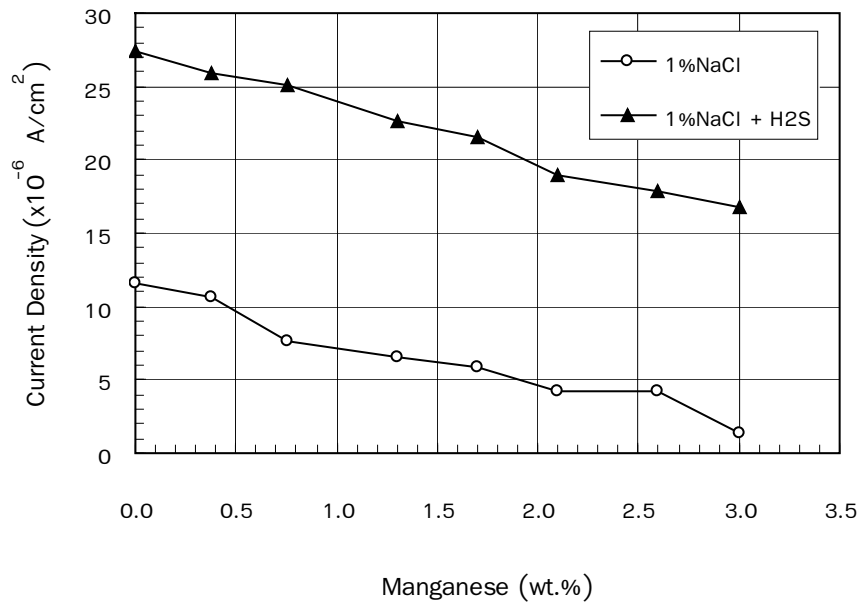
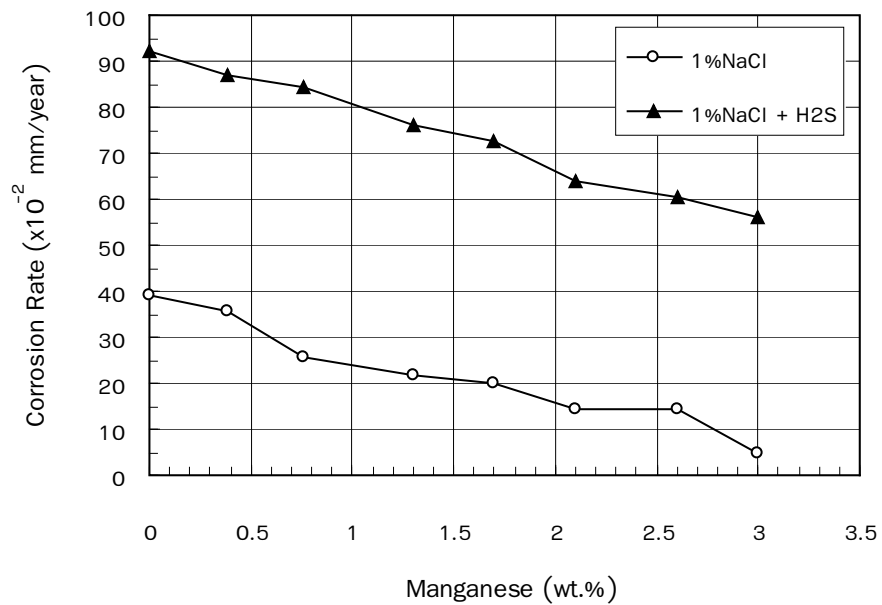




รูปที่ 4.32 ผลของธาตุแมงกานีสในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงต่อค่า  $I_{\text{corr}}$  ในสภาวะที่มี 1%NaCl เปรียบเทียบกับสภาวะที่มี 1%NaCl อิ่มตัวด้วย H<sub>2</sub>S ที่อุณหภูมิ 25 °C



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 แต่ความสามารถในการต้านทานการหมองต่ำ 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 โดยในตัวหลังสุดนั้นจะพบว่าเป็นปัญหาที่สำคัญข้อหนึ่งทีเดียว

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 กับการเริ่มมีการใช้ทองคำและทองคำกระวัด ตั้งแต่ราวปี ค.ศ. 1854 มีความจำเป็นที่ต้องมีการใช้โลหะประสานควบคู่ไปด้วย เพื่อใช้ในการประสานรอยต่อต่าง ๆ ในช่วงแรกนั้นก็ได้นำแคดเมียมมาใช้ในงานประสานทองเนื่องจากมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำมาก แต่ในช่วงหลังก็ได้ล้มเลิกไปเนื่องจากเป็นสารพิษและมีอันตรายต่อผู้ใช้งานอย่างมาก จึงได้มีการพัฒนาโลหะประสานทองตัวอื่น ๆ ขึ้นมา โดยเริ่มมีการใช้โลหะชนิดอื่น ๆ ขึ้นเช่น สังกะสี อินเดียม ดีบุก จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าข้อมูลส่วนใหญ่จะเป็นความลับ และมีการถ่ายทอดเฉพาะในกลุ่มเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ข้อมูลพื้นฐานสามารถค้นคว้าจากเอกสารบทความที่มีข้อมูลจำกัดในระดับหนึ่งเท่านั้น ส่วนการศึกษาคุณสมบัติของโลหะประสานทองในที่นี้จะศึกษาในทอง 14 กระวัด โดยมีการเติมสังกะสีลงไป ทั้งนี้เพราะยังไม่มีผู้ศึกษาอย่างละเอียดและขาดข้อมูลเชิงวิชาการ อีกทั้งในทองคำ 14 กระวัดต่างก็พบปัญหาอยู่มาก ซึ่งจะเป็นรากฐานที่สำคัญในการศึกษาโลหะประสานทองในกระวัดต่อ ๆ ไปได้ โดยจะดูคุณสมบัติต่าง ๆ โดยจะมีการศึกษาในส่วนของคุณสมบัติของโลหะประสาน สีที่ได้ คุณสมบัติด้านทางกล ความสามารถในการเปียก

