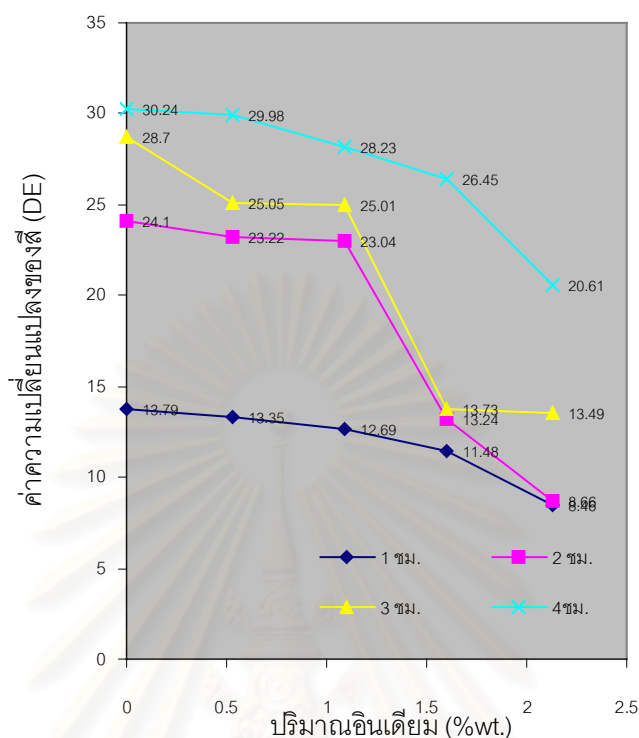
สำหรับชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงที่มีการผสมเฉพาะซิลิกอนคือชุดส่วนผสม 6.26 % Cu – 0.11 % Si – balance of Ag ซึ่งจากการตรวจสอบส่วนผสมพบว่าคงเหลือปริมาณซิลิกอนเพียง 0.11 % wt. เท่านั้น แต่เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับชุดส่วนผสมที่เป็นเงินสเตอร์ลิงธรรมดาพบว่าเงินสเตอร์ลิงที่มีการผสมเฉพาะซิลิกอนจะมีความสามารถในการต้านทานการหมองดีกว่า โดยสังเกตจากสีของผิวชิ้นงานที่ปรากฏและจากค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (DE) ที่มีค่าน้อยกว่า ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.5

หากทำการเปรียบเทียบระหว่างชุดส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณที่เหลืออยู่ของซิลิกอนใกล้เคียงกัน แต่มีปริมาณของอินเดียมแตกต่างกัน (ชิ้นงานทดสอบจากส่วนผสมที่มีปริมาณซิลิกอนระหว่าง 0.09 – 0.11 % wt. และ ปริมาณอินเดียมที่มีอยู่ในชิ้นงานระหว่าง 0 - 2.13 % wt. ตามลำดับ) จากสีของชิ้นงานที่ปรากฏดังรูปที่ 5.11 สามารถสังเกตได้ว่า ความสามารถในการต้านทานการหมองชิ้นงานที่มีซิลิกอนเท่า ๆ กัน จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณอินเดียมที่ผสมลงไปในช่วง 0- 2.13 % wt. ทั้งนี้จากการตรวจสอบค่า DE ดังกราฟรูปที่ 5.12 ก็แสดงผลไปในทางเดียวกันคือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (DE) จะลดลงตามปริมาณของอินเดียมที่ผสมลงไปในช่วงระหว่าง 0 – 2.13 % wt. และจากการตรวจสอบ

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานชุดดังกล่าวจะพบปริมาณของ Secondary Structure กระจายตัวอย่างหนาแน่นขึ้นตามปริมาณของอินเดียมที่เติมลงไป โดยสังเกตได้ชัดว่า Secondary Structure เหล่านี้จะประกอบด้วยทองแดงและซิลิคอนในปริมาณที่สูงมากกว่าในเนื้อพื้นมาก โดยเฉพาะในชุดชิ้นงานที่เติมอินเดียมสูงที่สุดคือ ชิ้นงานของชุดส่วนผสม 3.76 % Cu - 0.11 % Si - 2.13 % In - balance of Ag) จากการตรวจสอบส่วนผสมโดย EDX พบสัดส่วนปริมาณของธาตุผสมใน Secondary Structure บริเวณแถบสีขาวคือ Ag : Cu : Si : In เท่ากับ 93.22 : 4.33 : 0.08 : 2.37 % wt. และมีสัดส่วนปริมาณของธาตุผสมที่พบในเนื้อพื้นคือ Ag : Cu : Si : In เท่ากับ 93.55 : 4.85 : 0.15 : 1.45 %wt. สามารถพิจารณาได้ว่า Matrix และ Secondary Structure ที่มีปริมาณของอินเดียมและซิลิคอนเหลืออยู่มากที่สุดจะมีความสามารถในการต้านทานการหมองดีที่สุด โดยที่ความสามารถในการละลายของซิลิคอนจะขึ้นอยู่กับปริมาณของทองแดงในโครงสร้างดังกล่าว (ต้องมีทองแดงละลายอยู่สูงๆ) โดยซิลิคอนจะมีผลต่อความสามารถในการต้านทานการหมองมากที่สุด โดยมีอินเดียมเป็นตัวช่วยเสริมให้ต้านทานการหมองดียิ่งขึ้น



รูปที่ 5.11 ภาพถ่ายแสดงสีผิวชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณของซิลิคอนใกล้เคียงกัน (0.09 - 0.11% wt.) แต่มีปริมาณของอินเดียมแตกต่างกันได้แก่ 0, 0.5, 1, 1.5 และ 2.0 % wt.(มีอยู่จริงในชิ้นงาน 0, 0.53, 1.09, 1.60 และ 2.13 % wt.ตามลำดับ)โดยใช้เวลาดทดสอบ 1, 2, 3 และ 4 ชม.



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงผลการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงของดี (DE) ของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณของซิลิกอนใกล้เคียงกัน (0.09 – 0.11% wt.) แต่มีปริมาณของอินเดียมแตกต่างกันได้แก่ 0, 0.53, 1.09, 1.60 และ 2.13 % wt. โดยใช้เวลาทดสอบ 1, 2, 3 และ 4 ชม.

5.7 การตรวจสอบสมบัติต่างๆของชุดส่วนผสมเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากการหลอมในเตาสถูญญากาศ

จากการทดลองเตรียมชุดส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงซึ่งประกอบด้วย 92.5 % Ag – 5.0 % Cu – 0.5 % Si – 2.0 % In แล้วนำไปหลอมในเตาสถูญญากาศแล้วนำไปตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี, โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับชุดส่วนผสมที่หลอมในเตาอินดักชั่น โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.7.1 ส่วนผสมทางเคมี

พบว่ามีส่วนโดยน้ำหนักของธาตุผสมหลังการหลอมเท่ากับ 5.13 % Cu – 0.44 % Si – 2.12 % In – balance of Ag โดยเมื่อเปรียบเทียบกับชุดส่วนผสมที่หลอมในเตาอินดักชั่นที่ได้เตรียมปริมาณส่วนผสมเหมือนกันคือชุดส่วนผสม 3.76 % Cu – 0.11 % Si – 2.13 % In – balance of Ag พบว่าปริมาณสัดส่วนของธาตุผสมโดยเฉพาะซิลิกอนจะแตกต่างกันมาก ทั้งนี้เนื่องจากกรรมวิธีการหลอมแตกต่างกัน

กล่าวคือเมื่อทำการหลอมในเตาสุญญากาศทำให้ลดการสูญเสียของซิลิกอนที่ไปทำปฏิกิริยากับ ออกซิเจนในอากาศหรือทำให้เกิด Slag น้อยลง จึงเหลือปริมาณซิลิกอนในสารละลายของแข็งสูงกว่า

5.7.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค

จากรูปที่ 5.2 (ฅ) โครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏจะเห็นลักษณะของ network ซึ่งเป็นลักษณะของพื้นผิวที่มีคราเมเปราะสูงเนื่องจากมีปริมาณซิลิกอนละลายอยู่สูง โดยจาก EDX ตรวจสอบ ปริมาณของธาตุผสมใน Matrix เป็น $Ag : Cu : Si : In = 96.17 : 2.15 : 0.12 : 1.5 \text{ \% wt.}$ และจากโครงสร้าง network จะมีสัดส่วนปริมาณธาตุต่าง ๆ เป็น $Ag : Cu : Si : In = 16.92 : 73.06 : 9.56 : 0.46 \text{ \% wt.}$ ซึ่งจะเห็นว่าโครงสร้าง network จะประกอบด้วยทองแดงและซิลิกอนละลายอยู่ในสัดส่วนที่สูงกว่า โครงสร้างพื้น (Matrix) และจากภาพรูป 5.6 พบโครงสร้างของยูเทคติกอยู่ภายในโครงสร้างของ network ซึ่งจากแถบที่เป็นสีขาวในยูเทคติกจะมีปริมาณธาตุผสมเป็น $Ag : Cu : Si : In = 55.73 : 40.01 : 2.83 : 1.43 \text{ \% wt.}$ และจากแถบที่เป็นสีดำในยูเทคติกมีปริมาณธาตุผสมเป็น $Ag : Cu : Si : In = 2.09 : 86.21 : 11.67 : 0.03 \text{ \% wt.}$ ซึ่งพบว่าบริเวณที่เป็นสีดำที่อยู่ในยูเทคติกภายในโครงสร้าง network จะมีปริมาณของทองแดงและซิลิกอนสูงกว่าบริเวณที่เป็นสีขาวในยูเทคติกมาก

5.7.3 สมบัติทางกล

| | | |
|----------------------------|---|--------------|
| - ค่าความแข็ง | = | 66.30 HV |
| - Ultimate Tensile Stress | = | 209.464 MPa. |
| - 0.2% Offset Yield Stress | = | 77.812 MPa. |

จากผลการทดสอบทางกลที่แสดงไว้ข้างต้นเมื่อเปรียบเทียบกับชุดส่วนผสม 3.76 % Cu – 0.11 % Si – 2.13 % In – balance of Ag แล้วพบว่าชุดส่วนผสม 5.13 % Cu – 0.44 % Si – 2.12 % In – balance of Ag มีค่าความแข็ง และค่า Ultimate Tensile Stress สูงกว่าเนื่องจากมีปริมาณซิลิกอนในสารละลายของแข็งสูงกว่า และสังเกตได้ว่าโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะเป็น network ซึ่งแสดงว่ามีความแข็งสูงแต่มีความเปราะสูงด้วยเช่นกันซึ่งทำให้มีค่า Yield Stress ต่ำกว่า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สรุปผลการทดลอง

1. อินเดียมจะมีบทบาทในการลดอุณหภูมิ ณ จุดหลอมเหลวสมบูรณ (liquidus) ของเงินสเตอร์ลิง ทำให้สามารถลดอุณหภูมิในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ เนื่องจากการไหลตัวของโลหะหลอมเหลวดีขึ้น แต่จะไม่มีผลกับเงินสเตอร์ลิงที่มีซิลิกอนผสมอยู่
2. ซิลิกอน และทองแดงใน Solid Solution และ Secondary Structure ของเงินสเตอร์ลิงมีผลต่อการเพิ่มความแข็ง และความต้านทานแรงดึงของเงินสเตอร์ลิง โดยซิลิกอน 0.09 - 0.11 % wt. ทำให้เงินสเตอร์ลิงมีความแข็งเพิ่มขึ้น 38.4 % และมีความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น 75 %
3. ในกรณีที่ผสมอินเดียมมีผลทำให้ความแข็ง และความต้านทานแรงดึงของเงินสเตอร์ลิงลดลงเนื่องจากอินเดียมดึงเอาทองแดงและซิลิกอนในเนื้อพื้นออกมาอยู่ใน Secondary Structure มากขึ้นตามปริมาณอินเดียมที่ผสมลงไป นอกจากนี้การเตรียมส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงก่อนการหล่อได้ลดปริมาณสัดส่วนของทองแดงลงโดยการผสมอินเดียมลงไปแทนที่ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เงินสเตอร์ลิงมีความแข็ง และความต้านทานแรงดึงลดลง
4. ในกรณีที่ผสมซิลิกอน 0.09 - 0.11 % wt. เป็นผลทำให้ความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิงสูงขึ้น และเมื่อมีการผสมอินเดียมร่วมด้วย 0 – 2.13 % wt ช่วยทำให้ความต้านทานการหมองของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงสูงยิ่งขึ้นตามปริมาณอินเดียมที่ผสมลงไปโดยมีความต้านทานการหมองสูงขึ้น 33 – 40 % เมื่อเปรียบเทียบกับเงินสเตอร์ลิงธรรมดา และสูงขึ้น 31.84 – 38.65 % เมื่อเปรียบเทียบกับเงินสเตอร์ลิงที่ผสมเฉพาะซิลิกอนในปริมาณ (0.09 - 0.11 % wt.)

บทที่ 6

วิจารณ์การทดลอง และข้อเสนอแนะ

6.1 วิจารณ์การทดลอง

1. ในการทดสอบผสมของเงินสเตอร์ลิงที่ทำการทดลอง ลงในแบบหล่อได้มีการป้องกันการทำปฏิกิริยากับอากาศโดยเฉพาะการเกิดออกไซด์ โดยมีการใช้ก๊าซเฉื่อย (Argon) ฟันลงในเบ้าหลอมกราไฟต์ตลอดระยะเวลาทำการหลอม เพื่อป้องกันการสูญเสียของธาตุต่างๆไปกับ Slag ด้วย และนอกจากนี้ยังพยายามใช้เวลาในการหลอมส่วนผสมต่างๆเท่าๆกัน เพื่อลดปัญหาการละลายของธาตุต่างในชิ้นงานไม่ให้มีความแตกต่างจากความเป็นจริงมาก แต่ทั้งนี้หากทำการหล่อในเตาสถูญญากาศจะสามารถลดปัญหาดังกล่าวได้มาก และทำให้ปริมาณส่วนผสมที่ต้องการให้ละลายอยู่ มีการสูญเสียน้อยลง สามารถควบคุม Condition ที่กำหนดไว้ดียิ่งขึ้น
2. แบบหล่อที่มีลักษณะเป็นแท่งเหล็กและมีร่องเพื่อให้ชิ้นงานหล่อที่ออกมาเป็นรูปทรงกระบอก (rod) ได้นำไปอบไว้ในเตาอบเซรามิก โดยใช้อุณหภูมิในการอบสูงถึง $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพื่อให้ความแตกต่างของอุณหภูมิของโลหะหลอมเหลวในเบ้ากราไฟต์ และแบบหล่อมีน้อยที่สุด เพื่อให้การไหลของน้ำโลหะดีขึ้น แต่การเทน้ำโลหะลงในแบบหล่อจะมีปัญหาน้ำโลหะไม่เต็มแบบหล่อ หากไม่ชำนาญพอก็จะเกิดรูพรุนในชิ้นงานหล่อบ้างทำให้การนำชิ้นงานไปตัดทดสอบสมบัติทางกลมีความเชื่อถือได้น้อยลง ซึ่งในการทดลองนี้ได้พยายามให้มีการเทน้ำโลหะลงในแบบหล่อเป็นไปอย่างระมัดระวังที่สุด แต่อาจยังมีปัญหาความพรุนในชิ้นงานอยู่บ้าง จึงต้องทำการเทแบบหล่อหลายครั้งในแต่ละชุดส่วนผสม และนำไปทดสอบความแข็งแรง (Tensile) ซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการนำชิ้นงานไปทดสอบหลายๆชิ้น (ชิ้นทดสอบ Tensile มีประมาณ 3- 4 ชิ้นงานต่อ 1 ส่วนผสม) ซึ่งถ้าหากเตรียมชุดส่วนผสมแล้วนำไปหล่อในเตาที่ออกแบบให้มีการไหลของน้ำโลหะไปยังแบบหล่อที่เป็นดินเทียน แล้วนำมาตัดชิ้นงานเพื่อไปทดสอบสมบัติต่างๆต่อไป ก็จะทำให้ค่าต่างๆที่ได้จากการทดสอบมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น
3. ในการทดสอบความสามารถในการต้านทานการหมอง สำหรับเครื่อง Spectrophotometer ในการทดสอบครั้งนี้เป็นเครื่องที่ใช้สำหรับทดสอบสีของชิ้นทดสอบที่เป็นเส้นใย เช่นกระดาษ, ภาพพิมพ์ และเนื้อผ้าเป็นหลัก แต่การนำมาประยุกต์ใช้ในการทดสอบกับโลหะนั้น จะต้องระวังในเรื่องการสะท้อนของแสงด้วย ดังนั้นจึงไม่ได้ทำการขัดชิ้นงานจนเงาเพราะจะมีผลทำให้การวัดค่าสีมีความผิดพลาดไปได้ แต่ทั้งนี้ต่อไปควรมีการใช้เครื่อง Spectrophotometer ที่สามารถใช้กับการวัดค่าสีของโลหะโดยตรงจะทำให้ได้ผลการทดสอบออกมาถูกต้องมากยิ่งขึ้น

6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย

1. ขั้นตอนสำคัญที่สุดในการเติมส่วนผสมลงในเข้ากราไฟต์ขณะทำการหล่อนั้น คือการกวนเพื่อ ให้ผงคอปเปอร์ซิลิคอน (Cu- Si) เกิดการละลายได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้น ควรระวังมากที่สุดในจุด โดยเฉพาะการใช้อัตราความที่สม่ำเสมอเหมือนกันในทุกจุด ส่วนผสม ซึ่งจะช่วยให้ผลการทดลองออกมาดีที่สุด
2. ควรระวังในการใช้ปริมาณของอินเดียมในการเติมลงในเงินสเตอร์ลิง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติในด้านการต้านทานการหมอง เนื่องจากในการทดลองครั้งนี้บ่งชี้ว่า หากมีการเติมเฉพาะอินเดียม จะไม่ช่วยทำให้เงินสเตอร์ลิงกันหมองดีขึ้น แต่กลับลดลงเนื่องจากเกิด Secondary Structure ที่มีปริมาณของธาตุผสม โดยเฉพาะทองแดงละลายอยู่มาก กระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อพื้น โดยออกไซด์ของทองแดงทำให้เกิดการหมองของผิวชิ้นงานนั่นเอง
3. ผลของการวิจัยครั้งนี้บ่งชี้ว่า ซิลิคอนเป็นองค์ประกอบหลักในเงินสเตอร์ลิงที่ช่วยทำให้มีความสามารถในการต้านทานการหมองดีขึ้น แต่อินเดียมจะเป็นส่วนเสริมที่ทำให้มีความสามารถในการต้านทานการหมองดียิ่งขึ้น แต่ทั้งนี้จะต้องพิจารณาถึงปริมาณที่เหมาะสมของทั้งอินเดียมและซิลิคอนในเงินสเตอร์ลิง ซึ่งจากการวิจัยพบว่า หากมีการเติมซิลิคอนมากเกินไปจะมีผลทำให้เกิดโครงสร้างเป็น network ซึ่งทำให้ชิ้นงานมีความเปราะสูงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ และปริมาณอินเดียมก็ไม่ควรใส่มากเกินไป เพราะทำให้มีผลต่อสีของผลิตภัณฑ์ที่ด้านไม่เงางามและนอกจากนี้ อินเดียมยังมีราคาแพงไม่เหมาะที่จะใช้เติมในปริมาณสูงได้ เพราะไม่คุ้มค่าในแง่เศรษฐกิจ
4. ควรศึกษากรรมวิธีปรับปรุงคุณสมบัติโดยความร้อน (Heat Treatment) ของเงินสเตอร์ลิงที่มีการผสมซิลิคอนและอินเดียม เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านต่างๆของชิ้นงานให้ดีขึ้นและให้ชิ้นงานมีเนื้อ โลหะที่มีความสม่ำเสมอมากที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Christopher Raub . Use of Silver in Jewelry. The Proceeding of The Santa Fe Symp of Jewelry Manufacturing Technology , 1989, pp.241-256
2. Price, L.E., and Thomas. G.J. Inst. Metals. 1938, pp. 357-385
3. Vinal, G.W., and Schramm. G.M Metal Industry (N.T.). 1934, pp.1 ,15, 22,100, 151, 231
4. Charles E.T. White. Engineering Applications of Indium. 1985, pp.1-18, 83-91, 191-192
5. Daniel Davitz. Silver Palladium Alloy . US. Patent No. 5,037,708, Date Aug. 6, 1991
6. Zamojski, Marek R. Silver Alloy. US. Patent No 5,558,833 Date Sep. 24, 1996
7. Hiroshi Harigaya, Kazutoma Kasai, Michio Asahina. Silver Alloys having High Sulphuration Resistance .U.S. Patent No. 3,811, 876 Date May 21,1974
8. Daniel Davitz. Silver Colored Alloy with low percentage of Ni and Cu . US.Patent No 5,817,195 Date Oct. 6, 1998
9. T.K. Vaidyanathan and A. Prasad. Precious Metals. Pergamon Press, 1932, pp. 293-299
10. Thomas H. Courtney. Mechanical Behavior of Materials. McGraw-Hill Publication, 1990, p.169
11. Allison Butts. The Chemical Properties of Silver. Chapter 8, Silver in Industry, pp.126-132
12. Allison Butts and J.M. Thomas. Corrosion Resistance of Silver and Silver Alloys. Chapter 15, Silver in Industry, pp.357-387
13. Ernest M. Levin, Carl R. Robbins, Haward F. Mcmurdie. Phase Diagrams for Ceramists. The American Ceramics Society, Inc, Ohio, 1964, p.104
14. George E. Dieter. Mechanical Metallurgy. McGraw-Hill Publication, 1988, pp.184-191
15. Kubachewski O., Alcock C.B., and Spencer P.J.. Thermochemistry of Materials. 6th ed., Pergamon Press, 1993, p.149

16. Richard V. Carrano. Improve Your Silver Casting. The Santa Fe Sym. On Jewelry Manufacturing Technology, 1997, pp.157-168
17. Aldo M. Reti. Understanding Sterling Silver. Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology, 1997, pp.339-345
18. H. Royal. The Deposition of Novel Thin films of Binary Silver alloys and Oxides for Tarnish Resistance. The Proceeding of 4th on Santa Fe Symp. of Jewelry Manufacturing and Technology, 1990, p.37
19. Metal Europ. Resistance to Tarnishing of the Silver - Germanium and Silver - Copper - Germanium Alloys. The Proceeding of The Santa Fe Symp. of Jewelry Manufacturing and Technology, 1990, pp.63-67
20. Raukstraum G. and Agarwal D.P.. Surface Finishing on Color Measurements. The Proceeding of The Santa Fe Symp. of Jewelry Manufacturing and Technology, 1990, pp.147-163
21. Raukstraum G. and Agarwal D.P.. Color Tecnology for Jewelry Alloy Application. The Proceeding of The Santa Fe Symp. of Jewelry Manufacturing and Technology, 1988, pp.229-244
22. Lawrence Addicks. Silver in Industry. International Textbook Press, Scranton, PA,1994, pp.398-399
23. Ernest A. Smith. Silver in Industrial Alloys, Precious Metal and Application. N.A.G. Press London, 1978, p.17
24. T.K. Vaidyanathan and A. Prasad. Corrosion and Tarnish of Ag - In and Ag - In - Pd Alloys Precious Metals.1980, pp.293-299
25. C.G. Woychik and T.B. Massalski. Phase Stability Relationships and Glass Formation in the System Cu - Ag - In. Metallurgical Transaction A, Volume 19A. January 1988,pp.13-29



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ทฤษฎีการวัดค่าสีของโลหะประกอบเครื่องประดับ

ในโลหะเครื่องประดับที่ทำด้วยโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านมามีการวัดค่าสีโดยใช้คอมพิวเตอร์ เป็นการลดข้อสงสัย หรือความคลุมเครือ เนื่องจากไม่มีมาตรฐานของสี สำหรับโลหะผสมทั่วไป ลักษณะสีที่ปรากฏบนผิววัสดุใด ๆ จะปรากฏออกมานั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลัก 3 ประการคือ

1. ที่มาของต้นแสงส่องสว่าง
2. ตัววัตถุ ซึ่งไม่เกี่ยวกับรูปแบบของสี แต่เกี่ยวกับผิวที่สีนั้นปรากฏอยู่ การใช้กระจกสะท้อนแสงจะช่วยลดเซซการเปลี่ยนแปลงของสีที่ผิววัตถุเปลี่ยนแปลงไปจากผิวหยาบเป็นผิวละเอียด
3. ผู้สังเกต และการรับรู้

มาตรฐานการอธิบายระบบสีมี 2 ระบบที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

1. Munshell system ใช้พิกัดแบบ 3 ค่าคือ

- Hue คือ ชื่อสีอธิบายเป็นคำ ๆ เช่น สีแดง หมายถึง....
- Chroma บอกความเข้มของสีโดยวัดแยกออกจากแกน ขาว – เทา – ดำ
- Value อธิบายตำแหน่งของ Scale ของ ขาว เทา ดำ

หมายเหตุ ระบบนี้ ผู้สังเกตต้องพิจารณาสีของวัตถุเทียบกับเพิ่มสีมาตรฐานที่ใกล้เคียงกันมากที่สุดแล้วเรียกสีของวัตถุนั้นตามสีที่ใกล้เคียงที่สุด

2. CIELAB System (The Committee of International on Illumination)

ระบบนี้จะใช้หลักการอธิบายเชิงคณิตศาสตร์ เป็นระบบที่นิยมมากที่สุด ในการใช้สีตรงกันข้ามในการอธิบายซึ่งเรียกว่าองค์ประกอบของสี ได้แก่ สีเขียว – แดง สีเหลือง – น้ำเงิน และสีขาว – ดำ โดยใช้หลักการมองเห็นของตามนุษย์เป็นพื้นฐาน เพราะตาจะมีเซลล์แบบ Cone เพียงอย่างเดียว จึงเห็นความแตกต่างระหว่างสีแดง กับสีเขียวได้ แต่ไม่สามารถมองเห็นได้พร้อมกัน ความหมายของค่าสีในระบบนี้คือ

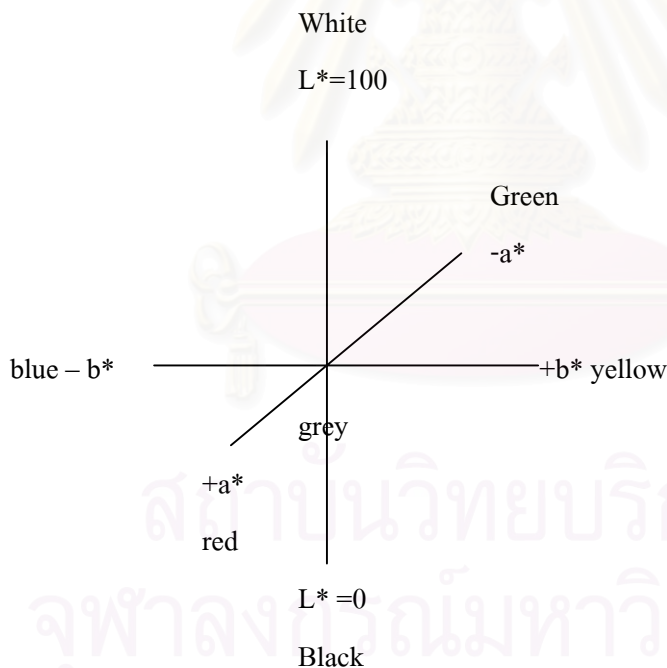
- L = Lightness, L = 0 (Black), L = 100 (White)
- a = ค่าสีแดง – เขียว ถ้าสีแดง ค่า a จะเป็นค่าบวกตั้งแต่ 0 ถึง 100
สีเขียว ค่า a จะเป็นค่าลบตั้งแต่ - 100 ถึง 0
- b = ค่าสีเหลือง – น้ำเงิน ถ้าสีเหลืองค่า b จะเป็นค่าบวกตั้งแต่ 0 ถึง 100
สีน้ำเงินค่า b จะเป็นค่าลบตั้งแต่ - 100 ถึง 0

ตัวอย่างการวัดความแตกต่างของค่าสีที่วัดได้จากวัตถุ 2 ชิ้นดังนี้

$$DE^2 = (L2-L1)^2 + (a2 - a1)^2 + (b2 - b1)^2$$

เมื่อ $L1, a1, b1$ คือค่าที่วัดได้จากวัตถุชิ้นแรก และ $L2, a2, b2$ คือค่าที่วัดได้จากวัตถุชิ้นที่สอง กรณีนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้การวัดความแตกต่างของสีจากวัตถุเดียวกันแต่มีสีเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการหมองของโลหะเงินสเตอร์ลิง หรือจากสาเหตุอื่น

คุณภาพสีที่วัดได้ถูกต้องหรือไม่ขึ้นกับแสงที่กระท้อนจากวัตถุ และการใช้กระจกสะท้อนแสงจะช่วยเก็บแสงสะท้อนจากวัตถุในกรณีที่ผิวละเอียดได้กลับมาหมด ถ้าเป็นผิวหยาบจะสามารถวัดโดยไม่ใช่กระจกช่วยได้ ถ้า $DE = 1$ ไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงหรือความแตกต่างได้ แต่ถ้า $DE = 4$ จะสามารถเริ่มสังเกตเห็นด้วยสายตาได้



รูปที่ ก.1 L* a* b* color space

ตาราง ก.1 แสดงผลการเปรียบเทียบค่า DE และค่าสีของชิ้นงานในแต่ละชุดส่วนผสมที่ผ่านการทดสอบการหมองเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

| หมายเลขชุด | ค่า L, a, b, ก่อนการทดลอง | | | ค่า L, a b หลังการทดลอง | | | ค่า DE |
|------------|---------------------------|-------|------|-------------------------|-------|-------|--------|
| | L1 | a1 | b1 | L2 | a2 | b2 | |
| 1 | 80.25 | -0.70 | 4.92 | 70.50 | -0.11 | 15.12 | 14.12 |
| 2 | 73.75 | -0.94 | 5.16 | 70.30 | -0.15 | 18.49 | 13.79 |
| 3 | 73.10 | -0.62 | 5.00 | 68.19 | 1.86 | 17.17 | 13.35 |
| 4 | 74.05 | -0.78 | 4.89 | 64.69 | 2.39 | 12.85 | 12.69 |
| 5 | 77.54 | -0.55 | 5.84 | 68.55 | 1.24 | 12.76 | 11.48 |
| 6 | 74.62 | -0.42 | 5.18 | 67.57 | 0.76 | 9.71 | 8.46 |
| 7 | 77.21 | -0.40 | 5.71 | 60.63 | 1.60 | 14.15 | 18.71 |
| 8 | 82.55 | -0.25 | 5.64 | 64.42 | 4.29 | 18.18 | 22.51 |

ตาราง ก. 2 แสดงผลการเปรียบเทียบค่า DE และค่าสีของชิ้นงานในแต่ละชุดส่วนผสมที่ผ่านการทดสอบการหมองเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

| หมายเลขชุด | ค่า L, a, b, ก่อนการทดลอง | | | ค่า L, a b หลังการทดลอง | | | ค่า DE |
|------------|---------------------------|-------|------|-------------------------|------|-------|--------|
| | L1 | a1 | b1 | L2 | a2 | b2 | |
| 1 | 76.10 | -0.64 | 4.72 | 63.00 | 6.41 | 24.48 | 24.73 |
| 2 | 75.65 | -0.86 | 4.57 | 55.55 | 1.80 | 17.60 | 24.10 |
| 3 | 82.10 | -0.84 | 5.67 | 66.50 | 1.75 | 22.67 | 23.22 |
| 4 | 83.61 | -0.52 | 5.75 | 63.02 | 2.02 | 15.78 | 23.04 |
| 5 | 74.46 | -1.03 | 4.60 | 63.34 | 0.51 | 11.63 | 13.24 |
| 6 | 74.39 | -0.58 | 4.81 | 68.41 | 0.36 | 11.00 | 8.66 |
| 7 | 73.30 | -0.30 | 6.08 | 41.69 | 3.71 | 4.82 | 31.89 |
| 8 | 83.34 | -0.10 | 5.33 | 50.25 | 2.33 | 10.89 | 33.64 |

ตาราง ก.3 แสดงผลการเปรียบเทียบค่า DE และค่าสีของชิ้นงาน ในแต่ละชุดส่วนผสมที่ผ่านการทดสอบ
การหมองเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

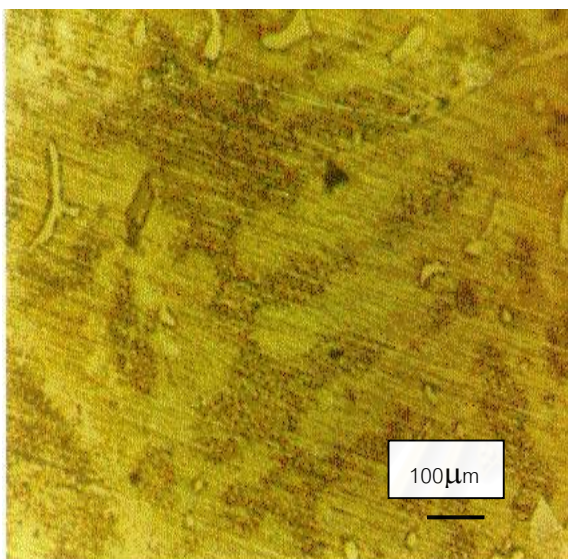
| หมายเลขชุด | ค่า L, a, b, ก่อนการทดลอง | | | ค่า L, a b หลังการทดลอง | | | ค่า DE |
|------------|---------------------------|-------|------|-------------------------|------|-------|--------|
| | L1 | a1 | b1 | L2 | a2 | b2 | |
| 1 | 85.71 | -0.55 | 5.15 | 56.50 | 4.20 | 10.40 | 30.05 |
| 2 | 81.17 | -0.34 | 5.76 | 64.10 | 5.10 | 28.18 | 28.70 |
| 3 | 79.24 | -0.35 | 4.84 | 58.75 | 4.41 | 18.44 | 25.05 |
| 4 | 78.28 | -0.72 | 4.52 | 58.20 | 5.54 | 18.06 | 25.01 |
| 5 | 77.10 | -0.85 | 5.85 | 66.33 | 2.49 | 13.69 | 13.73 |
| 6 | 74.61 | -0.88 | 4.52 | 65.31 | 2.50 | 13.69 | 13.49 |
| 7 | 79.22 | -0.48 | 5.10 | 46.69 | 4.34 | 12.63 | 33.73 |
| 8 | 76.54 | -0.46 | 5.76 | 53.78 | 8.94 | 32.22 | 36.14 |

ตาราง ก.4 แสดงผลการเปรียบเทียบค่า DE และค่าสีของชิ้นงาน ในแต่ละชุดส่วนผสมที่ผ่าน
การทดสอบการหมองเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

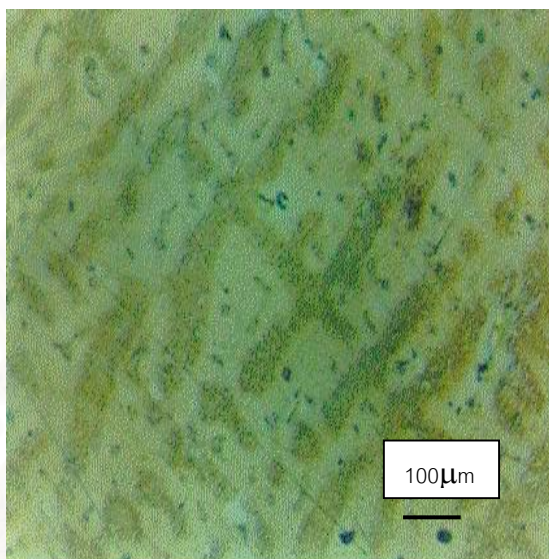
| หมายเลขชุด | ค่า L, a, b, ก่อนการทดลอง | | | ค่า L, a b หลังการทดลอง | | | ค่า DE |
|------------|---------------------------|-------|------|-------------------------|------|-------|--------|
| | L1 | a1 | b1 | L2 | a2 | b2 | |
| 1 | 75.75 | -0.58 | 6.78 | 49.53 | 9.11 | 19.66 | 30.77 |
| 2 | 77.29 | -0.28 | 5.09 | 49.10 | 3.20 | 15.47 | 30.24 |
| 3 | 76.34 | -0.62 | 4.78 | 47.10 | 3.42 | 10.05 | 29.98 |
| 4 | 82.12 | -0.51 | 4.92 | 57.15 | 3.61 | 17.43 | 28.23 |
| 5 | 83.73 | -0.52 | 5.15 | 62.61 | 2.46 | 21.09 | 26.45 |
| 6 | 73.76 | -0.50 | 5.33 | 58.74 | 3.46 | 18.08 | 20.61 |
| 7 | 79.56 | -0.50 | 4.75 | 49.71 | 6.94 | 20.15 | 34.40 |
| 8 | 85.86 | -0.84 | 6.40 | 49.00 | 4.66 | 14.36 | 38.11 |

ภาคผนวก ข

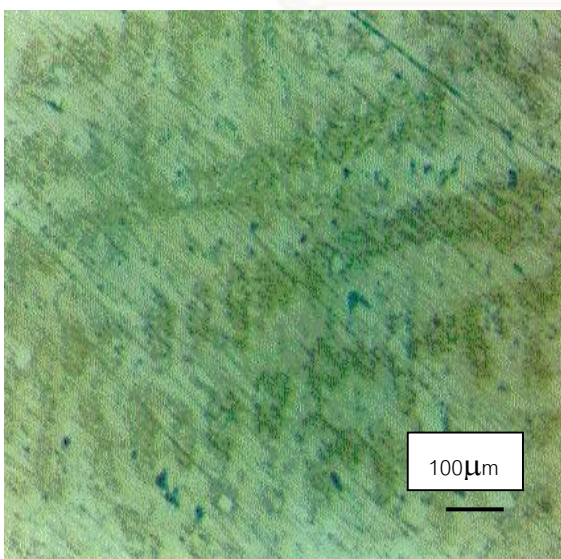
รูป ข.1 โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากนำไปกัดกรด
ที่กำลังขยาย 200 เท่า



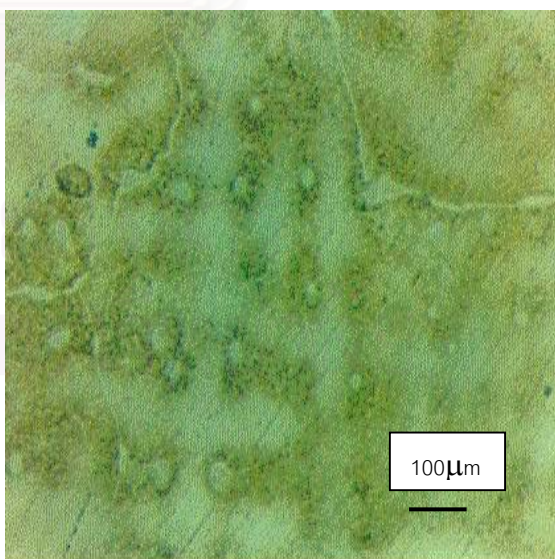
Sterling



Sterling + 0.11%Si

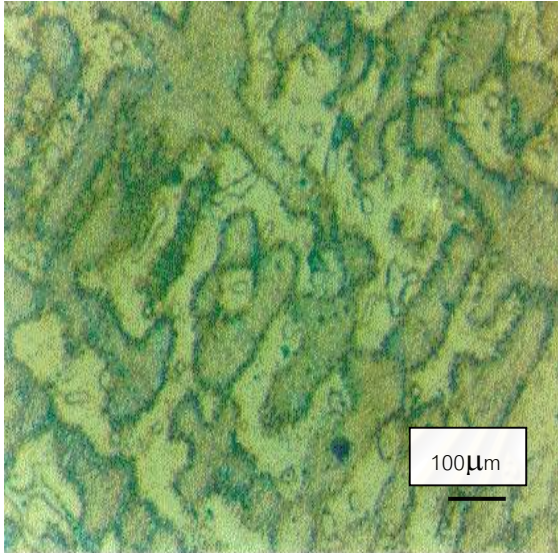


Sterling + 0.09%Si + 0.53%In

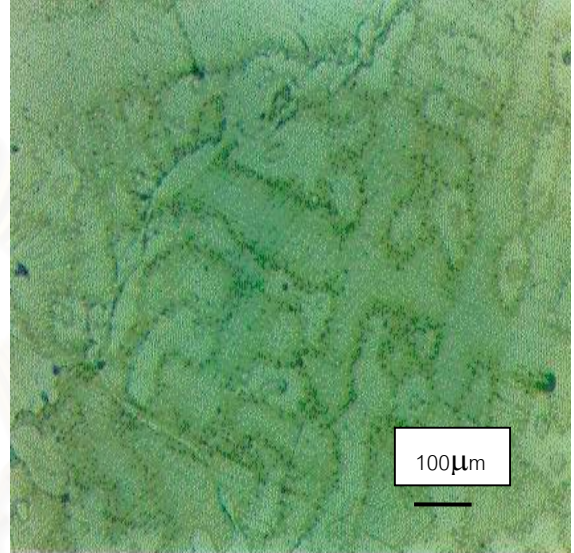


Sterling + 0.09%Si + 1.09%In

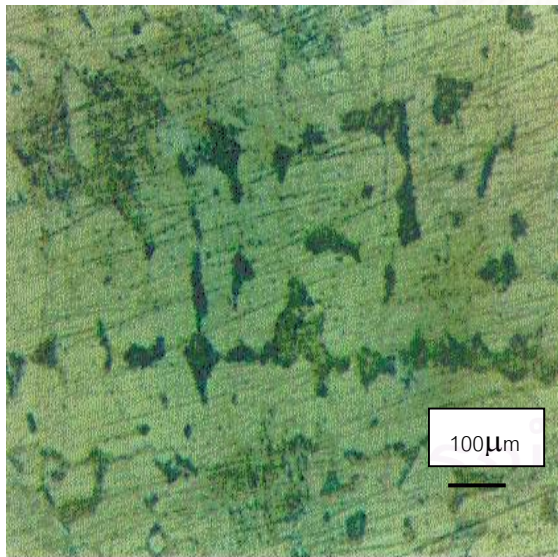
รูป ข.2 โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากนำไปกัดกรด (ต่อ)
ที่กำลังขยาย 200 เท่า



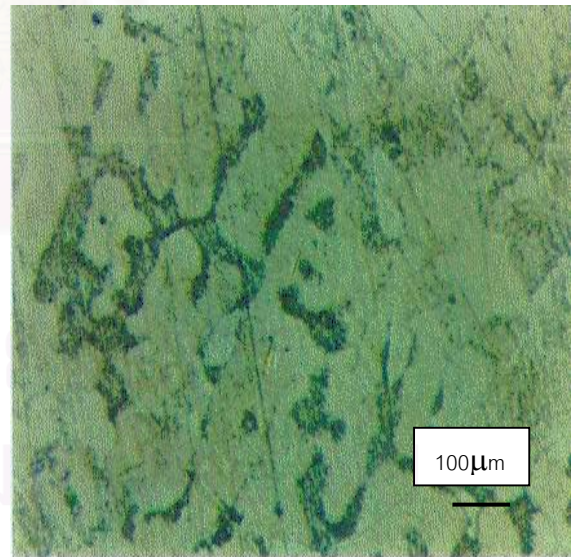
Sterling + 0.10%Si + 1.60%In



Sterling + 0.11%Si + 2.13%In



Sterling + 1.03%In



Sterling + 2.09%In

ภาคผนวก ค

ตารางแสดงผลการทดสอบแรงดึง

ตาราง ค.1 ทำการทดสอบครั้งที่ 1

Ag Test

Test type: Tensile Instron Corporation
 Operator name: Operator Series IX Automated Materials Testing System 7.26.00
 Sample Identification: AG1 Test Date: Tuesday, June 12, 1901
 Interface Type: 5500

Sample Rate (pts/secs): 5.0000 Humidity (%): 50
 Crosshead Speed: 5.0000 mm/min Temperature: 25 C
 2nd Crosshead Speed: 0.0000 mm/min
 Full Scale Load Range: 150.000 kN

Sample comments:

| | Load at Max.Load (kN) | Stress at Max.Load (MPa) | Load at z-slp Yield (kN) | Stress at z-slp Yield (MPa) | Load at offset 0.2% (N) | Stress at offset 0.2% (MPa) | Load at offset 0.02% (N) | Stress at offset 0.02% (MPa) |
|------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------------|------------------------------|
| 1 | 2.220 | 176.647 | 2.220 | 176.647 | 1511.269 | 120.266 | 1249.153 | 99.407 |
| 2 | 1.718 | 136.727 | 1.718 | 136.727 | 1618.251 | 128.779 | 1204.666 | 95.867 |
| 3 | 1.331 | 105.930 | 1.331 | 105.930 | 1257.156 | 100.044 | 834.371 | 66.399 |
| 4 | 1.689 | 134.411 | 1.689 | 134.411 | 616.864 | 49.090 | 520.092 | 41.389 |
| 5 | 1.286 | 102.348 | 0.835 | 66.462 | 604.755 | 48.126 | 463.529 | 36.887 |
| 6 | 1.511 | 120.282 | 1.511 | 120.282 | 1340.697 | 106.692 | 900.304 | 71.646 |
| Mean | 1.626 | 129.391 | 1.551 | 123.410 | 1158.165 | 92.166 | 862.019 | 68.599 |
| S.D. | 0.341 | 27.118 | 0.460 | 36.581 | 442.436 | 35.209 | 330.218 | 26.278 |

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค.2 ทำการทดสอบครั้งที่ 2

Ag Test

Test type: Tensile
Operator name: Operator
Sample Identification: AG2
Interface Type: 5500

Instron Corporation
Series IX Automated Materials Testing System 7.26.00
Test Date: Tuesday, July 31, 1901

Sample Rate (pts/secs): 5.0000
Crosshead Speed: 5.0000 mm/min
2nd Crosshead Speed: 0.0000 mm/min
Full Scale Load Range: 150.000 kN

Humidity (%): 50
Temperature: 25 C

Sample comments:

| | Load at Max. Load (kN) | Stress at Max. Load (MPa) | Load at z-slp Yield (kN) | Stress at z-slp Yield (MPa) | Load at offset 0.2% (N) | Stress at offset 0.2% (MPa) | Load at offset 0.02% (N) | Stress at offset 0.02% (MPa) |
|------|------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------------|------------------------------|
| 1 | 1.654 | 131.585 | 1.654 | 131.585 | 1550.319 | 123.373 | 1083.983 | 86.263 |
| 2 | 2.675 | 212.851 | 2.675 | 212.851 | 1280.069 | 101.867 | 888.946 | 70.742 |
| 3 | 2.244 | 178.575 | 2.244 | 178.575 | 839.086 | 66.774 | 535.281 | 42.597 |
| 4 | 2.232 | 177.648 | 2.232 | 177.648 | 897.718 | 71.440 | 558.771 | 44.467 |
| 5 | 1.202 | 95.656 | 1.202 | 95.656 | 685.779 | 54.574 | 384.364 | 30.587 |
| 6 | 1.832 | 145.820 | 1.832 | 145.820 | 465.493 | 37.044 | 270.002 | 21.487 |
| 7 | 1.492 | 118.700 | 1.492 | 118.700 | 1065.709 | 84.808 | 757.079 | 60.248 |
| 8 | 0.850 | 67.617 | 0.850 | 67.617 | 848.105 | 67.492 | 637.207 | 50.708 |
| 9 | 1.348 | 107.257 | 1.348 | 107.257 | 834.398 | 66.401 | 528.487 | 42.057 |
| 10 | 1.845 | 146.813 | 1.845 | 146.813 | 937.612 | 74.615 | 779.690 | 62.047 |
| 11 | 1.444 | 114.944 | 1.444 | 114.944 | 636.499 | 50.652 | 409.685 | 32.602 |
| 12 | 3.031 | 241.234 | 3.031 | 241.234 | 858.806 | 68.343 | 525.222 | 41.797 |
| Mean | 1.821 | 144.892 | 1.821 | 144.892 | 908.300 | 72.282 | 613.226 | 48.800 |
| S.D. | 0.630 | 50.167 | 0.630 | 50.167 | 287.930 | 22.913 | 230.057 | 18.308 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก.3 ทำการทดสอบครั้งที่ 3

Ag Test

Test type: Tensile
 Operator name: Operator
 Sample Identification: AG3
 Interface Type: 5500

Instron Corporation
 Series IX Automated Materials Testing System 7.26.00
 Test Date: Friday, November 23, 1901

Sample Rate (pts/secs): 5.0000
 Crosshead Speed: 5.0000 mm/min
 2nd Crosshead Speed: 0.0000 mm/min
 Full Scale Load Range: 150.000 kN

Humidity (%): 50
 Temperature: 25 C

Sample comments: AG3

| | Load at Max.Load (kN) | Stress at Max.Load (MPa) | Load at z-slp Yield (kN) | Stress at z-slp Yield (MPa) | Load at offset 0.2% (N) | Stress at offset 0.2% (MPa) | Load at offset 0.02% (kN) | Stress at offset 0.02% (MPa) |
|------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 1.732 | 137.836 | 1.732 | 137.836 | 1160.787 | 92.375 | 0.724 | 57.597 |
| 2 | 3.018 | 240.153 | 3.018 | 240.153 | 829.587 | 66.018 | 0.623 | 49.560 |
| 3 | 2.618 | 208.370 | 2.618 | 208.370 | 1425.219 | 113.418 | 0.784 | 62.366 |
| 4 | 2.456 | 195.413 | 2.456 | 195.413 | 1137.974 | 90.559 | 0.691 | 55.019 |
| Mean | 2.456 | 195.443 | 2.456 | 195.443 | 1138.392 | 90.592 | 0.705 | 56.135 |
| S.D. | 0.537 | 42.758 | 0.537 | 42.758 | 243.675 | 19.391 | 0.067 | 5.337 |

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชุดผสมเงินสเตอร์ลิง

รายการ ง.1 ปริมาณซิลิกอนในชุดผสม 6.26 % Cu – 0.11 % Si - balance of Ag

แบบ วค.

ที่ วว 0504/ 8444



ถึง ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรมวิทยาศาสตร์บริการขอส่งรายงานการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ วัตถุประสงค์อย่าง ตาม คำร้อง

ลงวันที่ 12 มิถุนายน 2544 เลขรับ 3273 วันที่ 12 มิถุนายน 2544

ซึ่งกรมวิทยาศาสตร์ฯ ได้รับเมื่อวันที่ 12 มิถุนายน 2544

กอง เคมี

โทร. 2017347-9



รายงานการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ

| ชื่อวัตถุประสงค์อย่าง | เครื่องหมาย | หมายเลข | | |
|-----------------------|-----------------|------------|----------------------|------|
| | ตรา ฯลฯ | | | |
| ตามและผู้ส่งเรียก | ที่ระบุตัวอย่าง | ปฏิบัติการ | | |
| Silver alloy | B | VI.191 | ซิลิกอน (Si), ร้อยละ | 0.11 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จิราภรณ์ ภิรมย์
(นางสาววาสนา คงสุข)
นักวิทยาศาสตร์ 4

รายงานนี้ : - รับรองเฉพาะวัตถุประสงค์ที่ได้ตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ เท่านั้น
- ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง

รายการ ง.2 ปริมาณซิลิกอนในชุดผสม 5.57 % Cu – 0.09 % Si – 0.53 % In - balance of Ag

แบบ วศ. 1



ที่ วว 0504/ 8445

ถึง ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรมวิทยาศาสตร์บริการขอส่งรายงานการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ วัสดุตัวอย่าง ตาม คำร้อง

ลงวันที่ 12 มิถุนายน 2544 เลขรับ 3273 วันที่ 12 มิถุนายน 2544

ซึ่งกรมวิทยาศาสตร์ฯ ได้รับเมื่อวันที่ 12 มิถุนายน 2544

กอง เคมี
โทร. 2017347-9



รายงานการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ

| ชื่อวัสดุตัวอย่าง | เครื่องหมาย | หมายเลข | | |
|-------------------|-------------|-----------------|----------------------|------|
| ตามและผู้ส่งเรียก | ตรา ฯลฯ | ที่ระบุตัวอย่าง | ปฏิบัติการ | |
| Silver alloy | C | VI.192 | ซิลิกอน (Si), ร้อยละ | 0.09 |

วิมลดา อิงอร
(นางสาววาสนา คงสุข)
นักวิทยาศาสตร์ 4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- รายงานนี้ :
- รับรองเฉพาะวัสดุตัวอย่างที่ได้ตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ เท่านั้น
 - ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง

รายการ ง.3 ปริมาณซิลิกอนในชุดผสม 5.16 % Cu – 0.09 % Si – 1.09 % In - balance of Ag

แบบ วศ. 1



ที่ วว 0504/ 8446

ถึง ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรมวิทยาศาสตร์บริการขอส่งรายงานการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ วัตถุตัวอย่าง ตาม คำร้อง

ลงวันที่ 12 มิถุนายน 2544 เลขรับ 3273 วันที่ 12 มิถุนายน 2544

ซึ่งกรมวิทยาศาสตร์ฯ ได้รับเมื่อวันที่ 12 มิถุนายน 2544

กอง เคมี
โทร. 2017347-9



รายงานการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ

| ชื่อวัตถุตัวอย่าง | เครื่องหมาย | หมายเลข | | |
|-------------------|-----------------|------------|----------------------|------|
| | ตรา ฯลฯ | | | |
| ตามที่ผู้ส่งเรียก | ที่ระบุตัวอย่าง | ปฏิบัติการ | | |
| Silver alloy | D | VI.193 | ซิลิกอน (Si), ร้อยละ | 0.09 |

วิรัช คุ้ม
(นางสาววาสนา คงสุข)
นักวิทยาศาสตร์ 4

สถาบันวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายงานนี้ : - รับรองเฉพาะวัตถุตัวอย่างที่ได้ตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ เท่านั้น
- ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง

รายการ ง.4 ปริมาณซิลิกอนในชุดผสม 4.23 % Cu – 0.10 % Si – 1.60 % In - balance of Ag (VO.389)
และในชุดผสม 3.76 % Cu – 0.11 % Si – 2.13 % In - balance of Ag (VO.390)

แบบ วศ. 1



ที่ วว 0504/ 14375

ถึง ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรมวิทยาศาสตร์บริการขอส่งรายงานการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ วัสดุตัวอย่าง ตาม คำร้อง

ลงวันที่ - เลขรับ 6469 วันที่ 22 ตุลาคม 2544

ซึ่งกรมวิทยาศาสตร์ฯ ได้รับเมื่อวันที่ 22 ตุลาคม 2544

กอง เคมี
โทร. 0 2201 7347-9

รายงานการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ

| ชื่อวัสดุตัวอย่าง | เครื่องหมาย | หมายเลข | ซิลิกอน (Si) |
|-------------------|-----------------|------------|--------------|
| ตามและผู้ส่งเรียก | ที่ระบุตัวอย่าง | ปฏิบัติการ | % |
| Ag - alloys | - | VO.389 | 0.10 |
| | | VO.390 | 0.11 |

ดวงชนน ศรีดิโนวศ
(นางวรรณภา ดันชินขงค์)

นักวิทยาศาสตร์ 7 ว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายงานนี้ : - รับรองเฉพาะวัสดุตัวอย่างที่ได้ตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ เท่านั้น
- ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง

รายการ ง.5 ปริมาณซิลิคอนในชุดผสม 5.13 % Cu – 0.44 % Si – 2.12 % In - balance of Ag

แบบ วศ. 1



ที่ วว 0504/ 412

ถึง นายเจษฎา จอกแก้ว

กรมวิทยาศาสตร์บริการขอส่งรายงานการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ วัสดุตัวอย่าง ตาม คำร้อง

ลงวันที่ 12 ธันวาคม 2544 เลขรับ 7595 วันที่ 12 ธันวาคม 2544

ซึ่งกรมวิทยาศาสตร์ ๙ ได้รับเมื่อวันที่ 12 ธันวาคม 2544

กอง เคมี
โทร. 0 2201 7347-9



รายงานการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ

| ชื่อวัสดุตัวอย่าง | เครื่องหมาย | หมายเลข | ชื่อวิเคราะห์ | ร้อยละ |
|-------------------|-----------------|------------|----------------------|--------|
| ตามและผู้ส่งเรียก | ตรา ๙๗๙ | | | |
| | ที่ระบุตัวอย่าง | ปฏิบัติการ | | |
| Ag - alloy | - | VQ.793 | ซิลิคอน (Si), ร้อยละ | 0.44 |

นางสาววราสนา คงสุข
(นางสาววราสนา คงสุข)

นักวิทยาศาสตร์ 4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายงานนี้ : - รับรองเฉพาะวัสดุตัวอย่างที่ได้ตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ เท่านั้น
- ไม่รับรองวัสดุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง

รายการ ง.7 ปริมาณของ Ag, Cu และ In ในชุดผสม 4.23%Cu – 0.10%Si – 1.60%In - balance of Ag (S-1)

ในชุดผสม 6.26%Cu – 0.11%Si – 2.13%In - balance of Ag (S-2)

ในชุดผสม 5.88%Cu – 1.03%In - balance of Ag (S-3)

ในชุดผสม 5.17%Cu – 2.09%In - balance of Ag (S-4)

dmc²
DUPON METALS COMPANY CENTER

Head office
dmc² Metals (Thailand) Ltd.

23 /110-113 , Sorachai Bldg.,
25-28 Fl., Sukhumvit Road,
North Klinton, Wattana
Bangkok 10110 , Thailand
Phone : (662) 714-3969
Fax : (662) 714-4224

Factory
dmc² Metals (Thailand) Ltd.

PRECIOUS METAL REFINERY
47/33 Moo 4, Sukhapiban 2 Road
Praves, Bangkok 10260
Phone : (662) 727-0234-7
Fax : (662) 727-0238

To : Metallurgy department
Fax : 218-6942
Attn : Dr. Aekasit
CC. : K. Jessada (02-436-2380) Date : 20-Jul-01

ASSAY RESULTS

RECEIPT NO. : 03175

| Bar No. | Weight in grams | | Au | | Ag | | Cu | | In | |
|---------|-----------------|------------|----|------|-------|------|------|------|------|------|
| | Received | After Used | % | Fine | % | Fine | % | Fine | % | Fine |
| S-1 | 40.15 | 38.99 | | - | 93.62 | | 4.23 | | 1.60 | |
| S-2 | 34.12 | 32.96 | | - | 94.11 | | 3.76 | | 2.13 | |
| S-3 | 20.72 | 19.56 | | - | 92.56 | | 5.88 | | 1.03 | |
| S-4 | 38.30 | 37.14 | | - | 92.53 | | 5.17 | | 2.09 | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| Total | 133.29 | 128.65 | | - | | | | | | |

We would consider the above accepted if we do not hear from you within five (5) working days from today.

Yours sincerely
dmc² Metals (Thailand) Ltd.

Acceptance / Date

รายการ ง.8 ปริมาณของ Ag, Cu และ In ในชุดผสม 5.13%Cu – 0.44%Si – 2.12%In - balance of Ag (S-1)

dmc²
Digital Mining & Metallurgy Centre

Head office
dmc² Metals (Thailand) Ltd.

23 /110-113 , Sorechai Bldg.,
 25-28 Fl. Sukhumvit Road,
 North Kington, Wattana
 Bangkok 10110 , Thailand
 Phone : (662) 714-3969
 Fax : (662) 714-4224

Factory
dmc² Metals (Thailand) Ltd.

PRECIOUS METAL REFINERY
 47/33 Moo 4, Sukhapiban 2 Road
 Prawas, Bangkok 10280
 Phone : (662) 727-0234-7
 Fax : (662) 727-0238

To : Metallurgy Engineering Department
 Chulalongkorn University
Fax : 218-6942 , 4-362380
Attn : K.Jessada
CC. : Dr.Aekasit

Date : 03-Jan-02

ASSAY RESULTS

RECEIPT NO. : 03933

| Bar No. | Weight in grams | | Au | | Ag | | Cu | | In | |
|--------------|-----------------|--------------|----|------|-------|------|------|------|------|------|
| | Received | After Used | % | Fine | % | Fine | % | Fine | % | Fine |
| S-1 | 13.24 | 12.12 | | - | 92.08 | | 5.13 | | 2.12 | |
| | | | | - | | | | | | |
| | | | | - | | | | | | |
| | | | | - | | | | | | |
| | | | | - | | | | | | |
| Total | 13.24 | 12.12 | | - | | | | | | |

We would consider the above accepted if we do not hear from you within five (5) working days from today.

Yours sincerely
 dmc² Metals (Thailand) Ltd.

Acceptance / Date

ศูนย์บริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการ ง.9 แสดง ค่าความบริสุทธิ์ของเม็ดยอดินเดียม

CERTIFICATE OF ANALYSIS

PRODUCT NUMBER: 30913-3 LOT NUMBER: 03929LS
 PRODUCT NAME: INDIUM, SHOT, 2 -5MM DIAM., 99.99%
 FORMULA: IN FORMULA WEIGHT: 114.82

APPEARANCE GRAY, TEAR-SHAPED PELLETS

TRACE ANALYSIS, ICP

| | |
|----|---------|
| PB | 3.7 PPM |
| NA | 3.0 PPM |
| CD | 2.5 PPM |
| ZN | 2.0 PPM |
| FE | 1.2 PPM |
| CA | 0.6 PPM |
| MG | 0.3 PPM |

ICP ASSAY CONFIRMS INDIUM COMPONENT.

PARTICLE SIZE MEASUREMENTS 4.9MM DIAMETER

QUALITY CONTROL ACCEPTANCE DATE OCTOBER 1998

สถาบันวิทยบริการ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 ALDRICH CHEMICAL COMPANY
 DAVID SWESSEL
 SEPTEMBER 10, 1999



chemists helping chemists in research & industry

aldrich chemical co.

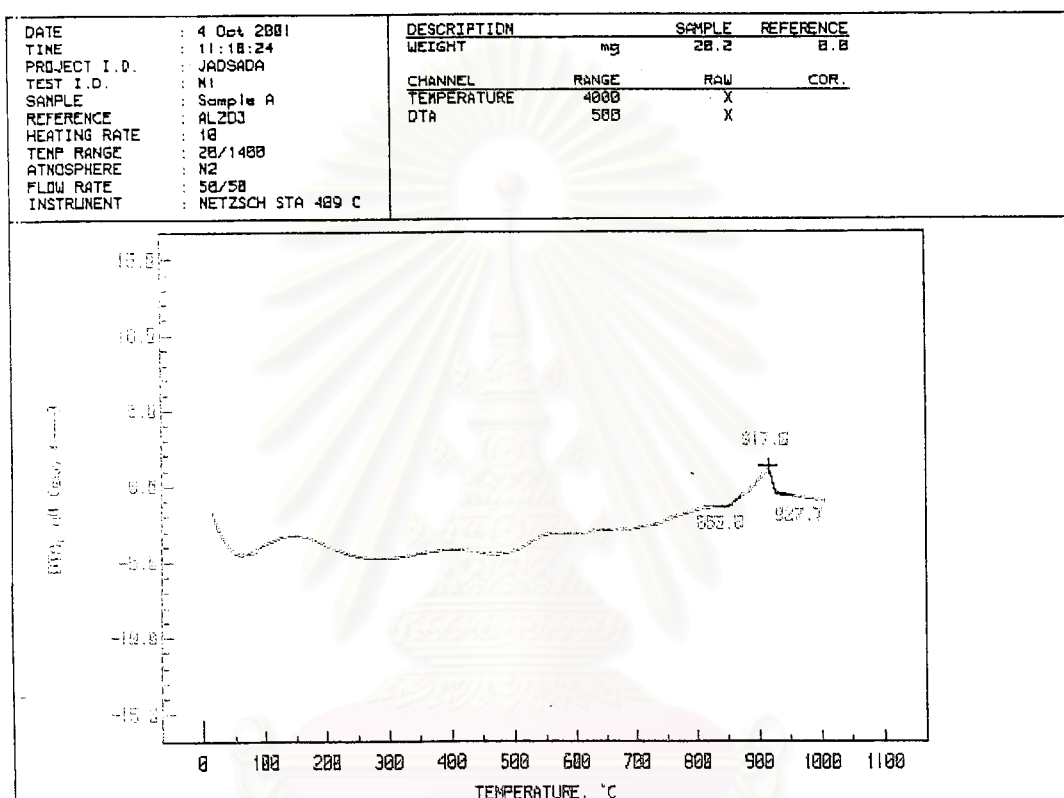
P.O. Box 355, Milwaukee, Wisconsin 53201 USA • (414) 273-3850 • FAX (414) 273-4979

ALDRICH warrants that its products conform to the information contained in this and other Aldrich publications. Purchaser must determine the suitability of the product for its particular use. See reverse side of invoice or packing slip for additional terms and conditions of sale.

ภาคผนวก จ

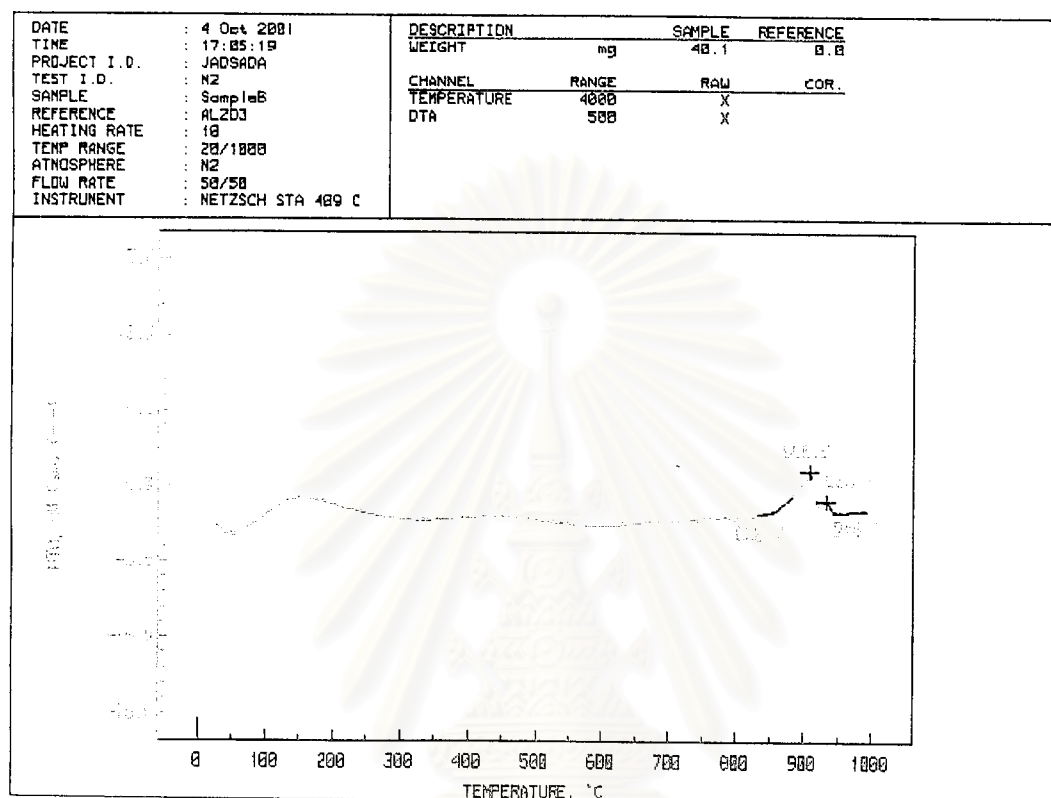
ผลการตรวจสอบจุดหลอมเหลวโดยวิธี DTA.

รูป จ.1 กราฟแสดงจุดหลอมเหลวของชุดส่วนผสม 6.90%Cu – balance of Ag



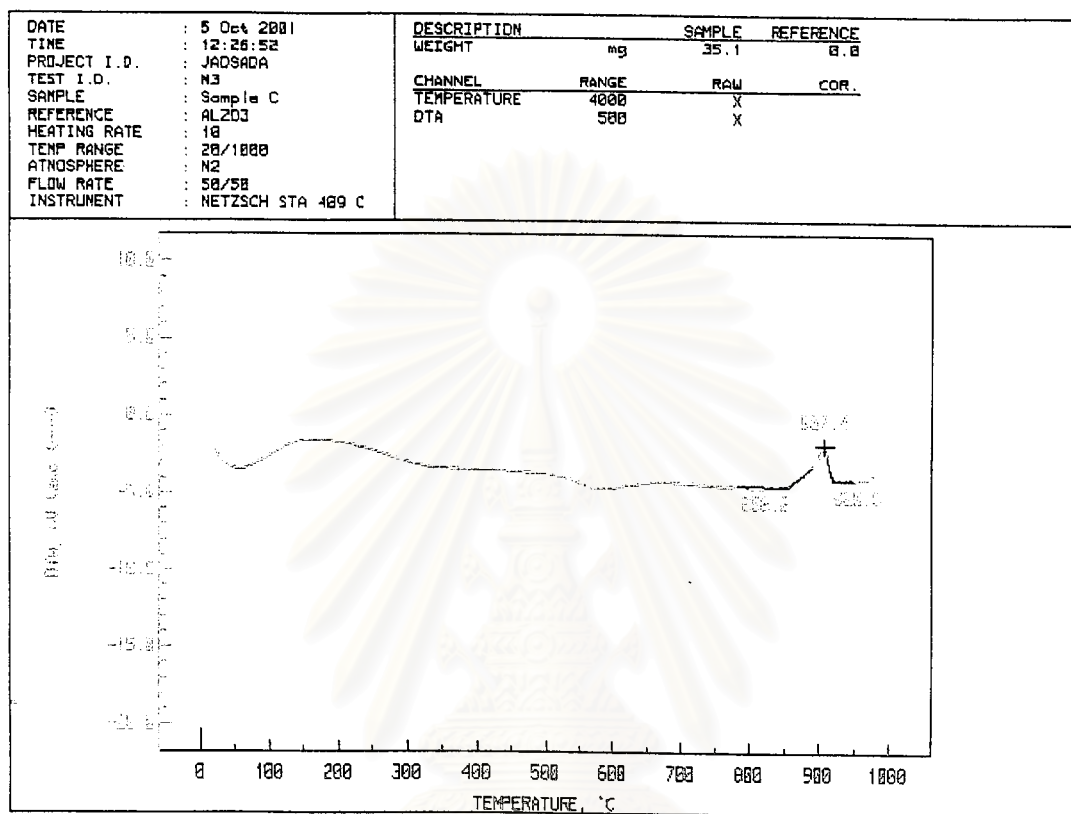
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูป จ.2 กราฟแสดงจุดหลอมเหลวของชุดส่วนผสม 6.26%Cu – 0.11%Si - balance of Ag



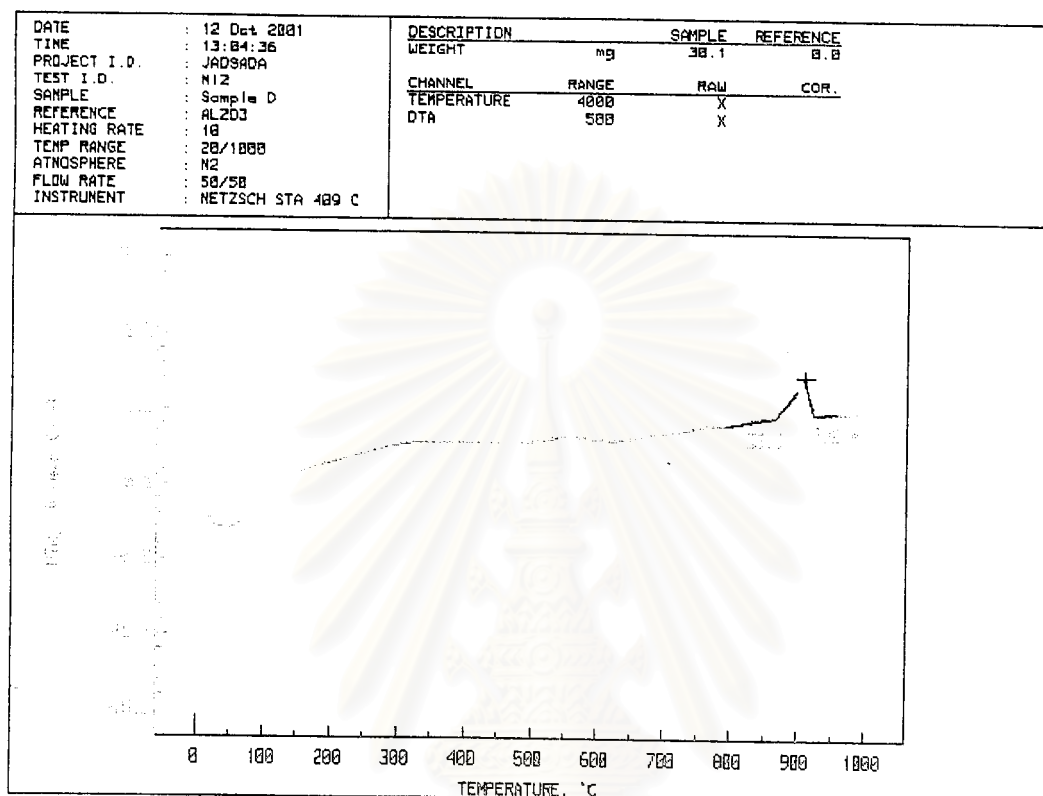
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูป จ.3 กราฟแสดงจุดหลอมเหลวของชุดส่วนผสม 5.57%Cu – 0.09%Si – 0.53%In - balance of Ag



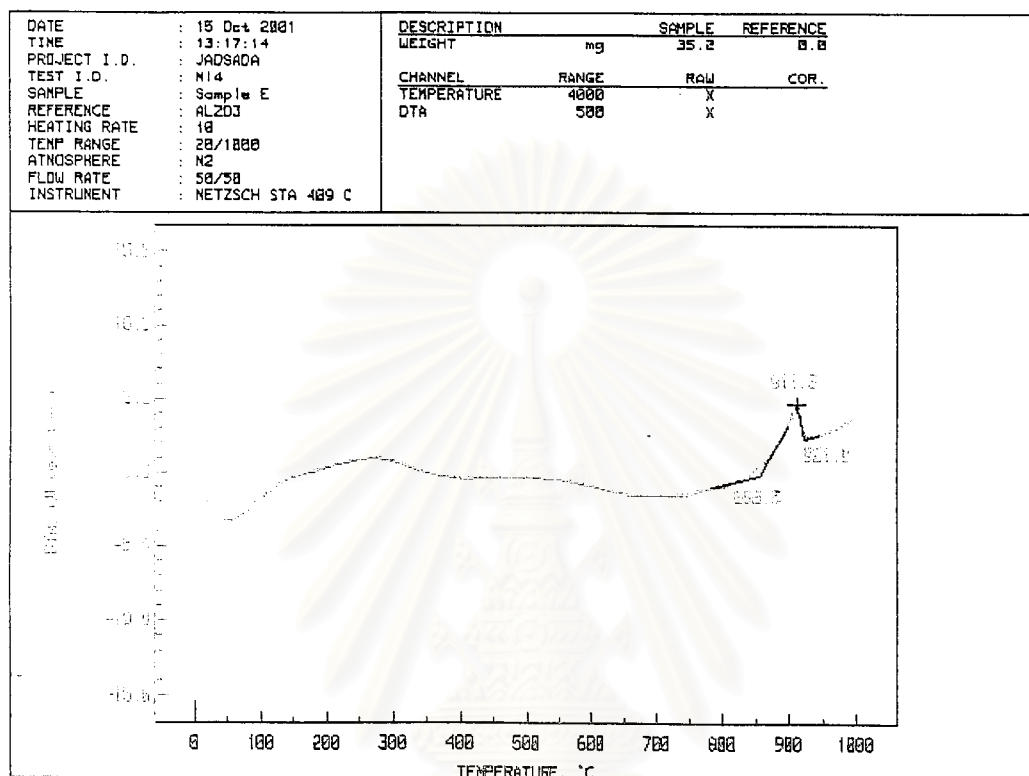
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูป จ.4 กราฟแสดงจุดหลอมเหลวของชุดส่วนผสม 5.16%Cu – 0.09%Si – 1.09%In - balance of Ag



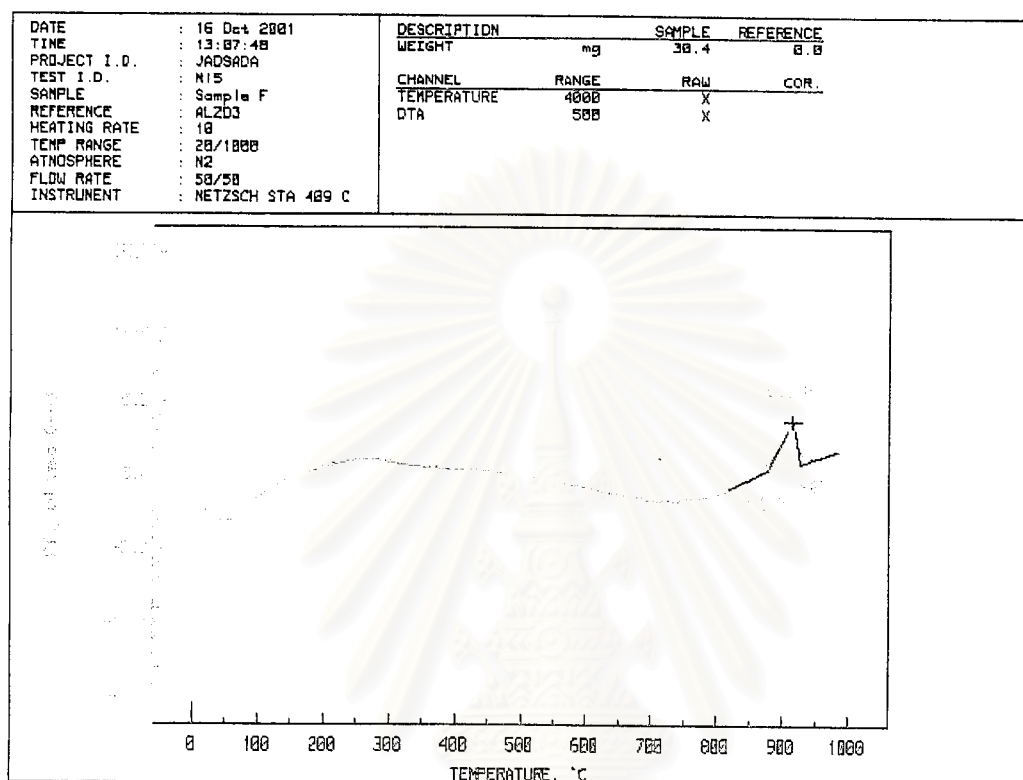
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูป จ.5 กราฟแสดงจุดหลอมเหลวของชุดส่วนผสม 4.23%Cu – 0.10%Si – 1.60%In - balance of Ag



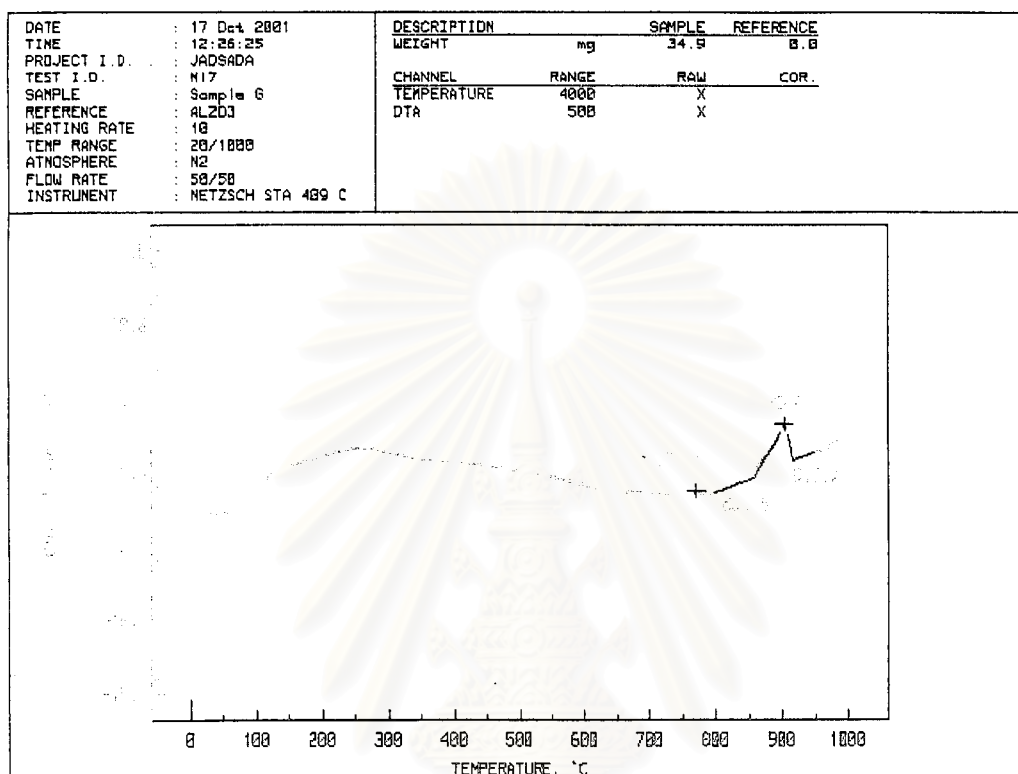
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูป จ.6 กราฟแสดงจุดหลอมเหลวของชุดส่วนผสม 3.76%Cu – 0.11%Si – 2.13%In - balance of Ag



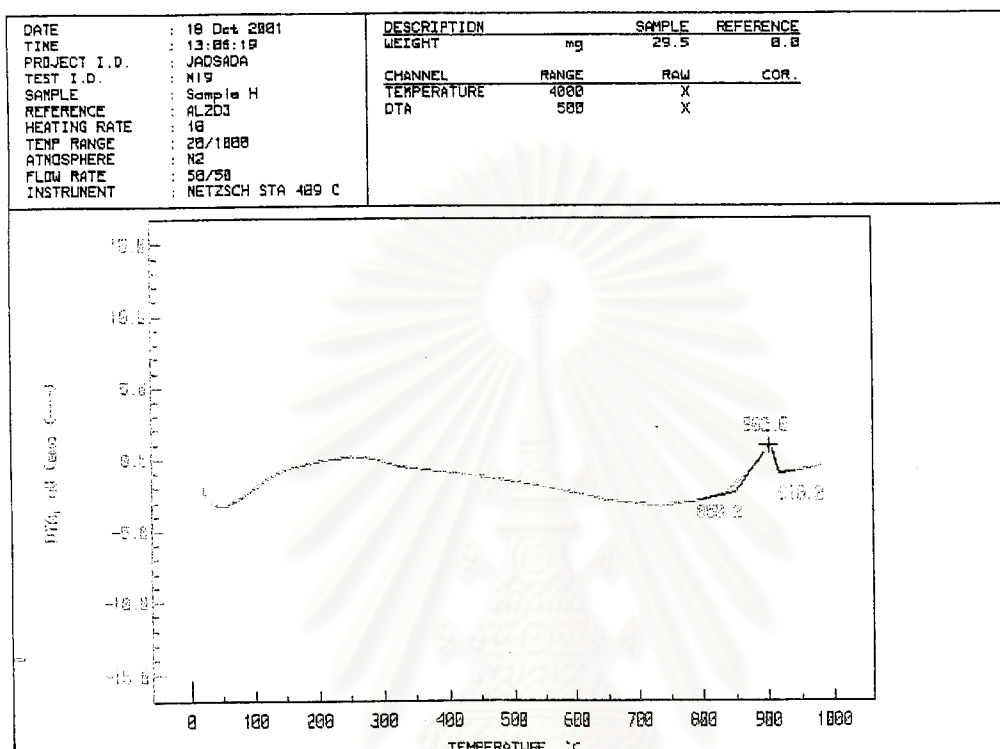
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูป จ.7 กราฟแสดงจุดหลอมเหลวของชุดส่วนผสม 5.88%Cu – 1.03%In - balance of Ag



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูป จ.8 กราฟแสดงจุดหลอมเหลวของชุดส่วนผสม 5.17%Cu – 2.09%In - balance of Ag



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ตารางส่วนผสมทางเคมีจากการตรวจสอบจาก EDX

| Sample | Composition from EDX (%wt.) | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------------|------|------|------|---------------------|-------|------|------|------------|-------|------|------|
| | Matrix | | | | Secondary Structure | | | | | | | |
| | | | | | Black Zone | | | | White Zone | | | |
| | Ag | Cu | Si | In | Ag | Cu | Si | In | Ag | Cu | Si | In |
| Sterling | 94.08 | 5.92 | - | - | 71.86 | 28.14 | - | - | NA. | NA. | NA. | NA. |
| Sterling + 0.11%Si | 95.79 | 4.16 | 0.05 | - | 2.93 | 92.49 | 4.58 | - | NA. | NA. | NA. | NA. |
| Sterling + 0.09%Si + 0.53%In | 96.82 | 3.52 | 0.11 | - | NA. | NA. | NA. | NA. | 73.09 | 27.35 | 0.06 | - |
| Sterling + 0.09%Si + 1.09%In | 96.24 | 3.65 | 0.12 | - | 44.55 | 51.79 | 3.53 | 0.13 | NA. | NA. | NA. | NA. |
| Sterling + 0.10%Si + 1.60%In | 94.72 | 4.50 | 0.06 | 0.71 | 55.48 | 40.96 | 1.79 | 1.77 | NA. | NA. | NA. | NA. |
| Sterling + 0.11%Si + 2.13%In | 93.55 | 4.85 | 0.15 | 1.45 | 58.60 | 38.14 | 1.19 | 2.07 | 93.22 | 4.33 | 0.08 | 2.37 |
| Sterling + 1.03%In | 94.63 | 5.11 | - | 0.26 | 60.83 | 38.73 | - | 0.44 | NA. | NA. | NA. | NA. |
| Sterling + 2.09%In | 94.83 | 4.08 | - | 1.09 | 62.91 | 35.77 | - | 1.32 | NA. | NA. | NA. | NA. |

หมายเหตุ : NA. = not available

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย เจษฎา จอกแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2513 ภูมิลำเนาเป็นคนกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2537 ประสบการณ์ในการทำงาน โดยเป็นวิศวกรประจำแผนกวิศวกรรมแก๊สเทอร์ไบน์และดีเซล ฝ่ายบำรุงรักษาเครื่องกล การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย สำนักงานใหญ่ นนทบุรี โดยเริ่มเข้าทำงานตั้งแต่ปี พ.ศ. 2538 ต่อมาได้สอบเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโลหการ ในภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา 2541 จึงได้ลางานเพื่อศึกษาต่อเป็นระยะเวลา 2 ปี และกลับเข้าทำงานในแผนกเดิมเมื่อปี พ.ศ.2543 จนถึงปัจจุบัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย