



บทที่ 4

รายงานผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ผลส่วนผสมทางเคมีของเงินสเตอร์ลิง 925 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก

ผลจากการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเงิน ทองแดงและดีบุกจากการตรวจสอบด้วยวิธี Inductively Coupled Plasma Atomic Spectroscopy และวิธี Atomic Absorption Spectroscopy ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมทางเคมีของเงินสเตอร์ลิง 925 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก ก่อนและหลังการหล่อ

โลหะผสม ชุดที่	ส่วนผสมตั้งต้น (wt%)			ส่วนผสมที่ตรวจพบในชิ้นงานหล่อ (wt%)		
	Cu	Sn	Ag	Cu*	Sn**	Ag
1	7.50	–	92.5	7.35	–	Balance
2	6.50	–	93.5	6.36	–	Balance
3	6.17	0.33	93.5	5.95	0.31	Balance
4	6.11	0.39	93.5	5.85	0.38	Balance
5	6.04	0.46	93.5	5.78	0.43	Balance
6	5.98	0.52	93.5	5.74	0.50	Balance
7	5.91	0.59	93.5	5.68	0.54	Balance
8	5.85	0.65	93.5	5.61	0.63	Balance

หมายเหตุ: * ผลตรวจส่วนผสมทางเคมี Umicore Precious Metal (Thailand) Ltd.

** ผลตรวจส่วนผสมทางเคมีได้มาจากสถาบันวิจัยอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ

ตารางที่ 4.2 ส่วนผสมทางเคมีของปริมาณดีบุกในเงินสเตอร์ลิง 925 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุกก่อนหล่อ หลังการหล่อ และที่สูญเสียระหว่างทำการหล่อ

โลหะผสมชุดที่	ปริมาณดีบุกที่ใช้ในการหล่อ (wt%)	ปริมาณดีบุกที่มีอยู่จริง (wt%)	ปริมาณดีบุกที่สูญเสีย (wt%)	เปอร์เซ็นต์ที่ปริมาณดีบุกสูญเสียไป (wt%)
1	-	-	-	-
2	-	-	-	-
3	0.33	0.31	0.02	6.06
4	0.39	0.38	0.01	2.56
5	0.46	0.43	0.03	6.52
6	0.52	0.50	0.02	3.85
7	0.59	0.54	0.05	8.47
8	0.65	0.63	0.02	3.08

จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 แสดงผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีหลังการหล่อ ของโลหะผสมทั้ง 8 ชุด โดยมีปริมาณดีบุกตั้งต้น 0 – 0.65%โดยน้ำหนัก เมื่อตรวจสอบส่วนผสมหลังการหล่อ จะพบว่าปริมาณธาตุดีบุกที่ตรวจพบในโลหะผสมมีปริมาณลดลงจากปริมาณดีบุกตั้งต้น เหลือดีบุกเพียง 0 - 0.63%โดยน้ำหนัก ปริมาณดีบุกที่สูญเสียไปมีตั้งแต่ 0 – 0.05%โดยน้ำหนัก โลหะผสมชุดที่ 7 จะมีการสูญเสียปริมาณธาตุดีบุกสูงที่สุดคือ 0.05%โดยน้ำหนัก ส่วนโลหะผสมชุดที่ 4 จะมีการสูญเสียปริมาณธาตุดีบุกต่ำที่สุดคือ 0.01%โดยน้ำหนัก

ถึงแม้ว่าปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่ตรวจสอบได้จากโลหะผสมทั้ง 8 ชุด จะไม่เท่ากับปริมาณธาตุดีบุกตั้งต้นที่เดิมลงไป แต่แนวโน้มของปริมาณธาตุทองแดงที่ลดลงและปริมาณธาตุดีบุกที่เพิ่มขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณธาตุตั้งต้นที่เดิมลงไปก่อนจึง มีสัดส่วนที่สามารถนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบได้

ปัจจัยที่มีผลต่อการสูญเสียธาตุดีบุกและทองแดงในโลหะผสม คือ ธาตุดีบุกและทองแดงสามารถรวมตัวกับออกซิเจนได้ดี จึงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น เกิดเป็นสารประกอบดีบุกออกไซด์และคอปเปอร์ออกไซด์ลอยปกคลุมที่ผิวหน้าโลหะขณะถลุงโลหะหลอมเหลวในขั้นตอนการหลอม และ

หลังจากโลหะเย็นตัว จะเหลือเศษโลหะหรือสแลก (slag) แยกตัวออกมาอยู่บริเวณผิวหน้าตรง
รูเทของงานหล่อ

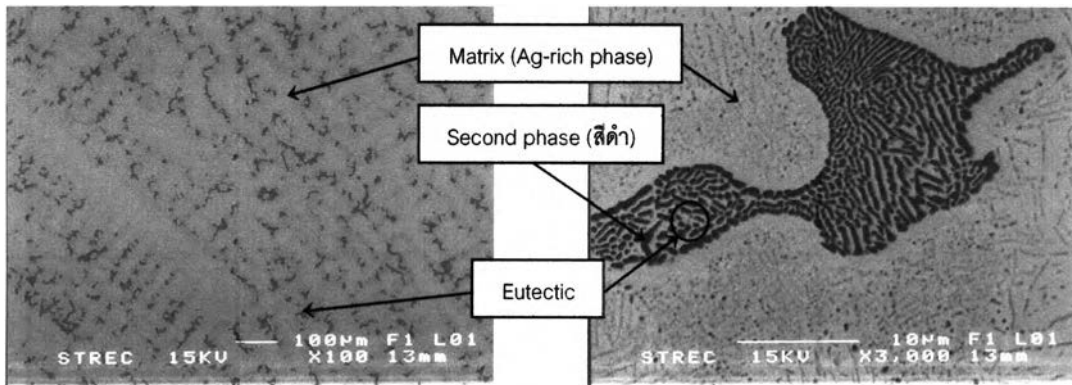
4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วย EDX ของ
โลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และเงินสเตอร์ลิง 935 - ทองแดง – ดีบุกในสภาพหล่อ แสดงไว้ในตารางที่ 4.3
ส่วนภาพโครงสร้างจุลภาคก่อน etch ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) แสดงดังรูปที่
4.1 และภาพโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินหลังจาก etch แสดงในภาคผนวก ก และรูปที่ 4.2 ที่
กำลังขยาย 100 เท่า

ตารางที่ 4.3 ปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของเงินสเตอร์ลิง 925 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก
ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM)

ชุด โลหะ ผสม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)			ส่วนผสมทางเคมีที่ตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด(SEM) (wt%)								
	Cu	Sn	Ag	All			Matrix			Second phase(สีดำ)		
				Cu	Sn	Ag	Cu	Sn	Ag	Cu	Sn	Ag
1	7.35	-	Balance	7.82	-	92.18	4.42	-	95.58	25.71	-	74.30
2	6.36	-	Balance	6.72	-	93.28	4.67	-	95.33	37.86	-	62.14
3	5.95	0.31	Balance	6.76	ND	92.89	4.46	0.47	95.08	36.00	ND	63.78
4	5.85	0.38	Balance	6.71	0.47	92.83	6.79	0.83	92.38	43.60	ND	56.21
5	5.78	0.43	Balance	6.30	ND	93.36	8.61	0.52	90.87	58.09	0.31	41.60
6	5.74	0.50	Balance	6.31	0.48	93.22	6.00	0.57	93.43	31.41	0.61	67.98
7	5.68	0.54	Balance	6.44	0.40	93.21	7.32	0.73	91.95	61.39	0.48	38.13
8	5.61	0.63	Balance	5.85	0.58	93.57	4.36	0.67	94.97	68.31	0.61	31.09

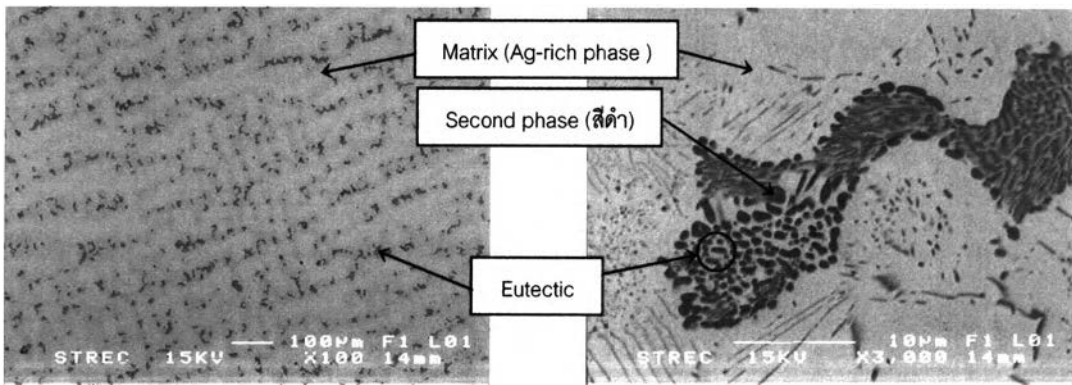
ND-ตรวจไม่พบ



4.1 (ก)

4.1 (ข)

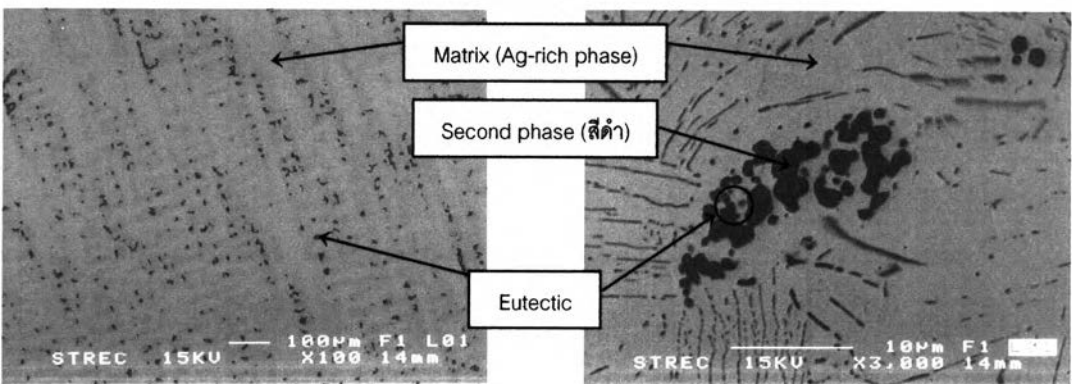
โลหะผสมชุดที่ 1 : Ag - 7.35%Cu



4.1 (ค)

4.1 (ง)

โลหะผสมชุดที่ 2 : Ag - 6.36%Cu

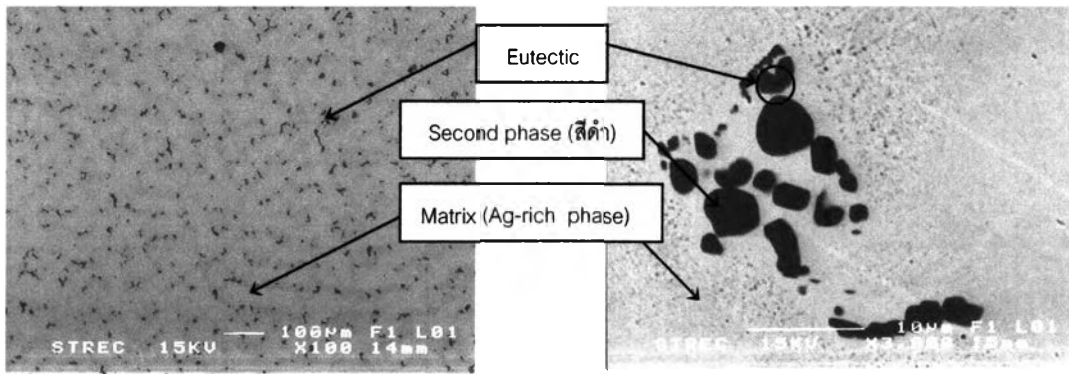


4.1 (จ)

4.1 (ฉ)

โลหะผสมชุดที่ 3 : Ag - 5.95%Cu - 0.32%Sn

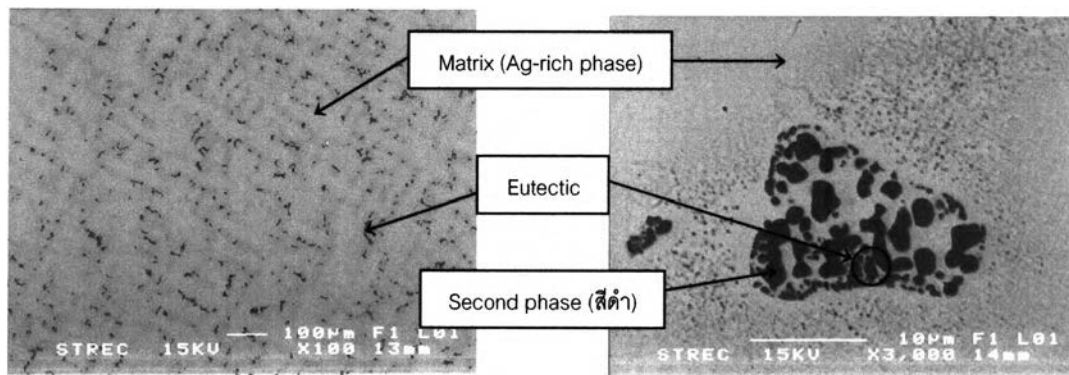
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 925 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM)



4.1 (ซ)

4.1 (ช)

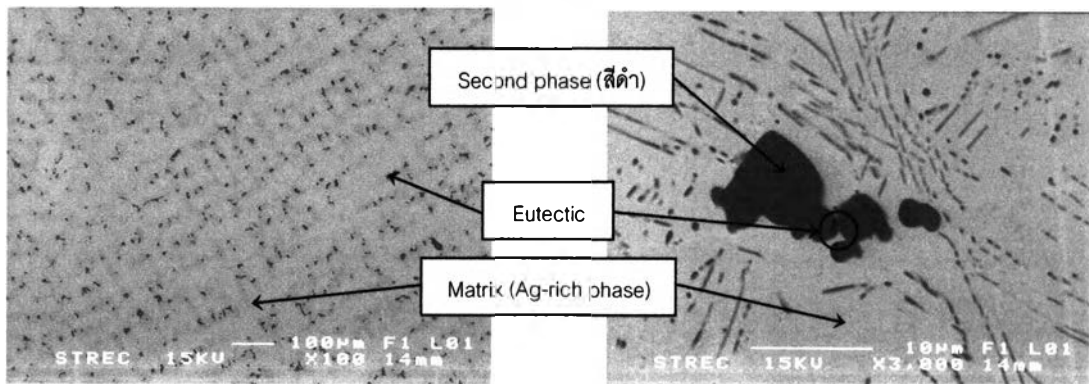
โลหะผสมชุดที่ 4 : Ag - 5.85%Cu - 0.38%Sn



4.1 (ฅ)

4.1 (ฉ)

โลหะผสมชุดที่ 5 : Ag - 5.78%Cu - 0.43%Sn

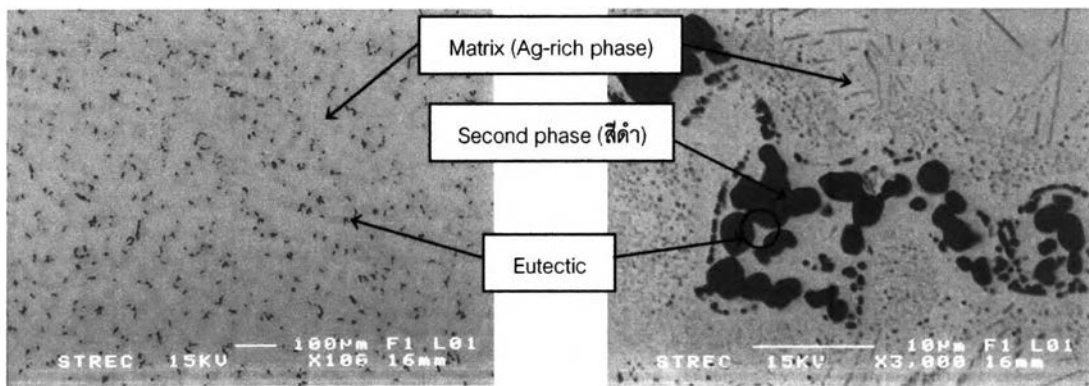


4.1 (ค)

4.1 (ก)

โลหะผสมชุดที่ 6 : Ag - 5.74%Cu - 0.50%Sn

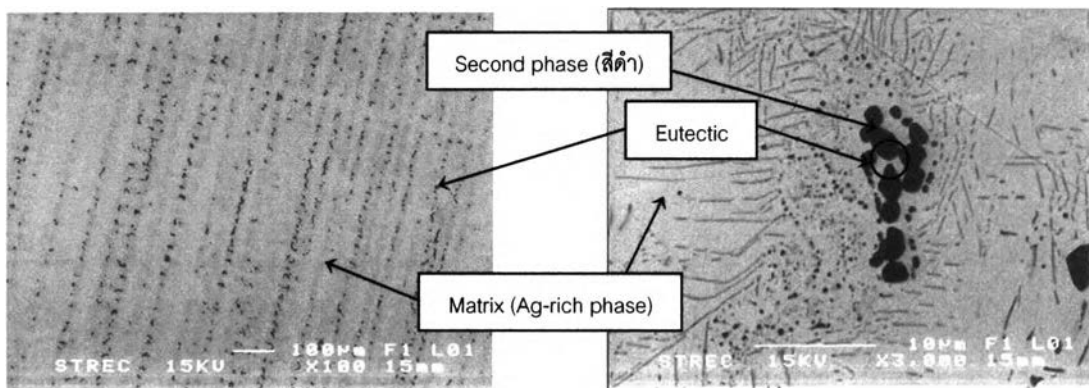
รูปที่ 4.1(ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 925 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM)



4.1 (ฐ)

4.1 (ฑ)

โลหะผสมชุดที่ 7 : Ag - 5.68%Cu - 0.54%Sn



4.1 (ฒ)

4.1 (ณ)

โลหะผสมชุดที่ 8 : Ag - 5.61%Cu - 0.63%Sn

รูปที่ 4.1(ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 925 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM)

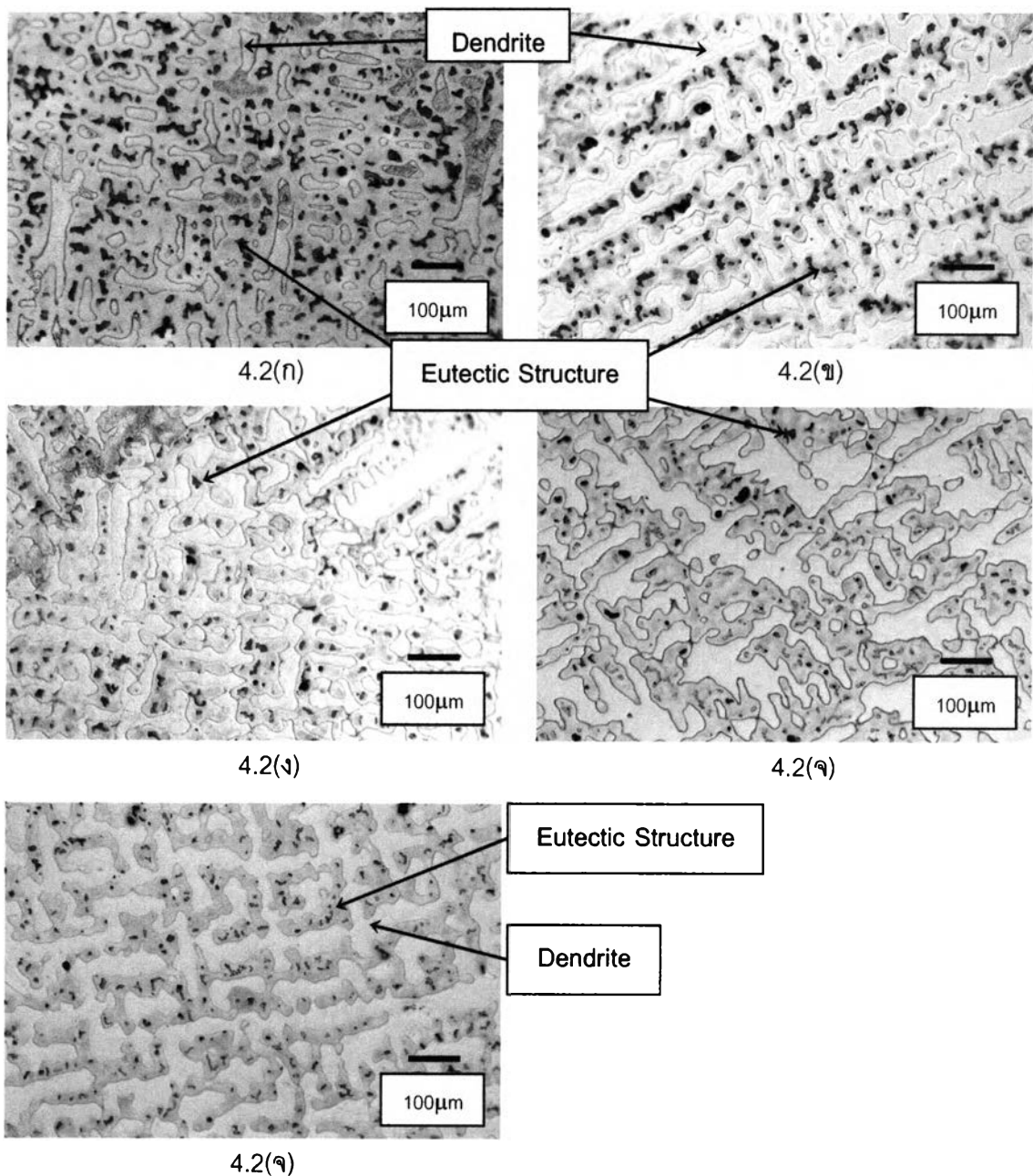
ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิง 925 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก ในสภาพหล่อนก่อนการ etch ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงทุกอัตราส่วนผสมภายหลังจากการหล่อที่กำลังขยาย 100 เท่า จะมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ (Dendrite) เมื่อพิจารณาภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยายสูงขึ้น จะปรากฏโครงสร้างหลัก 2 ชนิด คือ โครงสร้างพื้น (Matrix) ซึ่งจะมีเงินเป็นองค์ประกอบสูง เรียกว่า Ag-rich solid solution (α -phase) และโครงสร้างยูเทคติก (Eutectic structure) มีลักษณะเป็นแถบสีดำสลับกับแถบสีขาวกระจัดกระจายอยู่ โดยแถบสีขาวจะมี Ag-rich solid solution (α -phase) ส่วนแถบสีดำจะมี Cu-rich solid solution (β -phase) ปริมาณของธาตุผสมในโครงสร้างต่าง

phase) ส่วนแถบสีดำจะมี Cu-rich solid solution (β -phase) ปริมาณของธาตุผสมในโครงสร้างต่าง ๆ สามารถตรวจสอบได้จาก EDX(ตาราง4.3) ปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างที่ตรวจสอบได้และกราฟแสดงพีคของธาตุต่าง ๆ ในโครงสร้างแสดงไว้ในภาคผนวก ข

โลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมดีบุกมีส่วนผสมทางเคมี Ag-7.35%Cu รูปที่ 4.1(ก)และ(ข) และโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมดีบุกมีส่วนผสมทางเคมี Ag-6.36%Cu รูปที่ 4.1(ค)และ(ง) จะพบลักษณะโครงสร้างเป็นเดนไดรต์ บริเวณโครงสร้างเนื้อพื้น Ag-rich solid solution (α -phase) มีลักษณะเป็นเนื้อพื้นสีขาว พบว่ามีปริมาณธาตุเงินเป็นองค์ประกอบสูงมาก ที่กำลังขยาย 3000 เท่า จะพบโครงสร้างที่มีลักษณะแถบลายขาวดำ ซึ่งเป็นโครงสร้างยูเทคติกระหว่างเฟส α และเฟส β เนื่องจากโครงสร้างยูเทคติกมีขนาดเล็ก ดังนั้นจากการตรวจสอบด้วย EDX จึงครอบคลุมพื้นที่ยูเทคติก ทำให้ไม่สามารถวัดค่าปริมาณทองแดงในเฟส β ได้ ค่าที่วัดได้ในตาราง 4.3 จึงแสดงถึงส่วนผสมโดยรวมของเฟสทั้งสองนี้ ซึ่งค่าที่ได้พบว่ามีความใกล้เคียงจุดยูเทคติกของแผนภูมิสมดุลของเงิน-ทองแดง (28.1%ทองแดง) ยกเว้นกรณีของเงินผสมดีบุก 0.54% และ 0.63% ที่มีขนาดของ Second phase ที่ใหญ่จึงจะได้ปริมาณทองแดงสูงถึง 61.39% และ 68.31%

สำหรับเงินสเตอร์ลิง 935 ที่เติมดีบุกในปริมาณต่าง ๆ กันดังนี้ 0.31, 0.38, 0.43, 0.50, 0.54 และ 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะเป็นเดนไดรต์เช่นกัน จะมีโครงสร้างเนื้อพื้นเป็น Ag – rich phase ซึ่งมีเงินเป็นองค์ประกอบสูงมาก เช่นเดียวกับโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935 ที่ไม่ได้เติมดีบุก และเมื่อเติมปริมาณดีบุกเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลในทางกลับกันคือปริมาณของเฟส(β)ทองแดงลดน้อยลง ดังจะเห็นได้จากภาพโครงสร้างจุลภาค(รูปที่ 4.1)ซึ่งมี Second phase(อนุภาคสีดำ)บนโครงสร้างยูเทคติกและโครงสร้างยูเทคติกที่อยู่ระหว่างกิ่งเดนไดรต์ลดลง และลักษณะของอนุภาคสีดำจะมีรูปร่างกลมและมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อปริมาณดีบุกเพิ่มขึ้นลักษณะการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคของโลหะเช่นนี้จะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลอย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างยูเทคติกเป็นโครงสร้างสลับกันของสองเฟสที่ทำให้คุณสมบัติทางกลเพิ่มขึ้น ผลจากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วย EDX ดังตาราง 4.3 พบว่าดีบุกสามารถอยู่ได้ทั้งในเนื้อพื้น Matrix และในเฟสต่าง ๆ ของโครงสร้างยูเทคติกโดยเฉพาะในเนื้อพื้นจะพบปริมาณดีบุกสูงอันเนื่องมาจากความสามารถในการละลายของดีบุกที่ดีในเนื้อเงิน

สำหรับภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิง 925 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก หลัง etch แสดงไว้ดังรูป 4.2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงเฟส ที่มีลักษณะโครงสร้างเดนไดรต์ได้ชัดเจน



รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 925 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกำลังขยาย 100 เท่า หลังการ etch ($50\%NH_4OH+25\%H_2O_2+25\%H_2O$)

4.2(น) Ag - 7.35%Cu

4.2(ข) Ag - 6.36%Cu

4.2(ค) Ag - 5.95%Cu-0.31%Sn

4.2(ง) Ag - 5.78%Cu-0.43%Sn

4.2(จ) Ag - 5.68%Cu-0.54%Sn

4.3 ผลจากการทดสอบสมบัติทางกลในสภาพหล่อ (as - cast)

4.3.1 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

ทดสอบวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ตามมาตรฐาน ASTM92-82 โดยเครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ระบบดิจิทัล ใช้น้ำหนักกด 1 กิโลกรัม เป็นเวลา 10 วินาที วัดความยาวเส้นทแยงมุมทั้งสองด้าน (d_1 และ d_2) แล้วคำนวณค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (HV) ค่าความแข็งเฉลี่ยเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณส่วนผสมทางเคมีของเงินสเตอร์ลิง 925 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก แสดงใน ตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (HV) เฉลี่ยเปรียบเทียบกับปริมาณส่วนผสมทางเคมีของเงินสเตอร์ลิง 925 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก

โลหะผสมชุดที่	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)			ค่าความแข็งเฉลี่ย (HV)
	Cu	Sn	Ag	
1	7.35	–	Balance	63.5
2	6.36	–	Balance	56.0
3	5.95	0.31	Balance	58.8
4	5.85	0.38	Balance	62.7
5	5.78	0.43	Balance	62.9
6	5.74	0.50	Balance	61.7
7	5.68	0.54	Balance	61.2
8	5.61	0.63	Balance	60.5

โลหะเงินผสมทั้ง 8 ชุด มีค่าความแข็งแบบวิกเกอร์แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 จะพบว่าค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของเงินสเตอร์ลิงที่ไม่เติมดีบุก (Ag-7.35%Cu) มีค่าสูงสุด คือ 63.5 HV เนื่องจากมีปริมาณทองแดงสูง และค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง ที่ไม่เติมดีบุก (Ag-6.36%Cu) มีค่าต่ำสุด คือ 56.0 HV จากตารางที่ 4.4 พบว่าการเติมดีบุกส่งผลต่อค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยประมาณไม่เกิน 12% ความแข็งที่เพิ่มขึ้นน่าจะมาจากสาเหตุสามประการคือ

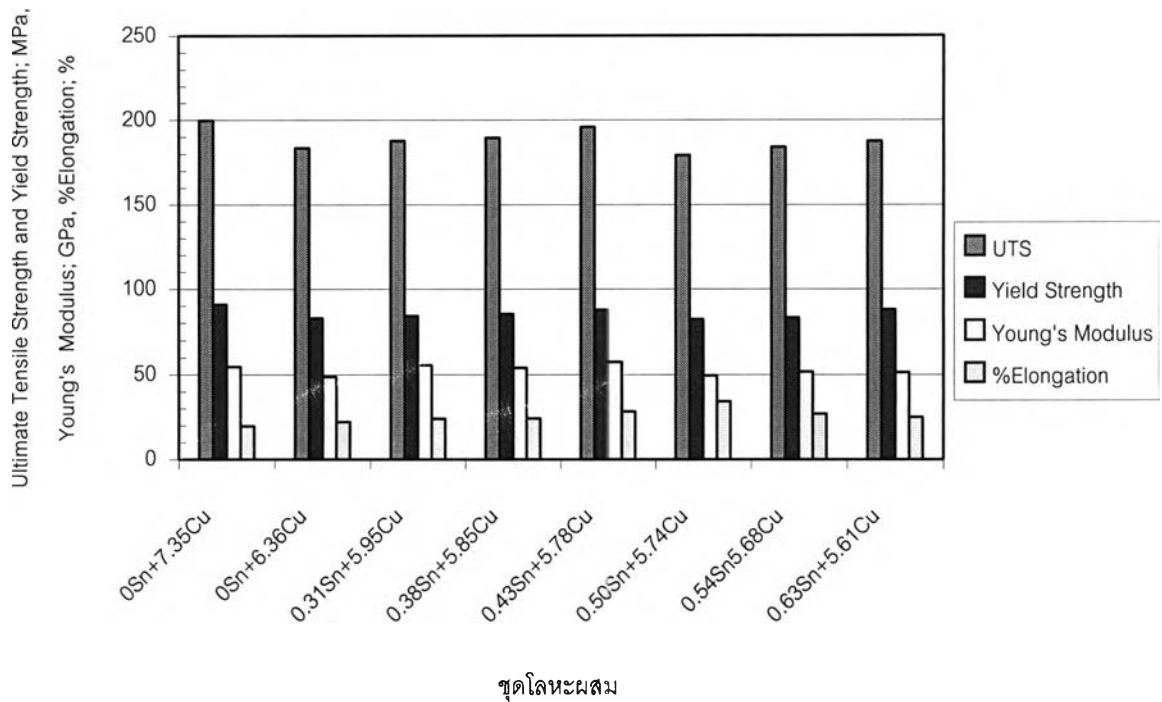
ประการแรก ดีบุกเข้าไปละลายอยู่ในเนื้อ Matrix ในลักษณะสารละลายของแข็ง(Solid Solution Strengthening) ประการที่สองดีบุกเข้าไปอยู่ในเฟสที่มีทองแดงสูง(Second phase) ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ประการที่สามโครงสร้างที่อยู่โดยรอบโครงสร้างยูเทคติกที่มีลักษณะเล็กละเอียดโดยเฉพาะเมื่อมีดีบุก 0.38%โดยน้ำหนัก และ 0.43%โดยน้ำหนัก (ดูรูปที่ 4.1(ซ)และ 4.1(ญ)) ทำให้มีความแข็งแรงสูงสุดในชุดโลหะเงินสเตอร์ลิง 935

4.3.2 ผลทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

ทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E 8M-96 ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงระบบอัตโนมัติ ขนาด 150 kN รุ่น series IX โดยบริษัท Instron Corporation ด้วยความเร็วแรงดึง 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength; UTS) ค่าความเค้นจุดคราก(Yield strength; σ_y) ค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus; E) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 และเมื่อนำมาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ต่าง ๆ จะได้กราฟดังรูป 4.3 และ 4.4

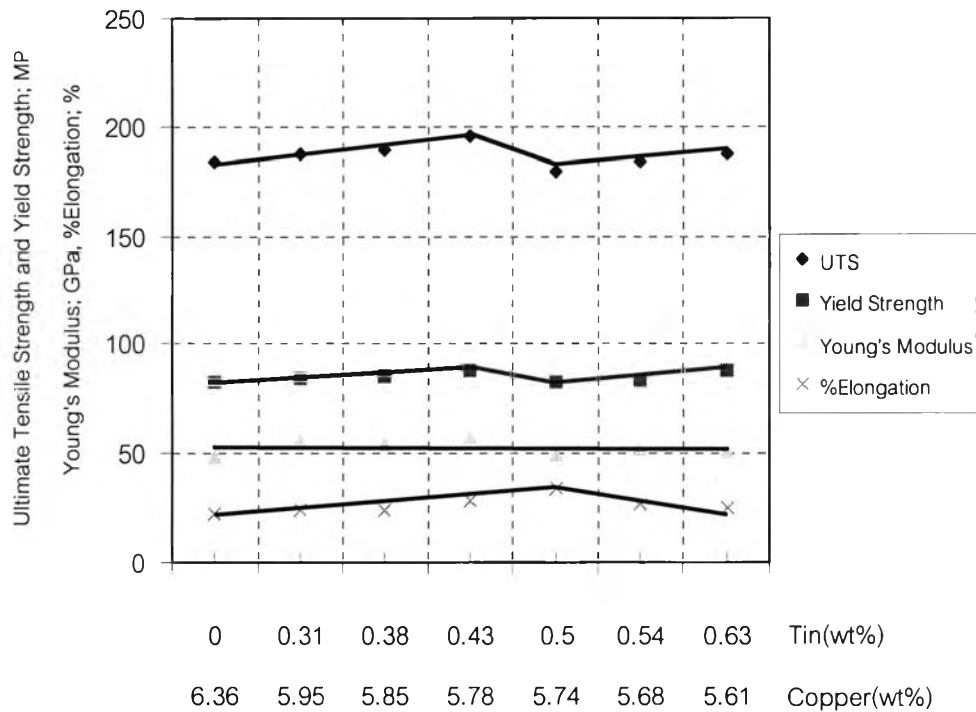
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแรงดึงของเงินสเตอร์ลิง 925 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก

โลหะผสม ชุดที่	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)			ความเค้นจุด คราก(MPa)	ความต้านทาน แรงดึงสูงสุด (MPa)	มอดุลัส ยืดหยุ่น (GPa)	เปอร์เซ็นต์ การยืดตัว (%)
	Cu	Sn	Ag				
1	7.35	-	Balance	90.9	199.6	54.5	19.7%
2	6.36	-	Balance	82.7	183.4	48.6	22.2%
3	5.95	0.31	Balance	84.1	187.6	55.5	24.1%
4	5.85	0.38	Balance	85.3	189.5	54.1	24.3%
5	5.78	0.43	Balance	87.8	195.7	57.4	28.4%
6	5.74	0.50	Balance	82.2	179.2	49.4	34.3%
7	5.68	0.54	Balance	83.2	184.0	51.7	27.1%
8	5.61	0.63	Balance	88.0	187.5	51.4	25.0%



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก ในสภาพหล่อกับชุดโลหะผสม

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ค่าความเค้นจุดคราก ค่ามอดุลัสยืดหยุ่น และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว เมื่อนำค่าทั้งหมดมาวาดกราฟแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นและค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวกับชุดโลหะเงินผสม จะได้กราฟดังรูป 4.3 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่โลหะจะทนได้ก่อนที่จะขาดออกจากกันและค่าความเค้นจุดครากของโลหะเงินสเตอร์ลิง Ag-7.35%Cu พบว่ามีค่าสูงที่สุด คือ 199.6 MPa และ 90.9 MPa ตามลำดับ ซึ่งมาจากอิทธิพลของธาตุทองแดง ตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 1(รูปที่1.1 กราฟผลของธาตุต่าง ๆ ในเงิน) แต่มีค่าความเหนียวต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเงินสเตอร์ลิง 935 ที่ส่วนผสมอื่น ๆ



รูปที่ 4.4 ผลของธาตุทองแดงและดีบุกในเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก ในสภาพหล่อที่มีต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความเค้นจุดคราก ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นและความเหนียว

สำหรับค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความเค้นจุดครากของเงินสเตอร์ลิง Ag-6.36%Cu และเงินสเตอร์ลิง 935 ที่เติมดีบุกตั้งแต่ 0.31–0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณดีบุกเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.4

แนวโน้มที่เพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความเค้นจุดครากของเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก เมื่อมีดีบุกเพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับเงินสเตอร์ลิง 935 ที่ไม่เติมดีบุก Ag-6.36%Cu นั้นสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับที่อธิบายในค่าความแข็งก่อนหน้านี้

แสดงว่าเมื่อดีบุกเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความแข็ง ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความเค้นจุดครากเพิ่มขึ้น ยกเว้นเมื่อมีดีบุก 0.38-0.43% จะมีค่าดังกล่าวสูงที่สุด เพราะมีโครงสร้างที่อยู่โดยรอบโครงสร้างยูเทคติกที่เล็กละเอียด

ค่ามอดุลัสยืดหยุ่น จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงให้เห็นว่าเงินสเตอร์ลิง Ag-7.35%Cu และโลหะผสมเงิน 935 ที่ไม่เติมดีบุกและเติมดีบุกจะมีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นที่คงที่

ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวจะลดลงเมื่อปริมาณดีบุกเพิ่มมากขึ้น

4.4 ผลทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) ภายหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ

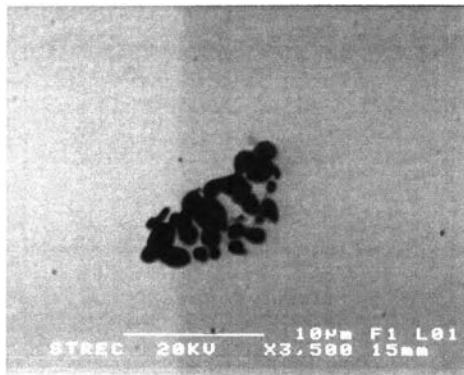
เนื่องจากชิ้นงานสำหรับทดลองมีจำนวนจำกัด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาหาตัวแปรการบ่มเพิ่มความแข็งที่เหมาะสมเสียก่อน ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิการบ่มและระยะเวลาการบ่ม สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้อุณหภูมิที่อบให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 750 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ชุบอย่างรวดเร็วในน้ำ และทดลองบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 260 °C และ 350 °C ตามลำดับ ส่วนระยะเวลาเท่ากับ 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที ตามลำดับ จากนั้นนำชิ้นงานมาขัดเพื่อเอาชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการอบออกไป โดยความลึกที่ขัดออกไปไม่ต่ำกว่า 200 μm (รายละเอียดเกี่ยวกับชั้นออกไซด์อยู่ในหัวข้อ 4.5) แล้วจึงวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ โดยทั่วไปสมบัติด้านความต้านทานแรงดึงที่สูงจะมีค่าความแข็งสูงด้วย

เหตุผลที่เลือกใช้อุณหภูมิ 260 °C เนื่องจากมีงานวิจัยของ Eager และคณะ (22) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการบ่มเพิ่มความแข็งเงินสเตอร์ลิง 925 ที่เติมทองแดง ดีบุกและลิเทียม คือ 260 °C

4.4.1 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก ในสภาพอบให้เป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิ 750 °C

4.4.1.1 โลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมดีบุก Ag-7.35%Cu และ Ag-6.36%Cu มีค่าความแข็งแบบวิกเกอร์เท่ากับ 56.3 HV และ 55.4 HV (จากตาราง 4.6) ตามลำดับ ซึ่งค่าความแข็งที่ได้มีค่าต่ำกว่าชิ้นงานในสภาพหล่อ เนื่องจากโครงสร้างยูเทคติกละลายกลับเข้าไปในโครงสร้างเนื้อพื้น ทำให้ความแข็งลดลง เมื่อตรวจสอบดูโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังจากกัดกรด พบว่าโครงสร้างเดนไดรต์ที่พบในชิ้นงานสภาพหล่อจะถูกขจัดหมดไปและไม่ปรากฏให้เห็นแต่จะเห็นโครงสร้างของโลหะเกิดการก่อตัวเป็นเกรนขึ้นแทน ส่วนโครงสร้างยูเทคติกยังมีหลงเหลืออยู่บ้าง แสดงดังรูป 4.5 (ก) ค่าความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิง Ag-6.36%Cu มีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิง Ag-7.35%Cu สาเหตุมาจากมีปริมาณทองแดงน้อยกว่า เมื่อดูโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังจากetch จะพบว่ามีลักษณะโครงสร้างแบบเดียวกับโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมดีบุก แต่โครงสร้างยูเทคติกที่หลงเหลืออยู่มีปริมาณน้อยกว่า

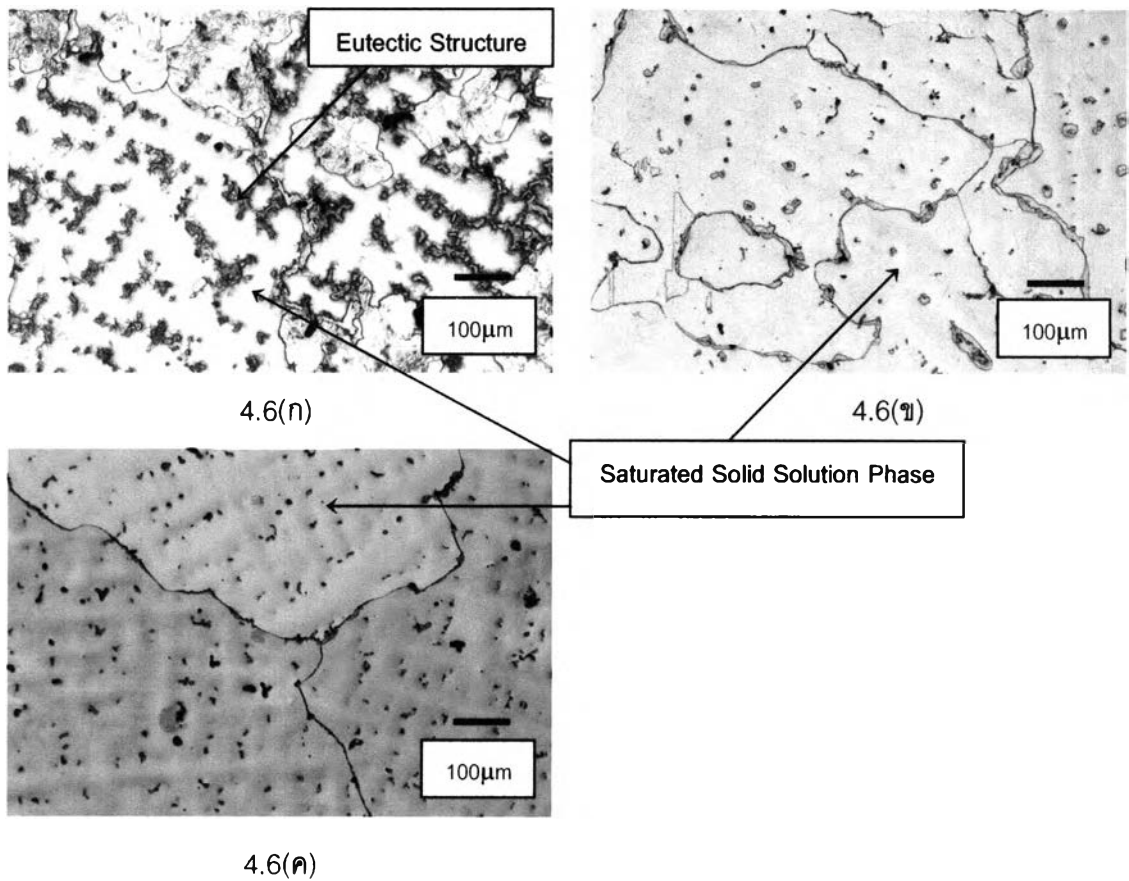
เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณทองแดงลดลง เมื่อพิจารณาจากภาพโครงสร้างจุลภาคที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาดของเงินสเตอร์ลิง Ag-5.74%Cu-0.50%Sn ยังไม่etch ดังรูปที่ 4.5 จะไม่พบโครงสร้างโดยรอบโครงสร้างยูเทคติกและโครงสร้างยูเทคติกที่หลงเหลืออยู่จะมีขนาดเล็กลง ขึ้นงานหลังจากetch แสดงดังรูป ที่ 4.6(ข)และ(ค) พบว่าโครงสร้างเดนไดรท์จะไม่ปรากฏให้เห็นแต่จะเห็นเป็นลักษณะของเกรนและเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อมีดีบุกเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาดของเงินสเตอร์ลิง Ag-5.74%Cu-0.50%Sn ยังไม่etch กำลังขยาย 3500 เท่า

4.4.2 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก หลังผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 260 °C

ตารางที่ 4.6 โลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ใส่ดีบุก Ag-7.35%Cu ได้ค่าความแข็งสูงสุดคือ 139.80 HV ซึ่งใช้เวลาในการบ่ม 240 นาที ส่วนโลหะผสมเงิน Ag-6.36%Cu ให้ค่าความแข็งสูงสุดที่ 133.80 HV โดยใช้เวลา 120 นาที สำหรับโลหะผสมเงินที่เติมดีบุก 0.31 และ 0.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะใช้ระยะเวลาสั้นที่สุดในการบ่มเพิ่มความแข็งด้วยเวลา 60 นาที และค่าความแข็งที่ได้ของโลหะผสมเงินที่มีดีบุก 0.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักยังมีค่าสูงที่สุดถึง 140.60 HV เมื่อพิจารณาค่าความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิงทุกๆส่วนผสมแล้ว พบว่าที่ระยะเวลา 120 นาที ค่าความแข็งของโลหะผสมเงินทุกส่วนผสมจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันดังรูป 4.7 ดังนั้นระยะเวลาที่จะใช้ในการบ่มเพิ่มความแข็งสำหรับอุณหภูมิ 260 °C นี้คือ 120 นาที



รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก ในสภาพอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่ 750 °C เวลา 1 ชม. ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกำลังขยาย 100 เท่า หลัง etch (50%NH₄OH+25%H₂O₂+25%H₂O)

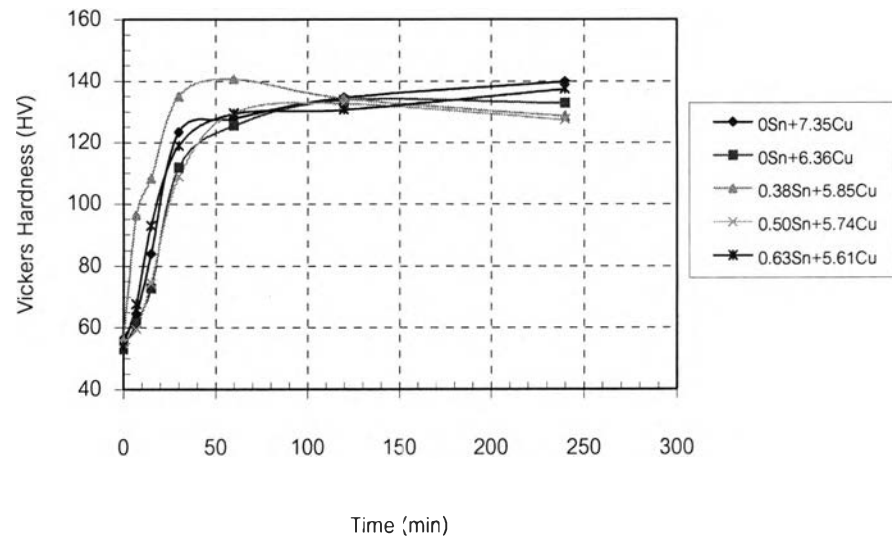
4.6(ก) Ag-7.35%Cu

4.6(ข) Ag-5.78%Cu-0.43%Sn

4.6(ค) Ag-5.68%Cu-0.54%Sn

ตารางที่ 4.6 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์หลังจากการอบให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 750 °C และบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่ 260 °C ที่เวลา 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที

ชุดโลหะผสม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)			ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (HV)						
	Cu	Sn	Ag	เวลา(นาที)						
				0	7	15	30	60	120	240
1	7.35	-	Balance	56.3	64.4	83.8	123.2	127.8	134.5	<u>139.8</u>
2	6.36	-	Balance	55.6	61.5	72.8	111.8	125.4	<u>133.8</u>	132.8
3	5.95	0.31	Balance	55.5	78.5	83.3	133.4	<u>138.2</u>	135.0	126.2
4	5.85	0.38	Balance	55.1	96.4	108.2	134.9	<u>140.6</u>	134.4	128.5
5	5.78	0.43	Balance	54.9	62.4	68.9	122.6	132.3	<u>134.6</u>	124.4
6	5.74	0.50	Balance	54.5	59.4	74.4	108.6	129.6	<u>132.6</u>	127.4
7	5.68	0.54	Balance	54.3	63.0	71.6	104.5	115.0	128.0	<u>132.0</u>
8	5.61	0.63	Balance	53.8	67.6	92.8	118.8	129.3	130.6	<u>137.4</u>



รูปที่ 4.7 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์หลังจากบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 260 °C ที่เวลา 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที

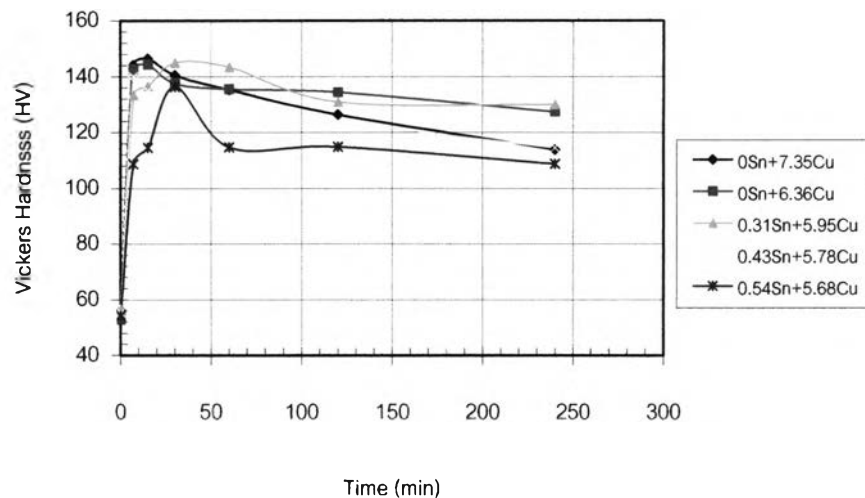
4.4.3 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก หลังผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 350 °C

จากตาราง 4.7 โลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ใส่ดีบุก Ag-7.35%Cu ได้ค่าความแข็งสูงสุดคือ 146.6 HV ซึ่งใช้เวลาในการบ่ม 15 นาที ส่วนโลหะผสมเงิน Ag-6.36%Cu ให้ค่าความแข็งสูงสุดที่ 144.4 HV โดยใช้เวลา 15 นาทีเช่นกัน สำหรับโลหะผสมเงินที่เติมดีบุกตั้งแต่ 0.31 –0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าความแข็งสูงสุดของแต่ละส่วนผสมจะมีแนวโน้มลดลง เมื่อพิจารณาค่าความแข็งของโลหะผสมเงินทุกส่วนผสมแล้ว พบว่าที่ระยะเวลา 30 นาที ค่าความแข็งของโลหะผสมเงินทุกส่วนผสมจะมีค่าใกล้เคียงกันดังรูป 4.8 ดังนั้นระยะเวลาที่จะใช้ในการอบเพิ่มความแข็งสำหรับอุณหภูมิ 350 °C นี้คือ 30 นาที

ตารางที่ 4.7 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์หลังจากการอบให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 750 °C และบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่ 350 °C ที่เวลา 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที

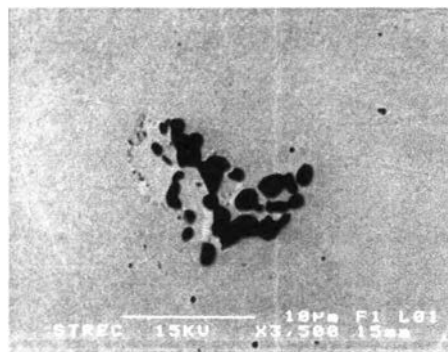
ชุดโลหะผสม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)			ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์(HV)						
				เวลา(นาที)						
	Cu	Sn	Ag	0	7	15	30	60	120	240
1	7.35	_	Balance	56.3	144.2	<u>146.6</u>	140.6	135.4	126.4	113.9
2	6.36	_	Balance	55.6	142.5	<u>144.4</u>	137.7	135.7	134.6	127.5
3	5.95	0.31	Balance	55.5	133.5	136.8	143.6	<u>145.8</u>	131.2	130.1
4	5.85	0.38	Balance	55.1	<u>140.0</u>	137.3	130.2	125.8	125.1	119.3
5	5.78	0.43	Balance	54.9	<u>140.1</u>	135.1	125.6	124.5	123.4	114.5
6	5.74	0.50	Balance	54.5	119.3	121.9	<u>137.2</u>	128.6	125.2	120.6
7	5.68	0.54	Balance	54.3	108.3	114.6	<u>136.5</u>	114.8	115.0	108.8
8	5.61	0.63	Balance	53.8	127.0	127.3	130.0	132.5	<u>135.1</u>	114.5

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าค่าความแข็งสูงสุดของโลหะเงินผสมแต่ละส่วนผสมจะเกิดที่เวลาแตกต่างกัน ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากธาตุทองแดงและดีบุกร่วมกัน

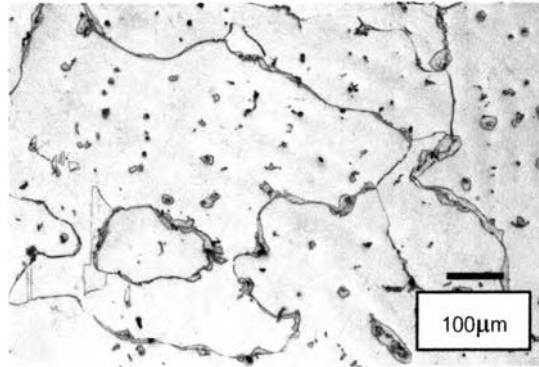


รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์หลังจากบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 350 °C ที่เวลา 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที

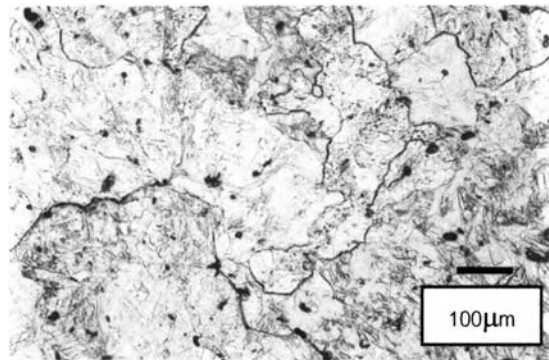
รูปที่ 4.9 ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิง Ag-5.78%Cu-0.43%Sn ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาดยังไม่ etch ในสภาพอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่ 750 °C เวลา 1 ชม. และภายหลังบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 260 °C เวลา 120 นาที จะไม่พบโครงสร้างโดยรอบโครงสร้างยูเทคติกและโครงสร้างยูเทคติกจะมีขนาดเล็กซึ่งแตกต่างจากงานหล่อและจะไม่เห็นอนุภาคตกตะกอน เนื่องจากมีขนาดเล็กมาก รูปที่ 4.10(ก)และ(ข) แสดงภาพโครงสร้างจุลภาคภายหลัง etch แล้ว



รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิง Ag-5.78%Cu-0.43%Sn ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาดยังไม่ etch ในสภาพอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่ 750 °C เวลา 1 ชม. และภายหลังบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 260 °C เวลา 120 นาที กำลังขยาย 3500 เท่า



4.10(ก)



4.10(ข)

รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอรลิง 935-ทองแดง-ดีบุก ในสภาพอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่ 750°C เวลา 1 ชม. และภายหลังบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 260°C เวลา 120 นาที ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 100 เท่า หลัง etch ($50\%\text{NH}_4\text{OH}+25\%\text{H}_2\text{O}_2+25\%\text{H}_2\text{O}$)

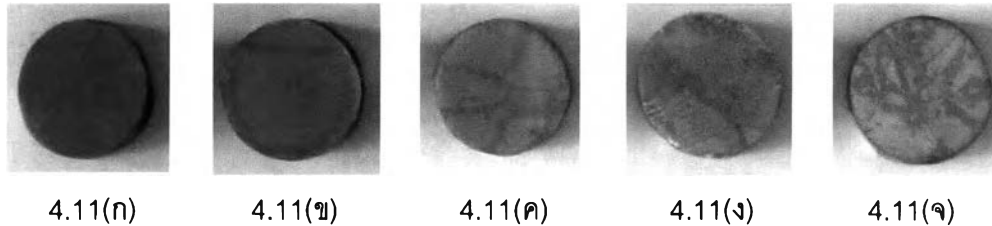
4.10(ก) Ag-5.78%Cu-0.43%Sn ที่ผ่านการอบให้เป็นสารละลายเนื้อเดียว

4.10(ข) Ag-5.78%Cu-0.43%Sn ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็ง

4.5 ผลการตรวจสอบสีผิวหลังอบให้ความร้อน

จากการอบชิ้นงานให้เป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่ 750°C เวลา 1 ชม แล้วชุบลงในน้ำจะพบว่าลักษณะสีผิวของชิ้นงานจะมีสีผิวค่อนข้างดำ และก่อนจะวัดความแข็งต้องขัดชั้นผิวสีดำนี้ออกไปไม่ต่ำกว่า $200\ \mu\text{m}$ ดังนั้นจึงได้ทดลองทำการทดสอบอบชิ้นงานเพื่อดูลักษณะสีผิวโดยจะอบชิ้นงานให้เป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 1 ชม. แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

พบว่าลักษณะสีผิวของชิ้นงานโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก ที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ลักษณะสีผิวของชิ้นงานหลังอบที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.11(ก) Ag-7.35%Cu

4.11(ข) Ag-6.36%Cu

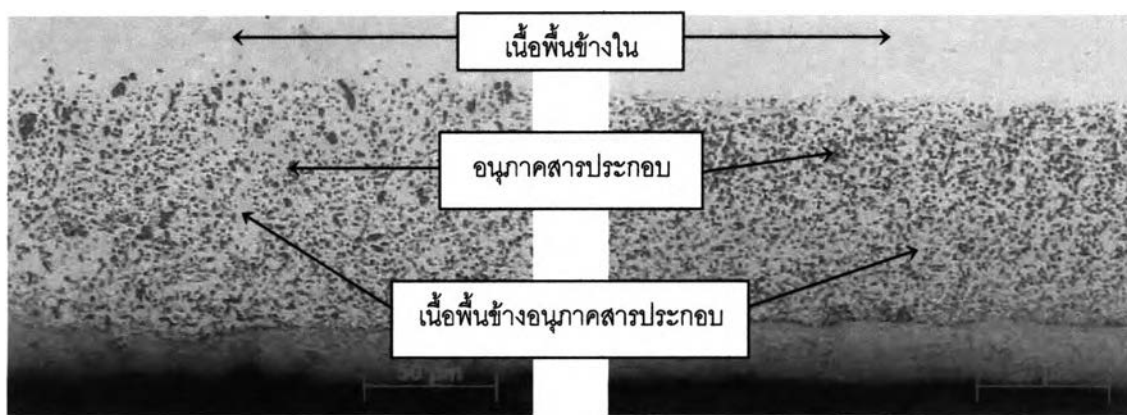
4.11(ค) Ag-5.95%Cu-0.31%Sn

4.11(ง) Ag-5.78%Cu-0.43%Sn

4.11(จ) Ag-5.68%Cu-0.54%Sn

จากรูปที่ 4.11 จะพบว่าผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่เติมดีบุก (Ag-7.35%Cu) จะมีสีดำที่สุด ส่วนในกลุ่มโลหะเงินสเตอร์ลิง 935 จะสังเกตเห็นว่า โลหะเงินสเตอร์ลิง Ag-6.36%Cu จะมีสีดำต่ำที่สุดในกลุ่ม และเมื่อเติมดีบุกเข้าไปจะทำให้สีผิวเป็นสีเทาขาว สีผิวจะขาวมากขึ้นเมื่อปริมาณดีบุกที่เติมเข้าไปเพิ่มขึ้น

ลักษณะสีผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่เติมดีบุก(Ag-7.35%Cu)ที่พบนี้เกิดจากการแพร่ของทองแดงจากบริเวณใจกลางชิ้นงานไปยังผิวของชิ้นงานแล้วทำปฏิกิริยาออกซิเดชันในบรรยากาศ เกิดเป็นฟิล์มของสารประกอบออกไซด์ปกคลุมบนผิวหน้า จากการศึกษาทฤษฎีในเรื่องคุณสมบัติของฟิล์มพบว่าสารประกอบคอปเปอร์ออกไซด์ที่มีสีดำจะเรียกว่า Cupric oxide (CuO) ส่วนสีชมพูจะเรียกว่า Cuprous oxide (Cu₂O) โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้จะเกิดขณะให้ความร้อนแก่โลหะที่อุณหภูมิ 600-800 °C ในสภาวะบรรยากาศ ส่วนโลหะเงินสเตอร์ลิง Ag-6.36%Cu ก็อธิบายได้ในลักษณะเดียวกันแต่สีผิวของชิ้นงานที่มีสีอ่อนกว่าก็เนื่องมาจากปริมาณทองแดงมีน้อยกว่าในเงินสเตอร์ลิงที่ไม่เติมดีบุก Ag-7.35%Cu การที่ทองแดงทำปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวจะเป็นสาเหตุให้ปริมาณทองแดงในชิ้นงานลดลงได้ รูปที่ 4.12 แสดงภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบ



4.12(ก)

4.12(ข)

รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 750 °C เวลา 1 ชม. ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 200 เท่า ยังไม่ etch

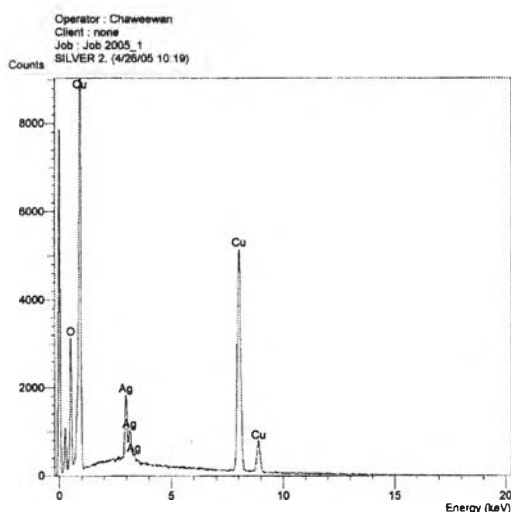
4.12(ก) Ag-7.35%Cu ชั้นออกไซด์หนาประมาณ 117 μm

4.12(ข) Ag-5.61%Cu-0.63%Sn ชั้นออกไซด์หนาประมาณ 100 μm

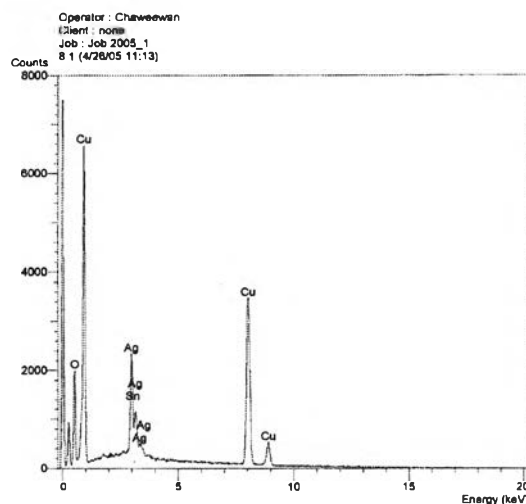
จากรูป 4.12 จะเห็นว่ามีการประกอบเกิดขึ้นและจากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีโดย EDX ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.13 พบว่าสารประกอบที่เกิดขึ้นในเงินสเตอร์ลิง Ag-7.35%Cu จะเป็นสารประกอบระหว่างธาตุออกซิเจน, ทองแดงและเงิน ส่วนในเงินสเตอร์ลิง Ag-5.61%Cu-0.63%Sn จะเป็นสารประกอบระหว่างธาตุออกซิเจน, ทองแดง เงินและดีบุก อนุภาคสารประกอบจะมีธาตุทองแดงเป็นส่วนประกอบที่สูงมาก ชั้นสารประกอบของเงินสเตอร์ลิง Ag-7.35%Cu จะหนากว่าชั้นสารประกอบของเงินสเตอร์ลิง Ag-5.61%Cu-0.63%Sn เล็กน้อยและอนุภาคของสารประกอบจะหนากว่า

ดังนั้นชั้นสารประกอบที่เกิดขึ้นนี้ก็คือ ชั้นออกไซด์ออกไซด์ ซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่อบชิ้นงานในบรรยากาศ โดยออกซิเจนในบรรยากาศจะแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาออกไซด์ขึ้นกับทองแดงที่แพร่ออกมาที่ผิวของชิ้นงาน และพบว่าพื้นที่ข้างเคียงอนุภาคออกไซด์จะไม่พบธาตุทองแดงเลย เนื่องจากทองแดงจะถูกดึงมาทำปฏิกิริยาออกไซด์ขึ้น จากตาราง 4.8 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณทองแดงที่เป็นส่วนประกอบในอนุภาคออกไซด์ระหว่างโลหะเงินสเตอร์ลิง Ag-5.61%Cu-0.63%Sn และ Ag-7.35%Cu จะพบว่าอนุภาคออกไซด์ของโลหะเงินสเตอร์ลิง Ag-5.61%Cu-0.63%Sn จะมีทองแดงเป็นส่วนประกอบต่ำกว่าในโลหะเงินสเตอร์ลิง Ag-7.35%Cu และมีดีบุกเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย เพราะฉะนั้นจึงเป็นไปได้

ที่ตีบุกจะมีส่วนช่วยลดการสูญเสียทองแดงอันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ ส่วนบริเวณเนื้อพื้นข้างในจะไม่พบธาตุออกซิเจนเลย



4.13(ก)



4.13(ข)

รูปที่ 4.13 กราฟผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วย EDX ของอนุภาคสารประกอบของโลหะเงินสเตอร์ลิง

4.13(ก) Ag-7.35%Cu

4.13(ข) Ag-5.61%Cu-0.63%Sn

ตารางที่ 4.8 ปริมาณธาตุผสมในชั้นสารประกอบของเงินสเตอร์ลิง 925 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ตีบุก ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด(SEM)

ชุดโลหะผสม	ครั้งที่	ส่วนผสมทางเคมี			ชั้นสารประกอบ								เนื้อพื้นข้างใน			
					อนุภาคสารประกอบ				เนื้อพื้นข้างอนุภาคสารประกอบ							
		Cu	Sn	Ag	Cu	Sn	Ag	O	Cu	Sn	Ag	O	Cu	Sn	Ag	O
1	1	7.35	-	Balance	68.22	-	11.87	19.91	0.41	-	99.59	-	4.59	-	95.41	-
	2				66.99	-	12.88	20.13	0.39	-	99.61	-	4.29	-	95.71	-
	3				71.58	-	9.16	19.26	0.37	-	99.63	-	5.03	-	94.97	-
8	1	5.61	0.63	Balance	43.40	2.25	31.89	22.47	1.52	-	98.48	-	3.93	0.60	95.47	-
	2				47.79	1.39	28.59	22.23	1.85	-	98.15	-	4.02	0.54	95.44	-
	3				56.33	1.55	21.58	20.54	1.98	-	98.02	-	4.05	0.62	95.33	-

เมื่อนำชิ้นงานเดิมที่อบแล้วมาผ่าครึ่งแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 750 °C เวลา 1 ชม. เช่นเดิม จะได้ลักษณะผิวดังรูปที่ 4.14 รูปที่ได้แสดงให้เห็นว่าที่ขอบของชิ้นงานจะเป็นสีขาว เนื่องจากทองแดงที่แพร่มาที่ผิวเกิดเป็นออกไซด์ไปหมดตั้งแต่การอบครั้งแรกซึ่งได้อธิบายไว้ข้างต้นแล้ว เมื่ออบครั้งที่ 2 จึงไม่มีทองแดงที่ผิวที่จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ไม่เกิดคอปเปอร์ออกไซด์สีเทาดำที่ขอบของชิ้นงาน ชิ้นออกไซด์จะมีส่วนในการลดความแข็งแรงของโลหะเงินสเตอริลิ่งในกรณีที่ไม่มีการนำชิ้นงานไปใส่น้ำหรือล้างผิวภายหลัง จากอบออกก่อนที่จะนำชิ้นงานไปทดสอบหรือใช้งานในด้านต่าง ๆ



4.14(น)

4.14(ข)

4.14(ค)

4.14(ง)

4.14(จ)

รูปที่ 4.14 ลักษณะสีผิวของชิ้นงานที่ผ่าครึ่งหลังอบที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.14(น) Ag-7.35%Cu

4.14(ข) Ag-6.36%Cu

4.14(ค) Ag-5.95%Cu-0.31%Sn

4.14(ง) Ag-5.78%Cu-0.43%Sn

4.14(จ) Ag-5.68%Cu-0.54%Sn

ในโลหะเงินสเตอริลิ่ง 935 ที่เติมดีบุก ลักษณะสีผิวที่ได้จะมีสีเทาขาวและสีจะขาวมากขึ้นเมื่อปริมาณดีบุกเพิ่มขึ้น นั่นคือขณะอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 750 °C จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของดีบุกที่ผิวเป็นส่วนใหญ่ ส่วนปฏิกิริยาออกซิเดชันของทองแดงจะเกิดขึ้นบ้างเล็กน้อย เมื่อนำชิ้นงานไปผ่าครึ่งและอบที่ 750 °C จะพบว่าสีขาวที่ขอบของชิ้นงานที่เติมดีบุกจะมีน้อยมาก ดังรูปที่ 4.14 แสดงว่าการสูญเสียทองแดงน้อยลงด้วย

เนื่องจากสีผิวของเครื่องประดับมีความสำคัญมาก การที่สีผิวเปลี่ยนแปลงจะทำให้เกิดความหมองขึ้นซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ ถึงแม้ว่าการเติมทองแดงเพียงอย่างเดียวจะมีความแข็งสูงขึ้นมากก็ตามแต่สีผิวจะดำคล้ำ ดังนั้นจึงต้องมีการเติมดีบุกเข้าไปด้วยเพื่อช่วยให้ผิวของชิ้นงานไม่เป็นสีดำและลดการสูญเสียทองแดงขณะอบ

4.6 ผลทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ภายหลังจากทำกระบวนการบ่มเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน

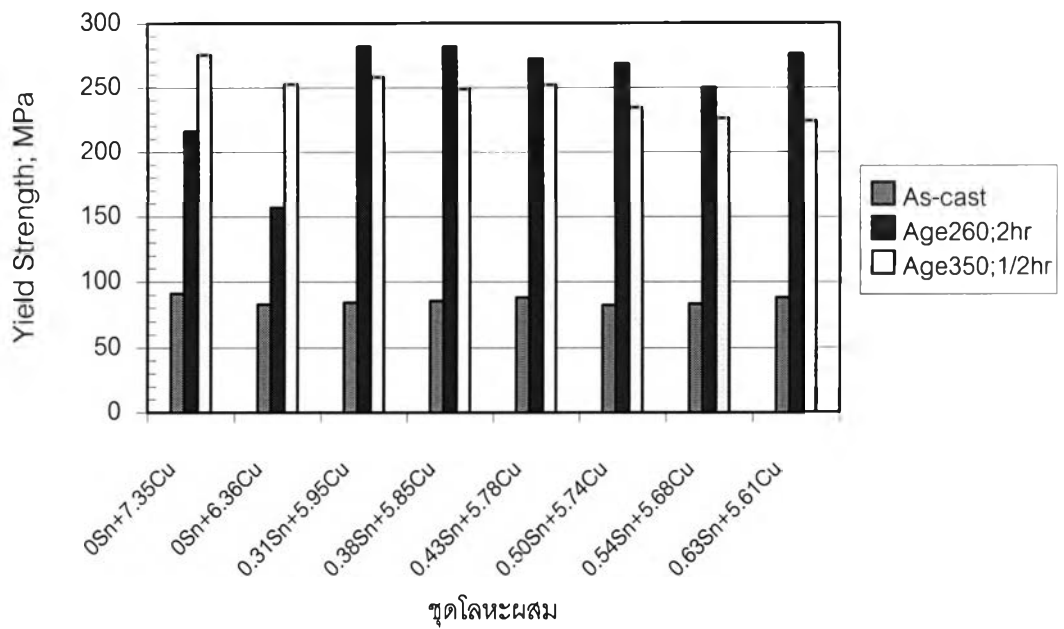
จากตารางที่ 4.6 และ 4.7 ตัวแปรต่าง ๆ ที่เหมาะสมสำหรับทำกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน มีดังนี้คืออบชิ้นงานให้เป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นชุบอย่างรวดเร็วลงในน้ำเย็น ต่อมาบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิ 350 °C และ 260 °C เป็นเวลา 30 นาที และ 120 นาที ตามลำดับ ผลทดสอบแรงดึงหลังจากบ่มเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน แสดงไว้ในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.15 , 4.16 และ 4.17

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบแรงดึงของเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก

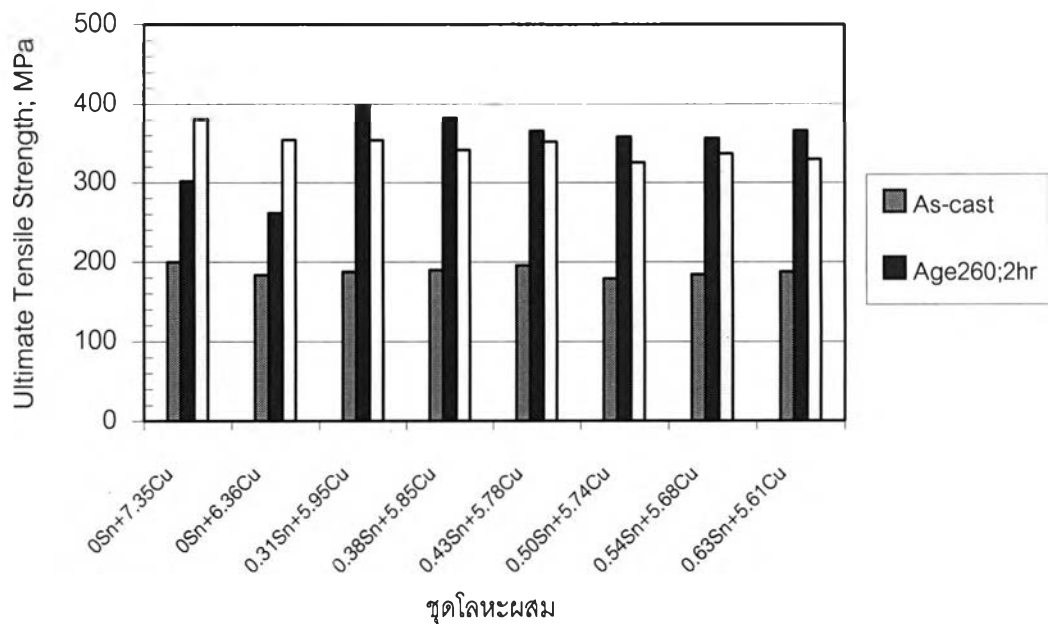
โลหะผสมชนิดที่	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)			ความเค้นจุดคราก (MPa)		ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (MPa)		มอดุลัสยืดหยุ่น (GPa)		เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%)	
				อุณหภูมิบ่มเพิ่มความแข็งแรง (°C)		อุณหภูมิบ่มเพิ่มความแข็งแรง (°C)		อุณหภูมิบ่มเพิ่มความแข็งแรง (°C)		อุณหภูมิบ่มเพิ่มความแข็งแรง (°C)	
	Cu	Sn	Ag	260*	350**	260*	350**	260*	350**	260*	350**
1	7.35	-	Balance	215.8	275.4	301.6	380.9	2.8	3.6	14.7	15.0
2	6.36	-	Balance	156.7	252.3	261.3	353.9	2.8	3.4	17.3	18.3
3	5.95	0.31	Balance	281.5	258.0	398.4	353.5	3.8	3.4	17.7	15.7
4	5.85	0.38	Balance	281.5	248.7	382.5	341.2	3.6	3.4	13.3	15.2
5	5.78	0.43	Balance	272.2	252.0	365.1	351.6	4.2	3.7	11.8	15.8
6	5.74	0.50	Balance	268.5	234.3	357.7	325.3	4.2	3.7	11.0	12.1
7	5.68	0.54	Balance	250.0	226.0	356.0	336.3	5.0	3.4	12.7	11.4
8	5.61	0.63	Balance	275.9	224.0	365.8	329.5	3.6	3.6	12.3	10.0

* ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิ 260 °C คือ 120 นาที

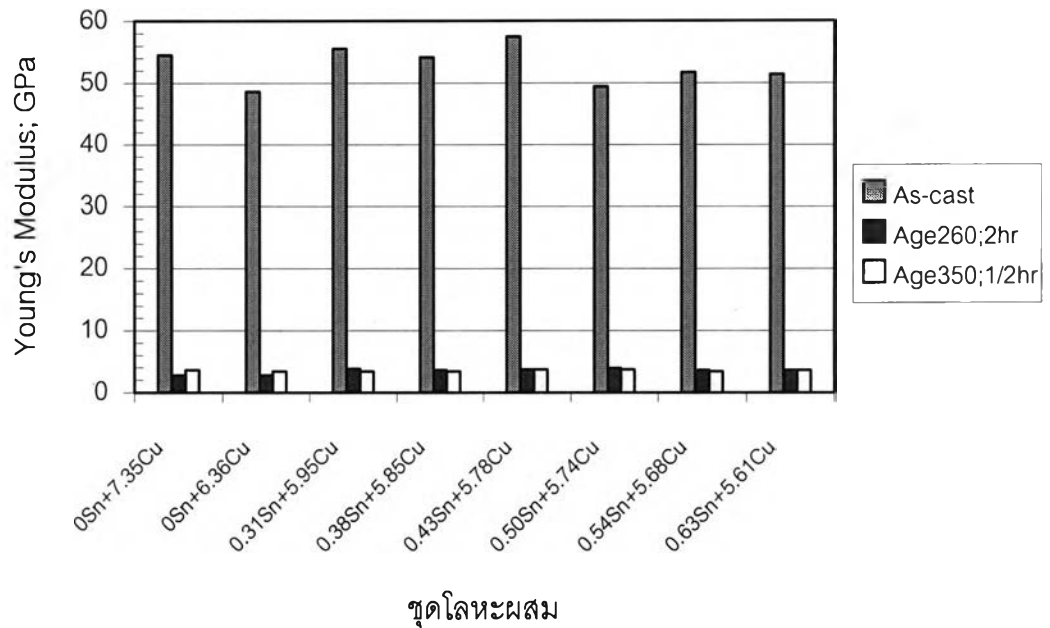
** ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิ 350 °C คือ 30 นาที



รูปที่ 4.15 ค่าความเค้นจุดครากของชิ้นงานในสภาพหล่อ, บ่มที่ 260 °C เวลา 120 นาที และ บ่มที่ 350 °C เวลา 30 นาที ของชิ้นงานทุกส่วนผสม



รูปที่ 4.16 ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานในสภาพหล่อ, บ่มที่ 260 °C เวลา 120 นาที และ บ่มที่ 350 °C เวลา 30 นาที ของชิ้นงานทุกส่วนผสม



รูปที่ 4.17 ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของชิ้นงานในสภาพหล่อ, บ่มที่ 260 °C เวลา 120 นาทีและ บ่มที่ 350 °C เวลา 30 นาที ของชิ้นงานทุกส่วนผสม

4.6.1 ผลทดสอบแรงดึง (Tensile test) ภายหลังจากทำกระบวนการบ่มเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 260 °C เวลา 120 นาที

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 ความเค้นจุดครากและความต้านทานแรงดึงภายหลังจากบ่มเพิ่มความแข็งแรงจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับชิ้นงานในสภาพหล่อ เงินสเตอร์ลิง 935 ที่มีดีบุกทุกส่วนผสม จะมีค่าความเค้นจุดครากและความต้านทานแรงดึงสูงกว่าเงินสเตอร์ลิง Ag-7.35% และ Ag-6.36%Cu แต่เมื่อปริมาณดีบุกเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความเค้นจุดครากมีแนวโน้มลดลงดังรูป 4.15 และ 4.16 แต่ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นจะมีแนวโน้มคงที่ดังรูป 4.17 จากตารางที่ 4.9 พบว่าโลหะผสมเงิน Ag-5.95%Cu-0.31%Sn จะมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด คือ 398.4 MPa ส่วนค่าความเค้นจุดครากมีค่า 281.5 MPa ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าความเค้นจุดครากของโลหะผสมเงิน Ag-5.85%Cu-0.38%Sn และมีค่าสูงที่สุดด้วย สาเหตุที่ค่าความเค้นจุดครากและค่าความต้านทานแรงดึงในโลหะเงินสเตอร์ลิง Ag-7.35% และ Ag-6.36%Cu มีค่าต่ำกว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงที่เติมดีบุก ก็เนื่องมาจากมีหลายปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าดังกล่าวลดลง ปัจจัยแรกคือการสูญเสียทองแดงไปขณะทำการอบที่อุณหภูมิ 750 °C ดีบุกจะมีส่วนช่วยให้การสูญเสียทองแดงขณะอบน้อยลง ดังนั้นการไม่เติมดีบุก

จะทำให้มีการสูญเสียทองแดงไป เนื่องจากทองแดงมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความแข็งแรงในโลหะเงินและกระบวนการบ่มเพิ่มความแข็งแรง ดังนั้นเมื่อปริมาณทองแดงลดลงไปอาจจะทำให้การตกตะกอนน้อยลงไปด้วย ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงต่างๆลดลงไปด้วย ปัจจัยที่สองซึ่งจะมีผลบ้างเล็กน้อยก็คือชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ผิวของเงินสเตอร์ลิงหลังจากอบที่ 750°C เนื่องจากไม่มีการนำชิ้นงานไปล้างผิวออกหลังจากอบ ทำให้บริเวณที่เกิดชั้นออกไซด์มีสมบัติทางกลลดลงดังนั้นขณะดึงชิ้นงานบริเวณผิวของชิ้นงานจะรับแรงได้ไม่ดี

ส่วนในกรณีของเงินสเตอร์ลิงที่เติมดีบุกพบว่าเมื่อปริมาณดีบุกเพิ่มขึ้นค่าความเค้นจุดครากและความต้านทานแรงดึงกลับมีแนวโน้มลดลง ก็เนื่องมาจากปริมาณดีบุกที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณทองแดงลดลงและยังมีการสูญเสียทองแดงไปบางส่วนขณะอบที่ 750°C ด้วย ทำให้มีปริมาณทองแดงในชิ้นงานที่น้อยลงถึงแม้ว่าจะมีดีบุกมากขึ้นก็ตาม เนื่องจากอนุภาคตกตะกอนที่เป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้นคือ Cu-Ag, Cu-Sn และ Cu-Ag-Sn ซึ่งทุกชนิดจะต้องมีทองแดงเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นปริมาณทองแดงที่ลดลงจะทำให้การเกิดอนุภาคตกตะกอนลดลงและส่งผลให้สมบัติทางกลลดลงด้วย จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 พบว่าปริมาณดีบุกที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 0.31-0.38% โดยน้ำหนัก

4.6.2 ผลทดสอบแรงดึง (Tensile test) ภายหลังจากทำกระบวนการบ่มเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 350°C เวลา 30 นาที

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 ค่าความเค้นจุดครากและค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้ ภายหลังบ่มเพิ่มความแข็งแรงจะมีค่าสูงขึ้นมาจากสภาพหล่อ และพบว่าเงินสเตอร์ลิง Ag-7.35%Cu จะมีค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความเค้นจุดครากสูงที่สุด 380.9 MPa และ 275.4 MPa ตามลำดับ ส่วนโลหะผสมเงิน Ag-6.36%Cu จะให้ค่าความต้านทานแรงดึง 353.9 MPa ความเค้นจุดคราก 252.3 MPa ในโลหะเงินสเตอร์ลิงที่เติมดีบุกตั้งแต่ 0.31-0.63% โดยน้ำหนัก ทั้งค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความเค้นจุดครากจะต่ำกว่าในเงินสเตอร์ลิงที่ไม่เติมดีบุก (Ag-7.35%Cu และ Ag-6.36%Cu) และมีแนวโน้มลดลง รูปที่ 4.17 แสดงค่ามอดุลัสยืดหยุ่นซึ่งค่อนข้างคงที่

จากข้อมูลข้างต้นพบว่าเงินสเตอร์ลิง Ag-7.35%Cu และ Ag-6.36%Cu ที่บ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 350°C เวลา 30 นาที จะให้ค่าความเค้นจุดครากและความต้านทานแรงดึงสูงกว่าที่บ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 260°C เวลา 120 นาที แต่เมื่อมีการเติมดีบุกเข้าไปในเงินสเตอร์ลิง 935 จะพบว่าเงินสเตอร์ลิงที่บ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 260°C จะมีค่าความเค้นจุดครากและความต้านทานแรงดึงสูงกว่าที่บ่ม

เพิ่มความแข็งที่ 350 °C โดยค่าความเค้นจุดครากและค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้นนี้อาจเป็นผลมาจากการตกตะกอนของ Cu-Ag, Cu-Sn และ Cu-Ag-Sn (ยังไม่ทราบว่าเป็นการตกตะกอนของอะไร เพราะไม่ได้มีการศึกษาในเรื่องนี้) ที่มีขนาดที่เหมาะสมกว่าและการกระจายตัวที่ดีกว่า นอกจากนี้ยังมีสีผิวที่ดีกว่า แสดงว่าสเตอร์ลิงที่เติมดีบุกต้องบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 260 °C จึงจะเหมาะ สำหรับเงิน สเตอร์ลิงที่ไม่เติมดีบุกเหมาะที่จะบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C

4.7 การพิจารณาหาส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับทำสปริง

จากข้อมูลสมบัติต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบเราจะนำมาพิจารณาเพื่อหาส่วนผสมของโลหะที่เหมาะสมต่อการนำมาทำลึนสปริง โดยค่าที่จะนำมาเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเหมาะสม คือ ค่า σ_y^2/E

ตารางที่ 4.10 แสดงค่า σ_y^2/E ของโลหะผสมที่ส่วนผสมต่างๆ ในสภาพหล่อ ตารางที่ 4.11 แสดงค่า σ_y^2/E ของโลหะผสมที่ส่วนผสมต่าง ๆ ที่บ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 260 °C เวลา 120 นาที และตารางที่ 4.12 สำหรับโลหะผสมที่บ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิที่ 350 °C เวลา 30 นาที ส่วนรูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า σ_y^2/E กับชุดโลหะผสมทั้ง 8 ชุด

ตารางที่ 4.10 ค่า σ_y^2/E ของโลหะเงินผสมที่ส่วนผสมต่าง ๆ ในสภาพหล่อ

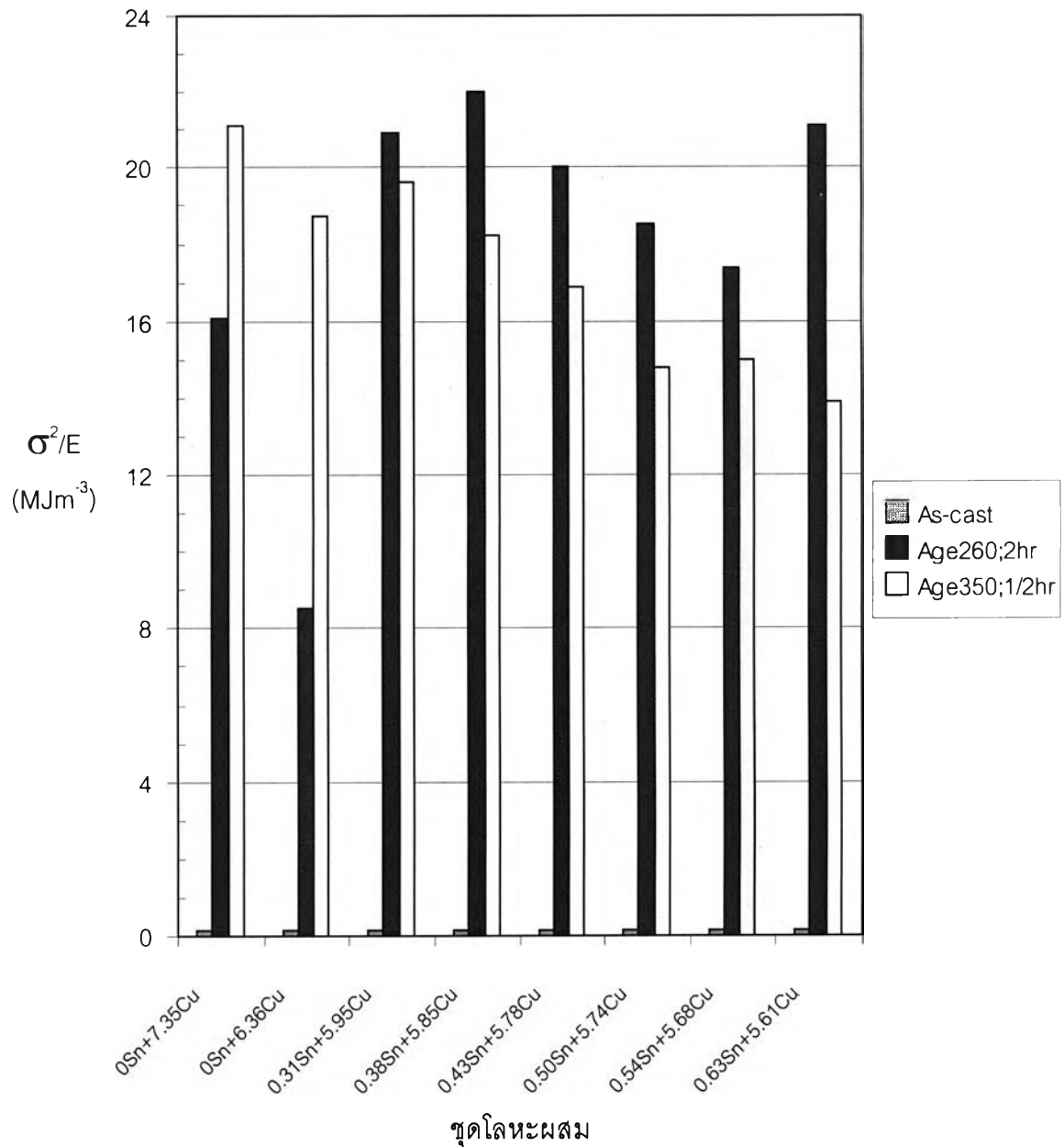
โลหะผสมชุดที่	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)			ความเค้นจุดคราก (MPa)	มอดุลัสยืดหยุ่น (GPa)	σ_y^2/E (MJm ⁻³)	σ_y/E ($\times 10^{-3}$)	เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%)
	Cu	Sn	Ag					
1	7.35	–	Balance	90.9	54.5	0.152	1.7	19.7
2	6.36	–	Balance	82.7	48.6	0.141	1.7	22.2
3	5.95	0.31	Balance	84.1	55.5	0.127	1.5	24.1
4	5.85	0.38	Balance	85.3	54.1	0.134	1.6	24.3
5	5.78	0.43	Balance	87.8	57.4	0.134	1.5	28.4
6	5.74	0.50	Balance	82.2	49.4	0.137	1.7	34.3
7	5.68	0.54	Balance	83.2	51.7	0.134	1.6	27.1
8	5.61	0.63	Balance	88.0	51.4	0.151	1.7	25.0

ตารางที่ 4.11 ค่า σ_y^2/E ของโลหะเงินผสมที่ส่วนผสมต่าง ๆ ที่บ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 260°C เวลา 120 นาที

โลหะผสมชุดที่	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)			ความเค้นจุดคราก (MPa)	มอดุลัสยืดหยุ่น (GPa)	σ_y^2/E (MJm ⁻³)	σ_y/E ($\times 10^{-2}$)	เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%)
	Cu	Sn	Ag					
1	7.35	–	Balance	215.8	2.8	16.1	7.7	14.7
2	6.36	–	Balance	156.7	2.8	8.5	5.6	17.3
3	5.95	0.31	Balance	281.5	3.8	20.9	7.4	17.7
4	5.85	0.38	Balance	281.5	3.6	22.0	7.8	13.3
5	5.78	0.43	Balance	272.2	3.7	20.0	7.4	11.8
6	5.74	0.50	Balance	268.5	3.9	18.5	6.9	11.0
7	5.68	0.54	Balance	250.0	3.6	17.4	6.9	12.7
8	5.61	0.63	Balance	275.9	3.6	21.1	7.7	12.3

ตารางที่ 4.12 ค่า σ_y^2/E ของโลหะเงินผสมที่ส่วนผสมต่าง ๆ ที่บ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 350°C เวลา 30 นาที

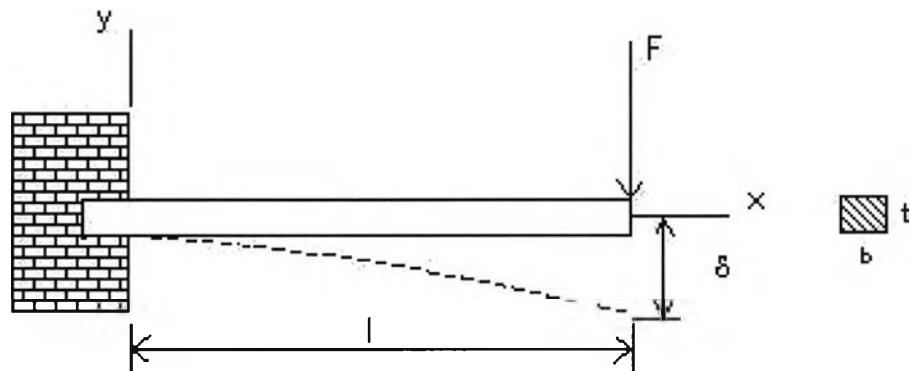
โลหะผสมชุดที่	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)			ความเค้นจุดคราก (MPa)	มอดุลัสยืดหยุ่น (GPa)	σ_y^2/E (MJm ⁻³)	σ_y/E ($\times 10^{-2}$)	เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%)
	Cu	Sn	Ag					
1	7.35	–	Balance	275.4	3.6	21.1	7.7	15.0
2	6.36	–	Balance	252.3	3.4	18.7	7.4	18.3
3	5.95	0.31	Balance	258.0	3.4	19.6	7.6	15.7
4	5.85	0.38	Balance	248.7	3.4	18.2	7.3	15.2
5	5.78	0.43	Balance	252.0	3.7	16.9	6.8	15.8
6	5.74	0.50	Balance	234.3	3.7	14.8	6.3	12.1
7	5.68	0.54	Balance	226.0	3.4	15.0	6.6	11.4
8	5.61	0.63	Balance	224.0	3.6	13.9	6.2	10.0



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า σ^2/E กับชุดโลหะผสมทั้ง 8 ชุด

จากรูปที่ 4.18 เมื่อนำค่าทั้งหมดมาเปรียบเทียบกันพบมีค่า σ_y^2/E ของโลหะผสมเงินทุกส่วนผสมในสภาพหล่อมีค่าต่ำที่สุดจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาทำสปริง ส่วนชุดโลหะเงินสเตอร์ลิง Ag-5.85%Cu-0.38%Sn ที่ทำการอบเพิ่มความแข็งที่ 260 °C เป็นเวลา 120 นาที มีค่า σ_y^2/E สูงที่สุดคือ 22 MJm⁻³

การเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับลึนสปริงสามารถพิจารณาได้อีกวิธี คือ เมื่อทราบขนาดของสปริง สำหรับในงานวิจัยนี้ลึนสปริงตัวอย่างมีลักษณะดังรูป 2.10 และมีขนาดดังนี้คือ $t = 0.7$ มม. $b = 3.8$ มม. $l = 5.1$ มม. และ $\delta = 1.7$ มม.



รูปที่ 2.10 รูปคาน cantilever

จากสมการ

$$\frac{\sigma_y}{E} > \frac{3\delta t}{2l^2} \quad (4.1)$$

แทนค่า t , l และ δ ลงในสมการ (4.1)

$$\frac{\sigma_y}{E} > \frac{3\delta t}{2l^2} = \frac{3 \times 1.7 \times 0.7}{2 \times 5.1 \times 5.1} = 6.9 \times 10^{-2}$$

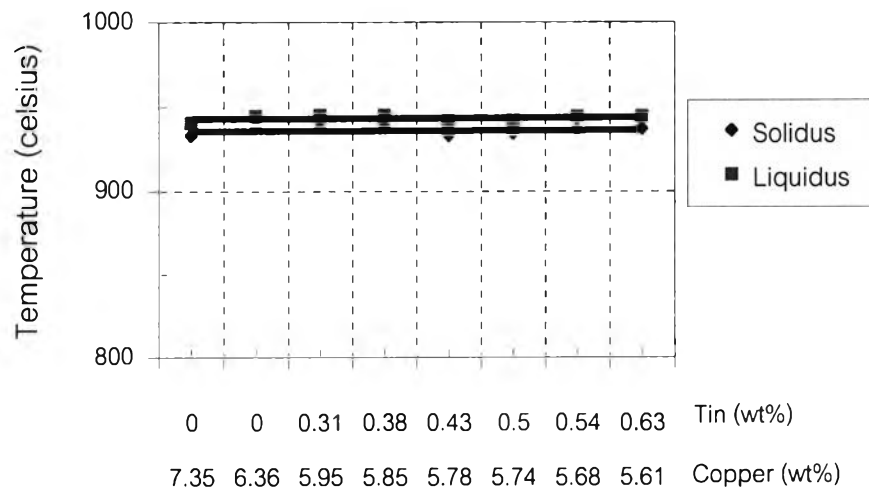
จากค่าที่คำนวณได้ข้างต้นทำให้เราทราบว่าส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับทำลึนสปริงตัวอย่าง (ขนาดของสปริงเป็นไปตามข้อมูลข้างต้น) จะต้องมีค่า $\sigma_y/E > 6.9 \times 10^{-2}$ ดังนั้นส่วนผสมที่เหมาะสมคือส่วนผสมที่มีค่า σ_y/E ที่สูงจึงจะดีที่สุดเนื่องจากจะต้องเผื่อค่า safety factor ด้วย และจากตารางที่ 4.9, 4.10 และ 4.11 จะพบว่าค่า σ_y/E ที่สูงที่สุด คือ 7.8×10^{-2} ซึ่งเป็นโลหะผสมเงิน Ag-5.85%Cu-0.38Sn% ที่ทำการบ่มเพิ่มความแข็งที่ 260°C เป็นเวลา 120 นาที จะสังเกตเห็นว่าเมื่อค่า σ_y^2/E สูงค่า σ_y/E ก็สูงด้วยเช่นกัน

4.8 ผลการตรวจสอบช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว

ทดสอบวัดช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวด้วยเครื่อง DTA (Differential Thermal Analysis) ซึ่งผลที่ได้แสดงไว้ในตาราง 4.13 และรูปที่ 4.19

ตารางที่ 4.13 แสดงผลการทดสอบช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว

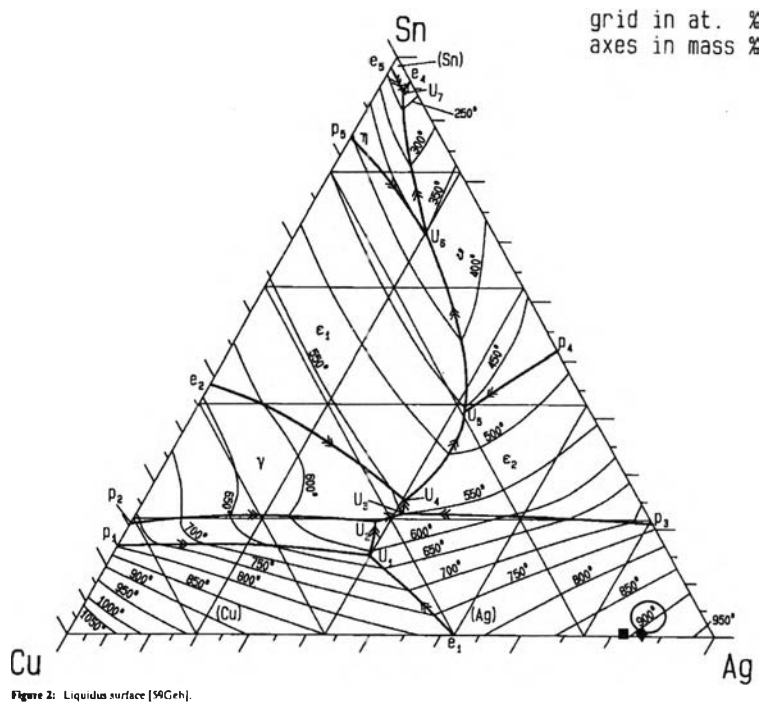
โลหะผสมชุดที่	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)			จุดเริ่มหลอมเหลว (Solidus) (°C)	จุดหลอมเหลว สมบูรณ์ (Liquidus) (°C)
	Cu	Sn	Ag		
1	7.35	–	Balance	932.7	940.3
2	6.36	–	Balance	937.7	944.2
3	5.95	0.31	Balance	937.4	944.8
4	5.85	0.38	Balance	937.9	944.8
5	5.78	0.43	Balance	933.0	941.5
6	5.74	0.50	Balance	934.1	941.6
7	5.68	0.54	Balance	936.3	944.0
8	5.61	0.63	Balance	936.7	944.4



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทองแดงและดีบุกกับช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว

จากตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.19 ข้างต้นจะพบว่าช่วงอุณหภูมิของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก จะมีอุณหภูมิ ณ จุดที่เริ่มมีการหลอมเหลว (Solidus) ในช่วง 932.7 - 937.9 °C และอุณหภูมิ ณ จุดที่มีการหลอมเหลวสมบูรณ์(Liquidus)ในช่วง 940.3 - 944.8 °C

จุดเริ่มมีการหลอมเหลว(Solidus) และจุดหลอมเหลวสมบูรณ์(Liquidus)จากการทดลองจะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จาก Phase Diagram ดังรูป 4.20 โดย จุด ◆ เป็นจุด Liquidus ของโลหะผสมเงิน Ag-6.36%Cu ที่อุณหภูมิประมาณ 905 °C และจุด ■ เป็นจุด Liquidus ของโลหะเงินสเตอร์ลิง Ag-7.35%Cu ที่อุณหภูมิประมาณ 896 °C ส่วนในวงรีเป็นจุด Liquidus ของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่เติมดีบุกทุกส่วนผสม ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง สาเหตุก็เนื่องมาจากการหล่อไม่สามารถควบคุมให้การแข็งตัวของน้ำโลหะเป็นไปอย่างสมดุได้ และจากรูป 4.19 พบว่าทั้งจุด Solidus และ Liquidus ของโลหะเงินสเตอร์ลิงทุกส่วนผสมมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ จึงเป็นไปได้ว่าดีบุกไม่มีผลต่อจุด Solidus และจุด Liquidus



รูปที่ 4.20 แผนภูมิสมดุ Liquidus line ระหว่างเงิน-ทองแดง-ดีบุก