ปัญหาด้านข้อมูลและเทคนิคทางด้านการผลิตที่มีอยู่อย่างจำกัด และด้านคุณภาพที่ไม่เพียงพอต่อการแข่งขันต่อนานาประเทศ ดังที่กล่าวข้างต้นมาแล้วนั้น เป็นปัญหาที่สำคัญทำให้เกิดผลกระทบต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมทองคำอย่างมาก ดังนั้นจึงทำให้มีความจำเป็นอย่างสูงในการศึกษาและวิจัยส่วนผสมโลหะประสานที่ใช้กับทอง 14 กระวัด โดยจะเป็นรากฐานที่สำคัญในการต่อยอดความรู้ในการที่จะพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตทองคำในประเทศขึ้นโดยไม่ต้องพึ่งพิงเทคโนโลยีต่างชาติ อีกทั้งยังจะเป็นเอกสารอ้างอิงที่สำคัญในการศึกษาต่อไป แลที่สำคัญจะเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนการผลิตและพัฒนาประเทศในระยะยาวอีกด้วย

## 5.2 วัตถุประสงค์

- 5.2.1 เพื่อศึกษาส่วนผสมของดีบุก ที่เหมาะกับโลหะประสานทอง 14 กระวัด
- 5.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการวัดคุณสมบัติด้านการเปียกในโลหะประสานทอง 14 กระวัด

## 5.3 ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาตัวประสานทองที่ใช้กับทองคำ 14 กระวัด 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

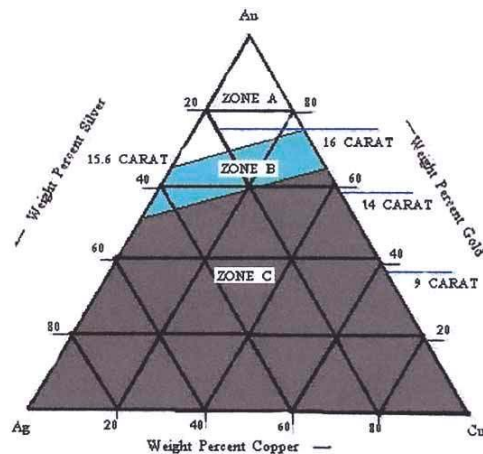
สับสนต่อการอธิบายในลักษณะของข้อมูลทางคุณภาพ แต่โชคดีที่ผ่านมาได้มีการใช้เครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ในการวัดค่าสี โดยจะช่วยลดข้อสงสัยหรือความคลุมเครือได้ โดยใช้มาตรฐาน CIELAB ในการวัดค่าสี

### 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 มีราคาที่สูง (ราคาประมาณ 5 เท่าของเงิน) ในขณะที่เมื่อเลือกใช้งาน

โลหะประสานอื่น เช่น สังกะสี หรือดีบุก จะมรรคาถูกกว่าแต่คุณภาพที่ได้จะต่ำกว่าโลหะประสานที่มีธาตุอินเดียมผสม

#### 6. ส่วนผสมทางเคมีต้องไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม

ไอระเหยที่ออกมาจากโลหะผสมที่มีสารแคดเมียมผสมอยู่จะมีผลเกี่ยวกับปัญหาทางด้านปอดและไต โดยจะมีผลในระยะยาวทำให้ผู้ป่วยร้อยละ 20 ถึงแก่ความตาย

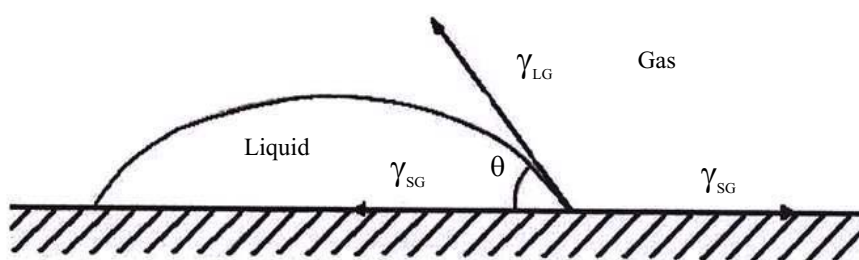
#### 7. ความสามารถในการเปียก (Wettability)

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

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

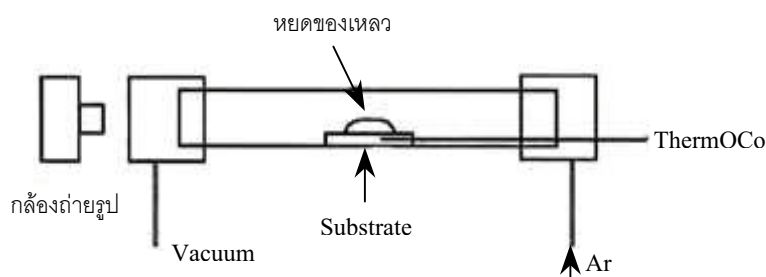
จากสมการที่ 5.1 ถึง 5.3 จะเห็นว่า ของเหลวนั้นสามารถเปียกบนของแข็งได้ดี จะมี ความสัมพันธ์ต่างกันตามแต่ค่าของ  $\theta, \gamma_{SG}, \gamma_{SL}, \gamma_{LG}$  เมื่อค่า  $\theta$  มีค่าต่ำ  $\gamma_{SG}$  จะมีค่าสูง และ  $\gamma_{SL}, \gamma_{LG}$  มีค่าต่ำ

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



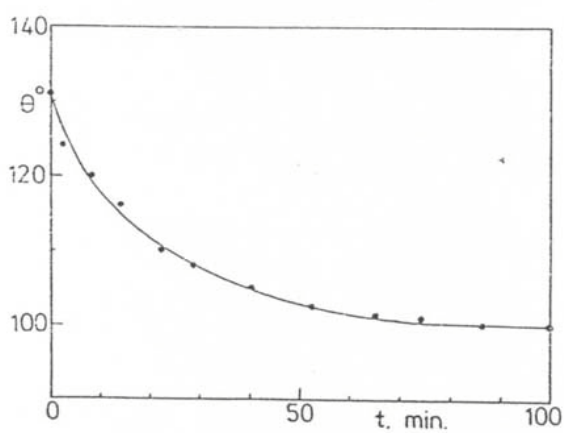
รูปที่ 5.3 เครื่องมือทดสอบแบบ sessile drop

ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าแรงดึงผิวและมุมสัมผัส

ในการทดลอง Sessile drop นั้นจะพบว่าปัจจัยต่างๆ ดังนี้

### 1. เวลาที่ใช้ในการทดลอง

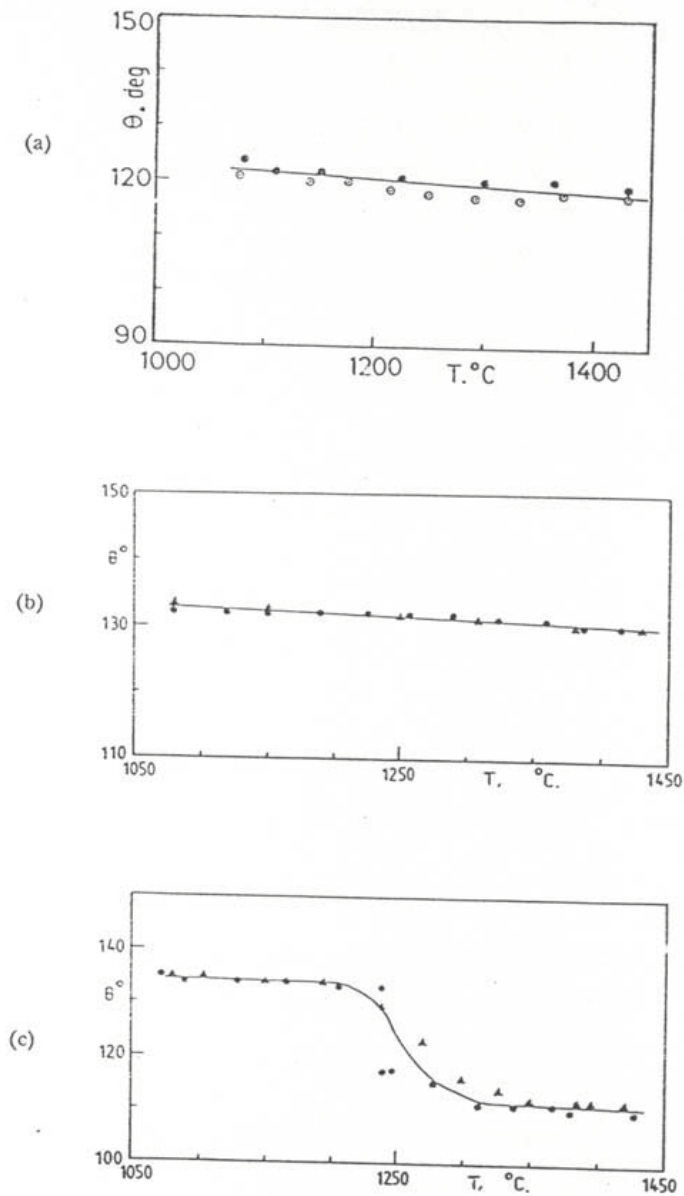
เมื่อให้ความร้อนแต่โลหะจนหลอมเหลวแล้วที่อุณหภูมิคงที่ ที่จุด ๆ หนึ่ง จะเห็นว่าเมื่อปล่อยเวลาผ่านไป และในขณะเดียวกันก็วัดค่ามุมสัมผัสก็จะเห็นได้ว่าค่าจะลดลงและจะค่อย ๆ คงที่ที่ค่า ๆ หนึ่ง ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับมุมสัมผัสของทองคำบน TiC ที่ 1100°C

### 2. อุณหภูมิ

ขณะที่โลหะถึงจุดหลอมเหลว โลหะจะปรับตัวอยู่ในของเหลว เมื่อเราให้ความร้อนขึ้นไปเรื่อย ๆ ในโลหะส่วนใหญ่ นั้นค่ามุมสัมผัสจะมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.5



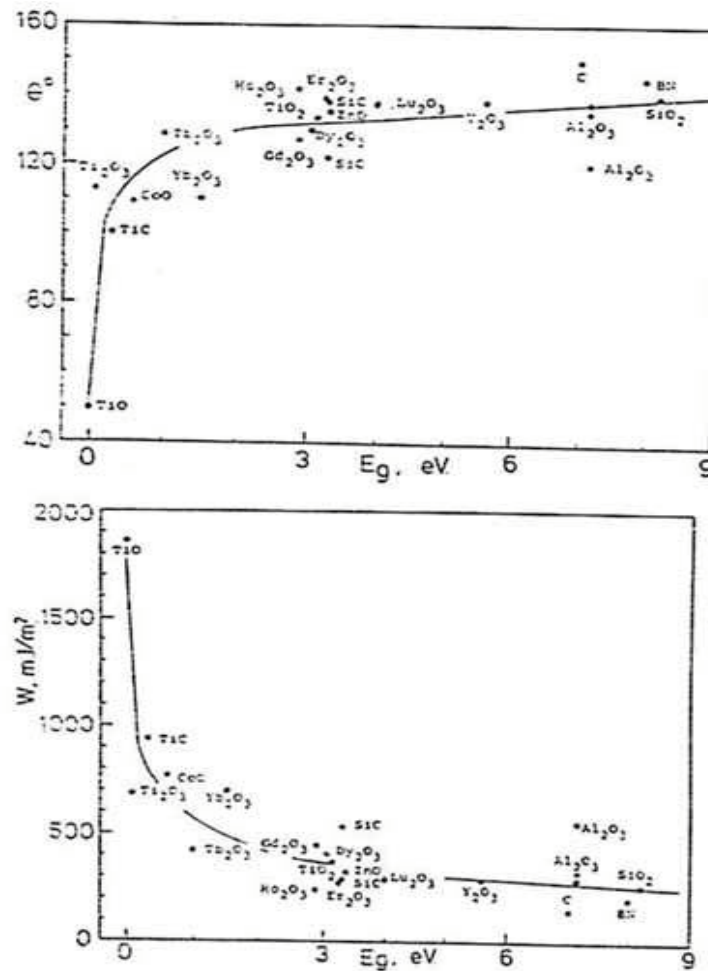
รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับมุมสัมผัสของทอง

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 แสดงผลของมุมสัมผัสและแรงดึงผิว

| หมายเลข | ปริมาณสังกะสี (wt%) | แรงดึงผิว (mN/m) | มุมสัมผัส (องศา) (คำนวณจากโปรแกรม) | มุมสัมผัส (องศา) 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 กระวัด

| 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 กระวัด

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)

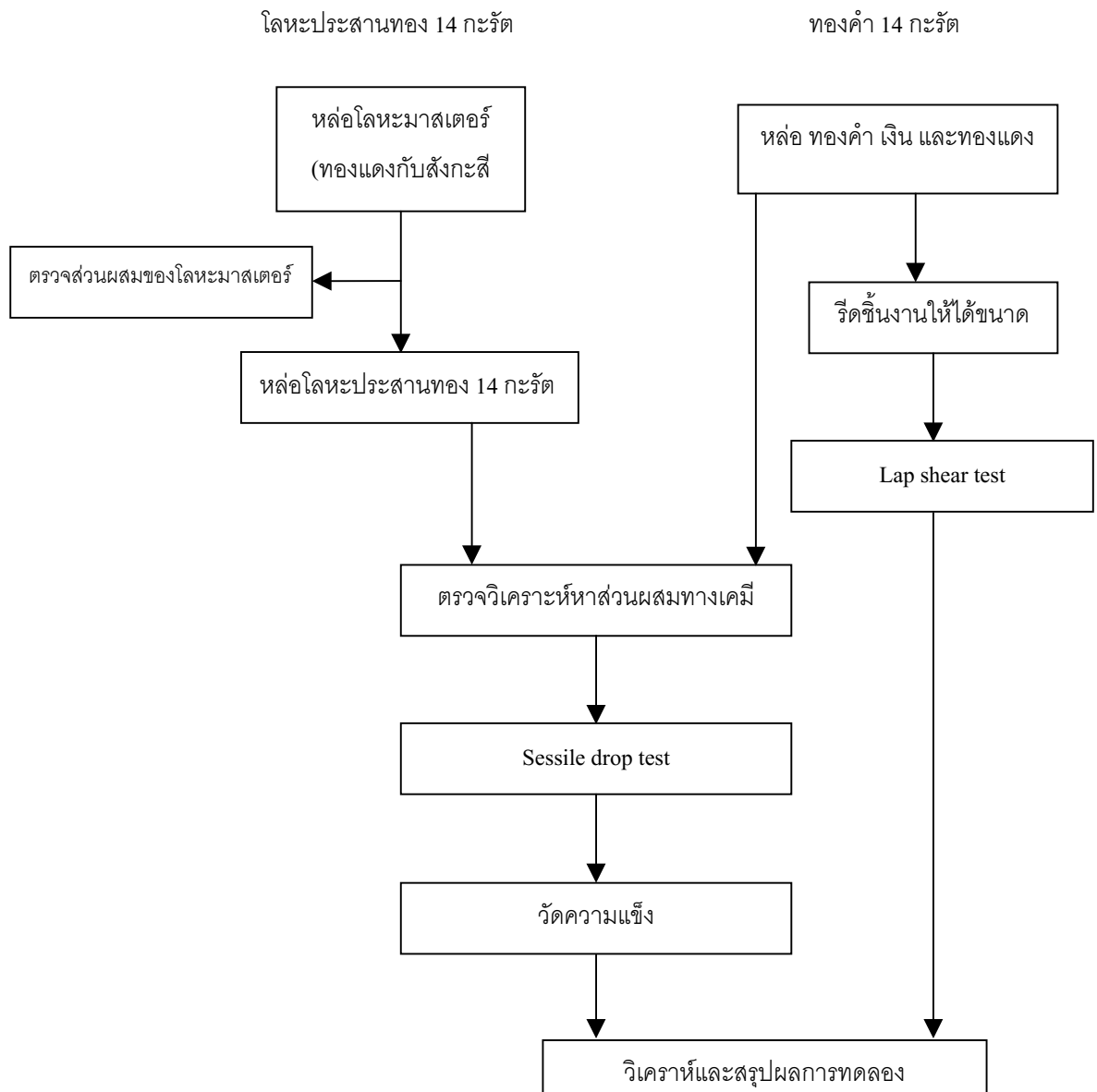
#### 5.6.5.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

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 แล้วทำการหลอมในเบ้ากราไฟต์โดยใช้ก๊าซปิโตรเจนเป็นเชื้อเพลิงพ่นด้วยหัวพ่นในการหลอม 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

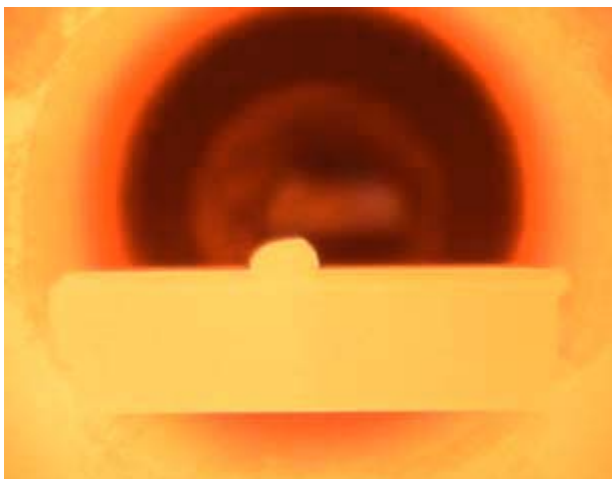
การศึกษาโลหะประสานทอง 14K โดยการเติมธาตุสังกะสี ซึ่งได้รับทุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนเพื่อการวิจัย ปี พ.ศ. 2540-2542 ในการประมวลผล

