

บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองที่ห้องปฏิบัติการ

4.1.1 ลักษณะอินกอตของเงินสเตอร์ลิง

ในการทดลองได้หลอมและหล่ออินกอตในบรรยากาศปกติ ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ของโลหะเงินสเตอร์ลิง 8 ส่วนผสม ซึ่งมีส่วนผสม A เป็นส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงเริ่มต้น ส่วนผสม B-H เป็นส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่มีการเติมโลหะผสมเข้าไปแทนที่ปริมาณทองแดง ดังนี้

ส่วนผสม A เป็น $\text{Ag-6.4Cu-0.4Sn-0.2In}$

ส่วนผสม B เป็น $\text{Ag-5.65Cu-0.4Sn-0.2In-0.75(Al-1.05Mg-0.64Si-0.25Ti)}$

ส่วนผสม C เป็น $\text{Ag-5.65Cu-0.4Sn-0.2In-0.75(Al-5.99Mg-0.60Si-0.25Ti)}$

ส่วนผสม D เป็น $\text{Ag-5.65Cu-0.4Sn-0.2In-0.75(Al-0.88Mg-0.54Si-20Y}_2\text{O}_3\text{,ZrO}_2\text{)}$

ส่วนผสม E เป็น $\text{Ag-5.65Cu-0.4Sn-0.2In-0.75(Cu-29.70Zn-0.42Ti)}$

ส่วนผสม F เป็น $\text{Ag-6.4(Cu-0.16Zr)-0.4Sn-0.2In}$

ส่วนผสม G เป็น $\text{Ag-6.4(Cu-5Ti)-0.4Sn-0.2In}$

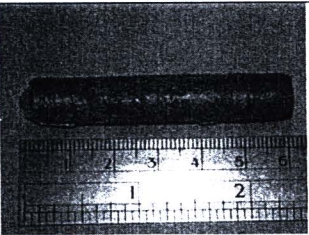
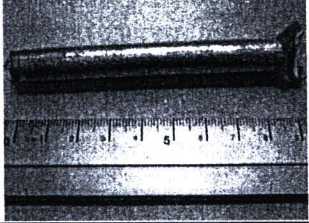
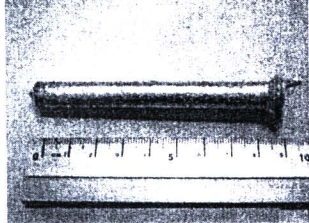
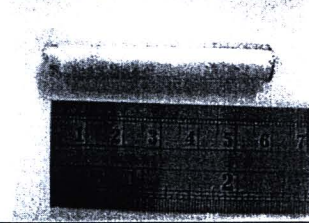
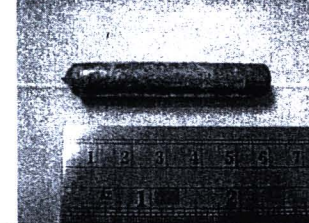
ส่วนผสม H เป็น $\text{Ag-6.4(Cu-1.96B)-0.4Sn-0.2In}$

ลักษณะอินกอตที่ได้จากการหล่อเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A-H แสดงในตารางที่ 4.1 อินกอตของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A มีลักษณะผิวหยาบ ขรุขระ ผิวมีสีเหลืองปนสีดำ ลักษณะแบบนี้พบกับอินกอตของเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสม E, F, G และ H การที่ผิวชิ้นงานมีสีเหลืองปนดำ เกิดขึ้นจากการหลอมในบรรยากาศปกติ ทำให้อากาศที่อยู่โดยรอบสัมผัสกับน้ำโลหะได้โดยตรง จึงเกิดเป็นสารประกอบของธาตุบางชนิดขึ้น ในที่นี้ไม่ได้วิเคราะห์ว่าเป็นสารประกอบอะไร สันนิษฐานว่าเป็นสารประกอบออกไซด์ ในทางปฏิบัติ วิธีกำจัดผิวสีเหลือง สีดำเหล่านี้ ทำได้โดยการนำชิ้นงานไปแช่ในกรด (ทางโรงงานที่ร่วมโครงการนี้ ใช้กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ความเข้มข้นร้อยละ 30 แช่เป็นเวลา 20 นาที)

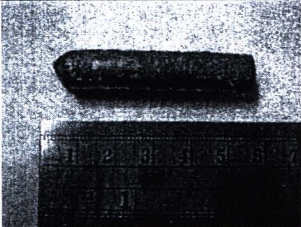
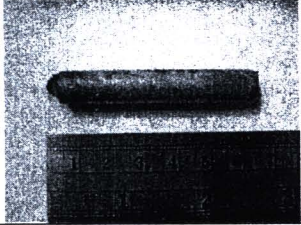
ลักษณะผิวของอินกอตเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B, C และ D มีผิวเรียบสีขาว มันวาว มีคราบสีเหลืองอ่อนเกิดขึ้นที่ผิวเล็กน้อย สามารถทำความสะอาดผิวได้โดยล้างด้วยกรด เนื่องจากในส่วนผสมเหล่านี้มีการเติมอัลลอยที่เป็นโลหะอะลูมิเนียมผสมเข้าไป อะลูมิเนียมเป็นธาตุที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยากับ

ออกซิเจนจึงเกิดเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์กลุ่มอยู่ที่ผิวหน้า ป้องกันอากาศสัมผัสน้ำโลหะโดยตรง ทำให้ผิวงานมีสีขาว มีคราบสีเหลืองน้อยลง

ตารางที่ 4.1 ลักษณะและรูปของอินกอตเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A- H

ส่วนผสม	รูปอินกอต	ลักษณะ
A		- ผิวหยาบ ขรุขระ - มีสีเหลืองปนดำที่ผิว
B		- ผิวเรียบสีขาว เงามาว - มีคราบสีเหลืองที่ผิวเล็กน้อย
C		- ผิวเรียบสีขาว เงามาว - มีคราบสีเหลืองที่ผิวเล็กน้อย
D		- มีผิวเรียบสีขาว เงามาว - มีคราบสีเหลืองที่ผิวเล็กน้อย
E		- ผิวมีสีเหลืองปนดำ - สีผิวไม่สม่ำเสมอ - ผิวขรุขระ หยาบ
F		- ผิวมีสีเหลืองปนดำบางส่วน - สีผิวไม่สม่ำเสมอ - ผิวหยาบเล็กน้อย

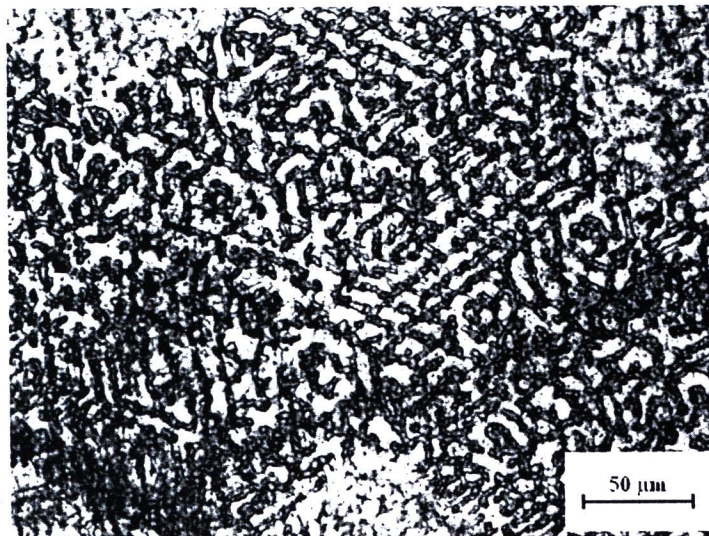
ตารางที่ 4.1 ลักษณะและรูปของอินกอตเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A- H (ต่อ)

ส่วนผสม	รูปอินกอต	ลักษณะ
G		- ผิวมีสีเหลืองปนดำ - สีผิวไม่สม่ำเสมอ - ผิวหยาบ ขรุขระมาก
H		- ผิวมีคราบเหลืองปนดำ - ผิวหยาบเล็กน้อย

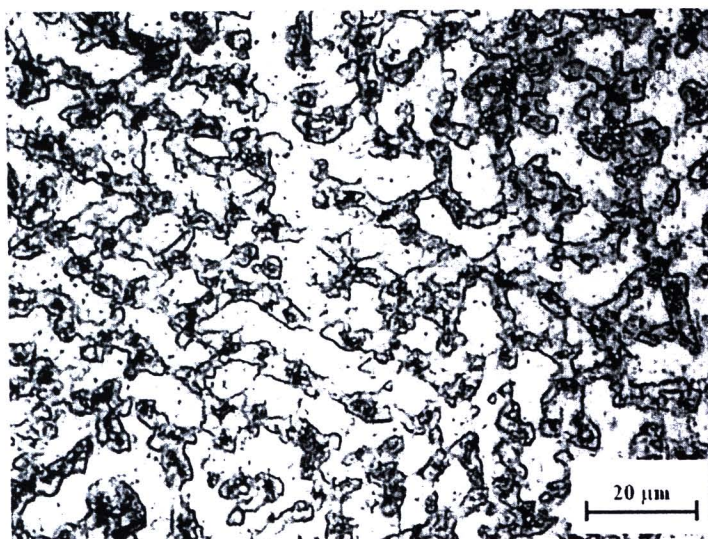
เป็นที่น่าสังเกตว่า ในระหว่างการหลอม ลักษณะของน้ำโลหะของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A, E, และ H มีลักษณะใส ไม่หนืด น้ำโลหะไหลตัวง่าย เทหล่อในแม่พิมพ์ได้ง่าย เกิดตะกรัน (Slag) ปริมาณน้อย ทำให้สูญเสียน้ำหนักของเงินสเตอร์ลิงเล็กน้อย สำหรับเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสม B, C, D, F และ G พบว่า ขณะที่หลอมมีตะกรันปกคลุมที่ผิวน้ำโลหะ น้ำโลหะใส มีการไหลตัวได้ดี หลังการเทหล่อในแม่พิมพ์แล้วเหลือตะกรันจำนวนมากเฉลี่ยประมาณร้อยละ 13.08 ซึ่งทำให้สูญเสียน้ำหนักของอินกอตไป (น้ำหนักของวัตถุดิบก่อนและหลังหล่อได้แสดงในภาคผนวก ก) และอาจมีการสูญเสียธาตุอื่นที่เติมเพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของเงินสเตอร์ลิง ในการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีมีค่าใช้จ่ายที่สูง จึงไม่ได้วิเคราะห์ทุกส่วนผสม อย่างไรก็ตาม ส่วนผสมที่ถูกเลือกนำไปใช้ผลิตจริงในภาคอุตสาหกรรมจะมีการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีอีกครั้ง

4.1.2 ผลการศึกษาโครงสร้างและความแข็งจุลภาคของอินกอต

โครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A ที่มีส่วนผสมของ $Ag-6.4Cu-0.4Sn-0.2In$ จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ใช้เลนส์วัตถุกำลังขยาย 20 และ 50 เท่า แสดงในรูปที่ 4.1 (ก)-(ข) และจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยกำลังขยาย 2,500 และ 5,000 เท่า แสดงในรูปที่ 4.2 (ก)-(ข) ตามลำดับ พบว่า โครงสร้างเป็นลักษณะเดนไดรต์ (Dendrite) บริเวณโครงสร้างพื้น (Matrix) เป็นเฟสที่มีปริมาณเงินเป็นส่วนผสมหลัก (Ag-rich Phase) โดยทั่วไปเรียกว่าเฟสแอลฟา ส่วนบริเวณพื้นที่สีดำเป็นเฟสบีตา ซึ่งมีปริมาณทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก (Cu-rich Phase)

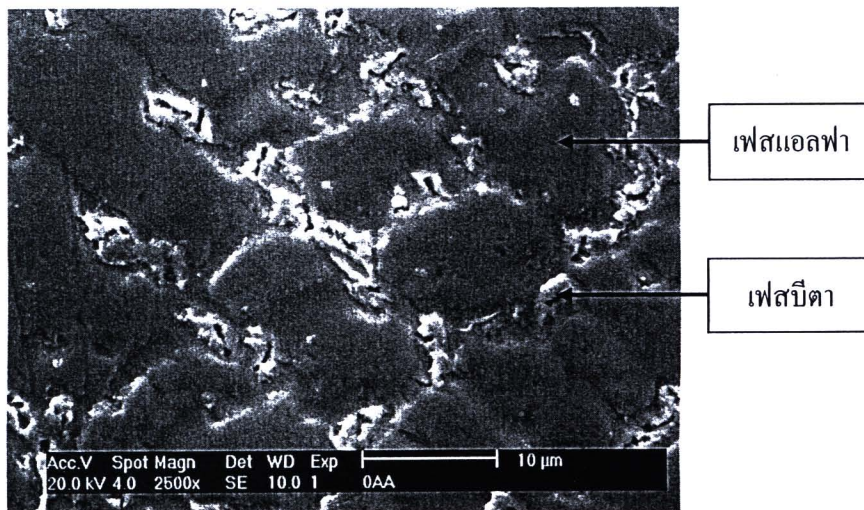


(ก)

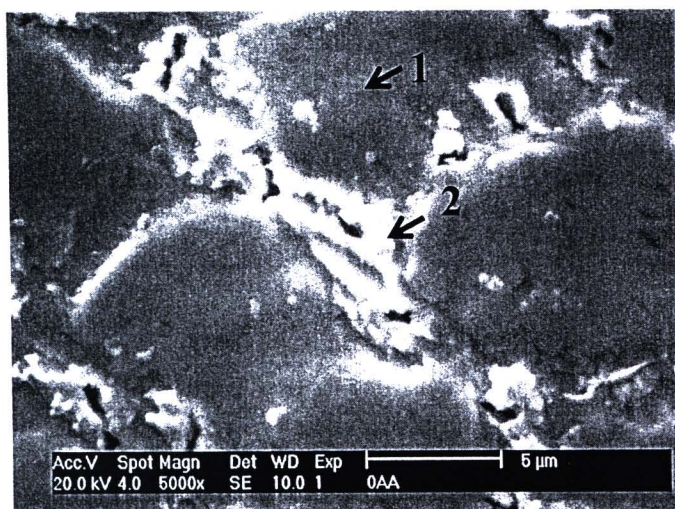


(ข)

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A (ก) กำลังขยาย 20 เท่า
(ข) กำลังขยาย 50 เท่า



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A

(ก) กำลังขยาย 2,500 เท่า (ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า

จากผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS แสดงตำแหน่งที่วิเคราะห์ในรูปที่ 4.2 (ข) ตำแหน่งที่ 1 เป็นบริเวณโครงสร้างพื้น และตำแหน่งที่ 2 บริเวณที่เป็นเฟสบีตา ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าตำแหน่งที่ 1 เป็นเฟสแอลฟามีปริมาณเงินร้อยละ 96.8 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณของทองแดง ร้อยละ 3.3 โดยน้ำหนัก ส่วนบริเวณตำแหน่งที่ 2 เป็นเฟสบีตามีปริมาณของเงิน ร้อยละ 91.8 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณของทองแดงร้อยละ 8.2 โดยน้ำหนัก เป็นที่น่าสังเกตว่าเฟสบีตามีปริมาณทองแดงต่ำกว่าปริมาณของเงิน ตามหลักการเฟสบีตาที่มีทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก แต่

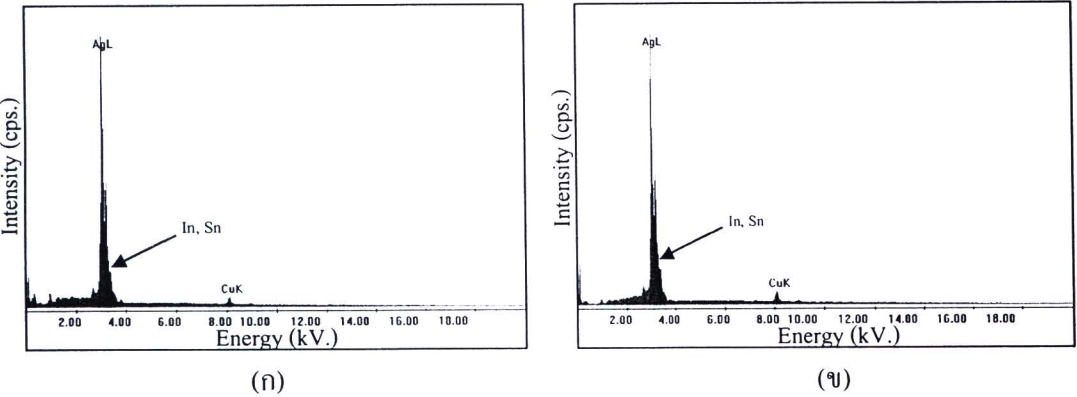
ผลการวิเคราะห์ที่ได้นี้ให้ผลที่ไม่สอดคล้องกับหลักการ ทั้งนี้เนื่องจากเฟสปีตามีขนาดเล็ก ผลการวิเคราะห์จึงมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากพื้นที่ในการวิเคราะห์มีบริเวณของโครงสร้างพื้นรวมอยู่ด้วย

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A ด้วยเทคนิค EDS

บริเวณที่วิเคราะห์	ปริมาณธาตุ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)			
	Ag	Cu	Sn	In
ตำแหน่งที่ 1	96.8	3.3	N/A	N/A
ตำแหน่งที่ 2	91.8	8.2	N/A	N/A

หมายเหตุ N/A หมายถึง ตรวจสอบไม่ได้

ผลการวิเคราะห์ธาตุดีบุก และอินเดียม ไม่สามารถตรวจสอบได้ (Non Available) เนื่องจากปริมาณที่ผสมมีค่าน้อย และสเปกตรัมของดีบุก และอินเดียมอยู่ใกล้กับเงินมาก จึงถูกฟลักของเงินซ้อนทับทำให้ไม่เห็นฟลักของดีบุกและอินเดียม ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จากข้อมูลในเฟสไดอะแกรมของเงินกับดีบุก และเงินกับอินเดียม พบว่าดีบุกและอินเดียมปริมาณน้อยๆ สามารถละลายได้ดีในเงิน เกิดเป็นสารละลายของของแข็ง [16]



