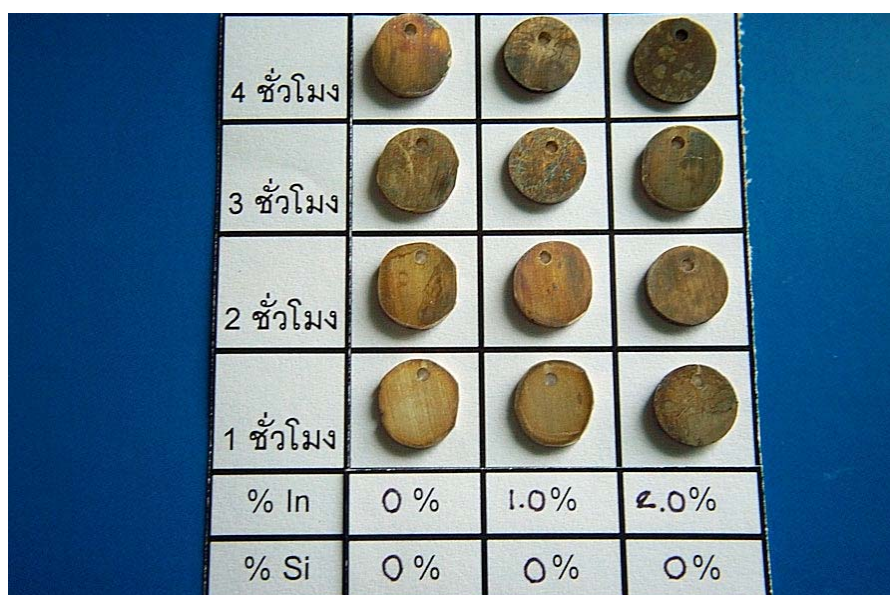


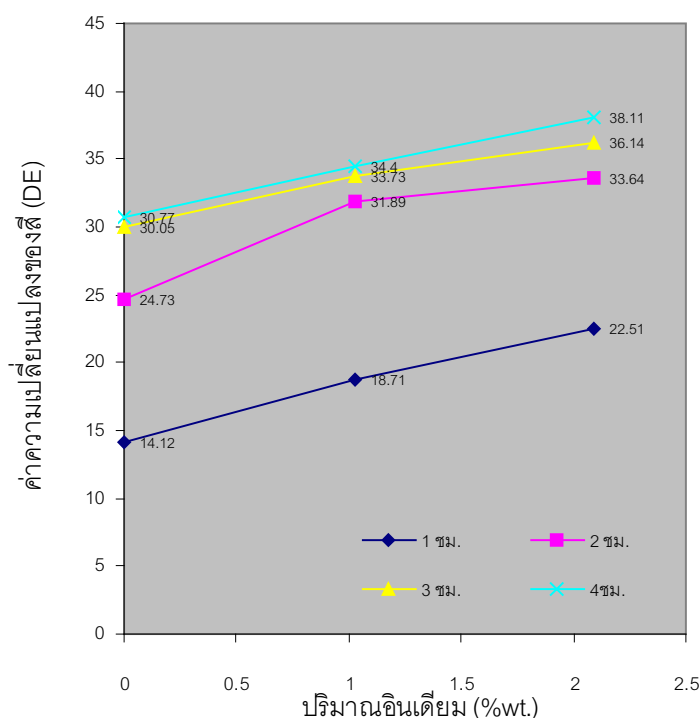
3.15.6 ความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิงผสม

ชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่ได้มีการผสมซิลิคอนและอินเดียมในปริมาณต่าง ๆ กัน เมื่อนำมาทำการเตรียมผิวด้วยการขัดด้วยกระดาษทราย ตั้งแต่เบอร์ 400 จนถึงเบอร์ 1200 และใช้เวลาทดสอบการหมองต่างกัน คือ 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานหล่อที่ทำการทดสอบจะมีสีต่างกัน ดังรูปที่ 3.27 ได้แสดงให้เห็นความแตกต่างของสีผิวชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงที่มีการผสมอินเดียมในปริมาณแตกต่างกัน ระหว่าง 0 - 3.09 % wt. พบว่าความสามารถในการต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิงจะลดลงตามปริมาณของอินเดียมที่ผสมลงไป ในปริมาณระหว่าง 0 - 3.09 % wt. จากกราฟรูปที่ 3.28 ทั้งนี้จากการวิเคราะห์จากโครงสร้างจุลภาค จะสังเกตเห็นปริมาณของ Secondary Structure กระจายตัวอยู่ทั่วเนื้อพื้น โดยที่ Secondary Structure เหล่านี้จะมีการกระจายตัวอย่างหนาแน่นสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชุดส่วนของเงินสเตอร์ลิงธรรมดาที่ไม่ผสมอินเดียม และจาก EDX พบว่าใน Secondary Structure เหล่านี้จะมีส่วนของทองแดง และอินเดียมในระหว่าง 25.98 – 38.73 % wt. และ 0.44 - 1.32 % wt. ตามลำดับ ซึ่งผลของทองแดงที่มีอยู่สูงใน Secondary Structure นี้เองทำให้ความสามารถในการป้องกันการหมองของชิ้นงานลดลง เนื่องจากโครงสร้างที่มีทองแดงอยู่ในปริมาณที่สูงและขนาดใหญ่ขึ้น จะไวต่อการเกิดปฏิกิริยา Oxidation และ Sulphidation มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานจากชุดส่วนของเงินสเตอร์ลิงธรรมดา (6.90 % Cu – balance of Ag) ขณะที่หากใช้ EDX ตรวจสอบปริมาณของธาตุผสมในเนื้อพื้น จะปรากฏปริมาณของเงินและทองแดงใกล้เคียงกันในชุดส่วนของเงินที่มีการผสมปริมาณของอินเดียม 0 – 3.09 % wt. รวมทั้งในเงินสเตอร์ลิงธรรมดาเช่นกัน



รูปที่ 3.27 ภาพถ่ายแสดงสีผิวชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่เติมอินเดียม 0, 1 และ 2 %wt. (มืออยู่จริง)

ในชิ้นงาน 0, 1.03 และ 3.09 ตามลำดับ) โดยใช้เวลาทดสอบ 1, 2, 3 และ 4 ชม.



รูปที่ 3.28 กราฟแสดงผลการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงของดี (DE) ของชิ้นงานเงิน สเตอริงที่มีการผสมอินเดียม 0, 1.03 และ 2.09% wt. โดยใช้เวลาทดสอบ 1, 2, 3 และ 4 ชม.

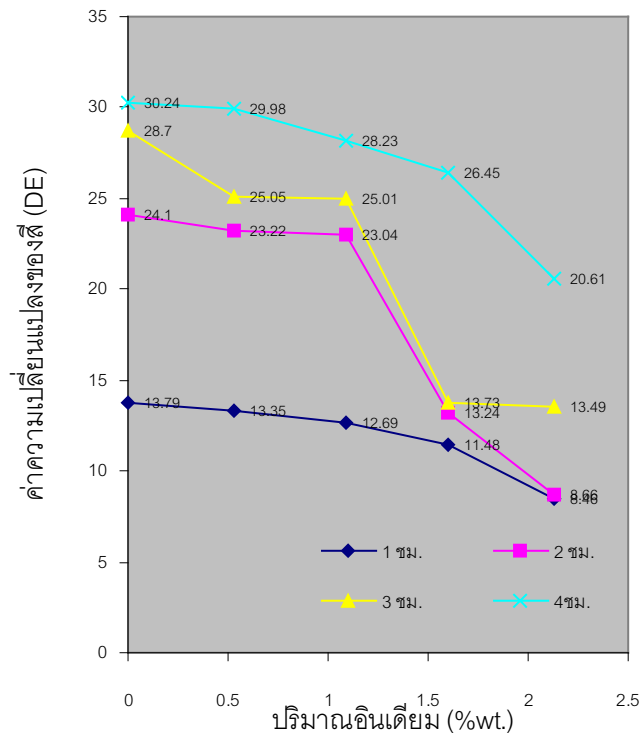
สำหรับชิ้นงานเงินสเตอริงที่มีการผสมเฉพาะซิลิคอนคือชุดส่วนผสม 6.26% Cu – 0.11% Si – balance of Ag ซึ่งจากการตรวจสอบส่วนผสมพบว่าคงเหลือปริมาณซิลิคอนเพียง 0.11 % wt. เท่านั้น แต่เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับชุดส่วนผสมที่เป็นเงินสเตอริงธรรมดาพบว่าเงินสเตอริงที่มีการผสมเฉพาะซิลิคอนจะมีความสามารถในการต้านทานการหมองดีกว่า โดยสังเกตจากสีของผิวชิ้นงานที่ปรากฏและจากค่าการเปลี่ยนแปลงของดี (DE) ที่มีค่าน้อยกว่า ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.11

หากทำการเปรียบเทียบระหว่างชุดส่วนผสมของเงินสเตอริงที่มีปริมาณที่เหลือน้อยของซิลิคอนใกล้เคียงกัน แต่มีปริมาณของอินเดียมแตกต่างกัน (ชิ้นงานทดสอบจากส่วนผสมที่มีปริมาณซิลิคอนระหว่าง 0.09 – 0.11% wt. และ ปริมาณอินเดียมที่มีอยู่ในชิ้นงานระหว่าง 0 - 3.13% wt. ตามลำดับ) จากสีของชิ้นงานที่ปรากฏดังรูปที่ 3.29 สามารถสังเกตได้ว่า ความสามารถในการต้านทานการหมองชิ้นงานที่มีซิลิคอนเท่า ๆ กัน จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณอินเดียมที่ผสมลงไปในช่วง 0- 3.13% wt. ทั้งนี้จากการตรวจสอบค่า DE ดังกราฟรูปที่ 3.30 ก็แสดงผลไปในทางเดียวกันคือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของดี

(DE) จะลดลงตามปริมาณของอินเดียมที่ผสมลงไปในช่วงระหว่าง 0 – 3.13% wt. และจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานชุดดังกล่าวจะพบปริมาณของ Secondary Structure กระจายตัวอย่างหนาแน่นขึ้นตามปริมาณของอินเดียมที่เติมลงไป โดยสังเกตได้ชัดว่า Secondary Structure เหล่านี้จะประกอบด้วยทองแดงและซิลิคอนในปริมาณที่สูงมากกว่าในเนื้อพื้นมาก โดยเฉพาะในชุดชิ้นงานที่เติมอินเดียมสูงที่สุดคือ ชิ้นงานของชุดส่วนผสม 3.76% Cu - 0.11% Si – 3.13% In – balance of Ag) จากการตรวจสอบส่วนผสมโดย EDX พบสัดส่วนปริมาณของธาตุผสมใน Secondary Structure บริเวณแถบสีขาวคือ Ag : Cu : Si : In เท่ากับ 93.22 : 4.33 : 0.08 : 3.37% wt. และมีสัดส่วนปริมาณของธาตุผสมที่พบในเนื้อพื้นคือ Ag : Cu : Si : In เท่ากับ 93.55 : 4.85 : 0.15 : 1.45%wt. สามารถพิจารณาได้ว่า Matrix และ Secondary Structure ที่มีปริมาณของอินเดียมและซิลิคอนเหลืออยู่มากที่สุดจะมีความสามารถในการต้านทานการหมองดีที่สุด โดยที่ความสามารถในการละลายของซิลิคอนจะขึ้นอยู่กับปริมาณของทองแดงในโครงสร้างดังกล่าว (ต้องมีทองแดงละลายอยู่สูง ๆ) โดยซิลิคอนจะมีผลต่อความสามารถในการต้านทานการหมองมากที่สุดโดยมีอินเดียมเป็นตัวช่วยเสริมให้ต้านทานการหมองดียิ่งขึ้น



รูปที่ 3.29 ภาพถ่ายแสดงสีผิวชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณของซิลิคอนใกล้เคียงกัน (0.09 - 0.11% wt.) แต่มีปริมาณของอินเดียมแตกต่างกันได้แก่ 0, 0.5, 1, 1.5 และ 3.0 % wt.(มีอยู่จริงในชิ้นงาน 0, 0.53, 1.09, 1.60 และ 3.13 % wt.ตามลำดับ)โดยใช้เวลาทดสอบ 1, 2, 3 และ 4 ชม.



รูปที่ 3.30 กราฟแสดงผลการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงของดี (DE) ของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงที่มี ปริมาณของซิลิคอนใกล้เคียงกัน (0.09 – 0.11 % wt.) แต่มีปริมาณของอินเดียมแตกต่างกันได้แก่ 0, 0.53, 1.09, 1.60 และ 3.13 % wt. โดยใช้เวลาทดสอบ 1, 2, 3 และ 4 ชม.

3.16 สรุปผลการทดลอง

1. อินเดียมจะมีบทบาทในการลดอุณหภูมิ ณ จุดหลอมเหลวสมบูรณ์ (liquidus) ของเงินสเตอร์ลิง ทำให้สามารถลดอุณหภูมิในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ เนื่องจากการไหลตัวของโลหะหลอมเหลวดีขึ้น แต่จะไม่มีผลกับเงินสเตอร์ลิงที่มีซิลิคอนผสมอยู่

2. ซิลิคอนและทองแดงใน Solid Solution และ Secondary Structure ของเงินสเตอร์ลิงมีผลต่อการเพิ่มความแข็ง และความต้านทานแรงดึงของเงินสเตอร์ลิง โดยซิลิคอน 0.09 - 0.11% wt. ทำให้เงินสเตอร์ลิงมีความแข็งเพิ่มขึ้น 38.4% และมีความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น 75 %

3. ในกรณีที่ผสมอินเดียมมีผลทำให้ความแข็ง และความต้านทานแรงดึงของเงินสเตอร์ลิงลดลงเนื่องจากอินเดียมดึงเอาทองแดงและซิลิคอนในเนื้อพื้นออกมาอยู่ใน Secondary Structure มากขึ้นตามปริมาณอินเดียมที่ผสมลงไป นอกจากนี้การเตรียมส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงก่อนการหล่อได้ลดปริมาณสัดส่วนของทองแดงลงโดยการผสมอินเดียมลงไปแทนที่ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เงินสเตอร์ลิงมีความแข็ง และความต้านทานแรงดึงลดลง

4. ในกรณีที่ผสมซิลิคอน 0.09 - 0.11% wt. เป็นผลทำให้ความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิงสูงขึ้น และเมื่อมีการผสมอินเดียมร่วมด้วย 0 - 3.13% wt ช่วยทำให้ความต้านทานการหมองของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงสูงยิ่งขึ้นตามปริมาณอินเดียมที่ผสมลงไปโดยมีความต้านทานการหมองสูงขึ้น 33 - 40% เมื่อเปรียบเทียบกับเงิน สเตอร์ลิงธรรมดา และสูงขึ้น 31.84 - 38.65% เมื่อเปรียบเทียบกับเงินสเตอร์ลิงที่ผสมเฉพาะซิลิคอนในปริมาณ (0.09 - 0.11% wt.)

บทที่ 4

การศึกษาอิทธิพลของธาตุแมงกานีส ต่อสมบัติทางกลและความต้านทานการ หมอง ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง (เงิน 92.5% – ทองแดง – แมงกานีส)

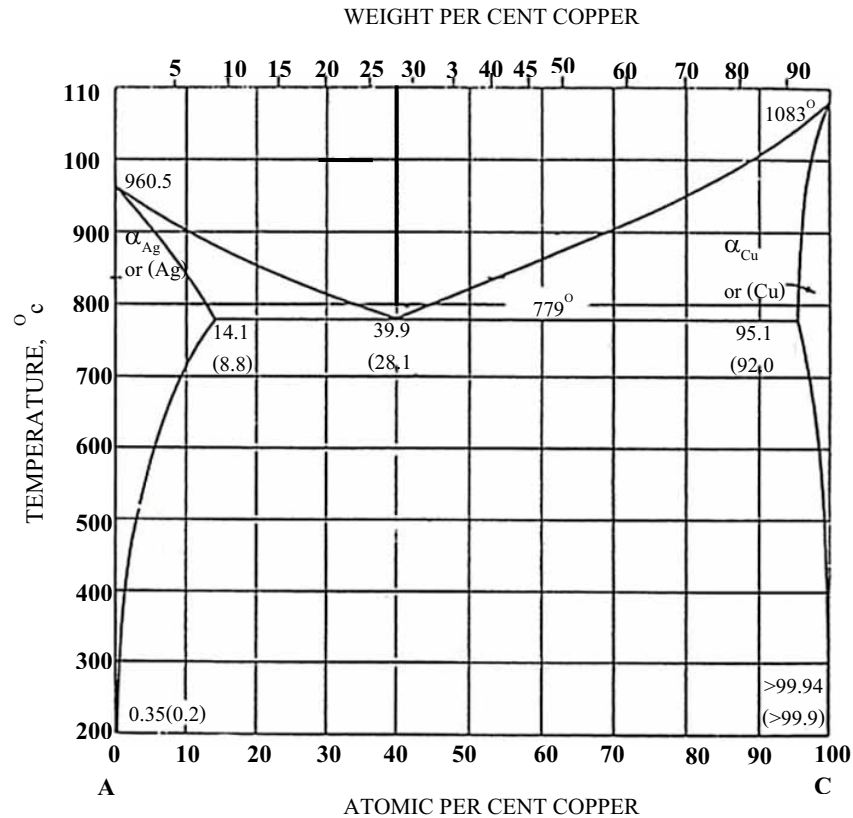
4.1 ความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ เป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญในการเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศไทย โดยอุตสาหกรรมด้านเครื่องประดับชนิดที่ผลิตจากโลหะเงินมีมากขึ้น และมีมูลค่าการส่งออกเป็นจำนวนมากในแต่ละปี ทั้งยังมีแนวโน้มที่ดีในการพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศ โดยโลหะผสมสำคัญที่ใช้ในอุตสาหกรรมนี้ คือ โลหะผสมเงินสเตอร์ลิง (Sterling Silver) ซึ่งเป็นโลหะเงินผสมเพียงชนิดเดียวที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ

โลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ได้ถูกกำหนดมาตรฐานไว้ว่า ต้องมีส่วนผสมของโลหะเงินบริสุทธิ์ 92.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เหลือ 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นธาตุอื่น แต่โดยปกติธาตุที่ผสมคือทองแดงซึ่งทำให้มีความแข็งเพิ่มขึ้น

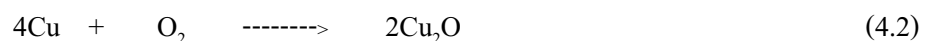
เนื่องจากโลหะเงินบริสุทธิ์มีความอ่อนมาก ไม่สามารถนำไปผลิตเป็นเครื่องประดับได้ จึงได้นำทองแดงมาผสม เพื่อเพิ่มความแข็ง ด้วยกลไกการเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอน(Precipitation hardening) พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมและอุณหภูมิ จากแผนภูมิสมดุลเฟสของระบบธาตุเงิน – ทองแดง ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงการเกิดปฏิกิริยายูเทคติกที่อุณหภูมิ 779.1°C สัดส่วนผสมยูเทคติกเกิดที่ส่วนผสมทองแดง 28.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความสามารถในการละลายได้สูงสุดของทองแดงในเงิน คือ 8.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขณะที่ความสามารถในการละลายของเงินในทองแดงอยู่ที่ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความสามารถในการละลายจะลดลงตามอุณหภูมิที่ลดลง ตามเส้น Solvus ดังรูป

การผลิตเครื่องประดับจากเงินสเตอร์ลิงมีหลายกระบวนการ เช่น การหลอมโดยใช้เตาที่อาศัยหลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction Furnace) ในระบบสุญญากาศ บรรยากาศปกติ หรือใช้ก๊าซเฉื่อยปกคลุมด้วยก็ได้ โดยข้อดีของการใช้ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในการหลอมโลหะ คือ การหลอมทำได้รวดเร็ว สามารถควบคุมส่วนผสมและอุณหภูมิได้ง่าย มีการสูญเสียโลหะที่ใช้ในการหลอมน้อย และมีสภาพการทำงานที่สะดวกสบายขึ้น



รูปที่ 4.1 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน – ทองแดง

ทั้งขั้นตอนการหลอมโลหะ และการหล่อโลหะ ต้องทำการควบคุมบรรยากาศอย่างดี ในกรณีที่มีการควบคุมบรรยากาศไม่เหมาะสม เช่น ทำการหลอมและหล่อโลหะในบรรยากาศที่มีออกซิเจนอยู่ และใช้อุณหภูมิหลอมที่สูงเกินไป จะทำให้ออกซิเจนละลายเข้าไปในโลหะหลอมเหลว ก่อให้เกิดปัญหาต่าง ๆ เช่น เกิด Cupric Oxide (CuO) และ Cuprous Oxide (Cu₂O) ซึ่งมีสีน้ำตาลถึงเทาดำ และสีชมพูอมแดง ตามลำดับ⁽²⁶⁾ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการที่ (4.1) และ (4.2) โดยออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อโลหะเงิน สเตอริ่ง ทำให้คุณสมบัติทางกลของโลหะลดลง อีกทั้งยังมีผลต่อความสวยงามด้วย



ปัญหาอื่น ๆ ที่สำคัญ ได้แก่ การเกิดโพรงหรือรูพรุน (Porosity) เนื่องจากก๊าซ และจากการหดตัว โดยกรณีของโพรงหรือรูพรุนเนื่องจากก๊าซ (Gas Porosity) เกิดจากการที่ก๊าซรวมตัวกันเป็นฟองอากาศอยู่ในน้ำโลหะ และขณะโลหะหลอมเหลวเริ่มแข็งตัวนั้น ก๊าซที่ละลายในโลหะหลอมเหลวและมลทินต่าง ๆ จะถูกปล่อยออกจากน้ำโลหะ แต่ถ้าไม่สามารถปล่อยออกได้ทัน เนื่องจากขณะทำการหลอม ใช้อุณหภูมิหลอมสูงเกินไป ทำให้ก๊าซที่ละลายอยู่ในโลหะหลอมเหลว มีปริมาณมากเกินไป ก๊าซ

นั้นจึงติดอยู่ในงานหล่อและเกิดเป็นโพรงหรือรูพรุนขึ้น การป้องกันทำได้โดยไม่ให้อากาศสัมผัสโดยตรงกับโลหะหลอมเหลว ขณะทำการหลอมและหล่อโลหะผสม ส่วนกรณีของโพรงหรือรูพรุนเนื่องจากการหดตัว (Shrinkage Porosity) เกิดจากการหดตัวของโลหะขณะที่โลหะแข็งตัว แต่การชดเชยโลหะหลอมเหลวเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ จึงทำให้เกิดโพรงหรือรูพรุนขึ้น

นอกจากนี้ปัญหาที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ ปัญหาการหมอง ซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวของโลหะ เนื่องจากการเกิดจากการทำปฏิกิริยาของเงิน กับบรรยากาศที่มีกำมะถัน (S) สูง เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เกิดเป็นสารประกอบ Ag_2S ซึ่งมีสีน้ำตาลเข้มแกมเขียวถึงดำทำให้เครื่องเงินหรือเครื่องประดับเงินหมอง

จากปัญหาการเกิดออกไซด์ของทองแดง และซัลไฟด์ของเงิน ได้มีการแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นด้วยการเติมธาตุผสมบางชนิดลงไป เพื่อให้ธาตุผสมนี้จับตัวกับออกซิเจน เกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ ทำให้ปริมาณออกซิเจนในโลหะหลอมเหลวลดลง และยังช่วยหน่วงปฏิกิริยาออกซิเดชัน ระหว่างทองแดงและออกซิเจนให้ช้าลง นอกจากนี้ธาตุผสมที่เติมลงไปนี้ยังสามารถหน่วงการเกิดปฏิกิริยาของเงินกับกำมะถันได้อีกด้วย

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้น ธาตุผสมที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ เจอร์มาเนียม (Ge) สังกะสี (Zn) อะลูมิเนียม (Al) แคดเมียม (Cd) และซิลิคอน (Si) และฟอสฟอรัส (P) ซึ่งธาตุผสมเหล่านี้มีสมบัติเป็นตัวลดออกซิเจน (Deoxidizer)

โดยในปี 1930 เป็นต้นมา Price L.E และ Thomas G.J.⁽²⁸⁾ ได้ศึกษาการเกิดออกซิเดชันของธาตุอะลูมิเนียม พบว่าเกิดขึ้นฟิล์มออกไซด์โปร่งใส ซึ่งช่วยในการป้องกันการเกิดการหมองได้ และในปี 1948 มีงานวิจัยที่สนับสนุนงานของ Price และ Thomas โดยพบว่าการเติมธาตุอะลูมิเนียม 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แทนการเติมธาตุทองแดง จะช่วยป้องกันการเกิดออกไซด์ที่มีสีหมองคล้ำถึงแดงที่ผิว ซึ่งเรียกว่า firestain ในโลหะเงินสเตอร์ลิงได้⁽²⁹⁾ แต่หากปริมาณธาตุอะลูมิเนียมที่เติมลงไปมากกว่า 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแล้ว จะทำให้โลหะเงินสเตอร์ลิงมีสีไม่สวยงาม และยังทำให้โลหะเงินสเตอร์ลิงมีความแข็งแรงสูงขึ้นมาก ยากต่อการขึ้นรูปเครื่องประดับเงินด้วยมือ

สำหรับธาตุเจอร์มาเนียม พบว่าสามารถลดออกซิเจนได้ดีกว่าธาตุอื่น ๆ ที่เคยศึกษามา ซึ่งฟิล์มออกไซด์ (GeO_x) ที่ได้จะโปร่งใส สามารถป้องกันการเกิด firestain ขณะทำการเชื่อมและอบอ่อน แต่ธาตุเจอร์มาเนียมมีราคาแพง และพบว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผสมเจอร์มาเนียมมีความเปราะสูงในสภาวะของแข็ง โดยโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมของเงินบริสุทธิ์ 92.5 เปอร์เซ็นต์ และธาตุเจอร์มาเนียม 7.5 เปอร์เซ็นต์ จะมีความเปราะสูงและแตกในขณะทำการรีด⁽³⁰⁾ จึงไม่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรม

นอกจากนี้ธาตุซิลิคอน ก็มีคุณสมบัติเป็นตัวลดออกซิเจน และยังทำให้ผิวเงาขึ้นอีกด้วย เนื่องจากมีแรงตึงผิวเกิดขึ้น แต่จากการศึกษาของ John C. McCloskey, Paul R. Welch และ Shankar Aithal⁽³¹⁾

พบว่าธาตุซิลิคอนที่เติมลงในโลหะมีค่า มีคุณสมบัติในการเพิ่มขนาดเกรนทำให้โลหะมีพฤติกรรมเปราะ สำหรับธาตุฟอสฟอรัสสามารถดออกซิเจนได้ แต่จะไม่ทำให้เกิดความเงาที่ผิวโลหะ ส่วนธาตุสังกะสีและแคดเมียมเป็นตัวลดออกซิเจนที่ดี แต่จะมีผลต่อความแข็งแรง โดยจะทำให้โลหะเงินสเตอร์ลิงอ่อนลง ไม่เหมาะในการทำเครื่องประดับเงิน⁽³²⁾

จากการศึกษาคุณสมบัติของธาตุแมงกานีส (Mn) พบว่าธาตุแมงกานีสสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ง่าย จึงมีสมบัติเป็นตัวลดออกซิเจน และจากข้อมูลพบว่าแมงกานีสมีความสามารถในการเพิ่มความต้านทานการหมองให้กับโลหะเงินสเตอร์ลิงได้ด้วย

4.2. วัตถุประสงค์

- 4.2.1 เพื่อศึกษาผลของธาตุผสมแมงกานีส ต่อคุณสมบัติทางกลของโลหะเงินสเตอร์ลิง
- 4.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของธาตุผสมแมงกานีสต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิง
- 4.2.3 เพื่อศึกษาความต้านทานการหมองของโลหะเงินสเตอร์ลิง ก่อนและหลังการเติมแมงกานีส
- 4.2.4 เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของธาตุผสมแมงกานีสในการหล่อโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ใช้ในงานด้านเครื่องประดับ

4.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 4.3.1 หลอมโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณเงินบริสุทธิ์ 92.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณทองแดง 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้เตาเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction Furnace) ในสภาวะบรรยากาศปกติ เปรียบเทียบกับการหลอมโลหะเงินสเตอร์ลิงที่เติมธาตุผสมแมงกานีส ในช่วงปริมาณ 0.5 – 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้ปริมาณทองแดงลดลงอยู่ในช่วง 7.0 – 4.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ
- 4.3.2 ตรวจสอบส่วนผสมและโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากการหล่อ
- 4.3.3 ศึกษาสมบัติทางกล โดยการทดสอบแรงดึงและการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์
- 4.3.4 ศึกษาความต้านทานการหมองของโลหะเงินสเตอร์ลิง ก่อนและหลังการเติมธาตุผสมแมงกานีส
- 4.3.5 ทดสอบการกัดกร่อนของฟิล์มที่เกิดขึ้นหลังการเติมธาตุผสมแมงกานีส ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า โดยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์ (Potentiodynamic Technique)

4.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 4.4.1 ทราบถึงปริมาณและความสามารถของธาตุผสมแมงกานีส ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิง ได้แก่ ความต้านทานแรงดึง และความแข็ง

4.4.2 ทราบถึงอิทธิพลของธาตุผสมแมงกานีสที่ส่วนผสมต่าง ๆ ต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง

4.4.3 ทราบถึงความสามารถในการต้านทานการหมองของโลหะเงินสเตอร์ลิง ที่ปริมาณธาตุผสมแมงกานีสต่าง ๆ กัน

4.4.4 เป็นแนวทางในการศึกษาและปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะเงินสเตอร์ลิง ในงานอุตสาหกรรมเครื่องประดับ

4.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

4.5.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเงิน (Silver, Ag)

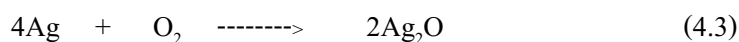
4.5.1.1 สมบัติทางกายภาพ

เงินเป็นโลหะที่มีสีขาวแวววาวสูง และมีความเสถียรมากโลหะหนึ่ง มีคุณสมบัติในการบิดโค้งงอ ดีเป็นแผ่นบาง ๆ และดึงเป็นเส้นได้ดีมากรองจากทองคำ (Au) และพัลลาเดียม (Pd) เงินจัดอยู่ในกลุ่มโลหะมีค่า โดยเงินบริสุทธิ์สามารถนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดีที่สุด แต่เนื่องจากมีราคาแพง จึงไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ในด้านนี้มากนัก ได้มีการนำโลหะเงินไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยแบ่งประเภทของเงินได้หลายประเภท ได้แก่ เงินบริสุทธิ์ เงินบริตาเนีย (ปริมาณเงิน 95.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) เงินสเตอร์ลิง (ปริมาณเงิน 92.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และเงินประเภทอื่น ๆ เช่น 800Ag, Pink Silver ฯลฯ

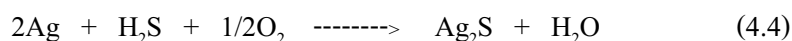
เงินบริสุทธิ์ มีจุดหลอมเหลว 960.8°C ส่วนเงินสเตอร์ลิงมีจุดหลอมเหลว 896°C ความหนาแน่น ที่อุณหภูมิ 20°C เท่ากับ 10.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC (face-centered cubic)

4.5.1.2 สมบัติทางเคมี

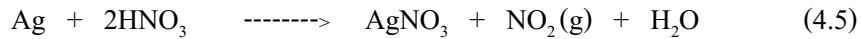
- เงินเป็นธาตุที่เสถียรมาก จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในอากาศแห้งและชื้น
- ถ้าอากาศมีออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับเงิน เกิดฟิล์มออกไซด์ดังสมการที่ (4.3)



- ถ้าในอากาศมีซัลเฟอร์(S) ซึ่งได้จากไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เงินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ผิว โดยซัลเฟอร์จะทำปฏิกิริยากับ Ag เกิดฟิล์ม Ag_2S มีสีน้ำตาลเข้มแกมเขียวถึงดำเคลือบที่ผิว ทำให้เกิดการหมอง ปฏิกิริยาการเกิดฟิล์ม Ag_2S แสดงได้ดังสมการที่ (4.4)⁽³³⁾



- เงินทำปฏิกิริยากับกรดไนตริกเกิดสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ดังสมการที่ (4.5)



- โลหะเงินสามารถเกิดสารประกอบและผสมกับโลหะได้หลายชนิด ที่สำคัญ คือ โลหะผสมเงิน - ทองแดง เช่น เงินสเตอร์ลิง เป็นต้น

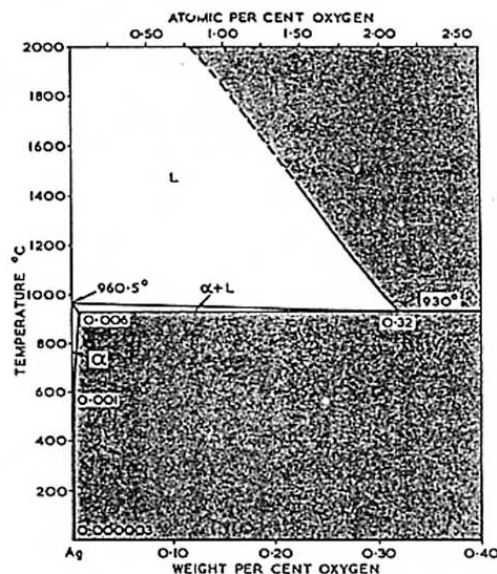
4.5.2 ปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นกับเงินสเตอร์ลิง

ปัญหาที่พบส่วนใหญ่ในการผลิตเครื่องประดับ จากการหลอมและหล่อโลหะ การตกแต่งขึ้นรูป และการใช้งานของเงินสเตอร์ลิง แบ่งได้ 3 ประเภท ได้แก่

1. การละลายของออกซิเจนในโลหะเงินหลอมเหลว
2. การเกิดคอปเปอร์ออกไซด์ที่ผิวโลหะ
3. การเกิดการหมองขึ้นที่ผิว

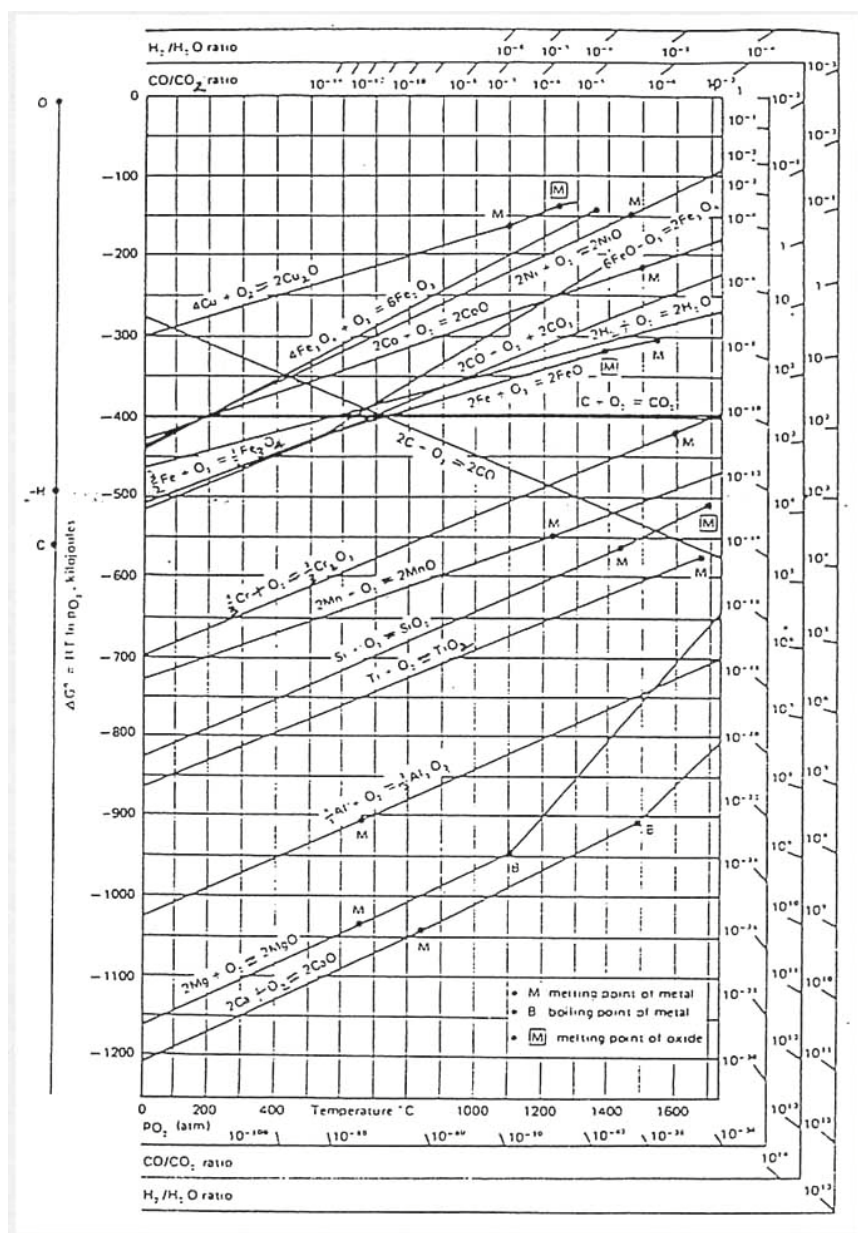
4.5.2.1 การละลายของออกซิเจนในโลหะเงินหลอมเหลว

การละลายของออกซิเจนในโลหะเงินหลอมเหลว เกิดขึ้นในกระบวนการหลอมโลหะที่อุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลวของโลหะเงินสเตอร์ลิง โดยออกซิเจนจะละลายเข้าไปในน้ำโลหะ น้ำโลหะจะเกิดการแข็งตัว โดยปริมาณออกซิเจนที่มีในน้ำหล่อจะทำให้เกิดรูพรุนขึ้นในชิ้นงาน โดยปริมาณของออกซิเจนที่ละลายในโลหะเงิน แสดงได้ดังแผนภูมิสมดุลเฟสของระบบเงินและออกซิเจน ดังรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิห้อง โลหะเงินไม่สามารถดูดซับออกซิเจนได้เลย แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ออกซิเจนจะละลายในเงินได้มากขึ้น โดยเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนถึงอุณหภูมิหลอมเหลวของเงิน คือ 960.8°C จะพบว่าออกซิเจนละลายในโลหะเงินได้มากถึง 10 เท่าของออกซิเจนที่ละลายในโลหะเงินที่อุณหภูมิห้องโดยปริมาตร⁽³⁴⁾



รูปที่ 4.2 แผนภูมิสมดุลเฟสของระบบเงินและออกซิเจน

แนวทางในการแก้ไขปัญหาการละลายของออกซิเจนในเงินสเตอร์ลิงหลอมเหลว คือ การป้องกันไม่ให้น้ำโลหะสัมผัสกับบรรยากาศที่มีออกซิเจน ทำได้โดยใช้การหลอมโลหะและหล่อโลหะในสภาวะสุญญากาศ หรือหลอมในบรรยากาศที่ใช้ก๊าซเฉื่อยปกคลุม ซึ่งต้องลงทุนสูงมาก เพราะต้องใช้เครื่องมือพิเศษในการหล่อ อีกวิธีหนึ่งคือการเติมธาตุผสมบางชนิดลงไป ซึ่งธาตุผสมนี้จะได้รวมตัวกับออกซิเจน แล้วลอยออกมาจากน้ำโลหะได้ดี ธาตุเหล่านี้เรียกว่า ตัวลดออกซิเจน (Deoxidizer) ได้แก่ อะลูมิเนียม เจอร์มาเนียม สังกะสี แคดเมียม และซิลิคอน จากข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์จากแผนภูมิของ Ellingham ในรูปที่ 4.3 พบว่าธาตุแมงกานีส สามารถรวมตัวกับออกซิเจนได้ง่าย จึงมีความสามารถในการเป็นตัวลดออกซิเจนได้เช่นกัน



รูปที่ 4.3 แผนภูมิของ Ellingham สำหรับการเกิดออกไซด์ของธาตุต่าง ๆ

4.5.2.2 การเกิดคอปเปอร์ออกไซด์ที่ผิวโลหะ

การเกิดคอปเปอร์ออกไซด์ที่ผิว ทำให้เงินสเตอร์ลิงมีสีผิวเป็นสีเทาดำ และสีชมพูอมแดง ซึ่งเป็นสีของ CuO (Cupric oxide) และ Cu_2O (Cuprous oxide) ตามลำดับ ปฏิริยาออกซิเดชันนี้ เกิดขึ้นขณะให้ความร้อนแก่โลหะที่อุณหภูมิประมาณ $600 - 800^\circ\text{C}$ ในสภาวะบรรยากาศ โดยฟิล์มออกไซด์ของ CuO ที่เกิดขึ้นสามารถขจัดออกได้ง่าย โดยการจุ่มลงในสารละลายร้อนของกรดกำมะถัน 7% โดยปริมาตร เรียกวิธีการนี้ว่า การกัดผิวด้วยสารเคมี (Pickling)

สำหรับแนวทางในการป้องกัน คือการเติมธาตุผสมบางชนิดที่สามารถจับตัวกับออกซิเจนได้ดีลงไป เกิดฟิล์มออกไซด์บาง ๆ ขึ้นที่ผิว ซึ่งจะหน่วงการเกิดปฏิริยาออกซิเดชันของทองแดงกับออกซิเจนให้ช้าลงได้

4.5.2.3 การเกิดการหมองขึ้นที่ผิว

ปัญหาที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ การเกิดการหมองขึ้นที่ผิวโลหะ (Tarnishing) โดยที่ภายใต้สภาวะปกติ เงินสเตอร์ลิงจะเกิดการหมองได้ง่ายกว่าในเงินบริสุทธิ์ เนื่องจากเงินสเตอร์ลิงมีปริมาณธาตุทองแดงผสมอยู่ด้วย โดยอัตราการหมองของโลหะผสมเงินและทองแดง จะเป็นสัดส่วนกับปริมาณของทองแดง และอัตราการหมองของเงินบริสุทธิ์และโลหะผสมเงินจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีความชื้นในอากาศสูง และโลหะเงินเกิดการสัมผัสกับบรรยากาศที่มีซัลเฟอร์สูง พวกสารประกอบซัลเฟอร์ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) จะทำให้เกิด Ag_2S ซึ่งมีสีน้ำตาลเข้มแกมเขียวจนถึงดำเคลือบผิวโลหะ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) จะทำให้เกิดเงินซัลเฟตเคลือบที่ผิว แล้วเกิดการหมองขึ้น ทำให้เครื่องเงินมีสีผิวเปลี่ยนไป

วิธีแก้ปัญหการหมองของเงินสเตอร์ลิง ทำได้โดยการชุบด้วยโลหะอื่น เช่น ทอง (Au) แพลตินัม (Pt) โรเดียม (Rh) หรือชุบด้วยน้ำยากันหมอง นอกจากนี้การเติมธาตุผสมบางชนิดลงไป ทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์ของธาตุผสม สามารถหน่วงการเกิดปฏิริยาระหว่างเงินกับสารประกอบที่มีกำมะถันได้ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเติมธาตุผสมแมงกานีส

4.5.2.4 วิธีวัดความสามารถในการต้านทานการหมอง

การวัดความสามารถในการต้านทานการหมอง มีหลายวิธี ได้แก่

4.5.2.4.1 การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิว^(38, 39)

วิธีนี้ใช้การวัดค่าความสว่าง L^* และค่าสี a^* , b^* ที่สะท้อนจากผิวโลหะ จากการตรวจสอบด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ทั้งก่อนและหลังการทดสอบในบรรยากาศที่มีซัลเฟอร์ ซึ่งได้จากการละลายโซเดียมซัลไฟด์นาโนไฮดรต ($\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$) ด้วยน้ำ นำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิวของชิ้นงาน (Color difference, DE^*) ด้วยมาตรฐานการวัดสีระบบ CIELAB (The Commission International d' Eclairage)¹ ซึ่งแสดงได้ด้วยสูตร

$$DE^* = [(L^*_2 - L^*_1)^2 + (a^*_2 - a^*_1)^2 + (b^*_2 - b^*_1)^2]^{1/2} \quad (4.6)$$

เมื่อ L^*_1, L^*_2 คือ ความสว่าง ก่อนและหลังการทดสอบการมองเห็นตามลำดับ

a^*_1, a^*_2 คือ ค่าสีแดง – เขียว ก่อนและหลังการทดสอบการมองเห็นตามลำดับ

b^*_1, b^*_2 คือ ค่าสีเหลือง – น้ำเงิน ก่อนและหลังการทดสอบการมองเห็นตามลำดับ

สำหรับการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีในระบบนี้ จะใช้หลักการอธิบายเชิงคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นที่ยอมรับมากที่สุดในการใช้ตรงกันข้ามอธิบาย ได้แก่ สีเขียว – แดง สีเหลือง – น้ำเงิน และสีขา – ดำ ความหมายของค่าสี คือ

L^* = ความสว่าง (Lightness) $L^* = 0$ (ดำ), $L^* = 100$ (ขาว)

a^* = ค่าสีแดง – เขียว ถ้าสีแดง ค่า a^* จะเป็นค่าบวก ตั้งแต่ 0 ถึง 100

ถ้าสีเขียว ค่า a^* จะเป็นค่าลบ ตั้งแต่ -100 ถึง 0

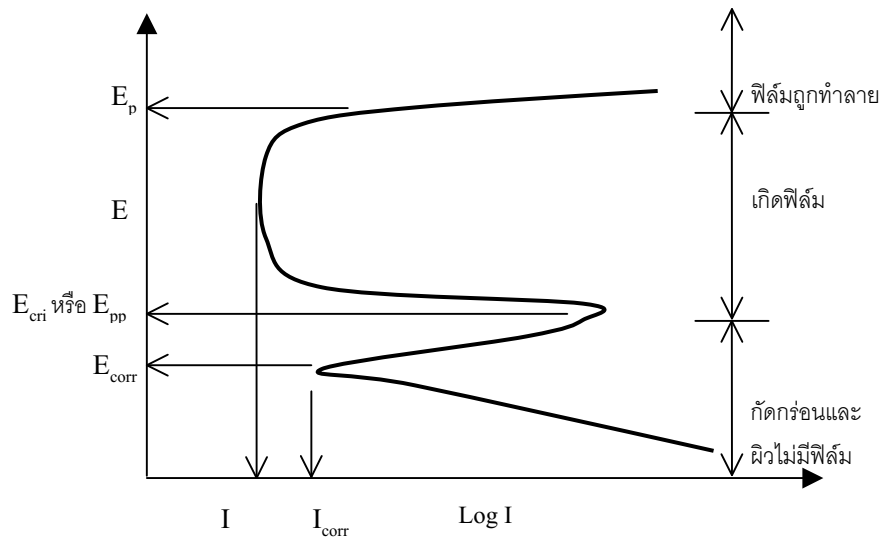
b^* = ค่าสีเหลือง – น้ำเงิน ถ้าสีเหลือง ค่า b^* จะเป็นค่าบวก ตั้งแต่ 0 ถึง 100

ถ้าสีน้ำเงิน ค่า b^* จะเป็นค่าลบ ตั้งแต่ -100 ถึง 0

โดยค่า L^* , a^* และ b^* ที่วัดได้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการวัดความแตกต่างของสีจากวัตถุเดียวกัน แต่มีสีเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการมองเห็นของโลหะเงินสเตอร์ลิงได้ และค่า DE^* ที่คำนวณได้หากเท่ากับ 1 แสดงว่าไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในชิ้นงานได้ แต่ถ้าค่า DE^* เท่ากับ 4 แสดงว่าสามารถเริ่มสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงด้วยสายตาในชิ้นงานได้ โดยค่า DE^* ที่เพิ่มสูงขึ้น จะมีความแตกต่างของสีผิวก่อนและหลังการทดสอบการกันมองเห็นสูง

4.5.2.4.2 การวัดการทนหมองโดยเทคนิคไฟฟ้าเคมี

อาศัยหลักการทางไฟฟ้าเคมีวัดการหมองของเงินสเตอร์ลิงโดยวัดความสามารถการทนหมองในรูปของเส้นโพราไลเซชัน คือ ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าเทียบกับศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้ามาตรฐานกับกระแสการกัดกร่อนของเงินสเตอร์ลิงในสารละลายที่กำหนด ลักษณะของเส้นโพลาไรเซชันและค่าตัวแปรต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ลักษณะเส้นโพลาริเซชันและค่าตัวแปรต่างๆ

ตัวแปรที่วัดจากเส้นโพลาริเซชัน คือ

- E_{corr} คือ ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะ

- E_{cri} (หรือ E_{pp}) คือ ศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนสภาวะวัสดุระหว่างการถูกกัดกร่อนมากเพราะไม่มีฟิล์มที่ผิวกับสภาวะที่ถูกกัดกร่อนน้อยมาก ๆ หรือไม่ถูกกัดกร่อนเพราะเกิดฟิล์มที่ผิว

- E_p คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ฟิล์มถูกทำลาย โลหะถูกกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอหรือแบบรูเข็มขึ้นอยู่กับการโครงสร้างจุลภาค

- I_{corr} คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน E_{corr}

- I_p คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะโลหะเกิดฟิล์มที่ผิว

ตัวแปร E_{corr} และ I_{corr} ใช้สำหรับวัดค่าอัตราการกัดกร่อนที่ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน E_{corr} โดยสามารถแปลงค่ากระแสเป็นอัตราการสูญเสียเนื้อหรือความหนาแน่นของโลหะด้วยกฎของฟาราเดย์ดังสมการ 4.7 ค่า E_{corr} สามารถแปลเป็นความหมายในการเปรียบเทียบความต้านทานการกัดกร่อนได้ คือ ค่ามากกว่าแสดงว่าโลหะมีความสามารถต้านทานหรือมีความเสถียรต่อการกัดกร่อนมากกว่า ค่า E_{corr} และ I_{corr} นี้มีการนำไปใช้งานกันมาก

$$\frac{dm}{dt} = (MW) I_{\text{corr}} / zF \quad (4.7)$$

โดยที่

$\frac{dm}{dt}$ = อัตราการกัดกร่อนในหน่วยน้ำหนัก/พื้นที่xเวลา

F = ค่าคงที่ฟาราเดย์

z = เลขออกซิเดชันของไอออนโลหะ

MW = น้ำหนักอะตอม

$$I_{\text{corr}} = \text{ค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน}$$

ตัวแปรค่า I_p จะแสดงว่าฟิล์มที่เกิดขึ้นบนผิวโลหะขณะนั้นยอมให้อิออนผ่านได้มากหรือน้อย ค่า I_p มาก หมายความว่าความยอมให้อิออนผ่านได้ง่าย ความแข็งแรงของฟิล์มจะน้อยหรือมีเสถียรภาพน้อยกว่าฟิล์มที่มีค่า I_p น้อยกว่า นิยมใช้ในการประกอบการศึกษาทางด้านกลไกการเกิดฟิล์มควบคู่กับการวิเคราะห์ฟิล์มด้วยเทคนิคอื่น ๆ

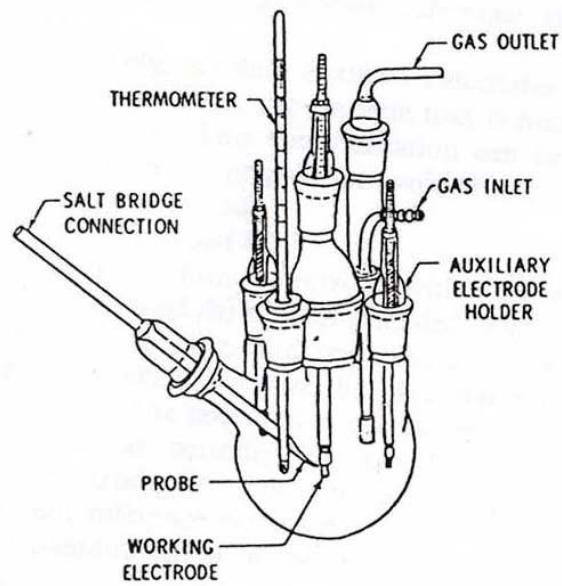
ตัวแปรค่า E_p แสดงถึงความต้านทานการกัดกร่อน วัสดุที่มีค่า E_p มากกว่าจะมีความต้านทานการกัดกร่อนมากกว่า การกัดกร่อนจะเป็นรูปแบบใดขึ้นอยู่กับรูปแบบที่ปรากฏ เช่น แบบรูเข็ม (Pitting) หรือแบบสม่ำเสมอ (Uniform) ขึ้นอยู่กับโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะ โดยส่วนใหญ่โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะจะไม่สม่ำเสมอจึงปรากฏเป็นการกัดกร่อนแบบรูเข็ม จึงมักจะเรียกค่านี้ว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Potential) การวัดค่า E_p ขึ้นอยู่กับผู้วัดจะกำหนดที่ใด เช่น ที่ค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มจะมากกว่าค่า I_p หรือที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

การหาค่าตัวแปรที่กล่าวมาประกอบการสังเกตผิวโลหะหลังการทดสอบจะสามารถเปรียบเทียบการทนมองของเงินสเตอร์ลิงได้

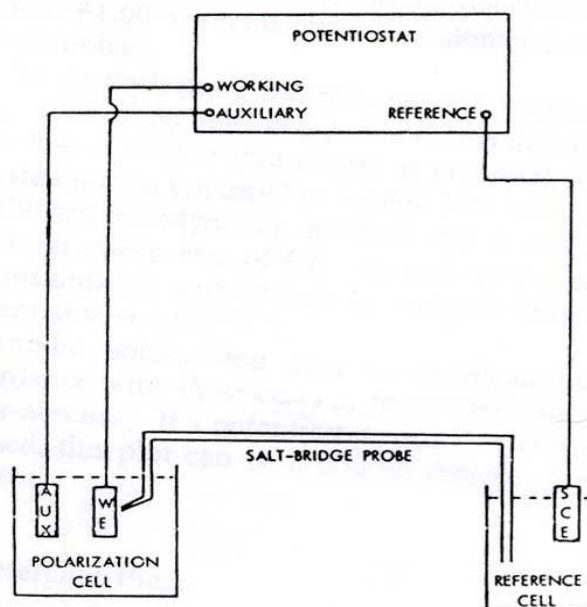
เนื่องจากวิธีการนี้ยังไม่มีกำหนดเป็นมาตรฐานในงานเครื่องประดับ ในที่นี้ได้นำวิธีการตามที่มีในมาตรฐานการวัดการกัดกร่อน คือ มาตรฐาน ASTM G5-94 (American Society of Testing of Materials) และ มาตรฐาน NACE TM 0177-96 (National Association of Corrosion Engineer) ของประเทศสหรัฐอเมริกามาประยุกต์ใช้ โดยใช้มาตรฐาน ASTM G5-94 เป็นวิธีการวัดเส้นโพลาริเซชันและใช้มาตรฐาน NACE TM0177-96 กำหนดสารละลาย คือ สารละลายผสมของ NaCl 35% + CH₃COOH 5% อิมมิดด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S)

การวัดเส้นโพลาริเซชันโดยใช้เทคนิคไฟฟ้าเคมี

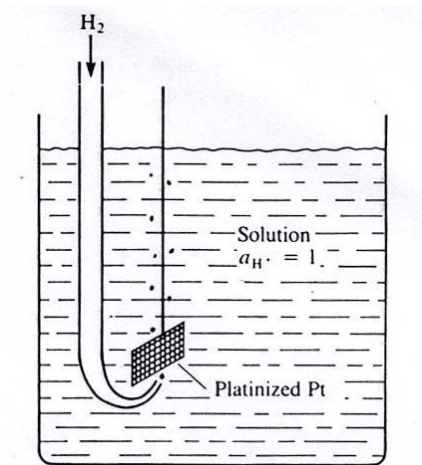
ในการตรวจวัดค่าอัตราการกัดกร่อนด้วยเทคนิคไฟฟ้า เคมีจะวัดโดยใช้วิธีโพเทนชิโอดนามิกส์ (potentiodynamic technique) ตามมาตรฐาน ASTM G5-94⁽⁴¹⁾ (American Society of Testing and Materials) และใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์นี้ คือการที่ควบคุมศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เซลล์ แล้ววัดค่ากระแสที่ได้หรือที่เปลี่ยนแปลงไป โดยใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตต (Potentiostat) ดังรูปที่ 4.6 เครื่องโพเทนชิโอสแตตหรือกัลวานอสแตต (Galvanostat) เป็นอุปกรณ์ป้อนศักย์ไฟฟ้าให้แก่เซลล์ โดยผ่านขั้วไฟฟ้าวัดกระแสซึ่งทำจากโลหะแพลตตินัมหรือแท่งกราไฟต์ เป็นการเร่งให้ขึ้นตัวอย่างทดสอบที่ต่อกับขั้วไฟฟ้าโลหะทดสอบเกิดการกัดกร่อนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้า จะได้เส้นโพลาริเซชันที่แสดงถึงพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะ



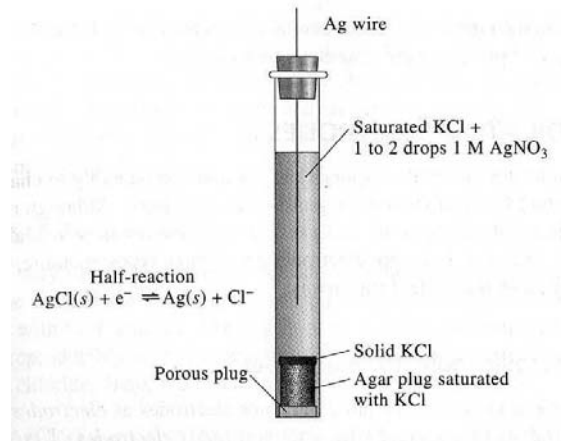
รูปที่ 4.5 เซลล์ที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมี



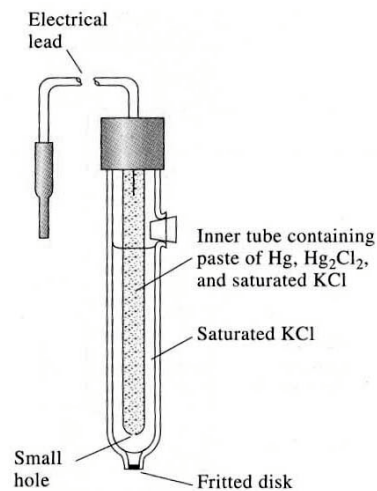
รูปที่ 4.6 เครื่องโพเทนชิโอสแตทที่ใช้วัดเส้นโพลาริเซชัน



(ก) ขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน⁽⁴²⁾
(Hydrogen Electrode)



(ข) ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์⁽⁴³⁾
(Silver/Silver Chloride; Ag/AgCl)

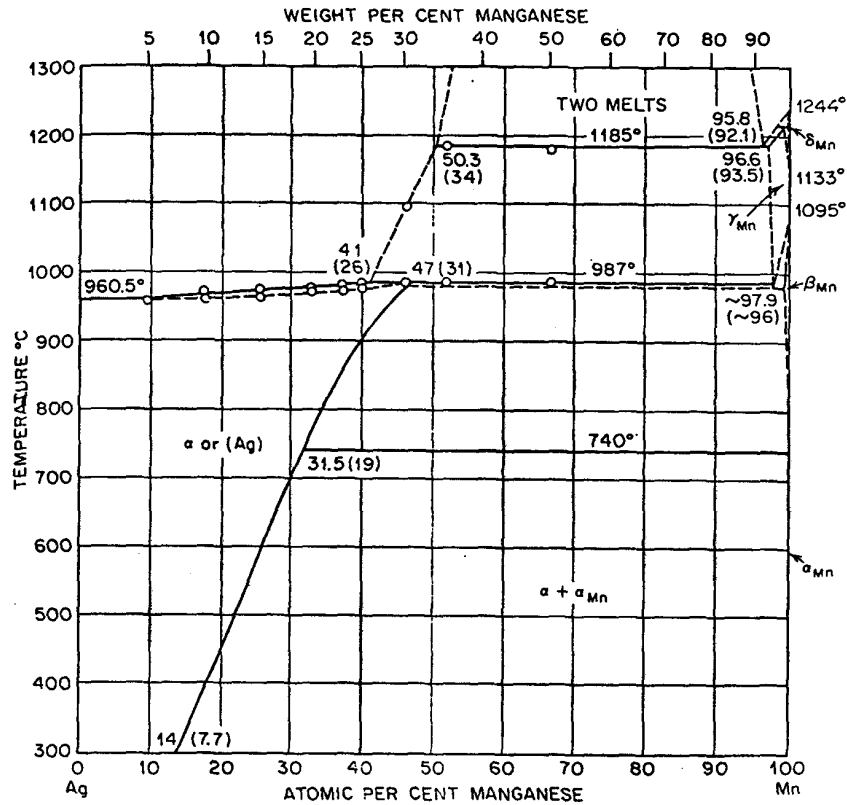


(ค) ขั้วไฟฟ้าคาโลเมล⁽⁴³⁾
(Saturated Calomel Electrode ; SCE)

รูปที่ 4.7 ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิดต่างๆ

การตรวจสอบพฤติกรรมการกัดกร่อน ทำได้โดยต่อเซลล์ให้ครบวงจร จะได้เซลล์กัลวานิก (galvanic cell) ชนิด 3 ขั้ว ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode; RE) ขั้วไฟฟ้าวัดกระแส

(counter electrode; CE) และขั้วไฟฟ้าโลหะทดสอบ (working electrode; WE) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงใช้สำหรับวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเซลล์ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่นิยมใช้ แสดงดังรูปที่ 4.7

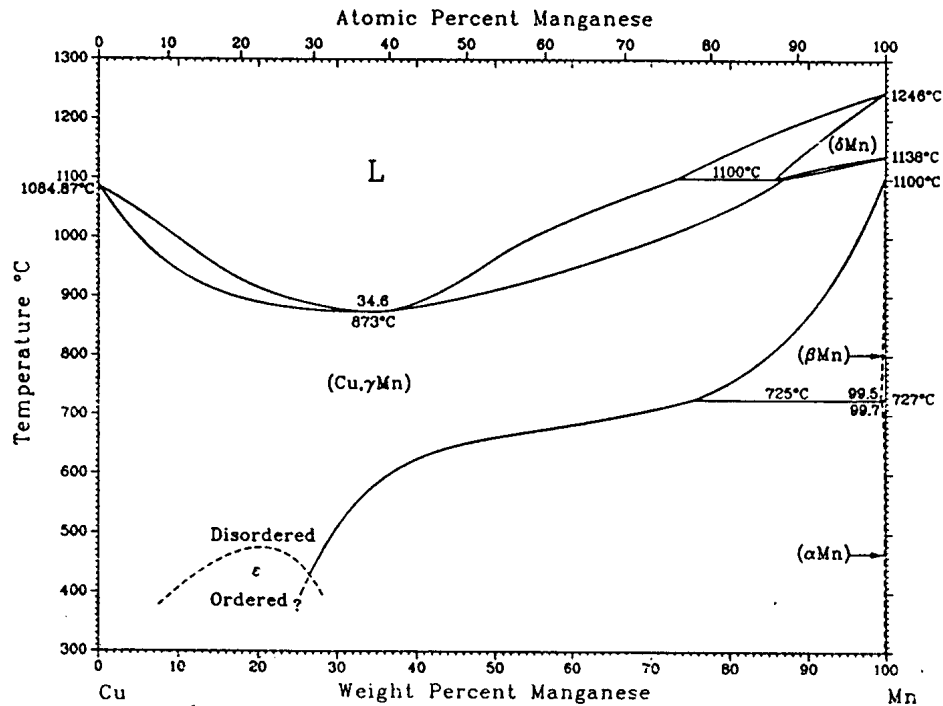


รูปที่ 4.8 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน – แมงกานีส

4.5.3 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน – แมงกานีส⁽⁴⁵⁾

รูปที่ 4.8 แสดงแผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน – แมงกานีส จากรูปจะเห็นว่าแมงกานีสสามารถละลายในเงิน เป็นสารละลายของแข็งได้เป็นอย่างดี และความสามารถในการละลายจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิ 300°C แมงกานีสสามารถละลายในเงินได้ถึง 7.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และละลายได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 987°C แมงกานีสจะสามารถละลายในเงินได้ถึง 31 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

Cu-Mn



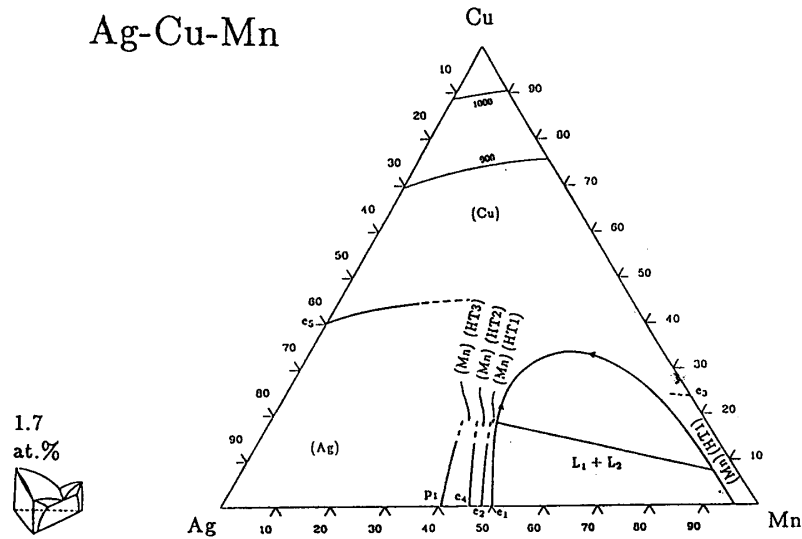
รูปที่ 4.9 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบทองแดง – แมงกานีส⁽⁴⁶⁾

4.5.4 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบทองแดง – แมงกานีส

สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้ ธาตุแมงกานีสที่ใช้ อยู่ในรูปโลหะผสม 50%Cu – 50%Mn โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมโลหะผสมเงิน – ทองแดง – แมงกานีส คือ 1100°C ซึ่งจากแผนภูมิสมดุลเฟสระบบทองแดง – แมงกานีส ดังรูปที่ 4.9 ที่ส่วนผสม 50%Cu – 50%Mn โดยน้ำหนัก พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 970°C ดังนั้นอุณหภูมิ 1030°C ที่ใช้ในการหลอมโลหะในการทดลองนี้ สามารถหลอมโลหะผสมเงิน – ทองแดง – แมงกานีส เป็นของเหลวได้ทั้งหมด ถึงแม้ว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของแมงกานีส จะสูงถึง 1245°C ก็ตาม

4.5.5 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน – ทองแดง – แมงกานีส

โลหะผสมเงิน – ทองแดง – แมงกานีส ที่ใช้ในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ จะมีส่วนผสมอยู่ในช่วงมุมล่างซ้ายของแผนภูมิสมดุลเฟส ดังรูปที่ 4.10 โดยโลหะทั้งสามชนิดมีคุณสมบัติทางกายภาพและปฏิกิริยาแสดงดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.10 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน – ทองแดง – แมงกานีส⁽⁴⁷⁾

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของเงิน ทองแดง และแมงกานีส⁽⁴⁸⁾

ธาตุ	สัญลักษณ์	เลขอะตอม	น้ำหนักอะตอม	จุดหลอมเหลว °C	จุดเดือด °C	ความหนาแน่นที่ 20°C	รัศมีอะตอม (nm)	โครงสร้างผลึกที่ 20°C
เงิน	Ag	47	107.87	961	2210	10.5	0.144	FCC
ทองแดง	Cu	29	63.54	1083	2595	8.96	0.128	FCC
แมงกานีส	Mn	25	54.938	1245	2150	7.43	0.118	Cubic*

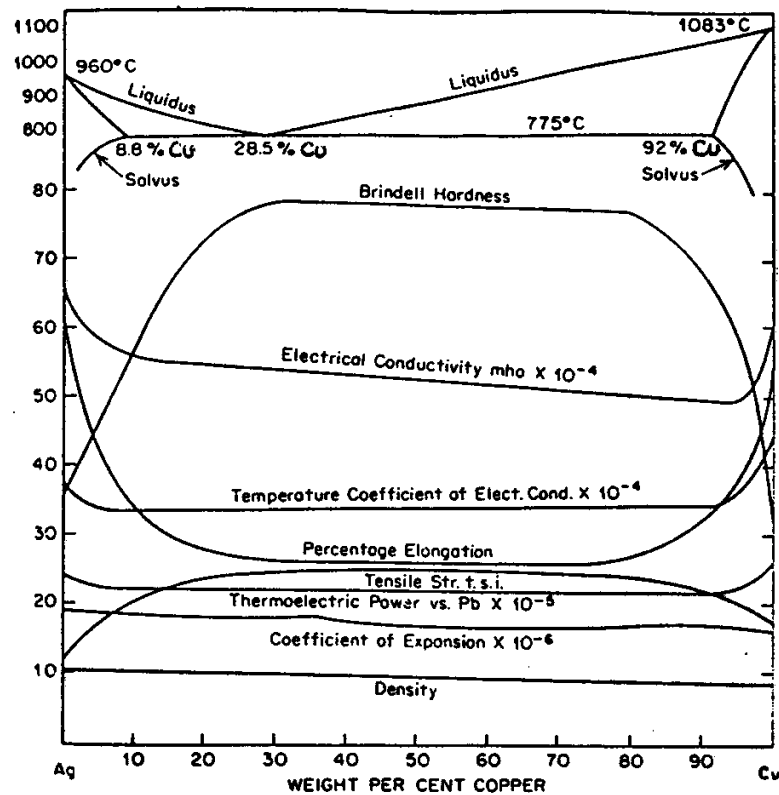
* ที่อุณหภูมิอื่น จะมีโครงสร้างผลึกแบบอื่น

4.5.6 คุณสมบัติทางกล

โลหะผสมระหว่างเงินและทองแดง ที่ใช้ในทางการค้าส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงไฮโปยูเทคติก ซึ่งมีปริมาณทองแดงต่ำกว่า 28.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยโลหะผสมเงินและทองแดงที่ใช้กันมานานอย่างกว้างขวาง คือ โลหะเงินสเตอร์ลิง ที่มีส่วนผสมของเงินบริสุทธิ์ 92.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และที่เหลือ 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นทองแดง

จากรูปที่ 4.11 ที่ส่วนผสมไฮโปยูเทคติกของโลหะผสมเงินและทองแดง แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีปริมาณทองแดงในเงินสูงขึ้น จะทำให้โลหะผสมมีค่าความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness) และค่า

ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ที่สูงขึ้น แต่ปริมาณทองแดงที่เพิ่มขึ้นนี้ จะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation) ลดลง และส่งผลให้ค่าความเหนียวลดลงด้วย



รูปที่ 4.11 คุณสมบัติต่าง ๆ ของโลหะระบบเงิน - ทองแดง⁽⁴⁹⁾

กลไกที่ทำให้เงินสเตอร์ลิงมีความแข็งแรงสูงกว่าเงินบริสุทธิ์ คือ การเพิ่มความแข็งแรงโดยการละลายของธาตุในสารละลายของแข็ง (Solid solution hardening) และการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน (Precipitation hardening) โดยการอบชุบความร้อน (heat treatment) ในลักษณะต่าง ๆ จะทำให้ได้โครงสร้างและสมบัติที่แตกต่างกันไป โดยหลังจากกระบวนการแข็งตัวของโลหะเสร็จสิ้น โลหะเงินสเตอร์ลิงเย็นลงถึงอุณหภูมิห้อง Cu-rich phase จะตกตะกอนแยกตัวออกจาก Ag-rich phase เนื่องจากความสามารถในการละลายของทองแดงจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง และหากทำการชุบแข็งอย่างรวดเร็วขณะโลหะกำลังแข็งตัว จะสามารถยับยั้งการตกตะกอนของทองแดงได้ โดย Cu-rich ที่ได้จะมีขนาดเล็กมาก และสามารถละลายกลับไปในสารละลายได้เมื่อให้ความร้อนเหนืออุณหภูมิ solvus ที่ประมาณ 745°C (1373°F) โดยกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนของเงินสเตอร์ลิง อธิบายได้ดังนี้⁽⁵⁰⁾

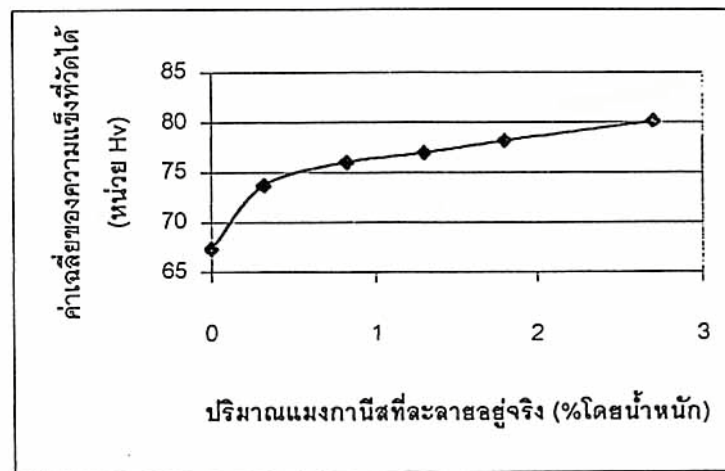
1) การทำให้เป็นโลหะเนื้อเดียว (Homogenization) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 745°C จะได้โลหะผสมที่เป็นสารละลายของแข็งอย่างสมบูรณ์

2) เมื่อชุบแข็งอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิห้อง จะช่วยป้องกันการตกตะกอนของ Cu-rich phase ทำให้เงินสเตอร์ลิงมีความแข็งแรงสูงขึ้น (หากโลหะเย็นตัวช้า โลหะที่ตกตะกอนจะมีเกรนขนาดใหญ่ ไม่สามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงได้)

3) การให้ความร้อนแก่เงินสเตอร์ลิงอีกครั้ง เรียกว่าการบ่มเพิ่มความแข็งแรง (aging) สำหรับเงินสเตอร์ลิงมักบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิประมาณ 300°C โดยจะเกิดการตกตะกอนของ Cu-rich ที่มีขนาดเล็กมาก สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้

จากการศึกษาพบว่าเงินสเตอร์ลิงสามารถเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนได้ โดยให้ความร้อนแก่เงินสเตอร์ลิงที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา $\frac{1}{2}$ - 1 ชั่วโมง แล้วชุบแข็ง (quench) ในน้ำ หลังจากนั้นบ่มเพิ่มความแข็งแรง (aging) ที่ 300°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้เงินสเตอร์ลิงที่มีความแข็งแรงสูง ถึง 145 HV⁽⁵¹⁾

โครงการทางวิศวกรรมของนายธนวัฒน์ เมืองมั่น และนายสุทธิ สุอำพัน ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของธาตุแมงกานีสต่อความแข็งแรงของเงินสเตอร์ลิง โดยการเติมธาตุแมงกานีสในปริมาณต่าง ๆ กัน คือ 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณธาตุแมงกานีสที่เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้เงินสเตอร์ลิงมีความแข็งแรงสูงขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุแมงกานีสที่ละลายอยู่จริง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) กับค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงที่วัดได้ (หน่วย HV) ในสภาพหล่อ⁽⁵³⁾

โลหะผสมระหว่างเงินและแมงกานีส จะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณแมงกานีสสูงขึ้น จนถึง 20 เปอร์เซ็นต์ แล้วความแข็งแรงจะไม่เพิ่มขึ้นอีก ซึ่งคุณสมบัติทางกลต่าง ๆ ของโลหะผสมเงิน - แมงกานีส แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงคุณสมบัติทางกลต่าง ๆ ของโลหะผสมเงินและแมงกานีส⁽⁵⁴⁾

ปริมาณ แมงกานีส (%)	ค่าความแข็ง (หน่วยวิกเกอร์)		ความต้านทานแรง ดึง (MPa)		ความเค้นจุด คราก (MPa)		เปอร์เซ็นต์การ ยืดตัว (%)		ค่าความต้านทานไฟ ฟ้า ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	
	อบ อ่อน	รีด เย็น	อบ อ่อน	รีดเย็น	อบ อ่อน	รีดเย็น	อบ อ่อน	รีด เย็น	อบ อ่อน	รีดเย็น
2.03	32	69	157.91	217.15	47.17	215.01	41	8.0	8.6	9.1
6.62	46	85	189.92	262.31	68.18	249.81	32	4.0	18.2	19.4
16.16	86	122	291.50	403.53	144.72	386.17	23	2.5	39.7	37.9
19.82	86	127	303.31	594.24	162.12	377.83	18	2.0	43.2	39.6

4.6 ระเบียบวิธีการวิจัย

4.6.1 วัสดุดิบ

4.6.1.1 เงินบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์

4.6.1.2 เม็ดโลหะทองแดงบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์

4.6.1.3 แท่งโลหะผสมทองแดงและแมงกานีส : 50%Cu – 50%Mn โดยน้ำหนัก

4.6.2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

4.6.2.1 อุปกรณ์ในการทำแม่พิมพ์ยาง

4.6.2.1.1 กรอบอะลูมิเนียมวัดขนาดแม่พิมพ์ (aluminium mold frame)

4.6.4.1.2 ยางสำหรับทำแม่พิมพ์ (mold rubber)

4.6.4.1.3 มีดผ่าแม่พิมพ์ (mold knife)

4.6.4.1.4 หัวจุกทางน้ำโลหะเข้า (sprue former)

4.6.4.1.5 ต้นแบบตัวเรือน (jewelry model)

4.6.4.1.6 เครื่องอัดแม่พิมพ์ยาง (vulcanizer machine)

4.6.2.2 อุปกรณ์ในการหล่อเทียนและติดต้น

4.6.2.2.1 เครื่องฉีดเทียน (wax injector)

4.6.2.2.2 เทียน (wax)

4.6.2.2.3 สเปรย์ แป้ง และแปรงสำหรับทำความสะอาดแม่พิมพ์ยาง

4.6.2.2.4 ฐานยาง (sprue base)

4.6.2.2.5 หัวแรงไฟฟ้า

4.6.2.3 อุปกรณ์ในการทำแม่พิมพ์ในหล่อและอบเผา

4.6.2.3.1 กระบอกล่อ

4.6.2.3.2 ปูนปลาสเตอร์หล่อแบบต้นเทียน

4.6.2.3.3 ขามผสมปูนหล่อ

4.6.2.3.4 เครื่องผสมปูนหล่อ

4.6.2.3.5 เครื่องสุญญากาศ (vacuum machine)

4.6.2.3.6 กระบอกตวงน้ำและตาชั่ง

4.6.2.3.7 เตาอบแม่พิมพ์

4.6.2.4 อุปกรณ์ในการหลอมและหล่อโลหะ

4.6.2.4.1 เตาหลอมและหล่อแบบสุญญากาศ Yasui VPC (vacuum pressure casting machine) พร้อมอุปกรณ์ที่ใช้ในการหลอมโลหะ

4.6.2.4.2 กระบอกหล่อที่ได้จากการอบเผาแม่พิมพ์ปูนหล่อ

4.6.2.4.3 อุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ในการหลอมและหล่อโลหะ

4.6.2.4.4 เครื่องทำความสะอาดชิ้นงานความดันสูง

4.6.2.5 อุปกรณ์ในการตรวจสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

4.6.2.5.1 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 ถึง ความดัน 17 bar

4.6.2.5.2 วาล์วและท่อที่ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม ท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

กลาง ¼ นิ้ว

4.6.2.5.3 ชุดเซลล์ไฟฟ้าเคมี

4.6.2.5.4 เครื่องโพเทนชิโอแอสตด (Potentiostat)

4.6.2.5.5 ขั้วไฟฟ้าโลหะเงิน (Ag/AgCl (3 M KCl)) ใช้เป็นขั้วไฟฟ้ามาตรฐาน

อ้างอิง

4.6.2.5.6 ขั้วไฟฟ้าโลหะแพลตินัม (Pt)

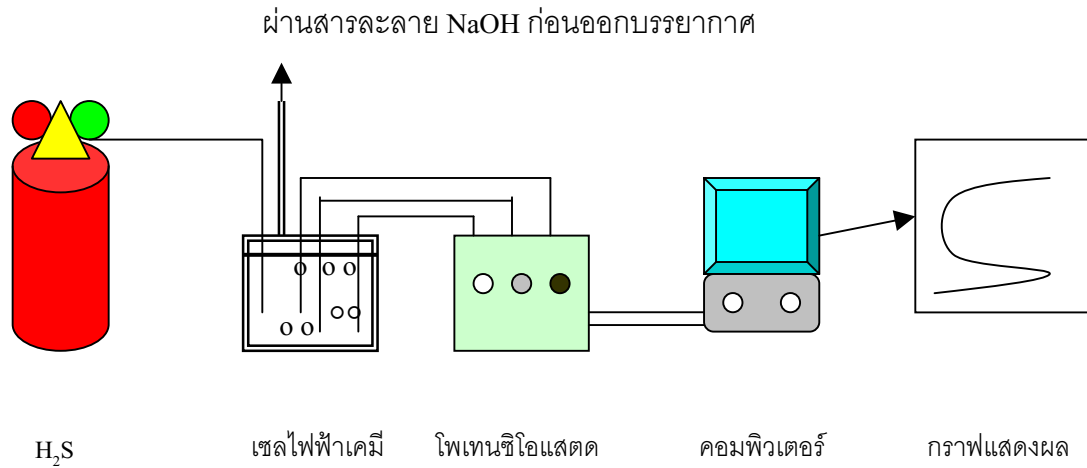
4.6.2.5.7 สารละลายผสมของ NaCl 1%

4.6.2.5.8 ตัวอย่างทดสอบเงินสเตอร์ลิง

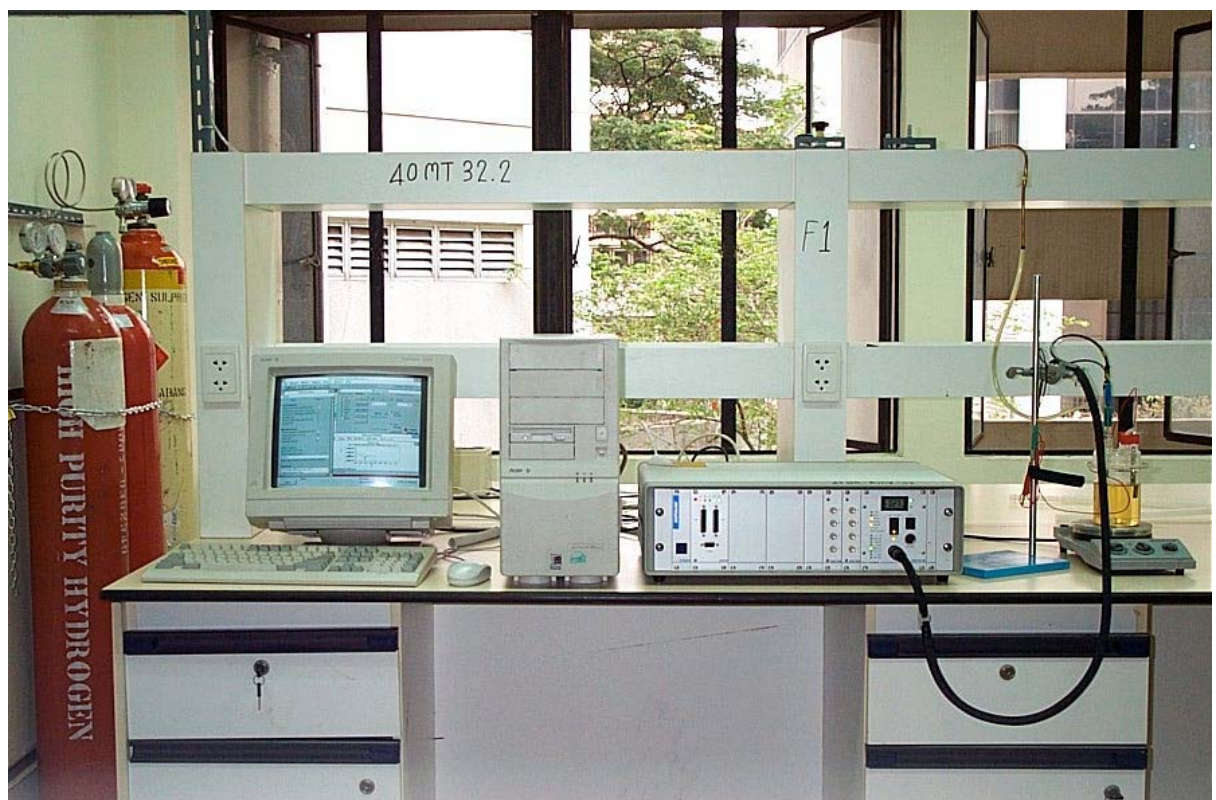
การประกอบชุดทดลอง

รูปที่ 4.13 เป็นแผนภาพลายเส้นแสดงชุดเครื่องมือวัดการทนหมองของเงินสเตอร์ลิง โดยเทคนิคไฟฟ้าเคมี ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากถังเก็บที่ความดัน 17 bar ถูกควบคุมด้วยวาล์วลดความดันผ่านท่อนำก๊าซเข้าสู่สารละลายผสมของ NaCl 1% ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจนอิ่มตัวที่อุณหภูมิห้อง (25°C) เครื่องโพเทนชิโอแอสตดต่อวงจรไฟฟ้ากับขั้วไฟฟ้ามาตรฐาน ขั้วไฟฟ้าแพลตินัม และตัวอย่างทดสอบที่อยู่ในเซลล์ไฟฟ้าเคมี เพื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างทดสอบเทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐาน และวัดกระแสไฟฟ้าของตัวอย่างทดสอบเทียบกับขั้วไฟฟ้าแพลตินัม ส่งข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร์ผ่านวงจรไฟฟ้า

(Interphase Card) โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะเขียนกราฟความสัมพันธ์ออกมาเป็นเส้นกราฟโพลาริเซชัน ในรูปที่ 4.14 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ได้ต่อเรียบร้อยแล้วพร้อมที่จะทำการทดลองต่อไป



รูปที่ 4.13 แผนภาพสายเส้นแสดงชุดเครื่องมือวัดการทนมองของเงินสเตอร์ลิง



รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายชุดอุปกรณ์เครื่องมือวัดการทนมองของเงินสเตอร์ลิง

4.6.2.6 เครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.6.2.6.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope)

4.6.2.6.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope; SEM)

4.6.2.6.3 Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDX)

4.6.2.6.4 เครื่องมือทดสอบแรงดึง (Universal tensile testing machine)

4.6.2.6.5 เครื่องมือทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness testing machine)

4.6.2.6.6 เครื่องมือวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีโดยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชัน (Atomic Absorption Spectroscopy; AAS)

4.6.2.6.7 เครื่องมือวัดค่าสีบนผิววัสดุ (Spectrophotometer)

4.6.2.6.8 เครื่องโพเทนชิโอสแตทที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อน ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า เป็นเครื่องใช้งานหลายวัตถุประสงค์ (General Purpose Electrochemical System; GPES) รุ่น PGSTAT 20

4.6.3 สารเคมี

4.6.3.1 โซเดียมซัลไฟด์นาโนไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)

4.6.3.2 แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH)

4.6.3.3 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

4.6.3.4 กรดกำมะถัน (H_2SO_4)

4.6.3.5 กรดไนตริกเข้มข้น (HNO_3)

4.6.3.6 กรดกัดแก้ว (HF)

4.6.3.7 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)

4.6.3.8 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

4.6.3.9 ผงเพชร (diamond paste) ขนาด 3, 1 และ $\frac{1}{4}$ ไมครอน

4.6.3.10 แอลกอฮอล์

4.6.3.11 น้ำกลั่น

4.7 ขั้นตอนการทดลอง

ในแต่ละส่วนของโลหะทั้ง 8 ชุด ทำการทดลองดังนี้

4.7.1 นำต้นแบบตัวเรือนลักษณะแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ทำจากโลหะเงินสเตอร์ลิง ขนาดกว้าง 9 มิลลิเมตร ยาว 26 มิลลิเมตร และหนา 1.5 มิลลิเมตร มาทำแม่พิมพ์ยาง เพื่อใช้ในการฉีดเทียนและนำไปหล่อต่อไป

4.7.2 ฉีดเทียนที่หลอมละลาย ให้เข้าไปในแม่พิมพ์ยางด้วยเครื่องฉีดเทียน ได้แบบเทียนลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดดังข้อ 4.7.1 จำนวน 60 ชิ้น

4.7.3 นำแบบเทียน (wax pattern) ที่ได้มาติดต้นเทียนเพื่อจัดให้เป็นกลุ่มอย่างมีระเบียบ เพื่อสามารถหล่อขึ้นงานได้ครั้งละจำนวนมาก

4.7.4 ชั่งน้ำหนักต้นเทียนที่ได้ เพื่อนำไปคำนวณหาส่วนผสมโลหะที่ต้องการหล่อ

4.7.5 นำต้นเทียนจากข้อ 4.7.4 ใส่ในกระบะบอกหล่อ แล้วดวงอัตราส่วนระหว่างปูนหล่อและน้ำให้เหมาะสม โดยให้น้ำมีน้ำหนัก 37 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปูนหล่อ

4.7.6 ผสมปูนหลอกับน้ำด้วยเครื่องผสมปูนหล่อ แล้วดูดอากาศออกจากเนื้อปูนหล่อด้วยเครื่องสุญญากาศ (vacuum machine) หลังจากนั้นเทปูนลงในกระบะบอกหล่อ แล้วดูดอากาศออกอีกครั้ง

4.7.7 รอให้กระบะบอกปูนหล่อแห้งโดยทิ้งไว้ในสภาวะปกติ แล้วนำกระบะบอกปูนหล่อเข้าเตาอบเผาแม่พิมพ์ปูนหล่อ เพื่อขจัดเทียนออกจากแม่พิมพ์ปูนหล่อ โดยเพิ่มอุณหภูมิเตาขึ้นช้าๆ และคงที่ไว้ที่อุณหภูมิ 580°C ใช้เวลาในการอบเผาทั้งสิ้นประมาณ 12 ชั่วโมง

4.7.8 เตรียมส่วนผสมและอุปกรณ์ในการหลอมและหล่อโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงทั้งหมด 8 ชุด โดยชั่งน้ำหนักเม็ดเงินบริสุทธิ์ 99.99% เม็ดทองแดงบริสุทธิ์ 99.99% และโลหะผสมทองแดง – แมงกานีส 50 : 50 โดยน้ำหนัก ให้มีปริมาณแมงกานีส ดังนี้ 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำหนักที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4.3

4.7.9 หลอมและหล่อโลหะผสมที่ละชุดจนครบ 8 ชุด ด้วยเครื่องหลอมและหล่อแบบสุญญากาศ Yasui VPC โดยกวนน้ำโลหะขณะโลหะหลอมละลาย แล้วหล่อที่อุณหภูมิ 990°C สำหรับโลหะผสมที่ไม่ได้เติมแมงกานีส และ $1,030^{\circ}\text{C}$ สำหรับโลหะผสมแมงกานีส

4.7.10 นำแม่พิมพ์ออกจากเครื่องหล่อโลหะ ทิ้งไว้ให้โลหะเย็นตัวลง ประมาณ 30 นาที แล้วนำแม่พิมพ์ไปทำความสะอาดขึ้นงานหล่อด้วยเครื่องฉีดน้ำความดันสูง เพื่อทำลายปูนหล่อออกจากกระบะบอกหล่อ

4.7.11 นำต้นขึ้นงานโลหะที่ได้ทำความสะอาดด้วยการจุ่มกรดกัดแก้วเพื่อกัดผิวขึ้นงานให้สะอาด

4.7.12 ตัดแต่งและขัดขึ้นงาน เพื่อนำไปทดสอบ วิเคราะห์คุณสมบัติ และสรุปผลต่อไป

ตารางที่ 4.3 แสดงส่วนผสมของโลหะเงินสเตอร์ลิง

โลหะผสม ชุดที่	ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์)			น้ำหนักที่ใช้ (กรัม)		
	เงิน	ทองแดง	แมงกานีส	เงิน	ทองแดง	ทองแดง - แมงกานีส
1	92.5	7.5	0	185	15	0
2	92.5	7.0	0.5	185	13	2
3	92.5	6.5	1.0	185	11	4
4	92.5	6.0	1.5	185	9	6
5	92.5	5.5	2.0	185	7	8
6	92.5	5.0	2.5	185	5	10
7	92.5	4.5	3.0	185	3	12
8	92.5	4.0	3.5	185	1	14

หมายเหตุ : ส่วนผสมนี้เป็นอัตราส่วนเปรียบเทียบน้ำหนักของเงิน ทองแดง และทองแดง - แมงกานีส

ถ้านำหนักทั้งหมดที่ใช้ในการหลอมและหล่อแต่ละชุดเท่ากับ 200 กรัม

4.8 วิธีการวิเคราะห์และวิธีการตรวจสอบ

4.8.1 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุเงิน ทองแดง และแมงกานีสด้วยเครื่องมือ Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) ส่งชิ้นตัวอย่างทดสอบไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเงิน ทองแดง และแมงกานีส ที่กรมวิทยาศาสตร์บริการ และบริษัท dmc² Metals (Thailand) Ltd. ด้วยเครื่องมือ AAS

วิธีการทดสอบหาปริมาณธาตุด้วย AAS ทำได้โดย

4.8.1.1 ชั่งตัวอย่างทดสอบปริมาณ 0.3 กรัม ละลายในกรดไนตริกเข้มข้นจำนวน 10 มิลลิลิตร

4.8.1.2 ทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง จนละลายหมด แล้วใส่ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) ออกให้หมด จากนั้นผสมน้ำให้ได้ปริมาตรรวม 50 มิลลิลิตร

4.8.1.3 วิเคราะห์ปริมาณธาตุโดยนำไปเผาด้วย air-acetylene โดยใช้ความร้อนประมาณ 6,000°C เพื่อให้สารทดสอบเกิดการแตกตัวเป็นอะตอม แล้วทำการกระตุ้นอะตอมให้เข้าสู่สภาวะ excited state เพื่อให้เกิดการคายพลังงานออก

4.8.1.4 วัดค่าพลังงานที่คายออกมาเทียบกับตอนเริ่มต้น จะทำให้ทราบค่าพลังงานส่วนที่ถูกดูดกลืนไป แล้วนำค่าที่ได้มาเทียบกับค่ามาตรฐานของเครื่องมือจะทำให้ทราบว่าชิ้นตัวอย่างทดสอบมีส่วนผสมของโลหะที่ต้องการทราบเป็นปริมาณเท่าใด

4.8.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

4.8.2.1 เตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมของปริมาณแมงกานีสต่างๆ กัน โดยตัดชิ้นงานหล่อแล้วเตรียมผิวโดยขัดผิวชิ้นงานด้วย

กระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ แล้วขัดละเอียด (polishing) ด้วยผงเพชรขนาด 3, 1 และ $\frac{1}{4}$ ไมครอน ตามลำดับ หลังจากนั้นล้างคราบสกปรกด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ แล้วเป่าให้แห้ง

4.8.2.2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) และตรวจสอบปริมาณของธาตุผสมในโครงสร้างที่พบด้วย EDX

4.8.2.3 กัดกรด (etching) ที่ผิวชิ้นงานด้วย $50\% \text{H}_2\text{O}_2 + 25\% \text{NH}_4\text{OH} + 25\% \text{H}_2\text{O}$ โดยปริมาตร เป็นเวลา 5 - 10 วินาที

4.8.2.4 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ที่กำลังขยาย 50, 100, 200 และ 500 เท่า บันทึกภาพตามกำลังขยายที่เหมาะสม

4.8.2.5 วิเคราะห์และสรุปผล

4.8.3 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

4.8.3.1 เตรียมชิ้นงานเพื่อทำการวัดความแข็ง โดยขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ แล้วขัดละเอียดด้วยผงเพชร ขนาด 3, 1 และ $\frac{1}{4}$ ไมครอน ตามลำดับ ล้างคราบสกปรกด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ เป่าให้แห้ง

4.8.3.2 วัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ตามมาตรฐาน ASTM E 92 – 82⁽³¹⁾ ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ระบบดิจิทัล โดยให้น้ำหนักกด 1 กิโลกรัม เป็นเวลา 10 วินาที

4.8.3.3 วัดขนาดรอยกดทั้งสองแกน (d_1 และ d_2) แล้วคำนวณค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (HV) จากสูตรดังสมการ

$$HV = \frac{2P \sin(\alpha/2)}{d^2} = \frac{1.8544P}{d^2} \quad (4.8)$$

เมื่อ P = แรงกด (กิโลกรัม)

d = ความยาวเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม 2 ด้าน (d_1 และ d_2) หน่วยเป็นมิลลิเมตร

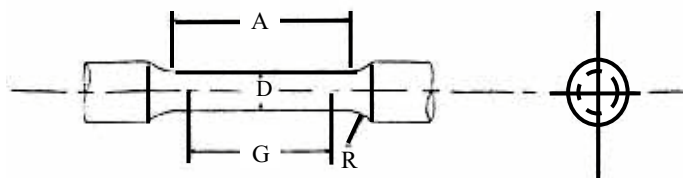
α = มุมระหว่างหน้าของหัวกดเพชรทรงปิรามิด = 136°

4.8.3.4 เปลี่ยนบริเวณกดใหม่ แล้วกดซ้ำตามข้อ 4.8.3.2 และ 4.8.3.3 อีกจำนวน 3 ครั้ง คำนวณค่าความแข็งวิกเกอร์ (HV)

4.8.3.5 หาค่าเฉลี่ยของความแข็ง แล้ววิเคราะห์และสรุปผล

4.8.4 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

4.8.4.1 ตัดชิ้นงานและกลึงขึ้นรูปให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร และขนาด gage length 20 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM E 8M – 96 ดังรูปที่ 4.15



$G = \text{Gage length} = 20.0 \pm 0.1 \text{ mm.}$

$D = \text{Diameter} = 4.0 \pm 0.1 \text{ mm.}$

$R = \text{Radius of fillet, min} = 4 \text{ mm.}$

$A = \text{Length of reduced section, min} = 24 \text{ mm.}$

รูปที่ 4.15 แสดงภาพชิ้นทดสอบแรงดึง

4.8.4.2 นำชิ้นทดสอบไปทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง Universal tensile test ระบบอัตโนมัติ ขนาด 150 kN รุ่น series IX โดยบริษัท Instron Corporation กำหนดความเร็วในการดึง (tension speed) 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ความเค้นจุดคราก (yield strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation)

4.8.4.3 วิเคราะห์และสรุปผล

4.8.5 การทดสอบความต้านทานการหมอง

4.8.5.1 นำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อที่เป็นสีเหลืองผืนผ้าขนาดกว้าง 9 มิลลิเมตร ยาว 26 มิลลิเมตร และหนา 1.5 มิลลิเมตร ทั้ง 8 ส่วนผสม เตรียมผิวชิ้นงานโดยขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ ล้างด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ แล้วเป่าให้แห้ง ชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนการทดสอบ แล้ววัดค่าความสว่าง L^* และค่าสี a^* , b^* ด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น Macbeth color – eye[®] 7000 โดยให้ไฟสีขาว (artificial daylight) D65 มุม 2 องศา

4.8.5.2 แขนงชิ้นงานไว้ในภาชนะปิดที่มีบรรยากาศของไอซัลเฟอร์ ซึ่งได้จากการละลายไฮเดียมซัลไฟด์นาโนไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) ในน้ำจนอิ่มตัว แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีผิวของชิ้นงานเมื่อเวลาผ่านไป 0.5, 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง บันทึกผล

4.8.5.3 ชั่งน้ำหนักชิ้นงานหลังจากทดสอบการหมอง แล้วนำชิ้นงานไปวัดค่าความสว่าง L^* และค่าสี a^* , b^* ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์อีกครั้ง

4.8.5.4 นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิวของชิ้นงาน (DE^*) จะได้ค่า DE^* ของโลหะทดสอบแต่ละชุดที่เวลาทดสอบต่างๆ กัน แล้ววิเคราะห์และสรุปผล

4.8.6 การทดสอบการกัดกร่อนของฟิล์มที่เกิดขึ้นหลังการเติมธาตุผสมแมงกานีส ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์ (Potentiodynamic Technique)

4.8.6.1 นำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อที่มีขนาดกว้าง 9 มิลลิเมตร ยาว 26 มิลลิเมตรและหนา 1.5 มิลลิเมตรทั้ง 8 ส่วนผสม มาเตรียมผิวโดยขัดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ ล้างด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ แล้วเป่าให้แห้ง เก็บไว้ในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4.8.6.2 ติดตั้งเครื่องโพเทนชิโอสแตทกับเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยชิ้นงานต่อกับขั้วไฟฟ้าโลหะทดสอบ (working electrode; WE) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode; RE) คือ ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) และขั้วไฟฟ้าวัดกระแส (counter electrode; CE) คือ แท่งแพลตตินัม (Pt rod) พร้อมทั้งจุ่มเทอร์โมมิเตอร์ในสารละลายเพื่อวัดอุณหภูมิ

4.8.6.3 วัดเส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานในสารละลายที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 °C โดยใช้อัตราการป้อนศักย์ไฟฟ้า (potential scanning rate) 0.1 มิลลิโวลต์ต่อวินาที พื้นที่ของโลหะทดสอบที่จุ่มในสารละลายเท่ากับ 1.49 ตารางเซนติเมตร

4.8.6.4 วัดเส้นโพลาริเซชันในสารละลายเช่นเดียวกับข้อ 4.8.6.2 แต่ปล่อยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสารละลายจนอิ่มตัว

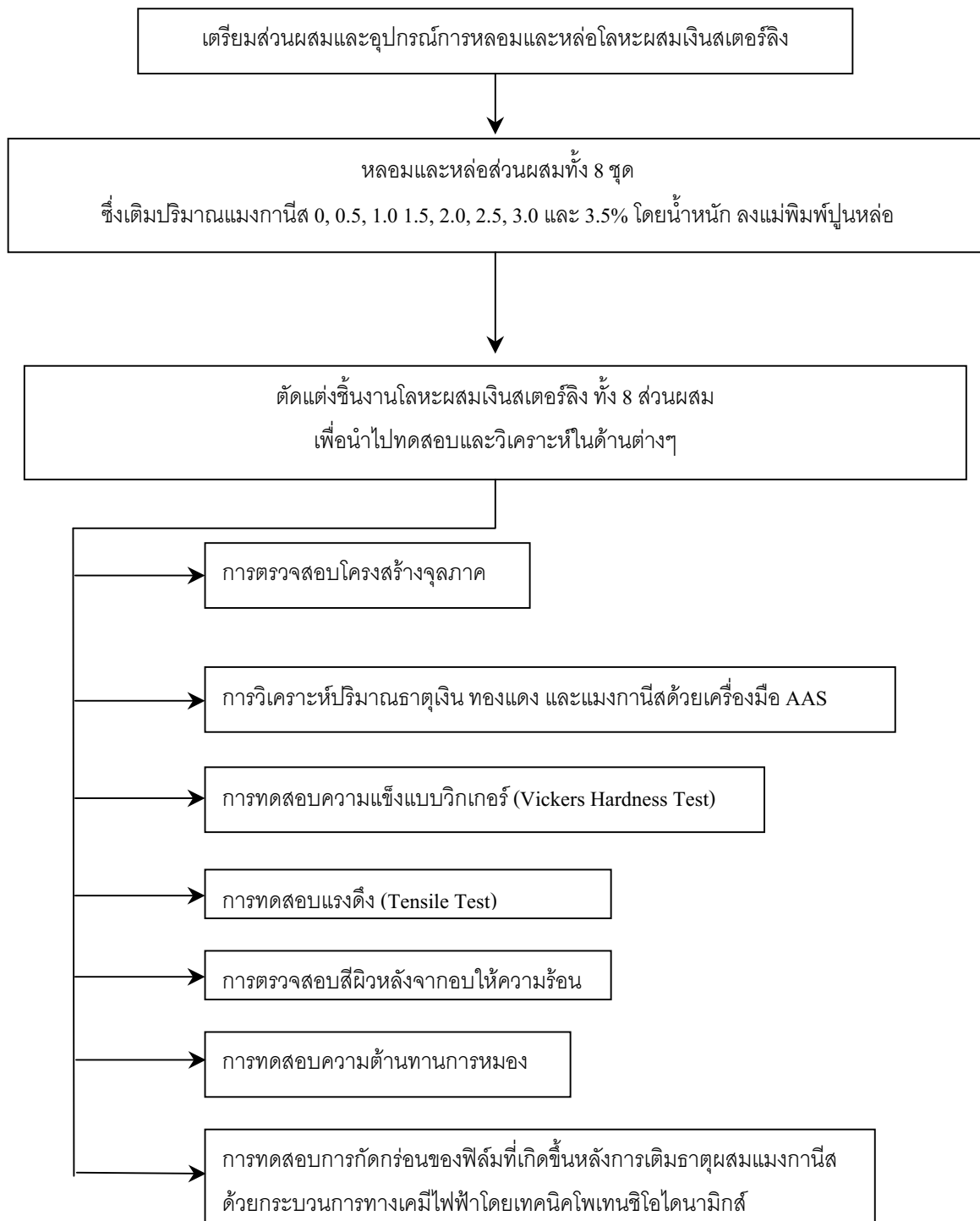
4.8.6.5 หาค่า E_{corr} , E_{pp} , I_p , E_p และ I_{corr} จากเส้นโพลาริเซชันที่ได้ แล้วคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน จากสูตรดังสมการ

$$CR = \frac{3272 \cdot I_{corr} \cdot EW}{d \cdot A} \quad (4.9)$$

เมื่อ	CR	=	corrosion rate (mm/year)
	I_{corr}	=	corrosion current density (A)
	EW	=	equivalent weight (g)
	d	=	density (g/cm ³)
	A	=	surface area (cm ²)

4.8.6.6 วิเคราะห์พฤติกรรมของการกัดกร่อนของโลหะทดสอบและสรุปผล

แผนภูมิกระบวนการทดลอง



4.9 รายงานผลการทดลอง

4.9.1 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 (มีปริมาณแมงกานีสที่ได้จากการตรวจสอบ ส่วนผสมทางเคมี 0, 0.38, 0.76, 1.3, 1.7, 2.1, 2.6 และ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ) หลอม และหล่อโลหะผสมด้วยเตาแบบสุญญากาศ Yasui VPC ที่อุณหภูมิ 990°C สำหรับโลหะเงินสเตอร์ลิง ที่ไม่เติมแมงกานีส ($92.5\%\text{Ag} - 7.5\%\text{Cu}$) และ $1,030^{\circ}\text{C}$ สำหรับโลหะผสมแมงกานีส ชิ้นงานหล่อโลหะผสมที่ได้จากการหล่อและผิวของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 ภาพแสดงชิ้นงานที่ได้จากการหลอมและหล่อแบบสุญญากาศ ของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่เติมปริมาณแมงกานีส 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.17 ภาพแสดงลักษณะผิวของชิ้นงานที่ได้จากการหล่อ

(ก) โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมแมงกานีส

(ข) โลหะผสมที่มีแมงกานีส 0.76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ค) โลหะผสมที่มีแมงกานีส 1.70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(ง) โลหะผสมที่มีแมงกานีส 2.60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.9.2 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง – แมงกานีส

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเงิน ทองแดง และแมงกานีส จากการตรวจสอบด้วยเครื่องมือ Atomic Absorption Spectroscopy แสดงดังตารางที่ 4.4 และปริมาณแมงกานีสที่สูญเสียจากงานหล่อ แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 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 4.5 แสดงส่วนผสมทางเคมีของปริมาณแมงกานีสที่ใช้ในการหล่อ ปริมาณแมงกานีสที่มีอยู่จริง และที่สูญเสียในขณะทำการหล่อ

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

4.9.3 ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางกลในสภาพหลังการหล่อขึ้นรูป (as - cast)

4.9.3.1 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. (ตาราง ค.1) และค่าความแข็งเฉลี่ยเปรียบเทียบกับปริมาณส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง – แมงกานีส แสดงไว้ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 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 ค.1)

4.9.3.2 ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

ทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E 8M – 96 โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง ระบบอัตโนมัติ ขนาด 150 kN รุ่น seriesIX โดยบริษัท Instron Corporation ด้วยความเร็วแรงดึง 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ได้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength; UTS) และค่าความเค้นจุดคราก (yield strength; σ_y) แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบแรงดึงของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส

โลหะผสม ชุดที่	ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)			ความต้านทานแรงดึงสูง สุด* (MPa)	ความเค้นจุดคราก* (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 ค.2)

** ไม่สามารถหาค่าได้ เนื่องจากชิ้นงานทดสอบเสียหายขณะเตรียมชิ้นงานและขณะ
ทดสอบ

4.9.4 ผลการทดสอบความต้านทานการหมอง (Tarnish Resistance)

เตรียมชิ้นงานแต่ละส่วนผสมๆ ละ 5 ชิ้น เพื่อทดสอบในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน คือ 0.5, 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง นำชิ้นงานมาวัดค่าความสว่าง L^* และค่าสี a^* , b^* ด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ หลังจากนั้นแขวนชิ้นงานแต่ละชุดการทดลองไว้ในภาชนะปิดที่ใส่สารละลายอิมมิตัวของโซเดียมซัลไฟด์ เพื่อให้ชิ้นงานอยู่ในบรรยากาศของไอซัลเฟอร์ แล้วนำชิ้นงานมาวัดค่า L^* , a^* และ b^* ด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์อีกครั้ง คำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิวของชิ้นงาน (DE^*) ตามสูตรในสมการที่ (4.6) ค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.18 แสดงภาพชิ้นงานหลังทดสอบความต้านทานในการกันหมอง

ตารางที่ 4.8 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

เวลาทดสอบ (ชั่วโมง)	0%Mn	0.38%Mn	0.76%Mn	1.30%Mn	1.70%Mn	2.10%Mn	2.60%Mn	3.00%Mn
1/2								
1								
2								
3								
4								

รูปที่ 4.18 ภาพแสดงลักษณะชิ้นงานหลังทดสอบความต้านทานในการกันหมอง

4.9.5 ผลการทดสอบการกัดกร่อนของฟิล์มด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยวิธีโพเทนชิโอไดนามิกส์

หลังจากเตรียมชิ้นงานที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อนจำนวน 2 ชุด ชุดละ 8 ส่วนผสม คือ โลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยชุดแรกทดสอบในสารละลายไฮโดรเจนคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และชุดที่ 2 ทดสอบในสารละลายชนิดเดียวกัน แต่ปล่อยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เพื่อให้สารละลายอิ่มตัว ต่อเซลล์ไฟฟ้าโดยชิ้นงานทดสอบอยู่ที่ขั้วไฟฟ้าโลหะทดสอบ (WE) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (RE) เป็น Ag/AgCl และขั้วไฟฟ้าวัดกระแส (CE) เป็นแท่งแพลตตินัม ทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอ ไดนามิกส์ ซึ่งอาศัยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของโลหะทดสอบในสารละลาย โดยเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้ชิ้นงานทดสอบด้วยอัตราการสแกน 0.1 มิลลิโวลต์ต่อวินาที แล้ววัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า (E) และกระแสไฟฟ้า (I) เรียกกราฟนี้ว่าเส้นโพลาริเซชัน (แสดงในภาคผนวก จ) หาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ศักย์ไฟฟ้าพาสซีเวชันปฏิกิริยา (E_{pp}) ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (E_p) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มพาสซีฟ (I_p) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) จากเส้นโพลาริเซชัน แล้วนำค่า I_{corr} ไปคำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate) จากสูตรในสมการที่ (4.9) หรือคำนวณได้โดยตรงจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณที่ต่อกับเครื่องโพเทนชิโอสเตท ได้ค่าดังตารางที่ 4.9 และ 4.10 เพื่อนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะทดสอบต่อไป

ตารางที่ 4.9 แสดงค่า E_{corr} , E_{pp} , E_p , I_p , I_{corr} และ Corrosion Rate ที่วัดได้จากเส้นโพลาริเซชันของชิ้นทดสอบในสารละลายไฮโดรเจนคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

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 ($\times 10^{-2}$ 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

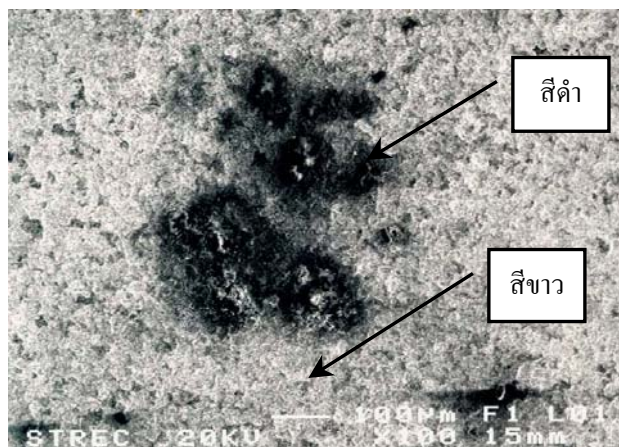
ตารางที่ 4.10 แสดงค่า E_{corr} , E_{pp} , E_p , I_{corr} และ Corrosion Rate ที่วัดได้จากเส้นโพลาริเซชันของชิ้นทดสอบ
ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)	E_{corr} (mV)	E_{pp} (mV)	E_p (mV)	I_{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

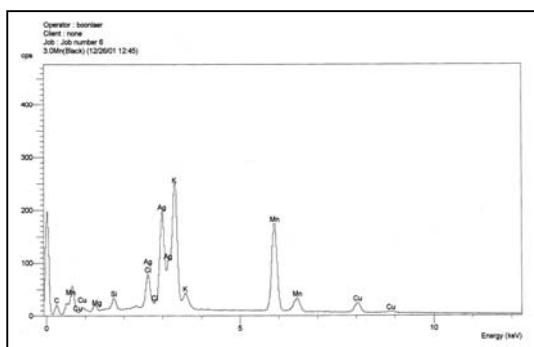
4.10 อภิปรายผลการทดลอง

4.10.1 ผลจากการหลอมและหล่อโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส

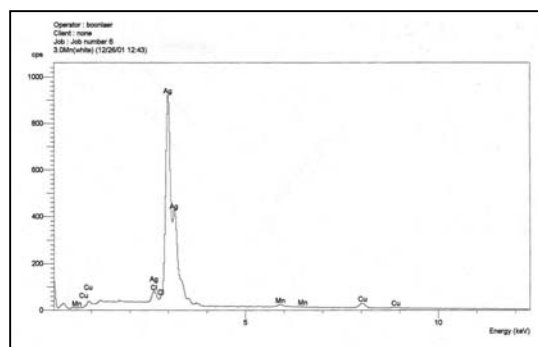
ชิ้นงานที่ได้จากหลอมและหล่อแบบสุญญากาศของ โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 0, 0.38, 0.76, 1.30, 1.70, 2.10, 2.60 และ 3.00 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนักตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.16 เมื่อสังเกตและตรวจสอบด้วยตาเปล่าในชิ้นงานหล่อ พบว่าผิวหน้าด้านล่างของโคนต้นตอบริเวณรูเท (sprue) ที่เป็นทางเข้าของโลหะหลอมเหลวมีลักษณะแตกต่างกัน กล่าวคือ บริเวณผิวหน้าด้านล่างของโลหะผสมจะเรียบขึ้นเมื่อมีปริมาณแมงกานีสสูงขึ้น แสดงว่าธาตุแมงกานีสที่เพิ่มขึ้น มีส่วนช่วยเพิ่มความสามารถในการเปียก (wettability) ให้แก่โลหะผสม นอกจากนี้จากการสังเกตลักษณะสีผิว พบว่าโลหะผสมแมงกานีสจะมีผิวเป็นสีชมพูเข้มขึ้นเมื่อเติมธาตุแมงกานีสสูงขึ้น และยังพบจุดดำบนผิวชิ้นงานที่มีธาตุแมงกานีสผสมตั้งแต่ 1.70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นไป ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.17 โดยจุดดำจะมีสีเข้มขึ้นเมื่อมีธาตุแมงกานีสสูงขึ้น จากการตรวจสอบปริมาณธาตุบริเวณผิวที่เกิดจุดสีดำด้วย EDX (รูปที่ 4.19) พบว่ามีธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ คาร์บอน ออกซิเจน แมงกานีส เงิน คลอรีน และฟลูออรีน ซึ่งจะมีปริมาณธาตุแมงกานีสค่อนข้างสูง ดังกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.20 (ก) ซึ่งผิวโลหะผสมน่าจะทำปฏิกิริยากับบรรยากาศขณะหล่อและหลังการหล่อเสร็จสิ้นแล้ว และเมื่อตรวจสอบบริเวณสีขาวจะแสดงพีก (peak) ของโลหะเงินในปริมาณสูง ดังรูปที่ 4.20 (ข)



รูปที่ 4.19 ภาพแสดงจุดบัดบัดบนผิวโลหะผสม 4.40%Cu – 2.60%Mn – balance of Ag
ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) กำลังขยาย 100 เท่า



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.20 กราฟแสดงผลจากการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมบนผิวของโลหะผสม
4.40%Cu – 2.60%Mn – balance of Ag (ก) บริเวณสีดำ (ข) บริเวณสีขาว

4.10.2 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส

ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีหลังการหล่อ แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 โดยโลหะผสมทั้ง 8 ชุด มีปริมาณธาตุแมงกานีสก่อนหลอมและหล่อ 0 – 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อตรวจสอบส่วนผสมหลังการหล่อ พบว่าปริมาณธาตุแมงกานีสที่ตรวจสอบได้ในโลหะผสมลดลงจากปริมาณแมงกานีสที่ใช้ในการหล่อ เหลือธาตุแมงกานีสเพียง 0 – 3% โดยน้ำหนัก ปริมาณธาตุแมงกานีสที่สูญเสีย มีค่าตั้งแต่ 0 – 0.5% โดยน้ำหนัก (ดังตารางที่ 4.5) ซึ่งถ้าเติมปริมาณแมงกานีสในโลหะผสมมาก ปริมาณแมงกานีสที่สูญเสียก็มีมากขึ้น ยกเว้นในโลหะผสมชุดที่ 3 ที่ใช้ธาตุแมงกานีสในการหล่อ 1

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่สูญเสียไปในขั้นตอนการหล่อสูงกว่าในโลหะชุดที่ 4 ที่มีการเติมธาตุแมงกานีส 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากส่วนผสมทางเคมีทั้ง 8 ชุด ถึงแม้ปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่ตรวจสอบได้จะไม่เท่ากับปริมาณธาตุที่เติมลงไป แต่แนวโน้มของปริมาณธาตุทองแดงที่ลดลงและแมงกานีสที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับปริมาณธาตุที่เติมลงไปก่อนหล่อ คือมีสัดส่วนที่สามารถนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบได้

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

4.10.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส ในสภาพหล่อ โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมหลังจากกัดกรด แสดงในภาพผนวก จ. รูปที่ จ.1, จ.2 และ จ.3 เป็นภาพกำลังขยาย 50 100 และ 200 เท่าตามลำดับ และโครงสร้างจุลภาคก่อนการกัดกรด ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) แสดงดังรูปที่ 4.21 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิงทุกอัตราส่วนผสมที่ได้จากการหล่อ มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ (dendrite) พบโครงสร้างหลัก 2 เฟส คือ โครงสร้างเนื้อพื้น (matrix) และโครงสร้างยูเทคติก (eutectic structure) โดยโครงสร้างเนื้อพื้นจะมีเงินเป็นองค์ประกอบสูง เรียก Ag – rich solid solution phase (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 แสดงไว้ในภาพผนวก ข. ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยไม่มีชิ้นงานมาตรฐานเปรียบเทียบ

4.10.3.1 โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมแมงกานีสมีส่วนผสมทางเคมี 7.65%Cu – balance of Ag (รูปที่ 4.21 (ก) และ (ข)) พบว่าโครงสร้างเนื้อพื้นเป็น Ag – rich solid solution (α - phase) มีลักษณะเป็นพื้นสีขาว จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วย EDX ที่บริเวณนี้พบปริมาณธาตุต่าง ๆ ดังนี้ 95.53%Ag – 4.47%Cu โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยายสูงขึ้น (2000 เท่า) ดังรูปที่ 4.21 (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. พบว่าตรงบริเวณโครงสร้างยูเทคติกและโครงสร้างเนื้อพื้น จะมีปริมาณแมงกานีสในโครงสร้างสูงขึ้นแปรผันตามปริมาณแมงกานีสที่เติมลงไป สำหรับบริเวณอนุภาคสีดำบนโครงสร้างยูเทคติกจะมีปริมาณทองแดงค่อนข้างสูง ซึ่งสูงกว่าปริมาณเงินที่มีอยู่มาก แสดงว่าธาตุทองแดงจะเป็นองค์ประกอบหลักของอนุภาคสีดำที่อยู่บนโครงสร้างยูเทคติก

4.10.3.2 โลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณส่วนผสมเคมี 6.97%Cu – 0.38%Mn – balance of Ag มีโครงสร้างดังรูปที่ 4.21 (ค) และ (ง) ที่กำลังขยาย 100 เท่า (รูปที่ 4.21 (ค)) จะเห็นลักษณะโครงสร้างเดนไดรต์ที่ได้จากงานหล่อขึ้นรูปเช่นเดียวกับโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมแมงกานีส โดยบริเวณโครงสร้างเดนไดรต์ที่เป็นโครงสร้างเนื้อพื้น จะเป็น Ag – rich phase และเมื่อตรวจสอบด้วย EDX จะพบปริมาณ สัดส่วนของธาตุดังนี้ Ag : Cu : Mn = 92.46 : 7.23 : 0.31 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และพบโครงสร้างยูเทคติกลักษณะ Irregular shape (รูปที่ 4.21 (ง)) เช่นเดียวกับที่พบในโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมแมงกานีส บริเวณรอบนอกของโครงสร้างยูเทคติกมีลักษณะ Interdendritic shrinkage กระจายอยู่รอบ ๆ 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

4.10.3.3 โลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณทองแดงและแมงกานีส 6.63 และ 0.76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่เหลือเป็นธาตุเงิน จะพบโครงสร้างลักษณะเดนไดรต์และโครงสร้างยูเทคติกลักษณะ irregular shape ค่อนข้างยาวกระจายอยู่ทั่วโครงสร้างเนื้อพื้น แสดงดังรูปที่ 4.21 (ฉ) จากการตรวจสอบส่วนผสมด้วย EDX ปริมาณธาตุต่าง ๆ บนโครงสร้างเนื้อพื้น เท่ากับ 93.11%Ag – 6.22%Cu – 0.67%Mn และบริเวณโครงสร้างยูเทคติกควมมีส่วนผสม คือ 71.74%Ag – 27.10%Cu – 1.17%Mn

4.10.3.4 โลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณทองแดงและแมงกานีส 6.14 และ 1.30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่เหลือเป็นธาตุเงิน โครงสร้างยูเทคติกที่พบเป็นลักษณะ irregular shape (รูปที่ 4.21 (ซ)) แต่รูปร่างไม่เรียวยาวเหมือนโครงสร้างยูเทคติก บนโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 0.76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณธาตุผสมบริเวณโครงสร้างยูเทคติก (บริเวณ

E) คือ $65.19\%Ag - 32.92\%Cu - 1.88\%Mn$ ปริมาณธาตุของอนุภาคลำในโครงสร้างยูเทคติก คือ $20.96\%Ag - 76.69\%Cu - 2.35\%Mn$ ซึ่งเป็น Cu – rich phase มีธาตุทองแดงอยู่ในสัดส่วนที่สูงมาก

4.10.3.5 โครงสร้างโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมทางเคมี $5.40\%Cu - 1.70\%Mn - \text{balance of } Ag$ แสดงดังรูปที่ 4.21 (ฉ) และ (ญ) ที่กำลังขยาย 100 เท่า พบโครงสร้างเดนไดรต์ที่สังเกตเห็นได้ว่าโครงสร้างเนื้อพื้นสีขาวมีบริเวณกว้างมากขึ้น ($94.16\%Ag - 4.22\%Cu - 1.62\%Mn$) และบริเวณโครงสร้างยูเทคติกจะลดลงเนื่องจากการลดลงของปริมาณทองแดงในโลหะผสม ถึงแม้ปริมาณแมงกานีสที่ละลายอยู่ในโลหะผสมจะเพิ่มขึ้นก็ตาม แต่ก็ยังมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับธาตุหลัก ทำให้พบโครงสร้างยูเทคติกกระจายอยู่ทั่วไปอย่างไม่หนาแน่นนัก ซึ่งธาตุที่มีผลต่อโครงสร้างยูเทคติกนี้ คือ ธาตุทองแดงเนื่องจากสัดส่วนในการเติมธาตุทองแดงต่อธาตุแมงกานีสค่อนข้างสูง รอบนอกของโครงสร้าง ยูเทคติกพบ Interdendritic shrinkage จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วย EDX บริเวณโครงสร้าง ยูเทคติกมีปริมาณธาตุดังนี้ $60.84\%Ag - 36.54\%Cu - 2.61\%Mn$

4.10.3.6 โครงสร้างของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมทางเคมี $4.90\%Cu - 2.10\%Mn - \text{balance of } Ag$ แสดงดังรูปที่ 4.21 (ฎ) และ (ฏ) พบว่าโครงสร้างยูเทคติกในโลหะผสมมีความหนาแน่นลดลง เกิดจากการลดลงของธาตุทองแดงในโลหะผสม และลักษณะโครงสร้างยูเทคติกที่ได้ค่อนข้างกลม โดยจาก EDX พบส่วนผสมทางเคมีที่บริเวณเนื้อพื้นดังนี้ $93.80\%Ag - 4.14\%Cu - 2.05\%Mn$ ปริมาณธาตุต่าง ๆ บริเวณโครงสร้างยูเทคติกรวมเท่ากับ $57.41\%Ag - 39.20\%Cu - 3.39\%Mn$

4.10.3.7 โครงสร้างของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมทางเคมี $4.40\%Cu - 2.60\%Mn - \text{balance of } Ag$ แสดงดังรูปที่ 4.21 (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 โดยอนุภาคลำในโครงสร้าง ยูเทคติกมีส่วนผสม $Ag : Cu : Mn = 15.76 : 78.52 : 5.71$ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งปริมาณทองแดงที่พบสูงกว่าที่พบบนโครงสร้างเนื้อพื้น

4.10.3.8 โลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมทางเคมี $4.00\%Cu - 3.00\%Mn - \text{balance of } Ag$ จะมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคแสดงดังรูปที่ 4.21 (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 ลักษณะโครงสร้างที่ให้เห็นได้ชัดเจนว่าบริเวณกึ่งของเดนไดรต์มีเงินเป็นส่วนผสมทางเคมีสูง และบริเวณโครงสร้างยูเทคติกซึ่งอยู่ระหว่างกึ่งของเดนไดรต์จะมีทองแดงเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนที่ค่อนข้างสูง โดยโครงสร้างยูเทคติกนี้จะมีปริมาณลดลงเมื่อมีปริมาณทองแดงใน

โลหะผสมลดลง ธาตุแมงกานีสที่เติมลงไปโลหะผสมจะเป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้างยูเทคติก ในปริมาณมากกว่าที่พบในโครงสร้างเนื้อพื้น และปริมาณแมงกานีสที่พบในโครงสร้างทั้งสองจะมี ปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณแมงกานีสที่เพิ่มขึ้นในโลหะผสม ซึ่งแมงกานีสจะอยู่ร่วมกับโครงสร้างที่มี ทองแดงเป็นองค์ประกอบมากกว่า

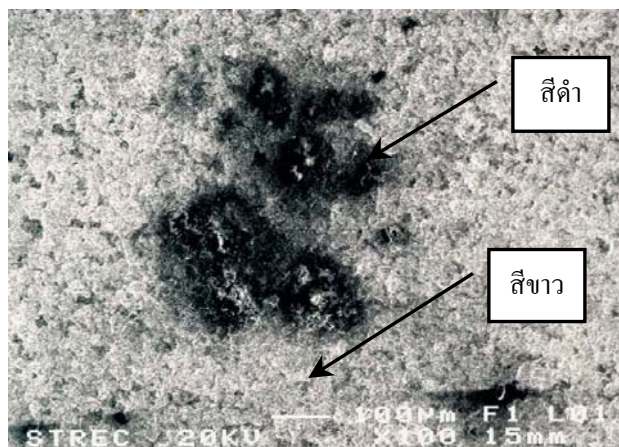
ตารางที่ 4.10 แสดงค่า E_{corr} , E_{pp} , E_p , I_{corr} และ Corrosion Rate ที่วัดได้จากเส้นโพลาริเซชันของชิ้นทดสอบ
ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)	E_{corr} (mV)	E_{pp} (mV)	E_p (mV)	I_{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

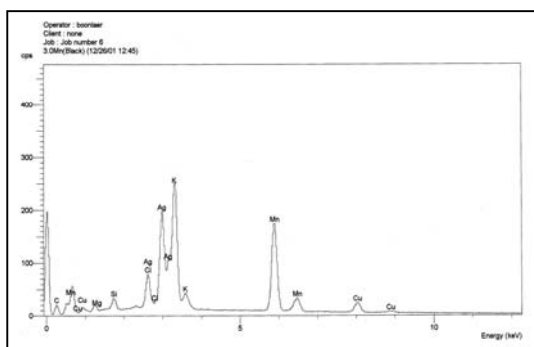
4.10 อภิปรายผลการทดลอง

4.10.1 ผลจากการหลอมและหล่อโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส

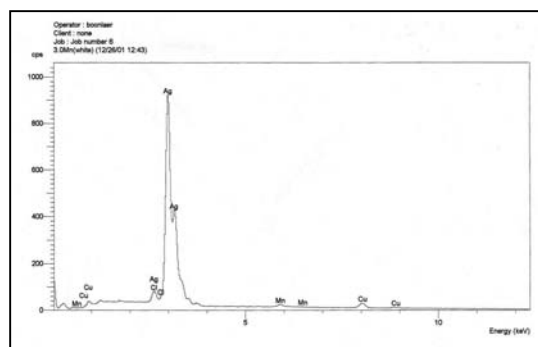
ชิ้นงานที่ได้จากหลอมและหล่อแบบสุญญากาศของ โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 0, 0.38, 0.76, 1.30, 1.70, 2.10, 2.60 และ 3.00 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนักตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.16 เมื่อสังเกตและตรวจสอบด้วยตาเปล่าในชิ้นงานหล่อ พบว่าผิวหน้าด้านล่างของโคนต้นตอบริเวณรูเท (sprue) ที่เป็นทางเข้าของโลหะหลอมเหลวมีลักษณะแตกต่างกัน กล่าวคือ บริเวณผิวหน้าด้านล่างของโลหะผสมจะเรียบขึ้นเมื่อมีปริมาณแมงกานีสสูงขึ้น แสดงว่าธาตุแมงกานีสที่เพิ่มขึ้น มีส่วนช่วยเพิ่มความสามารถในการเปียก (wettability) ให้แก่โลหะผสม นอกจากนี้จากการสังเกตลักษณะสีผิว พบว่าโลหะผสมแมงกานีสจะมีผิวเป็นสีชมพูเข้มขึ้นเมื่อเติมธาตุแมงกานีสสูงขึ้น และยังพบจุดดำบนผิวชิ้นงานที่มีธาตุแมงกานีสผสมตั้งแต่ 1.70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นไป ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.17 โดยจุดดำจะมีสีเข้มขึ้นเมื่อมีธาตุแมงกานีสสูงขึ้น จากการตรวจสอบปริมาณธาตุบริเวณผิวที่เกิดจุดสีดำด้วย EDX (รูปที่ 4.19) พบว่ามีธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ คาร์บอน ออกซิเจน แมงกานีส เงิน คลอรีน และฟลูออรีน ซึ่งจะมีปริมาณธาตุแมงกานีสค่อนข้างสูง ดังกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.20 (ก) ซึ่งผิวโลหะผสมน่าจะทำปฏิกิริยากับบรรยากาศขณะหล่อและหลังการหล่อเสร็จสิ้นแล้ว และเมื่อตรวจสอบบริเวณสีขาวจะแสดงพีก (peak) ของโลหะเงินในปริมาณสูง ดังรูปที่ 4.20 (ข)



รูปที่ 4.19 ภาพแสดงจุดบัดกรีบนผิวโลหะผสม 4.40%Cu – 2.60%Mn – balance of Ag
ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) กำลังขยาย 100 เท่า



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.20 กราฟแสดงผลจากการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมบนผิวของโลหะผสม
4.40%Cu – 2.60%Mn – balance of Ag (ก) บริเวณสีดำ (ข) บริเวณสีขาว

4.10.2 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส

ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีหลังการหล่อ แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 โดยโลหะผสมทั้ง 8 ชุด มีปริมาณธาตุแมงกานีสก่อนหลอมและหล่อ 0 – 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อตรวจสอบส่วนผสมหลังการหล่อ พบว่าปริมาณธาตุแมงกานีสที่ตรวจสอบได้ในโลหะผสมลดลงจากปริมาณแมงกานีสที่ใช้ในการหล่อ เหลือธาตุแมงกานีสเพียง 0 – 3% โดยน้ำหนัก ปริมาณธาตุแมงกานีสที่สูญเสีย มีค่าตั้งแต่ 0 – 0.5% โดยน้ำหนัก (ดังตารางที่ 4.5) ซึ่งถ้าเติมปริมาณแมงกานีสในโลหะผสมมาก ปริมาณแมงกานีสที่สูญเสียก็มีมากขึ้น ยกเว้นในโลหะผสมชุดที่ 3 ที่ใช้ธาตุแมงกานีสในการหล่อ 1

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่สูญเสียไปในขั้นตอนการหล่อสูงกว่าในโลหะชุดที่ 4 ที่มีการเติมธาตุแมงกานีส 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากส่วนผสมทางเคมีทั้ง 8 ชุด ถึงแม้ปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่ตรวจสอบได้จะไม่เท่ากับปริมาณธาตุที่เติมลงไป แต่แนวโน้มของปริมาณธาตุทองแดงที่ลดลงและแมงกานีสที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับปริมาณธาตุที่เติมลงไปก่อนหล่อ คือมีสัดส่วนที่สามารถนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบได้

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

4.10.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส ในสภาพหล่อ โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมหลังจากกั๊กกรด แสดงในภาคผนวก จ. รูปที่ จ.1, จ.2 และ จ.3 เป็นภาพกำลังขยาย 50 100 และ 200 เท่าตามลำดับ และโครงสร้างจุลภาคก่อนการกั๊กกรด ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) แสดงดังรูปที่ 4.21 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิงทุกอัตราส่วนผสมที่ได้จากการหล่อ มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ (dendrite) พบโครงสร้างหลัก 2 เฟส คือ โครงสร้างเนื้อพื้น (matrix) และโครงสร้างยูเทคติก (eutectic structure) โดยโครงสร้างเนื้อพื้นจะมีเงินเป็นองค์ประกอบสูง เรียก Ag – rich solid solution phase (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 ข. ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยไม่มีชิ้นงานมาตรฐานเปรียบเทียบ

4.10.3.1 โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมแมงกานีสมีส่วนผสมทางเคมี 7.65%Cu – balance of Ag (รูปที่ 4.21 (ก) และ (ข)) พบว่าโครงสร้างเนื้อพื้นเป็น Ag – rich solid solution (α - phase) มีลักษณะเป็นพื้นสีขาว จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วย EDX ที่บริเวณนี้พบปริมาณธาตุต่าง ๆ ดังนี้ 95.53%Ag – 4.47%Cu โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยายสูงขึ้น (2000 เท่า) ดังรูปที่ 4.21 (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. พบว่าตรงบริเวณโครงสร้างยูเทคติกและโครงสร้างเนื้อพื้น จะมีปริมาณแมงกานีสในโครงสร้างสูงขึ้นแปรผันตามปริมาณแมงกานีสที่เติมลงไป สำหรับบริเวณอนุภาคสีดำบนโครงสร้างยูเทคติกจะมีปริมาณทองแดงค่อนข้างสูง ซึ่งสูงกว่าปริมาณเงินที่มีอยู่มาก แสดงว่าธาตุทองแดงจะเป็นองค์ประกอบหลักของอนุภาคสีดำที่อยู่บนโครงสร้างยูเทคติก

4.10.3.2 โลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณส่วนผสมเคมี 6.97%Cu – 0.38%Mn – balance of Ag มีโครงสร้างดังรูปที่ 4.21 (ค) และ (ง) ที่กำลังขยาย 100 เท่า (รูปที่ 4.21 (ค)) จะเห็นลักษณะโครงสร้างเดนไดรต์ที่ได้จากงานหล่อขึ้นรูปเช่นเดียวกับโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมแมงกานีส โดยบริเวณโครงสร้างเดนไดรต์ที่เป็นโครงสร้างเนื้อพื้น จะเป็น Ag – rich phase และเมื่อตรวจสอบด้วย EDX จะพบปริมาณ สัดส่วนของธาตุดังนี้ Ag : Cu : Mn = 92.46 : 7.23 : 0.31 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และพบโครงสร้างยูเทคติกลักษณะ Irregular shape (รูปที่ 4.21 (ง)) เช่นเดียวกับที่พบในโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมแมงกานีส บริเวณรอบนอกของโครงสร้างยูเทคติกมีลักษณะ Interdendritic shrinkage กระจายอยู่รอบ ๆ 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

4.10.3.3 โลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณทองแดงและแมงกานีส 6.63 และ 0.76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่เหลือเป็นธาตุเงิน จะพบโครงสร้างลักษณะเดนไดรต์และโครงสร้างยูเทคติกลักษณะ irregular shape ค่อนข้างยาวกระจายอยู่ทั่วโครงสร้างเนื้อพื้น แสดงดังรูปที่ 4.21 (ฉ) จากการตรวจสอบส่วนผสมด้วย EDX ปริมาณธาตุต่าง ๆ บนโครงสร้างเนื้อพื้น เท่ากับ 93.11%Ag – 6.22%Cu – 0.67%Mn และบริเวณโครงสร้างยูเทคติกควมมีส่วนผสม คือ 71.74%Ag – 27.10%Cu – 1.17%Mn

4.10.3.4 โลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณทองแดงและแมงกานีส 6.14 และ 1.30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่เหลือเป็นธาตุเงิน โครงสร้างยูเทคติกที่พบเป็นลักษณะ irregular shape (รูปที่ 4.21 (ซ)) แต่รูปร่างไม่เรียวยาวเหมือนโครงสร้างยูเทคติก บนโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 0.76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณธาตุผสมบริเวณโครงสร้างยูเทคติก (บริเวณ

E) คือ $65.19\%Ag - 32.92\%Cu - 1.88\%Mn$ ปริมาณธาตุของอนุภาคลำในโครงสร้างยูเทคติก คือ $20.96\%Ag - 76.69\%Cu - 2.35\%Mn$ ซึ่งเป็น Cu – rich phase มีธาตุทองแดงอยู่ในสัดส่วนที่สูงมาก

4.10.3.5 โครงสร้างโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมทางเคมี $5.40\%Cu - 1.70\%Mn - \text{balance of } Ag$ แสดงดังรูปที่ 4.21 (ฉ) และ (ญ) ที่กำลังขยาย 100 เท่า พบโครงสร้างเดนไดรต์ที่สังเกตเห็นได้ว่าโครงสร้างเนื้อพื้นสีขาวมีบริเวณกว้างมากขึ้น ($94.16\%Ag - 4.22\%Cu - 1.62\%Mn$) และบริเวณโครงสร้างยูเทคติกจะลดลงเนื่องจากการลดลงของปริมาณทองแดงในโลหะผสม ถึงแม้ปริมาณแมงกานีสที่ละลายอยู่ในโลหะผสมจะเพิ่มขึ้นก็ตาม แต่ก็ยังมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับธาตุหลัก ทำให้พบโครงสร้างยูเทคติกกระจายอยู่ทั่วไปอย่างไม่หนาแน่นนัก ซึ่งธาตุที่มีผลต่อโครงสร้างยูเทคติกนี้ คือ ธาตุทองแดงเนื่องจากสัดส่วนในการเติมธาตุทองแดงต่อธาตุแมงกานีสค่อนข้างสูง รอบนอกของโครงสร้าง ยูเทคติกพบ Interdendritic shrinkage จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วย EDX บริเวณโครงสร้าง ยูเทคติกมีปริมาณธาตุดังนี้ $60.84\%Ag - 36.54\%Cu - 2.61\%Mn$

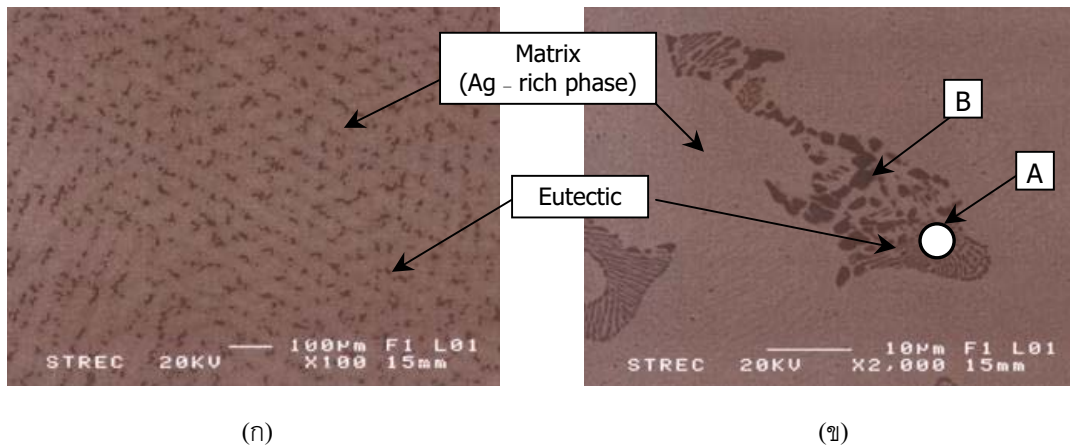
4.10.3.6 โครงสร้างของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมทางเคมี $4.90\%Cu - 2.10\%Mn - \text{balance of } Ag$ แสดงดังรูปที่ 4.21 (ฉ) และ (ญ) พบว่าโครงสร้างยูเทคติกในโลหะผสมมีความหนาแน่นลดลง เกิดจากการลดลงของธาตุทองแดงในโลหะผสม และลักษณะโครงสร้างยูเทคติกที่ได้ค่อนข้างกลม โดยจาก EDX พบส่วนผสมทางเคมีที่บริเวณเนื้อพื้นดังนี้ $93.80\%Ag - 4.14\%Cu - 2.05\%Mn$ ปริมาณธาตุต่าง ๆ บริเวณโครงสร้างยูเทคติกรวมเท่ากับ $57.41\%Ag - 39.20\%Cu - 3.39\%Mn$

4.10.3.7 โครงสร้างของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมทางเคมี $4.40\%Cu - 2.60\%Mn - \text{balance of } Ag$ แสดงดังรูปที่ 4.21 (ฉ) และ (ญ) 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 โดยอนุภาคลำในโครงสร้าง ยูเทคติกมีส่วนผสม $Ag : Cu : Mn = 15.76 : 78.52 : 5.71$ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งปริมาณทองแดงที่พบสูงกว่าที่พบบนโครงสร้างเนื้อพื้น

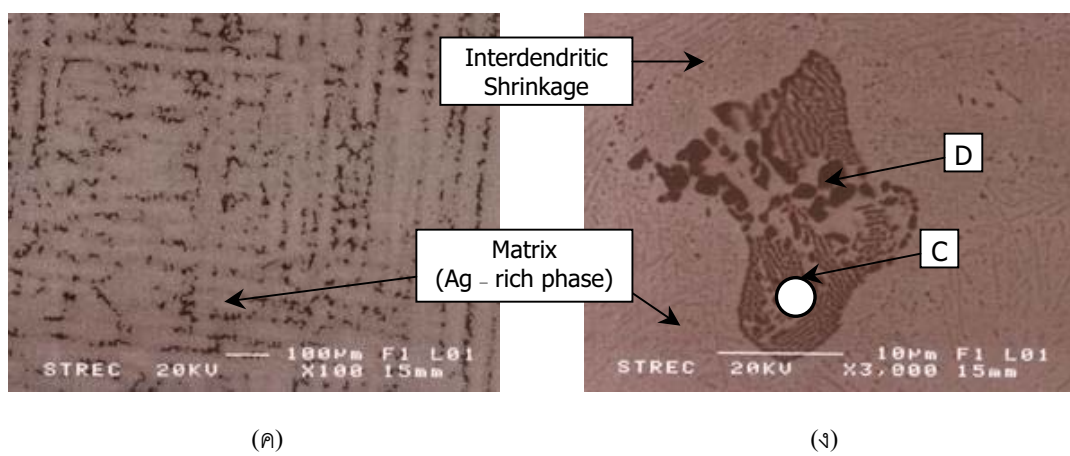
4.10.3.8 โลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมทางเคมี $4.00\%Cu - 3.00\%Mn - \text{balance of } Ag$ จะมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคแสดงดังรูปที่ 4.21 (ฉ) และ (ญ) และจากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วย EDX โครงสร้างเนื้อพื้นมีปริมาณธาตุต่างๆ คือ $91.42\%Ag - 5.33\%Cu - 3.25\%Mn$ และโครงสร้างยูเทคติกมีปริมาณธาตุดังนี้ $53.99\%Ag - 40.41\%Cu - 5.60\%Mn$ โดยน้ำหนัก

จากลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส ที่มีปริมาณแมงกานีสแตกต่างกัน ลักษณะโครงสร้างที่ให้เห็นได้ชัดเจนว่าบริเวณกึ่งของเดนไดรต์มีเงินเป็นส่วนผสมทางเคมีสูง และบริเวณโครงสร้างยูเทคติกซึ่งอยู่ระหว่างกึ่งของเดนไดรต์จะมีทองแดงเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนที่ค่อนข้างสูง โดยโครงสร้างยูเทคติกนี้จะมีปริมาณลดลงเมื่อมีปริมาณทองแดงใน

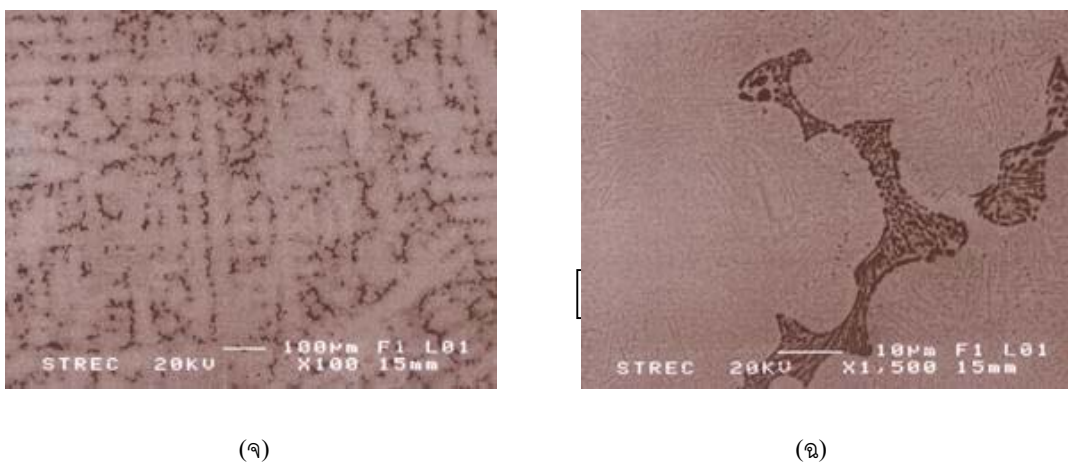
โลหะผสมลดลง ธาตุแมงกานีสที่เติมลงไปโลหะผสมจะเป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้างยูเทคติก ในปริมาณมากกว่าที่พบในโครงสร้างเนื้อพื้น และปริมาณแมงกานีสที่พบในโครงสร้างทั้งสองจะมี ปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณแมงกานีสที่เพิ่มขึ้นในโลหะผสม ซึ่งแมงกานีสจะอยู่ร่วมกับโครงสร้างที่มี ทองแดงเป็นองค์ประกอบมากกว่า



โลหะผสมชุดที่ 1 : 7.65%Cu – balance of Ag

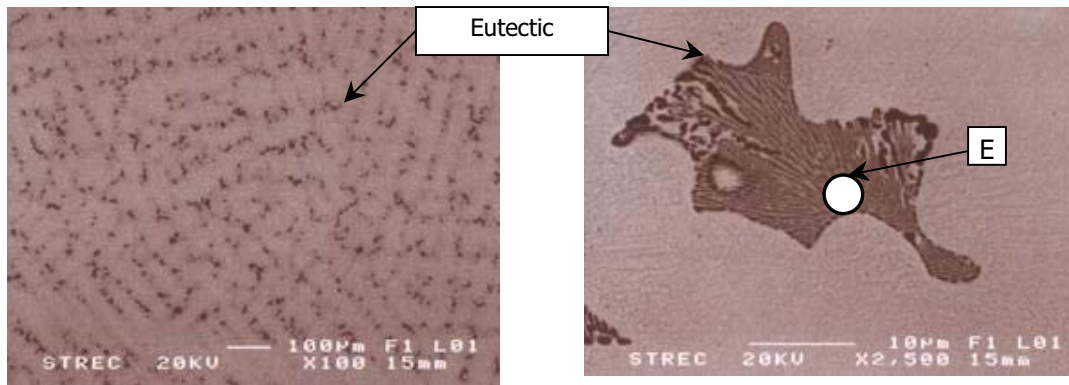


โลหะผสมชุดที่ 2 : 6.97%Cu – 0.38%Mn - balance of Ag



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

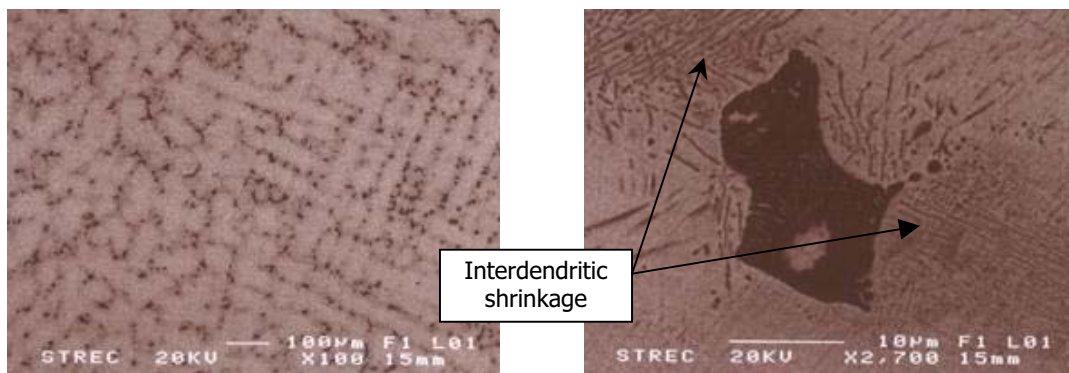
รูปที่ 4.21 ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5%-ทองแดง-แมงกานีส
ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยายต่าง ๆ



(ข)

(ฅ)

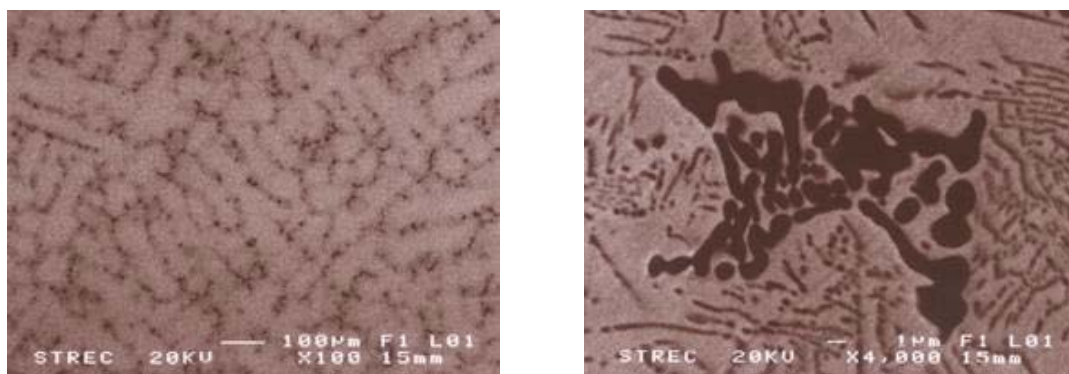
โลหะผสมชุดที่ 4 : 6.14%Cu – 1.30%Mn – balance of Ag



(ฉ)

(ญ)

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

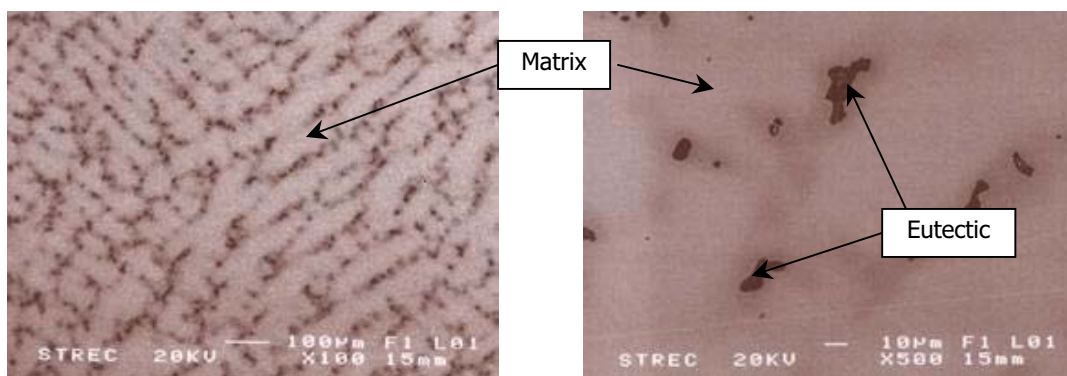


(ฎ)

(ฏ)

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

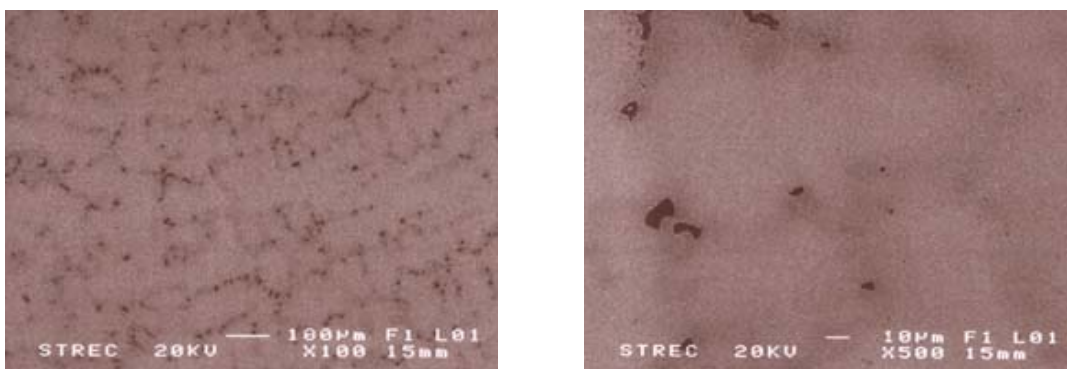
รูปที่ 4.21 (ต่อ) ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5%-ทองแดง-แมงกานีส
ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยายต่าง ๆ



(จ)

(ข)

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



(ค)

(ง)

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

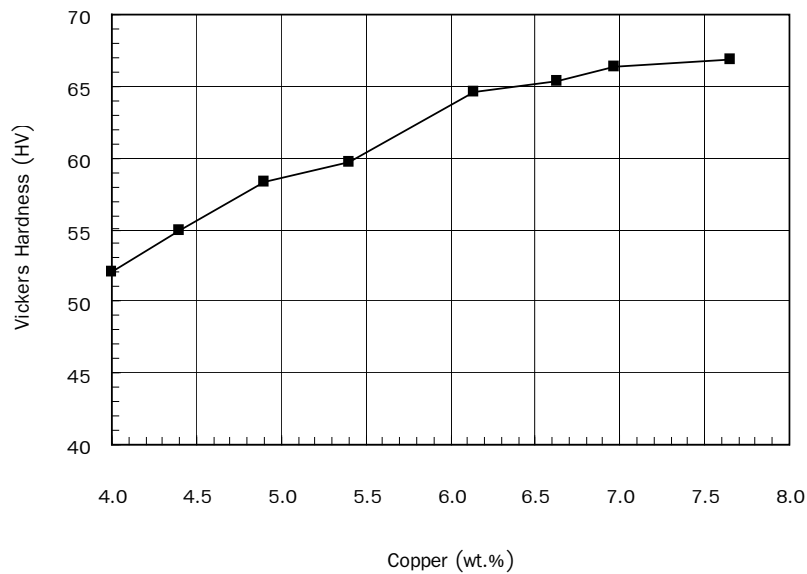
รูปที่ 4.21 (ต่อ) ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5%-ทองแดง-แมงกานีส

ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยายต่าง ๆ

4.10.4 ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางกลในสภาพหลังการหล่อขึ้นรูป

4.10.4.1 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

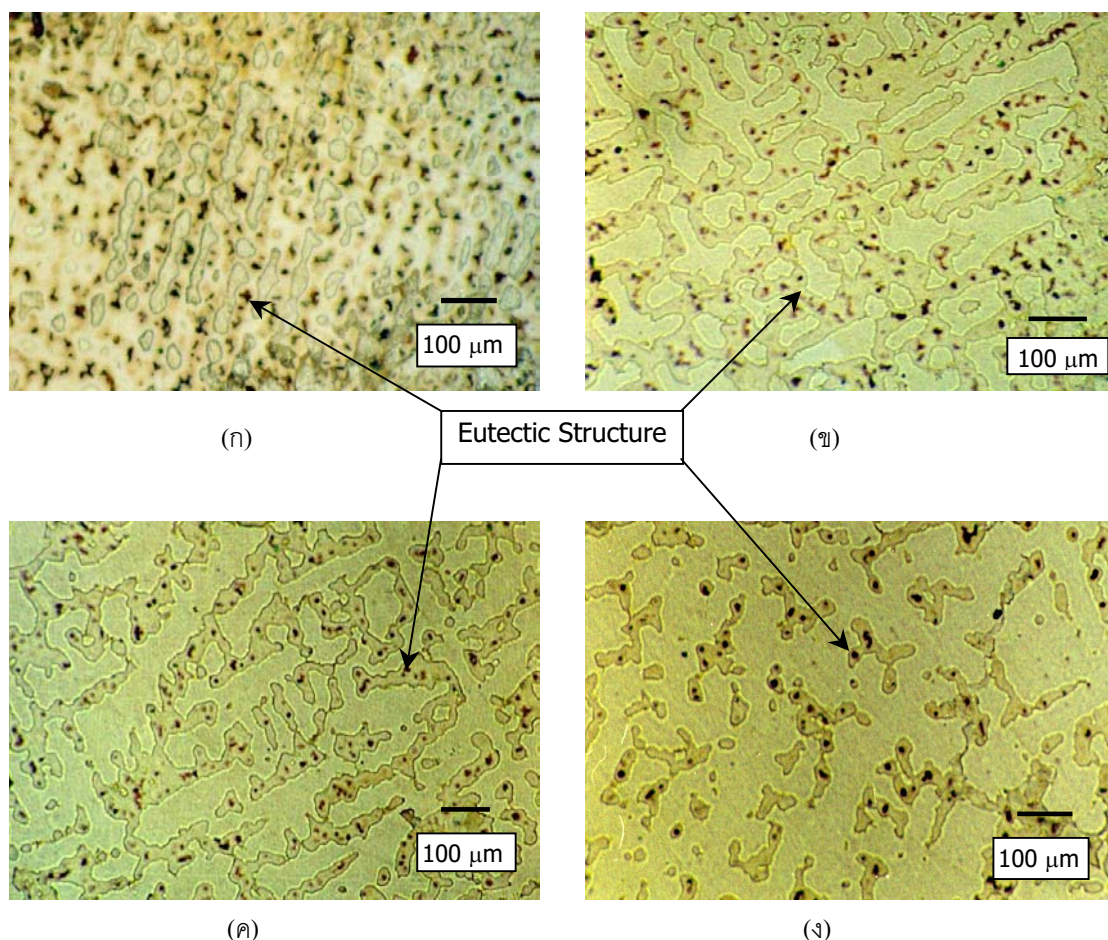
โลหะเงินสเตอร์ลิงทั้ง 8 ชุด ที่มีปริมาณธาตุแมงกานีส 0, 0.38, 0.76, 1.30, 1.70, 2.10, 2.60 และ 3.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และในขณะเดียวกันจะมีปริมาณทองแดง 7.65, 6.97, 6.63, 6.14, 5.40, 4.90, 4.40 และ 4.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ มีความแข็งเฉลี่ยแบบวิกเกอร์ (HV) แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 ซึ่งเมื่อนำมาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทองแดงในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 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 4.22 แสดงให้เห็นว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณทองแดงสูงจะมีความแข็งสูง ซึ่งสามารถอธิบายได้จากโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม

รูปที่ 4.23 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิงหลังกัดกรด เห็นได้ชัดว่าโลหะผสมที่มีปริมาณทองแดงลดลง (ปริมาณแมงกานีสสูงขึ้น) จะพบปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกน้อยลงด้วย โครงสร้างเนื้อพื้นซึ่งเป็น Ag – rich phase และเป็นเฟสที่อ่อนจะมีปริมาณมากขึ้น หากโลหะผสมมีปริมาณทองแดงละลายอยู่สูง ความแข็งที่ได้จะเพิ่มขึ้นด้วยกลไกการเพิ่มความแข็งโดยการละลายของธาตุในสารละลายของแข็ง (solid solution hardening) โครงสร้างยูเทคติกซึ่งเป็น Cu – rich phase จะเป็น โครงสร้างที่ช่วยในการเพิ่มความแข็ง ถ้าโครงสร้างยูเทคติกมีมาก ความแข็งก็จะสูง จากภาพโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมที่ส่วนผสมแตกต่างกัน 4 ชุด (รูปที่ 4.23) พบว่าโลหะผสมที่มีปริมาณทองแดงลดลง จะเห็นโครงสร้างยูเทคติกที่อยู่ระหว่างกิ่งของเดนไดรต์ที่มีปริมาณลดลง และโครงสร้างเดนไดรต์ที่ได้จะมีบริเวณกว้างขึ้น ทำให้ช่องว่างระหว่างเดนไดรต์มีขนาดเล็กลง เป็นสาเหตุให้โลหะผสมมีความแข็งต่ำ โดยธาตุทองแดงมีอิทธิพลต่อความแข็งของโลหะผสมมากกว่าธาตุแมงกานีส หากเติมในปริมาณที่เท่ากัน



รูปที่ 4.23 ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง – แมงกานีส

ในสภาพหล่อขึ้นรูป ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 100 เท่า
หลังการกัดกรด

(ก) 7.65%Cu – balance of Ag

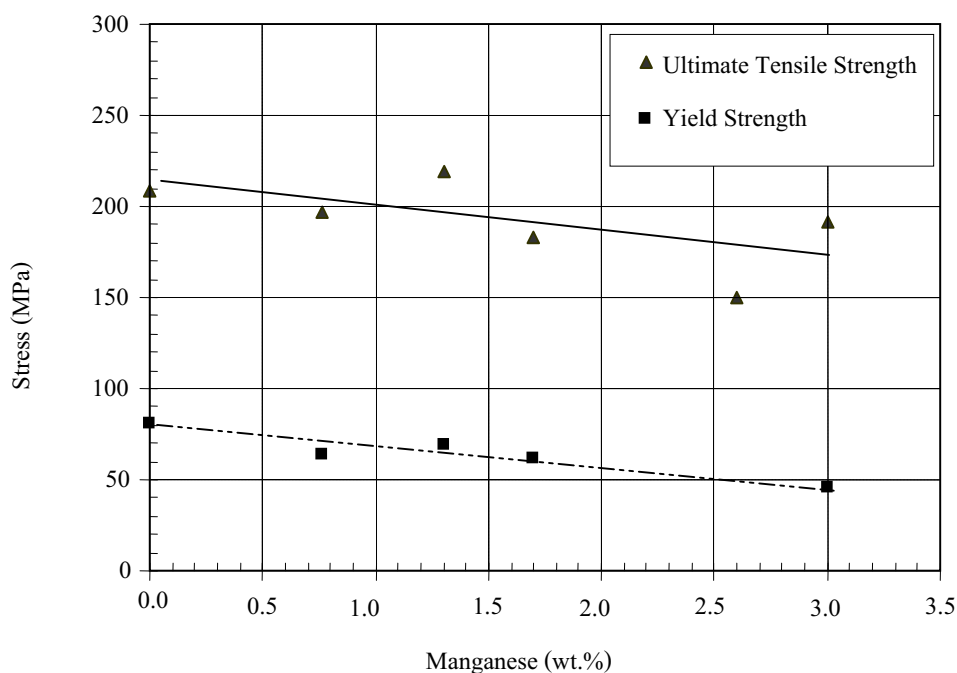
(ข) 6.14%Cu – 1.30%Mn – balance of Ag

(ค) 4.90%Cu – 2.10%Mn – balance of Ag

(ง) 4.00%Cu – 3.00%Mn – balance of Ag

4.10.4.2 ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

ค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดึง ได้แก่ ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength; UTS) และค่าความเค้นจุดคราก (yield strength; σ_y) โดยค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) ไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากชิ้นงานทดสอบที่นำไปทดสอบแรงดึงเป็นชิ้นงานจากการหล่อขึ้นรูป (as-cast) ทำให้เกิดปัญหาจากรูพรุน และความไม่สม่ำเสมอของเนื้อโลหะ ซึ่งเกิดปัญหาทั้งขณะเตรียมชิ้นงานก่อนการทดสอบและขณะทำการทดสอบ ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ได้มีความเบี่ยงเบนสูง จึงไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงผลของธาตุแมงกานีสในโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีต่อ
ความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความเค้นจุดคราก

ความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความเค้นจุดครากของโลหะผสม แสดงไว้ใน ตารางที่ 4.7 เมื่อนำมาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างความเค้นและปริมาณธาตุแมงกานีสในโลหะเงินสเตอร์ลิง ได้กราฟดังรูปที่ 4.24 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

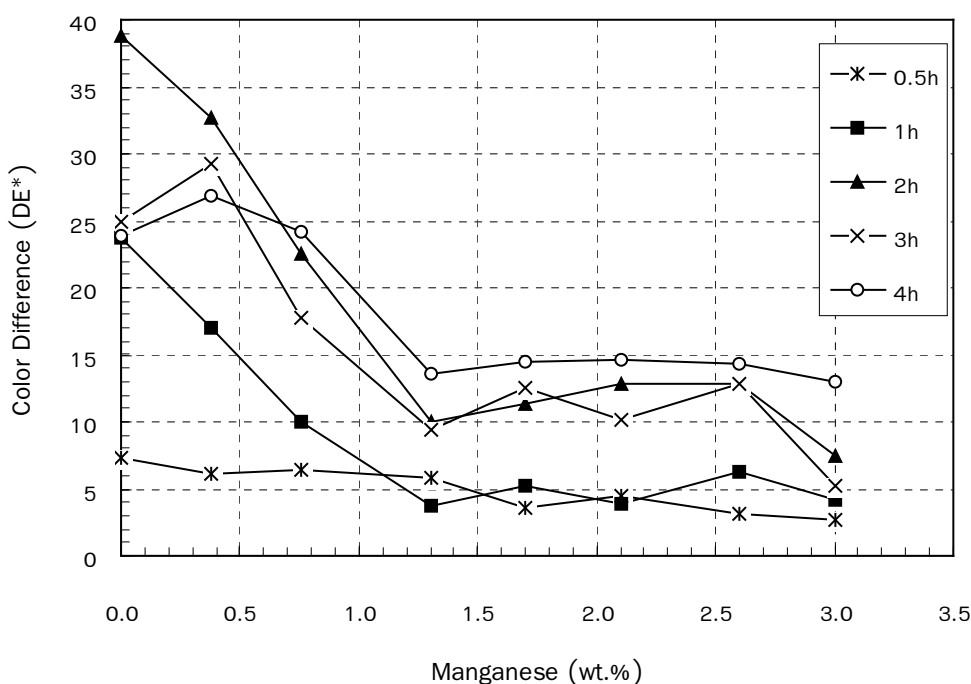
ความเค้นจุดคราก (yield strength; σ_y) เป็นค่าแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป (elastic – plastic behavior) ซึ่งเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดความเสียหาย ในการตรวจสอบค่าความเค้นจุดครากของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมแมงกานีส พบว่ามีความเค้นจุดครากค่อนข้างสูง คือ 80.88 MPa และเมื่อโลหะผสมมีปริมาณ

แมงกานีสเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.38 – 3.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความเค้นจุดครากมีแนวโน้มลดลง แต่จะพบว่าความเค้นจุดครากในโลหะผสมที่มีปริมาณแมงกานีส 0.76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ($\sigma_y = 63.6$ MPa) จะมีค่าต่ำกว่าโลหะผสมที่มีปริมาณแมงกานีส 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ($\sigma_y = 69.5$ MPa) เนื่องจากการมีรูพรุนและความไม่สม่ำเสมอของเนื้อโลหะที่ได้จากงานหล่อ

สาเหตุของการลดลงของค่าความเค้นจุดครากนี้ สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับการลดลงของความแข็งแรงเมื่อมีปริมาณแมงกานีสในโลหะผสมเพิ่มขึ้น (ปริมาณทองแดงลดลง) โดยจากรูปที่ 4.23 เห็นได้ชัดว่าโครงสร้างยูเทคติกซึ่งเป็นโครงสร้างที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรงให้กับโลหะผสมมีปริมาณลดลง ทำให้ความต้านทานแรงดึงและความเค้นจุดครากของโลหะผสมลดลงด้วย

4.10.5 ผลการทดสอบความต้านทานการหมอง (Tarnish Resistance)

ผลการทดสอบความต้านทานการหมองของชิ้นงานโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส ในบรรยากาศไอซัลเฟอร์ ที่ได้จากการละลายสารประกอบโซเดียมซัลไฟด์ในน้ำในภาชนะปิด แขนงชิ้นงานทดสอบเป็นเวลาต่างๆ กัน คือ 0.5, 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ภาพลักษณะชิ้นงานหลังทดสอบความต้านทานการหมอง แสดงดังรูปที่ 4.18 ค่าความสว่าง L^* , ค่าสี a^* , b^* และค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิว (Color difference; DE^*) ที่ได้จากการตรวจสอบสีที่เปลี่ยนไปด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แสดงไว้ในตารางที่ 4.8 นำค่า DE^* ที่คำนวณได้มาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแมงกานีสกับค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิว ได้ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิง

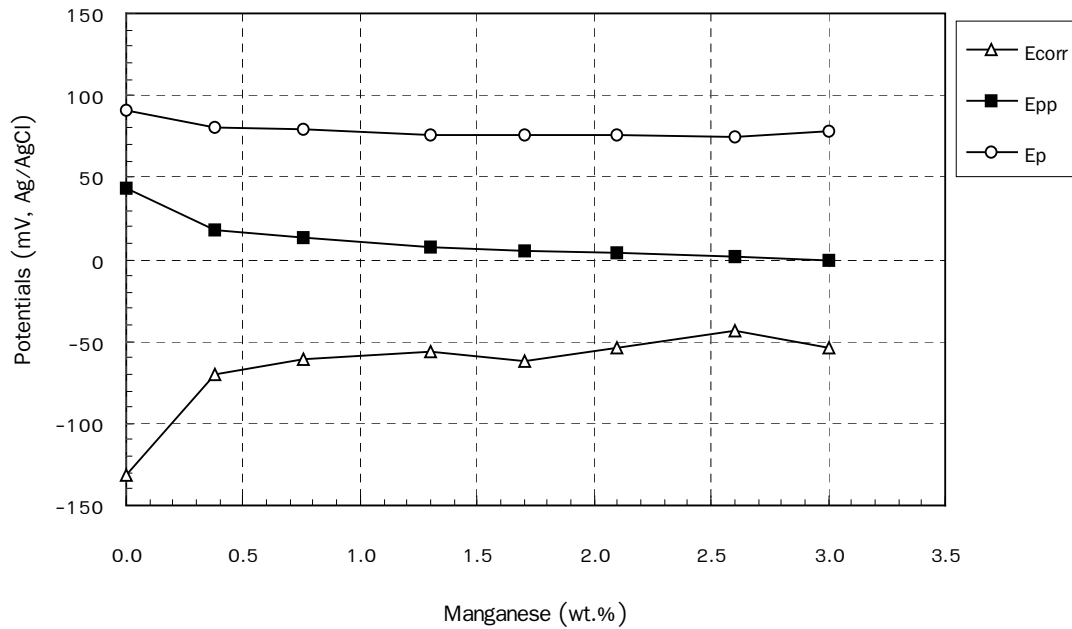
จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีผิวที่เกิดความหมองด้วยตาเปล่า พบว่าชิ้นงานทดสอบที่แขวนไว้ในบรรยากาศไอซัลเฟอร์เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง โลหะผสมที่มีแมงกานีสต่ำกว่า 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะเกิดการหมองเล็กน้อย ส่วนโลหะผสมที่เหลือ สีผิวชิ้นงานทดสอบที่สังเกตได้คือไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อทดสอบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ชิ้นงานที่มีปริมาณแมงกานีสต่ำกว่า 1.3 เปอร์เซ็นต์ เกิดการหมองเล็กน้อย ส่วนชิ้นงานที่มีแมงกานีสสูงกว่า 1.3 เปอร์เซ็นต์ จะสังเกตไม่เห็นความหมอง ชิ้นงานที่มีปริมาณแมงกานีส 3.0 เปอร์เซ็นต์จะเกิดการหมองเพียงบางจุดเท่านั้น เวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้นเป็น 2, 3 และ 4 ชั่วโมง สังเกตได้ว่าชิ้นงานที่มีปริมาณแมงกานีสต่ำกว่า 1.3 เปอร์เซ็นต์ มีความหมองมาก ชิ้นงานที่มีปริมาณแมงกานีสสูงกว่าจะหมองน้อยกว่า และชิ้นงานที่มีแมงกานีสมากกว่า 1.3 เปอร์เซ็นต์ เกิดการหมองในปริมาณที่น้อยมาก จนเกือบสังเกตไม่เห็นด้วยตาเปล่า

รูปที่ 4.25 แสดงผลของปริมาณธาตุแมงกานีสที่มีต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 0, 0.38, 0.76, 1.3, 1.7, 2.1, 2.6 และ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิงทำปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์ในบรรยากาศเกิดความหมองขึ้น พิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิว (DE^*) ในการทดสอบความหมองเป็นเวลาต่างๆ กัน พบว่าโลหะผสมที่ทิ้งไว้ในบรรยากาศของไอซัลเฟอร์เป็นเวลาเท่ากัน โลหะผสมที่มีปริมาณแมงกานีสต่ำกว่า 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะให้ค่า DE^* ค่อนข้างสูง โดยค่า DE^* ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อชิ้นงานมีปริมาณแมงกานีสเพิ่มขึ้น ส่วนชิ้นงานที่มีแมงกานีสตั้งแต่ 1.3 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ค่า DE^* ค่อนข้างคงที่ คือเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สรุปได้ว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงจะมีความสามารถในการต้านทานการหมองเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณแมงกานีสในโลหะผสมนั้นเพิ่มขึ้น

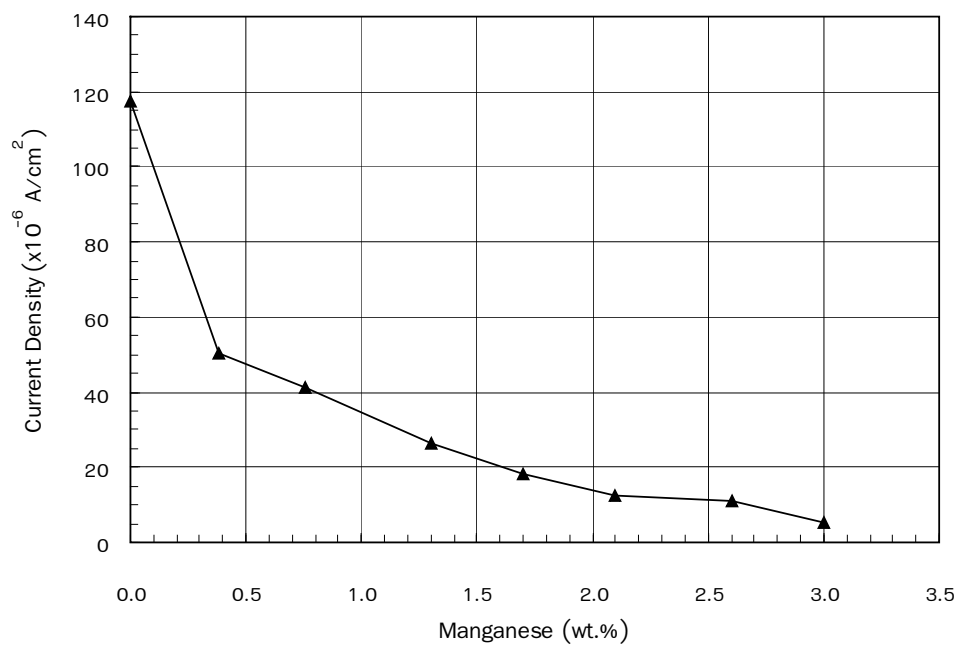
4.10.6 ผลจากการทดสอบการกัดกร่อนของฟิล์มด้วยกระบวนการทางไฟฟ้า เคมี โดยวิธี โพเทนชิโอไดนามิกส์

การทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า จะได้เส้นโพลาริเซชันของการกัดกร่อนของโลหะทดสอบ โดยทำการทดสอบ 2 ชุด ชุดแรกทดสอบในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 °C หาค่า E_{corr} , E_{pp} , E_p , I_p และ I_{corr} จากเส้นโพลาริเซชัน ค่าต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.9 และกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆ กับปริมาณธาตุแมงกานีสในโลหะเงินสเตอร์ลิง แสดงดังรูปที่ 4.26, 4.27 และ 4.28 ชิ้นงานชุดที่ 2 ทดสอบในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิมิตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ที่อุณหภูมิ 25 °C หาค่า E_{corr} , E_{pp} , E_p และ I_{corr} แต่ไม่สามารถหาค่า I_p ได้ เนื่องจากโลหะทดสอบไม่เกิดฟิล์มขึ้นที่ผิว ค่าต่าง ๆ ที่หาได้จากเส้นโพลาริเซชันแสดงไว้ในตารางที่ 4.10 นำค่าที่ได้มาวาดกราฟเปรียบเทียบผลของธาตุแมงกานีสต่อค่าเหล่านี้ ได้ดังรูปที่ 4.30 และ 4.31

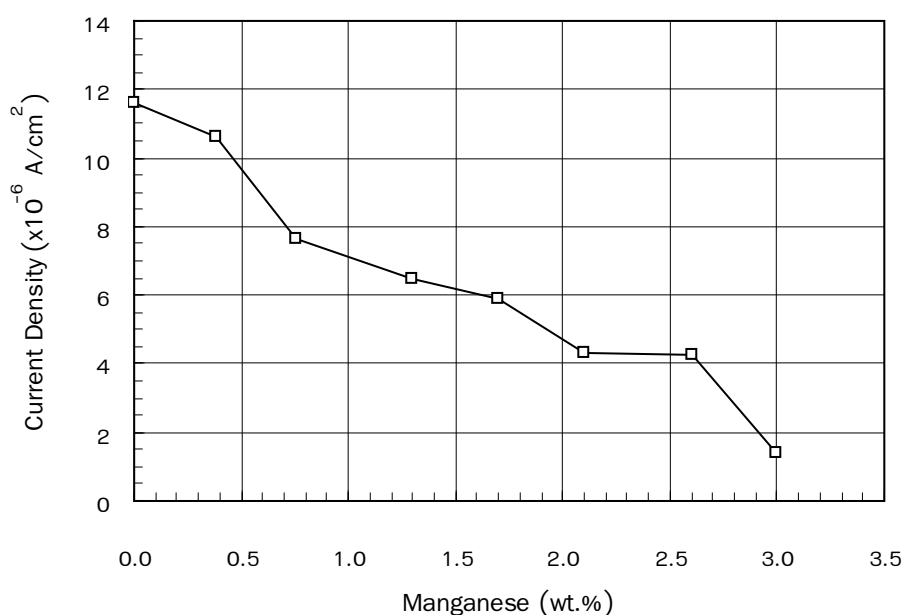
ภาพลักษณะชิ้นงานและเส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด รวมถึงวิธีการหาค่าต่าง ๆ แสดงไว้ในภาคผนวก จ.



รูปที่ 4.26 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า E_{corr} , E_{pp} และ E_p ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 °C



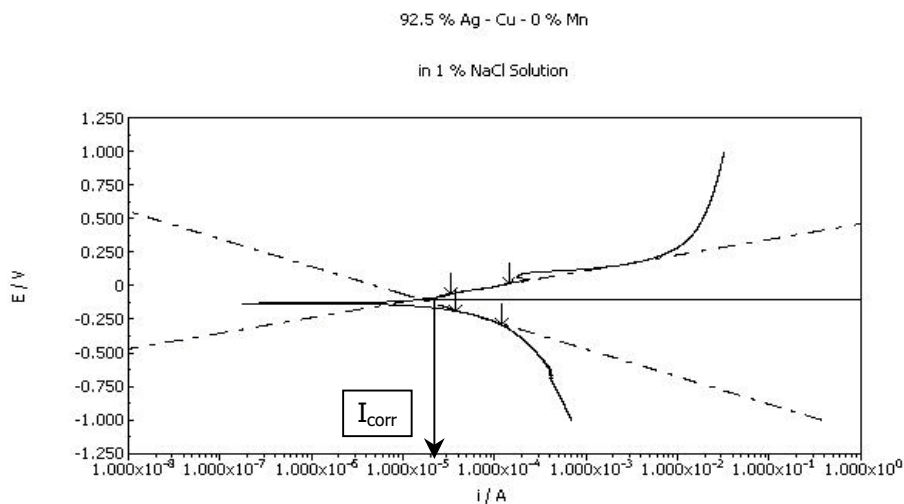
รูปที่ 4.27 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า I_p ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 °C



รูปที่ 4.28 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า I_{corr} ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 °C

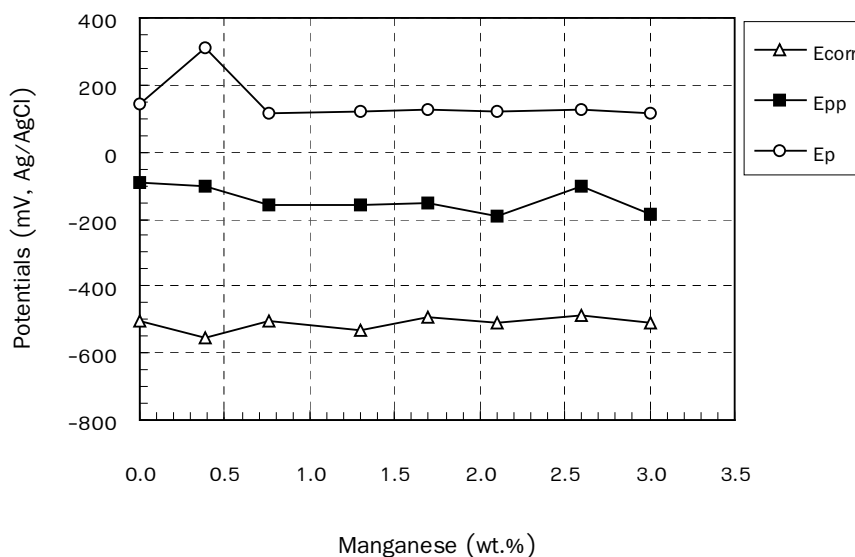
จากรูปที่ 4.26, 4.27 และ 4.28 ทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อโลหะเงินสเตอร์ลิงมีปริมาณแมงกานีสมากขึ้น มีผลในการเพิ่มค่า E_{corr} ลดค่า E_{pp} และค่า I_p อย่างเห็นได้ชัด แต่มีผลในการลดค่า E_p ไม่ชัดเจนนักแต่มีแนวโน้มที่ลดลง แสดงว่าปริมาณแมงกานีสที่เติมลงในโลหะเงินสเตอร์ลิง มีผลในการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของฟิล์มที่เกิดขึ้น โลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่า $E_{\text{corr}} = -54 \text{ mV}$ ซึ่งสูงกว่าในโลหะผสมที่ไม่มีปริมาณแมงกานีส ($E_{\text{corr}} = -132 \text{ mV}$) โดยโลหะผสมที่มีค่า E_{corr} ต่ำ จะถูกกัดกร่อนได้ง่ายกว่า ค่า E_p ที่ได้ลดลงน้อยมาก แสดงว่าปริมาณแมงกานีสที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อการต้านทานการแตกตัวของฟิล์มป้องกันมากนัก คือ หากโลหะผสมอยู่ในสภาวะที่มีสนามไฟฟ้าที่เหมาะสม ฟิล์มก็จะสามารถแตกตัวได้ และเนื่องจากค่า E_{pp} คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนสภาวะที่ไม่มีฟิล์มไปเป็นสภาวะขณะเกิดฟิล์มที่ผิว (active-passive transition) การลดลงของค่า E_{pp} (อัตราการลดลงค่อนข้างต่ำ) เมื่อโลหะผสมมีปริมาณแมงกานีสสูงขึ้น แสดงว่าโลหะผสมนั้นสามารถเกิดฟิล์มพาสซีฟ (passive film) ได้ง่ายขึ้น และการลดของค่า I_p ที่ชัดเจนอาจชี้ให้เห็นว่าฟิล์มที่ผิวของโลหะผสม มีความสามารถที่จะต้านทานการไหลผ่านของไอออนได้มากขึ้น ป้องกันการแพร่ของออกซิเจนหรือซัลเฟอร์ในอากาศเข้าไปทำปฏิกิริยากับธาตุหลักของโลหะผสม ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดความหมอง ค่า I_p ในโลหะผสมที่ไม่ได้เติมแมงกานีสมีค่า $117.58 \mu\text{A/cm}^2$ และค่า I_p จะลดลงเหลือเพียง $5.4 \mu\text{A/cm}^2$ ในโลหะผสมที่มีแมงกานีส 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับค่า I_{corr} ที่ได้จากจุดตัดของเส้นโค้งคาโทดิกและอโน

ดิก สามารถหาได้ดังรูปที่ 4.29 โดยเลือกจุดเพื่อหาความชันของเส้นโค้งทั้งสอง ค่ากระแสที่จุดตัดคือค่า I_{corr} คำนวณค่าอัตราการกัดกร่อนโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับเครื่องโพเทนชิโอสแตท หรือนำค่า I_{corr} ที่หาได้ ไปคำนวณโดยใช้สูตรจากสมการที่ (4.7) ผลการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 4.9

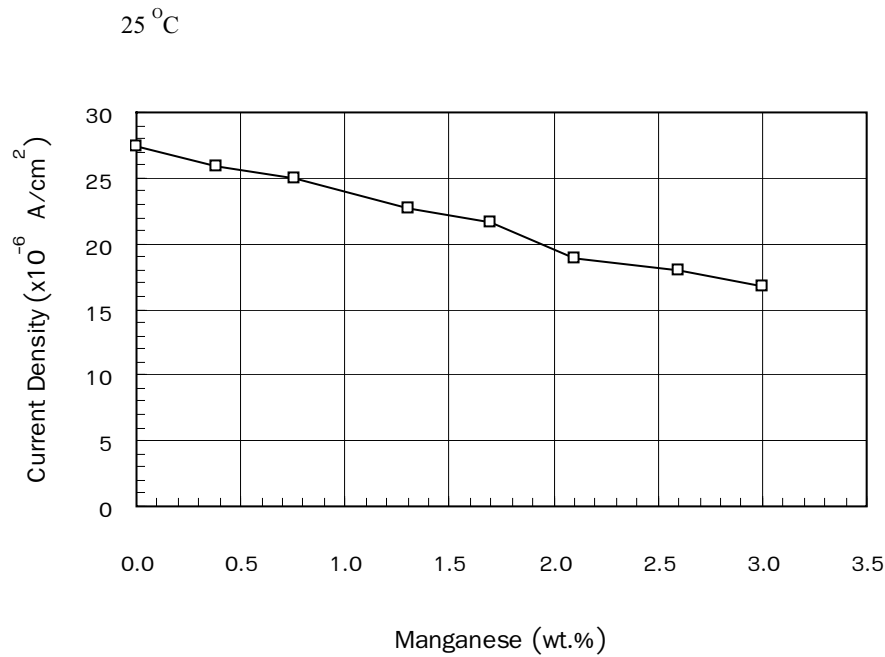


รูปที่ 4.29 แสดงการหาค่า I_{corr} จากจุดตัดระหว่างเส้นโค้งคาโทดิกและเส้นโค้งแอโนดิก

สำหรับการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงด้วยการวัดเส้นโพลาริเซชันของโลหะทดสอบในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งอิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 °C ได้ค่า E_{corr} , E_{pp} , E_p และ I_{corr} ดังตารางที่ 4.10

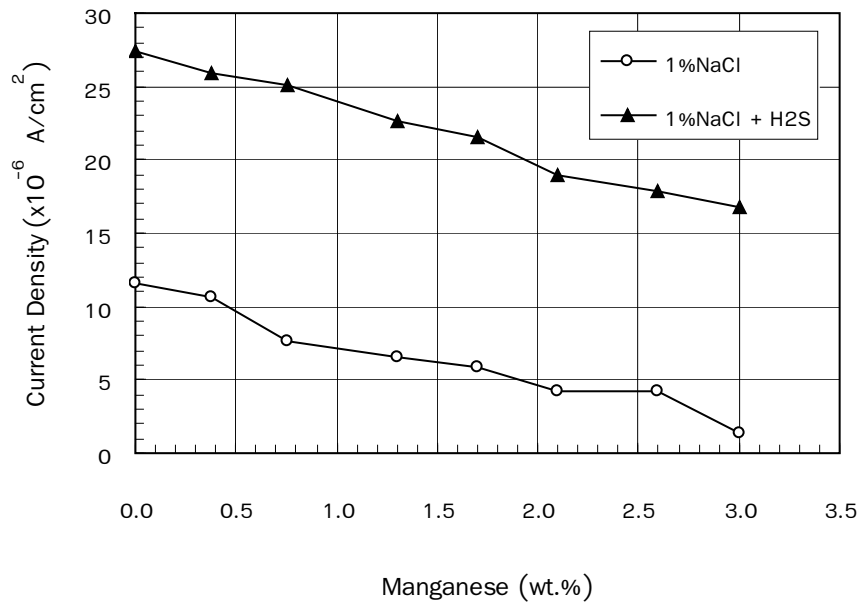


รูปที่ 4.30 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า E_{corr} , E_{pp} และ E_p ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ

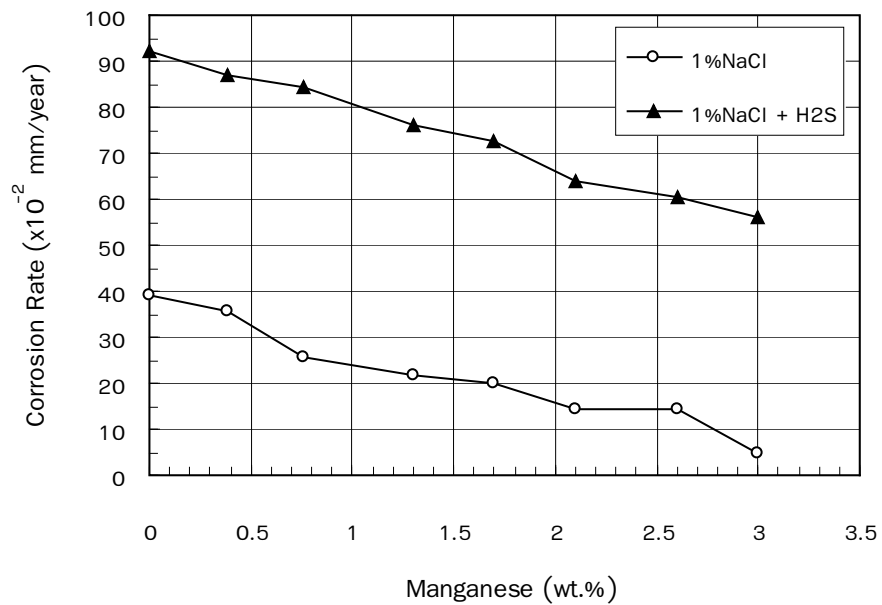


รูปที่ 4.31 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า I_{corr} ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 °C

จากรูปที่ 4.30 และ 4.31 จะเห็นว่าค่า E_{corr} , E_{pp} , E_p และ I_{corr} ที่ได้ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กล่าวคือ ปริมาณแมงกานีสในโลหะผสมที่เพิ่มขึ้น ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมได้ ค่า I_{corr} ที่หาได้ นำมาคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนได้ผลดังตารางที่ 4.10 สำหรับการทดสอบด้วยสารละลายที่อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์นี้ จะไม่สามารถหาค่า I_p ได้ เนื่องจากโลหะทดสอบไม่มีฟิล์มพาสซีฟเกิดขึ้นที่ผิว เพราะก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งเป็นสารประกอบซัลเฟอร์มีผลยับยั้งการเกิดฟิล์มของโลหะผสม เมื่อนำ ค่า I_{corr} และค่าอัตราการกัดกร่อนในการทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายทั้งสองลักษณะมาเปรียบเทียบ แสดงดังรูปที่ 4.32 และ 4.33



รูปที่ 4.32 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงต่อค่า I_{corr} ในสภาวะที่มี 1%NaCl เปรียบเทียบกับสภาวะที่มี 1%NaCl อิ่มตัวด้วย H₂S ที่อุณหภูมิ 25 °C



รูปที่ 4.33 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงต่อค่าอัตราการกัดกร่อน ในสภาวะที่มี 1%NaCl เปรียบเทียบกับสภาวะที่มี 1%NaCl อิ่มตัวด้วย H₂S ที่อุณหภูมิ 25 °C

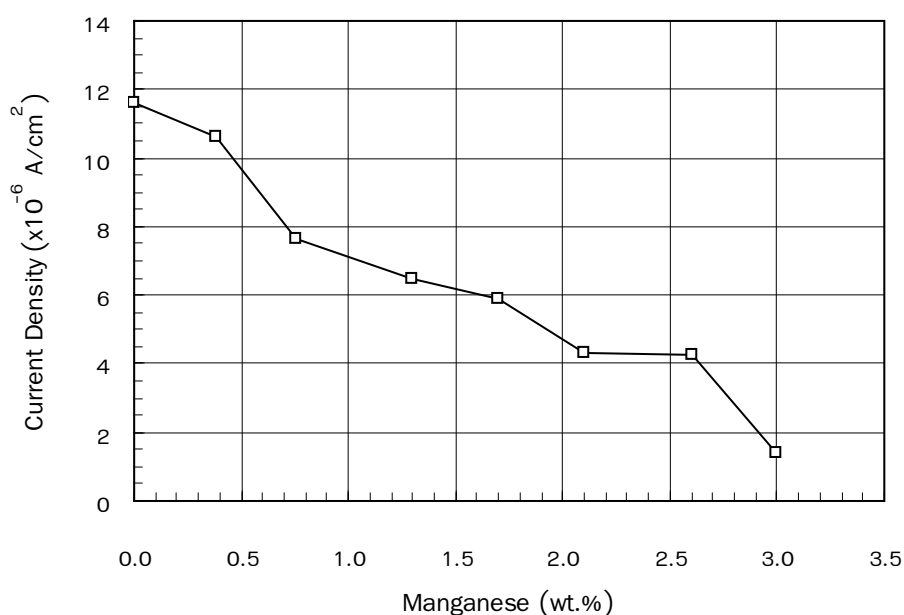
จากรูปที่ 4.32 และ 4.33 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน หรือ I_{corr} ที่ได้จากเส้นโพลาริเซชัน สามารถนำมาคำนวณหาอัตราการสูญเสียเนื้อโลหะได้เป็นค่าอัตราการกัดกร่อน (mm/year) ในการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะผสมทั้ง 8 ชุด จะเห็นว่าเมื่อโลหะผสมมีปริมาณแมงกานีสสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ได้จากเส้นโพลาริเซชันมีค่าลดลง อัตราการกัดกร่อนที่คำนวณได้มีค่าลดลงด้วย แสดงว่าฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนผิวของโลหะผสมช่วยเพิ่มความต้านทานในการกัดกร่อนและการหมอง โดยฟิล์มนี้จะปกคลุมที่ผิวหน้าของโลหะผสม หน่วงการเกิดปฏิกิริยาของธาตุหลักในโลหะผสมกับก๊าซซัลเฟอร์หรือออกซิเจนที่อยู่ในบรรยากาศ ทำให้โลหะผสมที่มีปริมาณแมงกานีสที่สูงกว่า มีความเสถียรสูง และสามารถต้านทานการกัดกร่อนและต้านทานการหมองได้ดีกว่า

4.11 สรุปผลการทดลอง

1. ธาตุแมงกานีสที่เติมลงในโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส พบในโครงสร้างยูเทคติกที่เป็น Cu – rich phase ในปริมาณสูงกว่าที่พบในโครงสร้างเนื้อพื้น (Ag – rich phase)
2. ความแข็งและความแข็งแรงของโลหะเงินสเตอร์ลิงจะมีค่าลดลงตามปริมาณทองแดงที่ลดลง (ปริมาณแมงกานีสเพิ่มขึ้น) โดยโครงสร้างยูเทคติกที่พบมีปริมาณลดลง โครงสร้างเนื้อพื้น (Ag – rich phase) พบในปริมาณมากขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความเค้นจุดคราก และความแข็ง จึงมีแนวโน้มลดลง โดยโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความแข็งเพียง 52.1 HV ซึ่งต่ำกว่าความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมแมงกานีส (66.8 HV) ความต้านทานแรงดึงสูงสุด และความเค้นจุดครากที่มีค่าสูงที่สุด พบในโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่มีแมงกานีส คือ 208.7 และ 80.88 MPa ตามลำดับ
3. ปริมาณแมงกานีสในโลหะผสมในช่วง 1.3 – 3.0 เปอร์เซ็นต์ มีผลในการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการหมอง โดยค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิว (DE^*) ของโลหะผสมแมงกานีสค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับค่า DE^* ของโลหะผสมที่ไม่ได้เติมแมงกานีส และเมื่อโลหะผสมมีปริมาณแมงกานีสตั้งแต่ 0.38 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป จะมีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มพาสซีฟ (I_p) อย่างชัดเจน โดยค่า E_{corr} และ I_p ของโลหะผสมที่มีแมงกานีส 0.38 เปอร์เซ็นต์เท่ากับ -70 mV และ 50.34 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ตามลำดับ ซึ่ง E_{corr} มีค่าต่ำกว่าและ I_p มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากโลหะผสมที่ไม่มีแมงกานีส ($E_{\text{corr}} = -132 \text{ mV}$, $I_p = 117.58 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) ค่า E_{corr} สูง แสดงว่าโลหะเกิดการกัดกร่อนได้ยาก ค่า I_p ต่ำกว่า แสดงว่าฟิล์มสามารถต้านทานการแพร่ผ่านของอิออนได้มากกว่า สามารถหน่วงการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวโลหะจะสัมผัสกับปัจจัยที่เอื้อให้เกิดการหมอง เช่น ออกซิเจนหรือซัลเฟอร์ ช่วยป้องกันการหมองของโลหะเงินสเตอร์ลิงได้

4. โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีแมงกานีสตั้งแต่ 1.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นไป จะมีจุดสัปดาห์บนผิวชิ้นงานกระจายอยู่ทั่วไป เนื่องจากผิวโลหะทำปฏิกิริยากับบรรยากาศขณะหล่อ ทำให้ผิวชิ้นงานขาดความสวยงาม และความเงางาม

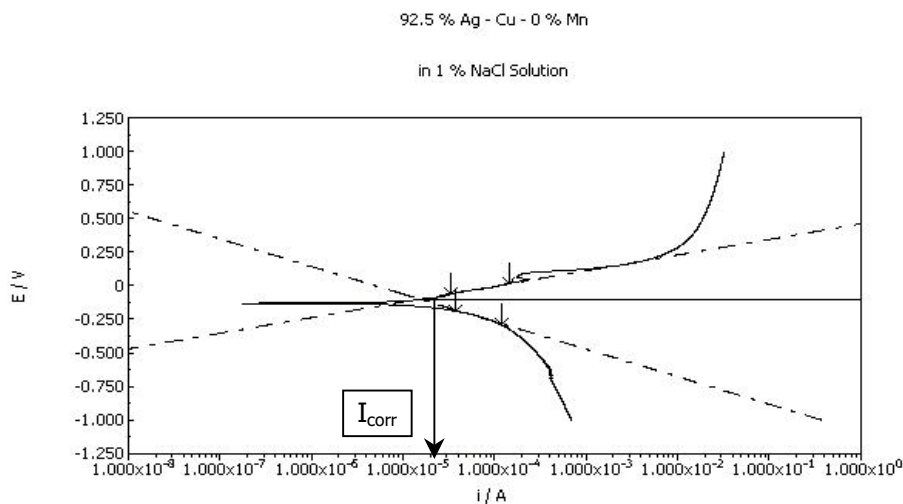
5. ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่เหมาะสม คือ 6.14%Cu – 1.3%Mn – balance of Ag โลหะที่ส่วนผสมนี้จะมีสมบัติทางกล คือ ความแข็ง และความแข็งแรงค่อนข้างดี มีความสามารถในการต้านทานการหมองที่เหมาะสม และลักษณะผิวหลังการหล่อสะอาด ไม่มีข้อบกพร่องที่ผิวหน้า หากเป็นโลหะผสมที่มีแมงกานีสต่ำกว่านี้หรือไม่มีเลย สมบัติทางกลดี แต่ความต้านทานการหมองต่ำ ในทางตรงข้าม หากมีปริมาณแมงกานีสสูง คือ ตั้งแต่ 1.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นไป ความต้านทานการหมองดี แต่สมบัติทางกลต่ำ ทั้งยังเกิดข้อบกพร่องลักษณะจุดสีดำบนผิวโลหะ ทำให้ลดความเงางามของผิวโลหะเงิน สเตอร์ลิง



รูปที่ 4.28 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า I_{corr} ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 °C

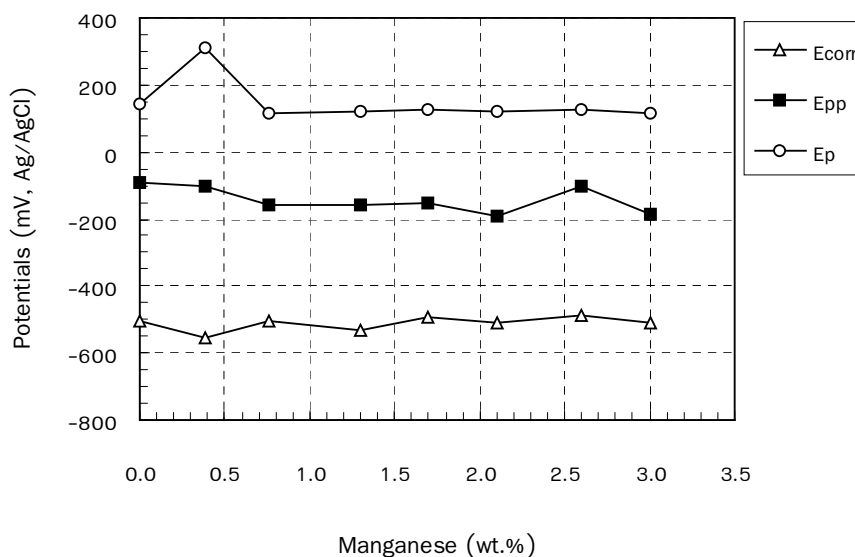
จากรูปที่ 4.26, 4.27 และ 4.28 ทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อโลหะเงินสเตอร์ลิงมีปริมาณแมงกานีสมากขึ้น มีผลในการเพิ่มค่า E_{corr} ลดค่า E_{pp} และค่า I_p อย่างเห็นได้ชัด แต่มีผลในการลดค่า E_p ไม่ชัดเจนนักแต่มีแนวโน้มที่ลดลง แสดงว่าปริมาณแมงกานีสที่เติมลงในโลหะเงินสเตอร์ลิง มีผลในการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของฟิล์มที่เกิดขึ้น โลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่า $E_{\text{corr}} = -54 \text{ mV}$ ซึ่งสูงกว่าในโลหะผสมที่ไม่มีปริมาณแมงกานีส ($E_{\text{corr}} = -132 \text{ mV}$) โดยโลหะผสมที่มีค่า E_{corr} ต่ำ จะถูกกัดกร่อนได้ง่ายกว่า ค่า E_p ที่ได้ลดลงน้อยมาก แสดงว่าปริมาณแมงกานีสที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อการต้านทานการแตกตัวของฟิล์มป้องกันมากนัก คือ หากโลหะผสมอยู่ในสภาวะที่มีสนามไฟฟ้าที่เหมาะสม ฟิล์มก็จะสามารถแตกตัวได้ และเนื่องจากค่า E_{pp} คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนสภาวะที่ไม่มีฟิล์มไปเป็นสภาวะขณะเกิดฟิล์มที่ผิว (active-passive transition) การลดลงของค่า E_{pp} (อัตราการลดลงค่อนข้างต่ำ) เมื่อโลหะผสมมีปริมาณแมงกานีสสูงขึ้น แสดงว่าโลหะผสมนั้นสามารถเกิดฟิล์มพาสซีฟ (passive film) ได้ง่ายขึ้น และการลดของค่า I_p ที่ชัดเจนอาจชี้ให้เห็นว่าฟิล์มที่ผิวของโลหะผสม มีความสามารถที่จะต้านทานการไหลผ่านของไอออนได้มากขึ้น ป้องกันการแพร่ของออกซิเจนหรือซัลเฟอร์ในอากาศเข้าไปทำปฏิกิริยากับธาตุหลักของโลหะผสม ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดความหมอง ค่า I_p ในโลหะผสมที่ไม่ได้เติมแมงกานีสมีค่า $117.58 \mu\text{A/cm}^2$ และค่า I_p จะลดลงเหลือเพียง $5.4 \mu\text{A/cm}^2$ ในโลหะผสมที่มีแมงกานีส 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับค่า I_{corr} ที่ได้จากจุดตัดของเส้นโค้งคาโทดิกและอโน

ดิก สามารถหาได้ดังรูปที่ 4.29 โดยเลือกจุดเพื่อหาความชันของเส้นโค้งทั้งสอง ค่ากระแสที่จุดตัดคือค่า I_{corr} คำนวณค่าอัตราการกัดกร่อนโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับเครื่องโพเทนชิโอสแตท หรือนำค่า I_{corr} ที่หาได้ ไปคำนวณโดยใช้สูตรจากสมการที่ (4.7) ผลการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 4.9

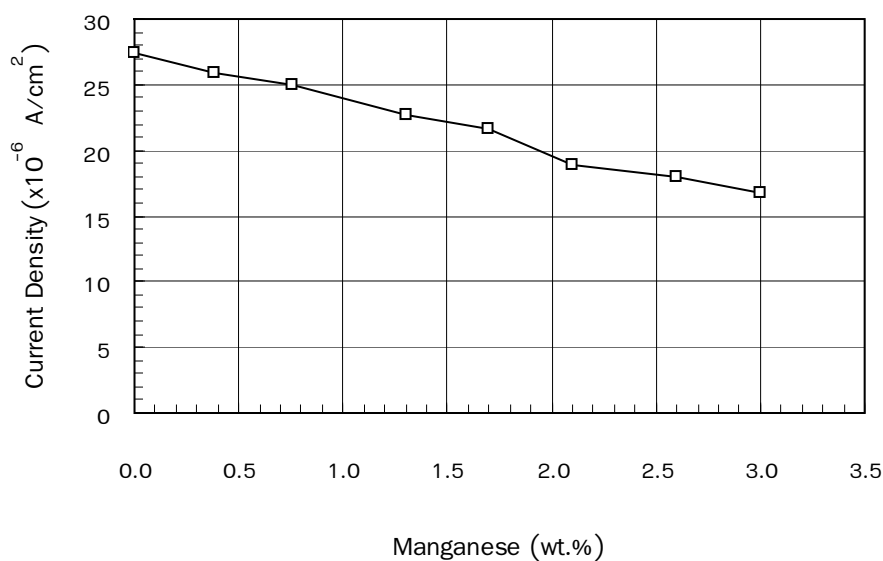


รูปที่ 4.29 แสดงการหาค่า I_{corr} จากจุดตัดระหว่างเส้นโค้งคาโทดิกและเส้นโค้งแอโนดิก

สำหรับการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงด้วยการวัดเส้นโพลาริเซชันของโลหะทดสอบในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งอิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 °C ได้ค่า E_{corr} , E_{pp} , E_p และ I_{corr} ดังตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.30 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า E_{corr} , E_{pp} และ E_p ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 °C



รูปที่ 4.31 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า I_{corr} ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 °C

จากรูปที่ 4.30 และ 4.31 จะเห็นว่าค่า E_{corr} , E_{pp} , E_p และ I_{corr} ที่ได้ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กล่าวคือ ปริมาณแมงกานีสในโลหะผสมที่เพิ่มขึ้น ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมได้ ค่า I_{corr} ที่หาได้ นำมาคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนได้ผลดังตารางที่ 4.10 สำหรับการทดสอบด้วยสารละลายที่อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์นี้ จะไม่สามารถหาค่า I_p ได้ เนื่องจากโลหะทดสอบไม่มีฟิล์มพาสซีฟเกิดขึ้นที่ผิว เพราะก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งเป็นสารประกอบซัลเฟอรั่มีผลยับยั้งการเกิดฟิล์มของโลหะผสม เมื่อนำ ค่า I_{corr} และค่าอัตราการกัดกร่อนในการทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายทั้งสองลักษณะมาเปรียบเทียบ แสดงดังรูปที่ 4.32 และ 4.33