ตารางที่ 5.15 แสดงผลของมุมสัมผัสที่อุณหภูมิ 950 °C

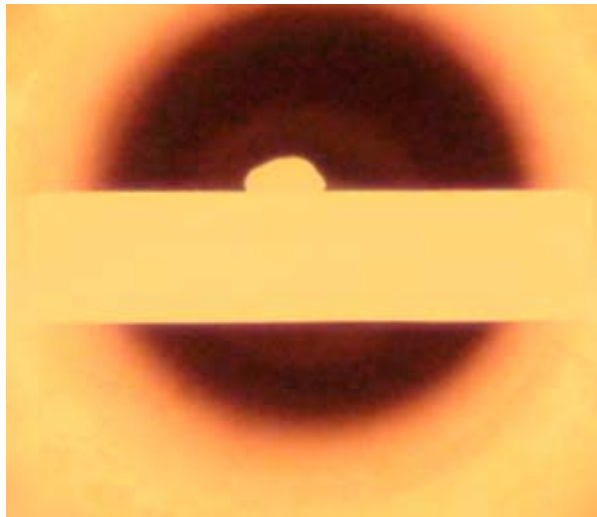
| หมายเลข       | ปริมาณดีบุก (wt%) | มุมสัมผัส (องศา)<br>(ที่ได้จากการคำนวณ) | มุมสัมผัส (องศา)<br>(ที่ได้จากการวัดด้วยสายตา) |
|---------------|-------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------|
| B01-3(0.0%Sn) | 0                 | 120.1                                   | 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

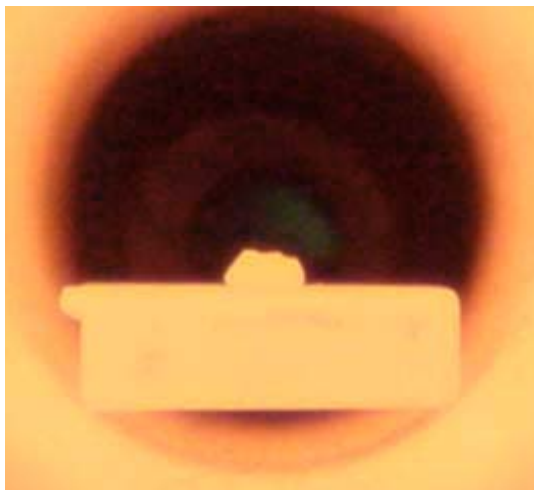
ถ้ามุมสัมผัสมีค่ามากกว่า 90 องศา แสดงว่า โลหะประสานทองไม่เกิดการเปียก



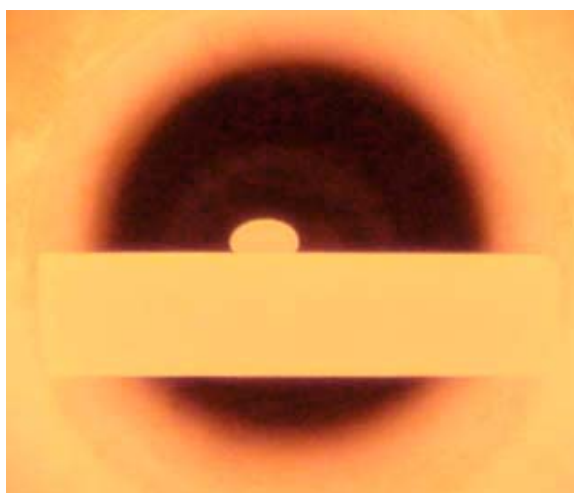
รูปที่ 5.7 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง (Sn 0%)



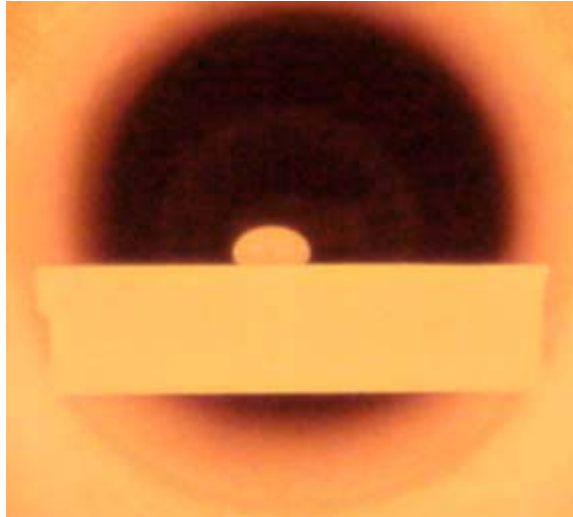
รูปที่ 5.8 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง (Sn 0.47%)



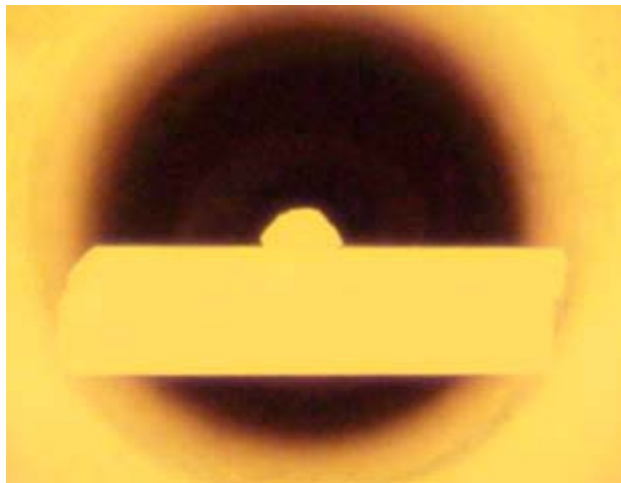
รูปที่ 5.9 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง (Sn 1.07%)



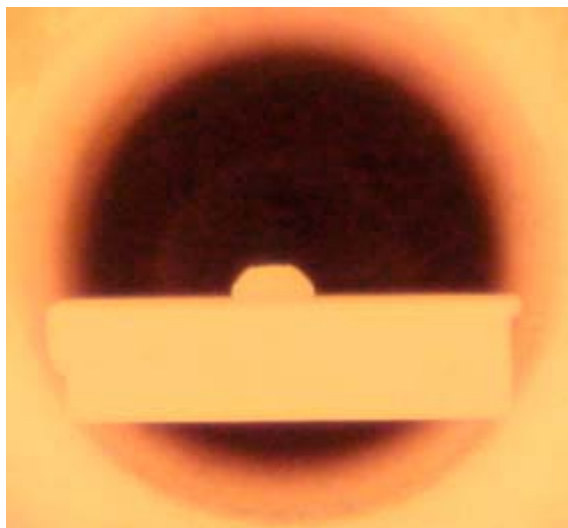
รูปที่ 5.10 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง (Sn 1.40%)



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                                       |

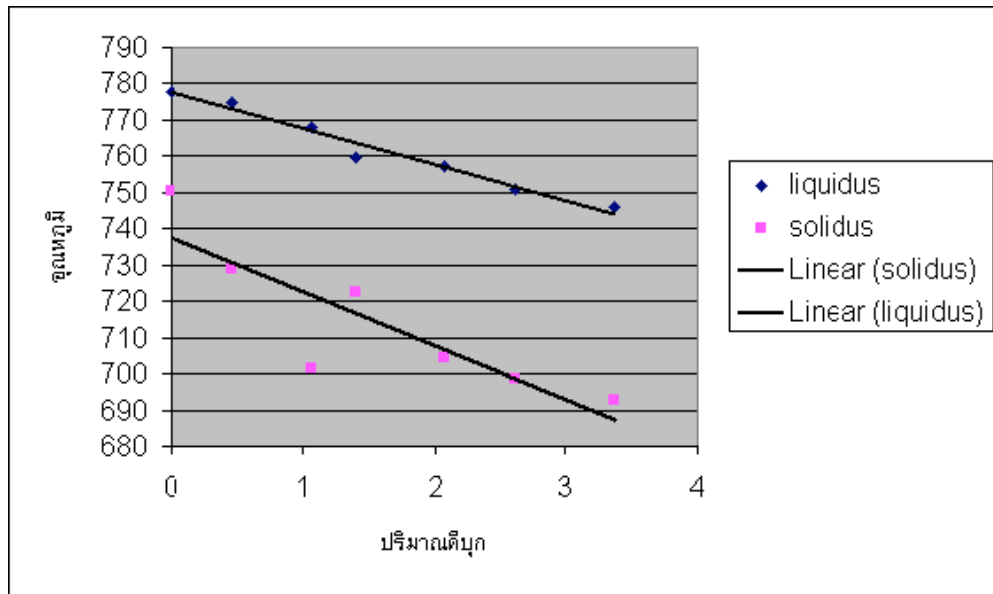
### 5.8 อภิปรายผลการทดลอง

#### 5.8.1 ผลการหลอมและหล่อโลหะประสานทอง

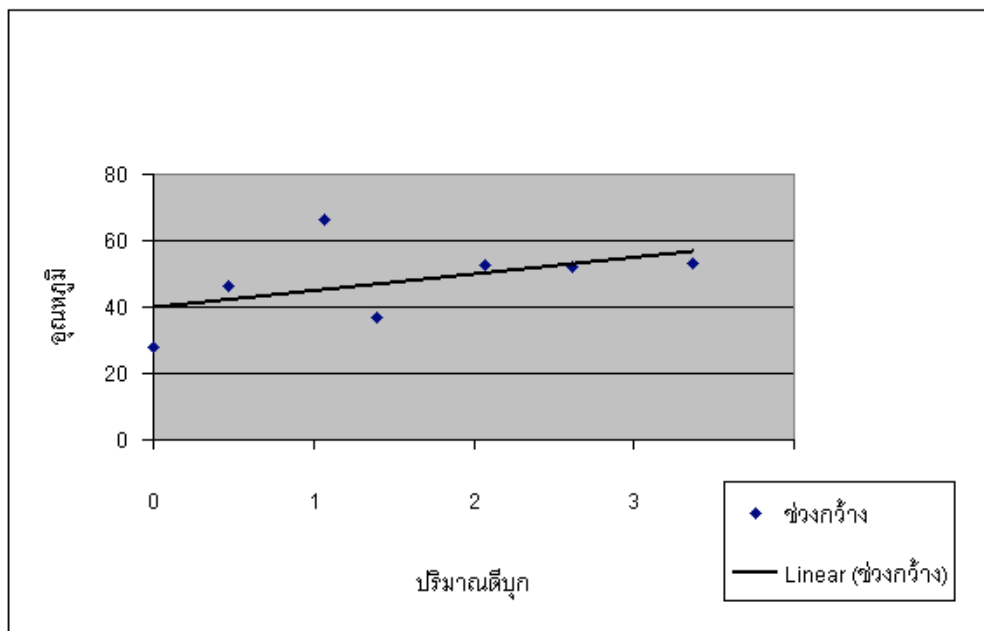
จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 5.11 – 5.12 ได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาส่วนผสมทางเคมีของโลหะประสานทอง พบว่าในการทำการหล่อขึ้นงานจะมีการสูญเสียส่วนผสมในการหล่อไปบางส่วน โดย Zn จะมีการสูญเสียไประหว่างทำการหล่อมากที่สุด (เนื่องจาก Zn เป็นธาตุที่มีจุดเดือดต่ำ) แม้ว่าจะได้ทำการชดเชยส่วนผสมไว้แล้ว ส่วนดีบุกจะมีการสูญเสียน้อยมาก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



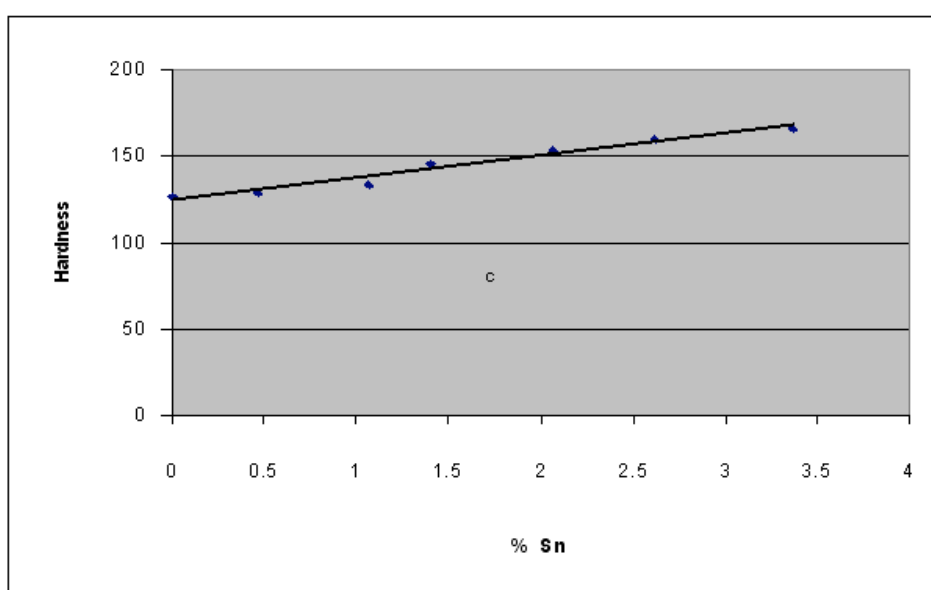
รูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจุด Liquidus และ Solidus กับปริมาณดีบุก



รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ของช่องกว้างระหว่างจุด Liquidus&Solidus กับปริมาณดีบุก

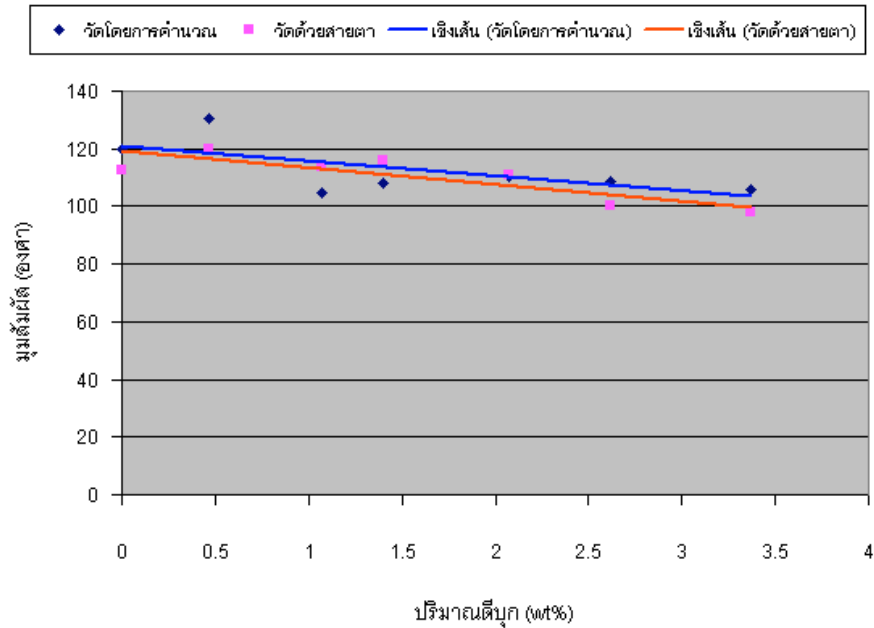
### 5.8.3 คุณสมบัติทางกล

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

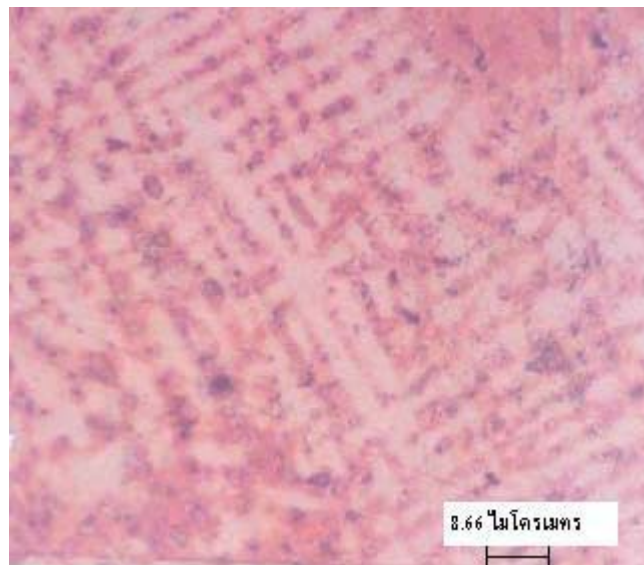
5.8.4 จากการทดลองการหาคุณสมบัติด้านการเปียก (Wettability) ทำให้เราเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มดีบุกลงไปในห้อง 14 กระรัต จะมีแนวโน้มทำให้มุมสัมผัสระหว่างน้ำโลหะกับฐานรองที่เป็นอะลูมิเนียมมีค่าลดลง ตามตารางที่ 4.5 และสามารถพิจารณาแนวโน้มการลดลงของมุมสัมผัสได้โดยจะแสดงในรูปที่ 5.4



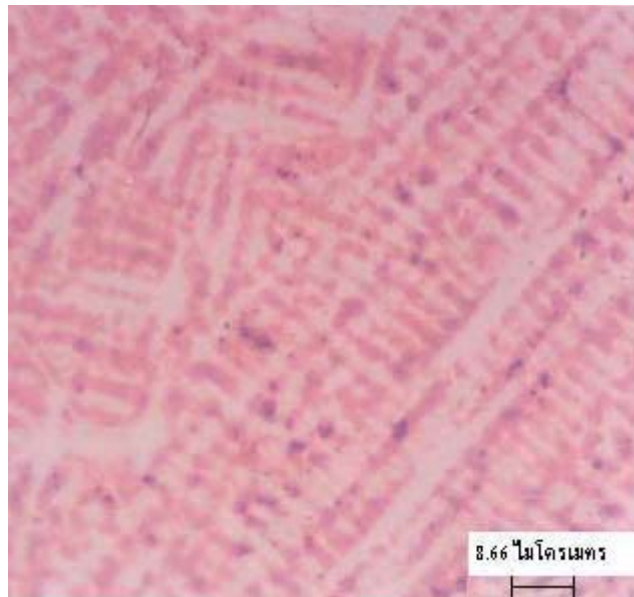
รูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์กันระหว่างปริมาณดีบุกกับนมส้มคัส