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A (ก) ตำแหน่งที่ 1 และ (ข) ตำแหน่งที่ 2

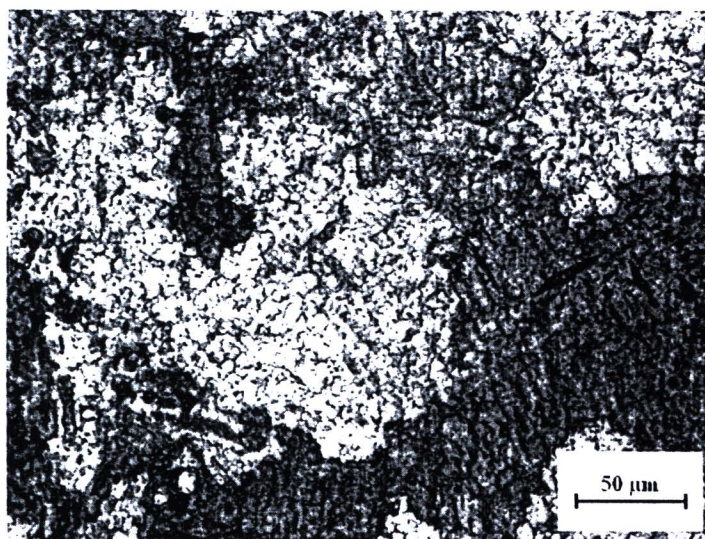
ความแข็งจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A มีค่าเฉลี่ย 73.0 วิกเกอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีค่าเท่ากับเงินสเตอร์ลิง 925 ที่มีส่วนผสม Ag-7.5Cu ซึ่งไม่มีการเติมธาตุผสมอื่นนอกจากทองแดง [54] และจากงานวิจัยของเจษฎา จอกแก้ว [31] พบว่า ความแข็งของเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสม Ag-7.0Cu-0.5Si มีค่าความแข็งลดลงจาก 80 เป็น 62 วิกเกอร์ เมื่อเติมอินเดียมปริมาณร้อยละ

0-2.13 โดยน้ำหนัก ลงไปแทนที่ปริมาณทองแดง โดยให้เหตุผลว่าทองแดงเป็นธาตุที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้เงิน แต่อินเดียมที่เติมลงไปเกิดการรวมตัวกับทองแดงเป็นเฟสบีตามากขึ้น ทองแดงที่ละลายในโครงสร้างพื้นจึงมีน้อยลง เป็นสาเหตุให้ความแข็งแรงลดลงตามปริมาณอินเดียมที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A ที่มีการเติมอินเดียมลงไป

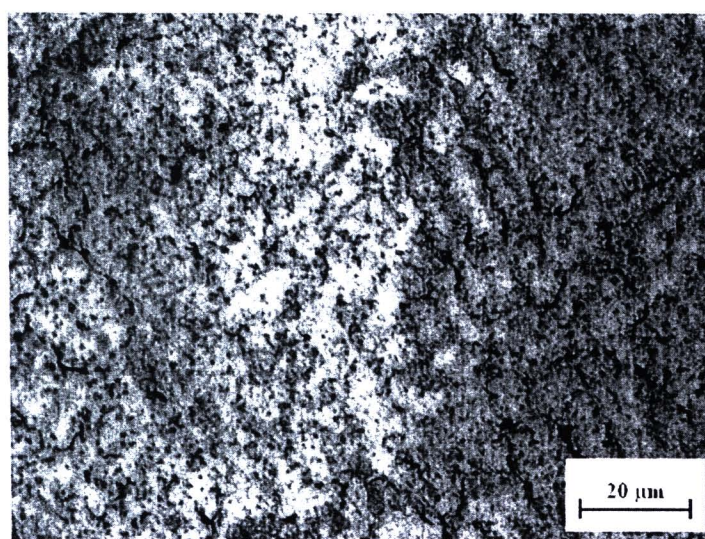
โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B ที่มีส่วนผสมเป็น $\text{Ag-5.65Cu-0.4Sn-0.2In-0.75(Al-1.05Mg-0.64Si-0.25Ti)}$ จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ใช้เลนส์วัตถุกำลังขยาย 20 และ 50 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.4 (ก)-(ข) และจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยกำลังขยาย 1,500 และ 3,500 เท่า แสดงในรูปที่ 4.5 (ก)-(ข) ตามลำดับ พบว่า โครงสร้างมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ ประกอบด้วยพื้นที่สีขาวเป็นเฟสแอลฟาที่มีเงินเป็นส่วนผสมหลัก และพื้นที่สีดำเป็นเฟสบีตาที่มีทองแดงเป็นส่วนผสมหลักกระจายอยู่ในโครงสร้าง

ผลจากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS แสดงตำแหน่งที่วิเคราะห์ในรูปที่ 4.5 (ข) ตำแหน่งที่ 1 เป็นบริเวณโครงสร้างพื้น และตำแหน่งที่ 2 และ 3 เป็นเฟสบีตาอยู่ระหว่างช่องว่างระหว่างเดนไดรต์ ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.3 มีหน่วยเป็นร้อยละ โดยน้ำหนัก พบว่า ตำแหน่งที่ 1 เป็นเฟสแอลฟาที่มีปริมาณเงินร้อยละ 94.0 ทองแดงร้อยละ 5.0 อะลูมิเนียมร้อยละ 0.4 แมกนีเซียมร้อยละ 0.4 และซิลิคอนร้อยละ 0.2 ส่วนบริเวณตำแหน่งที่ 2 เป็นเฟสบีตาที่มีปริมาณของเงินร้อยละ 80.2 ทองแดงร้อยละ 18.8 และอะลูมิเนียมร้อยละ 1.0 และบริเวณตำแหน่งที่ 3 มีปริมาณเงินร้อยละ 94.8 มีทองแดงร้อยละ 4.5 มีอะลูมิเนียมร้อยละ 0.4 และมีปริมาณแมกนีเซียมร้อยละ 0.3

ทำนองเดียวกับส่วนผสม A เฟสบีตาของส่วนผสม B มีปริมาณทองแดงต่ำกว่าปริมาณของเงิน ทั้งนี้เนื่องจากเฟสบีตาทั้งสองบริเวณมีขนาดเล็ก ผลการวิเคราะห์จึงมีบริเวณโครงสร้างพื้นรวมอยู่ด้วย อย่างไรก็ตามลักษณะโครงสร้างจุลภาคมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของปวีร์ศรีและคณะ [55] พบว่าเงินสเตอร์ลิงที่เติมอะลูมิเนียมผสม มีโครงสร้างเฟสบีตาอยู่บริเวณช่องว่างระหว่างเดนไดรต์ (Interdendritic Dendrite) และผลการวิเคราะห์ธาตุอินเดียม และไทเทเนียมไม่พบในทุกบริเวณที่ทำการวิเคราะห์เช่นกัน

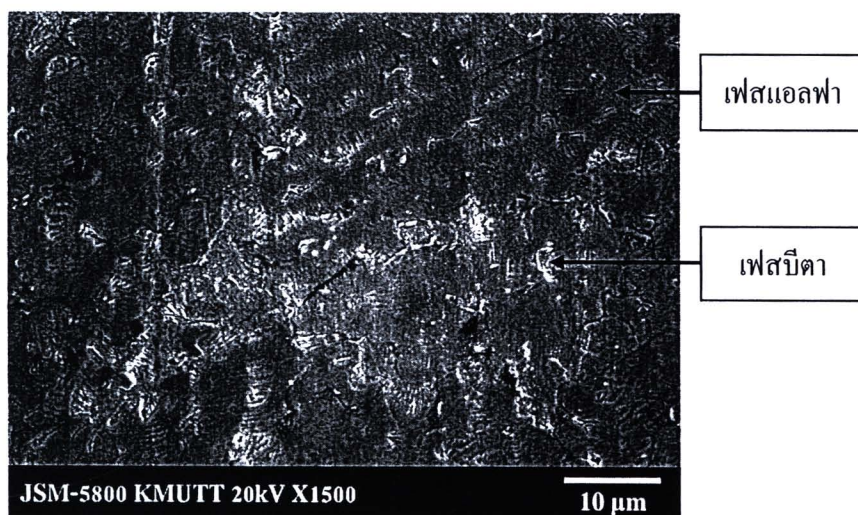


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B (ก) กำลังขยาย 20 เท่า
(ข) กำลังขยาย 50 เท่า



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B
(ก) กำลังขยาย 1,500 เท่า (ข) กำลังขยาย 3,500 เท่า

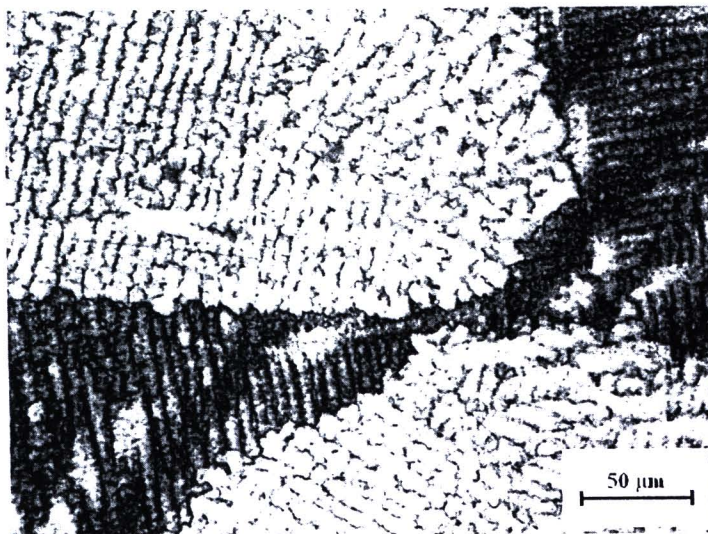
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B ด้วยเทคนิค EDS

บริเวณที่วิเคราะห์	ปริมาณธาตุ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)							
	Ag	Cu	Sn	In	Al	Mg	Si	Ti
ตำแหน่งที่ 1	94.0	5.0	N/A	N/A	0.4	0.4	0.2	N/A
ตำแหน่งที่ 2	80.2	18.8	N/A	N/A	1.0	N/A	N/A	N/A
ตำแหน่งที่ 3	94.8	4.5	N/A	N/A	0.4	0.3	N/A	N/A

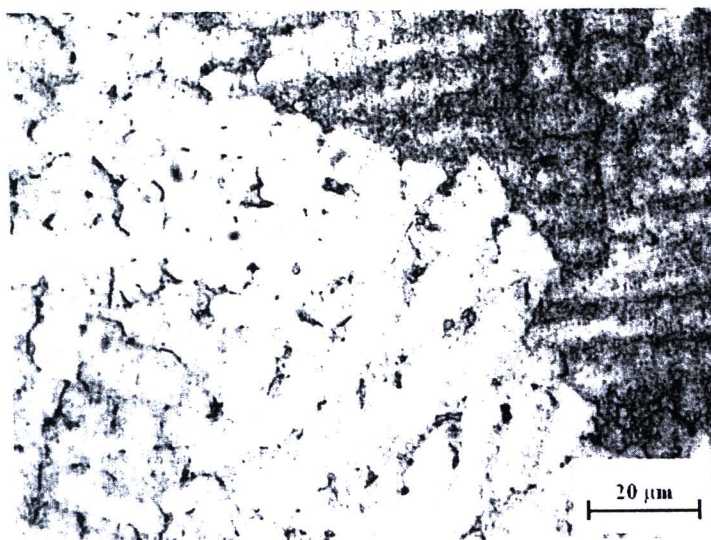
หมายเหตุ N/A หมายถึง ตรวจสอบไม่ได้

ความแข็งจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B มีค่าเฉลี่ย 91.0 วิกเกอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมแรกพบว่ามีค่าความแข็งสูงกว่าเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A ซึ่งมีค่า 73.0 วิกเกอร์ จากการพิจารณาพบว่าการเติมโลหะผสมอะลูมิเนียม แมกนีเซียม ซิลิคอน และไทเทเนียม ในปริมาณน้อยๆ ทำให้โครงสร้างและความแข็งจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลง สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งพบว่า การเติมอะลูมิเนียมในโลหะเงินสเตอร์ลิง Ag-6.1Cu-0.9Al มีค่าความแข็งเป็น 88.0 วิกเกอร์ [56] ส่วนการเติมแมกนีเซียมในเงินสเตอร์ลิง ที่ประกอบด้วยเงินร้อยละ 92.5 ทองแดงร้อยละ 2.5-7.4 และแมกนีเซียมร้อยละ 0.1-5 ภายหลังจากผ่านการบ่มแข็ง สามารถเพิ่มความแข็งเป็น 152 วิกเกอร์ [6] และการเติมซิลิคอนในเงินสเตอร์ลิง 925 ปริมาณร้อยละ 0-0.5 สามารถเพิ่มความแข็งได้ มีค่า 77.9-91.8 วิกเกอร์ [12]

สำหรับโครงสร้างของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม C ที่มีส่วนผสมเป็น Ag-5.65Cu-0.4Sn-0.2In-0.75(Al-5.99Mg-0.60Si-0.25Ti) จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ใช้เลนส์วัตถุกำลังขยาย 20 และ 50 เท่า แสดงในรูปที่ 4.6 (ก)-(ข) และจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนด้วยกำลังขยาย 1,500 และ 3,500 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.7 (ก)-(ข) ตามลำดับ พบว่า โครงสร้างมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ บริเวณโครงสร้างพื้นเป็นเฟสแอลฟาที่มีเงินเป็นส่วนผสมหลัก ส่วนบริเวณพื้นที่สีดำเป็นเฟสบีตา ซึ่งมีปริมาณของทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก

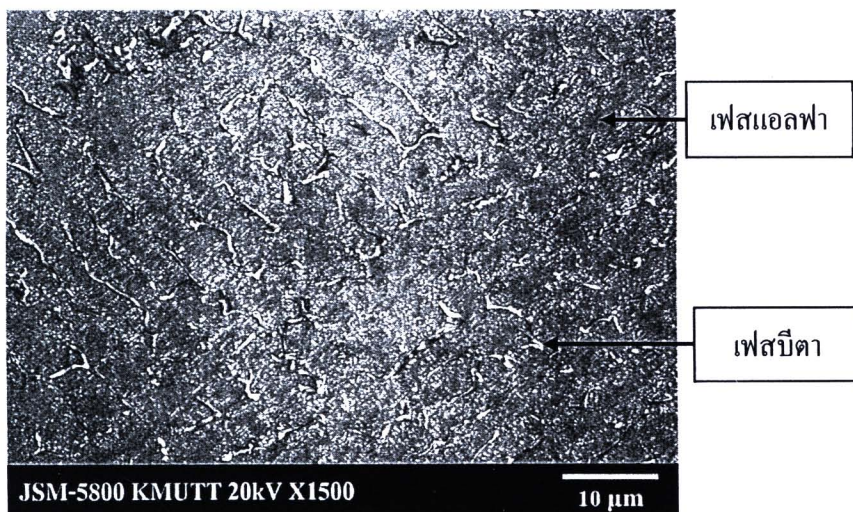


(ก)

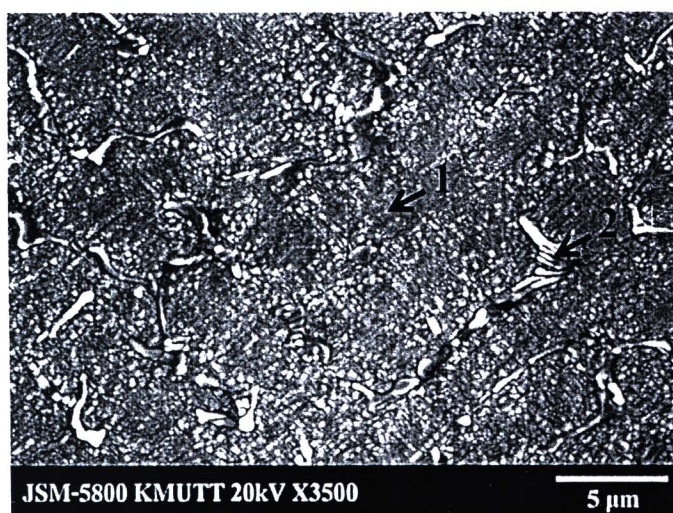


(ข)

รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม C (ก) กำลังขยาย 20 เท่า
(ข) กำลังขยาย 50 เท่า



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม C

(ก) กำลังขยาย 1,500 เท่า (ข) กำลังขยาย 3,500 เท่า

จากผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS แสดงตำแหน่งที่วิเคราะห์ในรูปที่ 4.7 (ข) ตำแหน่งที่ 1 เป็นบริเวณโครงสร้างพื้น และตำแหน่งที่ 2 บริเวณที่เป็นเฟสบีตา ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.4 มีหน่วยเป็นร้อยละ โดยน้ำหนัก พบว่าตำแหน่งที่ 1 เป็นเฟสแอลฟามีปริมาณเงินร้อยละ 94.0 มีทองแดงร้อยละ 5.0 มีอะลูมิเนียม แมกนีเซียม และซิลิคอนปริมาณเล็กน้อย ส่วนบริเวณตำแหน่งที่ 2 เป็นเฟสบีตามีปริมาณของเงินร้อยละ 88.9 มีทองแดงร้อยละ 9.3 มีอะลูมิเนียมร้อยละ 1.0 มีปริมาณแมกนีเซียมและซิลิคอนเล็กน้อย เนื่องจากเฟสบีตามีขนาดเล็ก ทำให้ผลการวิเคราะห์มี

บริเวณของโครงสร้างพื้นรวมอยู่ด้วย เฟสบีตาจึงมีปริมาณของทองแดงต่ำกว่าปริมาณของเงิน ส่วนผลการวิเคราะห์ธาตุดีบุก อินเดียม และไทเทเนียม ไม่สามารถตรวจสอบได้ เช่นเดียวกับส่วนผสม B ความแข็งจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม C มีค่าความแข็งเฉลี่ย เท่ากับ 89.0 วิกเกอร์ ซึ่งความแข็งที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันกับส่วนผสม B

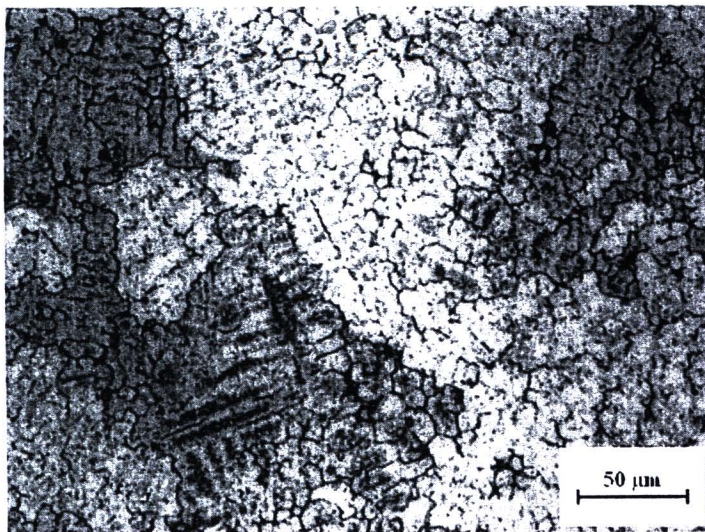
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม C ด้วยเทคนิค EDS

บริเวณที่วิเคราะห์	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)							
	Ag	Cu	Sn	In	Al	Mg	Si	Ti
ตำแหน่งที่ 1	94.0	5.0	N/A	N/A	0.3	0.3	0.4	N/A
ตำแหน่งที่ 2	88.9	9.3	N/A	N/A	1.0	0.3	0.5	N/A

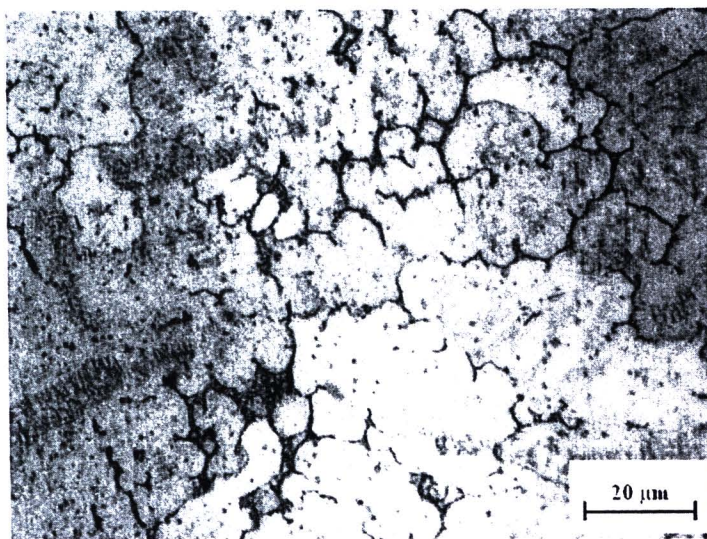
หมายเหตุ N/A หมายถึง ตรวจสอบไม่ได้

โครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม D ที่มีส่วนผสมของ Ag-5.65Cu-0.4Sn-0.2In-0.75(Al-0.88Mg-0.54Si-20Y₂O₃.ZrO₂) จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ใช้เลนส์วัตถุกำลังขยาย 20 และ 50 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.8 (ก)-(ข) และจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยกำลังขยาย 1,500 และ 3,500 เท่า แสดงในรูปที่ 4.9 (ก)-(ข) มีโครงสร้างเป็นลักษณะเดนไดรต์ ประกอบด้วยเฟสแอลฟาของเงิน และเฟสบีตาที่กระจายอยู่ในช่องว่างระหว่างเดนไดรต์

จากผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS แสดงตำแหน่งที่วิเคราะห์ในรูปที่ 4.9 (ข) ตำแหน่งที่ 1 และ 2 เป็นบริเวณโครงสร้างพื้น และตำแหน่งที่ 3 บริเวณที่เป็นเฟสบีตา ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 มีปริมาณเงิน ทองแดง อะลูมิเนียมและแมกนีเซียมใกล้เคียงกัน แต่บริเวณที่ 2 พบดีบุกปริมาณร้อยละ 0.9 โดยน้ำหนัก ส่วนบริเวณตำแหน่งที่ 3 เป็นเฟสที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างยูเทคติก ประกอบด้วยเฟสแอลฟาและบีตาที่มีปริมาณเงินร้อยละ 73.0 โดยน้ำหนัก ทองแดงร้อยละ 24.4 โดยน้ำหนัก อะลูมิเนียมร้อยละ 2.3 โดยน้ำหนัก และแมกนีเซียมร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก เนื่องจากโครงสร้างยูเทคติกมีขนาดเล็ก ผลการวิเคราะห์จึงมีบริเวณของโครงสร้างพื้นรวมอยู่ด้วย ส่วนผลการวิเคราะห์ธาตุดีบุก อินเดียม ซิลิกอน และสารประกอบอิตเทรียมเซอร์โคเนีย (Y₂O₃.ZrO₂) ไม่สามารถตรวจสอบได้

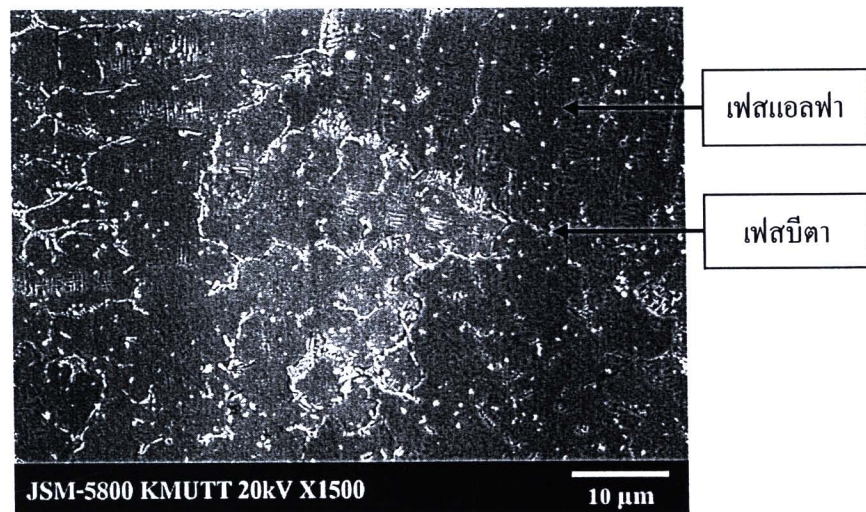


(ก)

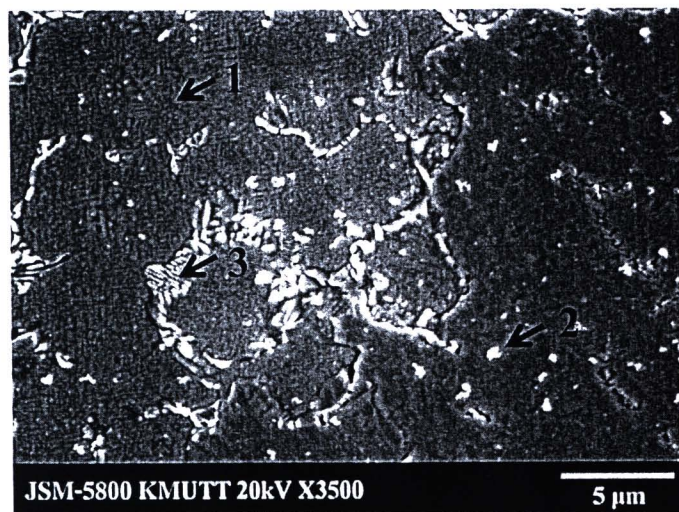


(ข)

รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม D (ก) กำลังขยาย 20 เท่า
(ข) กำลังขยาย 50 เท่า



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม D
(ก) กำลังขยาย 1,500 เท่า (ข) กำลังขยาย 3,500 เท่า

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม D ด้วยเทคนิค EDS

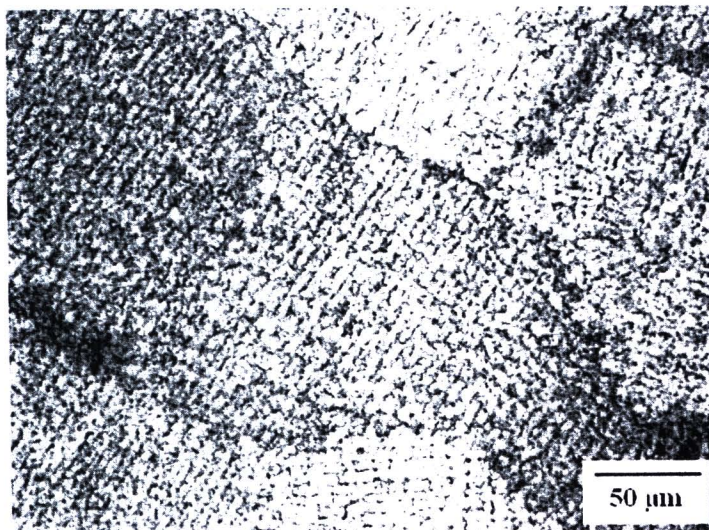
บริเวณที่วิเคราะห์	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)							
	Ag	Cu	Sn	In	Al	Mg	Si	YZ
ตำแหน่งที่ 1	95.9	3.3	N/A	N/A	0.4	0.4	N/A	N/A
ตำแหน่งที่ 2	94.3	4.0	0.9	N/A	0.5	0.3	N/A	N/A
ตำแหน่งที่ 3	73.0	24.4	N/A	N/A	2.3	0.3	N/A	N/A

หมายเหตุ N/A หมายถึง ตรวจสอบไม่ได้

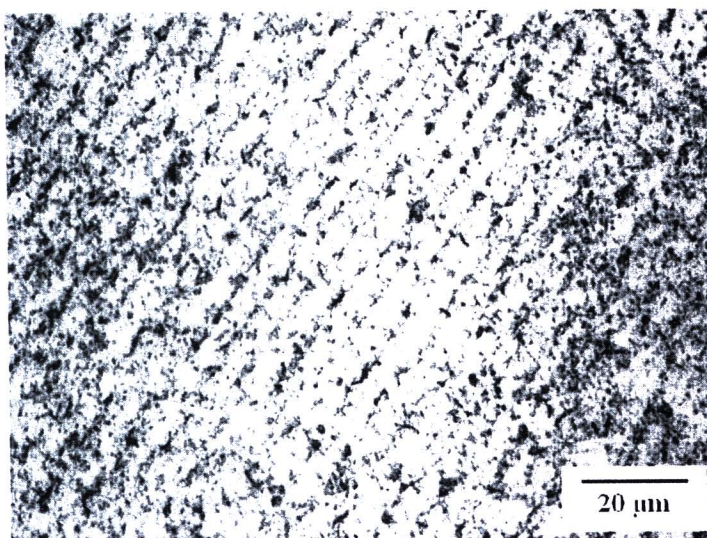
สำหรับความแข็งแรงของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม D มีค่าเฉลี่ย 84.0 วิกเกอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับเงินสเตอร์ลิงส่วนผสมอื่น พบว่า เงินสเตอร์ลิงส่วนผสม D มีค่าความแข็งแรงสูงกว่าส่วนผสม A แต่มีค่าความแข็งต่ำกว่าส่วนผสม B และ C แม้ว่าจะมีการเติมอัลลอยที่มีส่วนผสมใกล้เคียงกัน แต่ค่าความแข็งที่ได้กลับมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากโครงสร้างมีความต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจน

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม E ที่มีส่วนผสมเป็น Ag-5.65Cu-0.40Sn-0.20In-0.75(Cu-29.70Zn-0.42Ti) จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ใช้เลนส์วัตถุกำลังขยาย 20 และ 50 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.10 (ก)-(ข) และจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยกำลังขยาย 1,500 และ 3,500 เท่า แสดงในรูปที่ 4.11 (ก)-(ข) ตามลำดับ พบว่า โครงสร้างเป็นลักษณะเดนไดรต์ โครงสร้างมีความสม่ำเสมอ ประกอบด้วยเฟสแอลฟาของเงิน และเฟสบีตาของทองแดงที่กระจายอย่างหนาแน่นในช่องว่างระหว่างเดนไดรต์ สังเกตได้ว่าขนาดของเดนไดรต์ละเอียดกว่าโครงสร้างของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสมอื่นๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว

จากผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS แสดงตำแหน่งที่วิเคราะห์ในรูปที่ 4.11 (ข) ตำแหน่งที่ 1 เป็นบริเวณโครงสร้างพื้น และตำแหน่งที่ 2 บริเวณที่เป็นเฟสบีตา ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าตำแหน่งที่ 1 เป็นเฟสแอลฟามีปริมาณเงินร้อยละ 96.2 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณทองแดงร้อยละ 3.8 โดยน้ำหนัก ส่วนบริเวณตำแหน่งที่ 2 เป็นเฟสบีตามีปริมาณของเงินร้อยละ 94.0 โดยน้ำหนัก ปริมาณทองแดงร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณดีบุกร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก สำหรับผลการวิเคราะห์ธาตุดีบุกพบได้ในบริเวณเฟสบีตา ส่วนอินเดียม สังกะสี และไทเทเนียม ไม่สามารถตรวจสอบได้

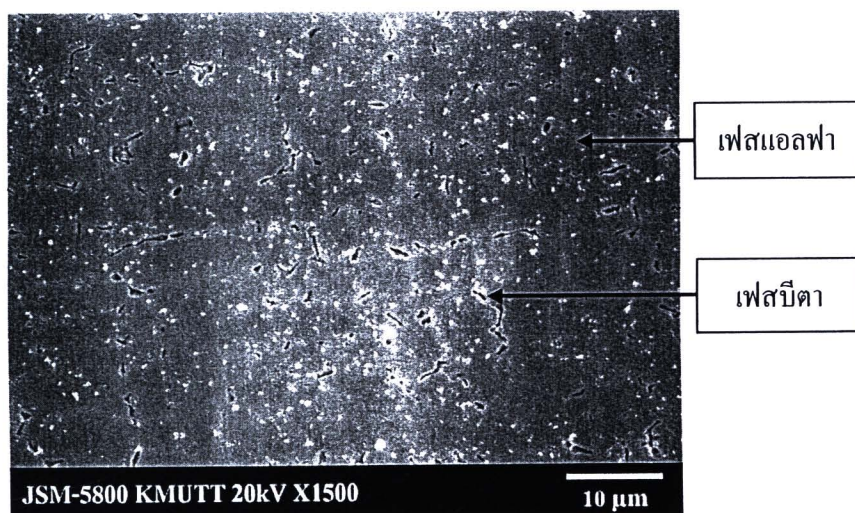


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม E (ก) กำลังขยาย 20 เท่า
(ข) กำลังขยาย 50 เท่า



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม E
(ก) กำลังขยาย 1,500 เท่า (ข) กำลังขยาย 3,500 เท่า

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม E ด้วยเทคนิค EDS

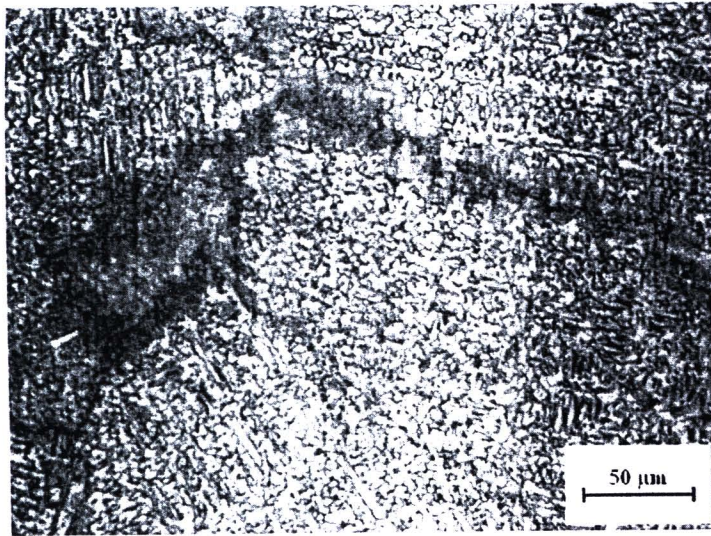
บริเวณที่วิเคราะห์	ปริมาณธาตุ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)					
	Ag	Cu	Sn	In	Zn	Ti
ตำแหน่งที่ 1	96.2	3.8	N/A	N/A	N/A	N/A
ตำแหน่งที่ 2	94.0	5.0	1.0	N/A	N/A	N/A

หมายเหตุ N/A หมายถึง ตรวจสอบไม่ได้

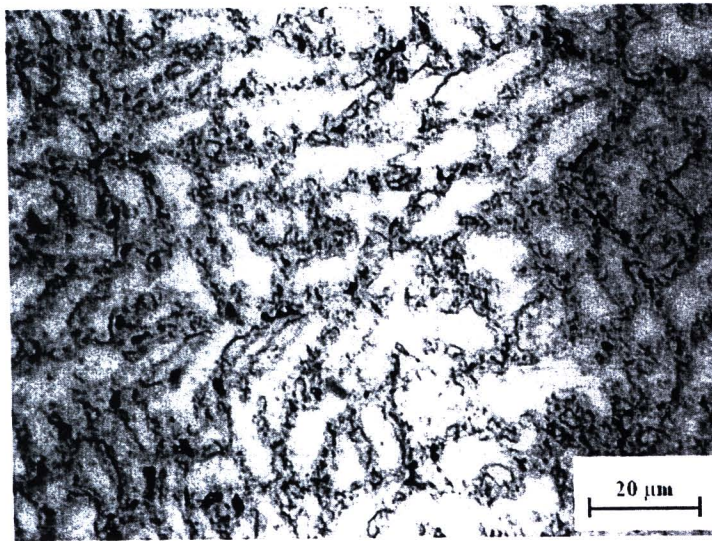
ความแข็งจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม E มีค่าเฉลี่ยเป็น 90.0 วิกเกอร์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ ส่วนผสม B และ C ซึ่งมีค่าเท่ากับ 91 และ 89 วิกเกอร์ ตามลำดับ เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคของ ส่วนผสม B, C และ E มีความละเอียด และสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงานเหมือนกัน จึงทำให้ความแข็งมีค่า ใกล้เคียงกัน

โครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม F ที่มีส่วนผสมเป็น Ag-6.4(Cu-0.16Zr)-0.4Sn-0.2In จาก ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ใช้เลนส์วัตถุกำลังขยาย 20 และ 50 เท่า แสดงในรูปที่ 4.12 (ก)-(ข) และจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยกำลังขยาย 1,500 และ 3,500 เท่า แสดงในรูปที่ 4.13 (ก)-(ข) ตามลำดับ พบว่า โครงสร้างเป็นลักษณะเดนไดรต์ โครงสร้างพื้นเป็นเฟส แอลฟาที่มีปริมาณเงินเป็นส่วนผสมหลัก และพื้นที่สีดำเป็นเฟสบีตาซึ่งมีปริมาณทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก

จากผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS แสดงตำแหน่งที่วิเคราะห์ในรูปที่ 4.13 (ข) ตำแหน่งที่ 1 เป็นบริเวณโครงสร้างพื้น และตำแหน่งที่ 2 และ 3 เป็นบริเวณเฟสบีตา ผลการวิเคราะห์ แสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าตำแหน่งที่ 1 เป็นเฟสแอลฟาที่มีปริมาณเงินร้อยละ 95.5 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณของทองแดงร้อยละ 4.0 โดยน้ำหนัก ส่วนบริเวณตำแหน่งที่ 2 และ 3 เป็นเฟสบีตามีปริมาณ ของเงิน ทองแดง และเซอร์โคเนียมใกล้เคียงกัน และตำแหน่งที่ 3 ยังพบปริมาณของดีบุกร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก เป็นที่น่าสังเกตว่าเฟสบีตามีปริมาณของทองแดงน้อยกว่าปริมาณของเงิน ทั้งนี้เนื่องจาก เฟสบีตามีขนาดเล็ก ผลการวิเคราะห์จึงมีพื้นที่บริเวณ โครงสร้างพื้นรวมอยู่ด้วย สำหรับผลการ วิเคราะห์ธาตุอินเดียม ไม่สามารถตรวจสอบได้ ทั้ง 3 บริเวณ ส่วนความแข็งจุลภาคของเงินสเตอร์ลิง ส่วนผสม F มีค่าเฉลี่ยเป็น 85.0 วิกเกอร์

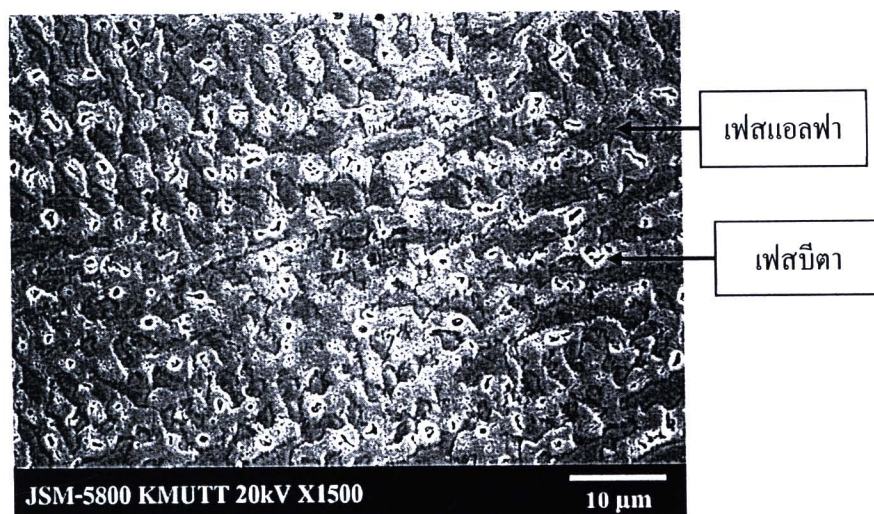


(ก)

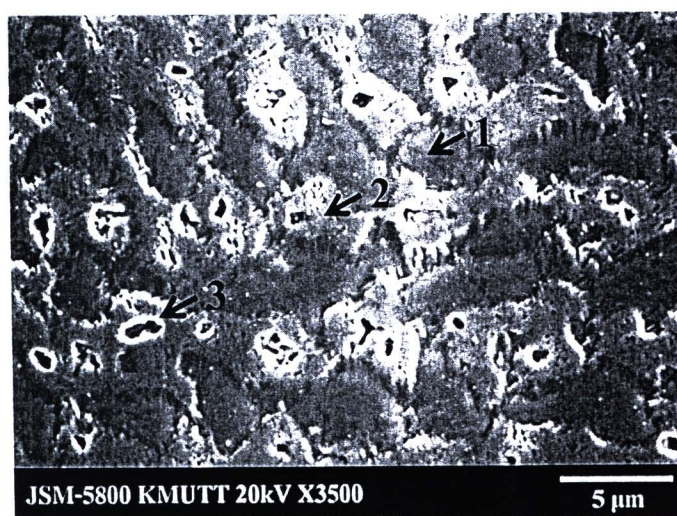


(ข)

รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม F (ก) กำลังขยาย 20 เท่า
(ข) กำลังขยาย 50 เท่า



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม F
(ก) กำลังขยาย 1,500 เท่า (ข) กำลังขยาย 3,500 เท่า

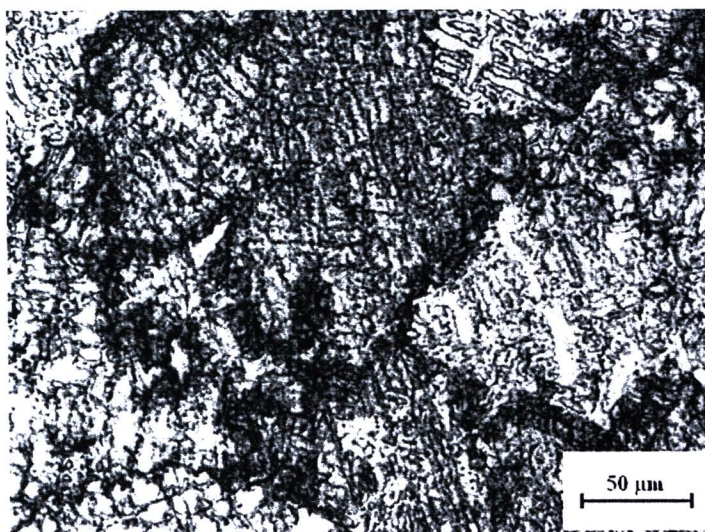
ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม F ด้วยเทคนิค EDS

บริเวณที่วิเคราะห์	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
	Ag	Cu	Sn	In	Zr
ตำแหน่งที่ 1	95.5	4.0	N/A	N/A	0.5
ตำแหน่งที่ 2	92.8	6.5	N/A	N/A	0.7
ตำแหน่งที่ 3	92.0	6.0	1.0	N/A	1.0

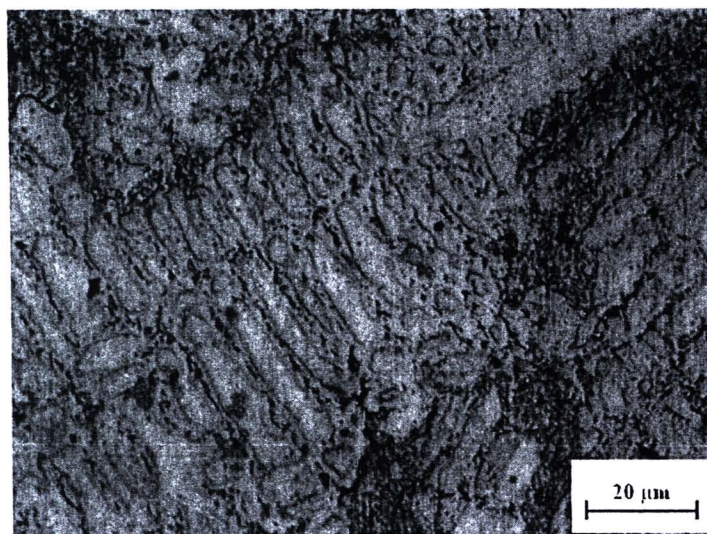
หมายเหตุ N/A หมายถึง ตรวจสอบไม่ได้

สำหรับโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม G ที่มีส่วนผสมเป็น Ag-6.4(Cu-5Ti)-0.4Sn-0.2In จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ใช้เลนส์วัตถุกำลังขยาย 20 และ 50 เท่า แสดงในรูปที่ 4.14 (ก)-(ข) และจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยกำลังขยาย 1,500 และ 3,500 เท่า แสดงในรูปที่ 4.15 (ก)-(ข) ตามลำดับ พบว่า โครงสร้างเป็นลักษณะเดนไดรต์ โครงสร้างพื้นเป็นเฟสแอลฟาที่มีเงินเป็นส่วนผสมหลัก ส่วนบริเวณช่องว่างระหว่างเดนไดรต์เป็นเฟสบีตาที่มีทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก

จากผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS แสดงตำแหน่งที่วิเคราะห์ในรูปที่ 4.15 (ข) ตำแหน่งที่ 1 เป็นบริเวณโครงสร้างพื้น และตำแหน่งที่ 2 บริเวณที่เป็นเฟสบีตา ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าตำแหน่งที่ 1 เป็นเฟสแอลฟามีปริมาณเงินร้อยละ 95.6 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณทองแดงร้อยละ 4.4 โดยน้ำหนัก ส่วนบริเวณตำแหน่งที่ 2 เป็นเฟสบีตามีปริมาณของเงินร้อยละ 95.0 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณทองแดงร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก ส่วนผลการวิเคราะห์ธาตุดีบุก อินเดียม และไทเทเนียม ไม่สามารถตรวจสอบได้ ทั้ง 2 บริเวณ และความแข็งจุลภาคมีค่าเฉลี่ย 82.0 วิกเกอร์

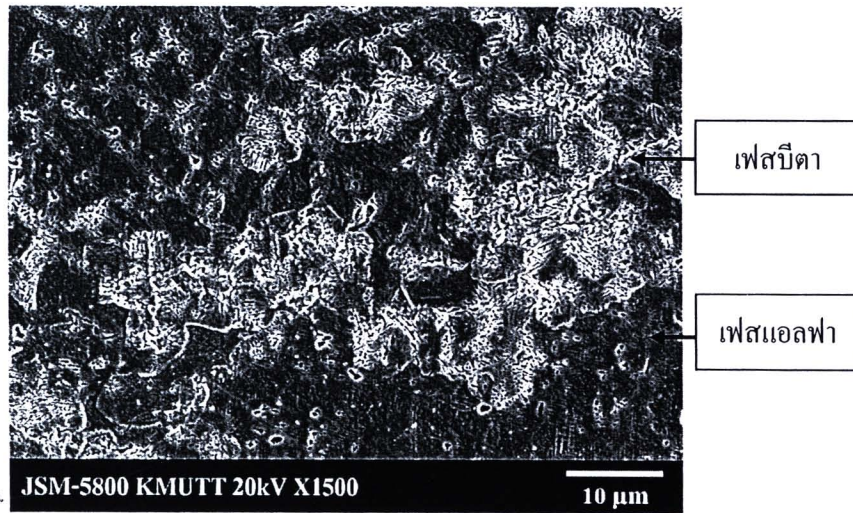


(ก)

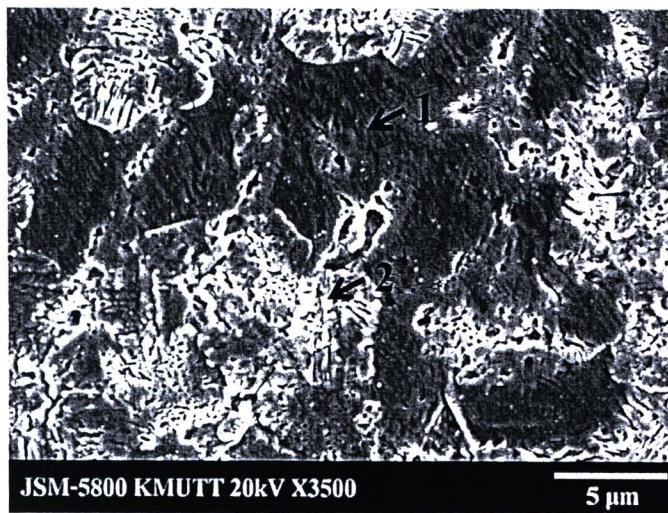


(ข)

รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม G (ก) กำลังขยาย 20 เท่า
(ข) กำลังขยาย 50 เท่า



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม G
(ก) กำลังขยาย 1,500 เท่า (ข) กำลังขยาย 3,500 เท่า

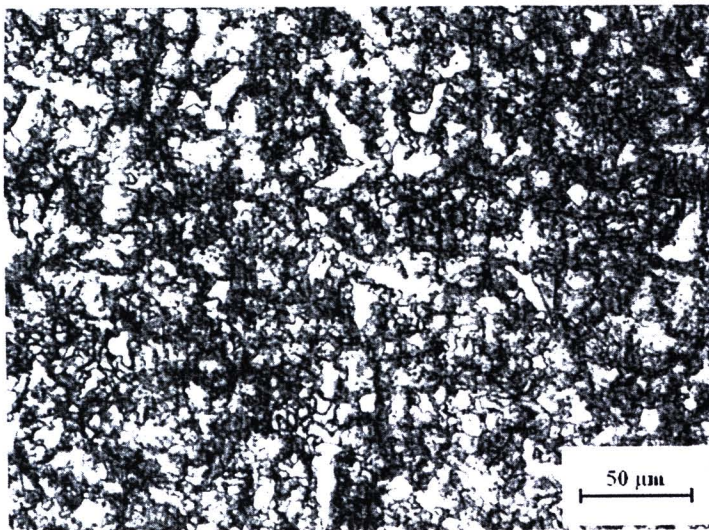
ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม G ด้วยเทคนิค EDS

บริเวณที่วิเคราะห์	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
	Ag	Cu	Sn	In	Ti
ตำแหน่งที่ 1	95.6	4.4	N/A	N/A	N/A
ตำแหน่งที่ 2	95.0	5.0	N/A	N/A	N/A

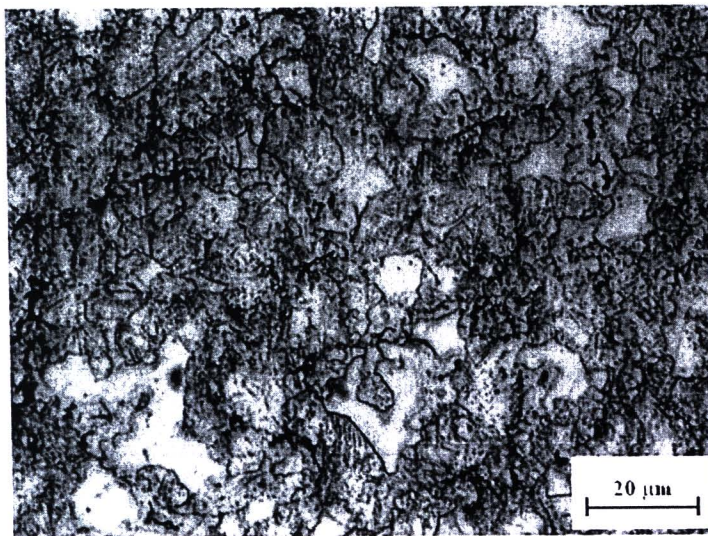
หมายเหตุ N/A หมายถึง ตรวจสอบไม่ได้

โครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม H ที่มีส่วนผสมเป็น Ag-6.4(Cu-1.96B)-0.4Sn-0.2In จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ใช้เลนส์วัตถุกำลังขยาย 20 และ 50 เท่า แสดงในรูปที่ 4.16 (ก)-(ข) และจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยกำลังขยาย 1,500 และ 3,500 เท่า แสดงในรูปที่ 4.17 (ก)-(ข) ตามลำดับ พบว่า โครงสร้างเป็นลักษณะเดนไดรต์ ประกอบด้วยโครงสร้างพื้นเป็นเฟสแอลฟาที่มีเงินเป็นส่วนผสมหลัก และเฟสบีตาซึ่งมีปริมาณของทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก อยู่บริเวณช่องว่างระหว่างเดนไดรต์

จากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS แสดงตำแหน่งที่วิเคราะห์ในรูปที่ 4.17 (ข) ตำแหน่งที่ 1 เป็นบริเวณโครงสร้างพื้น และตำแหน่งที่ 2 เป็นบริเวณเฟสบีตา ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.9 พบว่าตำแหน่งที่ 1 เป็นเฟสแอลฟาที่มีปริมาณเงินร้อยละ 97.3 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณทองแดงร้อยละ 2.7 โดยน้ำหนัก ส่วนบริเวณตำแหน่งที่ 2 เป็นเฟสบีตามีปริมาณของเงินร้อยละ 94.9 โดยน้ำหนัก มีปริมาณทองแดงร้อยละ 3.8 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณดีบุกร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก และผลการวิเคราะห์ธาตุอินเดียมและโบรอน ไม่สามารถตรวจสอบได้ทั้ง 2 บริเวณ ความแข็งจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม H มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 76 วิกเกอร์

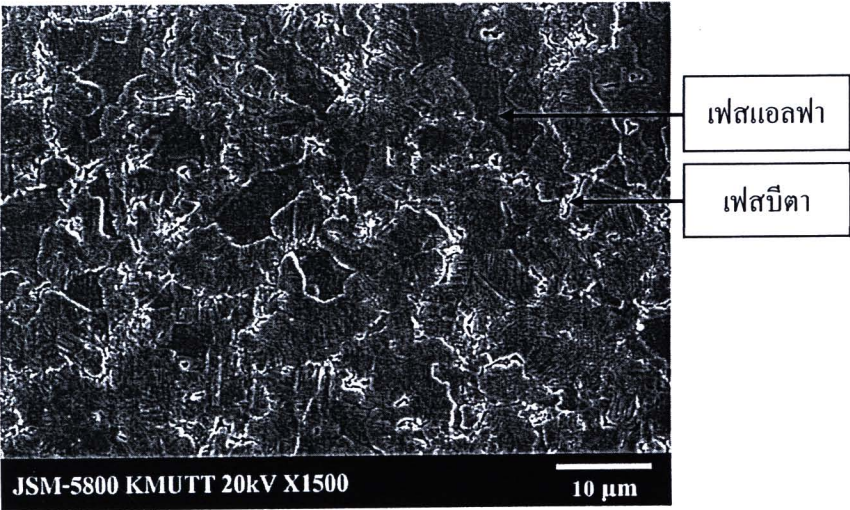


(ก)

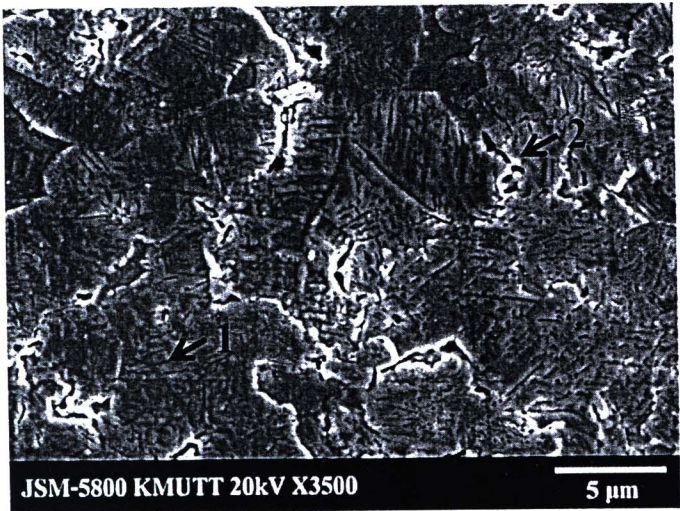


(ข)

รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม H (ก) กำลังขยาย 20 เท่า
(ข) กำลังขยาย 50 เท่า



(ก)



(ข)

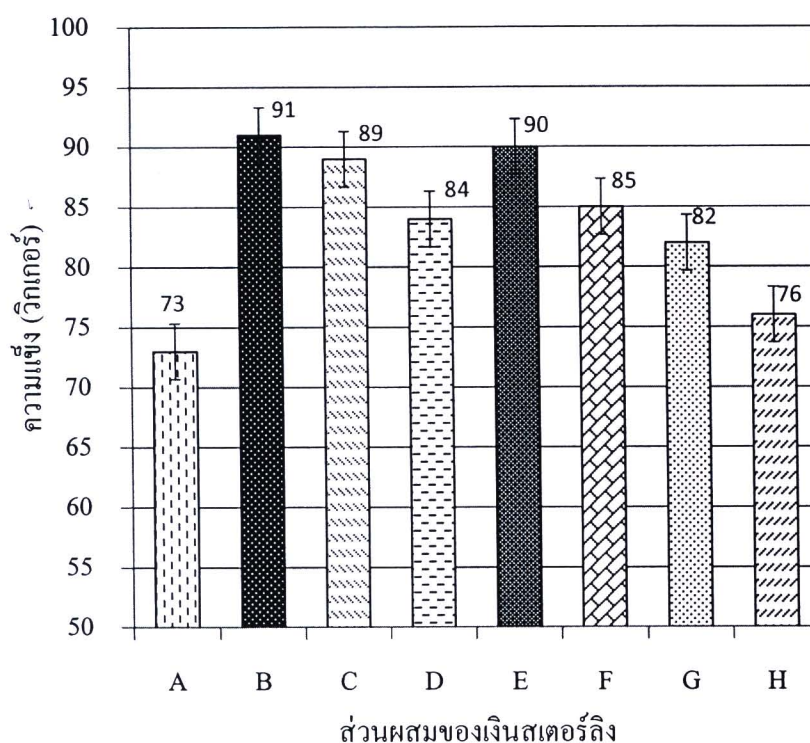
รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม H
(ก) กำลังขยาย 1,500 เท่า (ข) กำลังขยาย 3,500 เท่า

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม H ด้วยเทคนิค EDS

บริเวณที่วิเคราะห์	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
	Ag	Cu	Sn	In	B
ตำแหน่งที่ 1	97.2	2.8	N/A	N/A	N/A
ตำแหน่งที่ 2	95.0	4.0	1.0	N/A	N/A

หมายเหตุ N/A หมายถึง ตรวจสอบไม่ได้

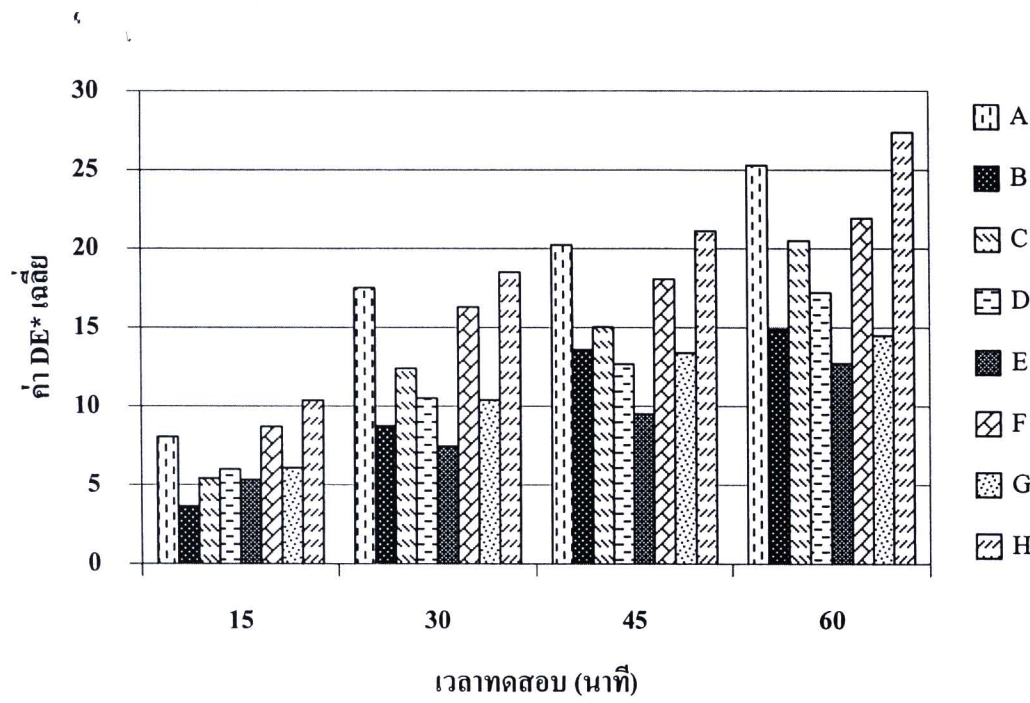
ในภาพรวมความแข็งแรงของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A-H แสดงในรูปที่ 4.18 พบว่า เงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A เป็นส่วนผสมเริ่มต้น Ag-6.4Cu-0.4Sn-0.2In มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ย 73 วิกเกอร์ ส่วนเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B, C และ E มีความแข็งแรงที่สูงใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเป็น 91, 89 และ 90 วิกเกอร์ ตามลำดับ ส่วนเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม D, F, G และ H มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยได้แก่ 84, 85, 82 และ 76 วิกเกอร์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าส่วนผสม B, C และ E เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคของทั้ง 3 ส่วนผสม มีเฟสบีมากกว่าโครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมอื่น



รูปที่ 4.18 ความแข็งแรงจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อของเงินสเตอร์ลิง 8 ส่วนผสม

4.1.3 ผลการทดสอบความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิง

ผลการทดสอบความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิง ภายหลังจากทดสอบโดยนำชิ้นงานไปตั้งในภาชนะปิดที่มีบรรยากาศของสารละลายอิมัลชันโซเดียมซัลไฟด์ ใช้เวลาในการทดสอบ 15, 30, 45 และ 60 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าสีโดยใช้เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ เพื่อหาค่าการเปลี่ยนแปลงสี (DE*) ซึ่งค่านี้คำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงของสีก่อนและหลังการทดสอบของชิ้นงาน แสดงในรูปที่ 4.19 ผลการทดสอบที่เวลา 15 นาที พบว่าค่า DE* ของเงินสเตอร์ลิงทุกส่วนผสม มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเพิ่มเวลาในการทดสอบเป็น 30 และ 45 นาที ค่า DE* มีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้น และเมื่อเพิ่มเวลาในการทดสอบเป็น 60 นาที พบว่าค่า DE* มีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัดเจน ชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสม A หลังทดสอบเป็นเวลา 60 นาที พบว่าค่า DE* มีค่า 25.27 ในการทดลองนี้จึงใช้เป็นมาตรฐาน เพื่อเปรียบเทียบค่า DE* กับส่วนผสมอื่น



รูปที่ 4.19 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของเงินสเตอร์ลิงเมื่อใช้เวลาทดสอบ 15, 30, 45 และ 60 นาที

จากงานวิจัยที่ผ่านมารายงานไว้ว่า เงินสเตอร์ลิง 925 ที่ไม่ได้เติมธาตุอื่นเลยนอกจากทองแดง (Ag-7.5Cu) จัดว่ามีความต้านทานการหมองที่ไม่ดี มีค่า DE* อยู่ในช่วง 30-40 เป็นข้อมูลอ้างอิงจากสิทธิบัตร US Patent 7,198,683 B2 [51] ซึ่งได้แบ่งค่า DE* เพื่อใช้อธิบายระดับความต้านทานการหมอง (Tarnish Rate) ไว้ 5 ระดับ ตั้งแต่ระดับ 0 ถึง 5 ระดับ 0 หมายถึง เงินสเตอร์ลิงมีความต้านทานการหมองดีที่สุด ระดับ 5 หมายถึง เงินสเตอร์ลิงที่มีความต้านทานการหมองต่ำสุด โดยทั่วไปมีการกำหนดระดับการหมองที่ยอมรับได้ ต้องมีค่าไม่เกินระดับ 3.5 นั่นคือค่า DE* ต้องมีค่าไม่เกิน 25

ชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสม H หลังทดสอบที่เวลา 60 นาที มีค่า DE* สูงสุด มีค่าประมาณ 27.37 แสดงว่ามีความต้านทานการหมองน้อยที่สุด เนื่องจากชิ้นงานนี้มีรูพรุนขนาดเล็ก ทำให้เป็นจุดเริ่มต้นของการหมอง บรรยากาศภายนอกที่เป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ จึงสามารถทำปฏิกิริยากับเนื้องานได้รวดเร็ว ในการทดลองได้ขัดเงาชิ้นงานเพิ่มขึ้น แครูพรุนก็ไม่หมดไป

สำหรับชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมอื่นๆ ที่เหลือ ได้แก่ ส่วนผสม B, C, D, E และ G มีค่าความต้านทานการหมองดีกว่าเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A ทุกส่วนผสม โดยเฉพาะส่วนผสม E แสดงค่าความต้านทานการหมองได้ดีที่สุด มีค่า DE* เท่ากับ 12.73 รองลงไปเป็นส่วนผสม G และ B ให้ค่า DE* เท่ากับ 14.50 และ 14.89 ตามลำดับ

สำหรับเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม E ที่ประกอบด้วย Ag-5.65Cu-0.40Sn-0.20In-0.75(Cu-29.70Zn-0.42Ti) ซึ่งมีค่า DE* ต่ำสุด หมายความว่า มีความต้านทานการหมองดีที่สุด พบว่า มีการเติมธาตุสังกะสีกับไทเทเนียม แม้จะเป็นปริมาณเพียงเล็กน้อย ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า เงินสเตอร์ลิงที่มีความต้านทานการหมองที่ดี ควรเติมสังกะสีไม่เกินร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ดินุกไม่เกินร้อยละ 0.85 โดยน้ำหนัก [51] และการเติมไทเทเนียมปริมาณไม่เกินร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก จะทำให้เกิดชั้นฟิล์มบางที่ผิวของเงินสเตอร์ลิง [29] ซึ่งเป็นการป้องกันการสัมผัสกับบรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ ดังนั้น เงินสเตอร์ลิงส่วนผสม E ที่มีการเติมสังกะสี และไทเทเนียมในปริมาณน้อยจึงสามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงสีได้

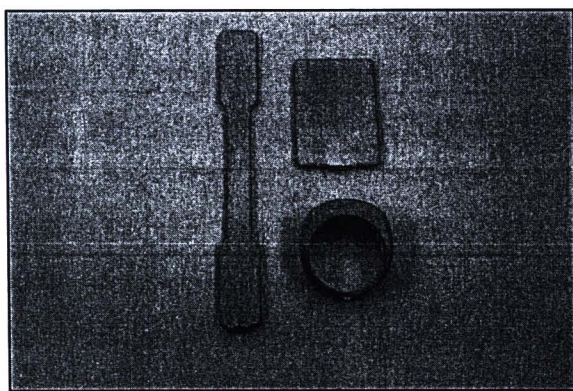


4.2 ผลการทดลองที่โรงงาน

4.2.1 ลักษณะชิ้นงานของเงินสเตอร์ลิง

ในการทดลองหลอมชิ้นงานที่โรงงานได้เลือกทำชิ้นงานเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ ชิ้นงานแหวนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง กว้างxยาว เท่ากับ 8x80 มิลลิเมตร และชิ้นงานสำหรับทดสอบการหุ้มขนาดกว้างxยาว เท่ากับ 20x30 มิลลิเมตร ส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่เลือกมาทดสอบ ได้แก่ ส่วนผสม B และ E ซึ่งได้จากการพิจารณาจากค่าความแข็งแรงสูงสุด มีค่า 91 และ 90 วิกเกอร์ ตามลำดับ และค่าความต้านทานการหุ้มหลังทดสอบโดยตั้งในบรรยากาศของสารละลายอิมมัลซิเคชันซัลไฟด์ เป็นเวลา 60 นาที ให้ค่า DE* เท่ากับ 14.89 และ 12.73 ตามลำดับ

สถานะในการหลอมเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A โดยใช้อุณหภูมิ 1,080 องศาเซลเซียส อุ่นแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส พบว่า น้ำโลหะใส ไม่หนืด เมื่อเทน้ำโลหะลงในแม่พิมพ์ที่อุ่นไว้ที่ 580 องศาเซลเซียส หล่อเป็นชิ้นงาน ไม่พบการกะเทาะจากการหลอม ลักษณะชิ้นงานที่ได้แสดงในรูปที่ 4.20 พบว่า ชิ้นงานที่ได้มีผิวเรียบ สีขาว ไม่มีความแวววาว เนื่องจากการหลอมโลหะด้วยระบบสุญญากาศสามารถป้องกันไม่ให้ก๊าซที่ไวต่อการทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะได้ เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการหล่อในบรรยากาศปกติ พบว่า ผิวชิ้นงานมีคราบสีเหลืองปนดำ ผิวหยาบ ขรุขระ

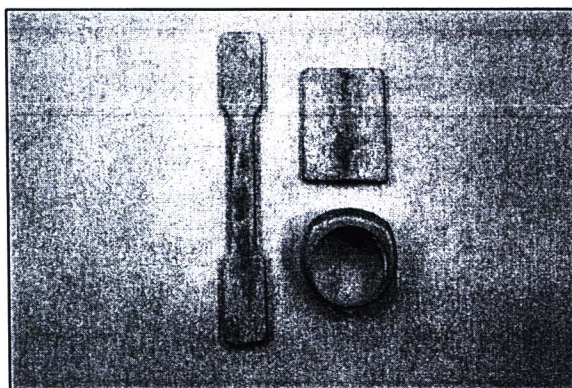


รูปที่ 4.20 ชิ้นงานของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A ประกอบด้วย Ag-6.4Cu-0.4Sn-0.2In

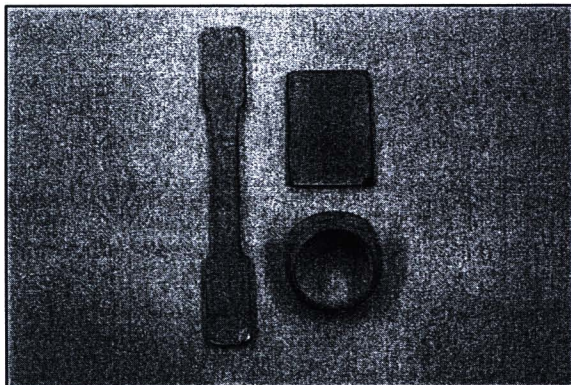
อุณหภูมิการหลอมเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B และ E ได้ทำการหลอมโดยใช้ 2 อุณหภูมิ ได้แก่ 1,130 และ 1,080 องศาเซลเซียส อุณหภูมิอุ่นแม่พิมพ์ใช้ 580 องศาเซลเซียส ในการหลอมครั้งแรกเลือกใช้อุณหภูมิ 1,130 องศาเซลเซียส เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงมีผลให้น้ำโลหะไหลตัวได้ดี ทำให้น้ำโลหะไหลเต็มแบบที่มีลักษณะแตกต่างกันในแม่พิมพ์ได้ พบว่าเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B บริเวณผิวหน้าของ

น้ำโลหะมีออกไซด์เกิดขึ้น หลังจากการหล่อพบตะกรันประมาณร้อยละ 7.17 โดยน้ำหนัก ส่วนเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม E น้ำโลหะมีลักษณะใส หลังจากหล่อเป็นชิ้นงาน เหลือตะกรันเล็กน้อยประมาณร้อยละ 3.26 โดยน้ำหนัก จากนั้นได้นำชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงทั้งสองส่วนผสมไปขัดแต่งผิว พบตามดเกิดขึ้นบริเวณผิวเช่นเดียวกัน เมื่อทำการขัดผิวเพิ่มขึ้นยังคงพบตามดอยู่ภายในเนื้อชิ้นงานเช่นเดิม สันนิษฐานว่าเกิดจากการหลอมโดยใช้อุณหภูมิสูงไป จึงทดลองหลอมใหม่ด้วยอุณหภูมิ 1,080 องศาเซลเซียส

ผลการหล่อเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B โดยใช้อุณหภูมิ 1,080 องศาเซลเซียส พบว่า มีปริมาณตะกรันร้อยละ 4.91 ส่วนเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม E ไม่พบตะกรัน ลักษณะผิวของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B และ E หลังจากหล่อ แสดงในรูปที่ 4.21-4.22 ตามลำดับ พบว่า เงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B ผิวมีคราบน้ำเหลืองเกิดขึ้นเล็กน้อย ผิวเรียบ และบริเวณชิ้นงานที่ติดกับทางเข้าของน้ำโลหะ เกิดเป็นคราบของน้ำโลหะที่ไหลเข้าในแบบ แต่เมื่อทำการขัดแต่งผิว คราบดังกล่าวจะหายไป และไม่พบตามดในเนื้อของชิ้นงานทุกชิ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ได้จากการหลอมในบรรยากาศปกติ พบว่า ลักษณะผิวมีความใกล้เคียงกัน แต่ปริมาณของกาตะกรันของการหลอมแบบบรรยากาศปกติมีปริมาณมากกว่าการหลอมในระบบสุญญากาศ สำหรับเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม E มีผิวเรียบสีขาวเหมือนส่วนผสม A เมื่อนำไปขัดแต่งผิวไม่พบตามดในเนื้อชิ้นงาน โดยทั่วไปการหลอมและหล่อในระบบสุญญากาศย่อมให้สมบัติของชิ้นงานดีกว่าการหลอมในบรรยากาศปกติอยู่แล้ว ดังนั้นผิวชิ้นงานจึงไม่มีคราบน้ำเหลืองสีดำนปน แสดงว่า การหลอมและหล่อเงินสเตอร์ลิงที่ใช้อุณหภูมิ 1,080 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมมากขึ้น



รูปที่ 4.21 ชิ้นงานของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B

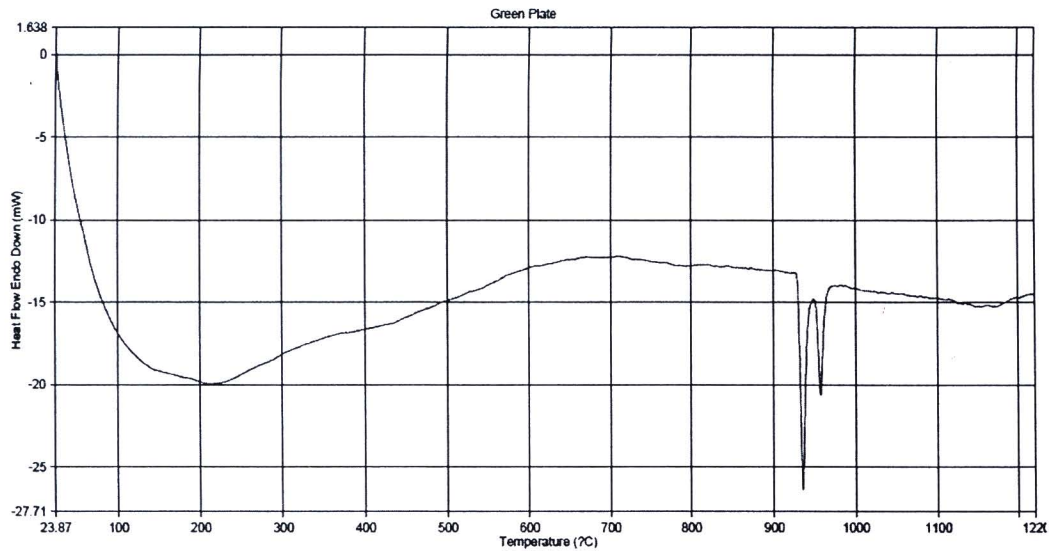


รูปที่ 4.22 ชิ้นงานของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม E

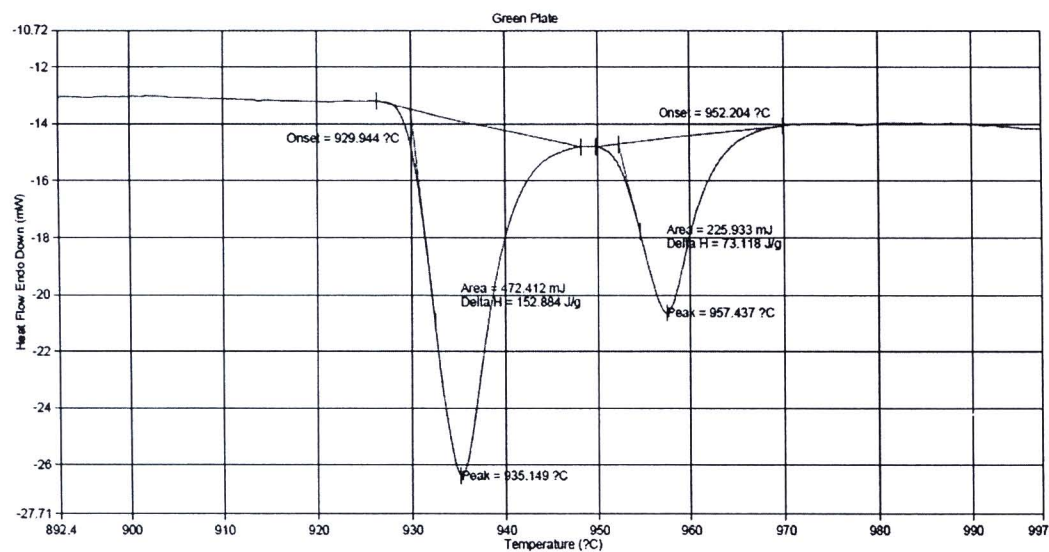
4.2.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความร้อนด้วยเทคนิค DTA

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความร้อนของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A ในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 1,200 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 4.23 (ก)-(ข) ตามลำดับ พบว่า มีพีคที่เกิดการดูดความร้อน (Endothermic) แสดงว่ามีการสลายตัวของเฟสที่อุณหภูมิ 953 และ 957 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการหลอมเหลว และหลอมเหลวสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 957 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์จุดหลอมเหลว แสดงให้เห็นว่า การหลอมด้วยอุณหภูมิ 1,080 องศาเซลเซียส ที่ใช้หล่อมีความเหมาะสม เนื่องจากมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 100-120 องศาเซลเซียส และชิ้นงานเต็มแบบ มีผิวเรียบ ชัด แต่งผิวไม่พบตามด หรือรูพรุนในเนื้อของชิ้นงานทุกแบบ

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความร้อนของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B ช่วงอุณหภูมิ 500-1,200 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.24 พบว่า มีพีคที่เกิดการดูดความร้อน แสดงว่ามีการสลายตัวของเฟสที่อุณหภูมิ 778 และ 885 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิในการหลอมเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B ครั้งแรกกับผลการวิเคราะห์จุดหลอมเหลว แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิที่เลือกใช้ก่อนการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความร้อนค่อนข้างสูง เนื่องจากเกิดตามคฝงในเนื้อชิ้นงาน หลังจากวิเคราะห์ได้มีการเลือกอุณหภูมิที่ต่ำลงเพื่อกำหนดเป็นสภาวะในการหลอมครั้งต่อไป ซึ่งผลของการเปลี่ยนสภาวะการหลอมเป็น 1,080 องศาเซลเซียส ทำให้ผิวชิ้นงานหลังขัดแต่งไม่พบตามดภายใน แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิที่ใช้หลอมครั้งที่ 2 มีความเหมาะสมขึ้น

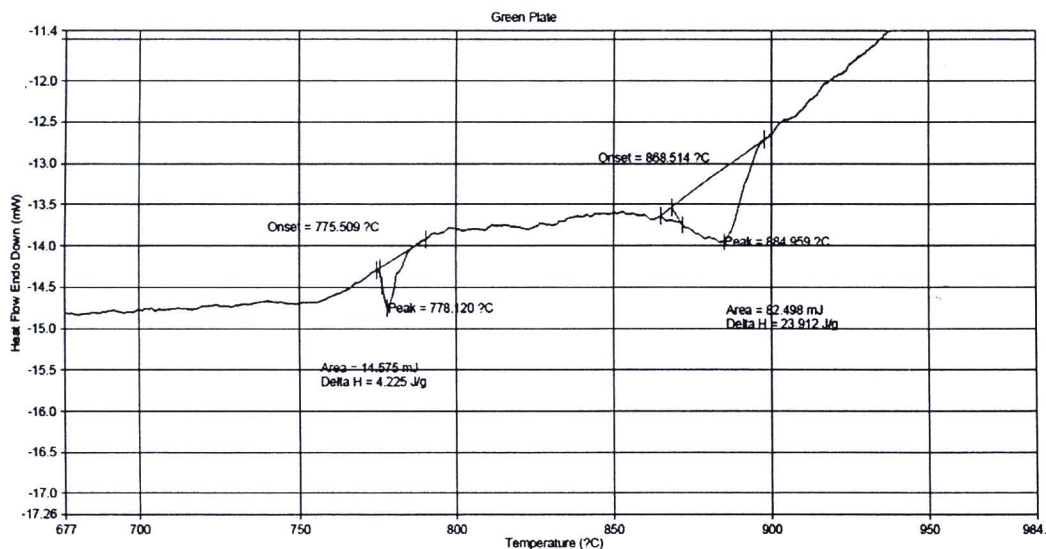


(ก)



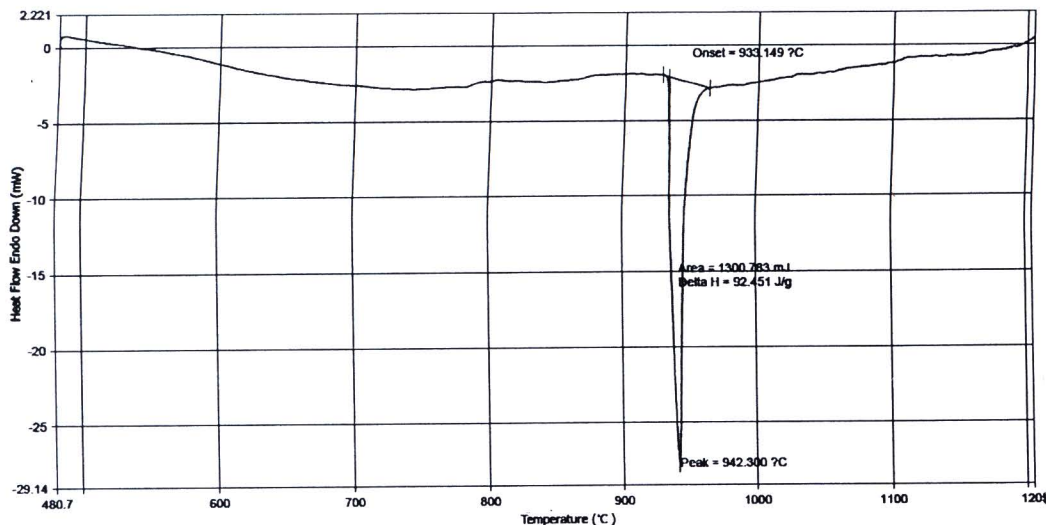
(ข)

รูปที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความร้อนของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A วิเคราะห์ด้วยเทคนิค DTA (ก) อุณหภูมิห้องถึง 1,200 องศาเซลเซียส (ข) ภาพขยายช่วงอุณหภูมิ 890-990 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความร้อนของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B วิเคราะห์ด้วยเทคนิค DTA

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความร้อนของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม E ในช่วงอุณหภูมิ 500-1,200 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 4.25 พบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 933 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการหลอมเหลว และหลอมเหลวสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 942 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์จุดหลอมเหลวแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิที่เลือกใช้ก่อนการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความร้อนค่อนข้างสูงมาก จึงเป็นเหตุให้เกิดตามคฝงในเนื้อชิ้นงานหลังนำไปขัดแต่งผิว ภายหลังการวิเคราะห์ได้มีการเลือกอุณหภูมิที่ต่ำลง โดยเลือกใช้สภาวะการหลอมเดียวกับส่วนผสม B เป็น 1,080 องศาเซลเซียส ทำให้ชิ้นงานหลังการหล่อเมื่อนำไปขัดแต่งผิวไม่พบตามคฝงภายใน แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิที่ใช้หลอมนี้มีความเหมาะสมมากขึ้น



รูปที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความร้อนของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม E วิเคราะห์ด้วยเทคนิค DTA

สำหรับผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความร้อนของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B และ E สามารถนำไปใช้ในโรงงานได้จริง โดยช่างผู้ชำนาญการในโรงงานสามารถเลือกอุณหภูมิที่จะใช้หลอม และหล่อเป็นเครื่องประดับจากรูปแบบของชิ้นงานได้อย่างเหมาะสม เช่น ความซับซ้อนและความยาวของชิ้นงาน เป็นต้น เพื่อให้ชิ้นงานมีคุณภาพที่ดีขึ้น สามารถลดข้อเสียในการผลิตได้

4.2.3 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค ICP-OES

ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค ICP-OES ของโลหะเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A, B และ E แสดงในตารางที่ 4.10 พบว่า ปริมาณธาตุดีบุกที่ตรวจสอบได้ในเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A, B และ E ลดลงจากปริมาณดีบุกที่ใช้ในการหลอมมากกว่าธาตุอื่น จากการสังเกตจะเห็นว่าธาตุที่มีปริมาณลดลงคือธาตุที่เป็นตัวหล่อออกซิเจน ได้แก่ ดีบุก อะลูมิเนียม แมกนีเซียม และสังกะสี โดยธาตุเหล่านี้สามารถรวมตัวกับออกซิเจนได้ดีกว่าเงิน ได้เป็นสารประกอบของออกไซด์ลอยปกคลุมอยู่ที่ผิวหน้าของน้ำโลหะ เมื่อทำการหล่อเป็นชิ้นงาน จะเหลือตะกรันแยกตัวออกมาอยู่บริเวณผิวหน้าตรงรูเทของงานหล่อ

จากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีทั้ง 3 ส่วนผสม ถึงแม้ปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่ตรวจสอบได้จะไม่เท่ากับปริมาณธาตุที่เติมลงไป แต่แนวโน้มของปริมาณธาตุที่เติมเป็นไปในทิศทางเดียวกับปริมาณธาตุที่เติมลงไปก่อนหล่อ ซึ่งสัดส่วนนี้สามารถนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเงินสเตอร์ลิงด้วยเทคนิค ICP-OES

ปริมาณธาตุ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	เงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A		เงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B		เงินสเตอร์ลิงส่วนผสม E	
	ตั้งต้น	ICP-OES	ตั้งต้น	ICP-OES	ตั้งต้น	ICP-OES
Ag	Bal.	Bal.	Bal.	Bal.	Bal.	Bal.
Cu	6.40	5.24	5.65	5.64	6.17	4.83
Sn	0.40	0.22	0.40	0.13	0.40	0.09
In	0.20	0.22	0.20	0.18	0.20	0.13
Al	-	-	0.73	0.53	-	-
Mg	-	-	0.008	0.004	-	-
Si	-	-	0.005	0.007	-	-
Ti	-	-	0.002	0.010	0.003	0.010
Zn	-	-	-	-	0.223	0.170

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่ได้เติมและไม่ได้วิเคราะห์

4.2.4 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค XRF

การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค XRF ได้วิเคราะห์บนชิ้นงานจำนวน 3 ตำแหน่ง พื้นที่ในการวิเคราะห์มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.8 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.13 ในบทที่ 3 สำหรับผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีแสดงในตารางที่ 4.11 พบว่า เงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A มีปริมาณเงินเฉลี่ยร้อยละ 93.95 ทองแดงเฉลี่ยร้อยละ 5.38 ดีบุกเฉลี่ยร้อยละ 0.49 และอินเดียมเฉลี่ยร้อยละ 0.19 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าในแต่ละบริเวณที่ทำการวิเคราะห์มีปริมาณธาตุใกล้เคียงกัน ธาตุที่สูญหายไปอาจเกิดจากการเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ในขณะหลอมแล้วกลายเป็นตะกรัน

สำหรับเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B พบว่า ปริมาณของเงินและดีบุกเพิ่มขึ้นทุกบริเวณที่ทำการวิเคราะห์ ส่วนทองแดงและอินเดียมมีปริมาณลดลงในทุกบริเวณเช่นกัน ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ไม่พบปริมาณของธาตุอะลูมิเนียม แมกนีเซียม ซิลิกอนและไทเทเนียม เนื่องจากขีดจำกัดของเครื่องมือวิเคราะห์ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุดังกล่าวได้ ส่วนเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม E จากการวิเคราะห์ทั้ง 3 บริเวณ พบว่า แต่ละบริเวณมีปริมาณของเงิน ทองแดง ดีบุก อินเดียม และสังกะสีไม่แตกต่างกัน โดยทองแดงมีปริมาณลดลงทั้ง 3 บริเวณ ส่วนไทเทเนียมไม่พบในการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค XRF เป็นการวิเคราะห์ปริมาณธาตุแต่ละบริเวณ ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะให้ปริมาณของธาตุแต่ละชนิดที่ถูกต้องได้ จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์หลายๆ ตำแหน่งของชิ้นงาน ทำให้เทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์การกระจายตัวของปริมาณธาตุของชิ้นงานได้ สามารถนำผลการวิเคราะห์ไปเสริมกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDS ได้

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเงินสเตอร์ลิงด้วยเทคนิค XRF

ปริมาณ ธาตุ (ร้อยละ โดย น้ำหนัก)	เงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A					เงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B					เงินสเตอร์ลิงส่วนผสม E				
	ตั้งต้น	ตำแหน่งวิเคราะห์ XRF			ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ตั้งต้น	ตำแหน่งวิเคราะห์ XRF			ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ตั้งต้น	ตำแหน่งวิเคราะห์ XRF			ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		1	2	3			1	2	3			1	2	3	
Ag	93.00	93.99	94.15	93.71	93.95	93.00	93.20	93.73	93.68	93.54	93.00	94.37	94.35	94.31	94.34
Cu	6.40	5.44	5.23	5.48	5.38	5.65	5.97	5.53	5.65	5.72	6.17	4.76	4.73	4.79	4.76
Sn	0.40	0.40	0.44	0.63	0.49	0.40	0.63	0.56	0.48	0.56	0.40	0.54	0.59	0.52	0.55
In	0.20	0.17	0.18	0.19	0.18	0.20	0.20	0.18	0.19	0.19	0.20	0.19	0.20	0.22	0.20
Al	-	-	-	-	-	0.73	N/A	N/A	N/A	-	-	-	-	-	-
Mg	-	-	-	-	-	0.008	N/A	N/A	N/A	-	-	-	-	-	-
Si	-	-	-	-	-	0.005	N/A	N/A	N/A	-	-	-	-	-	-
Ti	-	-	-	-	-	0.002	N/A	N/A	N/A	-	0.003	N/A	N/A	N/A	-
Zn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.223	0.140	0.140	0.160	0.01

หมายเหตุ N/A หมายถึง ตรวจสอบไม่ได้
 - หมายถึง ไม่ได้ค้นและไม่ได้วิเคราะห์

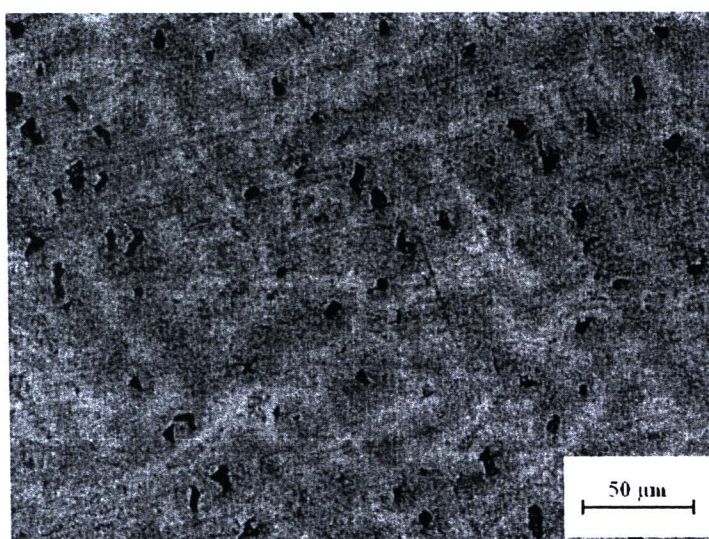
4.2.5 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A ที่มีส่วนผสมของ Ag-6.4Cu-0.4Sn-0.2In จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ใช้เลนส์กำลังขยาย 10 และ 20 เท่า แสดงในรูปที่ 4.26 (ก)-(ข) และจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยกำลังขยาย 500 และ 1,000 เท่า แสดงในรูปที่ 4.27 (ก)-(ข) ตามลำดับ พบว่า โครงสร้างเป็นลักษณะเดนไดรต์ บริเวณโครงสร้างพื้นเป็นเฟสแอลฟาที่มีเงินเป็นส่วนผสมหลัก ส่วนบริเวณพื้นที่สีดำเป็นเฟสบีตา ซึ่งมีปริมาณทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก

จากผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS แสดงตำแหน่งที่วิเคราะห์ในรูปที่ 4.27 (ข) ตำแหน่งที่ 1 และ 2 เป็นบริเวณโครงสร้างพื้น และตำแหน่งที่ 3 เป็นบริเวณเฟสบีตา ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.12 พบว่าบริเวณที่ 1 และบริเวณที่ 2 เป็นเฟสแอลฟา มีปริมาณเงินและทองแดงใกล้เคียงกัน ส่วนบริเวณที่ 3 เป็นเฟสบีตามีปริมาณของเงินร้อยละ 94.91 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณทองแดงร้อยละ 5.09 โดยน้ำหนัก สังเกตได้ว่าเฟสบีตามีขนาดเล็ก ผลการวิเคราะห์จึงมีโอกาสดูดเคลื่อน ความแข็งจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A มีค่าเฉลี่ย 64.7 วิกเกอร์

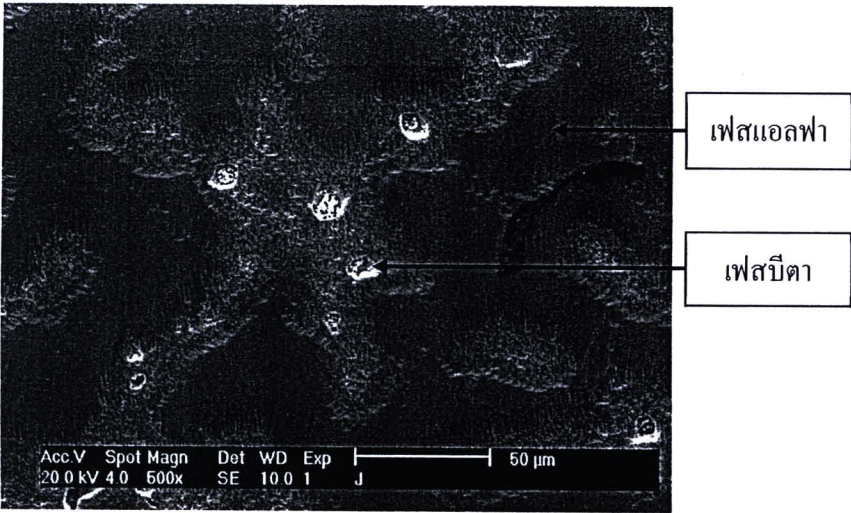


(ก)

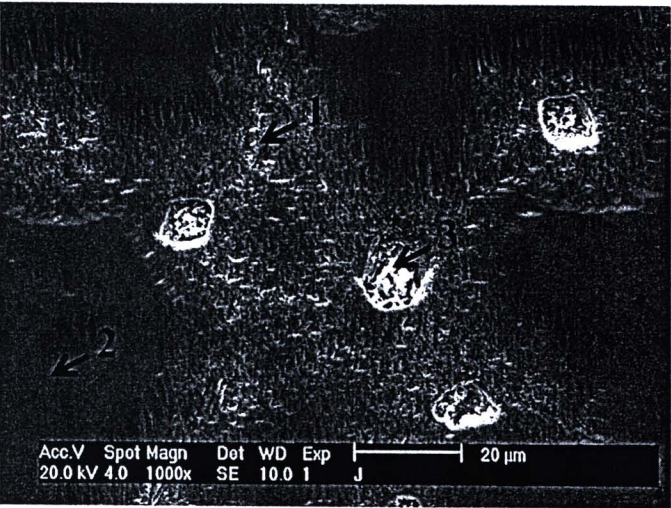


(ข)

รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A
(ก) กำลังขยาย 10 เท่า (ข) กำลังขยาย 20 เท่า



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.27 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิง ส่วนผสม A (ก) กำลังขยาย 500 เท่า (ข) กำลังขยาย 1,000 เท่า

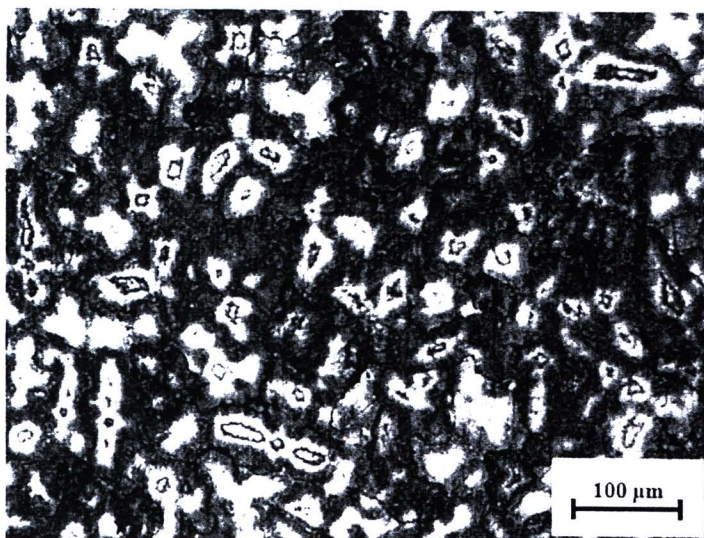
ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A ด้วยเทคนิค EDS

บริเวณที่วิเคราะห์	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	Ag	Cu	Sn	In
ตำแหน่งที่ 1	97.26	2.74	N/A	N/A
ตำแหน่งที่ 2	97.83	2.17	N/A	N/A
ตำแหน่งที่ 3	94.91	5.09	N/A	N/A

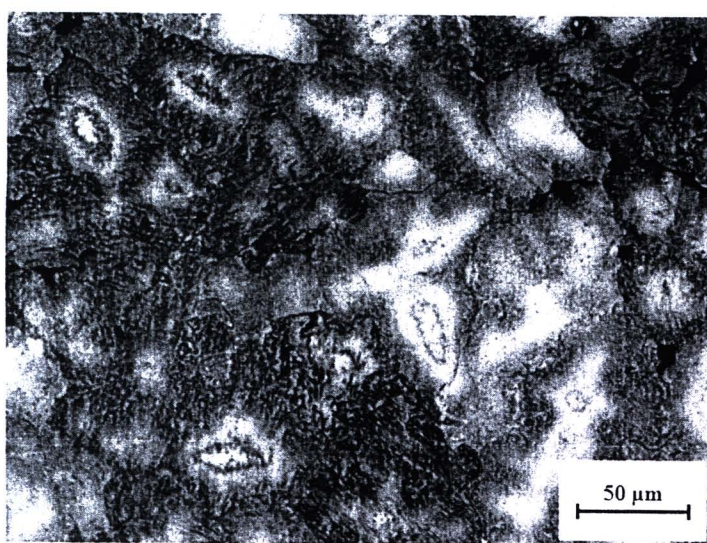
หมายเหตุ N/A หมายถึง ตรวจสอบไม่ได้

สำหรับโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B ที่มีส่วนผสมเป็น Ag-5.65Cu-0.4Sn-0.2In-0.75(Al-1.05Mg-0.64Si-0.25Ti) จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ใช้เลนส์วัตถุกำลังขยาย 10 และ 20 เท่า แสดงในรูปที่ 4.28 (ก)-(ข) และจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยกำลังขยาย 1,000 และ 1,500 เท่า แสดงในรูปที่ 4.29 (ก)-(ข) ตามลำดับ พบว่า โครงสร้างเป็นลักษณะเดนไดรต์ บริเวณโครงสร้างพื้นเป็นเฟสแอลฟาที่มีเงินเป็นส่วนผสมหลัก และบริเวณเฟสบีตาที่มีทองแดงเป็นส่วนผสมหลักอยู่ระหว่างช่องว่างของเดนไดรต์

จากผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS แสดงตำแหน่งที่วิเคราะห์ในรูปที่ 4.29 (ข) ตำแหน่งที่ 1 และ 2 เป็นโครงสร้างพื้น และบริเวณตำแหน่งที่ 3 เป็นบริเวณเฟสบีตา ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.13 พบว่า ตำแหน่งที่ 1 และ 2 เป็นเฟสแอลฟาเหมือนกัน เนื่องจากปริมาณเงินทองแดง อะลูมิเนียม และแมกนีเซียมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนบริเวณตำแหน่งที่ 3 มีปริมาณเงินร้อยละ 24.38 โดยน้ำหนัก มีปริมาณทองแดงสูงถึงร้อยละ 63.63 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณอะลูมิเนียมร้อยละ 11.99 โดยน้ำหนัก จากการสังเกตพบว่า บริเวณเฟสบีตาจะมีปริมาณของอะลูมิเนียมผสมอยู่สูงกว่าในโครงสร้างพื้นมาก จากข้อมูลของเฟสไดอะแกรมระหว่างอะลูมิเนียมกับทองแดง และอะลูมิเนียมกับเงิน พบว่า อะลูมิเนียมสามารถละลายในทองแดงได้มากกว่าในเงิน [16] ดังนั้นเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B จึงมีเฟสบีตามากขึ้น สำหรับผลการวิเคราะห์ธาตุคูปเปอร์ อินเดียม ซิลิคอน และไทเทเนียม ไม่สามารถตรวจสอบได้ในทุกบริเวณที่ทำการวิเคราะห์ ความแข็งของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B มีค่าเฉลี่ย 79.5 วิกเกอร์

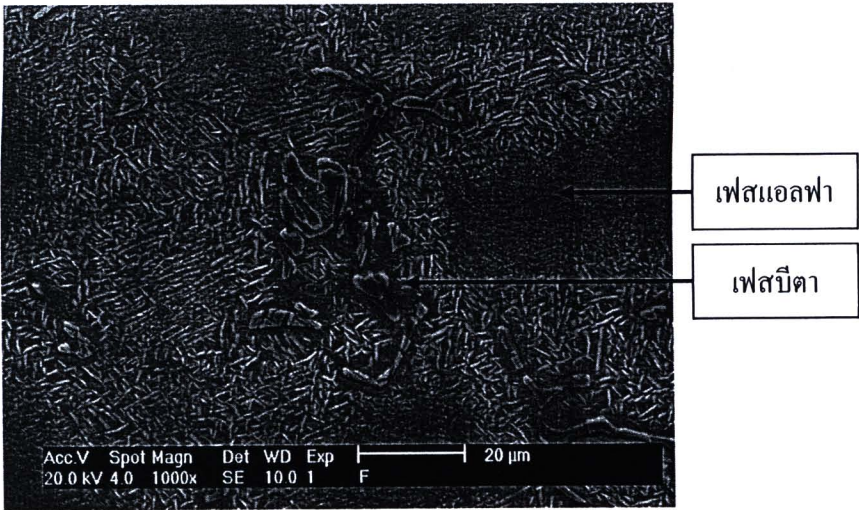


(ก)

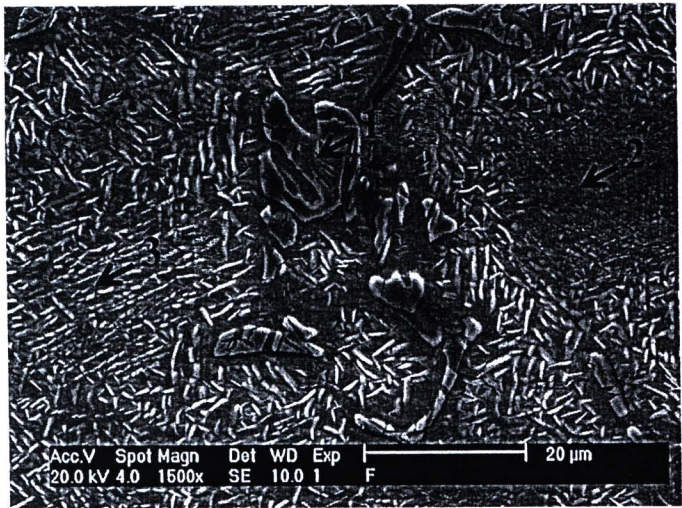


(ข)

รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B
(ก) กำลังขยาย 10 เท่า (ข) กำลังขยาย 20 เท่า



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 1,500 เท่า

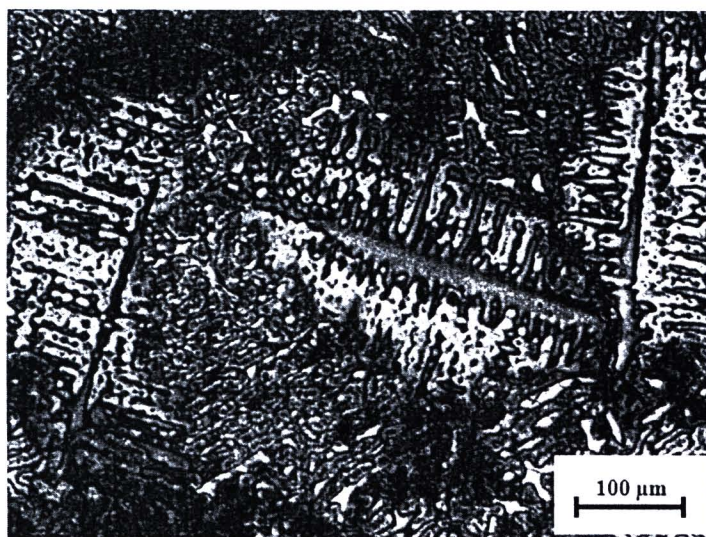
ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B ด้วยเทคนิค EDS

บริเวณที่วิเคราะห์	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)							
	Ag	Cu	Sn	In	Al	Mg	Si	Ti
ตำแหน่งที่ 1	24.38	63.63	N/A	N/A	11.99	N/A	N/A	N/A
ตำแหน่งที่ 2	94.94	3.29	N/A	N/A	0.76	1.01	N/A	N/A
ตำแหน่งที่ 3	93.09	3.84	N/A	N/A	1.29	1.78	N/A	N/A

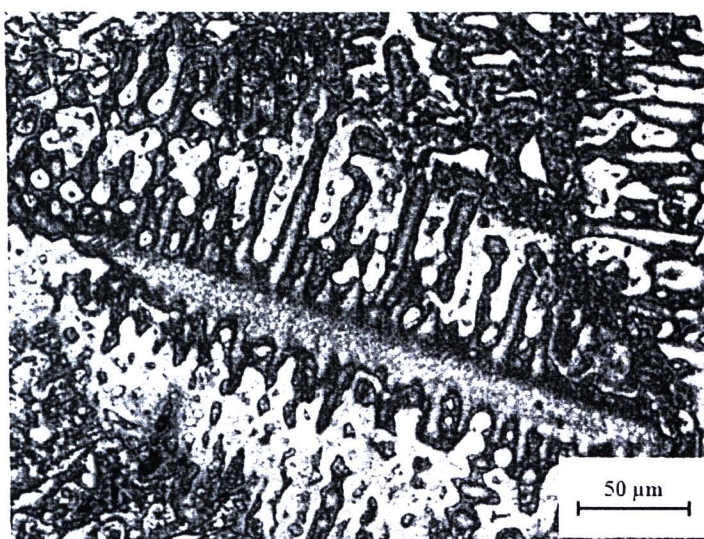
หมายเหตุ N/A หมายถึง ตรวจสอบไม่ได้

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม E ที่มีส่วนผสม $\text{Ag-5.65Cu-0.40Sn-0.20In-0.75(Cu-29.70Zn-0.42Ti)}$ จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ใช้เลนส์วัตถุกำลังขยาย 10 และ 20 เท่า แสดงในรูปที่ 4.30 (ก)-(ข) และจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยกำลังขยาย 1,000 และ 1,500 เท่า แสดงในรูปที่ 4.31 (ก)-(ข) ตามลำดับ พบว่า โครงสร้างเป็นลักษณะเดนไดรต์ บริเวณโครงสร้างพื้นเป็นเฟสแอลฟาที่มีเงินเป็นส่วนผสมหลัก และมีเฟสบีตาอยู่ระหว่างช่องว่างระหว่างเดนไดรต์

จากผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS แสดงตำแหน่งที่วิเคราะห์ในรูปที่ 4.31 (ข) ตำแหน่งที่ 1 และ 2 เป็นโครงสร้างพื้น และตำแหน่งที่ 3 บริเวณที่เป็นเฟสบีตา ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.14 หน่วยเป็นร้อยละ โดยน้ำหนัก พบว่า ตำแหน่งที่ 1 มีปริมาณของเงินร้อยละ 93.58 และมีทองแดงร้อยละ 6.42 บริเวณตำแหน่งที่ 2 มีปริมาณเงินร้อยละ 95.30 มีทองแดงร้อยละ 4.70 และตำแหน่งที่ 3 มีปริมาณเงินร้อยละ 87.81 และมีปริมาณทองแดงร้อยละ 12.19 เฟสบีตานี้มีปริมาณทองแดงที่ต่ำกว่าปริมาณของเงิน เนื่องจากเฟสบีตามีขนาดเล็ก ผลการวิเคราะห์จึงมีบริเวณของโครงสร้างพื้นรวมอยู่ด้วย สำหรับผลการวิเคราะห์ธาตุอื่นๆ อินเดียม สังกะสี และไทเทเนียม ไม่สามารถตรวจสอบได้ใน 3 บริเวณ ความแข็งจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม E มีค่าเฉลี่ย 75.7 วิกเกอร์

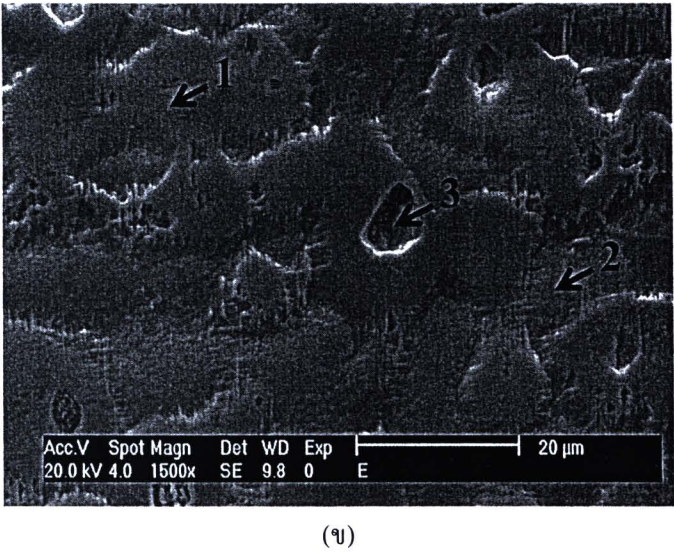
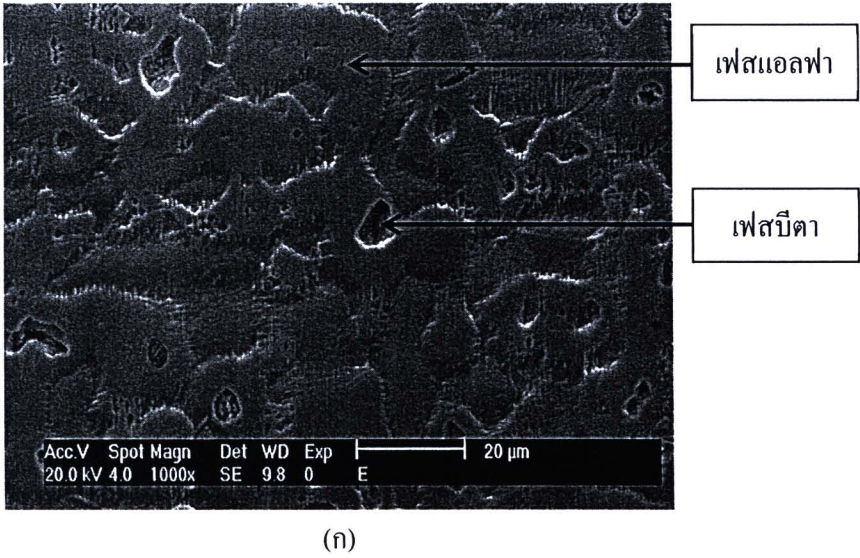


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม E
(ก) กำลังขยาย 10 เท่า (ข) กำลังขยาย 20 เท่า



รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิง
ส่วนผสม E (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 1,500 เท่า

ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม E ด้วยเทคนิค EDS

บริเวณที่วิเคราะห์	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					
	Ag	Cu	Sn	In	Zn	Ti
ตำแหน่งที่ 1	93.58	6.42	N/A	N/A	N/A	N/A
ตำแหน่งที่ 2	95.30	4.70	N/A	N/A	N/A	N/A
ตำแหน่งที่ 3	87.81	12.19	N/A	N/A	N/A	N/A

หมายเหตุ N/A หมายถึง ตรวจสอบไม่ได้

4.2.5 ผลการทดสอบสมบัติทางกล

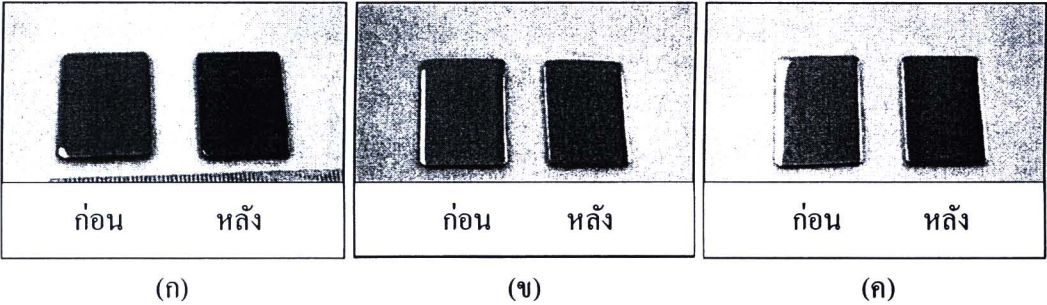
ผลการทดสอบสมบัติทางกล แสดงดังตารางที่ 4.15 พบว่า เงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A ซึ่งเป็นส่วนผสมที่ใช้เปรียบเทียบกับก่อนเติมอัลลอยอื่นเข้าไป มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ย 64.7 วิกเกอร์ ซึ่งมีความแข็งต่ำสุด เมื่อเทียบกับเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B และ E มีค่าความแข็งแรงสูงขึ้นเฉลี่ย 79.5 และ 75.7 วิกเกอร์ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของแต่ละส่วนผสมที่มีความแตกต่างกันของปริมาณเฟส บิตา สำหรับความต้านแรงดึงนั้นสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับค่าความแข็ง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A กับเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B และ E พบว่าค่าความต้านแรงดึงสูงสุดของส่วนผสมที่ไม่มีการเติมอัลลอยมีค่าน้อยที่สุด เป็น 181.6 เมกะพาสคัล เงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B มีค่าความต้านแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยเป็น 212.2 เมกะพาสคัล ร้อยละการยืดตัวของเงินสเตอร์ลิงที่มีค่าสูงสุดคือส่วนผสมที่เติมอัลลอย E มีค่าร้อยละการยืดตัวเฉลี่ยเป็น 28.3 เนื่องจากในส่วนผสมมีการเติมสังกะสีเข้าไป ซึ่งมีส่วนช่วยเพิ่มการยืดตัว [10]

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบความแข็ง ความต้านแรงดึงสูงสุด และร้อยละการยืดตัว

ส่วนผสม	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ความต้านแรงดึงสูงสุด (เมกะพาสคัล)	การยืดตัว (ร้อยละ)
A	64.7	181.6	15.9
B	79.5	212.2	19.9
E	75.7	188.3	28.3

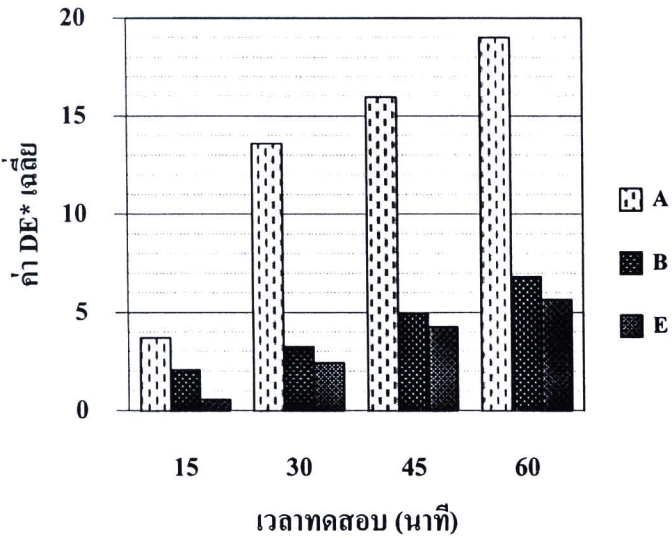
4.2.6 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของเงินสเตอร์ลิง

ลักษณะโดยทั่วไปของชิ้นงานจากการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A, B และ E ที่ทดสอบในบรรยากาศของสารละลายอิมิดาโซเดียมซัลไฟด์ เป็นเวลา 60 นาที แสดงในรูปที่ 4.32 (ก)-(ค) ตามลำดับ พบว่า ชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A หลังการทดสอบมีสีเหลืองเข้ม และมีจุดสีน้ำตาลเข้มกระจายอยู่ทั่วชิ้นงานเหมือนกับส่วนผสม B แต่ชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B หลังจากทดสอบมีสีเหลืองอ่อน และชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม E หลังการทดสอบ พบว่า ชิ้นงานเปลี่ยนเป็นสีเหลืองจางๆ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสม A และ B ที่มีสีเหลืองที่ผิวเข้มกว่า แสดงว่าอัลลอยที่เติมเข้าไปสามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงสีของเงินสเตอร์ลิงได้



รูปที่ 4.32 ลักษณะชิ้นงานทดสอบ (ก) เงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A (ข) เงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B และ(ค) เงินสเตอร์ลิงส่วนผสม E

ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A, B และ E แสดงในรูปที่ 4.33 ผลการทดสอบที่เวลา 15 นาที พบว่าค่า DE* มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเพิ่มเวลาในการทดสอบเป็น 30 และ 45 นาที ทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงค่า DE* ชัดเจนขึ้น และเมื่อเวลาในการทดสอบเป็น 60 นาที พบว่าเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A มีค่า DE* เท่ากับ 19.02 เงินสเตอร์ลิงส่วนผสม B มีค่า DE* เป็น 6.84 และเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม E มีค่า DE* เท่ากับ 5.66 แสดงให้เห็นว่า อัลลอยที่เติมลงไปสามารถเพิ่มความต้านทานการหมองของโลหะเงินสเตอร์ลิงได้



รูปที่ 4.33 ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A, B และ E โดยใช้เวลาทดสอบ 15, 30, 45 และ 60 นาที

จากการเปรียบเทียบค่า DE^* ที่เวลาทดสอบ 60 นาที ในบรรยากาศสารละลายอิมัลชันโซเดียมซัลไฟด์ของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A, B และ E ผลลัพธ์ที่ มจร. มีค่าเท่ากับ 25.27, 14.89 และ 12.73 ตามลำดับ ส่วนที่ผลิตจากโรงงาน มีค่า DE^* เป็น 19.02, 6.84 และ 5.66 ตามลำดับ พบว่าการทดลองที่โรงงานทำให้ค่า DE^* มีค่าลดลง เนื่องจากสภาวะการหลอมและหล่อที่โรงงานทำในระบบสุญญากาศ ทำให้ก๊าซจากภายนอกไม่สามารถสัมผัสน้ำโลหะ ทำให้ชิ้นงานไม่เกิดเป็นตามด หรือรูพรุน ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการหมอง

เมื่อพิจารณาส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่เดิมอัลลอย B และ E ซึ่งมีการผสมธาตุที่เป็นส่วนผสมช่วยเพิ่มความต้านทานการหมองที่ดี ได้แก่ ดีบุก อินเดียม ซิลิคอน ไทเทเนียม และสังกะสี ให้ผลการทดลองสอดคล้องกับข้อมูลของสิทธิบัตรหมายเลข 7,198,683 B2 [51] ว่าส่วนผสมทางเคมีที่เหมาะสมของเงินสเตอร์ลิงเพื่อเพิ่มความต้านทานการหมองประกอบด้วย ธาตุทองแดงร้อยละ 4.4-5.25 โดยน้ำหนัก สังกะสีไม่เกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ดีบุกไม่เกินร้อยละ 0.85 โดยน้ำหนัก ลิเทียมร้อยละ 0.05-0.3 โดยน้ำหนัก ซิลิคอนร้อยละ 0.05-0.5 โดยน้ำหนัก เจอร์เมเนียมไม่เกินร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก และ โบรอนไม่เกินร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก และสิทธิบัตรหมายเลข 4,775,511 [29] พบว่าในการเติมโครเมียม แทนทาลัม ไทเทเนียม และทอเรียม ไม่เกินร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ในเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสม Ag-Cu, Ag-Au และ Ag-Cu-Au ทำให้เกิดเป็นชั้นฟิล์มบางๆ ที่ผิว และไม่ทำให้เสียสมบัติด้านอื่น

4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

การหล่อในบรรยากาศปกติของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A, B และ E ทำให้น้ำโลหะสัมผัสกับอากาศโดยรอบ เป็นสาเหตุให้ธาตุที่เดิมบางชนิดเกิดปฏิกิริยากับก๊าซเกิดเป็นออกไซด์ปกคลุมที่ผิวของน้ำโลหะ ทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณธาตุที่จะช่วยปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของเงินสเตอร์ลิง ลักษณะผิวของอินกอตไม่สวย เกิดเป็นคราบสีเหลืองปนดำ และเกิดเป็นรูพรุนที่ผิวของอินกอตเนื่องจากก๊าซสามารถละลายในน้ำโลหะหลอมเหลวได้มาก เมื่อน้ำโลหะแข็งตัวก๊าซไม่สามารถออกมาจากน้ำโลหะได้ ทำให้เกิดเป็นรูอยู่ภายใน

สำหรับการหลอมและหล่อในระบบสุญญากาศของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A, B และ E เป็นการหลอมและหล่อในระบบปิด น้ำโลหะไม่สามารถสัมผัสกับอากาศได้ ทำให้ธาตุที่เดิมลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของเงินสเตอร์ลิงไม่เกิดปฏิกิริยากับก๊าซที่มีอยู่ในบรรยากาศปกติได้ ดังนั้นภายหลังจากการหล่อ พบว่าตะกรันมีปริมาณน้อยลง น้ำหนักของเงินสเตอร์ลิงลดลงเล็กน้อย ลักษณะผิวของชิ้นงานทั้ง 3 ส่วนผสม มีผิวเรียบสีขาว

โครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A, B และ E ที่ได้จากการหล่อในบรรยากาศปกติมีลักษณะเดนไดรต์ที่เล็กละเอียดกว่าโครงสร้างที่ได้จากการหล่อในระบบสุญญากาศ เนื่องจากการหล่อในบรรยากาศปกติ ทำการเทหล่อลงในแม่พิมพ์โลหะซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าการเทหล่อในแม่พิมพ์ปูนในระบบสุญญากาศ ตามหลักการโดยทั่วไปของการหล่อ ลักษณะโครงสร้างจุลภาคมีผลมาจากอัตราการเย็นตัว ถ้าการเย็นตัวเร็วจะทำให้ได้โครงสร้างที่มีขนาดเล็กกว่าการเย็นตัวช้า ดังนั้นขนาดของเดนไดรต์จึงแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว โครงสร้างที่มีขนาดเล็กจะให้ความแข็งแรงสูงกว่าโครงสร้างขนาดใหญ่ เนื่องจากลักษณะโครงสร้างที่เล็กละเอียดมีขอบเกรนมากกว่าทำให้สามารถขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันได้ดีกว่าโครงสร้างขนาดใหญ่

การหล่อชิ้นงานในบรรยากาศปกติ มีผลทำให้ความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิงส่วนผสม A, B และ E มีค่าน้อยกว่า (มีค่า DE^* สูงกว่า) การหล่อชิ้นงานในระบบสุญญากาศ เนื่องจากการหล่อในบรรยากาศปกติ ทำให้ก๊าซโดยรอบสามารถสัมผัสกับน้ำโลหะ ทำให้ชิ้นงานเกิดเป็นตามด หรือรูพรุน ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการหมอง และธาตุที่เดิมเพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความต้านทานการหมองสามารถเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ ทำให้เกิดการสูญเสียของธาตุดังกล่าวไป ดังนั้นในการผลิตชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงควรเลือกใช้กระบวนการหล่อในระบบสุญญากาศ