บทที่ 4

รายงานผลการทดลอง

4.1 ผลที่ได้จากการหลอมและหล่อโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แคลเซียม - ซิลิคอน

โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้ง 12 ชุด แบ่งเป็น 3 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกเติมแคลเซียมปริมาณตั้งแต่ 0.024 – 0.216 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กลุ่มที่สองเติมซิลิคอนปริมาณตั้งแต่ 0.030 – 0.24 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และกลุ่มที่สามเติมแคลเซียม 0.024 – 0.168 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และกำหนดให้ปริมาณซิลิคอนคงที่คือ 0.12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หลอมและหล่อโลหะผสมด้วยเตาแบบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 980 องศาเซลเซียส สำหรับโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้ผสมแคลเซียม และ 1030 องศาเซลเซียส สำหรับโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมของธาตุแคลเซียม

4.2 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แคลเซียม - ซิลิคอน

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเงิน ทองแดง แคลเซียม และซิลิคอน จากการตรวจสอบด้วยวิธี ICP แสดงดังตารางที่ 4.1 ปริมาณแคลเซียมและซิลิคอนที่สูญเสียหลังการหล่อดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แคลเซียม - ซิลิคอน ก่อนและหลังการหล่อ

โลหะผสมชุดที่	ปริมาณส่วนผสมก่อนการหล่อ (wt.%)				ปริมาณส่วนผสมหลังการหล่อ (wt.%)			
	Ag	Cu	Ca	Si	Ag	Cu	Ca	Si
1	92.500	7.500	-	-	balance	7.46	-	-
2	92.500	7.476	0.024	-	balance	7.12	0.012	-
3	92.500	7.404	0.096	-	balance	7.06	0.025	-
4	92.500	7.332	0.168	-	balance	7.19	0.063	-
5	92.500	7.284	0.216	-	balance	7.30	0.090	-
6	92.500	7.470	-	0.030	balance	7.38	-	0.014
7	92.500	7.410	-	0.090	balance	7.44	-	0.050
8	92.500	7.380	-	0.120	balance	7.40	-	0.080
9	92.500	7.260	-	0.240	balance	7.36	-	0.165
10	92.500	7.356	0.024	0.120	balance	7.37	0.015	0.060
11	92.500	7.284	0.096	0.120	balance	7.35	0.038	0.062
12	92.500	7.212	0.168	0.120	balance	7.32	0.102	0.068

หมายเหตุ : ธาตุ Ag, Cu, Ca และ Si ทดสอบปริมาณส่วนผสมที่สถาบันวิจัยและพัฒนาเครื่องประดับแห่งชาติ (สวอ.)

ตารางที่ 4.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของปริมาณแคลเซียมและซิลิคอนที่ใช้ในการหล่อ ปริมาณที่เหลืออยู่จริง และปริมาณที่สูญเสียไปหลังจากการหล่อ

โลหะผสมชุดที่	ปริมาณแคลเซียม			ปริมาณซิลิคอน		
	ที่ใช้ในการหล่อ (%wt)	ที่มีอยู่จริง (%wt)	% ของการสูญหาย	ที่ใช้ในการหล่อ (%wt)	ที่มีอยู่จริง (%wt)	% ของการสูญหาย
1	-	-	-	-	-	-
2	0.024	0.012	50.0	-	-	-
3	0.096	0.025	74.0	-	-	-
4	0.168	0.063	62.5	-	-	-
5	0.216	0.090	58.3	-	-	-
6	-	-	-	0.030	0.014	53.3
7	-	-	-	0.090	0.050	44.4
8	-	-	-	0.120	0.080	33.3
9	-	-	-	0.240	0.165	31.2
10	0.024	0.015	37.5	0.120	0.060	50.0
11	0.096	0.038	60.4	0.120	0.062	48.3
12	0.168	0.102	39.3	0.120	0.068	43.3

จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีหลังการหล่อพบว่าปริมาณแคลเซียมในโลหะผสมหลังการหล่อ ลดลงจากปริมาณแคลเซียมที่ใช้ในการหล่อ 37.5 - 74.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และพบว่าปริมาณซิลิคอนในโลหะผสมหลังการหล่อ ลดลงจากปริมาณซิลิคอนที่ใช้ในการหล่อ 31.2 - 53.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่าทั้งแคลเซียมและซิลิคอนมีค่าเปอร์เซ็นต์การสูญหายที่สูงทั้งนี้เป็นเพราะธาตุแคลเซียมและซิลิคอนนั้นสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้ดีมาก จึงทำให้มีการสูญเสียปริมาณของธาตุทั้งสองมากขณะทำการหล่อ

4.3 ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางกลในสภาพหลังการหล่อขึ้นรูป (as-cast)

4.3.1 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

เมื่อวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ตามมาตรฐาน ASTM E 92-82 ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ระบบดิจิตอล โดยกดด้วยน้ำหนัก 1 กิโลกรัม เป็นเวลา 10 วินาที วัดความยาวเส้นทแยงมุมทั้งสองด้าน (d_1 และ d_2) แล้วคำนวณค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (HV) โลหะผสมแต่ละชุดกดวัดความแข็ง 5 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย ค่าความยาวเส้นทแยงมุมและค่าความแข็งแสดงไว้ในภาคผนวก และค่าความแข็งเฉลี่ยเปรียบเทียบกับปริมาณส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง – แคลเซียม – ซิลิคอน แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยแบบวิกเกอร์ (HV) เปรียบเทียบกับปริมาณส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง – แคลเซียม – ซิลิคอน

โลหะผสม ชุดที่	ส่วนผสมทางเคมี				ค่าความแข็งเฉลี่ย* (HV)
	Ag	Cu	Ca	Si	
1	balance	7.46	-	-	65.4
2	balance	7.12	0.012	-	65.8
3	balance	7.06	0.025	-	62.4
4	balance	7.19	0.063	-	56.1
5	balance	7.30	0.090	-	55.1
6	balance	7.38	-	0.014	60.9
7	balance	7.44	-	0.050	54.2
8	balance	7.40	-	0.080	53.2
9	balance	7.36	-	0.165	53.4
10	balance	7.37	0.015	0.060	53.5
11	balance	7.35	0.038	0.062	52.2
12	balance	7.32	0.102	0.068	50.5

หมายเหตุ : * เป็นค่าความแข็งเฉลี่ย ซึ่งความยาวเส้นทแยงมุม (d_1 และ d_2) และค่าความแข็งที่คำนวณได้ทั้งหมด แสดงไว้ในภาคผนวก

4.3.2 ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

ทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E 8M – 96 โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงระบบอัตโนมัติขนาด 150 kN รุ่น seriesIX โดยบริษัท Instron Corporation ด้วยความเร็วแรงดึง 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength; UTS) และค่าความเค้นจุดคราก (yield strength; σ_y) แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบแรงดึงของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง – แคลเซียม – ซิลิคอน

โลหะผสมชุดที่	ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)				ความต้านทานแรงดึงสูงสุด* (MPa)	ความเค้นจุดคราก* (MPa)
	Ag	Cu	Ca	Si		
1	balance	7.46	-	-	218.6	78.8
2	balance	7.12	0.012	-	224.4	92.2
3	balance	7.06	0.025	-	172.4	76.3
4	balance	7.19	0.063	-	171.4	63.6
5	balance	7.30	0.090	-	143.5	63.4
6	balance	7.38	-	0.014	199.4	73.9
7	balance	7.44	-	0.050	186.9	72.1
8	balance	7.40	-	0.080	176.2	67.5
9	balance	7.36	-	0.165	150.5	59.4
10	balance	7.37	0.015	0.060	164.5	66.2
11	balance	7.35	0.038	0.062	140.1	57.5
12	balance	7.32	0.102	0.068	128.4	56.7

หมายเหตุ: * เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากผลการทดสอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 ผลการตรวจสอบสีผิวหลังทำการอบให้ความร้อน (Heat Treatment)

ผลจากการอบให้ความร้อนในสภาวะบรรยากาศของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้ง 3 ชุด ที่มีส่วนผสมของธาตุแคลเซียม ซิลิคอน และแคลเซียม - ซิลิคอน ปริมาณต่างๆ ที่อุณหภูมิ 100, 200 และ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ รูปสีชิ้นงานทั้ง 12 ส่วนผสมแสดงดังรูปที่ 4.1-4.3

อุณหภูมิอบชุบความร้อน (°C)	เวลาอบชุบความร้อน (ชั่วโมง)	0%Ca 0%Si	0.012%Ca 0%Si	0.025%Ca 0%Si	0.063%Ca 0%Si	0.090%Ca 0%Si
100	2					
	4					
200	2					
	4					
300	2					
	4					

รูปที่ 4.1 ภาพแสดงผลของธาตุแคลเซียมที่มีต่อลักษณะสีผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงหลังจากการอบให้ความร้อน

อุณหภูมิจุบชุบความร้อน (°C)	เวลาจุบชุบความร้อน (ชั่วโมง)	0%Ca 0%Si	0%Ca 0.014%Si	0%Ca 0.050%Si	0%Ca 0.080%Si	0%Ca 0.165%Si
100	2					
	4					
200	2					
	4					
300	2					
	4					

รูปที่ 4.2 ภาพแสดงผลของธาตุซิลิคอนที่มีต่อลักษณะสีผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงหลังจากการอบให้ความร้อน

อุณหภูมิอบชุบความร้อน (°C)	เวลาอบชุบความร้อน (ชั่วโมง)	0%Ca 0%Si	0.015%Ca 0.060%Si	0.038%Ca 0.062%Si	0.102%Ca 0.068%Si
100	2				
	4				
200	2				
	4				
300	2				
	4				

รูปที่ 4.3 ภาพแสดงผลของธาตุแคลเซียมและซิลิคอนที่มีต่อลักษณะสีผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงหลังจากการอบให้ความร้อน

4.5 ผลการทดสอบความต้านทานการหมอง (Tarnish Resistance)

เตรียมชิ้นงานแต่ละส่วนผสมๆ ละ 5 ชิ้น เพื่อทดสอบในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน คือ 0.5, 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง นำชิ้นงานมาวัดค่าความสว่าง L* และค่าสี a*, b* ด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ หลังจากนั้นแขวนชิ้นงานแต่ละชุดการทดลองไว้ในภาชนะปิดที่ใส่สารละลายอิ่มตัวของโซเดียมซัลไฟด์ เพื่อให้ชิ้นงานอยู่ในบรรยากาศของไอซัลเฟอร์ แล้วนำชิ้นงานมาวัดค่า L*, a* และ b* ด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์อีกครั้ง คำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงาน (DE*) ตามสูตรในสมการที่ (2.1) ค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.5 และรูป 4.4 - 4.5 แสดงภาพชิ้นงานหลังทดสอบความต้านทานการหมอง

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิว (DE*) ของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แคลเซียม - ซิลิคอน

โลหะผสมชุดที่	ส่วนผสมทางเคมี				ค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิว (DE*)				
	Ag	Cu	Ca	Si	0.5 ชม.	1 ชม.	2 ชม.	3 ชม.	4 ชม.
1	balance	7.46	-	-	0.73	15.81	45.74	41.13	51.62
2	balance	7.12	0.012	-	0.42	3.37	8.82	32.19	38.03
3	balance	7.06	0.025	-	0.03	2.86	11.87	32.41	37.34
4	balance	7.19	0.063	-	0.22	5.70	16.90	34.64	40.12
5	balance	7.30	0.090	-	0.05	6.23	16.38	35.30	40.87
6	balance	7.38	-	0.014	0.10	11.66	26.68	35.65	40.38
7	balance	7.44	-	0.050	0.03	6.52	24.24	35.41	39.09
8	balance	7.40	-	0.080	0.11	5.03	24.97	30.12	34.88
9	balance	7.36	-	0.165	0.17	4.98	19.79	23.44	32.06
10	balance	7.37	0.015	0.060	0.09	6.91	23.97	29.30	35.11
11	balance	7.35	0.038	0.062	0.25	7.42	24.12	36.29	38.93
12	balance	7.32	0.102	0.068	0.28	8.50	32.37	37.61	43.80

เวลาทดสอบ (ชั่วโมง)	0% Ca	0.012% Ca	0.025% Ca	0.063% Ca	0.090% Ca
1/2					
1					
2					
3					
4					

รูปที่ 4.4 ภาพแสดงลักษณะชิ้นงานที่ผสมแคลเซียมหลังทดสอบความต้านทานการกัดหมอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เวลาทดสอบ (ชั่วโมง)	0%Si	0.014%Si	0.050%Si	0.080%Si	0.165%Si
1/2					
1					
2					
3					
4					

รูปที่ 4.5 ภาพแสดงลักษณะชิ้นงานที่ผสมซิลิคอนหลังทดสอบความต้านทานการกันหมอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เวลาทดสอบ ชั่วโมง	0% Ca	0.015% Ca	0.038% Ca	0.102% Ca
	0% Si	0.060% Si	0.062% Si	0.068% Si
1/2				
1				
2				
3				
4				

รูปที่ 4.6 ภาพแสดงลักษณะชิ้นงานที่ผสมแคลเซียมและซิลิคอนหลังทดสอบความต้านทานการกันหมอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6 ผลการทดสอบการกัดกร่อนด้วยกระบวนทางเคมีไฟฟ้า โดยวิธีโพเทนชิโอไดนามิก

หลังจากเตรียมชิ้นงานที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อนทั้ง 12 ส่วนผสม คือโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผสมแคลเซียม ซิลิคอน และแคลเซียม-ซิลิคอน โดยทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปล่อยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เพื่อให้สารละลายอิ่มตัว ต่อเซลล์ไฟฟ้าโดยชิ้นงานทดสอบอยู่ที่ขั้วไฟฟ้าโลหะทดสอบ (WE) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (RE) เป็น Ag/AgCl และขั้วไฟฟ้าวัดกระแส (CE) เป็นแท่งแพลตตินัม ทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิก ซึ่งอาศัยการวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของโลหะทดสอบในสารละลาย โดยเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้ชิ้นงานทดสอบด้วยอัตราการสแกน 0.1 มิลลิโวลท์ต่อวินาที แล้ววัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า (E) และกระแสไฟฟ้า (I) เรียกกราฟนี้ว่าเส้นโพลาไรเซชัน (แสดงในภาคผนวก) หาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{cor}) ศักย์ไฟฟ้าพาสซิเวชันปฐมภูมิ (E_{pp}) ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (E_p) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มพาสซิฟ (I_p) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) จากเส้นโพลาไรเซชัน แล้วนำค่า I_{corr} ไปคำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate) จากสูตรในสมการที่ (3.2) หรือคำนวณได้โดยตรงจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณที่ต่อกับเครื่องโพเทนชิโอสแตท ได้ค่าดังตารางที่ 4.6 เพื่อนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะทดสอบต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 แสดงค่า E_{corr}, E_{pp}, E_p, I_{corr}, I_p และ Corrosion Rate ที่วัดได้จากเส้นโพลาไรเซชันของชิ้นทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)	E_{corr} (mV)	E_{pp} (mV)	E_p (mV)	I_p ($\mu A/cm^2$)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	Corrosion Rate ($x10^{-2}$ mm/year)
1) 0%Ca-0%Si	-498	-265	48	1860	29.00	78.30
2) 0.012%Ca–0%Si	-461	-272	86	125	0.80	2.16
3) 0.025%Ca-0%Si	-493	-315	57	134	0.90	2.51
4) 0.063%Ca–0%Si	-520	-311	32	159	1.10	2.97
5) 0.090%Ca–0%Si	-515	-232	75	576	2.70	7.29
6) 0%Ca-0.014%Si	-520	-364	49	630	4.20	11.34
7) 0%Ca-0.050%Si	-552	-325	66	595	3.80	10.26
8) 0%Ca-0.080%Si	-447	-339	48	310	1.90	5.13
9) 0%Ca-0.165%Si	-168	-39	85	108	0.70	1.78
10) 0.015%Ca-0.060%Si	-525	-305	45	167	1.20	3.24
11) 0.038%Ca-0.062%Si	-250	22	75	181	3.20	8.64
12) 0.102%Ca-0.068%Si	-238	30	74	188	3.70	9.99

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย