

## กรณีศึกษาการแตกตัวของโลหะเงินสเตอร์ลิงจากการรีดเย็นขึ้นรูป

สิริพร โรจนนันต์<sup>1</sup> สุรศิษฐ์ โรจนนันต์<sup>2</sup>

วีรภัทร ธรรมเจริญ<sup>3</sup> ฉลองชัย โพธินาแค<sup>3</sup> และ อภิชาติ ดารากัย<sup>3</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

### บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอในมุมมองของกรณีศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการตรวจสอบหาสาเหตุการแตกตัวของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น ในงานนี้ได้ทดสอบสมบัติทางกล และศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่แตกจากจากการรีด ผลการทดสอบสมบัติทางกล พบว่าความแข็งมีค่าอยู่ในช่วง 97-105 บริเนล ความแข็งแรงมีค่าอยู่ในช่วง 188-202 เมกกะปาสคาล และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าอยู่ในช่วง 7-11 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงธรรมดาและกล้องอิเล็กตรอนชนิดส่องกราด พบว่ามีการกระจายของเฟสไม่สม่ำเสมอ ซึ่งประกอบด้วยเฟสอัลฟาที่มีส่วนผสมของเงินเป็นส่วนผสมหลัก โครงสร้างยูเทคติก และในบางบริเวณพบรอยแตกจากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) พบว่าบริเวณโครงสร้างพื้นมีธาตุ Ag, Cu, C และ O และบริเวณรอยแตกมีธาตุ Ag, Cu, C, O, Si, Cr, B, Fe, Ta และ Al นอกจากนี้ส่วนที่เป็นอนุภาคพบว่ามีธาตุ Ca, C และ O ผลการศึกษาสรุปว่าธาตุต่างๆ มีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอในโครงสร้าง โดยเฉพาะธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูง มีบทบาทสำคัญในการแตกตัวของชิ้นงานจากการขึ้นรูปเย็น

**คำสำคัญ :** การแตกตัวของโลหะเงิน / โลหะเงิน / การรีดเย็น / เงินสเตอร์ลิง

<sup>1</sup> อาจารย์ สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อม และวัสดุ

<sup>2</sup> อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ

<sup>3</sup> นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ

## Case Study of Crack Problem of Silver Sterling from Cold Working Process

Siriporn Rojanananan <sup>1</sup>, Surasit Rojanananan <sup>2</sup>,  
Chalongchai Photinakae <sup>3</sup>, Weerapat Thamcharoen <sup>3</sup>, and Apichart Darakai <sup>3</sup>  
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

### Abstract

This paper presents an investigation on crack problem identification of silver sterling from a cold working process. Mechanical properties and microstructures were examined. The results showed that tensile strength, hardness and percent elongation ranged from 188-202 MPa, 90-105 HB, and 7-11, respectively. Metallographic investigation showed that phase distribution exhibited inhomogeneous phases, containing  $\alpha$ -Ag-rich phase and eutectic structure and cracks. EDS analysis was carried out on the matrix and the crack interface areas. EDS spectrum showed peaks of Ag, Cu, C, O and Ag, Cu, C, O, Si, Cr, B, Fe, Ta, Al, respectively. Moreover, EDS spectrum on particle showed peaks of Ca C and O. The experimental results indicated that the presence of the inhomogeneous distribution of high melting point elements has a significant effect on the cracking of the silver sterling.

**Keywords** : Crack / Silver / Cold Work / Silver Sterling

---

<sup>1</sup> Lecturer, Division of Materials Technology, School of Energy Environment and Materials.

<sup>2</sup> Lecturer, Department of Tool and Materials Engineering.

<sup>3</sup> Student, Department of Tool and Materials Engineering.

## 1. บทนำ

ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับและอัญมณีที่มีการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับด้วยโลหะเงินสเตอร์ลิง ส่วนใหญ่ผลิตด้วยกรรมวิธีหล่อขึ้นรูป (Casting) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นการหล่อแบบประณีต (Investment casting) เนื่องจากวิธีนี้เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการลดความเสียหายของตัวเรือนได้สลักซับซ้อน มีรายละเอียดงานดี ครอบคลุมตามแบบที่ต้องการ แต่ก็พบว่ามีปัญหาจากการหล่อ เช่น ปัญหาคุณภาพผิวงานไม่ดี มีข้อบกพร่องลักษณะต่างๆ เกิดขึ้น เช่น เกิดตามด เกิดรูพรุนที่ผิวงาน ปัญหาการหล่อเงินสเตอร์ลิง [1] เกิดจาก 2 สาเหตุใหญ่ คือ เทคนิคการหลอมไม่ดีพอ และปัญหาความสามารถในการละลายของออกซิเจนได้ดีในขณะที่โลหะเงินหลอมละลาย จึงต้องมีวิธีป้องกันบรรยากาศจากการหลอม เนื่องจากการที่ออกซิเจนละลายได้ดีในสภาพของเหลว เมื่อเงินแข็งตัวจึงเกิดรูพรุนและเกิดออกไซด์ของทองแดง จึงมีการผลิตเครื่องประดับบางรูปแบบ (Design) ที่ผลิตด้วยกรรมวิธีขึ้นรูปแทนการหล่อ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดขึ้นจากการหล่อ ซึ่งเหมาะสมสำหรับชิ้นงานที่ไม่ต้องการรายละเอียดของลดความเสียหายมากนัก ในการขึ้นรูปเป็นการเพิ่มความแข็งแรงและยังทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จึงต้องมีการอบอุ่น Smith G. และ Robertson A. [2] รายงานว่า เงินบริสุทธิ์เกรดทางการค้าโดยทั่วไปอบที่อุณหภูมิ 300-350 องศาเซลเซียส แล้วตามด้วยการรีดเย็นขึ้นรูป 50 เปอร์เซ็นต์ แต่ในทางปฏิบัตินิยมอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ทำให้เกรนใหญ่ขึ้น เนื่องจากผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้น มีการรวมตัวของออกซิเจนเกิดขึ้นเป็นผลให้ความเหนียวลดลงและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น สำหรับเงินสเตอร์ลิงโดยทั่วไปอบที่อุณหภูมิ 480-535 องศาเซลเซียส โดยปล่อยให้เย็นตัวในเตาภายใต้บรรยากาศที่ควบคุม

ปัญหาการรีดขึ้นรูปบางครั้งพบว่ามีรอยแตกระหว่างการรีดลดขนาด อาจเป็นปัญหาจากการรีดลดรูปมากเกินไปหรือจากสาเหตุอื่นๆ จุดประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อศึกษาวิเคราะห์สาเหตุการแตกของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านกระบวนการรีดลดขนาด ในมุมมองของกรณีศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการตรวจสอบสาเหตุการแตกตัวของเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น

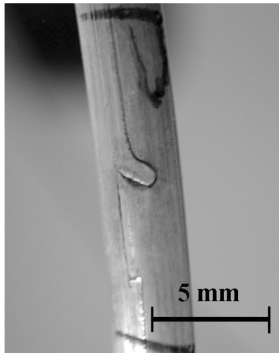
## 2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

โลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการรีดขึ้นรูปเป็นลวดในงานวิจัยนี้ ได้รับความอนุเคราะห์มาจากโรงงาน เมื่อศึกษาจากลักษณะภายนอกพบว่าปัญหาของการแตกเป็นช่วงๆ จึงเก็บตัวอย่างของโลหะเงินสเตอร์ลิงมาวิเคราะห์สาเหตุของการแตก รวบรวมลักษณะทางกายภาพ ทดสอบสมบัติทางกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) ทดสอบความแข็งแรงด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรง (Hardness tester) ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงธรรมดา โดยการใช้กรดกัดผิวของ  $100 \text{ ml H}_2\text{O} + 4 \text{ ml H}_2\text{SO}_4 + 7.5 \text{ g CrO}_3$  และกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) ในบริเวณรอยแตกและบริเวณทั่วไป รวมทั้งการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)

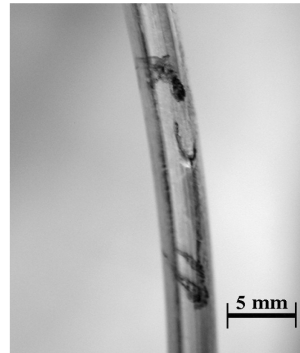
### 3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

#### 3.1 ลักษณะทั่วไป

จากการตรวจสอบลักษณะการแตกร้าวจากภายนอกของชิ้นงาน พบว่ารอยแตกมีลักษณะแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) และ 1 (ข) รอยแตกบางส่วนเป็นลักษณะปลายแหลม บางส่วนเป็นลักษณะแผ่นมนและเป็นรอยแตกทางยาว ระยะห่างของรอยแตกที่พบแต่ละรอยห่างกันเป็นระยะที่ไม่แน่นอนในช่วงประมาณ 10-30 เซนติเมตร ไม่พบรูปแบบที่แตกเป็นลักษณะซ้ำๆ ในระยะห่างคงที่ สาเหตุที่เกิดรอยแตกแบบนี้จึงไม่น่าจะมาจากลูกรีดที่ใช้ในการรีดลดขนาดมีตำหนิที่ผิวหน้า



(ก)

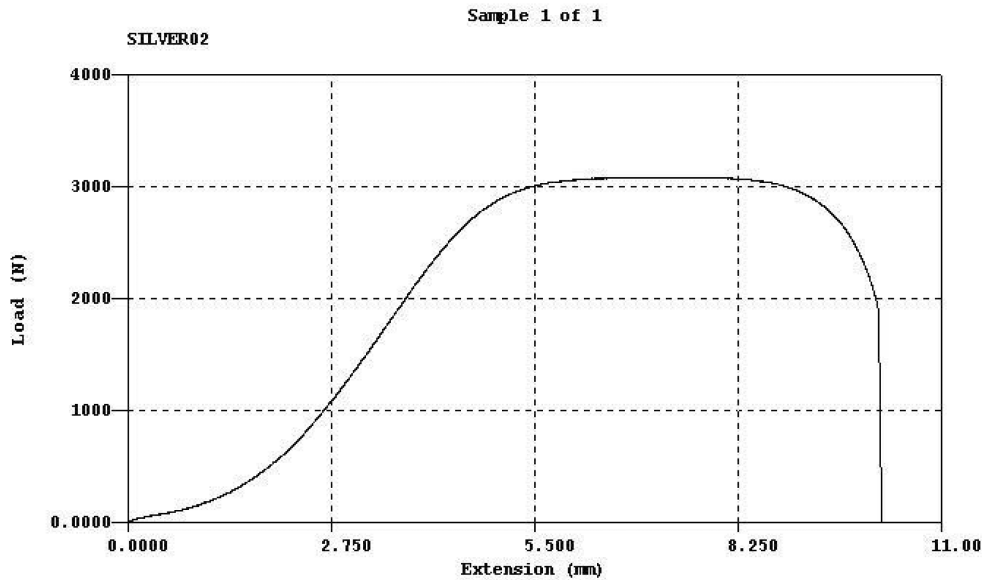


(ข)

รูปที่ 1 ตัวอย่างลักษณะรอยแตกของโลหะเงินที่ผ่านการรีดเย็น

#### 3.2 สมบัติทางกล

ในการทดสอบสมบัติทางกล ในที่นี้ได้ทดสอบความต้านทานแรงดึงและความแข็งของลวดตัวอย่างที่รีดแล้วมีรอยแตกเป็นระยะๆ โดยเลือกตัดลวดในบริเวณที่ไม่มีรอยแตกมาเป็นชิ้นงานทดสอบ ผลการทดสอบแรงดึงได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและระยะยึดตัวดังแสดงในรูปที่ 2 ผลการคำนวณความแข็งแรงสูงสุดของของชิ้นงานและผลการทดสอบความแข็ง แสดงผลดังตารางที่ 1 ในการทดสอบแรงดึงและวัดความแข็งนี้ ใช้จำนวนชิ้นทดสอบอย่างละ 10 ชิ้น พบว่ามีค่าความแข็งมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 97-105 บริเนล ความแข็งแรงมีค่าประมาณ 188-203 เมกกะปาสคาล เมื่อเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยที่ผ่านของ Station A. [3] รายงานว่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของโลหะเงินสเตอริงที่ผ่านการรีดเย็นโดยที่ชิ้นงานไม่มีรอยแตกร้าว มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดถึงประมาณ 304-344 เมกกะปาสคาล และความแข็งมีค่าประมาณ 95-107 บริเนล จะเห็นได้ว่าความเค้นแรงดึงสูงสุดมีค่าสูงกว่าค่าทดสอบได้จากชิ้นงานที่ศึกษา สำหรับความแข็งมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ศึกษานี้ ไม่ได้มีปัญหาการแตกร้าวจากกระบวนการรีดลดรูปเกินขนาด โดยปกติการรีดขึ้นรูปย่อมส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งและความแข็งแรง หากรีดลดขนาดมากเกินไปอาจเป็นสาเหตุของการแตกร้าวในการรีดได้ แต่จากผลการทดลองนี้ ความแข็งและความแข็งแรงที่วัดได้มีค่าไม่สูงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยดังกล่าว



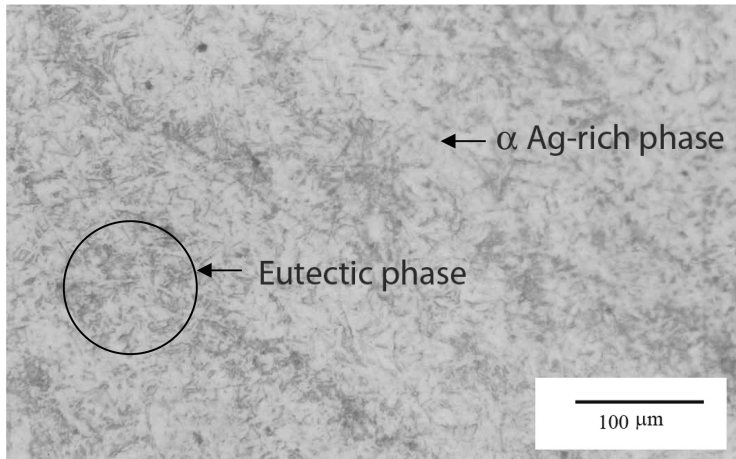
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดึงจนกระทั่งชิ้นงานขาดและระยะยืดตัวของชิ้นงาน

ตารางที่ 1 ค่าความแข็งและความแข็งแรงของชิ้นทดสอบที่ตัดมาจากชิ้นงานที่รีดแตก

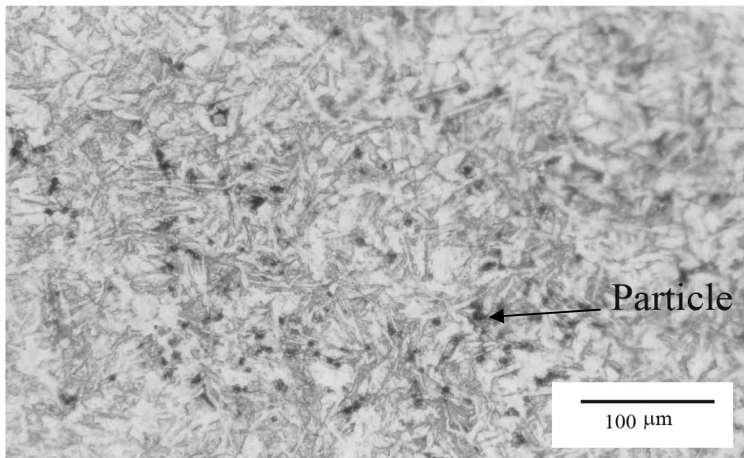
ชั้นที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
ความแข็ง (บริเนล)	97.1	101.8	103.2	103.9	105.0	103.5	101.3	102.0	102.5	105.3	112.6
ความแข็งแรง (เมกกะปาสคาล)	197.1	194.0	193.0	194.7	202.5	192.3	193.9	191.2	193.9	187.5	194.0

### 3.3 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงธรรมดา (Optical microscope)

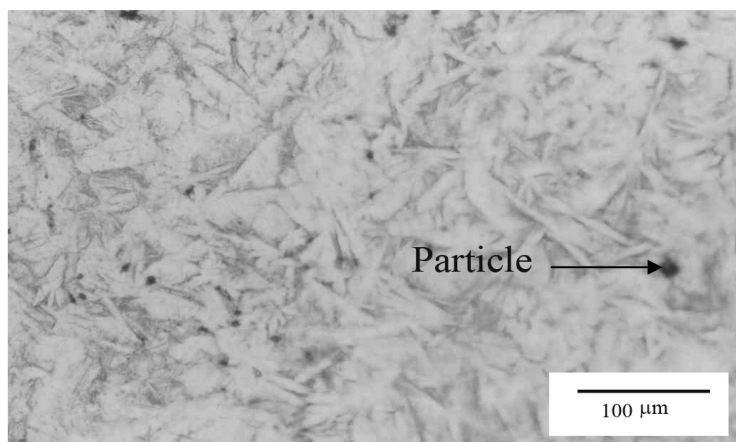
จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงธรรมดาในบริเวณต่างๆ ที่ไม่ปรากฏรอยแตก พบว่าโครงสร้างประกอบด้วยเฟสอัลฟา ( $\alpha$ -Ag-rich phase) ที่มีส่วนผสมของเงินเป็นส่วนผสมหลัก โครงสร้างยูเทคติก (Eutectic structure) และอนุภาค (Particle) ดังแสดงในรูปที่ 3 (ก) - (ค) ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าลักษณะการกระจายตัวของเฟสแตกต่างกัน โครงสร้างในรูป (ก) มีการกระจายตัวของเฟสสม่ำเสมอ ส่วนรูป (ข) แสดงอนุภาคขนาดเล็กกระจายเป็นหย่อมเพิ่มเติมจากที่เห็นในบริเวณแรก รูป (ค) แสดงขนาดของโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ปรากฏรอยแตกแสดงในรูปที่ 4 (ก) - (ข) ประกอบด้วยเฟสอัลฟาของเงินและยูเทคติกเช่นกัน แต่สามารถเห็นได้ชัดเจนว่ามีอนุภาคขนาดเล็กกระจายตลอดแนวข้างรอยแตก แสดงให้เห็นว่าเกิดความไม่สม่ำเสมอของเฟสต่างๆ ในชิ้นงาน



(น)

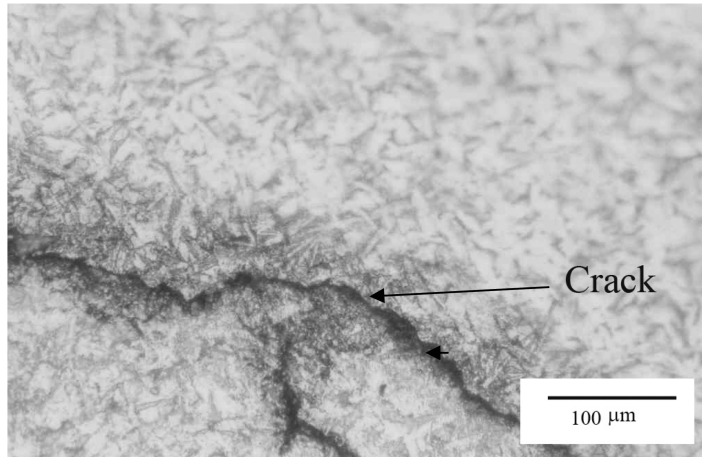


(ข)

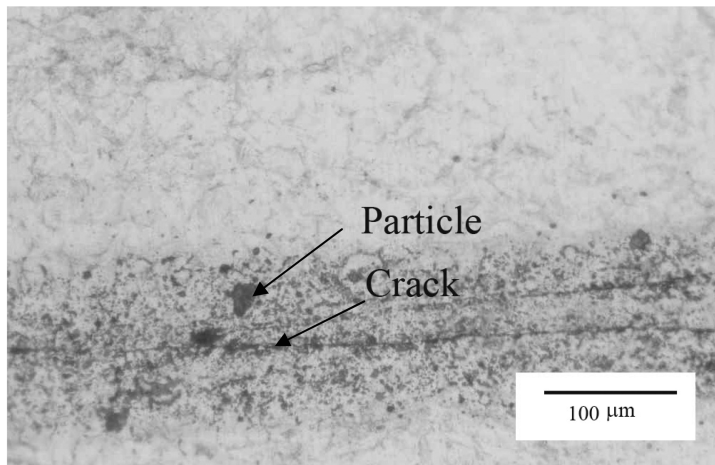


(ค)

รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโครงสร้างพื้นบริเวณต่างๆ กัน ที่ไม่ปรากฏรอยแตก



(ก)

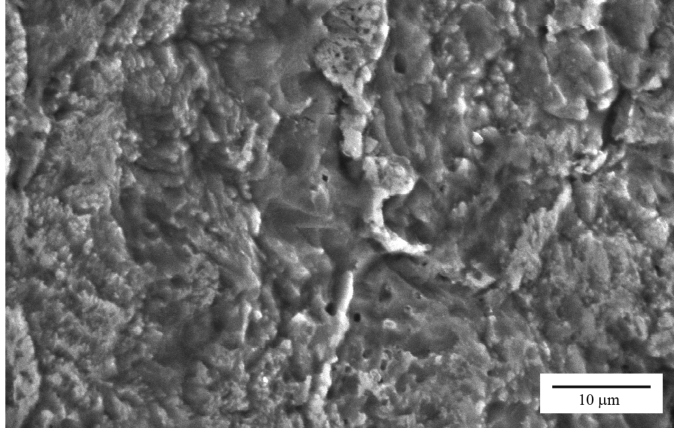


(ข)

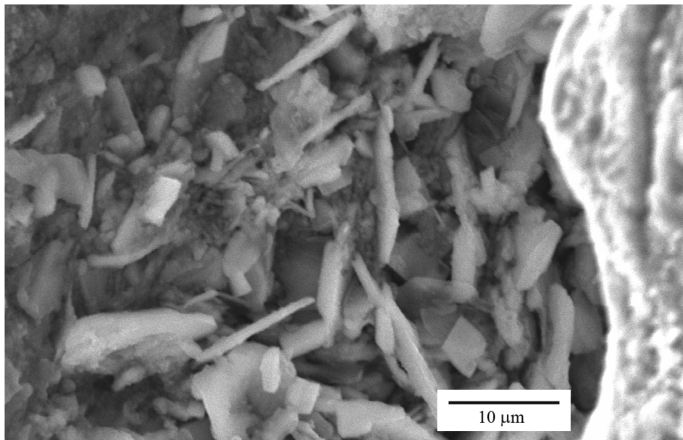
รูปที่ 4 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ปรากฏรอยแตก

### 3.4 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

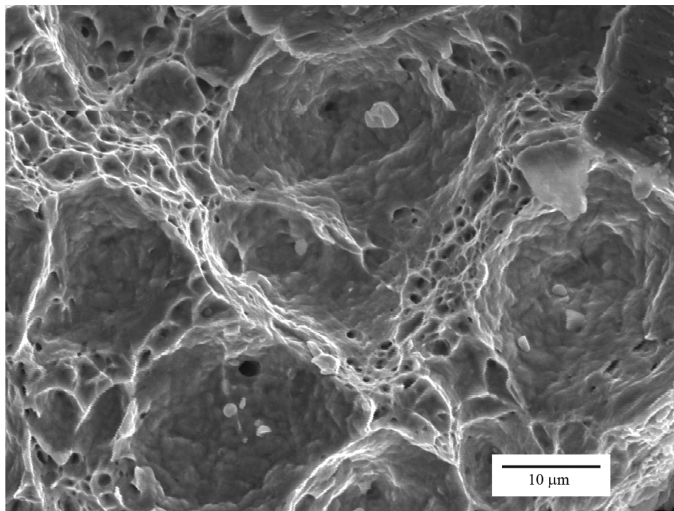
ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานในบริเวณต่างๆ ที่ได้จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้กำลังขยาย 5,000 เท่า ลักษณะโดยทั่วไปของโครงสร้างพื้นบริเวณที่ไม่ปรากฏรอยแตกแสดงในรูปที่ 5 จะเห็นว่า โครงสร้างมีลักษณะที่สม่ำเสมอ ซึ่งแตกต่างจากบริเวณที่เป็นรอยแตกในรูปที่ 6 โครงสร้างมีลักษณะเป็นเกล็ดหรือเป็นแผ่นมีลักษณะแตกต่างกันในรอยแตก เป็นลักษณะการแตกแบบเปราะ เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 7 ซึ่งแสดงลักษณะผิวแตกหักเนื่องจากการดึงมีลักษณะการแตกแบบเหนียว จะเห็นว่าผิวที่แตกมีลักษณะแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง รูปที่ 8 (ก) - (ข) แสดงรอยแตกบริเวณอื่น พบว่ามีอนุภาครูปร่างเป็นก้อนมน ปลายรี ขนาดความกว้างประมาณ 1-2 ไมโครเมตร และก้อนเหลี่ยมขนาดความกว้างประมาณ 10-15 ไมโครเมตร



รูปที่ 5 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงโครงสร้างพื้นโดยทั่วไปที่ไม่ปรากฏรอยแตก

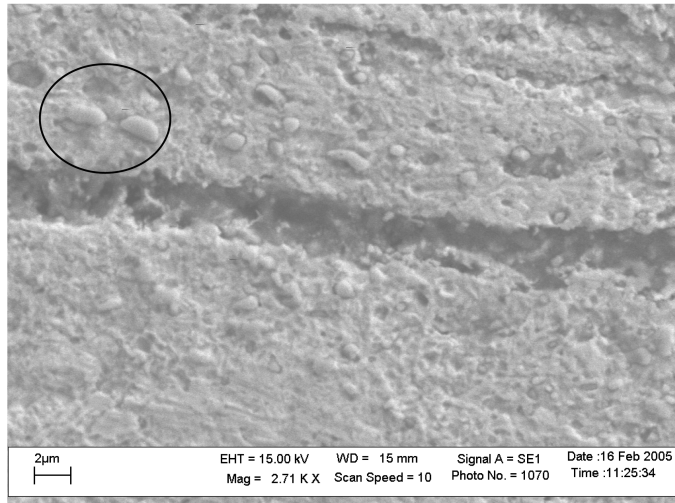


รูปที่ 6 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยแตก

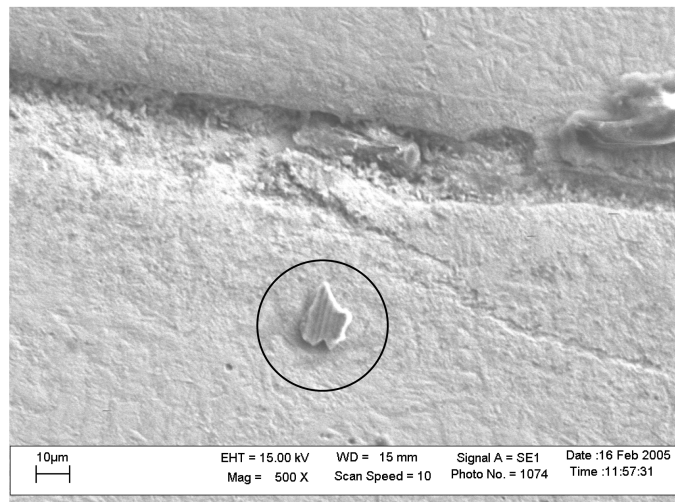


รูปที่ 7 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยแตกเนื่องจากการดึง





(ก)

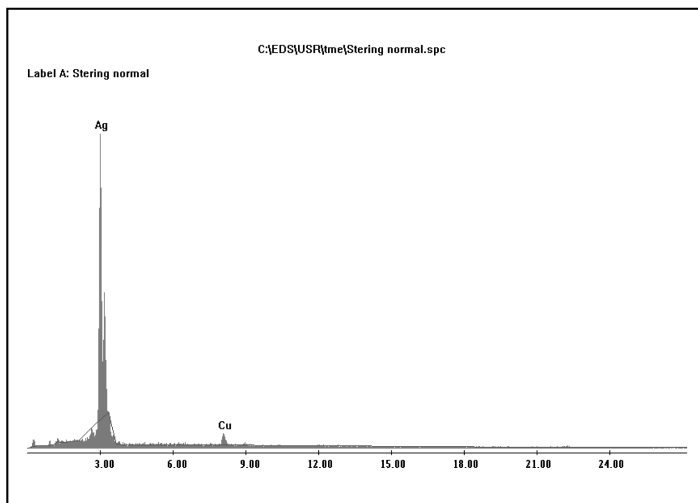


(ข)

รูปที่ 8 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงโครงสร้างบริเวณรอยแตกในตำแหน่งต่างกัน

### 3.4 การวิเคราะห์ส่วนผสมธาตุด้วยเทคนิค EDS

จากผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีในบริเวณต่างๆ โดยเลือกวิเคราะห์บริเวณต่างๆ แบบสุ่มเพื่อเป็นตัวแทนของบริเวณดังต่อไปนี้ บริเวณโครงสร้างพื้นที่ไม่ปรากฏรอยแตกกร้าว บริเวณที่เป็นอนุภาค และบริเวณรอยแตก รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วย EDS ของบริเวณโครงสร้างพื้นที่ไม่ปรากฏรอยแตกกร้าว ตารางที่ 2 แสดงผลสรุปผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีในบริเวณต่างๆ



รูปที่ 9 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ในการหาปริมาณธาตุในโครงสร้างพื้นบริเวณ 1

ตารางที่ 2 ปริมาณธาตุในแต่ละบริเวณของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS

ชนิดธาตุ บริเวณ ที่วิเคราะห์	ปริมาณของธาตุที่พบ (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)										
	Ag	Cu	Si	C	O	Ca	Cr	B	Fe	Al	Ta
โครงสร้างพื้น 1	94.73	5.27	-	-	-	-	-	-	-	-	-
โครงสร้างพื้น 2	85.40	3.91	-	7.62	3.07	-	-	-	-	-	-
อนุภาคเล็ก	79.39	4.51	-	11.05	5.05	-	-	-	-	-	-
อนุภาคใหญ่	-	-	-	26.26	39.87	33.87	-	-	-	-	-
รอยแตก 1	91.10	-	-	8.90	-	-	-	-	-	-	-
รอยแตก 2	74.68	10.87	-	9.42	5.03	-	-	-	-	-	-
รอยแตก 3	38.43	5.42	8.42	-	10.97	-	1.06	34.71	0.99	-	-
รอยแตก 4	40.35	1.62	-	3.57	3.06	-	2.80	-	-	1.58	47.02

ส่วนผสมทางเคมีในแต่ละบริเวณ มีชนิดของธาตุและปริมาณธาตุแตกต่างกันไป ปริมาณของธาตุเป็นแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักทั้งหมด พบว่าโครงสร้างพื้นบริเวณที่ 1 ประกอบด้วย 94.73%Ag-5.27%Cu ซึ่งมีส่วนผสมเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 21-2515 [4] คือมีธาตุเงินมากกว่า 92.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และที่เหลือเป็นธาตุอื่นๆ ส่วนบริเวณโครงสร้างพื้นบริเวณอื่นๆ ที่ให้ผลวิเคราะห์แตกต่างจากบริเวณแรกคือบริเวณที่ 2 มีปริมาณของธาตุ 85.40%Ag-3.91%Cu-7.62%C และ 3.07%O บริเวณนี้มีธาตุ C และ O เพิ่มจากบริเวณแรก ซึ่งโดยปกติแล้วธาตุทั้งสองนี้ละลายในเนื้อพื้นเงินได้น้อยมาก อาจเป็นไปได้ว่าธาตุ C มาจากการเตรียมชิ้นงาน SEM ซึ่งชิ้นงานถูกวางไว้บนแผ่นกาวคาร์บอนทำให้เกิดคาร์บอนปรกฏ ส่วนธาตุ O อาจมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศขณะหลอม ทำนองเดียวกันผลการวิเคราะห์ธาตุที่บริเวณอนุภาคที่เห็นเป็นก้อนพบว่ามีธาตุ C และ O อยู่ด้วย ในขณะที่อีกอนุภาคที่เห็นเป็นเม็ดเหลี่ยมที่มีขนาดใหญ่ พบว่ามีส่วนผสมของธาตุ C, O และ Ca

เป็นองค์ประกอบ ธาตุ Ca อาจเป็นสิ่งมลทินที่ติดมาจากวัตถุดิบหรือจากแหล่งอื่น จากผลวิเคราะห์ทั้งหมด พบว่า ส่วนผสมทางเคมีในชิ้นงานไม่สม่ำเสมอ

ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณรอยแตก พบอีกว่าบริเวณรอยแตกที่มีส่วนผสมของธาตุแตก ต่างกันไปในแต่ละบริเวณรอยแตก เป็นการยืนยันให้เห็นชัดเจนว่ามีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอของธาตุที่เรียกว่า Segregation จากผลวิเคราะห์ บางบริเวณรอยแตกมีธาตุ Si ในปริมาณที่สูงถึง 8.42% และยังมี 1.06% Cr, 34.71%B 0.99%Fe และ 1.58%Al ที่นอกเหนือจากธาตุหลักที่พบในบริเวณอื่น จากการวิจัยที่ผ่านมา ได้ถูกตีพิมพ์ในปี ค.ศ. 1938 โดย Price L.E และ Thomas G.J. [5] รายงานว่าการเติมธาตุ Si มีจุดประสงค์เพื่อช่วยป้องกันการเกิดออกซิเดชันได้ นอกจากนี้ Si ยังช่วยเพิ่มสมบัติต่างๆ เช่น เพื่อความแข็ง ความแข็งแรง ต้านทานการหมอง และป้องกันการเกิดออกซิเดชัน แต่ปริมาณที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 0.02-0.2% โดยน้ำหนัก หากมีมากกว่านั้นจะส่งผลให้ชิ้นงานเปราะ จากรายงานการวิจัยของ Nisaratanaporn, S. และ Nisaratanaporn, E. [6] พบว่าการเติม Si เพียงแค่ 0.04% โดยน้ำหนัก มีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงเพียงเล็กน้อยแต่มีผลต่อการลดความเหนียว (Ductility) อย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากการเติม Si เพิ่มขึ้นมีผลทำให้โครงสร้างจุลภาคมีลักษณะเป็นตาข่าย (Network structure) ของเฟสที่มีธาตุทองแดงและซิลิกอนเป็นธาตุหลัก (Cu-Si rich phase) เกิดบริเวณขอบเกรนของเฟสโครงสร้างพื้นของเฟสอัลฟา ( $\alpha$ -Ag-rich phase)

ผลจากการวิเคราะห์บริเวณอื่นกลับไม่พบธาตุ Si ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากจุดหลอมเหลวของธาตุซิลิกอน มีค่าสูงกว่าเงินมาก จุดหลอมเหลวของซิลิกอนมีค่า 1,420 องศาเซลเซียส ส่วนจุดหลอมเหลวของเงินคือ 962 องศาเซลเซียส จึงเป็นไปได้ที่จะเกิดปัญหาการละลายไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้ยังมีธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูงอีกหลายธาตุเช่น B, Cr, Ta และ Fe ดังนั้นในการหลอมโลหะให้ผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันจึงทำได้ยาก ทั้งนี้ต้องหาเทคนิคในการหลอม เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่สม่ำเสมอขึ้น หรืออาจต้องเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการหลอมให้นานขึ้น

ธาตุต่างๆ ที่พบ อาจมาจากการตั้งใจเติมและไม่ได้ตั้งใจเติม เช่น การพบธาตุ B อาจได้มาจากการเติมสารโบแรก ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) ในขั้นตอนการกำจัดสารมลทินในระหว่างการหลอม การพบธาตุอื่นอาจมาจากการเติมธาตุผสมที่นิยมเรียกกันว่า Master alloy มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มสมบัติต่างๆ ให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความแข็งแรง เพิ่มความต้านทานการหมองของสี แต่มีปัญหาเรื่องความสามารถในการละลายของธาตุ ธาตุบางชนิดละลายได้ดี เกิดเป็นสารละลายของแข็ง (Solid solution) ธาตุบางชนิดอาจจับตัวกับธาตุชนิดอื่นเกิดเป็นสารประกอบ (Compound) ที่แข็งและเปราะ นอกจากนี้ธาตุต่างๆ ที่พบอาจมาจากความไม่บริสุทธิ์ของวัตถุดิบก็ได้ จากลithบัตรส่วนผสมเงินสเตอร์ลิง [7] จดลithลithส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่มีความต้านทานการหมอง ป้องกันการเกิดฝ้าแดง มีขนาดเกรนเล็ก และลดการเกิดรูพรุน มีส่วนผสมของธาตุต่างๆ หลายชนิดดังนี้ หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 92.5%Ag-0.5%Cu-4.25%Zn-0.02%In-0.48%Sn-1.25%(2B-98Cu)-1.0%(90Cu-10Si)

## 5. สรุปผลการทดลอง

1. ความแข็ง ความแข็งแรง และเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของชิ้นงานตัวอย่างโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นแล้วเกิดรอยแตก มีค่าอยู่ในช่วง 97-105 บริเนล 188-202 เมกกะปาสคาล และมีค่า 7-11 ตามลำดับ
2. โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างโลหะเงินสเตอร์ลิง ประกอบด้วยเฟสอัลฟาที่มีส่วนผสมของเงินเป็นส่วนผสมหลัก โครงสร้างยูเทคติก และอนุภาค กระจายตัวไม่สม่ำเสมอ

3. ส่วนผสมทางเคมีที่วิเคราะห์ได้ในบริเวณต่างกัน พบว่ามีธาตุต่างกัน โครงสร้างพื้นมีธาตุ Ag, Cu, C และ O ที่บริเวณรอยแตกพบว่ามี ธาตุ Ag, Cu, C, O, Si, Cr, B, Fe, Ta และ Al และส่วนที่เป็นอนุภาคพบว่ามีธาตุ Ag, Cu, Ca, C และ O

4. การกระจายตัวของธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูง ไม่สม่ำเสมอในโครงสร้าง มีบทบาทสำคัญในการเป็นสาเหตุของการแตกร้าวของชิ้นงานจากการขึ้นรูปเย็น

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณบริษัทเทททีโซน์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุดิบ เพื่อใช้ในการศึกษานี้

## เอกสารอ้างอิง

1. Carrano, R. V., 1993. "Improving Your Silver Casting", *Precious Metals*, Newport, Rhode Island, USA, June 1993, pp. 157-168.

2. Smith, G. and Robertson, A., "Annealing of Precious Metals," *Database METALDEX*, <http://oh1.csc.com/ids70/results.php>.

3. Abbey, S., 1952, *The Goldsmith's and Silversmith's Handbook*, William C., and Sons Publishers, London and Becoles, pp. 15-17.

4. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2515, กระทรวงอุตสาหกรรม, *มอก. 21-2515 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเครื่องเงิน*, กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

5. Price, L.E. and Thomas, G.J., "The Tarnish of Silver and Silver Alloys and Its Prevention" *Journal of IOM*, Vol. 63, p. 29.

6. Nisaratanaporn, S., and Nisaratanaporn, E., 2003, "The Anti-tarnishing, Microstructure Analysis and Mechanical Properties of Sterling Silver with Silicon Addition", *Journal of Metals, Materials and Minerals*, Vol. 12, No. 2, pp. 13-18.

7. Bernhard, M. and Sivertsen, J.T., June 1990, *Patent Sterling*, *Database METADEX*, Silver Alloy Compositions, United Precious Metal Refining, <http://oh1.csc.com/ids70/results.php>.