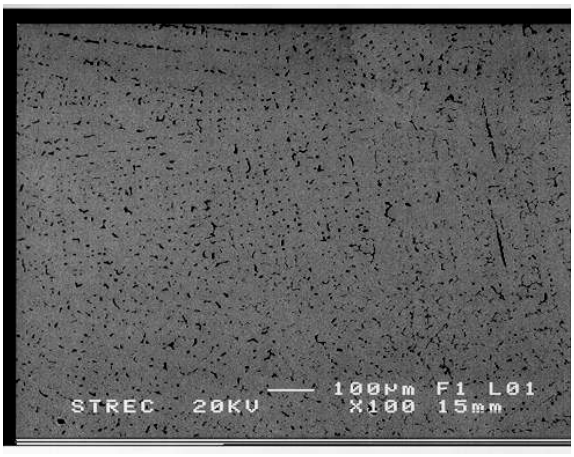
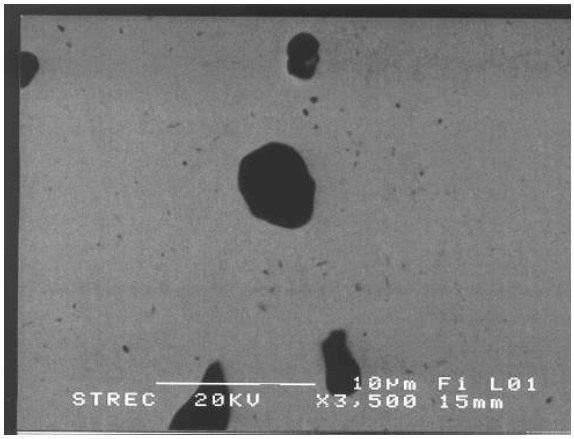
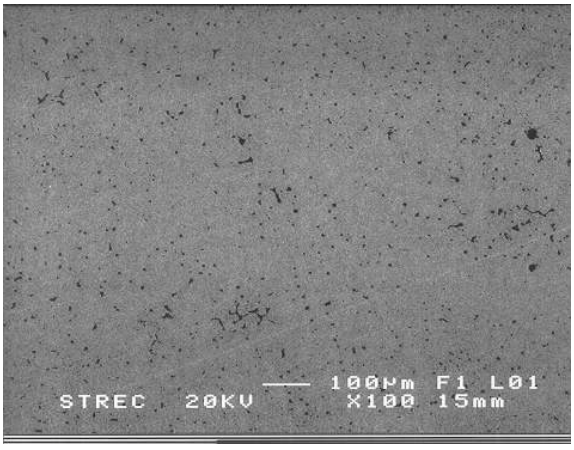
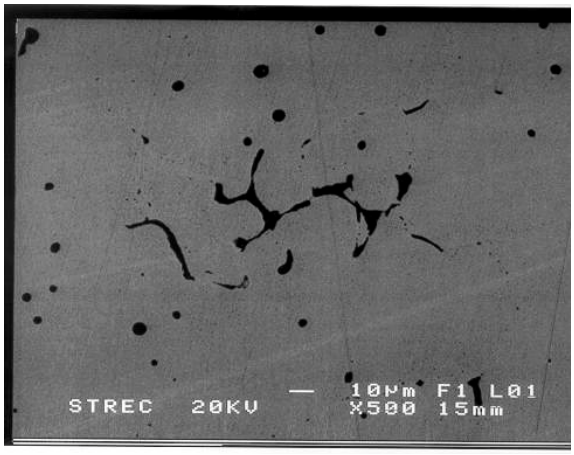




(ช) (ซ)

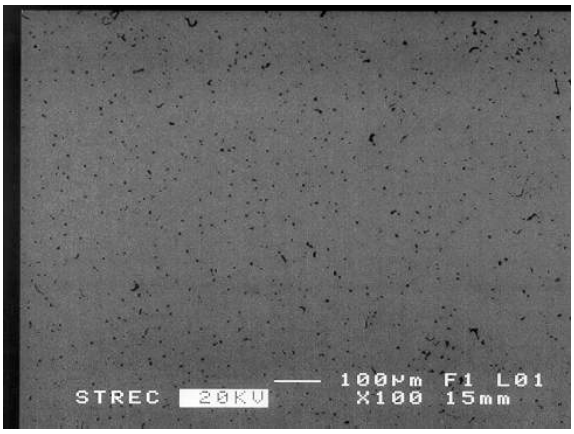
ชุดส่วนผสม 5.16%Cu-0.09%Si-1.09%In – balance of Ag

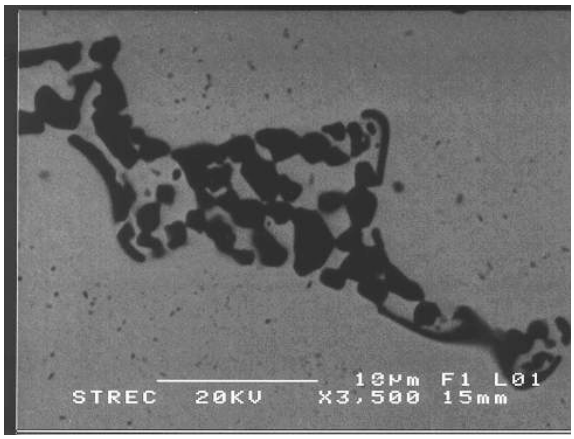




(ฌ) (ญ)

ชุดส่วนผสม 4.23%Cu-0.10%Si-1.60%In – balance of Ag

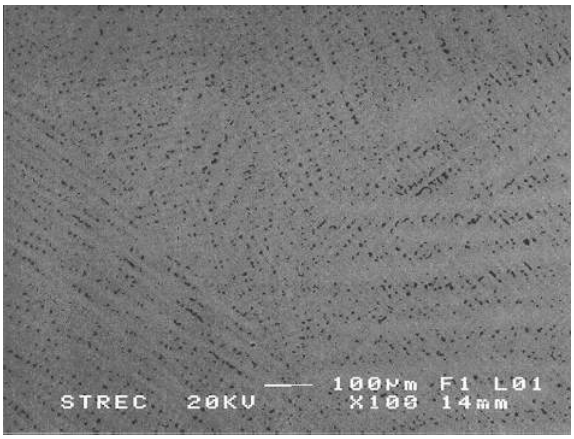




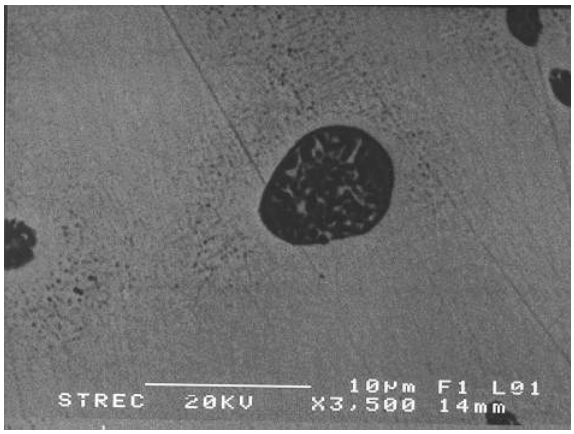
(ฎ) (ฏ)

ชุดส่วนผสม 3.76%Cu-0.11%Si-3.13%In – balance of Ag

รูปที่ 3.17 ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงของแต่ละชุดส่วนผสมที่กำลังขยายต่างๆ (ต่อ)

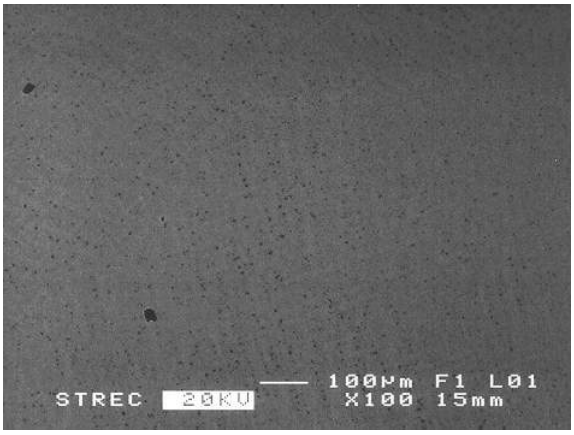


(ฐ)

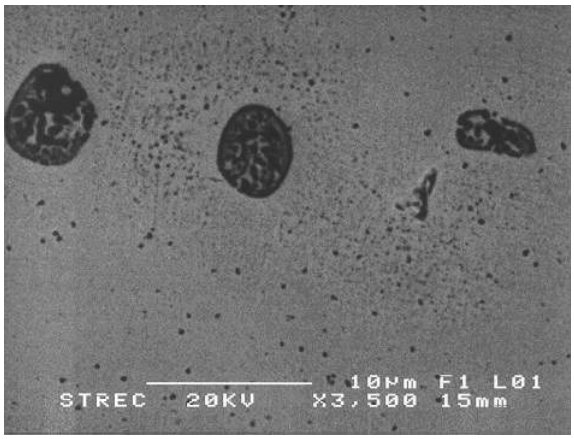


(ฑ)

ชุดส่วนผสม 5.88%Cu-1.03%In – balance of Ag

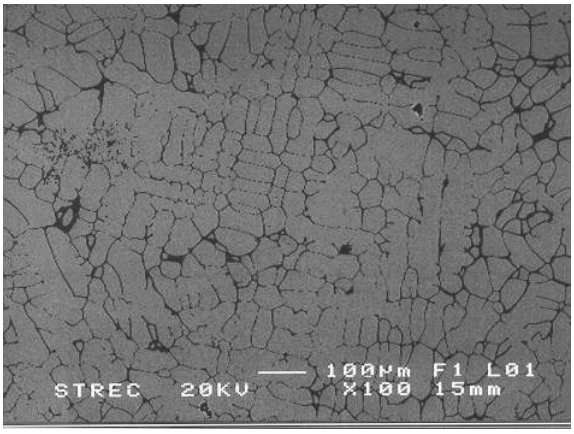


(ฒ)

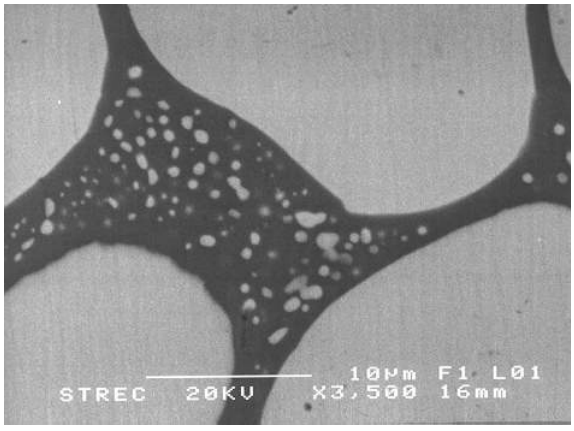


(ณ)

ชุดส่วนผสม 5.17%Cu-3.09%In – balance of Ag



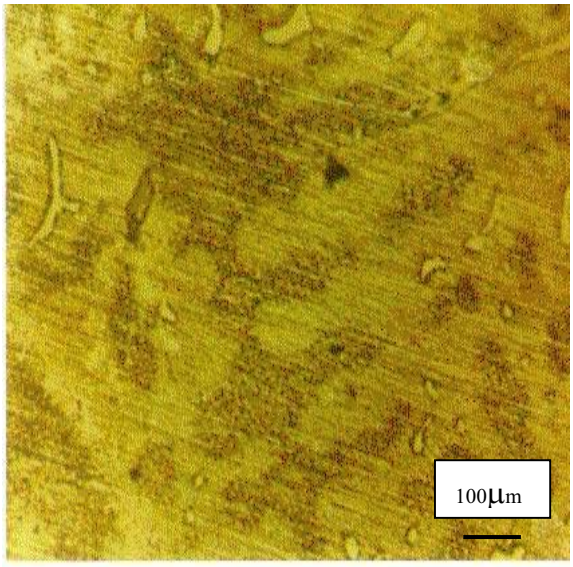
(ด)



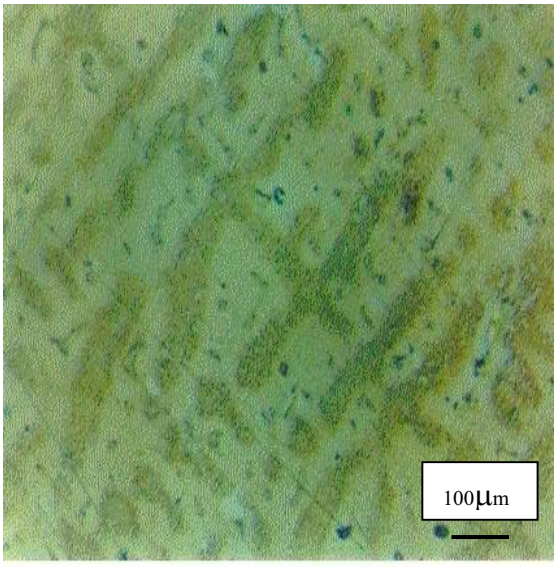
(ต)

ชุดส่วนผสม 5.13%Cu-0.44%Si-3.12%In – balance of Ag

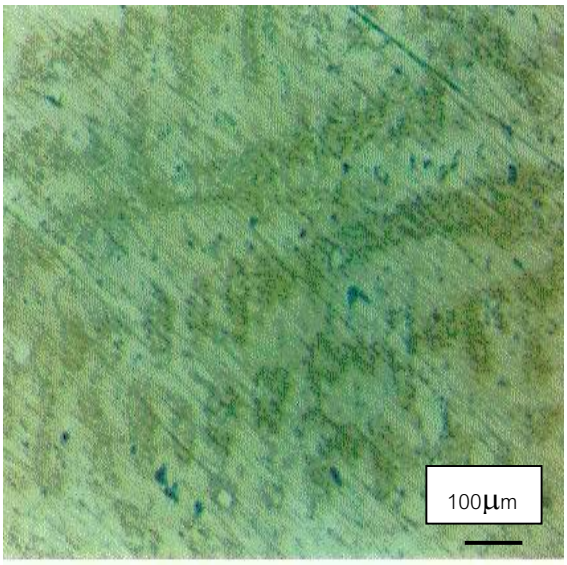
รูปที่ 3.17 ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงของแต่ละชุดส่วนผสมที่กำลังขยายต่างๆ (ต่อ)



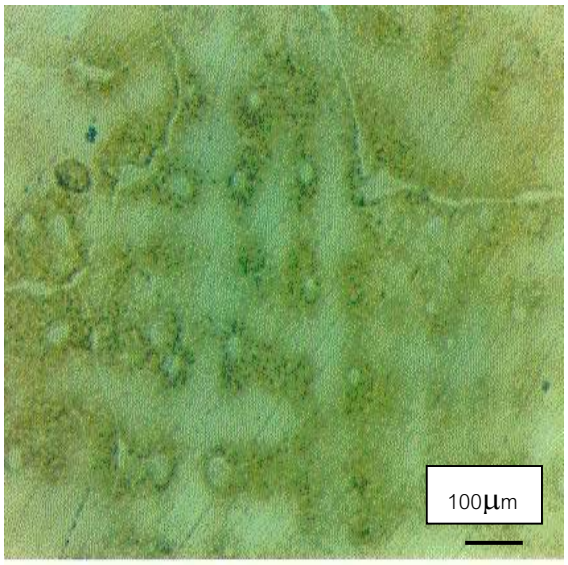
Sterling



Sterling + 0.11%Si

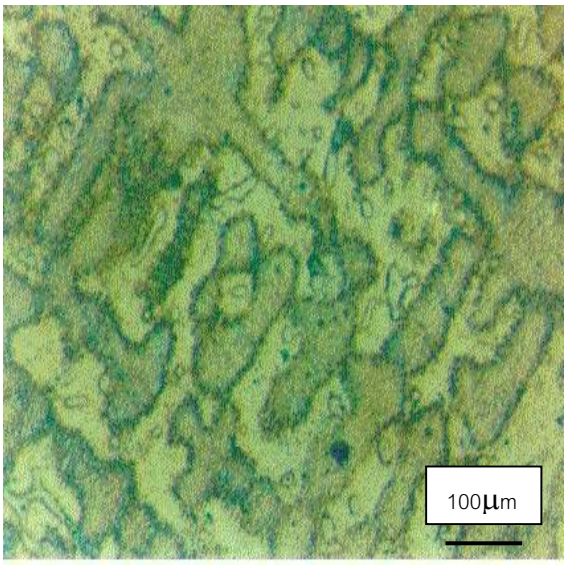


Sterling + 0.09%Si + 0.53%In

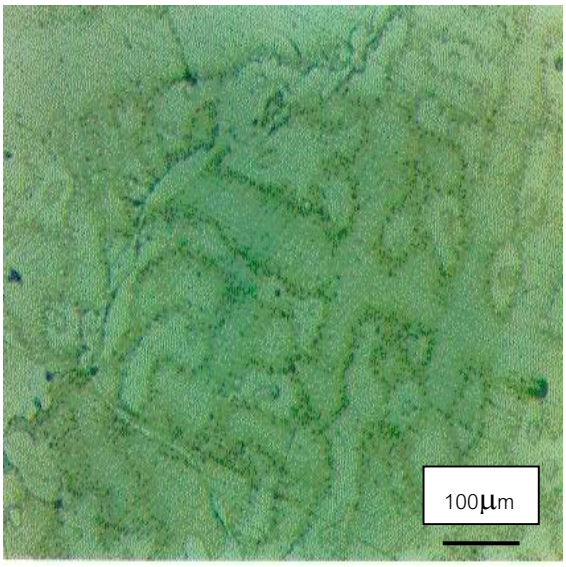


Sterling + 0.09%Si + 1.09%In

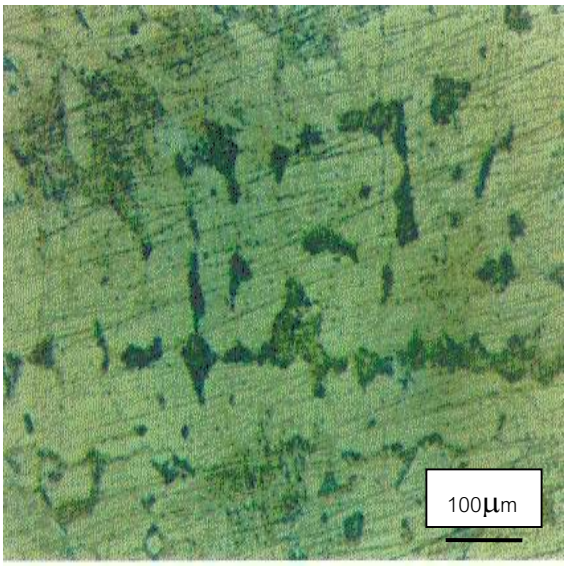
รูป 3.18 โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากนำไปกัดกรด ที่กำลังขยาย 200 เท่า



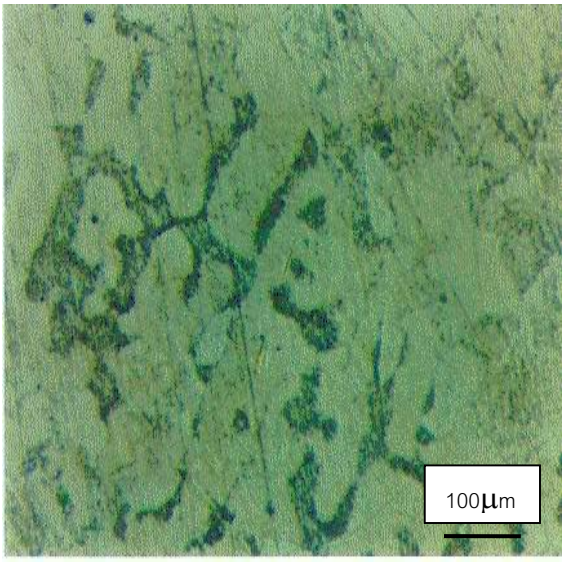
Sterling + 0.10%Si + 1.60%In



Sterling + 0.11%Si + 3.13%In



Sterling + 1.03%In



Sterling + 3.09%In

รูป 3.19 โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากนำไปกัดกรด ที่กำลังขยาย 200 เท่า

3.12 ผลวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเงินสเตอร์ลิงผสมภายหลังจากการหลอม และช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว

ในการหลอมได้ผลของส่วนผสมดังตารางที่ 3.8 และวัดช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวโดยใช้เครื่อง DTA ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางเดียวกัน

ตารางที่ 3.8 แสดงผลของส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงและช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว

หมายเลขชุด	เงิน (wt.%)	ทองแดง (wt.%)	ซิลิคอน (wt.%)	อินเดียม (wt.%)	จุดหลอมเหลว (^{o}c)	จุดที่เริ่มมีการไหลตัว (^{o}c)
1	93.39	6.90	-	-	853.8	917.0
2	93.57	6.26	0.11	-	858.7	908.5
3	93.32	5.57	0.09	0.53	856.2	907.4
4	93.55	5.16	0.09	1.09	865.9	909.7
5	93.62	4.23	0.10	1.60	856.5	911.3
6	93.11	3.76	0.11	3.13	876.7	915.2
7	93.56	5.88	-	1.03	859.4	903.8
8	93.58	5.17	-	3.09	850.2	903.0

จากตารางข้างต้น จะเห็นว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงผสมในแต่ละชุดส่วนผสม จะมีอุณหภูมิ ณ จุดหลอมเหลวในช่วงระหว่าง 850 – 876^{O}C และมีอุณหภูมิ ณ จุดหลอมเหลวสมบูรณ์ในช่วงระหว่าง 902 – 917^{O}C ซึ่งผลจากการวัดค่าจุดหลอมเหลวดังกล่าวจะได้กล่าวในหัวข้อการอภิปรายผลการทดลองต่อไป

ตารางที่ 3.9 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นตัวอย่างก่อนและหลังการหล่อ

หมายเลขชุด	% โดยน้ำหนักส่วนผสมก่อนการหล่อ				% โดยน้ำหนักส่วนผสมหลังการหล่อ			
	Ag	Cu	Si	In	Ag	Cu	Si	In
1	93.50	7.50	-	-	balance	6.90	-	-
2	93.50	7.00	0.50	-	balance	6.26	0.11	-
3	93.50	6.50	0.50	0.50	balance	5.57	0.09	0.53
4	93.50	6.00	0.50	1.00	balance	5.16	0.09	1.09
5	93.50	5.50	0.50	1.50	balance	4.23	0.10	1.60
6	93.50	5.00	0.50	3.00	balance	3.76	0.11	3.13
7	93.50	6.50	-	1.00	balance	5.88	-	1.03
8	93.50	5.50	-	3.00	balance	5.17	-	3.09

จากตารางที่ 3.9 สังเกตุได้ว่า เงินสเตอร์ลิงบางชุดตัวอย่างจะมี % สัดส่วนโดยน้ำหนักของธาตุต่าง ๆ ในส่วนผสมเช่น Ag, Cu, In ภายหลังการหล่อมากขึ้นกว่าก่อนที่จะทำการหล่อ ทั้งนี้เนื่องจาก

สัดส่วนของซิลิคอนภายหลังการหล่อมีค่าลดลงมากถึง 0.39–0.41% wt. โดยเหลือเพียง 0.09–0.11% wt. จากเดิมที่เติมในชุดตัวอย่างที่ได้ผสมซิลิคอน 0.5% wt.

3.13 ผลของสมบัติทางกล

3.13.1 ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness)

ทดสอบความแข็งโดยเครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ ใช้น้ำกด 1 กิโลกรัม เวลากด 10 วินาที ได้ผลดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 ค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิงผสมซิลิคอนและอินเดียมปริมาณต่าง ๆ กัน

หมายเลขชุด	%โดยน้ำหนักของส่วนผสมหลังการหล่อ				ค่าความแข็ง (HV)
	Ag	Cu	Si	In	
1	Balance	6.90	-	-	58.1
2	Balance	6.26	0.11	-	80.4
3	Balance	5.57	0.09	0.53	76.8
4	Balance	5.16	0.09	1.09	73.7
5	Balance	4.23	0.10	1.60	66.0
6	Balance	3.76	0.11	3.13	63.3
7	Balance	5.88	-	1.03	55.7
8	Balance	5.17	-	3.09	53.1

3.13.2 ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง Instron ระบบอัตโนมัติ ขนาด 150 kN รุ่น series IX โดยกำหนด ความเร็วในการดึง 0.5 mm./min ได้ผลดังตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 ผลการทดสอบค่าแรงดึงและ%การยืดตัวของ เงินสเตอร์ลิงแต่ละชุดส่วนผสม

หมายเลขชุด	สัดส่วนธาตุที่พิจารณา		Ultimate Stress (MPa)	0.2% Offset Yield St (MPa)	% Elongation
	Si (%wt.)	In (%wt.)			
1	-	-	137.836	93.375	6.0
2	0.11	-	240.693	67.180	3.5
3	0.09	0.53	210.610	107.642	9.0
4	0.09	1.09	195.413	90.559	5.0
5	0.10	1.60	177.148	88.853	5.0
6	0.11	3.13	146.813	74.615	3.0
7	-	1.03	134.156	126.076	10.0
8	-	3.09	118.700	84.808	5.0

3.14 ผลการทดสอบการต้านทานการหมอง

ทำการตัดชิ้นงานชิ้นตัวอย่างที่ได้จากการหล่อเงินสเตอร์ลิงในแต่ละส่วนผสม ๆ ละ 4 ชิ้น ขนาดชิ้นละ 1 มม. ขัดจนถึงเบอร์ 1200 แล้วนำมาเจาะรู แขวนไว้ในภาชนะปิดที่ใส่สารละลายอิ่ม

ตัวของ Na_2S เพื่อให้ชิ้นทดสอบอยู่ในบรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยทดสอบในช่วงเวลาแตกต่างกันคือ 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง แล้วนำมาวัดค่าสีโดยใช้เครื่อง Spectrophotometer ได้ค่าดังตารางที่ 3.12 ดังนี้

ตารางที่ 3.12 ค่า DE ของเงินสเตอร์ลิงในแต่ละส่วนผสม ที่เวลาทดสอบต่างๆกัน

หมายเลขชุด	สัดส่วนธาตุที่พิจารณา		ค่าDE			
	Si (wt.%)	In(wt.%)	1ชม.	2ชม.	3ชม.	4ชม.
1	-	-	14.12	24.73	30.05	30.77
2	0.11	-	13.79	24.10	28.70	30.24
3	0.09	0.53	13.35	23.22	25.05	29.98
4	0.09	1.09	13.69	23.04	25.01	28.23
5	0.10	1.60	11.48	13.24	13.73	26.45
6	0.11	3.13	8.46	8.66	13.49	20.61
7	-	1.03	18.71	31.89	33.73	34.40
8	-	3.09	23.51	33.64	36.14	38.11

หมายเหตุ : ค่า DE คือค่าที่แสดงความแตกต่างระหว่างวัตถุ 2 ชิ้นที่มีการเปรียบเทียบค่าสีกัน โดยคำนวณได้จากสูตร

$$DE^2 = (L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2$$

โดยที่ 1.) ตัวเลข 1 หมายถึง ชิ้นงานก่อนที่ทำการทดสอบการหมอง

3.) ตัวเลข 2 หมายถึง ชิ้นงานหลังจากทำการทดสอบการหมอง

3.) ค่า L หมายถึงค่าLightness โดยค่า L=O คือ มืดมาก, L=100 คือสว่างมาก

4.) ค่า a หมายถึง ค่าสีแดง – เขียว

โดยที่ ถ้าสีแดง ค่า b จะมีค่าเป็นบวกตั้งแต่ 0 ถึง 100

ถ้าสีเขียวค่า b จะมีค่าเป็นลบตั้งแต่ – 100 ถึง 0

5.) ค่า b หมายถึง ค่าสีเหลือง – น้ำเงิน

โดยที่ ถ้าสีเหลือง ค่า b จะมีค่าเป็นบวกตั้งแต่ 0 ถึง 100

ถ้าสีน้ำเงิน ค่า b จะมีค่าเป็นลบตั้งแต่ – 100 ถึง 0

โดยกรณีนี้นำมาประยุกต์ใช้กับการวัดความแตกต่างของสีจากวัตถุเดียวกัน แต่มีสีเปลี่ยนแปลงไป เช่นการหมองของเงินสเตอร์ลิงผสมซึ่งรายละเอียดได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก

3.15 อภิปรายผลการทดลอง

3.15.1 ส่วนผสมทางเคมี

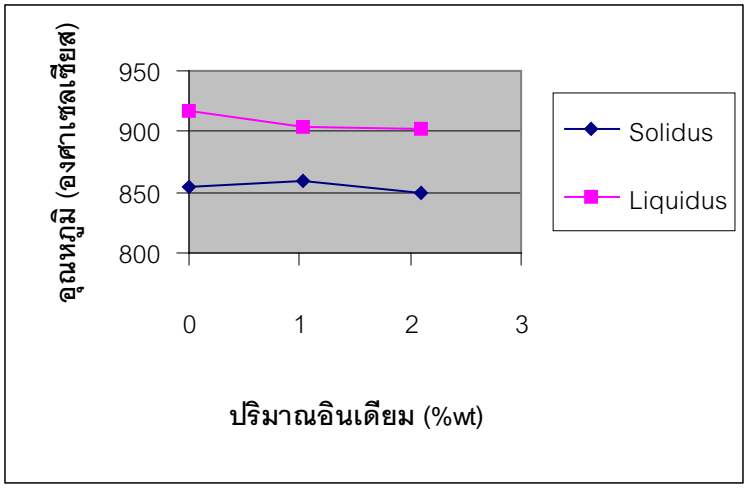
ผลของส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.8 ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างก่อนทำการหลอมและหลังทำการหลอม จะเห็นได้ว่ามีการสูญเสียของซิลิคอนในปริมาณที่สูง สำหรับชุดส่วนผสมที่ได้มีการ

เติมซิลิคอน 0.5 % โดยน้ำหนัก เนื่องจากสูญเสียปริมาณของซิลิคอนที่ออกไปในรูปของ slag หรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น กับอากาศที่อยู่โดยรอบขณะทำการหล่อ ทำให้ปริมาณของซิลิคอนเหลืออยู่น้อยกว่าที่ควรจะเป็น โดยปรากฏเหลือซิลิคอนเพียง 0.09 - 0.11% โดยน้ำหนักเท่านั้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการสูญเสียปริมาณซิลิคอนด้วย เช่นเวลาที่ใช้ในการหลอม และอุณหภูมิที่ใช้หลอม เนื่องจากซิลิคอนมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่าเงิน (1410^{O}C) ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิในการหลอมสูงกว่าการหลอมเงินปกติ และใช้เวลานานกว่าจึงจะเกิดการหลอมละลายเข้าด้วยกันกับส่วนผสมอื่นในเงินสเตอร์ลิง ทำให้มีแนวโน้มที่ซิลิคอนจะทำปฏิกิริยากับอากาศภายนอก รวมทั้งธาตุอื่นเกิดเป็นตะกรันหรือ slag มากยิ่งขึ้น และทำให้ สัดส่วนโดยน้ำหนักของธาตุ อื่นๆ ที่เหลือภายหลังการหล่อมีปริมาณที่สูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับชุดส่วนผสมเดียวกันก่อนทำการหล่อ เช่นในชุดส่วนผสม 5.57 % Cu – 0.09 % Si – 0.53 % In – balance of Ag ซึ่งมีปริมาณของ In ก่อนทำการหล่อเท่ากับ 0.5 % wt. แต่ภายหลังการหล่อแล้วปรากฏปริมาณของ In เท่ากับ 0.53 % wt.

แต่เนื่องจากเราต้องการศึกษาถึงอิทธิพลของอินเดียมที่มีผลต่อสมบัติด้านต่าง ๆ ของเงินสเตอร์ลิง คือสมบัติทางกล สมบัติด้านการต้านทานการหมอง และผลต่อจุดหลอมเหลวของเงินสเตอร์ลิง ดังนั้นเราจึงต้องทำการเปรียบเทียบโดยที่คงส่วนผสมของธาตุอื่น ๆ ที่เหลือให้คงที่ เช่น เงินทองแดงและซิลิคอน

3.15.2 ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว

จากตารางที่ 3.7 ทราบได้ว่า ผลของอินเดียมต่อจุดหลอมเหลวของเงินสเตอร์ลิงผสมไม่สามารถสรุปผลการตรวจสอบได้อย่างแน่ชัด โดยหากทำการเปรียบเทียบระหว่างชุดส่วนผสมที่มีปริมาณส่วนผสมของเงินและทองแดงใกล้เคียงกัน แต่มีการผสมปริมาณอินเดียมแตกต่างกันไป จะเห็นได้ว่าจุดหลอมเหลว (จุด solidus) ของเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากชุดส่วนผสมทั้ง 3 ชุด มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งไม่สามารถสรุปถึงความแตกต่างได้อย่างชัดเจน เนื่องจากปริมาณของอินเดียมที่เติมลงไปมีปริมาณที่น้อย จึงไม่สามารถสังเกตุถึงความเปลี่ยนแปลงของจุดหลอมเหลวของแต่ละชุดส่วนผสมได้ชัดเจน ซึ่งโดยทั่วไปเงินสเตอร์ลิง (93.5 % Ag – 7.5 % Cu) จะมีค่า Liquidus อยู่ระหว่าง 810 – 890^{O}C โดยการประมาณจากแผนภูมิสมดุล 2 เฟส (Ag –Cu) ในรูปที่ 3.1 แต่เนื่องจากในการทดลองทำการหล่อไม่สามารถ ควบคุมให้การแข็งตัวของน้ำโลหะเป็นไปอย่างสมดุลได้ ผลจึงทำให้เงินสเตอร์ลิงมีค่า Liquidus ระหว่าง 853.8 – 917^{O}C และมีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวเท่ากับ 63.2^{O}C ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสภาวะสมดุล และเมื่อพิจารณาที่จุดหลอมเหลวสมบูรณ์ หรือ Liquidus จะพบว่า ชุดส่วนผสม 5.88 % Cu – 1.03 % In – balance of Ag และ ชุดส่วนผสม 5.17 % Cu – 3.09 % In – balance of Ag ที่ผสมอินเดียม 1.03 และ 3.09 % wt. ตามลำดับ จะมีจุดหลอมเหลวสมบูรณ์ต่ำกว่า ชุดส่วนผสม 6.09 % Cu – balance of Ag ซึ่งเป็นเงินสเตอร์ลิงธรรมดา โดยสามารถสังเกตความแตกต่างได้อย่างชัดเจน ดังกราฟรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอินเดียมกับช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว สำหรับชุดส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่ไม่มีปริมาณซิลิคอนผสมอยู่

จากกราฟรูปที่ 3.20 จะเห็นได้ว่า จุดหลอมเหลวของชุดส่วนผสมที่มีอินเดียมผสมอยู่ 0 - 2.09% wt.จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่ถ้าพิจารณาจุดหลอมเหลวสมบูรณ์กับชุดส่วนผสมชุด ดังกล่าวจะพบความแตกต่างกันอย่างชัดเจน กล่าวคือปริมาณของอินเดียมตั้งแต่ 1.03 % wt. ขึ้นไป จะมีผลทำให้เงินสเตอร์ลิงมีอุณหภูมิ ณ จุดหลอมเหลวสมบูรณ์ (Liquidus) ลดลง โดยแปรผกผันกับปริมาณของอินเดียมที่เติมลงไป หมายถึงว่าหากมีการเติมอินเดียมลงในเงินสเตอร์ลิงมากขึ้น จะส่งผลให้อุณหภูมิ ณ จุดหลอมเหลวสมบูรณ์ลดลงยิ่งขึ้น สิ่งนี้ทำให้ทราบถึงสมบัติของอินเดียมที่มีต่อเงินสเตอร์ลิงประการหนึ่งคือ อินเดียมจะมีผลต่อการไหลตัวของโลหะหลอมเหลวขณะทำการหล่อ โดยถ้ามีการเติมอินเดียมในปริมาณ 1.03% wt. ขึ้นไปจะส่งผลให้จุดที่เริ่มมีการไหลตัว (Liquidus) ของเงินสเตอร์ลิงผสมมีค่าลดลง ทำให้สามารถลดอุณหภูมิในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ ซึ่งจะเป็นการประหยัดต้นทุนในการผลิตได้เป็นอย่างดี

แต่สำหรับชุดส่วนผสมที่มีซิลิคอนเป็นส่วนผสมจะพบว่า ชุดส่วนผสมดังกล่าวที่มีปริมาณของซิลิคอนใกล้เคียงกัน (0.09 - 0.11% wt.) เมื่อมีการเติมอินเดียมลงไปในปริมาณแตกต่างกันในแต่ละชุดส่วนผสม ผลที่ได้จะมีจุดหลอมเหลวไม่ต่างกันมากนัก แต่จะมีจุดหลอมเหลวสมบูรณ์ซึ่งมี แนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับชุดส่วนผสมที่มีการเติมซิลิคอนแต่ไม่เติมอินเดียม โดยสังเกตพบเมื่อตั้งแต่มีการผสมอินเดียมตั้งแต่ 0.53% wt ขึ้นไป แต่ค่าของอุณหภูมิ ณ จุดหลอมเหลวสมบูรณ์จะมีค่าไม่แตกต่างกันนัก (2 – 3^{O}C) สำหรับชุดส่วนผสมที่มีอินเดียมผสมอยู่ 0.53 - 1.60% wt. กล่าวคือสำหรับเงินสเตอร์ลิงที่มีซิลิคอนผสมอยู่ระหว่าง 0.09 – 0.11% wt เมื่อมีการเติมอินเดียมลงไปด้วยอัตราส่วนผสมระหว่าง 0.53 – 1.60% wt. จะมีผลต่อจุดหลอมเหลวและจุดหลอมเหลวสมบูรณ์ของเงินสเตอร์ลิงน้อยมาก เมื่อเทียบกับชุดส่วนผสมที่ไม่มีการเติมอินเดียมแต่เติมซิลิคอนในปริมาณใกล้เคียงกัน (0.09-

0.11% wt.) คือมีค่าอุณหภูมิหลอมเหลวระหว่าง 907 – 911°C แต่เมื่อเทียบกับเงินสเตอร์ลิงธรรมดา (ชุดส่วนผสม 6.09 % Cu – balance of Ag) พบว่า ชุดส่วนผสมที่มีอินเดียมผสมอยู่ 0.53 – 1.60 % wt. จะมีจุดหลอมเหลวสมบูรณ์ต่ำกว่า และสำหรับชุดส่วนผสม 3.76 %Cu – 0.11 %Si – 2.13 %In – balance of Ag ที่มีอินเดียมผสมอยู่ 2.13 % จะมีจุดหลอมเหลวสูงขึ้นเมื่อเทียบกับชุดอื่น ๆ โดยเฉพาะชุดส่วนผสมที่เป็นเงินสเตอร์ลิงธรรมดาพบว่า ชุดส่วนผสม 3.76 %Cu – 0.11 %Si – 2.13 %In – balance of Ag มีค่าจุดหลอมเหลวสูงขึ้นมาก ซึ่งข้อมูลนี้ยังไม่สามารถยืนยันผลการตรวจสอบได้ เนื่องจากมีค่าไม่สอดคล้องกับการทดลองของ Wood และ Lipowitz[4] ซึ่งพบว่าการเติมธาตุอินเดียมในโลหะผสมส่วนใหญ่ จะช่วยทำให้ลดจุดหลอมเหลวของโลหะผสมนั้นได้ แต่ถึงแม้ Wood จะไม่ได้กล่าวถึงเงินสเตอร์ลิงก็ตามแต่จากการตรวจสอบชุดส่วนผสมอื่นๆก็จะมีแนวโน้มเป็นไปตามที่ Wood กล่าวไว้ทั้งสิ้น ยกเว้นแต่ชุดส่วนผสม 3.76 %Cu – 0.11 %Si – 2.13 %In – balance of Ag เท่านั้น ซึ่งจุดสังเกตอีกอย่างหนึ่งสำหรับชุดส่วนผสมนี้ก็คือว่า ปริมาณส่วนผสมของซิลิคอนจะเท่ากับ 0.11% wt. ซึ่งแม้จะมีค่าใกล้เคียงกันกับชุดส่วนผสมอื่นๆที่ผสมของซิลิคอน แต่ก็มีค่าสูงที่สุด ซึ่งสิ่งนี้อาจมีผลทำให้ค่าจุดหลอมเหลวไม่เป็นไปตามที่คาดไว้ได้เช่นกัน

3.15.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

จากรูปที่ 3.17 ซึ่งได้จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโดยยังไม่ได้ทำการกัดกรด พบว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากการผสมซิลิคอนและอินเดียมในปริมาณต่าง ๆ กัน โดยผ่านกระบวนการหล่อขึ้นรูปในสภาวะบรรยากาศมีลักษณะเป็นเดนไดรท์ ซึ่งหากพิจารณาการกระจายตัวของเฟสต่างๆที่สังเกตได้จากภาพกำลังขยายเท่ากัน (x 100) พบว่าในเงินสเตอร์ลิงธรรมดาที่ไม่มีการผสมซิลิคอนและอินเดียม (ชุดส่วนผสม 6.9 % Cu – balance of Ag, รูป ก.) จะปรากฏโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนผสมหลัก 2 เฟส คือ โครงสร้างพื้น (Matrix) ที่เป็น Ag rich – Solid Solution (α-phase) โดยจาก EDX (ในภาคผนวก ข) พบว่าสัดส่วนโดยน้ำหนักของ Ag : Cu เป็น 94.08 % : 5.92 % ซึ่งจะเป็นบริเวณภายใน Dendrite ที่เป็นแถบสีขาวในรูป (ก) ส่วนเฟสที่ปรากฏเป็นแถบสีเทาบริเวณช่องว่างระหว่าง Dendrite คือ โครงสร้างยูเทคติค ซึ่งประกอบด้วย Ag rich – Solid Solution (α- phase) กับ Cu rich – Solid Solution (β- phase) นอกจากนี้ จากภาพกำลังขยายที่มากขึ้น (x 3500) จากรูปที่ (ข) จะพบ Secondary Structure ที่มีลักษณะเป็นก้อนสีดำกระจายอยู่บ้างเล็กน้อย ซึ่งปรากฏอยู่บริเวณขอบนอกของ Dendrite arms ซึ่งพบปริมาณของธาตุต่าง ๆ ใน Particle ดังกล่าวจาก EDX ดังนี้คือ Ag : Cu = 71.86 : 28.14 % wt. โดยสังเกตุว่าจะมีปริมาณของทองแดงผสมอยู่สูงกว่าบริเวณอื่น และจากกำลังขยายที่สูงขึ้นนี้จะสังเกตุเห็นลักษณะของ Irregular Eutectics ที่มีลักษณะเป็นแถบสีขาวสลับดำที่มีลักษณะการวางตัวกระจัดกระจายโดยมีทิศทางขึ้นกับ

Solid Phase ที่มีการแข็งตัวบริเวณดังกล่าว นอกจากนี้ยังพบ Interdendritic Shrinkage กระจายอยู่เล็กน้อยโดยเฉพาะด้านล่างของ รูป (ก)

สำหรับเงินสเตอร์ลิงจากชิ้นงานหล่อที่ได้มีการผสมซิลิคอน หรืออินเดียม หรือทั้งสองธาตุ จะพบลักษณะโครงสร้างเป็นเดนไดรท์เช่นเดียวกับกรณีของเงินสเตอร์ลิงธรรมดา แต่จะสังเกตพบปริมาณของ Secondary Structure ที่มีการกระจายตัวหนาแน่นกว่าอย่างชัดเจน โดยมีขนาดและรูปร่างต่างๆ ในแต่ละชิ้นตัวอย่างที่มีปริมาณของธาตุผสมที่แตกต่างกันโดยสามารถพิจารณาได้ดังนี้

3.15.3.1 กลุ่มของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากการหล่อชนิดที่ผสมซิลิคอน 0.11 % wt. ได้แก่ชุดส่วนผสม 6.26 % Cu – 0.11 % Si – balance of Ag พบว่าโครงสร้างพื้น(Matrix) เป็น Ag rich – Solid Solution ซึ่งปรากฏอยู่บริเวณภายใน Dendrite ที่เป็นแถบสีขาว ดังรูป (ค) ซึ่งจากEDX พบปริมาณสัดส่วนของธาตุ ๆ ดังนี้ คือ Ag : Cu : Si = 95.79 : 4.16 : 0.05 % wt. และสังเกตได้ว่าปริมาณของ Secondary Structure จะพบมากกว่าในเงินสเตอร์ลิงธรรมดา โดยมีรูปร่างแตกต่างกัน (Irregular Shape) ซึ่งจากการทำEDX ที่ภายในบริเวณที่เป็นสีดำที่มีรูปร่างโค้งยาวดังรูป (ง) จะพบปริมาณสัดส่วนของธาตุต่างๆเป็น Cu : Ag : Si = 93.49 : 3.93 : 4.58 % wt. โดยสังเกตว่าจะมีปริมาณของทองแดงผสมอยู่สูงเป็นหลักคือ 93.49 % ซึ่งน่าจะเป็นเฟส β ที่มีขนาดใหญ่ และมีปริมาณของซิลิคอนสูงกว่าบริเวณที่เป็นโครงสร้างพื้นมาก แสดงว่าซิลิคอนที่มีปริมาณสูงนี้สามารถรวมตัวกับทองแดงโดยอยู่ภายใน Secondary Structure ได้มากกว่าในสารละลายของเงิน (α - phase)

3.15.3.2 กลุ่มของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากการหล่อชนิดที่ผสมซิลิคอนในปริมาณใกล้เคียงกัน (0.09 – 0.11 % wt.) และผสมธาตุอินเดียมในปริมาณต่าง ๆ กัน (0.53 – 3.13%wt.)

3.15.3.2.1 ชิ้นงานสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิคอน 0.09%wt. และอินเดียม 0.53 %wt. ได้แก่ชุดส่วนผสม 5.57 % Cu – 0.09 % Si – 0.53 % In – balance of Ag จากรูป (จ) พบว่ามีการกระจายตัวของ Secondary Structure อยู่ทั่วไป คล้าย ๆ กับของชุดส่วนผสม 6.26 % Cu – 0.11 % Si – balance of Ag ที่มีการเติมเฉพาะซิลิคอน โดยมีรูปร่างของ Secondary Structure เป็น Irregular Shape และจาก EDX พบปริมาณของธาตุผสมต่าง ๆ ใน Matrix (แถบขาว) เป็น Ag : Cu : Si = 96.82 :3.52 : 0.11%wt. ส่วน In ปรากฏอยู่น้อยมากจนไม่นำมาคิดและจากลักษณะ Secondary Structure ดังที่รูป (ฉ) จะเห็นโครงสร้าง ยูเทคติคอยู่ภายใน ซึ่งเมื่อตรวจสอบปริมาณธาตุผสมภายในโครงสร้างที่พบดังกล่าวจาก EDX พบว่ามีสัดส่วนของธาตุผสม Ag : Cu : Si = 73.09 : 27.35 : 0.06 %wt.โดย In มีปริมาณน้อยมาก ซึ่งพบว่ามีปริมาณของทองแดงสูงกว่า และมีปริมาณของซิลิคอนน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ Matrix

3.15.3.2.2 ชิ้นงานสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิคอน 0.09 % wt. และอินเดียม 1.09 % wt. ได้แก่ชุดส่วนผสม 5.16 % Cu – 0.09 % Si –1.09 % In – balance of Ag จากรูป (ช) พบว่ามีการกระจายตัวของ Secondary Structure อยู่ทั่วเนื้อพื้น (Matrix) และจาก EDX พบปริมาณของธาตุผสม

ต่าง ๆใน Matrix (แถบขาว) เป็น Ag :Cu : Si = 96.24 :3.65 :0.12 %wt ส่วน In ปรากฏอยู่น้อยมาก และจาก Secondary Structure ที่ปรากฏดังรูป (ช) บริเวณที่เป็นก้อนกลมสีดำนั้นจาก EDX พบว่ามีสัดส่วนของธาตุผสม Cu : Ag : Si : In = 51.79 :44.55 :3.53 :0.13 % wt. ซึ่งพบว่าจะมีปริมาณของทองแดง, ซิลิคอน และอินเดียม มากกว่าที่ปรากฏอยู่ใน Matrix

3.15.3.2.3 ชิ้นงานสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิคอน 0.10%wt. และอินเดียม 1.60% wt. ได้แก่ชุดส่วนผสม 4.23% Cu – 0.10% Si – 1.6 % In – balance of Ag จากรูป (ฌ) พบว่า Secondary Structure กระจายตัวอยู่อย่างหนาแน่นทั่วเนื้อพื้น จาก EDX พบปริมาณของธาตุผสมใน Matrix (แถบขาว)เป็น Ag : Cu : Si : In = 94.72 : 3.50 : 0.06 : 1.71 % wt.และจาก Secondary Structure ที่ปรากฏอยู่ดังรูป (ญ) จาก EDX ตรวจสอบปริมาณธาตุผสมบริเวณก้อนสีดำรูปร่างยาวรีจะได้ Ag : Cu : Si : In = 55.48 :40.96 :1.79 :1.77 %wt.

3.15.3.2.4 ชิ้นงานสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิคอน 0.11 % wt. และอินเดียม 3.13 % wt. ได้แก่ชุดส่วนผสม 3.76 % Cu – 0.11 % Si – 3.13 % In – balance of Ag จากรูป (ฎ) พบว่า Secondary Structure มีการกระจายตัวอยู่ในปริมาณคล้ายๆกับกรณีชิ้นงานที่ผสมอินเดียม 1.60 %wt. จาก EDX พบปริมาณของธาตุผสมใน Matrix (แถบขาว) เป็น Ag : Cu : Si : In = 93.55 : 4.85 : 0.15 : 1.45 % wt. และจากภาพกำลังขยายสูง ๆ (x 3500) ดังรูป (ฎ) พบว่าใน Secondary Structure จะปรากฏโครงสร้างของยูเทคติคอยู่ภายใน โดยจาก EDXพบว่า บริเวณแถบจาง ๆ ในยูเทคติคมีปริมาณสัดส่วนของธาตุผสม Ag : Cu : Si : In = 93.22 : 4.33 : 0.08 : 3.37% wt. และบริเวณที่เป็นแถบดำ ๆ ในยูเทคติคมีปริมาณสัดส่วนของธาตุผสม Ag : Cu : Si : In = 58.60 : 38.14 : 1.19 : 3.17% wt.

3.15.3.3 กลุ่มของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากการหล่อชนิดที่ผสมเฉพาะอินเดียม

3.15.3.3.1 ชิ้นงานสเตอร์ลิงที่ผสมอินเดียม 1.03 %wt. ได้แก่ชุดส่วนผสม 5.88 % Cu – 1.03 % In – balance of Ag จากรูป (ฐ) พบว่า Secondary Structure มีการกระจายตัวอยู่ทั่วไปอย่างหนาแน่น จาก EDX ตรวจสอบปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างพื้น (Matrix) พบว่ามี สัดส่วนของธาตุผสม Ag : Cu : In = 94.63 : 5.11 : 0.26 %wt. และจากกำลังขยายสูง ๆ ดังรูป (ฑ) พบว่าลักษณะรูปร่างของ Secondary Structure จะมีทั้งแบบยาวรีและค่อนข้างกลมโดยมีโครงสร้างยูเทคติคอยู่ภายใน และจาก EDX พบว่าปริมาณสัดส่วนของธาตุผสมบริเวณที่เป็นแถบสีดำ Ag : Cu : In = 60.83 : 38.73 : 0.44 %wt.

3.15.3.3.2 ชิ้นงานสเตอร์ลิงที่เติมอินเดียม 3.0 % ได้แก่ชุดส่วนผสม 5.17 %Cu –3.09 %In – balance of Ag จากรูป (ฒ) พบว่าการกระจายตัวของ Secondary Structure ค่อนข้างหนาแน่น โดยมีขนาดเล็กละเอียด จากการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมโดย EDX ที่โครงสร้าง

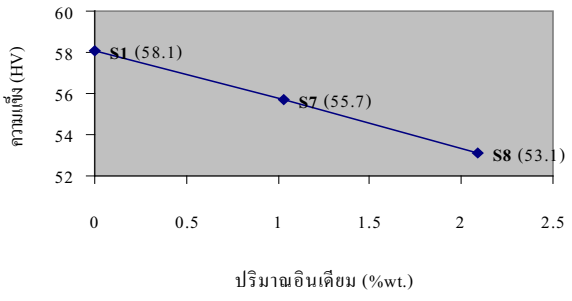
พื้น (Matrix) พบว่ามีสัดส่วนของธาตุผสม Ag : Cu : In = 94.83 : 4.08 : 1.09 %wt. และจากกำลังขยายสูง ๆ ดังรูป (ณ) พบ Secondary Structure ที่มีลักษณะกลมปรากฏโครงสร้างยูเทคติคอยู่ภายในโดยมีปริมาณสัดส่วนของธาตุต่างๆบริเวณที่เป็นแถบสีดำ Ag : Cu : In = 63.91 : 35.77 : 1.32 % wt. โดยพบว่าปริมาณสัดส่วนของทองแดงและอินเดียมมีอยู่สูงกว่าโครงสร้างพื้น

3.15.4 ผลการตรวจสอบขนาดของเดนไดรท์

จากรูปที่ 3.18 – 3.19 ซึ่งได้จากตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากการผสมซิลิคอนและอินเดียมในปริมาณต่าง ๆ กันโดยใช้สารละลาย H_2O_2 25 % + NH_2OH 25 % + H_2O 50 % ในการกัดเพื่อให้เห็นโครงสร้างของเดนไดรท์ได้ชัดเจนขึ้น ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์ขนาดของเดนไดรท์ที่ปรากฏ เพื่อนำมาใช้อธิบายถึงสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิงในแต่ละชุดส่วนผสมได้ โดยหากพิจารณาชุดส่วนผสมที่เป็นเงินสเตอร์ลิงธรรมดา ได้แก่ชุดส่วนผสม 6.9 % Cu – balance of Ag เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับชุดส่วนผสมที่มีการผสมซิลิคอนลงไปด้วยได้แก่ชุดส่วนผสม 6.26 % Cu - 0.11 % Si – balance of Ag พบว่ามีขนาดของเดนไดรท์ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 3.18 และหากทำการเปรียบเทียบระหว่างชุดตัวอย่างที่เป็นเงินสเตอร์ลิงธรรมดาคือ ชุดส่วนผสม 6.9 % Cu – balance of Ag กับชุดส่วนผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีการเติมอินเดียมได้แก่ ชุดส่วนผสม 5.88 % Cu – 1.03 % In – balance of Ag และชุดส่วนผสม 5.17 % Cu – 3.09 % In – balance of Ag พบว่าขนาดของเดนไดรท์จะมีขนาดใกล้เคียงกัน และถ้าหากทำการเปรียบเทียบระหว่างชุดส่วนผสมที่มีการเติมทั้งซิลิคอนและอินเดียมกับชุดส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่เติมเฉพาะซิลิคอนโดยคิดเทียบจากปริมาณซิลิคอนที่เหลืออยู่ใกล้เคียงกัน (0.09 – 0.11%) พบว่าขนาดของเดนไดรท์จะมีขนาดใกล้เคียงกันเช่นกัน

3.15.5 ด้านสมบัติทางกล

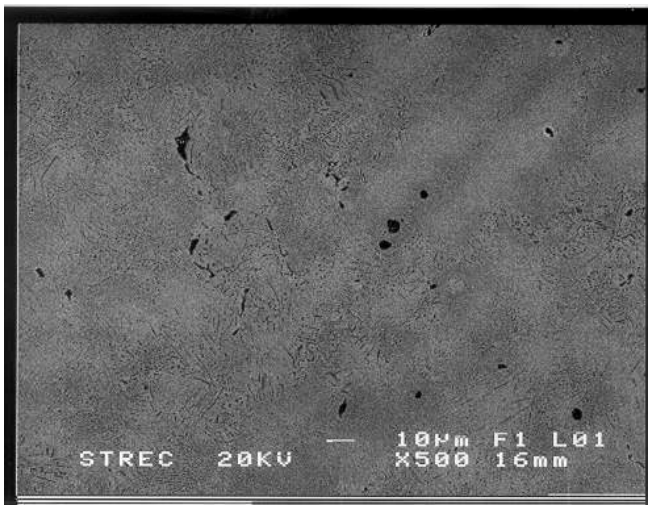
ในการทดลองครั้งนี้ได้ศึกษาสมบัติทางกล คือค่าความแข็ง และความต้านทานแรงดึงโดยจากข้อมูลในตารางที่ 3.10 นำมาวิเคราะห์ค่าความแข็งที่ได้โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนปริมาณของอินเดียมในเงินสเตอร์ลิงกับค่าความแข็งดังรูปที่ 3.21



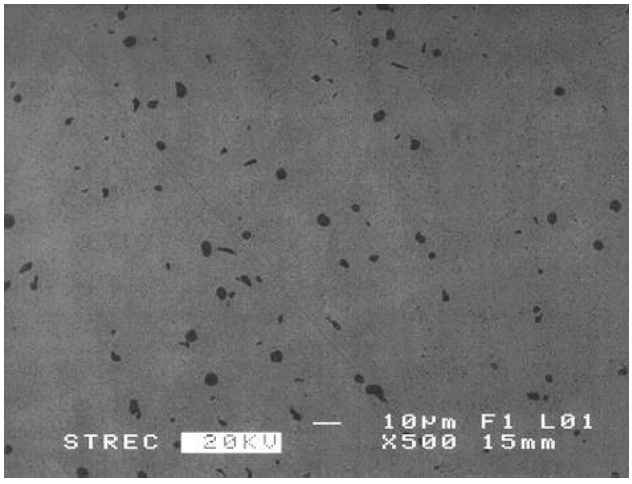
รูปที่ 3.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอินเดียม 0 – 3.09 %wt.กับค่าความแข็งสำหรับชุดส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่ไม่เติมซิลิคอน

จากรูปที่ 3.21 พบว่า ค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิง (ที่ไม่เติมซิลิคอน) จะแปรผกผันกับปริมาณอินเดียมที่เติมลงไป กล่าวคือเงินสเตอร์ลิงจะมีความแข็งลดลง ตามปริมาณของอินเดียมที่ผสมลงไปในช่วงระหว่าง 0 – 3.09 % โดยน้ำหนัก เนื่องจากได้ลดสัดส่วนของทองแดงในการหล่อลงจากการเติมอินเดียมลงไปแทนที่ พร้อมกันนั้นทองแดงในเนื้อพื้นได้แยกตัวออกมารวมตัวกับอินเดียมใน Secondary Structure มากขึ้นจึงทำให้เงินสเตอร์ลิงมีความแข็งลดลง ซึ่งหากพิจารณาถึงโครงสร้างจุลภาคจะสังเกตได้ว่าชุดส่วนผสมเงินสเตอร์ลิงธรรมดาที่ไม่ผสมซิลิคอน (6.09 %Cu – balance of Ag) เมื่อเทียบกับชุดส่วนผสมที่ไม่ผสมซิลิคอนแต่ผสมอินเดียม พบว่าผลของการเติมอินเดียมที่ไม่เท่ากันจะทำให้เกิด Solid Solution ที่มีปริมาณทองแดงและอินเดียมละลายอยู่ต่างกัน ซึ่งมีผลโดยตรงต่อขนาดรูปร่างและการกระจายตัวของ Secondary Structure ในเนื้อพื้น จากการพิจารณาข้อมูลดังกล่าวกับค่าความแข็งที่วัดได้ สามารถอธิบายได้จากรูปที่ 3.22 โดยชุดส่วนผสมที่เป็นเงินสเตอร์ลิงธรรมดาซึ่งไม่เติมธาตุอินเดียมนั้น จะมีส่วนที่เป็นโครงสร้างยูเทคติคกระจายตัวอยู่ทั่วไปในเนื้อพื้น นอกจากนี้ยังพบ Secondary Structure กระจายตัวอยู่บ้างแต่ไม่หนาแน่น ซึ่งจากการตรวจสอบปริมาณของธาตุผสมโดย EDX จะพบว่า Particle เหล่านี้จะมีปริมาณของทองแดงมากกว่าเนื้อพื้น คือมีสัดส่วนของ Ag : Cu เท่ากับ 71.86 :5.92 % wt. เท่านั้น ซึ่งเชื่อได้ว่า Secondary Structure เหล่านี้จะมีส่วนสำคัญที่ทำให้โครงสร้างที่ได้มีความแข็งเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับชุดส่วนผสมที่มีการเติมอินเดียมลงไปได้แก่ชุดส่วนผสม 5.88%Cu - 1.03%In – balance of Ag และชุดส่วนผสม 5.17%Cu - 3.09%In – balance of Ag สามารถพบ Secondary Structure มีลักษณะกระจายตัวทั่วไปในเนื้อพื้นเช่นกัน แต่จากการใช้ EDX ตรวจสอบส่วนผสมของธาตุต่าง ๆ ใน Secondary Structure ดังกล่าวพบว่า จะมีปริมาณของอินเดียมและทองแดงสูงกว่าในเนื้อพื้นซึ่งกลับทำให้เงินสเตอร์ลิงมีความแข็งลดลงเนื่องจากทองแดงถูกแยกตัวออกมาอยู่ใน Secondary Structure มากขึ้นตามปริมาณอินเดียมที่ผสมลงไป โดยสำหรับชุดส่วนผสม 5.88%Cu – 1.03%In – balance of Ag จะมี สัดส่วนธาตุผสมใน Secondary Structure จาก EDX เป็น Ag : Cu : In เท่ากับ 60.83 : 28.73 : 0.44%wt. ส่วนชุดส่วนผสม 5.17%Cu – 3.09%In – balance of Ag จะมีสัดส่วนของธาตุผสมใน Secondary Structure จาก EDX เป็น Ag : Cu : In เท่ากับ 63.91 : 35.77 : 1.32%wt และหากเปรียบเทียบขนาดของเดนไดรท์จะพบว่ามีขนาดไม่ต่างกัน เนื่องจากอินเดียมมีปริมาณไม่มากพอที่จะเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจน สำหรับชุดส่วนผสมที่มีการเติมซิลิคอนลงไปได้แก่ชุดส่วนผสม 6.26 % Cu - 0.11% Si – balance of Ag จะพบปริมาณของ Secondary Structure มีการกระจายตัวอย่างหนาแน่นมากขึ้นเมื่อเทียบกับชุดส่วนผสมที่เป็นเงินสเตอร์ลิงธรรมดา และจาก EDX พบว่า Secondary Structure เหล่านี้ จะมีปริมาณของทองแดงละลายอยู่มาก (เป็น Cu – rich phase) โดยมีสัดส่วนของ Cu : Ag : Si เป็น 93.94 : 3.93 : 4.58% wt. ซึ่งจะเห็นได้จากสีของ Secondary Structure เหล่านี้จะเป็นสีออกแดงคล้ำซึ่งเป็นสีของทองแดงที่เป็นส่วนผสมหลัก ทำให้โครงสร้างที่ได้มี

ความแข็งแรงสูงและจากขนาดของเดนไดรท์พบว่าชุดส่วนผสมที่มีการเติมซิลิคอนลงไปจะมีขนาดเดนไดรท์ใกล้เคียงกับชุดส่วนผสมที่เป็นเงินสเตอร์ลิงธรรมดา ซึ่งแสดงว่าความแข็งแรงของเงินสเตอร์ลิงเป็นผลจากปริมาณของทองแดงและซิลิคอนที่ละลายอยู่ใน Solid Solution และ Secondary Structure เท่านั้น

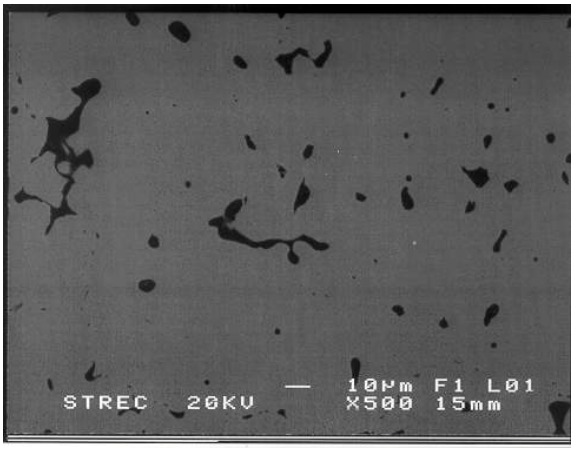


) ไม่ผสมอินเดียม

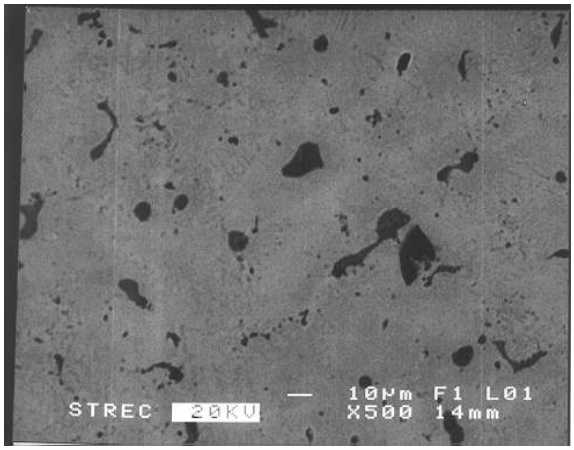


) ผสมอินเดียม 3.09%wt.

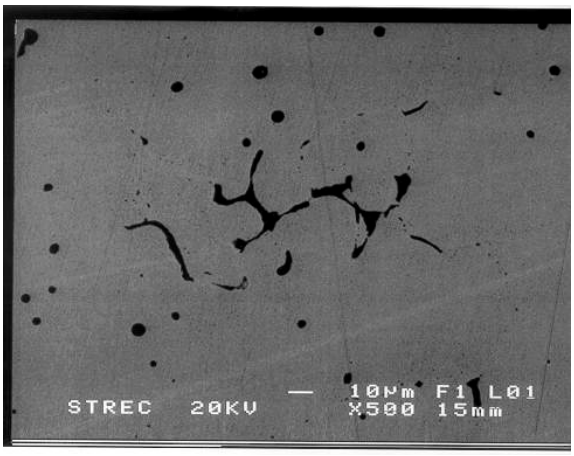
รูปที่ 3.22 ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณอินเดียมแตกต่างกัน



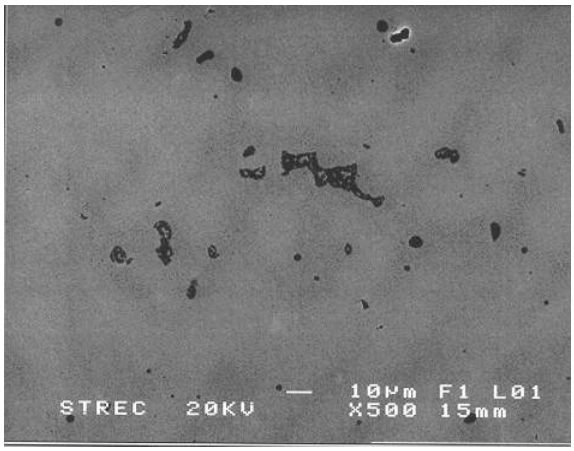
ก) Sterling + Si 0.11%wt.



ข) Sterling + Si 0.09%wt. + In 0.53%wt.



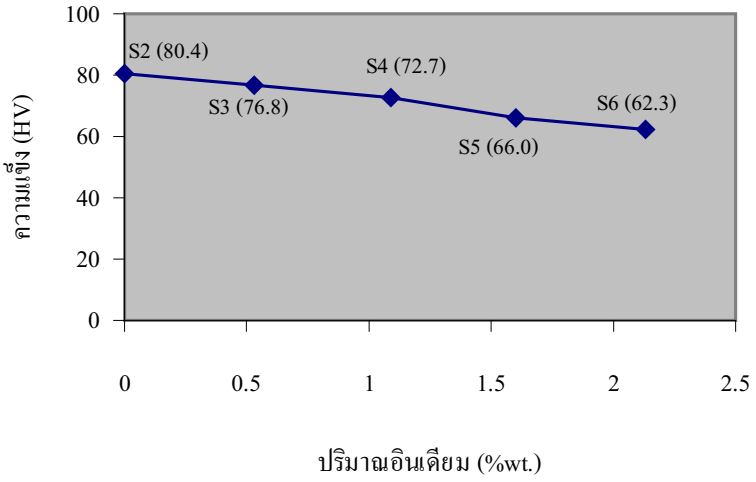
ค) Sterling + Si 0.10%wt. + In 1.60%wt.



ง) Sterling + Si 0.11%wt. + In 3.13%wt.

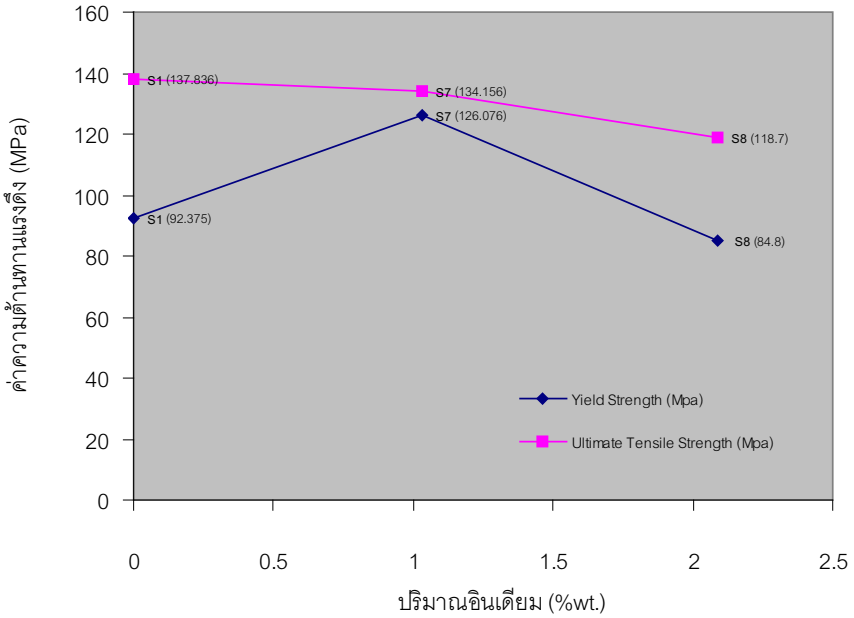
รูปที่ 3.23 ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณซิลิคอนใกล้เคียงกัน (0.09 – 0.11 % wt.) แต่มีปริมาณอินเดียมแตกต่างกัน (0 – 3.13 % wt.)

ส่วนชุดส่วนผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีการเติมทั้งอินเดียมและซิลิคอนเมื่อเทียบกับชุดส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่เติมเฉพาะซิลิคอน โดยคิดที่ปริมาณซิลิคอนที่เหลืออยู่ใกล้เคียงกัน (0.09 - 0.11%wt.) ดังรูปที่ 3.23 พบว่าค่าความแข็งลดลงตามปริมาณอินเดียมที่ผสมลงไปในช่วงระหว่าง 0 – 3.13%wt. เนื่องจากการลดสัดส่วนปริมาณของทองแดงในการหล่อลงจากการเติมอินเดียมลงไปแทนที่ และจากการที่ทองแดงและซิลิคอนได้แยกตัวออกไปอยู่ใน Secondary Structure ที่มีการกระจายตัวอย่างหนาแน่นมากขึ้นตามปริมาณของอินเดียมที่ผสมลงไปดังกราฟรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 กราฟแสดงค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิคอนในปริมาณใกล้เคียงกัน (0.09-0.11% wt.) กับปริมาณของอินเดียมที่ผสมลงไประหว่าง 0 –3.13 % wt.

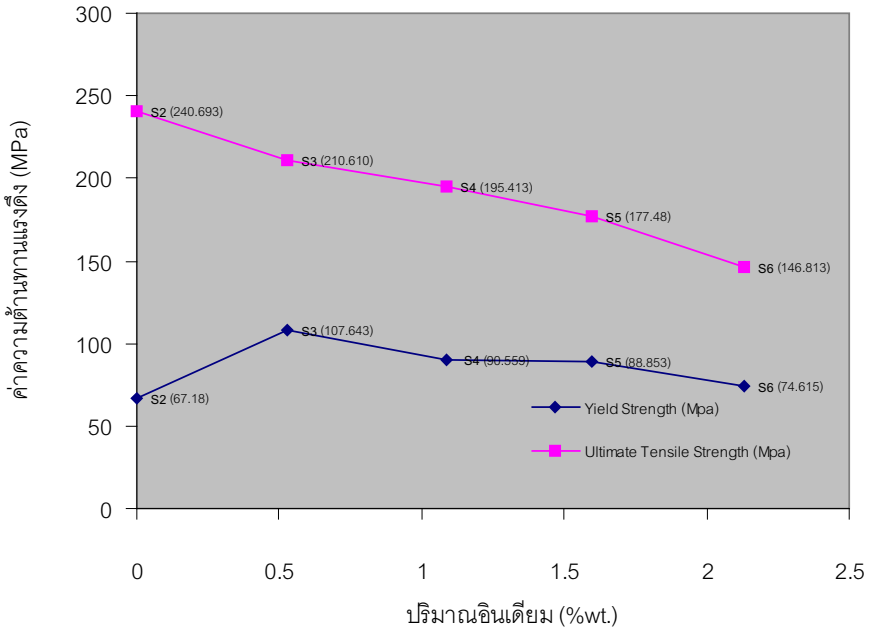
ทางด้านความต้านทานแรงดึงนั้นสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับ กรณีของค่าความแข็ง โดยเมื่อเปรียบเทียบ ระหว่างเงินสเตอร์ลิงธรรมดา กับเงินสเตอร์ลิง ที่มีการเติม อินเดียมจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก กับ ปริมาณอินเดียมที่เติม ดังกราฟรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 กราฟแสดงค่า Ultimate Tensile Strength และ Yield Strength ของเงินสเตอร์ลิง ที่เติมอินเดียมในปริมาณแตกต่างกันได้แก่ 0, 1.09 และ 3.13 %wt.

จากกราฟรูปที่ 3.25 สังเกตได้ว่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการผสมอินเดียมมากขึ้น แต่สำหรับความต้านทานแรงดึงที่จุดครากมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณอินเดียมที่ผสมในช่วงระหว่าง 1.03 – 3.09 % wt. แต่พบว่าชุดผสมที่ไม่ผสมอินเดียมค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดครากกลับมีค่าน้อยกว่าชุดผสมที่ผสมอินเดียม ซึ่งยังไม่สามารถหาสาเหตุได้ สำหรับชุดส่วนผสมที่มีการเติมอินเดียม 1.03 % จนถึง 3.09 % พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความต้านทานแรงดึง ณ จุดคลาก มีค่าลดลงตามปริมาณของอินเดียมที่ผสมอยู่

สำหรับชุดส่วนผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีการเติมอินเดียมและซิลิคอน สามารถนำมาเปรียบเทียบกับเงินสเตอร์ลิงที่มีการเติมเฉพาะซิลิคอน โดยคิดปริมาณของซิลิคอนที่เหลืออยู่ใกล้เคียงกัน (0.09 – 0.11 % wt.) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุด และความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก กับปริมาณอินเดียมที่ผสมต่างกัน ในชุดส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่มีซิลิคอนผสมอยู่ใกล้เคียงกันได้ดังกราฟรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 กราฟแสดงค่า Ultimate Tensile Strength และ Yield Strength ของเงินสเตอร์ลิงที่มีซิลิคอนผสมอยู่ใกล้เคียงกัน(0.09 –0.11%wt) โดยมีปริมาณอินเดียมที่ผสมอยู่แตกต่างกันได้แก่ 0.53, 1.09, 1.60 และ 3.13 % wt.

จากกราฟรูปที่ 3.26 สำหรับชุดส่วนผสมที่มีซิลิคอนผสมอยู่ใกล้เคียงกัน (0.09 – 0.11%wt.) แต่มีปริมาณอินเดียมแตกต่าง สังเกตุได้ว่า ความต้านทานแรงดึงสูงสุดจะมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณอินเดียมที่ผสมลงไประหว่าง 0 – 3.13% เนื่องจากการลดสัดส่วนปริมาณของทองแดงในการหล่อลงจากการเติมอินเดียมลงไปแทนที่ และจากการที่ทองแดงและซิลิคอนได้แยกตัวออกไปอยู่ใน Secondary Structure ที่มีการกระจายตัวอย่างหนาแน่นมากขึ้นตามปริมาณของอินเดียมที่ผสมลงไป สำหรับความต้านทานแรงดึงที่จุดคลากมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณอินเดียมที่เพิ่มขึ้นในช่วงระหว่าง 0.53 - 3.13% wt. แต่พบว่าในชุดส่วนผสม 6.26% Cu – 0.11% Si – balance of Ag มีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคลากน้อยกว่าชุดส่วนผสมอื่นซึ่งยังไม่สามารถหาสาเหตุได้