

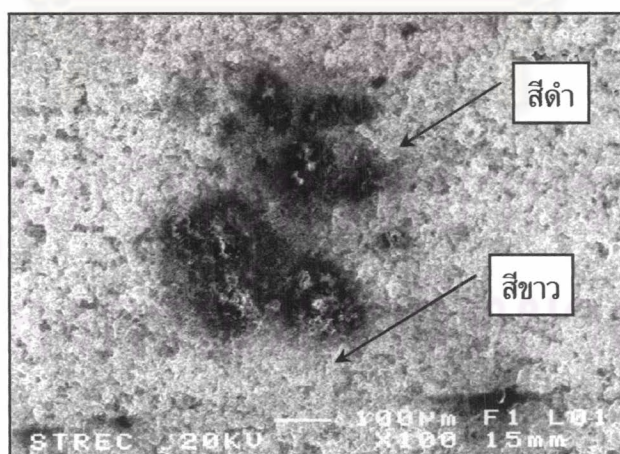
## บทที่ 5

### อภิปรายผลการทดลอง

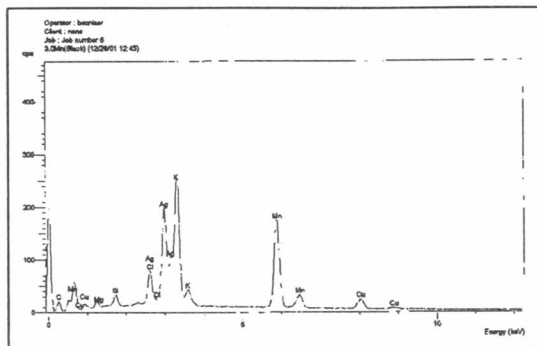
#### 5.1 ผลจากการหลอมและหล่อโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส

ชิ้นงานที่ได้จากการหลอมและหล่อแบบสูญญากาศของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 0, 0.38, 0.76, 1.3, 1.7, 2.1, 2.6 และ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.1 เมื่อสังเกตและตรวจสอบด้วยตาเปล่าในชิ้นงานหล่อ พบว่าผิวหน้าด้านล่างของโคนต้นตรงบริเวณรูเท (sprue) ที่เป็นทางเข้าของโลหะหลอมเหลวมีลักษณะแตกต่างกัน กล่าวคือ บริเวณผิวหน้าด้านล่างของโลหะเงินสเตอร์ลิงจะเรียบขึ้นเมื่อมีปริมาณแมงกานีสสูงขึ้น แสดงว่าธาตุแมงกานีสที่เพิ่มขึ้น มีส่วนช่วยเพิ่มความสามารถในการเปียก (wettability) ให้แก่โลหะผสม

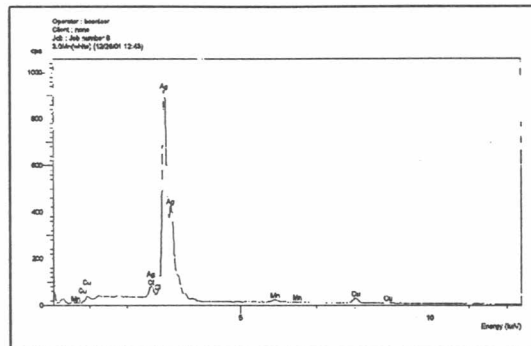
นอกจากนี้จากการสังเกตลักษณะสีผิว พบว่าโลหะผสมแมงกานีสจะมีผิวเป็นสีชมพูเข้มขึ้นเมื่อเติมธาตุแมงกานีสสูงขึ้น และยังพบจุดดำบนผิวชิ้นงานที่มีธาตุแมงกานีสผสมตั้งแต่ 1.70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นไป ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.2 โดยจุดดำจะมีสีเข้มขึ้นเมื่อมีธาตุแมงกานีสสูงขึ้น จากการตรวจสอบปริมาณธาตุบริเวณผิวที่เกิดจุดสีดำด้วย EDX (รูปที่ 5.1) พบว่ามีธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ คาร์บอน ออกซิเจน แมงกานีส เงิน คลอรีน และฟลูออรีน ซึ่งจะมีปริมาณธาตุแมงกานีสค่อนข้างสูง ดังกราฟที่แสดงในรูปที่ 5.2(ก) ซึ่งผิวโลหะผสมน่าจะทำปฏิกิริยากับบรรยากาศขณะหล่อและหลังการหล่อเสร็จสิ้นแล้ว และเมื่อตรวจสอบบริเวณสีขาวจะแสดงพีค (peak) ของโลหะเงินในปริมาณสูง ดังรูปที่ 5.2(ข)



รูปที่ 5.1 ภาพแสดงจุดสีดำบนผิวโลหะผสม 4.40%Cu – 2.60%Mn – balance of Ag ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) กำลังขยาย 100 เท่า



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.2 กราฟแสดงผลจากการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมบนผิวของโลหะผสม 4.40%Cu - 2.60%Mn - balance of Ag (ก) บริเวณสีดำ (ข) บริเวณสีขาว

## 5.2 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส

ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีหลังการหล่อ แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 โดยโลหะผสมทั้ง 8 ชุด มีปริมาณธาตุแมงกานีสก่อนหลอมและหล่อ 0 - 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อตรวจสอบส่วนผสมหลังการหล่อ พบว่าปริมาณธาตุแมงกานีสที่ตรวจสอบได้ในโลหะผสมลดลงจากปริมาณแมงกานีสที่ใช้ในการหล่อ เหลือธาตุแมงกานีสเพียง 0 - 3% โดยน้ำหนัก ปริมาณธาตุแมงกานีสที่สูญเสีย มีค่าตั้งแต่ 0 - 0.5% โดยน้ำหนัก (ดังตารางที่ 4.2) ซึ่งถ้าเติมปริมาณแมงกานีสในโลหะผสมมาก ปริมาณแมงกานีสที่สูญเสียก็มีมากเช่นกัน ยกเว้นในโลหะผสมชุดที่ 3 ที่ใช้ธาตุแมงกานีสในการหล่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่สูญเสียไปในขั้นตอนการหล่อสูงกว่าโลหะชุดที่ 4 ที่มีการเติมธาตุแมงกานีส 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากส่วนผสมทางเคมีทั้ง 8 ชุด ถึงแม้ปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่ตรวจสอบได้จะไม่เท่ากับปริมาณธาตุที่เติมลงไป แต่แนวโน้มของปริมาณธาตุทองแดงที่ลดลงและแมงกานีสที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับปริมาณธาตุที่เติมลงไปก่อนหล่อ คือมีส่วนที่สามารถนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบได้

ปัจจัยที่มีผลต่อการสูญเสียธาตุแมงกานีสในโลหะผสม คือ การที่ธาตุแมงกานีสมีสมบัติเป็นตัวลดออกซิเจน (deoxidizer) สามารถรวมตัวกับออกซิเจนได้ดีกว่าธาตุเงินและทองแดงที่เป็นธาตุหลัก จึงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น ได้สารประกอบแมงกานีสออกไซด์ลอยปกคลุมอยู่ผิวหน้าโลหะขณะกวนโลหะหลอมเหลวในขั้นตอนการหลอม และหลังจากโลหะเย็นตัว จะเหลือเศษโลหะหรือสแลก (slag) แยกตัวออกมาอยู่บริเวณผิวหน้าตรงรูเทของงานหล่อ

### 5.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส ในสภาพหล่อขึ้นรูป โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมหลังจากกัดกรด แสดงในภาคผนวก ก รูปที่ ก1 ก2 และ ก3 เป็นภาพกำลังขยาย 50 100 และ 200 เท่าตามลำดับ และโครงสร้างจุลภาคก่อนการกัดกรด ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) แสดงดังรูปที่ 5.3 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิงทุกอัตราส่วนผสมที่ได้จากการหล่อ มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ (dendrite) พบโครงสร้างหลัก 2 เฟส คือ โครงสร้างเนื้อพื้น (matrix) และโครงสร้างยูเทคติก (eutectic structure) โดยโครงสร้างเนื้อพื้นจะมีเงินเป็นองค์ประกอบสูง เรียก Ag - rich solid solution phase ( $\alpha$  - phase) สำหรับในโครงสร้างยูเทคติกจะมี Ag - rich solid solution และ Cu - rich solid solution ( $\beta$  - phase) โดย secondary structure มีลักษณะเป็นแถบสีดำกระจัดกระจายอยู่ โครงสร้าง secondary structure ที่พบมีปริมาณธาตุต่างๆ มากน้อยขึ้นอยู่กับโลหะผสมที่มีส่วนผสมแตกต่างกันไป ซึ่งตรวจสอบได้จาก EDX ปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างที่ตรวจสอบได้และกราฟแสดงพีคของธาตุต่างๆ ในโครงสร้างนั้น แสดงไว้ในภาคผนวก ข ซึ่งเป็นกราฟวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยไม่มีชิ้นงานมาตรฐานเปรียบเทียบ

5.3.1 โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมแมงกานีสมีส่วนผสมทางเคมี 7.65%Cu - balance of Ag (รูปที่ 5.3(ก) และ (ข)) พบว่าโครงสร้างเนื้อพื้นเป็น Ag - rich solid solution ( $\alpha$  - phase) มีลักษณะเป็นพื้นสีขาว จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วย EDX ที่บริเวณนี้พบปริมาณธาตุต่างๆ ดังนี้ 95.53%Ag - 4.47%Cu โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยายสูงชัน (2000 เท่า) ดังรูปที่ 5.3(ข) จะพบ secondary structure ที่มีลักษณะแถบลายขาวดำ เมื่อตรวจสอบส่วนผสมโดยรวม (บริเวณ A) ด้วย EDX จะมีปริมาณธาตุต่างๆ ดังนี้ 69.53%Ag - 30.47%Cu โดยน้ำหนัก บริเวณที่มีสีดำ (จุด B) มีส่วนผสมดังนี้ 22.09%Ag - 77.91%Cu จะเห็นได้ว่าตรงบริเวณนี้มีปริมาณธาตุทองแดงสูงมาก (Cu - rich phase)

สำหรับโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีสต่างๆ กัน คือ 0.38, 0.76, 1.3, 1.7, 2.1, 2.6 และ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีโครงสร้างเนื้อพื้นเป็น Ag - rich phase เช่นเดียวกับโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมแมงกานีส และเมื่อเติมปริมาณแมงกานีสมากขึ้น ในทางตรงข้ามจะมีปริมาณทองแดงลดน้อยลง จากภาพโครงสร้างจุลภาคจะเห็นโครงสร้างยูเทคติกที่อยู่ระหว่างกิ่งของเดนไดรต์ที่มีปริมาณลดลง เมื่อตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วย EDX ดังตารางในภาคผนวก ข พบว่าตรงบริเวณโครงสร้างยูเทคติก และโครงสร้างเนื้อพื้น จะมีปริมาณแมงกานีสในโครงสร้างสูงชันแปรผันตามปริมาณแมงกานีสที่เติมลงไป สำหรับบริเวณอนุภาคสีดำบนโครงสร้างยูเทคติกจะมีปริมาณทองแดงค่อนข้างสูง ซึ่งสูงกว่าปริมาณเงินที่มีอยู่มาก แสดงว่าธาตุทองแดงจะเป็นองค์ประกอบหลักของอนุภาคสีดำที่อยู่บนโครงสร้างยูเทคติก

5.3.2 โลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณส่วนผสมเคมี 6.97%Cu - 0.38%Mn - balance of Ag มีโครงสร้างดังรูปที่ 5.3(ค) และ (ง) ที่กำลังขยาย 100 เท่า (รูปที่ 5.3(ค)) จะเห็นลักษณะโครงสร้างเดนไดรต์ที่ได้จากงานหล่อขึ้นรูปเช่นเดียวกับโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมแมงกานีส โดยบริเวณโครงสร้างเดนไดรต์ที่เป็นโครงสร้างเนื้อพื้น จะเป็น Ag - rich phase และ

เมื่อตรวจสอบด้วย EDX จะพบปริมาณ สัดส่วนของธาตุดังนี้ Ag : Cu : Mn = 92.46 : 7.23 : 0.31 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และพบโครงสร้างยูเทคติกลักษณะ Irregular shape (รูปที่ 5.3 (ง)) เช่นเดียวกับที่พบในโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมแมงกานีส บริเวณรอบนอกของโครงสร้างยูเทคติกมีลักษณะ Interdendritic shrinkage กระจายอยู่รอบๆ ปริมาณสัดส่วนธาตุที่พบบริเวณโครงสร้างนี้ (บริเวณ C) คือ Ag : Cu : Mn = 70.90 : 28.62 : 0.48 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยบริเวณอนุภาคสีดำบนโครงสร้างยูเทคติก (จุด D) จะมีปริมาณธาตุทองแดงเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนสูง คือ Ag : Cu : Mn = 29.29 : 70.17 : 0.54 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งปริมาณแมงกานีสที่พบในโครงสร้างยูเทคติกนี้จะสูงกว่าแมงกานีสที่พบในโครงสร้างเนื้อพื้นค่อนข้างมาก แสดงว่าธาตุแมงกานีสสามารถรวมตัวกับทองแดงอยู่ใน secondary structure ได้มากกว่าละลายใน Ag - rich phase บนโครงสร้างเนื้อพื้น

5.3.3 โลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณทองแดงและแมงกานีส 6.63 และ 0.76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่เหลือเป็นธาตุเงิน จะพบโครงสร้างลักษณะเดนไดรต์และโครงสร้างยูเทคติกลักษณะ irregular shape ค่อนข้างยาวกระจายอยู่ทั่วโครงสร้างเนื้อพื้น แสดงดังรูปที่ 5.3(ฉ) จากการตรวจสอบส่วนผสมด้วย EDX ปริมาณธาตุต่างๆ บนโครงสร้างเนื้อพื้น เท่ากับ 93.11%Ag - 6.22%Cu - 0.67%Mn และบริเวณโครงสร้างยูเทคติกรวมมีส่วนผสม คือ 71.74%Ag - 27.10%Cu - 1.17%Mn

5.3.4 โลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณทองแดงและแมงกานีส 6.14 และ 1.30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่เหลือเป็นธาตุเงิน โครงสร้างยูเทคติกที่พบเป็นลักษณะ irregular shape (รูปที่ 5.3(ช)) แต่รูปร่างไม่เรียวยาวเหมือนโครงสร้างยูเทคติก บนโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 0.76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณธาตุผสมบริเวณโครงสร้างยูเทคติก (บริเวณ E) คือ 65.19%Ag - 32.92%Cu - 1.88%Mn ปริมาณธาตุของอนุภาคสีดำในโครงสร้างยูเทคติก คือ 20.96%Ag - 76.69%Cu - 2.35%Mn ซึ่งเป็น Cu - rich phase มีธาตุทองแดงอยู่ในสัดส่วนที่สูงมาก

5.3.5 โครงสร้างโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมทางเคมี 5.40%Cu - 1.70%Mn - balance of Ag แสดงดังรูปที่ 5.3(ฅ) และ (ญ) ที่กำลังขยาย 100 เท่า พบโครงสร้างเดนไดรต์ที่สังเกตเห็นได้ว่าโครงสร้างเนื้อพื้นสีขาวมีบริเวณกว้างมากขึ้น (94.16%Ag - 4.22%Cu - 1.62%Mn) และบริเวณโครงสร้างยูเทคติกจะลดลงเนื่องจากการลดลงของปริมาณทองแดงในโลหะผสม ถึงแม้ปริมาณแมงกานีสที่ละลายอยู่ในโลหะผสมจะเพิ่มขึ้นก็ตาม แต่ก็ยังมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับธาตุหลัก ทำให้พบโครงสร้างยูเทคติกกระจัดกระจายอยู่ทั่วไปอย่างไม่หนาแน่นนัก ซึ่งธาตุที่มีผลต่อโครงสร้างยูเทคติกนี้ คือ ธาตุทองแดงเนื่องจากสัดส่วนในการเติมธาตุทองแดงต่อธาตุแมงกานีสค่อนข้างสูง รอบนอกของโครงสร้างยูเทคติก พบ Interdendritic shrinkage จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วย EDX บริเวณโครงสร้างยูเทคติกรวมมีปริมาณธาตุดังนี้ 60.84%Ag - 36.54%Cu - 2.61%Mn

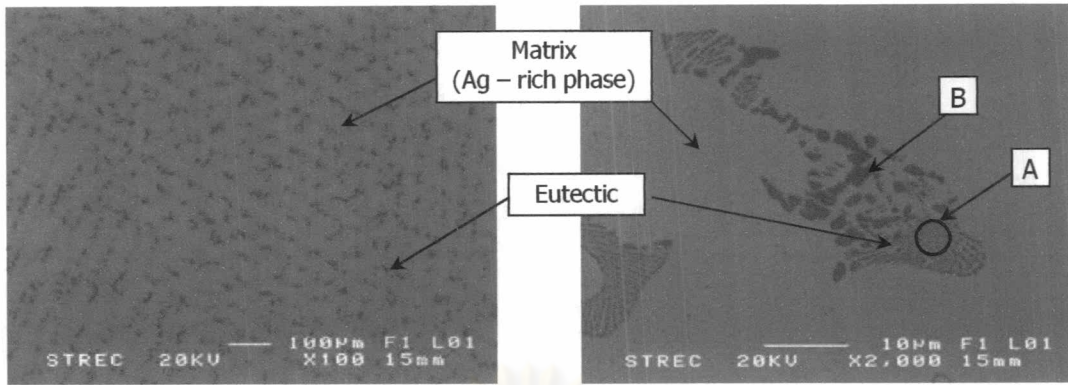
5.3.6 โครงสร้างของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมทางเคมี 4.90%Cu - 2.10%Mn - balance of Ag แสดงดังรูปที่ 5.3(ฎ) และ (ฏ) พบว่าโครงสร้างยูเทคติกในโลหะผสมมีความหนาแน่นลดลง เกิดจากการลดลงของธาตุทองแดงในโลหะผสม และลักษณะโครงสร้างยูเทคติกที่ได้ค่อนข้างกลม โดยจาก EDX พบส่วนผสมทางเคมีที่บริเวณเนื้อพื้นดังนี้ 93.80%Ag - 4.14%Cu - 2.05%Mn ปริมาณธาตุต่างๆ บริเวณโครงสร้างยูเทคติกรวม เท่ากับ 57.41%Ag - 39.20%Cu - 3.39%Mn

5.3.7 โครงสร้างของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมทางเคมี 4.40%Cu - 2.60%Mn - balance of Ag แสดงดังรูปที่ 5.2(ฐ) และ (ฑ) จากการตรวจสอบ EDX พบว่าปริมาณแมงกานีสจะเพิ่มขึ้นทั้งในโครงสร้างเนื้อพื้นและยูเทคติก โดยบริเวณโครงสร้างเนื้อพื้นมีสัดส่วนของธาตุผสม Ag : Cu : Mn = 92.81 : 4.62 : 2.57 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และบริเวณโครงสร้างยูเทคติกมีสัดส่วนของธาตุผสม Ag : Cu : Mn = 66.58 : 29.36 : 4.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยอนุภาค สีดำในโครงสร้างยูเทคติกมีส่วนผสม Ag : Cu : Mn = 15.76 : 78.52 : 5.71 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งปริมาณทองแดงที่พบสูงกว่าที่พบบนโครงสร้างเนื้อพื้น

5.3.8 โลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมทางเคมี 4.00%Cu - 3.00%Mn - balance of Ag จะมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคแสดงดังรูปที่ 5.3(ฒ) และ (ณ) และจากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วย EDX โครงสร้างเนื้อพื้นมีปริมาณธาตุต่างๆ คือ 91.42%Ag - 5.33%Cu - 3.25%Mn และโครงสร้างยูเทคติกมีปริมาณธาตุดังนี้ 53.99%Ag - 40.41%Cu - 5.60%Mn โดยน้ำหนัก

จากลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส ที่มีปริมาณแมงกานีสแตกต่างกัน ลักษณะโครงสร้างที่ได้เห็นได้ชัดเจนว่าบริเวณกิ่งของเดนไดรต์ที่มีเงินเป็นส่วนผสมทางเคมีสูง และบริเวณโครงสร้างยูเทคติกซึ่งอยู่ระหว่างกิ่งของเดนไดรต์จะมีทองแดงเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนที่ค่อนข้างสูง โดยโครงสร้างยูเทคติกนี้จะมีปริมาณลดลงเมื่อมีปริมาณทองแดงในโลหะผสมลดลง ธาตุแมงกานีสที่เติมลงไปโลหะผสมจะเป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้างยูเทคติกในปริมาณมากกว่าที่พบในโครงสร้างเนื้อพื้น และปริมาณแมงกานีสที่พบในโครงสร้างทั้งสองจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณแมงกานีสที่เพิ่มขึ้นในโลหะผสม ซึ่งแมงกานีสจะอยู่ร่วมกับโครงสร้างที่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบมากกว่า

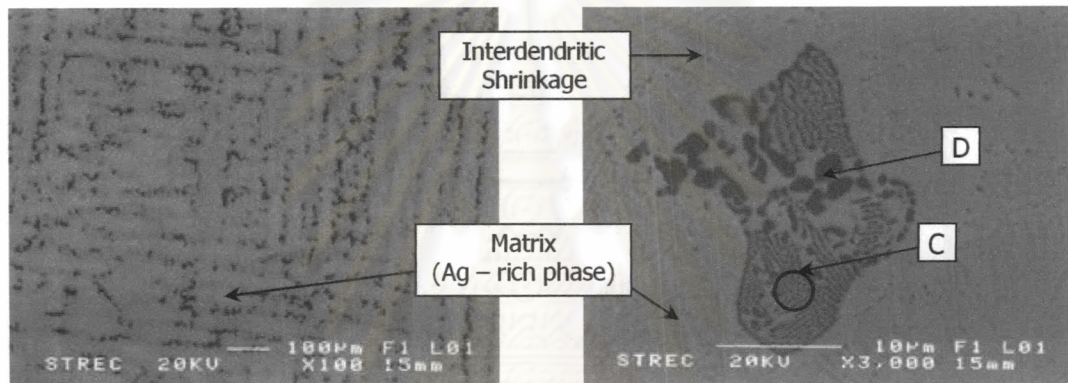
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5.3 (ก)

5.3 (ข)

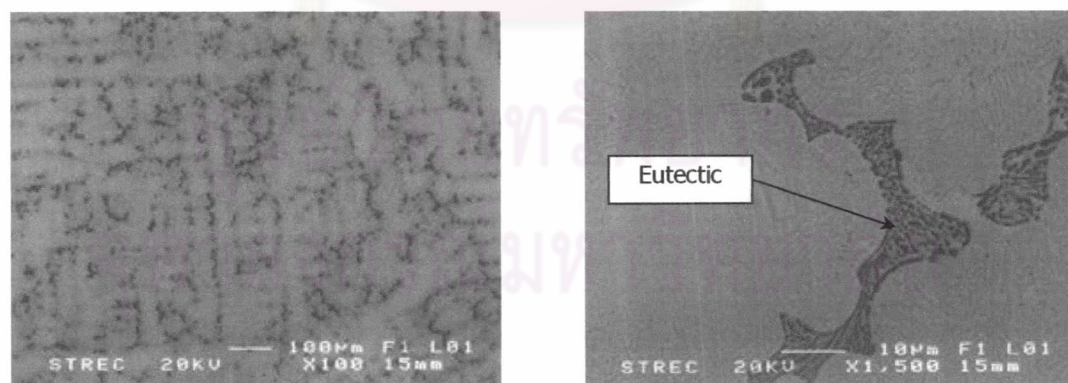
โลหะผสมชุดที่ 1 : 7.65%Cu - balance of Ag



5.3 (ค)

5.3 (ง)

โลหะผสมชุดที่ 2 : 6.97%Cu - 0.38%Mn - balance of Ag

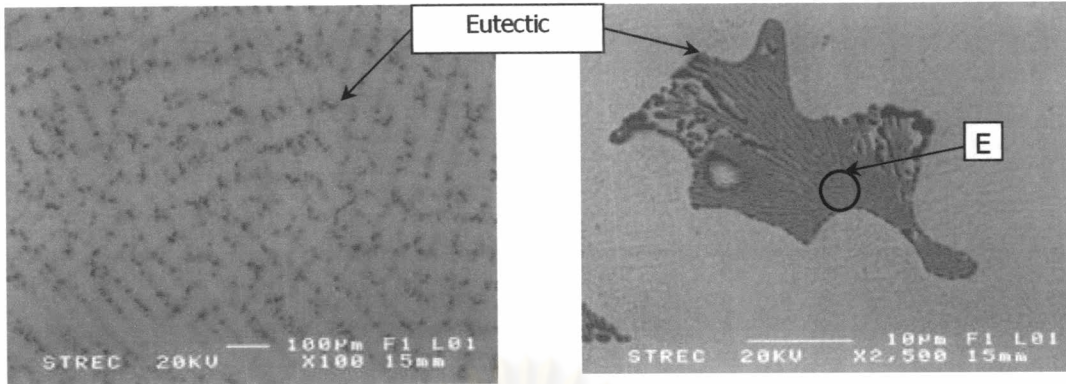


5.3 (จ)

5.3 (ฉ)

โลหะผสมชุดที่ 3 : 6.63%Cu - 0.76%Mn - balance of Ag

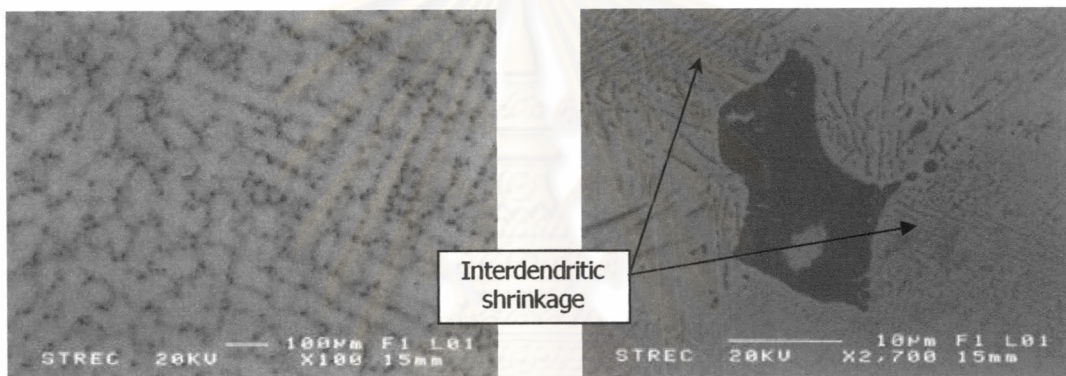
รูปที่ 5.3 ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยายต่าง ๆ



5.3 (ข)

5.3 (ช)

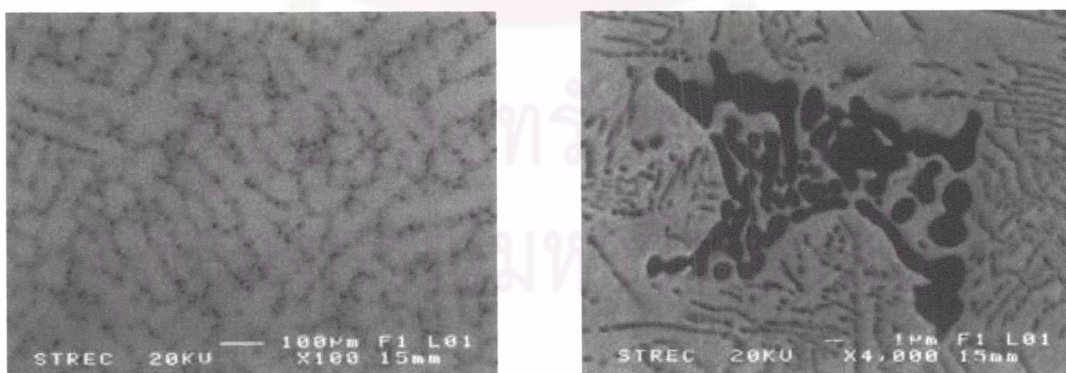
โลหะผสมชุดที่ 4 : 6.14%Cu – 1.30%Mn – balance of Ag



5.3 (ฉ)

5.3 (ญ)

โลหะผสมชุดที่ 5 : 5.40%Cu – 1.70%Mn – balance of Ag

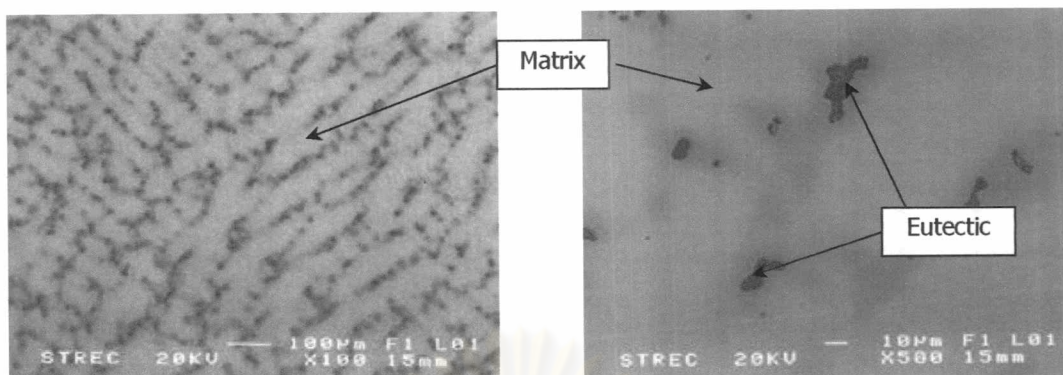


5.3 (ฎ)

5.3 (ฏ)

โลหะผสมชุดที่ 6 : 4.90%Cu – 2.10%Mn – balance of Ag

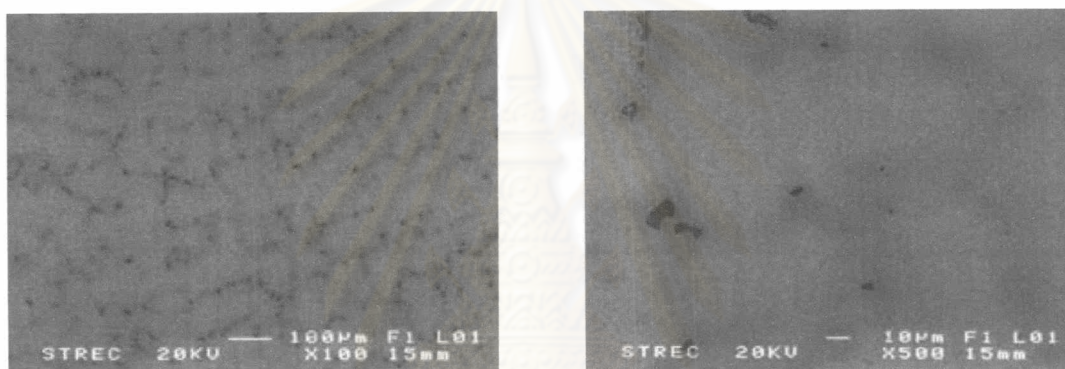
รูปที่ 5.3 (ต่อ) ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส  
ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยายต่าง ๆ



5.3 (จู)

5.3 (ท)

โลหะผสมชุดที่ 7 : 4.40%Cu – 2.60%Mn – balance of Ag



5.3 (ฉ)

5.3 (ฉ)

โลหะผสมชุดที่ 8 : 4.00%Cu – 3.00%Mn – balance of Ag

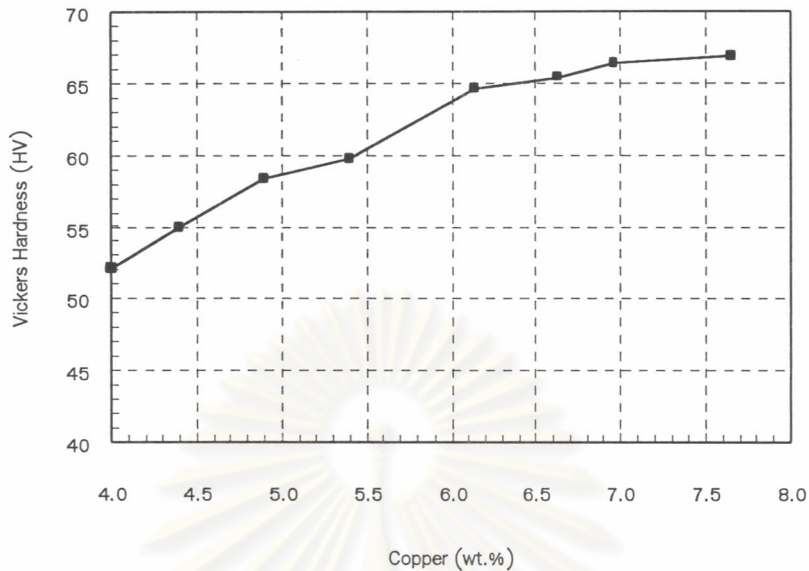
รูปที่ 5.3 (ต่อ) ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส  
ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยายต่างๆ

#### 5.4 ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางกลในสภาพหลังการหล่อขึ้นรูป

##### 5.4.1 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

โลหะเงินสเตอร์ลิงทั้ง 8 ชุด ที่มีปริมาณธาตุแมงกานีส 0, 0.38, 0.76, 1.30, 1.70, 2.10, 2.60 และ 3.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และในขณะเดียวกันจะมีปริมาณทองแดง 7.65, 6.97, 6.63, 6.14, 5.40, 4.90, 4.40 และ 4.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ มีความแข็งแบบวิกเกอร์เฉลี่ย (HV) แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 ซึ่งเมื่อนำมาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทองแดงในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 5.4

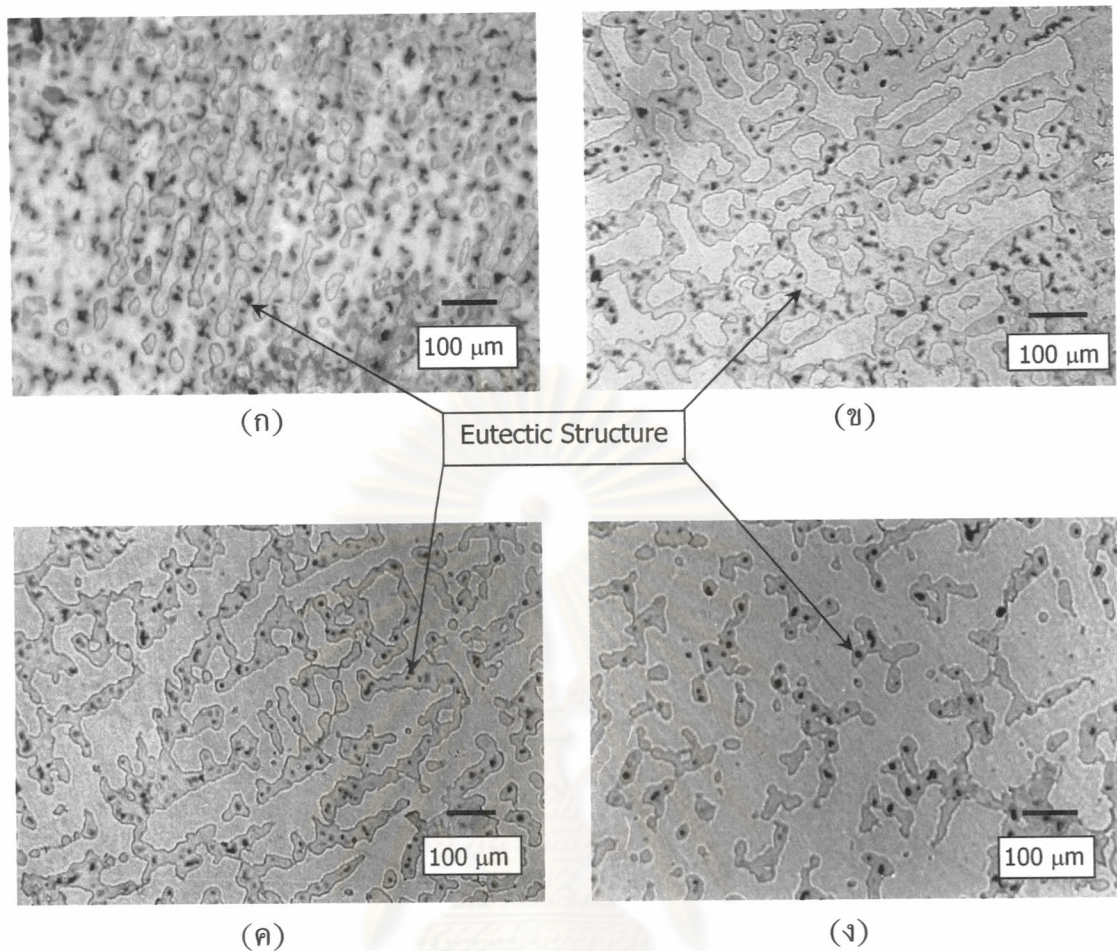




รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทองแดงในโลหะเงินสเตอร์ลิง กับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์

โลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่มีธาตุแมงกานีส คือมีทองแดงในปริมาณ 7.65 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (7.65%Cu – balance of Ag) มีค่าความแข็งแบบวิกเกอร์สูงถึง 66.8 HV ค่าความแข็งนี้จะลดลงเมื่อมีปริมาณทองแดงลดลง โดยความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสม 4.00%Cu – 3.00%Mn – balance of Ag ลดลงเหลือเพียง 52.1 HV (ลดลง 22 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่มีแมงกานีส) จากรูปที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณทองแดงสูงจะมีความแข็งสูง ซึ่งสามารถอธิบายได้จากโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม

รูปที่ 5.5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิงหลังการกัดกรด เห็นได้ชัดว่าโลหะผสมที่มีปริมาณทองแดงลดลง (ปริมาณแมงกานีสสูงขึ้น) จะพบปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกคติน้อยลงด้วย โครงสร้างเนื้อพื้นซึ่งเป็น Ag – rich phase และเป็นเฟสที่อ่อนจะมีปริมาณมากขึ้น หากโลหะผสมมีปริมาณทองแดงละลายอยู่สูง ความแข็งที่ได้จะเพิ่มขึ้นด้วยกลไกการเพิ่มความแข็งโดยการละลายของธาตุในสารละลายของแข็ง (solid solution hardening) โครงสร้างยูเทคติกคตินี้เป็น Cu – rich phase จะเป็นโครงสร้างที่ช่วยในการเพิ่มความแข็ง ถ้าโครงสร้างยูเทคติกคตินี้มีความแข็งก็จะสูง จากภาพโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมที่ส่วนผสมแตกต่างกัน 4 ชุด (รูปที่ 5.5) พบว่าโลหะผสมที่มีปริมาณทองแดงลดลง จะเห็นโครงสร้างยูเทคติกคติที่อยู่ระหว่างกิ่งของเดนไดรต์ที่มีปริมาณลดลง และโครงสร้างเดนไดรต์ที่ได้จะมีบริเวณกว้างขึ้น ทำให้ช่องว่างระหว่างเดนไดรต์มีขนาดเล็กลง เป็นสาเหตุให้โลหะผสมมีความแข็งต่ำ โดยธาตุทองแดงมีอิทธิพลต่อความแข็งของโลหะผสมมากกว่าธาตุแมงกานีสหากเติมในปริมาณที่เท่ากันดังการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นในบทที่ 2 (รูปที่ 2.13)

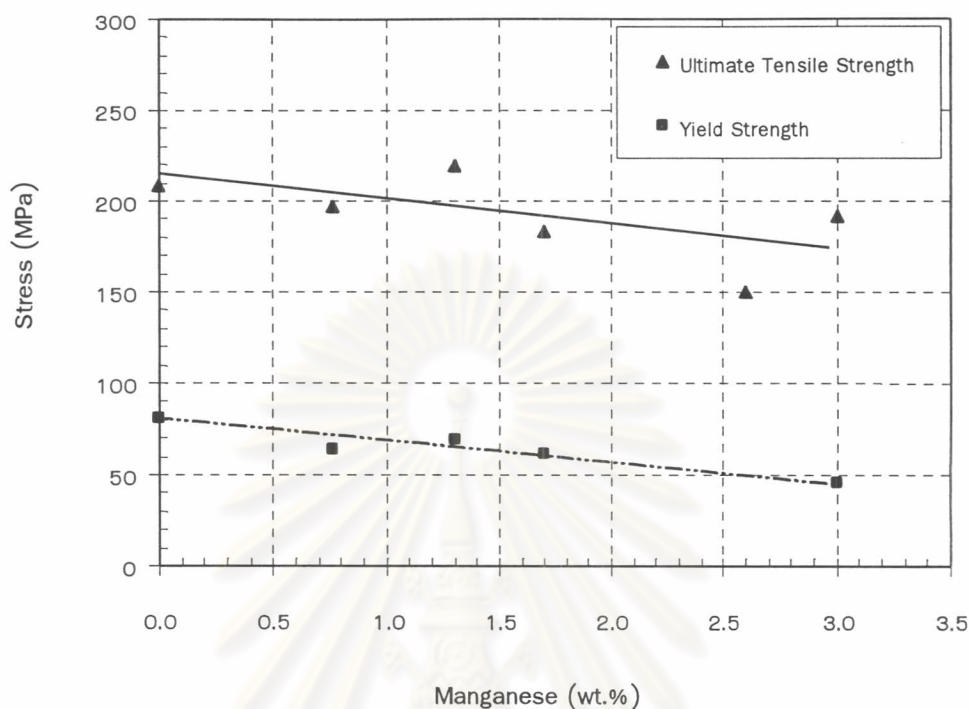


**รูปที่ 5.5** ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส ในสภาพหล่อขึ้นรูป ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 100 เท่า หลังการกัดกรด

- (ก) 7.65%Cu – balance of Ag
- (ข) 6.14%Cu – 1.30%Mn – balance of Ag
- (ค) 4.90%Cu – 2.10%Mn – balance of Ag
- (ง) 4.00%Cu – 3.00%Mn – balance of Ag

#### 5.4.2 ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

ค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดึง ได้แก่ ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength; UTS) และความเค้นจุดคราก (yield strength;  $\sigma_y$ ) โดยค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) ไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากชิ้นงานทดสอบที่นำไปทดสอบแรงดึงเป็นชิ้นงานจากการหล่อขึ้นรูป (as-cast) ทำให้เกิดปัญหาจากรูพรุนและความไม่สม่ำเสมอของเนื้อโลหะ ซึ่งเกิดปัญหาทั้งขณะเตรียมชิ้นงานก่อนการทดสอบและขณะทำการทดสอบ ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ได้มีความเบี่ยงเบนสูง จึงไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงผลของธาตุแมงกานีสในโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความเค้นจุดคราก

ความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความเค้นจุดครากของโลหะผสม แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 เมื่อนำมาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างความเค้นและปริมาณธาตุแมงกานีสในโลหะเงินสเตอร์ลิง ได้กราฟดังรูปที่ 5.6 ค่าความต้านทานแรงดึงซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่โลหะจะทนได้ก่อนที่จะขาดออกจากกันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมธาตุแมงกานีส มีค่า 208.7 MPa และจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณแมงกานีสตั้งแต่ 0.76 - 2.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของโลหะผสมที่มีปริมาณแมงกานีส 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงที่สุด คือ 219.1 MPa และโลหะผสมที่มีปริมาณแมงกานีส 2.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำที่สุด คือ มีค่าเพียง 149.7 MPa สำหรับความต้านทานแรงดึงของโลหะผสมที่ได้จากงานหล่อมีความแม่นยำไม่สูงนัก เนื่องจากมีปัจจัยสำคัญเกี่ยวกับรูพรุนจากการหดตัว (shrinkage porosity) และความไม่สม่ำเสมอของชิ้นงานหล่อ ดังนั้นจึงนำค่าความเค้นจุดครากมาวิเคราะห์สมบัติทางกลของโลหะเงินสเตอร์ลิงแทน

ความเค้นจุดคราก (yield strength;  $\sigma_y$ ) เป็นค่าแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป (elastic - plastic behavior) ซึ่งเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดความเสียหาย ในการตรวจสอบค่าความเค้นจุดครากของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมแมงกานีส พบว่ามีความเค้นจุดครากค่อนข้างสูง คือ 80.88 MPa และเมื่อโลหะผสมมีปริมาณแมงกานีสเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.38 - 3.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความเค้นจุดครากมี

แนวโน้มลดลง แต่จะพบว่าความเค้นจุดครากในโลหะผสมที่มีปริมาณแมงกานีส 0.76 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ( $\sigma_y = 63.6$  MPa) จะมีค่าต่ำกว่าโลหะผสมที่มีปริมาณแมงกานีส 1.3 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ( $\sigma_y = 69.5$  MPa) เนื่องจากการมีรูพรุนและความไม่สม่ำเสมอของเนื้อโลหะที่ได้จากงานหล่อ

สาเหตุของการลดลงของค่าความเค้นจุดครากนี้ สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับการลดลงของความแข็งเมื่อมีปริมาณแมงกานีสในโลหะผสมเพิ่มขึ้น (ปริมาณทองแดงลดลง) โดยจากรูปที่ 5.5 เห็นได้ชัดว่าโครงสร้างยูเทคติกซึ่งเป็นโครงสร้างที่ช่วยเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงให้กับโลหะผสมมีปริมาณลดลง ทำให้ความต้านทานแรงดึงและความเค้นจุดครากของโลหะผสมลดลงด้วย

### 5.5 ผลการตรวจสอบสีผิวหลังอบให้ความร้อน (Heat Treatment)

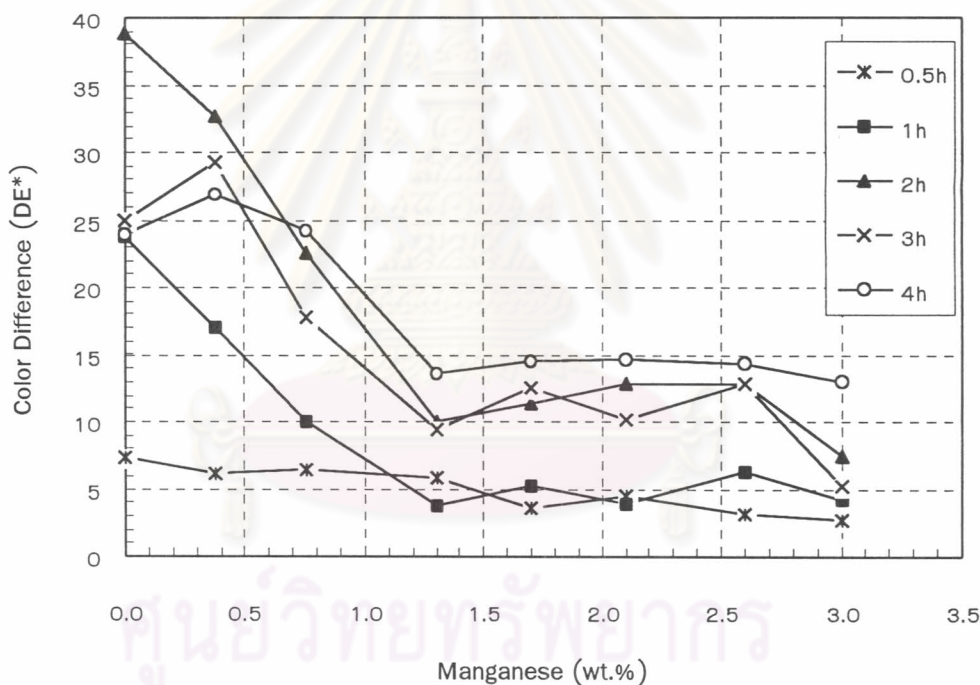
จากรูปที่ 4.3 แสดงลักษณะสีผิวที่ได้จากการอบชุบให้ความร้อนแก่โลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 0, 0.76, 1.7 และ 2.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก รูปแสดงลักษณะชิ้นงานทั้งหมดที่ได้จากการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ กัน แสดงไว้ในภาคผนวก จ เมื่อให้ความร้อนแก่โลหะทดสอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง จะเห็นว่าสีผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงไม่เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น คือ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่มีแมงกานีสผสมจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอมส้ม และโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีแมงกานีสผสม 0.76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีสีเขียว โดยผิวของโลหะผสมทั้ง 2 ชุด มีความเงางามอยู่ และจะมีสีเขียวเข้มขึ้นหากมีธาตุแมงกานีส 1.70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่ความเงางามจะหายไป สำหรับโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีธาตุแมงกานีส 2.60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สีผิวจะเข้มขึ้นจนเห็นเป็นสีแดงอมดำและไม่มีความเงา ในขณะเดียวกันถ้าให้ความร้อนที่อุณหภูมิเท่าเดิม แต่ทิ้งไว้นานขึ้น คือ 4 ชั่วโมง พบว่าสีผิวที่ได้มีแนวโน้มของสีไปในทิศทางเดียวกันกับให้ความร้อนชิ้นงานเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพียงแต่สีผิวที่ได้จะเข้มมากขึ้น และเมื่ออบให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น คือ 300 °C จะได้ผิวโทนสีแดงอมม่วง โดยถ้าหากเป็นโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีสสูง ผิวก็จะมีสีแดงเข้มขึ้นตามปริมาณแมงกานีสที่เติมลงไป แต่ถ้าทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 300 °C นานถึง 4 ชั่วโมง สีผิวที่ได้จะเป็นสีม่วงเข้มจนถึงเทาดำ

ลักษณะสีผิวที่ได้เกิดจากการที่ธาตุแมงกานีสทำปฏิกิริยาออกซิเดชันในบรรยากาศ เกิดเป็นฟิล์มของสารประกอบแมงกานีสปกคลุมบนผิวหน้าโลหะเงินสเตอร์ลิง โดยพบว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 °C และเติมปริมาณแมงกานีสไม่เกิน 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะได้สีผิวที่สวยงาม จากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลทางทฤษฎีในเรื่องคุณสมบัติของฟิล์มพบว่าสารประกอบแมงกานีสออกไซด์ (manganese oxide; MnO) และแมงกานีสซัลไฟด์ (manganese sulfide; MnS) มีสีเขียว แมงกานีสไดออกไซด์ (manganese dioxide, MnO<sub>2</sub>) มีสีดำ แมงกานีสซัลเฟต (manganese sulfate; MnSO<sub>4</sub>) มีสีแดง คอปเปอร์ซัลไฟด์ (cupric sulfide; CuS) มีสีดำ และสารประกอบซิลเวอร์เปอร์แมงกาเนต (silver permanganate; AgMnO<sub>4</sub>) มีสีม่วง โดยฟิล์มของสารประกอบที่เกิดขึ้นที่ผิวโลหะผสม จะมีผลต่อสีผิวของโลหะ

ผสมเมื่ออบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ และเวลาต่างกัน ดังนั้นควรที่จะมีการศึกษาคุณสมบัติ ลักษณะ และองค์ประกอบของฟิล์มที่เกิดขึ้นต่อไป

## 5.6 ผลการทดสอบความต้านทานการหมอง (Tarnish Resistance)

ผลการทดสอบความต้านทานการหมองของชิ้นงานโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส ในบรรยากาศไอซัลเฟอร์ ที่ได้จากการละลายสารประกอบโซเดียมซัลไฟด์นาโนไฮเดรต ในน้ำในภาชนะปิด แขนงชิ้นงานทดสอบเป็นเวลาต่างๆ กัน คือ 0.5, 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ภาพลักษณะชิ้นงานหลังทดสอบความต้านทานการหมอง แสดงดังรูปที่ 4.4 ค่าความสว่าง  $L^*$ , ค่าสี  $a^*$ ,  $b^*$  และค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิว (Color difference;  $DE^*$ ) ที่ได้จากการตรวจสอบสีที่เปลี่ยนไปด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 นำค่า  $DE^*$  ที่คำนวณได้มาวาดกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแมงกานีสกับค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิว ได้ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิง

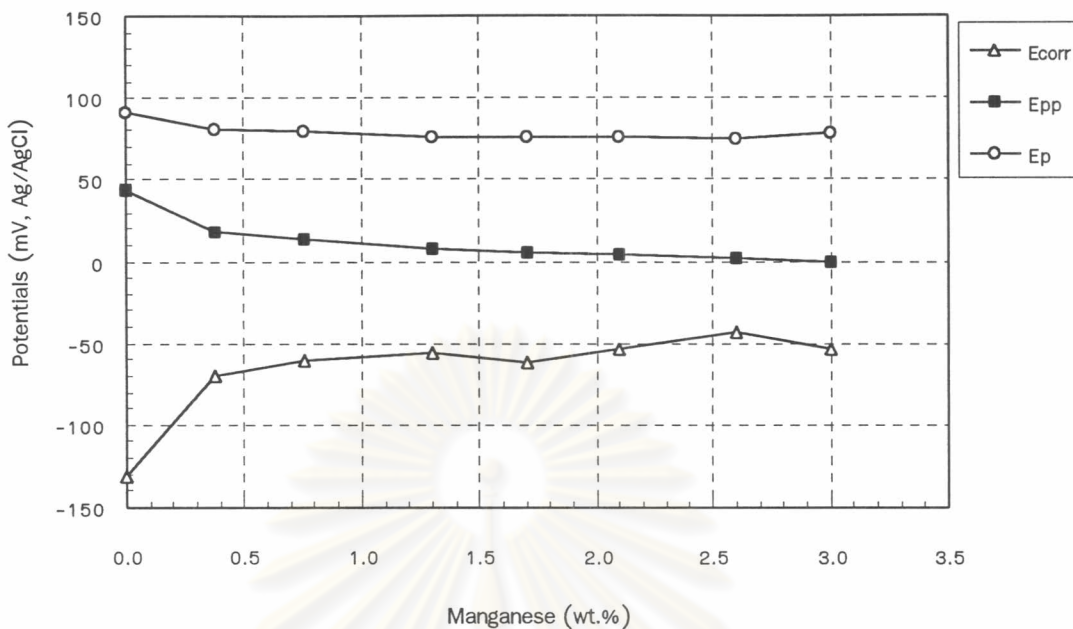
จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีผิวที่เกิดความหมองด้วยตาเปล่า พบว่าชิ้นงานทดสอบที่ แขนงไว้ในบรรยากาศไอซัลเฟอร์เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง โลหะผสมที่มีแมงกานีสต่ำกว่า 1.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะเกิดการหมองเล็กน้อย ส่วนโลหะผสมที่เหลือ สีผิวชิ้นงานทดสอบที่ สังเกตได้คือไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อทดสอบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ชิ้นงานที่มีปริมาณแมงกานีสต่ำกว่า 1.3 เปอร์เซ็นต์ เกิดการหมองเล็กน้อย ส่วนชิ้นงานที่มีแมงกานีสสูงกว่า 1.3 เปอร์เซ็นต์ จะ สังเกตไม่เห็นความหมอง ชิ้นงานที่มีปริมาณแมงกานีส 3.0 เปอร์เซ็นต์จะเกิดการหมองเพียงบาง จุดเท่านั้น เวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้นเป็น 2, 3 และ 4 ชั่วโมง สังเกตได้ว่าชิ้นงานที่มีปริมาณ

แมงกานีสต่ำกว่า 1.3 เปอร์เซ็นต์ มีความหมองมาก ชิ้นงานที่มีปริมาณแมงกานีสสูงกว่าจะหมองน้อยกว่า และชิ้นงานที่มีแมงกานีสมากกว่า 1.3 เปอร์เซ็นต์ เกิดการหมองในปริมาณที่น้อยมากจนเกือบสังเกตไม่เห็นด้วยตาเปล่า

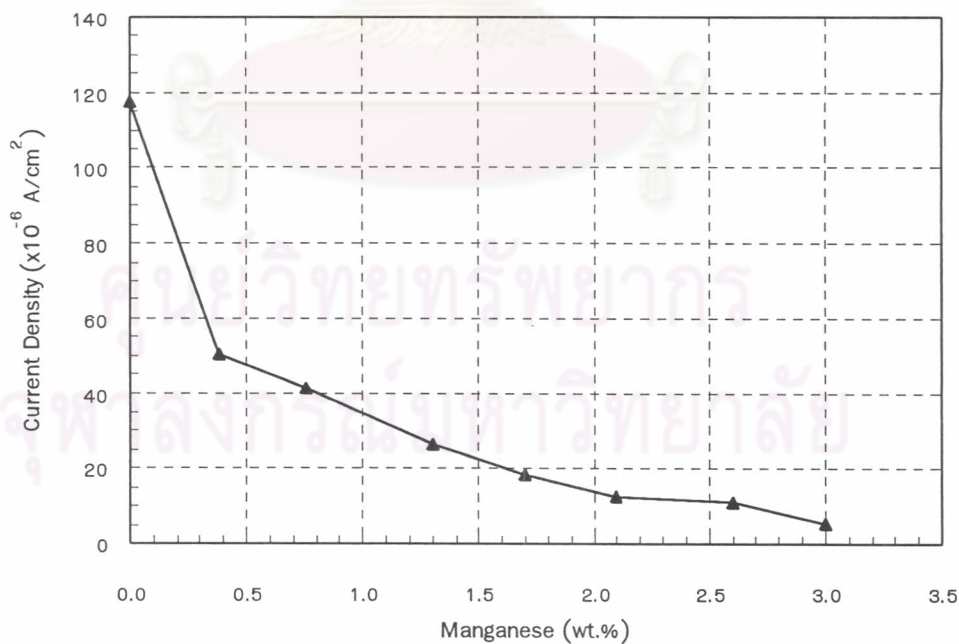
รูปที่ 5.7 แสดงผลของปริมาณธาตุแมงกานีสที่มีต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 0, 0.38, 0.76, 1.3, 1.7, 2.1, 2.6 และ 3.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก โดยผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงทำปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์ในบรรยากาศเกิดความหมองขึ้น พิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิว ( $DE^*$ ) ในการทดสอบความหมองเป็นเวลาต่าง ๆ กัน พบว่าโลหะผสมที่ทิ้งไว้ในบรรยากาศของไอซัลเฟอร์เป็นเวลาเท่ากัน โลหะผสมที่มีปริมาณแมงกานีสต่ำกว่า 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะให้ค่า  $DE^*$  ค่อนข้างสูง โดยค่า  $DE^*$  ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อชิ้นงานมีปริมาณแมงกานีสเพิ่มขึ้น ส่วนชิ้นงานที่มีแมงกานีสตั้งแต่ 1.3 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ค่า  $DE^*$  ค่อนข้างคงที่ คือเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สรุปได้ว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงจะมีความสามารถในการต้านทานการหมองเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณแมงกานีสในโลหะผสมนั้นเพิ่มขึ้น

#### 5.7 ผลจากการทดสอบการกัดกร่อนของฟิล์มด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า โดยวิธีโพเทนชิโอดินามิกส์

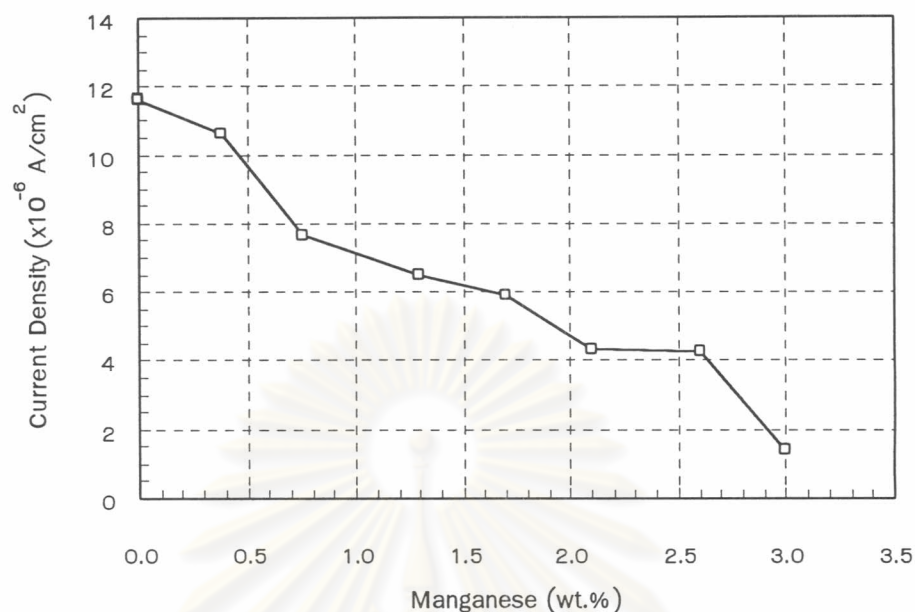
การทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกส์ โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า จะได้เส้นโพลาริเซชันของการกัดกร่อนของโลหะทดสอบ โดยทำการทดสอบ 2 ชุด ชุดแรกทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส หาค่า  $E_{corr}$ ,  $E_{pp}$ ,  $E_p$ ,  $I_p$  และ  $I_{corr}$  จากเส้นโพลาริเซชัน ค่าต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 และกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าต่างๆ กับปริมาณธาตุแมงกานีสในโลหะเงินสเตอร์ลิง แสดงดังรูปที่ 5.8, 5.9 และ 5.10 ชิ้นงานชุดที่ 2 ทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส หาค่า  $E_{corr}$ ,  $E_{pp}$ ,  $E_p$  และ  $I_{corr}$  แต่ไม่สามารถหาค่า  $I_p$  ได้ เนื่องจากโลหะทดสอบไม่เกิดฟิล์มชั้นที่ผิว ค่าต่างๆ ที่ทำได้จากเส้นโพลาริเซชันแสดงไว้ในตารางที่ 4.7 นำค่าที่ได้มาวาดกราฟเปรียบเทียบผลของธาตุแมงกานีสต่อค่าเหล่านี้ ได้ดังรูปที่ 5.12 และ 5.13 ภาพลักษณะชิ้นงานและเส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด รวมถึงวิธีการหาค่าต่างๆ แสดงไว้ในภาคผนวก จ



รูปที่ 5.8 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า  $E_{corr}$ ,  $E_{pp}$  และ  $E_p$  ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.9 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า  $I_p$  ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

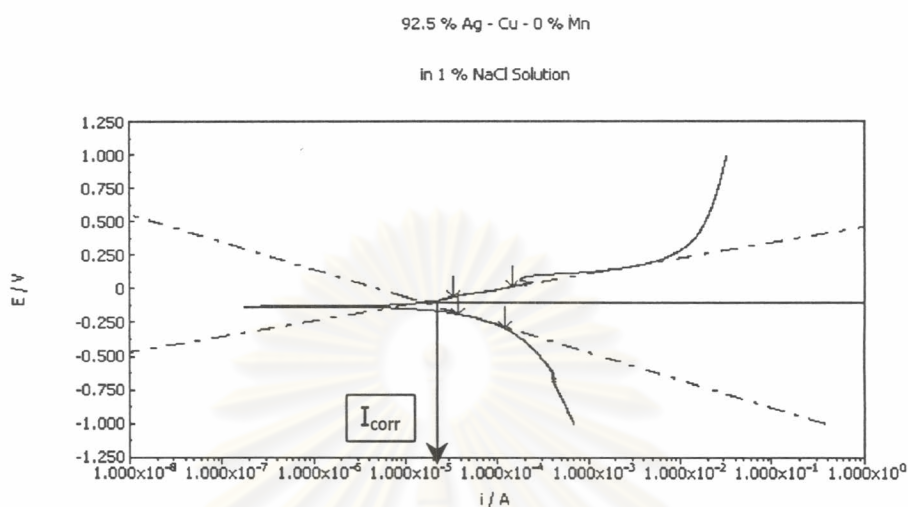


รูปที่ 5.10 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า  $I_{\text{corr}}$  ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 5.8, 5.9 และ 5.10 ทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อโลหะเงินสเตอร์ลิงมีปริมาณแมงกานีสมากขึ้น มีผลในการเพิ่มค่า  $E_{\text{corr}}$  ลดค่า  $E_{\text{pp}}$  และค่า  $I_p$  อย่างเห็นได้ชัด แต่มีผลในการลดค่า  $E_p$  ไม่ชัดเจนนักแต่มีแนวโน้มที่ลดลง แสดงว่าปริมาณแมงกานีสที่เติมลงในโลหะเงินสเตอร์ลิง มีผลในการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของฟิล์มที่เกิดขึ้น โลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่า  $E_{\text{corr}} = -54$  mV ซึ่งสูงกว่าในโลหะผสมที่ไม่มีปริมาณแมงกานีส ( $E_{\text{corr}} = -132$  mV) โดยโลหะผสมที่มีค่า  $E_{\text{corr}}$  ต่ำ จะถูกกัดกร่อนได้ง่ายกว่า ค่า  $E_p$  ที่ได้ลดลงน้อยมาก แสดงว่าปริมาณแมงกานีสที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อการต้านทานการแตกตัวของฟิล์มป้องกันมากนัก คือ หากโลหะผสมอยู่ในสภาวะที่มีสนามไฟฟ้าที่เหมาะสม ฟิล์มก็จะสามารถแตกตัวได้ และเนื่องจากค่า  $E_{\text{pp}}$  คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนสภาวะที่ไม่มีฟิล์มไปเป็นสภาวะขณะเกิดฟิล์มที่ผิว (active-passive transition) การลดลงของค่า  $E_{\text{pp}}$  (อัตราการลดลงค่อนข้างต่ำ) เมื่อโลหะผสมมีปริมาณแมงกานีสสูงขึ้น แสดงว่าโลหะผสมนั้นสามารถเกิดฟิล์มพาสซีฟ (passive film) ได้ง่ายขึ้น และการลดของค่า  $I_p$  ที่ชัดเจนอาจชี้ให้เห็นว่าฟิล์มที่ผิวของโลหะผสม มีความสามารถที่จะต้านทานการไหลผ่านของไอออนได้มากขึ้น ป้องกันการแพร่ของออกซิเจนหรือซัลเฟอร์ในอากาศเข้าไปทำปฏิกิริยากับธาตุหลักของโลหะผสม ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดความหมอง ค่า  $I_p$  ในโลหะผสมที่ไม่ได้เติมแมงกานีสมีค่า  $117.58 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  และค่า  $I_p$  จะลดลงเหลือเพียง  $5.4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  ในโลหะผสมที่มีแมงกานีส 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับค่า  $I_{\text{corr}}$  ที่ได้จากจุดตัดของเส้นโค้งคาโทดิกและอโนดิกสามารถหาได้ดังรูปที่ 5.11 โดยเลือกจุดเพื่อหาความชันของเส้นโค้งทั้งสอง ค่ากระแสที่จุดตัดคือ

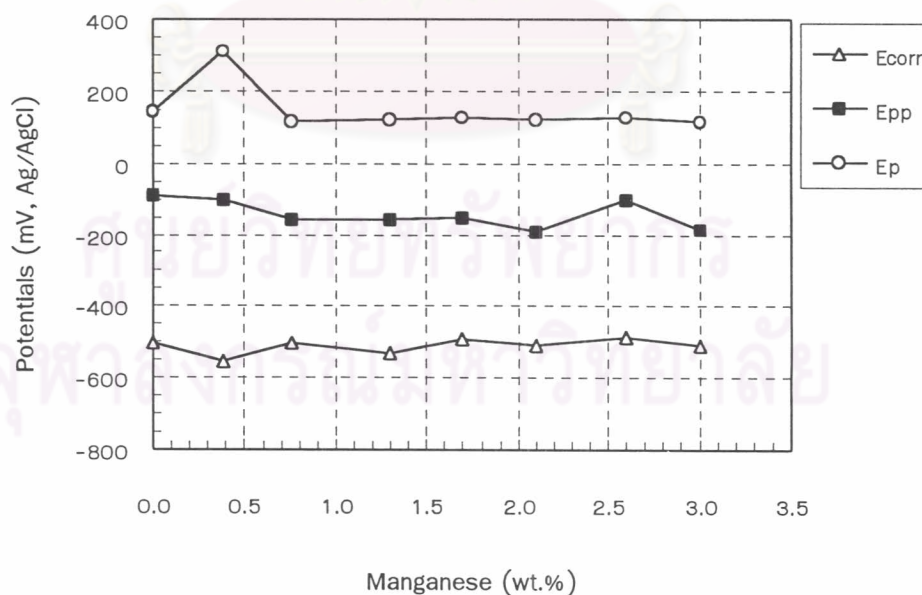


ค่า  $I_{corr}$  คำนวณค่าอัตราการกัดกร่อนโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับเครื่องโพเทนชิโอสแตท หรือนำค่า  $I_{corr}$  ที่หาได้ ไปคำนวณโดยใช้สูตรจากสมการที่ (3.2) ผลการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 4.6

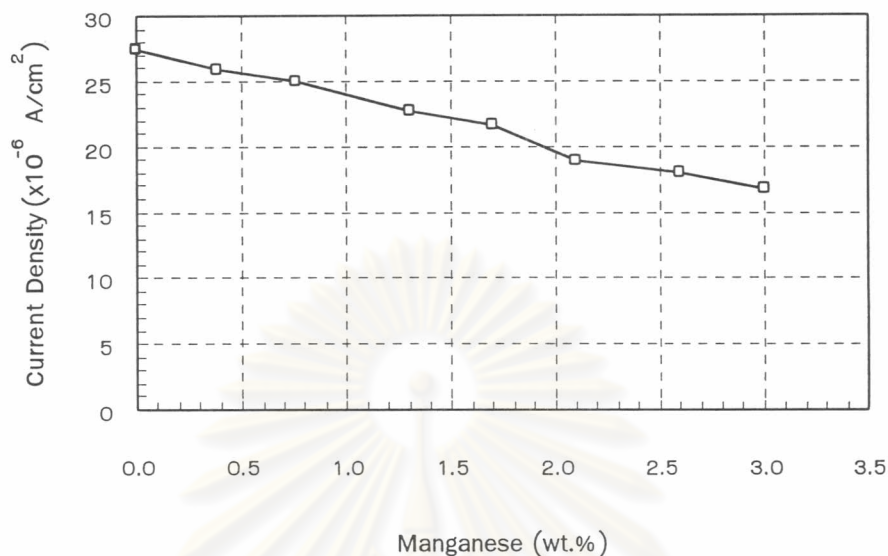


รูปที่ 5.11 แสดงการหาค่า  $I_{corr}$  จากจุดตัดระหว่างเส้นโค้งคาโทดิกและเส้นโค้งแอโนดิก

สำหรับการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงด้วยการวัดเส้นโพลาริเซชันของโลหะทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งอิมมิตด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ได้ค่า  $E_{corr}$ ,  $E_{pp}$ ,  $E_p$  และ  $I_{corr}$  ดังตารางที่ 4.7



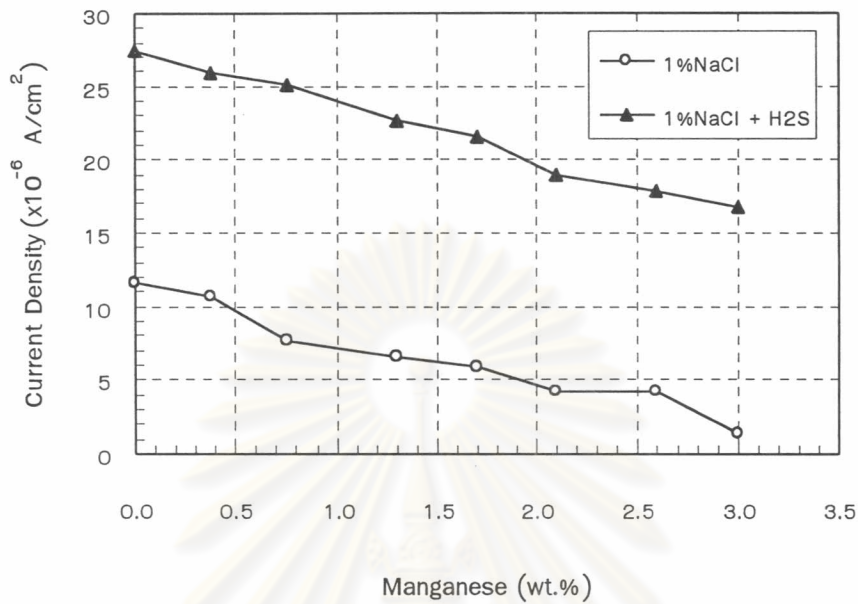
รูปที่ 5.12 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า  $E_{corr}$ ,  $E_{pp}$  และ  $E_p$  ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิมมิตด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



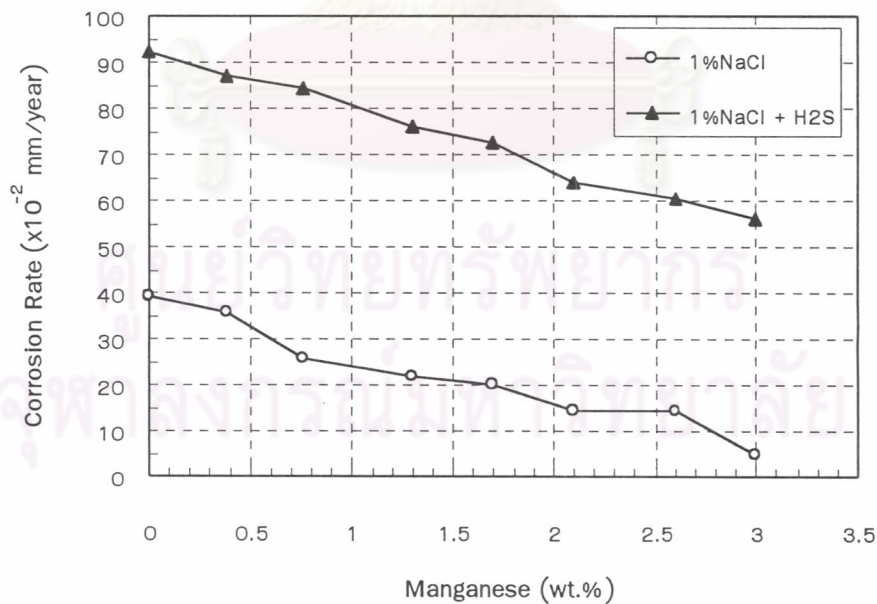
รูปที่ 5.13 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า  $I_{\text{corr}}$  ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิมิตด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 5.12 และ 5.13 จะเห็นว่าค่า  $E_{\text{corr}}$ ,  $E_{\text{pp}}$ ,  $E_p$  และ  $I_{\text{corr}}$  ที่ได้ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กล่าวคือ ปริมาณแมงกานีสในโลหะผสมที่เพิ่มขึ้น ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมได้ ค่า  $I_{\text{corr}}$  ที่ทำได้ นำมาคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนได้ผลดังตารางที่ 4.7 สำหรับการทดสอบด้วยสารละลายที่อิมิตด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์นี้ จะไม่สามารถหาค่า  $I_p$  ได้ เนื่องจากโลหะทดสอบไม่มีฟิล์มพาสซีฟเกิดขึ้นที่ผิว เพราะก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งเป็นสารประกอบซัลเฟอร์มีผลยับยั้งการเกิดฟิล์มของโลหะผสม เมื่อนำค่า  $I_{\text{corr}}$  และค่าอัตราการกัดกร่อนในการทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายทั้งสองลักษณะมาเปรียบเทียบ แสดงดังรูปที่ 5.14 และ 5.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.14 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงต่อค่า  $I_{\text{corr}}$  ในสภาวะที่มี 1%NaCl เปรียบเทียบกับสภาวะที่มี 1%NaCl อิ่มตัวด้วย H<sub>2</sub>S ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.15 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงต่อค่าอัตราการกัดกร่อน ในสภาวะที่มี 1%NaCl เปรียบเทียบกับสภาวะที่มี 1%NaCl อิ่มตัวด้วย H<sub>2</sub>S ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 5.14 และ 5.15 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน หรือ  $I_{corr}$  ที่ได้จากเส้นโพลาริเซชัน สามารถนำมาคำนวณหาอัตราการสูญเสียเนื้อโลหะได้เป็นค่าอัตราการกัดกร่อน (mm/year) ในการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะผสมทั้ง 8 ชุด จะเห็นว่าเมื่อโลหะผสมมีปริมาณแมงกานีสสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ได้จากเส้นโพลาริเซชันมีค่าลดลง อัตราการกัดกร่อนที่คำนวณได้มีค่าลดลงด้วย แสดงว่าฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนผิวของโลหะผสมช่วยเพิ่มความต้านทานในการกัดกร่อนและการหมอง โดยฟิล์มนี้จะปกคลุมที่ผิวหน้าของโลหะผสม หน่วงการเกิดปฏิกิริยาของธาตุหลักในโลหะผสมกับก๊าซซัลเฟอร์หรือออกซิเจนที่อยู่ในบรรยากาศ ทำให้โลหะผสมที่มีปริมาณแมงกานีสที่สูงกว่า มีความเสถียรสูง และสามารถต้านทานการกัดกร่อนและต้านทานการหมองได้ดีกว่า



ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย