

**ความสัมพันธ์ของระยะห่างและความหนาแน่นของเฟสที่มีต่อสมบัติเชิงกล  
ของลวดเงินสเตอร์ลิง**

**ณัฐกร จิรตระกูล และ ขจีพร วงศ์ปรีดี\***

**The relations of mean free path and thickness spacing to  
mechanical properties of sterling silver**

**Nutthakorn Jiratrakul and Kageeporn Wongpreedee\***

ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพฯ 10110

\*Corresponding author. E-mail: kageeporn@swu.ac.th

**บทคัดย่อ**

อนุภาคเฟสมีความสัมพันธ์ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของโลหะ โดยรูปทรงและขนาดของอนุภาคเฟสเปลี่ยนแปลงไปตามกระบวนการผลิตขึ้นรูป ในปัจจุบันการขึ้นรูปเส้นลวดโลหะขนาดเล็กกำลังเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ทั้งนี้ยังไม่มีมีการกำหนดมาตรฐานที่ใช้เป็นเกณฑ์ของกระบวนการผลิตจึงทำให้เป็นอุปสรรคต่อการผลิตเส้นลวดให้มีคุณภาพได้ตรงตามต้องการในแต่ละโรงงาน ในการวิจัยนี้ได้ดึงขึ้นรูปลวดเงินสเตอร์ลิงจากเครื่องหล่อแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting) ริดไนท์สทางการโตของเดนไดรต์ (Dendrite) และดึงให้เป็นเส้นลวดด้วยขั้นตอนที่กำหนดไว้แน่นอนเพื่อให้ได้ลวดที่มีค่าเอต้า (ค่าความเครียดจริง) เท่ากับ 3, 4 และ 5 โดยอบอ่อนจำนวน 1 ครั้งและ 2 ครั้ง และทดสอบหาค่าความแข็งในระบบวิกเกอร์ ตรวจโครงสร้างทางจุลภาคเพื่อนำมาคำนวณหาระยะห่างระหว่างอนุภาคเฟสทองแดงเพื่อหาความสัมพันธ์ จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาพิจารณา พบว่าเมื่อค่าเอต้าเพิ่มมากขึ้นทำให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคเฟสทองแดงน้อยและยังผลให้ความแข็งมีค่าน้อยลง โดยอธิบายได้ว่าเป็นผลจากการอบอ่อนที่กระทบต่อการกระจายตัวของอนุภาคเฟสทองแดง สำหรับกระบวนการผลิตขึ้นงานลวดขนาดเล็ก ผลของแคปิลลารี (Capillary Effect) มีความสำคัญต่ออัตราเร็วการแพร่ของความร้อน ทั้งนี้จากการวิจัยทำให้ทราบว่าการศึกษาอนุภาคเฟสทองแดงสามารถช่วยทำนายสมบัติเชิงกลของโลหะ

**คำสำคัญ:** การอบอ่อน เงินสเตอร์ลิง การดึงลวด ระยะห่างระหว่างอนุภาคเฟส ความหนาแน่นของอนุภาคเฟส

### Abstract

Phase has an effect on the mechanical properties of metals and alloys. The deformed processes impact on sizes and shapes of phases. This research is to study wire drawing of sterling silver alloys. The alloys were cast to obtain continuous casting rods and extruded in the direction of primary dendrite. The measurements were performed according to true strain ( $\eta$ ) of 3, 4, 5 and annealed for one and two times on each true strain. Vicker hardness tests were performed. The microstructure was investigated to measure the distances of second phases to obtain the relationship of hardness tests and second phase microstructure. The results were shown that the increases of true strain were not correlated to the second phase microstructure and the hardness. This is the fact that capillary effects play an important role to the diffusion when the wire sample sizes are getting small. In conclusion, the study of second phase of sterling silver can predict mechanical properties on each processes of deformation.

*Keywords:* annealing, sterling silver, wire drawing, mean free path, thickness spacing

### บทนำ

เทคนิคการดึงขึ้นรูปลวดโลหะ สามารถทำเส้นลวดได้ทั้งแบบกลมหรือแบบหลายเหลี่ยม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะ รูดา (Die) ที่เป็นอุปกรณ์ในการดึงลวด และรูปทรงต่างๆ ตามลักษณะของหน้าตัดรูดาของรูปแบบนั้นๆ เพื่อการผลิตเครื่องประดับในรูปแบบต่างๆ เช่น สร้อย ต่างหู สายโซ่ เป็นต้น ประวัติศาสตร์ของโลหะและลวดเริ่มต้นขึ้นในช่วงปี 8000 ก่อนคริสตกาล ซึ่งเป็นยุคที่มีการใช้หินเป็นเครื่องมือ ต่อมา มีการเริ่มนำโลหะจำพวกเหล็ก ทองแดง เงิน และทอง มาขึ้นรูปด้วยวิธีการทุบให้เล็กและบางด้วยหินเหล็กไฟหรือก้อนหินจนได้ขนาดของโลหะที่บางเรียวยาวเป็นเส้นเพื่อนำไปทอผ้าและสวมใส่ จากนั้นในช่วงปี 3000 ก่อนคริสตกาลมีการทดลองดึงลวดด้วยการใช้ดาที่ทำจากหิน ซึ่งสามารถดึงลวดให้ได้ขนาดสม่ำเสมอตามต้องการ และถูกพัฒนาให้ซับซ้อนมากขึ้น ในปัจจุบันลวดถูกนำไปใช้หลากหลายรูปแบบลักษณะ เช่น ทางการแพทย์ ทางอุตสาหกรรมและการก่อสร้าง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ

การศึกษาสมบัติของโลหะผสมเพื่อพัฒนาและควบคุมคุณภาพการผลิตของลวดเงินในอุตสาหกรรมเครื่องประดับไทย จำเป็นต้องมีความรู้ทางด้านโลหะวิทยา กล่าวคือ การจัดเรียงตัวของโครงสร้างจุลภาคที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล การออกแบบการผลิตของการเลือกใช้อุณหภูมิและเวลาที่

เหมาะสม เปอร์เซ็นต์การลดขนาดลดในแต่ละครั้ง การเปลี่ยนขนาดและรูปร่างของลวดโลหะกับ รูดาย ปริมาณแรงที่ใช้สำหรับการดึงลวด สมบัติของลวดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในการดึงผ่านรูดายแต่ ละครั้งเพื่อให้ลวดที่จะนำไปใช้มีสมบัติตรงตามความต้องการ (Avitzur, 1968; Avitzur and Talbert, 1996) ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของระยะห่าง และความหนาของอนุภาคเฟสทองแดงที่มีผลต่อ สมบัติเชิงกลของโลหะเงิน สเตอริง เพื่อสามารถทำนายแนวโน้มของค่าความแข็งของชิ้นงานจาก กระบวนการผลิตและการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

### วิธีการวิจัย

**การคำนวณหาค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสุดท้าย**

กำหนดค่าความเครียดจริง เท่ากับ 3, 4 และ 5 โดยหาค่าได้จากสมการ (Russell *et al.*, 2000)

$$\eta = 2 \ln \left( \frac{D_0}{D_f} \right) \quad [1]$$

เมื่อ  $\eta$  คือ ค่าความเครียดจริง

$D_0$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น (มม.)

$D_f$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสุดท้าย (มม.)

**การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การลดขนาด**

คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การลดขนาด (% Re) (William and Callister, 2007) จากสมการ

$$\% \text{ Re} = \left( \frac{D_0 - D_f}{D_0} \right) \times 100 \quad [2]$$

แปรรูปสมการ [2] เพื่อหาการลดขนาดจากเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นและเส้นผ่านศูนย์กลางสุดท้าย

$$D_0 - D_f = \frac{\% \text{ Re} \cdot D_0}{100} \quad [3]$$

คำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต้องอบอ่อน โดยพิจารณาเส้นผ่านศูนย์กลางสุดท้าย และเปอร์เซ็นต์การลด ขนาด มาคำนวณหาจุดที่จะต้องทำการอบอ่อน  $x$  ครั้ง (แบบ 1 ครั้งและแบบ 2 ครั้ง) ในระหว่างการ ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

$$D_A = D_0 - \left[ \frac{\% \text{ Re} \times x \times D_0}{N \times 100} \right] \quad [4]$$

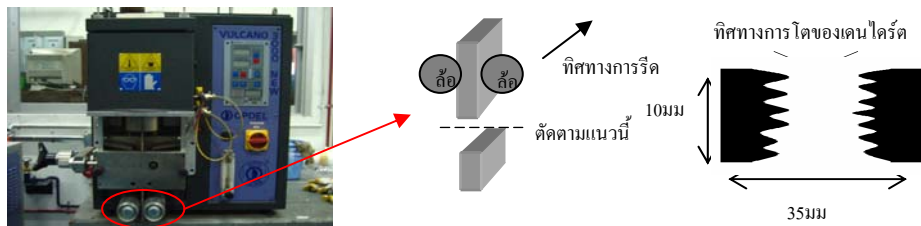
เมื่อ  $D_A$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต้องอบอ่อน (มม.)

$x$  คือ จุดจำนวนครั้งที่ต้องอบอ่อน

$N$  คือ จำนวนครั้งที่ทั้งหมดที่อบอ่อน

**การเตรียมชิ้นงาน**

โลหะผสมเตรียมจากโลหะเงินบริสุทธิ์ 93 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทองแดงบริสุทธิ์ 4.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและสังกะสีบริสุทธิ์ 2.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หลอมด้วยเครื่องหล่อต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิ 975 องศาเซลเซียส โดยมีความเร็วของการหล่อเพื่อควบคุมอัตราการเย็นตัว 0.01 เมตรต่อวินาที หลังจากนั้นตัดโลหะในแนวขวางตามทิศทางการโตของแกนเดนไดรต์ ให้มีขนาดยาว 10 มิลลิเมตร ดังรูป 1 และนำโลหะมารีดโดยใช้คายนูกกลิ้งเพื่อให้เป็นแท่งโลหะทรงกระบอก จากนั้นดึงลวดด้วยเครื่องดึงลวดในแนวทิศทางการโตของแกนเดนไดรต์ที่ความเร็วรอบของการดึง 6.25 เมตรต่อวินาที



**รูป 1** ลักษณะของชิ้นงานเงิน

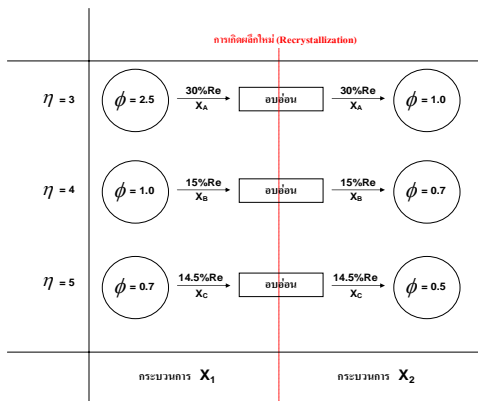
ระหว่างการรีดต้องอบอุ่นเพื่อคลายความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป เป็นจำนวน 1 ครั้งและ 2 ครั้งตามสัดส่วนการลดขนาด ดังแสดงในตาราง 1 และรูป 2 และ 3 โดยผ่านเครื่องอบอุ่นแบบราง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราเร็ว 1.6 เมตรต่อวินาที ระยะเวลา 4 นาที ซึ่งบรรยากาศภายในจะถูกปกคลุมด้วยก๊าซไนโตรเจน และปากทางเข้าออกมีก๊าซไฮโดรเจนปกคลุมอยู่

**ตาราง 1** ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแต่ละเอต้าที่ได้จากการคำนวณ

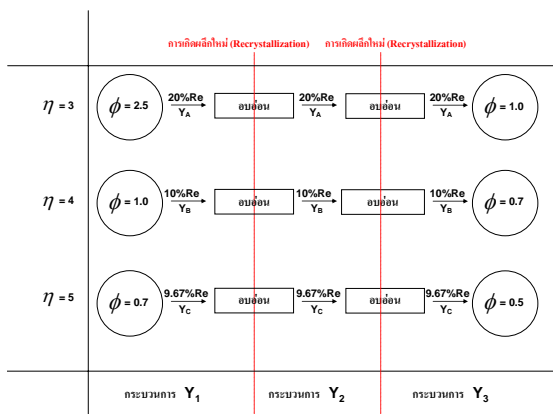
$\eta$	$D_0$ (มม.)	อบอุ่น 1 ครั้ง		อบอุ่น 2 ครั้ง			$D_f$ (มม.)	% Re อบอุ่น ทั้งหมด	
		ขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลาง ที่อบอุ่น	% Re อบอุ่น	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ที่อบอุ่น ครั้งที่ 1	% Re อบอุ่น	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ที่อบอุ่น ครั้งที่ 2			% Re อบอุ่น
3	2.5	1.80 มม.	$X_A$	2.00 มม.	$Y_A$	1.50 มม.	$Y_A$	1.0	60%
4	1.0	0.90 มม.	$X_B$	0.90 มม.	$Y_B$	0.80 มม.	$Y_B$	0.7	30%
5	0.7	0.60 มม.	$X_C$	0.65 มม.	$Y_C$	0.55 มม.	$Y_C$	0.5	29%

$X_A, X_B, X_C$  คือ %Re อบอุ่น 1 ครั้ง ที่เอต้า เท่ากับ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ

$Y_A, Y_B, Y_C$  คือ %Re อบอุ่น 2 ครั้ง ที่เอต้า เท่ากับ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ



รูป 2 ขั้นตอนการอบอ่อนชิ้นงาน 1 ครั้ง

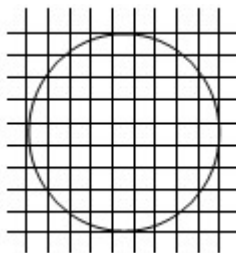


รูป 3 ขั้นตอนการอบอ่อนชิ้นงาน 2 ครั้ง

ตัวอย่างเอต้า เท่ากับ 3, 4 และ 5 แบบอบอ่อน 1 ครั้งและ 2 ครั้ง ถูกนำมาตรวจสอบ โครงสร้างทางโลหะวิทยา โดยการอัดชิ้นงานแบบร้อนในบาคาไลต์ (Bakelite) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ความดัน 35 กิโลนิวตัน แล้วขัดตัวอย่างชิ้นงานด้วยเครื่องขัดเงา จากนั้นใช้กระดาษทราย ซิลิโคนคาร์ไบด์ ขนาดเบอร์ 320, 400, 500, 800, 1000, 1200 และ 2500 ตามลำดับและผ้าสักหลาดที่มี ผงเพชรขัดเงาขนาด 3 ไมครอนและ 1 ไมครอนสำหรับขัดละเอียด หลังจากนั้นนำตัวอย่างชิ้นงานไป ตรวจสอบเฟสด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

**การวัดความหนาแน่นของอนุภาคเฟส**

วัดค่าตามวิธี ASTM F902-84 (1990) (American Society for Testing Materials, 1984) ทั้งนี้แผ่นวัดความหนาแน่นเฟสประกอบด้วยเส้นตรงที่ตัดกันเป็นตารางสี่เหลี่ยมจำนวน 100 จุด โดยที่ แต่ละช่องกว้างเท่ากับ 0.5x0.5 เซนติเมตร และวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 5 เซนติเมตร ดังรูป 4



รูป 4 แผ่นวัดหาความหนาแน่นเฟส

จำนวนพื้นที่ในการสังเกตเป็นจำนวน 20 บริเวณ และทำการวัดไม่ซ้ำพื้นที่กันจำนวน 120 ครั้งของภาพที่มีกำลังขยาย 1000x โดยการเลือกวิธีสุ่มแบบการสุ่มตัวอย่างอย่างง่าย (Simple Random Sampling) (สุชาดา กิระนันท์, 2542) นับจำนวนเฟสที่สอง (second phases) ที่ตัดกับมุมของสี่เหลี่ยม ( $m$ ) และจำนวนเฟสที่สองที่ตัดผ่านเส้นรอบวงของวงกลม ( $a$ ) โดยไม่นับซ้ำเฟส

**การคำนวณหาระยะห่างระหว่างอนุภาคของเฟสและความหนาในอนุภาคเฟส**

นำค่าที่ได้ทั้งหมดไปทำการคำนวณหาค่า  $V_F$ ,  $N_L$ ,  $\lambda$  และค่า  $t$  (Underwood, 1970) โดยที่  $V_F$  เป็นอัตราส่วนระหว่างจำนวนเฟสที่ตัดเส้นตัดของตารางกับจำนวนจุดตัดทั้งหมดของเส้นตาราง ซึ่งหาค่าได้จากสูตร

$$V_F = \frac{m}{z} \tag{5}$$

เมื่อ  $m$  คือ จำนวนเฟสที่สองที่ตัดเส้นตัดของตาราง

$z$  คือ จำนวนจุดตัดทั้งหมดของเส้นตาราง ในที่นี้มีค่าเท่ากับ 100

$N_L$  เป็นอัตราส่วนระหว่างจำนวนเฟสที่ตัดผ่านขอบของวงกลมกับความยาวเส้นรอบวงของวงกลม หาค่าได้จาก

$$N_L = \frac{a}{b} \tag{6}$$

เมื่อ  $a$  คือ จำนวนเฟสที่ตัดผ่านขอบของวงกลม

$b$  คือ ความยาวเส้นรอบวงของวงกลม ในที่นี้มีค่า  $2 \times \pi \times 25 = 157$  มิลลิเมตร

นำค่า  $V_F$  และค่า  $N_L$  ที่ได้มาคำนวณหาระยะห่างระหว่างอนุภาคของเฟส ( $\lambda$ ) (Friel, 2000) และค่าเฉลี่ยของความหนาในอนุภาคเฟส ( $t$ ) ซึ่งหาได้จากสูตร

$$\lambda = \frac{[1 - V_F]}{N_L} \tag{7}$$

และ

$$t = \frac{V_F}{N_L} \tag{8}$$

จากนั้นนำค่า  $\lambda$  และค่า  $t$  ที่ได้จากการวัดมาหาค่าเฉลี่ยรวมของแต่ละตัวอย่างซึ่งงาน

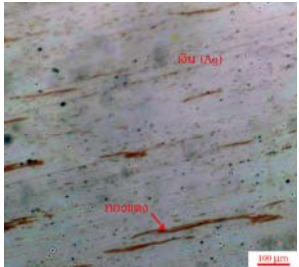
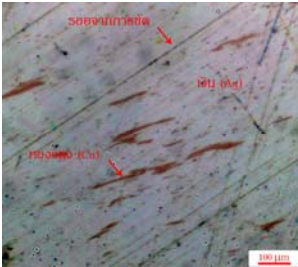
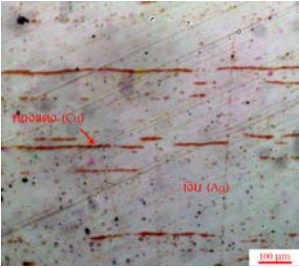
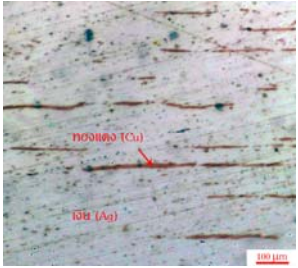
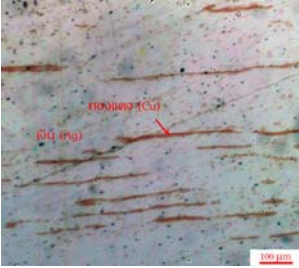
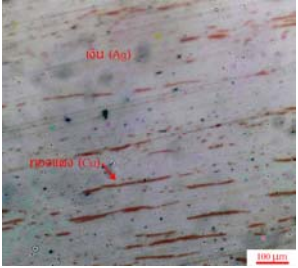
### การวัดความแข็ง

ตรวจสอบวัดความแข็ง (Hardness) ในระบบของวิกเกอร์ (Vickers Hardness; HV) น้ำหนักกด 200 gf เป็นเวลา 15 วินาที ตามแบบวิธี ASTM E-92: 2003

### ผลการวิจัย

ลวดตัวอย่างชิ้นงานเอต้า เท่ากับ 3, 4 และ 5 เมื่อทำการตรวจดูโครงสร้างทางจุลภาค ทำให้เห็นอนุภาคของเฟสทองแดง (เฟสที่สอง) ได้ชัดเจน ดังตาราง 2

ตาราง 2 โครงสร้างทางจุลภาคของอนุภาคเฟสทองแดงในตัวอย่างชิ้นงาน

η	จำนวนครั้งอบอ่อน	
	1 ครั้ง	2 ครั้ง
3		
4		
5		

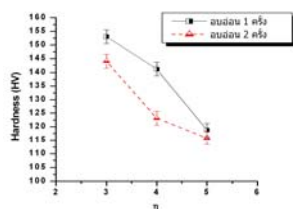
ที่เอต้าเท่ากับ 3 โครงสร้างจุลภาคของอนุภาคเฟสทองแดง มีรูปร่างขนาดใหญ่ หนา และมีระยะห่างระหว่างแต่ละอนุภาคมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเอต้าเท่ากับ 4 และเอต้าเท่ากับ 5 อนุภาคเฟสทองแดงมีการกระจายตัวอยู่ทั่วไป อีกทั้งมีรูปร่างที่ยาวและสั้นลง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากเอต้าเท่ากับ 4 ลักษณะของเส้นเฟสทองแดงเรียวยาวและเริ่มมีแนวโน้มของการแตกออกเป็นเส้นในแนวยาว ดังเห็นได้จากเอต้าเท่ากับ 5 เริ่มมีเส้นเฟสทองแดงเล็กๆ กระจายทั่วไป ซึ่งค่าเฉลี่ยรวมของระยะห่างระหว่างอนุภาคเฟส ดังแสดงในตาราง 3 มีการลดลงตามลำดับ ค่าเฉลี่ยรวมของความหนาของอนุภาคเฟสทองแดง และค่าความแข็งวิกเกอร์ แสดงดังตาราง 3

ตาราง 3 ผลการคำนวณหาค่าเฉลี่ยรวมของระยะห่างระหว่างอนุภาคเฟสทองแดง ค่าเฉลี่ยรวมของความหนาของอนุภาคเฟสทองแดง และค่าความแข็ง

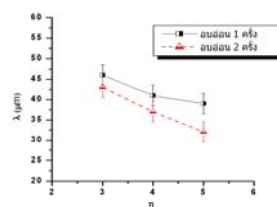
$\eta$	จำนวนครั้งอบอ่อน	% Re ที่ใช้ทั้งหมด	% Re ที่ใช้ในแต่ละส่วนของการอบอ่อน		$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$t$ ( $\mu\text{m}$ )	ค่าความแข็ง (HV)
			$X_A$	$X_B$			
3		60	$X_A$	30	46	1.9	153.0
4	1	30	$X_B$	15	41	0.9	141.2
5		29	$X_C$	14.5	39	1.5	118.7
3		60	$Y_A$	20	43	1.4	144.1
4	2	30	$Y_B$	10	37	0.8	123.1
5		29	$Y_C$	9.67	32	1.1	116.8

ความสัมพันธ์ของเอต้า ซึ่งมีความสัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างอนุภาคของเฟส คือ เมื่อเอต้าเพิ่มระยะห่างระหว่างอนุภาคของเฟสจะลดลง และเอต้ามีความสัมพันธ์กับค่าความแข็ง คือ เมื่อเอต้าเพิ่ม ค่าความแข็งจะลดดังรูป 5 และ 4 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าระยะห่างระหว่างอนุภาคของเฟสมีความสัมพันธ์ตรงกับความแข็ง ซึ่งมีทิศทางที่สอดคล้องกันดังรูป 7 ส่วนความหนาในอนุภาคเฟสทองแดง จะมีความแตกต่างระหว่างความสัมพันธ์กล่าวคือมีค่าลดลง ในเอต้าเท่ากับ 4 จากการอบอ่อนในทั้ง 2 แบบดังรูป 8

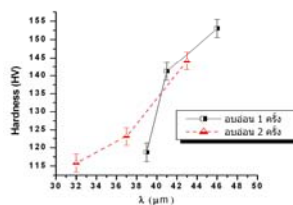




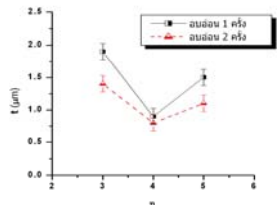
รูป 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเอต้า ( $\eta$ ) กับ  
ค่าความแข็ง (HV)



รูป 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเอต้า ( $\eta$ ) กับ  
ระยะห่างระหว่างอนุภาคของเฟส ( $\lambda$ )



รูป 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง (HV)  
กับ ระยะห่างระหว่างอนุภาคของเฟส ( $\lambda$ )



รูป 8 ความสัมพันธ์ระหว่างเอต้า ( $\eta$ ) กับ  
ความหนาในอนุภาคเฟสทองแดง ( $t$ )

### อภิปรายผลการทดลอง

1. ในงานวิจัยนี้ค่าความสัมพันธ์ของค่าเอต้า หรือค่าความเครียดจริงในภาพรวมจะแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างอนุภาคเฟสทองแดง และความแข็งของลวดเงินสเตอร์ลิง จากความสัมพันธ์นี้ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่า การอบอ่อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตของชิ้นงานที่มีขนาดเล็กทำให้ผลแคปิลลารี (Capillary Effect) มีความสำคัญและทำให้อัตราการถ่ายโอนของความร้อนจากผิวของลวดตามทฤษฎีของ Gibb Thompson (Trivedi, 2000) เกิดขึ้นได้เร็วกว่าในลวดขนาดเล็กทำให้การตกผลึกใหม่ (Recrystallization) และการโตของเกรน (Grain Growth) ภายในลวดขนาดเล็กเป็นไปอย่างรวดเร็วกว่าลวดขนาดใหญ่ ยังผลให้ความแข็งของลวดที่มีค่าเอต้ามากมีค่าต่ำกว่า ซึ่งแม้ว่าการทดลองครั้งนี้มีการขึ้นรูปหลังจากการอบอ่อนจะถือว่าไม่มีผลกระทบต่อปัจจัยนี้มากเพราะความไม่สมบูรณ์ของระนาบอะตอม (Dislocation) ตามแนวของเฟสทองแดงไม่สามารถก่อดัวได้อย่างรวดเร็ว แต่การอบอ่อนในจำนวนครั้งที่มีมากขึ้นจะช่วยให้มีกระจายของอนุภาคเฟสทองแดงกระจายได้ดีขึ้นในเอต้าที่มากกว่า ดังแสดงในตาราง 2 และ 3

2. ความหนาของอนุภาคเฟสทองแดง ลดลงที่เอต้าเท่ากับ 4 (ดังรูป 8) โดยการจัดเรียงตัวของอนุภาคสามารถอธิบายได้โดยอ้างอิงตามทฤษฎีความไม่เสถียรของรูปทรง (Shape Instability) (Malzahn Kampe *et al.*, 1989; Wongpreedee, 2003) แบบความไม่เสถียรรูปทรงหลัก (Primary

Instability) และแบบผลกระทบทรอง (Secondary Effect) การเปลี่ยนแปลงของลักษณะเฟสทองแดง และความหนาในอนุภาคเฟสทองแดง ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงการขึ้นรูป อนุภาคจะมีการยึดตัวไปในทิศทางของการขึ้นรูป (รูป 9 ก) หลังจากนั้นเมื่อถึงสภาวะหนึ่งเฟสทองแดงจะทำการแยกตัวในแนวยาวแบบความไม่เสถียรหลัก (รูป 9 ข) ซึ่งการทดลองนี้เป็นการแยกแบบแยกตามแนวขอบ (Boundary Splitting) และหลังจากนั้นจะมีการแยกตัวออกจากกันเป็นทรงกลมซึ่งเป็นผลกระทบแบบรอง หลังจากการขึ้นรูปมากขึ้น ซึ่งเป็นการแยกแบบขอบตามแนวยาว (Longitudinal Boundaries) และเข้าใกล้สภาวะที่เสถียร (รูป 9 ค) ซึ่งลักษณะของเฟสที่จำลองขึ้นสามารถเปรียบเทียบได้กับในภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในตาราง 2



รูป 9 ก อนุภาคเริ่มเกิดการยึดตัวไปในทิศทางการขึ้นรูป (สอดคล้องกับ  $\eta=3$ )



รูป 9 ข เฟสทองแดงจะทำการแยกตัวในแนวยาวแบบความไม่เสถียรหลัก เป็นการแยกแบบแยกตามแนวขอบ (Boundary Splitting) (สอดคล้องกับ  $\eta=4$ )



รูป 9 ค การแยกตัวออกจากกันเป็นทรงกลมเมื่อขึ้นรูปมากขึ้นเป็นการแยกแบบขอบตามแนวยาว (Longitudinal Boundaries) และเข้าใกล้สภาวะที่เสถียร (สอดคล้องกับ  $\eta=5$ )

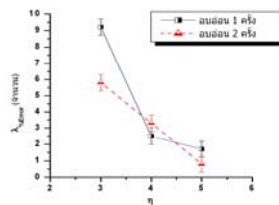
- ในการทดลองนี้ ค่าเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างอนุภาคเฟส หาได้จากการแทนที่สมการ [5] และ [6] ลงในสมการ [7] ได้

$$\lambda_{\%Error} = \frac{1 - [m/100]}{a/157} \tag{9}$$

- เมื่อ  $\lambda_{\%Error}$  คือ ค่าระยะห่างระหว่างอนุภาคเฟสที่เกิดเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (จำนวน)
- $a$  คือ จำนวนเฟสที่ตัดผ่านขอบของวงกลม (ครั้ง)
- $m$  คือ จำนวนเฟสที่ตัดเส้นตัดของตาราง (ครั้ง)

ระยะห่างระหว่างอนุภาคเฟสขึ้นอยู่กับจำนวนเฟสที่ตัดผ่านขอบของวงกลม ( $a$ ) และจำนวนเฟสที่ตัดเส้นตัดของตาราง ( $m$ ) ดังนั้นในกรณีที่  $a = 1$  ;  $m = 1, 2, 3$  ระยะห่างระหว่างอนุภาคเฟสจะมีค่า

ระยะห่างระหว่างอนุภาคเฟสที่สูงผิดปกติ เรียกว่า ค่าระยะห่างระหว่างอนุภาคเฟสที่เกิดเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด ( $\lambda_{\%Error}$ ) แต่ก็มีแนวโน้มลดลงเมื่อเอต้ามีค่ามากขึ้น เนื่องมาจากเฟสทองแดงมีการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความแปรปรวนลดลง ดังแสดงกราฟในรูป 10 สำหรับการทดลองหาค่าระยะห่างระหว่างอนุภาคเฟส และความหนาในอนุภาคเฟสทองแดง จะไม่นำค่าที่ได้จากระยะห่างระหว่างอนุภาคเฟสที่เกิดเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด ในกรณีที่มี  $\alpha = 1$ ;  $m = 1, 2$  หรือ 3 ซึ่งทำให้มีความแตกต่างมาก ตามปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างอนุภาคเฟสนั้นๆ และจะเห็นได้ว่าค่าระยะห่างระหว่างอนุภาคเฟสที่เกิดเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด มีแนวโน้มที่น้อยลงเมื่อขึ้นรูปมากขึ้น ดังแสดงในรูป 10 ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการกระจายของอนุภาค (จากการวัดระยะห่างระหว่างอนุภาคเฟส) มีการเรียงตัวในทิศทางที่แน่นอนมากขึ้นทำให้ค่าความผิดพลาดต่ำลง



รูป 10 ความสัมพันธ์ระหว่างเอต้า ( $\eta$ ) กับ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของระยะห่างระหว่างอนุภาคเฟส ( $\lambda_{\%Error}$ )

### สรุปผลการทดลอง

เปอร์เซ็นต์การลดขนาดและระยะห่างระหว่างอนุภาคเฟสมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันกับค่าความแข็ง ทำให้สามารถสรุปได้ว่าระยะห่างระหว่างอนุภาคเฟสที่ได้จากการวัดแปรผันตรงกับค่าความแข็งของลวดเงินสเตอร์ลิง การอบอ่อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตของชิ้นงานที่มีขนาดเล็กทำให้ผลแคบิลลารี มีความสำคัญต่ออัตราการ ถ่ายโอนของความร้อนจากผิวของลวด การกระจายตัวของเฟสอธิบายด้วยทฤษฎีความไม่เสถียรของรูปทรง (Shape Instability) ทั้งนี้จากการวิจัยทำให้ทราบว่า การศึกษาระยะห่างของอนุภาคเฟสกับความแข็งสามารถช่วยทำนายแนวโน้มสมบัติเชิงกลของโลหะที่จะเกิดขึ้นได้

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และโครงการเพิ่มขีดความสามารถการแข่งขัน ธุรกิจแพชั่น สาขาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ ภายใต้โครงการกรุงเทพฯเมืองแฟชั่น (จรัส) กระทรวงอุตสาหกรรมที่ได้ให้การ

สนับสนุนช่วยเหลือด้านอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยและขอบคุณ นายสิริธรรม แสงเดช เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ โครงการจรัสที่ให้ความช่วยเหลือในระหว่างการทดลอง

### เอกสารอ้างอิง

- สุชาติ กิระนันท์. (2542). ทฤษฎีและวิธีการสำรวจตัวอย่าง. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- American Society for Testing Materials. (1984). Practice for Calculating the Average Circular-Capillary-Equivalent Pore Diameter in Filter Media from Measurements of Porosity and Permeability. *Standard Practice for Calculating the Average Circular-Capillary-Equivalent Pore Diameter in Filter Media from Measurements of Porosity and Permeability*. St. Philadelphia, PA: ASTM F902.
- Avitzur, B. (1968). *Metal Forming: Processes and Analysis* (Original edition). New York: McGraw-Hill Book Co.
- Avitzur, B. and Talbert, S. H. (1996). *Elementary Mechanics of Plastic Flow in Metal Forming*. NY: J. Wiley & Sons.
- Friel, J.J. (2000). *Measurements: Practical Guide to Image Analysis*. United State of America. ASM International.
- Malzahn Kampe, J.C., Courtney, T.H., and Leng, Y. (1989). Shape Instabilities of Plate-Like Structures. *Acta Metal.*, 37(7), 1735-1745.
- Russell, A.M., Chumbley, L.S. and Tian, Y. (2000). Deformation Processed Metal-metal Composites. *Advanced Engineering Material.*, 2(1-2), 11-21.
- Trivedi, R.K. (2000). Lectures on the Theory of Phase Transformation. (2<sup>nd</sup> edition). H.I Aaronson, Editor, AIME.
- Underwood, E.E. (1970). *Quantitative Stereology*. Addison-Wesley: Chaps. 3-4.
- William, D. and Callister, Jr. (2007). *Materials Science and Engineering: an Introduction*. (7<sup>th</sup> edition). United State of America. John Wiley & Sons, Inc.
- Wongpreedee, K. (2003). *Kinetics of Transformation of Deformation Processed Gold-Matrix Composite*. Thesis, Iowa State University.