

อภิปรายผลการทดลอง

5.1 ผลจากการหลอมและหล่อโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง – แคลเซียม – ซิลิคอน

ชิ้นงานที่ได้จากการหลอมและหล่อแบบสูญญากาศของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแคลเซียม ซิลิคอน และแคลเซียม-ซิลิคอน ที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 เมื่อสังเกตและตรวจสอบด้วยตาเปล่าที่งานหล่อ พบว่าที่บริเวณผิวตรงโคนต้นของชิ้นงานตรงบริเวณรูเท (sprue) ที่เป็นทางเข้าของโลหะหลอมเหลวนั้นมีลักษณะแตกต่างกันดังนี้คือ บริเวณรูเทเหล่านี้ของชิ้นงานที่มีการเติมแคลเซียมปริมาณมากชิ้นจะมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้น แสดงว่าธาตุแคลเซียมที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความสามารถในการเปียก (wettability) ของโลหะเงินสเตอร์ลิงลดต่ำลง ส่วนบริเวณรูเทของชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนเพิ่มขึ้นนั้นจะมีผิวเรียบมากขึ้น แสดงว่าปริมาณธาตุซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นมีส่วนช่วยเพิ่มความสามารถในการเปียก (wettability) ให้แก่โลหะผสมเงินสเตอร์ลิง

นอกจากนี้จากการสังเกตลักษณะสีผิวของชิ้นงานหลังการหล่อ พบว่าโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแคลเซียมจะมีผิวเป็นสีขาวแกมเหลืองมากขึ้นเมื่อแคลเซียมมีปริมาณสูงขึ้น ส่วนชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนสูงขึ้นจะมีผิวเป็นสีขาวมากขึ้น

5.2 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง – แคลเซียม – ซิลิคอน

ผลการตรวจส่วนผสมทางเคมีหลังการหล่อ แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 โดยโลหะผสมทั้ง 12 ชุด ก่อนการหลอมและหล่อ มีปริมาณธาตุแคลเซียม 0 – 0.216 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ธาตุซิลิคอน มีปริมาณ 0 – 0.24 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อตรวจสอบส่วนผสมหลังการหล่อ พบว่าปริมาณธาตุแคลเซียมที่ตรวจสอบได้ในโลหะผสมลดลงจากปริมาณแคลเซียมที่ใช้ในการหล่อ เหลือธาตุแคลเซียมเพียง 0 – 0.102 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณธาตุแคลเซียมที่สูญเสียมีค่าตั้งแต่ 37.5 - 74.0 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณที่เติมลงไป ส่วนธาตุซิลิคอนเหลือเพียง 0-0.162 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณธาตุซิลิคอนที่สูญเสียมีค่าตั้งแต่ 31.2 - 53.3 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณที่เติมลงไป

จากส่วนผสมทางเคมีทั้ง 12 ชุด ถึงแม้ปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่ตรวจสอบได้จะไม่เท่ากับปริมาณธาตุที่เติมลงไป แต่แนวโน้มของปริมาณธาตุทองแดงที่ลดลงและปริมาณแคลเซียมและซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นนั้น เป็นไปในทิศทางเดียวกับปริมาณธาตุที่เติมลงไปก่อนการหล่อ คือมีส่วนที่สามารถนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบได้

ปัจจัยที่มีผลต่อการสูญเสียธาตุแคลเซียมและซิลิคอนในโลหะผสม คือ การที่ธาตุแคลเซียมและซิลิคอนมีสมบัติเป็นตัวลดออกซิเจน (deoxidizer) สามารถรวมตัวกับออกซิเจนได้

ดีกว่าธาตุเงินและทองแดงที่เป็นธาตุหลัก จึงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีขึ้น ได้สารประกอบแคลเซียมออกไซด์และซิลิโคนออกไซด์ลอยปกคลุมอยู่ที่ผิวหน้าโลหะเหลวในขั้นตอนการหลอม และหลังจากโลหะเย็นตัว จะเหลือเศษโลหะหรือสแลก (slag) แยกตัวออกมาอยู่บริเวณผิวหน้าตรงรูเทของงานหล่อ

5.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แคลเซียม - ซิลิโคน ในสภาพหล่อขึ้นรูป โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมหลังจากกั๊กกรด แสดงในภาคผนวก ก เป็นภาพกำลังขยาย 100, 200 และ 500 เท่าตามลำดับ และโครงสร้างจุลภาคก่อนการกั๊กกรด ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) แสดงดังรูปที่ 5.1 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิงทุกส่วนผสมที่ได้จากการหล่อ มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ (dendrite) มีโครงสร้างหลัก 2 เฟส คือ โครงสร้างเนื้อพื้น (matrix) และโครงสร้างยูเทคติก (eutectic structure) โดยโครงสร้างเนื้อพื้นจะมีเงินเป็นองค์ประกอบสูง เรียกว่า Ag - rich solid solution (α - phase) สำหรับในโครงสร้างยูเทคติกจะมี Ag - rich solid solution และ Cu - rich solid solution (β - phase) โดย secondary structure มีลักษณะเป็นแถบสีดำกระจายอยู่ โครงสร้าง secondary structure ที่พบมีปริมาณธาตุต่างๆ มากน้อยขึ้นอยู่กับโลหะผสมที่มีส่วนผสมแตกต่างกันไป ซึ่งตรวจสอบได้จาก EDX ปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างที่ตรวจสอบได้และกราฟแสดงพีคของธาตุต่างๆ ในโครงสร้างนั้น แสดงไว้ในภาคผนวก ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

5.3.1 โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมแคลเซียมและซิลิโคนมีส่วนผสมทางเคมี 7.46%Cu - balance of Ag (รูปที่ 5.1 (ก) และ (ข)) พบว่าโครงสร้างเนื้อพื้นเป็น Ag - rich solid solution (α - phase) มีลักษณะเป็นพื้นขาว จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วย EDX ที่บริเวณนี้พบปริมาณธาตุต่างๆ ดังนี้ 94.36%Ag - 5.64%Cu โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยายสูงขึ้น (3500 เท่า) ดังรูปที่ 5.1 (ข) จะพบ secondary structure ที่มีลักษณะเป็นแถบลายสีดำ (eutectic structure) เมื่อตรวจสอบส่วนผสมโดยรวมที่บริเวณนี้ด้วย EDX จะมีปริมาณธาตุต่างๆ ดังนี้ 64.59%Ag - 35.41%Cu โดยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่าตรงบริเวณนี้มีปริมาณธาตุทองแดงสูงมาก (Cu - rich phase)

5.3.2 โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมเคมี 7.12%Cu - 0.012%Ca - balance of Ag มีโครงสร้างจุลภาคดังรูปที่ 5.1 (ค) และ (ง) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (รูปที่ 5.1 (ค)) จะเห็นลักษณะโครงสร้างเดนไดรต์ที่ได้จากงานหล่อขึ้นรูปเช่นเดียวกับโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมแคลเซียม โดยบริเวณโครงสร้างเดนไดรต์ที่เป็นโครงสร้างเนื้อพื้นจะเป็น Ag - rich phase ซึ่งจากภาพจะเห็นว่าโครงสร้างเนื้อพื้นส่วนที่อยู่ใกล้กับโครงสร้างยูเทคติกจะเป็นสีขาว (บริเวณ B) เมื่อตรวจสอบด้วย

EDX จะพบปริมาณสัดส่วนของธาตุดังนี้ $Ag : Cu : Ca = 93.65 : 6.30 : 0.05$ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่ส่วนที่อยู่ห่างจากโครงสร้างยูเทคติก (บริเวณ C) จะเป็นสีขาวสว่างกว่า พบว่ามีปริมาณสัดส่วนของธาตุดังนี้ $Ag : Cu : Ca = 94.71 : 5.27 : 0.02$ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งบริเวณโครงสร้างเนื้อพื้นที่มีสีขาวและอยู่ใกล้กับโครงสร้างยูเทคติกมากกว่าจะมีส่วนประกอบแคลเซียมอยู่มากกว่าบริเวณที่อยู่ห่างจากยูเทคติก (บริเวณ D) โครงสร้างยูเทคติกมีลักษณะเป็น Irregular shape (รูปที่ 5.1 (ง)) เช่นเดียวกับที่พบในโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมแคลเซียม บริเวณยูเทคติกจะพบปริมาณสัดส่วนของธาตุ คือ $Ag : Cu = 23.09 : 76.91$ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งไม่พบปริมาณแคลเซียม เห็นได้ว่าแคลเซียมสามารถรวมตัวกับเงินในโครงสร้างเนื้อพื้น (Ag – rich phase) ได้ดีกว่าอยู่ภายใน secondary structure ที่เป็น Cu – rich phase

5.3.3 โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมเคมี $7.06\%Cu - 0.025\%Ca - \text{balance of } Ag$ จะพบว่าปริมาณโครงสร้างยูเทคติกลดลง และเริ่มเกิด β phase สีดำที่มีลักษณะเป็น Irregular shape ซึ่งมีสัดส่วนของธาตุ คือ $Ag : Cu = 5.62 : 94.38$ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็น Cu – rich phase พบว่าบริเวณโครงสร้างเนื้อพื้นมีสีขาวสว่างมากขึ้นโดยมีสัดส่วนของธาตุ คือ $Ag : Cu : Ca = 96.27 : 3.66 : 0.02$ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากรูป 5.1 (ฉ) บริเวณ Ag – Cu – Ca phase สีขาวเทาที่เกิดขึ้นเมื่อตรวจสอบดูพบว่ามีสัดส่วนของธาตุดังนี้คือ $Ag : Cu : Ca = 88.11 : 6.57 : 5.32$ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก Ag – Cu – Ca phase สีขาวเทานี้มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมและมักอยู่ติดกับ β phase สีดำที่เป็น Cu – rich phase

5.3.4 โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมเคมี $7.19\%Cu - 0.063\%Ca - \text{balance of } Ag$ พบว่าโครงสร้างที่เป็นเนื้อพื้นนั้นมีสีขาวสว่างมากขึ้นโดยมีสัดส่วนของธาตุ คือ $Ag : Cu : Ca = 94.94 : 4.98 : 0.08$ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากสัดส่วนที่ได้พบว่ามีแคลเซียมในโครงสร้างเนื้อพื้นเพิ่มขึ้นจากส่วนผสมชุดที่ 3 ส่วน β phase สีดำจะพบสัดส่วนของธาตุ คือ $Ag : Cu : Ca = 36.62 : 63.37 : 0.01$ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วน Ag – Cu – Ca phase สีขาวเทาตรวจสอบดูพบว่ามีสัดส่วนของธาตุคือ $Ag : Cu : Ca = 87.60 : 6.82 : 5.58$ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในส่วนผสมนี้พบปริมาณของเฟสสีขาวเทามากขึ้นกระจายอยู่ทั่วไปบริเวณที่ติดกับ β phase

5.3.5 โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมเคมี $7.38\%Cu - 0.014\%Si - \text{balance of } Ag$ ที่แสดงในรูปที่ 5.1 (ง) เห็นได้ว่าปริมาณโครงสร้างยูเทคติกลดลง และรูปร่างของโครงสร้างยูเทคติกมีความกว้างลดลงแต่เรียวยาวมากขึ้น โดยเริ่มมี β phase สีดำเกิดขึ้น จากรูปที่ 5.1 (ญ) เมื่อสังเกตในบริเวณโครงสร้างยูเทคติกพบว่าเส้นลายสีดำหดสั้นลงและเริ่มรวมตัวกันเมื่อเทียบกับโครงสร้างยูเทคติกที่แสดงในรูป 5.1 (ง) β phase สีดำนี้มีสัดส่วนของธาตุ คือ $Ag : Cu : Si = 7.42 : 92.18 : 0.4$ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนโครงสร้างเนื้อพื้นมีสัดส่วนของธาตุ คือ $Ag : Cu =$

95.68 : 4.32 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่พบซิลิคอนอยู่ในโครงสร้างเนื้อพื้นเลย แต่จะพบซิลิคอนอยู่ใน β phase สีดำน้อย

5.3.6 โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมเคมี 7.44%Cu – 0.05%Si – balance of Ag แสดงในรูปที่ 5.1 (ฎ) – 5.1 (จ) ในรูปพบว่าโครงสร้างยูเทคติกที่พบมีรูปร่างยาวมากขึ้นกว่าเดิม และยังคงมี β phase สีดำกระจายอยู่ทั่วไป ซึ่งสัดส่วนของธาตุใน β phase สีดำมีดังนี้ คือ Ag : Cu : Si = 31.79 : 66.37 : 1.83 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่ามีปริมาณซิลิคอนและทองแดงอยู่ใน β phase สีดำนี้เพิ่มมากขึ้น ส่วนโครงสร้างเนื้อพื้นมีอัตราส่วนผสมดังนี้คือ Ag : Cu = 94.08 : 5.92 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

5.3.7 โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมเคมี 7.40%Cu – 0.08%Si – balance of Ag โครงสร้างจุลภาคที่ได้มีลักษณะคล้ายกับโลหะผสมชุดที่ 7 อัตราส่วนผสมที่พบมีดังนี้คือ ที่โครงสร้างเนื้อพื้นมีสัดส่วนของธาตุเป็น Ag : Cu = 95.53 : 4.47 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และที่ β phase สีดำมีสัดส่วนของธาตุเป็น Ag : Cu : Si = 12.77 : 84.70 : 2.53 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

5.3.8 โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมเคมี 7.36%Cu – 0.165%Si – balance of Ag เป็นส่วนผสมที่มีการเติมซิลิคอนมากที่สุดของการทดลองการทดลองชุดนี้ ที่โครงสร้างเนื้อพื้นพบว่ามีอัตราส่วนผสม คือ Ag : Cu : Si = 95.92 : 4.02 : 0.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วน β phase สีดำมีอัตราส่วนผสม คือ Ag : Cu : Si = 1.86 : 92.83 : 5.31 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เห็นได้ว่ามีซิลิคอนใน β phase เพิ่มมากกว่าโลหะเงินผสมชุดที่ 8 จากรูป 5.1 (ด) ไม่พบว่ามีโครงสร้างยูเทคติก แต่จะเห็น β phase ที่มีรูปร่างยาวปรากฏอยู่ทั่วไป

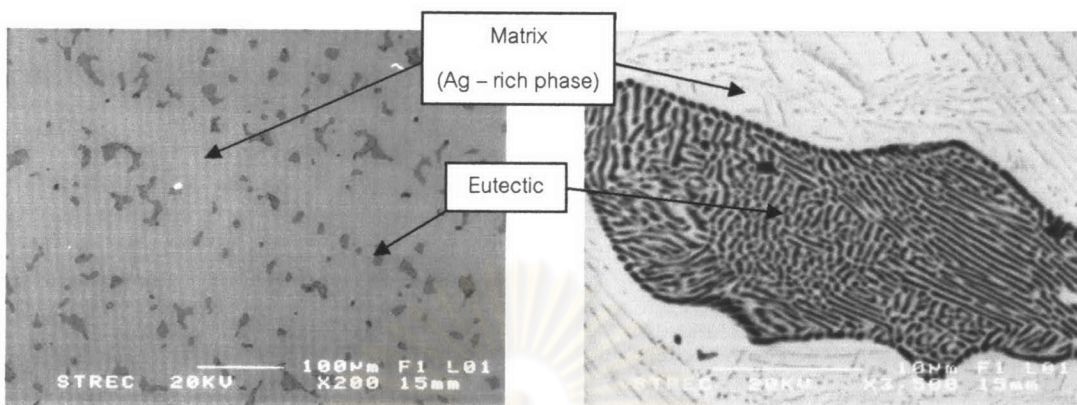
5.3.9 โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมเคมี 7.37%Cu – 0.015%Ca – 0.06%Si – balance of Ag จากรูปที่ 5.1 (ฉ) – 5.1 (น) เมื่อสังเกตดูจะไม่พบโครงสร้างยูเทคติก มีแต่ β phase สีดำที่เรียงตัวยาวมากขึ้น เมื่อดู β phase นี้ที่กำลังขยายสูงขึ้นไป 500 เท่า พบว่าเฟสนี้ไม่ค่อยต่อเนื่องกันเป็นสายเริ่มขาดออกจากกันเป็นช่วง หลังจากทำการตรวจสอบส่วนผสมพบว่ามีสัดส่วนของธาตุคือ Ag : Cu : Si = 3.58 : 93.22 : 3.20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่พบแคลเซียมละลายอยู่ใน β phase สีดำ แต่เมื่อตรวจสอบที่โครงสร้างเนื้อพื้นมีสัดส่วนธาตุดังนี้คือ Ag : Cu : Ca : Si = 95.21 : 4.69 : 0.06 : 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบปริมาณแคลเซียมอยู่ในโครงสร้างเนื้อพื้น

5.3.10 โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมเคมี 7.35%Cu – 0.038%Ca – 0.062%Si – balance of Ag ที่ส่วนผสมที่ 11 นี้มีการเติมแคลเซียมปริมาณเพิ่มขึ้นจากชุดที่ 10 เล็กน้อย พบว่าทำให้ β phase สีดำมีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าส่วนผสมที่ 10 เริ่มพบ Ag – Cu – Ca phase สีเทาขึ้นอีกที่บริเวณขอบ β phase สีดำ โดยมีสัดส่วนของธาตุใน β phase คือ Ag : Cu : Si = 5.54 : 91.11 : 3.35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สัดส่วนของธาตุผสมของ Ag – Cu – Ca phase สีเทา

คือ Ag : Cu : Ca : Si = 80.93 : 13.78 : 5.23 : 0.07 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก โครงสร้างพื้นคือ Ag : Cu : Ca : Si = 95.36 : 4.51 : 0.09 : 0.04 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

5.3.11 โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมเคมี 7.32%Cu – 0.102%Ca – 0.068%Si – balance of Ag ที่โครงสร้างพื้นมีอัตราส่วนผสมคือ Ag : Cu : Ca : Si = 95.79 : 4.03 : 0.09 : 0.09 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก β phase สีดามีอัตราส่วนผสมคือ Ag : Cu : Si = 3.24 : 94.04 : 2.72 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก Ag – Cu – Ca phase สีเทา มีอัตราส่วนผสมดังนี้คือ Ag : Cu : Ca : Si = 86.88 : 6.95 : 6.10 : 0.07 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ตามรูปที่ 5.1 (ฟ) ที่กำลังขยาย 500 เท่า ที่ส่วนผสมชุดที่ 12 พบว่า β phase มีขนาดโตขึ้นกว่าที่พบในส่วนผสมชุดที่ 11 (รูปที่ 5.1 (ผ))

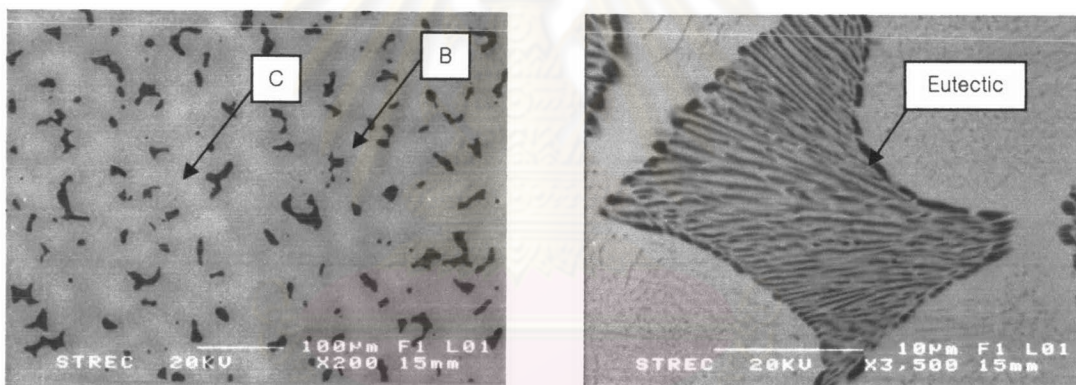
จากลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง – แคลเซียม – ซิลิคอน ที่ปริมาณต่างๆ กัน ลักษณะโครงสร้างที่ให้เห็นได้ชัดเจนว่าบริเวณกึ่งของเดนไดรท์มีเงินเป็นส่วนผสมทางเคมีสูง และบริเวณโครงสร้างยูเทคติกซึ่งอยู่ระหว่างกึ่งของเดนไดรท์จะมีทองแดงเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนที่ค่อนข้างสูง ในโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ทำการทดลองพบว่าเมื่อมีการผสมแคลเซียมเพียงอย่างเดียวจะทำให้โครงสร้างยูเทคติกมีปริมาณลดลงและเกิด β phase สีดำขึ้นมาตามปริมาณแคลเซียมที่เพิ่มขึ้น จะสังเกตเห็นได้ชัดในโลหะผสมชุดที่ 4 ซึ่งมีการเติมแคลเซียมถึง 0.063 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก จะเกิด β phase สีดำจะหนาแน่นขึ้นมา และมีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากแคลเซียมนี้ยังทำให้เกิด Ag – Cu – Ca phase สีเทาขึ้นมาเมื่อเติมแคลเซียมตั้งแต่ 0.025 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักขึ้นไป แล้วพบว่าเฟสสีเทาที่เกิดขึ้นมานี้จะมีส่วนประกอบของแคลเซียมค่อนข้างสูงกว่าบริเวณอื่น หากเทียบปริมาณของแคลเซียมในโครงสร้างเนื้อพื้นและ β phase สีดำหรือโครงสร้างยูเทคติกแล้วพบว่าธาตุแคลเซียมจะละลายอยู่ในโครงสร้างเนื้อพื้น (ที่เป็น Ag – rich phase) มากกว่า ส่วนซิลิคอนนั้นจะอยู่ใน β phase หรือโครงสร้างยูเทคติก (ที่เป็น Cu – rich phase) มากกว่า ธาตุผสมซิลิคอนก็มีแนวโน้มส่งผลให้ปริมาณโครงสร้างยูเทคติกลดลงและทำให้เกิด β phase สีดำมากขึ้นเช่นกัน แต่ β phase ที่เกิดขึ้นจะมีรูปร่างจะแตกต่างจาก β phase ที่ได้จากการเติมแคลเซียมโดยการเติมซิลิคอนจะทำให้ β phase ที่เกิดมีรูปร่างยาว ต่อเนื่องกันมากกว่า ส่วนแคลเซียมมีแนวโน้มทำให้ β phase แยกตัวออกจากกันแล้วมีรูปร่างค่อนข้างกลมหรือสั้นลง



5.1 (ก)

5.1 (ข)

โลหะผสมชุดที่ 1 : 7.46%Cu – balance of Ag

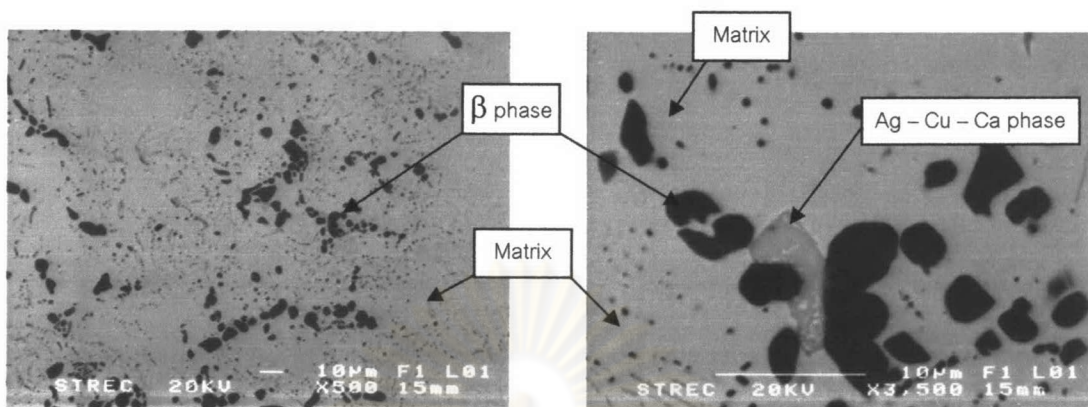


5.1 (ค)

5.1 (ง)

โลหะผสมชุดที่ 2 : 7.12%Cu – 0.012%Ca - balance of Ag

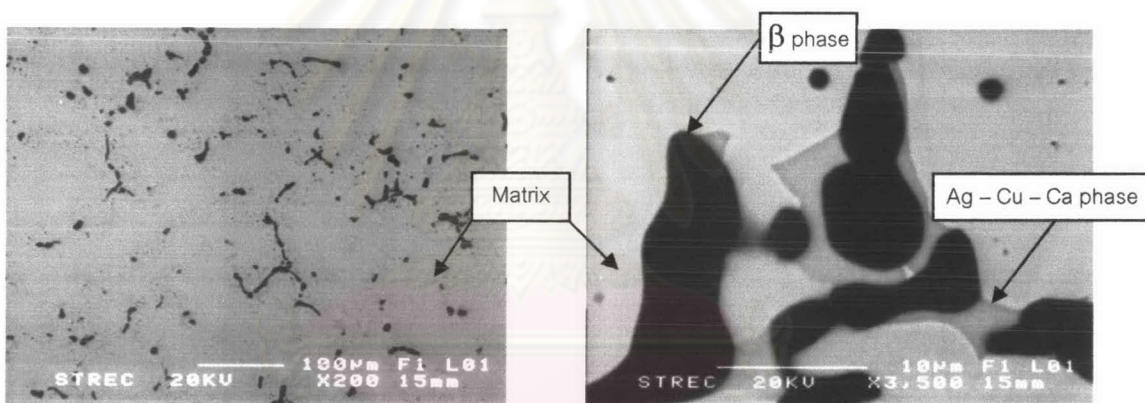
รูปที่ 5.1 (ต่อ) ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แคลเซียม - ซิลิคอน ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยายต่างๆ



5.1 (ก)

5.1 (ข)

โลหะผสมชุดที่ 3 : 7.06%Cu – 0.025%Ca – balance of Ag

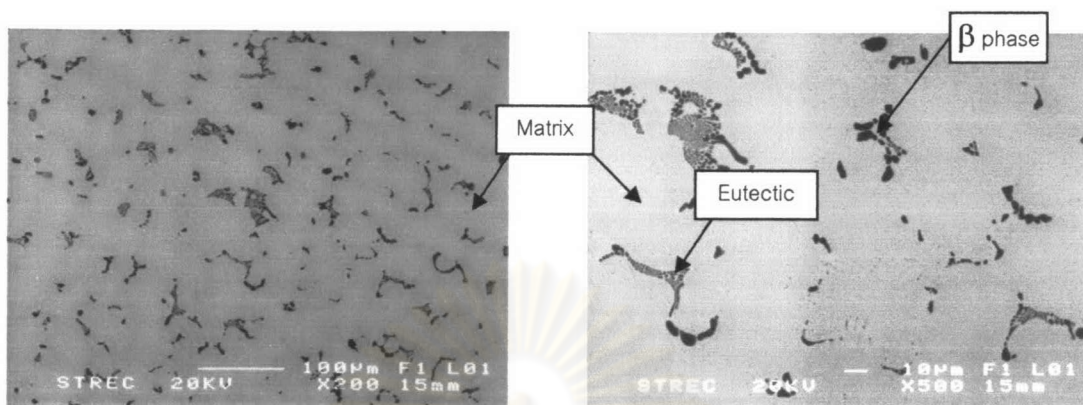


5.1 (ค)

5.1 (ค)

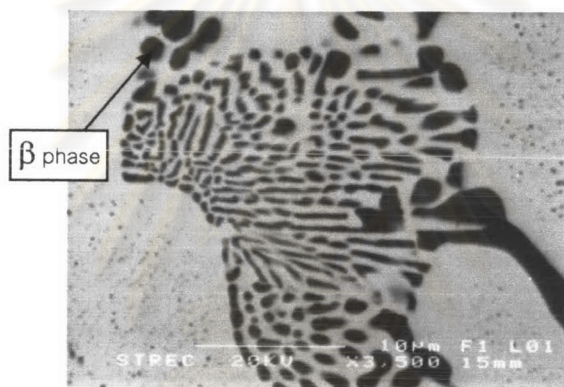
โลหะผสมชุดที่ 4 : 7.19%Cu – 0.063%Ca – balance of Ag

รูปที่ 5.1 (ต่อ) ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แคลเซียม - ซิลิคอน ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยายต่างๆ



5.1 (ฉ)

5.1 (จ)

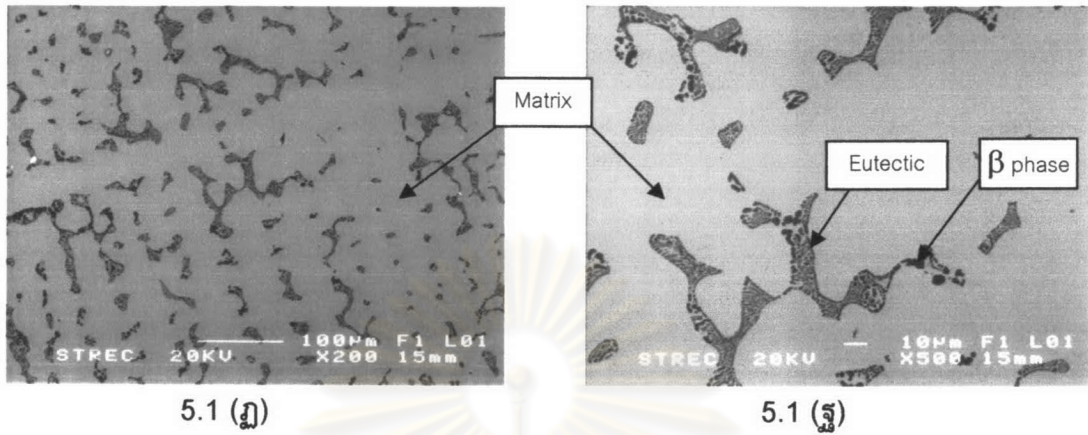


5.1 (จ)

โลหะผสมชุดที่ 6 : 7.38%Cu – 0.014%Si – balance of Ag

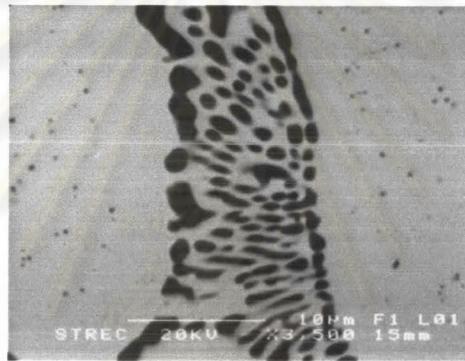
รูปที่ 5.1 (ต่อ) ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แคลเซียม - ซิลิคอน ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยายต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5.1 (ก)

5.1 (ข)

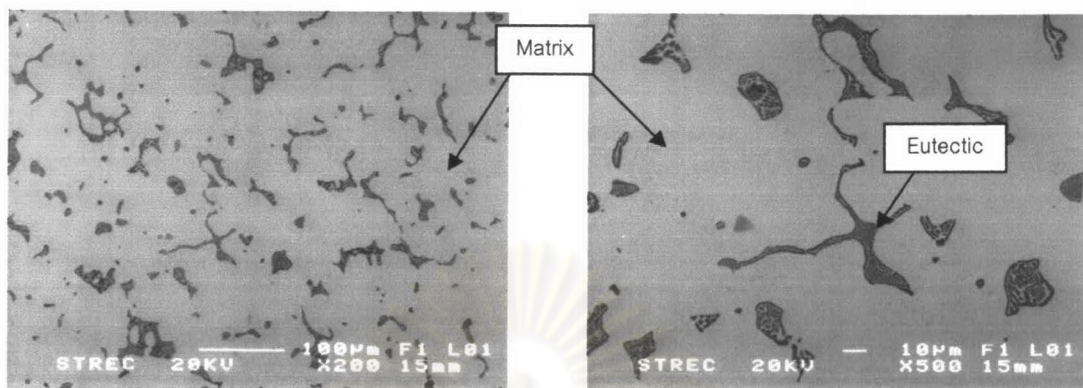


5.1 (ค)

โลหะผสมชุดที่ 7 : 7.44%Cu – 0.05%Si – balance of Ag

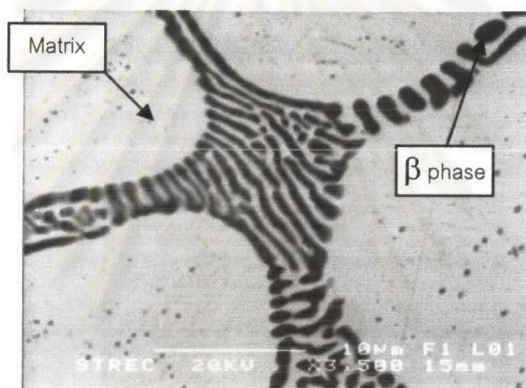
รูปที่ 5.1 (ต่อ) ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แคลเซียม - ซิลิคอน ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยายต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5.1 (ค)

5.1 (ง)

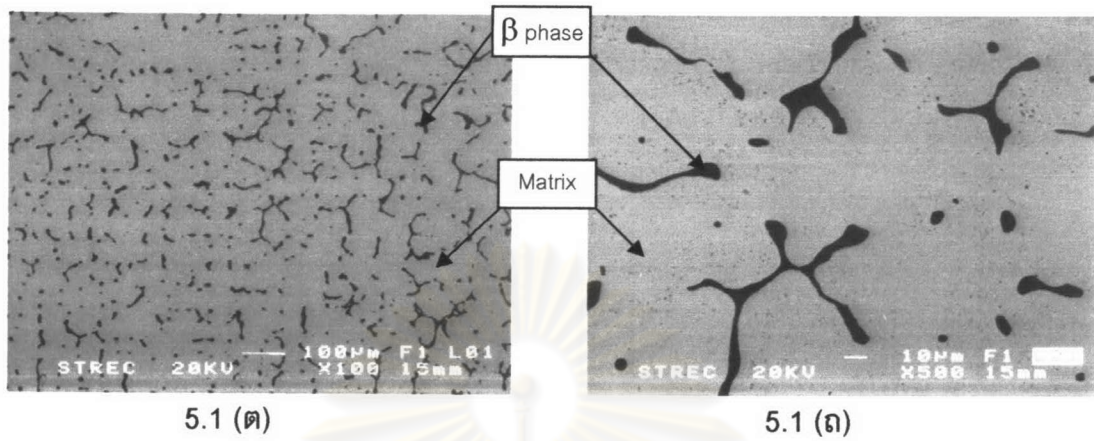


5.1 (ด)

โลหะผสมชุดที่ 8 : 7.40%Cu – 0.08%Si – balance of Ag

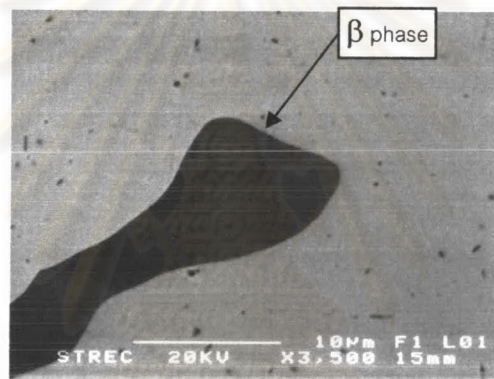
รูปที่ 5.1 (ต่อ) ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แคลเซียม - ซิลิคอน ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยายต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5.1 (ค)

5.1 (ค)

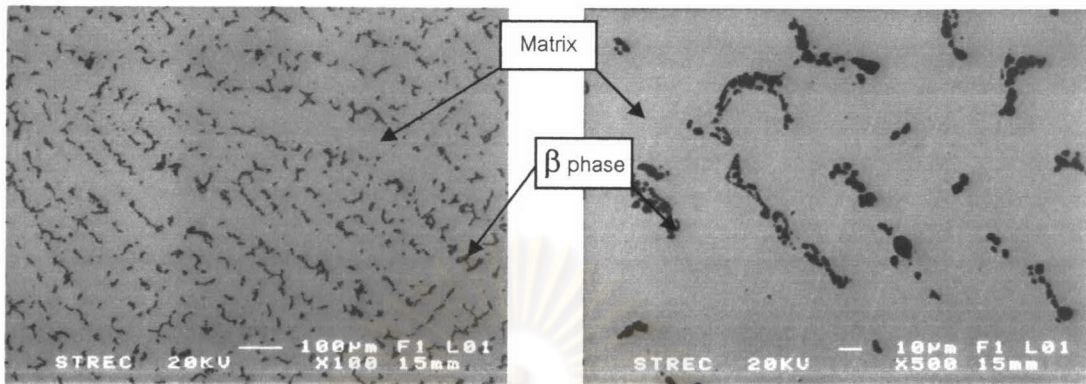


5.1 (ค)

โลหะผสมชุดที่ 9 : 7.36%Cu – 0.165%Si – balance of Ag

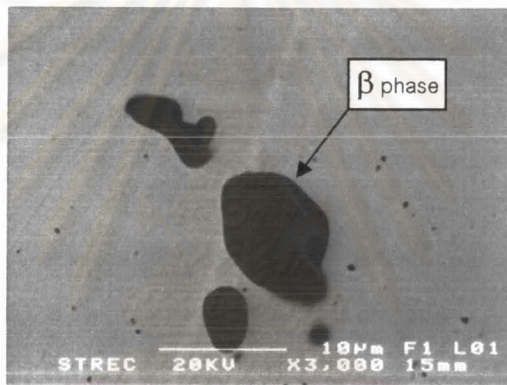
รูปที่ 5.1 (ต่อ) ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แคลเซียม - ซิลิคอน ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยายต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5.1 (จ)

5.1 (ข)

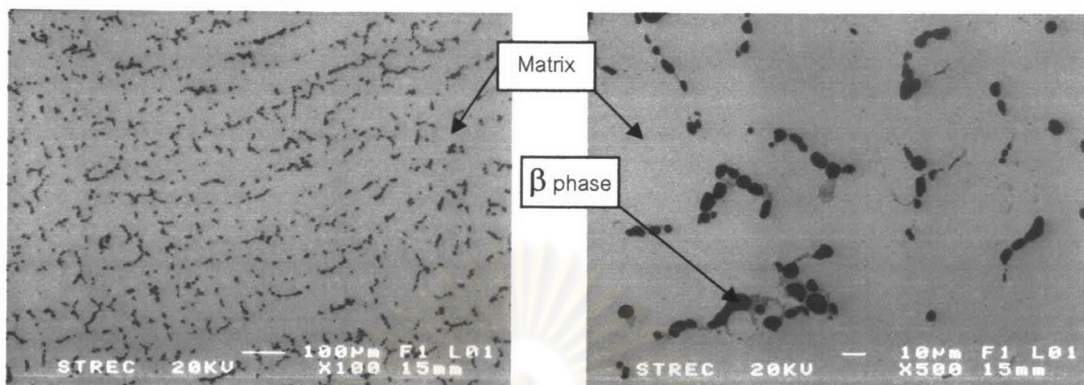


5.1 (บ)

โลหะผสมชุดที่ 10 : 7.37%Cu – 0.015%Ca – 0.06%Si – balance of Ag

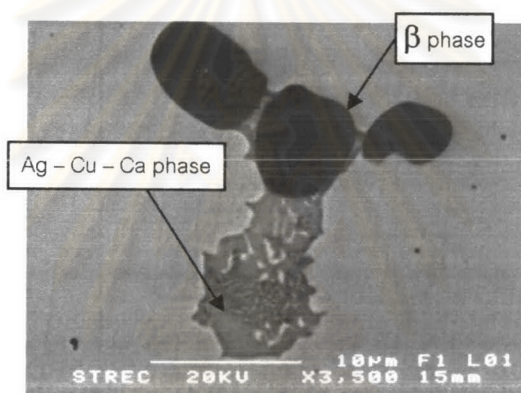
รูปที่ 5.1 (ต่อ) ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แคลเซียม - ซิลิคอน ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยายต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5.1 (ป)

5.1 (ผ)

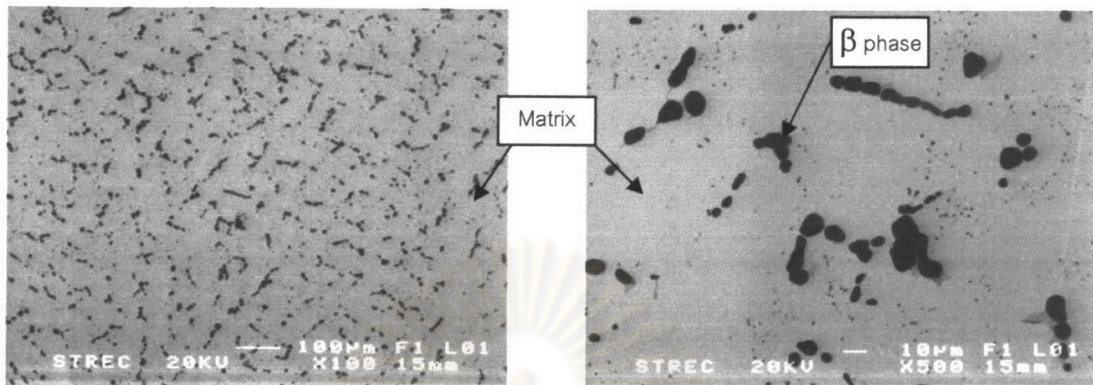


5.1 (ผ)

โลหะผสมชุดที่ 11 : 7.35%Cu – 0.038%Ca – 0.062%Si – balance of Ag

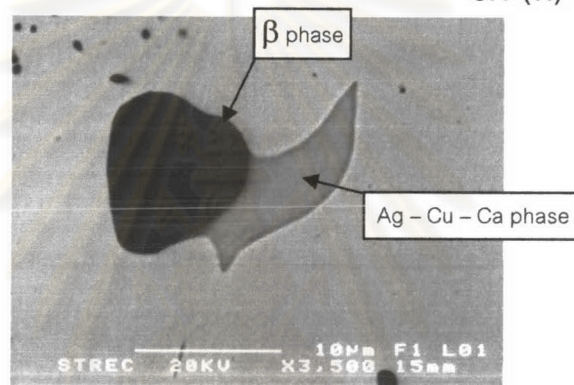
รูปที่ 5.1 (ต่อ) ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แคลเซียม - ซิลิคอน ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยายต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5.1 (พ)

5.1 (ค)



5.1 (ง)

โลหะผสมชุดที่ 12 : 7.32%Cu – 0.102%Ca – 0.068%Si – balance of Ag

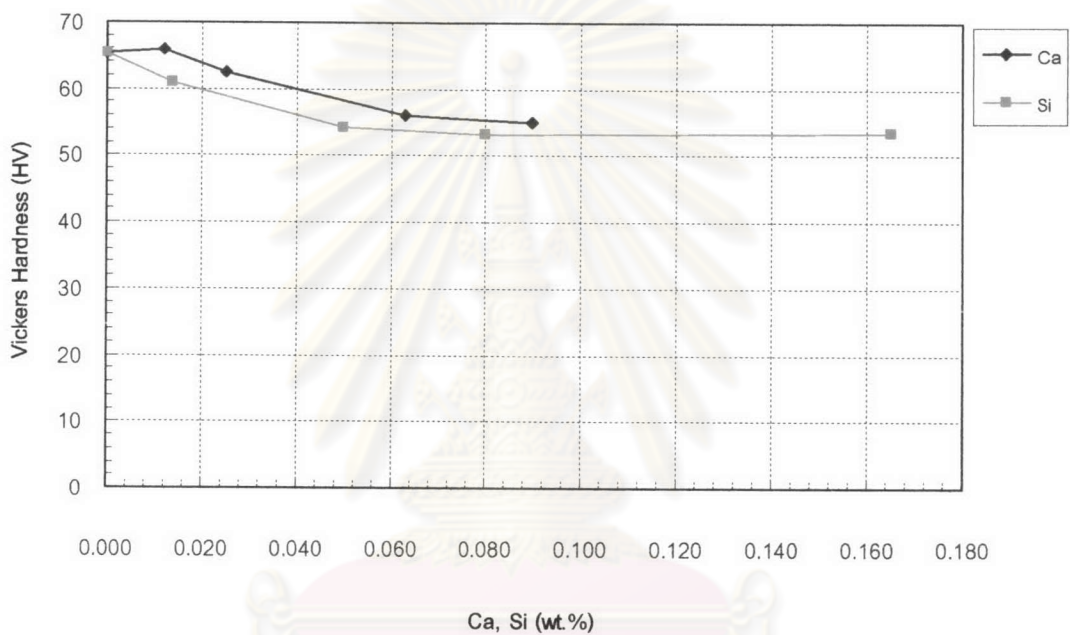
รูปที่ 5.1 (ต่อ) ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แคลเซียม - ซิลิคอน ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยายต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.4 ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางกลในสภาพหลังการหล่อขึ้นรูป

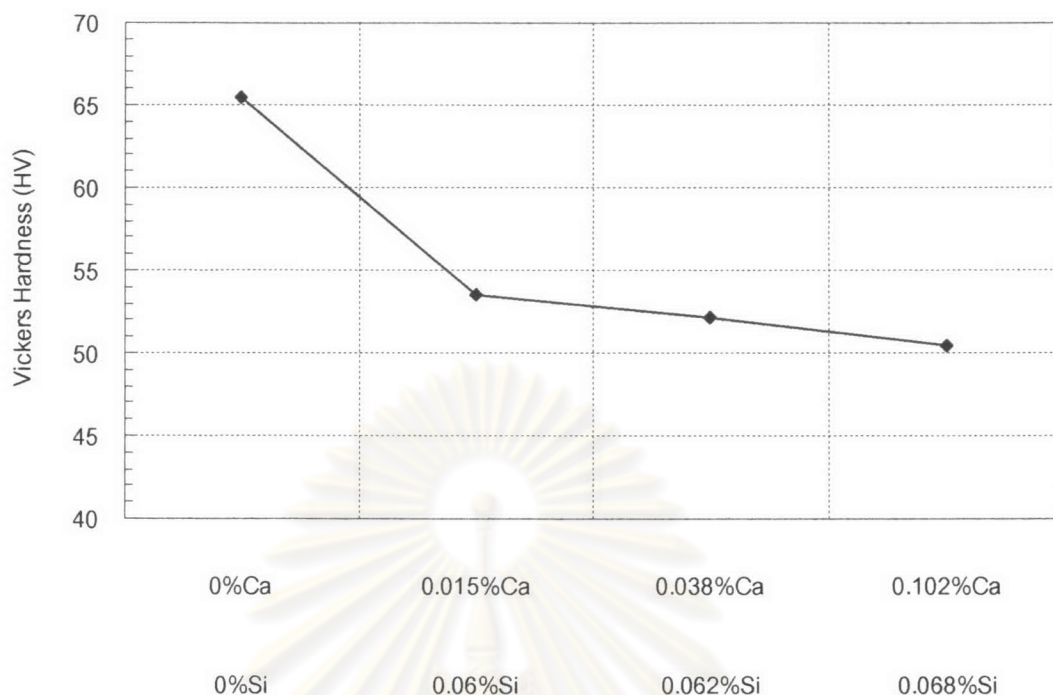
5.4.1 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vicker Hardness Test)

โลหะเงินสเตอร์ลิงทั้ง 12 ชุด ที่มีธาตุแคลเซียม และซิลิคอนปริมาณต่างกัน มีความแข็งแบบวิกเกอร์เฉลี่ย (HV) แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 ซึ่งเมื่อนำมาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณทองแดงในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมและซิลิคอนในโลหะเงินสเตอร์ลิงกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมและซิลิคอนในโลหะเงินสเตอร์ลิงกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์

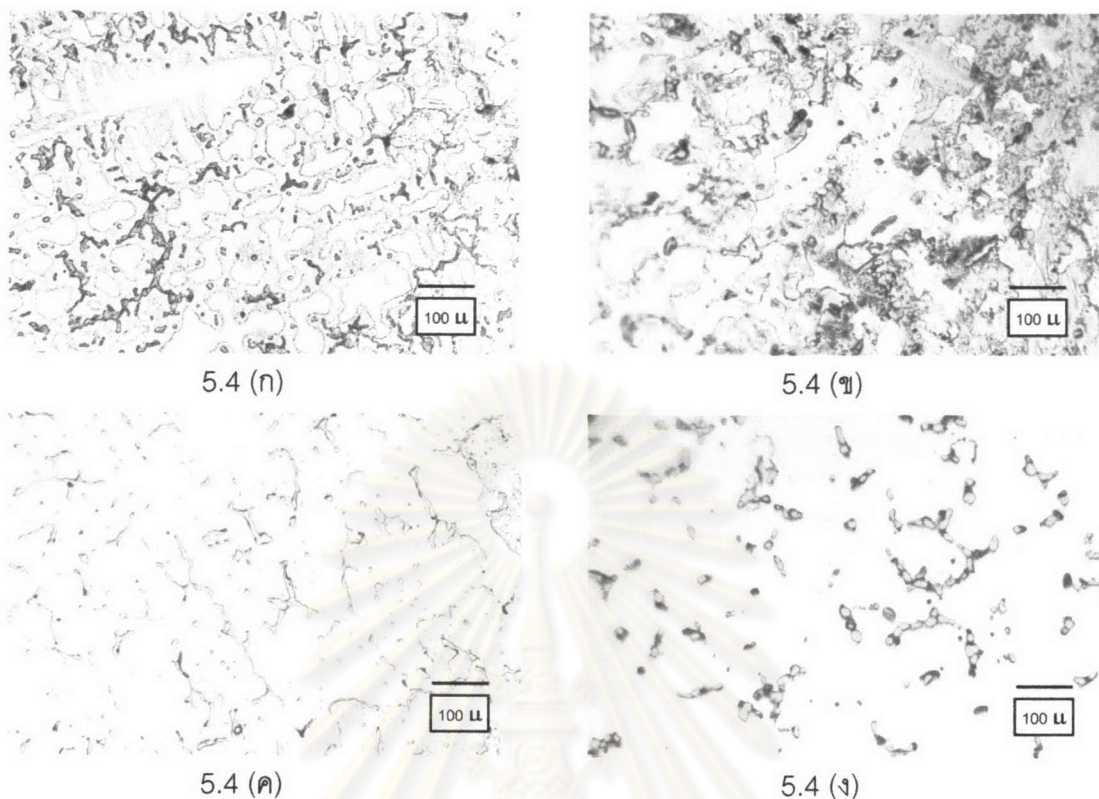
โลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่มีธาตุแคลเซียมและซิลิคอน โดยมีทองแดงในปริมาณ 7.46 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งแบบวิกเกอร์สูงถึง 65.4 HV ค่าความแข็งนี้จะลดลงเมื่อปริมาณทองแดงลดลง ปริมาณแคลเซียมและซิลิคอนเพิ่มขึ้น โดยความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสม 7.30%Cu – 0.09%Ca – balance of Ag ลดลงเหลือเพียง 55.1 HV ที่ส่วนผสม 7.36%Cu – 0.165%Si – balance of Ag ลดลงเหลือเพียง 53.4 HV และที่ส่วนผสม 7.32%Cu – 0.102%Ca – 0.068%Si – balance of Ag ลดลงเหลือเพียง 50.5 HV จากรูปที่ 5.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มส่วนผสมของแคลเซียมและซิลิคอนทำให้ความแข็งมีค่าลดลง เมื่อดูจากโครงสร้างจุลภาคดังรูปที่ 5.4 พบว่าเมื่อเติมแคลเซียมและซิลิคอนทำให้โครงสร้างยูเทคติกที่พบในโลหะเงินสเตอร์ลิงนั้นลดน้อยลง ตามปริมาณการเติมธาตุผสมแคลเซียมและซิลิคอนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการลดลงของโครงสร้างยูเทคติกนี้จะส่งผลให้โลหะเงินสเตอร์ลิงมีความแข็งลดลง เนื่องจากโครงสร้างยูเทคติก (Cu – rich phase) จะเป็นโครงสร้างที่ช่วยในการเพิ่มความแข็ง

จากผลการทดสอบส่วนผสมโดยวิธี EDX พบว่าหากมีการเติมปริมาณแคลเซียมน้อยคือที่ 0.012 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะพบปริมาณแคลเซียมละลายอยู่เล็กน้อยคือ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในโครงสร้างเนื้อพื้น ทำให้เกิด solid solution hardening ขึ้นมาแต่การที่ผลความแข็งรวม

ไม่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงที่เติมแคลเซียมปริมาณน้อยๆ นี้ เนื่องมาจากการลดลงของโครงสร้างยูเทคติก เมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมต่อไปถึงแม้ว่าจะมีการละลายของแคลเซียมในโครงสร้างเนื้อพื้นเพิ่มมากขึ้นแต่ความแข็งแรงกลับลดลงทั้งนี้เพราะผลของการลดลงของปริมาณและความหนาแน่นโครงสร้างยูเทคติกมีความเด่นชัดมากกว่า ส่วนการเติมซิลิคอนนั้นหากเริ่มเติมในปริมาณน้อยจะทำให้เกิด β phase สีดำนั่นในโครงสร้างยูเทคติก (รูปที่ 5.1 (ฎ)) เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิคอนต่อไปอีกพบว่าโครงสร้างยูเทคติกจะมีความกว้างน้อยลงแต่จะมีความยาวมากขึ้น (จากรูป 5.1 (ฐ) และ 5.1 (ณ)) จนกระทั่งปริมาณซิลิคอนเพิ่มจนถึง 0.165 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะเหลือแต่ β phase สีดำนอกจากรูปที่ 5.2 เป็นกราฟแสดงค่าความแข็งของชิ้นงานพบว่าในช่วงแรกของการเติมปริมาณซิลิคอนความแข็งจะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเติมปริมาณซิลิคอนมากขึ้นเรื่อยจนถึง 0.165 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วความชันของเส้นกราฟความแข็งเริ่มลดลง หมายถึงอัตราการลดลงของความแข็งเริ่มลดลง

การเติมส่วนผสมทั้งแคลเซียมและซิลิคอนนั้นจะมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิงเช่นกันคือ ทำให้ปริมาณโครงสร้างยูเทคติกลดลงคล้ายกับการเติมธาตุแคลเซียมหรือซิลิคอนอย่างใดอย่างหนึ่ง แต่รูปร่างของ β phase สีดำนั้น (หากดูในรูปที่ 5.4 จะพบว่า β phase สีดำนั้นจะเห็นในรูปจากการ SEM นั้นจะเห็นเป็นสีเหลืองแกมแดงแทน เนื่องจาก β phase มีปริมาณส่วนผสมเป็นธาตุทองแดงค่อนข้างสูง) จะสั้นลงหรือมีความกลมมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมในขณะที่ปริมาณซิลิคอนคงที่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.4 ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แคดเซียม - ซิลิคอนในสภาพหล่อขึ้นรูป ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 200 เท่า หลังการกัดด้วยสารละลาย

(ก) 7.46%Cu – balance of Ag

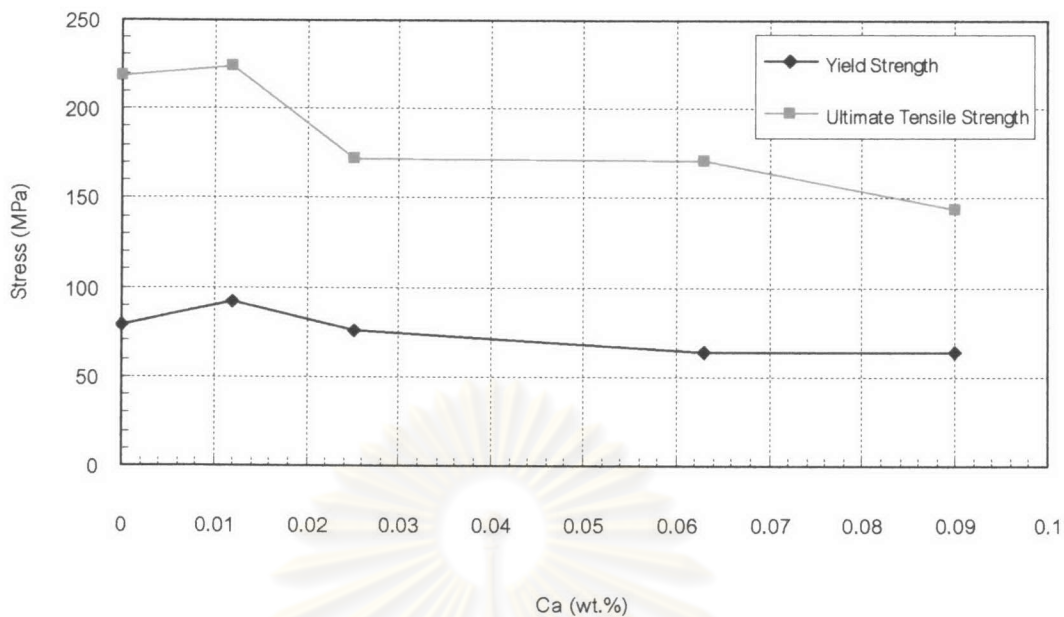
(ข) 7.30%Cu – 0.90%Ca – balance of Ag

(ค) 7.36%Cu – 0.165%Si – balance of Ag

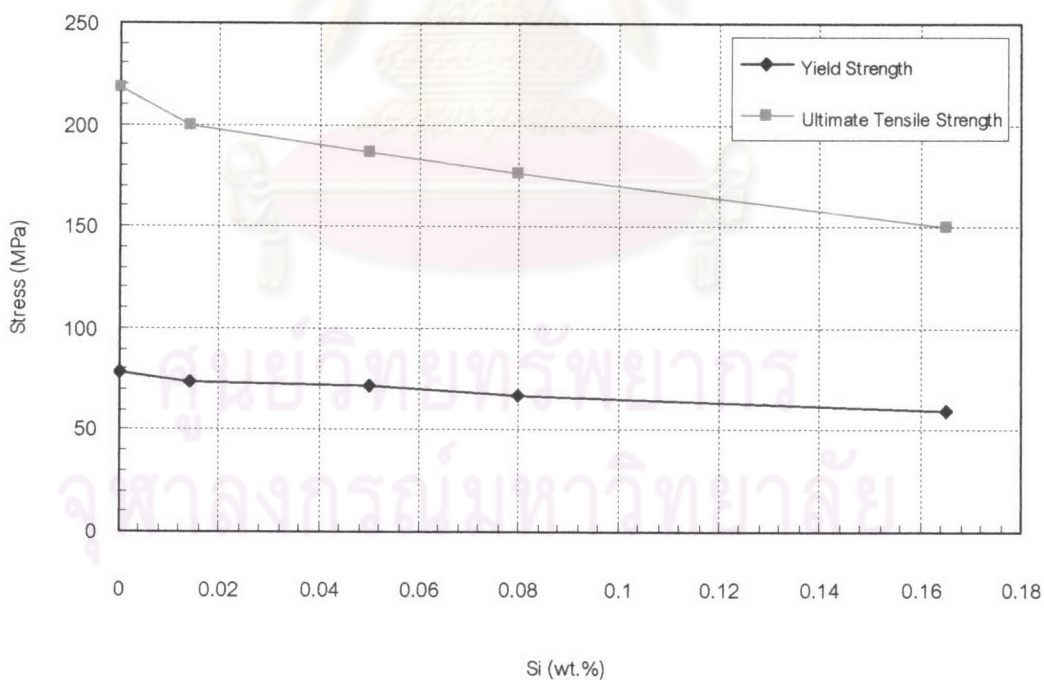
(ง) 7.35%Cu- 0.038%Ca – 0.062%Si – balance of Ag

5.4.2 ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

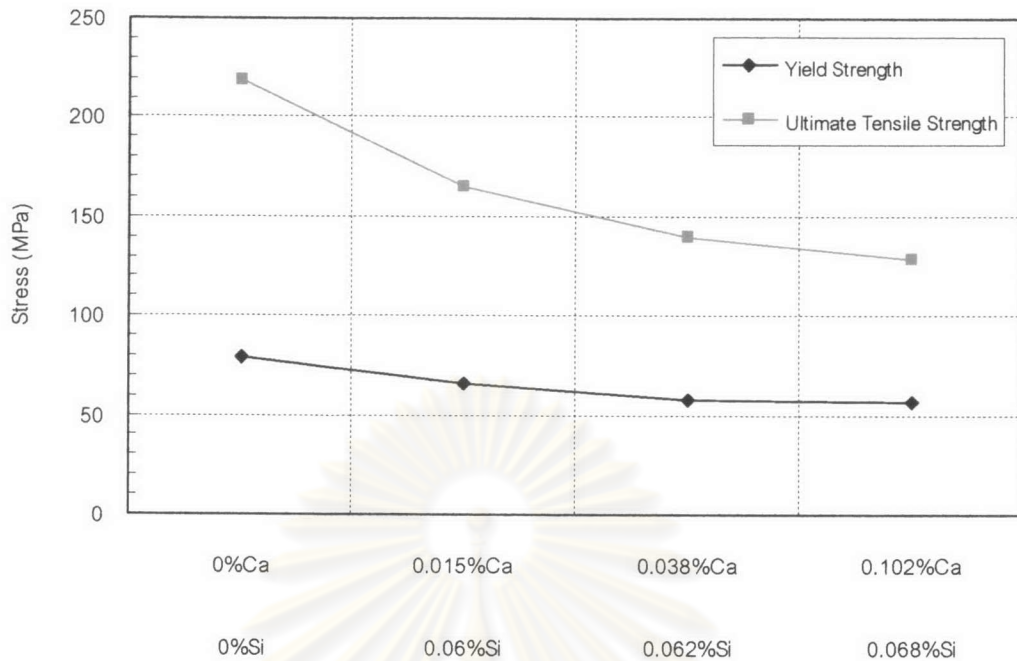
ค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดึง ได้แก่ ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength; UTS) และความเค้นจุดคราก (yield strength; σ_y) โดยค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) ไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากชิ้นงานทดสอบที่นำไปทดสอบแรงดึงเป็นชิ้นงานจากการหล่อขึ้นรูป (as – cast) ทำให้เกิดปัญหาจากรูพรุนและความไม่สม่ำเสมอของเนื้อโลหะ ซึ่งเกิดปัญหาทั้งขณะเตรียมชิ้นงานก่อนการทดสอบและขณะทำการทดสอบ ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ได้มีความเบี่ยงเบนสูง จึงไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงผลของธาตุแคลเซียมในโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความเค้นจุดคราก



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงผลของธาตุซิลิคอนในโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความเค้นจุดคราก



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงผลความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความเค้นจุดครากของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผสมทั้งธาตุแคลเซียมและซิลิคอน

ความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความเค้นจุดครากของโลหะผสม แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 เมื่อนำมาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและปริมาณธาตุแคลเซียมและซิลิคอนในโลหะเงินสเตอร์ลิง ได้กราฟดังรูปที่ 5.5 และ 5.6 ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและส่วนผสมที่เติมทั้งปริมาณธาตุแคลเซียมและซิลิคอนในโลหะเงินสเตอร์ลิงแสดงในกราฟรูปที่ 5.7 ค่าความต้านทานแรงดึงเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่โลหะจะรับได้ก่อนที่จะขาดออกจากกันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมธาตุแคลเซียมและซิลิคอน มีค่า 218.6 MPa เมื่อปริมาณแคลเซียมเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.012 - 0.090 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซิลิคอนเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.014 - 0.165 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และการเติมทั้งแคลเซียมและซิลิคอนโดยเพิ่มปริมาณแคลเซียมตั้งแต่ 0.015 - 0.102 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใส่ซิลิคอนในช่วง 0.060 - 0.068 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงสูงสุดของโลหะเงินสเตอร์ลิงมีค่าลดลง สำหรับความต้านทานแรงดึงของโลหะผสมที่ได้จากงานหล่อมีความแม่นยำไม่สูงนัก เนื่องจากมีปัจจัยสำคัญเกี่ยวกับรูพรุนจากการหดตัว (shrinkage porosity) และความไม่สม่ำเสมอของชิ้นงานหล่อเอง ดังนั้นจึงนำค่าความเค้นจุดครากมาวิเคราะห์สมบัติทางกลของโลหะเงินสเตอร์ลิงแทน

ความเค้นจุดคราก (yield strength; σ_y) เป็นค่าแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป (elastic - plastic behavior) ซึ่งเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดความเสียหาย ในการตรวจสอบค่าความเค้นจุดครากของโลหะเงินสเตอร์ลิง

ที่ไม่ได้เติมแคลเซียมและซิลิคอน พบว่ามีความเค้นจุดคราก คือ 78.80 MPa และเมื่อเติมธาตุแคลเซียมลงไปเพียงเล็กน้อยเพียง 0.012 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่ามีความเค้นจุดครากเพิ่มขึ้นถึง 92.21 MPa เมื่อเติมธาตุแคลเซียมเพิ่มมากขึ้นไปอีกตั้งแต่ 0.025 - 0.090 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าความเค้นจุดครากมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนถึง 63.43 MPa ส่วนการเติมซิลิคอนนั้นส่งผลให้ความเค้นจุดครากมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนถึง 59.42 MPa เมื่อมีปริมาณซิลิคอน 0.165 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การเติมทั้งแคลเซียมและซิลิคอนโดยเติมซิลิคอนคงที่ที่ประมาณ 0.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วแปรผันปริมาณแคลเซียมในช่วง 0.015 - 0.102 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความเค้นจุดครากจะลดลงเมื่อปริมาณแคลเซียมเพิ่มขึ้นโดยลดลงจาก 66.22 MPa เหลือเพียง 56.74 MPa ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันกับเมื่อเติมแคลเซียมเพียงอย่างเดียว

สาเหตุของการลดลงของค่าความเค้นจุดครากนี้สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับการลดลงของค่าความแข็ง จากรูปที่ 5.1 เห็นได้ชัดว่าโครงสร้างยูเทคติกซึ่งเป็นโครงสร้างที่ช่วยเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงให้กับโลหะผสมมีปริมาณลดลง เมื่อมีการเติมธาตุผสมแคลเซียมหรือซิลิคอนเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความต้านทานแรงดึงและความเค้นจุดครากของโลหะผสมลดลงด้วย

5.5 ผลการตรวจสอบสีผิวหลังอบให้ความร้อน (Heat Treatment)

จากรูปที่ 4.1-4.3 แสดงลักษณะสีผิวที่ได้จากการอบชุบให้ความร้อนแก่โลหะเงินสเตอร์ลิงทั้ง 12 ชุด ที่มีปริมาณแคลเซียมและซิลิคอนต่างๆ กัน โดยการให้ความร้อนแก่โลหะทดสอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง จะเห็นว่าสีผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงไม่เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น คือ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผสมแคลเซียมจะเปลี่ยนเป็นสีส้ม สีส้มนี้จะเข้มขึ้นเมื่อปริมาณแคลเซียมมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเป็นสีส้มสดใสที่ปริมาณแคลเซียมมากที่สุดที่ 0.09 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิคอนจะเปลี่ยนสีออกไปทางสีส้มอมเขียวอ่อนๆ ผิวของโลหะเงินที่ผสมทั้งซิลิคอนและแคลเซียมจะให้สีส้มอมเขียวแต่สีส้มจะเข้มมากกว่าโลหะผสมที่เติมซิลิคอน เมื่อทิ้งไว้นานขึ้นเป็น 4 ชั่วโมง ผิวของโลหะผสมที่เติมแคลเซียมจะมีสีเหลืองอมแดง โลหะผสมที่เติมซิลิคอนผิวจะมีสีแดงอมเหลือง สีแดงจะจางลงและสีเหลืองจะมากขึ้นตามปริมาณซิลิคอนที่เพิ่มขึ้น โดยจะมีสีเหลืองสดใสที่ซิลิคอน 0.08 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โลหะผสมที่เติมทั้งแคลเซียมและซิลิคอนจะให้ผิวเป็นสีเหลืองอมแดง โดยจะมีสีเหลืองอมแดงสดใสที่ปริมาณแคลเซียม 0.015 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และซิลิคอน 0.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อเติมแคลเซียมเพิ่มขึ้น พบว่าสีแดงลดลงเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอมเหลือง การเติมซิลิคอนทำให้โลหะเปลี่ยนสีจากสีแดงเข้มนั้นจางลงจนกระทั่งเป็นสีน้ำตาล เมื่อเติมทั้งแคลเซียมและซิลิคอนทำให้เปลี่ยนไปเป็นสีเหลืองอมส้ม เมื่ออบที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าถ้าเติมแคลเซียม

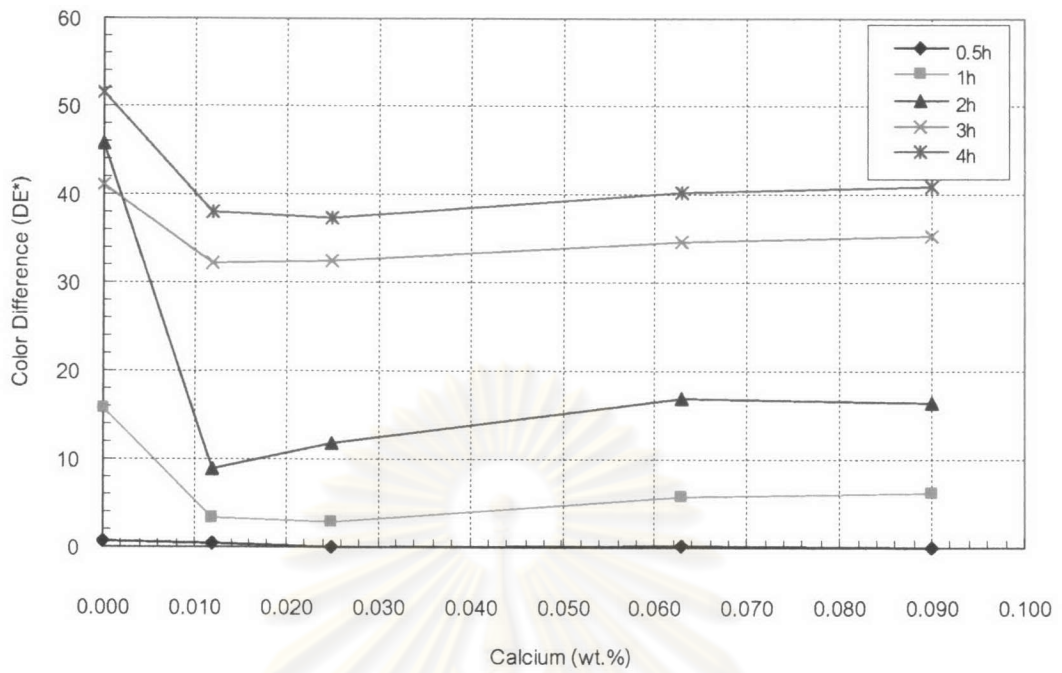
สีจะเปลี่ยนจากน้ำตาลดำเป็นสีดำ ถ้าเติมซิลิคอนสีน้ำตาลดำจะลดความเข้มลง ถ้าเติมทั้งแคลเซียมและซิลิคอนจะเป็นสีน้ำตาลอมเหลืองเมื่อแคลเซียมเพิ่มขึ้น

ลักษณะสีผิวที่ได้เกิดจากการที่ธาตุแคลเซียมและซิลิคอนทำปฏิกิริยาออกซิเดชันในบรรยากาศ เกิดเป็นฟิล์มของสารประกอบแคลเซียมและซิลิคอนปกคลุมบนผิวหน้าโลหะเงินสเตอร์ลิง เมื่อดูจากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมเพื่ออบทำสีผิวคือ อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และ 300 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามผลของสีที่ได้จากยังไม่มีความแตกต่างกันในแต่ละส่วนผสมมากนักทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณธาตุผสมแคลเซียมและซิลิคอนที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ยังมีปริมาณการเติมที่ค่อนข้างน้อย คาดว่าหากเพิ่มปริมาณส่วนผสมพวกแคลเซียมหรือซิลิคอนมากขึ้นจะทำให้ผลการศึกษาเรื่องสีผิวหลังการอบด้วยความร้อนนี้มีความแตกต่างเด่นชัดมากขึ้น

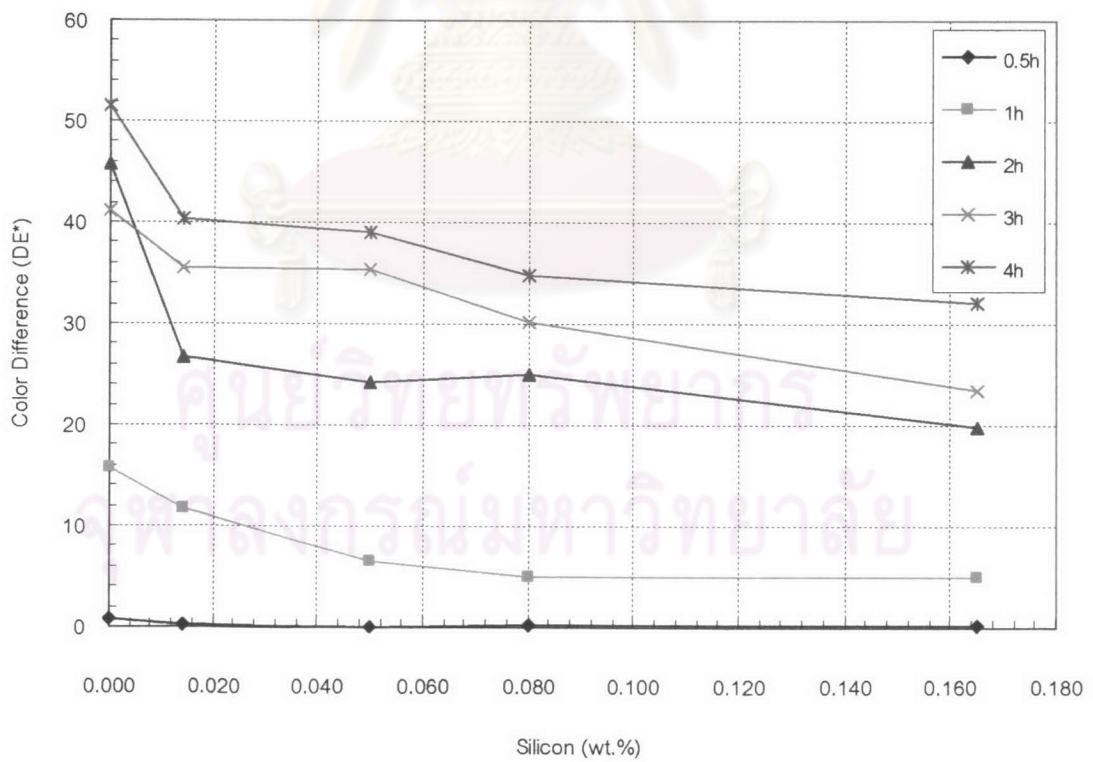
จากการศึกษาข้อมูลทางทฤษฎีในเรื่องคุณสมบัติของฟิล์มพบว่า สารประกอบแคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide; CaO) มีสีขาวหรือขาวเทา แคลเซียมเพอร์ออกไซด์ (calcium peroxide; CaO₂) มีสีเหลืองอ่อน แคลเซียมซัลไฟด์ (calcium sulphide; CaS) มีสีขาวอมเหลืองอ่อน ซิลิคอนไดออกไซด์ (silicon dioxide; SiO₂) มีสีขาว ซิลิคอนไดซัลไฟด์ (Silicon disulphide; SiS₂) มีสีขาวเทา ไดคอปเปอร์ออกไซด์ (dicopper oxide or cuprous oxide; Cu₂O) มีสีเหลือง, แดง หรือน้ำตาล คอปเปอร์ออกไซด์ (copper oxide or cupric oxide; CuO) มีสีดำ หรือน้ำตาลดำ คอปเปอร์ซัลไฟด์ (copper sulphide or cupric sulphide; CuS) มีสีน้ำเงิน-ดำหรือสีดำ ไดคอปเปอร์ซัลไฟด์ (dicopper sulphide or cuprous sulphide; Cu₂S) มีสีน้ำเงิน, น้ำเงิน-ดำ หรือสีดำ โดยฟิล์มของสารประกอบที่เกิดขึ้นที่ผิวของโลหะผสม จะมีผลต่อสีผิวของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง เมื่ออบให้ความร้อนและเวลาต่างๆ กัน ดังนั้นควรที่จะมีการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มที่เกิดขึ้นต่อไป

5.6 ผลการทดสอบความต้านทานการหมอง (Tarnish Resistance)

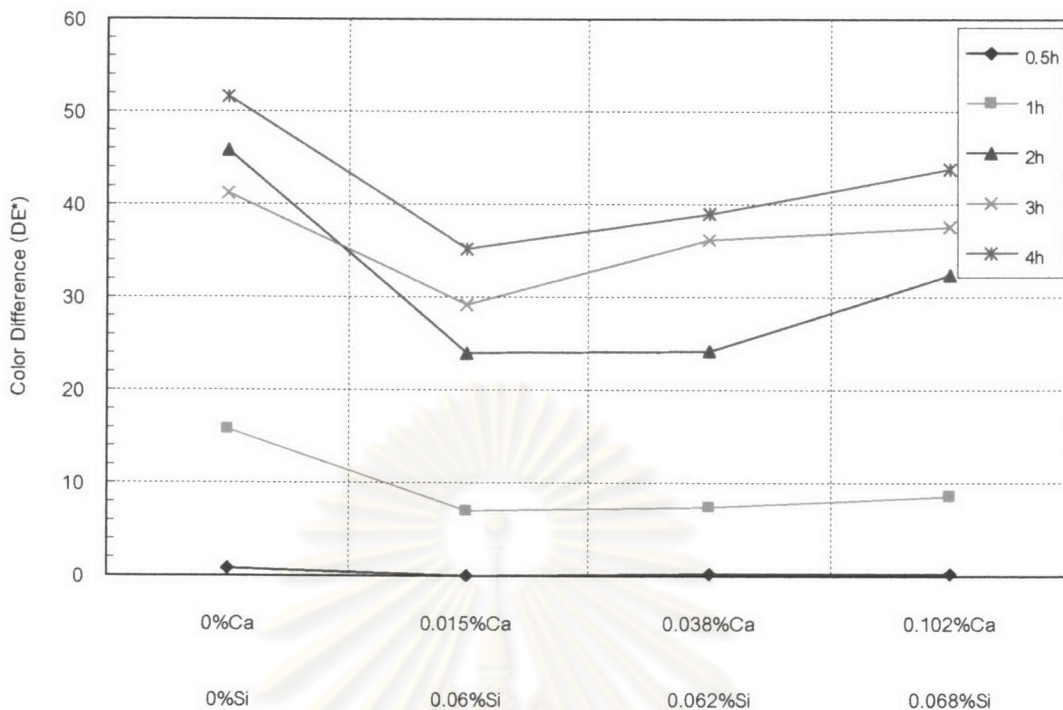
ผลการทดสอบความต้านทานการหมองของชิ้นงานโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แคลเซียม - ซิลิคอนทั้ง 12 ชุด ในบรรยากาศไอซัลเฟอร์ ที่ได้จากการละลายสารประกอบโซเดียมซัลไฟด์นาโนไฮเดรตในน้ำในภาชนะปิด โดยแขวนชิ้นงานทดสอบเป็นเวลาต่างๆ กัน คือ 0.5, 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ภาพลักษณะชิ้นงานหลังทดสอบความต้านทานการหมองทุกชุดได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.4-4.6 ค่าความสว่าง L*, ค่าสี a*, b* และค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิว (Color difference; DE*) ที่ได้จากการตรวจสอบสีที่เปลี่ยนไปด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 นำค่า DE* ที่คำนวณได้มาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมและซิลิคอนกับค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิว ได้ดังรูปที่ 5.8-5.10



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผสมธาตุแคลเซียม



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผสมธาตุซิลิคอน



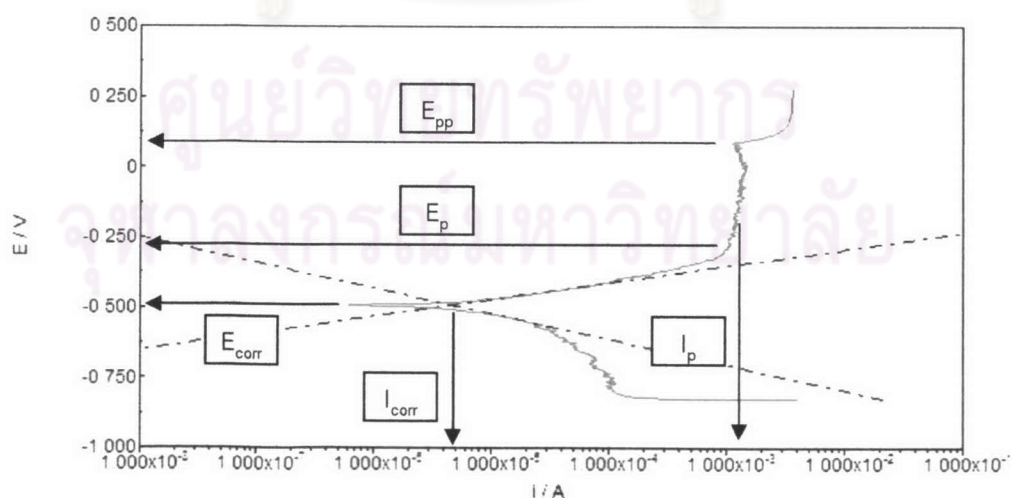
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผสมทั้งธาตุแคลเซียมและธาตุซิลิคอน

จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีผิวที่เกิดความหมองด้วยตาเปล่า พบว่าชิ้นงานทดสอบที่แขวนไว้ในบรรยากาศไอซัลเฟอร์เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง โลหะผสมที่มีแคลเซียมเกิน 0.025 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และซิลิคอนต่ำกว่า 0.080 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะเกิดการหมองขึ้นเล็กน้อย เมื่อทดสอบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ชิ้นงานที่มีแคลเซียมเกิน 0.025 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีความหมองมากกว่าชิ้นงานที่เติมแคลเซียมน้อยๆ แต่ความหมองก็ยังไม่ค่อยกว่าชิ้นงานที่ไม่เติมแคลเซียมเลย ชิ้นงานที่เติมซิลิคอนต่ำกว่า 0.080 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีความหมองมากกว่าชิ้นงานที่เติมซิลิคอนปริมาณสูงกว่า เมื่อเวลาการทดสอบเพิ่มขึ้นเป็น 2, 3 และ 4 ชั่วโมง สังเกตได้ว่าชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้ผสมทั้งแคลเซียมและซิลิคอนจะหมองเร็วและหมองมากกว่าชิ้นงานทดสอบที่ส่วนผสมอื่น ชิ้นงานที่เติมแคลเซียมนั้นจะหมองน้อยลงอย่างเห็นได้ชัดที่ส่วนผสม 0.012 และ 0.025 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนผสมแคลเซียมที่มากกว่า 0.025 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นั้นก็จะมีหมองเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณแคลเซียมที่เติม ชิ้นงานที่เติมซิลิคอนมากที่สุดที่ 0.08 และ 0.165 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักนั้นมีความหมองค่อนข้างต่ำ ส่วนชิ้นงานที่เติมซิลิคอนต่ำกว่า 0.08 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นั้นจะมีความหมองมากขึ้นตามปริมาณซิลิคอนที่ลดลง ส่วนการเติมทั้งแคลเซียมและซิลิคอนลงไป โดยคงปริมาณซิลิคอนคงที่ ให้ผลดีที่แคลเซียมปริมาณน้อยๆ ที่ 0.015 และ 0.038 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

รูปที่ 5.8-5.10 แสดงผลของปริมาณธาตุแคลเซียมและซิลิคอนที่มีต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิง โดยผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงทำปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์ในบรรยากาศเกิดความหมองขึ้น พิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิว (DE^*) ในการทดสอบความหมองเป็นเวลาต่างๆ กัน พบว่าโลหะผสมที่ทิ้งไว้ในบรรยากาศของไอของซัลเฟอร์เป็นเวลาเท่ากัน สรุปได้ว่าโลหะผสมที่มีปริมาณแคลเซียมสูงกว่า 0.025 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีค่า DE^* สูงมากขึ้นตามปริมาณแคลเซียมที่เพิ่มขึ้น โลหะผสมที่มีปริมาณซิลิคอนสูงกว่า 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่า DE^* ที่ได้จะมีค่าลดลง นั่นคือการต้านทานความหมองที่ดีขึ้นตามปริมาณซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่วนโลหะผสมที่เติมทั้งแคลเซียมและซิลิคอน จะมีค่า DE^* ต่ำกว่าที่ปริมาณแคลเซียมน้อย หมายถึงผลการต้านทานความหมองดีกว่าที่ปริมาณแคลเซียมไม่เกิน 0.038 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนการเติมแคลเซียมเกิน 0.038 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นไปทำให้ผลความต้านทานการหมองนั้น แ่ลง

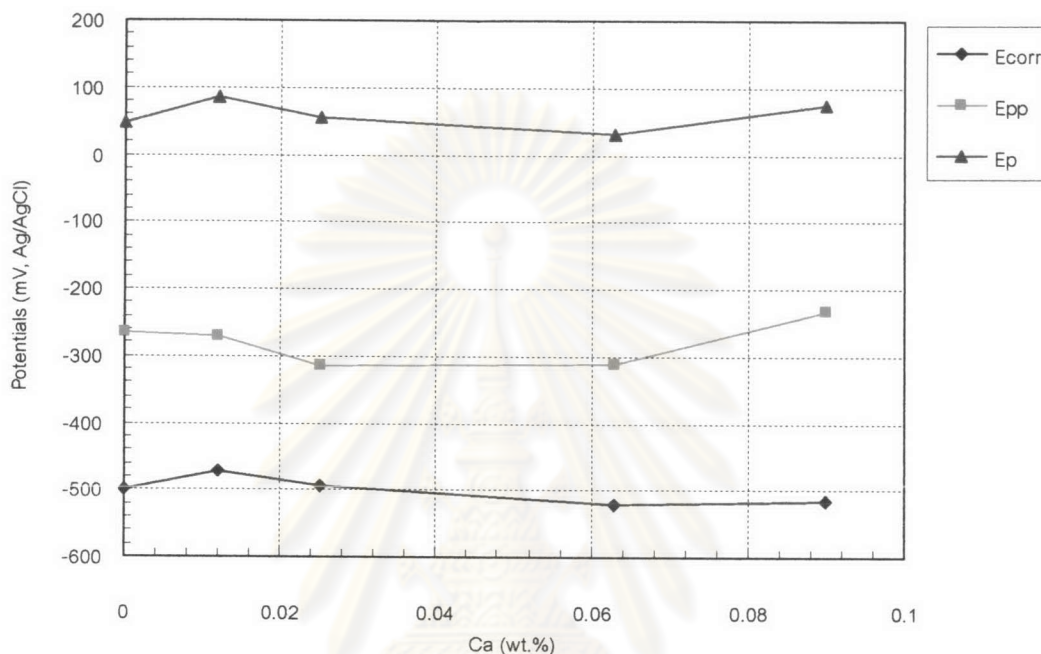
5.7 ผลจากการทดสอบการกัดกร่อนด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า โดยวิธีโพเทนชิโอดนามิก

การทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์ โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า จะได้เส้นโพลาริเซชันของการกัดกร่อนของโลหะทดสอบ โดยทำการทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิมิตต์ด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส หาค่า E_{corr} , E_{pp} , E_p , I_p และ I_{corr} จากเส้นโพลาริเซชัน นำค่า I_{corr} ไปคำนวณค่าอัตราการกัดกร่อนโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับเครื่องโพเทนชิโอสแตท หรือนำค่า I_{corr} ที่หาได้ ไปคำนวณโดยใช้สมการที่ (3-1) ผลการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 4.6



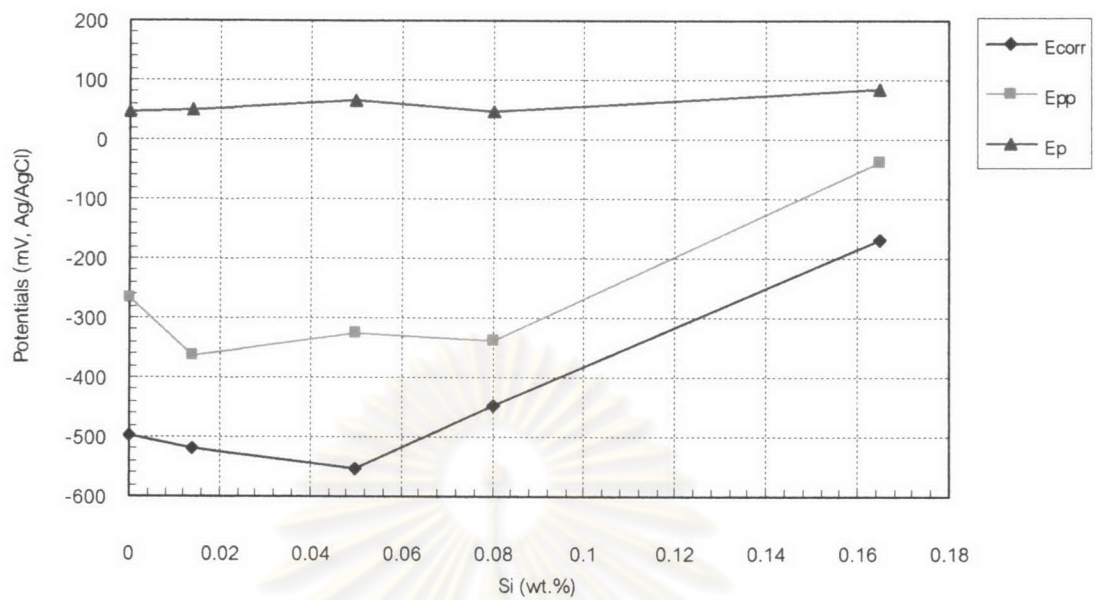
รูปที่ 5.11 แสดงการหาค่า E_{corr} , E_{pp} , E_p , I_p และ I_{corr} จากจุดตัดระหว่างเส้นโค้งคาโทดิก และเส้นโค้งอโนดิก

ค่าต่างๆ ได้จากเส้นโพลาริเซชันแสดงไว้ในตารางที่ 4.6 และนำมาวาดกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าต่างๆ กับปริมาณธาตุแคลเซียมและซิลิคอนในโลหะเงินสเตอร์ลิง แสดงดังรูปที่ 5.12-5.18 ภาพลักษณะชิ้นงานและเส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด แสดงไว้ในภาคผนวก ง

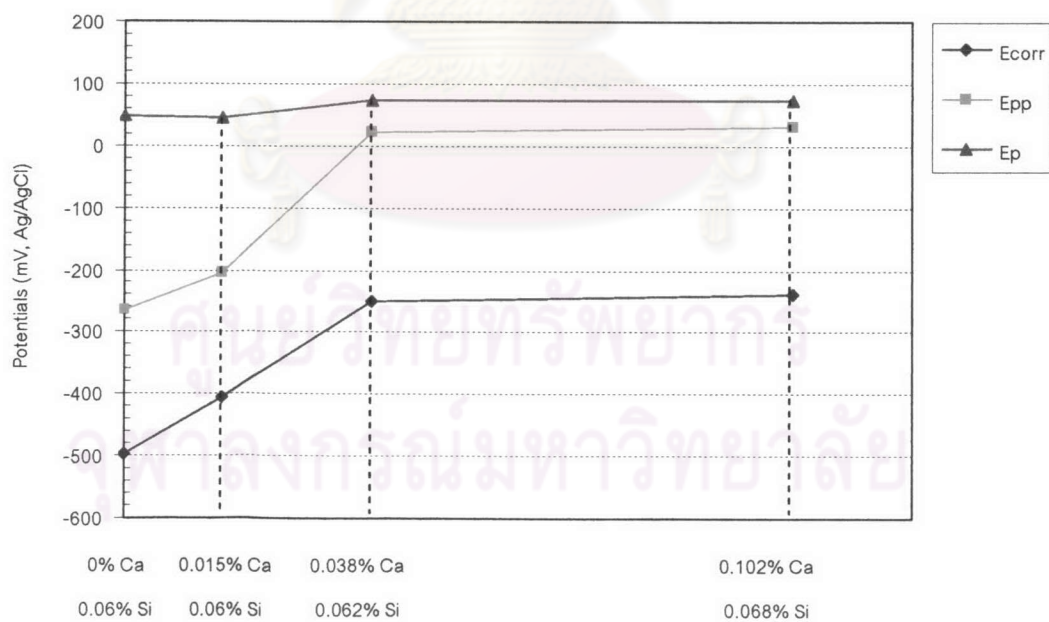


รูปที่ 5.12 ผลของธาตุแคลเซียมในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า E_{corr} , E_{pp} และ E_p ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

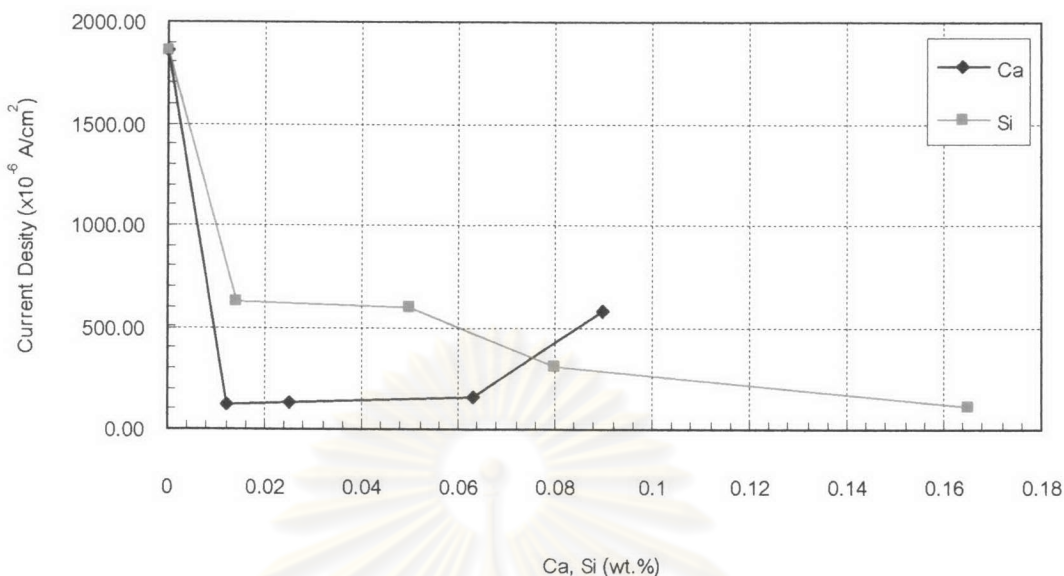
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



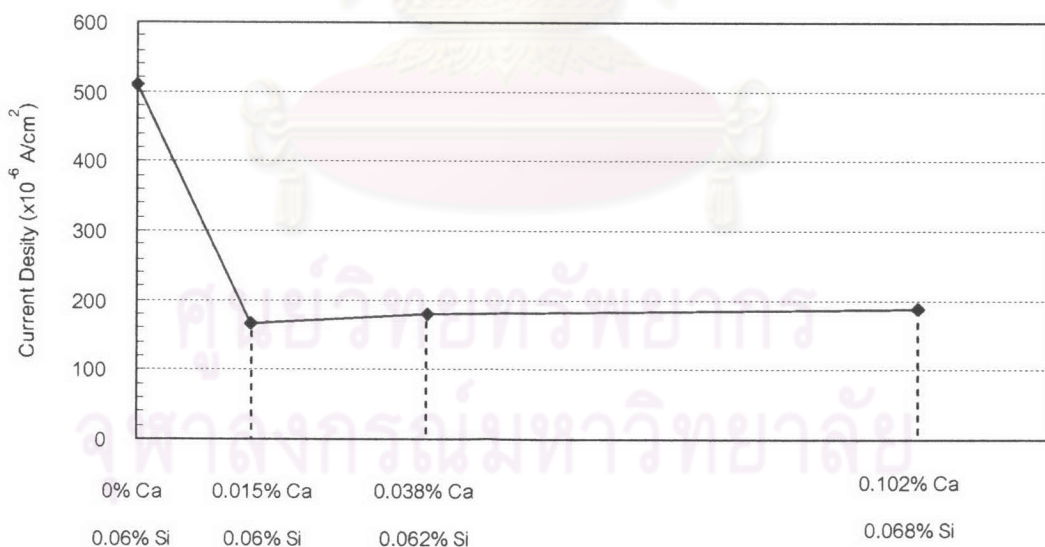
รูปที่ 5.13 ผลของธาตุซิลิคอนในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า E_{corr} , E_{pp} และ E_p ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิมมิตด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



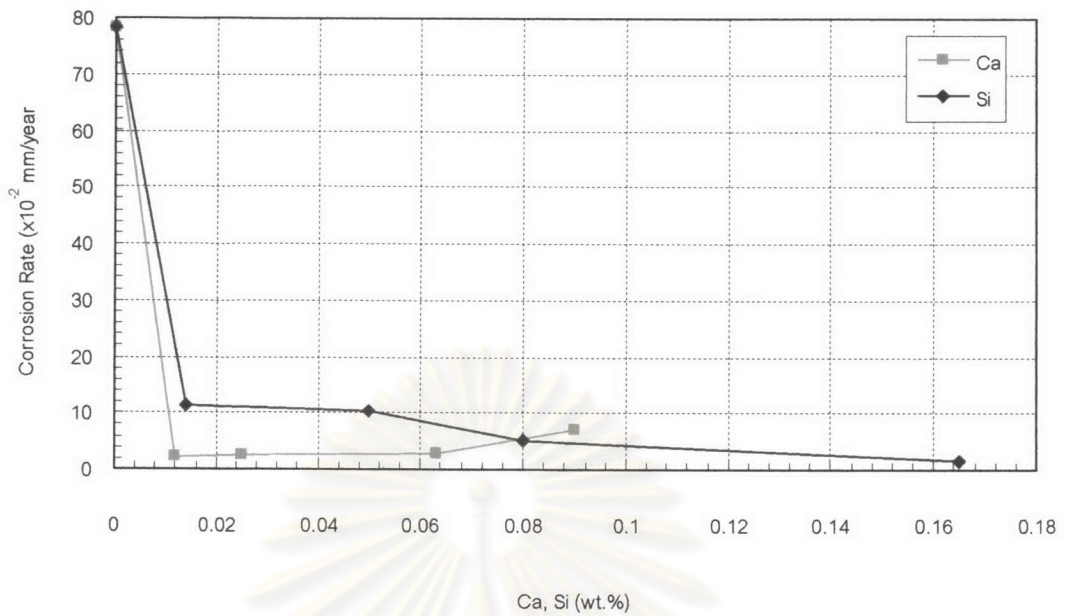
รูปที่ 5.14 ผลของทั้งธาตุแคลเซียมและซิลิคอนในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า E_{corr} , E_p และ E_p ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิมมิตด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



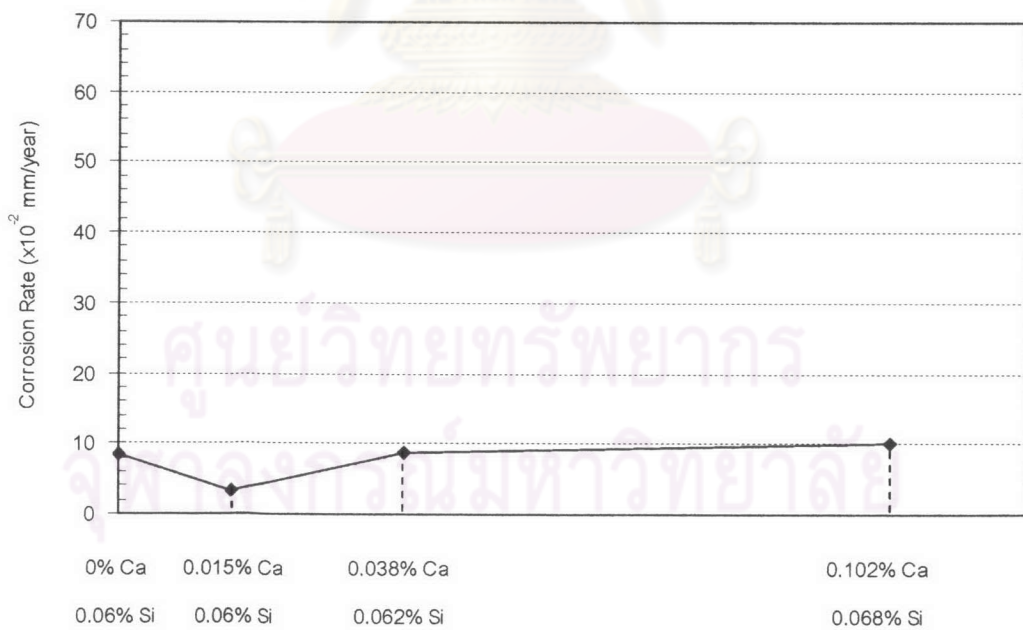
รูปที่ 5.15 ผลของธาตุแคลเซียมและซิลิคอนในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า I_p ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิมมิตด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.16 ผลของการเติมทั้งธาตุแคลเซียมและซิลิคอนในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า I_p ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิมมิตด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.17 ผลของธาตุแคลเซียมและซิลิคอนในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่าอัตราการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิมมิตด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.18 ผลของการเติมทั้งธาตุแคลเซียมและซิลิคอนในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงต่อค่าอัตราการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิมมิตด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 5.17 และ 5.18 ค่าอัตราการกัดกร่อนหรืออัตราการสูญเสียเนื้อโลหะ (mm/year) คำนวณได้จากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน หรือ i_{corr} ที่ได้จากเส้นโพลาริเซชัน ในการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะผสมทั้ง 12 ชุด จะเห็นได้ว่าเมื่อโลหะผสมมีปริมาณซิลิคอนสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ได้จากเส้นโพลาริเซชันมีค่าลดลง อัตราการกัดกร่อนที่คำนวณได้มีค่าลดลงไปด้วย ทำให้โลหะผสมที่มีปริมาณซิลิคอนที่สูงกว่าสามารถต้านทานการกัดกร่อนและต้านความหมองได้ดีกว่า ส่วนแคลเซียมนั้นหากมีปริมาณน้อย 0.012 - 0.025 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ก็สามารถต้านทานการหมองได้ดีกว่าเดิมที่ปริมาณมาก สังเกตได้จากกราฟรูปที่ 5.17 พบว่าเมื่อเติมแคลเซียมเกิน 0.025 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าอัตราการกัดกร่อนจะเพิ่มมากขึ้น ส่วนผลที่มีการเติมทั้งแคลเซียมและซิลิคอนเมื่อเติมปริมาณซิลิคอนค่อนข้างคงที่แล้วแปรผันค่าปริมาณแคลเซียม ก็จะทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำที่ปริมาณแคลเซียมน้อยๆ เช่นเดียวกัน ค่า i_p ที่ได้สังเกตได้ว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าอัตราการกัดกร่อน ส่วนค่า E_{corr} นั้นหากเติมแคลเซียมที่ปริมาณน้อยที่ 0.012 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักก็จะให้ค่า E_{corr} สูงกว่าการไม่เติมแคลเซียม แต่หากเติมแคลเซียมเกิน 0.025 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นไปค่า E_{corr} ที่ได้ก็จะเริ่มลดลง ส่วนการเติมซิลิคอนลงไปทำให้ค่า E_{corr} สูงขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณการเติมซิลิคอน และให้ผลอย่างเด่นชัดเมื่อปริมาณซิลิคอนสูงเกิน 0.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นไป แสดงว่าทำให้โลหะเกิดการกัดกร่อนได้ยากขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย