



# รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

## โครงการ

“ การพัฒนาและการผลิตโลหะผสมสำเร็จรูป  
ที่ใช้ประกอบอัญมณี ”  
ตามแผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรม ระยะที่ 2

โดย

อาจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร และคณะ

มีนาคม 2547

# รายงานฉบับสมบูรณ์

## โครงการ

“ การพัฒนาและการผลิต โลหะผสมสำเร็จรูป  
ที่ใช้ประกอบอัญมณี ”  
ตามแผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรม ระยะที่ 2

### คณะผู้วิจัย

### สังกัด

ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร

ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รศ. ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ

ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อ. สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์

ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยร่วมกับ

สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม

ชุดโครงการพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับสมบูรณ์ของโครงการการพัฒนาและการผลิตโลหะผสมสำเร็จรูปที่ใช้ประกอบอัญมณีนี้ สามารถทำสำเร็จลุล่วงได้เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือและให้แนวทางการสนับสนุนจากบุคคลและองค์กรที่เกี่ยวข้องตามที่ได้ระบุได้ในกิตติกรรมประกาศนี้

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยมาโดยตลอดอย่างต่อเนื่อง จนทำให้การดำเนินการวิจัยราบรื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งได้รับการประสานงานคอยช่วยเหลือดูแลอย่างดีมาโดยตลอด คณะผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณอย่างยิ่งแก่ ศาสตราจารย์ ดร. ทวีป ศิริวิศรี และทีมงานประสานงานโครงการทุกท่าน

ขอขอบคุณสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรมที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้แผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรมระยะที่ 2

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยในการตรวจวิเคราะห์การทดลอง

ขอขอบคุณบริษัท ศรีเอทีพี เจมส์ แอนด์จิวเวลรี่ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการหล่อชิ้นงานตัวอย่าง และช่วยเตรียมวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการหล่อแบบ Lost - wax นี้

ท้ายสุดนี้ คณะผู้วิจัยขอใช้โอกาสนี้ขอบคุณแก่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการจัดเตรียมการวิจัย และสนับสนุนเครื่องมือในการทำวิจัย ต่าง ๆ และขอขอบคุณนิสิตปริญญาตรี นิสิตปริญญาโททุกท่านในโครงการ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ที่มีส่วนช่วยเหลือและผลักดันให้งานวิจัยของโครงการสำเร็จลุล่วงไปได้

## บทสรุปผู้บริหาร

อุตสาหกรรมเครื่องประดับของไทยจัดเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสามารถและศักยภาพในการนำรายได้เข้าสู่ประเทศสูง โดยมีมูลค่าการส่งออกอยู่ในสิบอันดับแรก ในปี พ.ศ. 2546 ที่ผ่านมามีมูลค่าการส่งออกสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับประมาณ 100,000 ล้านบาท อย่างไรก็ตาม อุตสาหกรรมนี้ยังอาศัยแรงงานฝีมืออยู่มาก และยังต้องการการพัฒนาในด้านเทคโนโลยีทั้งทางด้านการผลิตและการบริหารการจัดการ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงและราคาเหมาะสมต่อการแข่งขันที่รุนแรงมากขึ้น วัตถุดิบส่วนใหญ่ทั้งโลหะมีค่าอัญมณี ตลอดจนเครื่องจักรอุปกรณ์และวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต เช่น โลหะผสมสำเร็จรูปหรือที่เรียกว่า อัลลอย ก็ยังต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้สูญเสียเงินตราไปกับวัสดุและวัตถุดิบเหล่านี้ ในแต่ละปีเป็นจำนวนมาก

ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับเงินก็เหมือนกับที่กล่าวมา ผู้ผลิตจำเป็นต้องสนองความต้องการของผู้บริโภคที่ต้องการเครื่องประดับเงินที่มีความต้านทานการหมองดีขึ้น ทำให้กระบวนการการผลิตแบบเดิมที่ใช้โลหะทองแดงบริสุทธิ์มาผสมกับเนื้อโลหะเงิน ผลิตเป็นเงินสเตอร์ลิงเกรด 925 มีจุดด้อย เพราะกรรมวิธีนี้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความต้านทานการหมองไม่ดีนัก ผู้ผลิตจึงจำเป็นต้องพัฒนาสูตรอัลลอยใหม่ขึ้นหรือซื้อ อัลลอยจากต่างประเทศที่มีราคาค่อนข้างสูง ซึ่งข้อมูลและสูตรอัลลอย ตลอดจนเทคนิคในการผลิตอัลลอยสำเร็จรูปเป็นความลับ อย่างไรก็ตาม จากการค้นคว้าและวิจัยพบว่าธาตุที่น่าจะมีส่วนช่วยในการต้านทานการหมอง คือ ธาตุซิลิคอน อินเดียมและแมงกานีส ในกรณีธาตุซิลิคอน คณะผู้วิจัยได้ศึกษาไว้แล้ว (รายละเอียดอยู่ใน โครงการ “การปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยการเติมธาตุซิลิคอน , ปี 2546) ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจที่จะศึกษาถึงอิทธิพลของธาตุอินเดียมและแมงกานีสต่อการเพิ่มความต้านทานการหมองของโลหะเงินสเตอร์ลิง และ คุณสมบัติทางกล คณะผู้วิจัยได้เสนอโครงการ “การพัฒนาและการผลิตโลหะผสมสำเร็จรูปที่ใช้ประกอบ อัญมณี” นี้ ภายใต้แผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรมระยะที่ 2 โดยโครงการนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม (สศอ.) ผ่านสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) เมื่อ 15 มกราคม 2544 เป็นต้นมา ระยะเวลาดำเนินการวิจัยเป็นเวลา 3 ปี โดยมีวัตถุประสงค์การวิจัยดังนี้

1. ศึกษา วิจัย อิทธิพลของธาตุอินเดียมและแมงกานีส ต่อคุณสมบัติด้านความทนทานต่อการหมอง และคุณสมบัติทางกลในเครื่องประดับที่ทำจากโลหะเงินสเตอร์ลิง โดยอ้างอิงผลิตภัณฑ์สากลเป็นเกณฑ์ และหาปริมาณที่เหมาะสมของธาตุผสมดังกล่าว เพื่อนำมาใช้ในการผลิตเป็นเครื่องประดับเงินสเตอร์ลิง
2. ศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลของธาตุที่บวกต่อคุณสมบัติด้านการประสานในโลหะประสานทอง เพื่อนำไปผลิตเป็นตัวประสานที่มีคุณสมบัติและการใช้งานที่ชัดเจน ในทอง 14 กระรัต
3. เผยแพร่ความรู้ที่ได้จากการศึกษาสู่สาธารณชน และวงการอุตสาหกรรม

ในการวิจัยนี้ ได้แบ่งหัวข้อวิจัยออกเป็น 3 หัวข้อ ดังนี้ (1) การศึกษาอิทธิพลของธาตุอินเดียม ต่อคุณสมบัติทางกลและความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิง (2) การศึกษาอิทธิพลของธาตุแมงกานีสต่อสมบัติทางกลและความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิง และ (3) การศึกษาผลของดีบุก ที่มีตัวโลหะประสานทองเกรด 14 กระรัต

ในการศึกษาโลหะผสมเงิน – ทองแดง – อินเดียม เงินสเตอร์ลิงที่มีการผสมเฉพาะอินเดียม (ระหว่าง 1.03 – 2.09 % โดยน้ำหนัก) ไม่ทำให้เงินสเตอร์ลิงมีความต้านทานการหมองสูงขึ้น และยังทำให้ความแข็งและความต้านทานแรงดึงของเงินสเตอร์ลิงลดลงจากการที่ได้ลดสัดส่วนของทองแดงลงโดยเดิม อินเดียมลงไปแทนที่ในชุดตัวอย่าง นอกจากนี้ยังพบลักษณะของโครงสร้างที่สองมีการกระจายตัวอยู่ทั่วไปในเนื้อพื้น โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของอินเดียมที่ผสมลงไป แต่สำหรับเงินสเตอร์ลิงที่มีการผสมทั้งซิลิคอนและอินเดียม โดยมีปริมาณซิลิคอนเหลืออยู่ในชุดตัวอย่างระหว่าง 0.09 - 0.11 % และมีอินเดียมผสมอยู่ในปริมาณ 0.53, 1.09, 1.60 และ 2.13 % โดยน้ำหนัก พบว่าเงินสเตอร์ลิงมีความสามารถในการต้านทานการหมองสูงขึ้นตามปริมาณอินเดียมที่ผสมลงไป โดยสูงขึ้น 33 – 40 % เมื่อเทียบกับเงินสเตอร์ลิงธรรมดา (92.5 % สเตอร์ลิง) และสูงขึ้น 31.84 – 38.65 % เมื่อเทียบกับเงิน สเตอร์ลิงที่ผสมซิลิคอน (ซิลิคอน 0.09 – 0.11%) ซึ่งจากการตรวจสอบปริมาณส่วนผสมในโครงสร้างจุลภาคพบอินเดียมและซิลิคอนผสมอยู่ทั้งในเนื้อพื้นและในโครงสร้างที่สองโดยขึ้นอยู่กับปริมาณอินเดียมและซิลิคอนที่เติมลงไป

ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง – แมงกานีส ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล ความต้านทานการหมองและการกัดกร่อนได้ถูกนำมาศึกษา เพื่อหาปริมาณธาตุแมงกานีสที่เหมาะสมในการหล่อโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ใช้ในอุตสาหกรรมด้านเครื่องประดับ โลหะเงินสเตอร์ลิงที่ทำการทดลองมีปริมาณแมงกานีสโดยน้ำหนัก ธาตุแมงกานีสที่พบในโครงสร้างจุลภาคจะเป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้างยูเทคติกที่เป็น copper - rich phase สูงกว่าในโครงสร้างเนื้อพื้น (silver - rich phase) และปริมาณแมงกานีสที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณโครงสร้างยูเทคติกที่เกิดขึ้นลดลง ความต้านทานแรงดึง ความเค้นจุดคราก และความแข็งมีค่าลดลงด้วย และปริมาณที่สูงขึ้นของแมงกานีสนี้ยังเพิ่มความต้านทานการหมองให้กับโลหะเงินสเตอร์ลิง ซึ่งตรวจสอบค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิว ( $DE^*$ ) ของโลหะเงินสเตอร์ลิงในบรรยากาศซัลเฟอร์ด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของฟิล์มที่เกิดขึ้นจากเส้นโพเทนชิโอไดนามิกอานอดิกโพลาไรเซชัน ซึ่งได้จากการทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณแมงกานีสที่เพิ่มขึ้นมีผลในการเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) และลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มพาสซีฟ ( $I_p$ ) อย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิมิตด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โลหะเงินสเตอร์ลิงไม่มีฟิล์มพาสซีฟเกิดขึ้นที่ผิว

ผลของดีบุกต่อความสามารถในการเปียกของโลหะประสานทอง 14 กระรัต ได้ถูกนำมาศึกษา ในโลหะประสานทอง 14 k จะเติมปริมาณดีบุกในช่วง 0 – 3.37 % โดยน้ำหนัก และคงอัตราส่วนระหว่างเงินและทองแดงในอัตราส่วน 1:1 ความสามารถในการเปียกทดสอบโดยใช้วิธีทดสอบแบบ Sessile drop และพบ

ว่ามุมสัมผัสของโลหะประสานทองลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณดีบุก เช่น จาก 120.1 องศา ที่ 0% Sn เป็น 105.9 องศาที่ 3.37%Sn ความแข็ง ความต้านทานการเฉือน เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณดีบุกเพิ่มขึ้น

จากการศึกษาและวิจัยในโครงการนี้ พบว่าธาตุอินเดียมที่ใช้ร่วมกับธาตุซิลิคอน มีผลต่อคุณสมบัติด้านการต้านทานการหมอง ธาตุแมงกานีสก็ส่งผลต่อคุณสมบัติดังกล่าวเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ธาตุแมงกานีสจัดเป็นธาตุที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้อย่างรวดเร็ว จึงต้องระมัดระวังในการใช้งานมากกว่าธาตุอินเดียม นอกจากนี้ คุณสมบัติทางกลของโลหะผสมจะมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมีเป็นอย่างมาก ในกรณีของโลหะประสานทอง ผลวิจัยแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของธาตุดีบุกต่อคุณสมบัติต่าง ๆ อย่างชัดเจน โดยจะมีผลต่อจุดหลอมเหลวลดลง ความแข็งแรงและความต้านทานการเฉือนเพิ่มขึ้น และส่งผลต่อมุมสัมผัสลดลง จากคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ ทำให้สรุปได้ว่า การเติมดีบุกมีผลช่วยในด้านการประสานและการเปียกของโลหะประสานได้

## บทคัดย่อ

ในการวิจัยนี้ได้แบ่งหัวข้อวิจัยออกเป็น 3 หัวข้อ ดังนี้ (1) การศึกษาอิทธิพลของธาตุอินเดียมต่อคุณสมบัติทางกลและความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิง (2) การศึกษาอิทธิพลของธาตุแมงกานีสต่อสมบัติทางกลและความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิง และ (3) การศึกษาผลของดินบุกที่มีตัวโลหะประสานทองเกรด 14 กระรัต

ในการศึกษาโลหะผสมเงิน - ทองแดง - อินเดียม เงินสเตอร์ลิงที่มีการผสมเฉพาะอินเดียม (ระหว่าง 1.03 - 2.09 %โดยน้ำหนัก) ไม่ทำให้เงินสเตอร์ลิงมีความต้านทานการหมองสูงขึ้น และยังทำให้ความแข็งแรงและความต้านทานแรงดึงของเงินสเตอร์ลิงลดลงจากการที่ได้ลดสัดส่วนของทองแดงลงโดยเติมอินเดียมลงไปแทนที่ในชุดตัวอย่าง นอกจากนี้ยังพบลักษณะของโครงสร้างที่สองมีการกระจายตัวอยู่ทั่วไปในเนื้อพื้น โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของอินเดียมที่ผสมลงไป แต่สำหรับเงินสเตอร์ลิงที่มีการผสมทั้งซิลิกอนและอินเดียม โดยมีปริมาณซิลิกอนเหลืออยู่ในชุดตัวอย่างระหว่าง 0.09 - 0.11 % และมีอินเดียมผสมอยู่ในปริมาณ 0.53, 1.09, 1.60 และ 2.13 %โดยน้ำหนัก พบว่าเงินสเตอร์ลิงมีความสามารถในการต้านทานการหมองสูงขึ้นตามปริมาณอินเดียมที่ผสมลงไป โดยสูงขึ้น 33 - 40 % เมื่อเทียบกับเงินสเตอร์ลิงธรรมดา (92.5 % สเตอร์ลิง) และสูงขึ้น 31.84 - 38.65 % เมื่อเทียบกับเงิน สเตอร์ลิงที่ผสมซิลิกอน (ซิลิกอน 0.09 - 0.11%) ซึ่งจากการตรวจสอบปริมาณส่วนผสมในโครงสร้างจุลภาคพบอินเดียมและซิลิกอนผสมอยู่ทั้งในเนื้อพื้นและในโครงสร้างที่สองโดยขึ้นอยู่กับปริมาณอินเดียมและซิลิกอนที่เติมลงไป

ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล ความต้านทานการหมองและการกัดกร่อนได้ถูกนำมาศึกษา เพื่อหาปริมาณธาตุแมงกานีสที่เหมาะสมในการหล่อโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ใช้ในอุตสาหกรรมด้านเครื่องประดับ โลหะเงินสเตอร์ลิงที่ทำการทดลองมีปริมาณแมงกานีสโดยน้ำหนัก ธาตุแมงกานีสที่พบในโครงสร้างจุลภาคจะเป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้างยูเทคติกที่เป็น copper - rich phase สูงกว่าในโครงสร้างเนื้อพื้น (silver - rich phase) และปริมาณแมงกานีสที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณโครงสร้างยูเทคติกที่เกิดขึ้นลดลง ความต้านทานแรงดึง ความเค้นจุดคราก และความแข็งมีค่าลดลงด้วย และปริมาณที่สูงขึ้นของแมงกานีสนี้ยังเพิ่มความต้านทานการหมองให้กับโลหะเงินสเตอร์ลิง ซึ่งตรวจสอบค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิว (DE\*) ของโลหะเงินสเตอร์ลิงในบรรยากาศซัลเฟอร์ด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของฟิล์มที่เกิดขึ้นจากเส้นโพเทนชิโอไดนามิกอานอดิกโพลาไรเซชัน ซึ่งได้จากการทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณแมงกานีสที่เพิ่มขึ้นมีผลในการเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) และลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มพาสซีฟ ( $I_p$ ) อย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์

1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โลหะเงินสเตอร์ลิงไม่มีฟิล์มพาสซีฟเกิดขึ้นที่ผิว

ผลของดินบุกต่อความสามารถในการเปียกของโลหะประสานทอง 14 กระรัต ได้ถูกนำมาศึกษาในโลหะประสานทอง 14 k จะเติมปริมาณดินบุกในช่วง 0 – 3.37 % โดยน้ำหนัก และคงอัตราส่วนระหว่างเงินและทองแดงในอัตราส่วน 1:1 ความสามารถในการเปียกทดสอบโดยใช้วิธีทดสอบแบบ Sessile drop และพบว่ามุมสัมผัสของโลหะประสานทองลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณดินบุก เช่น จาก 120.1 องศา ที่ 0% Sn เป็น 105.9 องศาที่ 3.37%Sn ความแข็ง ความต้านทานการเคียน เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณดินบุกเพิ่มขึ้น

## Abstract

In this research there are 3 topics studied as follows :

1. Effect of indium on mechanical properties and tarnish resistance of Sterling silver.
2. Effect of manganese on mechanical properties and tarnish resistance of Sterling silver.
3. Effect of Tin on 14 karat gold solder.

On Study of Ag – Cu – In Alloys, effects of indium added sterling (1.03 – 2.09 % indium) in improving tarnish resistance was not noticeable. In addition, the alloy exhibited lower tensile stress and hardness due to lower copper content. The secondary structure was found to increase in volume and was well dispersed as more indium was added. For sterling silver having silicon 0.09 - 0.11% by weight and indium 0.53, 1.09, 1.60 and 2.13 %, the tarnish resistance of these alloy was found to increase as the amount of indium increased. The tarnish resistance was found to increase 33 – 40 % compared with the common sterling silver (92.50% sterling silver) and 31.84 – 38.65 % compared with the silicon added sterling silver (0.09 – 0.11% silicon). EDX, Spectroscopy revealed that both indium and silicon presented in both matrix and secondary structure.

The effect of manganese in 92.5%Ag – Cu – Mn alloys on their microstructure, mechanical properties, and tarnish and corrosion resistance were investigated to determine the suitable manganese content of sterling silver alloys for the jewelry industry. The experimental alloys varied manganese content in the overage of 0-3 % by weight. The microstructure of 92.5%Ag – Cu – Mn alloys consists of both silver – rich solid solution, as a matrix, and eutectic structure. The amount of manganese found in the eutectic is higher than those in the matrix. By increasing manganese content, the amount of eutectic structure, and therefore, tensile and yield strength and hardness of the alloys were decreasing. The tarnish resistance was found to be improved when the amount of manganese were increasing and the tarnish films were studied quantitatively using a spectrophotometer to measure the color difference ( $DE^*$ ). Potentiodynamic anodic polarization technique was applied to measure the corrosion potentials ( $E_{corr}$ ) and passive current density ( $I_p$ ). In 1% sodium chloride solution, the increasing of manganese content not only promoted the noble shift in corrosion potentials but also reduced passive current density. However, in 1% sodium chloride solution saturated with hydrogen sulfide ( $H_2S$ ), the passive region could not be observed.

The effects of Tin on wettability of 14 karat gold soldering alloy have been investigated. Tin contents in the range of 0-3.37 % by weight. have been added into 14 k. solders and the ratio of silver of copper was maintained at 1:1 Wettability has been performed under sessile drop test and it was found that contact angles of the solder drop decreased with increasing tin content ie., from 120.1 degree at 0% Sn to 105.9 degree at 3.37% Sn. Hardness and shear strength also increased when the amount of tin increased.

## สารบัญ

|                                                                                                                                                           | หน้า  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| กิตติกรรมประกาศ                                                                                                                                           | i     |
| บทสรุปผู้บริหาร                                                                                                                                           | ii    |
| บทคัดย่อ                                                                                                                                                  | v     |
| Abstract                                                                                                                                                  | vii   |
| สารบัญ                                                                                                                                                    | ix    |
| สารบัญรูป                                                                                                                                                 | xii   |
| สารบัญตาราง                                                                                                                                               | xviii |
| บทที่ 1    บทนำ                                                                                                                                           | 1-1   |
| 1.1    ความเป็นมาของโครงการ                                                                                                                               | 1-1   |
| 1.2    ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับโลหะผสม                                                                                                                    | 1-2   |
| 1.3    วัตถุประสงค์                                                                                                                                       | 1-4   |
| 1.4    ขอบเขตของการวิจัย                                                                                                                                  | 1-4   |
| 1.5    ระยะเวลาดำเนินงาน                                                                                                                                  | 1-4   |
| 1.6    กิจกรรมและผลที่คาดว่าจะได้รับ                                                                                                                      | 1-5   |
| 1.7    แผนการดำเนินงาน                                                                                                                                    | 1-9   |
| 1.8    การวิเคราะห์ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจของโครงการ                                                                                                          | 1-10  |
| บทที่ 2    การดำเนินงานวิจัยและกิจกรรมที่เกี่ยวข้อง                                                                                                       | 2-1   |
| 2.1    ผลที่ได้ปฏิบัติในช่วงเดือนที่ 1 – 6                                                                                                                | 2-1   |
| 2.2    ผลที่ได้ปฏิบัติในช่วงเดือนที่ 7 – 12                                                                                                               | 2-1   |
| 2.3    ผลที่ได้ปฏิบัติในช่วงเดือนที่ 13 – 18                                                                                                              | 2-1   |
| 2.4    ผลที่ได้ปฏิบัติในช่วงเดือนที่ 19 – 24                                                                                                              | 2-2   |
| 2.5    ผลที่ได้ปฏิบัติในช่วงเดือนที่ 25 – 30                                                                                                              | 2-2   |
| 2.6    ผลที่ได้ปฏิบัติในช่วงเดือนที่ 31 – 36                                                                                                              | 2-2   |
| 2.7    กิจกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย                                                                                                             | 2-3   |
| บทที่ 3    การศึกษาอิทธิพลของธาตุอินเดียมต่อคุณสมบัติทางกล และความต้านทานการ<br>หมองของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง (เงิน 92.5% – ทองแดง – อินเดียม –<br>ซิลิคอน) | 3-1   |
| 3.1    ความสำคัญของงานวิจัย                                                                                                                               | 3-1   |
| 3.2    วัตถุประสงค์                                                                                                                                       | 3-4   |

|                                                                                                                                         | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.3 ขอบเขตการวิจัย                                                                                                                      | 3-5  |
| 3.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                                                                                                           | 3-5  |
| 3.5 ข้อมูลเบื้องต้นด้านโลหวิทยา                                                                                                         | 3-5  |
| 3.6 ระเบียบวิธีวิจัย                                                                                                                    | 3-12 |
| 3.7 ขั้นตอนการทดลอง                                                                                                                     | 3-14 |
| 3.8 ระเบียบ และวิธีการตรวจสอบวิเคราะห์ผล                                                                                                | 3-15 |
| 3.9 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลอง                                                                                                           | 3-19 |
| 3.10 ผลการดำเนินงานวิจัย                                                                                                                | 3-20 |
| 3.11 โครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่ใส่ทองแดงชนิดเดียว                                                                               | 3-22 |
| 3.12 ผลวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเงินสเตอร์ลิงผสมภายหลังจากการ<br>หลอม และช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว                                          | 3-29 |
| 3.13 ผลของสมบัติทางกล                                                                                                                   | 3-30 |
| 3.14 ผลการทดสอบการต้านทานการหมอง                                                                                                        | 3-30 |
| 3.15 อภิปรายผลการทดลอง                                                                                                                  | 3-31 |
| 3.16 สรุปผลการทดลอง                                                                                                                     | 3-47 |
| บทที่ 4 การศึกษาอิทธิพลของธาตุแมงกานีส ต่อสมบัติทางกลและความต้านทานการ<br>หมอง ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง (เงิน 92.5% – ทองแดง – แมงกานีส) | 4-1  |
| 4.1 ความสำคัญของงานวิจัย                                                                                                                | 4-1  |
| 4.2 วัตถุประสงค์                                                                                                                        | 4-4  |
| 4.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย                                                                                                               | 4-4  |
| 4.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                                                                                                           | 4-4  |
| 4.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง                                                                                                                  | 4-5  |
| 4.6 ระเบียบวิธีการวิจัย                                                                                                                 | 4-19 |
| 4.7 ขั้นตอนการทดลอง                                                                                                                     | 4-22 |
| 4.8 วิธีการวิเคราะห์และวิธีการตรวจสอบ                                                                                                   | 4-24 |
| 4.9 รายงานผลการทดลอง                                                                                                                    | 4-29 |
| 4.10 อภิปรายผลการทดลอง                                                                                                                  | 4-36 |
| 4.11 สรุปผลการทดลอง                                                                                                                     | 4-54 |
| บทที่ 5 การศึกษาอิทธิพลของธาตุดีบุกต่อคุณสมบัติการประสานในโลหะประสานทอง                                                                 | 5-1  |
| 5.1 ความสำคัญของงานวิจัย                                                                                                                | 5-1  |
| 5.2 วัตถุประสงค์                                                                                                                        | 5-2  |

|                               | หน้า |
|-------------------------------|------|
| 5.3 ขอบเขตการศึกษา            | 5-2  |
| 5.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 5-2  |
| 5.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง        | 5-3  |
| 5.6 ระเบียบวิธีการวิจัย       | 5-12 |
| 5.7 ผลการทดลอง                | 5-16 |
| 5.8 อภิปรายผลการทดลอง         | 5-22 |
| 5.9 สรุปผลการทดลอง            | 5-27 |
| เอกสารอ้างอิง                 |      |
| ภาคผนวก ก.                    |      |
| ภาคผนวก ข.                    |      |
| ภาคผนวก ค.                    |      |
| ภาคผนวก ง.                    |      |
| ภาคผนวก จ.                    |      |
| ภาคผนวก ฉ.                    |      |
| ภาคผนวก ช.                    |      |
| ภาคผนวก ซ.                    |      |

## สารบัญรูป

|             | หน้า                                                                                                                                                                                 |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| รูปที่ 3.1  | แผนภูมิสมดุลในระบบ 2 ธาตุ ระหว่างเงินกับทองแดง 3-2                                                                                                                                   |
| รูปที่ 3.2  | แสดงลักษณะจุลโครงสร้างของเงินสเตอร์ลิง 3-2                                                                                                                                           |
| รูปที่ 3.3  | แสดงค่าพลังงานอิสระของการเกิดโลหะออกไซด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 3-4                                                                                                                        |
| รูปที่ 3.4  | แผนภูมิสมดุลระบบโลหะผสมแคลเซียม-อินเดียม 3-9                                                                                                                                         |
| รูปที่ 3.5  | แผนภูมิสมดุลระบบโลหะผสมเงิน-อินเดียม 3-9                                                                                                                                             |
| รูปที่ 3.6  | แผนภูมิสมดุลระบบโลหะผสมทองแดง-อินเดียม 3-10                                                                                                                                          |
| รูปที่ 3.7  | แสดงความสัมพันธ์ $\sqrt{c}$ กับ $\Delta t$ . ในโลหะผสมของทองแดงที่มีชนิดของอะตอม<br>ที่ถูกละลายต่าง ๆ กัน 3-12                                                                       |
| รูปที่ 3.8  | เตาอินดักชันและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับหล่อเงินสเตอร์ลิง 3-14                                                                                                                             |
| รูปที่ 3.9  | แสดงขั้นตอนทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8M – 96 3-18                                                                                                                                  |
| รูปที่ 3.10 | แสดงวิธีการวัดค่าความแข็งขึ้นงานทดสอบ 3-18                                                                                                                                           |
| รูปที่ 3.11 | เครื่องหล่อดูดสุญญากาศที่มีระบบกวนน้ำโลหะที่ใช้ในวงการอุตสาหกรรม<br>เครื่องประดับ 3-21                                                                                               |
| รูปที่ 3.12 | แสดงถึงผิวงานหล่อของขึ้นงาน 3-21                                                                                                                                                     |
|             | - เงินสเตอร์ลิง 925-Cu7.5 (ซ้ายบน)                                                                                                                                                   |
|             | - เงิน 925-In1-Si0.4 (กลางบน)                                                                                                                                                        |
|             | - เงิน 925 ผสมอัลลอยนำเข้า (ขวาบน)                                                                                                                                                   |
|             | - เงิน 950-In1-Si0.4 (ซ้ายบน)                                                                                                                                                        |
|             | - เงิน 950-In2-Si0.3 (ขวาล่าง)                                                                                                                                                       |
| รูปที่ 3.13 | รูปร่างของขึ้นงานโลหะเงินผสมที่ได้จากการหลอม 3-22                                                                                                                                    |
| รูปที่ 3.14 | รูปขึ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึง ก่อนและหลังผ่านการทดสอบ 3-22                                                                                                                        |
| รูปที่ 3.15 | ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่มีทองแดง 7.5% (ซ้าย 50x และขวา 200x) 3-23                                                                                                       |
| รูปที่ 3.16 | โครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่มีทองแดง 7.5% เมื่อใช้กล้องอิเล็กตรอน<br>แบบส่องกวาดด้วย Back scatter electron image. (ซ้าย กำลังขยาย 100 เท่า<br>และขวา กำลังขยาย 1000 เท่า) 3-23 |
| รูปที่ 3.17 | ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงของแต่ละชุดส่วนผสมที่กำลังขยาย<br>ต่างๆ 3-24                                                                                                       |
| รูปที่ 3.17 | ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงของแต่ละชุดส่วนผสมที่กำลังขยาย<br>ต่างๆ (ต่อ) 3-25                                                                                                 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                           | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 3.17 ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงของแต่ละชุดส่วนผสมที่กำลังขยาย<br>ต่างๆ (ต่อ)                                                                                                                                                                                               | 3-26 |
| รูปที่ 3.18 โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากนำไปกัดกรด ที่กำลังขยาย 200 เท่า                                                                                                                                                                                                                     | 3-27 |
| รูปที่ 3.19 โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากนำไปกัดกรด ที่กำลังขยาย 200 เท่า                                                                                                                                                                                                                     | 3-28 |
| รูปที่ 3.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอินเดียมกับช่วงอุณหภูมิหลอม<br>เหลว สำหรับชุดส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่ไม่มีปริมาณซิลิคอนผสมอยู่                                                                                                                                             | 3-33 |
| รูปที่ 3.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอินเดียม 0 – 3.09 %wt.กับค่าความแข็ง<br>สำหรับชุดส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่ไม่เติมซิลิคอน                                                                                                                                                        | 3-37 |
| รูปที่ 3.22 ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณอินเดียมแตกต่างกัน                                                                                                                                                                                                               | 3-39 |
| รูปที่ 3.23 ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณซิลิคอนใกล้เคียงกัน<br>( 0.09 – 0.11 % wt. ) แต่มีปริมาณอินเดียมแตกต่างกัน ( 0 – 3.13 % wt. )                                                                                                                                    | 3-40 |
| รูปที่ 3.24 กราฟแสดงค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิคอนในปริมาณใกล้เคียงกัน<br>( 0.09-0.11% wt. ) กับปริมาณของอินเดียมที่ผสมลงไป ระหว่าง 0 – 3.13 % wt.                                                                                                                              | 3-41 |
| รูปที่ 3.25 กราฟแสดงค่า Ultimate Tensile Strength และ Yield Strength ของเงินสเตอร์ลิง<br>ที่เติมอินเดียมในปริมาณแตกต่างกันได้แก่ 0, 1.09 และ 3.13 %wt.                                                                                                                                    | 3-42 |
| รูปที่ 3.26 กราฟแสดงค่า Ultimate Tensile Strength และ Yield Strength ของเงินสเตอร์ลิง<br>ที่มีซิลิคอนผสมอยู่ใกล้เคียงกัน( 0.09 – 0.11%wt ) โดยมีปริมาณอินเดียมที่<br>ผสมอยู่ แตกต่างกัน ได้แก่ 0.53, 1.09, 1.60 และ 3.13 % wt.                                                            | 3-43 |
| รูปที่ 3.27 ภาพถ่ายแสดงสีผิวชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่เติมอินเดียม 0, 1 และ 2 %wt.<br>(มีอยู่จริง ในชิ้นงาน 0, 1.03 และ 3.09 ตามลำดับ) โดยใช้เวลาทดสอบ 1, 2,<br>3 และ 4 ชม                                                                                                               | 3-44 |
| รูปที่ 3.28 กราฟแสดงผลการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงของสี ( DE ) ของชิ้นงานเงิน<br>สเตอร์ลิงที่มีการผสมอินเดียม 0, 1.03 และ 2.09% wt. โดยใช้เวลาทดสอบ<br>1, 2, 3 และ 4 ชม.                                                                                                                      | 3-45 |
| รูปที่ 3.29 ภาพถ่ายแสดงสีผิวชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณของซิลิคอนใกล้เคียง<br>กัน( 0.09 - 0.11% wt. ) แต่มีปริมาณของอินเดียมแตกต่างกันได้แก่ 0, 0.5, 1,<br>1.5 และ 3.0 % wt.(มีอยู่จริงในชิ้นงาน 0, 0.53, 1.09, 1.60 และ 3.13 % wt.ตาม<br>ลำดับ)โดยใช้เวลาทดสอบ 1, 2, 3 และ 4 ชม. | 3-46 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                              | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 3.30 กราฟแสดงผลการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงของสี ( 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.                        | 3-47 |
| รูปที่ 4.1 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน – ทองแดง                                                                                                                                                                                                                                  | 4-2  |
| รูปที่ 4.2 แผนภูมิสมดุลเฟสของระบบเงินและออกซิเจน                                                                                                                                                                                                                             | 4-6  |
| รูปที่ 4.3 แผนภูมิของ Ellingham สำหรับการเกิดออกไซด์ของธาตุต่าง ๆ                                                                                                                                                                                                            | 4-7  |
| รูปที่ 4.4 ลักษณะเส้นโพลาริเซชันและค่าตัวแปรต่าง ๆ                                                                                                                                                                                                                           | 4-10 |
| รูปที่ 4.5 เซลล์ที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมี                                                                                                                                                                                                                           | 4-12 |
| รูปที่ 4.6 เครื่องโพเทนชิโอสแตทที่ใช้วัดเส้นโพลาริเซชัน                                                                                                                                                                                                                      | 4-12 |
| รูปที่ 4.7 ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิดต่างๆ                                                                                                                                                                                                                                         | 4-13 |
| รูปที่ 4.8 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน – แมงกานีส                                                                                                                                                                                                                                | 4-14 |
| รูปที่ 4.9 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบทองแดง – แมงกานีส                                                                                                                                                                                                                              | 4-15 |
| รูปที่ 4.10 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน – ทองแดง – แมงกานีส                                                                                                                                                                                                                      | 4-16 |
| รูปที่ 4.11 คุณสมบัติต่าง ๆ ของโลหะระบบเงิน – ทองแดง                                                                                                                                                                                                                         | 4-17 |
| รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุแมงกานีสที่ละลายอยู่จริง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) กับค่าเฉลี่ยของความแข็งที่วัดได้ (หน่วย HV) ในสภาพหล่อ                                                                                                                         | 4-18 |
| รูปที่ 4.13 แผนภาพลายเส้นแสดงชุดเครื่องมือวัดการทนหมองของเงินสเตอร์ลิง                                                                                                                                                                                                       | 4-21 |
| รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายชุดอุปกรณ์เครื่องมือวัดการทนหมองของเงินสเตอร์ลิง                                                                                                                                                                                                          | 4-21 |
| รูปที่ 4.15 แสดงภาพขึ้นทดสอบแรงดึง                                                                                                                                                                                                                                           | 4-26 |
| รูปที่ 4.16 ภาพแสดงชิ้นงานที่ได้จากการหลอมและหล่อแบบสูญญากาศ ของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่เติมปริมาณแมงกานีส 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก                                                                                                         | 4-29 |
| รูปที่ 4-17 ภาพแสดงลักษณะผิวของชิ้นงานที่ได้จากการหล่อ<br>(ก) โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมแมงกานีส<br>(ข) โลหะผสมที่มีแมงกานีส 0.76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก<br>(ค) โลหะผสมที่มีแมงกานีส 1.70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก<br>(ง) โลหะผสมที่มีแมงกานีส 2.60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก | 4-30 |
| รูปที่ 4.18 ภาพแสดงลักษณะชิ้นงานหลังทดสอบความต้านทานในการกันหมอง                                                                                                                                                                                                             | 4-34 |

|                                                                                                                                                                | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 4-19 ภาพแสดงจุดสีดำนบนผิวโลหะผสม 4.40%Cu – 2.60%Mn – balance of Ag ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) กำลังขยาย 100 เท่า                           | 4-37 |
| รูปที่ 4.20 กราฟแสดงผลจากการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมบนผิวของโลหะผสม 4.40%Cu – 2.60%Mn – balance of Ag (ก) บริเวณสีดำ (ข) บริเวณสีขาว                               | 4-37 |
| รูปที่ 4.21 ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5%-ทองแดง-แมงกานีส ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยายต่าง ๆ                   | 4-41 |
| รูปที่ 4.21 ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5%-ทองแดง-แมงกานีส ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยายต่าง ๆ (ต่อ)             | 4-42 |
| รูปที่ 4.21 ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5%-ทองแดง-แมงกานีส ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยายต่าง ๆ (ต่อ)             | 4-43 |
| รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทองแดงในโลหะเงินสเตอร์ลิง กับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์                                                               | 4-44 |
| รูปที่ 4.23 ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง – แมงกานีส ในสภาพหล่อขึ้นรูป ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 100 เท่า หลังการกัดกรด     | 4-45 |
| (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                                                                                                                          |      |
| รูปที่ 4.24 กราฟแสดงผลของธาตุแมงกานีสในโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความเค้นจุดคราก                                                      | 4-46 |
| รูปที่ 4.25 กราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิวของโลหะเงินสเตอร์ลิง                                                                                                 | 4-47 |
| รูปที่ 4.26 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า $E_{corr}$ , $E_{pp}$ และ $E_p$ ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 °C | 4-49 |
| รูปที่ 4.27 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า $I_p$ ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 °C                           | 4-49 |

|                                                                                                                                                                                              | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 4.28 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า $I_{corr}$ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 °C                                                     | 4-50 |
| รูปที่ 4.29 แสดงการหาค่า $I_{corr}$ จากจุดตัดระหว่างเส้นโค้งคาโทดิกและเส้นโค้งแอโนดิก                                                                                                        | 4-51 |
| รูปที่ 4.30 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า $E_{corr}$ , $E_{pp}$ และ $E_p$ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 °C | 4-51 |
| รูปที่ 4.31 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า $I_{corr}$ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 °C                      | 4-52 |
| รูปที่ 4.32 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงต่อค่า $I_{corr}$ ในสภาวะที่มี 1%NaCl เปรียบเทียบกับสภาวะที่มี 1%NaCl อิ่มตัวด้วย $H_2S$ ที่อุณหภูมิ 25 °C                                | 4-53 |
| รูปที่ 4.33 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงต่อค่าอัตราการกัดกร่อน ในสภาวะที่มี 1%NaCl เปรียบเทียบกับสภาวะที่มี 1%NaCl อิ่มตัวด้วย $H_2S$ ที่อุณหภูมิ 25 °C                           | 4-53 |
| รูปที่ 5.1 แสดงความต้านทานการหมองของโลหะผสมทองคำ-ทองแดง-เงิน                                                                                                                                 | 5-4  |
| รูปที่ 5.2 แสดงของเหลวในสมดุลกับของแข็งด้วยมุมสัมผัส $\theta$                                                                                                                                | 5-5  |
| รูปที่ 5.3 เครื่องมือทดสอบแบบ sessile drop                                                                                                                                                   | 5-6  |
| รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับมุมสัมผัสของทองคำบน TiC ที่ 1100°C                                                                                                                  | 5-7  |
| รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับมุมสัมผัสของทอง บน SiC(a), TiO <sub>2</sub> (b) และ ZnO(c)                                                                                          | 5-8  |
| รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสและ Work of adhesion ของทองบนฐานต่าง ๆ กันกับ fraction of bandap energies $E_g$                                                                   | 5-9  |
| รูปที่ 5.7 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง (Sn 0%)                                                                                                                                     | 5-19 |
| รูปที่ 5.8 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง (Sn 0.47%)                                                                                                                                  | 5-20 |
| รูปที่ 5.9 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง (Sn 1.07%)                                                                                                                                  | 5-20 |
| รูปที่ 5.10 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง (Sn 1.40%)                                                                                                                                 | 5-20 |
| รูปที่ 5.11 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง (Sn 2.07%)                                                                                                                                 | 5-21 |
| รูปที่ 5.12 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง (Sn 2.62%)                                                                                                                                 | 5-21 |

|                                                                                    | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 5.13 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง (Sn 3.37%)                       | 5-21 |
| รูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจุด Liquidus และ Solidus กับปริมาณดีบุก         | 5-23 |
| รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ของช่วงกว้างระหว่างจุด Liquidus&Solidus กับปริมาณดีบุก | 5-23 |
| รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณดีบุกกับส่วนผสม                               | 5-24 |
| รูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์กันระหว่างปริมาณดีบุกกับมุมสัมผัส                      | 5-25 |
| รูปที่ 5.18 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะประสานทองที่ไม่มีดีบุก (ดีบุก 0%)            | 5-25 |
| รูปที่ 5.19 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะประสานทองที่มีดีบุก 0.47%                    | 5-26 |
| รูปที่ 5.20 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะประสานทองที่มีดีบุก 1.07%                    | 5-26 |

## สารบัญตาราง

|               |                                                                                                                  | หน้า |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ตารางที่ 3.1  | แสดงอิทธิพลของธาตุผสมที่ใช้เติมในโลหะผสมของเงินในการทดลองของ Harigaya                                            | 3-6  |
| ตารางที่ 3.2  | แสดงค่าพลังงานอิสระของการเกิดปฏิกิริยา Oxidation และ Sulphuration ของธาตุต่าง ๆ                                  | 3-7  |
| ตารางที่ 3.3  | แสดงค่าพลังงานอิสระของธาตุต่าง ๆ ในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน                                                     | 3-8  |
| ตารางที่ 3.4  | ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเฟสและส่วนผสมทางเคมีโดยน้ำหนักในระบบ โลหะผสมของเงิน-อินเดียม                           | 3-10 |
| ตารางที่ 3.5  | ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเฟสและส่วนผสมทางเคมีโดยน้ำหนัก ในระบบ โลหะผสมของทองแดง-อินเดียม                        | 3-11 |
| ตารางที่ 3.6  | แสดงส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่ใช้ในการทดลอง                                                                      | 3-14 |
| ตารางที่ 3.7  | วิธีการวิเคราะห์ธาตุที่ได้จากการหล่อ                                                                             | 3-15 |
| ตารางที่ 3.8  | แสดงผลของส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงและช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว                                                          | 3-29 |
| ตารางที่ 3.9  | ส่วนผสมทางเคมีของขึ้นตัวอย่างก่อนและหลังการหล่อ                                                                  | 3-29 |
| ตารางที่ 3.10 | ค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิงผสมซิลิคอนและอินเดียมปริมาณต่าง ๆ กัน                                                 | 3-30 |
| ตารางที่ 3.11 | ผลการทดสอบค่าแรงดึงและ%การยืดตัวของเงินสเตอร์ลิงแต่ละชุดส่วนผสม                                                  | 3-30 |
| ตารางที่ 3.12 | ค่า DE ของเงินสเตอร์ลิงในแต่ละส่วนผสม ที่เวลาทดสอบต่าง ๆ กัน                                                     | 3-31 |
| ตารางที่ 4.1  | แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของเงิน ทองแดง และแมงกานีส                                                                 | 4-16 |
| ตารางที่ 4.2  | แสดงคุณสมบัติทางกลต่าง ๆ ของโลหะผสมเงินและแมงกานีส                                                               | 4-19 |
| ตารางที่ 4.3  | แสดงส่วนผสมของโลหะเงินสเตอร์ลิง                                                                                  | 4-24 |
| ตารางที่ 4.4  | แสดงส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส ก่อนและหลังการหล่อ                                    | 4-31 |
| ตารางที่ 4.5  | แสดงส่วนผสมทางเคมีของปริมาณแมงกานีสที่ใช้ในการหล่อ ปริมาณ แมงกานีสที่มีอยู่จริง และที่สูญเสียในขณะทำการหล่อ      | 4-31 |
| ตารางที่ 4.6  | แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยแบบวิกเกอร์ (HV) เปรียบเทียบกับปริมาณส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส | 4-32 |
| ตารางที่ 4.7  | แสดงผลการทดสอบแรงดึงของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส                                                     | 4-33 |
| ตารางที่ 4.8  | แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสปีผิว (DE*) ของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส                                       | 4-34 |

|               |                                                                                                                                                                                                                          | หน้า |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ตารางที่ 4.9  | แสดงค่า $E_{\text{corr}}$ , $E_{\text{pp}}$ , $E_p$ , $I_p$ , $I_{\text{corr}}$ และ Corrosion Rate ที่วัดได้จากเส้นโพลารไรเซชันของชิ้นทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก                              | 4-35 |
| ตารางที่ 4.10 | แสดงค่า $E_{\text{corr}}$ , $E_{\text{pp}}$ , $E_p$ , $I_{\text{corr}}$ และ Corrosion Rate ที่วัดได้จากเส้นโพลารไรเซชันของชิ้นทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอิม<br>ตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ | 4-36 |
| ตารางที่ 5.1  | แสดงผลของส่วนผสมโลหะประสานทองและช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว                                                                                                                                                                     | 5-10 |
| ตารางที่ 5.2  | แสดงผลการทดสอบความแข็งของโลหะประสานทอง                                                                                                                                                                                   | 5-10 |
| ตารางที่ 5.3  | แสดงผลทดสอบแรงดึงแบบ Lap Shear                                                                                                                                                                                           | 5-11 |
| ตารางที่ 5.4  | แสดงผลของมุมสัมผัสและแรงตึงผิว                                                                                                                                                                                           | 5-11 |
| ตารางที่ 5.5  | แสดงค่าความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบ                                                                                                                                                                                          | 5-12 |
| ตารางที่ 5.6  | แสดงส่วนผสมของโลหะมาสเตอร์ (Master alloy)                                                                                                                                                                                | 5-13 |
| ตารางที่ 5.7  | แสดงส่วนผสมของตัวประสานทองคำ 14 กระรัต                                                                                                                                                                                   | 5-13 |
| ตารางที่ 5.8  | แสดงส่วนผสมของทองคำผสม 14 กระรัตที่จะถูกประสาน                                                                                                                                                                           | 5-13 |
| ตารางที่ 5.9  | วิธีการวิเคราะห์                                                                                                                                                                                                         | 5-15 |
| ตารางที่ 5.10 | แสดงสารเคมีที่ใช้ในการกัดกรดสำหรับโลหะผสมทองคำ 14 กระรัต                                                                                                                                                                 | 5-15 |
| ตารางที่ 5.11 | แสดงผลของส่วนผสมทางเคมีตั้งต้นของโลหะประสานทอง                                                                                                                                                                           | 5-17 |
| ตารางที่ 5.12 | แสดงส่วนผสมทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์                                                                                                                                                                                  | 5-17 |
| ตารางที่ 5.13 | แสดงผลของส่วนผสมและอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะประสานทอง                                                                                                                                                                      | 5-18 |
| ตารางที่ 5.14 | แสดงผลการทดสอบความแข็งเฉลี่ยของโลหะประสานทอง 14 กระรัต                                                                                                                                                                   | 5-18 |
| ตารางที่ 5.15 | แสดงผลของมุมสัมผัสที่อุณหภูมิ 950 °C                                                                                                                                                                                     | 5-19 |
| ตารางที่ 5.16 | ผลการทดสอบแรงดึง Lap Shear                                                                                                                                                                                               | 5-22 |

## บทที่ 1

### บทนำ

โครงการ “การพัฒนาและการผลิตโลหะผสมสำเร็จรูปที่ใช้ประกอบอัญมณี” ภายใต้แผน  
ปรับโครงสร้างอุตสาหกรรมระยะที่ 2 โครงการได้รับการสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม (สศอ.) ผ่านสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) เมื่อวันที่ 15 มกราคม 2544 เป็นต้น  
มา โดยมีระยะเวลาโครงการ 3 ปี และมีทีมของบุคลากรที่ทำการวิจัยในโครงการนี้ ดังต่อไปนี้

|                                        |                   |
|----------------------------------------|-------------------|
| 1. อาจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร     | หัวหน้าโครงการ    |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ | นักวิจัย          |
| 3. อาจารย์สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์      | นักวิจัย          |
| 4. นางศิริรัตน์ นิสารัตนพร             | ผู้ช่วยวิจัย      |
| 5. นางสาววีณา ขลังธรรมเนียม            | ผู้ช่วยวิจัย      |
| 6. นายเสนีย์ มณีเพชร                   | ผู้ช่วยวิจัย      |
| 7. นางสาวปราณี เจือจันทิก              | ผู้ช่วยวิจัย      |
| 8. นายเจษฎา จอกแก้ว                    | นิสิตปริญญาโท     |
| 9. นางสาวสุกัญญา วงษ์ศรีรักษา          | นิสิตปริญญาโท     |
| 10. นางสาวนิรมล ลพหล้า                 | เจ้าหน้าที่ธุรการ |

#### 1.1 ความเป็นมาของโครงการ

อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของไทยจัดเป็นอุตสาหกรรมที่สร้างรายได้เข้าประเทศ  
สูง และจัดอยู่ในกลุ่มอุตสาหกรรมที่มีมูลค่าการส่งออกอยู่ใน 10 อันดับแรกตั้งแต่ปี 2533 เป็นต้นมา  
ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องประดับอัญมณี ได้แก่ โลหะประกอบอัญมณี อุตสาหกรรมที่นำโลหะมี  
ค่าไปใช้ในการผลิตเครื่องประดับในไทย สามารถจำแนกได้เป็นสองกลุ่มหลัก คือ อุตสาหกรรมเครื่อง  
ประดับเงิน และอุตสาหกรรมเครื่องประดับทอง อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตสำหรับอุตสาหกรรม  
ระดับกลางและเล็กโดยทั่วไปยังไม่มีวิธีการผลิตด้วยวิธีการดั้งเดิมที่ได้รับการตกทอดลงมาจาก  
บรรพบุรุษ อีกทั้งสูตรส่วนผสมโลหะและวิชาการผลิตเหล่านี้ก็ยังเป็นที่ปกปิดหรือเป็นความลับตลอดมา  
นอกจากนี้ มาตรฐานและชื่อโลหะดังกล่าวก็มิได้มีแน่ชัดและเป็นสากล

โลหะหลักที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ ทอง ทองแดง และเงิน ซึ่งล้วนแล้วแต่ต้องนำเข้าจากต่าง  
ประเทศทั้งสิ้น ทองคำที่นำเข้าจากต่างประเทศนั้นจะมีความบริสุทธิ์ 99.99% หรือที่เรียกว่าทองสวิส ซึ่ง  
ไม่นำเข้าจากประเทศสวิสเพียงประเทศเดียว แต่มีการนำเข้าจากประเทศออสเตรเลีย และโลหะเงิน  
นำเข้าจากอเมริกาและสวิส แต่ในปัจจุบันนำเข้าจากเกาหลีได้จำนวนมาก ทองดังกล่าวสามารถนำมา

ทำโลหะประกอบอัญมณีโดยตรงไม่มีการเจือได้ เช่น Goldmaster, Prima Gold หรือทอง-สุโขทัย เป็นต้น ซึ่งเป็นเครื่องประดับทองระดับสูงราคาแพง แต่มีผู้นิยมภายในประเทศ ผู้ผลิตและผู้ประกอบการส่วนใหญ่จัดอยู่ในกลุ่ม ผู้ประกอบการรายย่อยและระดับกลางหรือที่เรียกกันว่า SME โดยทำการผลิตเครื่องประดับและตัวเรือนรูปพรรณ ซึ่งอาจจะจัดแบ่งตามลักษณะการใช้โลหะผสม หรือที่เรียกกันว่าอัลลอย ออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ การผลิตเครื่องประดับโดยใช้อัลลอยที่ผลิตขึ้นเองกับการผลิตโดยใช้อัลลอยที่มีการนำเข้ามาจากต่างประเทศ การผลิตในกลุ่มแรกเป็นกระบวนการผลิตในลักษณะดั้งเดิมที่ได้รับการตกทอดจากบรรพบุรุษ มีสูตรผสมโลหะและหลักวิชาการการผลิตเฉพาะตัวที่ได้รับจากการถ่ายทอดประสบการณ์และความชำนาญของผู้ผลิตและช่าง ผลิตภัณฑ์จากลักษณะการผลิตในกลุ่มนี้เป็นเครื่องประดับทองที่มีปริมาณธาตุทองผสมอยู่สูงมากกว่า 90% หรือที่เรียกกันทางการค้าว่า ทอง 100% การผลิตในกลุ่มที่สอง เป็นกระบวนการผลิตที่นำเข้าอัลลอยจากต่างประเทศ อาทิเช่น สหรัฐอเมริกา อิตาลี มาผสมกับเนื้อทองบริสุทธิ์ (99.99%) เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องประดับสำเร็จรูปทองกะรัต หรือทองเคชนิดต่าง ๆ เพื่อการส่งออกไปยังต่างประเทศเป็นหลัก ดังนั้นผลิตภัณฑ์ต้องมีคุณภาพสูง จึงใช้อัลลอยจากต่างประเทศ ซึ่งนำเข้าโดยตรงจากต่างประเทศหรือซื้อผ่านบริษัทตัวแทนในประเทศ ผู้ผลิตจะได้รับคำปรึกษาด้านคุณสมบัติและวิธีการใช้อัลลอยจากบริษัทตัวแทน โดยอาจจะรู้เพียงชนิดและปริมาณของธาตุผสมหลัก (เงิน ทองแดง สังกะสี) ที่ผสมอยู่ในอัลลอยเท่านั้น ส่วนธาตุผสมรองหรือธาตุผสมที่เป็นตัวเพิ่มคุณสมบัติพิเศษ ตัวปรับขนาดเกรน (Grain refiner) หรือตัวลดก๊าซออกซิเจน (Deoxidizer) ในน้ำโลหะ ผู้ผลิตจะไม่มีข้อมูลเหล่านี้เลย นอกจากนี้ยังขาดความรู้ทางด้านโลหวิทยาที่ใช้ในการผลิต ตลอดจนการเลือกวัตถุดิบและกระบวนการผลิตที่เหมาะสม ก่อให้เกิดปัญหาและความเสียหายขึ้นในผลิตภัณฑ์

## 1.2 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับโลหะผสม

คุณสมบัติของโลหะผสมที่แตกต่างกันในแต่ละผู้ผลิต ขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุและชนิดของธาตุที่แต่ละบริษัทเลือกใช้ตามสูตรลับที่ได้จากการพัฒนาและวิจัย อย่างไรก็ตาม โลหะผสมที่ดีจะมีหน้าที่หลัก ดังนี้

- 1) ปรับสีของชิ้นงานให้ได้ตามความต้องการของลูกค้า
- 2) สร้างหรือให้ชิ้นงานมีคุณสมบัติทางกล เช่น ความแข็ง ความแข็งแรงที่เหมาะสม
- 3) ลดปริมาณของก๊าซที่ละลายอยู่ในน้ำโลหะขณะหลอมเหลว
- 4) ลดขนาดของผลึกและช่วงของการหดและยุบตัวของโลหะ
- 5) เพิ่มการไหลตัวของโลหะเมื่อทำการหล่อหลอม
- 6) ป้องกันการเกิดออกซิเดชันและสร้างความทนทานต่อการมัวหมองหลังการผลิตและใช้งาน
- 7) มีคุณสมบัติด้านการเปียก (wettability) ดีในกรณีใช้เป็นโลหะประสาน

ดังนั้นข้อมูลหรือสูตรต่าง ๆ ทั้งหมดเป็นความลับ ซึ่งทำให้อุตสาหกรรมโลหะมีค่าของไทยยังต้องพึ่งพาเทคโนโลยี และต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซื้อ know-how ต่าง ๆ เกี่ยวกับอัลลอยมาโดยตลอด โลหะผสมหรืออัลลอยจึงมีอิทธิพลต่อความอยู่รอดที่ยั่งยืนของอุตสาหกรรมตัวเรือนเครื่องประดับเป็นอย่างมาก

ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น วัสดุผสมต่าง ๆ ในอัลลอยมีความสำคัญและมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของโลหะที่ใช้ผลิตเป็นเครื่องประดับ คณะผู้จัดทำได้ทำการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับปัญหาข้อบกพร่อง ตำหนิต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากการใช้โลหะผสม และแนวทางการแก้ไขปัญหา ตลอดจนพฤติกรรมของผู้ผลิตไว้ดังนี้

ก) ในกรณีศึกษาเกี่ยวกับอัลลอยที่ใช้ในการผลิตเครื่องประดับเงิน วัสดุผสมที่สำคัญคือทองแดง อย่างไรก็ตามโลหะเงินสเตอร์ลิงเหล่านี้มีความทนทานต่อการเกิดความหมองดำ ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีดำ อันเนื่องมาจากเงินซัลไฟด์ สิ่งนี้ทำให้เครื่องประดับเงินไม่เป็นที่นิยมเท่าที่ควร ความพยายามในการแก้ไขปัญหาด้านความทนทานต่อการหมองมีมากมาย อาทิเช่น นำเทคโนโลยีการเคลือบผิวหรือชุบผิวด้วยโลหะที่มีความเสถียรสูง โดยทำการชุบโรเดียม ชุบแพลตตินัม และชุบด้วยโลหะทอง ขณะเดียวกัน ยังมีความพยายามในการผลิตโลหะผสมสูตรใหม่ ๆ ที่มีความต้านทานการหมองเพิ่มขึ้น เช่น การใส่หรือเติมธาตุ อินเดียม ดีบุก แมงกานีส หรือซิลิกอน

ข) ปัญหาข้อบกพร่องที่มักพบในงานหล่อเงินและทอง ได้แก่ รูพรุนจากฟองก๊าซ รูพรุนจากการหดตัว โพรงจากการหดตัว ซึ่งมักจะเรียกรวมกันว่าตามด และปัญหาอีกอย่างที่สำคัญคือการเกิดผื่น (firescale) ซึ่งจากการศึกษาพบว่า บ่อยครั้งตำหนิดังกล่าวจะหายไปเมื่อเปลี่ยนโลหะผสม ในขณะที่รูพรุนและโพรงจากการหดตัวเป็นผลสืบเนื่องจากการออกแบบทางเดินน้ำโลหะที่ไม่เหมาะสมทำให้น้ำโลหะไม่สามารถไหลเข้าไปซัดเซยการหดตัวของโลหะที่เปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นของแข็งได้ทันทั่วทั้งชิ้น ข้อสังเกตอีกประการหนึ่ง คือ สีผิวของโลหะหลังจากการหล่อ เมื่อใช้อัลลอยจากต่างประเทศและเครื่องมือการหล่อหลอมทันสมัย พบว่าสีผิวของโลหะจะมีสีออกแดงอ่อนหรือชมพู ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของทองแดงกับออกซิเจนเป็นออกไซด์ และสามารถล้างโดยการกัดด้วยกรดได้ง่าย ขณะที่การหล่อหลอมโดยใช้อัลลอยในประเทศและเครื่องมือรุ่นเก่า เช่น หัวเป่าไฟ (Torch) หรือเตา Induction ที่ไม่ควบคุมบรรยากาศ จะพบออกไซด์ที่หนากว่ามีสีชมพูแดงจนถึงน้ำตาลและขจัดออกยากกว่า

ค) ปัญหาการประสานโลหะทอง พบว่า ในปัจจุบันโลหะที่นิยมใช้ในการผลิตเป็นโลหะประสานทอง คือ โลหะสังกะสี ที่อยู่ในรูปของโลหะผสมในระบบ ทอง - เงิน - ทองแดง - สังกะสี อย่างไรก็ตาม การพัฒนาด้านนี้ทำให้มีการนำวัสดุผสมอื่น ๆ มาใช้ เพื่อให้คุณสมบัติด้านการเปียก การไหล และความแข็งแรง ตลอดจนคุณสมบัติด้านการประสาน อื่น ๆ เช่น จุดหลอมเหลวของโลหะประสาน ลดต่ำลง วัสดุที่มีคุณสมบัติที่น่าสนใจเหล่านี้ ได้แก่ อินเดียม ดีบุก แกลเลียม เป็นต้น

ง) ผู้ผลิตและผู้ประกอบการมักจะตัดสินใจเลือกใช้แอลลอยจากการลองผิดลองถูก โดยไม่คำนึงถึงกระบวนการผลิตที่ถูกต้องเหมาะสม ดังนั้น เมื่อเกิดปัญหาข้อบกพร่องหรือตำหนิในผลิตภัณฑ์มักจะ ตัดสินใจเปลี่ยนอัลลอยใหม่แทนที่ไปปรับปรุงกระบวนการผลิต ดังนั้น จึงอาจจะวิเคราะห์ได้ว่าผู้ผลิตขาดความรู้ในด้านโลหวิทยา อิทธิพลของธาตุผสมแต่ละชนิดและการนำมาใช้ให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิต เครื่องมืออุปกรณ์ของตนเอง ซึ่งจุดนี้ทำให้ต้องใช้แอลลอยที่ราคาแพงขึ้น สูญเสียเงินตราเกินความจำเป็น

### 1.3 วัตถุประสงค์

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์หลัก 3 ประการ คือ

- 1.3.1 ศึกษา วิจัย อิทธิพลของธาตุอินเดียมและแมงกานีส ต่อคุณสมบัติด้านความทนทานต่อการหมอง และคุณสมบัติทางกลในเครื่องประดับที่ทำจากโลหะเงินสเตอร์ลิง โดยอ้างอิงผลิตภัณฑ์สากลเป็นเกณฑ์ และหาปริมาณที่เหมาะสมของธาตุผสมดังกล่าวเพื่อนำมาใช้ในการผลิตเป็นเครื่องประดับเงินสเตอร์ลิง
- 1.3.2 ศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลของธาตุดีบุกต่อคุณสมบัติด้านการประสานในโลหะทอง เพื่อนำไปผลิตเป็นตัวประสานที่มีคุณสมบัติและการใช้งานที่ชัดเจน ในทอง 14 กะรัต
- 1.3.3 เผยแพร่ความรู้ที่ได้จากการศึกษาสู่สาธารณชน และวงการอุตสาหกรรม

### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาและวิจัยอิทธิพลของธาตุอินเดียมและแมงกานีสต่อคุณสมบัติความต้านทานการหมอง และคุณสมบัติทางกลของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผสมธาตุอินเดียม และธาตุ แมงกานีส
- 1.4.2 ศึกษาและพัฒนาเทคนิคการผลิตโลหะผสมหรืออัลลอยที่ประกอบจากธาตุอินเดียมและแมงกานีส และหาปริมาณที่เหมาะสมต่อคุณสมบัติความต้านทานการหมอง และคุณสมบัติทางกลที่ใช้ในเงินสเตอร์ลิง
- 1.4.3 ศึกษาและวิจัยอิทธิพลของธาตุดีบุกต่อคุณสมบัติด้านการประสาน และความแข็งแรงของการประสาน ในโลหะทอง 14 กะรัต
- 1.4.4 ศึกษาและพัฒนาเทคนิคการผลิตโลหะผสมหรืออัลลอยที่ประกอบจากธาตุดีบุก และหาปริมาณที่เหมาะสมต่อคุณสมบัติด้านการประสานและคุณสมบัติทางกล ที่ใช้ในโลหะทอง 14 กะรัต

1.4.5 เผยแพร่ความรู้ที่ได้จากการวิจัยและพัฒนาต่อสาธารณชน และวงการอุตสาหกรรม  
เครื่องประดับ

1.5 ระยะเวลาการดำเนินงาน 3 ปี (เริ่ม 15 มกราคม 2544 - 14 มกราคม 2547)

1.6 กิจกรรมและผลที่คาดว่าจะได้รับ

| กิจกรรม                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | ผลที่คาดว่าจะได้รับ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>เดือนที่ 1-3</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ศึกษา ค้นคว้า ข้อมูลพื้นฐานและข้อมูลต่าง ๆ เกี่ยวกับโลหะผสมสำเร็จรูป (อินเดียม ดีบุก แมงกานีส) จากวารสารต่างประเทศ</li> <li>2. ศึกษา ระบบ 3 ธาตุ ในระบบทอง-เงิน-ดีบุก จากเอกสารต่างประเทศ</li> <li>3. ศึกษา ระบบ 3 ธาตุ ในระบบ เงิน-ทองแดง-อินเดียม และระบบเงิน-ทองแดง-แมงกานีส</li> <li>4. จัดเตรียมหาเครื่องมือ และอุปกรณ์</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ได้ข้อมูลทางวิชาการเบื้องต้นเกี่ยวกับโลหะทองและโลหะเงิน ที่มี ธาตุผสมอินเดียม ดีบุก แมงกานีส</li> <li>2. ได้ข้อมูลเบื้องต้นของโลหะผสมดังกล่าว สำหรับโลหะประสานทอง</li> <li>3. ได้ข้อมูลเบื้องต้นของโลหะผสมดังกล่าว</li> <li>4. ได้เครื่องมือ อุปกรณ์ที่จำเป็นในงานวิจัย</li> </ol>           |
| <p>เดือนที่ 4-6</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ศึกษา ระบบ 3 ธาตุ ในระบบทอง-เงิน-ดีบุก จากเอกสารต่างประเทศ (ต่อ)</li> <li>2. ศึกษา ระบบ 3 ธาตุ ในระบบ เงิน-ทองแดง-อินเดียม และระบบเงิน-ทองแดง-แมงกานีส (ต่อ)</li> <li>3. จัดหาโลหะมีค่า และโลหะผสม<br/>จัดเตรียมเครื่องมือ และอุปกรณ์ ในการหลอม (ต่อ)</li> </ol>                                                                        | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ได้ข้อมูล ด้านโลหวิทยาเกี่ยวกับ ระบบ 3 ธาตุของทอง-เงิน-ดีบุกสำหรับโลหะประสาน</li> <li>2. ได้ข้อมูลด้านโลหวิทยาในระบบ 3 ธาตุ คือ ระบบเงิน-ทองแดง-อินเดียม และเงิน-ทองแดง-แมงกานีส</li> <li>3. ได้โลหะเงิน ทองแดง อินเดียมและแมงกานีส มีเครื่องมือและอุปกรณ์ ที่พร้อมสำหรับการวิจัย</li> </ol> |
| <p>เดือนที่ 7-9</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ศึกษาข้อมูล ต่อจากช่วงเดือนที่ 4-6 (ต่อ)</li> <li>2. จัดหาโลหะมีค่า และโลหะผสม</li> <li>3. จัดหาวัสดุสิ้นเปลือง เช่น เป้าหลอม สารเคมีต่าง ๆ</li> <li>4. ทำการทดลองหลอมโลหะเงินสเตอร์ลิง</li> </ol>                                                                                                                                      | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ได้ข้อมูล เทคนิคต่าง ๆ เพิ่มเติม</li> <li>2. ได้โลหะเงิน ทองแดง อินเดียมและแมงกานีส</li> <li>3. ได้วัสดุต่าง ๆ ที่ต้องการ</li> <li>4. ได้ข้อมูลเทคนิคการหลอม และชิ้นโลหะเงินสเตอร์ลิง</li> </ol>                                                                                             |

|                                                                                                                                                    |                                                                                                                               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>เดือนที่ 10-12</p> <p>1. ทำการทดลองหลอมโลหะเงินสเตอร์ลิงผสมธาตุอินเดียม และผสมธาตุแมงกานีส ตามอัตราส่วนที่กำหนด โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุผสม</p> | <p>1. ได้ข้อมูลเทคนิคการผสมและหลอมโลหะผสมชนิดนี้และได้ขึ้นโลหะผสมดังกล่าว ในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่กำหนดเพื่อศึกษาในขั้นต่อไป</p> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

หมายเหตุ เตาหลอมโลหะแบบอินดักชันทั้งระบบสูญญากาศและปกติมีอยู่ที่ภาควิชา ฯ แล้ว

| กิจกรรม                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | ผลที่คาดว่าจะได้รับ                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>เดือนที่ 10-12</p> <p>2. ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ผสมธาตุอินเดียม และแมงกานีส</p> <p>3. เตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับหลอมโลหะประสานทองผสมดีบุก</p> <p>4. ตรวจสอบความต้านทานการห่มองของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ผสมธาตุผสม</p>                                                                                                                | <p>2. ทราบโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงในสภาวะบรรยากาศที่กำหนด โดยไม่เติมธาตุผสมดังกล่าว</p> <p>3. มีเครื่องมือและอุปกรณ์พร้อมที่จะทำการวิจัยเรื่องโลหะประสานทอง ดังกล่าว</p> <p>4. ได้ข้อมูลความต้านทานการห่มองของเงินสเตอร์ลิง</p>                              |
| <p>เดือนที่ 13-15</p> <p>1. จัดหาโลหะมีค่า ทอง และเงิน เพิ่มเติม</p> <p>2. ทำการทดลองหลอมโลหะเงินสเตอร์ลิงผสมธาตุอินเดียม และผสมธาตุแมงกานีส ตามอัตราส่วนที่กำหนด โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุผสม (ต่อ)</p> <p>3. วิเคราะห์หาปริมาณธาตุอินเดียมและแมงกานีสในชิ้นงานที่ได้จากการหลอม</p> <p>4. ตรวจสอบคุณสมบัติความแข็งของเงินสเตอร์ลิงไม่ผสมธาตุอินเดียมและแมงกานีส</p> | <p>1. ได้ทองบริสุทธิ์ และเงินบริสุทธิ์</p> <p>2. ได้ขึ้นโลหะผสมดังกล่าว ในอัตราส่วนต่าง ๆ เพิ่มเติม</p> <p>3. ได้ปริมาณธาตุผสมอินเดียมและแมงกานีสจากการวิเคราะห์หาส่วนผสมทางเคมีด้วยวิธีทางเคมีและเครื่อง AA</p> <p>3. ได้คุณสมบัติด้านความแข็งของเงินสเตอร์ลิง</p> |
| <p>เดือนที่ 16-18</p> <p>1. จัดหาโลหะมีค่า ทอง และเงิน และธาตุผสมต่าง ๆ เพิ่มเติม</p> <p>2. จัดหา วัสดุทางวิทยาศาสตร์ และสารเคมีเพิ่ม</p> <p>3. ทำการทดลองหลอมโลหะเงินสเตอร์ลิงผสมธาตุอินเดียม และผสมธาตุแมงกานีส ตามอัตราส่วนที่</p>                                                                                                                               | <p>1. ได้ทองบริสุทธิ์ เงินบริสุทธิ์ อินเดียม แมงกานีส และ ดีบุก</p> <p>2. ได้เข้าหลอม ผงขัดโลหะ สารเคมี ฯลฯ เพิ่มเติม</p> <p>3. ได้ขึ้นโลหะผสมดังกล่าว ในอัตราส่วนต่าง ๆ เพิ่มเติม</p>                                                                              |

| <p>กำหนด โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุผสม (ต่อ)</p> <p>4. ทำการทดลองหลอมโลหะประสานทองที่ผสมดีบุกตามอัตราส่วนที่กำหนด สำหรับทอง 14 กระรัต</p> <p>5. วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเงินสเตอร์ลิงผสมธาตุแมงกานีสและอินเดียม</p> <p>6. วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะประสานทอง</p>                                                                                                                                                                                                | <p>4. ได้ขึ้นโลหะประสานตามอัตราส่วนที่กำหนด เพื่อนำไปศึกษาหาความสามารถในการเปียกและจุดหลอมเหลวของโลหะประสานต่อไป</p> <p>5. ทราบข้อมูลส่วนผสมทางเคมีของโลหะเงินสเตอร์ลิงผสมธาตุแมงกานีส และอินเดียม</p> <p>6. ทราบข้อมูลส่วนผสมทางเคมีของโลหะประสานทอง</p>                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| กิจกรรม                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | ผลที่คาดว่าจะได้รับ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <p>เดือนที่ 19-21</p> <p>1. ทำการทดลองหลอมโลหะเงินสเตอร์ลิงในอัตราส่วนผสมอื่นที่แตกต่างจากช่วงเดือน 16-18 (ต่อ)</p> <p>2. ทำการทดลองหลอมโลหะประสานทองที่ผสมดีบุกตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ (ต่อ)</p> <p>3. วิเคราะห์หาส่วนผสมทางเคมีในเงินสเตอร์ลิงผสม (ต่อ)</p> <p>4. วิเคราะห์หาปริมาณธาตุดีบุกในทองผสม</p> <p>5. ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของชิ้นงานที่ผลิตขึ้น</p> <p>6. ตรวจสอบความต้านทานการหมอง (ต่อ)</p> <p>7. ตรวจสอบจุดหลอมเหลวของโลหะด้วยเครื่อง DTA</p> | <p>1. ได้ขึ้นโลหะผสมดังกล่าว ในอัตราส่วนต่าง ๆ เพิ่มเติม</p> <p>2. ได้ขึ้นโลหะประสานตามอัตราส่วนที่ตั้งไว้</p> <p>3. ทราบปริมาณธาตุผสมที่มีในเนื้อโลหะเงินสเตอร์ลิงผสม</p> <p>4. ทราบปริมาณธาตุต่าง ๆ ที่ผสมอยู่ในทอง</p> <p>5. ทราบถึงโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้น และความแข็งของชิ้นงานต่าง ๆ ในสภาพหล่อ</p> <p>6. ทราบข้อมูลความต้านทานการหมอง</p> <p>7. ได้ข้อมูลจุดหลอมเหลวของโลหะประสานที่ผลิตขึ้น</p> |
| <p>เดือนที่ 22-24</p> <p>1. ทำการทดลองและวิเคราะห์ปริมาณธาตุผสมชนิดต่าง ๆ เหมือนในช่วงเดือน 19-21</p> <p>2. ทดสอบประสานโลหะประสานทอง บนโลหะทองเกรด 14 กระรัต</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <p>1. ได้ข้อมูล และผลการวิเคราะห์ จากการทดลองเพิ่มเติม</p> <p>2. ได้ขึ้นงานทอง 14 กระรัตที่ประสานด้วยโลหะประสานทองทั้ง 2 ชนิด</p>                                                                                                                                                                                                                                                                          |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>เดือนที่ 25-30</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. จัดหาสารเคมีและวัสดุทางวิทยาศาสตร์ เพิ่ม</li> <li>2. ทำการทดลองต่าง ๆ เหมือนในช่วงเดือน 22-24</li> <li>3. ทดลองหล่อ (จริง) โดยเทโลหะเงินสเตอร์ลิงผสมธาตุอินเดียมและแมงกานีส กับโรงงานที่ให้ความร่วมมือ</li> <li>4. ทดสอบความต้านทานการหมองและความแข็งของชิ้นงานหล่อในโรงงาน</li> <li>5. วิเคราะห์ผลการทดลอง</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ได้สารเคมีและวัสดุทางวิทยาศาสตร์เพิ่มเติม</li> <li>2. ได้ข้อมูลจากการวิจัย เพิ่มเติม</li> <li>3. ทราบผลการทดลองเทในโรงงาน และนำมาเปรียบเทียบผลกับการทดลองในห้องทดลอง</li> <li>4. ทราบผลความแตกต่างในความต้านทานการหมองที่เกิดขึ้น (ถ้ามี)</li> <li>5. ได้ข้อมูลวิเคราะห์จากการวิจัยบางส่วน</li> </ol> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

| กิจกรรม                                                                                                   | ผลที่คาดว่าจะได้รับ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>เดือนที่ 31-33</p> <p>1. วิเคราะห์ผลการทดลอง (ต่อ)</p>                                                 | <p>1. ได้ข้อมูลส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอินเดียม โลหะผสมแมงกานีส ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเครื่องประดับเงิน ที่มีคุณสมบัติด้านความทนทานต่อการหมองสูงขึ้น</p> <p>2. เทคนิคการผลิตโลหะผสมเหล่านี้และ คุณสมบัติทางกลของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผสมจากโลหะผสม อินเดียม และแมงกานีส</p> <p>3. ได้ข้อมูลส่วนผสมทางเคมีของโลหะประสานทองที่ผลิตขึ้นจากโลหะผสมดีบุก และทราบถึงคุณสมบัติด้านการประสาน ของโลหะทองผสม 14 กระรัต</p> <p>3.1 ได้เทคโนโลยีและกระบวนการผลิตโลหะผสมสำเร็จรูป ดังกล่าว</p> <p>3.2 ได้ข้อมูลสำหรับจัดทำรายงาน</p> |
| <p>เดือนที่ 34-36</p> <p>1. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์</p> <p>2. จัดสัมมนาเผยแพร่ ความรู้และเทคนิคการผลิต</p> | <p>1. ได้รายงานฉบับสมบูรณ์</p> <p>2. ได้เผยแพร่ความรู้และเทคนิคการผลิตโลหะผสม</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

## 1.7 แผนการดำเนินงาน

| ตค.-ธค. | แผนงานโครงการ                               | ปีที่ 1 (2543-2544) |          |         |         | ปีที่ 2 (2544-2545) |          |         |         | ปีที่ 3 (2545-2546) |          |         |         |
|---------|---------------------------------------------|---------------------|----------|---------|---------|---------------------|----------|---------|---------|---------------------|----------|---------|---------|
|         |                                             | มค.-มีค.            | เมย.-มิย | กค.-กย. | ตค.-ธค. | มค.-มีค.            | เมย.-มิย | กค.-กย. | ตค.-ธค. | มค.-มีค.            | เมย.-มิย | กค.-กย. | ตค.-ธค. |
| 1.      | ศึกษาค้นคว้าข้อมูลจากวารสาร เอกสาร          | ↕                   | ↕        | ↕       |         | ↕                   | ↕        |         |         | ↕                   |          |         |         |
| 2.      | จัดหาโลหะมีค่าและโลหะผสม                    | ↕                   | ↕        | ↕       |         | ↕                   | ↕        |         |         | ↕                   |          |         |         |
| 3.      | จัดหาและจัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์          | ↕                   | ↕        |         |         | ↕                   |          |         |         |                     |          |         |         |
| 4.      | ทดลองหลอมโลหะเงินสเตอร์ลิงผสม               |                     |          | ↕       |         |                     | ↕        |         | ↕       |                     | ↕        |         |         |
| 5.      | ทดลองหลอมโลหะประสานทอง                      |                     |          |         |         | ↕                   | ↕        |         | ↕       | ↕                   | ↕        |         |         |
| 6.      | ทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี                |                     |          |         |         | ↕                   |          | ↕       |         | ↕                   |          | ↕       |         |
| 7.      | ตรวจสอบคุณสมบัติความแข็ง                    |                     |          |         |         | ↕                   |          | ↕       |         |                     |          | ↕       |         |
| 8.      | ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค                      |                     |          |         | ↕       |                     |          | ↕       |         |                     |          | ↕       |         |
| 9.      | ตรวจสอบความต้านทานการหมอง                   |                     |          |         | ↕       |                     |          | ↕       |         |                     |          | ↕       |         |
| 10.     | ทดสอบประสานทอง 14 กระรัต                    |                     |          |         |         |                     |          | ↕       |         |                     |          | ↕       |         |
| 11.     | ทดสอบหล่อขึ้นงานกับโรงงาน (ซึ่งความร่วมมือ) |                     |          |         |         |                     |          |         | ↕       |                     |          |         | ↕       |
| 12.     | จัดสัมมนาเพื่อเผยแพร่ความรู้                |                     |          |         |         |                     |          |         |         |                     | ↕        |         | ↕       |
| 13.     | สรุปผลและจัดทำรายงาน                        |                     |          |         |         |                     |          |         |         |                     |          |         | ↕       |

### 1.8 การวิเคราะห์ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจของโครงการ

การวิจัยในหัวข้อนี้จะช่วยผู้ประกอบการรายย่อยและขนาดกลาง (SME) เป็นหลัก โดยมีผลตอบแทนทางด้านเศรษฐกิจดังนี้

กรณีของโลหะผสมสำเร็จรูปชนิด ทองแดงผสมอินเดียม และทองแดงผสมแมงกานีส

- 1) ลดการนำเข้าโลหะผสมสำเร็จรูปที่มีราคาแพงจากต่างประเทศ และสามารถผลิตโลหะผสมสำเร็จรูปไว้ใช้ได้เอง ราคาของโลหะผสมที่นำเข้ามีราคาสูงถึง 8,000 บาทต่อกิโลกรัม ในขณะที่โลหะผสมจากการวิจัยนี้จะมีราคาประมาณไม่เกิน 4,000 บาท (โลหะผสมอินเดียม 8%) และไม่เกิน 2,500 บาท (โลหะผสมแมงกานีส 8%) อย่างไรก็ตามโลหะผสมนำเข้าชนิดนี้คาดว่าจะมีปริมาณไม่มากนัก ประมาณ 5% ของยอดนำเข้าโลหะผสม ดังนั้นสามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้โดยประมาณ  $4,000 \text{ บาท/ก.ก.} \times 800 \text{ กิโลกรัม/ปี} = 3.2 \text{ ล้านบาทต่อปี}$  (ราคาอินเดียม 99.97% จากวารสาร Metal bulletin, กันยายน 2542 อยู่ที่ 215 เหรียญสหรัฐต่อกิโลกรัม หรือประมาณ 8,600 บาทต่อกิโลกรัม)
- 2) ตลาดเครื่องประดับเงินที่ต้องการคุณสมบัติความต้านทานการหมอง หรือตลาดที่ผู้บริโภคชอบเงินที่หมองช้าจะขยายตัวมากขึ้น อย่างน้อย 10 % ดังนั้น ถ้าคิดจากยอดส่งออกปีเครื่องประดับเงินในปี 2540 ที่มีมูลค่าการส่งออก 5,823.5 ล้านบาท น่าจะขยายเพิ่มมูลค่าได้อีก 500 ล้านบาท
- 3) ความนิยมใช้เครื่องประดับเงินเพิ่มขึ้น เนื่องจากคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในด้านความต้านทานการหมองได้รับการปรับปรุงให้เพิ่มสูงขึ้น จากการใส่อินเดียม และแมงกานีส ส่งผลต่อปริมาณรายได้จากการส่งออกและการบริโภคในประเทศสูงขึ้น

#### กรณีโลหะประสานทองที่มีดีบุกผสมอยู่

- 1) ประสิทธิภาพในการผลิตสูงขึ้นเนื่องจากจุดหลอมเหลวของโลหะผสมลดต่ำลง ทำให้เชื่อมประสานได้ง่าย
- 2) เพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันในระดับนานาชาติ เนื่องจากในอนาคต โลหะที่นำมาประสานทองจะไม่มีธาตุสังกะสีผสมอยู่ เพราะไอสังกะสีเป็นอันตรายต่อมนุษย์

## บทที่ 2

### การดำเนินงานวิจัยและกิจกรรมที่เกี่ยวข้อง

การดำเนินงานวิจัยโครงการนี้มีระยะเวลาในการวิจัย 3 ปี ตั้งแต่ 15 มกราคม 2544 ถึง 14 มกราคม 2547 และสามารถสรุปผลการดำเนินงานได้ดังนี้

#### 2.1 ผลที่ได้ปฏิบัติในช่วงเดือนที่ 1 – 6

จากการศึกษาข้อมูล คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาแผนภูมิสมมูลของระบบ 3 ชาติ ทฤษฎีและข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวกับโลหะผสมสำเร็จรูป (อินเดียม ดีบุก แมงกานีส) จากวารสารต่างประเทศ เตรียมอุปกรณ์และวัตถุดิบ คณะผู้วิจัยของปรับการวิจัยในโครงการเล็กน้อย เพื่อไม่ให้เกิดความซ้ำซ้อนกับโครงการย่อยอื่นในในชุดโครงการที่ 37 นี้ โดยขอปรับการวิจัยในส่วนอิทธิพลของธาตุอินเดียมในเงินสเตอร์ลิงอย่างเดียว เป็นการศึกษาวิจัยอินเดียมในเงินสเตอร์ลิงที่มีซิลิคอนผสมอยู่ด้วย โดยจะกำหนดธาตุซิลิคอนให้คงที่ในช่วงประมาณ 0.1 – 0.2% โดยน้ำหนัก และศึกษาอิทธิพลของธาตุอินเดียมที่มีผลต่อคุณสมบัติด้านความทนทานต่อการหมอง และคณะผู้วิจัยขอเน้นการวิจัยในส่วนอิทธิพลของธาตุแมงกานีสในเชิงลึกมากขึ้น ส่วนการวิจัยเรื่องอิทธิพลของธาตุดีบุกในโลหะประสานทองคณะผู้วิจัยจะเริ่มงานวิจัยในปีที่ 2 (ช่วงเดือนที่ 13-18)

#### 2.2 ผลที่ได้ปฏิบัติในช่วงเดือนที่ 7 – 12

คณะผู้วิจัยได้ทำการหลอมโลหะเงินผสมอินเดียม โดยเพิ่มธาตุซิลิคอน ตามที่ได้ขอปรับปรุงในช่วงเดือนที่ 1-6 ซิลิคอนที่ใช้อยู่ในรูปแคลเซียมซิลิไซด์ โดยจะหล่อขึ้นงานเป็นแท่งทรงกระบอก เพื่อศึกษาส่วนผสมทางเคมีและทดสอบคุณสมบัติทางกล การทดลองอิทธิพลของธาตุแมงกานีสได้ทำการหล่อตัวอย่างทั้งหมด 8 ชุด โดยมีอัตราส่วนผสม 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นำมาตรวจสอบคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาควรรวมถึงส่วนผสมทางเคมี อุปสรรคที่เกิดในงานวิจัยเนื่องจากการนำเข้าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งจัดเป็นก๊าซอันตรายทำได้ยาก ต้องรอก๊าซจากต่างประเทศนานถึง 6 เดือน

#### 2.3 ผลที่ได้ปฏิบัติในช่วงเดือนที่ 13 – 18

จากการทดลองในช่วงที่ 7 – 12 พบว่าการหลอมแคลเซียมซิลิไซด์ทำได้ยาก ดังนั้นจึงทดลองใช้โลหะทองแดงผสมซิลิคอนแทน คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการหลอมโลหะเงินผสมทองแดง อินเดียมและซิลิคอนที่อุณหภูมิ 1100°C และเมื่อโลหะละลายเข้าด้วยกันจะเทน้ำโลหะลงในแบบพิมพ์ โลหะแท่งทรงกระบอก เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกล ส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างจุลภาค การศึกษาอิทธิพลของธาตุแมงกานีสในโลหะเงินสเตอร์ลิงในช่วงเดือนที่ 13 – 18 ได้ผลทั้งส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างจุลภาคและค่าความแข็ง ส่วนการทดลองหลอมโลหะประสานทองในช่วงนี้อยู่ในระหว่างการเตรียมเตาท่อ (Tube furnace) ที่สามารถควบคุมบรรยากาศได้

## 2.4 ผลที่ได้ปฏิบัติในช่วงเดือนที่ 19 – 24

การศึกษาอิทธิพลของธาตุแมงกานีสต่อคุณสมบัติทางกล และความต้านทานการหมองของโลหะเงิน สเตอรัลิ่ง (Silver 92.5% – Copper – Manganese) ผลงานในช่วง 24 เดือนที่ผ่านมา คณะผู้วิจัยได้ทำการหลอมโลหะเงินผสมแมงกานีสตามอัตราส่วนต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ ทำการทดสอบทางกล ตรวจสอบผลวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างจุลภาค รวมถึงผลการวัดการต้านทานการหมองโดยเทคนิคไฟฟ้าเคมี เมื่อเทียบกับแผนงานที่วางไว้ การทดลองจึงเป็นไปตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ สามารถคิดผลการทำงานในช่วงนี้เป็น 80% ตามปริมาณที่ตั้งไว้ทั้งหมด

การศึกษาอิทธิพลของธาตุอินเดียมต่อคุณสมบัติทางกล และความต้านทานการหมองของโลหะเงิน สเตอรัลิ่ง (Silver 92.5% – Indium – Silver) การทดลองวิจัยงานโครงการย่อยนี้ได้แล้วเสร็จสมดังวัตถุประสงค์ที่ตั้งเป้าไว้ 100% ในช่วง 24 เดือนที่ผ่านมา สามารถคิดผลการทำงานได้ 100% ของปริมาณงานทั้งหมดที่ตั้งไว้

การศึกษาอิทธิพลของธาตุดีบุกต่อคุณสมบัติการประสานของโลหะประสานทอง ได้ทำการทดลองหลอมโลหะมาสเตอร์อัลลอย และทดลองหลอมโลหะประสานทอง และทำการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุดีบุก ดังนั้นเมื่อเทียบกับเป้าหมายที่ตั้งไว้จึงคิดเป็น 20% ตามปริมาณงานทั้งหมด

## 2.5 ผลที่ได้ปฏิบัติในช่วงเดือนที่ 25 – 30

การศึกษาอิทธิพลของธาตุแมงกานีสต่อคุณสมบัติทางกล และความต้านทานการหมองของโลหะเงิน สเตอรัลิ่ง (Silver 92.5% – Copper – Manganese) การทดลองวิจัยงานในโครงการย่อยนี้ได้แล้วเสร็จสมดังวัตถุประสงค์ที่ตั้งเป้าไว้ 100% ในช่วง 30 เดือนที่ผ่านมา สามารถคิดผลการทดลองได้ 100% ของปริมาณงานทั้งหมดที่ตั้งไว้

การศึกษาอิทธิพลของธาตุอินเดียมต่อคุณสมบัติทางกล และความต้านทานการหมองของโลหะเงิน สเตอรัลิ่ง (Silver 92.5% – Indium – Silver) การทดลองวิจัยงานโครงการย่อยนี้ได้แล้วเสร็จสมดังวัตถุประสงค์ที่ตั้งเป้าไว้ 100% และสรุปผลการทดลองทั้งหมดแล้วนำเสนอรายงาน

การศึกษาอิทธิพลของธาตุดีบุกต่อคุณสมบัติการประสานของโลหะประสานทอง เป็นการทดลองหลอมโลหะมาสเตอร์อัลลอย และทดลองหลอมโลหะประสานทองผสมดีบุกตามอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ ทดสอบความแข็ง ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค คิดเป็นปริมาณงานทั้งหมดที่ทำ 80%

## 2.6 ผลที่ได้ปฏิบัติในช่วงเดือนที่ 31 – 36

### ผลการดำเนินงาน

ผลการดำเนินงานวิจัยในช่วงนี้ คือ การรวบรวมข้อมูล ผลการทดลองทั้งหมด และทำการวิเคราะห์ สรุปผลการวิจัย เพื่อจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์ รวมถึงการทดลองซ้ำหรือวิเคราะห์ตรวจสอบผลการทดลองซ้ำอีกครั้ง

## 2.7 กิจกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

### 2.7.1 การเยี่ยมชมโรงงาน

คณะผู้วิจัยได้เยี่ยมชมโรงงานผู้ประกอบการขนาดใหญ่และเล็กที่ดำเนินกิจการในด้านการผลิตเครื่องประดับอัญมณี เงินและทอง โรงงานผลิตวัตถุดิบที่เกี่ยวข้องกับเครื่องประดับ โรงงานเครื่องประดับเทียม รวมทั้งสิ้น 11 ครั้ง ในช่วงระยะเวลา 3 ปีที่ทำการวิจัยดังนี้

- |                                                   |         |
|---------------------------------------------------|---------|
| 1. บริษัท ครีเอทีฟ เจมส์ แอนด์ จิวเวลรี่ จำกัด    | 1 ครั้ง |
| 2. บริษัท H.C. Starck จำกัด                       | 1 ครั้ง |
| 3. ศูนย์การค้าพลอย จังหวัดจันทบุรี (ถนนศรีจันทร์) | 1 ครั้ง |
| 4. บริษัท ภัคดี แฟคตอรี                           | 1 ครั้ง |
| 5. บริษัท โอล์ดมูน จำกัด                          | 1 ครั้ง |
| 6. บริษัท World Pearl จำกัด                       | 1 ครั้ง |
| 7. บริษัท ยูหลิม โกสค์ จำกัด                      | 1 ครั้ง |
| 8. ห้างทอง ชินเจียงเซียง ชั้น 1 นิ โอ สยาม        | 1 ครั้ง |
| 9. บริษัท I.O. จิวเวลรี่ จำกัด                    | 1 ครั้ง |
| 10. บริษัท CRP                                    | 1 ครั้ง |
| 11. บริษัท แพรนด้า จิวเวลรี่ จำกัด                | 1 ครั้ง |

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ประกอบการตามรายนามข้างต้นในความเอื้อเฟื้อและการสนับสนุนให้ข้อมูลวิชาการและเทคนิคการปฏิบัติต่าง ๆ ที่อาจเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อคณะผู้วิจัย มา ณ ที่นี้

อย่างไรก็ตาม จากการเยี่ยมชมกิจการ คณะผู้วิจัยพบว่า ผู้ประกอบการด้านการผลิตเครื่องประดับแท้ส่วนใหญ่มีความสนใจในการผลิตอัลลอยเพื่อใช้เอง อันจะเป็นการลดค่าใช้จ่าย เนื่องจากอัลลอยนำเข้าราคาแพงมากตามคุณภาพและธาตุผสมที่ใส่

### 2.7.2 การประชุมสัมมนา อบรมและเผยแพร่

รายละเอียดของการเข้าร่วมประชุม เข้าร่วมกิจกรรมเผยแพร่ความรู้ หรือการจัดสัมมนาต่าง ๆ ที่คณะผู้วิจัยได้มีส่วนร่วมในกิจกรรม มีดังต่อไปนี้

- วันที่ 13 กันยายน 2544 ได้บรรยายหัวข้อ เรื่อง “เทคนิคการตรวจสอบความบริสุทธิ์ของทอง” ที่ศูนย์แสดงสินค้าอิมแพค เมืองทองธานี โดยอาจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร เป็นวิทยากร
- วันที่ 22 กรกฎาคม 2545 ได้เข้าร่วมสัมมนาหัวข้อ เรื่อง “มาตรการกีดกันทางการค้าที่ไม่ใช่กฎหมาย” จัดโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ห้องประชุมนิรศรานวุติวงศ์ มหาวิทยาลัยศิลปากร คลังชั้น
- วันที่ 5 พฤศจิกายน 2545 ได้เข้าร่วมประชุม เรื่อง “การนำเสนอรายงานของการประเมินโครงการภายใต้แผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรมในปีที่ 1 ณ ห้องกษัตริย์ศึก 2 ชั้น 4 โรงแรมโซลทวินทาวเวอร์

4. วันที่ 6 พฤศจิกายน 2545 เข้าร่วมสัมมนา เรื่อง “เครื่องมือที่ใช้ทำพิมพ์แบบมีคอมพิวเตอรืควบคุม” ที่บริษัท เกรสไวท์ จำกัด

5. วันที่ 28 มีนาคม 2546 จัดสัมมนาเพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัย เรื่อง “การปรับปรุงคุณสมบัติของเงินสเตอร์ลิงโดยการเติมธาตุซิลิคอน” จัดโดย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้แผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรมระยะที่ 2 ซึ่งดำเนินงานโดย สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม (สศอ.) ณ ห้องประชุมนิรศรานูวัตวิงส์ ชั้น 4 มหาวิทยาลัยศิลปากร ตลิ่งชัน

6. วันที่ 16 มกราคม 2547 ได้บรรยายเรื่อง “การแก้ปัญหาทางานหล่อ” ในงานสัมมนาวิชาการ โครงการยกระดับเทคโนโลยีและการจัดการอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ โรงแรมฮอติเคย์อินน์ สีสม

ผลจากการจัดสัมมนาเพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัย เรื่อง “การปรับปรุงคุณสมบัติของเงินสเตอร์ลิงโดยการเติมธาตุซิลิคอน” และจากการรายงานความก้าวหน้าโครงการการพัฒนาและการผลิตโลหะผสมสำเร็จรูปที่ใช้ประกอบอัญมณี มีบริษัทสนใจให้ทุนสนับสนุนสำหรับทำวิจัย เพื่อนำผลงานวิจัยมาใช้ผลิตอัลลอยในระดับอุตสาหกรรม เพื่อลดปริมาณการนำเข้าอัลลอยจากต่างประเทศ โดยภาคเอกชนออกค่าใช้จ่ายประมาณ 44% และสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัยออกค่าใช้จ่ายส่วนที่เหลือทั้งหมด โดยมีชื่อโครงการวิจัยว่า “การผลิตอัลลอยผสมอินเดียมและซิลิคอน เพื่ออุตสาหกรรมเครื่องประดับเงิน” ระยะเวลา 2 ปี งบประมาณ 4,099,600 บาท

### 2.7.3 บทความวิจัย

การเผยแพร่ผลงานวิจัย นอกจากจะดำเนินงานในรูปของการถ่ายทอดเทคโนโลยีให้โรงงานโดยตรง และในรูปแบบการจัดสัมมนาอบรมแล้ว คณะผู้วิจัยยังได้เขียนบทความวิจัยลงตีพิมพ์ในวารสารต่างๆ ดังนี้

1. The Anit-tarnishing, Microstructure analysis and Machanical Properties of Sterling Silver with silicon addition ตีพิมพ์ใน Journal of Metals, Materilas and Minnerals. Vol. 12, No. 2 pp. 13-18, 2003.

2. การศึกษาอิทธิพลของธาตุอินเดียมต่อคุณสมบัติทางกลและความต้านทานการหมองโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง (เงิน 92.5% - ทองแดง - อินเดียม - ซิลิคอน) กำลังตีพิมพ์ในวารสาร ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประมาณเดือน มิถุนายน 2547

3. การศึกษาอิทธิพลของธาตุผสมในโลหะเงินสเตอร์ลิงผสม (Influence of Alloyin Elements in Sterling Silver) กำลังตีพิมพ์ในวารสารกองทุนสนับสนุนงานวิจัย ประมาณเดือน เมษายน 2547

4. การปรับปรุงคุณสมบัติทางกลโดยการเติมธาตุไทเทเนียมในทอง 23 กระรัต ขึ้นไป กำลังตีพิมพ์ในวารสารสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย ประมาณเดือน เมษายน 2547

### บทที่ 3

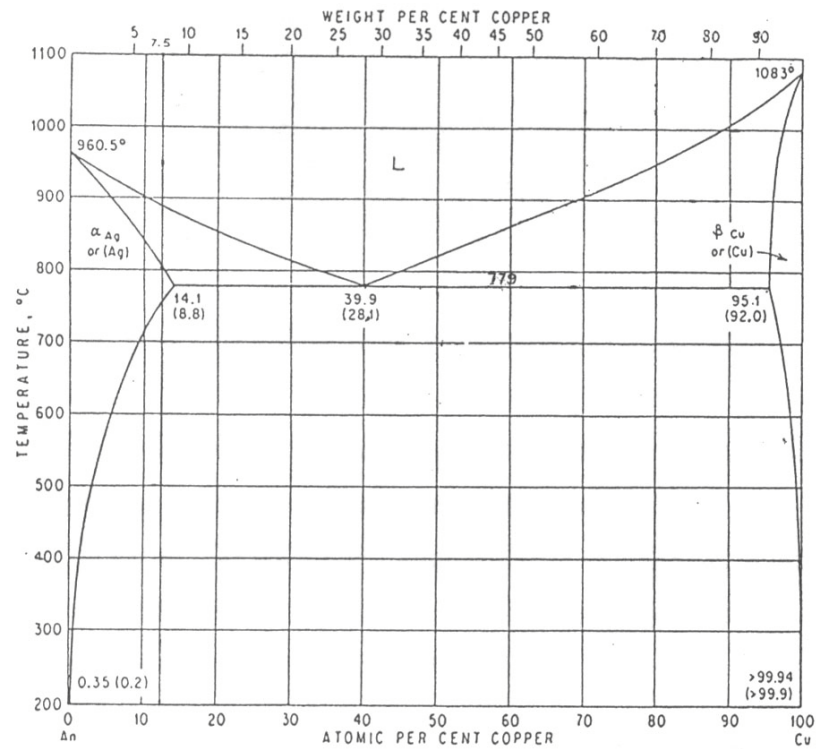
#### การศึกษาอิทธิพลของธาตุอินเดียมต่อคุณสมบัติทางกล และความต้านทานการหมอง ของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง (เงิน 92.5% – ทองแดง – อินเดียม – ซิลิคอน)

##### 3.1 ความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันได้มีการขยายตัวของอุตสาหกรรมเครื่องประดับและอัญมณีเป็นอย่างมาก จึงผลักดันให้ผู้ผลิตได้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ เพื่อสามารถแข่งขันกับตลาดการค้าสากลได้ โดยเฉพาะในปัจจุบันเงินสเตอร์ลิง (Sterling Silver) มีการแข่งขันในการผลิตสูง ทำให้ผู้ผลิตต้องคำนึงถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์เงินสเตอร์ลิงอย่างมาก คุณภาพที่จำเป็นต้องมีได้แก่ ความทนทานต่อการขีดข่วน คุณสมบัติทางกล ความทนทานต่อการหมอง โดยปกติมาตรฐานของเงินสเตอร์ลิงคือ โลหะผสมที่มีส่วนผสมของธาตุเงินอย่างน้อย 92.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนที่เหลืออีก 7.5 เปอร์เซ็นต์ มักจะเป็นทองแดง เพื่อทำให้โลหะผสมนี้มีความแข็งเพิ่มขึ้น สามารถนำไปเป็นเครื่องประดับและผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้อย่างมีคุณภาพมาก

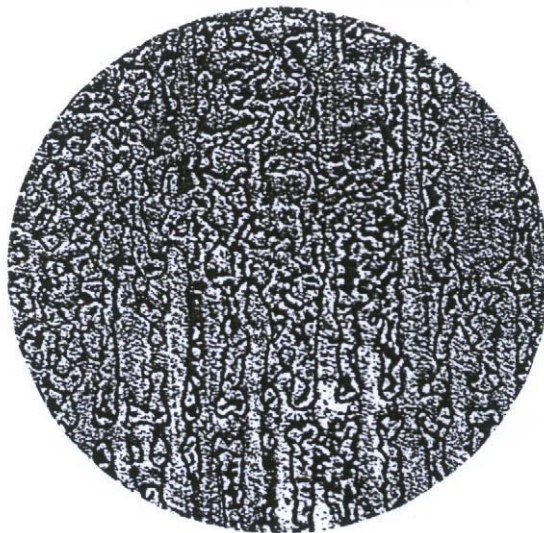
จากแผนภูมิสมดุล เงิน – ทอง ตามรูปที่ 3.1. เห็นได้ว่า อุณหภูมิหลอมเหลวของเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณทองแดงอยู่ที่ 7.5% โดยน้ำหนักคือ  $880^{\circ}\text{C}$  ดังนั้น เมื่อปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิหลอมเหลวดังกล่าว จึงเริ่มแข็งตัวโดยเกิดเป็นเฟสสารละลายของแข็งที่มีอะตอมของทองแดงละลายอยู่ในเนื้อโลหะเงิน ในแผนภูมิสารละลายของแข็งชนิดนี้เรียกว่าเฟส  $\alpha$  จากนั้นเมื่ออุณหภูมิลดลงถึงเส้น Solvus ก็จะมีการตกตะกอนของเฟสของสารละลายของแข็งของทองแดงที่ยอมให้เงินละลายได้จำนวนหนึ่ง (เฟส  $\beta$ ) ออกมา และเมื่ออุณหภูมิลดลงต่อไปอีกก็จะได้เฟส  $\alpha$  ที่ได้ ณ อุณหภูมิ นั้น จะมีปริมาณการละลายของทองแดงน้อยลง และในทำนองเดียวกัน เฟส  $\beta$  ก็จะมีปริมาณการละลายของเงินลดลงตามอุณหภูมิ ซึ่งค่าความสามารถในการละลายนี้จะหาได้จากค่าบนเส้น Solvus ทั้งสองเส้น ในด้านซ้ายและด้านขวาของแผนภูมิสมดุล

โดยปกติในการหล่อเงินสเตอร์ลิงนั้น การแข็งตัว (Solidification) จะไม่เป็นไปตามแผนภูมิสมดุล เนื่องจากมีอัตราการเย็นตัวเร็วเกินไปเพราะปล่อยให้เย็นตัวในอากาศภายนอกซึ่งจากงานหล่อเงินสเตอร์ลิงโดยทั่วไปมักพบโครงสร้างจุลภาคที่เป็นเฟสยูเทคติก ซึ่งประกอบด้วยผลึกขนาดเล็กของเฟส  $\alpha$  และผลึกขนาดเล็กของเฟส  $\beta$



รูปที่ 3.1 แผนภูมิสมดุลในระบบ 2 ธาตุ ระหว่างเงินกับทองแดง

โครงสร้างจุลภาคที่ได้หลังจากการแข็งตัวสมบูรณ์แล้ว จะมีลักษณะเป็นกิ่งก้านต่าง ๆ เรียกว่าเดนไดรต์ ตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะจุลโครงสร้างของเงินสเตอร์ลิง

ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการหล่อ การตกแต่งขึ้นรูป และการใช้งานของเงินสเตอร์ลิงมีดังต่อไปนี้ คือ

1. การเกิดรูพรุนในชิ้นงานหล่อ จากการละลายของออกซิเจนในน้ำโลหะ
2. การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิว ทำให้เกิดสารประกอบออกไซด์ของธาตุผสมในเงินสเตอร์ลิง เช่น Cupric Oxide ( $\text{CuO}$ ), Cuprous Oxide ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) ซึ่งมีสีเทาดำและสีแดงตามลำดับ ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์เงินสเตอร์ลิงที่ได้ลดลง
3. การเกิดการหมองที่ผิว จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเงินกับสารประกอบที่มีกำมะถัน (S) เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ทำให้เกิดสารประกอบซิลเวอร์ซัลไฟด์ ( $\text{Ag}_2\text{S}$ )

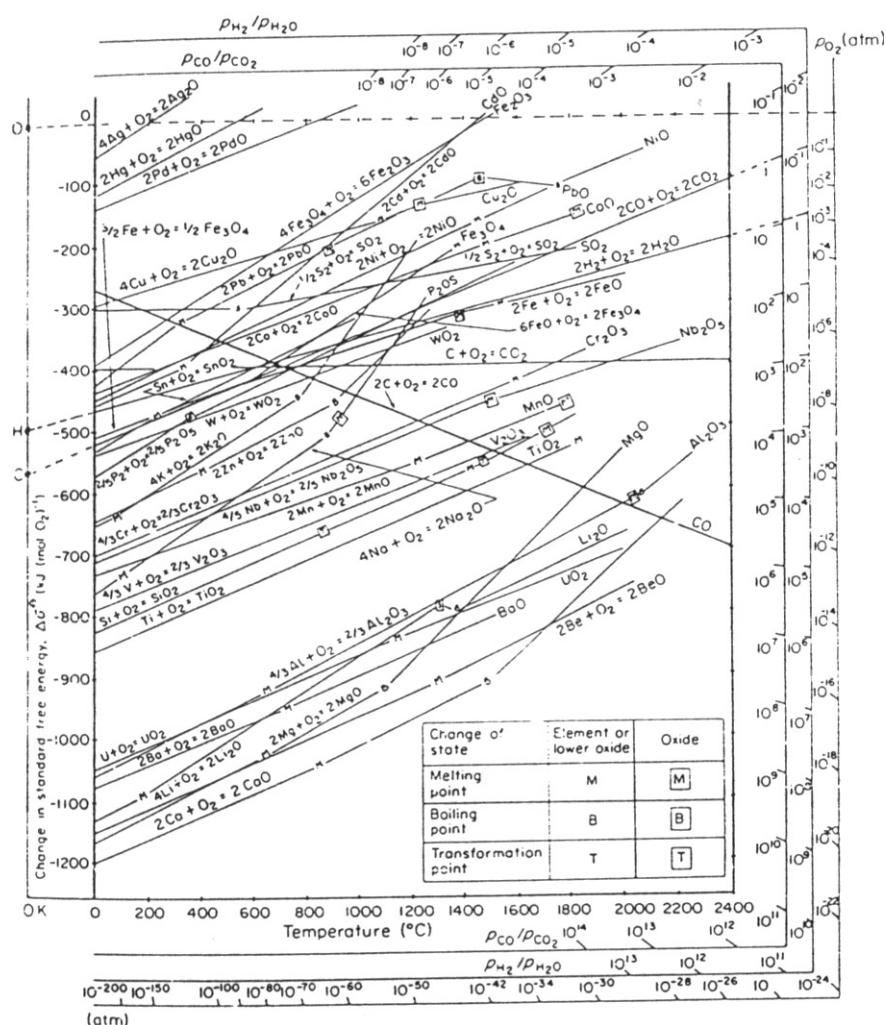
จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น ทำให้มีการเติมธาตุบางตัว ซึ่งเรียกว่า ตัวลดออกซิเจน (Deoxidizer) ลงไป เช่น แกลเลียม (Ga) เจอมาเนียม (Ge) สังกะสี (Zn) ดีบุก (Sn) ซิลิคอน (Si) แคลเซียม (Ca) และอินเดียม (In) เป็นต้น เพื่อเป็นตัวลดปริมาณออกซิเจนที่อยู่ในโลหะหลอมเหลว ทำให้ลดปัญหาการเกิดรูพรุนจากฟองก๊าซได้<sup>[13]</sup> นอกจากนั้น ธาตุเหล่านี้บางตัว เช่น แคลเซียม ดีบุก ซิลิคอน แกลเลียม ฯลฯ ยังสามารถลดปัญหาการหมองที่ผิวโลหะได้ดีอีกด้วย<sup>[13]</sup> เนื่องจากธาตุเหล่านี้มีความสามารถในการฟอร์มออกไซด์ได้ดีกว่าทองแดงที่อุณหภูมิห้อง ( $\Delta G^\circ$  ต่ำกว่า) ทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์เบา ๆ ขึ้นที่ผิวช่วยให้องค์การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของทองแดงให้ช้าลงได้ และยัง้องการทำให้ปฏิกิริยาของเงินกับกำมะถันได้ด้วยอีกทั้งยังเป็นการลดสัดส่วนของทองแดงในเงินสเตอร์ลิงลงทำให้โอกาสเกิด  $\text{CuO}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$  น้อยลงเช่นกัน

จากการสำรวจข้อมูลเบื้องต้นพบว่าธาตุที่มีความสามารถในการรวมตัวกับออกซิเจนได้ดี คือ ซิลิคอนและแคลเซียม ดังรูปที่ 3.3 เป็นแผนภูมิการเกิดออกไซด์ของธาตุต่าง ๆ (Ellingham Diagram) กับค่าพลังงานอิสระ ( $\Delta G^\circ$ ) ซึ่งจากการวิจัย<sup>[12]</sup> พบว่าการใช้ผงแคลเซียมซิลิไซด์ ในปริมาณที่เหมาะสมคือ 0.3% โดยน้ำหนัก เติมลงในเงินสเตอร์ลิงขณะหลอมเหลวโดยใช้เตาหลอมโลหะแบบอินดักชันในบรรยากาศปกติ ทำให้ความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิงดีขึ้น

อินเดียม (In) เป็นธาตุที่มีการใช้กันมากในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ โดยมีคุณสมบัติพิเศษคือ สารประกอบออกไซด์ของอินเดียมสามารถทนต่อการทำปฏิกิริยาระหว่าง เงินกับกำมะถัน ได้ดีทำให้ต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิงได้<sup>[2]</sup> และเนื่องจากอินเดียมมีจุดหลอมเหลวต่ำ ( $156.6^\circ\text{C}$ ) เมื่อนำมาผสมกับผงแคลเซียมซิลิไซด์แล้วเติมลงในเงินสเตอร์ลิงหลอมเหลว เมื่อปล่อยให้เย็นตัวจะเกิดการตกตะกอนของเฟสต่าง ๆ ขึ้น เช่น  $\text{Ca}_2\text{In}$ ,  $\text{CaIn}$ ,  $\text{CaIn}_2$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$  เป็นต้น โดยเฟสใหม่ที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะกระจายอยู่ในเงินสเตอร์ลิงหลอมเหลว ซึ่งคาดว่าจะทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสเทียม (Heterogeneous Nucleation) ให้กับสารละลายของแข็งของเงินสเตอร์ลิง หรืออาจเป็นตัวยับยั้งการโตขึ้นของเกรน

(Inhibitor) ทำให้ได้เกรนที่ละเอียดและสม่ำเสมอมีผลทำให้คุณสมบัติทางกลดีขึ้นโดยยังคงความต้านทานการหมอง (Tranishing) อยู่

ดังนั้น ในการวิจัยนี้ จะมีการเติมธาตุอินเดียมลงไปในเงินสเตอร์ลิงที่จำกัดปริมาณของแคลเซียมซิลิไซด์ไว้คงที่ที่ 0.3% โดยน้ำหนัก โดยทำการแปรผันสัดส่วนของธาตุอินเดียมในช่วง 0.5 - 2% โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากต้องการรักษาคุณสมบัติที่ดีในการหล่อ ซึ่งจะทำให้การศึกษาถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของเงิน สเตอร์ลิงที่ได้ ดังจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป



**รูปที่ 3.3** แสดงค่าพลังงานอิสระของการเกิดโลหะออกไซด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

### 3.2 วัตถุประสงค์

- 3.2.1 และหลังเติมอินเดียมในปริมาณต่าง ๆ กัน
- 3.2.2 ซิลิคอนผสมอยู่ก่อนและหลังเติมอินเดียมในปริมาณต่างๆ กัน
- 3.2.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอินเดียมที่มีผลต่อจุดหลอมเหลวของเงินสเตอร์ลิง

### 3.3 ขอบเขตการวิจัย

3.3.1. หลอมเงินสเตอร์ลิงที่ผสมและไม่ผสมแคลเซียมซิลิไซด์ โดยใช้เตาหลอมแบบเหนียวนำด้วยไฟฟ้าในสภาวะบรรยากาศ โดยเงินสเตอร์ลิงที่มีแคลเซียมซิลิไซด์ผสมอยู่จะทำการเติมอินเดียมในปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ กัน คือ 0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5% และ 2.0%

### 3.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 3.4.1 ทราบถึงความสามารถต้านทานความหองของเงินสเตอร์ลิงผสมอินเดียมที่ส่วนผสมต่าง ๆ
- 3.4.2 ทราบถึงปริมาณและความสามารถของอินเดียม ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิง เช่น ความแข็ง ความต้านทานแรงดึง
- 3.4.3 ทราบถึงโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากการเติมอินเดียม
- 3.4.4 ทราบถึงอิทธิพลของอินเดียมที่มีผลต่อจุดหลอมเหลวของเงินสเตอร์ลิง

### 3.5 ข้อมูลเบื้องต้นด้านโลหวิทยา

#### 3.5.1 ธาตุอินเดียมกับการใช้งานในเงินสเตอร์ลิง

ธาตุอินเดียมเป็นธาตุหมู่ 3A มีสีเงินและมีความนิ่มมากกว่าตะกั่ว สามารถนำไปตัดแต่งรูปร่างได้ง่ายมีจุดหลอมเหลว  $156.6^{\circ}\text{C}$  และจุดเดือด  $2073^{\circ}\text{C}$  ที่ความดันบรรยากาศ ได้มีการนำเอาธาตุอินเดียมมาใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ด้านทันตกรรมและผลิตภัณฑ์เครื่องเงินโดย DR. Murray<sup>[4]</sup> เป็นผู้ริเริ่มใช้ธาตุอินเดียมเป็นธาตุผสมในผลิตภัณฑ์ที่ชุบด้วยเงินเนื่องจากพบว่าเป็นตัวลดออกซิเจนได้ดี และสามารถต้านทานการหองได้ อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงความต้านทานแรงดึง และความเหนียวด้วย นอกจากนี้ ในราวปี ค.ศ. 1935 Wood and Lipowitz<sup>[4]</sup> ได้พบว่า การเติมธาตุอินเดียมในโลหะผสมบางอย่างจะช่วยลดจุดหลอมเหลวของโลหะผสมนั้นได้ ทำให้ประหยัดเชื้อเพลิงรวมทั้งต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์ดังกล่าว จากข้อดีของการเติมธาตุอินเดียมในโลหะผสมข้างต้น ทำให้สามารถนำมาพิจารณาในการปรับปรุง คุณสมบัติของเงินสเตอร์ลิง ดังที่จะกล่าวถึงต่อไป

#### 3.5.1.1 ธาตุอินเดียมกับคุณสมบัติการต้านทานการหอง

การหองที่เกิดขึ้นที่ผิว (Tarnishing) เกิดขึ้นเนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเงินกับสารประกอบที่มีกำมะถัน เช่น  $\text{H}_2\text{S}$  หรือ  $\text{SO}_2$  เป็นต้น ทำให้เกิดสารประกอบซัลไฟด์ของเงินขึ้น ซึ่งพบว่าจะมี  $\text{Ag}_2\text{S}$  เป็นองค์ประกอบหลัก และเกิดสีตั้งแต่สีน้ำตาล สีสน้ำตาลอมเขียว (Greenish-brown) จนถึงสีดำ โดยขึ้นกับชั้นความหนาของฟิล์มที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ Price และ Thomas<sup>[5]</sup> ยังค้นพบว่า เมื่อมีความชื้นปนอยู่กับ  $\text{SO}_2$  ในปริมาณที่เข้มข้นสูงฟิล์มของสารประกอบซัลไฟด์และมีซัลเฟต ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ ) ปนอยู่ด้วย

ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ เงินสเตอร์ลิงนั้นจะมีการหมองที่ผิวในอัตราที่เร็วกว่าเงินบริสุทธิ์ซึ่ง Vinal และ Schramm <sup>[6]</sup> พบว่า อัตราการหมองของเงินสเตอร์ลิงจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณทองแดงที่ผสมอยู่ เนื่องจากการเกิดออกซิเดชันของทองแดงทำให้เกิดความหมองเพิ่มขึ้น โดย CuO ที่มีสีดำและ Cu<sub>2</sub>O ที่มีสีแดง ดังนั้น จึงมีการเติมธาตุบางตัว เช่น สังกะสี ดีบุก อะลูมิเนียม ซิลิคอน พัลลาเดียม และอินเดียม เป็นต้น เพื่อที่จะมีการสร้างฟิล์มออกไซด์ของธาตุเหล่านี้และสามารถลดการหมองได้ โดยจะไปหน่วยการทำปฏิกิริยาของเงิน กับสารประกอบที่มีกำมะถัน

**สำหรับการศึกษาถึงการผสมธาตุบางอย่างในเงินสเตอร์ลิง เพื่อดำเนินการหมองนั้นเกิดขึ้นมาเป็นเวลานานแล้ว แต่ในที่นี้จะพิจารณาถึงผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับธาตุอินเดียมต่อเงินสเตอร์ลิงเท่านั้น**

### 3.5.2 การศึกษาคุณสมบัติความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิง

Daniel Davitz <sup>[1]</sup> ทำการทดลองหลอมเงินสเตอร์ลิง โดยพบว่าเงินสเตอร์ลิงที่ส่วนผสมโดยน้ำหนักเป็น 92.5%Ag - 2%Cu - 5%Pd - 0.5%In จะได้คุณภาพของเงินสเตอร์ลิงที่ดี โดยอินเดียมกับพัลลาเดียมช่วยในด้านความต้านทานหมอง คุณสมบัติในการหล่อขึ้นรูป และแบบหล่อที่ได้ไม่เปราะง่าย

Harigaya et al. <sup>[2]</sup> ทำการทดลองโลหะผสมของเงิน โดยทำการแปรผันค่าส่วนผสมต่าง ๆ โดยน้ำหนัก ดังนี้ คือ 4 -10%Sn, 0.5 - 2%In, 0.1 - 5%Zn และส่วนผสมที่เหลือเป็นเงิน จากนั้นทำการทดสอบการหมองของโลหะผสมของเงิน โดยวางแต่ละชุดทดสอบไว้ในบรรยากาศของไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) ซึ่งอิทธิพลของธาตุผสมดังกล่าวต่อการหมองดังแสดงในตารางที่ 3.1

**ตารางที่ 3.1** แสดงอิทธิพลของธาตุผสมที่ใช้เติมในโลหะผสมของเงินในการทดลองของ Harigaya

| ธาตุผสม | ผลดี                                                                               | ผลเสีย                                              |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Sn      | 0.4-10%wt. เป็นตัวกันหมองโดยหน่วงการเกิด Silver Sulfide และให้คุณสมบัติทางกลดีขึ้น | เกินกว่า 10%wt. จะทำให้สีของเงินผสมเปลี่ยนเป็นสีเทา |
| In      | 0.5-12%wt. จะทำให้กันหมองดีขึ้นและสามารถละลายเข้ากับเงินได้ดี                      | เกินกว่า 12%wt. จะทำให้เงินผสมมีสีเหลือง            |
| Zn      | 0.1-5%wt. จะเป็นตัวลดออกซิเจนที่ดี ด้านทานการหมองของเงินได้ดีขึ้น                  | เกินกว่า 5%wt. จะทำให้เงินผสมมีสีเทา                |

ในการทดลอง Harigaya นี้ แม้ไม่ใช่เงินสเตอร์ลิงเนื่องจากสัดส่วนน้ำหนักของเงินน้อยกว่า 92.5% แต่ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของธาตุผสมที่ใช้ในการทดลองได้

Zamejski, Marek R.<sup>[3]</sup> ทำการทดลองหลอมเงินสเตอร์ลิงผสม โดยแปรผันสัดส่วนของธาตุผสม อินเดียม/ทองแดง/โมลิบดีนัม จนได้ชุดส่วนผสมที่ได้คุณภาพดีที่สุดคือ 93%Ag - 4.99%Cu -2%In และ 0.01%Mo ซึ่งจะได้อุณหภูมิในการหล่อต่ำที่สุดคือ 1050°C - 1201°C พร้อมทั้งลักษณะพื้นผิวที่ดี สามารถในการต้านทานการหมองของธาตุผสม

### 3.5.3 การใช้ข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์พิจารณาความต้านทานการหมอง

ในการวิจัยนี้จะทำการศึกษาการหลอมเงินสเตอร์ลิงโดยใช้ส่วนผสมโดยน้ำหนักเป็น 92.5% Ag, 0.3% CaSi<sub>2</sub>, 0.5 - 2.0 % In, 5.2 - 6.7 % Cu ซึ่งเป็นที่ทราบแล้วว่าการหมองของเงินสเตอร์ลิงนั้น เกิดจากการทำปฏิกิริยาของเงินกับกำมะถันในบรรยากาศเป็นสารประกอบซิลเวอร์ซัลไฟด์ (Ag<sub>2</sub>S) ซึ่งมีสีดำและนอกจากนี้ ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของทองแดงที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ทำให้เกิดสารประกอบออกไซด์ของทองแดงคือ CuO และ Cu<sub>2</sub>O ซึ่งมีสีดำและแดงตามลำดับ ดังนั้น จึงได้พิจารณาถึงความสามารถในการเกิดสารประกอบออกไซด์ของธาตุผสมเพื่อที่จะสร้างฟิล์มออกไซด์มาป้องกันการหมองป้องกันกาหมองจากปฏิกิริยาที่กล่าวมาแล้ว ค่าพลังงานอิสระเกิดสารประกอบออกไซด์และสารประกอบซัลไฟด์ของธาตุต่าง ๆ ในเงินสเตอร์ลิงแสดงไว้ตามตารางที่ 3.2

**ตารางที่ 3.2\*** แสดงค่าพลังงานอิสระของการเกิดปฏิกิริยา Oxidation และ Sulphuration ของธาตุต่าง ๆ

| Reaction                                  | $\Delta G^0$ (Joule/Mole) | Range (°C) |
|-------------------------------------------|---------------------------|------------|
| 1. $2 Ag + \frac{1}{2} O_2 = Ag_2O$       | -30,540+66.1T             | 25         |
| 3. $2 Ag + \frac{1}{2} S_2 = Ag_2S$       | -161,300+168.6T           | 25-830 m   |
| 3. $Ca(l) + \frac{1}{2} O_2 = CaO$        | -640,000+108.6T           | 842-1482   |
| 4. $Ca(l) + \frac{1}{2} S_2 = CaS$        | -548,000+104T             | 842-1483   |
| 5. $2 Cu + \frac{1}{2} O_2 = Cu_2O$       | -160,400+71.25T           | 25-1085    |
| 6. $Cu + \frac{1}{2} O_2 = CuO$           | -152,300+85.4T            | 25-1086    |
| 7. $Cu + \frac{1}{2} S_2 = CuS$           | -115,600+76.0T            | 25-430     |
| 8. $2 In(l) + \frac{3}{2} O_2 = In_2O_3$  | -919,000+309.4T           | 157-1910 m |
| 9. $In(l) + \frac{1}{2} S_2 = InS$        | -155,000+60.7T            | 692-1500   |
| 10. $2 In(l) + \frac{3}{2} S_2 = In_2S_3$ | -554,000+286T             | 157-900    |
| 11. $Si + O_2 = SiO_2$                    | -907,000+176T             | 25-1412    |

จากตารางที่ 3.2 พบว่าในสภาวะที่มีกำมะถันในบรรยากาศที่อุณหภูมิห้อง โอกาสในการเกิดสารประกอบ  $\text{Ag}_2\text{S}$  และ  $\text{CuS}$  จะมีมากเนื่องจากมีค่า  $\Delta G^\circ$  ต่ำมาก ( $-111.25 \text{ kJ}$ . และ  $-92.95 \text{ kJ}$ . ตามลำดับ) แต่เนื่องจากสารประกอบซัลไฟด์ของธาตุอื่น ๆ เช่น  $\text{CaS}$ ,  $\text{InS}$ ,  $\text{In}_2\text{S}_3$  มีปริมาณน้อย ดังนั้นจะทำการพิจารณาการหมองที่เกิดจากสารประกอบ  $\text{Ag}_2\text{S}$  เป็นหลัก นอกจากนี้  $\text{CuO}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuS}$  ก็สามารถเกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้องด้วย จึงต้องพิจารณาสารประกอบออกไซด์ของธาตุผสมที่จะสามารถป้องกันการหมองได้ โดยจากตารางที่ 3.2 ซึ่งทราบว่า  $\text{SiO}_2$  สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิห้อง และมีค่า  $\Delta G^\circ$  ต่ำกว่าสารประกอบ  $\text{Ag}_2\text{S}$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$  มาก ซึ่งจะทำให้เกิดการสร้างชั้นเคลือบของฟิล์มซิลิกาขึ้นมาป้องกันปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้เกิดการหมองต่อไปได้

สำหรับค่าพลังงานอิสระในการทำปฏิกิริยากับ  $\text{O}_2$  ที่อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$ ,  $200^\circ\text{C}$  และ  $800^\circ\text{C}$  ได้แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าพลังงานอิสระของธาตุต่าง ๆ ในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน

| ธาตุ | ปฏิกิริยา                                              | $\Delta G^\circ (\text{kJ./mole O}_2)$ |                     |                     |
|------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------|---------------------|
|      |                                                        | $25^\circ\text{C}$                     | $200^\circ\text{C}$ | $800^\circ\text{C}$ |
| Ag   | $4\text{Ag} + \text{O}_2 = 2\text{Ag}_2\text{O}$       | -21.68                                 | -                   | -                   |
| Cu   | $4\text{Cu} + \text{O}_2 = 2\text{Cu}_2\text{O}$       | -278.33                                | -253.40             | -167.89             |
| In   | $4/3\text{In} + \text{O}_3 = 2/3\text{In}_2\text{O}_3$ | -                                      | -515.10             | -391.34             |
| Si   | $\text{Si} + \text{O}_2 = \text{SiO}_2$                | -854.55                                | -823.75             | -718.15             |
| Ca   | $2\text{Ca} + \text{O}_2 = 2\text{CaO}$                | -                                      | -                   | -1046.94            |

\*หมายเหตุสารประกอบหรือธาตุในตารางที่ 3.2.1 ปกติอยู่ในสภาวะของแข็ง ยกเว้น  $\text{O}_2$ ,  $\text{S}_2$  จะอยู่ในสภาวะก๊าซ m แทนจุดหลอม

Chartes E.T. white <sup>[4]</sup> ได้กล่าวไว้ว่าคุณสมบัติที่น่าสนใจประการหนึ่งของอินเดียมคือ ได้มีการใช้ธาตุอินเดียมผสมลงในโลหะประสานที่มีดีบุก และตะกั่วผสมอยู่ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

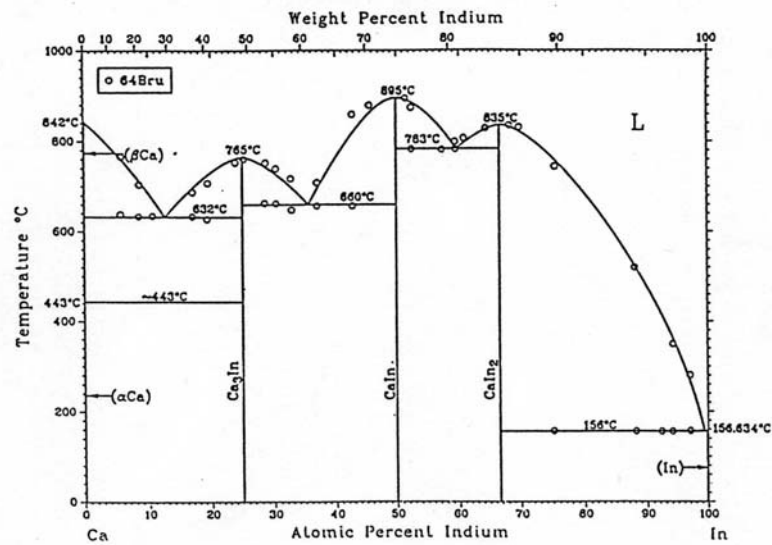
### 3.5.4 การใช้ข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์ในการพิจารณาคุณสมบัติทางกล

#### 3.5.4.1 การเกิดสารประกอบของธาตุผสมในเงินสเตอร์ลิง

เนื่องจากการทดลองได้ทำการหลอมเงินสเตอร์ลิงที่  $1100^\circ\text{C}$  โดยใส่แคลเซียมซิลิไซด์และอินเดียมลงไปด้วยทำให้เกิดสารประกอบของอินเดียมกับธาตุต่าง ๆ ในเงินสเตอร์ลิง ซึ่งจะได้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการเกิดสารประกอบเหล่านั้น และผลที่มีต่อคุณสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิง

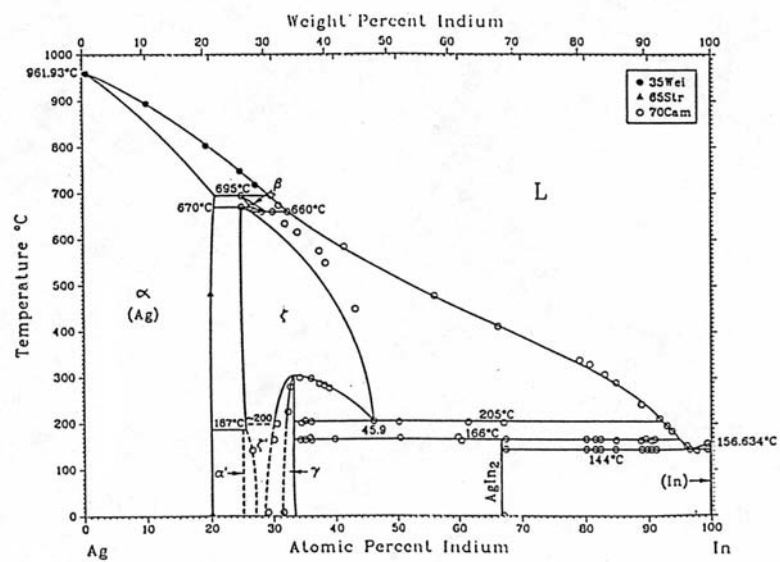
เนื่องจากสัดส่วนปริมาณของแคลเซียมกับอินเดียมในการหลอมเงินสเตอร์ลิงจะใช้ปริมาณที่ใกล้เคียงกัน (0.3%wt.  $\text{CaSi}_2$  และ 0.5-2.0%wt. In) ดังนั้น เมื่อปล่อยให้แข็งตัวจึงเป็นไปได้ที่จะเกิด Intermediate-phase ของแคลเซียม-อินเดียมได้หลายแบบ คือ เริ่มเกิด  $\text{CaIn}$  ที่อุณหภูมิ  $895^\circ\text{C}$  โดยมี สัดส่วนโดยน้ำหนักของอินเดียมเป็น 75.75% เกิด  $\text{CaIn}_2$  ที่อุณหภูมิ  $835^\circ\text{C}$  โดยมีสัดส่วนโดยน้ำหนักของอินเดียมเป็น 85% และเกิด  $\text{Ca}_3\text{In}$  ที่อุณหภูมิ  $765^\circ\text{C}$  โดยมีสัดส่วนโดยน้ำหนักของอินเดียมเป็น 49% ดังรูปที่ 3.4

### ระบบโลหะผสมแคลเซียม-อินเดียม



รูปที่ 3.4 แผนภูมิสมดุลของระบบโลหะผสมแคลเซียม-อินเดียม

### ระบบโลหะผสมเงิน-อินเดียม



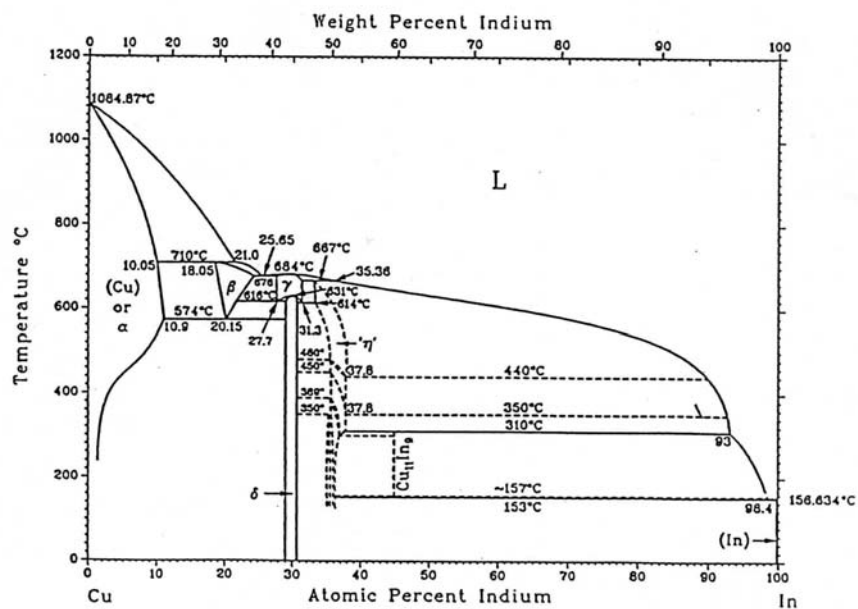
รูปที่ 3.5 แผนภูมิสมดุลของระบบโลหะผสมเงิน-อินเดียม

จากรูปที่ 3.5 เห็นได้ว่าอินเดียมสามารถละลายในเงินได้ดี ที่ปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของอินเดียม 0-20% จะเกิดเฟส  $\alpha$  ซึ่งเป็นสารละลายแข็งของเงิน-อินเดียมขึ้น ส่วน Intermediate phase เช่น  $\text{Ag}_3\text{In}$ ,  $\text{AgIn}_2$  มีโอกาสเกิดน้อยมากเพราะสัดส่วนน้ำหนักของอินเดียมสูงเกินไป และเกิดที่อุณหภูมิต่ำ ( $166^\circ\text{C} - 187^\circ\text{C}$ ) ส่วนเฟสอื่นแสดงไว้ในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเฟสและส่วนผสมทางเคมีโดยน้ำหนักในระบบโลหะผสมของเงิน-อินเดียม

| เฟส                             | % โดยน้ำหนักของอินเดียม |
|---------------------------------|-------------------------|
| $\alpha(\text{Ag})$             | 0-21.0                  |
| $\beta$                         | 26.0-31.0               |
| $\alpha'(\text{Ag}_3\text{In})$ | 26                      |
| $\zeta$                         | 26.0-48.0               |
| $\gamma(\text{Ag}_2\text{In})$  | 33.0-34.5               |
| $\phi(\text{AgIn}_2)$           | 68                      |
| (In)                            | 100                     |

#### ระบบโลหะผสมทองแดง-อินเดียม



รูปที่ 3.6 แผนภูมิสมดุลระบบโลหะผสมทองแดง-อินเดียม

ตามสัดส่วนปริมาณของทองแดงกับอินเดียมในการหลอมเงินสเตอร์ลิงผสม (0.5 - 2.0% wt.In, 5.2 - 6.7% wt.Cu) ซึ่งเมื่อพิจารณาตามรูปที่ 3.6 จะได้เฟสที่ตกตะกอนออกมาได้แก่เฟส  $\alpha$  เฟส  $\beta$  และเฟส  $\delta$  ส่วนเฟสอื่นตามตารางที่ 3.5 มีโอกาสเกิดน้อยมาก เนื่องจากมีสัดส่วนโดยน้ำหนักของอินเดียมสูงเกินไป

**ตารางที่ 3.5** ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเฟสและส่วนผสมทางเคมีโดยน้ำหนัก  
ในระบบโลหะผสมของทองแดง-อินเดียม

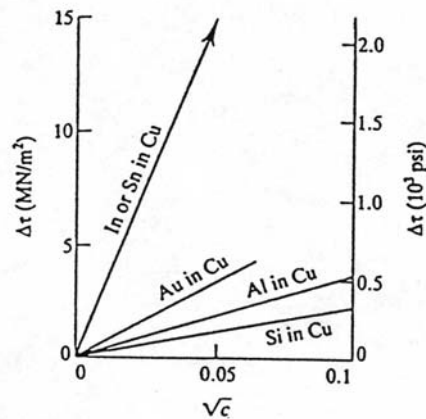
| เฟส                         | % โดยน้ำหนักของอินเดียม |
|-----------------------------|-------------------------|
| $\alpha$ (Cu)               | 0-18.3                  |
| $\beta$                     | 27.5-36.0               |
| $\gamma$                    | 40.5-45.0               |
| $\delta$                    | 43.0-44.5               |
| $\eta$                      | 47.0-52.5               |
| $\text{Cu}_{11}\text{In}_9$ | ~59.5                   |
| (In)                        | ~100.0                  |

### 3.5.5 กลไกการเพิ่มความแข็งแรงของธาตุผสมในเงินสเตอร์ลิง

เป็นที่ทราบกันดีว่ามีการผสมทองแดงในเงิน ทำให้ได้คุณสมบัติทางกลดีขึ้นแต่เนื่องจากการเกิดออกไซด์ของทองแดงเป็นผลให้เกิดการหมองของผลิตภัณฑ์ได้จึงจำเป็นต้องหาธาตุอื่นมาผสมเพื่อลดสัดส่วนการใช้ทองแดงลงโดยไม่ทำให้คุณสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิงลดลงไป ซึ่งในการวิจัยนี้ จะได้นำธาตุอินเดียมมาใช้ เนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดกลไกการเพิ่มความแข็งแรงในเงินสเตอร์ลิงได้ตามขบวนการต่อไปนี้

กลไกการเพิ่มความแข็งแรงโดยสารละลายของแข็ง (Solid Solution Strengthening) โดย ได้มีการศึกษาธาตุอินเดียมซึ่งถูกเติมลงไปเป็นอะตอมที่ถูกละลาย (Solute atom) ในทองแดง โดยจะทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันทำให้แปรรูปได้ยาก เป็นผลทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งยืนยันได้จากการวิเคราะห์ของ R.L. Fleisher<sup>[9]</sup> พบว่าความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนของการแปรรูป (Flow-Stress,  $\sigma$ ) กับรากที่สองของความเข้มข้นของอะตอมที่ถูกละลายจะแปรผันตรงกัน จากรูปที่ 3.7 แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของอะตอมอินเดียมที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเค้นเฉือนของการแปรรูปของโลหะผสมทองแดง-อินเดียมเพิ่มขึ้นเช่นกัน

แต่ทั้งนี้ ยังไม่ได้มีการศึกษาถึงผลของอินเดียมในเงินสเตอร์ลิง โดยอาจทำให้มีการเพิ่มความแข็งแรงขึ้นได้ หรือในทางตรงกันข้ามอินเดียมอาจทำให้เกิดอินคูชัน ซึ่งเป็นผลให้ความแข็งแรงลดลง ดังนั้น จะต้องทำการศึกษาต่อไป



รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์  $\sqrt{c}$  กับ  $\Delta\gamma$  ในโลหะผสมของทองแดงที่มีชนิดของ

อะตอมที่ถูกละลายต่าง ๆ กัน

กลไกเพิ่มความแข็งแรงจากขนาดเกรน (Boundary Strengthening) การเกิดสารประกอบของอินทรีย์กับธาตุผสมต่าง ๆ ในเงินสเตอร์ลิงระหว่างการแข็งตัว อาจมีผลทำให้ช่วยลดขนาดเกรนของเงิน สเตอร์ลิงได้ ซึ่งอาจทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสเทียมให้แก่สารละลายของแข็งของเงินสเตอร์ลิง หรืออาจเป็นตัวยับยั้ง (Inhibitor) การโตขึ้นของเกรน ทำให้ได้เกรนที่เล็กละเอียดขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ความแข็งแรงของเงินสเตอร์ลิงเพิ่มขึ้น เนื่องจากความสัมพันธ์ของ Hall-Petch<sup>[9]</sup> พบว่าขนาดเกรนที่ลดลงจะทำให้ความเค้นเฉือนที่ทำให้เกรนเกิดการแปรรูป (Apply Shear Stress,  $\tau_{app}$ ) ที่ขีดขวางไม่ให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่จากเกรนหนึ่งผ่านไปยังอีกเกรนหนึ่งเพิ่มขึ้น ตามสมการ

$$\tau_{app} = \tau_0 + k'_y d^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

โดย  $\tau_0$  : ความเค้นภายในวัสดุ (Intrinsic Stress) ที่ต้านการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันที่ทำให้เกรนเกิดการแปรรูป

$k'_y$  : ค่าคงที่เฉพาะของแต่ละวัสดุ

### 3.6. ระเบียบวิธีวิจัย

#### 3.6.1 วัตถุประสงค์

โลหะเงินและทองแดงที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดลองมีความบริสุทธิ์ 99.99% ส่วนอินเดียมนั้นมีความบริสุทธิ์ 99.9% โดยทั้งหมดนี้จะอยู่ในลักษณะที่เป็นเม็ดและแคลเซียมซิลิไซด์ ( $\text{CaSi}_2$ ) ที่ใช้จะมีลักษณะเป็นผง อย่างไรก็ตาม หลังการใช้แคลเซียมซิลิไซด์ ปรากฏว่ามีตะกอนเกิดขึ้น

มาก ทำให้ปริมาณซิลิคอนแปรปรวน จึงปรับเปลี่ยนจากการใช้แคลเซียมซิลิไซด์เป็นโลหะผสมทองแดงซิลิคอนที่มีอัตราส่วนระหว่างทองแดงต่อซิลิคอนเท่ากับ 70:30 โดยน้ำหนัก

### 3.6.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

#### 3.6.2.1 เตาหลอมอินดักชัน และอุปกรณ์หล่อหลอมโลหะ

- เตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction Furnace) พร้อมเครื่องระบายความร้อน ด้วยน้ำไหลเวียนภายในแบบระบบปิด
- เทอร์โมคัปเปิลชนิด R-Type วัดอุณหภูมิช่วง  $700 - 1700^{\circ}\text{C}$
- เป้าหลอมกราไฟต์ขนาดปริมาตร 620 ลูกบาศก์เซนติเมตร (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และความลึก 13 เซนติเมตร)
- แท่งกราไฟต์กวนน้ำโลหะ
- แบบหล่อโลหะสำหรับหล่อขึ้นงานเป็นแท่งทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร
- เตาอบไฟฟ้า
- ถังก๊าซ อาร์กอน พร้อมเกจวัดความดัน และหัวพ่น จำนวน 2 ชุด โดยชุดแรกใช้กับเตาอบไฟฟ้า เพื่อลดการเกิดออกไซด์ของผิวแบบหล่อ ส่วนอีกชุดหนึ่งใช้สำหรับพ่นก๊าซอาร์กอนลงในเป้าหลอมกราไฟต์ เพื่อคลุมผิวน้ำโลหะ ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ของธาตุต่างๆ ในน้ำโลหะ

#### 3.6.2.2 เครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลอง

- กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)
- กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope) และ EDX
- เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Tensile Test)
- เครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers Hardness Tester)
- เครื่องวัดค่าสีบนผิววัสดุสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

### 3.6.3 สารเคมี

#### 3.6.3.1 แอลกอฮอล์

#### 3.6.3.2 แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ )

#### 3.6.3.3 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )

#### 3.6.3.4 น้ำกลั่น

#### 3.6.3.5 โซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ )



รูปที่ 3.8 เตาอินดักชั่นและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับหล่อเงินสเตอร์ลิง

### 3.7 ขั้นตอนการทดลอง

3.7.1 เตรียมส่วนผสมของโลหะที่จะทำการหลอม ทำการจัดแบ่งเป็นชุด ๆ โดยมีส่วนผสมแตกต่างกันและมีน้ำหนักรวมเท่ากันคือ 300 กรัม ซึ่งมีส่วนผสมดังตารางที่ 3.6 ดังนี้

ตารางที่ 3.6 แสดงส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่ใช้ในการทดลอง

| หมายเลขชุด | ส่วนผสมทางเคมีโดยน้ำหนัก (%wt.) |        |         |          |
|------------|---------------------------------|--------|---------|----------|
|            | เงิน                            | ทองแดง | ซิลิคอน | อินเดียม |
| 1          | 92.5                            | 7.5    | -       | -        |
| 2          | 92.5                            | 7.0    | 0.5     | -        |
| 3          | 92.5                            | 6.5    | 0.5     | 0.5      |
| 4          | 92.5                            | 6.0    | 0.5     | 1.0      |
| 5          | 92.5                            | 5.5    | 0.5     | 1.5      |
| 6          | 92.5                            | 5.0    | 0.5     | 3.0      |
| 7          | 92.5                            | 6.5    | -       | 1.0      |
| 8          | 92.5                            | 5.5    | -       | 3.0      |
| 9          | 92.5                            | 5.0    | 0.5     | 3.0      |

- 3.7.2 ตั้งค่าอุณหภูมิเตาหลอมไว้ที่  $1100^{\circ}\text{C}$  เมื่ออุณหภูมิขึ้นถึงประมาณ  $600^{\circ}\text{C}$  ทำการเทเม็ดโลหะเงินและทองแดงรวมกันในเบ้าหลอมกราไฟต์ สำหรับส่วนผสมที่มีซิลิคอนหรืออินเดียม ให้เทโลหะดังกล่าวเมื่อโลหะเงินและทองแดงหลอมละลายแล้ว
- 3.7.3 เมื่อส่วนผสมหลอมละลายเข้าด้วยกันดีแล้ว รอจนกว่าอุณหภูมิลดลงมาถึง  $1100^{\circ}\text{C}$  แล้วรับน้ำแบบหล่อออกจากเตาอบ แล้วเทน้ำโลหะลงในแบบหล่อ
- 3.7.4 นำชิ้นงานหล่อซึ่งมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 150 เซนติเมตร มาตัดแบ่ง เพื่อทดสอบการหมอง ทดสอบหาจุดหลอมเหลวจากเครื่อง DTA ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและอิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ทดสอบแรงดึง วัดค่าความแข็งและวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี
- 3.7.5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

### 3.8 ระเบียบ และวิธีการตรวจสอบวิเคราะห์ผล

#### 3.8.1 การตรวจสอบค่าส่วนผสมทางเคมี

#### วิธีการวิเคราะห์ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 วิธีการวิเคราะห์ธาตุที่ได้จากการหล่อ

| ธาตุ | วิธีการวิเคราะห์ | สถานที่วิเคราะห์                          |
|------|------------------|-------------------------------------------|
| Ag   | ตรีเตรท          | บ. Dmc <sup>2</sup> Metal (Thailand) Ltd. |
| Cu   | AA               | บ. Dmc <sup>2</sup> Metal (Thailand) Ltd. |
| In   | AA               | บ. Dmc <sup>2</sup> Metal (Thailand) Ltd. |
| Si   | AA               | กรมวิทยาศาสตร์บริการ                      |

#### 3.8.1.1 การวิเคราะห์ปริมาณของเงินโดยวิธีตรีเตรทตามมาตรฐาน ISO 11427

1. ตัดชิ้นงานตัวอย่างให้มีขนาดเล็กที่สุดเพื่อให้ง่ายต่อการทำลายด้วยกรดจนได้ปริมาณ 0.1 กรัม
2. ละลายโลหะตัวอย่างด้วยกรดไนตริกที่ผสมน้ำในอัตราส่วน 1:1 โดยใช้อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$  เงินจะทำปฏิกิริยากับไนเตรท เป็นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท
3. ทำการตรีเตรทเพื่อหาปริมาณของเงินในสารละลาย โดยใช้โพแตสเซียมโบรไมด์ (KBr) จนเริ่มเกิดตะกอนของเงินโบรไมด์ (AgBr) แล้วคำนวณหาปริมาณของ KBr ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

4. ใช้หลักการไฟฟ้าเคมี โดยมีอิเล็กโตรด  $\text{Ag}/\text{AgBr}$  ใช้ตรวจสอบการเกิด  $\text{AgBr}$  (Automatic Titration) กรณีที่เตรียมแบบธรรมดาใช้สารละลายโพแทสเซียม ไธโอไซยาไนด์ ( $\text{KSCN}$ ) เข้มข้น 10 กรัม ต่อลิตร ผสมด้วยเพอร์ริกอัลลัม 2-3 หยดสำหรับใช้เป็นอินดิเคเตอร์ ที่จะทำให้เกิดจุดเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีในสารละลาย (N-Spot) เป็นสีชมพูอ่อนเกือบขาว
5. ใช้สารละลายมาตรฐาน  $\text{AgBr}$  ทดสอบเปรียบเทียบกับตะกอนที่เกิดขึ้นหลังการเตรียม กรณีทำการเตรียมแบบอัตโนมัติ

#### 3.8.1.2 การวิเคราะห์ปริมาณของธาตุผสม Cu, In, Si ด้วยวิธี Atomic Absorption Spectroscopy)

1. ชั่งตัวอย่างไว้ปริมาณ 0.3 กรัม ละลายในกรดไนตริกเข้มข้นจำนวน 10 มิลลิลิตร
2. ทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง จนละลายหมด แล้วไล่ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $\text{NO}_2$ ) ออกให้หมดจากนั้นผสมน้ำให้ได้ปริมาตรรวม 50 มิลลิลิตร
3. จากนั้นทำการวิเคราะห์ปริมาณของ ทองแดง ,อินเดียม ,ซิลิคอนโดยนำไปเผาด้วย air-acetylene โดยใช้ความร้อนประมาณ  $6,000^\circ\text{C}$  เพื่อให้สารทดสอบเกิดการแตกตัวเป็นอะตอม แล้วทำการกระตุ้นอะตอมให้เข้าสู่สภาวะ excited state เพื่อให้เกิดการคายพลังงานออก
4. วัดค่าพลังงานที่คายออกมาเทียบกับตอนเริ่มต้น จะทำให้ทราบพลังงานส่วนที่ถูกดูดกลืนไป แล้วนำค่าที่ได้มาเทียบกับค่ามาตรฐานของเครื่องมือ จะทำให้ทราบว่าชิ้นงานที่นำมาทดสอบมีส่วนผสมของโลหะที่ต้องการทราบเป็นปริมาณเท่าใด

#### 3.8.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

- 3.8.2.1 เตรียมชิ้นงานโดยการตัดชิ้นงานหล่อ แล้วเตรียมผิวโดยการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800, 1000 และ 1200 แล้ว Polishing ด้วยผงเพชรขนาด 9, 6, 3, 1 และ  $1/4$  ไมครอน ตามลำดับ ล้างคราบสกปรกด้วยน้ำและอัลกอฮอล์ เป่าให้แห้งจากนั้นนำไปกัดผิวชิ้นงานด้วยกรด  $\text{H}_2\text{O}_2$  50% +  $\text{NH}_4\text{OH}$  25% +  $\text{H}_2\text{O}$  25% โดยปริมาตรประมาณ 10 – 30 วินาที
- 3.8.2.2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง แล้วถ่ายรูปโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขนาด 100 และ 200 เท่า

3.8.2.3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) พร้อม  
กับตรวจสอบปริมาณของธาตุผสมในเฟสหรือโครงสร้างที่พบด้วย EDX

### 3.8.3 การตรวจวัดค่าความแข็ง

3.8.3.1 จัดชิ้นงานให้ได้ระนาบและขนาดกันทั้ง 2 ด้านกระดาศทรายจนถึงเบอร์ 1200  
แล้วขัดละเอียดด้วยผงเพชรขนาด 9, 6, 3, 1, และ 1/4 ไมครอนตามลำดับ

3.8.3.2 วัดค่าความแข็ง ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ด้วยน้ำหนักกด 1  
กิโลกรัม วัดระยะอินเดนท์ทั้ง 2 แกน โดยเครื่องจะคำนวณค่าความแข็งเป็น  
หน่วยวิกเกอร์ (HV) ในการวัดให้วัดตามหน้าตัดขวางของชิ้นงาน ห่างจากด้าน  
ริมของชิ้นงาน 2 มม. และวัดรอยต่อไปห่างจากรอยแรกทุก ๆ 2 มม. จำนวนทั้ง  
หมด 5 รอย ต่อ 1 ตัวอย่าง แล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยหาค่าความแข็งของชิ้น  
งานนั้น ๆ ต่อไป

### 3.8.4 การตรวจหาจุดหลอมเหลวจากเครื่อง DTA (Differential Thermal Analysis)

นำตัวอย่างชิ้นงานไปตัดให้มีขนาดเล็ก ๆ จากนั้นนำไปตะไบให้ได้น้ำหนักประมาณ 200  
มิลลิกรัม แล้ววางไว้ในเครื่อง DTA บรรยากาศไนโตรเจน โดยให้ความร้อนด้วยอัตรา  $10^{\circ}\text{C}$  ต่อนาที  
โดย DTA จะเป็นเทคนิคที่ใช้วัดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างชิ้นตัวอย่างกับวัสดุอ้างอิง ซึ่งใช้อะ  
ลูมินา โดยถูกวัดในรูปฟังก์ชันของอุณหภูมิเพื่อวัดหาจุด Liquidus และ Solidus ได้

### 3.8.5 การทดสอบการต้านทานการหมอง

3.8.5.1 ตัดชิ้นงานหล่อขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้นต่อหนึ่งตัวอย่าง  
แล้วขัดผ้าฝอยหน้าตัดทั้ง 2 ด้าน ด้วยกระดาศทราย เบอร์ 400, 600, 800,  
1000, และ 1200 ตามลำดับ

3.8.5.2 ชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนการทดสอบ และวัดค่าความสว่าง L และค่าสี a,b  
ก่อนการทดสอบด้วยเครื่อง Spectrophotometer GRETAG – SPM 50 มุม 2  
องศา D65A

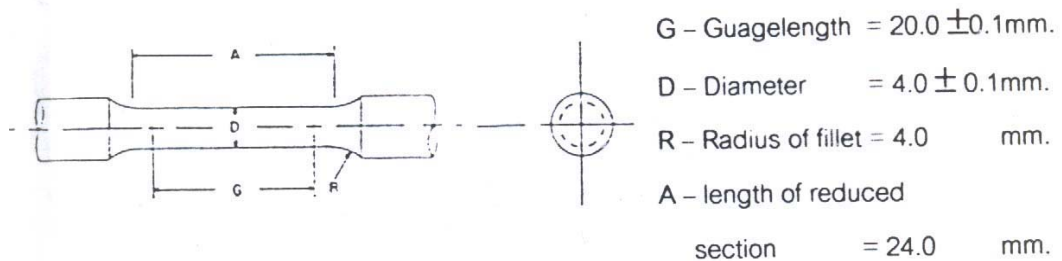
3.8.5.3 แช่ววนชิ้นงานไว้ในเนื้อสารละลายอิมัลชันของโซเดียมซัลไฟด์ ในภาชนะมีฝา  
ปิดเป็นเวลา 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง

3.8.5.4 นำชิ้นงานหลังการทดสอบการหมองไปชั่งน้ำหนัก แล้ววัดค่าความสว่างและ  
ค่าสีของชิ้นงาน

3.8.5.5 นำค่าต่าง ๆ ที่ได้มาคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงของสีผิวชิ้นงานของแต่ละ  
ชุดตัวอย่างแล้วนำมาสรุปผล

### 3.8.6 การทดสอบแรงดึง

ตัดชิ้นงานแล้วนำไปกลึงทำ Specimens ให้มีขนาดตามมาตรฐาน ASTM E8M – 96 ดังรูปที่ 3.9



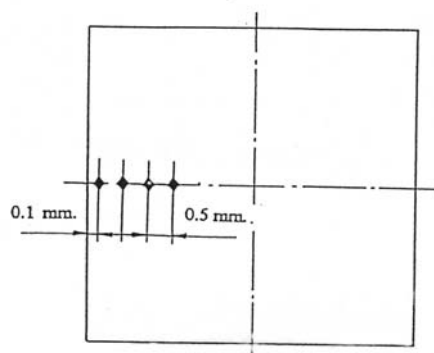
รูปที่ 3.9 แสดงชิ้นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8M – 96

นำชิ้นทดสอบแรงดึงของแต่ละชุดส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิง มาทำการทดสอบแรงดึงเพื่อหาค่าต่าง ๆ คือ ค่าแรงดึงสูงสุด ค่าแรงดึงที่จุดคราก และเปอร์เซ็นต์การเสียรูปหรือยืดตัวมาทำการเปรียบเทียบและสรุปผล

### 3.8.7. การตรวจวัดค่าความแข็ง

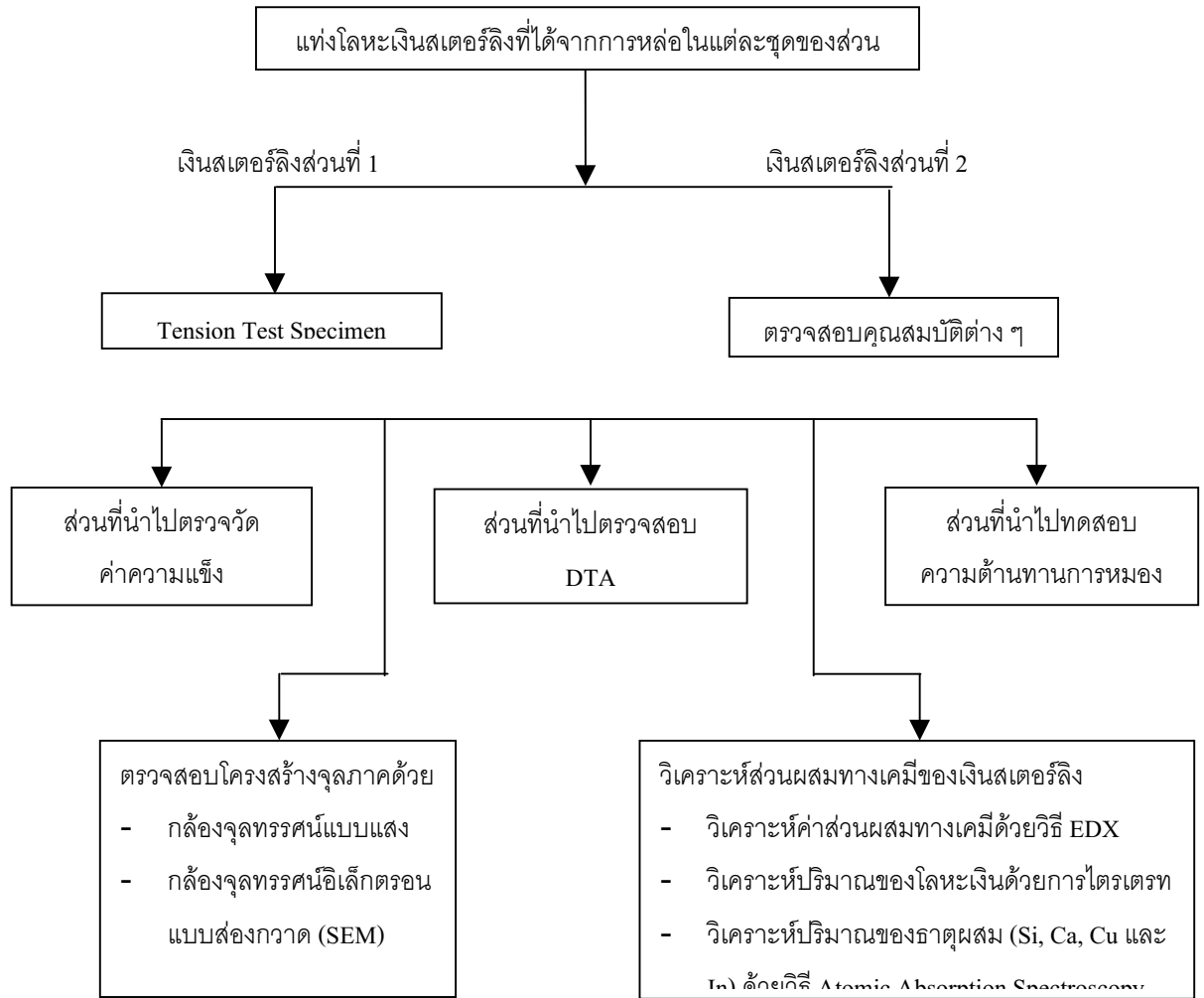
ตรวจวัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ ด้วยน้ำหนักกด 1 กิโลกรัม เวลา 10 วินาที วัดระยะอินเดนท์ทั้ง 2 แกน คำนวณค่าความแข็งเป็นวิกเกอร์นัมเบอร์

วัดความแข็งที่ผิวชิ้นงานโดยทำการวัดบนหน้าตัดขวางของชิ้นงาน รอยวัดแรกต่างจากผิวชิ้นงาน 0.1 มม. และรอยวัดต่อไป ห่างจากรอยแรกทุก ๆ 0.5 มม. ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงวิธีการวัดค่าความแข็งชิ้นงานทดสอบ

### 3.9 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลอง



### 3.10 ผลการดำเนินงานวิจัย

ตามที่คณะผู้วิจัยได้ระบุในรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 1 ว่าจะปรับปรุงการวิจัยในส่วนหัวข้อนี้เล็กน้อย โดยใช้ธาตุซิลิคอนในรูปของแคลเซียมซิลิไซด์ คณะผู้วิจัยได้ทำการทดลองโดยหล่อเป็นแท่งทรงกระบอกเพื่อนำไป ศึกษาส่วนผสมทางเคมีและทดสอบคุณสมบัติทางกล จากการตรวจสอบสภาพการหล่อพบว่า การหลอมแคลเซียมซิลิไซด์ทำได้ยาก ดังนั้นจึงทดลองใช้โลหะทองแดงผสมซิลิคอนแทน ในรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 2 คณะผู้วิจัยได้ทดลองหลอมโลหะเงินผสมทองแดงอินเดียมและซิลิคอนโดยใช้กระบวนการผลิตจริงในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อทดสอบผลที่เกิดขึ้นในชิ้นงานโลหะผสมทั้งในด้านสีผิวงานหล่อ การทนทานต่อการหมองโดยทิ้งไว้ในบรรยากาศปกติและนำมาเปรียบเทียบกับเงินสเตอร์ลิงที่มีทองแดงเป็นธาตุผสมตัวเดียวที่ทิ้งไว้ในช่วงเวลาเท่ากัน ผลการทดลองนี้พบว่าอินเดียมและซิลิคอนมีอิทธิพลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติด้านการกันหมองได้ โดยสังเกตจากสภาพผิวที่ยังไม่เปลี่ยนสี และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเงินสเตอร์ลิงที่ผสมอัลลอยที่นำเข้ามาจากต่างประเทศที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตเงินสเตอร์ลิงกันหมอง พบว่าสภาพผิวอยู่ในเกณฑ์ที่ดีพอ กันซึ่งข้อมูลเบื้องต้นดังกล่าวเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง และทำให้คณะผู้วิจัยสามารถศึกษาในภาพกว้างก่อนที่จะทำการวิจัยในเชิงลึกต่อไป ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ เริ่มแรก

คณะผู้วิจัยได้ทำการทดลองหล่อชิ้นงานโดยใช้เครื่องหล่อดูดสุญญากาศซึ่งได้รับความร่วมมืออย่างดีจาก ภาคเอกชนดังรูป 3.11 เครื่องหล่อดังกล่าวมีความสามารถในการกวนด้วยความถี่ขนาดปานกลางเพื่อให้โลหะเงิน ทองแดง อินเดียมและซิลิคอน ละลายเข้ากันได้เป็นอย่างดีเป็นเนื้อเดียว ในขณะที่หลอม และยังมีระบบสุญญากาศ ซึ่งทำให้การสูญเสียธาตุซิลิคอนที่เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนน้อยลง จึงมั่นใจได้ว่าซิลิคอนจะละลายเข้าสู่โลหะหลอมเหลวในปริมาณใกล้เคียงกับที่กำหนด

จากการทดลองในภาคอุตสาหกรรม ชิ้นงานต้นโลหะถูกผลิตขึ้นมาจำนวน 5 ต้น รูป 3.12 แสดงถึงชิ้นงานที่ผ่านการหลอมและหล่อในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งจะสังเกตได้ว่า ผิวของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงที่มีธาตุอินเดียมและซิลิคอน 1% และ 0.4% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ (รูปกลางบน) จะมีผิวที่มันเงากว่าชิ้นงานที่เติมทองแดงอย่างเดียว (รูปบนซ้าย) และยังมีผิวสวยกว่าการใช้อัลลอยนำเข้าจากต่างประเทศ (รูปบนขวา) นอกจากนั้นชิ้นงานที่มีเนื้อโลหะเงิน 95% ที่เติมอินเดียม 1% และซิลิคอน 0.4% (รูปล่างซ้าย) และที่เติมอินเดียม 2% และซิลิคอน 0.3% (รูปล่างขวา) จะมีผิวที่มันเงาและขาวกว่าต้นโลหะที่มีเนื้อเงินต่ำกว่า จากการทดลองเบื้องต้นดังกล่าว ทำให้ทราบว่าอินเดียมและซิลิคอนมีผลต่อการทำให้ผิวมันเงาและยับยั้งการเกิดออกไซด์ของทองแดงได้ดี อย่างไรก็ตามในต้นโลหะที่มีธาตุซิลิคอนสูง พบว่ามีการแตกของชิ้นงานบ้าง โดยเฉพาะบริเวณเนื้อโลหะบาง ข้อมูลทดลองเบื้องต้นนี้ทำให้คณะผู้วิจัยสามารถกำหนดขอบเขตการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุผสมได้ โดยจะควบคุมปริมาณ

ซิลิคอนให้อยู่ในระดับต่ำเพื่อป้องกันการแตกของชิ้นงาน และใส่อินเดียมในปริมาณที่เหมาะสมเพราะอินเดียมมีราคาค่อนข้างสูง

ในรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 4 โครงการย่อยนี้ ได้ดำเนินการเสร็จเรียบร้อยแล้วตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งเป้าไว้ จึงขอเสนอรายงานทั้งหมดของโครงการ ดังนั้นในรายงานฉบับต่อไปจะไม่กล่าวถึงการทดลองในหัวข้อย่อยนี้อีก



รูป 3.11 เครื่องหล่อด้วยสุญญากาศที่มีระบบกวนน้ำโลหะที่ใช้ในวงการอุตสาหกรรมเครื่องประดับ



รูป 3.12 แสดงถึงผลงานหล่อของชิ้นงาน

- เงินสเตอร์ลิง 925-Cu7.5 (ซ้ายบน)
- เงิน 925-In1-Si0.4 (กลางบน)
- เงิน 925 ผสมอัลลอยนำเข้า (ขวาบน)
- เงิน 950-In1-Si0.4 (ซ้ายบน)
- เงิน 950-In2-Si0.3 (ขวาล่าง)

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการหลอมโลหะเงินผสมทองแดง อินเดียมและซิลิกอน ที่อุณหภูมิ  $1100^{\circ}\text{C}$  และเมื่อโลหะละลายเข้าด้วยกัน จะเทน้ำโลหะลงในแบบพิมพ์โลหะรูปแท่งทรงกระบอก ชิ้นงานที่หล่อจะแสดงไว้ ในรูปที่ 3.13 และจะนำไปตัดวิเคราะห์คุณสมบัติทางกล ทางเคมี และโครงสร้างจุลภาคต่อไป รูปที่ 3.14 แสดงถึงรูปทรงชิ้นงานก่อนและหลังที่นำไปทดสอบความต้านทานแรงดึง



รูปที่ 3.13 รูปร่างของชิ้นงานโลหะเงินผสมที่ได้จากการหลอม

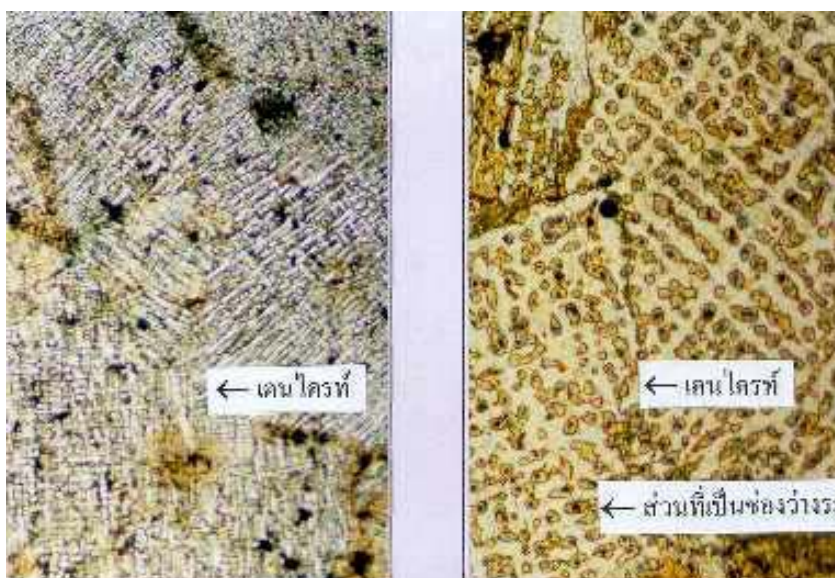


รูปที่ 3.14 รูปชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึง ก่อนและหลังผ่านการทดสอบ

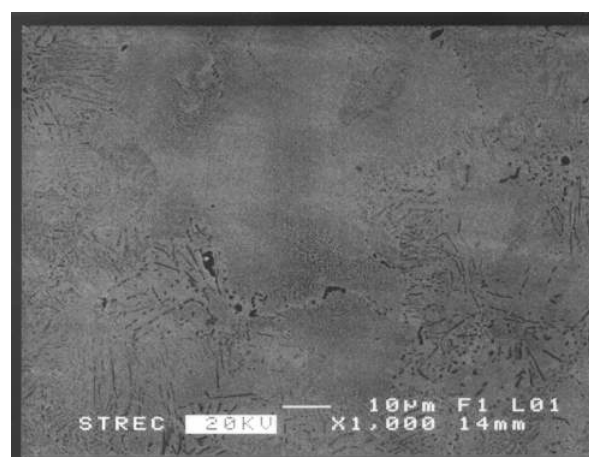
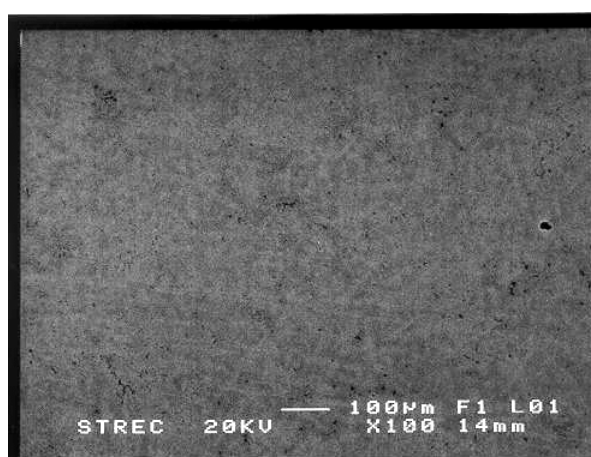
### 3.11 โครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่ใส่ทองแดงชนิดเดียว

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่ใส่ทองแดงชนิดเดียว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง ดังรูปที่ 3.15 และกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ดังรูปที่ 3.16 พบว่า โครงสร้างจุลภาคแสดงถึงโครงสร้างงานหล่อ ประกอบด้วยโครงสร้างเดนไดรต์กับโครงสร้างยูเทคติก โครงสร้างเดนไดรต์เป็นสารละลายของแข็งเฟสอัลฟาที่มีธาตุเงินเป็น ตัวทำละลายและมีธาตุทองแดงเป็นตัวถูกละลาย ส่วนโครงสร้างยูเทคติกเป็นโครงสร้างสลับกันระหว่างสองเฟส คือ เฟสอัลฟาและเฟสเบต้า (สีดำหรือน้ำตาลแดง) โครงสร้างที่พบเป็นโครงสร้างที่เห็นได้ปกติในเงินสเตอร์ลิงที่มี

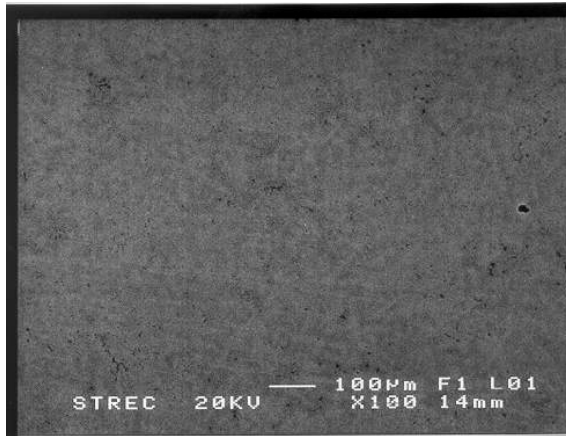
ทองแดงผสม 7.5% แม้ว่าตามแผนภูมิสมดุลของเฟส ระหว่างเงินและทองแดงจะให้โครงสร้างยูเทคติกเกิดขึ้นเมื่อ ทองแดงในเนื้อโลหะมีปริมาณตั้งแต่ 8.8% โดยน้ำหนักขึ้นไป ดังนั้นไม่ควรพบเมื่อเติมทองแดงเพียง 7.5% แต่ในโครงสร้างจุลภาคสามารถเห็นโครงสร้างยูเทคติกได้ เนื่องจากการเย็นตัวในลักษณะที่ไม่เป็นไปตามแผนภูมิสมดุล ส่วนโครงสร้างจุลภาคของเงินผสมทองแดง อินเดียมและซิลิคอน จะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อ 3.15 อภิปรายผลการทดลอง ข้อที่ 3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 3.15 ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่มีทองแดง 7.5% (ซ้าย 50x และขวา 200x)



รูปที่ 3.16 โครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่มีทองแดง 7.5% เมื่อใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกวดด้วย Black scatter electron image. (ซ้าย กำลังขยาย 100 เท่า และขวา กำลังขยาย 1000 เท่า)

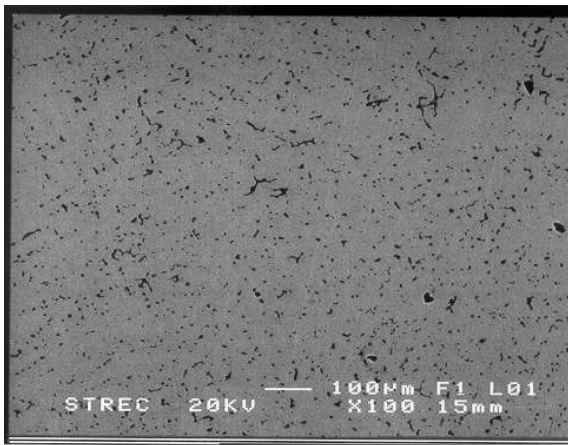


(ก)

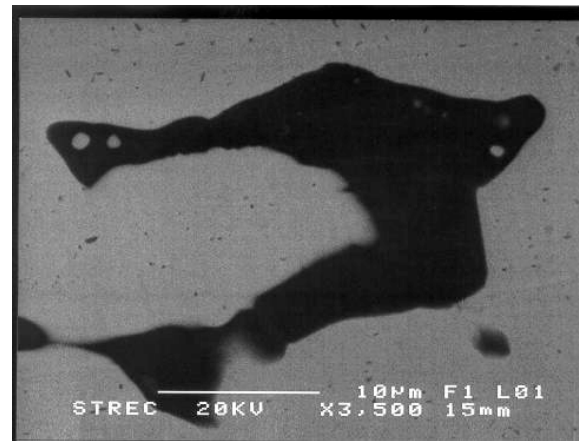


(ข)

ชุดส่วนผสม 6.9%Cu – balance of Ag

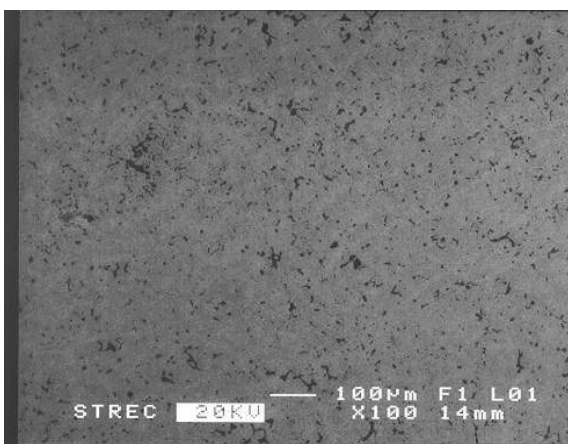


(ค)

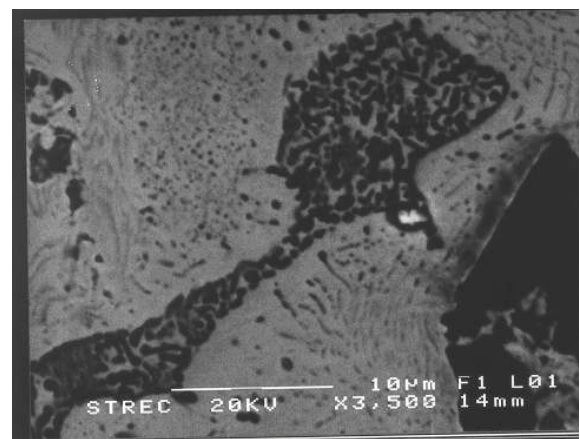


(ง)

ชุดส่วนผสม 6.26%Cu-0.11%Si– balance of Ag



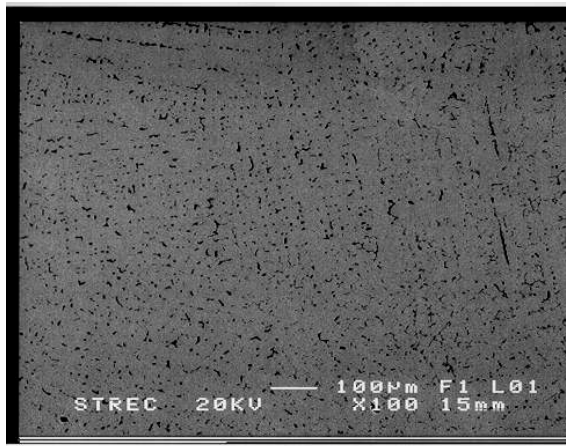
(จ)



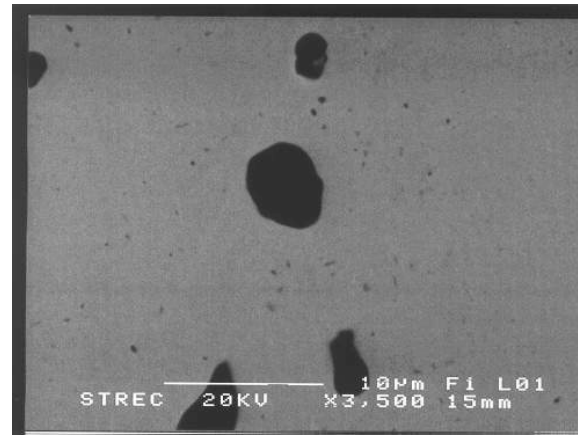
(ฉ)

ชุดส่วนผสม 5.57%Cu-0.09%Si-0.53%In– balance of Ag

รูปที่ 3.17 ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงของแต่ละชุดส่วนผสมที่กำลังขยายต่างๆ

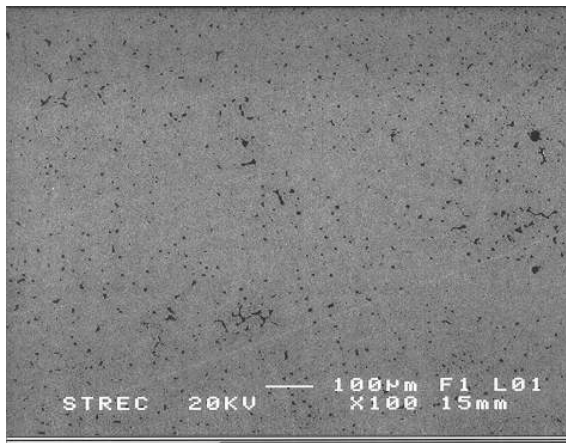


(จ)

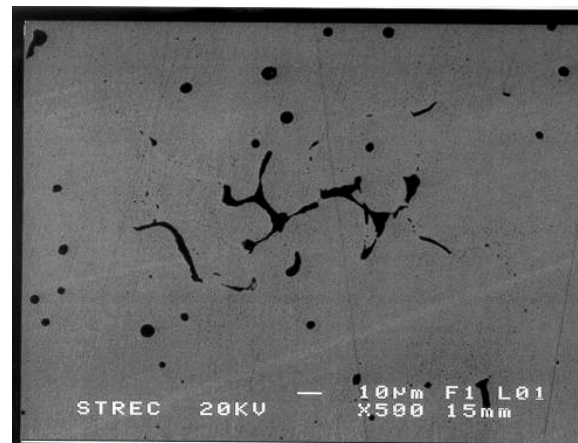


(ข)

ชุดส่วนผสม 5.16%Cu-0.09%Si-1.09%In – balance of Ag

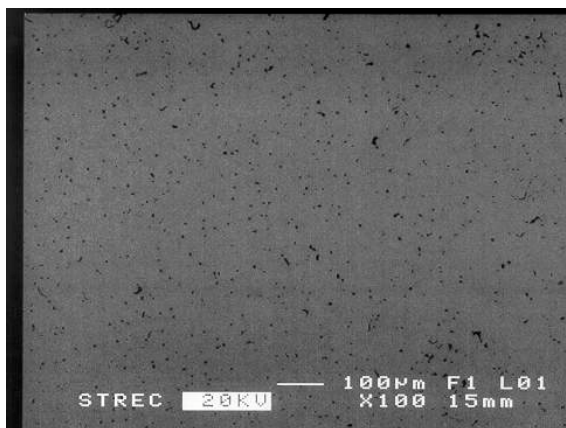


(ค)

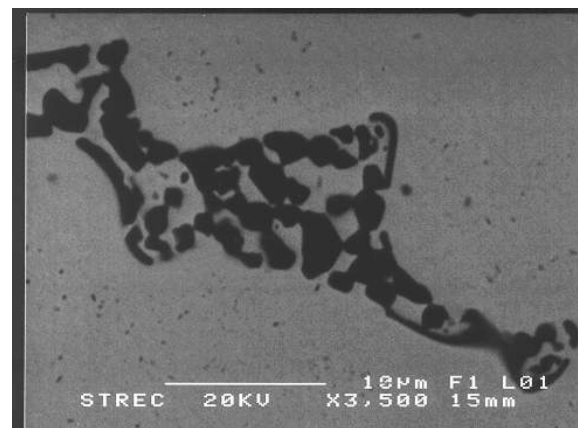


(ง)

ชุดส่วนผสม 4.23%Cu-0.10%Si-1.60%In – balance of Ag



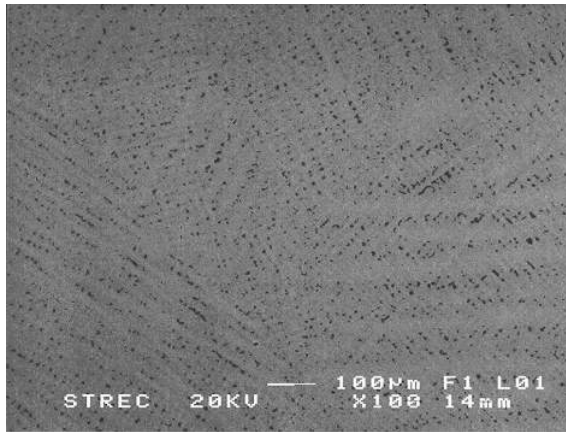
(ฉ)



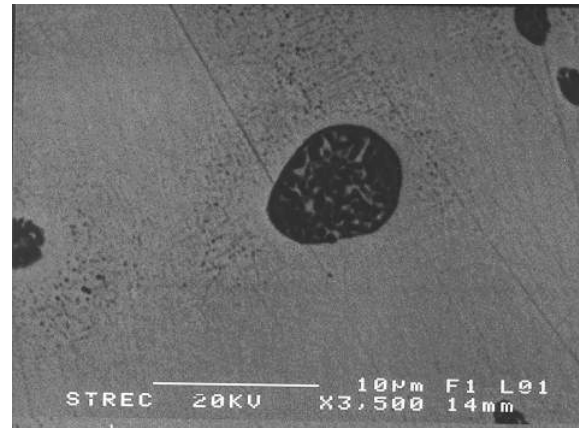
(ฐ)

ชุดส่วนผสม 3.76%Cu-0.11%Si-3.13%In – balance of Ag

รูปที่ 3.17 ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงของแต่ละชุดส่วนผสมที่กำลังขยายต่างๆ (ต่อ)

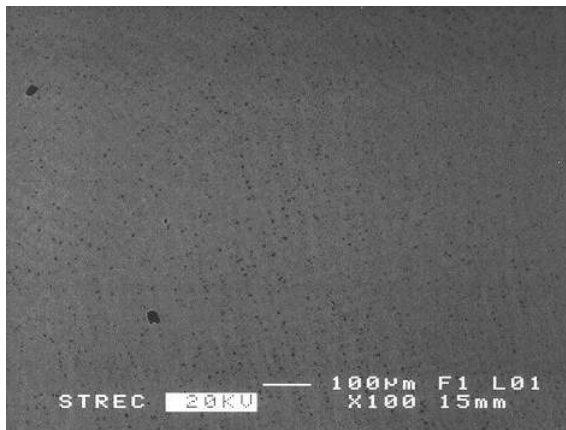


(จ)

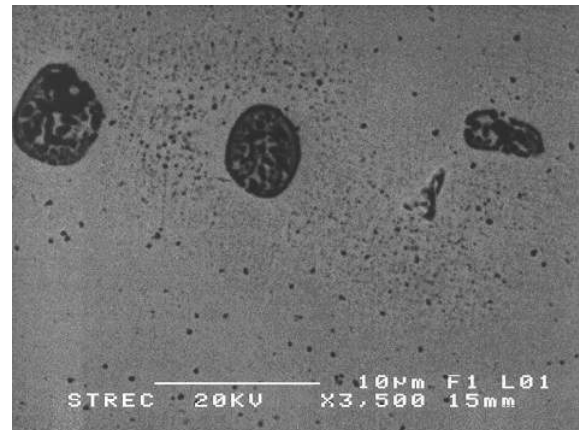


(ฉ)

ชุดส่วนผสม 5.88%Cu-1.03%In – balance of Ag

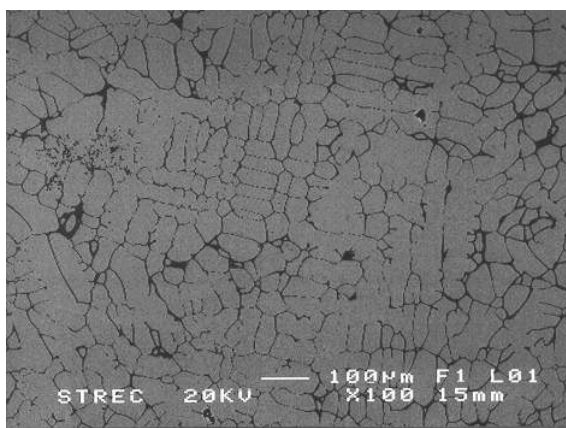


(ค)

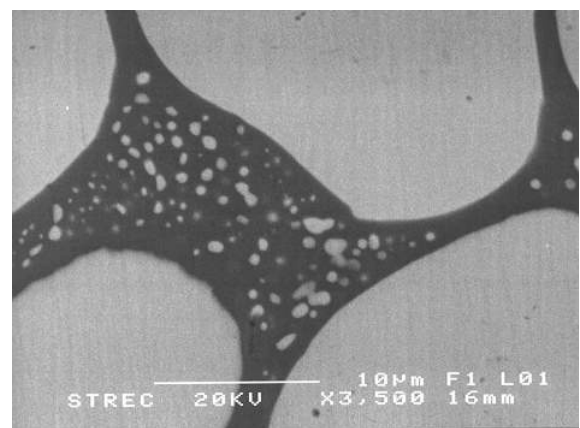


(ณ)

ชุดส่วนผสม 5.17%Cu-3.09%In – balance of Ag



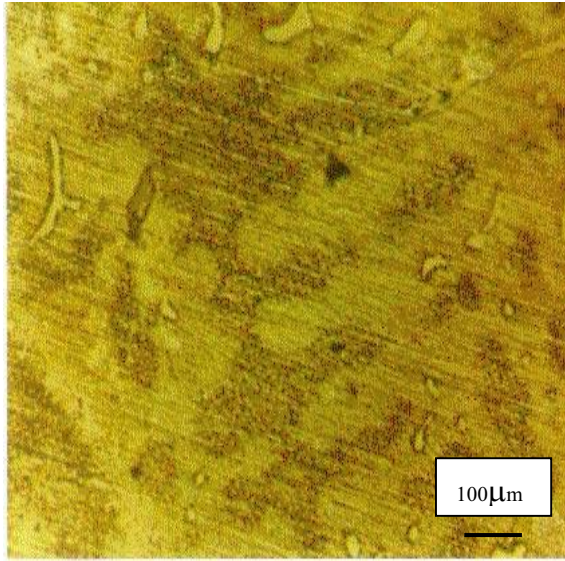
(ด)



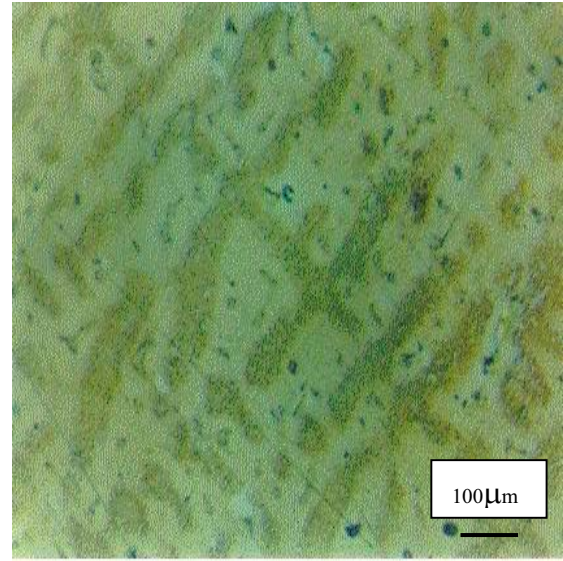
(ต)

ชุดส่วนผสม 5.13%Cu-0.44%Si-3.12%In – balance of Ag

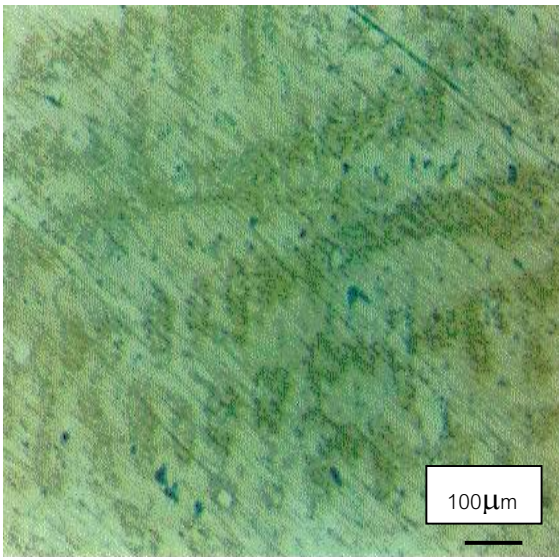
รูปที่ 3.17 ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงของแต่ละชุดส่วนผสมที่กำลังขยายต่างๆ (ต่อ)



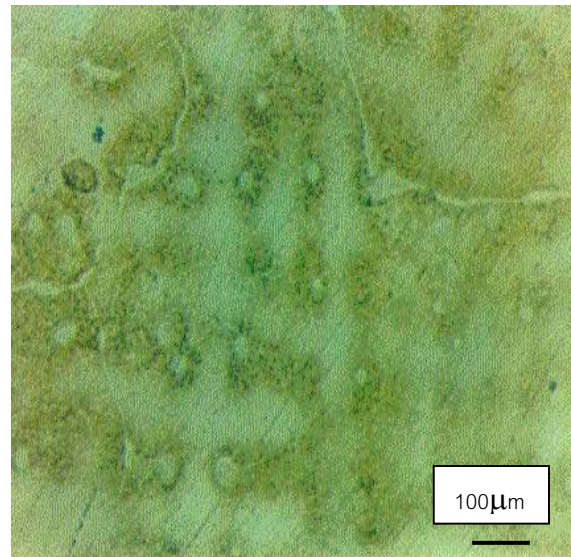
Sterling



Sterling + 0.11%Si

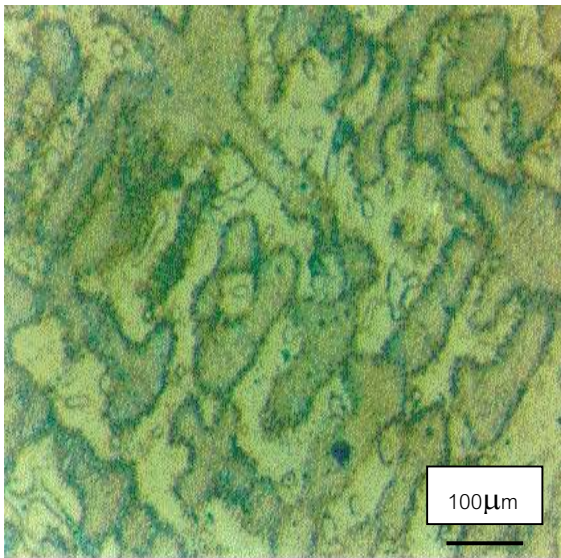


Sterling + 0.09%Si + 0.53%In

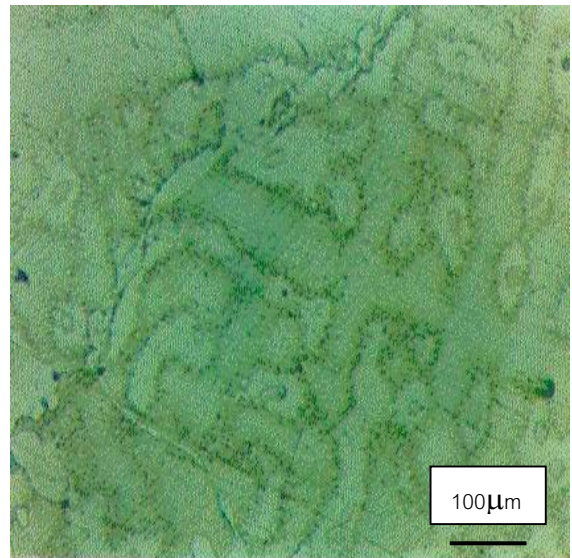


Sterling + 0.09%Si + 1.09%In

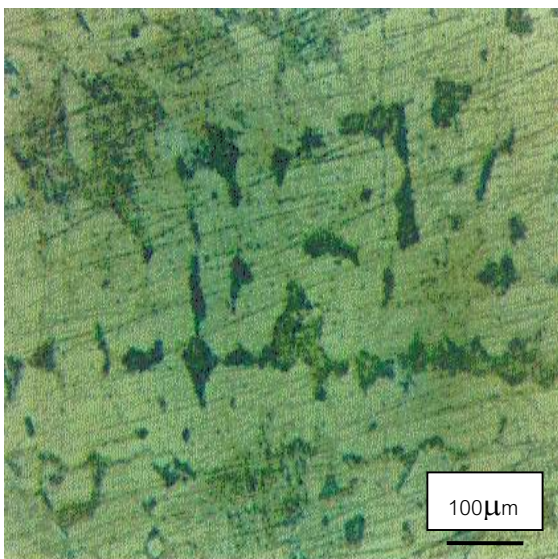
รูป 3.18 โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากนำไปกัดกรด ที่กำลังขยาย 200 เท่า



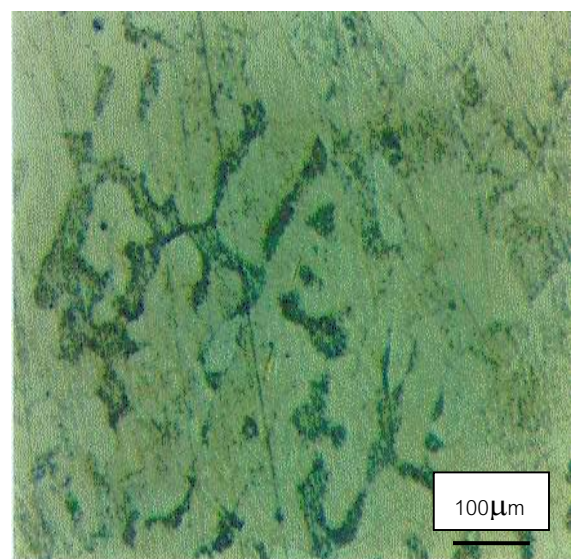
Sterling + 0.10%Si + 1.60%In



Sterling + 0.11%Si + 3.13%In



Sterling + 1.03%In



Sterling + 3.09%In

**รูป 3.19** โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากนำไปกัดกรด ที่กำลังขยาย 200 เท่า

### 3.12 ผลวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเงินสเตอร์ลิงผสมภายหลังจากการหลอม และช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว

ในการหลอมได้ผลของส่วนผสมดังตารางที่ 3.8 และวัดช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวโดยใช้เครื่อง DTA ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางเดียวกัน

ตารางที่ 3.8 แสดงผลของส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงและช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว

| หมายเลขชุด | เงิน<br>(wt.%) | ทองแดง<br>(wt.%) | ซิลิกอน<br>(wt.%) | อินเดียม<br>(wt.%) | จุดหลอมเหลว<br>(°C) | จุดที่เริ่มมีการ<br>ไหลตัว (°C) |
|------------|----------------|------------------|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------------------|
| 1          | 93.39          | 6.90             | -                 | -                  | 853.8               | 917.0                           |
| 2          | 93.57          | 6.26             | 0.11              | -                  | 858.7               | 908.5                           |
| 3          | 93.32          | 5.57             | 0.09              | 0.53               | 856.2               | 907.4                           |
| 4          | 93.55          | 5.16             | 0.09              | 1.09               | 865.9               | 909.7                           |
| 5          | 93.62          | 4.23             | 0.10              | 1.60               | 856.5               | 911.3                           |
| 6          | 93.11          | 3.76             | 0.11              | 3.13               | 876.7               | 915.2                           |
| 7          | 93.56          | 5.88             | -                 | 1.03               | 859.4               | 903.8                           |
| 8          | 93.58          | 5.17             | -                 | 3.09               | 850.2               | 903.0                           |

จากตารางข้างต้น จะเห็นว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงผสมในแต่ละชุดส่วนผสม จะมีอุณหภูมิ ณ จุดหลอมเหลวในช่วงระหว่าง 850 – 876°C และมีอุณหภูมิ ณ จุดหลอมเหลวสมบูรณ์ในช่วงระหว่าง 902 – 917°C ซึ่งผลจากการวัดค่าจุดหลอมเหลวดังกล่าวจะได้กล่าวในหัวข้อการอภิปรายผลการทดลองต่อไป

ตารางที่ 3.9 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นตัวอย่างก่อนและหลังการหล่อ

| หมายเลขชุด | % โดยน้ำหนักส่วนผสมก่อนการหล่อ |      |      |      | % โดยน้ำหนักส่วนผสมหลังการหล่อ |      |      |      |
|------------|--------------------------------|------|------|------|--------------------------------|------|------|------|
|            | Ag                             | Cu   | Si   | In   | Ag                             | Cu   | Si   | In   |
| 1          | 93.50                          | 7.50 | -    | -    | balance                        | 6.90 | -    | -    |
| 2          | 93.50                          | 7.00 | 0.50 | -    | balance                        | 6.26 | 0.11 | -    |
| 3          | 93.50                          | 6.50 | 0.50 | 0.50 | balance                        | 5.57 | 0.09 | 0.53 |
| 4          | 93.50                          | 6.00 | 0.50 | 1.00 | balance                        | 5.16 | 0.09 | 1.09 |
| 5          | 93.50                          | 5.50 | 0.50 | 1.50 | balance                        | 4.23 | 0.10 | 1.60 |
| 6          | 93.50                          | 5.00 | 0.50 | 3.00 | balance                        | 3.76 | 0.11 | 3.13 |
| 7          | 93.50                          | 6.50 | -    | 1.00 | balance                        | 5.88 | -    | 1.03 |
| 8          | 93.50                          | 5.50 | -    | 3.00 | balance                        | 5.17 | -    | 3.09 |

จากตารางที่ 3.9 สังเกตได้ว่า เงินสเตอร์ลิงบางชุดตัวอย่างจะมี % สัดส่วนโดยน้ำหนักของธาตุต่าง ๆ ในส่วนผสมเช่น Ag, Cu, In ภายหลังการหลอมมากขึ้นกว่าก่อนที่จะทำการหล่อ ทั้งนี้เนื่องจาก

สัดส่วนของซิลิกอนภายหลังการหลอมมีค่าลดลงมากถึง 0.39–0.41% wt. โดยเหลือเพียง 0.09–0.11% wt. จากเดิมที่เดิมในชุดตัวอย่างที่ได้ผสมซิลิกอน 0.5% wt.

### 3.13 ผลของสมบัติทางกล

#### 3.13.1 ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness)

ทดสอบความแข็งโดยเครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ ใช้น้ำกด 1 กิโลกรัม เวลากด 10 วินาที ได้ผลดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 ค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิงผสมซิลิกอนและอินเดียมปริมาณต่าง ๆ กัน

| หมายเลขชุด | %โดยน้ำหนักของส่วนผสมหลังการหล่อ |      |      |      | ค่าความแข็ง (HV) |
|------------|----------------------------------|------|------|------|------------------|
|            | Ag                               | Cu   | Si   | In   |                  |
| 1          | Balance                          | 6.90 | -    | -    | 58.1             |
| 2          | Balance                          | 6.26 | 0.11 | -    | 80.4             |
| 3          | Balance                          | 5.57 | 0.09 | 0.53 | 76.8             |
| 4          | Balance                          | 5.16 | 0.09 | 1.09 | 73.7             |
| 5          | Balance                          | 4.23 | 0.10 | 1.60 | 66.0             |
| 6          | Balance                          | 3.76 | 0.11 | 3.13 | 63.3             |
| 7          | Balance                          | 5.88 | -    | 1.03 | 55.7             |
| 8          | Balance                          | 5.17 | -    | 3.09 | 53.1             |

#### 3.13.2 ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง Instron ระบบอัตโนมัติ ขนาด 150 kN รุ่น series IX โดยกำหนด ความเร็วในการดึง 0.5 mm./min ได้ผลดังตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 ผลการทดสอบค่าแรงดึงและ%การยืดตัวของ เงินสเตอร์ลิงแต่ละชุดส่วนผสม

| หมายเลขชุด | สัดส่วนธาตุที่พิจารณา |           | Ultimate Stress (MPa) | 0.2% Offset Yield St (MPa) | % Elongation |
|------------|-----------------------|-----------|-----------------------|----------------------------|--------------|
|            | Si (%wt.)             | In (%wt.) |                       |                            |              |
| 1          | -                     | -         | 137.836               | 93.375                     | 6.0          |
| 2          | 0.11                  | -         | 240.693               | 67.180                     | 3.5          |
| 3          | 0.09                  | 0.53      | 210.610               | 107.642                    | 9.0          |
| 4          | 0.09                  | 1.09      | 195.413               | 90.559                     | 5.0          |
| 5          | 0.10                  | 1.60      | 177.148               | 88.853                     | 5.0          |
| 6          | 0.11                  | 3.13      | 146.813               | 74.615                     | 3.0          |
| 7          | -                     | 1.03      | 134.156               | 126.076                    | 10.0         |
| 8          | -                     | 3.09      | 118.700               | 84.808                     | 5.0          |

### 3.14 ผลการทดสอบการต้านทานการหมอง

ทำการตัดชิ้นงานขึ้นตัวอย่างที่ได้จากการหล่อเงินสเตอร์ลิงในแต่ละส่วนผสม ๆ ละ 4 ชิ้น ขนาดชิ้นละ 1 มม. ขัดจนถึงเบอร์ 1200 แล้วนำมาเจาะรู แขนงไว้ในภาชนะปิดที่ใส่สารละลายอิม

ตัวของ  $\text{Na}_2\text{S}$  เพื่อให้ชั้นทดสอบอยู่ในบรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยทดสอบในช่วงเวลาแตกต่างกันคือ 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง แล้วนำมาวัดค่าสีโดยใช้เครื่อง Spectrophotometer ได้ค่าดังตารางที่ 3.12 ดังนี้

ตารางที่ 3.12 ค่า DE ของเงินสเตอร์ลิงในแต่ละส่วนผสม ที่เวลาทดสอบต่างกัน

| หมายเลขชุด | สัดส่วนธาตุที่พิจารณา |           | ค่า DE |       |       |       |
|------------|-----------------------|-----------|--------|-------|-------|-------|
|            | Si (wt.%)             | In (wt.%) | 1ชม.   | 2ชม.  | 3ชม.  | 4ชม.  |
| 1          | -                     | -         | 14.12  | 24.73 | 30.05 | 30.77 |
| 2          | 0.11                  | -         | 13.79  | 24.10 | 28.70 | 30.24 |
| 3          | 0.09                  | 0.53      | 13.35  | 23.22 | 25.05 | 29.98 |
| 4          | 0.09                  | 1.09      | 13.69  | 23.04 | 25.01 | 28.23 |
| 5          | 0.10                  | 1.60      | 11.48  | 13.24 | 13.73 | 26.45 |
| 6          | 0.11                  | 3.13      | 8.46   | 8.66  | 13.49 | 20.61 |
| 7          | -                     | 1.03      | 18.71  | 31.89 | 33.73 | 34.40 |
| 8          | -                     | 3.09      | 23.51  | 33.64 | 36.14 | 38.11 |

หมายเหตุ : ค่า DE คือค่าที่แสดงความแตกต่างระหว่างวัตถุ 2 ชิ้นที่มีการเปรียบเทียบค่าสีกัน โดยคำนวณได้จากสูตร

$$DE^2 = (L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2$$

โดยที่

- 1.) ตัวเลข 1 หมายถึง ชิ้นงานก่อนที่ทำการทดสอบการหมอง
- 3.) ตัวเลข 2 หมายถึง ชิ้นงานหลังจากทำการทดสอบการหมอง
- 3.) ค่า L หมายถึงค่าLightness โดยค่า  $L=0$  คือ มีดมาก,  $L=100$  คือ สว่างมาก
- 4.) ค่า a หมายถึง ค่าสีแดง – เขียว  
โดยที่ ถ้าสีแดง ค่า b จะมีค่าเป็นบวกตั้งแต่ 0 ถึง 100  
ถ้าสีเขียวค่า b จะมีค่าเป็นลบตั้งแต่ - 100 ถึง 0
- 5.) ค่า b หมายถึง ค่าสีเหลือง – น้ำเงิน  
โดยที่ ถ้าสีเหลือง ค่า b จะมีค่าเป็นบวกตั้งแต่ 0 ถึง 100  
ถ้าสีน้ำเงิน ค่า b จะมีค่าเป็นลบตั้งแต่ - 100 ถึง 0

โดยกรณีนี้นำมาประยุกต์ใช้กับการวัดความแตกต่างของสีจากวัตถุเดียวกัน แต่มีสีเปลี่ยนแปลงไป เช่นการหมองของเงินสเตอร์ลิงผสมซึ่งรายละเอียดได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก

### 3.15 อภิปรายผลการทดลอง

#### 3.15.1 ส่วนผสมทางเคมี

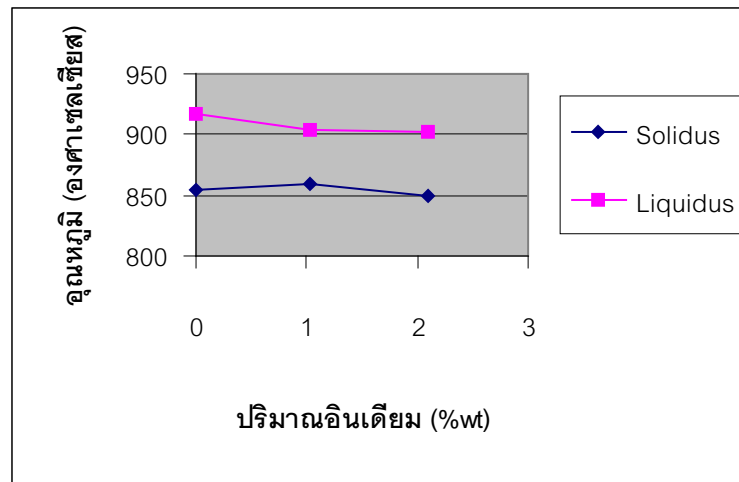
ผลของส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.8 ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างก่อนทำการหลอมและหลังทำการหลอม จะเห็นได้ว่าการสูญเสียของซิลิคอนในปริมาณที่สูง สำหรับชุดส่วนผสมที่ได้มีการ

เดิมซิลิคอน 0.5 % โดยน้ำหนัก เนื่องจากสูญเสียปริมาณของซิลิคอนที่ออกไปในรูปของ slag หรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน กับอากาศที่อยู่โดยรอบขณะทำการหล่อ ทำให้ปริมาณของซิลิคอนเหลืออยู่น้อยกว่าที่ควรจะเป็น โดยปรากฏเหลือซิลิคอนเพียง 0.09 - 0.11% โดยน้ำหนักเท่านั้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการสูญเสียปริมาณซิลิคอนด้วย เช่นเวลาที่ใช้ในการหลอม และอุณหภูมิที่ใช้หลอม เนื่องจากซิลิคอนมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่าเงิน ( $1410^{\circ}\text{C}$ ) ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิในการหลอมสูงกว่าการหลอมเงินปกติ และใช้เวลานานกว่าจึงจะเกิดการหลอมละลายเข้าด้วยกันกับส่วนผสมอื่นในเงินสเตอร์ลิง ทำให้มีแนวโน้มที่ซิลิคอนจะทำปฏิกิริยากับอากาศภายนอก รวมทั้งธาตุอื่นเกิดเป็นตะกั่วหรือ slag มากยิ่งขึ้น และทำให้ สัดส่วนโดยน้ำหนักของธาตุ อื่นๆ ที่เหลือภายหลังการหลอมมีปริมาณที่สูงขึ้นเล็กน้อย เมื่อเทียบกับชุดส่วนผสมเดียวกันก่อนทำการหล่อ เช่นในชุดส่วนผสม 5.57 % Cu – 0.09 % Si – 0.53 % In – balance of Ag ซึ่งมีปริมาณของ In ก่อนทำการหล่อเท่ากับ 0.5 % wt. แต่ภายหลังการหล่อแล้วปรากฏปริมาณของ In เท่ากับ 0.53 % wt.

แต่เนื่องจากเราต้องการศึกษาถึงอิทธิพลของอินเดียมที่มีผลต่อสมบัติด้านต่าง ๆ ของเงินสเตอร์ลิง คือสมบัติทางกล สมบัติด้านการต้านทานการหมอง และผลต่อจุดหลอมเหลวของเงินสเตอร์ลิง ดังนั้นเราจึงต้องทำการเปรียบเทียบโดยที่คงส่วนผสมของธาตุอื่น ๆ ที่เหลือให้คงที่ เช่น เงิน ทองแดงและซิลิคอน

### 3.15.2 ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว

จากตารางที่ 3.7 ทราบได้ว่า ผลของอินเดียมต่อจุดหลอมเหลวของเงินสเตอร์ลิงผสมไม่สามารถสรุปผลการตรวจสอบได้อย่างแน่ชัด โดยหากทำการเปรียบเทียบระหว่างชุดส่วนผสมที่มีปริมาณส่วนผสมของเงินและทองแดงใกล้เคียงกัน แต่มีการผสมปริมาณอินเดียมแตกต่างกันไป จะเห็นได้ว่าจุดหลอมเหลว ( จุด solidus ) ของเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากชุดส่วนผสมทั้ง 3 ชุด มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งไม่สามารถสรุปถึงความแตกต่างได้อย่างชัดเจน เนื่องจากปริมาณของอินเดียมที่เติมลงไปมีปริมาณที่น้อย จึงไม่สามารถสังเกตถึงความเปลี่ยนแปลงของจุดหลอมเหลวของแต่ละชุดส่วนผสมได้ชัดเจน ซึ่งโดยทั่วไปเงินสเตอร์ลิง ( 93.5 % Ag – 7.5 % Cu ) จะมีค่า Liquidus อยู่ระหว่าง  $810 - 890^{\circ}\text{C}$  โดยการประมาณจากแผนภูมิสมดุล 2 เฟส ( Ag – Cu ) ในรูปที่ 3.1 แต่เนื่องจากในการทดลองทำการหล่อไม่สามารถ ควบคุมให้การแข็งตัวของน้ำโลหะเป็นไปอย่างสมดุลได้ ผลจึงทำให้เงินสเตอร์ลิงมีค่า Liquidus ระหว่าง  $853.8 - 917^{\circ}\text{C}$  และมีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวเท่ากับ  $63.2^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสถานะสมดุล และเมื่อพิจารณาที่จุดหลอมเหลวสมบูรณ์ หรือ Liquidus จะพบว่า ชุดส่วนผสม 5.88 % Cu – 1.03 % In – balance of Ag และ ชุดส่วนผสม 5.17 % Cu – 3.09 % In – balance of Ag ที่ผสมอินเดียม 1.03 และ 3.09 % wt. ตามลำดับ จะมีจุดหลอมเหลวสมบูรณ์ต่ำกว่า ชุดส่วนผสม 6.09 % Cu – balance of Ag ซึ่งเป็นเงินสเตอร์ลิงธรรมดา โดยสามารถสังเกตความแตกต่างได้อย่างชัดเจน ดังกราฟรูปที่ 3.20



**รูปที่ 3.20** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอินเดียมกับช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว สำหรับชุดส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่ไม่มีปริมาณซิลิคอนผสมอยู่

จากกราฟรูปที่ 3.20 จะเห็นได้ว่า จุดหลอมเหลวของชุดส่วนผสมที่มีอินเดียมผสมอยู่ 0 - 2.09% wt. จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่ถ้าพิจารณาจุดหลอมเหลวสมบุรณ์กับชุดส่วนผสมชุด ดังกล่าว จะพบความแตกต่างกันอย่างชัดเจน กล่าวคือปริมาณของอินเดียมตั้งแต่ 1.03 % wt. ขึ้นไป จะมีผลทำให้เงินสเตอร์ลิงมีอุณหภูมิ ณ จุดหลอมเหลวสมบุรณ์ ( Liquidus ) ลดลง โดยแปรผกผันกับปริมาณของอินเดียมที่เติมลงไป หมายถึงว่าหากมีการเติมอินเดียมลงในเงินสเตอร์ลิงมากขึ้น จะส่งผลให้อุณหภูมิ ณ จุดหลอมเหลวสมบุรณ์ลดลงยิ่งขึ้น สิ่งนี้ทำให้ทราบถึงสมบัติของอินเดียมที่มีต่อเงินสเตอร์ลิงประการหนึ่งคือ อินเดียมจะมีผลต่อการไหลตัวของโลหะหลอมเหลวขณะทำการหล่อ โดยถ้ามีการเติมอินเดียมในปริมาณ 1.03% wt. ขึ้นไปจะส่งผลให้จุดที่เริ่มมีการไหลตัว (Liquidus) ของเงินสเตอร์ลิงผสมมีค่าลดลง ทำให้สามารถลดอุณหภูมิในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ ซึ่งจะเป็นการประหยัดต้นทุนในการผลิตได้เป็นอย่างดี

แต่สำหรับชุดส่วนผสมที่มีซิลิคอนเป็นส่วนผสมจะพบว่า ชุดส่วนผสมดังกล่าวที่มีปริมาณของซิลิคอนใกล้เคียงกัน ( 0.09 - 0.11% wt. ) เมื่อมีการเติมอินเดียมลงไปปริมาณแตกต่างกันในแต่ละชุดส่วนผสม ผลที่ได้จะมีจุดหลอมเหลวไม่ต่างกันมากนัก แต่จะมีจุดหลอมเหลวสมบุรณ์ซึ่งมี แนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับชุดส่วนผสมที่มีการเติมซิลิคอนแต่ไม่เติมอินเดียม โดยสังเกตพบเมื่อตั้งแต่มีการผสมอินเดียมตั้งแต่ 0.53% wt ขึ้นไป แต่ค่าของอุณหภูมิ ณ จุดหลอมเหลวสมบุรณ์จะมีค่าไม่แตกต่างกันนัก ( 2 - 3°C ) สำหรับชุดส่วนผสมที่มีอินเดียมผสมอยู่ 0.53 - 1.60% wt. กล่าวคือสำหรับเงินสเตอร์ลิงที่มีซิลิคอนผสมอยู่ระหว่าง 0.09 - 0.11% wt เมื่อมีการเติมอินเดียมลงไปด้วยอัตราส่วนผสมระหว่าง 0.53 - 1.60% wt. จะมีผลต่อจุดหลอมเหลวและจุดหลอมเหลวสมบุรณ์ของเงินสเตอร์ลิงน้อยมาก เมื่อเทียบกับชุดส่วนผสมที่ไม่มีการเติมอินเดียมแต่เติมซิลิคอนในปริมาณใกล้เคียงกัน (0.09-

0.11% wt.) คือมีค่าอุณหภูมิหลอมเหลวระหว่าง  $907 - 911^{\circ}\text{C}$  แต่เมื่อเทียบกับเงินสเตอร์ลิงธรรมดา (ชุดส่วนผสม 6.09 % Cu – balance of Ag) พบว่า ชุดส่วนผสมที่มีอินเดียมผสมอยู่ 0.53 – 1.60 % wt. จะมีจุดหลอมเหลวสมบูรณ์ต่ำกว่า และสำหรับชุดส่วนผสม 3.76 %Cu – 0.11 %Si – 2.13 %In – balance of Ag ที่มีอินเดียมผสมอยู่ 2.13 % จะมีจุดหลอมเหลวสูงขึ้นเมื่อเทียบกับชุดอื่น ๆ โดยเฉพาะชุดส่วนผสมที่เป็นเงินสเตอร์ลิงธรรมดาพบว่า ชุดส่วนผสม 3.76 %Cu – 0.11 %Si – 2.13 %In – balance of Ag มีค่าจุดหลอมเหลวสูงขึ้นมาก ซึ่งข้อมูลนี้ยังไม่สามารถยืนยันผลการตรวจสอบได้ เนื่องจากมีค่าไม่สอดคล้องกับการทดลองของ Wood และ Lipowitz<sup>(4)</sup> ซึ่งพบว่าการเติมธาตุอินเดียมในโลหะผสมส่วนใหญ่ จะช่วยให้ลดจุดหลอมเหลวของโลหะผสมนั้นได้ แต่ถึงแม้ Wood จะไม่ได้กล่าวถึงเงินสเตอร์ลิงก็ตามแต่จากการตรวจสอบชุดส่วนผสมอื่น ๆ ก็จะมีแนวโน้มเป็นไปตามที่ Wood กล่าวไว้ทั้งสิ้น ยกเว้นแต่ชุดส่วนผสม 3.76 %Cu – 0.11 %Si – 2.13 %In – balance of Ag เท่านั้น ซึ่งจุดสังเกตอีกอย่างหนึ่งสำหรับชุดส่วนผสมนี้ก็คือว่า ปริมาณส่วนผสมของซิลิคอนจะเท่ากับ 0.11% wt. ซึ่งแม้จะมีค่าใกล้เคียงกับชุดส่วนผสมอื่น ๆ ที่ผสมของซิลิคอน แต่ก็มีค่าสูงที่สุด ซึ่งสิ่งนี้อาจมีผลทำให้ค่าจุดหลอมเหลวไม่เป็นไปตามที่คาดไว้ได้เช่นกัน

### 3.15.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

จากรูปที่ 3.17 ซึ่งได้จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโดยยังไม่ได้ทำการกัดกรวดพบว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากการผสมซิลิคอนและอินเดียมในปริมาณต่าง ๆ กัน โดยผ่านกระบวนการหล่อขึ้นรูปในสภาวะบรรยากาศมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ ซึ่งหากพิจารณาการกระจายตัวของเฟสต่างๆ ที่สังเกตได้จากภาพกำลังขยายเท่ากัน ( $\times 100$ ) พบว่าในเงินสเตอร์ลิงธรรมดาที่ไม่มีการผสมซิลิคอนและอินเดียม (ชุดส่วนผสม 6.9 % Cu – balance of Ag, รูป ก.) จะปรากฏโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนผสมหลัก 2 เฟส คือ โครงสร้างพื้น (Matrix) ที่เป็น Ag rich – Solid Solution ( $\alpha$ -phase) โดยจาก EDX (ในภาคผนวก ข) พบว่าสัดส่วนโดยน้ำหนักของ Ag : Cu เป็น 94.08 % : 5.92 % ซึ่งจะเป็นบริเวณภายใน Dendrite ที่เป็นแถบสีขาวในรูป (ก) ส่วนเฟสที่ปรากฏเป็นแถบสีเทาบริเวณช่องว่างระหว่าง Dendrite คือ โครงสร้างยูเทคติก ซึ่งประกอบด้วย Ag rich – Solid Solution ( $\alpha$ - phase) กับ Cu rich – Solid Solution ( $\beta$ - phase) นอกจากนี้ จากภาพกำลังขยายที่มากขึ้น ( $\times 3500$ ) จากรูปที่ (ข) จะพบ Secondary Structure ที่มีลักษณะเป็นก้อนสีดำกระจายอยู่บ้างเล็กน้อย ซึ่งปรากฏอยู่บริเวณขอบนอกของ Dendrite arms ซึ่งพบปริมาณของธาตุต่างๆ ใน Particle ดังกล่าวจาก EDX ดังนี้คือ Ag : Cu = 71.86 : 28.14 % wt. โดยสังเกตว่าจะมีปริมาณของทองแดงผสมอยู่สูงกว่าบริเวณอื่น และจากกำลังขยายที่สูงขึ้นนี้จะสังเกตเห็นลักษณะของ Irregular Eutectics ที่มีลักษณะเป็นแถบสีขาวสลับดำที่มีลักษณะการวางตัวกระจายโดยมีทิศทางขึ้นกับ

Solid Phase ที่มีการแข็งตัวบริเวณดังกล่าว นอกจากนี้ยังพบ Interdendritic Shrinkage กระจายอยู่เล็กน้อยโดยเฉพาะด้านล่างของ รูป (ก)

สำหรับเงินสเตอร์ลิงจากชิ้นงานหล่อที่ได้มีการผสมซิลิคอน หรืออินเดียม หรือทั้งสองธาตุ จะพบลักษณะโครงสร้างเป็นเดนไดรต์เช่นเดียวกับกรณีของเงินสเตอร์ลิงธรรมดา แต่จะสังเกตพบปริมาณของ Secondary Structure ที่มีการกระจายตัวหนาแน่นกว่าอย่างชัดเจน โดยมีขนาดและรูปร่างต่างๆ ในแต่ละชิ้นตัวอย่างที่มีปริมาณของธาตุผสมที่แตกต่างกันโดยสามารถพิจารณาได้ดังนี้

3.15.3.1 กลุ่มของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากการหล่อชนิดที่ผสมซิลิคอน 0.11 % wt. ได้แก่ชุดส่วนผสม 6.26 % Cu – 0.11 % Si – balance of Ag พบว่าโครงสร้างพื้น (Matrix) เป็น Ag rich – Solid Solution ซึ่งปรากฏอยู่บริเวณภายใน Dendrite ที่เป็นแถบสีขาว ดังรูป (ค) ซึ่งจากEDX พบปริมาณสัดส่วนของธาตุๆ ดังนี้ คือ Ag : Cu : Si = 95.79 : 4.16 : 0.05 % wt. และสังเกตได้ว่าปริมาณของ Secondary Structure จะพบมากกว่าในเงินสเตอร์ลิงธรรมดา โดยมีรูปร่างแตกต่างกัน (Irregular Shape) ซึ่งจากการทำEDX ที่ภายในบริเวณที่เป็นสีดำที่มีรูปร่างโค้งยาวดังรูป (ง) จะพบปริมาณสัดส่วนของธาตุต่างๆเป็น Cu : Ag : Si = 93.49 : 3.93 : 4.58 % wt. โดยสังเกตว่าจะมีปริมาณของทองแดงผสมอยู่สูงเป็นหลักคือ 93.49 % ซึ่งน่าจะเป็นเฟส  $\beta$  ที่มีขนาดใหญ่ และมีปริมาณของซิลิคอนสูงกว่าบริเวณที่เป็นโครงสร้างพื้นมาก แสดงว่าซิลิคอนที่มีปริมาณสูงนี้สามารถรวมตัวกับทองแดงโดยอยู่ภายใน Secondary Structure ได้มากกว่าในสารละลายของเงิน ( $\alpha$  - phase)

3.15.3.2 กลุ่มของชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากการหล่อชนิดที่ผสมซิลิคอนในปริมาณใกล้เคียงกัน (0.09 – 0.11 % wt.) และผสมธาตุอินเดียมในปริมาณต่าง ๆ กัน (0.53 – 3.13%wt.)

3.15.3.2.1 ชิ้นงานสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิคอน 0.09%wt. และอินเดียม 0.53 %wt. ได้แก่ชุดส่วนผสม 5.57 % Cu – 0.09 % Si – 0.53 % In – balance of Ag จากรูป (จ) พบว่ามีการกระจายตัวของ Secondary Structure อยู่ทั่วไป คล้าย ๆ กับของชุดส่วนผสม 6.26 % Cu – 0.11 % Si – balance of Ag ที่มีการเติมเฉพาะซิลิคอน โดยมีรูปร่างของ Secondary Structure เป็น Irregular Shape และจากEDX พบปริมาณของธาตุผสมต่าง ๆ ใน Matrix (แถบขาว) เป็น Ag : Cu : Si = 96.82 : 3.52 : 0.11%wt. ส่วน In ปรากฏอยู่น้อยมากจนไม่น่ามาคิดและจากลักษณะ Secondary Structure ดังที่รูป (ฉ) จะเห็นโครงสร้าง ยูเทคติกอยู่ภายใน ซึ่งเมื่อตรวจสอบปริมาณธาตุผสมภายในโครงสร้างที่พบดังกล่าวจากEDX พบว่ามีสัดส่วนของธาตุผสม Ag : Cu : Si = 73.09 : 27.35 : 0.06 %wt. โดย In มีปริมาณน้อยมากซึ่งพบว่ามีปริมาณของทองแดงสูงกว่า และมีปริมาณของซิลิคอนน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ Matrix

3.15.3.2.2 ชิ้นงานสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิคอน 0.09 % wt. และอินเดียม 1.09 % wt. ได้แก่ชุดส่วนผสม 5.16 % Cu – 0.09 % Si – 1.09 % In – balance of Ag จากรูป (ช) พบว่ามีการกระจายตัวของ Secondary Structure อยู่ทั่วเนื้อพื้น (Matrix) และจาก EDX พบปริมาณของธาตุผสม

ต่าง ๆ ใน Matrix ( แถบขาว ) เป็น Ag : Cu : Si = 96.24 : 3.65 : 0.12 %wt ส่วน In ปรากฏอยู่น้อยมาก และจาก Secondary Structure ที่ปรากฏดังรูป (ข) บริเวณที่เป็นก้อนกลมสีดำนั้นจาก EDX พบว่ามีสัดส่วนของธาตุผสม Cu : Ag : Si : In = 51.79 : 44.55 : 3.53 : 0.13 % wt. ซึ่งพบว่าจะมีปริมาณของทองแดง, ซิลิคอน และอินเดียม มากกว่าที่ปรากฏอยู่ใน Matrix

3.15.3.2.3 ชิ้นงานสเตอริลิงที่ผสมซิลิคอน 0.10%wt. และอินเดียม 1.60% wt. ได้แก่ชุดส่วนผสม 4.23% Cu – 0.10% Si – 1.6 % In – balance of Ag จากรูป (ฅ) พบว่า Secondary Structure กระจายตัวอยู่อย่างหนาแน่นทั่วเนื้อพื้น จาก EDX พบปริมาณของธาตุผสมใน Matrix ( แถบขาว ) เป็น Ag : Cu : Si : In = 94.72 : 3.50 : 0.06 : 1.71 % wt. และจาก Secondary Structure ที่ปรากฏอยู่ดังรูป (ญ) จาก EDX ตรวจสอบปริมาณธาตุผสมบริเวณก้อนสีดำรูปวงยาวรีจะได้ Ag : Cu : Si : In = 55.48 : 40.96 : 1.79 : 1.77 %wt.

3.15.3.2.4 ชิ้นงานสเตอริลิงที่ผสมซิลิคอน 0.11 % wt. และอินเดียม 3.13 % wt. ได้แก่ชุดส่วนผสม 3.76 % Cu – 0.11 % Si – 3.13 % In – balance of Ag จากรูป (ฎ) พบว่า Secondary Structure มีการกระจายตัวอยู่ในปริมาณคล้ายๆกับกรณีชิ้นงานที่ผสมอินเดียม 1.60 %wt. จาก EDX พบปริมาณของธาตุผสมใน Matrix ( แถบขาว ) เป็น Ag : Cu : Si : In = 93.55 : 4.85 : 0.15 : 1.45 % wt. และจากภาพกำลังขยายสูง ๆ ( x 3500 ) ดังรูป (ฎ) พบว่าใน Secondary Structure จะปรากฏโครงสร้างของยูเทคตอยด์ภายใน โดยจาก EDXพบว่า บริเวณแถบขาว ๆ ในยูเทคตอยด์มีปริมาณสัดส่วนของธาตุผสม Ag : Cu : Si : In = 93.22 : 4.33 : 0.08 : 3.37% wt. และบริเวณที่เป็นแถบดำ ๆ ในยูเทคตอยด์มีปริมาณสัดส่วนของธาตุผสม Ag : Cu : Si : In = 58.60 : 38.14 : 1.19 : 3.17% wt.

3.15.3.3 กลุ่มของชิ้นงานเงินสเตอริลิงที่ได้จากการหล่อชนิดที่ผสมเฉพาะอินเดียม

3.15.3.3.1 ชิ้นงานสเตอริลิงที่ผสมอินเดียม 1.03 %wt. ได้แก่ชุดส่วนผสม 5.88 % Cu – 1.03 % In – balance of Ag จากรูป (ฐ) พบว่า Secondary Structure มีการกระจายตัวอยู่ทั่วไปอย่างหนาแน่น จาก EDX ตรวจสอบปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างพื้น (Matrix ) พบว่ามี สัดส่วนของธาตุผสม Ag : Cu : In = 94.63 : 5.11 : 0.26 %wt. และจากกำลังขยายสูง ๆ ดังรูป (ฑ) พบว่าลักษณะรูปร่างของ Secondary Structure จะมีทั้งแบบยาวรีและค่อนข้างกลมโดยมีโครงสร้างยูเทคตอยด์ภายใน และจาก EDX พบว่าปริมาณสัดส่วนของธาตุผสมบริเวณที่เป็นแถบสีดำ Ag : Cu : In = 60.83 : 38.73 : 0.44 %wt.

3.15.3.3.2 ชิ้นงานสเตอริลิงที่เติมอินเดียม 3.0 % ได้แก่ชุดส่วนผสม 5.17 %Cu – 3.09 %In – balance of Ag จากรูป (ฒ) พบว่าการกระจายตัวของ Secondary Structure ค่อนข้างหนาแน่น โดยมีขนาดเล็กละเอียด จากการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมโดย EDX ที่โครงสร้าง

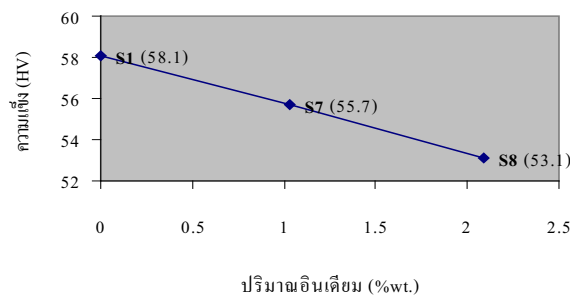
พื้น (Matrix) พบว่ามีสัดส่วนของธาตุผสม Ag : Cu : In = 94.83 : 4.08 : 1.09 %wt. และจากกำลังขยายสูง ๆ ดังรูป (ณ) พบ Secondary Structure ที่มีลักษณะกลมปรากฏโครงสร้างยูเทคติกอยู่ภายใน โดยมีปริมาณสัดส่วนของธาตุต่างๆบริเวณที่เป็นแถบสีดำ Ag : Cu : In = 63.91 : 35.77 : 1.32 % wt. โดยพบว่าปริมาณสัดส่วนของทองแดงและอินเดียมมีอยู่สูงกว่าโครงสร้างพื้น

#### 3.15.4 ผลการตรวจสอบขนาดของเดนไดรต์

จากรูปที่ 3.18 – 3.19 ซึ่งได้จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากการผสมซิลิคอนและอินเดียมในปริมาณต่าง ๆ กันโดยใช้สารละลาย  $\text{H}_2\text{O}_2$  25 % +  $\text{NH}_2\text{OH}$  25 % +  $\text{H}_2\text{O}$  50 % ในการกัดเพื่อให้เห็นโครงสร้างของเดนไดรต์ได้ชัดเจนขึ้น ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์ขนาดของเดนไดรต์ที่ปรากฏ เพื่อนำมาใช้อธิบายถึงสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิงในแต่ละชุดส่วนผสมได้ โดยหากพิจารณาชุดส่วนผสมที่เป็นเงินสเตอร์ลิงธรรมดา ได้แก่ชุดส่วนผสม 6.9 % Cu – balance of Ag เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับชุดส่วนผสมที่มีการผสมซิลิคอนลงไปด้วยได้แก่ชุดส่วนผสม 6.26 % Cu - 0.11 % Si – balance of Ag พบว่ามีขนาดของเดนไดรต์ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 3.18 และหากทำการเปรียบเทียบระหว่างชุดตัวอย่างที่เป็นเงินสเตอร์ลิงธรรมดาคือ ชุดส่วนผสม 6.9 % Cu – balance of Ag กับชุดส่วนผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีการเติมอินเดียมได้แก่ ชุดส่วนผสม 5.88 % Cu – 1.03 % In – balance of Ag และชุดส่วนผสม 5.17 % Cu – 3.09 % In – balance of Ag พบว่าขนาดของเดนไดรต์จะมีขนาดใกล้เคียงกัน และถ้าหากทำการเปรียบเทียบระหว่างชุดส่วนผสมที่มีการเติมทั้งซิลิคอนและอินเดียมกับชุดส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่เติมเฉพาะซิลิคอนโดยคิดเทียบจากปริมาณซิลิคอนที่เหลืออยู่ใกล้เคียงกัน (0.09 – 0.11%) พบว่าขนาดของเดนไดรต์จะมีขนาดใกล้เคียงกันเช่นกัน

#### 3.15.5 ด้านสมบัติทางกล

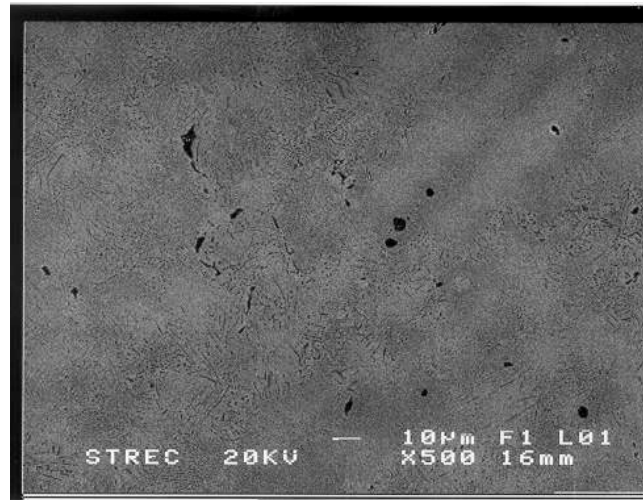
ในการทดลองครั้งนี้ได้ศึกษาสมบัติทางกล คือค่าความแข็ง และความต้านทานแรงดึงโดยจากข้อมูลในตารางที่ 3.10 นำมาวิเคราะห์ค่าความแข็งที่ได้โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนปริมาณของอินเดียมในเงินสเตอร์ลิงกับค่าความแข็งดังรูปที่ 3.21



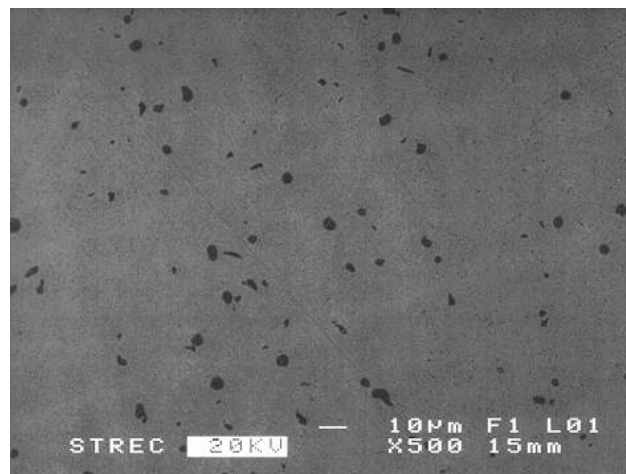
**รูปที่ 3.21** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอินเดียม 0 – 3.09 %wt. กับค่าความแข็ง สำหรับชุดส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่ไม่เติมซิลิคอน

จากรูปที่ 3.21 พบว่า ค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิง (ที่ไม่เติมซิลิคอน) จะแปรผกผันกับปริมาณอินเดียมที่เติมลงไป กล่าวคือเงินสเตอร์ลิงจะมีความแข็งลดลง ตามปริมาณของอินเดียมที่ผสมลงไปในช่วงระหว่าง 0 – 3.09 % โดยน้ำหนัก เนื่องจากได้ลดสัดส่วนของทองแดงในการหล่อลงจากการเติมอินเดียมลงไปแทนที่ พร้อมกันนั้นทองแดงในเนื้อพื้นได้แยกตัวออกมารวมตัวกับอินเดียมใน Secondary Structure มากขึ้นจึงทำให้เงินสเตอร์ลิงมีความแข็งลดลง ซึ่งหากพิจารณาถึงโครงสร้างจุลภาคจะสังเกตได้ว่าสัดส่วนผสมเงินสเตอร์ลิงธรรมดาที่ไม่ผสมซิลิคอน (6.09 %Cu – balance of Ag) เมื่อเทียบกับสัดส่วนผสมที่ไม่ผสมซิลิคอนแต่ผสมอินเดียม พบว่าผลของการเติมอินเดียมที่ไม่เท่ากันจะทำให้เกิด Solid Solution ที่มีปริมาณทองแดงและอินเดียมละลายอยู่ต่างกัน ซึ่งมีผลโดยตรงต่อขนาดรูปร่างและการกระจายตัวของ Secondary Structure ในเนื้อพื้น จากการพิจารณาข้อมูลดังกล่าวกับค่าความแข็งที่วัดได้ สามารถอธิบายได้จากรูปที่ 3.22 โดยสัดส่วนผสมที่เป็นเงินสเตอร์ลิงธรรมดาซึ่งไม่เติมธาตุอินเดียม นั้น จะมีส่วนที่เป็นโครงสร้างยูเทคติกกระจายตัวอยู่ทั่วไปในเนื้อพื้น นอกจากนี้ยังพบ Secondary Structure กระจายตัวอยู่บ้างแต่ไม่หนาแน่น ซึ่งจากการตรวจสอบปริมาณของธาตุผสมโดย EDX จะพบว่า Particle เหล่านี้จะมีปริมาณของทองแดงมากกว่าเนื้อพื้น คือมีสัดส่วนของ Ag : Cu เท่ากับ 71.86 : 5.92 % wt. เท่านั้น ซึ่งเชื่อได้ว่า Secondary Structure เหล่านี้จะมีส่วนสำคัญที่ทำให้โครงสร้างที่ได้มีความแข็งเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนผสมที่มีการเติมอินเดียมลงไปได้แก่สัดส่วนผสม 5.88%Cu - 1.03%In – balance of Ag และสัดส่วนผสม 5.17%Cu - 3.09%In – balance of Ag สามารถพบ Secondary Structure มีลักษณะกระจายตัวทั่วไปในเนื้อพื้นเช่นกัน แต่จากการใช้ EDX ตรวจสอบส่วนผสมของธาตุต่าง ๆ ใน Secondary Structure ดังกล่าวพบว่า จะมีปริมาณของอินเดียมและทองแดงสูงกว่าในเนื้อพื้นซึ่งกลับทำให้เงินสเตอร์ลิงมีความแข็งลดลงเนื่องจากทองแดงถูกแยกตัวออกมาอยู่ใน Secondary Structure มากขึ้นตามปริมาณอินเดียมที่ผสมลงไป โดยสำหรับสัดส่วนผสม 5.88%Cu – 1.03%In – balance of Ag จะมี สัดส่วนธาตุผสมใน Secondary Structure จาก EDX เป็น Ag : Cu : In เท่ากับ 60.83 : 28.73 : 0.44%wt. ส่วนสัดส่วนผสม 5.17%Cu – 3.09%In – balance of Ag จะมีสัดส่วนของธาตุผสมใน Secondary Structure จาก EDX เป็น Ag : Cu : In เท่ากับ 63.91 : 35.77 : 1.32%wt และหากเปรียบเทียบขนาดของเดนไดรต์จะพบว่าไม่ต่างกัน เนื่องจากอินเดียมมีปริมาณไม่มากพอที่จะเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจน สำหรับสัดส่วนผสมที่มีการเติมซิลิคอนลงไปได้แก่สัดส่วนผสม 6.26 % Cu - 0.11% Si – balance of Ag จะพบปริมาณของ Secondary Structure มีการกระจายตัวอย่างหนาแน่นมากขึ้นเมื่อเทียบกับสัดส่วนผสมที่เป็นเงินสเตอร์ลิงธรรมดา และจาก EDX พบว่า Secondary Structure เหล่านี้ จะมีปริมาณของทองแดงละลายอยู่มาก (เป็น Cu – rich phase) โดยมีสัดส่วนของ Cu : Ag : Si เป็น 93.94 : 3.93 : 4.58% wt. ซึ่งจะเห็นได้จากสีของ Secondary Structure เหล่านี้จะเป็นสีออกแดงคล้ำซึ่งเป็นสีของทองแดงที่เป็นส่วนผสมหลัก ทำให้โครงสร้างที่ได้มี

ความแข็งแรงสูงและจากขนาดของเดนไดรต์พบว่าชุดส่วนผสมที่มีการเติมซิลิคอนลงไปจะมีขนาดเดนไดรต์ใกล้เคียงกับชุดส่วนผสมที่เป็นเงินสเตอร์ลิงธรรมดา ซึ่งแสดงว่าความแข็งแรงของเงินสเตอร์ลิงเป็นผลจากปริมาณของทองแดงและซิลิคอนที่ละลายอยู่ใน Solid Solution และ Secondary Structure เท่านั้น

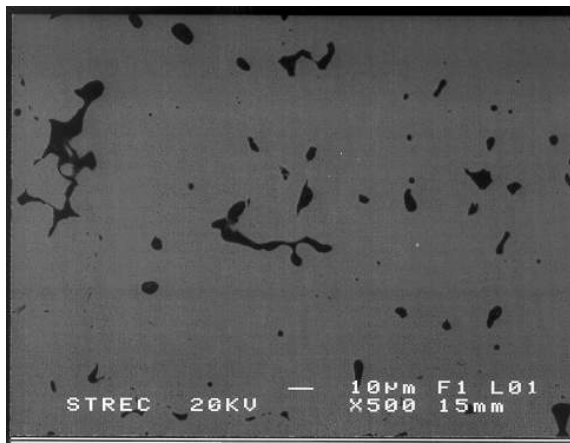


) ไม่ผสมอินเดียม

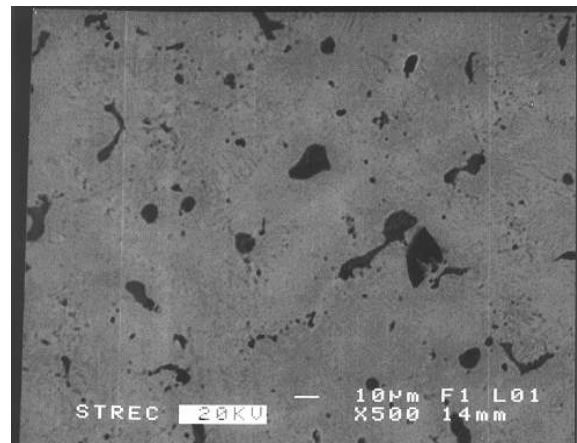


) ผสมอินเดียม 3.09%wt.

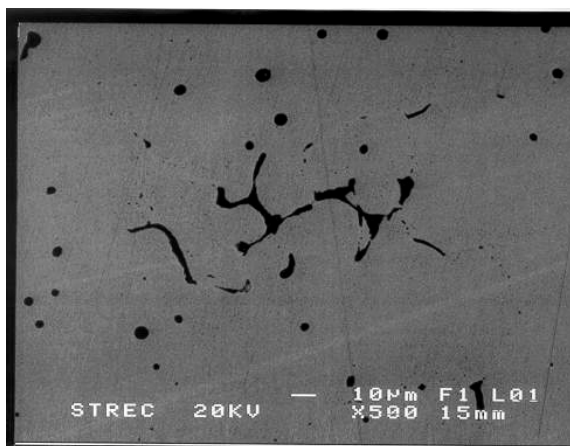
รูปที่ 3.22 ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณอินเดียมแตกต่างกัน



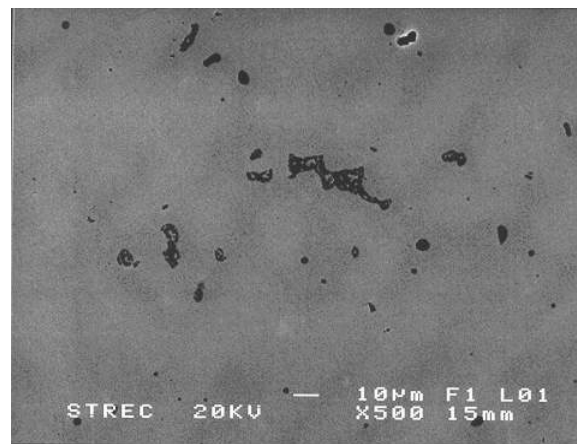
ก) Sterling + Si 0.11%wt.



ข) Sterling + Si 0.09%wt. + In 0.53%wt.



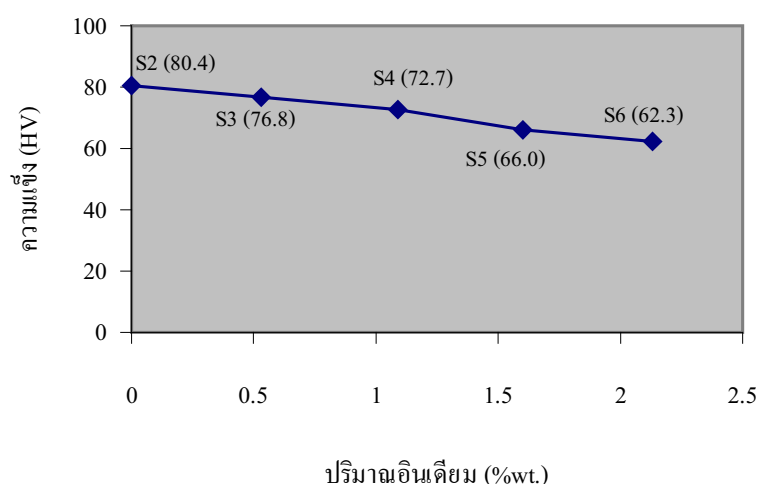
ค) Sterling + Si 0.10%wt. + In 1.60%wt.



ง) Sterling + Si 0.11%wt. + In 3.13%wt.

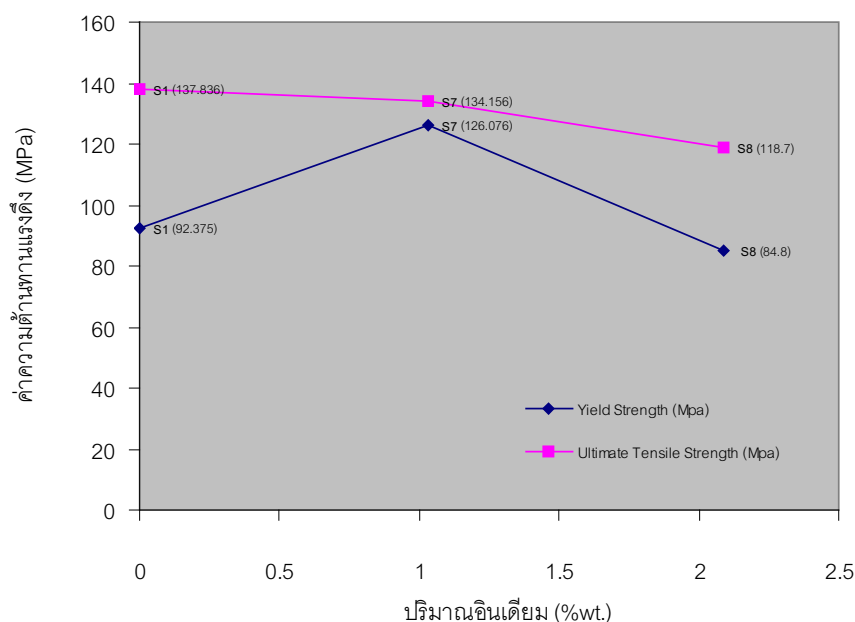
**รูปที่ 3.23** ภาพโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณซิลิคอนใกล้เคียงกัน  
( 0.09 – 0.11 % wt. ) แต่มีปริมาณอินเดียมแตกต่างกัน ( 0 – 3.13 % wt. )

ส่วนชุดส่วนผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีการเติมทั้งอินเดียมและซิลิคอนเมื่อเทียบกับชุดส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่เติมเฉพาะซิลิคอน โดยคิดที่ปริมาณซิลิคอนที่เหลืออยู่ใกล้เคียงกัน (0.09 - 0.11%wt.) ดังรูปที่ 3.23 พบว่าค่าความแข็งลดลงตามปริมาณอินเดียมที่ผสมลงไปในช่วงระหว่าง 0 – 3.13%wt. เนื่องจากการลดสัดส่วนปริมาณของทองแดงในการหล่อลงจากการเติมอินเดียมลงไปแทนที่ และจากการที่ทองแดงและซิลิคอนได้แยกตัวออกไปอยู่ใน Secondary Structure ที่มีการกระจายตัวอย่างหนาแน่นมากขึ้นตามปริมาณของอินเดียมที่ผสมลงไปดังกราฟรูปที่ 3.24



**รูปที่ 3.24** กราฟแสดงค่าความแข็งของเงินสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิคอนในปริมาณใกล้เคียงกัน ( 0.09-0.11% wt. ) กับปริมาณของอินเดียมที่ผสมลงไประหว่าง 0 –3.13 % wt.

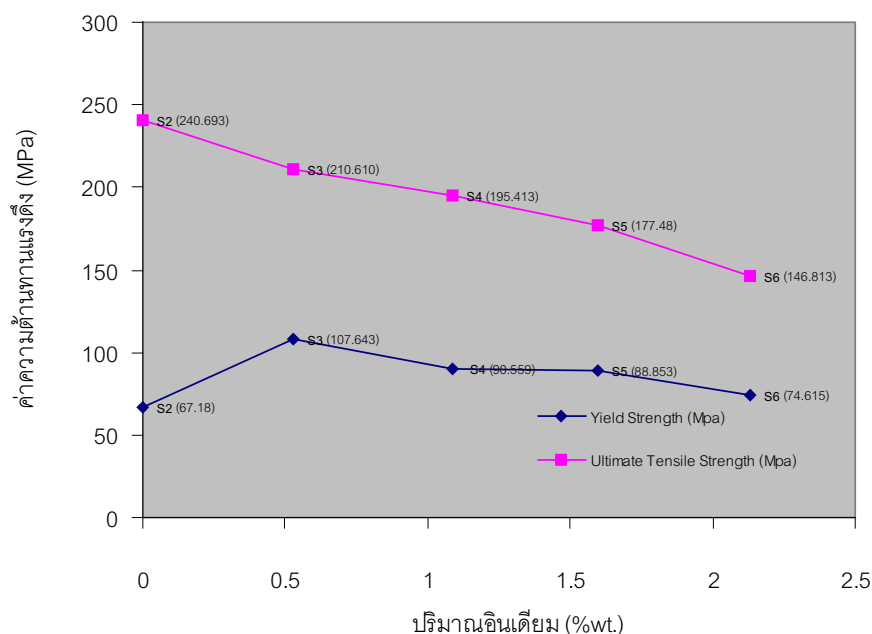
ทางด้านความต้านทานแรงดึงนั้นสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับ กรณีของค่าความแข็ง โดยเมื่อเปรียบเทียบ ระหว่างเงินสเตอร์ลิงธรรมดา กับเงินสเตอร์ลิง ที่มีการเติม อินเดียมจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก กับ ปริมาณอินเดียมที่เติม ดังกราฟรูปที่ 3.25



**รูปที่ 3.25** กราฟแสดงค่า Ultimate Tensile Strength และ Yield Strength ของเงินสเตอร์ลิงที่เติมอินเดียมในปริมาณแตกต่างกันได้แก่ 0, 1.09 และ 3.13 %wt.

จากกราฟรูปที่ 3.25 สังเกตได้ว่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการผสมอินเดียมมากขึ้น แต่สำหรับความต้านทานแรงดึงที่จุดครากมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณอินเดียมที่ผสมในช่วงระหว่าง 1.03 – 3.09 % wt. แต่พบว่าชุดผสมที่ไม่ผสมอินเดียมค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดครากกลับมีค่าน้อยกว่าชุดผสมที่ผสมอินเดียม ซึ่งยังไม่สามารถหาสาเหตุได้ สำหรับชุดส่วนผสมที่มีการเติมอินเดียม 1.03 % จนถึง 3.09 % พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก มีค่าลดลงตามปริมาณของอินเดียมที่ผสมอยู่

สำหรับชุดส่วนผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีการเติมอินเดียมและซิลิคอน สามารถนำมาเปรียบเทียบกับเงินสเตอร์ลิงที่มีการเติมเฉพาะซิลิคอน โดยคิดปริมาณของซิลิคอนที่เหลืออยู่ใกล้เคียงกัน (0.09 – 0.11 % wt.) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุด และความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก กับปริมาณอินเดียมที่ผสมต่างกัน ในชุดส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่มีซิลิคอนผสมอยู่ใกล้เคียงกันได้ดังกราฟรูปที่ 3.26

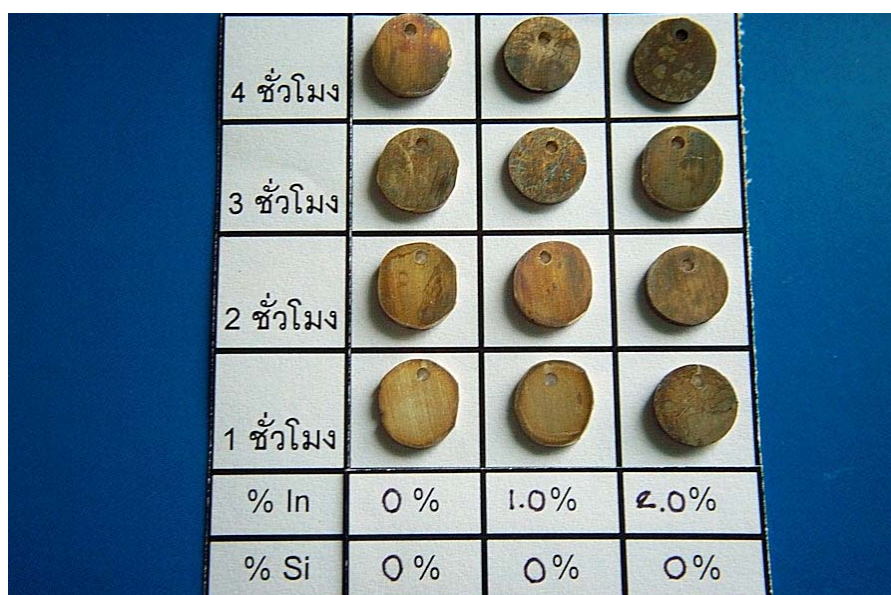


**รูปที่ 3.26** กราฟแสดงค่า Ultimate Tensile Strength และ Yield Strength ของเงินสเตอร์ลิงที่มีซิลิคอนผสมอยู่ใกล้เคียงกัน (0.09 – 0.11%wt.) โดยมีปริมาณอินเดียมที่ผสมอยู่แตกต่างกันได้แก่ 0.53, 1.09, 1.60 และ 3.13 % wt.

จากกราฟรูปที่ 3.26 สำหรับชุดส่วนผสมที่มีซิลิคอนผสมอยู่ใกล้เคียงกัน (0.09 – 0.11%wt.) แต่มีปริมาณอินเดียมแตกต่าง สังเกตได้ว่า ความต้านทานแรงดึงสูงสุดจะมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณอินเดียมที่ผสมลงไประหว่าง 0 – 3.13% เนื่องจากการลดสัดส่วนปริมาณของทองแดงในการหล่อลงจากการเติมอินเดียมลงไปแทนที่ และจากการที่ทองแดงและซิลิคอนได้แยกตัวออกไปอยู่ใน Secondary Structure ที่มีการกระจายตัวอย่างหนาแน่นมากขึ้นตามปริมาณของอินเดียมที่ผสมลงไป สำหรับความต้านทานแรงดึงที่จุดคลากมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณอินเดียมที่เพิ่มขึ้นในช่วงระหว่าง 0.53 - 3.13% wt. แต่พบว่าในชุดส่วนผสม 6.26% Cu – 0.11% Si – balance of Ag มีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคลากน้อยกว่าชุดส่วนผสมอื่นซึ่งยังไม่สามารถหาสาเหตุได้

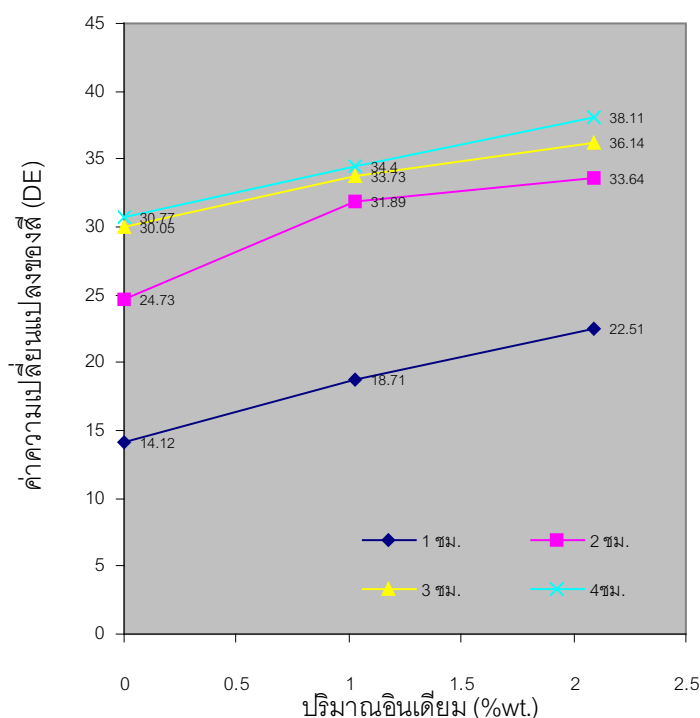
### 3.15.6 ความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิงผสม

ชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิงที่ได้มีการผสมซิลิคอนและอินเดียมในปริมาณต่าง ๆ กัน เมื่อนำมาทำการเตรียมผิวด้วยการขัดด้วยกระดาษทราย ตั้งแต่เบอร์ 400 จนถึงเบอร์ 1200 และใช้เวลาทดสอบการหมองต่างกัน คือ 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานหล่อที่ทำการทดสอบจะมีสีต่างกัน ดังรูปที่ 3.27 ได้แสดงให้เห็นความแตกต่างของสีผิวชิ้นงานเงินสเตอร์ลิงที่มีการผสมอินเดียมในปริมาณแตกต่างกันระหว่าง 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 สเตอริลิงที่มีการผสมอินเดียม 0, 1.03 และ 2.09% wt. โดยใช้เวลาทดสอบ 1, 2, 3 และ 4 ชม.

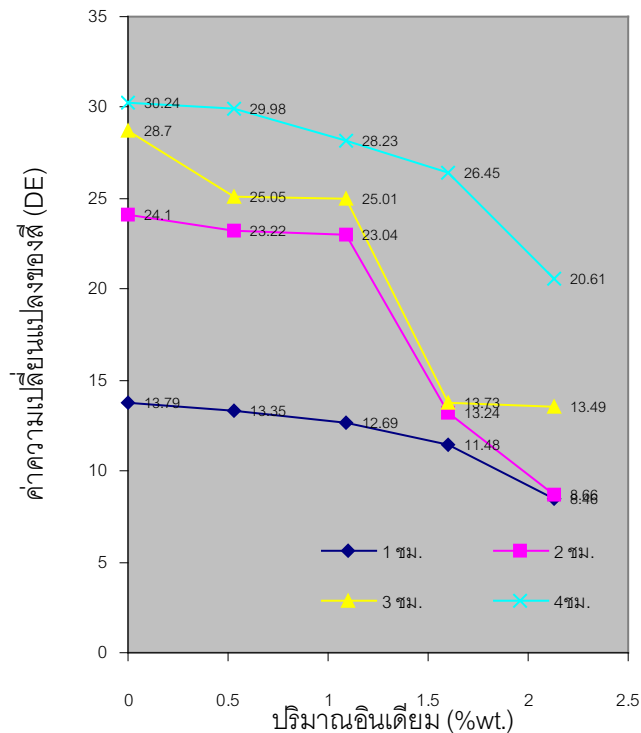
สำหรับชิ้นงานเงินสเตอริลิงที่มีการผสมเฉพาะซิลิคอนคือชุดส่วนผสม 6.26% Cu – 0.11% Si – balance of Ag ซึ่งจากการตรวจสอบส่วนผสมพบว่าคงเหลือปริมาณซิลิคอนเพียง 0.11 % wt. เท่านั้น แต่เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับชุดส่วนผสมที่เป็นเงินสเตอริลิงธรรมดาพบว่าเงินสเตอริลิงที่มีการผสมเฉพาะซิลิคอนจะมีความสามารถในการต้านทานการหมองดีกว่า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

หากทำการเปรียบเทียบระหว่างชุดส่วนผสมของเงินสเตอริลิงที่มีปริมาณที่เหลือน้อยของซิลิคอนใกล้เคียงกัน 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 ของเงินสเตอร์ลิงมีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานแรงดึงของเงินสเตอร์ลิง โดยซิลิคอน 0.09 - 0.11% wt. ทำให้เงินสเตอร์ลิงมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น 38.4% และมีความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น 75 %

3. ในกรณีที่ผสมอินเดียมมีผลทำให้ความแข็งแรงและความต้านทานแรงดึงของเงินสเตอร์ลิงลดลงเนื่องจากอินเดียมดึงเอาทองแดงและซิลิคอนในเนื้อพื้นออกมาอยู่ใน Secondary Structure มากขึ้นตามปริมาณอินเดียมที่ผสมลงไป นอกจากนี้การเตรียมส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงก่อนการหล่อได้ลดปริมาณสัดส่วนของทองแดงลงโดยการผสมอินเดียมลงไปแทนที่ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เงินสเตอร์ลิงมีความแข็งแรงและความต้านทานแรงดึงลดลง

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)

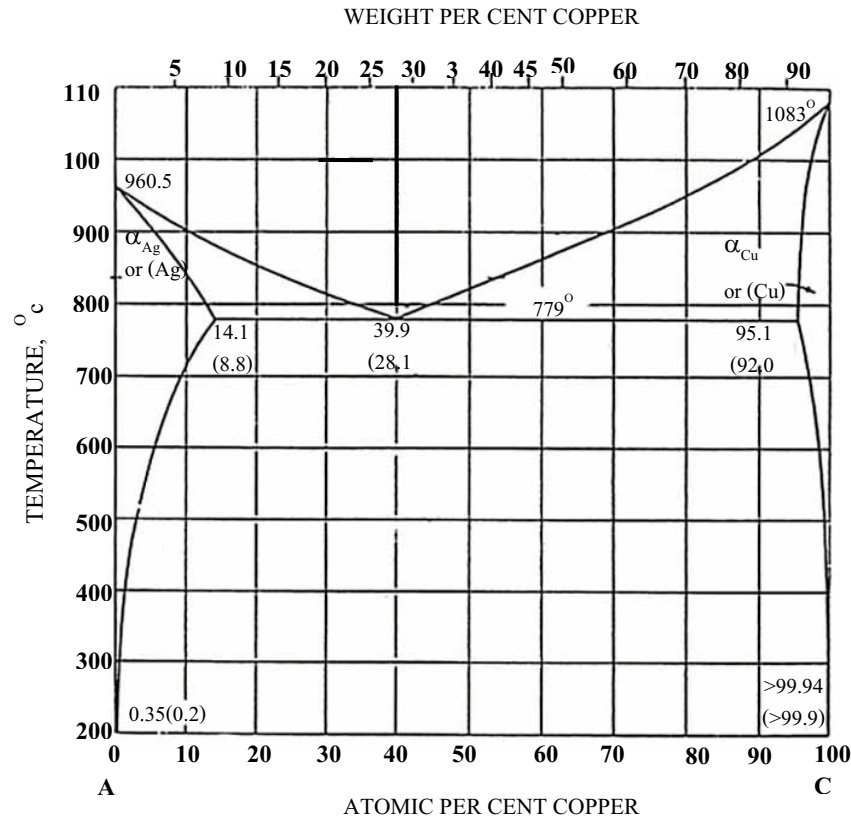
#### 4.1 ความสำคัญของงานวิจัย

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

โลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ได้ถูกกำหนดมาตรฐานไว้ว่า ต้องมีส่วนผสมของโลหะเงินบริสุทธิ์ 92.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เหลือ 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นธาตุอื่น แต่โดยปกติธาตุที่ผสมคือทองแดงซึ่งทำให้มีความแข็งเพิ่มขึ้น

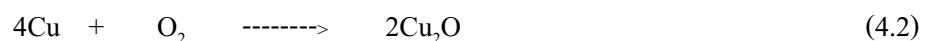
เนื่องจากโลหะเงินบริสุทธิ์มีความอ่อนมาก ไม่สามารถนำไปผลิตเป็นเครื่องประดับได้ จึงได้นำทองแดงมาผสม เพื่อเพิ่มความแข็ง ด้วยกลไกการเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอน(Precipitation hardening) พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมและอุณหภูมิ จากแผนภูมิสมดุลเฟสของระบบธาตุเงิน – ทองแดง ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงการเกิดปฏิกิริยายูเทคติกที่อุณหภูมิ 779.1°C สัดส่วนผสมยูเทคติกเกิดที่ส่วนผสมทองแดง 28.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความสามารถในการละลายได้สูงสุดของทองแดงในเงิน คือ 8.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขณะที่ความสามารถในการละลายของเงินในทองแดงอยู่ที่ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความสามารถในการละลายจะลดลงตามอุณหภูมิลดลง 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 (Cu<sub>2</sub>O) ซึ่งมีสีน้ำตาลถึงเทาดำ และสีชมพูอมแดง ตามลำดับ<sup>(26)</sup> 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 ใช้อุณหภูมิหลอมที่สูงเกินไป 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.<sup>(28)</sup> ได้ศึกษาการเกิดออกซิเดชันของธาตุอะลูมิเนียม พบว่าเกิดขึ้นฟิล์มออกไซด์โปร่งใส ซึ่งช่วยในการป้องกันการเกิดการหมองได้ และในปี 1948 มีงานวิจัยที่สนับสนุนงานของ Price และ Thomas โดยพบว่า การเติมธาตุอะลูมิเนียม 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แทนการเติมธาตุทองแดง จะช่วยป้องกันการเกิดออกไซด์ที่มีสีหมองคล้ำถึงแดงที่ผิว ซึ่งเรียกว่า firestain ในโลหะเงินสเตอร์ลิงได้<sup>(29)</sup> 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<sup>(30)</sup> จึงไม่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรม

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

พบว่าธาตุซิลิคอนที่เติมลงในโลหะมีค่า มีคุณสมบัติในการเพิ่มขนาดเกรนทำให้โลหะมีพฤติกรรมเปราะ สำหรับธาตุฟอสฟอรัสสามารถดออกซิเจนได้ แต่จะไม่ทำให้เกิดความเงาที่ผิวโลหะ ส่วนธาตุสังกะสีและแคดเมียมเป็นตัวลดออกซิเจนที่ดี แต่จะมีผลต่อความแข็งแรง โดยจะทำให้โลหะเงินสเตอร์ลิงอ่อนลง ไม่เหมาะในการทำเครื่องประดับเงิน<sup>(32)</sup>

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)

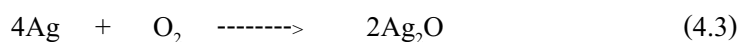
#### 4.5.1.1 สมบัติทางกายภาพ

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

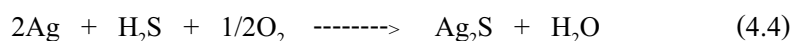
เงินบริสุทธิ์ มีจุดหลอมเหลว  $960.8^{\circ}\text{C}$  ส่วนเงินสเตอร์ลิงมีจุดหลอมเหลว  $896^{\circ}\text{C}$  ความหนาแน่น ที่อุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$  เท่ากับ 10.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC (face-centered cubic)

#### 4.5.1.2 สมบัติทางเคมี

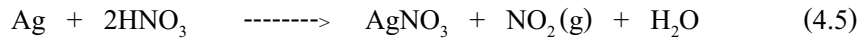
- เงินเป็นธาตุที่เสถียรมาก จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในอากาศแห้งและชื้น
- ถ้าอากาศมีออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับเงิน เกิดฟิล์มออกไซด์ดังสมการที่ (4.3)



- ถ้าในอากาศมีซัลเฟอร์(S) ซึ่งได้จากไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) เงินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ผิว โดยซัลเฟอร์จะทำปฏิกิริยากับ Ag เกิดฟิล์ม  $\text{Ag}_2\text{S}$  มีสีน้ำตาลเข้มแกมเขียวถึงดำเคลือบที่ผิว ทำให้เกิดการหมอง ปฏิกิริยาการเกิดฟิล์ม  $\text{Ag}_2\text{S}$  แสดงได้ดังสมการที่ (4.4)<sup>(33)</sup>



- เงินทำปฏิกิริยากับกรดไนตริกเกิดสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ดังสมการที่ (4.5)



- โลหะเงินสามารถเกิดสารประกอบและผสมกับโลหะได้หลายชนิด ที่สำคัญ คือ โลหะผสมเงิน - ทองแดง เช่น เงินสเตอร์ลิง เป็นต้น

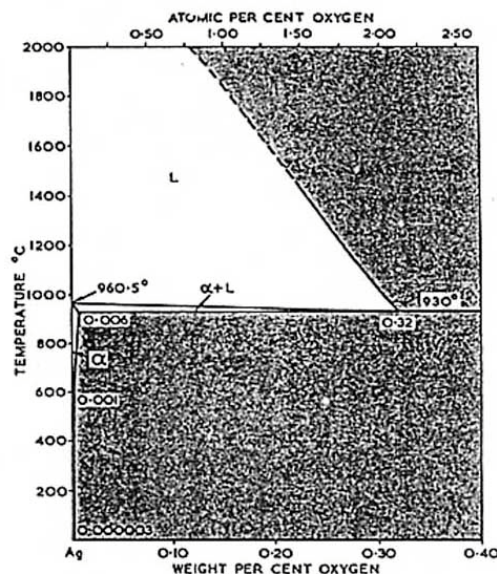
#### 4.5.2 ปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นกับเงินสเตอร์ลิง

ปัญหาที่พบส่วนใหญ่ในการผลิตเครื่องประดับ จากการหลอมและหล่อโลหะ การตกแต่งขึ้นรูป และการใช้งานของเงินสเตอร์ลิง แบ่งได้ 3 ประเภท ได้แก่

1. การละลายของออกซิเจนในโลหะเงินหลอมเหลว
2. การเกิดคอปเปอร์ออกไซด์ที่ผิวโลหะ
3. การเกิดการหมองขึ้นที่ผิว

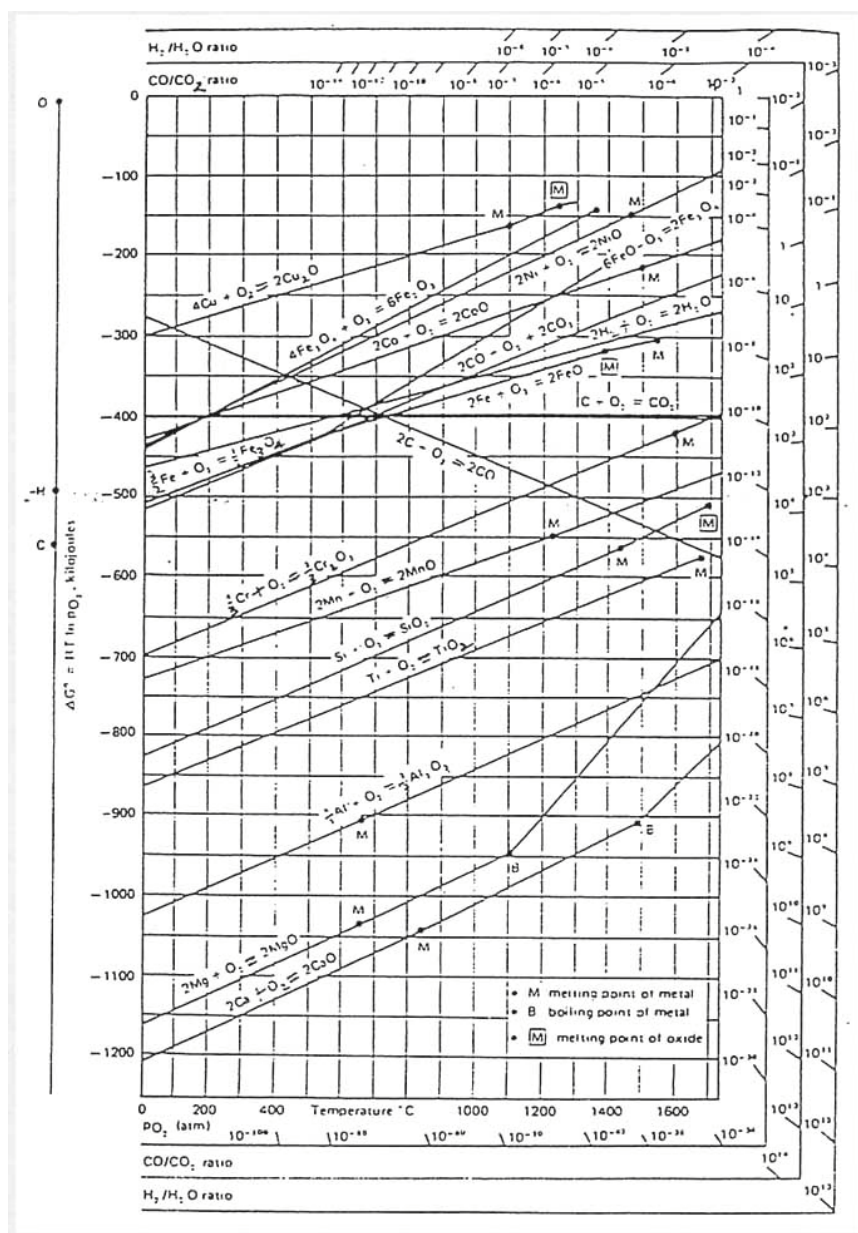
##### 4.5.2.1 การละลายของออกซิเจนในโลหะเงินหลอมเหลว

การละลายของออกซิเจนในโลหะเงินหลอมเหลว เกิดขึ้นในกระบวนการหลอมโลหะที่อุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลวของโลหะเงินสเตอร์ลิง โดยออกซิเจนจะละลายเข้าไปในน้ำโลหะ น้ำโลหะจะเกิดการแข็งตัว โดยปริมาณออกซิเจนที่มีในน้ำหล่อจะทำให้เกิดรูพรุนขึ้นในชิ้นงาน โดยปริมาณของออกซิเจนที่ละลายในโลหะเงิน แสดงได้ดังแผนภูมิสมดุลเฟสของระบบเงินและออกซิเจน ดังรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิห้อง โลหะเงินไม่สามารถดูดซับออกซิเจนได้เลย แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ออกซิเจนจะละลายในเงินได้มากขึ้น โดยเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนถึงอุณหภูมิหลอมเหลวของเงิน คือ  $960.8^{\circ}\text{C}$  จะพบว่าออกซิเจนละลายในโลหะเงินได้มากถึง 10 เท่าของออกซิเจนที่ละลายในโลหะเงินที่อุณหภูมิห้องโดยปริมาตร<sup>(34)</sup>



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  $\text{CuO}$  (Cupric oxide) และ  $\text{Cu}_2\text{O}$  (Cuprous oxide) ตามลำดับ ปฏิริยาออกซิเดชันนี้ เกิดขึ้นขณะให้ความร้อนแก่โลหะที่อุณหภูมิประมาณ  $600 - 800^\circ\text{C}$  ในสภาวะบรรยากาศ โดยฟิล์มออกไซด์ของ  $\text{CuO}$  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 ( $\text{H}_2\text{S}$ ) จะทำให้เกิด  $\text{Ag}_2\text{S}$  ซึ่งมีสีน้ำตาลเข้มแกมเขียวจนถึงดำเคลือบผิวโลหะ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) 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<sup>(38, 39)</sup>

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,  $\text{DE}^*$ ) ด้วยมาตรฐานการวัดสีระบบ CIELAB (The Commission International d' Eclairage)<sup>1</sup> 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

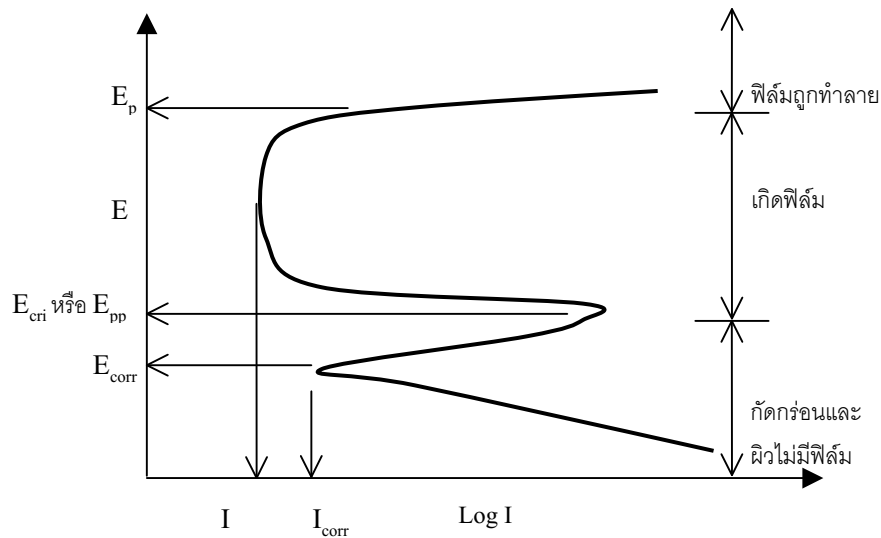
สำหรับการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีในระบบนี้ จะใช้หลักการอธิบายเชิงคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นที่ยอมรับมากที่สุดในการใช้ตรงกันข้ามอธิบาย ได้แก่ สีเขียว – แดง สีเหลือง – น้ำเงิน และสีขา – ดำ ความหมายของค่าสี คือ

|                               |                                                                                                               |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $L^*$ = ความสว่าง (Lightness) | $L^* = 0$ (ดำ), $L^* = 100$ (ขาว)                                                                             |
| $a^*$ = ค่าสีแดง – เขียว      | ถ้าสีแดง ค่า $a^*$ จะเป็นค่าบวก ตั้งแต่ 0 ถึง 100<br>ถ้าสีเขียว ค่า $a^*$ จะเป็นค่าลบ ตั้งแต่ -100 ถึง 0      |
| $b^*$ = ค่าสีเหลือง – น้ำเงิน | ถ้าสีเหลือง ค่า $b^*$ จะเป็นค่าบวก ตั้งแต่ 0 ถึง 100<br>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

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

-  $E_p$  คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ฟิล์มถูกทำลาย โลหะถูกกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอหรือแบบรูเข็มขึ้นอยู่กับการสร้างจุลภาค

-  $I_{corr}$  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

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

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

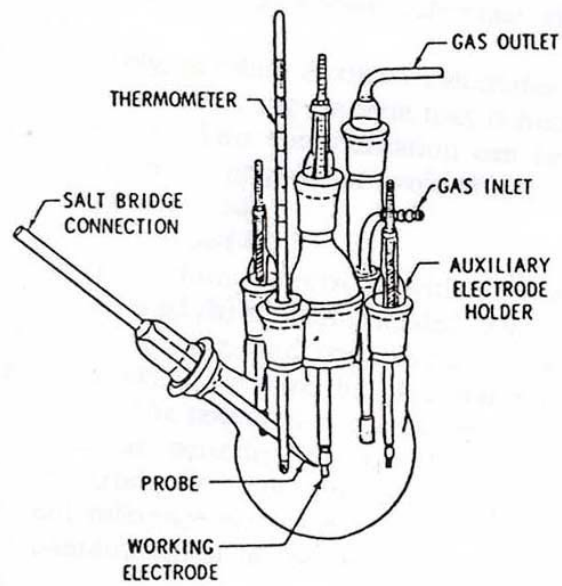
ตัวแปรค่า  $E_p$  แสดงถึงความต้านทานการกัดกร่อน วัสดุที่มีค่า  $E_p$  มากกว่าจะมีความต้านทานการกัดกร่อนมากกว่า การกัดกร่อนจะเป็นรูปแบบใดขึ้นอยู่กับรูปแบบที่ปรากฏ เช่น แบบรูเข็ม (Pitting) หรือแบบสม่ำเสมอ (Uniform) ขึ้นอยู่กับโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะ โดยส่วนใหญ่โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะจะไม่สม่ำเสมอจึงปรากฏเป็นการกัดกร่อนแบบรูเข็ม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

การหาค่าตัวแปรที่กล่าวมาประกอบการสังเกตผิวโลหะหลังการทดสอบจะสามารถเปรียบเทียบการทนมองของเงินสเตอร์ลิงได้

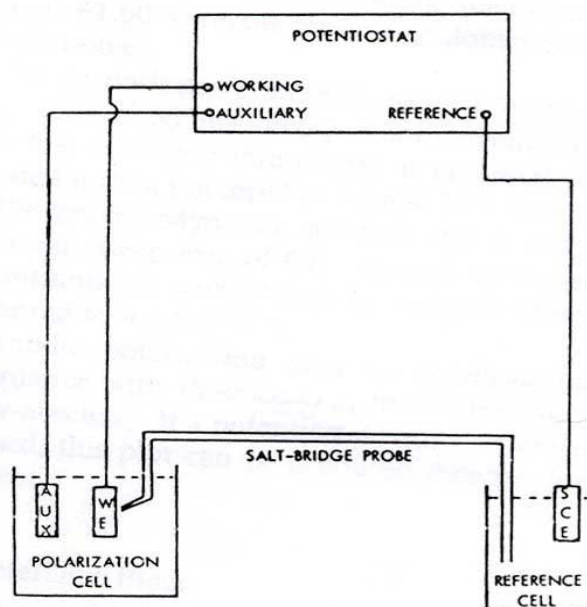
เนื่องจากวิธีการนี้ยังไม่มีกำหนดเป็นมาตรฐานในงานเครื่องประดับ ในที่นี้ได้นำวิธีการตามที่มีในมาตรฐานการวัดการกัดกร่อน คือ มาตรฐาน ASTM G5-94 (American Society of Testing of Materials) และ มาตรฐาน NACE TM 0177-96 (National Association of Corrosion Engineer) ของประเทศสหรัฐอเมริกามาประยุกต์ใช้ โดยใช้มาตรฐาน ASTM G5-94 เป็นวิธีการวัดเส้นโพลาริเซชันและใช้มาตรฐาน NACE TM0177-96 กำหนดสารละลาย คือ สารละลายผสมของ NaCl 35% + CH<sub>3</sub>COOH 5% อิมมิดด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S)

### การวัดเส้นโพลาริเซชันโดยใช้เทคนิคไฟฟ้าเคมี

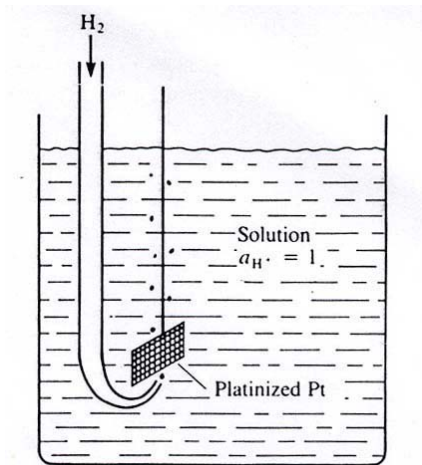
ในการตรวจวัดค่าอัตราการกัดกร่อนด้วยเทคนิคไฟฟ้า เคมีจะวัดโดยใช้วิธีโพเทนชิโอไดนามิกส์ (potentiodynamic technique) ตามมาตรฐาน ASTM G5-94<sup>(41)</sup> (American Society of Testing and Materials) และใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์นี้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



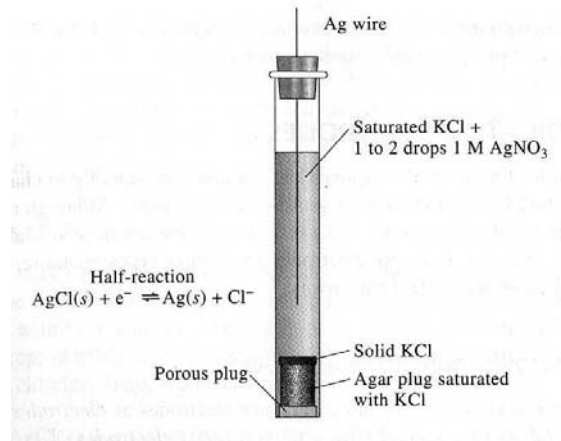
รูปที่ 4.5 เซลล์ที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมี



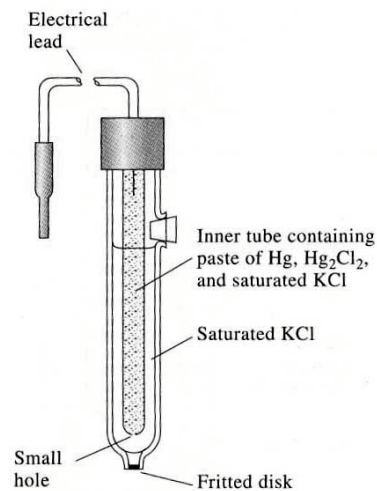
รูปที่ 4.6 เครื่องโพเทนชิโอสแตตที่ใช้วัดเส้นโพลาริเซชัน



(ก) ขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน<sup>(42)</sup>  
(Hydrogen Electrode)



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

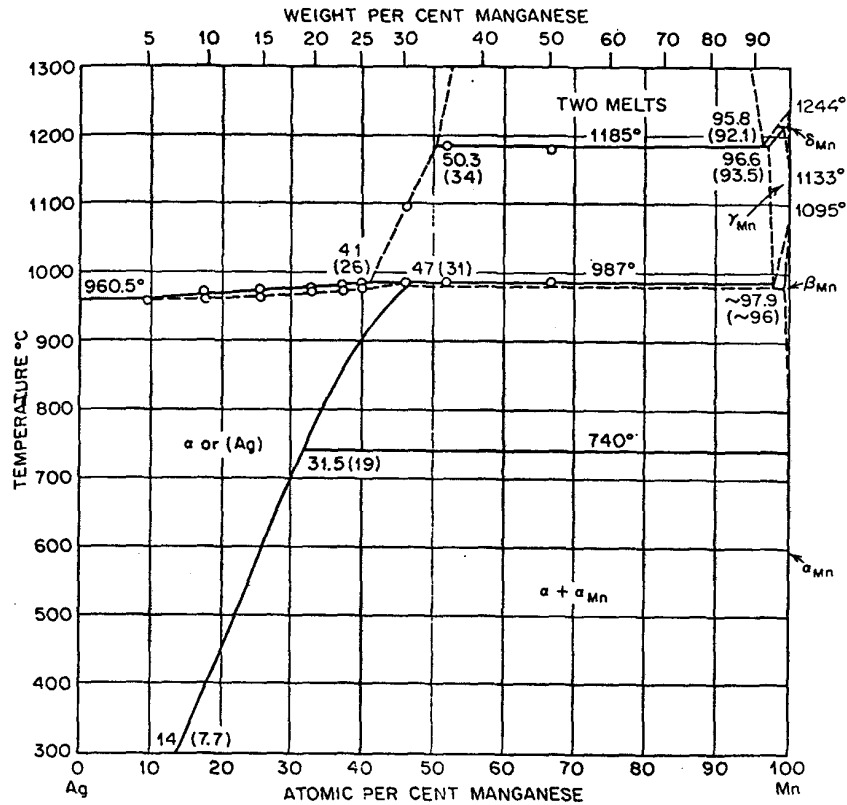


(ค) ขั้วไฟฟ้าคาโลเมล<sup>(43)</sup>  
(Saturated Calomel Electrode ; SCE)

#### 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

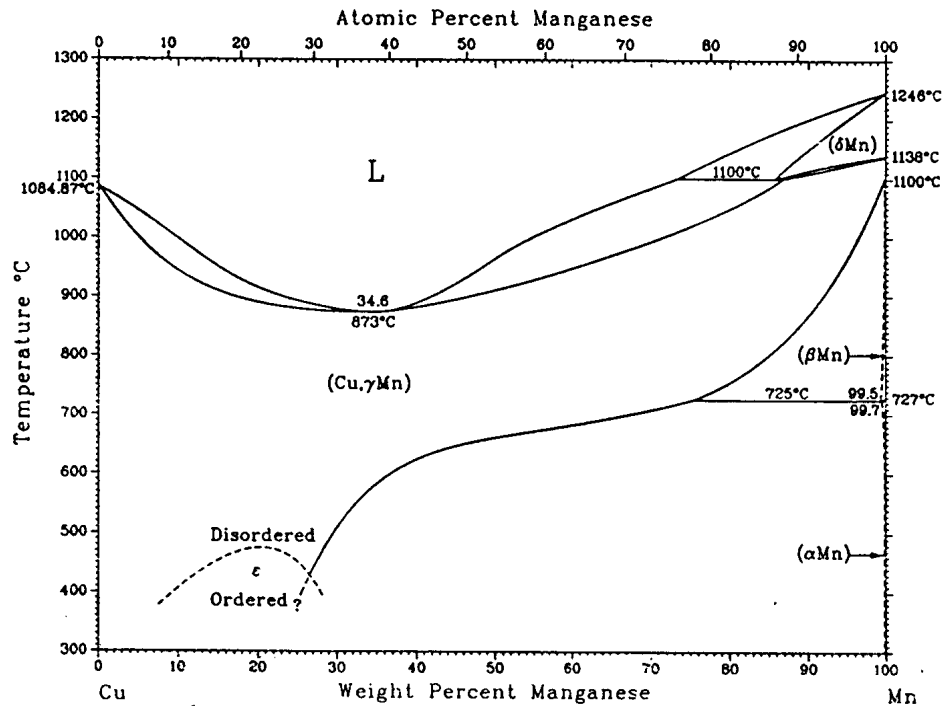


รูปที่ 4.8 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน – แมงกานีส

#### 4.5.3 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน – แมงกานีส<sup>(45)</sup>

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

## Cu-Mn



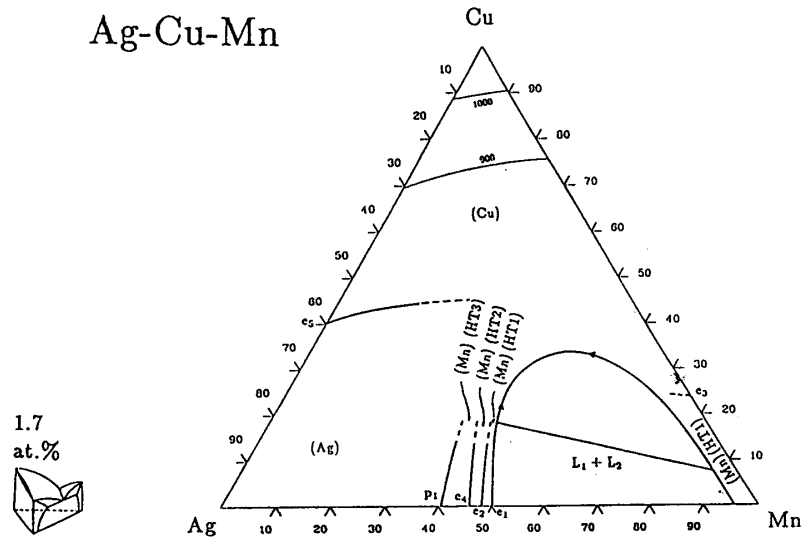
รูปที่ 4.9 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบทองแดง – แมงกานีส<sup>(46)</sup>

#### 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 โดยโลหะทั้งสามชนิดมีคุณสมบัติทางกายภาพขณะบริสุทธิ์แสดงดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.10 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน – ทองแดง – แมงกานีส<sup>(47)</sup>

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของเงิน ทองแดง และแมงกานีส<sup>(48)</sup>

| 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*                |

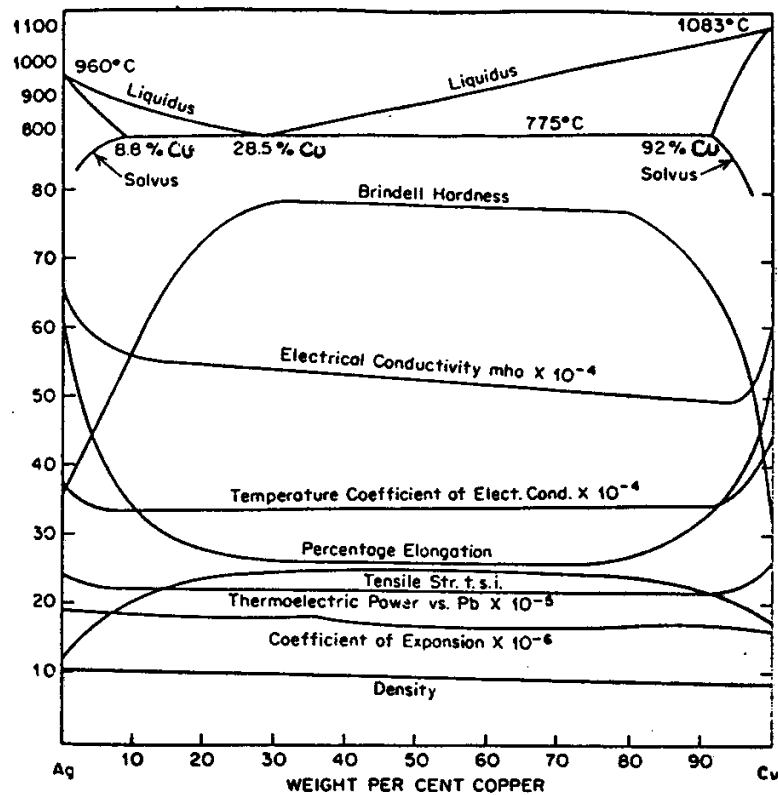
\* ที่อุณหภูมิอื่น จะมีโครงสร้างผลึกแบบอื่น

#### 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<sup>(49)</sup>

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<sup>(50)</sup>

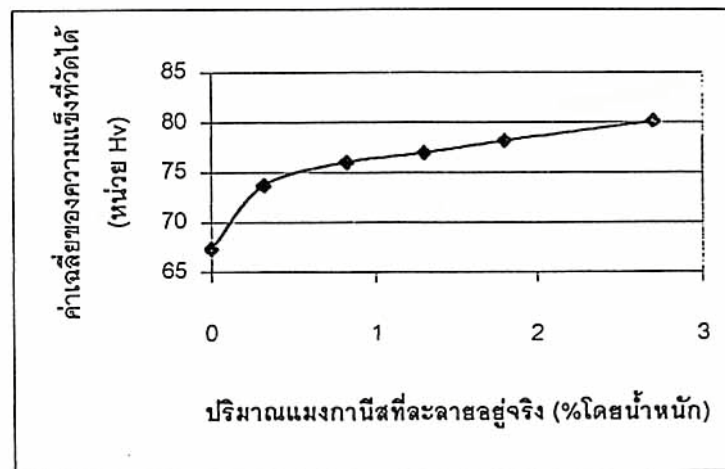
1) การทำให้เป็นโลหะเนื้อเดียว (Homogenization) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 745°C จะได้โลหะผสมที่เป็นสารละลายของแข็งอย่างสมบูรณ์

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

3) การให้ความร้อนแก่เงินสเตอร์ลิงอีกครั้ง เรียกว่าการบ่มเพิ่มความแข็งแรง (aging) สำหรับเงินสเตอร์ลิงมักบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิประมาณ  $300^{\circ}\text{C}$  โดยจะเกิดการตกตะกอนของ Cu-rich ที่มีขนาดเล็กมาก สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้

จากการศึกษาพบว่าเงินสเตอร์ลิงสามารถเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนได้ โดยให้ความร้อนแก่เงินสเตอร์ลิงที่อุณหภูมิ  $750^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา  $\frac{1}{2}$  - 1 ชั่วโมง แล้วชุบแข็ง (quench) ในน้ำ หลังจากนั้นบ่มเพิ่มความแข็งแรง (aging) ที่  $300^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้เงินสเตอร์ลิงที่มีความแข็งแรงสูง ถึง 145 HV<sup>(51)</sup>

โครงการทางวิศวกรรมของนายธนวัฒน์ เมืองมัน 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<sup>(53)</sup>

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

ตารางที่ 4.2 แสดงคุณสมบัติทางกลต่าง ๆ ของโลหะผสมเงินและแมงกานีส<sup>(54)</sup>

| ปริมาณ<br>แมงกานีส (%) | ค่าความแข็ง<br>(หน่วยวิกเกอร์) |             | ความต้านทานแรง<br>ดึง (MPa) |         | ความเค้นจุด<br>คราก (MPa) |         | เปอร์เซ็นต์การ<br>ยืดตัว (%) |             | ค่าความต้านทานไฟ<br>ฟ้า ( $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ) |         |
|------------------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------|---------|---------------------------|---------|------------------------------|-------------|-------------------------------------------------------|---------|
|                        | อบ<br>อ่อน                     | รีด<br>เย็น | อบ<br>อ่อน                  | รีดเย็น | อบ<br>อ่อน                | รีดเย็น | อบ<br>อ่อน                   | รีด<br>เย็น | อบ<br>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 เตอบแม่พิมพ์

#### 4.6.2.4 อุปกรณ์ในการหลอมและหล่อโลหะ

4.6.2.4.1 เตาลหลอมและหล่อแบบสุญญากาศ 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)

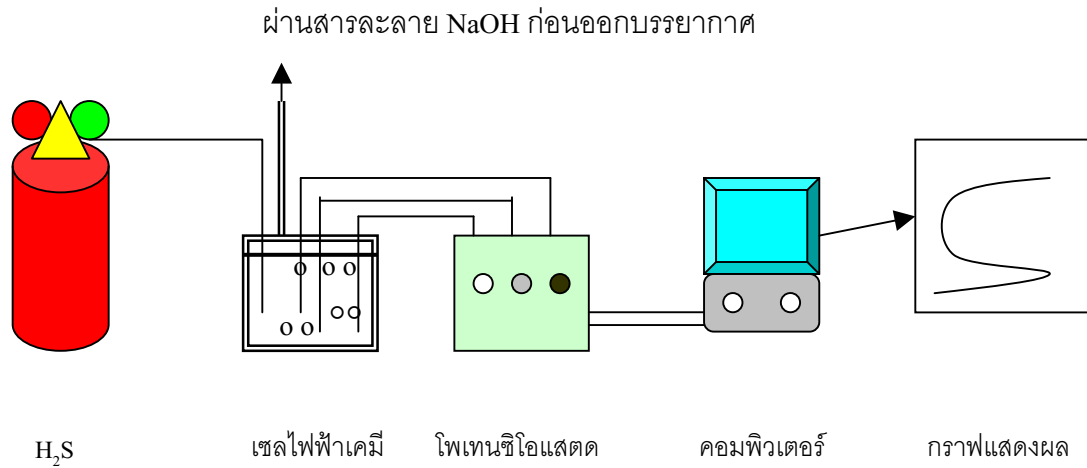
4.6.2.5.7 สารละลายผสมของ NaCl 1%

4.6.2.5.8 ตัวอย่างทดสอบเงินสเตอร์ลิง

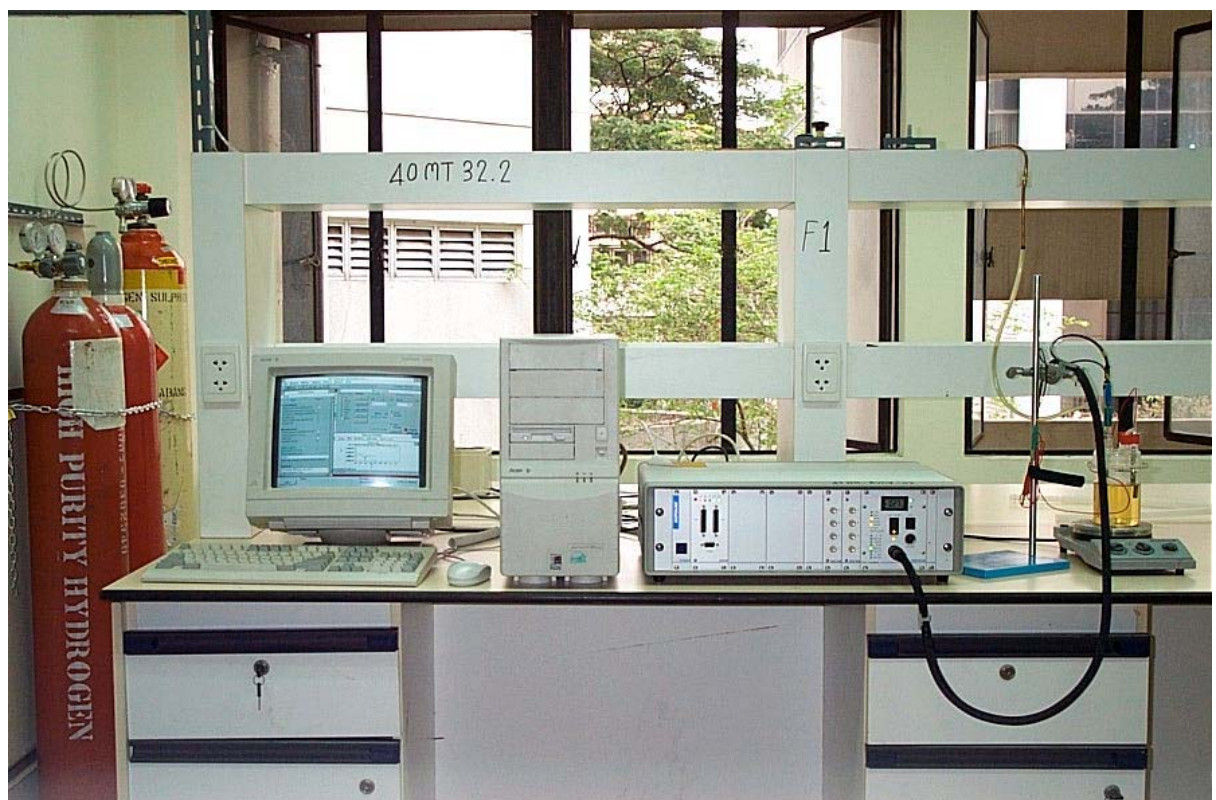
#### การประกอบชุดทดลอง

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 แผนภาพสายเส้นแสดงชุดเครื่องมือวัดการทอนมองของเงินสเตอร์ลิง



รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายชุดอุปกรณ์เครื่องมือวัดการทอนมองของเงินสเตอร์ลิง

#### 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 ( $\text{NH}_4\text{OH}$ )

4.6.3.3 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )

4.6.3.4 กรดกำมะถัน ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )

4.6.3.5 กรดไนตริกเข้มข้น ( $\text{HNO}_3$ )

4.6.3.6 กรดกัดแก้ว (HF)

4.6.3.7 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ )

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  $580^{\circ}\text{C}$  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  $990^{\circ}\text{C}$  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<br>ชุดที่ | ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์) |        |          | น้ำหนักที่ใช้ (กรัม) |        |                      |
|-------------------|------------------------------|--------|----------|----------------------|--------|----------------------|
|                   | เงิน                         | ทองแดง | แมงกานีส | เงิน                 | ทองแดง | ทองแดง -<br>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 dmc<sup>2</sup> 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 (NO<sub>2</sub>) 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 ¼ ไมครอน ตามลำดับ หลังจากนั้นล้างคราบสกปรกด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ แล้วเป่าให้แห้ง

4.8.2.2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) และตรวจสอบปริมาณของธาตุผสมในโครงสร้างที่พบด้วย EDX

4.8.2.3 กัดกรด (etching) ที่ผิวชิ้นงานด้วย 50% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 25% NH<sub>4</sub>OH + 25% H<sub>2</sub>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 ¼ ไมครอน ตามลำดับ ล้างคราบสกปรกด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ เป่าให้แห้ง

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

4.8.3.3 วัดขนาดรอยกดทั้งสองแกน (d<sub>1</sub> และ d<sub>2</sub>) 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<sub>1</sub> และ d<sub>2</sub>) หน่วยเป็นมิลลิเมตร

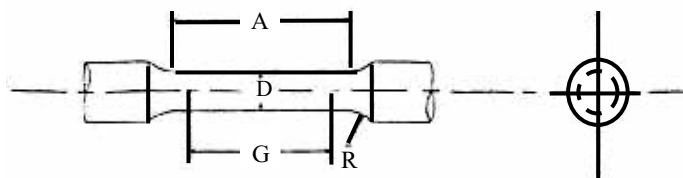
α = มุมระหว่างหน้าของหัวกดเพชรทรงปิรามิด = 136°

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<sup>®</sup> 7000 โดยให้ไฟสีขาว (artificial daylight) D65 มุม 2 องศา

4.8.5.2 แขนงชิ้นงานไว้ในภาชนะปิดที่มีบรรยากาศของไอซัลเฟอร์ ซึ่งได้จากการละลายโซเดียมซัลไฟด์นาโนไฮเดรต ( $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) 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

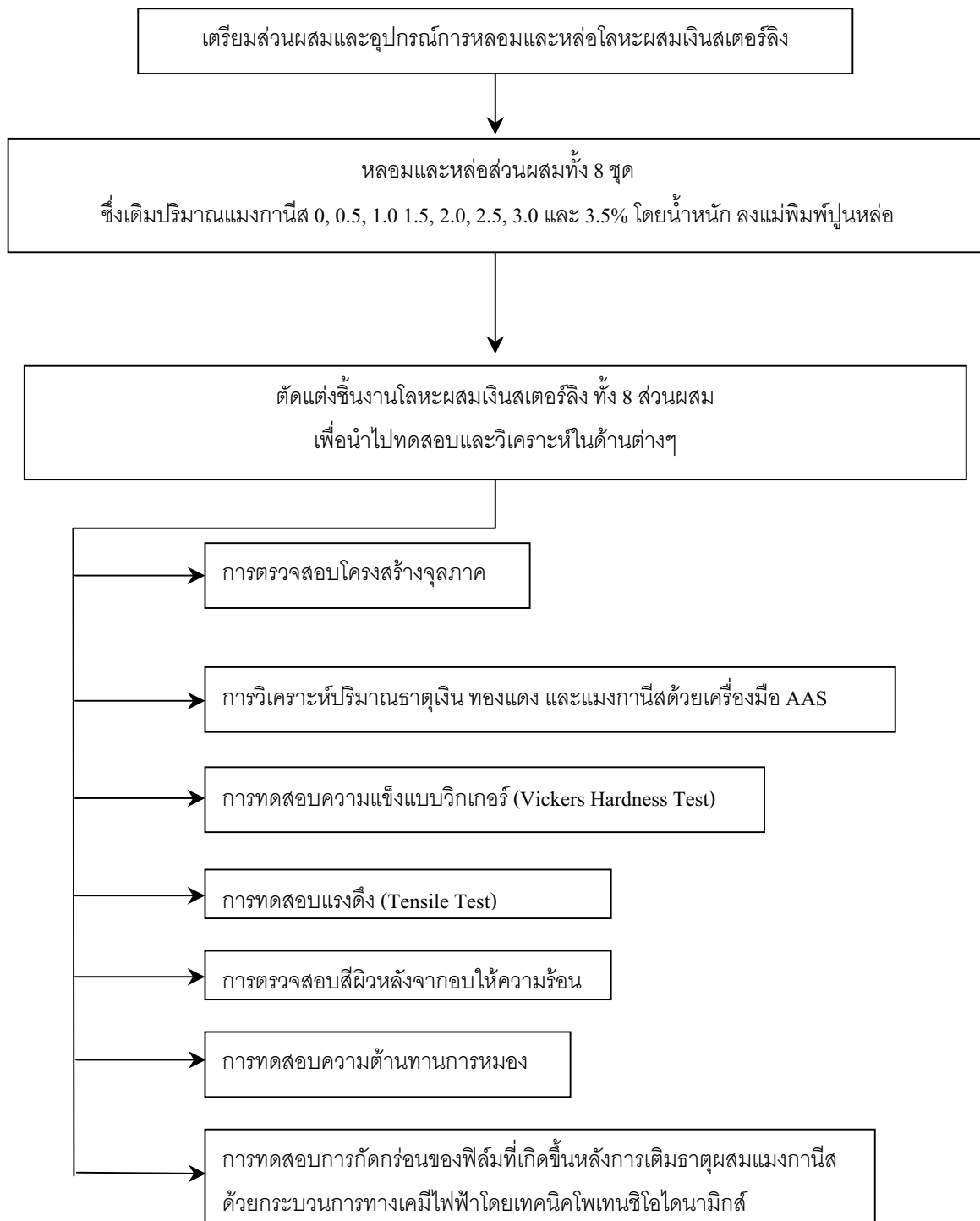
4.8.6.5 หาค่า  $E_{corr}$ ,  $E_{pp}$ ,  $I_p$ ,  $E_p$  และ  $I_{corr}$  จากเส้นโพลาริเซชันที่ได้ แล้วคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน จากสูตรดังสมการ

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

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

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%Ag – 7.5%Cu) และ 1,030°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<br>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<br>ชุดที่ | ปริมาณแมงกานีส<br>ที่ใช้ในการหล่อ (wt.%) | ปริมาณแมงกานีส<br>ที่มีอยู่จริง (wt.%) | ปริมาณแมงกานีส<br>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*<br>(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 series IX โดยบริษัท Instron Corporation ด้วยความเร็วแรงดึง 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ได้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength; UTS) และค่าความเค้นจุดคราก (yield strength;  $\sigma_y$ ) แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบแรงดึงของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส

| โลหะผสม<br>ชุดที่ | ส่วนผสมทางเคมี (wt.%) |      |      | ความต้านทานแรงดึงสูง<br>สุด* (MPa) | ความเค้นจุดคราก*<br>(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 หลังจากนั้นแขวนชิ้นงานแต่ละชุดการทดลองไว้ในภาชนะปิดที่ใส่สารละลายอิมมิดของโซเดียมซัลไฟด์ 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<br>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<br>(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 โดยชุดแรกทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 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 ( $E_{corr}$ ) ศักย์ไฟฟ้าพาสซีเวชันปรัสมภูมิ ( $E_{pp}$ ) 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 ที่วัดได้จากเส้นโพลาริเซชันของชิ้นทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

| ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)   | $E_{corr}$<br>(mV) | $E_{pp}$<br>(mV) | $E_p$<br>(mV) | $I_p$<br>( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) | $I_{corr}$<br>( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) | Corrosion Rate<br>( $\times 10^{-2}$ 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                                          |

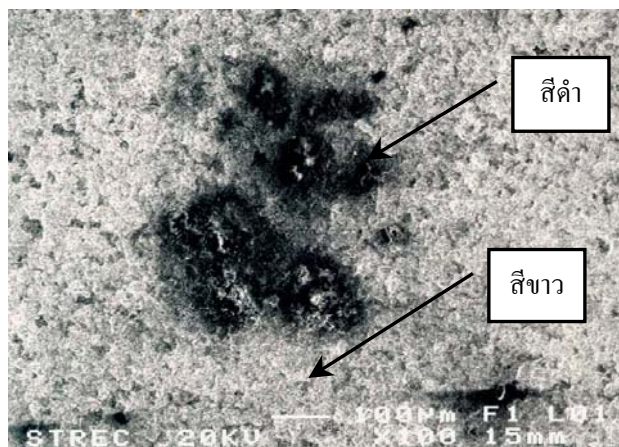
**ตารางที่ 4.10** แสดงค่า  $E_{\text{corr}}$ ,  $E_{\text{pp}}$ ,  $E_p$ ,  $I_{\text{corr}}$  และ Corrosion Rate ที่วัดได้จากเส้นโพลาริเซชันของชิ้นทดสอบ  
ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

| ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)   | $E_{\text{corr}}$<br>(mV) | $E_{\text{pp}}$<br>(mV) | $E_p$<br>(mV) | $I_{\text{corr}}$<br>( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) | Corrosion Rate<br>( $\times 10^{-2}$ 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                                         |

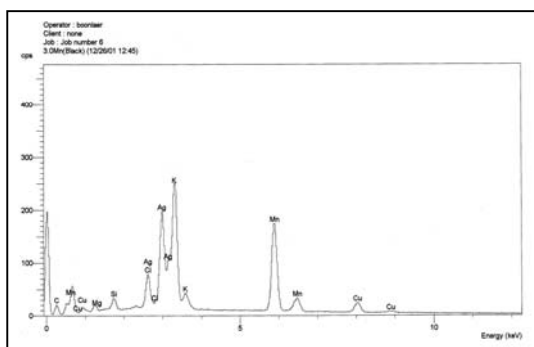
#### 4.10 อภิปรายผลการทดลอง

##### 4.10.1 ผลจากการหลอมและหล่อโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส

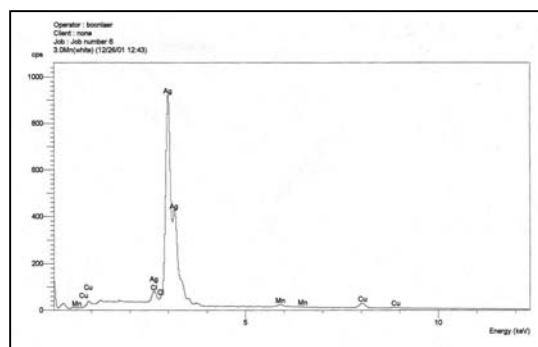
ชิ้นงานที่ได้จากหลอมและหล่อแบบสุญญากาศของ โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 0, 0.38, 0.76, 1.30, 1.70, 2.10, 2.60 และ 3.00 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนักตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.16 เมื่อสังเกตและตรวจสอบด้วยตาเปล่าในชิ้นงานหล่อ พบว่าผิวหน้าด้านล่างของโคนต้นตอบริเวณรูเท (sprue) ที่เป็นทางเข้าของโลหะหลอมเหลวมีลักษณะแตกต่างกัน 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 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมหลังจากกัดกรด แสดงในภาคผนวก 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 ( $\alpha$  - phase) สำหรับในโครงสร้างยูเทคติกจะมี Ag – rich solid solution และ Cu – rich solid solution ( $\beta$  - 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 ( $\alpha$  - 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

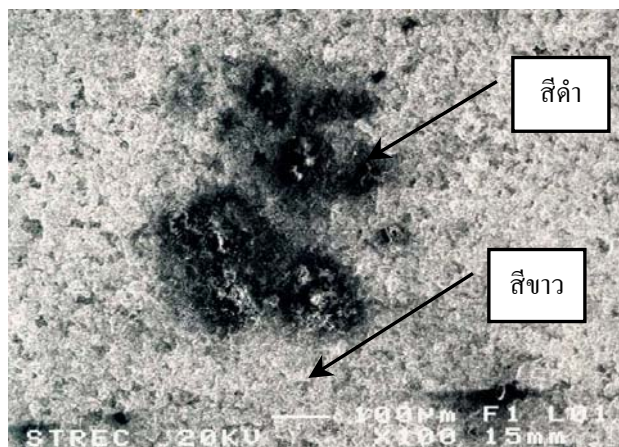
**ตารางที่ 4.10** แสดงค่า  $E_{\text{corr}}$ ,  $E_{\text{pp}}$ ,  $E_p$ ,  $I_{\text{corr}}$  และ Corrosion Rate ที่วัดได้จากเส้นโพลาริเซชันของชิ้นทดสอบ  
ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

| ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)   | $E_{\text{corr}}$<br>(mV) | $E_{\text{pp}}$<br>(mV) | $E_p$<br>(mV) | $I_{\text{corr}}$<br>( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) | Corrosion Rate<br>( $\times 10^{-2}$ 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                                         |

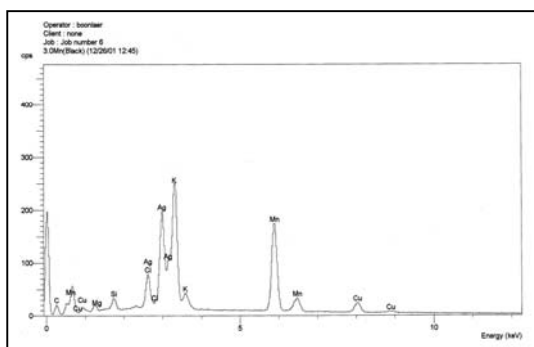
#### 4.10 อภิปรายผลการทดลอง

##### 4.10.1 ผลจากการหลอมและหล่อโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส

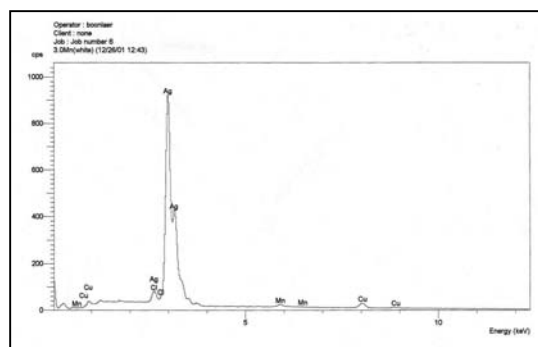
ชิ้นงานที่ได้จากหลอมและหล่อแบบสุญญากาศของ โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 0, 0.38, 0.76, 1.30, 1.70, 2.10, 2.60 และ 3.00 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนักตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.16 เมื่อสังเกตและตรวจสอบด้วยตาเปล่าในชิ้นงานหล่อ พบว่าผิวหน้าด้านล่างของโคนต้นตอบริเวณรูเท (sprue) ที่เป็นทางเข้าของโลหะหลอมเหลวมีลักษณะแตกต่างกัน 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 ปริมาณแมงกานีสที่สูญเสียก็มีมากเช่นกัน 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 แสดงในภาคผนวก 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 ( $\alpha$  - phase) สำหรับในโครงสร้างยูเทคติกจะมี Ag – rich solid solution และ Cu – rich solid solution ( $\beta$  - 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 ( $\alpha$  - 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  $60.84\%Ag - 36.54\%Cu - 2.61\%Mn$

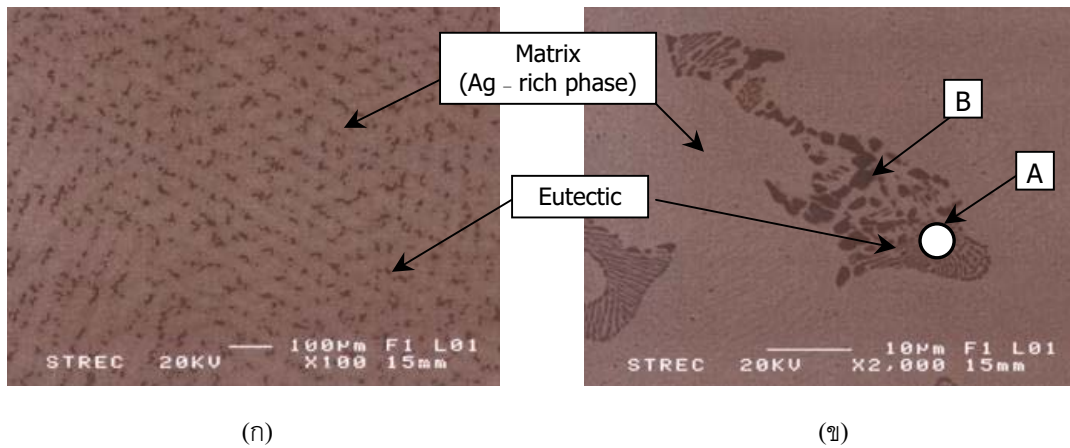
4.10.3.6 โครงสร้างของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมทางเคมี  $4.90\%Cu - 2.10\%Mn - \text{balance of } Ag$  แสดงดังรูปที่ 4.21 (ฉ) และ (ญ) พบว่าโครงสร้างยูเทคติกในโลหะผสมมีความหนาแน่นลดลง เกิดจากการลดลงของธาตุทองแดงในโลหะผสม และลักษณะโครงสร้างยูเทคติกที่ได้ค่อนข้างกลม โดยจาก EDX พบส่วนผสมทางเคมีที่บริเวณเนื้อพื้นดังนี้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

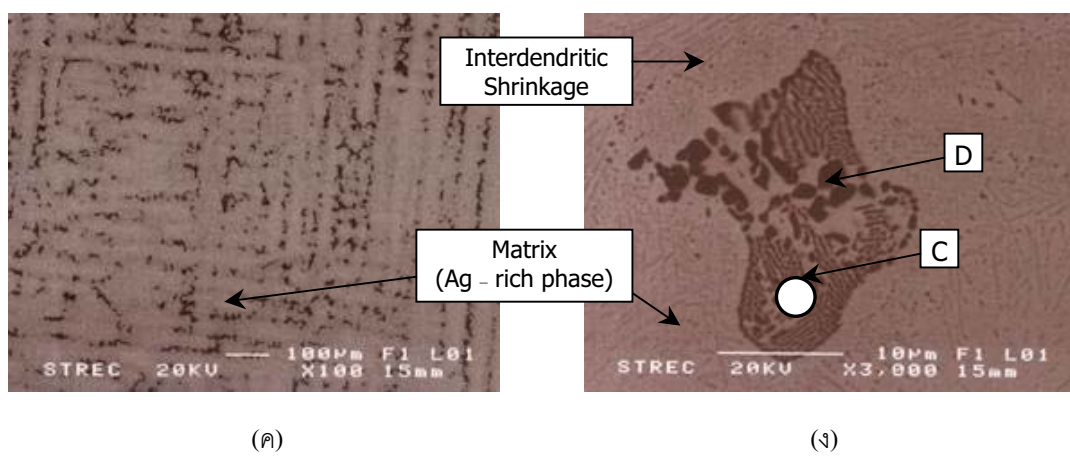
4.10.3.8 โลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมทางเคมี  $4.00\%Cu - 3.00\%Mn - \text{balance of } Ag$  จะมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคแสดงดังรูปที่ 4.21 (ฉ) และ (ญ) และจากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วย EDX โครงสร้างเนื้อพื้นมีปริมาณธาตุต่างๆ คือ  $91.42\%Ag - 5.33\%Cu - 3.25\%Mn$  และโครงสร้างยูเทคติกมีปริมาณธาตุดังนี้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

จากลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส ที่มีปริมาณแมงกานีสแตกต่างกัน ลักษณะโครงสร้างที่ให้เห็นได้ชัดเจนว่าบริเวณกึ่งของเดนไดรต์มีเงินเป็นส่วนผสมทางเคมีสูง และบริเวณโครงสร้างยูเทคติกซึ่งอยู่ระหว่างกึ่งของเดนไดรต์จะมีทองแดงเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนที่ค่อนข้างสูง โดยโครงสร้างยูเทคติกนี้จะมีปริมาณลดลงเมื่อมีปริมาณทองแดงใน

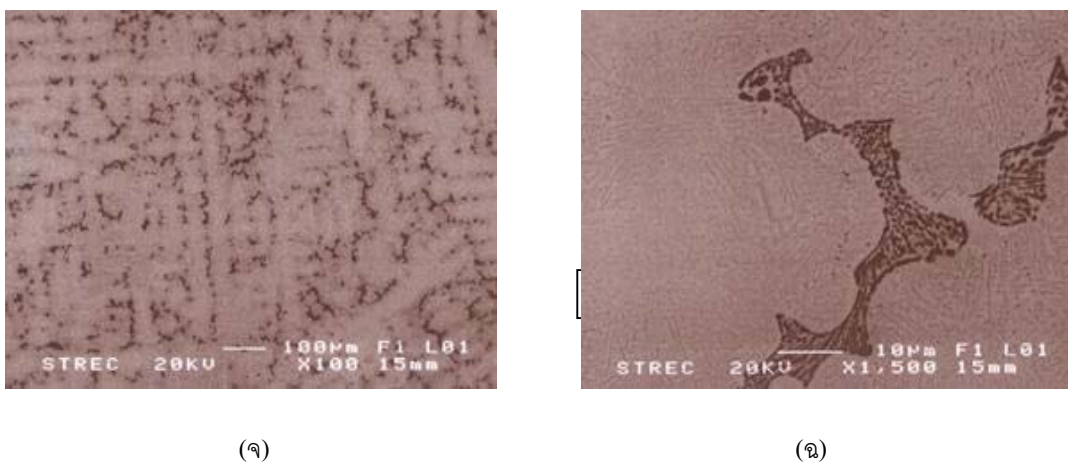
โลหะผสมลดลง ธาตุแมงกานีสที่เติมลงไปโลหะผสมจะเป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้างยูเทคติก ในปริมาณมากกว่าที่พบในโครงสร้างเนื้อพื้น และปริมาณแมงกานีสที่พบในโครงสร้างทั้งสองจะมี ปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณแมงกานีสที่เพิ่มขึ้นในโลหะผสม ซึ่งแมงกานีสจะอยู่ร่วมกับโครงสร้างที่มี ทองแดงเป็นองค์ประกอบมากกว่า



โลหะผสมชุดที่ 1 : 7.65%Cu – balance of Ag

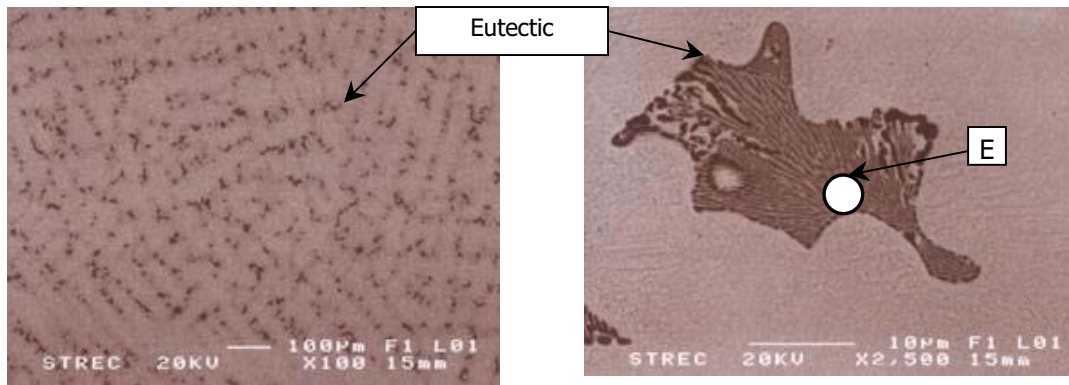


โลหะผสมชุดที่ 2 : 6.97%Cu – 0.38%Mn - balance of Ag



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

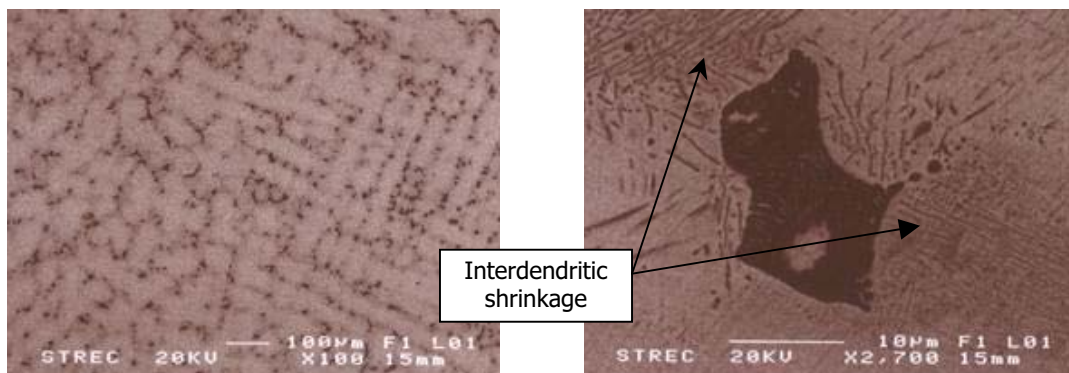
**รูปที่ 4.21** ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5%-ทองแดง-แมงกานีส  
ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยายต่าง ๆ



(ข)

(ฅ)

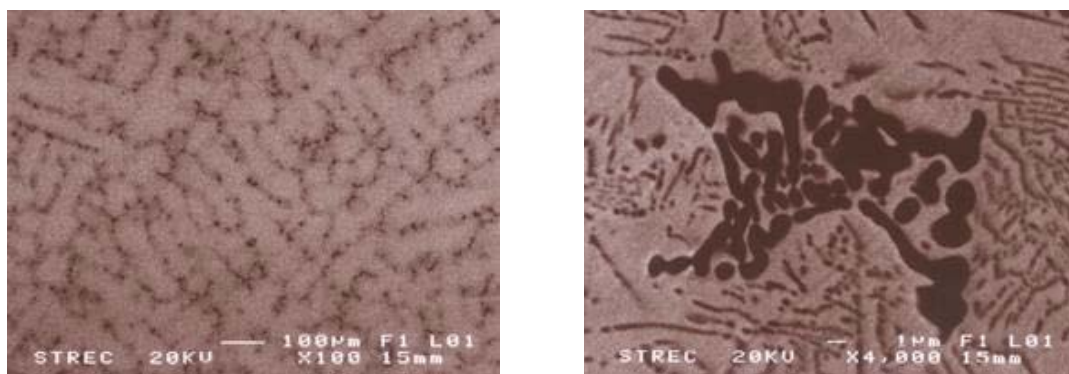
โลหะผสมชุดที่ 4 : 6.14%Cu – 1.30%Mn – balance of Ag



(ฉ)

(ญ)

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

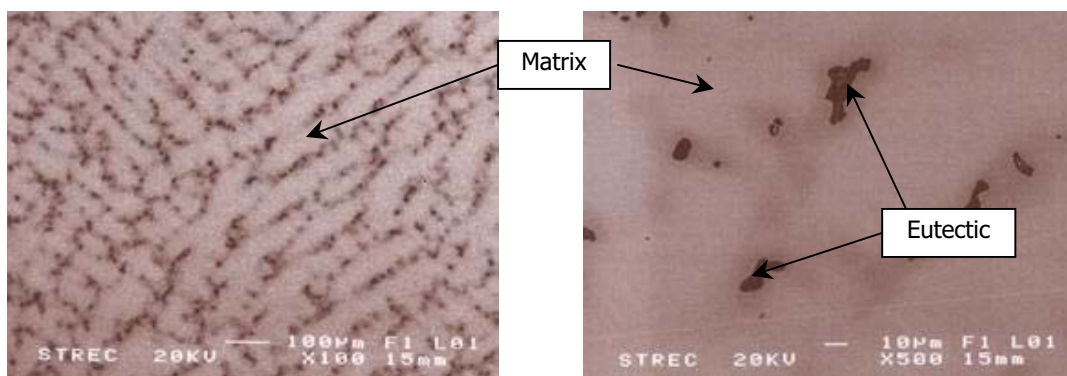


(ฎ)

(ฏ)

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

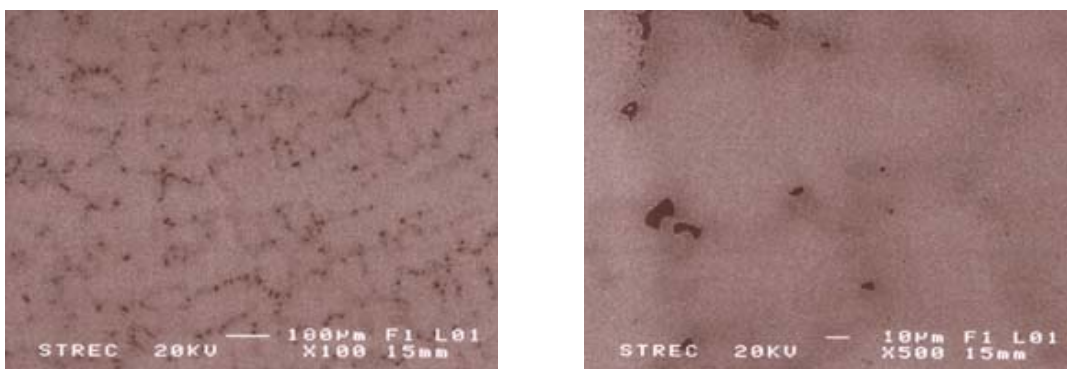
**รูปที่ 4.21 (ต่อ)** ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5%-ทองแดง-แมงกานีส  
ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยายต่าง ๆ



(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

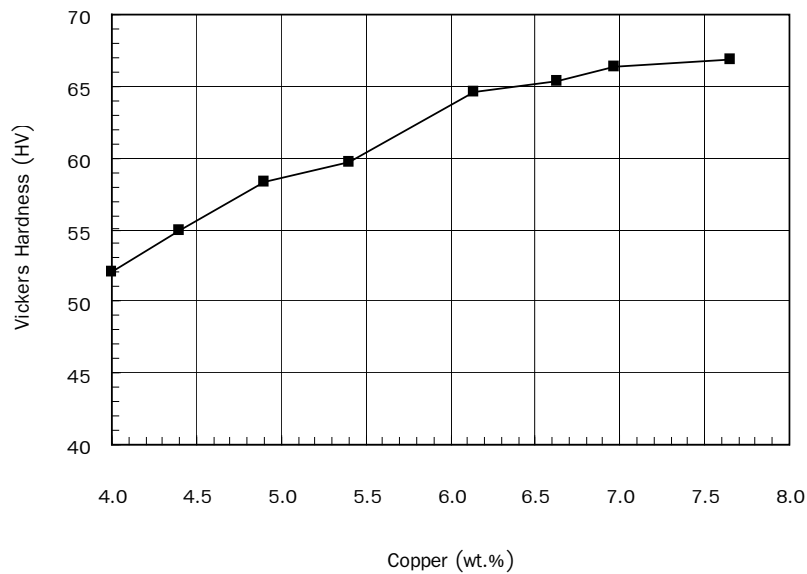
รูปที่ 4.21 (ต่อ) ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5%-ทองแดง-แมงกานีส

ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยายต่าง ๆ

## 4.10.4 ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางกลในสภาพหลังการหล่อขึ้นรูป

## 4.10.4.1 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

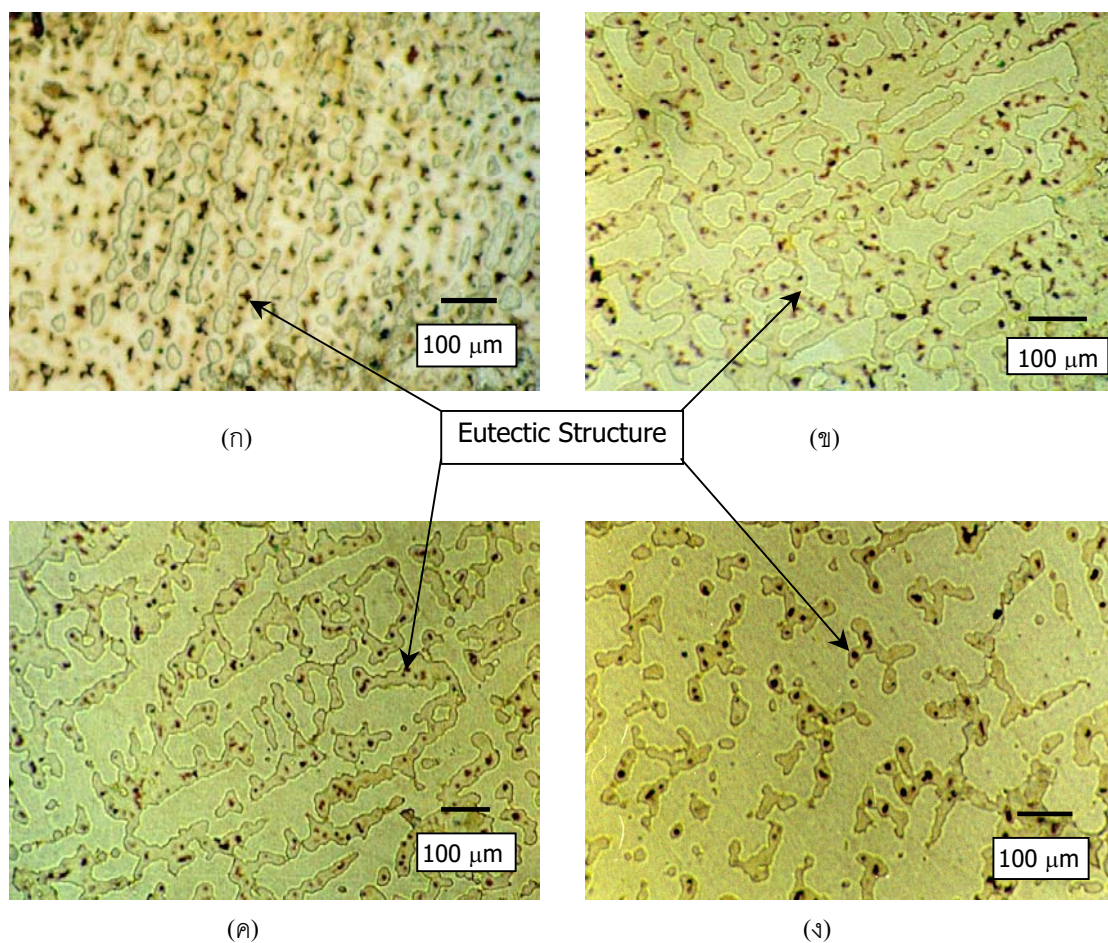
โลหะเงินสเตอร์ลิงทั้ง 8 ชุด ที่มีปริมาณธาตุแมงกานีส 0, 0.38, 0.76, 1.30, 1.70, 2.10, 2.60 และ 3.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และในขณะเดียวกันจะมีปริมาณทองแดง 7.65, 6.97, 6.63, 6.14, 5.40, 4.90, 4.40 และ 4.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ มีความแข็งเฉลี่ยแบบวิกเกอร์ (HV) แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 ซึ่งเมื่อนำมาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทองแดงในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิ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

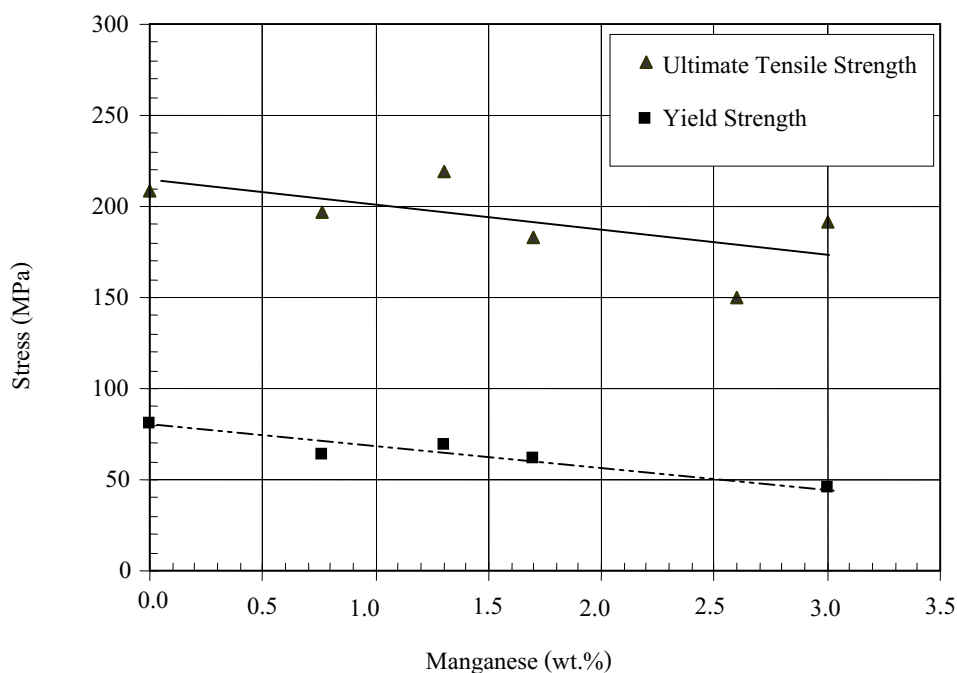
(ข) 6.14%Cu – 1.30%Mn – balance of Ag

(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;  $\sigma_y$ ) 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

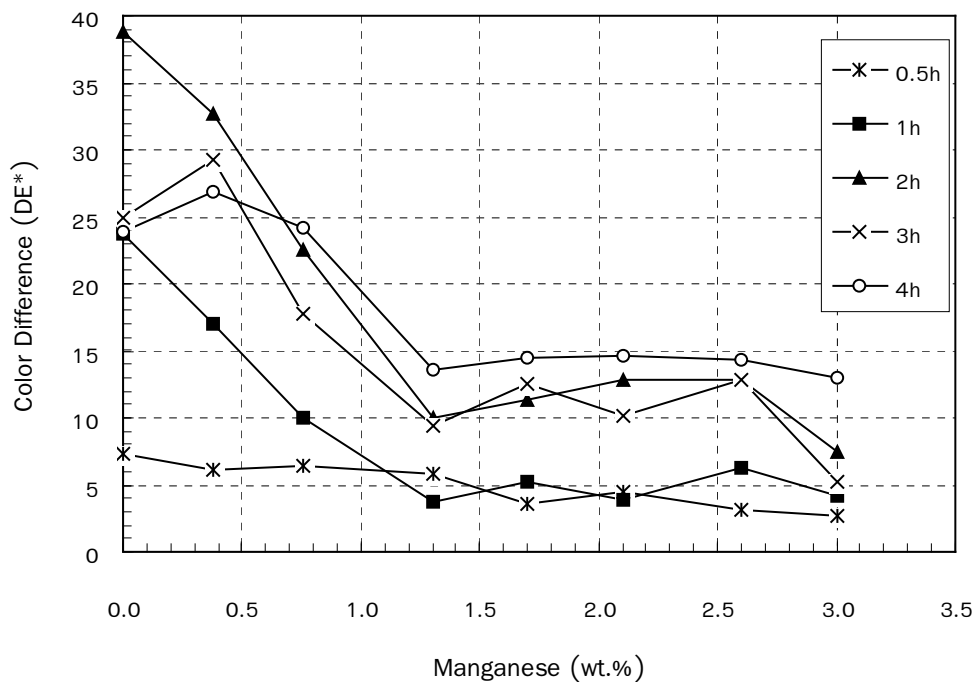
ความเค้นจุดคราก ( yield strength;  $\sigma_y$  ) เป็นค่าแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป (elastic – plastic behavior) ซึ่งเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดความเสียหาย ในการตรวจสอบค่าความเค้นจุดครากของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมแมงกานีส พบว่ามีความเค้นจุดครากค่อนข้างสูง 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

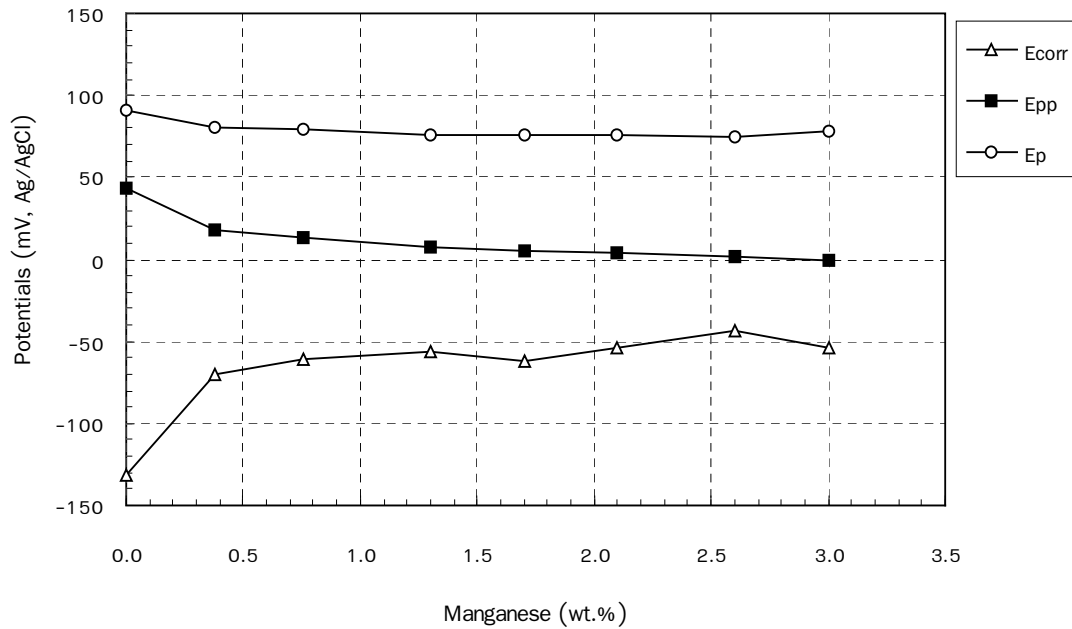
จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีผิวที่เกิดความหมองด้วยตาเปล่า พบว่าชิ้นงานทดสอบที่แขวนไว้ในบรรยากาศไอซัลเฟอร์เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง โลหะผสมที่มีแมงกานีสต่ำกว่า 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะเกิดการหมองเล็กน้อย ส่วนโลหะผสมที่เหลือ สีผิวชิ้นงานทดสอบที่สังเกตได้คือไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อทดสอบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 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

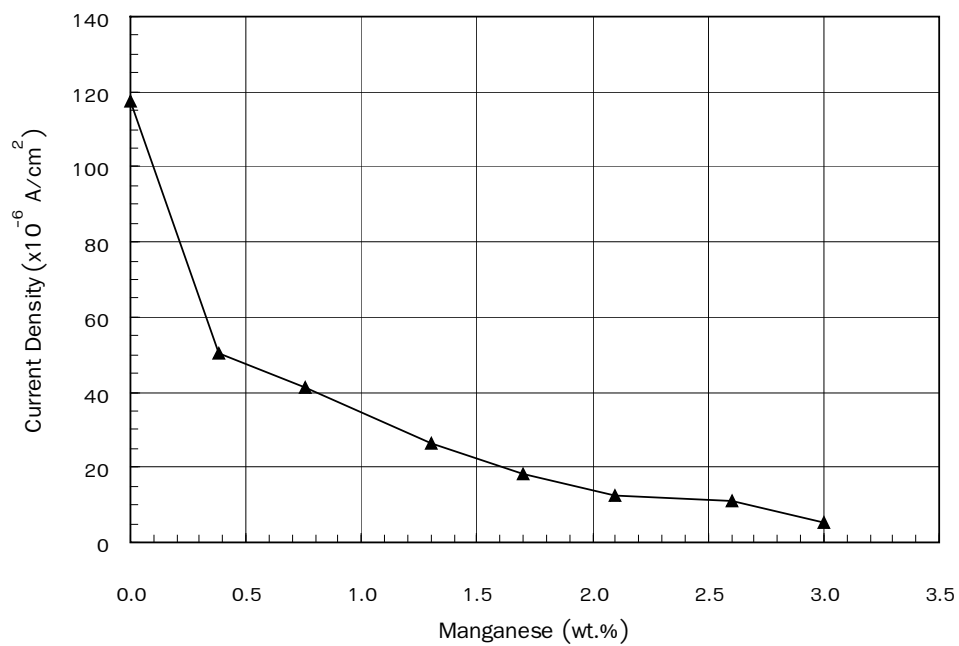
4.10.6 ผลจากการทดสอบการกัดกร่อนของฟิล์มด้วยกระบวนการทางไฟฟ้า เคมี โดยวิธี โพเทนชิโอสแตติก

การทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก 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 อิมิตด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) ที่อุณหภูมิ 25 °C หาค่า  $E_{corr}$ ,  $E_{pp}$ ,  $E_p$  และ  $I_{corr}$  แต่ไม่สามารถหาค่า  $I_p$  ได้ เนื่องจากโลหะทดสอบไม่เกิดฟิล์มชั้นที่ผิว ค่าต่าง ๆ ที่หาได้จากเส้นโพลาริเซชันแสดงไว้ในตารางที่ 4.10 นำค่าที่ได้มาวาดกราฟเปรียบเทียบผลของธาตุแมงกานีสต่อค่าเหล่านี้ ได้ดังรูปที่ 4.30 และ 4.31

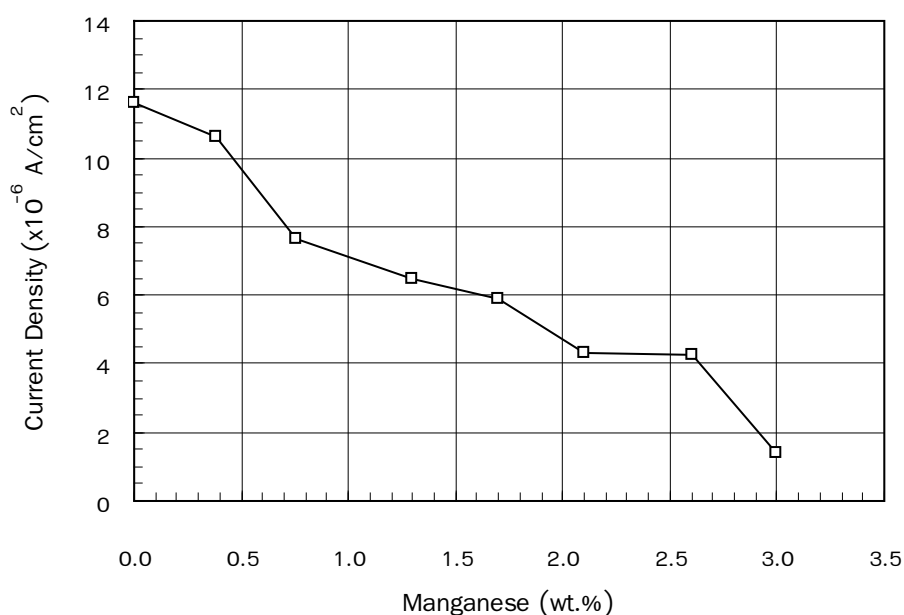
ภาพลักษณะชิ้นงานและเส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด รวมถึงวิธีการหาค่าต่าง ๆ แสดงไว้ในภาคผนวก จ.



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



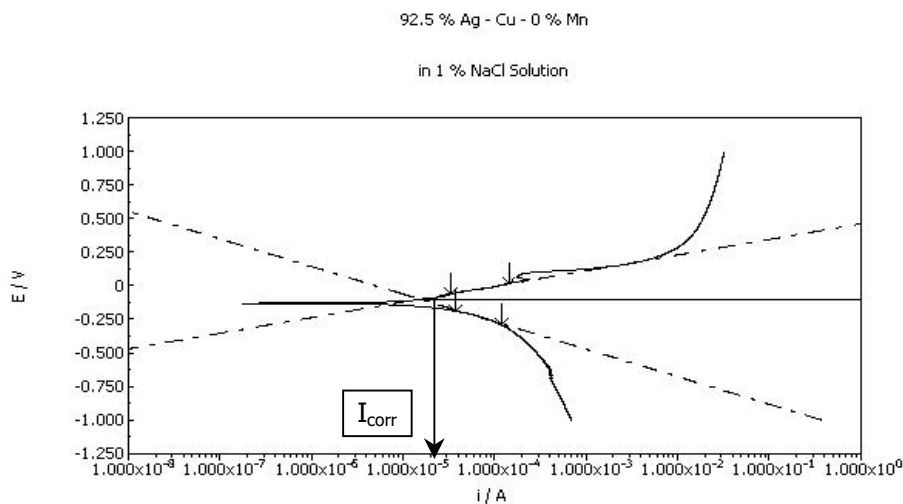
รูปที่ 4.27 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า  $I_p$  ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 °C



**รูปที่ 4.28** ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า  $I_{\text{corr}}$  ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 °C

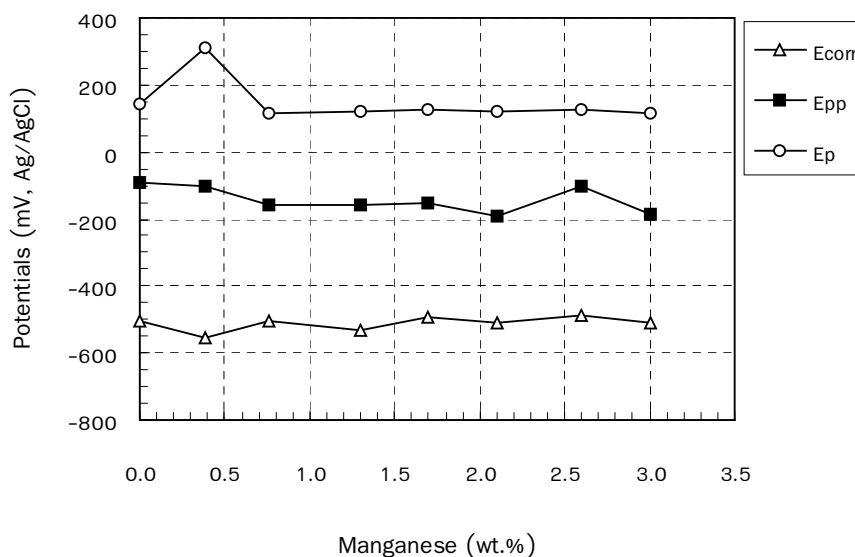
จากรูปที่ 4.26, 4.27 และ 4.28 ทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อโลหะเงินสเตอร์ลิงมีปริมาณแมงกานีสมากขึ้น มีผลในการเพิ่มค่า  $E_{\text{corr}}$  ลดค่า  $E_{\text{pp}}$  และค่า  $I_p$  อย่างเห็นได้ชัด แต่มีผลในการลดค่า  $E_p$  ไม่ชัดเจนนักแต่มีแนวโน้มที่ลดลง แสดงว่าปริมาณแมงกานีสที่เติมลงในโลหะเงินสเตอร์ลิง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

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

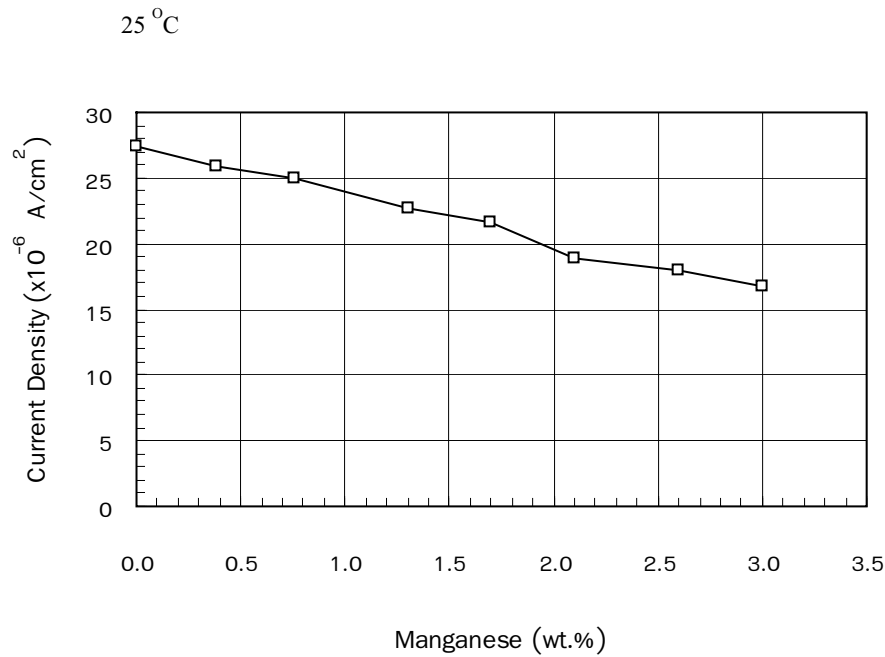


รูปที่ 4.29 แสดงการหาค่า  $I_{\text{corr}}$  จากจุดตัดระหว่างเส้นโค้งคาโทดิกและเส้นโค้งแอโนดิก

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

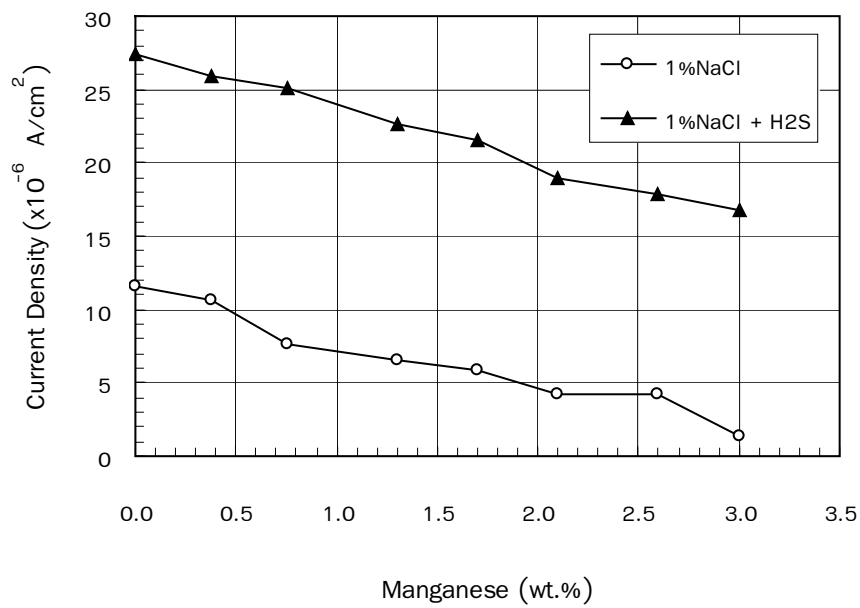


รูปที่ 4.30 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า  $E_{\text{corr}}$ ,  $E_{\text{pp}}$  และ  $E_p$  ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ

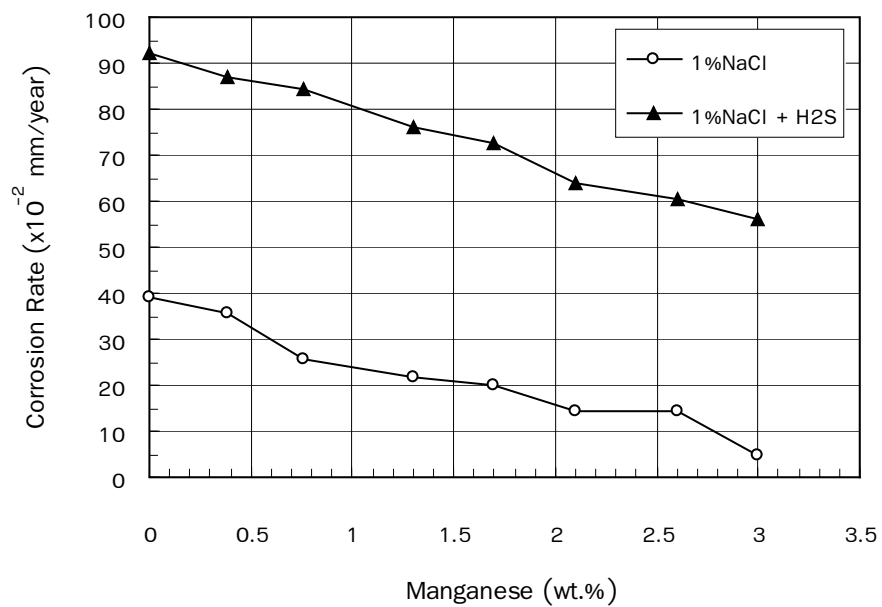


**รูปที่ 4.31** ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า  $I_{\text{corr}}$  ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 °C

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



รูปที่ 4.32 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงต่อค่า  $I_{\text{corr}}$  ในสภาวะที่มี 1%NaCl เปรียบเทียบกับสภาวะที่มี 1%NaCl อิ่มตัวด้วย H<sub>2</sub>S ที่อุณหภูมิ 25 °C



รูปที่ 4.33 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงต่อค่าอัตราการกัดกร่อน ในสภาวะที่มี 1%NaCl เปรียบเทียบกับสภาวะที่มี 1%NaCl อิ่มตัวด้วย H<sub>2</sub>S ที่อุณหภูมิ 25 °C

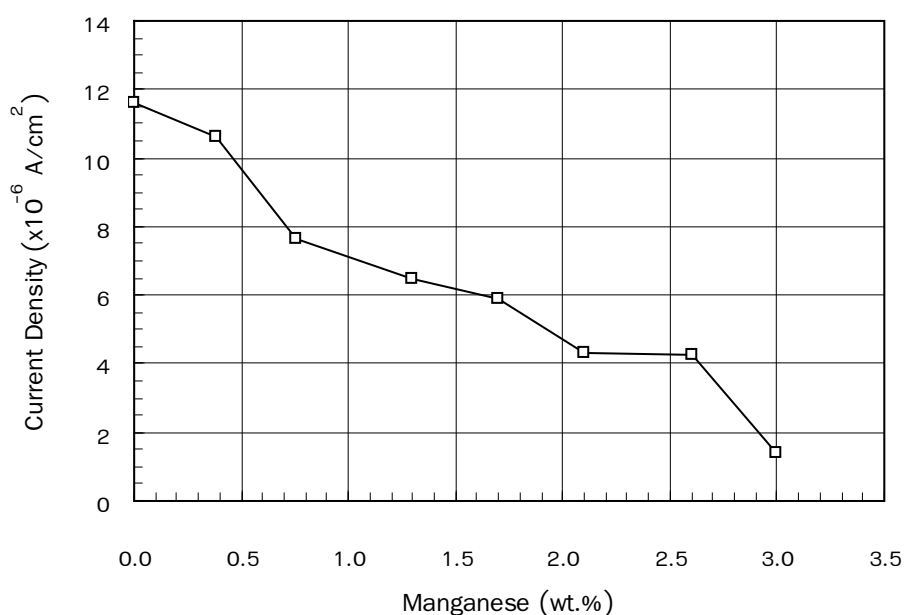
จากรูปที่ 4.32 และ 4.33 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน หรือ  $I_{\text{corr}}$  ที่ได้จากเส้นโพลาริเซชัน สามารถนำมาคำนวณหาอัตราการสูญเสียเนื้อโลหะได้เป็นค่าอัตราการกัดกร่อน (mm/year) ในการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะผสมทั้ง 8 ชุด จะเห็นว่าเมื่อโลหะผสมมีปริมาณแมงกานีสสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ได้จากเส้นโพลาริเซชันมีค่าลดลง 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 ( $E_{\text{corr}}$ ) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มพาสซีฟ ( $I_p$ ) อย่างชัดเจน โดยค่า  $E_{\text{corr}}$  และ  $I_p$  ของโลหะผสมที่มีแมงกานีส 0.38 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ -70 mV และ 50.34  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  ตามลำดับ ซึ่ง  $E_{\text{corr}}$  มีค่าต่ำกว่าและ  $I_p$  มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากโลหะผสมที่ไม่มีแมงกานีส ( $E_{\text{corr}} = -132 \text{ mV}$ ,  $I_p = 117.58 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) ค่า  $E_{\text{corr}}$  สูง แสดงว่าโลหะเกิดการกัดกร่อนได้ยาก ค่า  $I_p$  ต่ำกว่า แสดงว่าฟิล์มสามารถต้านทานการแพร่ผ่านของอิออนได้มากกว่า สามารถหน่วงการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวโลหะจะสัมผัสกับปัจจัยที่เอื้อให้เกิดการหมอง เช่น ออกซิเจนหรือซัลเฟอร์ ช่วยป้องกันการหมองของโลหะเงินสเตอร์ลิงได้

4. โลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีแมงกานีสตั้งแต่ 1.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นไป จะมีจุดสัปดาห์บนผิวชิ้นงานกระจายอยู่ทั่วไป เนื่องจากผิวโลหะทำปฏิกิริยากับบรรยากาศขณะหล่อ ทำให้ผิวชิ้นงานขาดความสวยงาม และความเงางาม

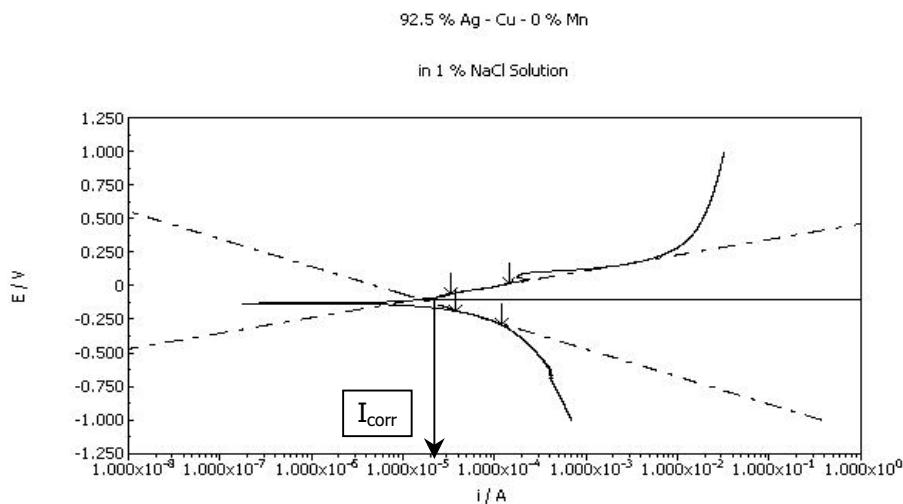
5. ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่เหมาะสม คือ 6.14%Cu – 1.3%Mn – balance of Ag โลหะที่ส่วนผสมนี้จะมีสมบัติทางกล คือ ความแข็ง และความแข็งแรงค่อนข้างดี มีความสามารถในการต้านทานการหมองที่เหมาะสม และลักษณะผิวหลังการหล่อสะอาด ไม่มีข้อบกพร่องที่ผิวหน้า หากเป็นโลหะผสมที่มีแมงกานีสต่ำกว่านี้หรือไม่มีเลย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



**รูปที่ 4.28** ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า  $I_{\text{corr}}$  ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 °C

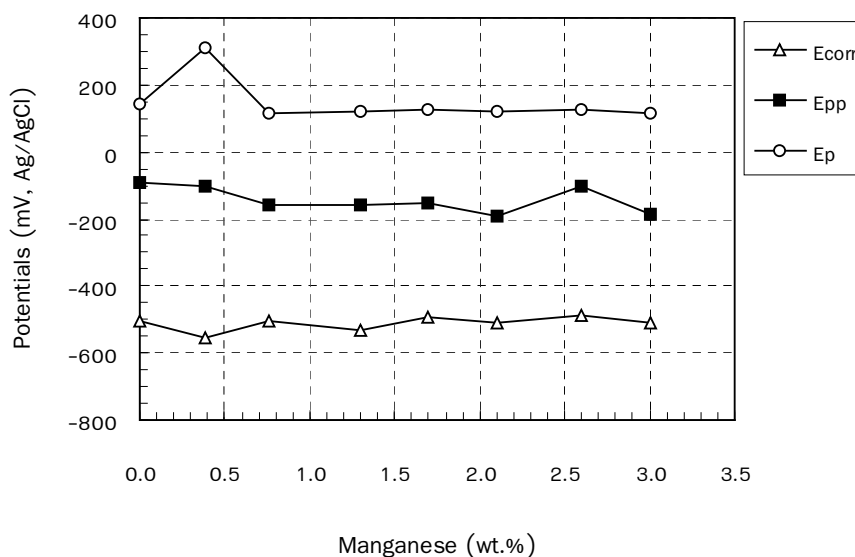
จากรูปที่ 4.26, 4.27 และ 4.28 ทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อโลหะเงินสเตอร์ลิงมีปริมาณแมงกานีสมากขึ้น มีผลในการเพิ่มค่า  $E_{\text{corr}}$  ลดค่า  $E_{\text{pp}}$  และค่า  $I_p$  อย่างเห็นได้ชัด แต่มีผลในการลดค่า  $E_p$  ไม่ชัดเจนนักแต่มีแนวโน้มที่ลดลง แสดงว่าปริมาณแมงกานีสที่เติมลงในโลหะเงินสเตอร์ลิง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

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

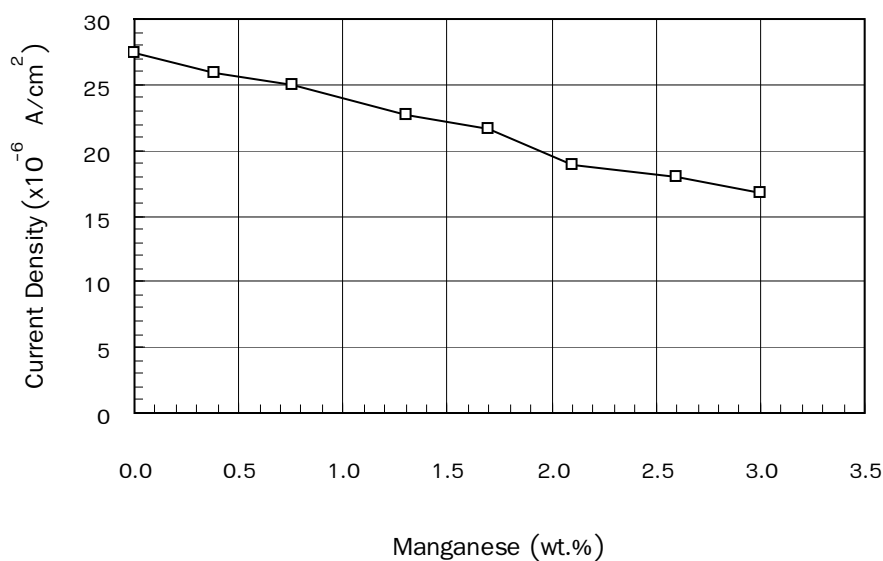


รูปที่ 4.29 แสดงการหาค่า  $I_{\text{corr}}$  จากจุดตัดระหว่างเส้นโค้งคาโทดิกและเส้นโค้งแอโนดิก

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

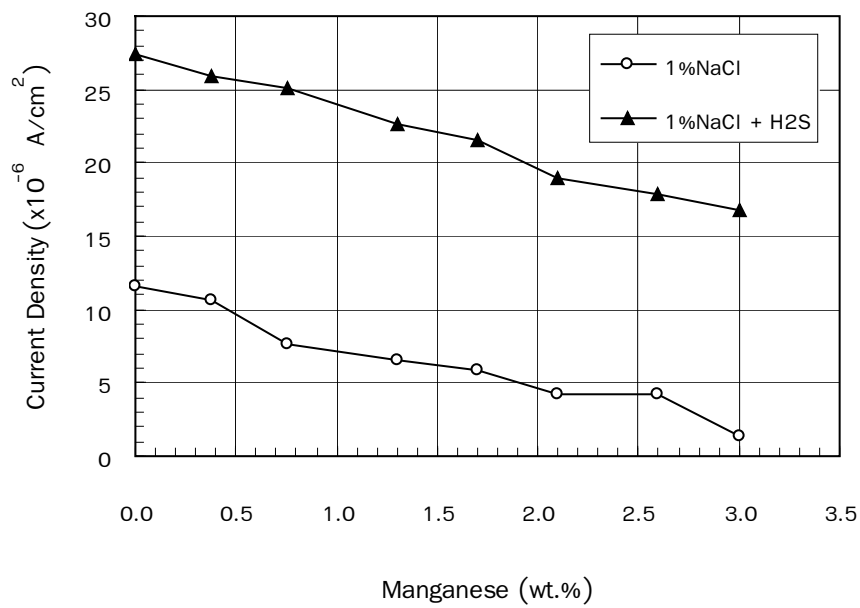


รูปที่ 4.30 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า  $E_{\text{corr}}$ ,  $E_{\text{pp}}$  และ  $E_p$  ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 °C

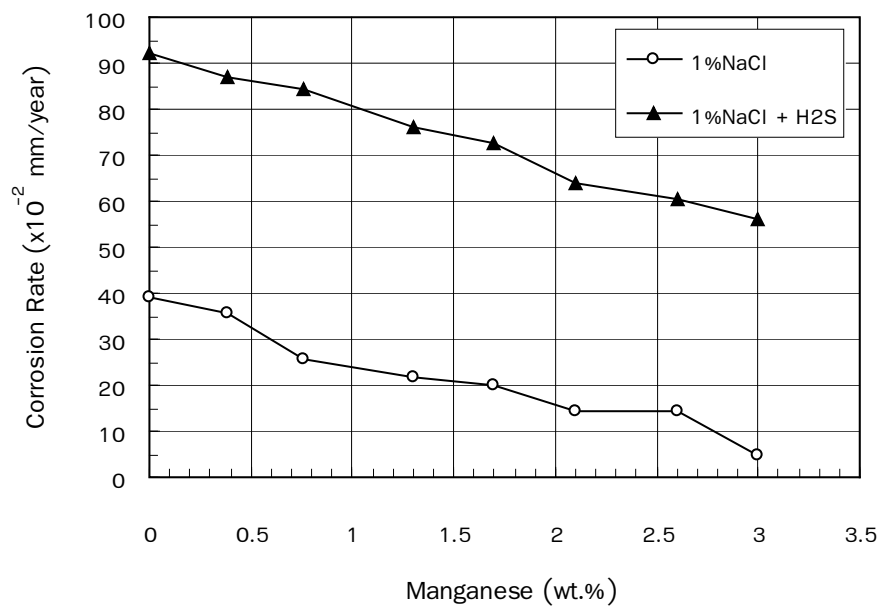


**รูปที่ 4.31** ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า  $I_{\text{corr}}$  ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 °C

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



รูปที่ 4.32 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงต่อค่า  $I_{\text{corr}}$  ในสภาวะที่มี 1%NaCl เปรียบเทียบกับสภาวะที่มี 1%NaCl อิ่มตัวด้วย H<sub>2</sub>S ที่อุณหภูมิ 25 °C



รูปที่ 4.33 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงต่อค่าอัตราการกัดกร่อน ในสภาวะที่มี 1%NaCl เปรียบเทียบกับสภาวะที่มี 1%NaCl อิ่มตัวด้วย H<sub>2</sub>S ที่อุณหภูมิ 25 °C

จากรูปที่ 4.32 และ 4.33 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน หรือ  $I_{\text{corr}}$  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 ( $E_{\text{corr}}$ ) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มพาสซีฟ ( $I_p$ ) อย่างชัดเจน โดยค่า  $E_{\text{corr}}$  และ  $I_p$  ของโลหะผสมที่มีแมงกานีส 0.38 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ -70 mV และ  $50.34 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  ตามลำดับ ซึ่ง  $E_{\text{corr}}$  มีค่าต่ำกว่าและ  $I_p$  มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากโลหะผสมที่ไม่มีแมงกานีส ( $E_{\text{corr}} = -132 \text{ mV}$ ,  $I_p = 117.58 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) ค่า  $E_{\text{corr}}$  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

## บทที่ 5

### การศึกษาอิทธิพลของธาตุดีบุกต่อคุณสมบัติการประสานในโลหะประสานทอง

#### 5.1 ความสำคัญของงานวิจัย

ภาวะวิกฤตการณ์ทางเศรษฐกิจที่เกิดขึ้นอย่างรุนแรงในประเทศไทยตั้งแต่ปีพุทธศักราช 2540 ได้สร้างความเสียหายแก่ทุกชนกลุ่มในสังคมไทย ผู้เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหา ก็ได้กำหนดมาตรการและแนวทางต่าง ๆ อาทิเช่น รมว.ศให้ใช้สินค้าไทย ลดสินค้าฟุ่มเฟือยจากต่างประเทศ และที่สำคัญคือการส่งเสริมการส่งออก แต่ในขณะเดียวกันปัญหาที่เราพบได้ในทุกๆอุตสาหกรรมโดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ก็คือ ในอุตสาหกรรมนั้นไม่สามารถผลิตสินค้าที่มีคุณภาพเพียงพอที่สามารถแข่งขันกับตลาดต่างประเทศได้ ทั้งนี้สืบเนื่องมาจากการขาดความรู้ความเข้าใจขั้นพื้นฐานอย่างแท้จริง ซึ่งโดยส่วนใหญ่ต่างก็ได้ทำตามประสบการณ์ที่ตนเองมีอยู่ หรือไม่ก็จากการรับเทคโนโลยีจากต่างชาติที่เข้ามาลงทุนโดยขาดความเข้าใจอย่างแท้จริง ทำให้ไม่สามารถพัฒนาเทคโนโลยีให้ก้าวไกลกว่าที่ควรจะเป็นได้

อุตสาหกรรมทองคำและเครื่องประดับ ต่างก็ประสบปัญหาดังกล่าวด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะในกลุ่มอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ซึ่งผู้ผลิตส่วนใหญ่ต่างก็ใช้ประสบการณ์จากบรรพบุรุษสืบทอดต่อกันมาในการผลิต โดยความรู้ทางด้านการผลิตทองคำและเครื่องประดับนี้จะเป็นความลับทางการค้า และมีหลากหลายตามประสบการณ์ของแต่ละร้านค้า แต่ทั้งนี้แล้วในโรงงานต่าง ๆ ก็ยังประสบปัญหาในด้านต่าง ๆ อยู่มาก ซึ่งทำให้ได้สินค้าที่ไม่ได้มาตรฐานเพียงพอที่จะแข่งขันกับต่างชาติได้ ปัญหาที่พบ อาทิเช่น รูปทรง ความแข็งแรง โลหะประสาน โดยในตัวหลังสุดนั้นจะพบว่าก็เป็นปัญหาที่สำคัญข้อหนึ่งทีเดียว

โลหะประสานที่ใช้ในอุตสาหกรรมบ้านเรามีทั้งที่นำเข้าจากต่างประเทศและผลิตขึ้นเอง การนำเข้าจากต่างประเทศทำให้สูญเสียเงินตราจำนวนหนึ่งอย่างน่าเสียดาย ทั้งที่โลหะประสานเหล่านี้สามารถผลิตขึ้นเองได้โดยไม่ยาก แต่ในการผลิตขึ้นเองในประเทศในปัจจุบันนี้ก็ประสบปัญหาด้านคุณสมบัติต่าง ๆ มากมาย เช่น ด้านคุณสมบัติของโลหะประสาน ความสามารถด้านความเปื่อยของโลหะประสาน สีของโลหะประสานไม่เข้ากันกับตัวที่จะประสาน ความต้านทานความผุกร่อนเมื่อผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลานาน ๆ และปัญหาสุดท้ายที่สำคัญและผู้ประกอบการส่วนใหญ่จะมองข้ามไปคือ ความปลอดภัยในการทำงานของช่าง เนื่องจากในโลหะประสานทองบางชนิดนั้นได้ผสมธาตุแคดเมียมเพื่อช่วยในการลดจุดหลอมเหลวของตัวประสานให้ต่ำลงและช่วยความสามารถด้านการเปื่อยด้วย แต่ธาตุแคดเมียมนี้มีจุดเดือดที่ต่ำและเป็นพิษด้วย ดังนั้นเมื่อสารนี้กลายเป็นไอจะเป็นอันตรายต่อปอดและไตอย่างรุนแรง เมื่อได้สูดดมเข้าไปในปริมาณที่มากและนาน ๆ ปัญหาที่ได้กล่าวมานั้นเกิดเนื่อง

จาก การขาดความรากพื้นฐานด้านโลหวิทยาของผู้ประกอบการ ซึ่งสิ่งนี้เองทำให้ลูกค้าทั้งในและต่างประเทศขาดความมั่นใจในการผลิต

โลหะประสานทองนั้นได้มีการนำมาใช้เป็นเวลานานพอ ๆ กับการเริ่มมีการใช้ทองคำและทองคำกระรัต ตั้งแต่ราวปี ค.ศ. 1854 มีความจำเป็นที่ต้องมีการใช้โลหะประสานควบคู่ไปด้วย เพื่อใช้ในการประสานรอยต่อต่าง ๆ ในช่วงแรกนั้นก็ได้นำแคดเมียมมาใช้ในงานประสานทองเนื่องจากมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำมาก แต่ในช่วงหลังก็ได้ล้มเลิกไปเนื่องจากเป็นสารพิษและมีอันตรายต่อผู้ใช้งานอย่างมาก จึงได้มีการพัฒนาโลหะประสานทองตัวอื่น ๆ ขึ้นมา โดยเริ่มมีการใช้โลหะชนิดอื่น ๆ ขึ้นเช่น สังกะสี อินเดียม ดีบุก จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าข้อมูลส่วนใหญ่จะเป็นความลับ และมีการถ่ายทอดเฉพาะในกลุ่มเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ข้อมูลพื้นฐานสามารถค้นคว้าจากเอกสารบทความที่มีข้อมูลจำกัดในระดับหนึ่งเท่านั้น ส่วนการศึกษาคุณสมบัติของโลหะประสานทองในที่นั้นจะศึกษาในทอง 14 กระรัต โดยมีการเติมสังกะสีลงไป ทั้งนี้เพราะยังไม่มีผู้ศึกษาอย่างละเอียดและขาดข้อมูลเชิงวิชาการ อีกทั้งในทองคำ 14 กระรัตต่างก็พบปัญหาอยู่มาก ซึ่งจะเป็นรากฐานที่สำคัญในการศึกษาโลหะประสานทองในกระรัตต่อ ๆ ไปได้ โดยจะดูคุณสมบัติต่าง ๆ โดยจะมีการศึกษาในส่วนของคุณสมบัติของโลหะประสาน สีที่ได้ คุณสมบัติด้านทางกล ความสามารถในการเปียก

ปัญหาด้านข้อมูลและเทคนิคทางด้านการผลิตที่มีอยู่อย่างจำกัด และด้านคุณภาพที่ไม่เพียงพอต่อการแข่งขันต่อนานาประเทศ ดังที่กล่าวข้างต้นมาแล้วนั้น เป็นปัญหาที่สำคัญทำให้เกิดผลกระทบต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมทองคำอย่างมาก ดังนั้นจึงทำให้มีความจำเป็นอย่างสูงในการศึกษาและวิจัยส่วนผสมโลหะประสานที่ใช้กับทอง 14 กระรัต โดยจะเป็นรากฐานที่สำคัญในการต่อยอดความรู้ในการที่จะพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตทองคำในประเทศขึ้นโดยไม่ต้องพึ่งพิงเทคโนโลยีต่างชาติ อีกทั้งยังจะเป็นเอกสารอ้างอิงที่สำคัญในการศึกษาต่อไป แลที่สำคัญจะเป็นประโยชน์ต่อวงการอุตสาหกรรมและพัฒนาประเทศในระยะยาวอีกด้วย

## 5.2 วัตถุประสงค์

- 5.2.1 เพื่อศึกษาส่วนผสมของดีบุก ที่เหมาะกับโลหะประสานทอง 14 กระรัต
- 5.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการวัดคุณสมบัติด้านการเปียกในโลหะประสานทอง 14 กระรัต

## 5.3 ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาตัวประสานทองที่ใช้กับทองคำ 14 กระรัต โดยมีการเติมโลหะทอง ทองแดง เงิน สังกะสี และดีบุก ในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน โดยใช้วิธีทดสอบแบบ Sessile drop เพื่อหาค่าความตึงผิวและมุมสัมผัส (Contact angle) เพื่อนำมาเปรียบเทียบความสามารถในการเปียก (wettability) ในส่วนผสมต่าง ๆ กัน

## 5.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 5.4.1 ทราบถึงปริมาณดีบุก ที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน
- 5.4.2 ทราบถึงอิทธิพลของดีบุก ที่มีต่อคุณสมบัติด้านการเปียก

## 5.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 5.5.1 ข้อมูลพื้นฐานด้านโลหวิทยาของโลหะประสาน

#### โลหะประสาน (Brazing)

การใช้งานทองคำนั้นบางครั้งมีความจำเป็นที่จะต้องเชื่อมประสานต่อรอยต่อต่าง ๆ หรือซ่อมแซมชิ้นงานนั้น ๆ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะใช้โลหะประสานขึ้น ในยุคแรก ๆ ของการใช้งานนั้น ได้มีการเติมทองผสมกับเงิน แต่ต่อมาได้มีการใช้ทองคำกะรัตกันมากขึ้น ดังนั้นจึงเกิดปัญหาขึ้นว่าเมื่อมีการใช้ทองคำกะรัตต่าง ๆ กันขึ้น จะต้องมีการใช้ตัวประสานที่มีส่วนผสมต่าง ๆ กันอีกหรือไม่ โดยได้มีการระบุถึง คุณสมบัติที่จำเป็นของตัวประสาน คือ เรื่องของสีของรอยประสาน โดยต้องมีการใช้ส่วนผสมให้ใกล้เคียงกับสีของทองคำที่นำมาประสานที่สุด และตัวประสานควรที่จะต้องมียุทธศาสตร์ที่น้อยกว่าชิ้นงานที่จะประสานและต้องมีคุณสมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกันจึงเป็นสิ่งสำคัญ

การใช้งานตัวประสานโดยทั่วไปจะทำโดยการรีดโลหะประสานให้เป็นแผ่นบาง ๆ และนำมาตัดหรืออัดให้เล็กลงกลายเป็นขนาดที่เหมาะสมประมาณ  $\frac{1}{4} * \frac{1}{4} * \frac{1}{100}$  นิ้ว<sup>3</sup> และตัวประสานยังถูกใช้ในรูปของผง (Dust) ก็ได้

#### คุณสมบัติของโลหะประสานทอง

โดยทั่วไปแล้วโลหะประสานใช้เพื่อทำการเชื่อมรอยต่อของวัสดุ 2 ชิ้น โดยการหลอมละลายวัสดุให้อุณหภูมิมากกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะประสาน ในขณะเดียวกันอุณหภูมิจะต้องไม่สูงกว่าอุณหภูมิที่เริ่มมีการไหลตัวของวัสดุที่จะเชื่อมต่อ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของโลหะประสานอีก

#### คุณสมบัติที่มีความสำคัญในโลหะประสาน

##### 1. อุณหภูมิที่ใช้งาน (Working Temperature)

อุณหภูมิที่ใช้ในการประสาน โดยทั่วไปมักจะสูงกว่าจุดหลอมเหลวของตัวประสานประมาณ 50 -100°C โดยจะต้องมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเริ่มไหลตัวของวัสดุที่จะประสาน ความแตกต่างระหว่างจุดหลอมเหลวของตัวประสานกับอุณหภูมิที่เริ่มมีการไหลตัวของวัสดุ ยังมีความแตกต่างกันมากยิ่งมีการไหลตัวดีขึ้น

##### 2. สี (Color)

หลังจากประสานโลหะเข้ากับวัสดุแล้ว ความกลมกลืนของสีเป็นสิ่งสำคัญในงานที่เกี่ยวข้องกับเครื่องประดับ โดยมีจุดประสงค์เพื่อความสวยงาม ซึ่งในการบ่งบอกถึงลักษณะของสีนั้นยากและ

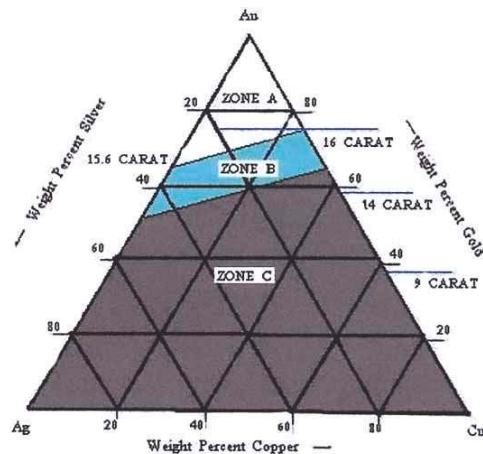
สับสนต่อการอธิบายในลักษณะของข้อมูลทางคุณภาพ แต่โชคดีที่ผ่านมาได้มีการใช้เครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ในการวัดค่าสี โดยจะช่วยลดข้อสงสัยหรือความคลุมเครือได้ โดยใช้มาตรฐาน CIELAB ในการวัดค่าสี

### 3.คุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties)

คุณสมบัติที่สำคัญ เช่นค่าความแข็งแรง และความแข็ง โลหะประสานต้องมีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการใช้งาน

### 4.ความต้านทานการกัดกร่อน

โลหะผสมทองคำนั้นจะมีความต้านทานการกัดกร่อนและต้านทานการหมองของสีค่อนข้างสูงตามปริมาณของทองคำในเนื้อวัสดุ จะเห็นได้จาก รูปที่ 5.1 ซึ่งแสดงความต้านทานการหมองของโลหะผสมทองคำ-ทองแดง-เงิน



รูปที่ 5.1 แสดงความต้านทานการหมองของโลหะผสมทองคำ-ทองแดง-เงิน

โดย           บริเวณ A แทน บริเวณที่ไม่มีการกัดกร่อนและการหมอง  
                  บริเวณ B แทน บริเวณที่เกิดการหมองในบรรยากาศซัลเฟอร์  
                  บริเวณ C แทน บริเวณที่เกิดการหมองและการกัดกร่อน

ซึ่งโดยทั่วไปจะมีความต้านทานต่อการหมองที่ปริมาณทองคำ มากกว่า 75% (มากกว่า 18 กระรัต)

### 5.ราคา

การเลือกใช้งานโลหะประสานนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงราคาของวัสดุที่จะใช้ด้วย เช่นการเลือกธาตุอินเดียม นั้น มีราคาที่สูงขึ้น (ราคาประมาณ 5 เท่าของเงิน) ในขณะที่เมื่อเลือกใช้งาน

โลหะประสานอื่น เช่น สังกะสี หรือดีบุก จะมรรคาถูกกว่าแต่คุณภาพที่ได้จะต่ำกว่าโลหะประสานที่มีธาตุอินเดียมผสม

#### 6. ส่วนผสมทางเคมีต้องไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม

ไอระเหยที่ออกมาจากโลหะผสมที่มีสารแคดเมียมผสมอยู่จะมีผลเกี่ยวกับปัญหาทางด้านปอดและไต โดยจะมีผลในระยะยาวทำให้ผู้ป่วยร้อยละ 20 ถึงแก่ความตาย

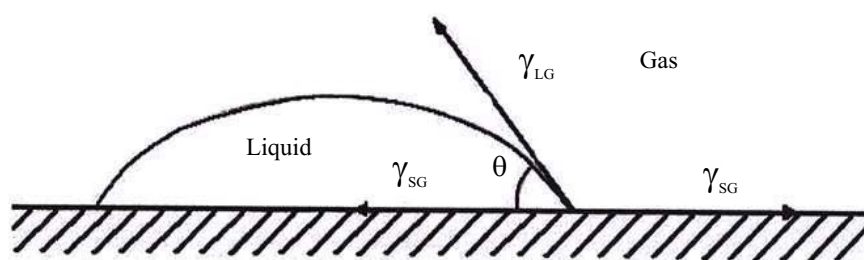
#### 7. ความสามารถในการเปียก (Wettability)

ในการประสานที่ดีนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องใช้โลหะประสานที่มีความสามารถในการเปียกที่ดี เพื่อที่จะทำให้มันสามารถไหลไปได้ครอบคลุมทั้งแบบ และทำให้มีความแข็งแรงพอเพียงที่จะยึดผิวสัมผัสนั้น

#### 5.5.2 การวัดความสามารถในการเปียก

ความสามารถในการเปียก คือ สิ่งที่แสดงให้เห็นว่า ของเหลวนั้น ๆ จะสามารถกระจายตัวไปบนผิวของของแข็งได้ดีเพียงไร ดังนั้นเมื่อของเหลวสามารถกระจายตัวได้ดี ก็คือมีความสามารถในการเปียกสูง ทำให้มีความแข็งแรงในการยึดให้ติดผิวสัมผัสได้ดี โดยเราสามารถแสดงความสามารถในการเปียกได้โดยการหาค่าออกมาในรูปของตัวเลข ดังนี้คือ มุมสัมผัส (Contact angle) และแรงตึงผิว (Surface Tension)

ถ้าของเหลวหยดลงบนฐานที่เป็นของแข็ง (Solid Substrate) ในบรรยากาศหนึ่ง ดังรูปที่ 5.2 มุมสัมผัส (Contact angle) คือมุม  $\theta$  จากสภาวะตามรูปนี้ สามารถแสดงความสัมพันธ์ของแรงตึงผิวทั้งสามได้ดังสมการที่ 5.1



รูปที่ 5.2 แสดงของเหลวในสมดุลกับของแข็งด้วยมุมสัมผัส  $\theta$

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos\theta \quad (5.1)$$

โดย  $\gamma_{SG}$  คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับก๊าซ (Solid – Gas)  
 $\gamma_{SL}$  คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับของเหลว (Solid – Liquid)  
 $\gamma_{LG}$  คือ แรงตึงผิวระหว่างของเหลวกับก๊าซ (Liquid - Gas)

$\theta$  คือ มุมสัมผัส (Contact angle)

ซึ่งเราสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\cos\theta = (\gamma_{SG} - \gamma_{SL}) / \gamma_{LG} \quad (5.2)$$

จะเห็นว่า  $\theta$  เป็นตัววัดความสามารถในการเปียกได้ ดังนี้

เมื่อ  $\theta < 90$  องศา คือ ของเหลวเปียกบนของแข็งนั้น

$\theta > 90$  องศา คือ ของเหลวไม่เปียกบนของแข็ง (non-wetting)

สมการที่ 5.1 นี้ เขียนโดย Young แต่มักจะอ้างถึงสมการของ Young-Dupre ด้วยเสมอ ดังสมการที่ 5.2 (ซึ่งเป็นการจัดรูปสมการใหม่) และยังสามารถแสดงออกมาในรูปของ Spreading Coefficient (SC) ดัง สมการที่ 5.3

$$SC = \gamma_{SG} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LG}) \quad (5.3)$$

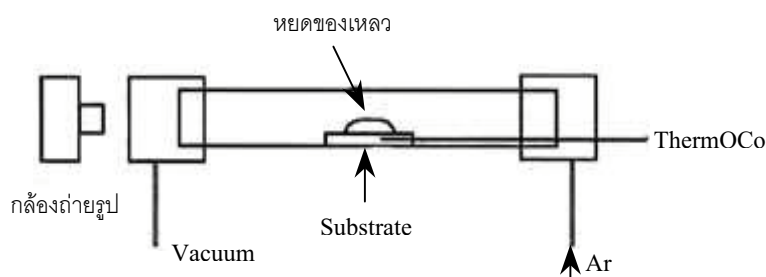
จากสมการที่ 5.1 ถึง 5.3 จะเห็นว่า ของเหลวนั้นสามารถเปียกบนของแข็งได้ดี จะมี ความสัมพันธ์ต่างกันตามแต่ค่าของ  $\theta, \gamma_{SG}, \gamma_{SL}, \gamma_{LG}$  เมื่อค่า  $\theta$  มีค่าต่ำ  $\gamma_{SG}$  จะมีค่าสูง และ  $\gamma_{SL}, \gamma_{LG}$  มีค่าต่ำ

ค่า  $\theta, \gamma_{LG}$  สามารถแสดงได้ในรูปของพลังงานได้เป็น  $W = \gamma_{LG} (1 + \cos\theta)$

โดย  $W = \text{Work of Adhesion}$

การวัด Surface Tension มีหลายวิธีที่ใช้กัน แต่ได้ค่าที่ไม่เที่ยงตรงนัก อย่างไรก็ตามวิธี ที่ได้รับการยอมรับและให้ค่าที่ค่อนข้างเที่ยงตรง ได้แก่ Sessile drop, Pendant drop method, Drop weight method

ซึ่งในงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ได้จากการค้นคว้าจะเลือกใช้วิธี Sessile drop และ Pendant drop เพราะว่าวิธีเหล่านี้เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง สามารถทำที่บรรยากาศใดก็ได้ สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ดี โดยในวิธี Sessile drop นั้นได้มีผู้ทดลองในรูปแบบต่างๆ กัน เช่น การวัดมุมโดยตรงจากหยดของเหลว หรือวัดทางอ้อมจากการถ่ายรูปออกมา ดังรูปที่ 5.3



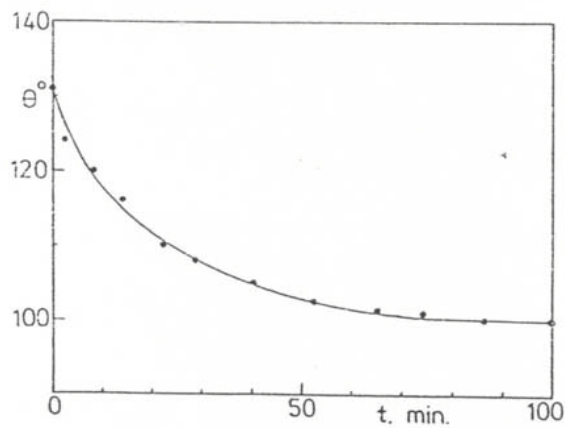
รูปที่ 5.3 เครื่องมือทดสอบแบบ sessile drop

ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าแรงดึงผิวและมุมสัมผัส

ในการทดลอง Sessile drop นั้นจะพบว่าปัจจัยต่างๆ ดังนี้

#### 1. เวลาที่ใช้ในการทดลอง

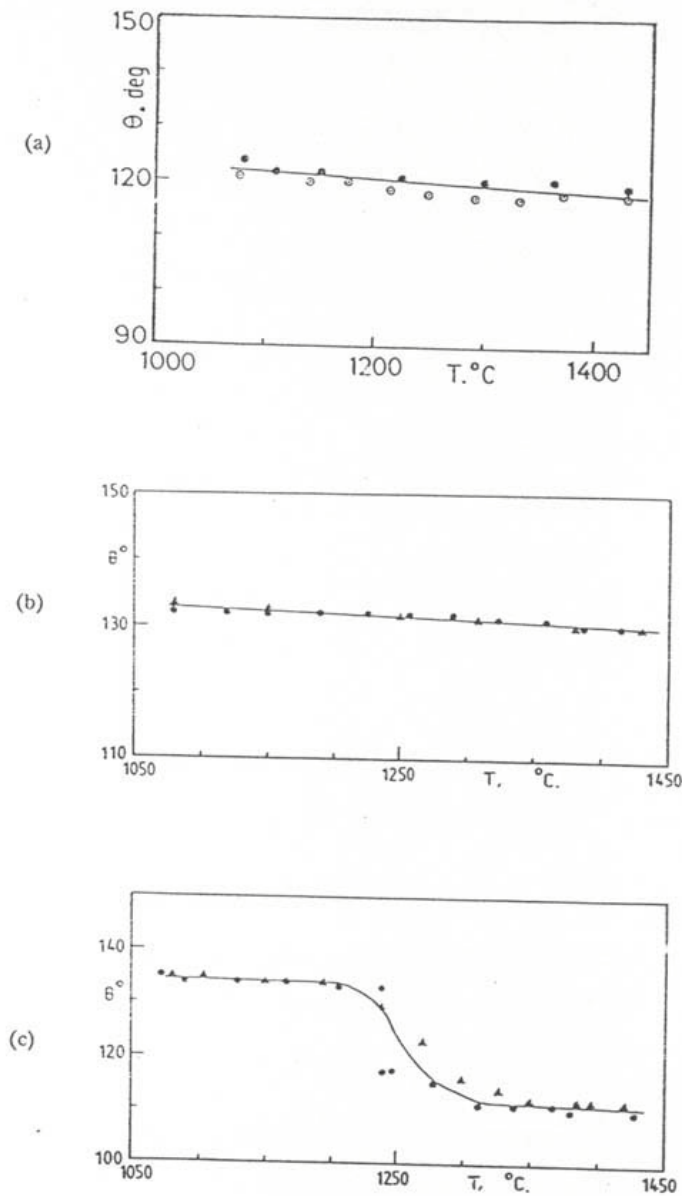
เมื่อให้ความร้อนแต่โลหะจนหลอมเหลวแล้วที่อุณหภูมิคงที่ ที่จุด ๆ หนึ่ง จะเห็นว่าเมื่อปล่อยเวลาผ่านไป และในขณะเดียวกันก็วัดค่ามุมสัมผัสก็จะเห็นได้ว่าค่าจะลดลงและจะค่อย ๆ คงที่ที่ค่า ๆ หนึ่ง ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับมุมสัมผัสของทองคำบน TiC ที่ 1100°C

#### 2. อุณหภูมิ

ขณะที่โลหะถึงจุดหลอมเหลว โลหะจะปรับตัวอยู่ในของเหลว เมื่อเราให้ความร้อนขึ้นไปเรื่อย ๆ ในโลหะส่วนใหญ่ นั้นค่ามุมสัมผัสจะมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.5

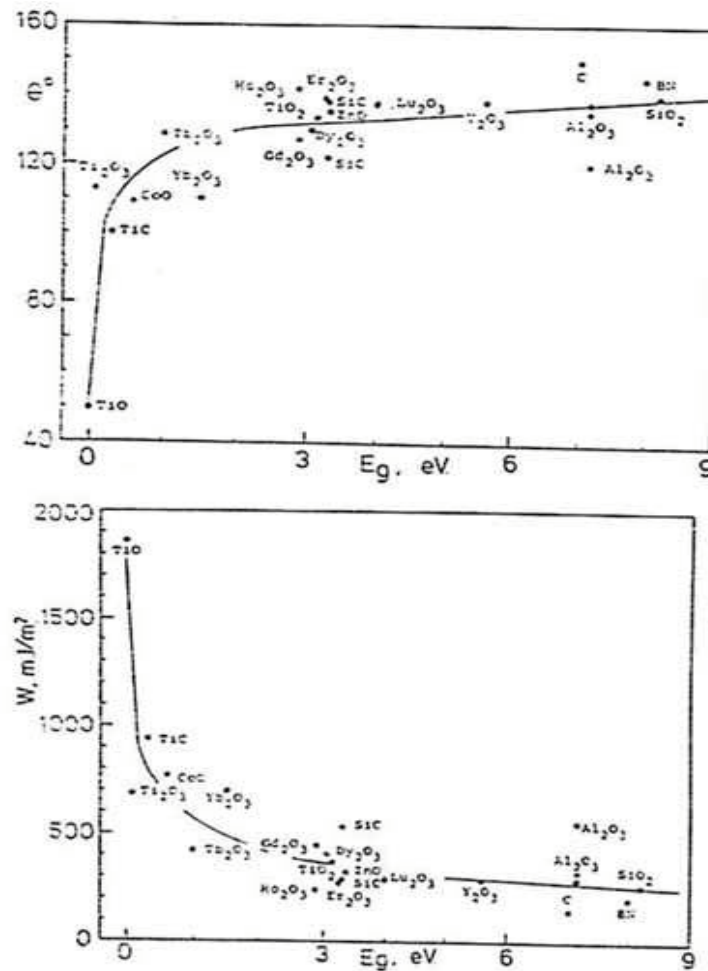


รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับมุมสัมผัสของทอง  
บน SiC(a), TiO<sub>2</sub>(b) และ ZnO(c)

### 3.ฐานรองชิ้นงาน

ฐานรองชิ้นงานในการทดสอบ Sessile drop เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อมุมสัมผัส ซึ่งในโลหะโดยทั่วไป เช่น พวกทองแดง นิกเกิล เหล็ก โคบอลต์ ซิลิคอน นั้น ฐานรองชิ้นงานจะมีผลต่อโลหะเหล่านี้ โดยจะเห็นได้ว่า ฐานจำพวก Insulating (คือมีค่า  $E_g > 4\text{eV}$ ) และพวกที่เป็น Semiconducting (คือมีค่า  $E_g < 4\text{eV}$ ) จะเป็นตัวแบ่งให้โลหะเหล่านี้ว่าโลหะนั้นจะเปียก (Wetting) หรือไม่บนฐานนั้น ๆ ซึ่งในพวก Semiconducting จะทำให้โลหะเปียกได้ง่าย แต่ในกรณีของทองนั้น ฐานไม่ค่อยมีผลมาก

นัก ยกเว้นกรณีที่เป็น TiO เท่านั้น ดังนั้นในการทดลองหาค่าแรงดึงผิวและมุมสัมผัสของโลหะผสมทองคำ ไม่ควรเลือกฐานรองชิ้นงานเป็น TiO ดังแสดงในรูปที่ 5.6 (บน) ซึ่งจะพบว่าเมื่อใช้ TiO เป็นฐานรองชิ้นงานจะเกิดการเปียกบนฐานรอง (มุมสัมผัสน้อยกว่า 90 องศา) ทำให้ไม่สามารถวัดค่าแรงดึงผิวได้ ดังนั้นในการทดลองควรเลือกใช้ฐานรองชิ้นงานชนิดอื่นๆ แทน เช่น  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$



รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสและ Work of adhesion ของทองบนฐาน ต่าง ๆ กัน กับ faction of bandap energies  $E_g$

### 5.5.3 การนำผลงานวิจัยในอดีตมาใช้ประโยชน์

สาเหตุที่เลือกใช้ปริมาณสังกะสี 10% ใส่ในโลหะประสานทอง เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยเรื่อง การศึกษาความสามารถในการเปียกของโลหะประสานที่ผสมสังกะสีภายใต้โครงการพัฒนาส่วนผสมและเทคนิคการผลิตโลหะที่ใช้ประกอบอัญมณี โดยได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) ปี 2540-2542 ซึ่งได้ทำการศึกษาผลของการเติมสังกะสีลงในโลหะประสานทอง เพื่อจะทำให้คุณสมบัติการเปียกของโลหะประสานทอง พบว่าการที่มีสังกะสีในโลหะประสานทองในปริมาณ 10% โดยน้ำหนักนั้นมีค่าดีที่สุดซึ่งสามารถพิจารณาได้จากข้อมูลต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 แสดงผลของส่วนผสมโลหะประสานทองและช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว

| หมายเลข   | ทองคำ (wt%) | เงิน (wt%) | ทองแดง (wt%) | สังกะสี (wt%) | จุดหลอมเหลว (°C) | จุดที่เริ่มมีการไหลตัว (°C) |
|-----------|-------------|------------|--------------|---------------|------------------|-----------------------------|
| B101-1    | 58.68       | 20.60      | 19.80        | 0.92          |                  |                             |
| B101-2    | 58.63       | 15.40      | 25.41        | 0.66          | 810.4            | 825.0                       |
| B103-1    | 61.80       | 19.20      | 16.50        | 2.50          |                  |                             |
| B103-2    | 58.33       | 17.47      | 20.01        | 2.20          | 785.8            | 803.9                       |
| B105-1    | 58.46       | 15.60      | 22.54        | 3.40          |                  |                             |
| B105-2    | 58.71       | 20.48      | 17.44        | 3.37          | 775.5            | 792.5                       |
| B109-1    | 63.76       | 20.18      | 11.63        | 4.43          | 751.3            | 777.1                       |
| B107-1    | 58.36       | 16.29      | 20.89        | 4.47          | 774.1            | 791.4                       |
| B117-1    | 61.98       | 12.82      | 15.18        | 10.02         |                  |                             |
| B117-2    | 60.11       | 12.00      | 17.81        | 10.08         | 720.6            | 744.3                       |
| S002      | 58.69       | 15.68      | 25.63        | -             | 822.8            | 840.3                       |
| B109-AC21 | 51.71       | 19.20      | 23.72        | 5.37          | 678.5            | 698.9                       |
| B109-AC12 | 52.46       | 8.01       | 34.07        | 5.46          | 726.6            | 740.7                       |

จากตารางที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่าผลของสังกะสีทำให้จุดหลอมเหลวลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยโลหะประสานจะมีค่า Liquidus อยู่ระหว่าง 750 – 820 °C ซึ่งการเพิ่มสังกะสีลงไปปริมาณ 10.08% โดยน้ำหนักจะมีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ 720.6 – 744.3 °C ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุด

#### ผลของคุณสมบัติทางกล

##### 1. ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness)

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดสอบความแข็งของโลหะประสานทอง

| หมายเลข | ทองคำ (wt%) | เงิน (wt%) | ทองแดง (wt%) | สังกะสี (wt%) | ค่าความแข็ง HV (โหลด 300 กรัม) |
|---------|-------------|------------|--------------|---------------|--------------------------------|
| S002    | 58.69       | 15.68      | 25.63        | 0             | 204.21                         |
| B103-2  | 58.33       | 17.47      | 22.01        | 2.20          | 188.68                         |
| B105-2  | 58.71       | 20.48      | 17.44        | 3.37          | 167.92                         |
| B105-2  | 58.46       | 15.60      | 22.54        | 3.40          | 177.96                         |
| B109-1  | 63.76       | 20.18      | 11.63        | 4.43          | 148.91                         |
| B107-1  | 58.36       | 16.29      | 20.89        | 4.47          | 169.87                         |
| B117-2  | 60.11       | 12.00      | 17.81        | 10.08         | 195.41                         |

จากตารางที่ 5.2 จะเห็นว่าค่าความแข็งของโลหะประสานทองจะมีค่าลดลงในช่วงแรก (ตั้งแต่ 0 – 4.47%) และจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น โดยผลของความแข็งนี้จะขึ้นอยู่กัปริมาณส่วนผสมของ

สังกะสีและของทองแดง ซึ่งจากตารางที่ 5.2 จะเห็นว่าปริมาณส่วนผสมของทองแดงมีช่วงกว้างมาก โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง 11.63 – 25.63%

## 2. ผลการทดสอบแรงดึงแบบ Lap Shear

ตารางที่ 5.3 แสดงผลทดสอบแรงดึงแบบ Lap Shear

| หมายเลข | ปริมาณสังกะสี (wt%) | Stress At Max.Load (Mpa) |
|---------|---------------------|--------------------------|
| B101.2  | 0.66                | 217.8                    |
| B103-2  | 2.20                | 196.2                    |
| B105-2  | 3.37                | 190.3                    |
| B107-1  | 4.47                | 228.6                    |
| B117-2  | 10.08               | 321.8                    |

จากตารางที่ 5.3 เมื่อพิจารณาถึงค่าส่วนผสมของสังกะสีจะพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสังกะสีลงในโลหะ ประสานทองมากขึ้น จะทำให้ความเค้นสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ Lap Shear เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

## 3. ผลคุณสมบัติด้านการเปื่อย

ตารางที่ 5.4 แสดงผลของมูมสัมผัสน้ำและแรงดึงผิว

| หมายเลข | ปริมาณสังกะสี (wt%) | แรงดึงผิว (mN/m) | มูมสัมผัสน้ำ (องศา)<br>(คำนวณจากโปรแกรม) | มูมสัมผัสน้ำ (องศา)<br>วัดจากค่าจริง |
|---------|---------------------|------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|
| S002    | 0                   | 1092.09          | 145.8                                    | 148.9                                |
| B101-2  | 0.66                | 658.99           | 133.2                                    | 136.7                                |
| B103-2  | 2.20                | -                | -                                        | 130.0                                |
| B105-1  | 3.40                | 677.00           | 140.4                                    | 132.3                                |
| B107-1  | 4.47                | 377.90           | 133.2                                    | 124.0                                |
| B109-1  | 4.43                | -                | -                                        | 123.8                                |
| B117-2  | 10.08               | -                | -                                        | 60.4                                 |

หมายเหตุ - หมายถึงไม่สามารถหาค่าได้ เนื่องจากรูปร่างไม่สมมาตร

ตารางที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าแรงตึงผิวและมุมสัมผัสยังต่ำ แสดงถึงความสามารถในการเปียกที่ดี ในการทดลองนี้ได้ใช้วิธีการคำนวณค่าแรงตึงผิวแบบ Axisymmetric Drop Shape Analysis โดยจะพบว่าชิ้นงานที่ไม่มีสังกะสีและชิ้นงานที่มีปริมาณสังกะสีต่ำ ๆ สามารถวัดค่าแรงตึงผิวได้ แต่ถ้าปริมาณสังกะสีสูง ๆ จะไม่สามารถวัดค่าได้ เนื่องจากแรงภายในไม่เพียงพอที่จะจัดรูปร่างของหยดของเหลวได้

## 5.6 ระเบียบวิธีการวิจัย

### 5.6.1 วัสดุดิบ

วัสดุดิบที่ใช้ในการทดลองนี้มี ทองคำ เงิน ทองแดง สังกะสี และดีบุก ซึ่งในการเตรียมตัวอย่างทดลองนั้น จะมีความบริสุทธิ์วัสดุดิบ 99% ขึ้นไป โดยแสดงค่าความบริสุทธิ์ของวัสดุดิบในตารางที่ 2.3.5

ตารางที่ 5.5 แสดงค่าความบริสุทธิ์ของวัสดุดิบ

| ชนิดของโลหะ | ค่าความบริสุทธิ์ | ลักษณะของวัสดุดิบ |
|-------------|------------------|-------------------|
| ทองคำ       | 99.99            | เม็ด              |
| เงิน        | 99.9             | เม็ด              |
| ทองแดง      | 99.9             | เม็ด              |
| สังกะสี     | 99.9             | เม็ด              |
| ดีบุก       | 99.97            | แผ่น              |

### 5.6.2 เครื่องมือที่ใช้

5.6.2.1 เตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ (Induction furnace)

5.6.2.2 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)

5.6.2.3 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Tensile Test)

5.6.2.4 เตาเผาโลหะแบบท่อ (Tube furnace)

5.6.2.5 เครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers hardness tester)

### 5.6.3 การเตรียมชิ้นงานเบื้องต้น

5.6.3.1 โลหะผสมมาตรฐาน (Master alloy)

เตรียมโลหะผสมมาตรฐานของทองแดงและสังกะสี (หรือทองเหลือง) เพื่อนำมาใช้ในการหล่อตัวโลหะประสานทองโดยมีส่วนผสมดังตารางที่ 5.6 เพื่อลดการสูญเสียของปริมาณสังกะสีขณะหลอมตัวประสานทอง

ตารางที่ 5.6 แสดงส่วนผสมของโลหะมาสเตอร์ (Master alloy)

| หมายเลข | ส่วนผสม (wt %) |        |
|---------|----------------|--------|
|         | สังกะสี        | ทองแดง |
| M01     | 45             | 55     |

หมายเหตุ : M แทน Master alloy

## 5.6.3.2 ตัวประสานทอง

ตัวประสานทองมีส่วนผสมของทองคำเป็น 58.5% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้เป็นส่วนผสมอื่นๆ โดยมีอัตราส่วนของเงินกับทองแดง เป็น 1:1 ส่วนสังกะสีที่ใส่มีค่า 10% คงที่ (เนื่องจากเป็นค่าที่ให้ wettability ดีที่สุดจากรายงานวิจัยซึ่งเคยได้รับทุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย เมื่อปี พ.ศ. 2540 – 2542 และดีบุกที่ใส่จะแปรผันตั้งแต่ 0.5% จนถึง 3.0% โดยน้ำหนัก โดยจะมีการเติมทองเหลืองลงไปเพื่อให้ได้โลหะประสานทอง ดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 แสดงส่วนผสมของตัวประสานทองคำ 14 กระรัต

| หมายเลข | ส่วนผสม (wt %) |       |        |         |       |
|---------|----------------|-------|--------|---------|-------|
|         | ทองคำ          | เงิน  | ทองแดง | สังกะสี | ดีบุก |
| B01     | 58.5           | 15.75 | 15.75  | 10.0    | 0     |
| B02     | 58.5           | 15.50 | 15.50  | 10.0    | 0.5   |
| B03     | 58.5           | 15.25 | 15.25  | 10.0    | 1.0   |
| B04     | 58.5           | 15.00 | 15.00  | 10.0    | 1.5   |
| B05     | 58.5           | 14.75 | 14.75  | 10.0    | 2.0   |
| B06     | 58.5           | 14.50 | 14.50  | 10.0    | 2.5   |
| B07     | 58.5           | 14.25 | 14.25  | 10.0    | 3.0   |

หมายเหตุ : B แทน โลหะประสาน(Brazing)

## 5.6.3.3 ทองคำผสม 14 กระรัต

ทำโดยผสมทองคำ และเงิน ในอัตราส่วนดังตารางที่ 5.8 โดยทำการหลอมและเทลงแบบหล่อ หลังจากนั้นทำความสะอาดและนำไปรีดให้ได้ความหนาประมาณ 0.7 มิลลิเมตร เพื่อที่จะนำไปตัดและทำเป็นชิ้นงานที่จะใช้ในการเชื่อมต่อ

โดยจะนำชิ้นงานที่ผ่านการรีดนั้นมาทำการตัดแบ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดความกว้าง 4.5 มิลลิเมตร และความยาว 12 มิลลิเมตร หนา 0.7 มิลลิเมตร

ตารางที่ 5.8 แสดงส่วนผสมของทองคำผสม 14 กระรัตที่จะถูกประสาน

| หมายเลข | ส่วนผสม (wt %) |        |
|---------|----------------|--------|
|         | เงิน           | ทองแดง |
| S01     | 16.5           | 25     |

หมายเหตุ : S แทนโลหะผสมทองที่จะถูกประสานโดย

โลหะประสานทองในตารางที่ 5.3

#### 5.6.3.4 ฐาน (Substrate)

ฐานที่ใช้ในการทดสอบกับ Sessile drop method โดยเป็น อะลูมินา(Alumina) หนา 2 มิลลิเมตร ความกว้าง 2 เซนติเมตร ความยาว 2 เซนติเมตร

#### 5.6.4 ขั้นตอนการทดลองโดยละเอียด

5.6.4.1 หลอมทองแดงกับสังกะสีเป็นทองเหลือง (โลหะมาสเตอร์) ด้วยเตาหลอมโลหะแบบเหนียวหน้าที่อุณหภูมิ 1100 °C โดยจะทำการหลอมทองแดงก่อน รอจนทองแดงที่ใส่ในเตาหลอมละลายแล้วจึงทำการเติมสังกะสีลงไป เพื่อป้องกันการสูญเสียของสังกะสีในขณะทำการหลอม โดยให้มีส่วนผสมตามตารางที่ 5.6 หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์ส่วนผสมด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์

5.6.4.2 ทำการหลอมส่วนผสมของทองคำ เงิน และทองแดง (ที่เพิ่มเข้าไปเพื่อให้ได้ส่วนผสมดังตารางที่ 5.7) บนเบ้ากราไฟต์ด้วย Burner (ใช้ก๊าซบิวเทนเป็นเชื้อเพลิง) แล้วใส่ผงบอแรกซ์ปริมาณเล็กน้อย เพื่อทำหน้าที่เป็นฟลักซ์ควบคุมบรรยากาศบนเบ้ากราไฟต์ เมื่อส่วนผสมละลายเข้าด้วยกันแล้ว จึงเติมทองเหลืองและดีบุกลงไป แล้วกวนให้เข้ากัน หลังจากนั้นเทลงบนแบบหล่อกราไฟต์ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 มิลลิเมตร สูง 5 เซนติเมตร เมื่อชิ้นงานเย็นตัวลงแล้วนำชิ้นงานไปทำความสะอาดและตัดแบ่งเพื่อนำไปวิเคราะห์หาส่วนผสมทางเคมี ทดสอบ Sessile drop ทดสอบ DTA ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง วัดความแข็ง และทำการทดสอบ Lap shear

5.6.4.3 หากจุดหลอมเหลวของโลหะประสานด้วยเครื่อง DTA (Differential thermal analysis) โดยใช้ชิ้นงานที่ได้จากข้อ 5.6.4.2 นำหนักชิ้นงานทดสอบประมาณ 15-30 มิลลิกรัม บรรยากาศไนโตรเจน และให้ความร้อนด้วยอัตรา 10°C ต่อนาที ตั้งแต่อุณหภูมิห้องไปจนถึง 1000°C

5.6.4.4 นำชิ้นงานจากข้อ 5.6.4.2 กับฐานอะลูมินา ที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 600, 800, 1000, 1200 มาทำการทดสอบแบบ Sessile drop method โดยใช้เครื่องที่ดัดแปลงมาจากเตาเผาโลหะแบบท่อ (Tube furnace) ชิ้นงานทดสอบมีน้ำหนักประมาณ 0.5-2 กรัม รูปร่างทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.6 เซนติเมตร (ขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 600 , 800 , 1000 , 1200 แล้วทำความสะอาดด้วยอะซิโตนก่อนเริ่มทดสอบ) ปรับอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องจนถึงประมาณ 1000°C ควบคุมบรรยากาศด้วยก๊าซอาร์กอน

5.6.4.5 ทดสอบความแข็งของโลหะประสานทองที่ได้สภาพหลังจากการหล่อ (As Cast) โดยขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 600, 800, 1000, 1200 และขัดละเอียดด้วยผงเพชรตั้งแต่เบอร์ 9, 3, ¼ ไมครอน และนำไปทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ ใช้น้ำหนัก 300 กรัม เวลา 30 วินาที

#### 5.6.4.6 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

### 5.6.5 ระเบียบและวิธีการตรวจสอบวิเคราะห์ผล

#### 5.6.5.1 การตรวจสอบค่าส่วนผสมทางเคมี

##### ตารางที่ 5.9 วิธีการวิเคราะห์

| หมายเลข | ธาตุ | วิธีการวิเคราะห์ | สถานที่วิเคราะห์            |
|---------|------|------------------|-----------------------------|
| 1       | Au   | Galvimeric       | บ.บางกอกแอสเสย์ออฟฟิส จำกัด |
| 2       | Ag   | Galvimeric       |                             |
| 3       | Cu   | AA               | กรมวิทยาศาสตร์บริการ        |
| 4       | Zn   | AA               |                             |
| 5       | Sn   | AA               |                             |

#### 5.6.5.2 การตรวจสอบขนาดของเกรน

เตรียมชิ้นงานที่ได้จากการกัดกรด ด้วยสารเคมี 5%KCN + 5%(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> โดยวัดขนาดด้วยวิธี Linear Intercept หรือ Heyn ตามมาตรฐาน ASTM ที่ E112

#### 5.6.5.3 การตรวจวัดค่าความแข็ง

ใช้การตรวจวัดค่าความแข็งแบบ ไมโครวิกเกอร์ ด้วยน้ำหนัก 300 กรัม วัดระยะอินเดนททั้งหมด 2 แกน โดยใช้เครื่องคำนวณค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ หน่วย (Pa) จากสมการที่ 1 ออกมา โดยวัดตามหน้าตัดขวางของชิ้นงาน ห่างจากด้านริมของชิ้นงาน 0.1 มิลลิเมตร และรอยวัดต่อไปห่างจากรอยแรกทุก ๆ 0.5 มิลลิเมตร

$$HV = 1.8544 \cdot P/a^2 \quad (5.4)$$

เมื่อ  $P$  = น้ำหนักกด (kg)

$a$  = ระยะอินเดนท (mm)

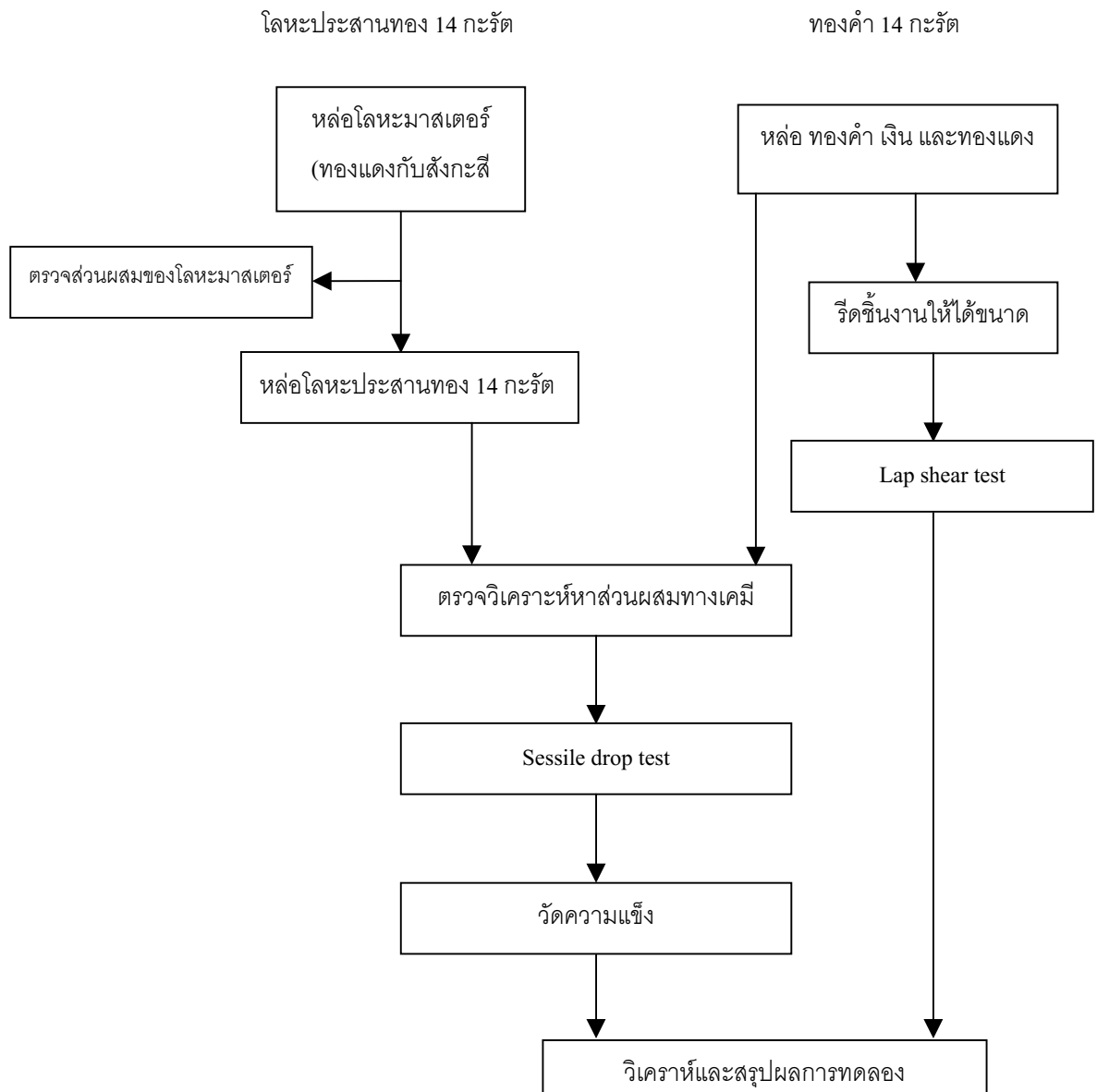
#### 5.6.5.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ตรวจสอบเพื่อดูความเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางจุลภาคของทองคำ 14 กระรัต โดยใช้สารเคมี ดังตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 แสดงสารเคมีที่ใช้ในการกัดกรดสำหรับโลหะผสมทองคำ 14 กระรัต

| หมายเลข | สารเคมี                                                                              | ระยะเวลาที่กัด     | จุดประสงค์                                                                                                 |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1       | 5%KCN+5%(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                | 1-7 นาที           | เพื่อแสดงขอบเกรน                                                                                           |
| 2       | (Conc.HCl + Conc.HNO <sub>3</sub> )<br>อัตราส่วน 3 ต่อ1 ปริมาณ<br>30% เจือจางด้วยน้ำ | 20 วินาที – 2 นาที | เพื่อแสดงรายละเอียดภายในเกรน (จะเกิดคราบของฟิล์มคลอไรด์ขณะกัด ให้ใช้แอมโมเนียเช็ดชิ้นงานเพื่อกำจัดคราบออก) |

#### 5.6.6 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลอง



## 5.7 ผลการทดลอง

### 5.7.1 ผลของส่วนผสมและช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว

ในการทำโลหะประสานทองนั้นจะเริ่มต้นจากการหลอมโลหะผสมมาสเตอร์อัลลอยของทองแดงและสังกะสีก่อน โดยโลหะผสมมาสเตอร์อัลลอยนั้นจะหลอมมาจากเตาหลอมแบบเหนียวนำแล้วนำไปผสมกับทองคำ เงิน และดีบุก ส่วนผสมดังตารางที่ 5.11 แล้วทำการหลอมในเบ้ากราไฟต์โดยใช้ก๊าซปิเทนเป็นเชื้อเพลิงพ่นด้วยหัวพ่นในการหลอม เมื่อวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีจะได้ตามตารางที่ 5.12 ส่วนช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวนั้นจะหาได้จากการนำชิ้นงานที่มีส่วนผสมดังตารางที่ 5.12 ไปทำการทดสอบด้วยเครื่อง Differential Thermal Analysis (DTA) ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 5.13

ตารางที่ 5.11 แสดงผลของส่วนผสมทางเคมีตั้งต้นของโลหะประสานทอง

| หมายเลข       | ทองคำ (wt%) | เงิน (wt%) | ทองแดง (wt%) | สังกะสี (wt%) | ดีบุก (wt%) |
|---------------|-------------|------------|--------------|---------------|-------------|
| B01-3(0.0%Sn) | 8.56        | 15.47      | 15.66        | 10.23         | 0           |
| B02-3(0.5%Sn) | 58.67       | 15.26      | 15.31        | 10.27         | 0.48        |
| B03-2(1.0%Sn) | 58.73       | 14.98      | 15.08        | 10.23         | 0.97        |
| B04-2(1.5%Sn) | 58.72       | 14.82      | 14.75        | 10.20         | 1.50        |
| B05-1(2.0%Sn) | 58.65       | 14.50      | 14.65        | 10.25         | 1.93        |
| B06-1(2.5%Sn) | 58.65       | 14.30      | 14.34        | 10.23         | 2.47        |
| B07-1(3.0%Sn) | 58.64       | 13.99      | 14.16        | 10.24         | 2.95        |

ตารางที่ 5.12 แสดงส่วนผสมทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์

| หมายเลข       | ทองคำ (wt%) | เงิน (wt%) | ทองแดง (wt%) | สังกะสี (wt%) | ดีบุก (wt%) |
|---------------|-------------|------------|--------------|---------------|-------------|
| B01-3(0.0%Sn) | 58.69       | 15.26      | 15.80        | 9.90          | 0           |
| B02-3(0.5%Sn) | 59.05       | 14.45      | 15.00        | 9.40          | 0.47        |
| B03-2(1.0%Sn) | 59.27       | 15.02      | 15.00        | 9.00          | 1.07        |
| B04-2(1.5%Sn) | 58.52       | 14.36      | 14.60        | 9.30          | 1.40        |
| B05-1(2.0%Sn) | 59.14       | 14.62      | 14.70        | 9.40          | 2.07        |
| B06-1(2.5%Sn) | 58.80       | 13.66      | 14.40        | 9.20          | 2.62        |
| B07-1(3.0%Sn) | 59.01       | 13.25      | 13.80        | 8.70          | 3.37        |

หมายเหตุ : ปริมาณของทองคำและเงินหาได้จากการตรวจสอบด้วยวิธี Galvimeric

ปริมาณของทองแดงและสังกะสีหาได้จากการตรวจสอบด้วยวิธี AA

ปริมาณของดีบุกหาได้จากการตรวจสอบด้วย SEM

ตารางที่ 5.13 แสดงผลของส่วนผสมและอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะประสานทอง

| หมายเลข       | ทองคำ<br>(wt%) | เงิน<br>(wt%) | ทองแดง<br>(wt%) | สังกะสี<br>(wt%) | ดีบุก<br>(wt%) | จุดหลอมเหลว<br>(°C) | จุดที่เริ่มมีการไหลตัว<br>(°C) |
|---------------|----------------|---------------|-----------------|------------------|----------------|---------------------|--------------------------------|
| B01-3(0.0%Sn) | 58.69          | 15.26         | 15.80           | 9.90             | 0              | 777.9               | 750.2                          |
| B02-3(0.5%Sn) | 59.05          | 14.45         | 15.00           | 9.40             | 0.47           | 775.0               | 728.8                          |
| B03-2(1.0%Sn) | 59.27          | 15.02         | 15.00           | 9.00             | 1.07           | 768.1               | 701.7                          |
| B04-2(1.5%Sn) | 58.52          | 14.36         | 14.60           | 9.30             | 1.40           | 759.5               | 722.6                          |
| B05-1(2.0%Sn) | 59.14          | 14.62         | 14.70           | 9.40             | 2.07           | 757.1               | 704.5                          |
| B06-1(2.5%Sn) | 58.80          | 13.66         | 14.40           | 9.20             | 2.62           | 750.6               | 698.5                          |
| B07-1(3.0%Sn) | 59.01          | 13.25         | 13.80           | 8.70             | 3.37           | 745.9               | 692.8                          |

## 5.7.2 ผลของคุณสมบัติทางกล

## 5.7.2.1 ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness)

ทำการทดสอบความแข็งโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ ซึ่งใช้น้ำหนักกด ขนาด 300 กรัม เวลากด 30 วินาที ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.14 แสดงผลการทดสอบความแข็งเฉลี่ยของโลหะประสานทอง 14 กระด

| หมายเลข       | ทองคำ<br>(wt%) | เงิน<br>(wt%) | ทองแดง<br>(wt%) | สังกะสี<br>(wt%) | ดีบุก<br>(wt%) | ค่าความแข็ง HV<br>(300 กรัม) | %ความแข็งที่เปลี่ยนแปลงไป |
|---------------|----------------|---------------|-----------------|------------------|----------------|------------------------------|---------------------------|
| B01-3(0.0%Sn) | 58.69          | 15.26         | 15.80           | 9.90             | 0              | 126.6                        | 0                         |
| B02-3(0.5%Sn) | 59.05          | 14.45         | 15.00           | 9.40             | 0.47           | 128.6                        | 1.57                      |
| B03-2(1.0%Sn) | 59.27          | 15.02         | 15.00           | 9.00             | 1.07           | 133.7                        | 5.61                      |
| B04-2(1.5%Sn) | 58.52          | 14.36         | 14.60           | 9.30             | 1.40           | 142.6                        | 14.63                     |
| B05-1(2.0%Sn) | 59.14          | 14.62         | 14.70           | 9.40             | 2.07           | 153.5                        | 21.25                     |
| B06-1(2.5%Sn) | 58.80          | 13.66         | 14.40           | 9.20             | 2.62           | 159.5                        | 25.99                     |
| B07-1(3.0%Sn) | 59.01          | 13.25         | 13.80           | 8.70             | 3.37           | 166.3                        | 31.36                     |

## 5.7.3 ผลของคุณสมบัติด้านการเปียก (Wettability)

การวัดคุณสมบัติด้านการเปียกของโลหะประสานทอง จะใช้วิธีการทดสอบแบบ Sessile drop เพื่อทำการหาค่ามุมสัมผัสและค่าแรงตึงผิว โดยผลการทดลองจะแสดงในตารางที่ 5.15 และรูปของหยดของเหลวที่มีปริมาณของดีบุกต่างกัน (ตั้งแต่ 0 – 3%) แสดงดังรูปที่ 5.7 – 5.13 ค่าแรงตึงผิวและมุมสัมผัสจะหาได้จากการคำนวณของ Axisymmetric drop Shape Analysis ใช้โปรแกรมจาก

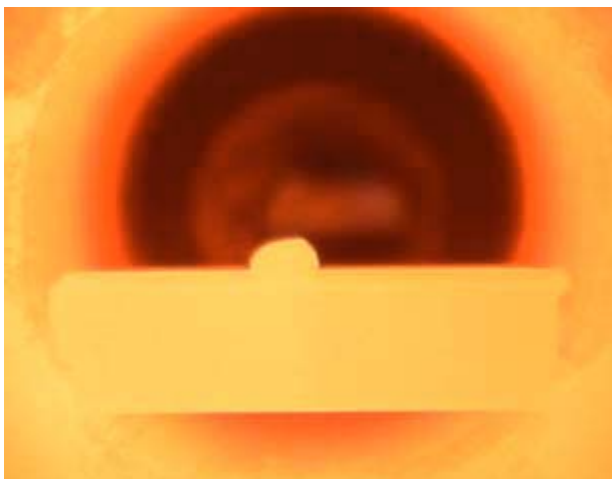
การศึกษาโลหะประสานทอง 14K โดยการเติมธาตุสังกะสี ซึ่งได้รับทุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนเพื่อการวิจัย ปี พ.ศ. 2540-2542 ในการประมวลผล

ตารางที่ 5.15 แสดงผลของมุมสัมผัสที่อุณหภูมิ 950 °C

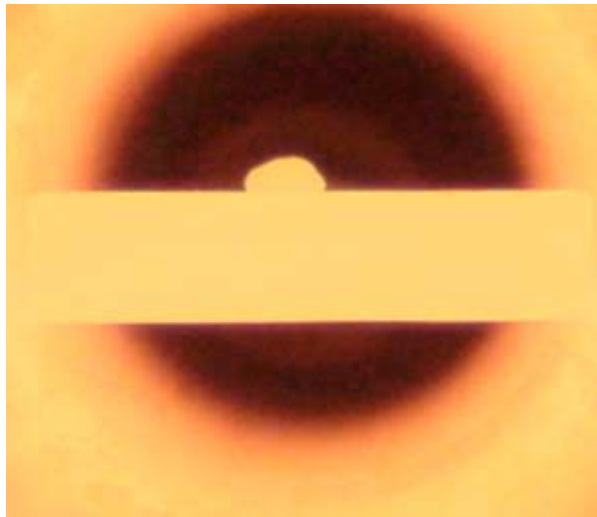
| หมายเลข       | ปริมาณดีบุก (wt%) | มุมสัมผัส (องศา)<br>(ที่ได้จากการคำนวณ) | มุมสัมผัส (องศา)<br>(ที่ได้จากการวัดด้วยสายตา) |
|---------------|-------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------|
| B01-3(0.0%Sn) | 0                 | 120.1                                   | 112.5                                          |
| B02-3(0.5%Sn) | 0.47              | 130.4                                   | 120.0                                          |
| B03-2(1.0%Sn) | 1.07              | 104.6                                   | 113.5                                          |
| B04-2(1.5%Sn) | 1.40              | 108.2                                   | 116.0                                          |
| B05-1(2.0%Sn) | 2.07              | 110.5                                   | 111.0                                          |
| B06-1(2.5%Sn) | 2.62              | 108.6                                   | 100.0                                          |
| B07-1(3.0%Sn) | 3.37              | 105.9                                   | 98.0                                           |

หมายเหตุ : ถ้ามุมสัมผัสมีค่าน้อยกว่า 90 องศา แสดงว่า โลหะประสานทองเกิดการเปียก

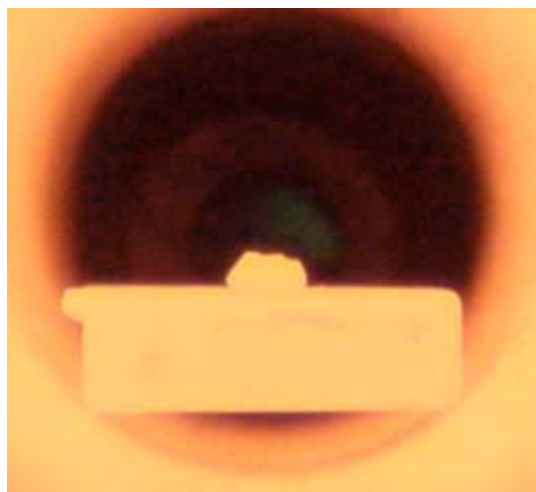
ถ้ามุมสัมผัสมีค่ามากกว่า 90 องศา แสดงว่า โลหะประสานทองไม่เกิดการเปียก



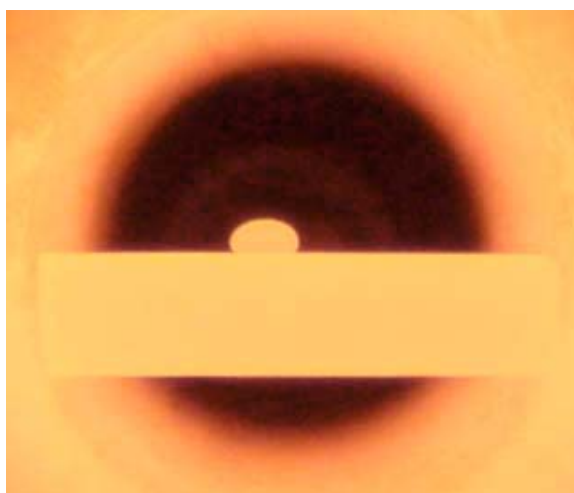
รูปที่ 5.7 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง (Sn 0%)



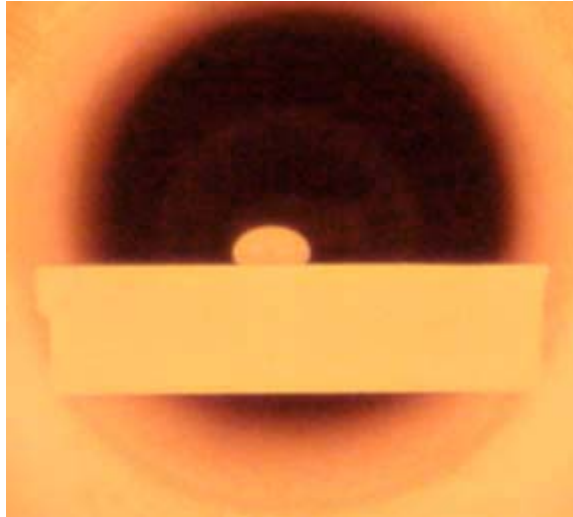
รูปที่ 5.8 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง (Sn 0.47%)



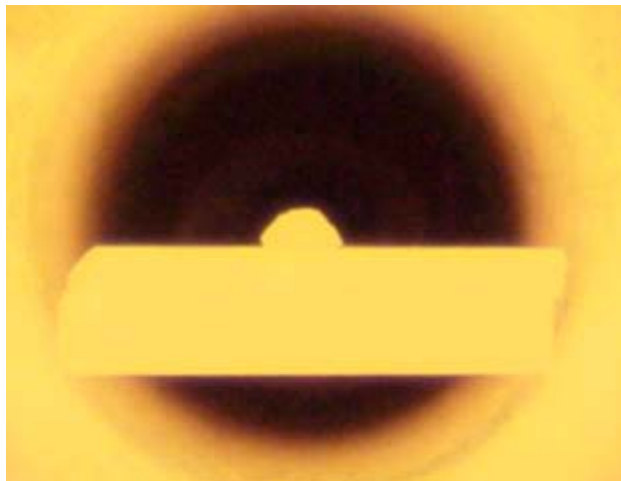
รูปที่ 5.9 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง (Sn 1.07%)



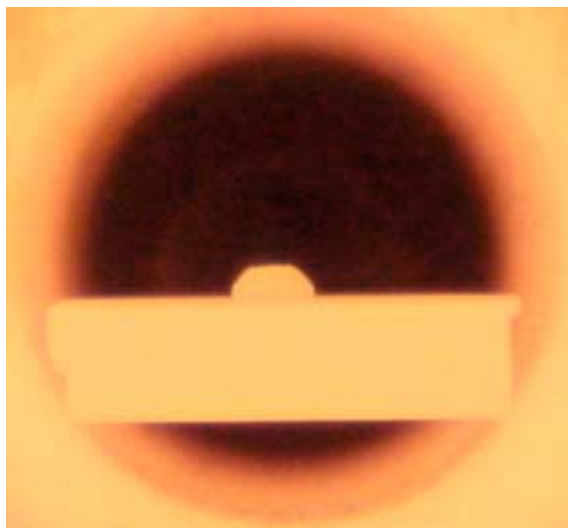
รูปที่ 5.10 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง (Sn 1.40%)



รูปที่ 5.11 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง (Sn 2.07%)



รูปที่ 5.12 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง (Sn 2.62%)



รูปที่ 5.13 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง (Sn 3.37%)

#### 5.7.4 ผลการทดสอบแรงดึง

ทดสอบแรงดึงเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลของตัวประสานด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงขนาด 10 ตัน ขึ้นงานทดสอบทำแบบ Lab Shear โดยใช้ตัวประสานทองมาเชื่อมโลหะผสมทองคำ 14 กระรัต ดังรูปใน ภาคผนวก ข ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.16 ผลการทดสอบแรงดึง Lap Shear

| หมายเลข        | ปริมาณดีบุก (wt.%) | ความเค้นสูงสุดเฉลี่ย<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
|----------------|--------------------|----------------------------------------------|
| B01-3 (0.0%Sn) | 0                  | 138.19                                       |
| B02-3 (0.5%Sn) | 0.47               | 144.22                                       |
| B03-2 (1.0%Sn) | 1.07               | 155.00                                       |
| B04-2 (1.5%Sn) | 1.40               | 162.93                                       |
| B05-1 (2.0%Sn) | 2.07               | 170.54                                       |
| B06-1 (2.5%Sn) | 2.62               | 180.73                                       |
| B07-1 (3.0%Sn) | 3.37               | 188.21                                       |

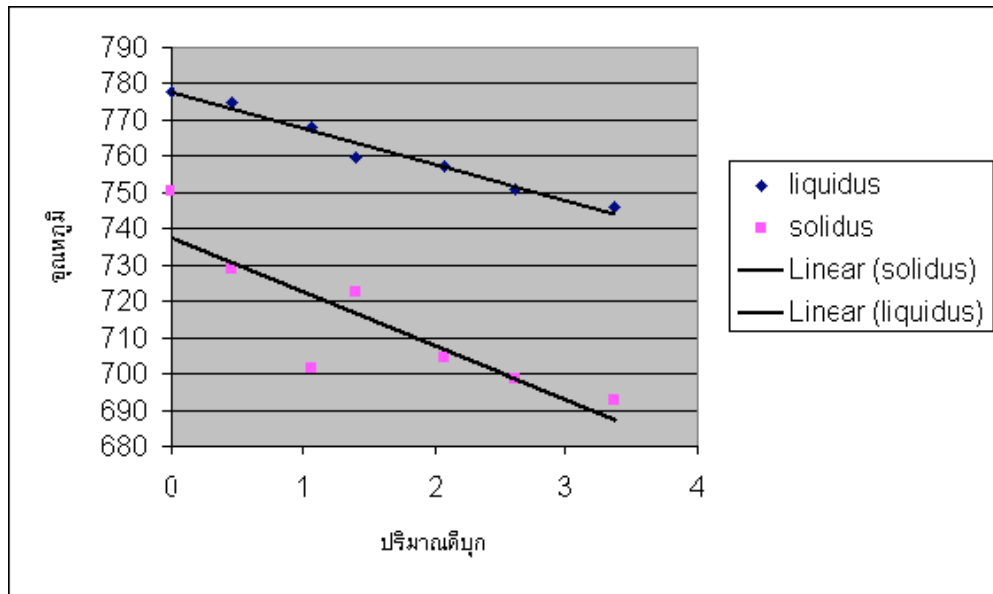
### 5.8 อภิปรายผลการทดลอง

#### 5.8.1 ผลการหลอมและหล่อโลหะประสานทอง

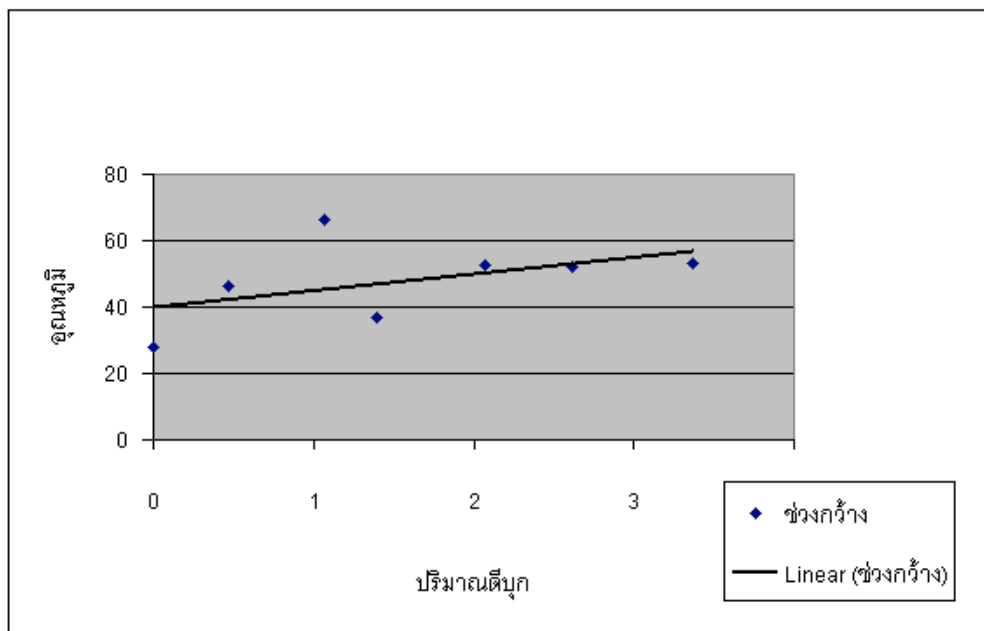
จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 5.11 – 5.12 ได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาส่วนผสมทางเคมีของโลหะประสานทอง พบว่าในการทำการหล่อขึ้นงานจะมีการสูญเสียส่วนผสมในการหล่อไปบางส่วน โดย Zn จะมีการสูญเสียไประหว่างทำการหล่อมากที่สุด (เนื่องจาก Zn เป็นธาตุที่มีจุดเดือดต่ำ) แม้ว่าจะได้ทำการชดเชยส่วนผสมไว้แล้ว ส่วนดีบุกจะมีการสูญเสียน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมก่อนหล่อและหลังหล่อ

#### 5.8.2 ช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลว

การทดลองหาจุดหลอมเหลวจากตัวอย่างที่มีการเปลี่ยนส่วนผสมของดีบุก มีแนวโน้มที่จุดหลอมเหลวของโลหะประสานทองนั้นมีค่าลดลง ตามตารางที่ 5.13 ซึ่งจะเห็นได้ว่าจะมีค่า Liquidus ที่ลดลงตั้งแต่ค่า 777.9°C – 745.941°C และจากกราฟของความแตกต่างของจุด Liquidus กับ Solidus ที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.14 และรูปที่ 5.15 ทำให้เราเห็นว่าการเติมดีบุกไป 1% ทำให้มีช่วงกว้างที่มากที่สุด และมีช่วงกว้างที่น้อยที่สุดเมื่อไม่มีการเติมดีบุกลงไป



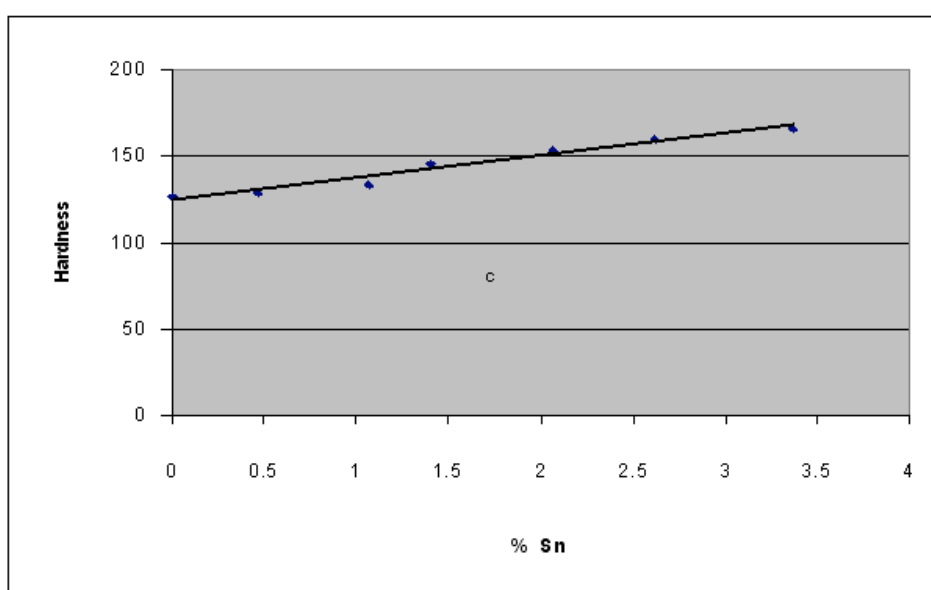
รูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจุด Liquidus และ Solidus กับปริมาณดีบุก



รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ของช่วงกว้างระหว่างจุด Liquidus&Solidus กับปริมาณดีบุก

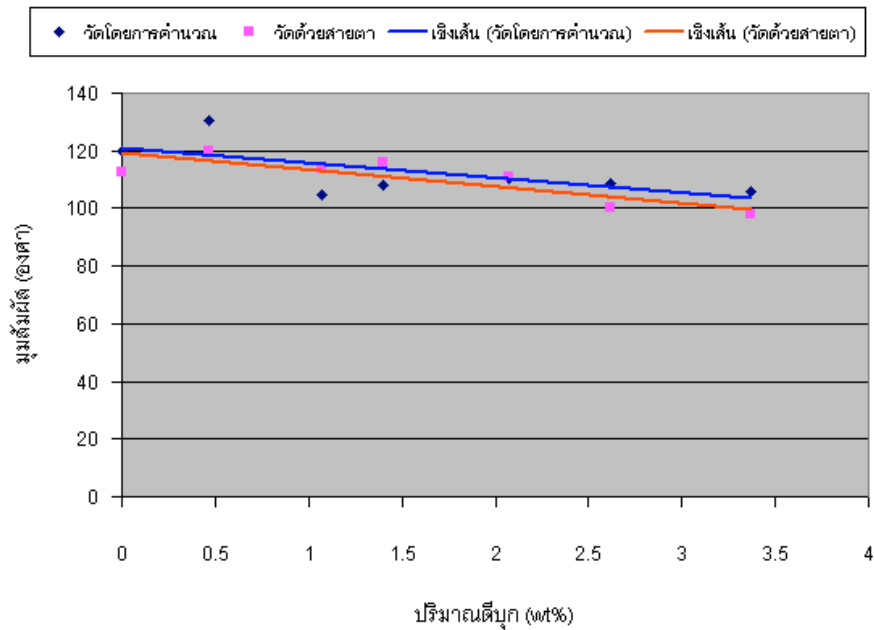
### 5.8.3 คุณสมบัติทางกล

ในการทดลองหาคุณสมบัติทางกลของโลหะประสานทอง ได้ทำการศึกษาความแข็งและความต้านแรงดึงแบบ Lap shear การวัดค่าความแข็งทำ โดยใช้วิธีวัดแบบ Microvicker ซึ่งจะได้ค่าความแข็งในหน่วยความแข็ง HV ซึ่งจากการทดลองจะได้แนวโน้มของความแข็งที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณดีบุกที่ใส่ลงไปมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 5.14 และจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณดีบุกกับส่วนผสมในรูปที่ 5.16 จากผลการทดลองหาค่าแรงดึงแบบ Lap shear พบว่าเมื่อเติมดีบุกลงในชิ้นงาน และวัดค่าความเค้นเฉือนสูงสุด ดังตารางที่ 5.16 จะเห็นได้ว่า ปริมาณดีบุกที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มความเค้นของรอยประสาน ซึ่งมีลักษณะเดียวกันกับความแข็งในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณดีบุกกับส่วนผสม

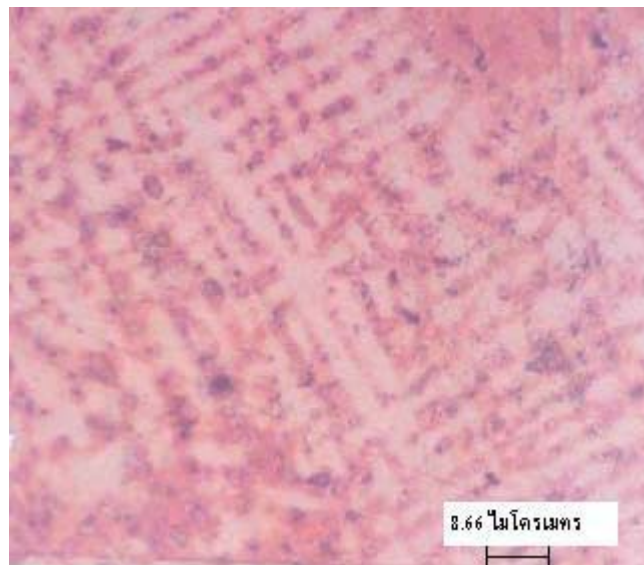
5.8.4 จากการทดลองการหาคุณสมบัติด้านการเปียก (Wettability) ทำให้เราเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มดีบุกลงไปในห้อง 14 กระรัต จะมีแนวโน้มทำให้มุมสัมผัสระหว่างน้ำโลหะกับฐานรองที่เป็นอะลูมิเนียมมีค่าลดลง ตามตารางที่ 4.5 และสามารถพิจารณาแนวโน้มการลดลงของมุมสัมผัสได้โดยจะแสดงในรูปที่ 5.4



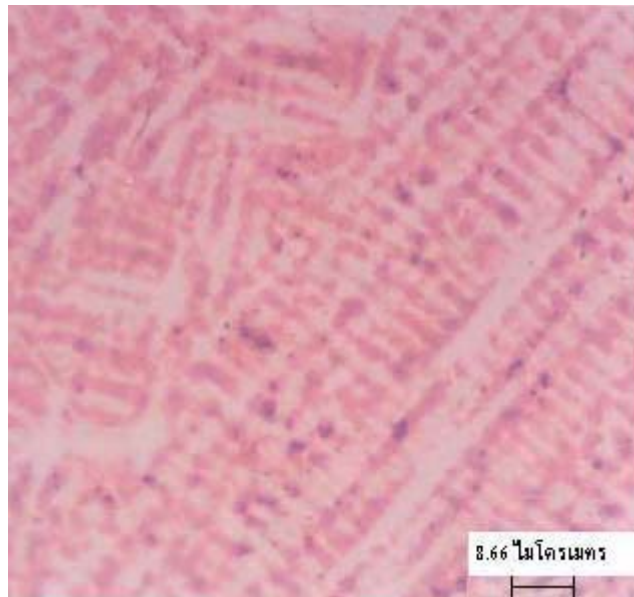
รูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์กันระหว่างปริมาณดีบุกกับนมส้มคัส

#### 5.8.4 โครงสร้างจุลภาค

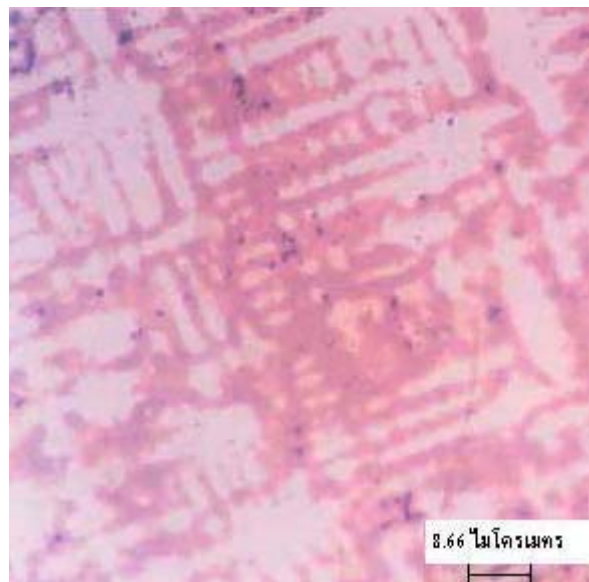
เมื่อพิจารณาภาพโครงสร้างจุลภาคของโลหะประสานทองจากรูปภาพที่ 5.18 – 5.20 สามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างที่เป็น dendrite ซึ่งในภาพเห็นเป็นสีขาวมีขนาดไม่แตกต่างกันมากนัก และหลังจากการตรวจสอบโดยใช้พบว่า dendrite มีทองและดีบุกละลายอยู่เป็นส่วนใหญ่ ทำให้สรุปได้ว่ากลไกการแข็งขึ้นของโลหะผสมทอง 14 กระรัต คือการที่ดีบุกมีการละลายในเนื้อโลหะแล้วเกิดกลไกการแข็งที่เรียกว่า solid solution strengthening



รูปที่ 5.18 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะประสานทองที่ไม่มีดีบุก (ดีบุก 0%)



รูปที่ 5.19 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะประสานทองที่มีคาร์บอน 0.47%



รูปที่ 5.20 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะประสานทองที่มีคาร์บอน 1.07%

## 5.9 สรุปผลการทดลอง

5.9.1 การเพิ่มปริมาณดีบุกทำให้ความกว้างของช่วงอุณหภูมิระหว่าง Liquidus กับ Solidus ของโลหะประสานทอง 14 กระรัตเพิ่มขึ้น และทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะประสานทอง 14 กระรัต ลดลงด้วย

5.9.2 การเพิ่มปริมาณดีบุกลงไป ทำให้ความแข็งของโลหะประสานทอง 14 กระรัตเพิ่มขึ้น

5.9.3 การเพิ่มปริมาณดีบุกจะส่งผลให้คุณสมบัติในการเปียก ( Wettability ) ดีขึ้น โดยมุมสัมผัสของโลหะประสานกับฐานรองจะมีค่าลดลง

5.9.4 การเพิ่มปริมาณดีบุกลงไป ไม่ส่งผลต่อขนาดของ dendrite ในโลหะประสานทอง 14 กระรัต

5.9.5 การเพิ่มดีบุกในโลหะประสานทอง 14 กระรัตนั้น ดีบุกจะมีกลไกในการเพิ่มความแข็งที่เรียกว่า Solid solution strengthening

5.9.6 การเพิ่มปริมาณดีบุก ทำให้ความเค้นเฉือนสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

1. Christopher Raub . Use of Silver in Jewelry. The Proceeding of The Santa Fe Symp of Jewelry Manufacturing Technology , 1989, pp.241-256
2. Price, L.E., and Thomas. G.J. Inst. Metals. 1938, pp. 357-385
3. Vinal, G.W., and Schramm. G.M Metal Industry (N.T). 1934, pp.1 ,15, 22,100, 151, 231
4. Charles E.T. White. Engineering Applications of Indium. 1985, pp.1-18, 83-91, 191-192
5. Daniel Davitz. Silver Palladium Alloy . US. Patent No. 5,037,708, Date Aug. 6, 1991
6. Zamojski, Marek R. Silver Alloy. US. Patent No 5,558,833 Date Sep. 24, 1996
7. Hiroshi Harigaya, Kazutoma Kasai, Michio Asahina. Silver Alloys having High Sulphuration Resistance. U.S. Patent No. 3,811, 876 Date May 21,1974
8. Daniel Davitz. Silver Colored Alloy with low percentage of Ni and Cu. US.Patent No 5,817,195 Date Oct. 6, 1998
9. T.K. Vaidyanathan and A. Prasad. Precious Metals. Pergamon Press, 1932, pp. 293-299
10. Thomas H. Courtney. Mechanical Behavior of Materials. McGraw-Hill Publication, 1990, p.169
11. Allison Butts. The Chemical Properties of Silver. Chapter 8, Silver in Industry, pp.126-132
12. Allison Butts and J.M. Thomas. Corrosion Resistance of Silver and Silver Alloys. Chapter 15, Silver in Industry, pp.357-387
13. Ernest M. Levin, Carl R. Robbins, Haward F. Mcmurdie. Phase Diagrams for Ceramists. The American Ceramics Society, Inc, Ohio, 1964, p.104
14. George E. Dieter. Mechanical Metallurgy. McGraw-Hill Publication, 1988, pp.184-191
15. Kubachewski O., Alcock C.B., and Spencer P.J.. Thermochemistry of Materials. 6<sup>th</sup> ed., Pergamon Press, 1993, p.149
16. Richard V. Carrano. Improve Your Silver Casting. The Santa Fe Sym. On Jewelry Manufacturing Technology, 1997, pp.157-168
17. Aldo M. Reti. Understanding Sterling Silver. Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology, 1997, pp.339-345
18. H. Royal. The Deposition of Novel Thin films of Binary Silver alloys and Oxides for Tarnish Resistance. The Proceeding of 4<sup>th</sup> on Santa Fe Symp. of Jewelry Manufacturing and Technology, 1990, p.37

19. Metal Europ. Resistance to Tarnishing of the Silver - Germanium and Silver -Copper - Germanium Alloys. The Proceeding of The Santa Fe Symp. of Jewelry Manufacturing and Technology, 1990, pp.63-67
20. Raukstraum G. and Agarwal D.P.. Surface Finishing on Color Measurements. The Proceeding of The Santa Fe Symp. of Jewelry Manufacturing and Technology, 1990, pp.147-163
21. Raukstraum G. and Agarwal D.P.. Color Tecnology for Jewelry Alloy Application. The Proceeding of The Santa Fe Symp. of Jewelry Manufacturing and Technology, 1988, pp.229-244
22. Lawrence Addicks. Silver in Industry. International Textbook Press, Scranton, PA,1994, pp.398-399
23. Ernest A. Smith. Silver in Industrial Alloys. Precious Metal and Application. N.A.G. Press London, 1978, p.17
24. T.K. Vaidyanathan and A. Prasad. Corrosion and Tarnish of Ag - In and Ag - In - Pd Alloys Precious Metals.1980, pp.293-299
25. C.G. Woychik and T.B. Massalski. Phase Stability Relationships and Glass Formation in the System Cu - Ag - In. Metallurgical Transaction A, Volume 19A. January 1988, pp.13-29
26. Richard V. Carrano, Improving your silver casting, The Santa Fe Symposium On Jewelry Manufacturing Technology, 1997, pp. 162-163.
27. Aldo M. Reti, Understanding sterling silver, The Santa Fe Symposium On Jewelry Manufacturing Technology, 1997, p. 339.
28. Price L.E and Thomas G.J, The tarnishing of silver and silver alloys and its prevention, Inst. Metals, Jan. 1938, p. 357
29. Gardam G.E. A sterling silver containing aluminium, Metallurgia, Jan. Vol. 47. No. 279, pp. 29-33.
30. Peter Johns, Firestain resistant silver alloys, The Santa Fe Symposium On Jewelry Manufacturing Technology, 1997 : pp. 38-42
31. John C. Mccloskey, Paul R. Welch and Shankar Aithal, Gold Technology, Issue No. 30, Winter 2000, pp. 4-7.
32. Aldo M. Reti, Understanding sterling silver, The Santa Fe Symposium On Jewelry Manufacturing Technology, 1997, p. 353
33. L. Gal-Or, "Tarnishing and corrosion of silver and gold alloys", The Santa Fe Symposium On Jewelry Manufacturing Technology, 1990: p. 21.

34. J.C. Chaston, Oxygen in Silver, Silver (Florida : Krieger), pp. 304-307.
35. Richard V. Carrano, "Sterling silver casting problems", The Santa Fe Symposium On Jewelry Manufacturing Technology, September 11-14, 1990, pp. 91-103.
36. J.J. Moore, Chemical metallurgy, Butterworth Heinemann, 1990, p. 85.
37. Allison Butts, The chemical properties of silver, Lehigh University, Pennsylvania, pp. 130-131.
38. D.P. Agarwal and G. Raykhtsaum, "Color technology for jewelry alloy applications", The Santa Fe Symposium On Jewelry Manufacturing Technology, 1988, pp. 229-234.
39. D.P. Agarwal and G. Raykhtsaum, "Tarnish behavior or low carat jewelry alloys – quantitative analysis", The Santa Fe Symposium On Jewelry Manufacturing Technology, 1989, pp. 115-116.
40. A.J. Sedriks. Corrosion of Stainless Steel. 2<sup>nd</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.
41. A American Society of Testing and Materials. Annual Book of ASTM Standard. Vol. 03.02, ASTM G 5-94, 1994, pp. 49
42. Christopher M.A. Brett and Maria Oliveira Brett. Electrochemistry principles, method, and applications. United Kingdom : Oxford Science, 1993, pp. 23.
43. Douglas a. Skoog, Donald M. West and F. James Holler. Fundamental of analytical chemistry. 7<sup>th</sup> ed., United State of America : Saunders College Publishing, 1996, pp. 388-389.
44. Aldo M. Reti, Understanding sterling silver, The Santa Fe Symposium On Jewelry Manufacturing Technology, 1997, p. 342.
45. ASM Handbook , Alloy Phase Diagrams, Vol. 3, ASM International, 1992, p. 2•32.
46. ASM Handbook , Alloy Phase Diagrams, Vol. 3, ASM International, 1992, p. 2•172.
47. P. Villars, A. Prince and H. Okamoto, Handbook of Ternary Alloy Phase Diagrams, Vol. 3, ASM International, 1995, p. 2303.
48. William F. Smith, Principles of materials science and engineering, 3<sup>rd</sup> edition, McGraw-Hill Inc., 1996, pp. 869-872.
49. F.N. Rhines, Phase Diagram in Metallurgy, McGraw-Hill book Co., 1956.
50. Aldo M. Reti, "Understanding sterling silver", The Santa Fe Symposium On Jewelry Manufacturing Technology, 1997, pp. 345-349.
- 51 Peter Johns, "Firestain resistant silver alloys", The Santa Fe Symposium On Jewelry Manufacturing Technology, 1997, p. 43.
52. ASM Handbook. Properties and selection nonferrous alloys and special – purpose materials. Vol. 2, ASM International, 1992, pp. 702

53. ชนวัฒน์ เมืองมั่น และสุทธิ สุอำพัน, โครงการทางวิศวกรรม เรื่อง อิทธิพลของแมงกานีสต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงของเงินสเตอร์ลิง, ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
54. Lawrence Addicks, Silver in industry, Reinhold Publishing Corporation, 1940, pp. 60-120.
55. American Society of Testing and Materials. Annual Book of ASTM Standard. Vol. 03.01, ASTM E 92-82, 1992, pp. 206-214.
56. American Society of Testing and Materials. Annual Book of ASTM Standard. Vol. 03.01, ASTM E 8m - 96, 1996, pp. 76-96
57. Microsoft Encarta encyclopedia ,1996 . [Computer Program]
58. Ernest, A. Smith. Working in precious metals. London: N.A.G. Press, 1978
59. Ott, Dieter and Christoph J. Raub. Gold Bull 18 (1985) :140-143
60. Bikerman, J.J. Physical surfaces. : Academic press , 1970
61. Davies, J.T. ,and Rideal ,E.K Interfacial phenomena. : Academic press , 1963
62. Temple, C. Potton. Paint flow and pigment dispersion. : John Wiley & sons, 1978
63. Lawrence,E. Murr. Interfacial phenomena in metals and alloys.: Addison-Westley Publishing, 1975
64. Humpston,G. , and Jacobson,D.M. Gold Bull 27 (October 1994) : 110-116
65. Bernard,G. , and Lupis,C.H.P. Met. Trans. 2(1971) : 555-559
66. Bernard,G. , and Lupis,C.H.P. Met. Trans. 2(1971) : 2991-2998
67. Asthana,R. Met. Trans. 26A(1995) : 307-1311
68. Oh,S.Y., Cornie,C.A., and Russell,K.C. Met. Trans. 20A(1989) : 527-532
69. Kanetkar,C.S. , Kacar, A.S., and Stefannescu,D.M. Met. Trans. 19A(1988): 1833-1839
70. นายกรันต์ ลิ้มปีพพชรย์, วิทยานิพนธ์เรื่อง“ผลของโลหะผสมต่อคุณสมบัติการเปียกของโลหะประสานทอง 14 กระรัต”, ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

ทฤษฎีการวัดค่าสีของโลหะประกอบเครื่องประดับ

## ทฤษฎีการวัดค่าสีของโลหะประกอบเครื่องประดับ

ในโลหะเครื่องประดับที่ทำด้วยโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านมามีการวัดค่าสีโดยใช้คอมพิวเตอร์ เป็น การลดข้อสงสัย หรือความคลุมเครือ เนื่องจากไม่มีมาตรฐานของสี สำหรับโลหะผสมทั่วไป ลักษณะสีที่ปรากฏบนผิว วัสดุใด ๆ จะปรากฏออกมานั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลัก 3 ประการคือ

1. ที่มาของต้นแสงส่องสว่าง
2. ตัววัตถุ ซึ่งไม่เกี่ยวกับรูปแบบของสี แต่เกี่ยวกับผิวที่สีนั้นปรากฏอยู่ การใช้กระจกสะท้อนแสงจะช่วยชัดเจนการเปลี่ยนแปลงของสีที่ผิววัตถุเปลี่ยนแปลงไปจากผิวหยาบเป็นผิวละเอียด
3. ผู้สังเกต และการรับรู้

มาตรฐานการอธิบายระบบสืมี 2 ระบบที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

1. Munshell system ใช้พิกัดแบบ 3 ค่าคือ
  - Hue คือ ชื่อสีอธิบายเป็นคำ ๆ เช่น สีแดง หมายถึง....
  - Chroma บอกความเข้มของสีโดยวัดแยกออกจากแกน ขาว – เทา – ดำ
  - Value อธิบายตำแหน่งของ Scale ของ ขาว เทา ดำ

หมายเหตุ ระบบนี้ ผู้สังเกตต้องพิจารณาสีของวัตถุเทียบกับแผ่นสีมาตรฐานที่ใกล้เคียงกันมากที่สุดแล้วเรียกสีของวัตถุนั้นตามสีที่ใกล้เคียงที่สุด

- ## 2. CIELAB System (The Committee of International on Illumination)

ระบบนี้จะใช้หลักการอธิบายเชิงคณิตศาสตร์ เป็นระบบที่นิยมมากที่สุด ในการใช้ชี้  
ตรงกันข้ามในการอธิบายซึ่งเรียกว่าองค์ประกอบของสี ได้แก่ สีเขียว – แดง สีเหลือง – น้ำเงิน และสี  
ขาว – ดำ โดยใช้หลักการมองเห็นของตามนุษย์เป็นพื้นฐาน เพราะตาจะมีเซลล์แบบ Cone เพียงอย่าง  
เดียว จึงเห็นความแตกต่างระหว่างสีแดง กับสีเขียวได้ แต่ไม่สามารถมองเห็นได้พร้อมกัน ความหมาย  
ของค่าสีในระบบนี้คือ

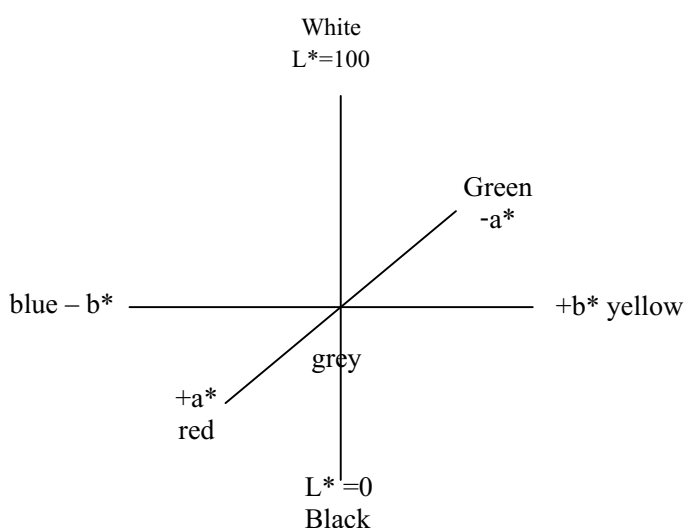
- L = Lightness, L = O (Black), L = 100 (White)
- a = ค่าสีแดง – เขียว ถ้าสีแดง ค่า a จะเป็นค่าบวกตั้งแต่ 0 ถึง 100  
                สีเขียว ค่า a จะเป็นค่าลบตั้งแต่ - 100 ถึง 0
- b = ค่าสีเหลือง – น้ำเงิน ถ้าสีเหลืองค่า b จะเป็นค่าบวกตั้งแต่ 0 ถึง 100  
                สีน้ำเงินค่า b จะเป็นค่าลบตั้งแต่ - 100 ถึง 0

ตัวอย่างการวัดความแตกต่างของค่าสีที่วัดได้จากวัตถุ 2 ชิ้นดังนี้

$$DE^2 = (L2-L1)^2 + (a2-a1)^2 + (b2-b1)^2$$

เมื่อ  $L1, a1, b1$  คือค่าที่วัดได้จากวัตถุชิ้นแรก และ  $L2, a2, b2$  คือค่าที่วัดได้จากวัตถุชิ้นที่สอง กรณีนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้การวัดความแตกต่างของสีจากวัตถุเดียวกันแต่มีสีเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการหมองของโลหะเงินสเตอร์ลิง หรือจากสาเหตุอื่น

คุณภาพสีที่วัดได้ถูกต้องหรือไม่ขึ้นกับแสงที่กระท้อนจากวัตถุ และการใช้กระจกสะท้อนแสงจะช่วยเก็บแสงสะท้อนจากวัตถุในกรณีที่ผิวละเอียดได้กลับมาหมด ถ้าเป็นผิวหยาบจะสามารถวัดโดยไม่ใช้กระจกช่วยได้ ถ้า  $DE = 1$  ไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงหรือความแตกต่างได้ แต่ถ้า  $DE = 4$  จะสามารถเริ่มสังเกตเห็นด้วยสายตาได้



รูปที่ ก.1  $L^* a^* b^*$  color space

ตาราง ก.1 แสดงผลการเปรียบเทียบค่า DE และค่าสีของชิ้นงานในแต่ละชุดส่วนผสมที่ผ่านการทดสอบการหมองเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

| หมายเลขชุด | ค่า L, a, b, ก่อนการทดลอง |       |      | ค่า L, a b หลังการทดลอง |       |       | ค่า DE |
|------------|---------------------------|-------|------|-------------------------|-------|-------|--------|
|            | L1                        | a1    | b1   | L2                      | a2    | b2    |        |
| 1          | 80.25                     | -0.70 | 4.92 | 70.50                   | -0.11 | 15.12 | 14.12  |
| 2          | 73.75                     | -0.94 | 5.16 | 70.30                   | -0.15 | 18.49 | 13.79  |
| 3          | 73.10                     | -0.62 | 5.00 | 68.19                   | 1.86  | 17.17 | 13.35  |
| 4          | 74.05                     | -0.78 | 4.89 | 64.69                   | 2.39  | 12.85 | 12.69  |
| 5          | 77.54                     | -0.55 | 5.84 | 68.55                   | 1.24  | 12.76 | 11.48  |
| 6          | 74.62                     | -0.42 | 5.18 | 67.57                   | 0.76  | 9.71  | 8.46   |
| 7          | 77.21                     | -0.40 | 5.71 | 60.63                   | 1.60  | 14.15 | 18.71  |
| 8          | 82.55                     | -0.25 | 5.64 | 64.42                   | 4.29  | 18.18 | 22.51  |

**ตาราง ก. 2** แสดงผลการเปรียบเทียบค่า DE และค่าสีของชิ้นงานในแต่ละชุดส่วนผสมที่ผ่านการทดสอบการหมองเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

| หมายเลขชุด | ค่า L, a, b, ก่อนการทดลอง |       |      | ค่า L, a b หลังการทดลอง |      |       | ค่า DE |
|------------|---------------------------|-------|------|-------------------------|------|-------|--------|
|            | L1                        | a1    | b1   | L2                      | a2   | b2    |        |
| 1          | 76.10                     | -0.64 | 4.72 | 63.00                   | 6.41 | 24.48 | 24.73  |
| 2          | 75.65                     | -0.86 | 4.57 | 55.55                   | 1.80 | 17.60 | 24.10  |
| 3          | 82.10                     | -0.84 | 5.67 | 66.50                   | 1.75 | 22.67 | 23.22  |
| 4          | 83.61                     | -0.52 | 5.75 | 63.02                   | 2.02 | 15.78 | 23.04  |
| 5          | 74.46                     | -1.03 | 4.60 | 63.34                   | 0.51 | 11.63 | 13.24  |
| 6          | 74.39                     | -0.58 | 4.81 | 68.41                   | 0.36 | 11.00 | 8.66   |
| 7          | 73.30                     | -0.30 | 6.08 | 41.69                   | 3.71 | 4.82  | 31.89  |
| 8          | 83.34                     | -0.10 | 5.33 | 50.25                   | 2.33 | 10.89 | 33.64  |

**ตาราง ก.3** แสดงผลการเปรียบเทียบค่า DEและค่าสีของชิ้นงานในแต่ละชุดส่วนผสมที่ผ่านการทดสอบการหมองเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

| หมายเลขชุด | ค่า L, a, b, ก่อนการทดลอง |       |      | ค่า L, a b หลังการทดลอง |      |       | ค่า DE |
|------------|---------------------------|-------|------|-------------------------|------|-------|--------|
|            | L1                        | a1    | b1   | L2                      | a2   | b2    |        |
| 1          | 85.71                     | -0.55 | 5.15 | 56.50                   | 4.20 | 10.40 | 30.05  |
| 2          | 81.17                     | -0.34 | 5.76 | 64.10                   | 5.10 | 28.18 | 28.70  |
| 3          | 79.24                     | -0.35 | 4.84 | 58.75                   | 4.41 | 18.44 | 25.05  |
| 4          | 78.28                     | -0.72 | 4.52 | 58.20                   | 5.54 | 18.06 | 25.01  |
| 5          | 77.10                     | -0.85 | 5.85 | 66.33                   | 2.49 | 13.69 | 13.73  |
| 6          | 74.61                     | -0.88 | 4.52 | 65.31                   | 2.50 | 13.69 | 13.49  |
| 7          | 79.22                     | -0.48 | 5.10 | 46.69                   | 4.34 | 12.63 | 33.73  |
| 8          | 76.54                     | -0.46 | 5.76 | 53.78                   | 8.94 | 32.22 | 36.14  |

**ตาราง ก.4** แสดงผลการเปรียบเทียบค่า DE และค่าสีของชิ้นงานในแต่ละชุดส่วนผสม ที่ผ่าน  
การทดสอบการหมองเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

| หมายเลขชุด | ค่า L, a, b, ก่อนการทดลอง |       |      | ค่า L, a b หลังการทดลอง |      |       | ค่า DE |
|------------|---------------------------|-------|------|-------------------------|------|-------|--------|
|            | L1                        | a1    | b1   | L2                      | a2   | b2    |        |
| 1          | 75.75                     | -0.58 | 6.78 | 49.53                   | 9.11 | 19.66 | 30.77  |
| 2          | 77.29                     | -0.28 | 5.09 | 49.10                   | 3.20 | 15.47 | 30.24  |
| 3          | 76.34                     | -0.62 | 4.78 | 47.10                   | 3.42 | 10.05 | 29.98  |
| 4          | 82.12                     | -0.51 | 4.92 | 57.15                   | 3.61 | 17.43 | 28.23  |
| 5          | 83.73                     | -0.52 | 5.15 | 62.61                   | 2.46 | 21.09 | 26.45  |
| 6          | 73.76                     | -0.50 | 5.33 | 58.74                   | 3.46 | 18.08 | 20.61  |
| 7          | 79.56                     | -0.50 | 4.75 | 49.71                   | 6.94 | 20.15 | 34.40  |
| 8          | 85.86                     | -0.84 | 6.40 | 49.00                   | 4.66 | 14.36 | 38.11  |

## **ภาคผนวก ข.**

*ตารางส่วนผสมทางเคมีจากการตรวจสอบจาก EDX*

ตารางที่ ข.1 ส่วนผสมทางเคมีจากการตรวจสอบจาก EDX

| Sample                       | Composition from EDX (%wt.) |      |      |      |      |                     |       |      |      |            |       |      |      |
|------------------------------|-----------------------------|------|------|------|------|---------------------|-------|------|------|------------|-------|------|------|
|                              | Matrix                      |      |      |      |      | Secondary Structure |       |      |      |            |       |      |      |
|                              |                             |      |      |      |      | Black Zone          |       |      |      | White Zone |       |      |      |
|                              | Ag                          | Cu   | Si   | In   | In   | Ag                  | Cu    | Si   | In   | Ag         | Cu    | Si   | In   |
| Sterling                     | 94.08                       | 5.92 | -    | -    | -    | 71.86               | 28.14 | -    | -    | NA.        | NA.   | NA.  | NA.  |
| Sterling + 0.11%Si           | 95.79                       | 4.16 | 0.05 | -    | -    | 2.93                | 92.49 | 4.58 | -    | NA.        | NA.   | NA.  | NA.  |
| Sterling + 0.09%Si + 0.53%In | 96.82                       | 3.52 | 0.11 | -    | -    | NA.                 | NA.   | NA.  | NA.  | 73.09      | 27.35 | 0.06 | -    |
| Sterling + 0.09%Si + 1.09%In | 96.24                       | 3.65 | 0.12 | -    | -    | 44.55               | 51.79 | 3.53 | 0.13 | NA.        | NA.   | NA.  | NA.  |
| Sterling + 0.10%Si + 1.60%In | 94.72                       | 4.50 | 0.06 | 0.71 | 0.71 | 55.48               | 40.96 | 1.79 | 1.77 | NA.        | NA.   | NA.  | NA.  |
| Sterling + 0.11%Si + 2.13%In | 93.55                       | 4.85 | 0.15 | 1.45 | 1.45 | 58.60               | 38.14 | 1.19 | 2.07 | 93.22      | 4.33  | 0.08 | 2.37 |
| Sterling + 1.03%In           | 94.63                       | 5.11 | -    | 0.26 | 0.44 | 60.83               | 38.73 | -    | 0.44 | NA.        | NA.   | NA.  | NA.  |
| Sterling + 2.09%In           | 94.83                       | 4.08 | -    | 1.09 | 1.32 | 62.91               | 35.77 | -    | 1.32 | NA.        | NA.   | NA.  | NA.  |

หมายเหตุ : NA. = not available

**ภาคผนวก ค.**

**ผลการทดสอบสมบัติทางกลของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง -  
แมงกานีส**

**ตาราง ค.1** ค่าความยาวเส้นทแยงมุม 2 ด้าน ( $d_1$  และ  $d_2$ ) และค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness; HV) ของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง – แมงกานีส

| ส่วนผสมทางเคมี<br>(wt.%)           | ครั้งที่ทดสอบ | $d_1$ (mm) | $d_2$ (mm) | ค่าความแข็ง<br>วิกเกอร์ (HV) | ค่าความแข็ง<br>เฉลี่ย (HV) |
|------------------------------------|---------------|------------|------------|------------------------------|----------------------------|
| ชุดที่ 1<br>7.65%Cu - Ag           | 1             | 168.7      | 164.6      | 66.8                         | 66.8                       |
|                                    | 2             | 170.4      | 160.8      | 67.6                         |                            |
|                                    | 3             | 170.4      | 165.6      | 65.7                         |                            |
|                                    | 4             | 168.4      | 163.8      | 67.2                         |                            |
| ชุดที่ 2<br>6.97%Cu – 0.38%Mn - Ag | 1             | 168.7      | 162.7      | 67.5                         | 66.3                       |
|                                    | 2             | 169.5      | 168.4      | 65.0                         |                            |
|                                    | 3             | 166.3      | 167.5      | 66.6                         |                            |
|                                    | 4             | 166.3      | 168.4      | 66.2                         |                            |
| ชุดที่ 3<br>6.63%Cu – 0.76%Mn - Ag | 1             | 167.9      | 171.3      | 64.5                         | 65.4                       |
|                                    | 2             | 173.7      | 164.6      | 64.8                         |                            |
|                                    | 3             | 170.4      | 167.5      | 65.0                         |                            |
|                                    | 4             | 163.8      | 168.4      | 67.2                         |                            |
| ชุดที่ 4<br>6.14%Cu – 1.30%Mn - Ag | 1             | 169.5      | 170.3      | 64.2                         | 64.6                       |
|                                    | 2             | 173.7      | 166.5      | 64.1                         |                            |
|                                    | 3             | 174.5      | 169.4      | 62.7                         |                            |
|                                    | 4             | 169.5      | 162.7      | 67.2                         |                            |
| ชุดที่ 5<br>5.40%Cu – 1.70%Mn - Ag | 1             | 177.0      | 178.0      | 58.9                         | 59.6                       |
|                                    | 2             | 175.3      | 175.1      | 60.4                         |                            |
|                                    | 3             | 172.0      | 176.1      | 61.2                         |                            |
|                                    | 4             | 178.6      | 178.9      | 58.0                         |                            |
| ชุดที่ 6<br>4.90%Cu – 2.10%Mn - Ag | 1             | 181.1      | 178.0      | 57.5                         | 58.3                       |
|                                    | 2             | 182.7      | 177.0      | 57.3                         |                            |
|                                    | 3             | 174.5      | 177.0      | 60.0                         |                            |
|                                    | 4             | 181.1      | 175.1      | 58.5                         |                            |
| ชุดที่ 7<br>4.40%Cu – 2.60%Mn - Ag | 1             | 181.1      | 173.2      | 59.1                         | 54.9                       |
|                                    | 2             | 190.9      | 180.9      | 53.7                         |                            |
|                                    | 3             | 187.7      | 188.5      | 52.4                         |                            |
|                                    | 4             | 184.4      | 185.6      | 54.2                         |                            |
| ชุดที่ 8<br>4.00%Cu – 3.00%Mn - Ag | 1             | 190.1      | 186.6      | 52.3                         | 52.1                       |
|                                    | 2             | 192.6      | 188.5      | 51.1                         |                            |
|                                    | 3             | 187.7      | 188.5      | 52.4                         |                            |
|                                    | 4             | 186.0      | 190.4      | 52.4                         |                            |

**ตาราง ค.2** ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength; UTS) และความเค้นจุดคราก (Yield Strength;  $\sigma_y$ ) ของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง – แมงกานีส

| ส่วนผสมทางเคมี<br>(wt.%)           | ครั้งที่ทดสอบ | UTS<br>(MPa) | $\sigma_y$<br>(MPa) | UTS เฉลี่ย<br>(MPa) | $\sigma_y$ เฉลี่ย<br>(MPa) | หมายเหตุ |
|------------------------------------|---------------|--------------|---------------------|---------------------|----------------------------|----------|
| ชุดที่ 1<br>7.65%Cu - Ag           | 1             | -            | -                   | 208.7               | 80.88                      | ก)       |
|                                    | 2             | 208.7        | 80.88               |                     |                            | -        |
|                                    | 3             | -            | -                   |                     |                            | ก)       |
|                                    | 4             | -            | -                   |                     |                            | ก)       |
| ชุดที่ 2<br>6.97%Cu – 0.38%Mn - Ag | 1             | -            | -                   | -                   | -                          | ข)       |
|                                    | 2             | -            | -                   |                     |                            | ก)       |
|                                    | 3             | -            | -                   |                     |                            | ค)       |
|                                    | 4             | -            | -                   |                     |                            | ค)       |
| ชุดที่ 3<br>6.63%Cu – 0.76%Mn - Ag | 1             | 191.3        | -                   | 196.3               | 63.6                       | ง)       |
|                                    | 2             | -            | 63.6                |                     |                            | ฉ)       |
|                                    | 3             | 201.2        | -                   |                     |                            | ง)       |
|                                    | 4             | -            | -                   |                     |                            | ข)       |
| ชุดที่ 4<br>6.14%Cu – 1.30%Mn - Ag | 1             | 241.2        | 53.5                | 219.1               | 69.5                       | -        |
|                                    | 2             | -            | 85.5                |                     |                            | ฉ)       |
|                                    | 3             | 193.7        | -                   |                     |                            | ง)       |
|                                    | 4             | 222.3        | -                   |                     |                            | ง)       |
| ชุดที่ 5<br>5.40%Cu – 1.70%Mn - Ag | 1             | -            | 68.8                | 183.3               | 61.4                       | ข)       |
|                                    | 2             | -            | 53.9                |                     |                            | ข)       |
|                                    | 3             | 171.8        | -                   |                     |                            | ง)       |
|                                    | 4             | 194.7        | -                   |                     |                            | ง)       |
| ชุดที่ 6<br>4.90%Cu – 2.10%Mn - Ag | 1             | -            | -                   | -                   | -                          | ข)       |
|                                    | 2             | -            | -                   |                     |                            | ก)       |
|                                    | 3             | -            | -                   |                     |                            | ข)       |
|                                    | 4             | -            | -                   |                     |                            | ก)       |
| ชุดที่ 7<br>4.40%Cu – 2.60%Mn - Ag | 1             | -            | -                   | 149.7               | -                          | ก)       |
|                                    | 2             | -            | -                   |                     |                            | ข)       |
|                                    | 3             | -            | -                   |                     |                            | ค)       |
|                                    | 4             | 149.7        | -                   |                     |                            | ง)       |
| ชุดที่ 8<br>4.00%Cu – 3.00%Mn - Ag | 1             | -            | 48.6                | 191.0               | 46.1                       | จ)       |
|                                    | 2             | -            | 43.5                |                     |                            | จ)       |
|                                    | 3             | -            | -                   |                     |                            | ก)       |
|                                    | 4             | 191.0        | -                   |                     |                            | ง)       |

หมายเหตุ :

- ก) ชิ้นงานแตกนอกบริเวณ gage length
- ข) ชิ้นงานแตกบริเวณหัวจับ (grip)
- ค) ชิ้นงานเสียในขั้นตอนการกลึง
- ง) ค่าความเค้นจุดครากใช้ไม่ได้ เนื่องจากกราฟช่วงแรกไม่สม่ำเสมอ
- จ) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดใช้ไม่ได้ เนื่องจากกราฟช่วงก่อนรับแรงดึงสูงสุดไม่สม่ำเสมอ
- ฉ) บริเวณรอยแตกมีรูพรุน
- ช) บริเวณรอยแตกมีรูพรุน และรอยแตกมีสีดำ
- ซ) ชิ้นงานไม่ขาด (break)

## ภาคผนวก ง.

ผลการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสีผิวของโลหะเงิน 92.5% - ทองแดง –  
แมงกานีส  
ที่ได้จากเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

**ตารางที่ ง.1** แสดงค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ค่าสี  $a^*$ ,  $b^*$  และค่าการเปลี่ยนแปลงสี ( $DE^*$ ) ของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง – แมงกานีส ทั้ง 8 ชุด ที่มีปริมาณแมงกานีส 0, 0.38, 0.76, 1.3, 1.7, 2.1, 2.6 และ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ โดยทดสอบความต้านทานการหมองเป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง

| โลหะผสม<br>ชุดที่ | ก่อนการทดสอบการหมอง |         |         | หลังการทดสอบการหมอง |         |         | ค่า $DE^*$ |
|-------------------|---------------------|---------|---------|---------------------|---------|---------|------------|
|                   | $L^*_1$             | $a^*_1$ | $b^*_1$ | $L^*_2$             | $a^*_2$ | $b^*_2$ |            |
| 1                 | 74.480              | -0.619  | 4.998   | 71.285              | -0.263  | 11.515  | 7.27       |
| 2                 | 75.058              | -0.664  | 4.748   | 71.496              | -0.550  | 9.766   | 6.16       |
| 3                 | 74.618              | -0.605  | 4.467   | 70.963              | -0.208  | 9.661   | 6.36       |
| 4                 | 70.892              | -0.276  | 7.558   | 66.621              | -0.417  | 11.581  | 5.87       |
| 5                 | 73.469              | -0.529  | 4.329   | 71.814              | -0.385  | 7.460   | 3.54       |
| 6                 | 74.198              | -0.451  | 4.508   | 71.700              | -0.508  | 8.135   | 4.40       |
| 7                 | 73.879              | -0.474  | 5.714   | 71.117              | -0.700  | 7.200   | 3.15       |
| 8                 | 73.307              | -0.352  | 4.719   | 71.441              | -0.461  | 6.696   | 2.72       |

**ตารางที่ ง.2** แสดงค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ค่าสี  $a^*$ ,  $b^*$  และค่าการเปลี่ยนแปลงสี ( $DE^*$ ) ของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง – แมงกานีส ทั้ง 8 ชุด ที่มีปริมาณแมงกานีส 0, 0.38, 0.76, 1.3, 1.7, 2.1, 2.6 และ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ โดยทดสอบความต้านทานการหมองเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

| โลหะผสม<br>ชุดที่ | ก่อนการทดสอบการหมอง |         |         | หลังการทดสอบการหมอง |         |         | ค่า $DE^*$ |
|-------------------|---------------------|---------|---------|---------------------|---------|---------|------------|
|                   | $L^*_1$             | $a^*_1$ | $b^*_1$ | $L^*_2$             | $a^*_2$ | $b^*_2$ |            |
| 1                 | 75.625              | -0.636  | 4.609   | 64.339              | 2.737   | 25.288  | 23.80      |
| 2                 | 74.548              | -0.642  | 4.999   | 66.418              | 0.311   | 19.834  | 16.94      |
| 3                 | 75.470              | -0.654  | 4.580   | 69.184              | -0.087  | 12.283  | 9.96       |
| 4                 | 72.273              | -0.215  | 5.498   | 69.282              | -0.323  | 7.796   | 3.77       |
| 5                 | 74.785              | -0.573  | 4.465   | 71.371              | -0.356  | 8.448   | 5.25       |
| 6                 | 72.459              | -0.266  | 5.167   | 70.177              | -0.329  | 8.215   | 3.81       |
| 7                 | 74.494              | -0.528  | 5.024   | 69.439              | -0.353  | 8.698   | 6.25       |
| 8                 | 73.451              | -0.350  | 4.883   | 70.497              | -0.326  | 7.926   | 4.24       |

**ตารางที่ ง.3** แสดงค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ค่าสี  $a^*$ ,  $b^*$  และค่าการเปลี่ยนแปลงสี ( $DE^*$ ) ของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง – แมงกานีส ทั้ง 8 ชุด ที่มีปริมาณแมงกานีส 0, 0.38, 0.76, 1.3, 1.7, 2.1, 2.6 และ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ โดยทดสอบความต้านทานการหมองเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

| โลหะผสม<br>ชุดที่ | ก่อนการทดสอบการหมอง |         |         | หลังการทดสอบการหมอง |         |         | ค่า $DE^*$ |
|-------------------|---------------------|---------|---------|---------------------|---------|---------|------------|
|                   | $L^*_1$             | $a^*_1$ | $b^*_1$ | $L^*_2$             | $a^*_2$ | $b^*_2$ |            |
| 1                 | 75.200              | -0.683  | 4.692   | 41.712              | 18.411  | 9.607   | 38.86      |
| 2                 | 74.874              | -0.657  | 4.764   | 55.156              | 7.518   | 29.487  | 32.66      |
| 3                 | 75.410              | -0.674  | 4.650   | 59.255              | 3.067   | 19.907  | 22.53      |
| 4                 | 73.044              | -0.221  | 4.806   | 65.740              | 1.026   | 11.553  | 10.02      |
| 5                 | 75.056              | -0.591  | 4.397   | 66.747              | 0.598   | 11.933  | 11.28      |
| 6                 | 73.180              | -0.377  | 5.140   | 61.627              | 0.987   | 10.738  | 12.91      |
| 7                 | 75.154              | -0.572  | 4.829   | 63.792              | 0.728   | 10.684  | 12.85      |
| 8                 | 71.174              | -0.124  | 5.529   | 64.300              | 0.015   | 8.493   | 7.49       |

**ตารางที่ ง.4** แสดงค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ค่าสี  $a^*$ ,  $b^*$  และค่าการเปลี่ยนแปลงสี ( $DE^*$ ) ของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง – แมงกานีส ทั้ง 8 ชุด ที่มีปริมาณแมงกานีส 0, 0.38, 0.76, 1.3, 1.7, 2.1, 2.6 และ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ โดยทดสอบความต้านทานการหมองเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

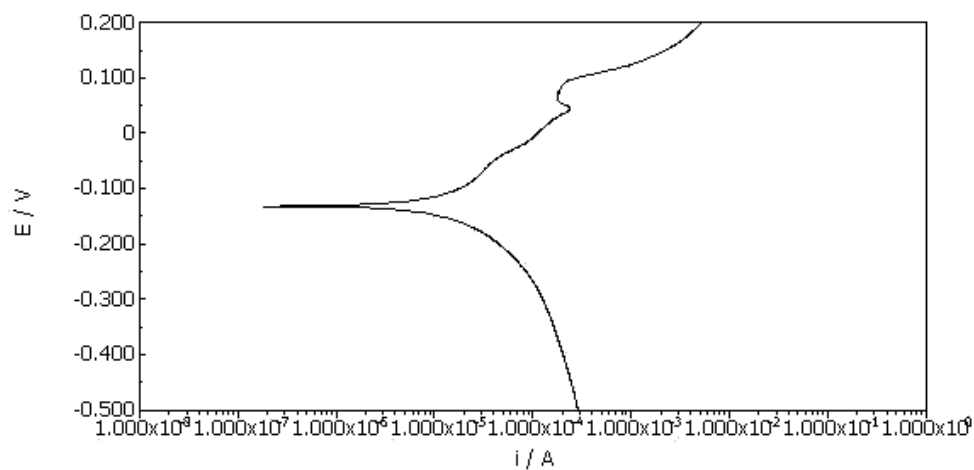
| โลหะผสม<br>ชุดที่ | ก่อนการทดสอบการหมอง |         |         | หลังการทดสอบการหมอง |         |         | ค่า $DE^*$ |
|-------------------|---------------------|---------|---------|---------------------|---------|---------|------------|
|                   | $L^*_1$             | $a^*_1$ | $b^*_1$ | $L^*_2$             | $a^*_2$ | $b^*_2$ |            |
| 1                 | 74.032              | -0.699  | 6.371   | 50.710              | 3.545   | 14.253  | 24.98      |
| 2                 | 75.419              | -0.776  | 4.823   | 58.341              | 3.626   | 28.222  | 29.30      |
| 3                 | 74.299              | -0.672  | 5.296   | 58.721              | 2.523   | 13.207  | 17.76      |
| 4                 | 71.844              | -0.072  | 4.955   | 64.577              | 0.836   | 10.798  | 9.37       |
| 5                 | 75.074              | -0.641  | 4.527   | 64.583              | 1.089   | 11.221  | 12.56      |
| 6                 | 72.773              | -0.366  | 4.646   | 64.908              | 0.821   | 10.929  | 10.14      |
| 7                 | 73.886              | -0.576  | 5.470   | 62.465              | 1.136   | 11.077  | 12.84      |
| 8                 | 71.729              | -0.311  | 4.382   | 69.012              | -0.179  | 8.800   | 5.19       |

**ตารางที่ ง.5** แสดงค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ค่าสี  $a^*$ ,  $b^*$  และค่าการเปลี่ยนแปลงสี ( $DE^*$ ) ของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง – แมงกานีส ทั้ง 8 ชุด ที่มีปริมาณแมงกานีส 0, 0.38, 0.76, 1.3, 1.7, 2.1, 2.6 และ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยทดสอบความต้านทานการหมองเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

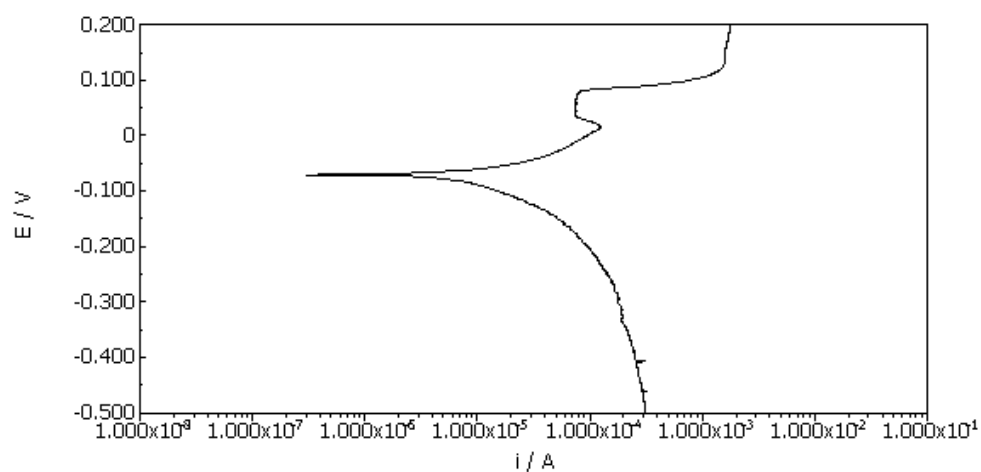
| โลหะผสม<br>ชุดที่ | ก่อนการทดสอบการหมอง |         |         | หลังการทดสอบการหมอง |         |         | ค่า $DE^*$ |
|-------------------|---------------------|---------|---------|---------------------|---------|---------|------------|
|                   | $L^*_1$             | $a^*_1$ | $b^*_1$ | $L^*_2$             | $a^*_2$ | $b^*_2$ |            |
| 1                 | 73.421              | -0.506  | 6.799   | 52.096              | 3.985   | 16.564  | 23.88      |
| 2                 | 73.837              | -0.379  | 4.908   | 54.235              | 5.699   | 22.280  | 26.89      |
| 3                 | 74.599              | -0.677  | 4.550   | 55.492              | 3.992   | 18.513  | 24.12      |
| 4                 | 72.190              | -0.184  | 4.585   | 60.792              | 1.225   | 11.867  | 13.60      |
| 5                 | 74.836              | -0.535  | 4.493   | 62.491              | 1.397   | 11.951  | 14.55      |
| 6                 | 73.124              | -0.278  | 5.175   | 60.315              | 1.590   | 11.854  | 14.57      |
| 7                 | 73.825              | -0.382  | 4.665   | 60.565              | 1.704   | 9.829   | 14.38      |
| 8                 | 73.669              | -0.387  | 4.126   | 62.079              | 1.120   | 9.880   | 13.03      |

## **ภาคผนวก จ.**

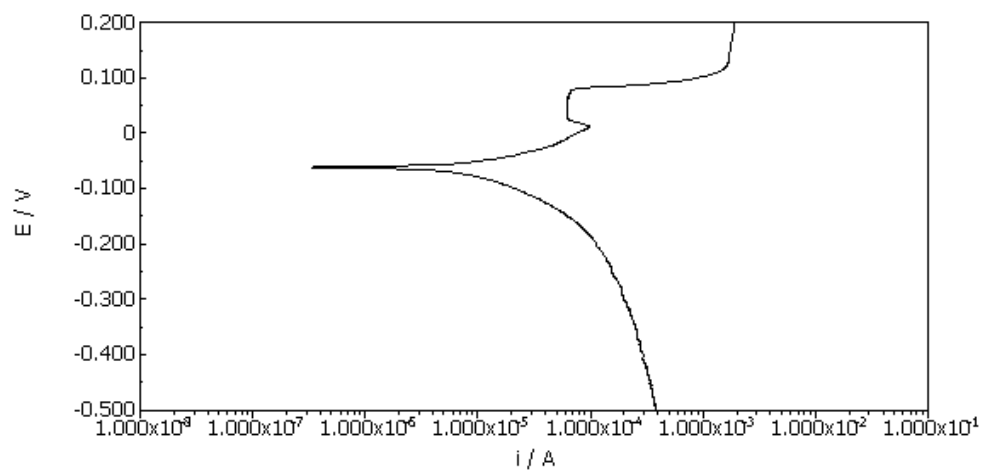
เส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดสอบการกัดกร่อนของ  
โลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง – แมงกานีส โดยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า



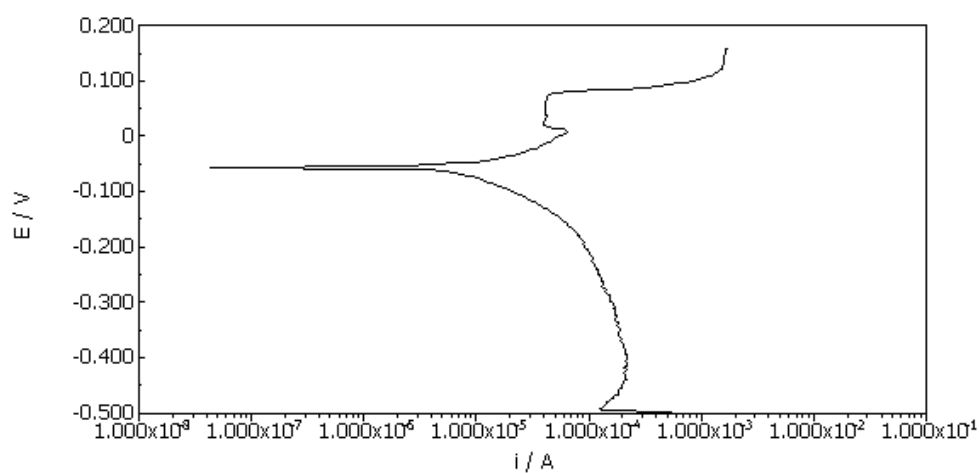
**รูปที่ จ.1-1** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสตริ่งที่ไม่มีแมงกานีสผสม ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



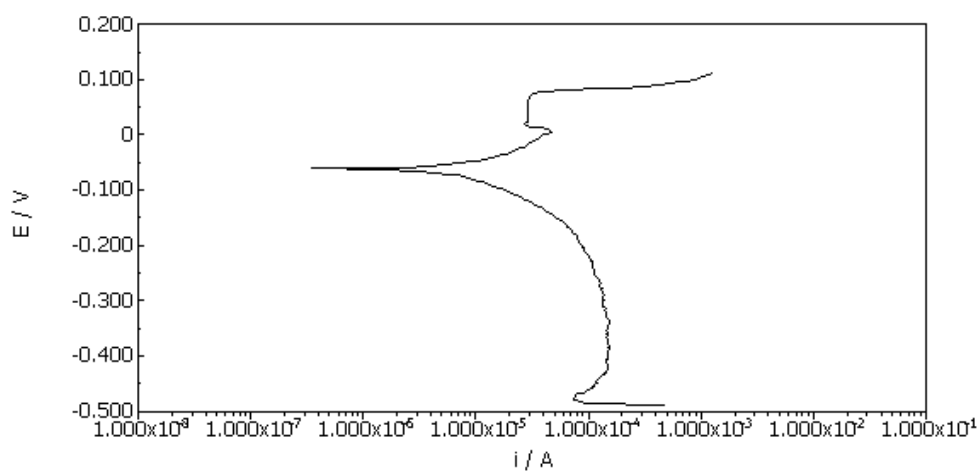
**รูปที่ จ.1-2** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสตริ่งที่มีปริมาณแมงกานีส 0.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



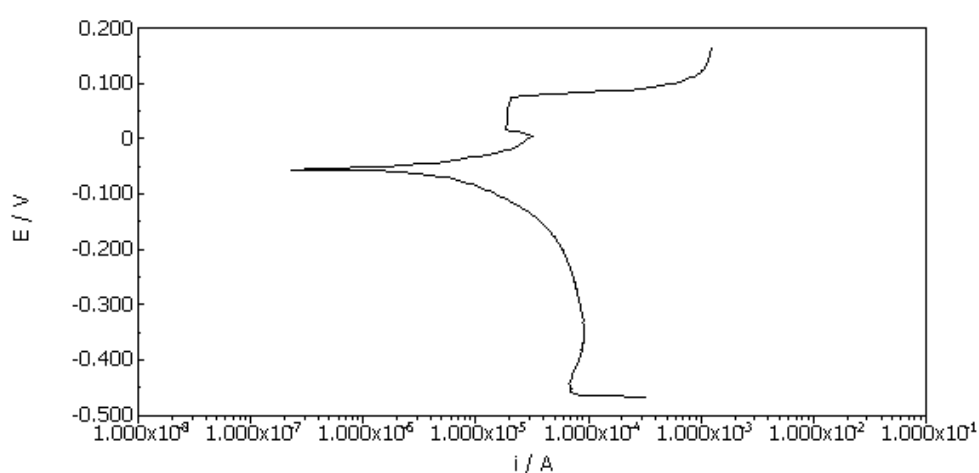
**รูปที่ จ.1-3** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 0.76 เปอร์เซ็นต์  
โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ  
25 องศาเซลเซียส



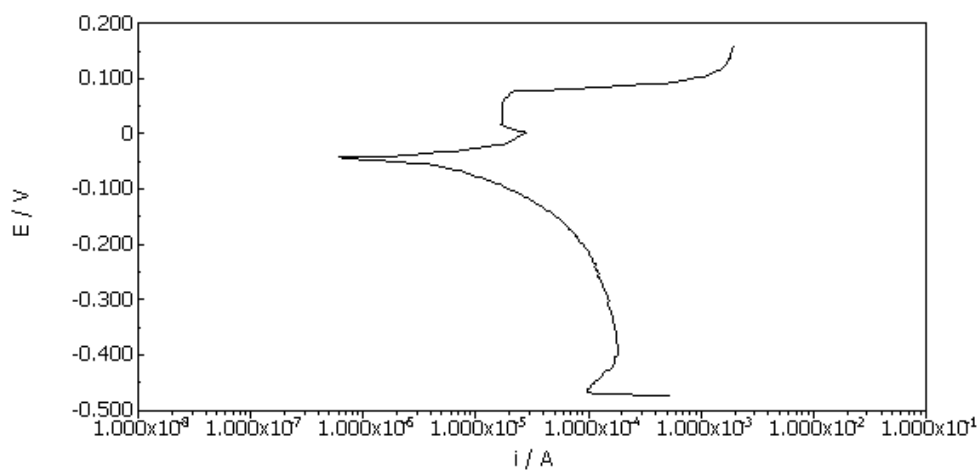
**รูปที่ จ.1-4** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 1.30 เปอร์เซ็นต์  
โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ  
25 องศาเซลเซียส



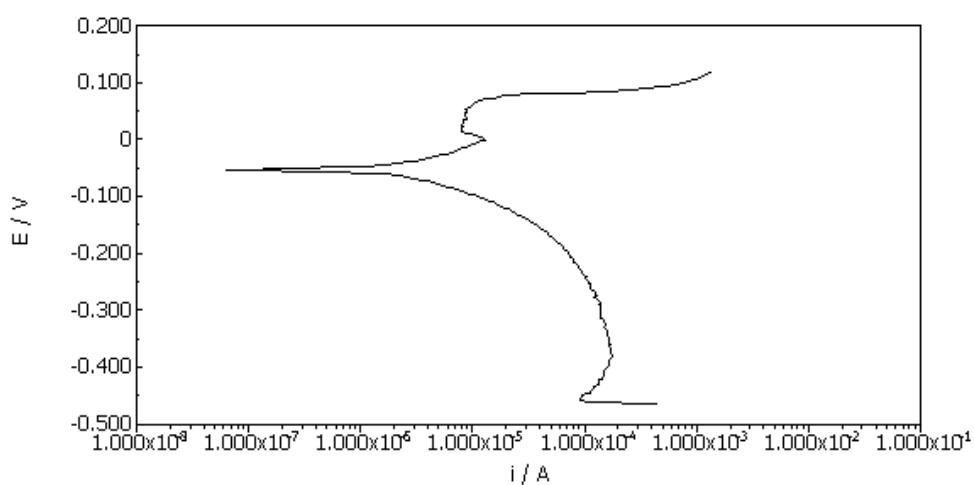
**รูปที่ จ.1-5** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 1.70 เปอร์เซนต์  
โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ  
25 องศาเซลเซียส



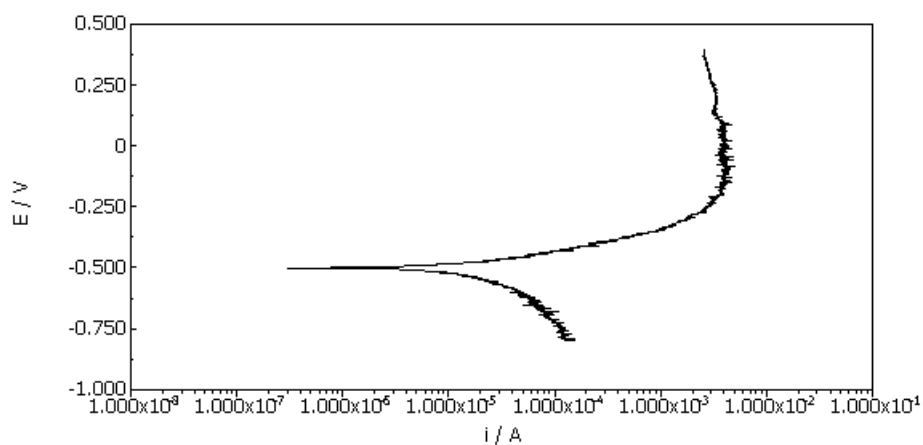
**รูปที่ จ.1-6** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 2.10 เปอร์เซนต์  
โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ  
25 องศาเซลเซียส



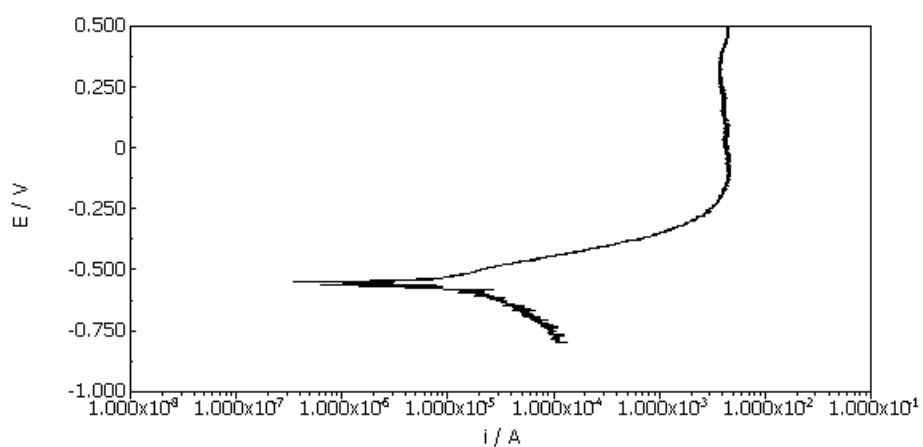
**รูปที่ จ.1-7** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 2.60 เปอร์เซ็นต์  
โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ  
๖๕ องศาเซลเซียส



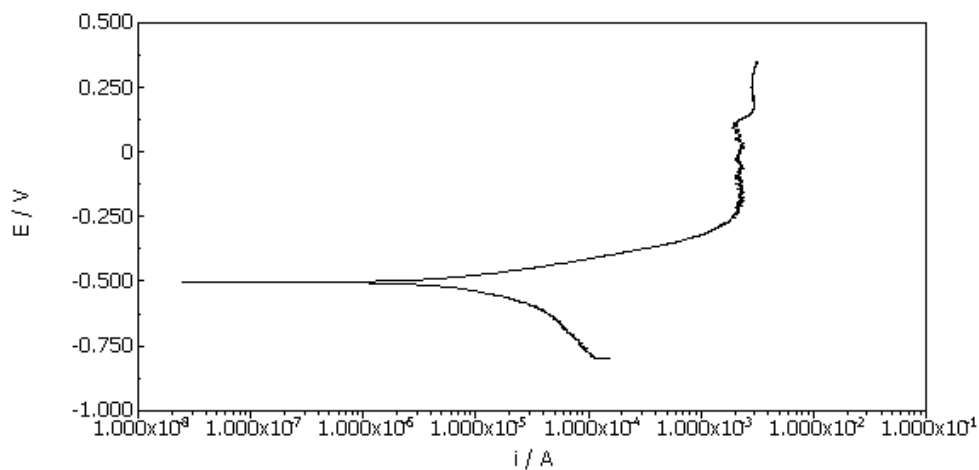
**รูปที่ จ.1-8** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 3.00 เปอร์เซ็นต์  
โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ  
๖๕ องศาเซลเซียส



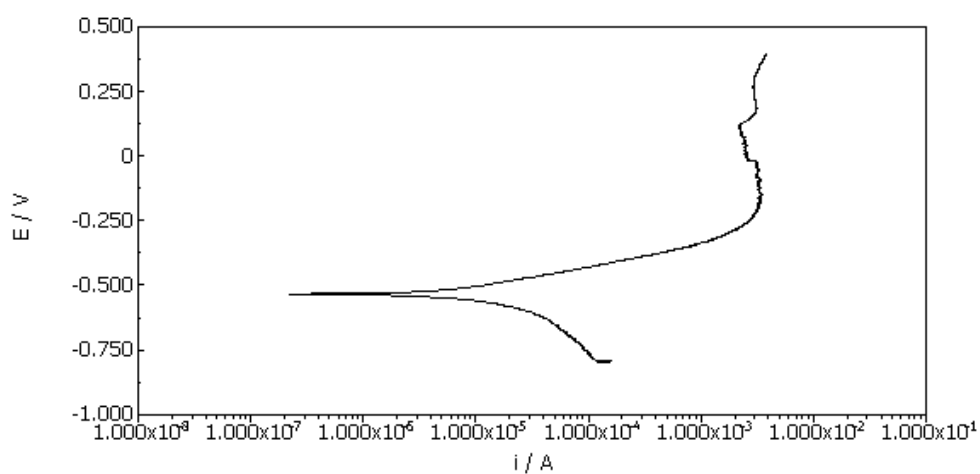
**รูปที่ จ.2-1** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่มีแมงกานีสผสม ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



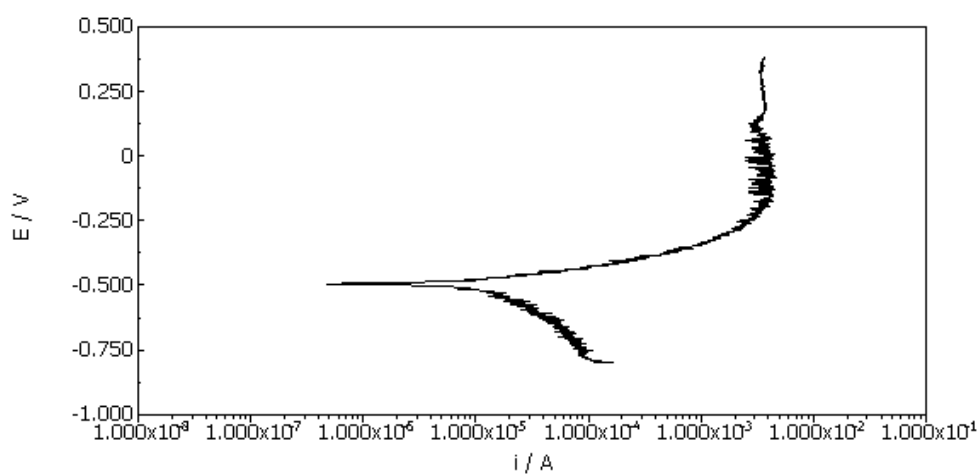
**รูปที่ จ.2-2** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 0.38 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



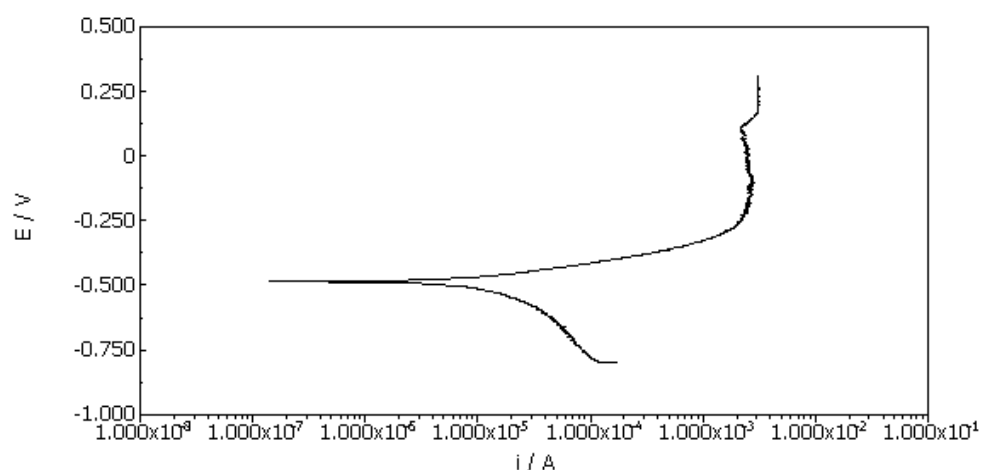
**รูปที่ จ 2-3** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 0.76 เปอร์เซ็นต์  
โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วย  
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



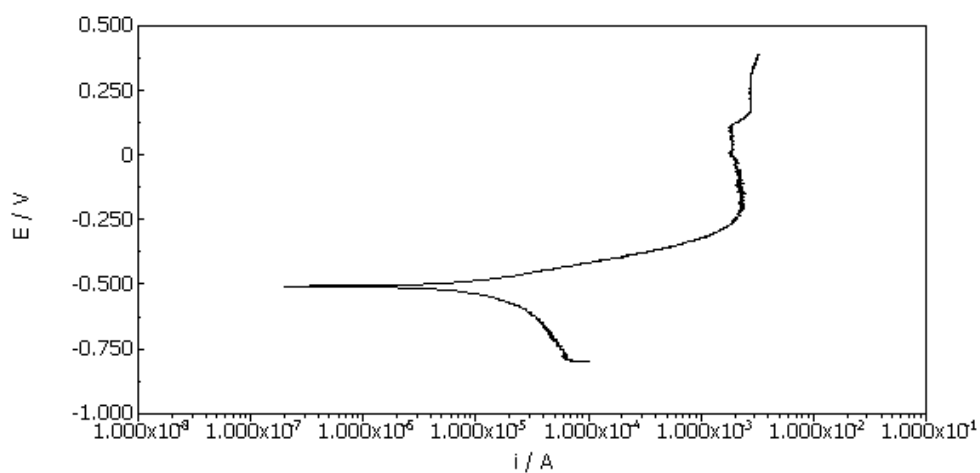
**รูปที่ จ 2-4** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 1.30 เปอร์เซ็นต์  
โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วย  
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



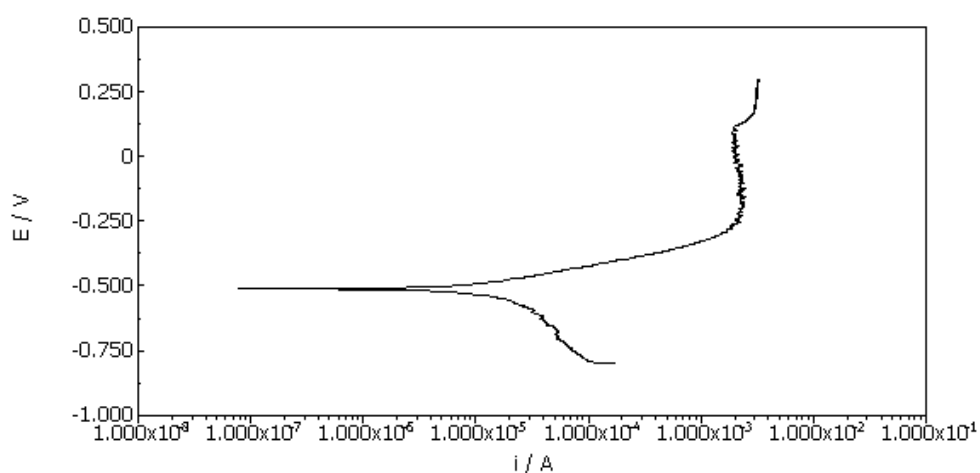
**รูปที่ จ.2-5** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 1.70 เปอร์เซ็นต์  
โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วย  
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



**รูปที่ จ.2-6** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 2.10 เปอร์เซ็นต์  
โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วย  
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

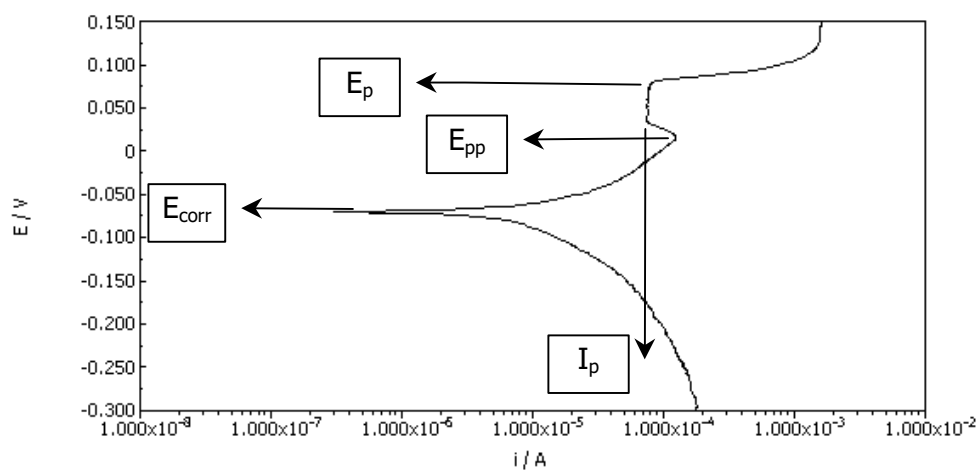


**รูปที่ จ.2-7** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 2.60 เปอร์เซ็นต์  
โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วย  
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

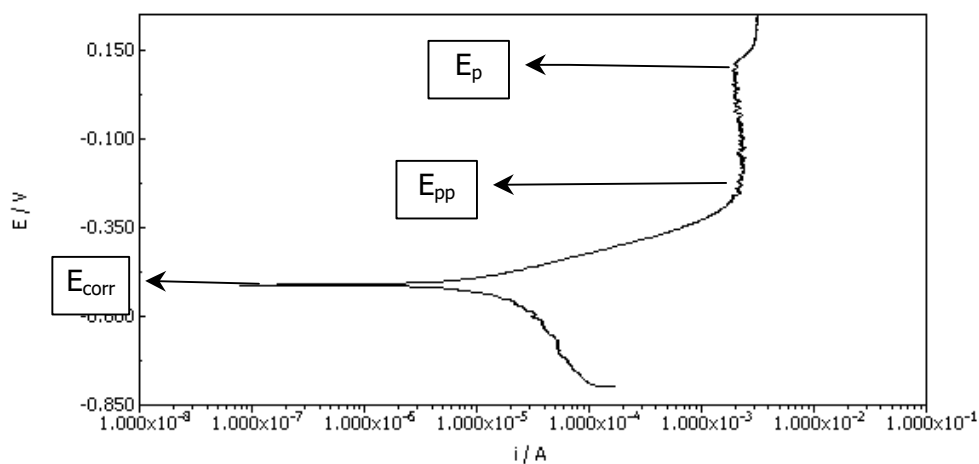


**รูปที่ จ 2-8** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 3.00 เปอร์เซ็นต์  
โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วย  
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

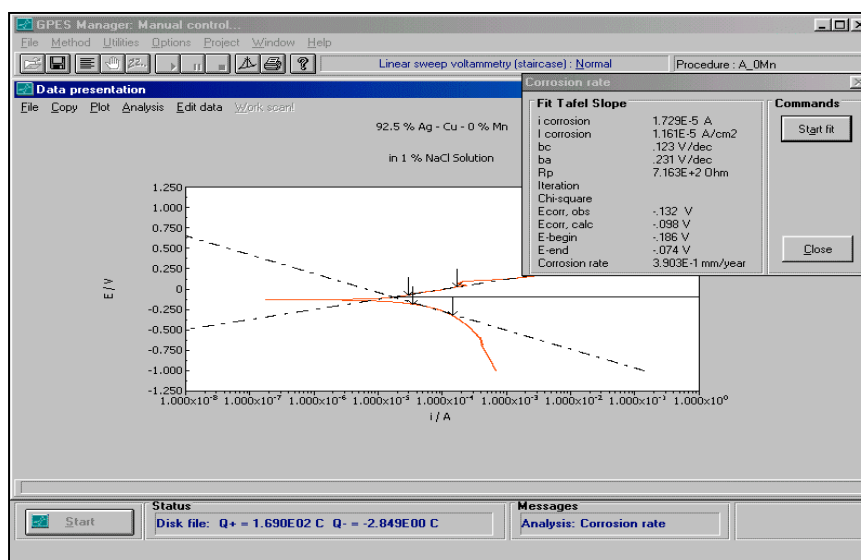
การหาค่า  $E_{\text{corr}}$ ,  $E_p$ ,  $E_{pp}$  และ  $I_p$  และอัตราการกัดกร่อน  
จากเส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิง



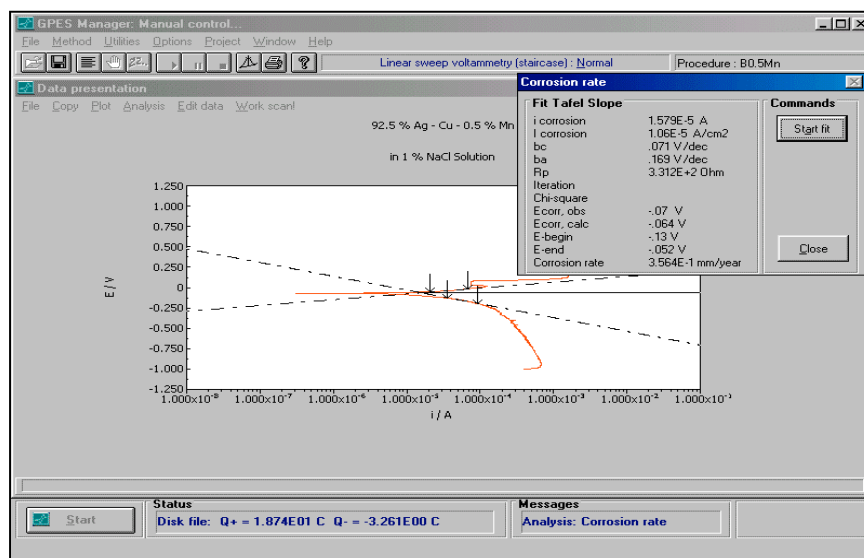
รูปที่ จ.3-1 ตัวอย่างการหาค่า  $E_{\text{corr}}$ ,  $E_p$ ,  $E_{pp}$  และ  $I_p$  จากเส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 0.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์



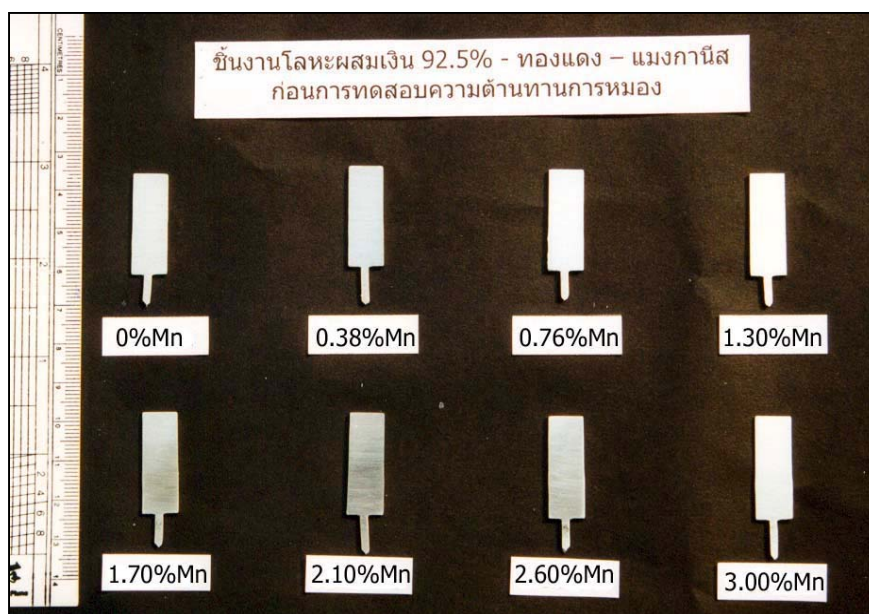
รูปที่ จ 3-2 ตัวอย่างการหาค่า  $E_{\text{corr}}$ ,  $E_p$  และ  $E_{pp}$  จากเส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งอ้อมด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์



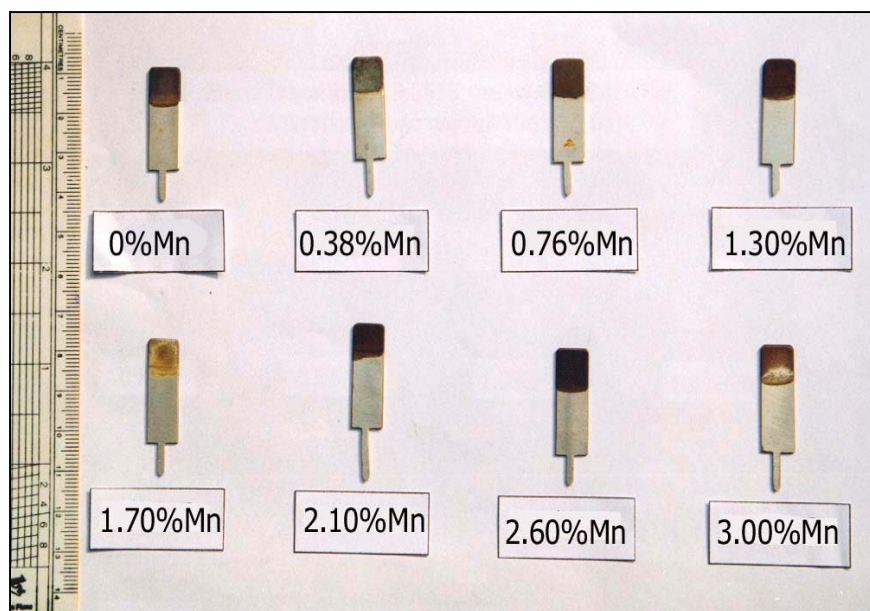
รูปที่ จ.3-3 การหาค่า  $I_{\text{corr}}$  และอัตราการกัดกร่อนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์  
จากเส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่มีปริมาณแมงกานีส  
ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



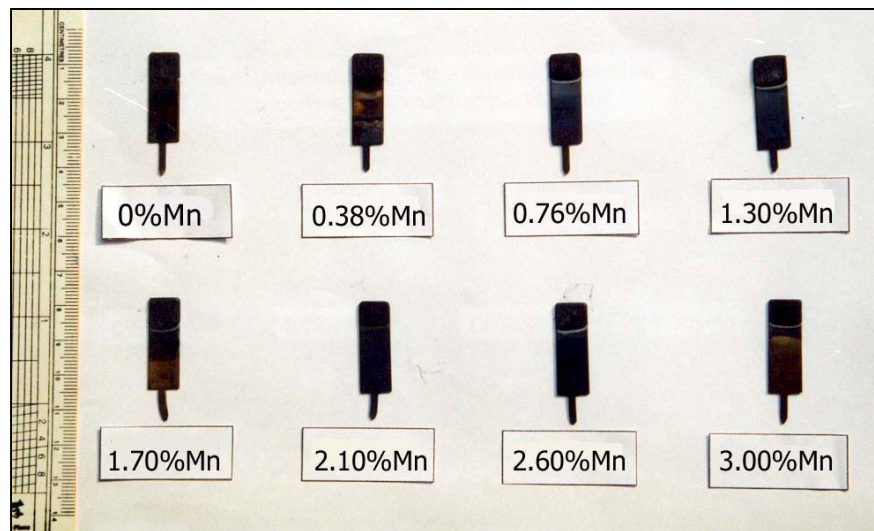
รูปที่ จ.3-4 การหาค่า  $I_{\text{corr}}$  และอัตราการกัดกร่อนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จาก  
เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 0.38  
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ ๔.4-1 ภาพแสดงชิ้นงานโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส  
ก่อนการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนโดยเทคนิคเคมีไฟฟ้า



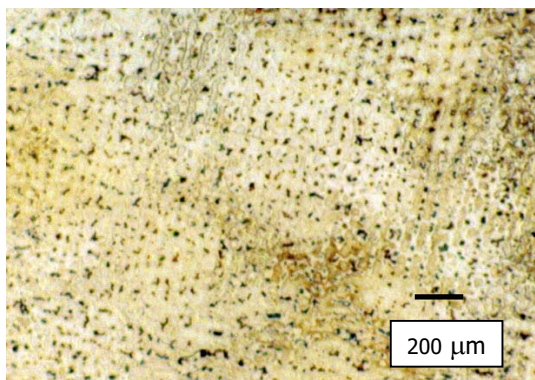
รูปที่ ๔.4-2 ภาพแสดงชิ้นงานโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส  
หลังการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนโดยเทคนิคเคมีไฟฟ้า  
ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ  
25 องศาเซลเซียส



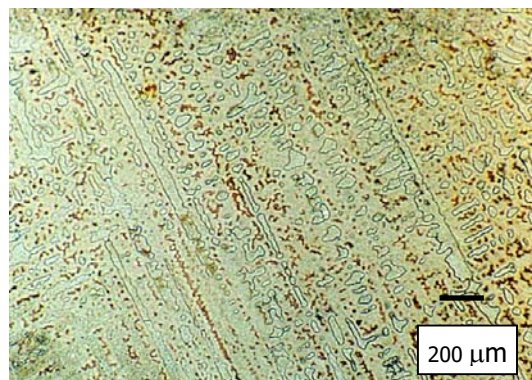
รูปที่ จ.4-3 ภาพแสดงชิ้นงานโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส  
 หลังการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนโดยเทคนิคเคมีไฟฟ้า  
 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วย  
 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

## **ภาคผนวก จ.**

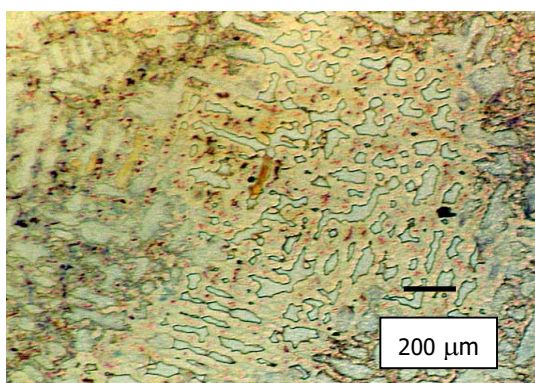
โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง -  
แมงกานีสในสภาพหล่อ



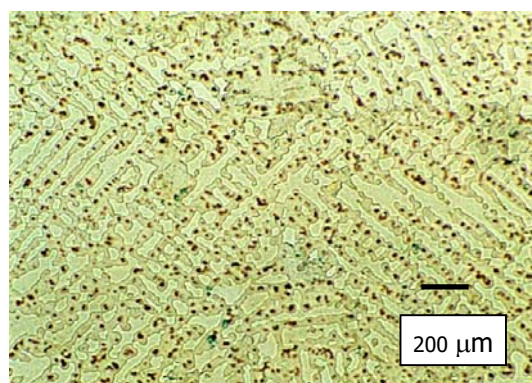
ฉ.1-1



ฉ.1-2

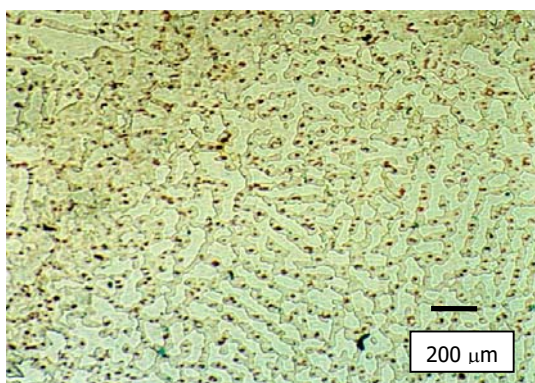


ฉ.1-3

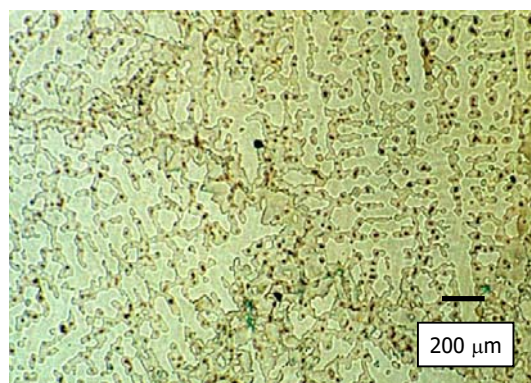


ฉ.1-4

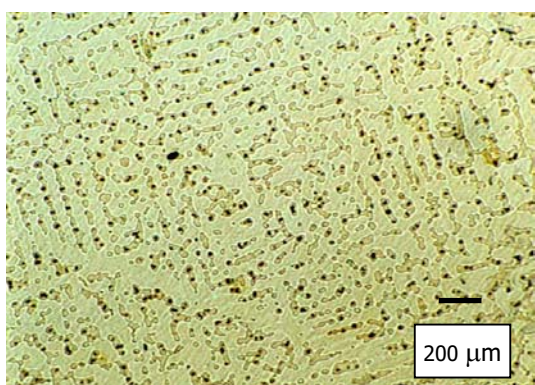
- รูปที่ ฉ.1** ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส  
 ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 50 เท่า
- ฉ.1-1 โลหะผสมชุดที่ 1 : 7.65%Cu – balance of Ag
- ฉ.1-2 โลหะผสมชุดที่ 2 : 6.97%Cu – 0.38%Mn – balance of Ag
- ฉ.1-3 โลหะผสมชุดที่ 3 : 6.63%Cu – 0.76%Mn – balance of Ag
- ฉ.1-4 โลหะผสมชุดที่ 4 : 6.14%Cu – 1.30%Mn – balance of Ag



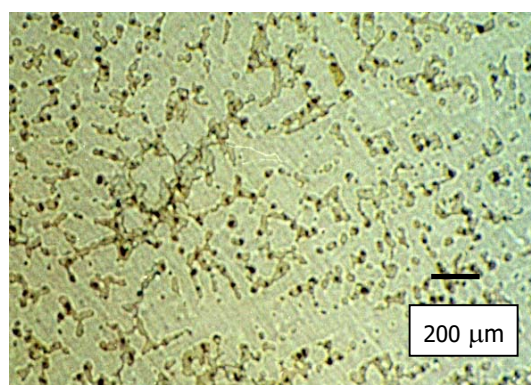
ด.1-5



ด.1-6



ด.1-7



ด.1-8

**รูปที่ ด.1 (ต่อ)** ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส

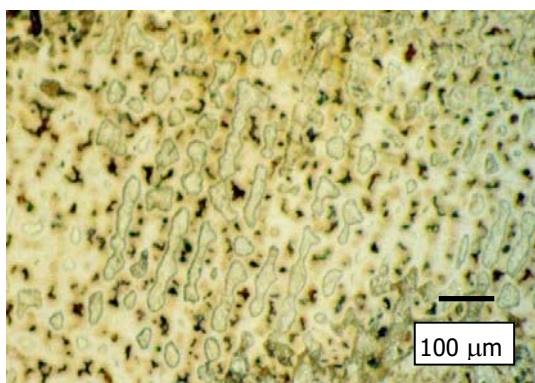
ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 50 เท่า

ด.1-5 โลหะผสมชุดที่ 5 : 5.40%Cu – 1.70%Mn – balance of Ag

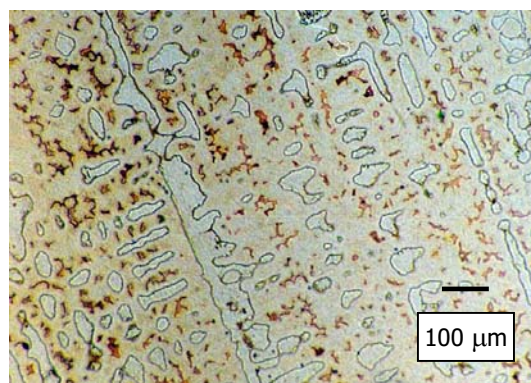
ด.1-6 โลหะผสมชุดที่ 6 : 4.90%Cu – 2.10%Mn – balance of Ag

ด.1-7 โลหะผสมชุดที่ 7 : 4.40%Cu – 2.60%Mn – balance of Ag

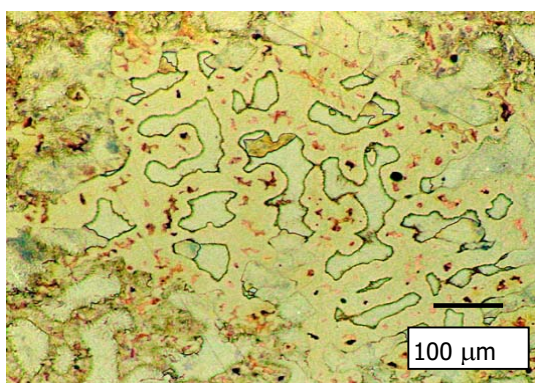
ด.1-8 โลหะผสมชุดที่ 8 : 4.00%Cu – 3.00%Mn – balance of Ag



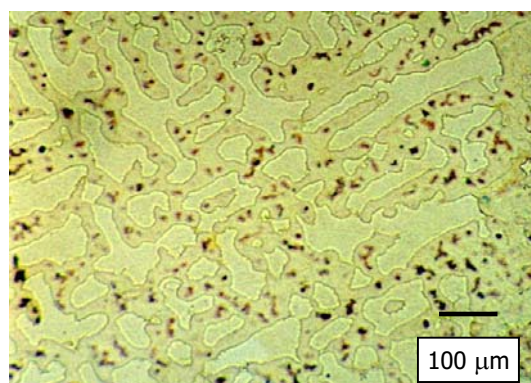
ด.2-1



ด.2-2



ด.2-3



ด.2-4

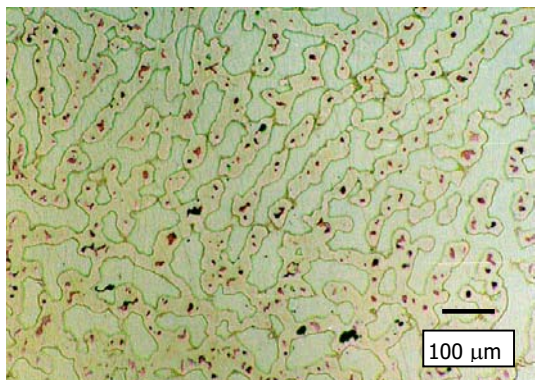
**รูปที่ ด.2** ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส  
ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 100 เท่า

ด.2-1 โลหะผสมชุดที่ 1 : 7.65%Cu – balance of Ag

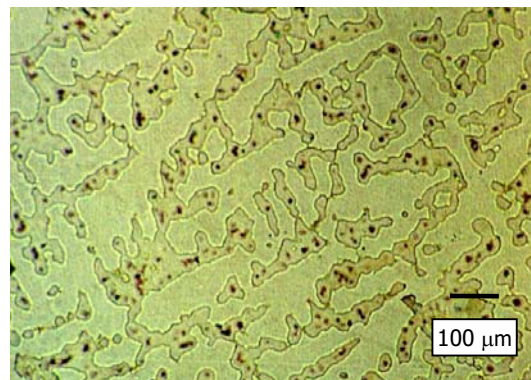
ด.2-2 โลหะผสมชุดที่ 2 : 6.97%Cu – 0.38%Mn – balance of Ag

ด.2-3 โลหะผสมชุดที่ 3 : 6.63%Cu – 0.76%Mn – balance of Ag

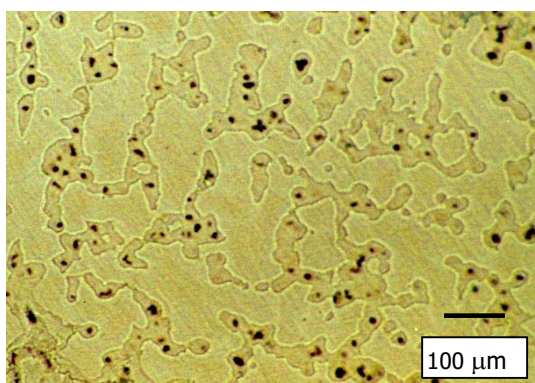
ด.2-4 โลหะผสมชุดที่ 4 : 6.14%Cu – 1.30%Mn – balance of Ag



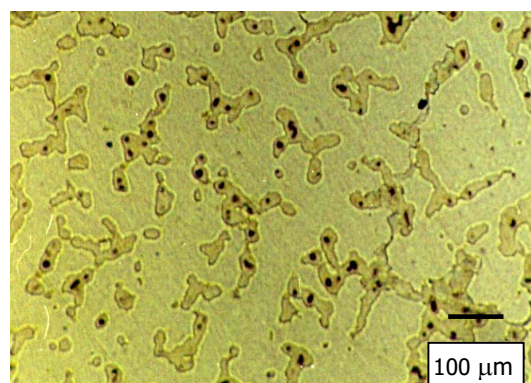
จ.2-5



จ.2-6



จ.2-7



จ.2-68

**รูปที่ จ.2 (ต่อ)** ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส

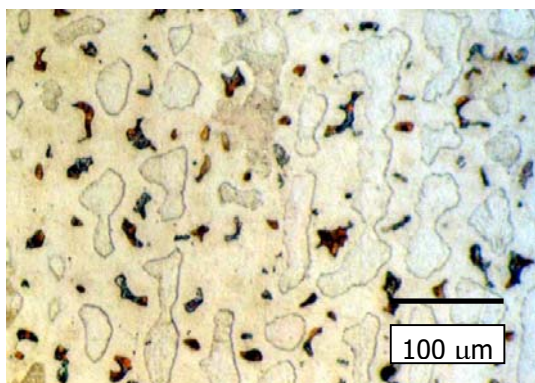
ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 100 เท่า

จ.2-5 โลหะผสมชุดที่ 5 : 5.40%Cu – 1.70%Mn – balance of Ag

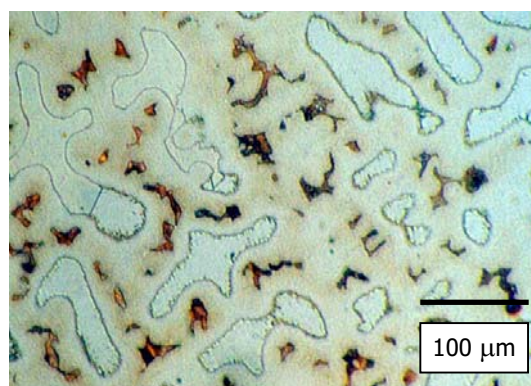
จ.2-6 โลหะผสมชุดที่ 6 : 4.90%Cu – 2.10%Mn – balance of Ag

จ.2-7 โลหะผสมชุดที่ 7 : 4.40%Cu – 2.60%Mn – balance of Ag

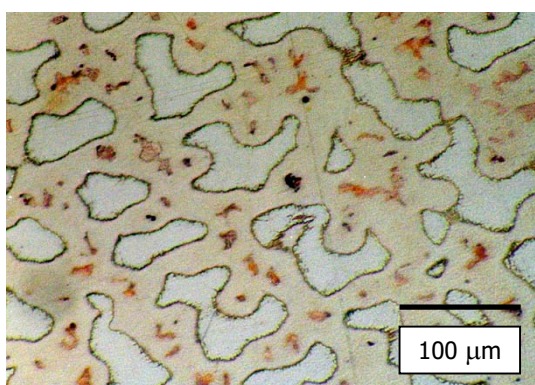
จ.2-8 โลหะผสมชุดที่ 8 : 4.00%Cu – 3.00%Mn – balance of Ag



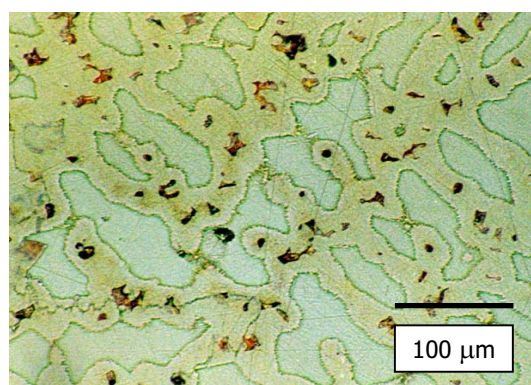
ฉ.3-1



ฉ.3-2



ฉ.3-3



ฉ.3-4

**รูปที่ ฉ.3** ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส

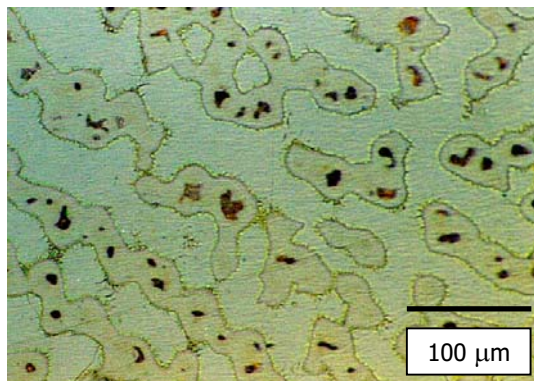
ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 200 เท่า

ฉ.3-1 โลหะผสมชุดที่ 1 : 7.65%Cu – balance of Ag

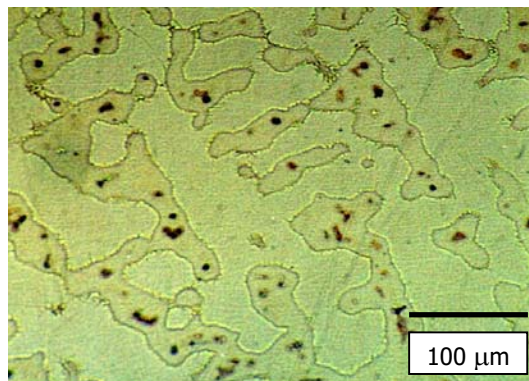
ฉ.3-2 โลหะผสมชุดที่ 2 : 6.97%Cu – 0.38%Mn – balance of Ag

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

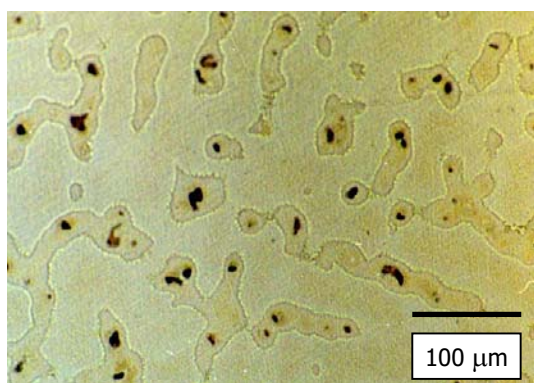
ฉ.3-4 โลหะผสมชุดที่ 4 : 6.14%Cu – 1.30%Mn – balance of Ag



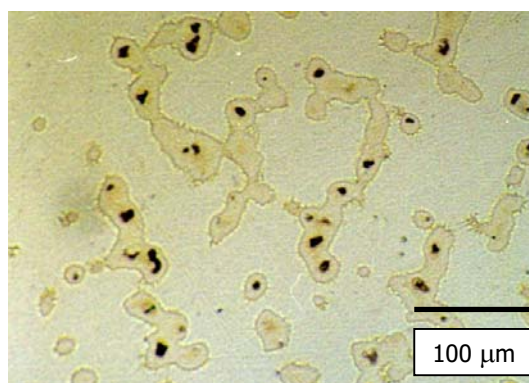
ฉ.3-5



ฉ.3-6



ฉ.3-7



ฉ.3-8

**รูปที่ ฉ.3 (ต่อ)** ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส

ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 200 เท่า

ฉ.3-5 โลหะผสมชุดที่ 5 : 5.40%Cu – 1.70%Mn – balance of Ag

ฉ.3-6 โลหะผสมชุดที่ 6 : 4.90%Cu – 2.10%Mn – balance of Ag

ฉ.3-7 โลหะผสมชุดที่ 7 : 4.40%Cu – 2.60%Mn – balance of Ag

ฉ.3-8 โลหะผสมชุดที่ 8 : 4.00%Cu – 3.00%Mn – balance of Ag

## ภาคผนวก ช.

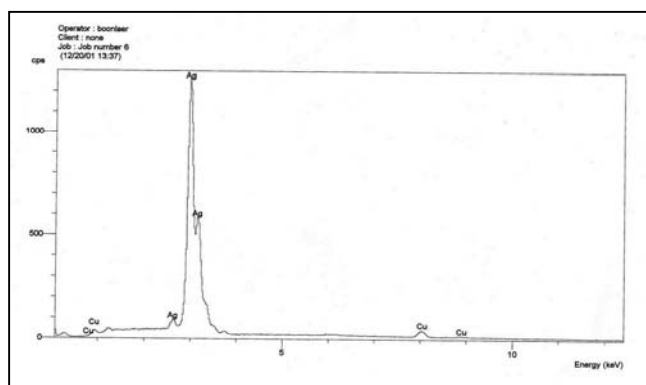
ปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของโลหะเงินผสม

ตาราง ๗. แสดงปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง – แมงกานีส  
ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM)

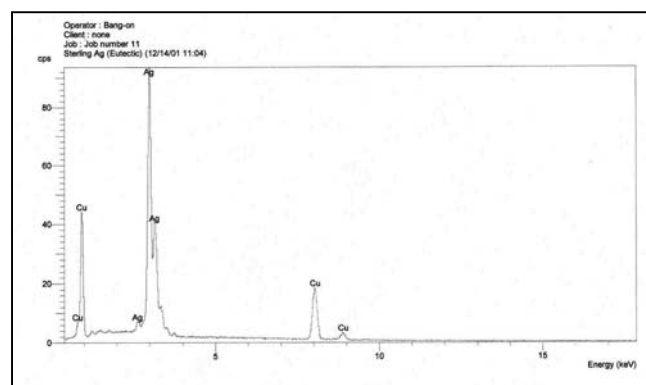
| Sample |         | Chemical Composition of Samples |      |    | Chemical Composition from EDX * (wt.%) |      |                     |       |       |      |                            |       |      |  |
|--------|---------|---------------------------------|------|----|----------------------------------------|------|---------------------|-------|-------|------|----------------------------|-------|------|--|
|        |         |                                 |      |    | Matrix                                 |      | Secondary Structure |       |       |      |                            |       |      |  |
|        |         |                                 |      |    |                                        |      | Eutectic (overall)  |       |       |      | Black Particle in Eutectic |       |      |  |
|        | Ag      | Cu                              | Mn   | Ag | Cu                                     | Mn   | Ag                  | Cu    | Mn    | Ag   | Cu                         | Mn    |      |  |
| 1      | balance | 7.65                            | -    |    | 95.53                                  | 4.47 | -                   | 69.53 | 30.47 | -    | 22.09                      | 77.91 | -    |  |
| 2      | balance | 6.97                            | 0.38 |    | 92.46                                  | 7.23 | 0.31                | 70.90 | 28.62 | 0.48 | 29.29                      | 70.17 | 0.54 |  |
| 3      | balance | 6.63                            | 0.76 |    | 93.11                                  | 6.22 | 0.67                | 71.74 | 27.10 | 1.17 | ND                         | ND    | ND   |  |
| 4      | balance | 6.14                            | 1.30 |    | 95.52                                  | 3.41 | 1.07                | 65.19 | 32.92 | 1.88 | 20.96                      | 76.69 | 2.35 |  |
| 5      | balance | 5.40                            | 1.70 |    | 94.16                                  | 4.22 | 1.62                | 60.84 | 36.54 | 2.61 | ND                         | ND    | ND   |  |
| 6      | balance | 4.90                            | 2.10 |    | 93.80                                  | 4.14 | 2.05                | 57.41 | 39.20 | 3.39 | ND                         | ND    | ND   |  |
| 7      | balance | 4.40                            | 2.60 |    | 92.81                                  | 4.62 | 2.57                | 66.58 | 29.36 | 4.06 | 15.76                      | 78.52 | 5.71 |  |
| 8      | balance | 4.00                            | 3.00 |    | 91.42                                  | 5.33 | 3.25                | 53.99 | 40.41 | 5.60 | ND                         | ND    | ND   |  |

\* Determined quantitatively by standardless

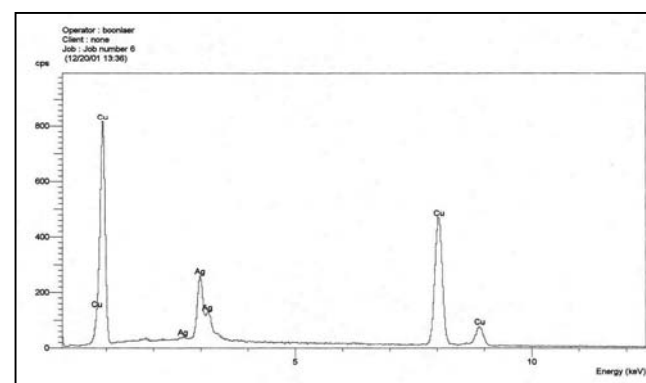
ND = not determined



๗.1-1



๗.1-2



๗.1-3

**รูปที่ ๗.1** กราฟแสดงผลจากการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของโลหะเงินสเตอร์ลิง (Ag + Cu 7.65%)

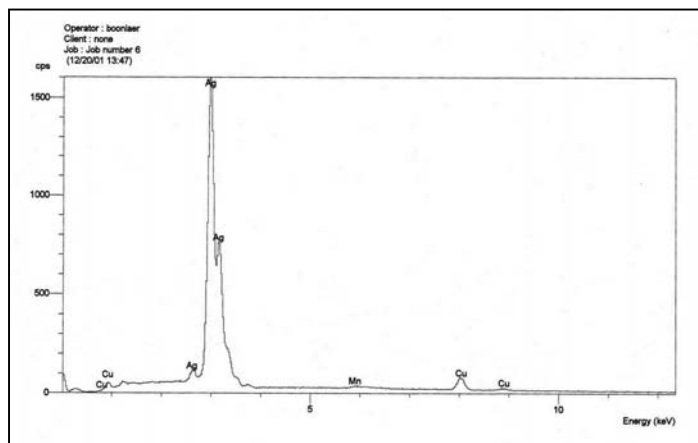
ที่ไม่มีแมงกานีสผสม ด้วย EDX\* (ชิ้นงานชุดที่ 1, 0% Mn) โดยตำแหน่งที่ตรวจสอบมีดังนี้

๗.1-1 บริเวณโครงสร้างเนื้อพื้น : 95.53%Ag – 4.47%Cu

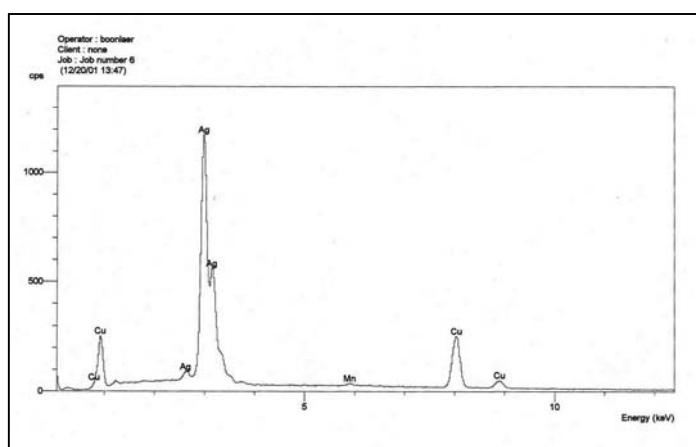
๗.1-2 บริเวณโครงสร้างยูเทคติก : 69.53%Ag – 30.47Cu ( ตำแหน่ง A. )

๗.1-3 บริเวณอนุภาคน้ำตาลในโครงสร้างยูเทคติก : 22.09%Ag – 77.91%Cu ( ตำแหน่ง B. )

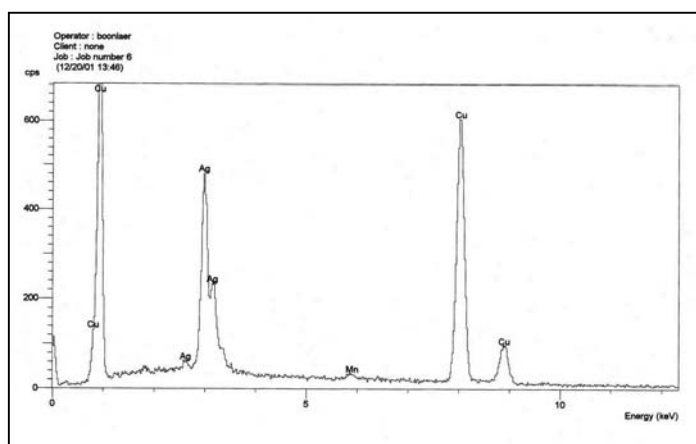
\* หมายเหตุ : ชิ้นงานที่ทำการทดสอบ (ชุดที่ 1) มีโครงสร้างจุลภาค หน้า 4.41 รูปที่ 4.21 ก. - ข.



รูปที่ ๒.๒-1



รูปที่ ๒.๒-2



รูปที่ ๒.๒-3

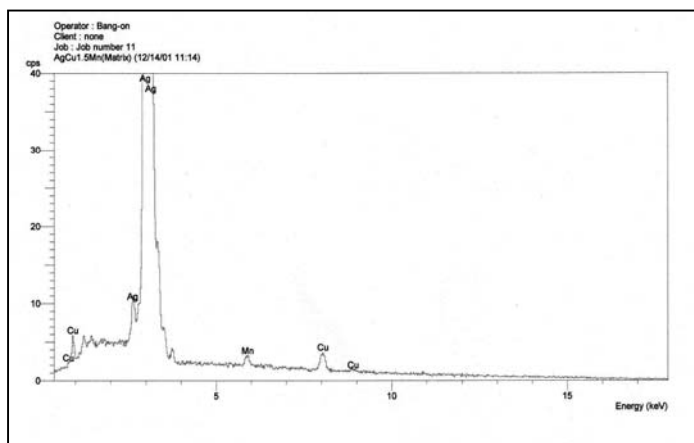
รูปที่ ๒.๒ กราฟแสดงผลจากการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของโลหะเงินสเตอร์ลิง ที่มีแมงกานีส 0.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วย EDX

๒.๒-1 บริเวณโครงสร้างเนื้อพื้น : 92.46%Ag – 7.23%Cu – 0.31%Mn (ตำแหน่ง Matrix)

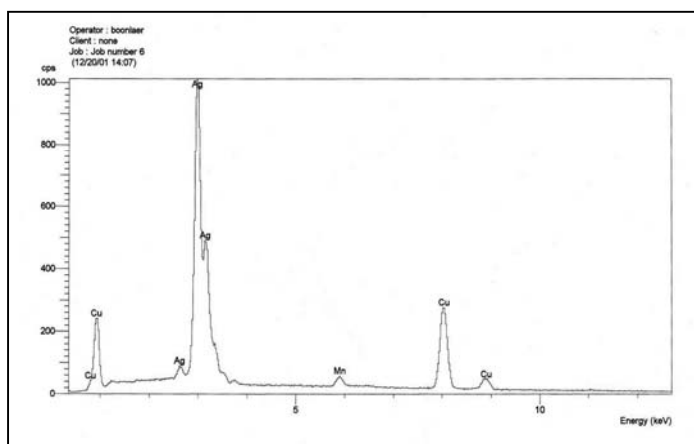
๒.๒-2 บริเวณโครงสร้างยูเทคติก : 70.90%Ag – 28.62Cu – 0.48%Mn (ตำแหน่ง C)

๒.๒-3 บริเวณอนุภาคสีดำในโครงสร้างยูเทคติก : 29.29%Ag – 70.17%Cu – 0.54%Mn (ตำแหน่ง D)

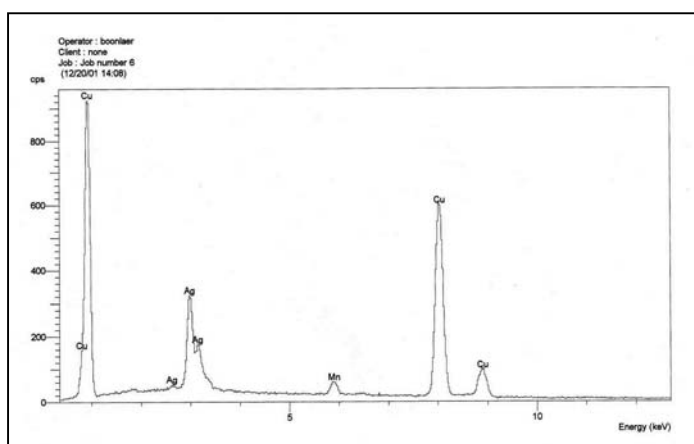
\* หมายเหตุ : ชิ้นงานทำการทดสอบ (ชุดที่ 2) มีโครงสร้างจุลภาคอยู่ในหน้า 4-41 (รูปที่ 4.21 ค - ง)



๗.3-1



๗.3-2



๗.3-3

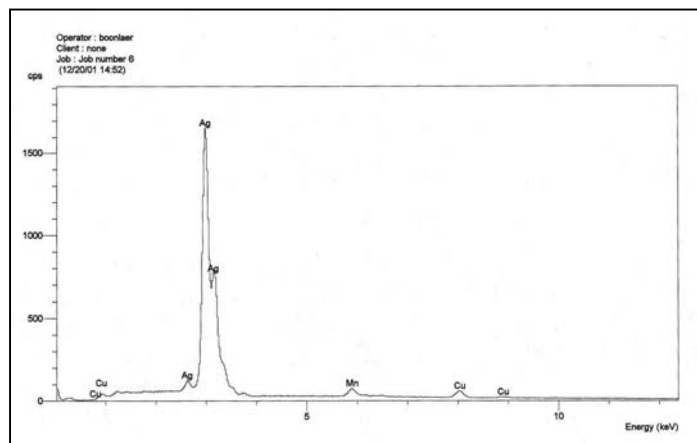
**รูปที่ ๓** กราฟแสดงผลจากการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีแมงกานีส 1.30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วย EDX

๗.3-1 บริเวณโครงสร้างเนื้อพื้น : 95.52%Ag – 3.41%Cu – 1.07%Mn (ตำแหน่ง Matrix)

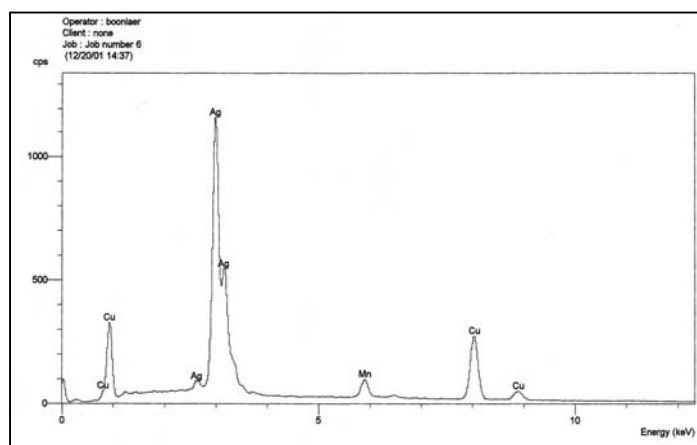
๗.3-2 บริเวณโครงสร้างยูเทคติก : 65.19%Ag – 32.92Cu – 1.88%Mn (ตำแหน่ง E)

๗.3-3 บริเวณอนุภาคสีดำในโครงสร้างยูเทคติก : 20.96%Ag – 76.69%Cu – 2.35%Mn

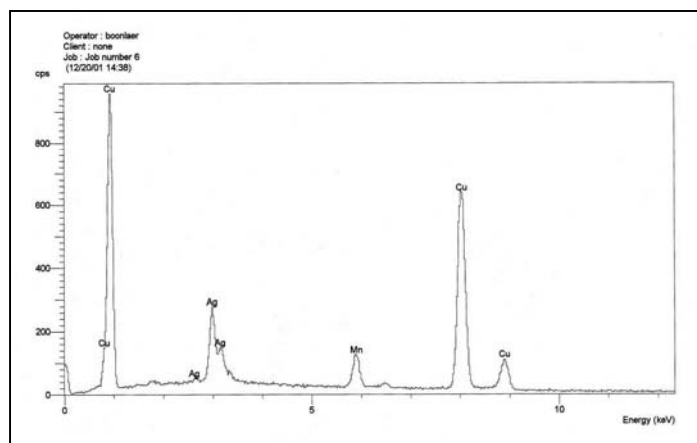
\* หมายเหตุ : ชิ้นงานที่ทำการทดสอบ (ชุดที่ 4) มีโครงสร้างจุลภาคอยู่ในหน้า 4-42 (รูปที่ 4.21 ข – ซ)



๗.4-1



๗.4-2



๗.4-3

รูปที่ ๗.4 กราฟแสดงผลจากการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีแมงกานีส 2.60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วย EDX

๗.4-1 บริเวณโครงสร้างเนื้อพื้น : 92.81%Ag – 4.62%Cu – 2.57%Mn (ตำแหน่ง Matrix)

๗.4-2 บริเวณโครงสร้างยูเทคติก : 66.58%Ag – 29.36Cu – 4.06%Mn (ตำแหน่ง Eutectic)

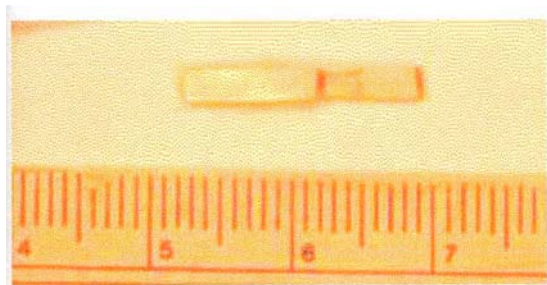
๗.4-3 บริเวณอนุภาคสีดำในโครงสร้างยูเทคติก : 15.76%Ag – 78.52%Cu – 5.71%Mn

\* หมายเหตุ : ชิ้นงานที่ทำการทดสอบ (ชุดที่ 7) มีโครงสร้างจุลภาคอยู่ในรูปที่ 4.21 (ฐ – ๗)

**ภาคผนวก ซ.**

*ผลการทดสอบ Lap Shear*

๗. แสดงลักษณะรูปชิ้นงานทดสอบ Lab Shear

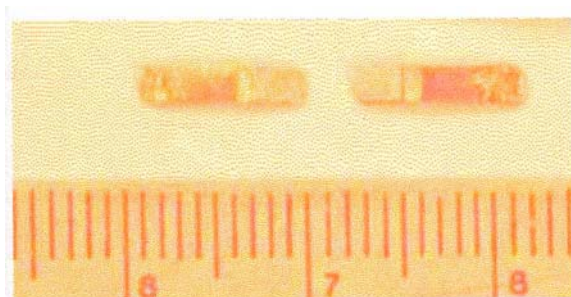


(ก.)



(ข.)

รูปที่ ๗.1 แสดงชิ้นงานทดสอบ Lap Shear ก่อนดิ่ง (ก.) ด้านหน้า (ข.) ด้านข้าง



(ค.)



(ง.)

รูปที่ ๗.2 แสดงชิ้นงานทดสอบ Lap Shear หลังดิ่ง (ค.) ด้านหน้า (ง.) ด้านข้าง