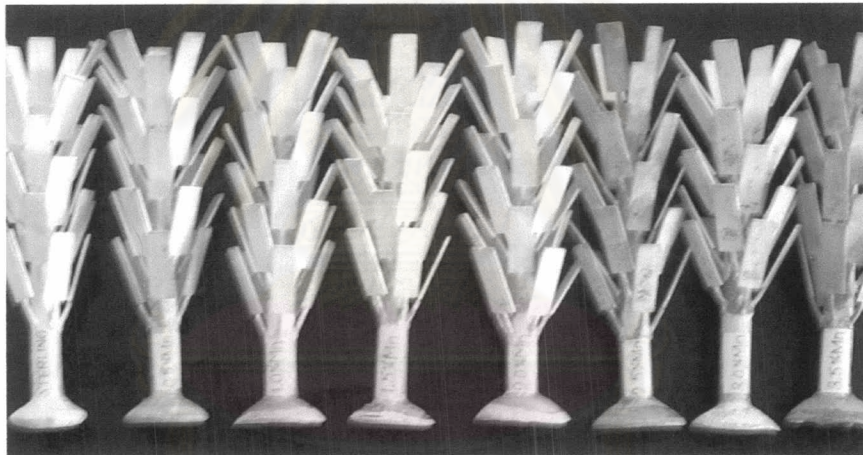


## บทที่ 4

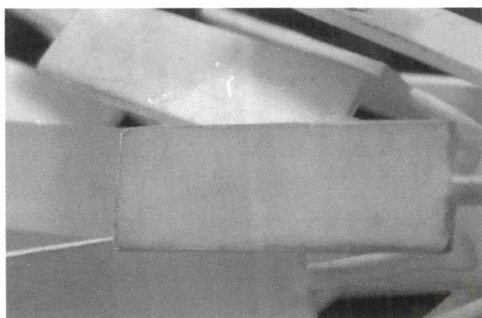
### รายงานผลการทดลอง

#### 4.1 ผลที่ได้จากการหลอมและหล่อโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส

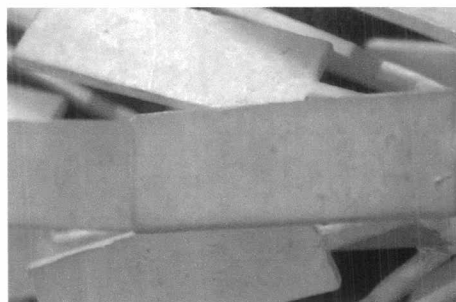
โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้ง 8 ชุด ที่เติมปริมาณแมงกานีสในขั้นตอนหลอมและหล่อตั้งแต่ 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (มีปริมาณแมงกานีสที่ได้จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี 0, 0.38, 0.76, 1.3, 1.7, 2.1, 2.6 และ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ) หลอมและหล่อโลหะผสมด้วยเตาแบบสุญญากาศ Yasui VPC ที่อุณหภูมิ 990 องศาเซลเซียส สำหรับโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมแมงกานีส (92.5%Ag – 7.5%Cu) และ 1,030 องศาเซลเซียส สำหรับโลหะผสมแมงกานีส ชิ้นงานหล่อโลหะผสมที่ได้จากการหล่อและลักษณะผิวของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



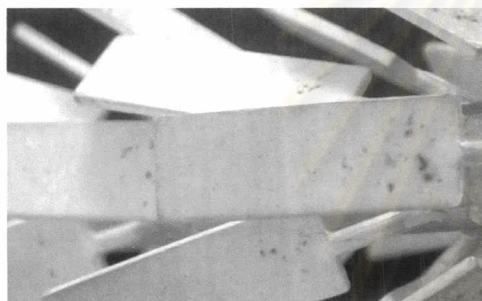
รูปที่ 4.1 ภาพแสดงชิ้นงานที่ได้จากการหลอมและหล่อแบบสุญญากาศ ของโลหะเงินสเตอร์ลิง ที่เติมปริมาณแมงกานีส 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



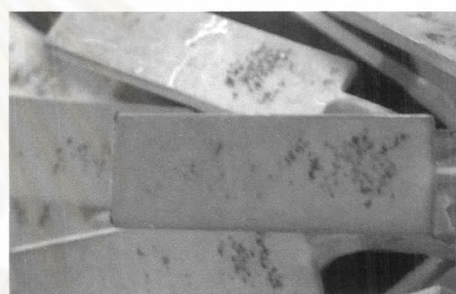
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.2 ภาพแสดงลักษณะผิวของชิ้นงานที่ได้จากการหล่อ

(ก) โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมแมงกานีส

(ข) โลหะผสมที่มีแมงกานีส 0.76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ค) โลหะผสมที่มีแมงกานีส 1.70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ง) โลหะผสมที่มีแมงกานีส 2.60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

#### 4.2 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเงิน ทองแดง และแมงกานีส จากการตรวจสอบด้วยเครื่องมือ Atomic Absorption Spectroscopy แสดงดังตารางที่ 4.1 และปริมาณแมงกานีสที่สูญเสียจากงานหล่อ แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส ก่อนและหลังการหล่อ

โลหะผสม ชุดที่	ปริมาณส่วนผสมก่อนการหล่อ (wt.%)			ปริมาณส่วนผสมหลังการหล่อ (wt.%)		
	Ag	Cu	Mn	Ag	Cu	Mn
1	92.50	7.50	-	balance	7.65	-
2	92.50	7.00	0.50	balance	6.97	0.38
3	92.50	6.50	1.00	balance	6.63	0.76
4	92.50	6.00	1.50	balance	6.14	1.30
5	92.50	5.50	2.00	balance	5.40	1.70
6	92.50	5.00	2.50	balance	4.90	2.10
7	92.50	4.50	3.00	balance	4.40	2.60
8	92.50	4.00	3.50	balance	4.00	3.00

ตารางที่ 4.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของปริมาณแมงกานีสที่ใช้ในการหล่อ ปริมาณแมงกานีสที่มีอยู่จริง และที่สูญเสียในขณะที่ทำการหล่อ

โลหะผสม ชุดที่	ปริมาณแมงกานีส ที่ใช้ในการหล่อ (wt.%)	ปริมาณแมงกานีส ที่มีอยู่จริง (wt.%)	ปริมาณแมงกานีส ที่สูญเสีย (wt.%)
1	-	-	-
2	0.50	0.38	0.12
3	1.00	0.76	0.24
4	1.50	1.30	0.20
5	2.00	1.70	0.30
6	2.50	2.10	0.40
7	3.00	2.60	0.40
8	3.50	3.00	0.50

จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีหลังการหล่อพบว่าปริมาณแมงกานีสในโลหะผสมหลังการหล่อ ลดลงจากปริมาณแมงกานีสที่ใช้ในการหล่อ 0.12 - 0.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

#### 4.3 ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางกลในสภาพหลังการหล่อขึ้นรูป (as - cast)

##### 4.3.1 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

เมื่อวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ตามมาตรฐาน ASTM E 92 - 82 ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ระบบดิจิทัล โดยกดด้วยน้ำหนัก 1 กิโลกรัม เป็นเวลา 10 วินาที วัดความยาวเส้นทแยงมุมทั้งสองด้าน ( $d_1$  และ  $d_2$ ) แล้วคำนวณค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (HV) โลหะผสมแต่ละชุดกดวัดความแข็ง 4 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย ค่าความยาวเส้นทแยงมุมและค่าความแข็งแสดงไว้ในภาคผนวก ค (ตารางค1) และค่าความแข็งเฉลี่ยเปรียบเทียบกับปริมาณส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยแบบวิกเกอร์ (HV) เปรียบเทียบกับปริมาณส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส

โลหะผสมชุดที่	ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)			ค่าความแข็งเฉลี่ย* (HV)
	Ag	Cu	Mn	
1	balance	7.65	-	66.8
2	balance	6.97	0.38	66.3
3	balance	6.63	0.76	65.4
4	balance	6.14	1.30	64.6
5	balance	5.40	1.70	59.6
6	balance	4.90	2.10	58.3
7	balance	4.40	2.60	54.9
8	balance	4.00	3.00	52.1

หมายเหตุ : \* เป็นค่าความแข็งเฉลี่ย ซึ่งความยาวเส้นทแยงมุม ( $d_1$  และ  $d_2$ ) และค่าความแข็งที่คำนวณได้ทั้งหมด แสดงไว้ในภาคผนวก ค (ตารางที่ ค1)

##### 4.3.2 ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

ทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E 8M - 96 โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงระบบอัตโนมัติ ขนาด 150 kN รุ่น series IX โดยบริษัท Instron Corporation ด้วยความเร็วแรงดึง 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ได้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength; UTS) และค่าความเค้นจุดคราก (yield strength;  $\sigma_y$ ) แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบแรงดึงของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส

โลหะผสม ชุดที่	ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)			ความต้านทานแรง ดึงสูงสุด* (MPa)	ความเค้น จุดคราก* (MPa)
	Ag	Cu	Mn		
1	balance	7.65	-	208.7	80.88
2 **	balance	6.97	0.38	-	-
3	balance	6.63	0.76	196.3	63.6
4	balance	6.14	1.30	219.1	69.5
5	balance	5.40	1.70	183.3	61.4
6 **	balance	4.90	2.10	-	-
7	balance	4.40	2.60	149.7	-
8	balance	4.00	3.00	191.0	46.1

หมายเหตุ : \* เป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และความเค้นจุดครากของชิ้นงานทั้งหมด  
แสดงไว้ในภาคผนวก ค (ตารางที่ ค2)

\*\* ไม่สามารถหาค่าได้ เนื่องจากชิ้นงานทดสอบเสียหายขณะเตรียมชิ้นงานและขณะ  
ทดสอบ

#### 4.4 ผลการตรวจสอบสีผิวหลังทำการอบให้ความร้อน (Heat Treatment)

ผลจากการอบให้ความร้อนในสภาวะบรรยากาศของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ที่มีปริมาณ  
แมงกานีส 0, 0.76, 1.70 และ 2.60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 100, 200 และ 300  
องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 และ 4 ชั่วโมงในแต่ละอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.3 และรูปแสดงสีผิว  
ของชิ้นงานโลหะเงินสเตอร์ลิง ทั้ง 8 ชุด แสดงไว้ในภาคผนวก จ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อุณหภูมิ อบชุบความร้อน (°C)	เวลาอบชุบ ความร้อน (ชั่วโมง)	0%Mn	0.76%Mn	1.70%Mn	2.60%Mn
100	2				
	4				
200	2				
	4				
300	2				
	4				

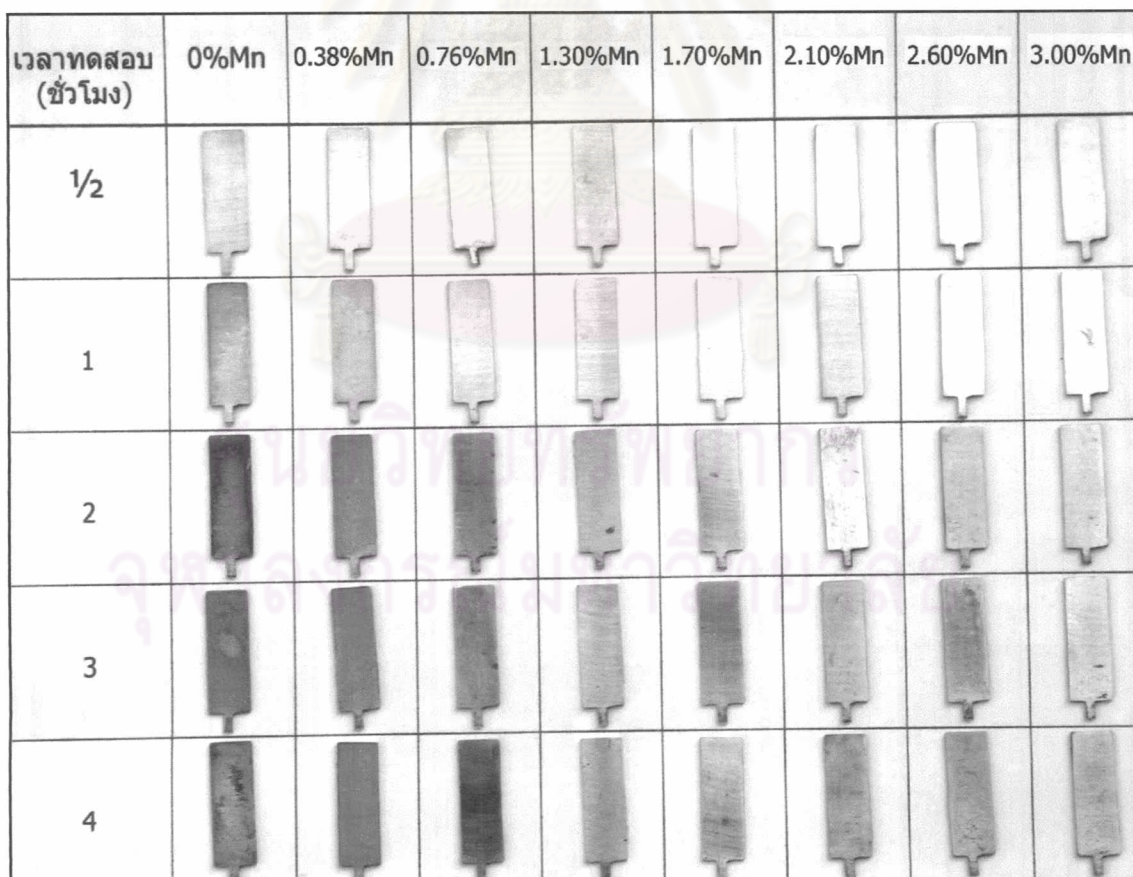
รูปที่ 4.3 ภาพแสดงลักษณะสีผิวที่ได้จากการอบให้ความร้อน

#### 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 หลังจากนั้นแขวนชิ้นงานแต่ละชุดการทดลองไว้ในภาชนะปิดที่ใส่สารละลายอิมัลชันของโซเดียมซัลไฟด์ เพื่อให้ชิ้นงานอยู่ในบรรยากาศของไอซัลเฟอร์ แล้วนำชิ้นงานมาวัดค่า  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  ด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์อีกครั้ง คำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงาน ( $DE^*$ ) ตามสูตรในสมการที่ (2.5) ค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.4 แสดงภาพชิ้นงานหลังทดสอบความต้านทานในการกันหมอง

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิว (DE\*) ของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส

โลหะผสม ชุดที่	ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)			ค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิว (DE*)				
	Ag	Cu	Mn	0.5 ซม.	1 ซม.	2 ซม.	3 ซม.	4 ซม.
1	balance	7.65	-	7.27	23.80	38.86	24.98	23.88
2	balance	6.97	0.38	6.16	16.94	32.66	29.30	26.89
3	balance	6.63	0.76	6.36	9.96	22.53	17.76	24.12
4	balance	6.14	1.30	5.87	3.77	10.02	9.37	13.60
5	balance	5.40	1.70	3.54	5.25	11.28	12.56	14.55
6	balance	4.90	2.10	4.40	3.81	12.91	10.14	14.57
7	balance	4.40	2.60	3.15	6.25	12.85	12.84	14.38
8	balance	4.00	3.00	2.72	4.24	7.49	5.19	13.03



รูปที่ 4.4 ภาพแสดงลักษณะชิ้นงานหลังทดสอบความต้านทานในการกันหมอง

#### 4.6 ผลการทดสอบการกัดกร่อนของฟิล์มด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า โดยวิธีโพเทนชิโอดินามิกส์

หลังจากเตรียมชิ้นงานที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อนจำนวน 2 ชุด ชุดละ 8 ส่วนผสม คือ โลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก โดยชุดแรกทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และชุดที่ 2 ทดสอบในสารละลายชนิดเดียวกัน แต่ปล่อยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เพื่อให้สารละลายอิ่มตัวต่อเซลล์ไฟฟ้าโดยชิ้นงานทดสอบอยู่ที่ขั้วไฟฟ้าโลหะทดสอบ (WE) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (RE) เป็น Ag/AgCl และขั้วไฟฟ้าวัดกระแส (CE) เป็นแท่งแพลตตินัม ทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกส์ ซึ่งอาศัยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของโลหะทดสอบในสารละลาย โดยเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้ชิ้นงานทดสอบด้วยอัตราการสแกน 0.1 มิลลิโวลต์ต่อวินาที แล้ววัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า (E) และกระแสไฟฟ้า (I) เรียกรูปนี้ว่าเส้นโพลาริเซชัน (แสดงในภาคผนวก จ) หาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) ศักย์ไฟฟ้าพาสซีเวชันปริมภูมิ ( $E_{pp}$ ) ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม ( $E_p$ ) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มพาสซีฟ ( $I_p$ ) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $I_{corr}$ ) จากเส้นโพลาริเซชัน แล้วนำค่า  $I_{corr}$  ไปคำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate) จากสูตรในสมการที่ (3.2) หรือคำนวณได้โดยตรงจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณที่ต่อกับเครื่องโพเทนชิโอสแตท ได้ค่าดังตารางที่ 4.6 และ 4.7 เพื่อนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะทดสอบต่อไป

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

ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)	$E_{corr}$ (mV)	$E_{pp}$ (mV)	$E_p$ (mV)	$I_p$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$I_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Corrosion Rate ( $\times 10^{-2}$ mm/year)
1) 7.65Cu - Ag	-132	44	91	117.58	11.61	39.03
2) 6.97Cu - 0.38Mn - Ag	-70	18	81	50.34	10.60	35.64
3) 6.63Cu - 0.76Mn - Ag	-61	13	79	41.15	7.62	25.61
4) 6.14Cu - 1.30Mn - Ag	-56	8	76	26.34	6.49	21.82
5) 5.40Cu - 1.70Mn - Ag	-62	5	76	18.13	5.92	19.91
6) 4.90Cu - 2.10Mn - Ag	-54	4	76	12.36	4.29	14.43
7) 4.40Cu - 2.60Mn - Ag	-44	2	75	11.19	4.25	14.29
8) 4.00Cu - 3.00Mn - Ag	-54	-1	78	5.40	1.38	4.66



ตารางที่ 4.7 แสดงค่า  $E_{\text{corr}}$ ,  $E_{\text{pp}}$ ,  $E_p$ ,  $I_{\text{corr}}$  และ Corrosion Rate ที่วัดได้จากเส้นโพลาริเซชันของ  
 ชิ้นทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอิ่มตัวด้วย  
 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)	$E_{\text{corr}}$ (mV)	$E_{\text{pp}}$ (mV)	$E_p$ (mV)	$I_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Corrosion Rate ( $\times 10^{-2}$ mm/year)
1) 7.65Cu - Ag	-504	-92	144	27.41	92.17
2) 6.97Cu - 0.38Mn - Ag	-553	-100	310	25.86	86.95
3) 6.63Cu - 0.76Mn - Ag	-504	-157	113	25.03	84.15
4) 6.14Cu - 1.30Mn - Ag	-534	-158	122	22.62	76.07
5) 5.40Cu - 1.70Mn - Ag	-491	-153	126	21.57	72.54
6) 4.90Cu - 2.10Mn - Ag	-508	-189	120	18.95	63.71
7) 4.40Cu - 2.60Mn - Ag	-486	-102	124	17.92	60.25
8) 4.00Cu - 3.00Mn - Ag	-512	-186	117	16.74	56.29

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย