



บทที่ 3
ผลและอภิปรายผลการวิจัย

3.1 การเตรียมชิ้นทดสอบและส่วนผสม

เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของธาตุเจือ คือ แพลตเดียม สังกะสี และซิลิกอน ต่อโครงสร้างจุลภาค ความแข็งและความสามารถในการต้านทานการหมองของโลหะผสมเงินทั้งสองระบบ จึงได้แบ่งโลหะผสมออกเป็นกลุ่มย่อยอีก 2 กลุ่ม คือ โลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Pd ที่ปริมาณ Pd 0.1-1.5wt% และโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Zn-Si ที่ปริมาณ Zn 0.5-2.0wt% และมี Si 0.05-0.3wt% โดยการหล่อแบบแม่พิมพ์ซีเมนต์ (lost-wax หรือ Investment casting) ในระบบสุญญากาศ โดยการหลอมโลหะทุกส่วนผสมที่อุณหภูมิ 1,025°C และอุณหภูมิเข้าหล่อ 600°C โดยรายละเอียดส่วนผสมทางเคมีและรหัสตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของโลหะผสม 935Ag ที่ส่วนผสมต่าง ๆ ในการทดลองและผลจากการวิเคราะห์ธาตุด้วย ICP

Systems	Sample code	Expected (wt%)				Analyzed (wt%)			
		Cu	Pd	Zn	Si	Cu	Pd	Zn	Si
Ag-Cu	935 Ag-Cu	6.50	-	-	-	6.22	-	-	-
Ag-Cu-Pd	935 Pd V1	6.40	0.10	-	-	5.86	0.09	-	-
	935 Pd V2	6.20	0.30	-	-	4.75	0.31	-	-
	935 Pd V3	6.00	0.50	-	-	5.85	0.48	-	-
	935 Pd V4	5.50	1.00	-	-	3.56	0.93	-	-
	935 Pd V5	5.30	1.20	-	-	4.98	1.22	-	-
	935 Pd V6	5.00	1.50	-	-	3.73	1.47	-	-
Ag-Cu-Zn-Si	935 Zn-Si V1	6.00	-	0.50	-	6.09	-	0.38	-
	935 Zn-Si V2	6.45	-	-	0.05	6.32	-	-	0.04
	935 Zn-Si V3	5.90	-	0.50	0.05	5.80	-	0.65	0.04
	935 Zn-Si V4	5.40	-	1.00	0.10	4.87	-	0.79	0.09
	935 Zn-Si V5	5.20	-	1.00	0.30	5.93	-	1.04	0.31
	935 Zn-Si V6	4.45	-	2.00	0.05	4.88	-	2.02	0.04

3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบ

การเตรียมชิ้นงานทดสอบเริ่มต้นจากการเตรียมส่วนผสม การเตรียมแว็กซ์ และขั้นตอนในการหล่อ มีรายละเอียดการดำเนินงานดังนี้

1) การเตรียมส่วนผสม ชิ้นทดสอบที่อัตราส่วนต่าง ๆ จากการเตรียมโลหะเงิน ทองแดง และโลหะผสม Master alloy ของ Pd950 Cu/Zn และ Cu/Si ที่ส่วนผสมระหว่าง Cu:Zn = 67:33 และ Cu:Si = 90:10 ตามลำดับ ลักษณะโลหะแสดงดังรูปที่ 3.1

2) การเตรียมขี้ผึ้งหรือแว็กซ์ (wax) เพื่อให้ได้ขนาดชิ้นตัวอย่างตามความเหมาะสมกับการทดสอบและวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป โดยแบ่งชิ้นตัวอย่างออกเป็นสามกลุ่มหลัก คือ สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค การทำสอบความแข็ง และการทดสอบการหมอง

3) การหล่อชิ้นทดสอบ เมื่อได้ต้นเทียนตามจำนวนชิ้นทดสอบที่ต้องการแล้ว เบ้าหล่อจะผ่านขั้นตอนการเทปูนสำหรับหล่อ การอบละลายแว็กซ์ และการหล่อโลหะภายใต้ระบบสุญญากาศ โดยโลหะผสมจะถูกหลอมที่อุณหภูมิ 1025°C ด้วยเครื่องหล่อ INDUTHERM – VC 400 โลหะหลอมจะถูกเทลงในแบบ (เบ้าหล่อ) ซึ่งมีอุณหภูมิอบเบ้า 600°C ในขั้นตอนนี้มีการใช้ระบบความดันที่มากกว่าปกติ (over pressure) ช่วยในการอัดความดันเพื่อให้โลหะหลอมเต็มแบบ หลังการเทน้ำโลหะหลอมลงในเบ้าหล่อ จะปล่อยให้เบ้าหล่อไว้ภายใต้สภาวะสุญญากาศภายในเครื่องหล่อ 2 นาที ตามด้วยการวางเบ้าหล่อให้เย็นตัวนอกเครื่องหล่อ 15 นาที เพื่อให้โลหะหลอมแข็งตัวสมบูรณ์ ก่อนการชุบแข็งในน้ำ (water quench)



รูปที่ 3.1 โลหะที่ใช้ในการทดลอง (a) Silver (b) Copper (c) Pd950 (d) Master alloy Cu/Zn และ (e) Master alloy Cu/Si

3.1.2 ชั้นทดสอบหลังหล่อ

ลักษณะต้นเงินของชั้นทดสอบหลังการหล่อด้วยแบบแม่พิมพ์ซีดีฝังในระบบสุญญากาศของโลหะผสมระบบ Ag-Cu-Pd และ Ag-Cu-Zn-Si ที่ส่วนผสมต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.2 และ 3.3



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

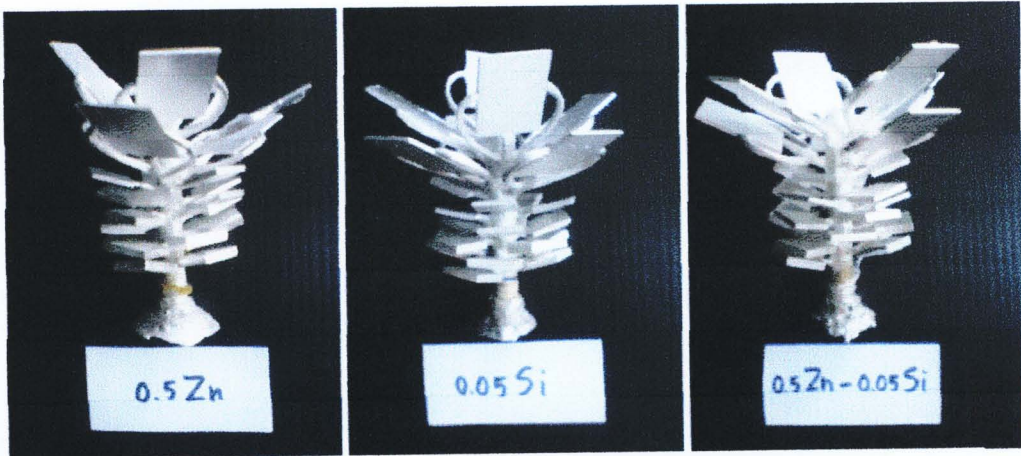


(f)



(g)

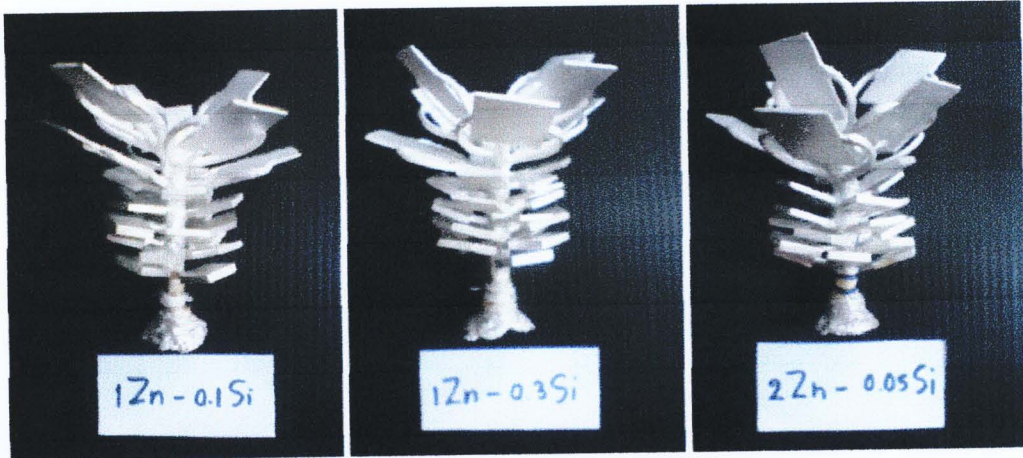
รูปที่ 3.2 ต้นเงินชั้นทดสอบระบบ Ag-Cu และ Ag-Cu-Pd 935 (a) Ag-Cu (b) 0.1Pd (c) 0.3Pd (d) 0.5Pd (e) 1.0Pd (f) 1.2Pd และ (g) 1.5Pd



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

(f)

รูปที่ 3.3 ต้นเงินขึ้นทดสอบ 935Ag ระบบ Ag-Cu-Zn-Si (a) 0.5Zn (b) 0.05Si (c) 0.5Zn-0.05Si (d) 1.0Zn-0.1Si (e) 1.0Zn-0.3Si และ (f) 2.0Zn-0.05Si

3.2 การวัดความแข็ง

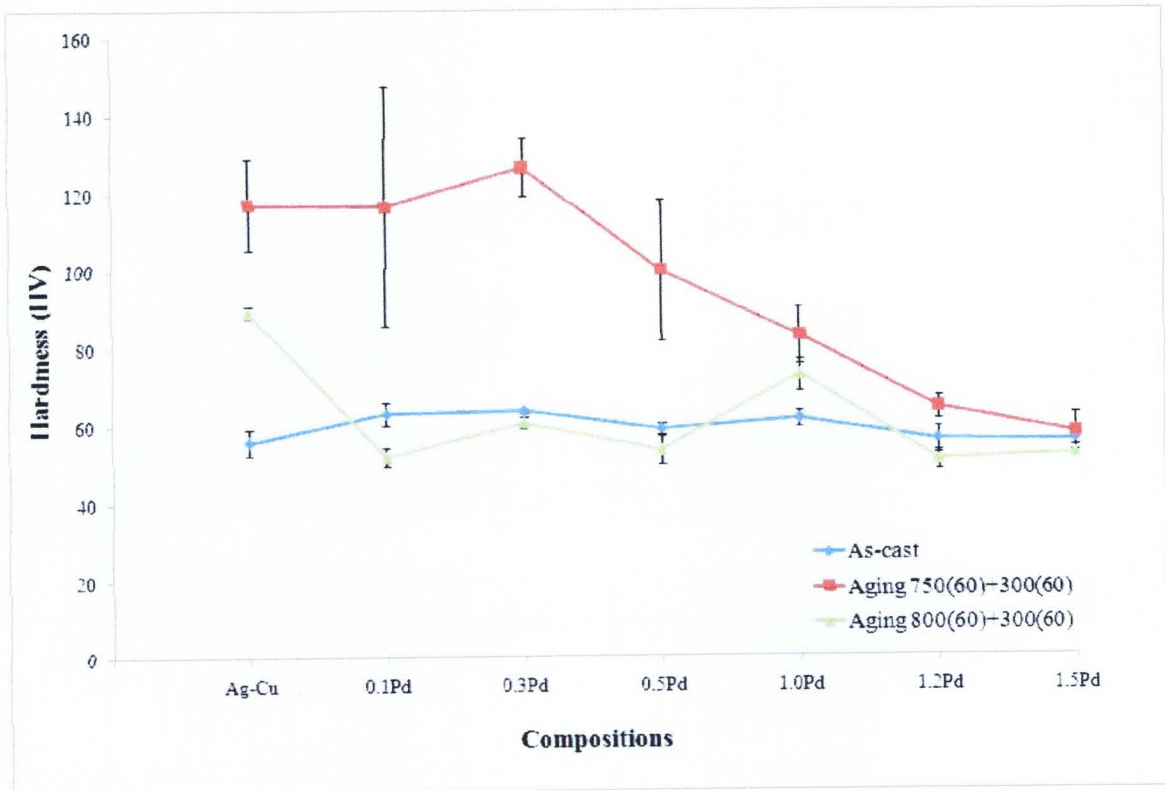
ผลจากการทดสอบค่าความแข็งของโลหะผสมเงินซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM 384-99 โดยใช้แรงกด 1 kgf เวลา 10 วินาที จำนวนชิ้นงานละ 5 บริเวณ ในโลหะผสมเงิน Ag-Cu-Pd และ Ag-Cu-Zn-Si ในสภาวะหลังหล่อและหลังปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการบ่มแข็ง ผลการทดลองรายละเอียดดังนี้

3.2.1 การวัดความแข็งโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Pd

การวัดความแข็งในโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Pd แสดงดังตารางที่ 3.2 พบว่าค่าความแข็งหลังหล่อมีค่าเฉลี่ย 59.39 HV ซึ่งเป็นค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิงโดยทั่วไปโดย และเมื่อขึ้นงานดังกล่าวผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวิธีทางความร้อน โดยการอบละลายที่อุณหภูมิ 750°C เวลา 60 นาที ตามด้วยการอบบ่มที่อุณหภูมิ 300°C เวลา 60 นาที ชิ้นงานทุกสภาวะมีความแข็งเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 95 HV และที่อุณหภูมิอบละลายเพิ่มขึ้นเป็น 800°C เวลา 60 นาที ตามด้วยการอบบ่มที่อุณหภูมิ 300°C เวลา 60 นาที โลหะทุกส่วนผสมจะมีความแข็งลดลง มีความแข็งเฉลี่ย 61.72 HV ความแข็งของโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Pd สภาวะหลังหล่อและหลังการบ่มแข็ง แสดงดังรูปที่ 3.4

ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบความแข็งของโลหะผสมเงิน 935Ag ระบบ Ag-Cu-Pd

สภาวะ	ชิ้นงาน	ส่วนผสม (%wt)		ความแข็ง HV						ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความแข็งเฉลี่ย
		Cu	Pd	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย		
หลังหล่อ	1	6.5	-	53.9	61.9	54.9	53.5	55.5	55.94	± 3.42	59.39
	2	6.4	0.1	67	63	64	62.2	59.3	63.10	± 2.79	
	3	6.2	0.3	64.3	63.7	62.7	64.2	63.8	63.74	± 0.63	
	4	6.0	0.5	58.5	57.5	58.7	61.2	59.4	59.06	± 1.37	
	5	5.5	1.0	61.5	62.9	60.9	58.7	64.4	61.68	± 2.14	
	6	5.3	1.2	54.2	57.9	51.6	58.2	59.3	56.24	± 3.22	
	7	5.0	1.5	55.9	57.9	54.1	56.7	55.3	55.98	± 1.43	
บ่มแข็ง 750°C	1	6.5	-	108.7	123.9	104.9	134	114.3	117.16	± 11.82	95.12
	2	6.4	0.1	144.7	120	96.3	147	75.4	116.68	± 30.96	
	3	6.2	0.3	132.1	124.1	126.9	134.6	115.3	126.60	± 7.55	
	4	6.0	0.5	110.2	119.7	81.4	79.9	108.9	100.02	± 18.17	
	5	5.5	1.0	87.7	83.5	78.3	92.2	73.6	83.06	± 7.37	
	6	5.3	1.2	63.6	63.8	63.4	69.5	62.1	64.48	± 2.88	
	7	5.0	1.5	57.6	57.6	65.7	55.4	53	57.86	± 4.77	
บ่มแข็ง 800°C	1	6.5	-	95.2	80.7	88	89.2	92.5	89.12	± 5.49	61.72
	2	6.4	0.1	50	54.1	52.6	52.9	50.9	52.10	1.63	
	3	6.2	0.3	61.6	64.5	59.1	58.2	60.3	60.74	2.46	
	4	6.0	0.5	52.8	54.2	52.3	55.8	53.3	53.68	1.37	
	5	5.5	1.0	68.1	71.6	74	73.5	77.6	72.96	3.47	
	6	5.3	1.2	47.3	52.1	57.8	48.9	48.9	51.00	4.18	
	7	5.0	1.5	51.3	51.6	54.4	49.2	55.8	52.46	2.62	



รูปที่ 3.4 กราฟเปรียบเทียบความแข็งของชิ้นงานในระบบ Ag-Cu-Pd

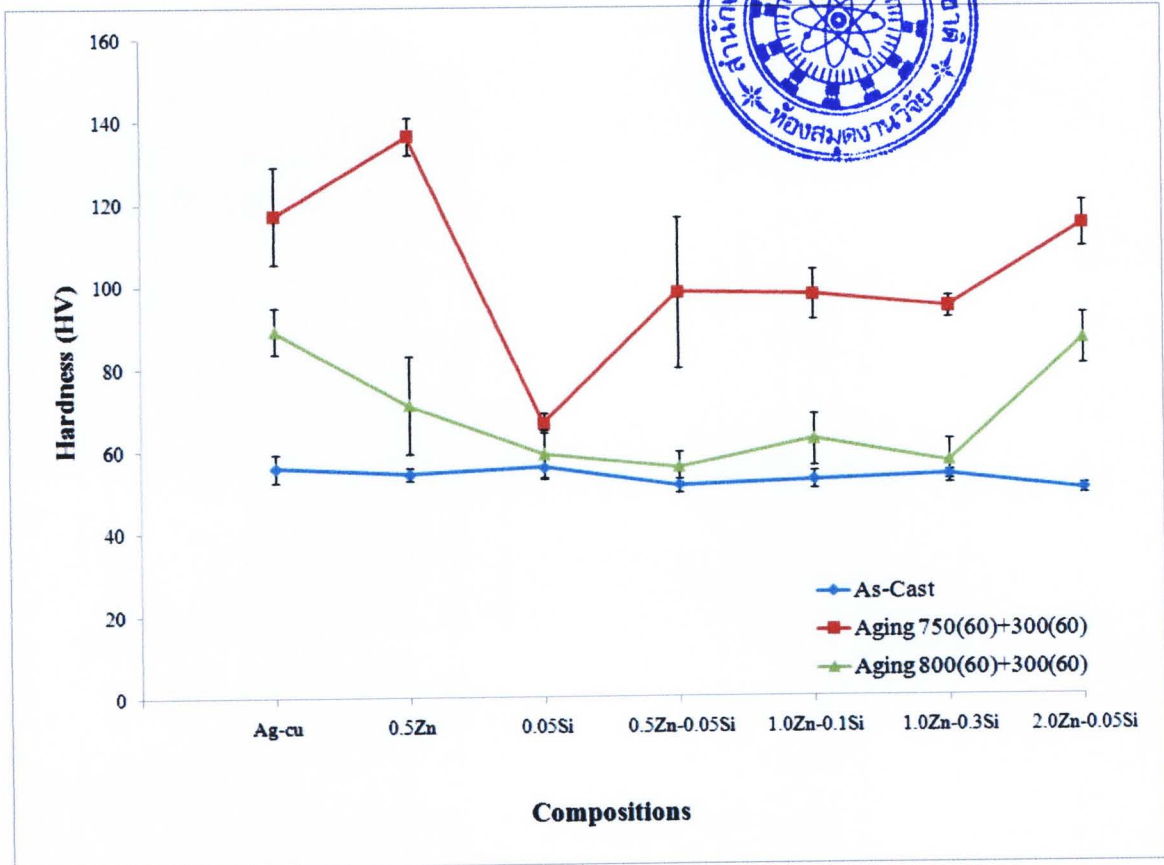
เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิงในรูปที่ 3.4 สภาวะหลังหล่อพบว่าความแข็งของโลหะผสมเงินทุกส่วนผสมมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 60 HV หลังการบ่มแข็งที่สภาวะการอบละลาย 750°C เวลา 60 นาที ตามด้วยการอบบ่มที่อุณหภูมิ 300°C เวลา 60 นาที ชิ้นงานทุกสภาวะมีความแข็งเพิ่มขึ้น โดยค่าความแข็งเพิ่มขึ้น 2 เท่า ในสภาวะที่มีส่วนผสม Pd ต่ำ (0-0.3wt%) โดยมีความแข็งเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ 126.60 HV ในชิ้นงาน 6.2Cu-0.3Pd โดยค่าความแข็งจะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณของ Pd เพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีความแข็งอยู่ในระดับเดียวกับสภาวะหลังหล่อในชิ้นงาน 1.5wt%Pd อย่างไรก็ตามการบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูงขึ้นคือ อุณหภูมิอบละลาย 800°C เวลา 60 นาที ตามด้วยการอบบ่มที่อุณหภูมิ 300°C เวลา 60 นาที พบว่าความแข็งในทุกสภาวะมีค่าลดลง โดยชิ้นงานโลหะผสมเงินมาตรฐานซึ่งมีส่วนผสม 935Ag-5.2Cu (ไม่มี Pd) เป็นสภาวะที่มีความแข็งมากที่สุดคือ ประมาณ 89 HV จากการวัดค่าความแข็งดังกล่าวนี้สามารถกล่าวได้ว่าการเจือ Pd มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในกระบวนการบ่มแข็ง โดยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 750°C เวลา 60 นาที สามารถเพิ่มความแข็งเป็น 2 เท่า ของความแข็งหลังหล่อได้

3.2.2 การวัดความแข็งโลหะผสมเงิน Ag-Cu-Zn-Si

พิจารณาค่าความแข็งในตารางที่ 3.3 พบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานหลังหล่อมีค่าเฉลี่ยประมาณ 53 HV และเมื่อชิ้นงานดังกล่าวผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวิธีทางความร้อน โดยการอบละลายที่อุณหภูมิ 750°C เวลา 60 นาที ตามด้วยการอบบ่มที่อุณหภูมิ 300°C เวลา 60 นาที ชิ้นงานทุกสภาวะมีความแข็งเพิ่มขึ้น มีค่าเฉลี่ย 103 HV ในขณะที่สภาวะการอบละลายที่อุณหภูมิสูง 800°C เวลา 60 นาที ตามด้วยการอบบ่มที่อุณหภูมิ 300°C เวลา 60 นาที ชิ้นงานทุกสภาวะมีความแข็งลดลงโดยมีค่าเฉลี่ย 68.75 HV ความแข็งของโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Zn-Si สภาวะหลังหล่อและหลังการบ่มแข็ง แสดงดังรูปที่ 3.5

ตารางที่ 3.3 ผลการทดสอบความแข็งของโลหะผสมเงิน 935Ag ระบบ Ag-Cu-Zn-Si

สภาวะ	ชิ้นงาน	อัตราส่วน (%wt)			ความแข็ง HV					ค่าเฉลี่ย \bar{x}	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความแข็งเฉลี่ย
		Cu	Zn	Si	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5			
หลังหล่อ	1	6.5	-	-	53.9	61.9	54.9	53.5	55.5	55.94	± 3.42	53.45
	2	6.0	0.5	-	52.3	54	53.8	54.4	56.9	54.28	± 1.66	
	3	6.45	-	0.05	59	57.7	55.1	51.7	55.7	55.84	± 2.79	
	4	5.9	0.5	0.05	53.2	48.9	50.3	52.1	52.4	51.38	± 1.74	
	5	5.4	1.0	0.1	48.8	53.3	53.2	53.8	54.4	52.70	± 2.23	
	6	5.2	1.0	0.3	55	55.3	54.5	51.9	54.2	53.80	± 1.20	
	7	4.45	2.0	0.05	50.4	49	51.8	49	50.6	50.16	± 1.18	
บ่มแข็ง 750°C	1	6.5	-	-	108.7	123.9	104.9	134	114.3	117.16	± 11.82	103.57
	2	6.0	0.5	-	131.4	138	136.3	133.2	143	136.38	± 4.51	
	3	6.45	-	0.05	65	63.4	69.2	68.4	66.5	66.50	± 2.38	
	4	5.9	0.5	0.05	128.2	90.1	102.2	89	81.6	98.22	± 18.31	
	5	5.4	1.0	0.1	96.5	107.9	96.5	91.6	95.4	97.58	± 6.11	
	6	5.2	1.0	0.3	95.7	97	92.5	91.1	96.6	94.58	± 2.62	
	7	4.45	2.0	0.05	110.5	107.7	116.3	121.8	116.5	114.56	± 5.53	
บ่มแข็ง 800°C	1	6.5	-	-	95.2	80.7	88	89.2	92.5	89.12	± 5.49	68.75
	2	6.0	0.5	-	55.4	76.2	69.3	83.1	71	71.00	± 11.82	
	3	6.45	-	0.05	66.7	63.1	52.1	56.7	56.6	59.04	± 5.80	
	4	5.9	0.5	0.05	49.2	56.6	58.6	58	56.4	55.76	± 3.78	
	5	5.4	1.0	0.1	56.6	68.2	69.6	61.5	56.5	62.48	± 6.22	
	6	5.2	1.0	0.3	55.6	62.8	55.3	50.1	61.7	57.10	± 5.20	
	7	4.45	2.0	0.05	91.8	89.6	79.5	92.3	80.7	86.78	± 6.20	



รูปที่ 3.5 กราฟเปรียบเทียบความแข็งของชิ้นงานในระบบ Ag-Cu-Zn-Si

จากการทดลองการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวิธีการบ่มแข็งสามารถเพิ่มความแข็งของโลหะในระบบ Ag-Cu-Zn-Si ประมาณสองเท่าคือ จากประมาณ 53 HV ในสภาวะหลอมเป็น 103 HV โดยชิ้นงานที่สามารถเพิ่มความแข็งได้มากที่สุดคือ 93.5Ag-6.0Cu-0.5Zn (รหัส 935 Zn-Si 1) คือสามารถเพิ่มจาก 54.28 HV เป็น 136.38 HV จากกราฟค่าความแข็งของชิ้นงานหลังการบ่มแข็งในทุกสภาวะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, SD) สูงกว่าชิ้นงานหลอม อาจเนื่องจากโครงสร้างหลังการบ่มแข็งมีเฟสไม่สม่ำเสมอ เฟสไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน (non-homogenize) และเนื่องจากความแข็งในการทดลองทำโดย

การวัดความแข็งแบบสุ่มจำนวน 5 ครั้ง และคำนวณค่าเฉลี่ย ดังนั้นหากโครงสร้างหลังกระบวนการบ่มแข็งมีลักษณะแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ค่าความแข็งที่ได้อาจมีความแตกต่างกันมาก

หากพิจารณาค่าความแข็งจากธาตุผสมของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้งสองระบบคือ Ag-Cu-Pd และ Ag-Cu-Zn-Si พบว่าการอบละลายที่อุณหภูมิ 750°C เวลา 60 นาที มีความเหมาะสมต่อการปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ในขณะที่การอบละลายที่อุณหภูมิสูง 800°C เวลา 60 นาที มีผลให้ค่าความแข็งลดลง โดยค่าความแข็งดังกล่าวมีผลจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

3.3 การทดสอบความสามารถในการต้านทานการหมอง

ชิ้นงานหลังหล่อและหลังการบ่มแข็งถูกทดสอบความต้านทานการหมองโดยการทดสอบภายใต้สภาวะบรรยากาศของสารละลาย Na_2S 0.1% เป็นเวลา 15-180 นาที โดยชิ้นงานทดสอบขนาด $10 \times 10 \times 1$ มม. ถูกขัดด้วยกระดาษทรายและขัดเรียบสุดท้ายด้วยผงอลูมินา ขนาด $0.3 \mu\text{m}$ การวัดสีขึ้นทดสอบหลังการทดสอบการหมองโดยใช้เครื่องวัดสีตามระบบมาตรฐานการวัดสี CIELAB ด้วยเครื่อง X-Rite Spectrometer (Model 972) ทำการวัดบนพื้นที่ผิว 10×10 มม. โดยค่าสีที่ได้รับระบุเป็นค่า L^* , a^* , b^* ความหมายดังนี้

- L^* หมายถึง ความสว่าง
- $+a^*$ หมายถึง อยู่ในทิศทางของสีแดง
- $-a^*$ หมายถึง อยู่ในทิศทางของสีเขียว
- $+b^*$ หมายถึง อยู่ในทิศทางของสีเหลือง
- $-b^*$ หมายถึง อยู่ในทิศทางของสีน้ำเงิน

โดยข้อมูลที่ได้จากการวัดสีเป็นการแสดงค่าเฉลี่ยความแตกต่างของสี (ΔE) โดยเปรียบเทียบค่าสีที่วัดได้จากตัวอย่างนั้นๆ กับค่าสีที่วัดได้จากชิ้นตัวอย่างที่ไม่ได้ทำการทดสอบการหมอง (เวลาทดสอบ 0 นาที) จากความแตกต่างของสี ค่า L^* , a^* , b^* เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดจำนวน 3 ครั้ง ในขณะที่ค่า ΔL^* , Δa^* และ Δb^* เป็นค่าความแตกต่างของ L^* , a^* , b^* เปรียบเทียบกับชิ้นงานทดสอบที่เวลา 0 นาที ดังนั้นค่าความแตกต่างของสีที่เวลาทดสอบนั้นๆ แสดงค่า ΔE การทดสอบความสามารถในการต้านทานการหมองที่เวลาต่างๆ ในขั้นทดสอบทั้งสภาวะหลังหล่อและหลังการบ่มแข็ง รายละเอียดดังนี้

3.3.1 การต้านทานการหมองของโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Pd

จากการทดสอบการหมองของโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Pd ในสภาวะหลังหล่อ (รูปที่ 3.6a) พบว่าที่เวลาทดสอบ 15 และ 30 นาที ผิวชิ้นทดสอบเปลี่ยนเป็นสีเหลือง-น้ำตาล โดยชิ้นทดสอบ 1.0Pd และ 1.2Pd มีสีใกล้เคียงกับชิ้นทดสอบเปรียบเทียบซึ่งไม่ได้ทำการทดสอบการหมอง (เวลา 0 นาที) โดยที่เวลา 45-180 นาที ผิวชิ้นทดสอบเริ่มเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเข้มเป็นน้ำตาลดำในชิ้นทดสอบที่มีปริมาณ Cu สูง 6.0-6.5 % โดยผิวทดสอบที่สามารถทนการหมองได้ดีที่สุดคือชิ้นทดสอบที่มีส่วนผสม 1.0-1.2 %Pd

การทดสอบการหมองในสภาวะหลังบ่มแข็ง พบว่าชิ้นทดสอบจะสูญเสียความสามารถในการต้านทานการหมอง ที่เวลาทดสอบ 15 นาที ผิวชิ้นทดสอบเกิดการหมองเป็นสีน้ำตาลอ่อน โดยมีกระจายของบริเวณสีน้ำตาลเข้มบางบริเวณ โดยชิ้นทดสอบที่สามารถต้านทานการหมองได้ดีที่สุดคือ 1.0Pd เมื่อเวลาทดสอบเพิ่มขึ้น (30 นาที) ผิวชิ้นทดสอบทุกชิ้นเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มและเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลดำเมื่อเวลาทดสอบเพิ่มขึ้น ลักษณะพื้นผิวจากการหมองมีการกระจายตัวแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (non-uniform tarnish surface) ดังแสดงในรูปที่ 3.6b

Tarnish test under Na ₂ S 0.1% (As-cast)									
Composition (wt%)			Time (min)						
Ag	Cu	Pd	0	15	30	45	60	120	180
93.5	6.5	-							
93.5	6.4	0.1							
93.5	6.2	0.3							
93.5	6.0	0.5							
93.5	5.5	1.0							
93.5	5.3	1.2							
93.5	5.0	1.5							

(a)

Tarnish test under Na ₂ S 0.1% (Aging)									
Composition (wt%)			Time (min)						
Ag	Cu	Pd950	0	15	30	45	60	120	180
93.5	6.5	-							
93.5	6.4	0.1							
93.5	6.2	0.3							
93.5	6.0	0.5							
93.5	5.5	1.0							
93.5	5.3	1.2							
93.5	5.0	1.5							

(b)

รูปที่ 3.6 การต้านทานการหมองในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Cu-Pd ทดสอบภายใต้สภาวะสารละลาย Na₂S เข้มข้น 0.1% (a) สภาวะหลังหล่อ และ (b) สภาวะหลังบ่มแข็งที่อุณหภูมิอบละลาย 750°C/60 นาที และอบบ่ม 300°C/60 นาที

ผลการวัดสีบนผิวตัวอย่างในสภาวะหลังหล่อและหลังการบ่มแข็งของโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Pd แสดงดังตารางที่ 3.4-3.5 โดยการวัดความต้านทานการหมองกระทำบนตัวอย่างที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติด้านความแข็งโดยการอบละลายที่อุณหภูมิ 750°C เวลา 60 นาที และอบบ่มที่อุณหภูมิ 300°C เวลา 60 นาที เนื่องจากสภาวะดังกล่าวเหมาะสมต่อการบ่มแข็งมากกว่าการอบละลายที่อุณหภูมิ 800°C เวลา 60 นาที และอบบ่มที่อุณหภูมิ 300°C เวลา 60 นาที จากตารางที่ 3.4 ไม่สามารถระบุค่า ΔL^* , Δa^* , Δb^* และ ΔE เนื่องจากขั้นตอนทดสอบสภาวะหลังหล่อในทุกส่วนผสมที่เวลาทดสอบ 0 นาที นั้นใช้เป็นชิ้นงานอ้างอิง เพื่อเทียบกับสภาวะอื่นๆ ทั้งจากขั้นตอนทดสอบการหมองหลังหล่อที่เวลาต่างๆ และขั้นตอนทดสอบที่ผ่านการบ่มแข็ง ดังนั้นค่า ΔL^* , Δa^* , Δb^* และ ΔE ในตารางที่ 3.5 เวลาทดสอบ 0 นาที จึงเปรียบเทียบจากค่าความแตกต่างของสีจากขั้นตอนทดสอบสภาวะหลังหล่อนี้เช่นกัน

ตารางที่ 3.4 การวัดสีระบบ CIELAB ในโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Pd สภาวะหลังหล่อ

รหัส	เวลาทดสอบ (min)	CIELAB			CIELAB color difference			
		L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE
935 Ag-Cu	0	41.39	3.96	2.82	-	-	-	-
	15	29.48	1.47	1.90	-11.91	-2.49	-0.92	12.20
	30	24.02	1.88	0.78	-17.37	-2.08	-2.04	17.61
	45	30.35	3.23	5.20	-11.04	-0.73	2.38	11.32
	60	22.66	0.89	2.41	-18.73	-3.07	-0.41	18.98
	120	25.54	2.44	2.86	-15.85	-1.52	0.04	15.92
	180	24.04	2.64	-0.74	-17.35	-1.32	-3.56	17.76
935 Pd V1	0	43.57	5.56	1.17	-	-	-	-
	15	30.32	2.81	7.53	-13.25	-2.75	6.36	14.95
	30	29.59	1.87	3.22	-13.98	-3.69	2.05	14.60
	45	26.58	-0.60	1.30	-16.99	-6.16	0.13	18.07
	60	24.99	2.24	2.31	-18.58	-3.32	1.14	18.91
	120	21.05	1.99	0.59	-22.52	-3.57	-0.58	22.81
	180	23.80	2.51	1.16	-19.77	-3.05	-0.01	20.00
935 Pd V2	0	45.85	-2.23	0.70	-	-	-	-
	15	25.41	0.41	2.11	-20.44	-5.15	0.94	21.10
	30	27.61	-1.36	1.39	-18.24	-6.92	0.22	19.51
	45	26.72	0.81	1.73	-19.13	-4.75	0.56	19.72
	60	32.08	-0.37	4.82	-13.77	-5.93	3.65	15.43
	120	24.26	2.92	2.37	-21.59	-2.64	1.20	21.78
	180	24.17	1.74	4.83	-21.68	-3.82	3.66	22.32

ตารางที่ 3.4 (ต่อ) การวัดสีระบบ CIELAB ในโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Pd สภาวะหลังหล่อ

รหัส	เวลาทดสอบ (min)	CIELAB			CIELAB color difference			
		L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE
935 Pd V3	0	46.23	-3.46	2.00	-	-	-	-
	15	28.50	-0.61	0.98	-17.73	2.85	-1.02	17.99
	30	27.44	1.55	2.61	-18.79	5.01	0.61	19.46
	45	28.60	1.20	5.48	-17.63	4.66	3.48	18.56
	60	26.93	2.38	5.64	-19.30	5.84	3.64	20.49
	120	24.95	1.43	5.35	-21.28	4.89	3.35	22.09
	180	22.61	3.26	1.54	-23.62	6.72	-0.46	24.56
935 Pd V4	0	34.29	1.10	-2.60	-	-	-	-
	15	31.26	-0.71	-1.10	-3.03	-1.81	1.50	3.83
	30	24.83	2.23	0.85	-9.46	1.13	3.45	10.13
	45	21.36	2.34	2.43	-12.93	1.24	5.03	13.93
	60	24.57	0.05	-1.85	-9.72	-1.05	0.75	9.81
	120	22.31	-2.35	5.21	-11.98	-3.45	7.81	14.71
	180	24.91	-0.01	3.85	-9.38	-1.11	6.45	11.44
935 Pd V5	0	42.41	1.26	-0.97	-	-	-	-
	15	29.35	-0.50	-2.91	-13.06	-1.76	-1.94	13.32
	30	29.98	-0.26	-0.84	-12.43	-1.52	0.13	12.52
	45	29.27	1.93	2.76	-13.14	0.67	3.73	13.68
	60	31.56	-0.13	4.34	-10.85	-1.39	5.31	12.16
	120	30.27	2.46	3.14	-12.14	1.20	4.11	12.87
	180	26.97	1.37	2.47	-15.44	0.11	3.44	15.82
935 Pd V6	0	46.23	-4.68	1.52	-	-	-	-
	15	28.23	1.94	1.95	-18.00	6.62	0.43	19.18
	30	25.33	1.73	2.33	-20.90	6.41	0.81	21.88
	45	25.25	-0.76	1.54	-20.98	3.92	0.02	21.34
	60	30.01	-1.16	4.91	-16.22	3.52	3.39	16.94
	120	31.02	3.94	1.48	-15.21	8.62	-0.04	17.48
	180	27.18	2.56	0.45	-19.05	7.24	-1.07	20.41

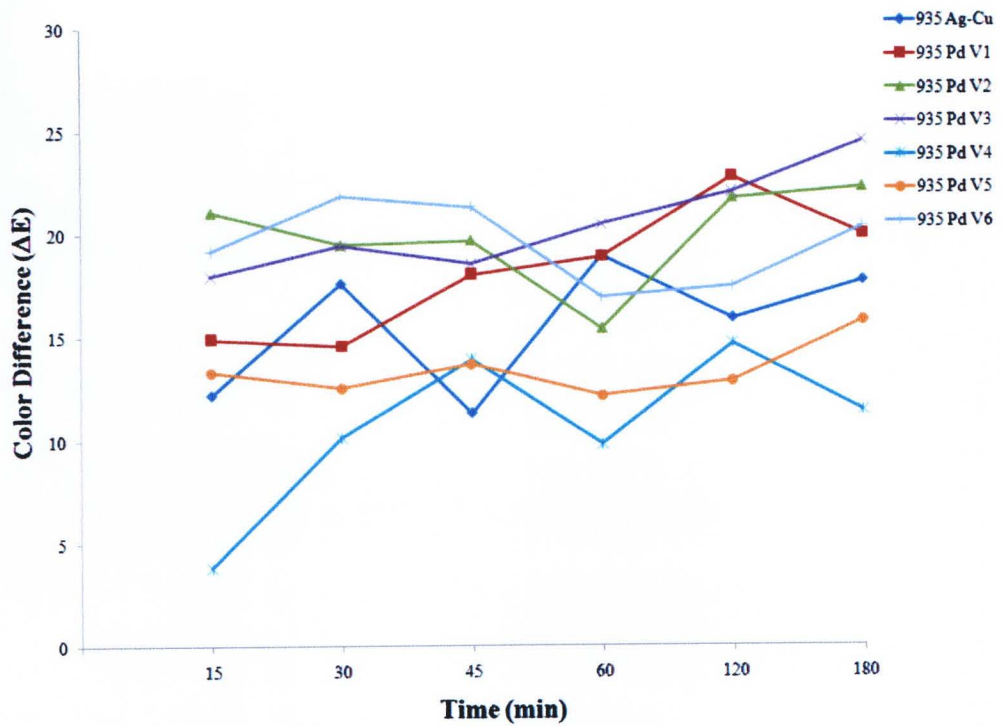
ตารางที่ 3.5 การวัดสีระบบ CIELAB ในโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Pd สภาวะหลังบ่มแข็งที่อุณหภูมิ
 อบละลาย 750°C/60 นาที และอบบ่ม 300°C/60 นาที

รหัส	เวลาดทดสอบ (min)	CIELAB			CIELAB color difference			
		L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE
935 Ag-Cu	0	32.13	1.67	-2.95	-9.26	-2.29	-5.77	11.15
	15	27.45	1.02	1.15	-13.94	-2.94	-1.67	14.34
	30	23.08	0.79	0.18	-18.31	-3.17	-2.64	18.77
	45	24.74	0.36	1.65	-16.65	-3.60	-1.17	17.07
	60	24.94	1.40	1.55	-16.45	-2.56	-1.27	16.70
	120	23.46	1.19	-0.25	-17.93	-2.77	-3.07	18.40
	180	21.70	1.00	0.18	-19.69	-2.96	-2.64	20.09
935 Pd V1	0	25.45	2.44	-1.30	-18.12	-3.12	-2.47	18.55
	15	25.26	1.50	-3.33	-18.31	-4.06	-4.50	19.29
	30	27.98	2.03	1.90	-15.59	-3.53	0.73	16.00
	45	28.17	-0.38	1.53	-15.40	-5.94	0.36	16.51
	60	24.31	2.35	1.05	-19.26	-3.21	-0.12	19.53
	120	25.82	1.71	-0.27	-17.75	-3.85	-1.44	18.22
	180	26.04	0.58	-0.41	-17.53	-4.98	-1.58	18.29
935 Pd V2	0	32.39	0.74	-2.22	-13.46	2.97	-2.92	14.09
	15	26.40	-0.71	1.63	-19.45	1.52	0.93	19.53
	30	26.68	1.62	1.26	-19.17	3.85	0.56	19.56
	45	28.30	-0.14	-1.24	-17.55	2.09	-1.94	17.78
	60	23.52	0.56	-0.91	-22.33	2.79	-1.61	22.56
	120	24.95	1.51	0.56	-20.90	3.74	-0.14	21.23
	180	26.17	-0.50	-1.94	-19.68	1.73	-2.64	19.93
935 Pd V3	0	31.71	-2.90	-3.49	-14.52	0.56	-5.49	15.53
	15	25.09	-2.23	-1.59	-21.14	1.23	-3.59	21.48
	30	25.01	0.08	2.32	-21.22	3.54	0.32	21.52
	45	26.26	2.05	0.98	-19.97	5.51	-1.02	20.74
	60	26.12	1.11	1.06	-20.11	4.57	-0.94	20.64
	120	23.93	2.91	1.23	-22.30	6.37	-0.77	23.20
	180	22.56	3.84	-0.20	-23.67	7.30	-2.20	24.87
935 Pd V4	0	30.30	-0.03	-1.82	-3.99	-1.13	0.78	4.22
	15	22.98	0.45	-0.75	-11.31	-0.65	1.85	11.48
	30	25.99	0.67	1.66	-8.30	-0.43	4.26	9.34
	45	25.98	0.80	0.00	-8.31	-0.30	2.60	8.71
	60	25.02	2.40	-1.79	-9.27	1.30	0.81	9.40
	120	26.34	-1.10	-0.49	-7.95	-2.20	2.11	8.51
	180	26.06	1.97	-0.55	-8.23	0.87	2.05	8.53

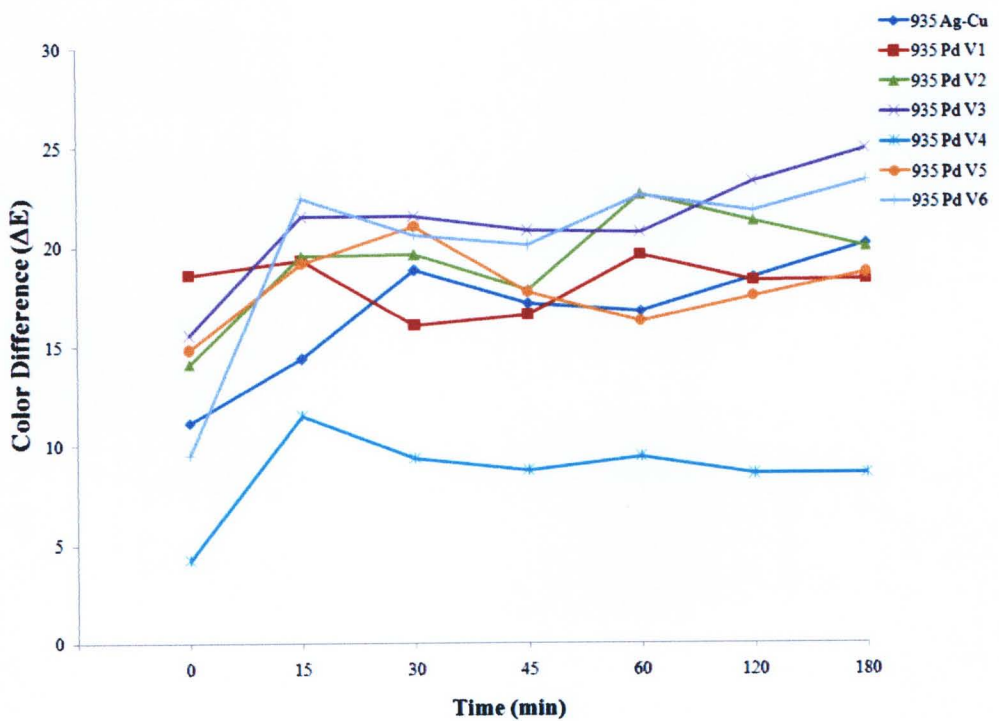
ตารางที่ 3.5 (ต่อ) การวัดสีระบบ CIELAB ในโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Pd สภาวะหลังบ่มแข็งที่ อุณหภูมิ อบละลาย 750°C/60 นาที และอบบ่ม 300°C/60 นาที

รหัส	เวลาดทดสอบ (min)	CIELAB			CIELAB color difference			
		L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE
935 Pd V5	0	27.90	-0.40	-3.42	-14.51	-1.66	-2.45	14.81
	15	23.58	-1.80	-2.36	-18.83	-3.06	-1.39	19.13
	30	21.54	2.97	0.72	-20.87	1.71	1.69	21.01
	45	24.74	1.14	-0.45	-17.67	-0.12	0.52	17.68
	60	26.26	2.54	-1.28	-16.15	1.28	-0.31	16.20
	120	24.99	2.22	-1.11	-17.42	0.96	-0.14	17.45
	180	24.00	3.70	0.07	-18.41	2.44	1.04	18.60
935 Pd V6	0	37.55	-2.84	-1.92	-8.68	1.84	-3.44	9.52
	15	25.02	2.06	4.24	-21.21	6.74	2.72	22.42
	30	26.67	1.63	1.52	-19.56	6.31	0.00	20.55
	45	27.09	1.07	0.67	-19.14	5.75	-0.85	20.00
	60	24.90	2.43	-0.16	-21.33	7.11	-1.68	22.55
	120	26.07	3.31	-0.20	-20.16	7.99	-1.72	21.75
	180	24.26	2.46	-1.22	-21.97	7.14	-2.74	23.26

จากการพิจารณาการวัดค่าความแตกต่างของสี ในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Cu-Pd สามารถเปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงค่า ΔE ในสภาวะหลังหล่อและหลังการบ่มแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ พบว่าชิ้นทดสอบรหัส 935 Pd V4 ซึ่งมีส่วนผสม 93.5Ag-5.5Cu-1.0Pd มีความต้านทานการหมองดีที่สุดในสภาวะหลังหล่อและหลังการบ่มแข็ง



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ΔE และเวลาในการทดสอบการหมองด้วย Na_2S 0.1% ในชิ้นทดสอบ 935Ag ระบบ Ag-Cu-Pd สภาวะหลังหล่อ



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ΔE และเวลาในการทดสอบการหมองด้วย Na_2S 0.1% ในชิ้นทดสอบ 935Ag ระบบ Ag-Cu-Pd สภาวะหลังบ่มแข็งที่อุณหภูมิ อบละลาย $750^\circ\text{C}/60$ นาที และอบบ่ม $300^\circ\text{C}/60$ นาที

3.3.2 การต้านทานการหมองของโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Zn-Si

รูปที่ 3.7a แสดงผลจากการทดสอบการหมองของโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Zn-Si ในสภาวะหลังหล่อ ภายใต้สภาวะบรรยากาศของสารละลาย Na_2S 0.1% เป็นเวลา 15-180 นาที พบว่าที่เวลาทดสอบ 15 นาที ผิวชั้นทดสอบที่มี Zn ปริมาณ 0-0.5wt% และมี S ปริมาณ 0-0.05 wt% เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ในขณะที่ชั้นทดสอบที่มีปริมาณ Zn และ Si มากกว่า 1.0wt%Zn และ 0.1wt%Si เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่เวลา 0 นาที พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงสีน้อย ที่เวลาทดสอบ 30-45 นาที ชั้นทดสอบทุกชั้นมีสีเข้มขึ้นเป็นสีน้ำตาลเข้ม และค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้ม-ดำที่เวลาทดสอบ 180 นาที โดยการทดสอบการหมองในสภาวะหลังบ่มแข็งที่อุณหภูมิอบละลาย $750^\circ\text{C}/60$ นาที และอบบ่ม $300^\circ\text{C}/60$ นาที (รูปที่ 3.6b) พบว่าชั้นทดสอบจะสูญเสียความสามารถในการต้านทานการหมอง ผิวชั้นทดสอบเกิดการหมองเป็นสีน้ำตาลและน้ำตาลเข้ม-ดำ โดยในชั้นทดสอบที่มีส่วนผสม 0-0.5wt%Zn จะเกิดการหมองรุนแรงที่เวลาทดสอบ 15 นาที ชั้นทดสอบที่มีส่วนผสม 0.05wt%Si ชั้นทดสอบมีการต้านทานการหมองได้ดีขึ้นและชั้นทดสอบที่มีปริมาณ 1.0wt%Zn และ 0.1-0.3wt%Si จากการสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าการกันหมองได้ดี อย่างไรก็ตามลักษณะพื้นผิวจากการหมองในทุกตัวอย่างมีการกระจายตัวแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (non-uniform tarnish surface) ผลการเปลี่ยนแปลงค่า ΔE ของชั้นทดสอบหลังหล่อและหลังบ่มแข็งแสดงดังตารางที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ

Tarnish test under Na ₂ S 0.1% (As-cast)										
Composition (wt%)				Time (min)						
Ag	Cu	Zn	Si	0	15	30	45	60	120	180
93.5	6.5	-	-							
93.5	6.0	0.5	-							
93.5	6.45	-	0.05							
93.5	5.95	0.5	0.05							
93.5	5.40	1.0	0.10							
93.5	5.20	1.0	0.30							
93.5	4.45	2.0	0.05							

(a)

Tarnish test under Na ₂ S 0.1% (Aging)										
Composition (wt%)				Time (min)						
Ag	Cu	Zn	Si	0	15	30	45	60	120	180
93.5	6.5	-	-							
93.5	6.0	0.5	-							
93.5	6.45	-	0.05							
93.5	5.95	0.5	0.05							
93.5	5.40	1	0.1							
93.5	5.20	1	0.3							
93.5	4.45	2	0.05							

(b)

รูปที่ 3.9 การต้านทานการหมองในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ทดสอบภายใต้สภาวะสารละลาย Na₂S เข้มข้น 0.1% ระบบ Ag-Cu-Zn-Si (a) สภาวะหลังหล่อ และ (b) สภาวะหลังบ่มแข็งที่อุณหภูมิอบละลาย 750°C/60 นาที และอบบ่ม 300°C/60 นาที

ตารางที่ 3.6 การวัดสีระบบ CIELAB ในโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Zn-Si สภาวะหลังหล่อ

รหัส	เวลาทดสอบ (min)	CIELAB			CIELAB color difference			
		L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE
935 Ag-Cu	0	39.26	2.92	0.34	-	-	-	-
	15	25.95	1.16	2.58	-13.31	-1.76	2.24	13.61
	30	27.25	0.17	3.54	-12.01	-2.75	3.20	12.73
	45	25.08	1.62	0.10	-14.18	-1.30	-0.24	14.24
	60	23.76	0.83	-1.20	-15.50	-2.09	-1.54	15.72
	120	23.35	1.92	-4.18	-15.91	-1.00	-4.52	16.57
	180	28.42	1.17	-4.04	-10.84	-1.75	-4.38	11.82
935 Zn-Si V1	0	38.43	2.17	1.13	-	-	-	-
	15	22.96	2.26	3.66	-15.47	0.09	2.53	15.68
	30	24.44	2.36	1.58	-13.99	0.19	0.45	14.00
	45	22.22	1.28	1.30	-16.21	-0.89	0.17	16.24
	60	20.58	1.78	0.37	-17.85	-0.39	-0.76	17.87
	120	22.71	0.42	-2.53	-15.72	-1.75	-3.66	16.24
	180	24.85	-0.45	-1.44	-13.58	-2.62	-2.57	14.07
935 Zn-Si V2	0	42.83	-1.09	3.68	-	-	-	-
	15	26.82	1.50	2.38	-16.01	-0.67	1.25	16.07
	30	25.04	0.28	1.18	-17.79	-1.89	0.05	17.89
	45	23.91	-0.11	1.23	-18.92	-2.28	0.10	19.06
	60	25.94	1.72	0.36	-16.89	-0.45	-0.77	16.91
	120	23.71	1.00	-2.53	-19.12	-1.17	-3.66	19.50
	180	25.94	1.09	-2.78	-16.89	-1.08	-3.91	17.37
935 Zn-Si V3	0	42.39	0.95	-0.39	-	-	-	-
	15	27.20	0.78	1.59	-15.19	-0.17	1.98	15.32
	30	23.41	2.03	0.47	-18.98	1.08	0.86	19.03
	45	26.48	-0.30	2.07	-15.91	-1.25	2.46	16.15
	60	23.22	1.68	0.13	-19.17	0.73	0.52	19.19
	120	21.82	0.20	-1.18	-20.57	-0.75	-0.79	20.60
	180	21.93	1.92	-0.74	-20.46	0.97	-0.35	20.49
935 Zn-Si V4	0	36.51	1.03	0.85	-	-	-	-
	15	29.36	1.92	2.12	-7.15	0.89	1.27	7.32
	30	26.94	-0.16	2.46	-9.57	-1.19	1.61	9.78
	45	28.60	-0.14	1.62	-7.91	-1.17	0.77	8.03
	60	23.73	0.78	1.70	-12.78	-0.25	0.85	12.81
	120	22.05	1.56	-0.06	-14.46	0.53	-0.91	14.50
	180	21.54	1.61	-1.68	-14.97	0.58	-2.53	15.19



ตารางที่ 3.6 (ต่อ) การวัดสีระบบ CIELAB ในโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Zn-Si สภาวะหลังหล่อ

รหัส	เวลาทดสอบ (min)	CIELAB			CIELAB color difference			
		L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE
935 Zn-Si V5	0	38.30	1.80	-3.74	-	-	-	-
	15	30.05	0.19	2.67	-8.25	-1.61	6.41	10.57
	30	27.28	0.69	2.07	-11.02	-1.11	5.81	12.51
	45	32.36	-1.54	0.51	-5.94	-3.34	4.25	8.03
	60	23.45	0.60	1.53	-14.85	-1.20	5.27	15.80
	120	24.35	1.46	1.42	-13.95	-0.34	5.16	14.88
	180	22.32	1.89	0.61	-15.98	0.09	4.35	16.56
935 Zn-Si V6	0	42.52	1.37	-0.35	-	-	-	-
	15	26.55	3.26	1.95	-15.97	1.89	2.30	16.25
	30	31.11	0.70	1.86	-11.41	-0.67	2.21	11.64
	45	31.66	-0.69	3.23	-10.86	-2.06	3.58	11.62
	60	27.97	2.42	2.90	-14.55	1.05	3.25	14.95
	120	26.68	2.46	1.35	-15.84	1.09	1.70	15.97
	180	22.50	1.72	-0.62	-20.02	0.35	-0.27	20.02

ตารางที่ 3.7 การวัดสีระบบ CIELAB ในโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Zn-Si สภาวะหลังบ่มแข็งที่ อุณหภูมิอบละลาย 750°C/60 นาที และอบบ่ม 300°C/60 นาที

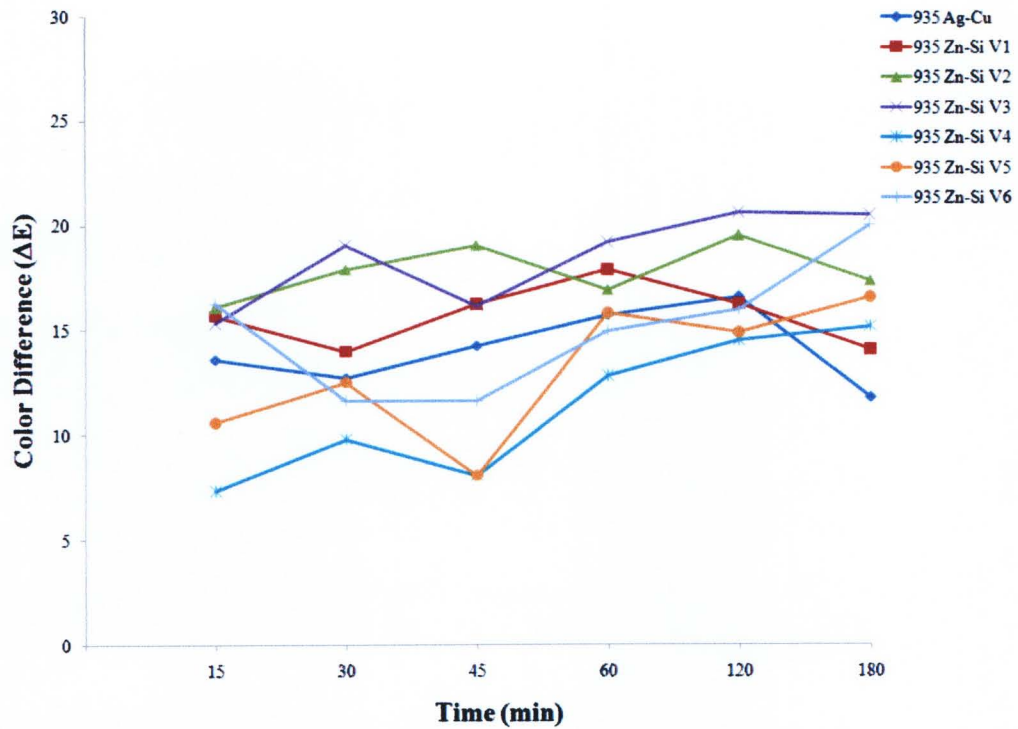
รหัส	เวลาทดสอบ (min)	CIELAB			CIELAB color difference			
		L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE
935 Ag-Cu	0	32.24	2.86	-3.08	-7.02	-0.06	-3.42	7.81
	15	27.51	1.30	1.06	-11.75	-1.62	0.72	11.88
	30	23.36	0.54	0.13	-15.90	-2.38	-0.21	16.08
	45	24.37	0.65	1.69	-14.89	-2.27	1.35	15.12
	60	25.03	1.30	1.65	-14.23	-1.62	1.31	14.38
	120	23.08	1.53	-0.38	-16.18	-1.39	-0.72	16.26
	180	22.04	1.33	0.50	-17.22	-1.59	0.16	17.29
935 Zn-Si V1	0	26.05	2.63	-1.58	-12.38	0.46	-2.71	12.68
	15	23.73	1.61	0.76	-14.70	-0.56	-0.37	14.72
	30	23.45	2.85	1.38	-14.98	0.68	0.25	15.00
	45	25.60	0.78	2.71	-12.83	-1.39	1.58	13.00
	60	26.19	2.41	2.95	-12.24	0.24	1.82	12.38
	120	23.39	0.16	1.81	-15.04	-2.01	0.68	15.19
	180	23.56	1.06	0.66	-14.87	-1.11	-0.47	14.92
935 Zn-Si V2	0	32.59	0.94	-2.28	-10.24	2.03	-5.96	12.02
	15	28.50	0.15	0.39	-14.33	1.24	-3.29	14.76
	30	24.81	-0.71	1.68	-18.02	0.38	-2.00	18.13
	45	25.60	0.78	2.71	-17.23	1.87	-0.97	17.36
	60	26.19	2.41	2.95	-16.64	3.50	-0.73	17.02
	120	23.39	0.16	1.81	-19.44	1.25	-1.87	19.57
	180	23.56	1.06	0.66	-19.27	2.15	-3.02	19.62
935 Zn-Si V3	0	31.85	-1.65	-2.24	-10.54	-2.60	-1.85	11.01
	15	26.54	0.15	0.11	-15.85	-0.80	0.50	15.88
	30	22.43	-0.74	-0.87	-19.96	-1.69	-0.48	20.04
	45	25.33	1.37	3.00	-17.06	0.42	3.39	17.40
	60	25.42	1.58	1.26	-16.97	0.63	1.65	17.06
	120	24.79	0.52	2.32	-17.60	-0.43	2.71	17.81
	180	26.30	-0.69	-0.46	-16.09	-1.64	-0.07	16.17
935 Zn-Si V4	0	29.96	-0.72	-1.75	-6.55	-1.75	-2.60	7.26
	15	23.38	-0.40	-0.79	-13.13	-1.43	-1.64	13.31
	30	22.75	0.16	0.06	-13.76	-0.87	-0.79	13.81
	45	27.23	1.07	2.80	-9.28	0.04	1.95	9.48
	60	24.64	1.02	0.25	-11.87	-0.01	-0.60	11.89
	120	23.86	1.48	0.18	-12.65	0.45	-0.67	12.68
	180	24.45	1.20	1.24	-12.06	0.17	0.39	12.07

ตารางที่ 3.7 (ต่อ) การวัดสีระบบ CIELAB ในโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Zn-Si สภาวะหลังบ่มแข็งที่ อุณหภูมิ อบละลาย 750°C/60 นาที และอบบ่ม 300°C/60 นาที

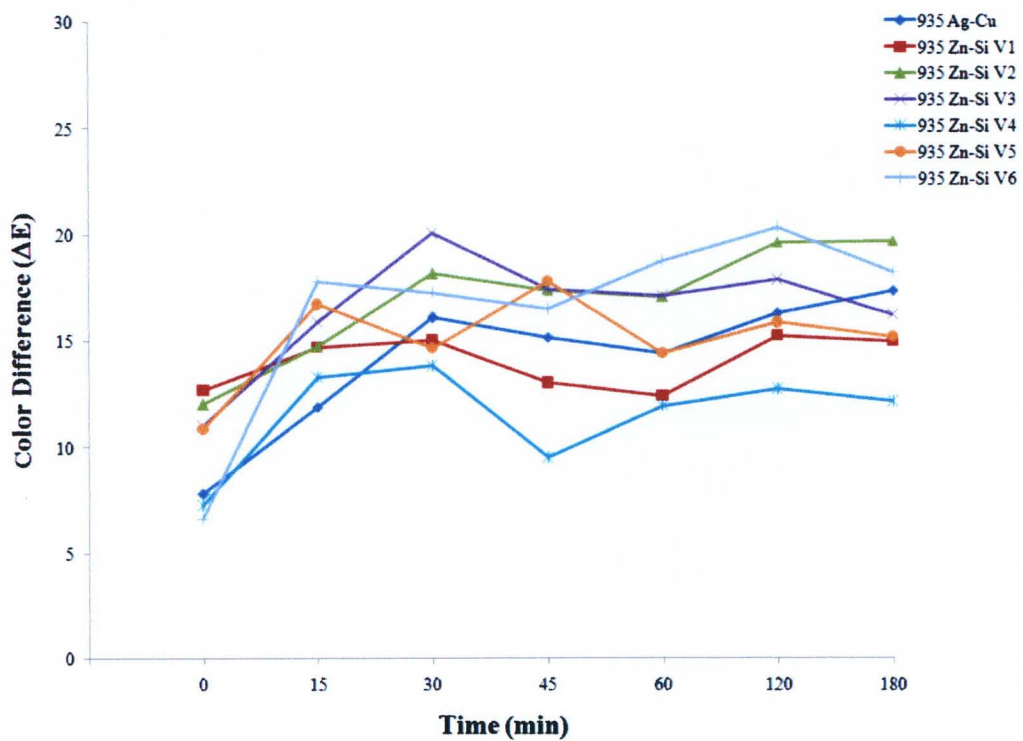
รหัส	เวลาทดสอบ (min)	CIELAB			CIELAB color difference			
		L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE
935 Zn-Si V5	0	27.76	-0.76	-3.39	-10.54	-2.56	0.35	10.85
	15	21.74	0.60	-1.67	-16.56	-1.20	2.07	16.73
	30	24.69	-1.15	0.79	-13.61	-2.95	4.53	14.64
	45	21.57	1.55	2.25	-16.73	-0.25	5.99	17.77
	60	24.93	3.17	1.38	-13.37	1.37	5.12	14.38
	120	22.85	1.79	-0.40	-15.45	-0.01	3.34	15.81
	180	23.85	1.65	0.70	-14.45	-0.15	4.44	15.12
935 Zn-Si V6	0	37.63	-2.81	-2.01	-4.89	-4.18	-1.66	6.64
	15	24.80	0.04	-1.16	-17.72	-1.33	-0.81	17.79
	30	25.28	1.46	-1.11	-17.24	0.09	-0.76	17.26
	45	27.06	-3.08	3.14	-15.46	-4.45	3.49	16.46
	60	23.88	0.59	0.94	-18.64	-0.78	1.29	18.70
	120	22.24	0.63	-0.63	-20.28	-0.74	-0.28	20.30
	180	24.41	0.20	0.37	-18.11	-1.17	0.72	18.16

รูปที่ 3.10 และ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ΔE และเวลาในการทดสอบการหมองด้วย Na_2S เข้มข้น 0.1% ของชิ้นทดสอบ 935Ag ระบบ Ag-Cu-Zn-Si สภาวะหลังหล่อและสภาวะหลังบ่มแข็งที่อุณหภูมิอบละลาย 750°C/60 นาที และอบบ่ม 300°C/60 นาที จากการวัดค่า ΔE ยืนยันผลของชิ้นทดสอบรหัส 935 Zn-Si V4 ซึ่งมีส่วนผสม 935Ag-5.4Cu-1.0Zn-0.1Si สามารถต้านทานการหมองได้ดีที่สุดซึ่งมีความสอดคล้องกับการสังเกตสีที่มองเห็นด้วยตาเปล่า

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลจากการทดสอบความสามารถในการต้านทานการหมองในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Cu-Pd และ Ag-Cu-Zn-Si สามารถกล่าวได้ว่าเมื่อธาตุเจือ Pd Zn และ Si มีปริมาณมากขึ้น (ปริมาณ Cu ลดลง) จะสามารถทนต่อการทดสอบการหมองเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของ Pd และ Si และการลดลงของ Cu ทำให้การต้านทานการหมองในโลหะผสมมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเติม Zn ไม่ส่งผลกระทบเป็นนัยสำหรับการหมอง โดยการวิเคราะห์ด้วย ICP (หัวข้อย่อย 3.1) ยืนยันปริมาณ Zn ในชิ้นทดสอบว่ามีได้สูญหายในระหว่างกระบวนการเตรียมตัวอย่าง



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ΔE และเวลาในการทดสอบการหมองด้วย Na_2S เข้มข้น 0.1% ของชิ้นทดสอบ 935Ag ระบบ Ag-Cu-Zn-Si สภาวะหลังหล่อ

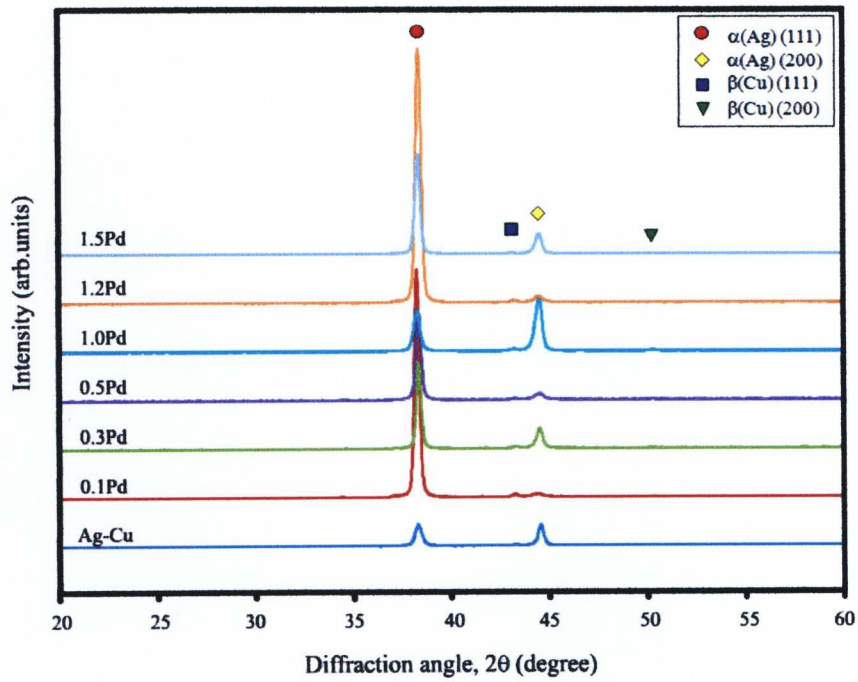


รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ΔE และเวลาในการทดสอบการหมองด้วย Na_2S เข้มข้น 0.1% ของชิ้นทดสอบ 935Ag ระบบ Ag-Cu-Zn-Si สภาวะหลังบ่มแข็งที่อุณหภูมิ อบละลาย $750^\circ\text{C}/60$ นาที และอบบ่ม $300^\circ\text{C}/60$ นาที

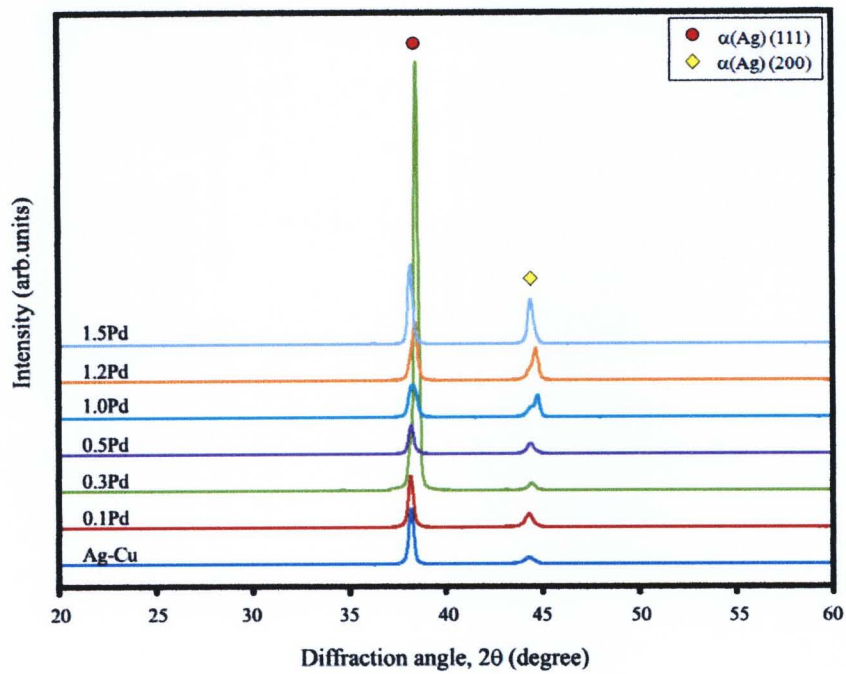
3.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)

จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD ของโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Pd และ Ag-Cu-Zn-Si ในสภาวะหลังหล่อและหลังบ่มแข็ง ดังรูปที่ 3.12-3.15 พบว่าประกอบด้วยระบบ Ag ตามมาตรฐาน JC-PDS file เลขที่ 87-0720 มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC มีค่า lattice parameter $a = 4.07724^{\circ}$ ที่ตำแหน่ง θ ตำแหน่ง $2\theta = 38.202^{\circ}$ และ 44.402° ซึ่งเป็นระนาบของ Ag (111) และ Ag (200) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบเฟส Cu ตามมาตรฐาน JC-PDS file เลขที่ 85-1326 มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC มีค่า lattice parameter $a = 3.615^{\circ}$ ณ ตำแหน่ง $2\theta = 43.317^{\circ}$ และ 50.449° ซึ่งเป็นระนาบของ Cu (111) และ Cu (200) ตามลำดับ

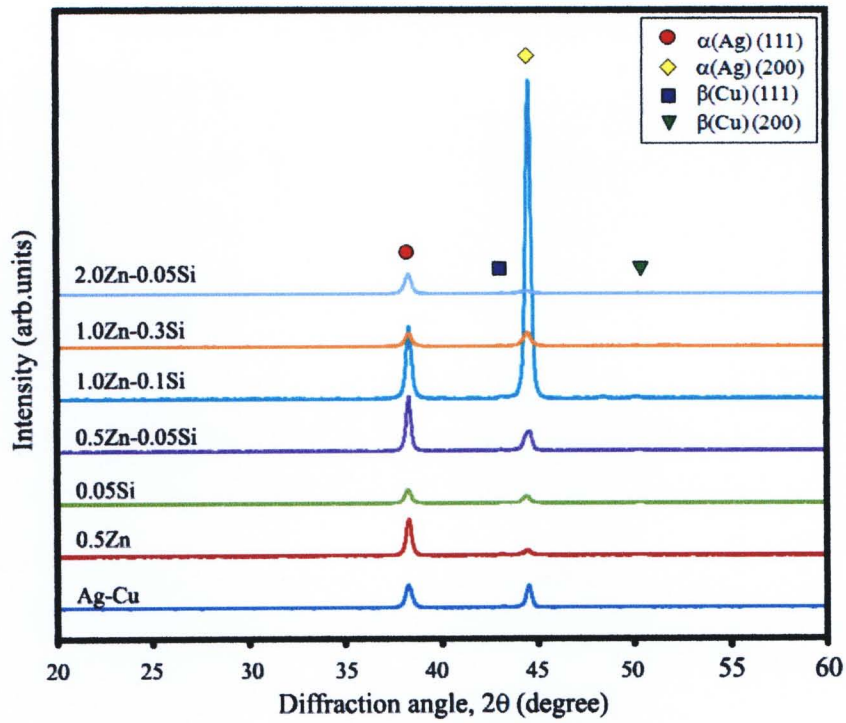
จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD ของชิ้นทดสอบสภาวะหลังบ่มแข็ง โดยการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 750°C เวลา 60 นาที และตามด้วยการอบบ่มที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 60 นาที พบว่ากราฟมีการเปลี่ยนแปลงคือ จะปรากฏเฟสของ Ag เพียงอย่างเดียว นั่นคือหลังจากกระบวนการบ่มแข็ง Cu ที่ตกตะกอนอยู่ก่อนหน้านี้บางส่วนได้ละลายรวมกับเฟสหลักของ Ag ทำให้ตะกอนของทองแดงมีปริมาณที่ลดลง จึงทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของทองแดงด้วยเทคนิค XRD ได้ (รูปที่ 3.13 และ 3.15)



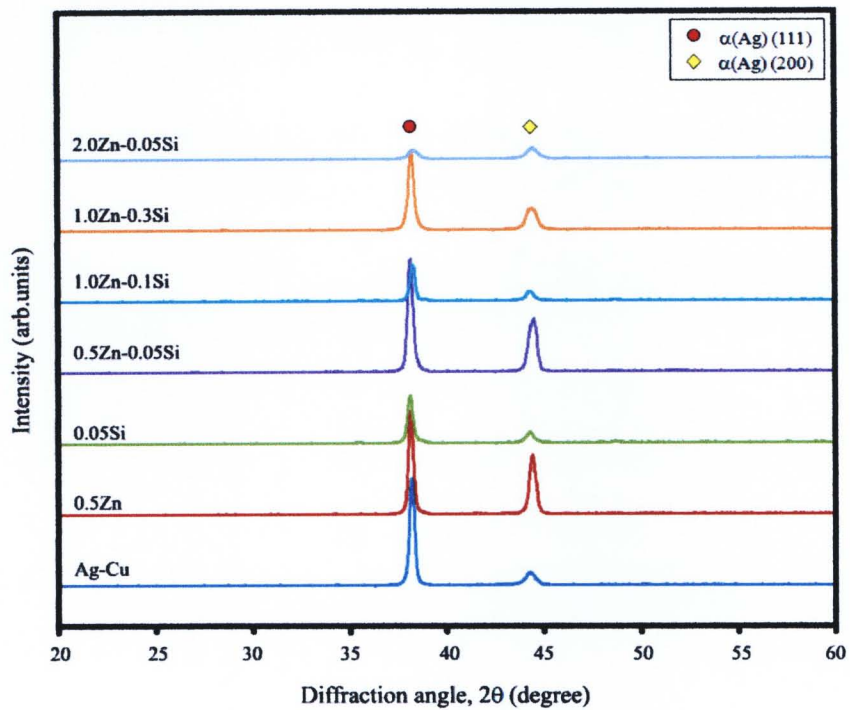
รูปที่ 3.12 ผลการโครงสร้างผลึกจาก XRD ของโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Pd หลังหล่อ



รูปที่ 3.13 ผลการโครงสร้างผลึกจาก XRD ของโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Pd หลังบ่มแข็งที่อุณหภูมิ
 อบละลาย 750°C/60 นาที และบ่มแข็ง 300°C/60 นาที



รูปที่ 3.14 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจาก XRD ของโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Zn-Si สภาวะหลังหล่อ



รูปที่ 3.15 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจาก XRD ของโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Zn-Si หลังบ่มแข็งที่อุณหภูมิอบละลาย 750°C/60 นาที และบ่มแข็ง 300°C/60 นาที

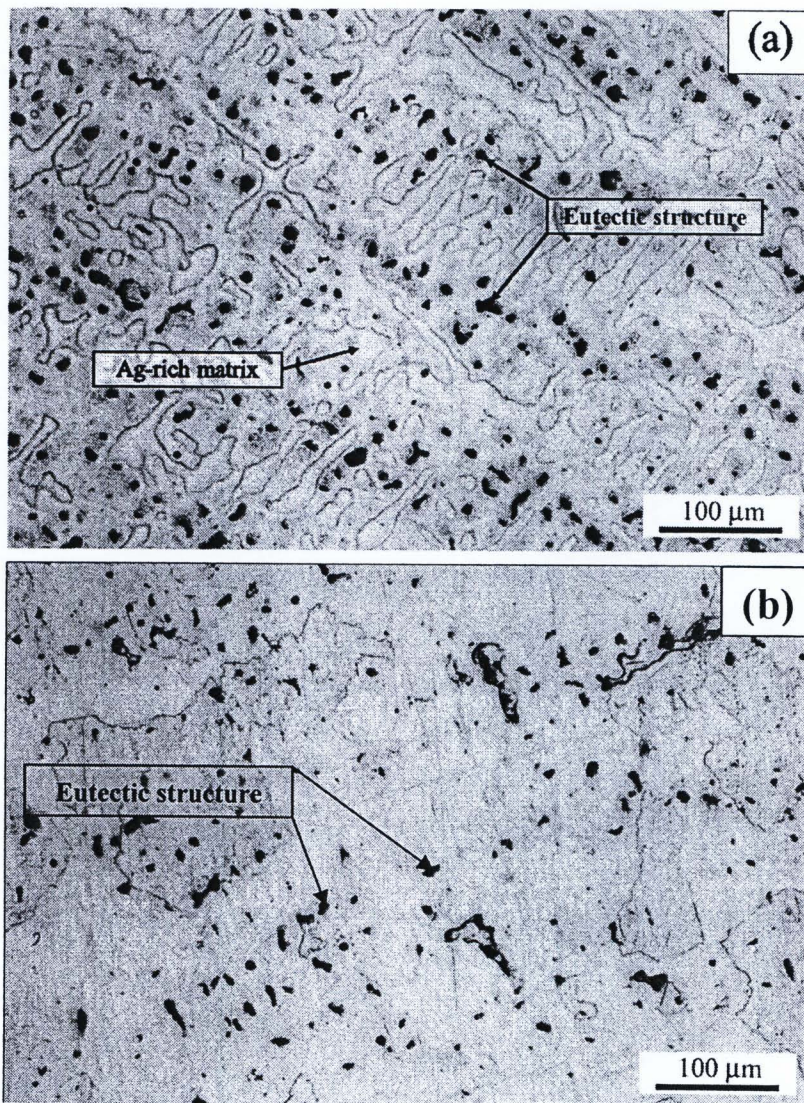
3.5 การตรวจโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสง

การศึกษาภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตามอัตราส่วนต่างๆจากกล้องจุลทรรศน์แสง ที่กำลังขยาย 50 และ 200 เท่า เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างโดยทั่วไป

3.5.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Ag-Cu

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสง พบว่าโครงสร้างของโลหะผสมเงิน มีลักษณะเป็นโครงสร้างคล้ายต้นไม้หรือเดนไดรต์ (dendrite) ของเฟสที่มีเงินเป็นส่วนผสมหลัก (Ag rich) และมีโครงสร้างยูเทคติก (Eutectic structure) อยู่ในช่องระหว่างเดนไดรต์ (interdendritic dendrite) ดังแสดงในรูปที่ 3.16a

หลังการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความด้วยความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็งโดยวิธีการบ่มแข็ง อุณหภูมิอบละลาย $750^{\circ}\text{C}/60$ นาที และบ่มแข็ง $300^{\circ}\text{C}/60$ นาที พบว่าโครงสร้างยูเทคติกส่วนมากมีการละลาย แต่ยังคงมีโครงสร้างยูเทคติกบางส่วนหลงเหลือและกระจายตัวอยู่ทั่วไปในโครงสร้างหลัก ดังแสดงในรูป 3.16b

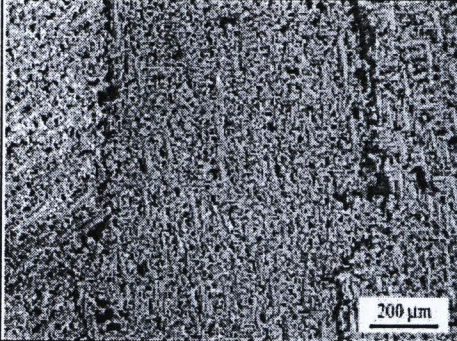
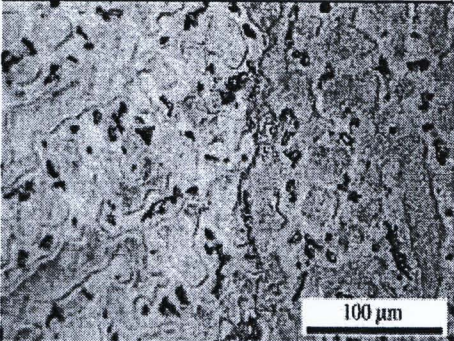
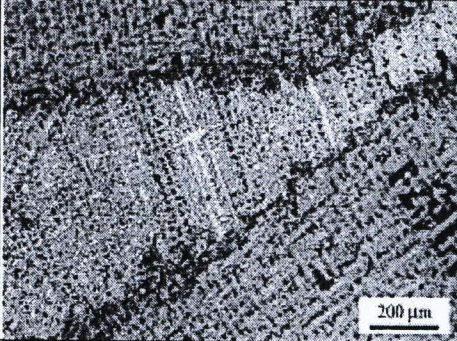
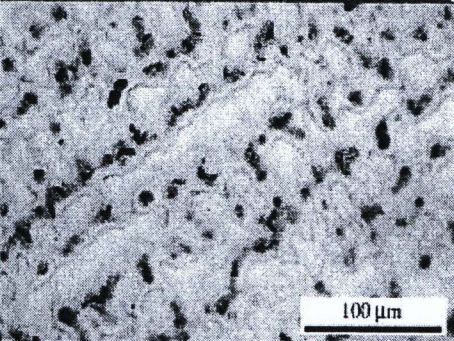
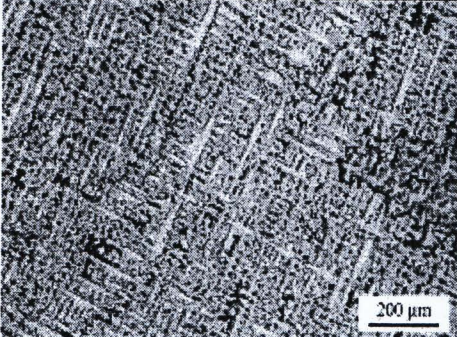
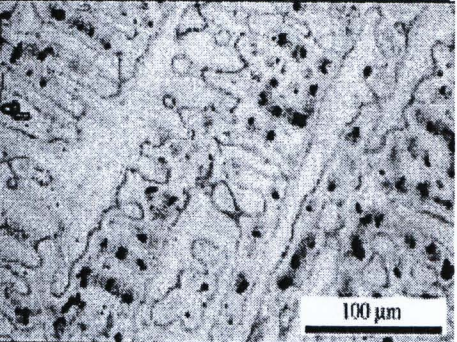


รูปที่ 3.16 โครงสร้างจุลภาคโลหะผสม 93.5Ag-6.5Cu (a) สภาวะหลังหลอม (b) สภาวะหลังบ่มแข็งที่อุณหภูมิอบละลาย $750^{\circ}\text{C}/60$ นาที และบ่มแข็ง $300^{\circ}\text{C}/60$ นาที

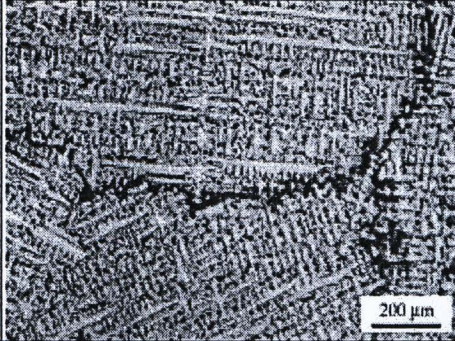
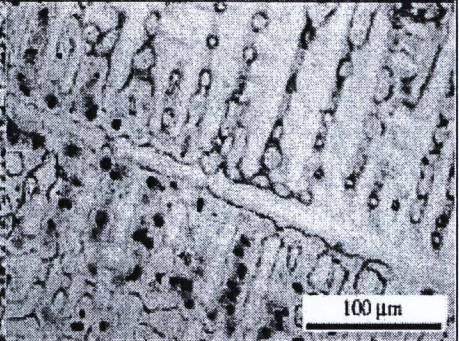
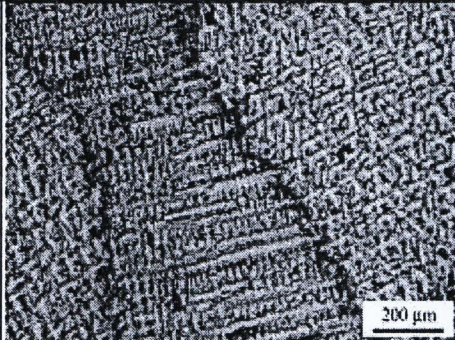
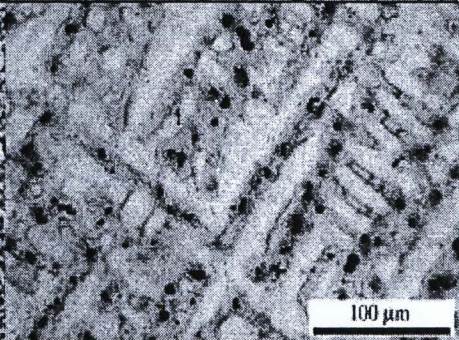
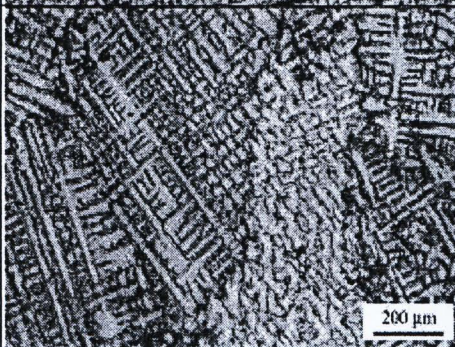
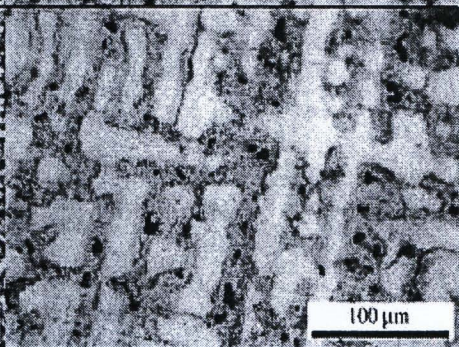
3.5.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Ag-Cu-Pd

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานในระบบ Ag-Cu-Pd สภาวะหลังหล่อ พบว่าลักษณะโครงสร้างเป็นเดนไดรต์เช่นเดียวกัน โดยจากการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 935 ระบบ Ag-Cu-Pd ที่ส่วนผสมต่าง ๆ เดนไดรต์เหล่านี้มีแนวโน้มที่มีขนาดเล็กลงและมีปริมาณหนาแน่นมากขึ้นเมื่อปริมาณของแพลเลเดียมเพิ่มขึ้น แสดงดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 โครงสร้างจุลภาคโลหะผสมระบบ Ag-Cu-Pd สภาวะหลังหล่อ

ชั้นทดสอบ	กำลังขยาย 50 เท่า	กำลังขยาย 200 เท่า
935 Pd V1 (6.4Cu-0.1Pd)		
935 Pd V2 (6.2Cu-0.3Pd)		
935 Pd V3 (6.0Cu-0.5Pd)		

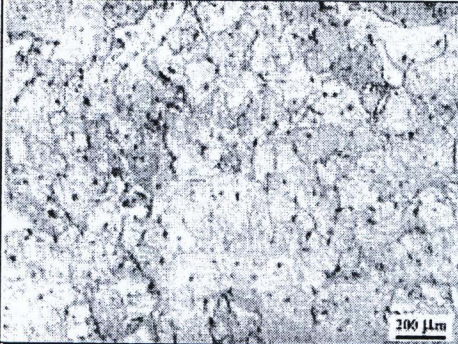
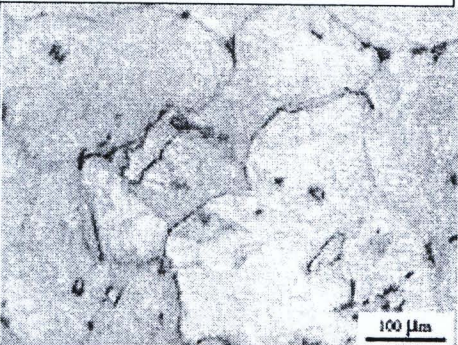
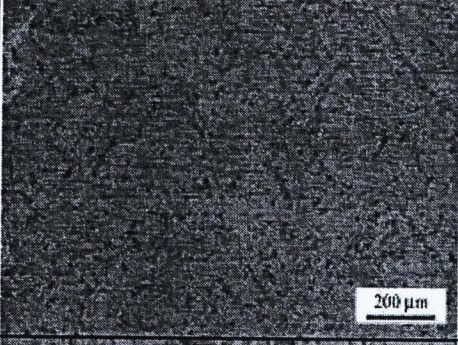
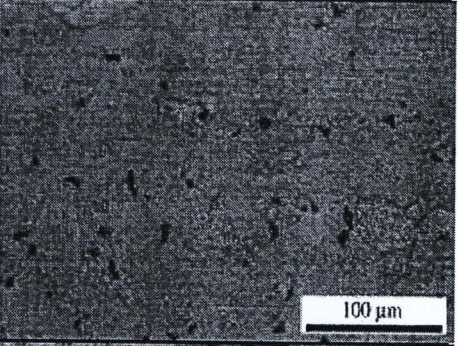
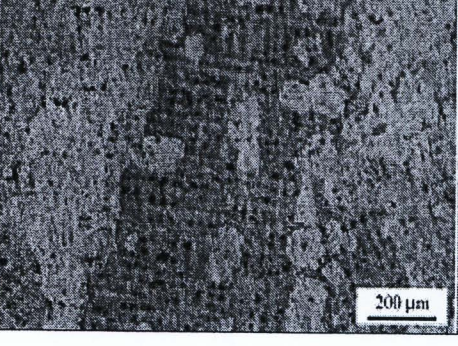
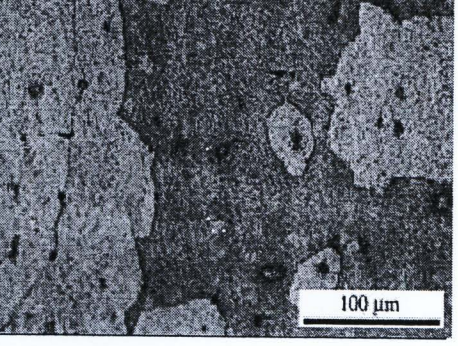
ตารางที่ 3.8 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคโลหะผสมระบบ Ag-Cu-Pd สภาวะหลังหล่อ

ชนิดทดสอบ	กำลังขยาย 50 เท่า	กำลังขยาย 200 เท่า
935 Pd V4 (5.5Cu-1.0Pd)		
935 Pd V5 (5.3Cu-1.2Pd)		
935 Pd V6 (5.0Cu-1.5Pd)		

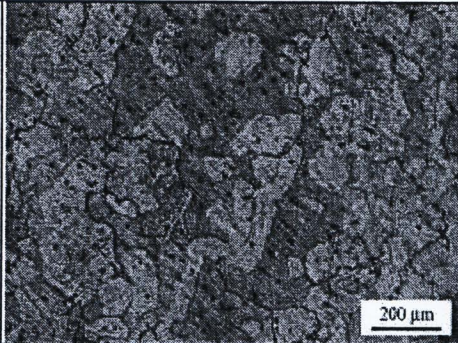
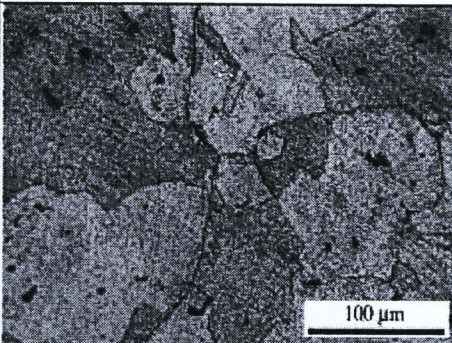
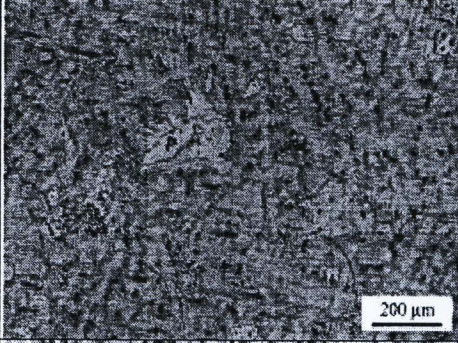
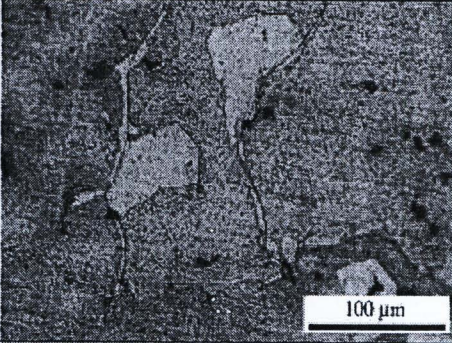

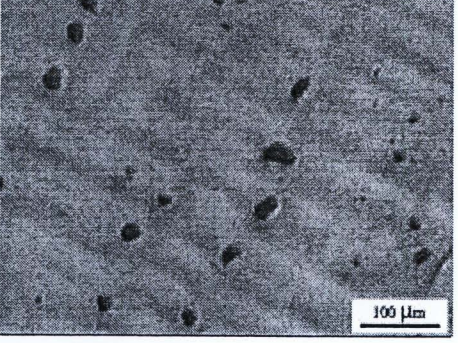


หลังการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 750°C เวลา 60 นาที และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C เวลา 60 นาที พบว่าการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 750°C เวลา 60 นาที นี้ไม่สามารถละลายเฟสยูเทคติกในทองแดงได้ทั้งหมด เนื่องจากโครงสร้างยูเทคติกส่วนใหญ่มีการละลายแต่ยังคงมีบางบริเวณที่ไม่สามารถละลายได้ กระจายตัวทั่วไปในโครงสร้างเฟสหลัก ดังแสดงในรูปที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมระบบ Ag-Cu-Pd สถานะหลังบ่มแข็ง

ขั้นตอนทดสอบ	กำลังขยาย 50 เท่า	กำลังขยาย 200 เท่า
935 Pd V1 (6.4Cu-0.1Pd)		
935 Pd V2 (6.2Cu-0.3Pd)		
935 Pd V3 (6.0Cu-0.5Pd)		

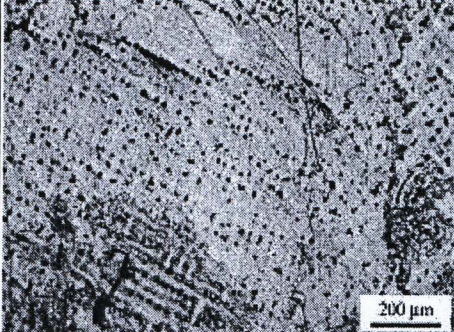
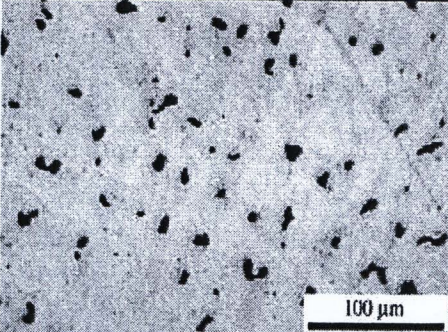
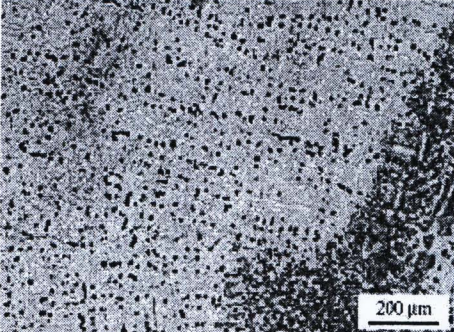
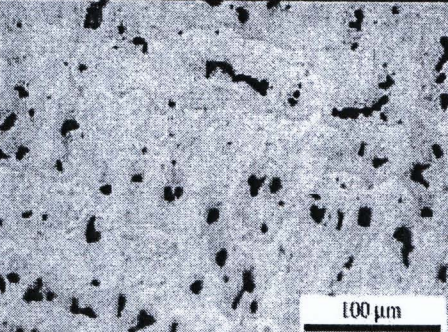
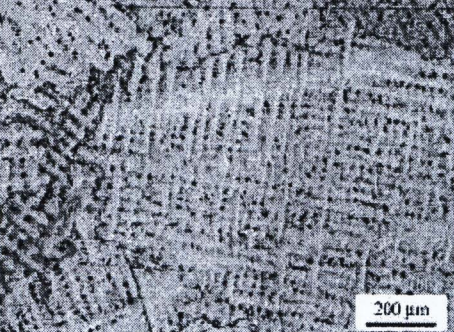
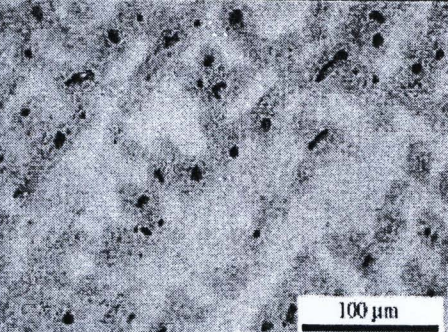
ตารางที่ 3.9 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมระบบ Ag-Cu-Pd สภาวะหลังบ่มแข็ง

ชั้นทดสอบ	กำลังขยาย 50 เท่า	กำลังขยาย 200 เท่า
935 Pd V4 (5.5Cu-1.0Pd)		
935 Pd V5 (5.3Cu-1.2Pd)		
935 Pd V6 (5.0Cu-1.5Pd)		

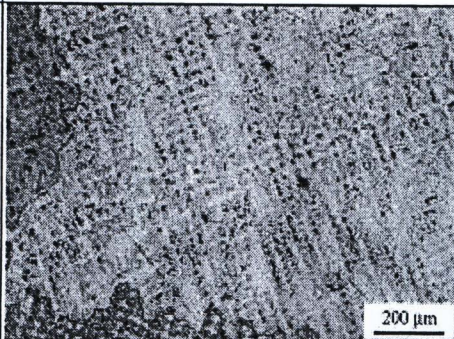
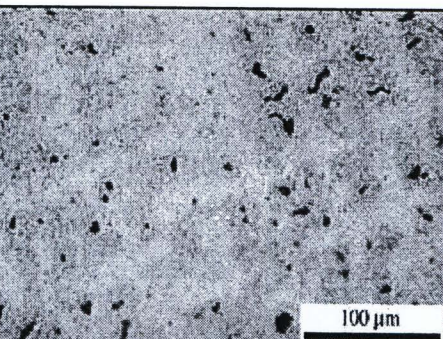
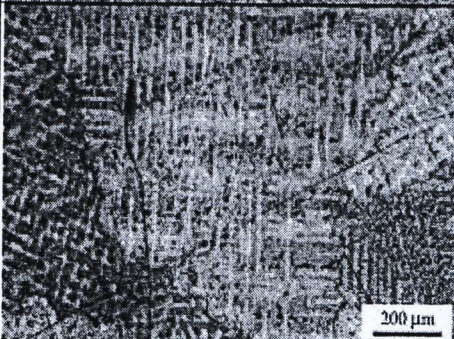
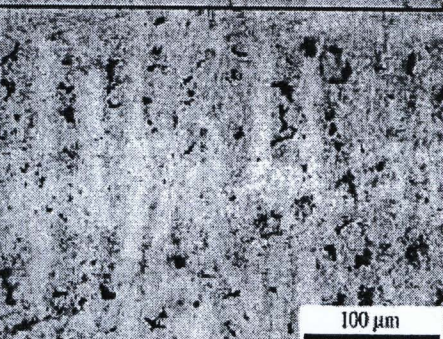
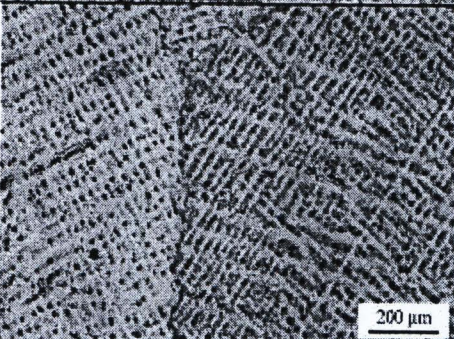
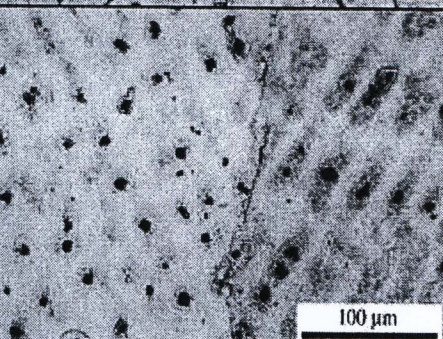
3.5.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Ag-Cu-Zn-Si หลังหล่อและหลังบ่มแข็ง

จากตารางที่ 3.10 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงหลังผ่านการหล่อในระบบ Ag-Cu-Zn-Si มีลักษณะโครงสร้างเป็นเดนไดรต์ (Dendrite) และมีโครงสร้างยูเทคติก (eutectic structure) ที่ประกอบด้วยเฟสอัลฟา (α phase) และเฟสเบต้า (β phase) อยู่ในช่องว่างระหว่างเดนไดรต์เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานในระบบ Ag-Cu-Zn-Si หลังหล่อ ในทุกอัตราส่วนผสมมีลักษณะโครงสร้างเป็นเดนไดรต์พบกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณ ชิ้นงานที่เพิ่มปริมาณซิลิกอนทำให้โครงสร้างยูเทคติกลดลง

ตารางที่ 3.10 โครงสร้างจุลภาคโลหะผสมระบบ Ag-Cu-Zn-Si สภาวะหลังหล่อ

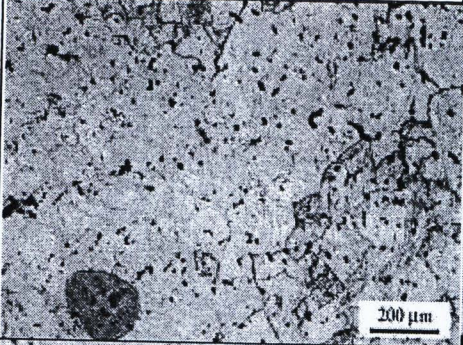
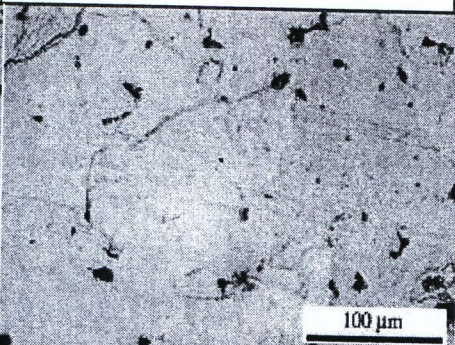
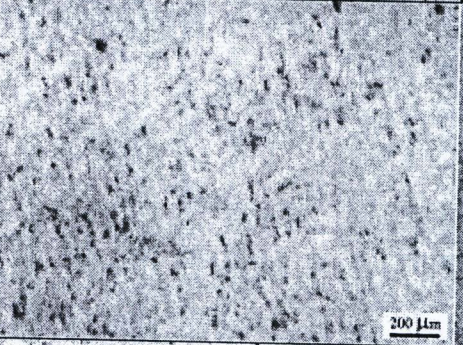
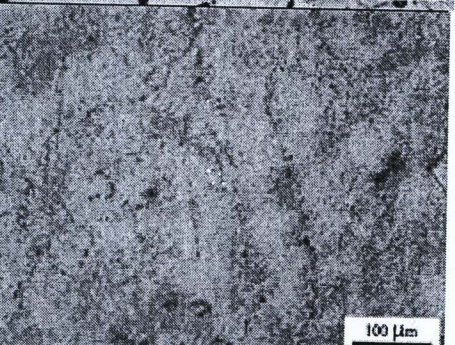
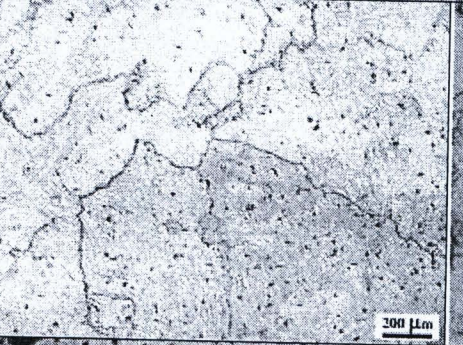
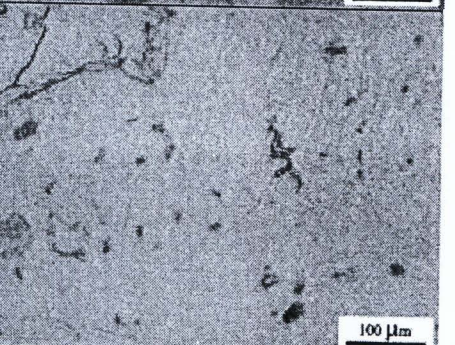
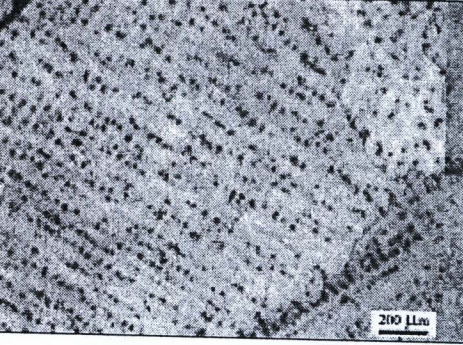
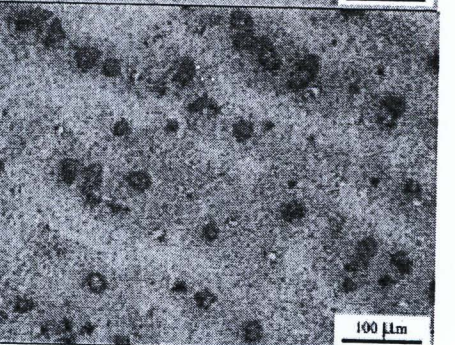
ขั้นตอนทดสอบ	กำลังขยาย 50 เท่า	กำลังขยาย 200 เท่า
935 Zn-Si V1 (0.5Zn)		
935 Zn-Si V2 (0.05Si)		
935 Zn-Si V3 (0.5Zn-0.05Si)		

ตารางที่ 3.10 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคโลหะผสมระบบ Ag-Cu-Zn-Si สภาวะหลังหล่อ

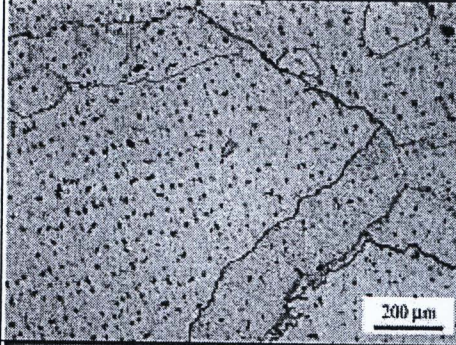
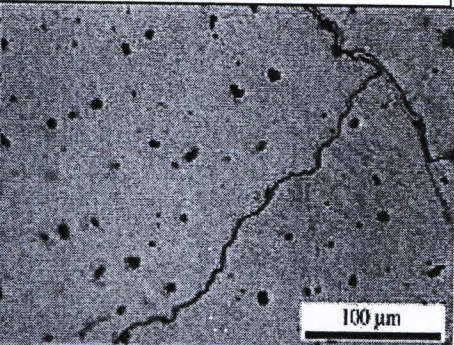
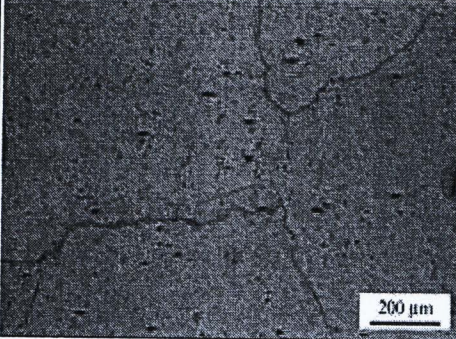
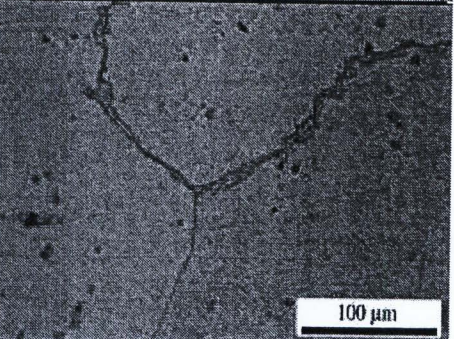
ชั้นทดสอบ	กำลังขยาย 50 เท่า	กำลังขยาย 200 เท่า
935 Zn-Si V4 (1.0Zn-0.1Si)	 <p>200 μm</p>	 <p>100 μm</p>
935 Zn-Si V5 (1.0Zn-0.3Si)	 <p>200 μm</p>	 <p>100 μm</p>
935 Zn-Si V6 (2.0Zn-0.05Si)	 <p>200 μm</p>	 <p>100 μm</p>

โครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบในระบบ Ag-Cu-Pd และ Ag-Cu-Zn-Si หลังผ่านการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 750°C เป็นระยะเวลา 60 นาที และจุ่มน้ำให้เย็นทันทีเพื่อให้เกิดสารละลายของของแข็งที่อิ่มตัวยิ่งยวด(Supersaturated solid solution) ตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C เป็นระยะเวลา 60 นาที พบว่าลักษณะโครงสร้างหลังการบ่มแข็งไม่ปรากฏโครงสร้างเดนไดรต์ แต่ยังคงมีโครงสร้างยูเทคติกและตะกอนทองแดงหลงเหลืออยู่ เนื่องจากการละลายของเฟสทองแดงไม่สมบูรณ์ดังแสดงในตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 โครงสร้างจุลภาคโลหะผสมระบบ Ag-Cu-Zn-Si สภาวะหลังบ่มแข็ง

ชั้นทดสอบ	กำลังขยาย 50 เท่า	กำลังขยาย 200 เท่า
935 Zn-Si V1 (0.5Zn)		
935 Zn-Si V2 (0.05Si)		
935 Zn-Si V3 (0.5Zn-0.05Si)		
935 Zn-Si V4 (1.0Zn-0.1Si)		

ตารางที่ 3.11 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคโลหะผสมระบบ Ag-Cu-Zn-Si สภาวะหลังบ่มแข็ง

ชั้นทดสอบ	กำลังขยาย 50 เท่า	กำลังขยาย 200 เท่า
935 Zn-Si V5 (1.0Zn-0.3Si)		
935 Zn-Si V6 (2.0Zn-0.05Si)		

การอบละลายโครงสร้างยูเทคติกจะมีผลต่อการเพิ่มความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิง คือหากโลหะทองแดงในโครงสร้างยูเทคติกมีการละลายในขั้นตอนของการอบละลาย ทำให้โลหะเงินซึ่งเป็นเฟสหลักอยู่ในสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด การเพิ่มความแข็งจากการอบบ่มก็สามารถเกิดขึ้นได้ดีในกระบวนการอบบ่ม ในทางกลับกันหากทองแดงในโครงสร้างยูเทคติกมีการละลายได้น้อยหรือละลายไม่หมดในขั้นตอนของการอบละลายเฟส ความแข็งของโลหะหลังกระบวนการบ่มแข็งก็จะเพิ่มขึ้นไม่มากนักนั่นเอง

3.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยการตรวจสอบด้วยภาพอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (backscattered electron micrograph, BEI) ซึ่งสามารถแสดงถึงความแตกต่างของเฟส (phase contrast) ทำให้ทราบถึงลักษณะเฟสและการกระจายตัวในโครงสร้าง และการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเฟสจากการวิเคราะห์แบบจุด (point analysis) โดยการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive X-Ray Spectrometry, EDS) ของโลหะผสม 935Ag ทุกระบบในชิ้นงานหลังหล่อและหลังการบ่มแข็ง แสดงรายละเอียดดังนี้

3.6.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu

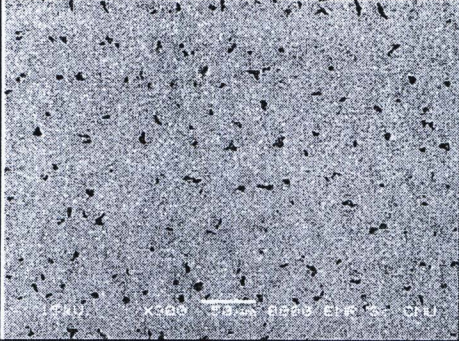



จากการตรวจสอบด้วยภาพอิเล็กตรอนกระเจิงกลับของโลหะผสม 935Ag (93.5Ag-6.5Cu) ซึ่งใช้เป็นโลหะผสมเงินมาตรฐานในการวิจัย ที่กำลังขยายต่ำ 500 และ 1000 เท่า แสดงดังตารางที่ 3.12 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยายต่ำ (300-500 เท่า) เพื่อต้องการทราบลักษณะโครงสร้างโดยรวมและการกระจายตัวของเฟสต่าง ๆ ในขณะที่ภาพกำลังขยายสูง (1000-3000 เท่า) เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างยูเทคติกที่กำลังขยายสูงขึ้น*

ภาพถ่ายกำลังขยายต่ำของโลหะผสมเงินหลังหล่อแสดงลักษณะการกระจายตัวของโครงสร้างยูเทค (เฟสสีเข้ม) กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในโลหะเฟสหลัก (matrix) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสภาวะหลังหล่อ สามารถแบ่งได้เป็น 4 บริเวณ ดังรูปที่ 3.17 คือ

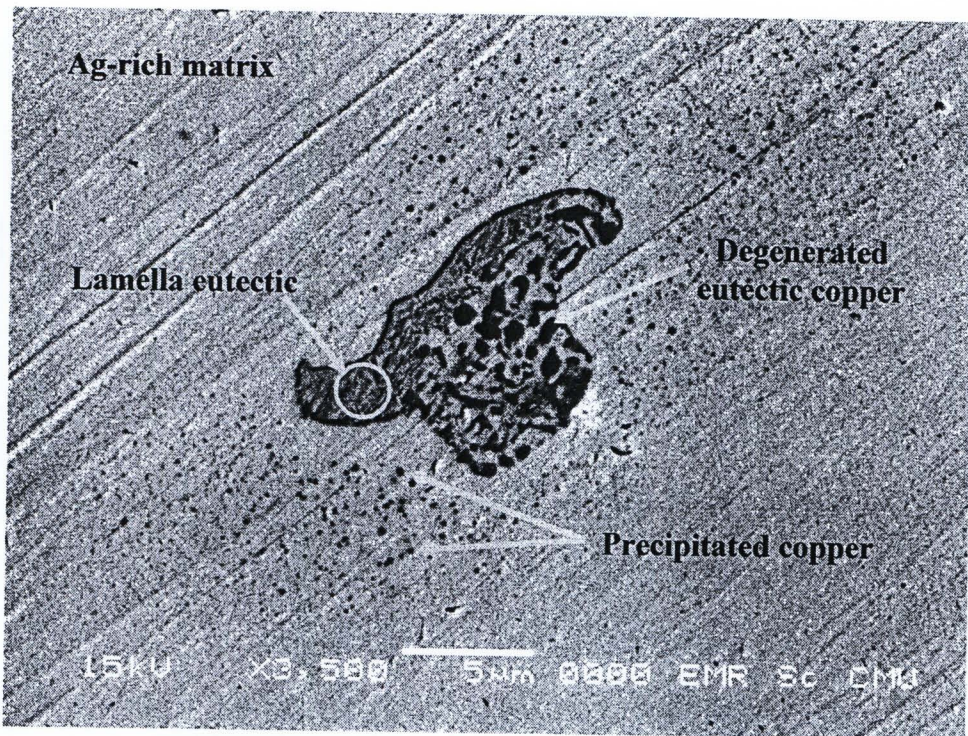
- 1) เฟสหลัก (matrix) เป็นโครงสร้างเดนไดรต์ ที่มีปริมาณเงินเป็นองค์ประกอบสูง (Ag-rich) หรือเฟสอัลฟา (α -phase)
- 2) บริเวณขอบของเดนไดรต์หรือแขนเดนไดรต์ (dendrite arms) ซึ่งมีการแยกตัวของทองแดงตกเป็นตะกอนทองแดง (Cu segregation หรือ Precipitated copper phase) ขนาดเล็ก สีดำ จำนวนมากกระจายตัวทั่วบริเวณขอบเดนไดรต์ เป็นเฟสที่มีปริมาณของทองแดงสูง (Cu-rich) หรือเรียกว่า เฟสเบตา (β -phase)
- 3) โครงสร้างลามัลลายูเทคติก (lamella eutectic structure) เป็นบริเวณที่มีโครงสร้างของเฟสอัลฟา และเบตาเรียงตัวสลับเป็นชั้นๆ
- 4) โครงสร้างรีเจนเนอเรตยูเทคติกของทองแดง (degenerated eutectic copper) เป็นเฟสที่มีปริมาณทองแดงสูง ในโครงสร้างนี้จะไม่มีการเรียงตัวสลับเป็นชั้นๆ ของโครงสร้างของเฟสอัลฟาและเบตา จะมีเพียงทองแดงเป็นองค์ประกอบเพียงชนิดเดียว มักพบบริเวณใกล้เคียงกับโครงสร้างลามัลลายูเทคติก

*หมายเหตุ การถ่ายภาพที่กำลังขยายสูงกว่า 5000 เท่า ไม่มีความจำเป็นในการวิจัย เนื่องจากโครงสร้างที่เกิดขึ้นในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงมีขนาดใหญ่ และการตรวจสอบโครงสร้างที่กำลังขยายสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านจะศึกษาต่อไปในงานวิจัยปีที่ 2

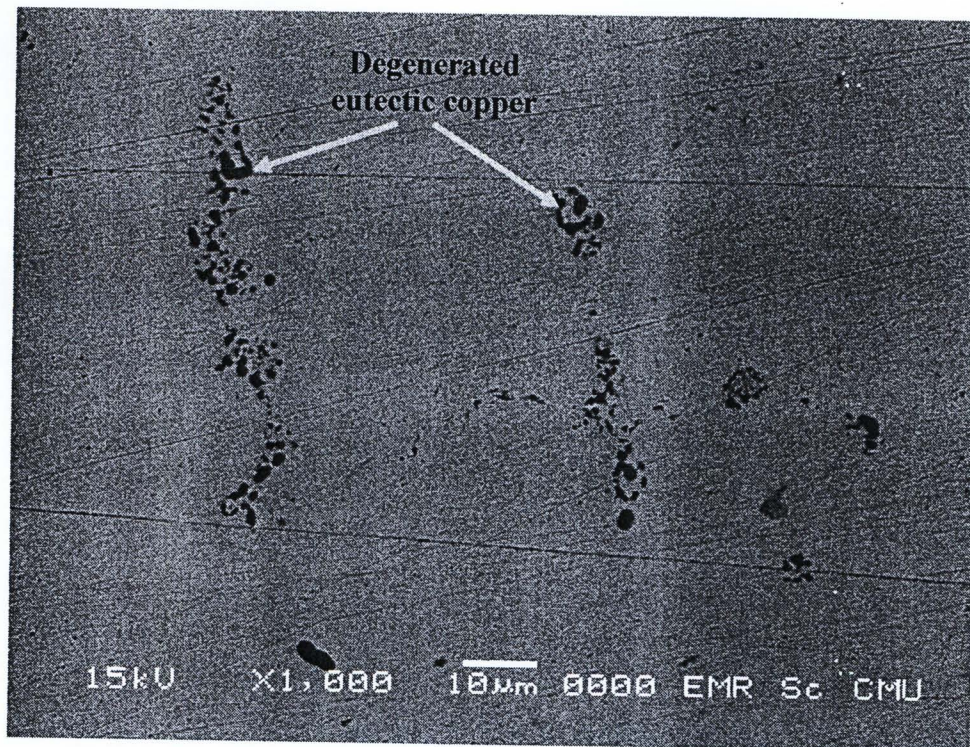
ตารางที่ 3.12 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 935Ag-6.5Cu สภาวะหลังหล่อและหลังบ่ม
แข็ง

ขั้นตอนทดสอบ	กำลังขยาย 500 เท่า	กำลังขยาย 1000 เท่า
935Ag-6.5Cu (As-cast)		
935Ag-6.5Cu (Aging)		

โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงหลังจากผ่านการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 750°C เวลา 60 นาที และจุ่มน้ำให้เย็นทันทีเพื่อให้เกิดสารละลายของของแข็งที่อิ่มตัวยิ่งยวด ตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C เวลา 60 นาที พบว่าโครงสร้างแลมเบลยูเทคติกมีปริมาณน้อยลงมาก แต่ยังคงยูเทคติกบางส่วนละลายไม่หมดและกระจายอยู่ทั่วไป อย่างไรก็ตามโครงสร้างยูเทคติกที่หลงเหลืออยู่ไม่มีลักษณะของแลมเบลยู คือไม่มีลักษณะการเรียงตัวสลับกันเป็นชั้น ๆ ของเฟสเงินและทองแดง แต่จะมีลักษณะคล้ายดีเจเนอเรตยูเทคติกของทองแดง ดังรูปที่ 3.18 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 935Ag-6.5Cu ในขั้นตอนทดสอบสภาวะหลังหล่อและหลังบ่มแข็งแสดงดังตารางที่ 3.13



รูปที่ 3.17 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 935Ag-6.5Cu สภาวะหลังหล่อ

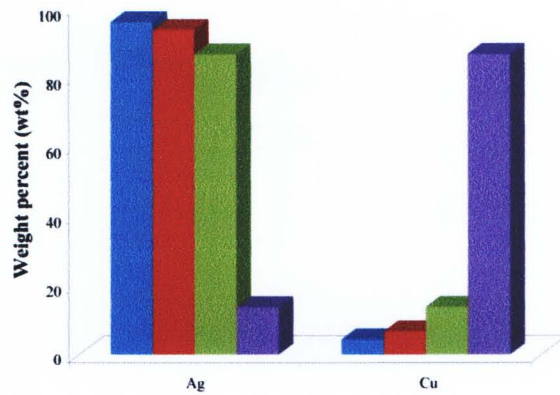


รูปที่ 3.18 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 935Ag-6.5Cu สภาวะหลังบ่มแข็ง ที่อุณหภูมิอบละลายเฟส 750°C/60 นาที และบ่มแข็ง 300°C/60 นาที

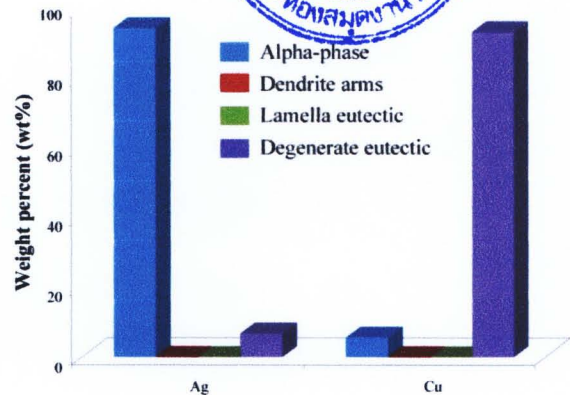
ตารางที่ 3.13 การวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 935Ag-6.5Cu

Samples	Composition, Ag-Cu (wt%)			
	α -phase	Dendrite arms	Lamella eutectic	Degenerated eutectic
As-cast	95.55-4.45	93.30-6.70	86.27-13.73	13.67-86.33
Aging	94.43-5.57	-	-	6.74-93.26

จากตารางสามารถแสดงปริมาณธาตุจากการวิเคราะห์ธาตุด้วย DES พบว่าชั้นทดสอบหลังหล่อ (รูปที่ 3.19a) ปริมาณเงินมีมากที่สุดในพื้นที่คือประมาณ 95wt% และค้อย ๆ ลดปริมาณลงในบริเวณ แขนเดนไดรต์และโครงสร้างลามลายุเทคติก ในขณะที่โครงสร้างดีเจเนเรตยูเทคติกมีปริมาณทองแดง สูง ประมาณ 86wt% การวิเคราะห์ธาตุด้วย DES ในชั้นทดสอบหลังบ่มแข็งจากการอบละลาย 750°C/60 นาที และบ่มแข็ง 300°C/60 นาที เป็นการสลายโครงสร้างลามลายุเทคติกและทำให้ทองแดงละลายในเฟสหลัก แต่โครงสร้างดีเจเนเรตยูเทคติกซึ่งอาจเกิดจากการไม่ละลายของทองแดงในโครงสร้างยูเทคติกเดิมหรือ การรวมตัวกันของทองแดงในบริเวณลามลายุเทคติกเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้นของเฟสทองแดง ซึ่งเฟส ดังกล่าวนี้อาจมีปริมาณทองแดงสูงกว่า 90wt% ดังแสดงในรูปที่ 3.19b



(a) 935Ag-6.5Cu หลังหล่อ





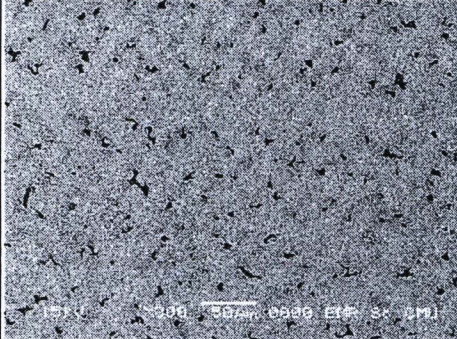



(b) 935Ag-6.5Cu หลังบ่มแข็ง

รูปที่ 3.19 การวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง (a) 935Ag-6.5Cu สภาวะหลังหล่อ และ (b) 935Ag-6.5Cu สภาวะหลังบ่มแข็ง

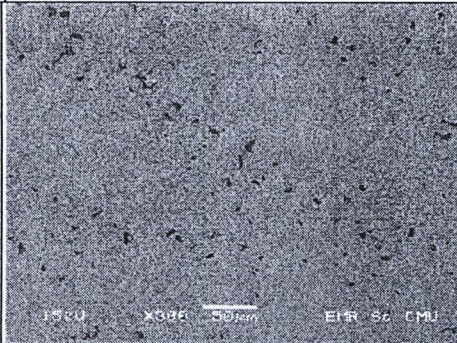
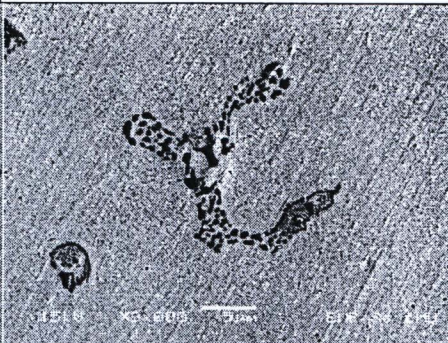
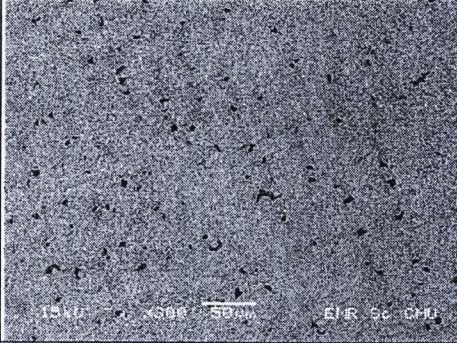

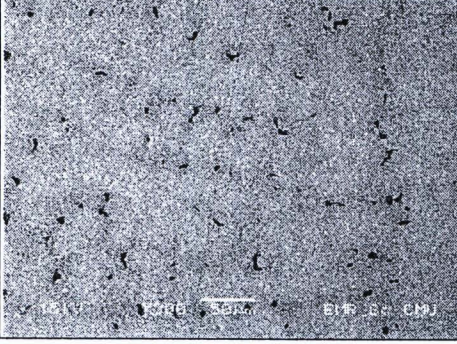
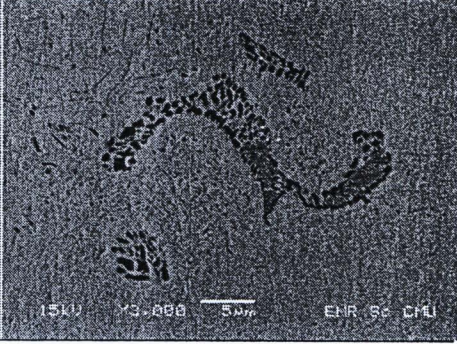
3.6.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Ag-Cu-Pd

โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Cu-Pd ที่ส่วนผสม 0.1-1.5wt% แสดงดังตารางที่ 3.14 ลักษณะโครงสร้างโดยทั่วไปที่กำลังขยายต่ำ แสดงลักษณะการกระจายตัวของโครงสร้างยูเทคติกในเฟสหลัก โครงสร้างยูเทคติกเหล่านี้มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณแพลเลเดียมเพิ่มขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งคือปริมาณทองแดงลดลงนั่นเอง ลักษณะโครงสร้างยูเทคติกที่กำลังขยายสูง 1000 เท่า ลักษณะโครงสร้างลามেলাและดีเจเนอเรตยูเทคติกในทงส่วนผสมมีลักษณะไม่แตกต่างกัน กล่าวคือ โครงสร้างประกอบด้วยโครงสร้างลามেলাและโครงสร้างดีเจเนอเรตของทองแดง ซึ่งอาจมีปริมาณที่ความแตกต่างกันบ้างในแต่ละยูเทคติก แต่ลักษณะโดยรวมนั้นไม่มีความแตกต่าง

ตารางที่ 3.14 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Cu-Pd สภาวะหลังหล่อ





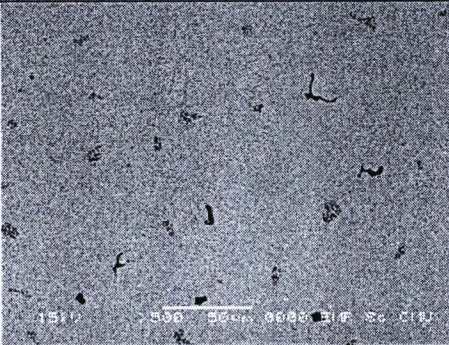


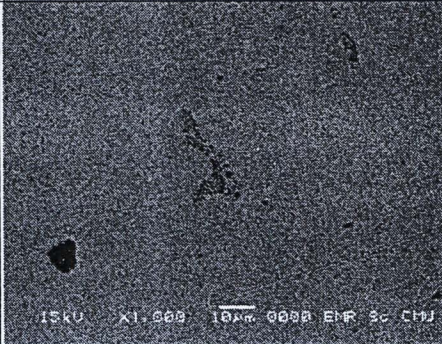
ขั้นทดสอบ	กำลังขยาย 300 เท่า	กำลังขยาย 1000 เท่า
935 Pd V1 (6.4Cu-0.1Pd)		
935 Pd V2 (6.2Cu-0.3Pd)		
935 Pd V3 (6.0Cu-0.5Pd)		

ตารางที่ 3.14 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Cu-Pd สภาวะหลังหล่อ

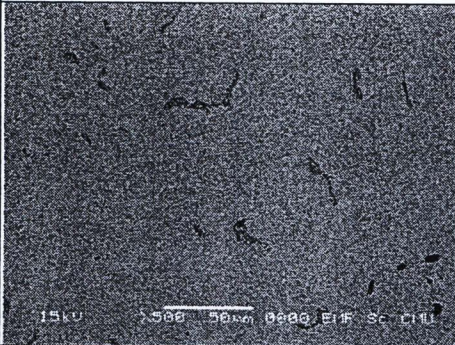
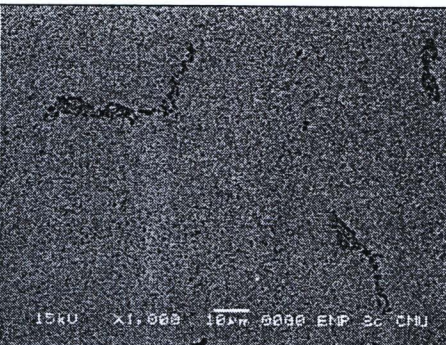
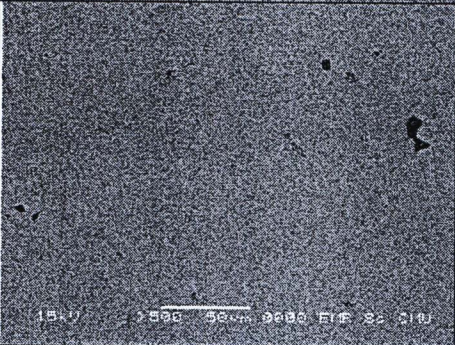

ชั้นทดสอบ	กำลังขยาย 300 เท่า	กำลังขยาย 1000 เท่า
935 Pd V4 (5.5Cu-1.0Pd)		
935 Pd V5 (5.3Cu-1.2Pd)		
935 Pd V6 (5.0Cu-1.5Pd)		

ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Ag-Cu-Pd หลังบ่มแข็ง (750°C/60 นาที และ 300°C/60 นาที) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเช่นเดียวกับโลหะผสมเงิน Ag-Cu คือ โครงสร้างลามัลลายเทคติกมีการละลายและตกตะกอนของทองแดงและกระจายตัวทั่วไปในเฟสหลัก การตกตะกอนเฟสทองแดงเล็ก ๆ กระจายตัวทั่วไปในเฟสหลักดังกล่าวนี้ มีผลให้โลหะผสมเงินมีความแข็งเพิ่มขึ้นมากหลังเสร็จสิ้นกระบวนการบ่มแข็ง โดยค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุด คือ ชั้นทดสอบ 935 Pd V2 (6.2Cu-0.3Pd) มีความแข็งเพิ่มขึ้นจาก 63.74 HV ในสภาวะหลังหล่อ เป็น 126.60 HV ในสภาวะหลังบ่มแข็ง โดยเมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นของโลหะผสม Ag-Cu-Pd สภาวะหลังบ่มแข็ง (ตารางที่ 3.15) และค่าความแข็งจากรูปที่ 3.4 พบว่าค่าความแข็งหลังกระบวนการบ่มแข็งเมื่อปริมาณของแพลเลเดียมเพิ่มขึ้นหรืออีกนัยหนึ่งคือมีปริมาณของทองแดงลดลง โดยค่าความแข็งหลังการบ่มแข็งในชั้นทดสอบ 935 Pd V6 (5.0Cu-1.5Pd) มีค่าน้อยที่สุด โดยมีค่าใกล้เคียงกับค่าความแข็งของชิ้นงานหลังหล่อคือประมาณ 60 HV อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาค พบว่าปริมาณของโครงสร้างดีเจเนอเรตของทองแดงหลังการบ่มแข็งมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับชั้นทดสอบอื่น ๆ ดังนั้นจากการวิจัยเบื้องต้นสามารถกล่าวว่าการแพลเลเดียมในโลหะผสมเงิน 935Ag มีผลต่อการลดลงของความแข็งหลังผ่านกระบวนการบ่มแข็ง

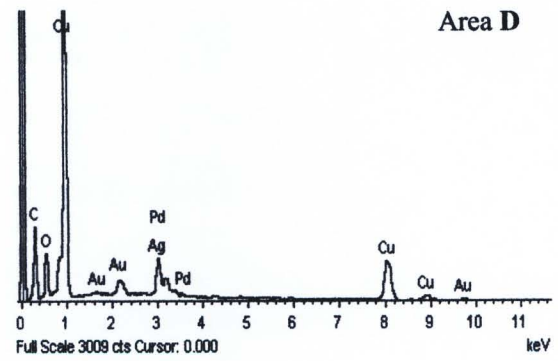
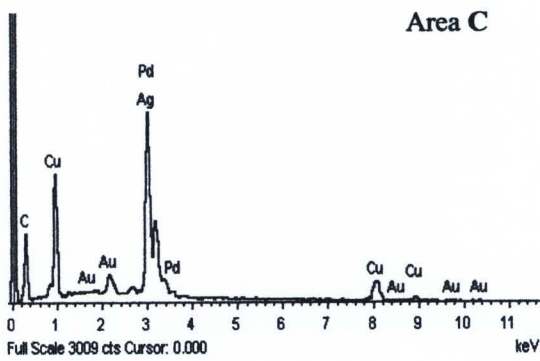
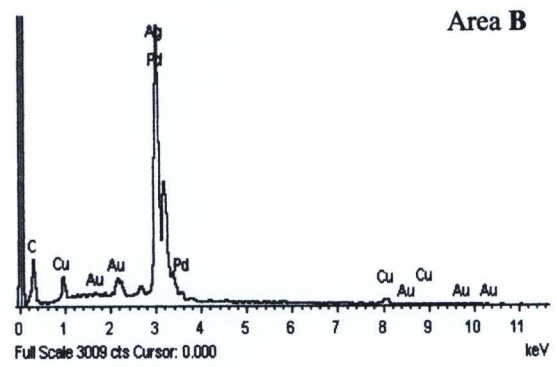
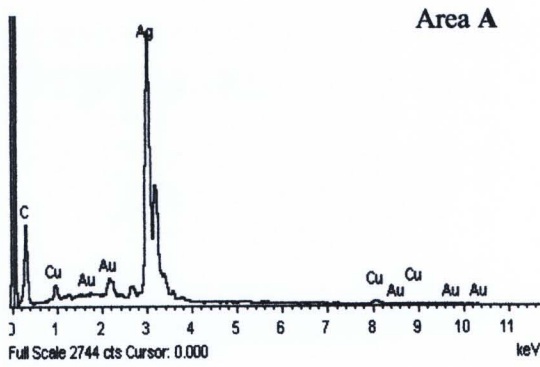
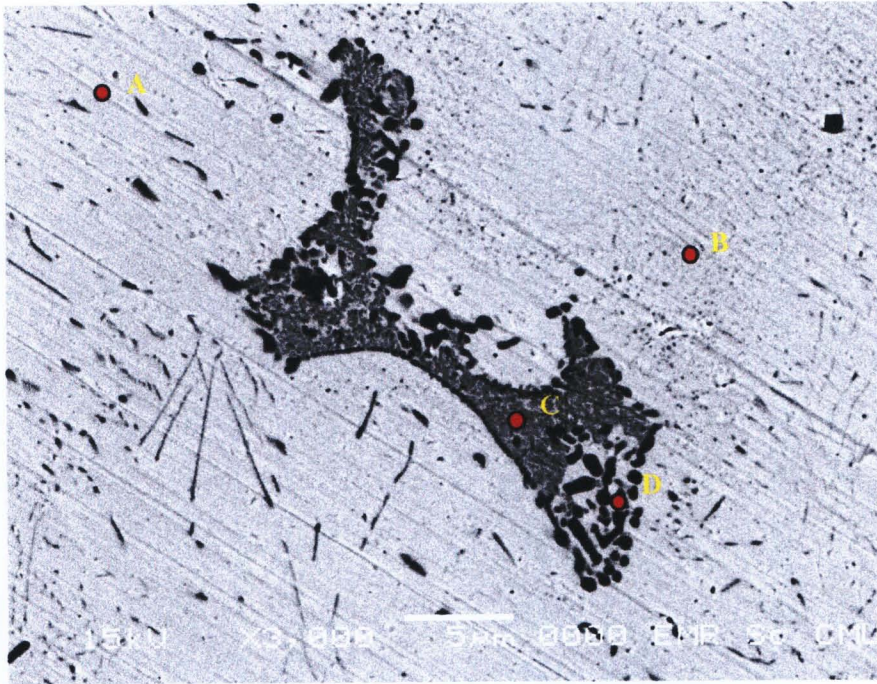
ตารางที่ 3.15 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Cu-Pd สภาวะหลังบ่มแข็ง

ชนิดทดสอบ	กำลังขยาย 500 เท่า	กำลังขยาย 1000 เท่า
935 Pd V1 (6.4Cu-0.1Pd)		
935 Pd V2 (6.2Cu-0.3Pd)		
935 Pd 3 (6.0Cu-0.5Pd)		
935 Pd V4 (5.5Cu-1.0Pd)		

ตารางที่ 3.15 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Cu-Pd สภาวะหลังบ่มแข็ง

ชั้นทดสอบ	กำลังขยาย 500 เท่า	กำลังขยาย 1000 เท่า
935 Pd V5 (5.3Cu-1.2Pd)		
935 Pd V6 (5.0Cu-1.5Pd)		

การวิเคราะห์ธาตุแบบจุดด้วย EDS (EDS point analysis) ในชั้นทดสอบโลหะผสมเงิน 935 ทุกชั้นทดสอบจำนวน 4 บริเวณ คือ บริเวณ A เป็นเฟสหลัก (matrix) ของโครงสร้างเดนไดรต์ซึ่งมีปริมาณเงินเป็นองค์ประกอบสูง (Ag-rich) หรือเฟสอัลฟา (α -phase) บริเวณ B เป็นบริเวณขอบของเดนไดรต์ซึ่งมีเฟสที่มีการแยกตัวของทองแดงตกตะกอนขนาดเล็กๆ (Copper segregation) กระจายตัวทั่วบริเวณตะกอนเหล่านี้มีขนาดเล็กกว่า $1 \mu\text{m}$ เป็นเฟสที่มีปริมาณทองแดงสูง (Cu-rich) หรือเรียกเฟสเบต้า (β -phase) บริเวณ C เป็นโครงสร้างลามัลลายูเทคติก (lamella eutectic structure) ซึ่งมีเฟสอัลฟาและเบตาเรียงตัวสลับกันเป็นชั้นๆ บริเวณ D เป็นโครงสร้างดีเจเนอเรตยูเทคติก (degenerated eutectic structure) ซึ่งมีปริมาณของทองแดงสูง ดังแสดงในรูปที่ 3.20 อย่างไรก็ตามจากภาพอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ จะเห็นว่าบริเวณเฟสหลักรอบโครงสร้างยูเทคติกไม่พบการตกตะกอนของทองแดง (Cu segregation) เนื่องจากการรวมตัวกันของอะตอมทองแดงในระหว่างการเกิดโครงสร้างดีเจเนอเรตยูเทคติก ทำให้โครงสร้างหลักของสารละลายของแข็งบริเวณนี้มีความเข้มข้นของทองแดงน้อย ไม่เพียงพอต่อการเกิด Cu segregation ดังกล่าว ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ในโลหะผสม Ag-Cu-Pd สภาวะหลังหล่อ ในตารางที่ 3.16 พบว่าโลหะ Pd สามารถละลายอยู่ในทุกเฟสคือในโครงสร้างหลัก โครงสร้างลามัลลายูเทคติก และโครงสร้างดีเจเนอเรตยูเทคติก ในขณะที่การวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ในชั้นทดสอบหลังบ่มแข็งแสดงดังตารางที่ 3.17 การวิเคราะห์ธาตุในชั้นทดสอบหลังบ่มนี้สามารถวิเคราะห์ได้เพียง 2 บริเวณ คือ บริเวณเฟสหลักและบริเวณโครงสร้างดีเจเนอเรตยูเทคติก เนื่องจากโครงสร้างลามัลลาได้ละลายในเฟสโลหะหลักในระหว่างกระบวนการอบละลาย



รูปที่ 3.20 ภาพอิเล็กตรอนกระเจิงกลับและการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS
ในชั้นทดสอบ 935 Pd V2 (6.2Cu-0.3Pd) สภาวะหลังหล่อ

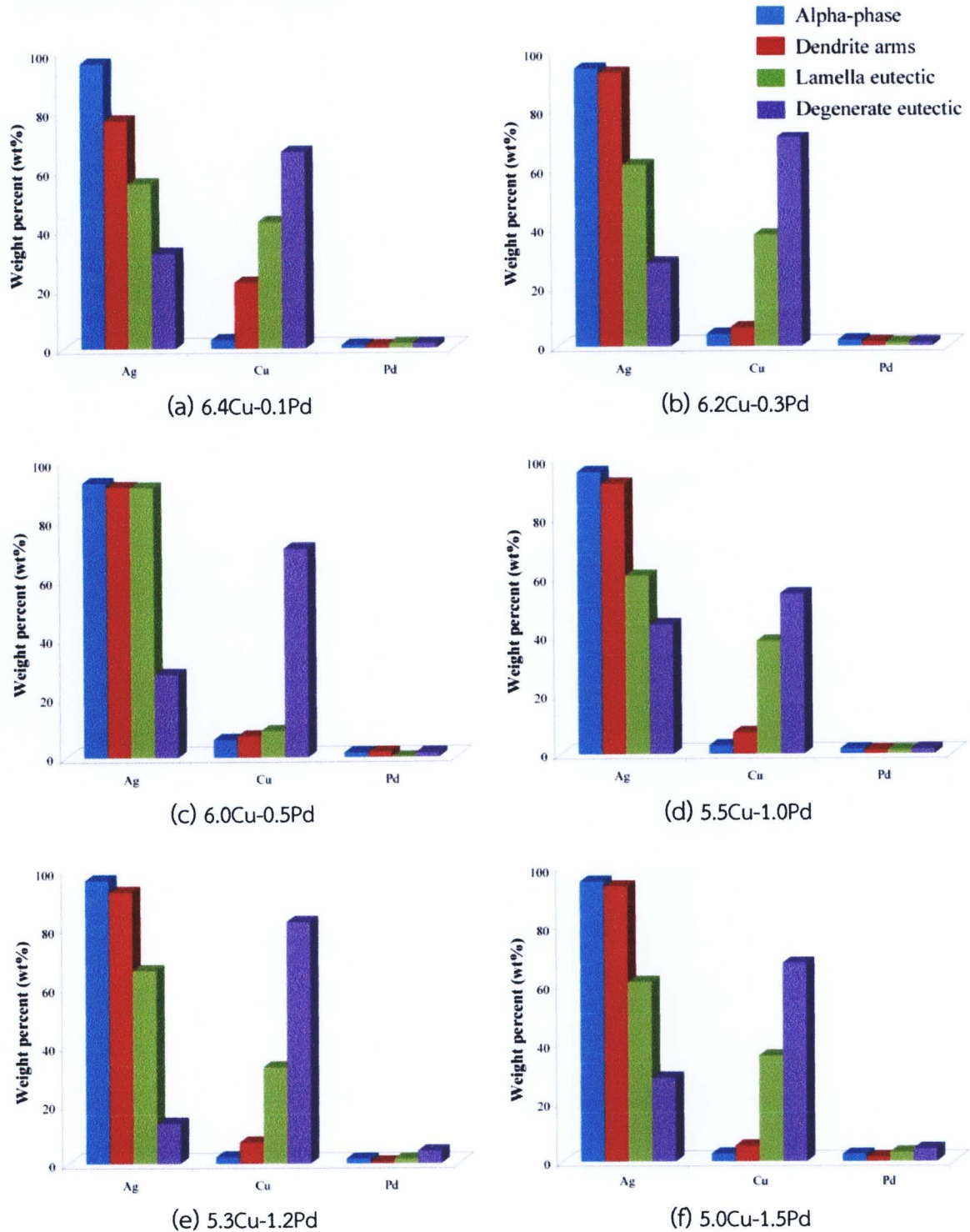
ตารางที่ 3.16 การวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ในชั้นทดสอบโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Cu-Pd สภาวะหลังหล่อ

Samples	Composition, Ag-Cu-Pd (wt%)			
	α -phase	Dendrite arms	Lamella eutectic	Degenerated eutectic
935 Pd V1 (6.4Cu-0.1Pd)	95.90-3.01-1.09	76.74-22.29-0.97	55.55-42.73-1.72	32.16-66.19-1.65
935 Pd V2 (6.2Cu-0.3Pd)	93.71-4.21-2.08	92.27-6.32-1.41	61.23-37.58-1.19	28.19-70.50-1.31
935 Pd 3 (6.0Cu-0.5Pd)	92.48-6.02-1.50	91.08-7.21-1.71	90.95-8.96-0.08	28.09-70.42-1.49
935 Pd V4 (5.5Cu-1.0Pd)	95.32-2.97-1.71	91.40-7.32-1.28	60.41-38.21-1.38	44.02-54.21-1.77
935 Pd V5 (5.3Cu-1.2Pd)	96.04-2.27-1.69	92.08-7.28-0.64	65.53-32.84-1.63	13.83-81.86-4.31
935 Pd V6 (5.0Cu-1.5Pd)	94.78-2.71-2.51	93.11-5.40-1.49	60.84-35.92-3.23	28.52-67.13-4.35

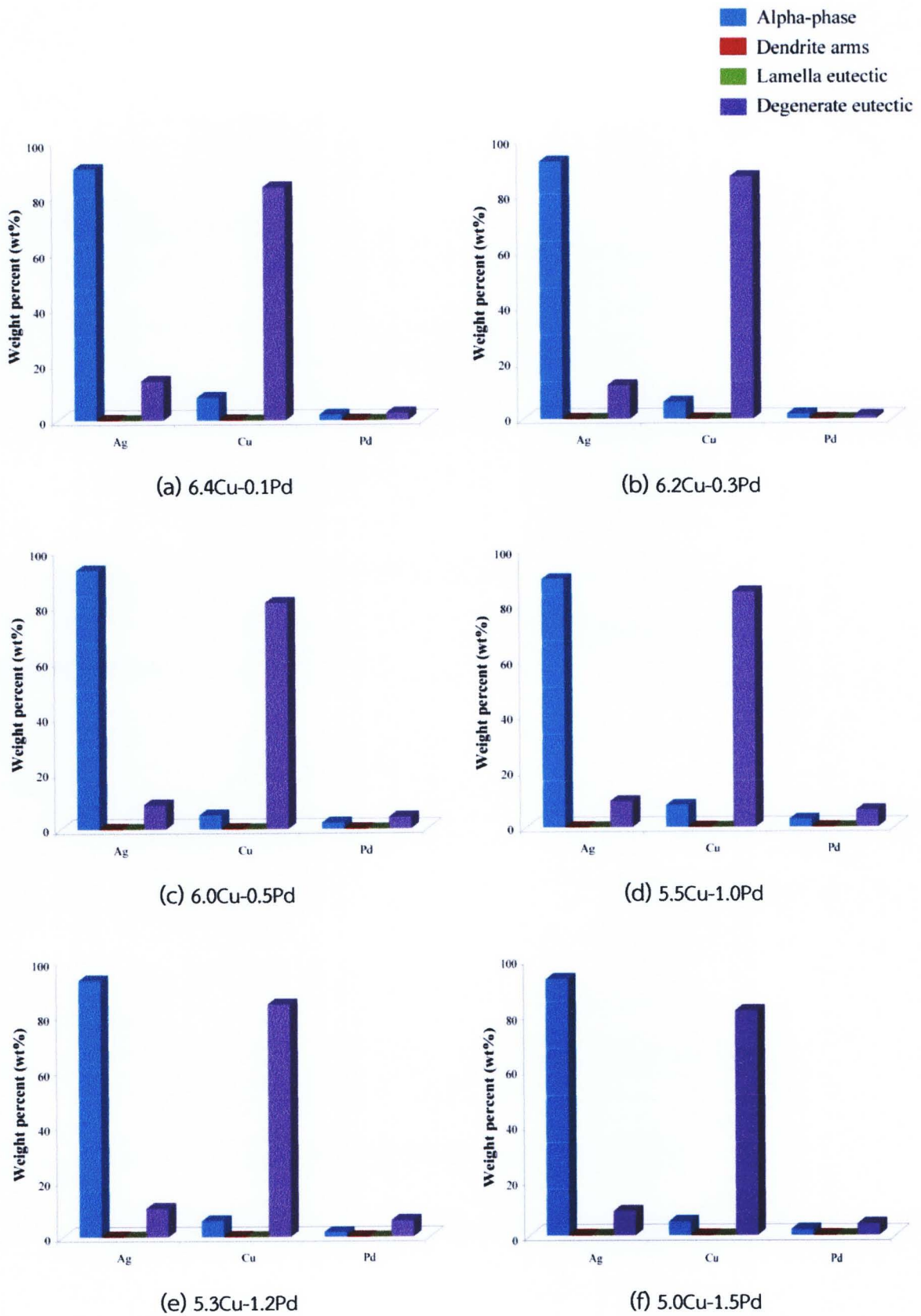
ตารางที่ 3.17 การวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ในชั้นทดสอบโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Cu-Pd สภาวะหลังบ่มแข็ง

Samples	Composition, Ag-Cu-Pd (wt%)			
	α -phase	Dendrite arms	Lamella eutectic	Degenerated eutectic
935 Pd V1 (6.4Cu-0.1Pd)	89.96-8.13-1.91	-	-	14.01-83.40-2.59
935 Pd V2 (6.2Cu-0.3Pd)	92.19-6.05-1.76	-	-	12.10-86.74-1.16
935 Pd 3 (6.0Cu-0.5Pd)	92.77-5.05-2.18	-	-	8.72-81.10-4.18
935 Pd V4 (5.5Cu-1.0Pd)	89.18-7.98-2.84	-	-	9.39-84.53-6.08
935 Pd V5 (5.3Cu-1.2Pd)	92.48-5.82-1.70	-	-	10.32-83.70-5.98
935 Pd V6 (5.0Cu-1.5Pd)	91.20-7.00-1.80	-	-	9.62-81.37-9.01

จากแผนภูมิแสดงส่วนผสมของธาตุจากการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ในชิ้นทดสอบหลังหล่อ (รูปที่ 3.21) ยืนยันปริมาณเงินในเฟสแอลฟา แขนเดนไดรต์ โครงสร้างลามล่ายุเทคติกและโครงสร้างดีเจเนอเรตยูเทคติกประมาณ 95, 89, 65 และ 29 wt% ตามลำดับ โดย Pd สามารถละลายได้ทั้งในเฟสของเงินและทองแดง แต่มีแนวโน้มการละลายร่วมกับเฟสที่มีทองแดงปริมาณสูงได้มากกว่า โดยเฉพาะเฟสทองแดงหลังการบ่มแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.21 การวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Cu-Pd สภาวะหลังหล่อ (a) 6.4Cu-0.1Pd (b) 6.2Cu-0.3Pd (c) 6.0Cu-0.5Pd (d) 5.5Cu-1.0Pd (e) 5.3Cu-1.2Pd และ (f) 5.0Cu-1.5Pd

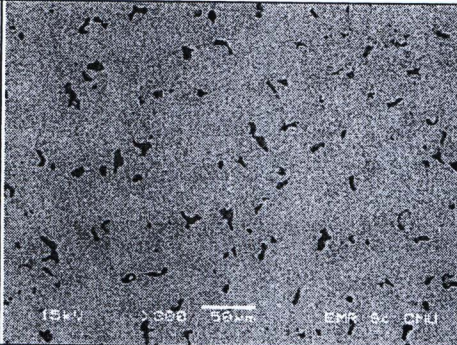

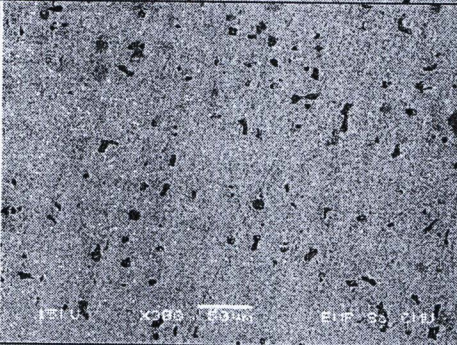

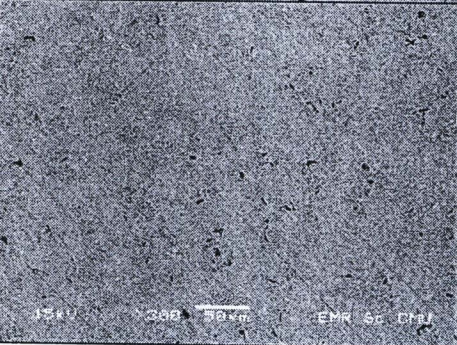
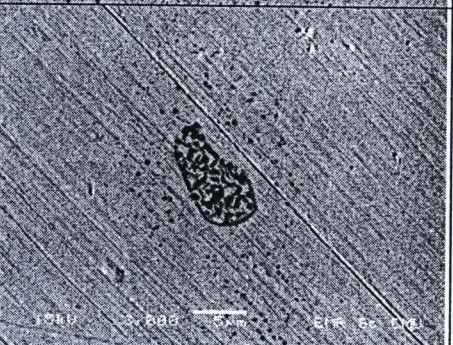


รูปที่ 3.22 การวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Cu-Pd สภาวะหลังบ่มแข็ง (a) 6.4Cu-0.1Pd (b) 6.2Cu-0.3Pd (c) 6.0Cu-0.5Pd (d) 5.5Cu-1.0Pd (e) 5.3Cu-1.2Pd และ (f) 5.0Cu-1.5Pd

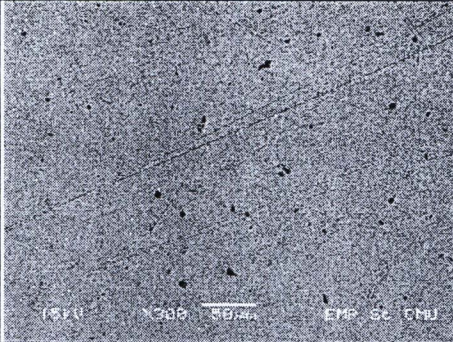

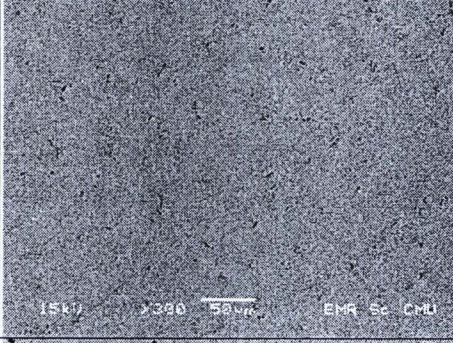
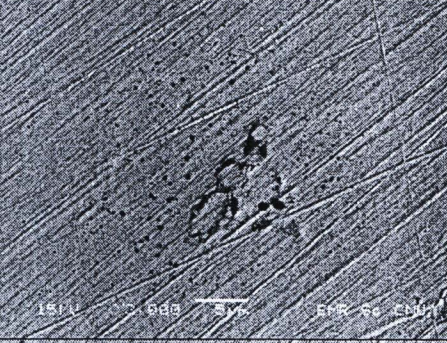
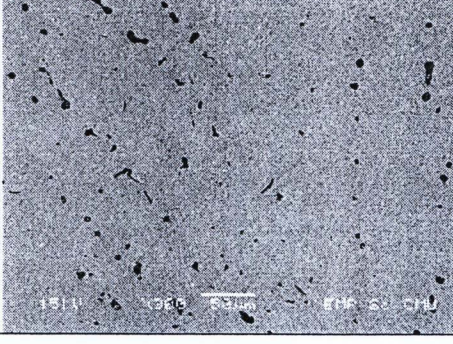
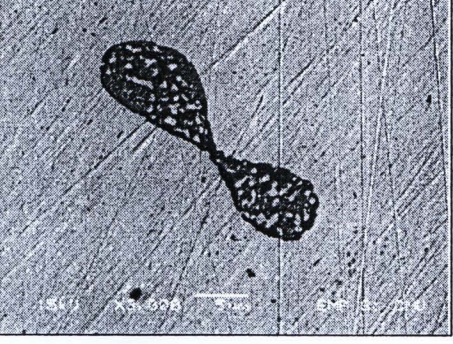
3.6.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Ag-Cu-Zn-Si

โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Cu-Zn-Si ที่ส่วนผสม ปริมาณ 0.5-2.0wt%Zn และ 0.05-0.3wt%Si แสดงดังตารางที่ 3.18 ลักษณะโครงสร้างโดยทั่วไปที่กำลังขยายต่ำ พบโครงสร้างยูเทคติกปริมาณมากกระจายตัวอยู่ทั่วไปในชั้นทดสอบที่มีการเติมสังกะสีหรือซิลิกอนเพียงธาตุเดียว คือชั้นทดสอบ 935 Zn-Si V1 และ 935 Zn-Si 2 โดยปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกลดลงเมื่อมีการเจือด้วยสังกะสีและซิลิกอน โดยเมื่อเปรียบเทียบกับ การเจือแพลเลเดียม (ตารางที่ 3.14) พบว่าการเจือด้วยสังกะสีและซิลิกอนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างลามาเลายูเทคติก (เฟสขาวสลับดำ) โดยไม่ปรากฏโครงสร้างลามาเลายูเทคติกในชั้นทดสอบที่มีปริมาณสังกะสีและซิลิกอนสูง ดังแสดงในชั้นทดสอบ 935 Zn-Si V6 (2.0Zn-0.05Si)

ตารางที่ 3.18 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Cu-Zn-Si สภาวะหลังหล่อ

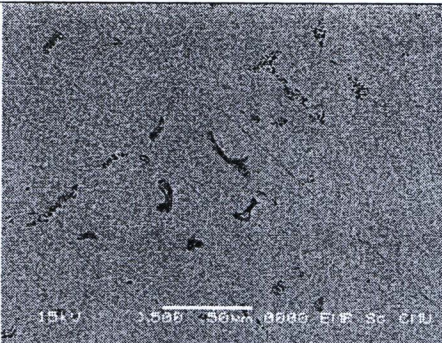
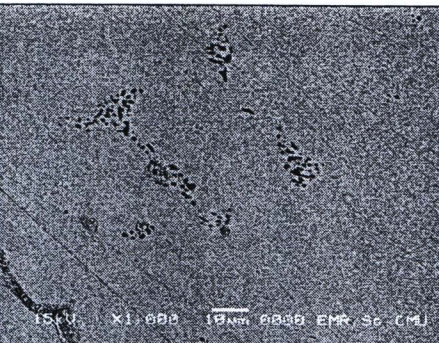


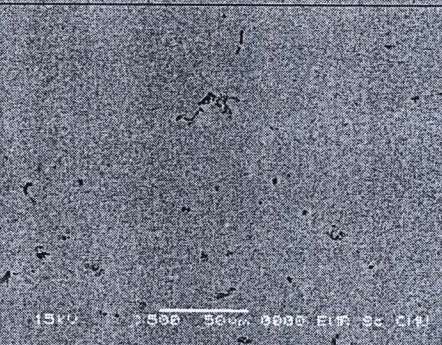


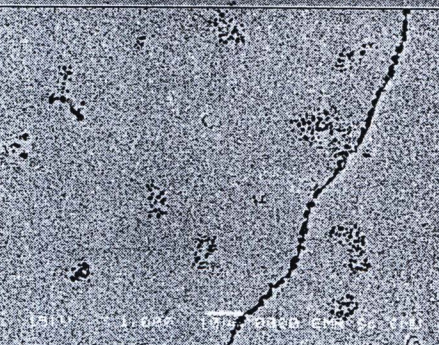
ชั้นทดสอบ	กำลังขยาย 300 เท่า	กำลังขยาย 1000 เท่า
935 Zn-Si V1 (0.5Zn)		
935 Zn-Si 2 (0.05Si)		
935 Zn-Si 3 (0.5Zn-0.05Si)		

ตารางที่ 3.18 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Cu-Zn-Si สภาวะหลังหล่อ

ชั้นทดสอบ	กำลังขยาย 300 เท่า	กำลังขยาย 1000 เท่า
935 Zn-Si V4 (1.0Zn-0.1Si)		
935 Zn-Si V5 (1.0Zn-0.3Si)		
935 Zn-Si V6 (2.0Zn-0.05Si)		

พิจารณาโครงสร้างจุลภาคหลังการบ่มแข็ง (ตารางที่ 3.19) พบว่าชั้นทดสอบที่มีส่วนผสมของสังกะสีและ/หรือซิลิกอนปริมาณต่ำ (0.5Zn, 0.05Si และ 0.5Zn-0.05Si) มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับโลหะผสมระบบ Ag-Cu-Pd คือมีโครงสร้างดีเจนเนอเรตคอปเปอร์กระจายตัวทั่วไปในเฟสหลัก ที่ปริมาณ 1.0wt%Zn (ชั้นทดสอบ 935 Zn-Si V4 และ 935 Zn-Si V5) โครงสร้างดีเจนเนอเรตคอปเปอร์คอปเปอร์เปลี่ยนเป็นลักษณะกลุ่มของเฟสสีดำ (ปริมาณทองแดงสูง) ตกตะกอนรวมกันเป็นกลุ่มโดยตะกอนเหล่านี้จะตกผลึกร่วมเป็นอนุภาคเดียวกันเมื่อปริมาณสังกะสีมีค่ามากขึ้น ดังแสดงในชั้นทดสอบ 935 Zn-Si V6 (2.0Zn-0.05Si)

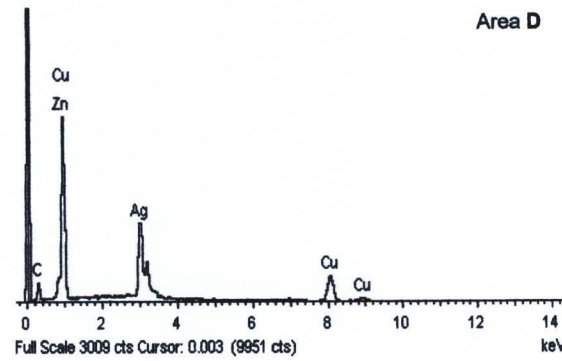
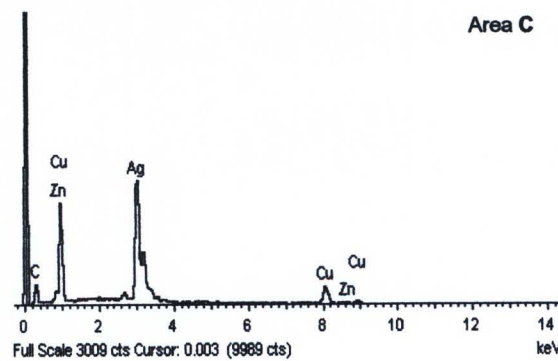
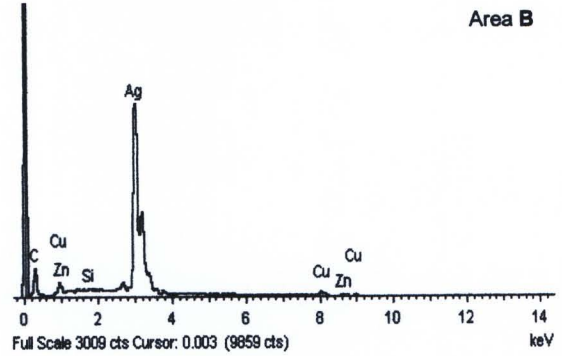
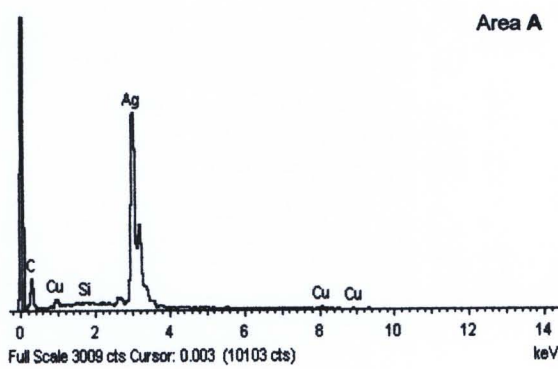
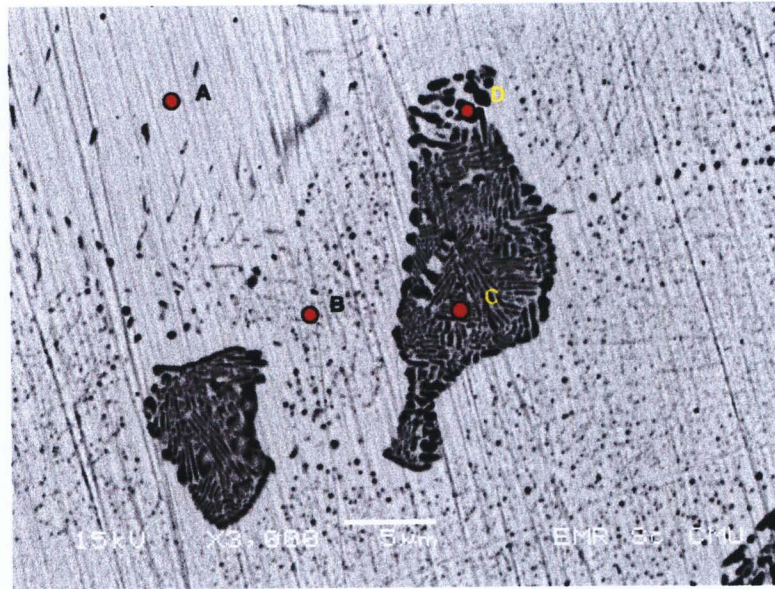
ตารางที่ 3.19 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Cu-Zn-Si สภาวะหลังบ่มแข็ง

ชนิดทดสอบ	กำลังขยาย 500 เท่า	กำลังขยาย 1000 เท่า
935 Zn-Si V1 (0.5Zn)		
935 Zn-Si V2 (0.05Si)		
935 Zn-Si V3 (0.5Zn-0.05Si)		
935 Zn-Si V4 (1.0Zn-0.1Si)		

ตารางที่ 3.19 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Cu-Zn-Si สภาวะหลังบ่มแข็ง

ชั้นทดสอบ	กำลังขยาย 500 เท่า	กำลังขยาย 1000 เท่า
935 Zn-Si V5 (1.0Zn-0.3Si)		
935 Zn-Si V6 (2.0Zn-0.05Si)		

การวิเคราะห์ธาตุแบบจุดด้วย EDS ในชั้นทดสอบโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Cu-Zn-Si กระทำในทุกชั้นทดสอบเช่นเดียวกับโลหะผสมเงินระบบ Ag-Cu-Pd โดยวิเคราะห์จำนวน 4 บริเวณ คือ เฟสหลัก (matrix) หรือเฟสอัลฟา บริเวณขอบของเดรโดรต์ บริเวณโครงสร้างลามেলাยูเทคติกและบริเวณโครงสร้างดีเจนเนอเรตยูเทคติก ตัวอย่างการวิเคราะห์ในบริเวณต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.23 และผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ในโลหะผสมระบบ Ag-Cu-Zn-Si สภาวะหลังหล่อและหลังบ่มแข็งในทุกชั้นทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.20 และ 3.21 โดยมีการแสดงข้อมูลเชิงแผนภูมิในรูปที่ 3.24 และ 3.25 ตามลำดับ



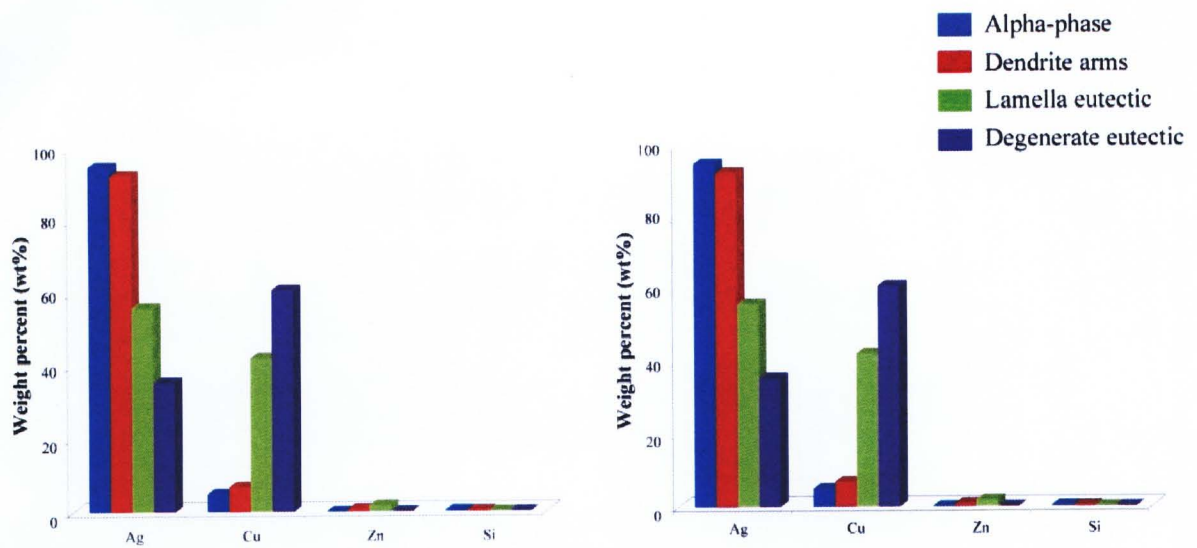
รูปที่ 3.23 ภาพอิเล็กตรอนกระเจิงกลับและการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ในชิ้นทดสอบ 935 Zn-Si V1
สถานะหลังหล่อ

ตารางที่ 3.20 การวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Cu-Zn-Si สภาวะหลังหล่อ

Samples	Composition, Ag-Cu-Zn-Si (wt%)			
	α -phase	Dendrite arms	Lamella eutectic	Degenerated eutectic
935 Zn-Si V1	94.95-4.86-0.00-0.19	92.47-6.73-0.65-0.15	56.15-42.21-1.64-0.00	35.64-61.03-0.00-0.00
935 Zn-Si V2	94.55-5.10-0.26-0.01	92.82-7.18-0.00-0.00	64.47-34.50-1.03-0.00	29.50-69.59-0.94-0.00
935 Zn-Si V3	95.01-4.35-0.62-0.02	92.92-5.71-1.37-0.00	82.65-15.85-1.27-0.23	28.33-68.26-3.18-0.23
935 Zn-Si V4	94.35-4.07-1.58-0.00	93.26-5.37-1.33-0.04	53.01-43.06-3.26-0.67	53.35-43.38-3.26-0.01
935 Zn-Si V5	96.18-2.48-1.34-0.00	95.98-3.47-0.55-0.00	82.69-14.91-2.31-0.01	28.92-64.57-4.86-1.65
935 Zn-Si V6	96.55-2.74-0.71-0.00	91.49-5.42-3.01-0.08	49.23-46.61-3.28-0.88	29.17-62.28-5.71-2.84

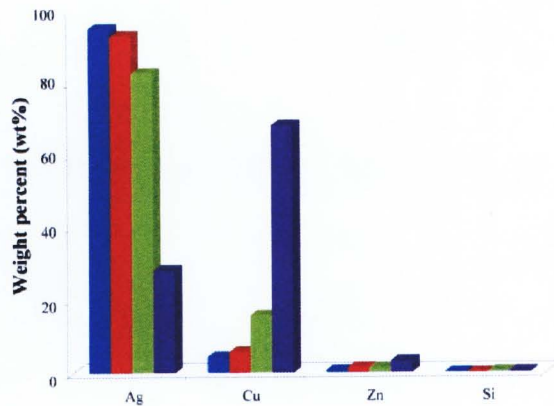
ตารางที่ 3.21 การวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Cu-Zn-Si สภาวะหลังบ่มแข็ง

Samples	Composition, Ag-Cu-Zn-Si (wt%)			
	α -phase	Dendrite arms	Lamella eutectic	Degenerated eutectic
935 Zn-Si V1	91.75-7.48-0.77-0.00	-	-	8.50-88.24-3.17-0.09
935 Zn-Si V2	94.56-5.44-0.00-0.00	-	-	9.61-90.39-0.00-0.00
935 Zn-Si V3	92.20-6.03-1.70-0.07	-	-	7.27-87.62-3.41-1.70
935 Zn-Si V4	96.08-3.14-0.78-0.00	-	-	28.93-68.37-2.70-0.00
935 Zn-Si V5	94.05-5.51-0.35-0.09	-	-	4.51-88.93-3.43-3.13
935 Zn-Si V6	94.78-3.56-1.76-0.00	-	-	4.04-87.14-2.75-6.07

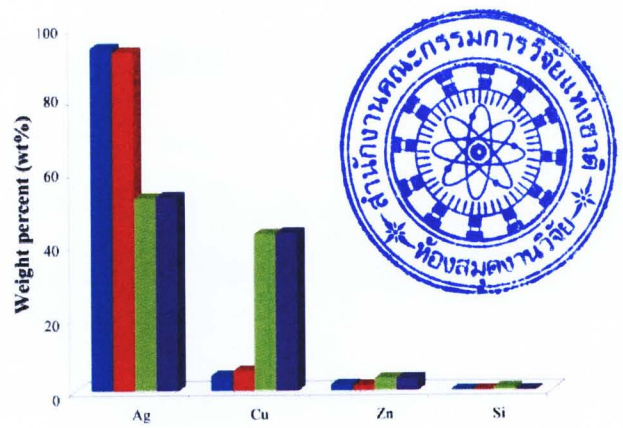


(a) 6.0Cu-0.5Zn

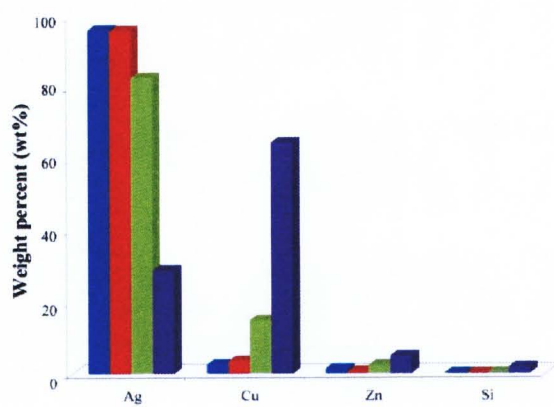
(b) 6.45Cu-0.05Si



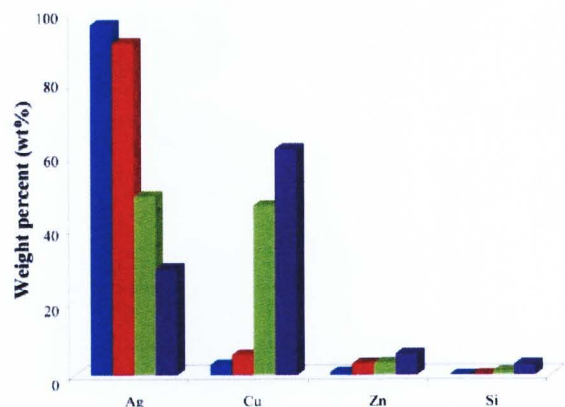
(c) 5.9Cu-0.5Zn-0.05Si



(d) 5.4Cu-1.0Zn-0.1Si



(e) 5.2Cu-1.0Zn-0.3Si

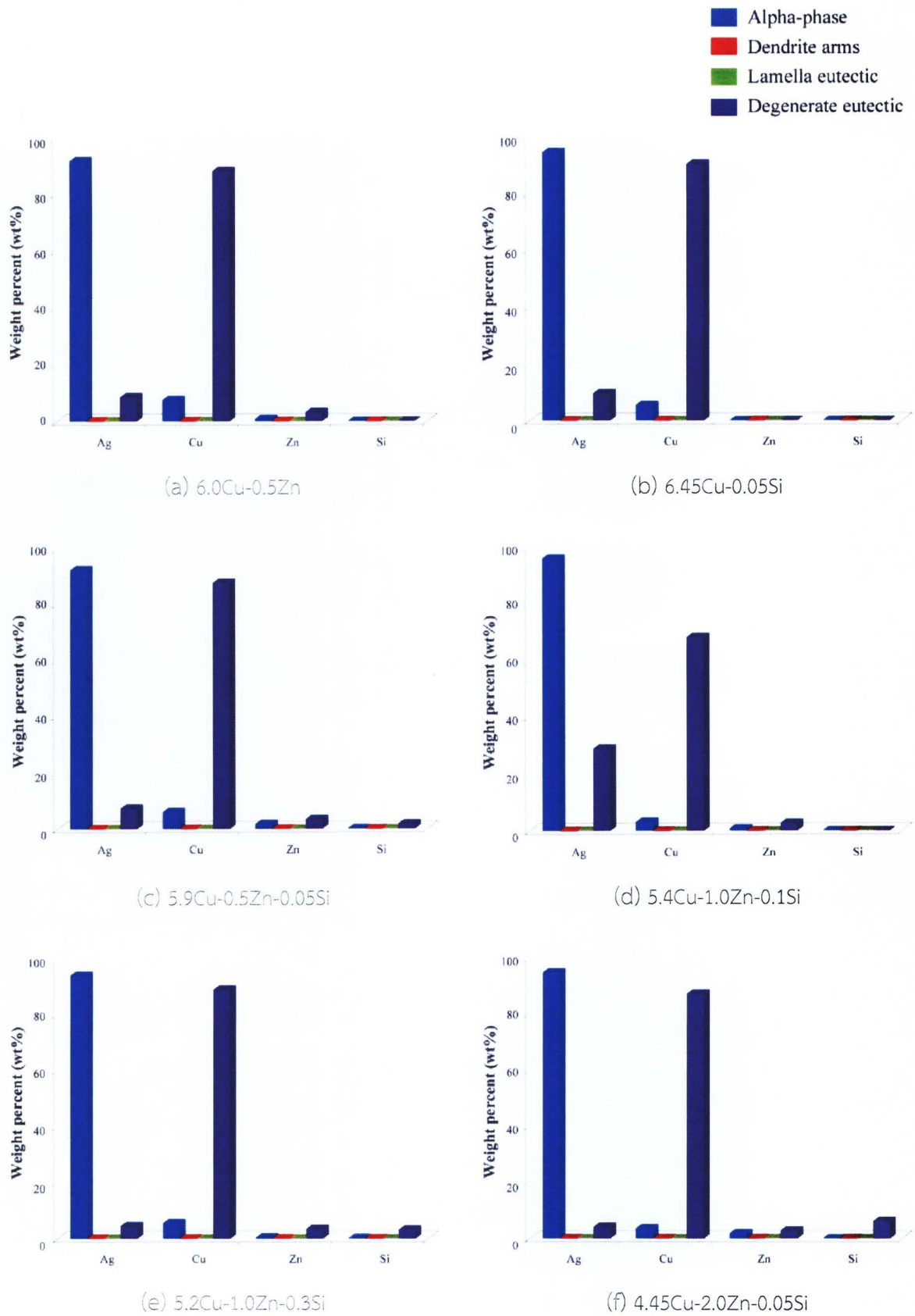


(f) 4.45Cu-2.0Zn-0.05Si

รูปที่ 3.24 การวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Cu-Zn-Si สภาวะหลังหล่อ

(a) 6.0Cu-0.5Zn (b) 6.45Cu-0.05Si (c) 5.9Cu-0.5Zn-0.05Si (d) 5.4Cu-1.0Pd-0.1Si

(e) 5.2Cu-1.0Pd-0.3Si และ (f) 4.45Cu-2.0Pd-0.05Si



รูปที่ 3.25 การวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงระบบ Ag-Cu-Zn-Si สภาวะหลังบ่มแข็ง
 (a) 6.0Cu-0.5Zn (b) 6.45Cu-0.05Si (c) 5.9Cu-0.5Zn-0.05Si (d) 5.4Cu-1.0Zn-0.1Si
 (e) 5.2Cu-1.0Zn-0.3Si และ (f) 4.45Cu-2.0Zn-0.05Si

จากการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ในโลหะผสมระบบ Ag-Cu-Zn-Si สภาวะหลังหล่อ (ตารางที่ 3.20 และรูปที่ 3.24) พบปริมาณของสังกะสีและซิลิกอนในโครงสร้างดีเจนเนอเรตยูเทคติกซึ่งมีปริมาณทองแดงสูง ซึ่งการละลายของซิลิกอนในทองแดงนี้เป็นผลให้โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงมีความสามารถต่อต้านทานการหมองได้ดี และเมื่อพิจารณาโครงสร้างโลหะเงินผสมร่วมกับการทดสอบการหมอง พบว่าขึ้นทดสอบหลังปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการบ่มแข็งจะสูญเสียความสามารถในการต้านทานการหมอง เนื่องจากการละลายของทองแดงในเฟสหลัก เกิดเป็นสารละลายของแข็งอิมิตัวที่ยืดของทองแดงซึ่งเป็นกลไกหลักในการอบละลาย ทำให้หลังการอบบ่มเกิดการตกตะกอนขนาดเล็กจำนวนมากของทองแดงกระจายตัวทั่วไปในโครงสร้าง กลไกเหล่านี้ส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงแต่ทำให้โลหะสูญเสียความสามารถต่อต้านทานการหมองของโลหะ ดังนั้นโลหะในทุกส่วนผสมจึงมีการหมองที่รุนแรงเมื่อทดสอบในสารละลาย Na_2S ในทุกช่วงเวลาทดสอบดังผลการทดสอบการหมองในหัวข้อ 3.3