#### 5.8.4 โครงสร้างจุลภาค

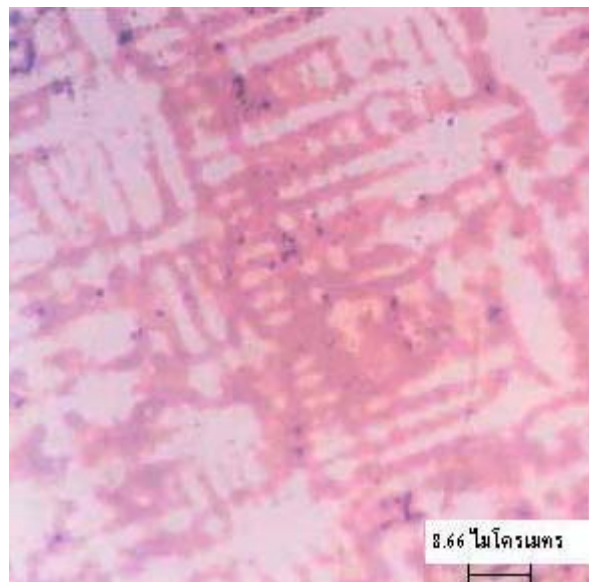
เมื่อพิจารณาภาพโครงสร้างจุลภาคของโลหะประสานทองจากรูปภาพที่ 5.18 – 5.20 สามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างที่เป็น dendrite ซึ่งในภาพเห็นเป็นสีขาวมีขนาดไม่แตกต่างกันมากนัก และหลังจากการตรวจสอบโดยใช้พบว่า dendrite มีทองและดีบุกละลายอยู่เป็นส่วนใหญ่ ทำให้สรุปได้ว่ากลไกการแข็งขึ้นของโลหะผสมทอง 14 กระรัต คือการที่ดีบุกมีการละลายในเนื้อโลหะแล้วเกิดกลไกการแข็งที่เรียกว่า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

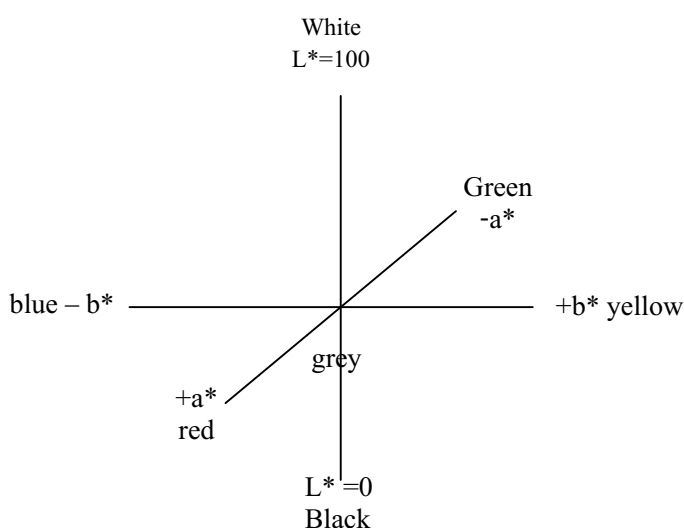
## ภาคผนวก ก

ทฤษฎีการวัดค่าสีของโลหะประกอบเครีองประดับ



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

คุณภาพสีที่วัดได้ถูกต้องหรือไม่ขึ้นกับแสงที่กระทบบนวัตถุ 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

| หมาย<br>เลขชุด | 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

| หมาย<br>เลขชุด | 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

| หมาย<br>เลขชุด | 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   |  | 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 |  | 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 |  | 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 |  | 60.83               | 38.73 | -    | 0.44 | NA.        | NA.   | NA.  | NA.  |
| Sterling + 2.09%In           | 94.83                       | 4.08 | -    | 1.09 |  | 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

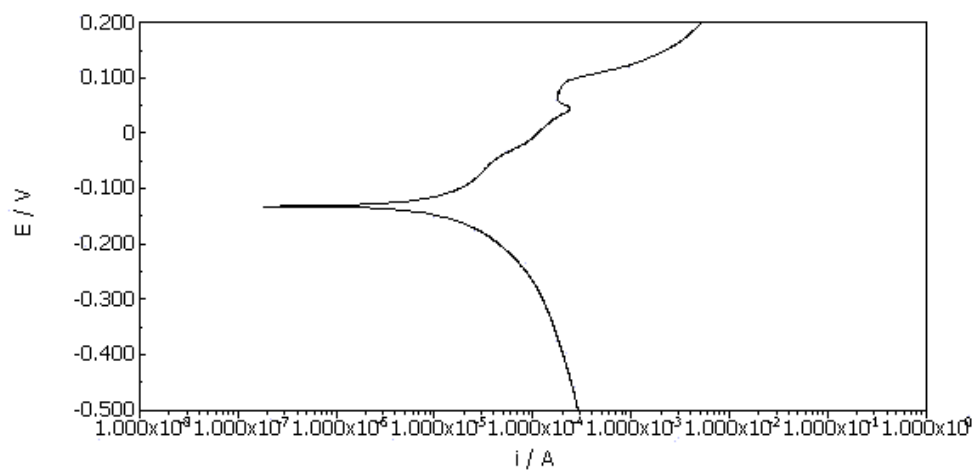
| โลหะผสม<br>ชุดที่ | ก่อนการทดสอบการหมอง |         |         | หลังการทดสอบการหมอง |         |         | ค่า $DE^*$ |
|-------------------|---------------------|---------|---------|---------------------|---------|---------|------------|
|                   | $L^*_1$             | $a^*_1$ | $b^*_1$ | $L^*_2$             | $a^*_2$ | $b^*_2$ |            |
| 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

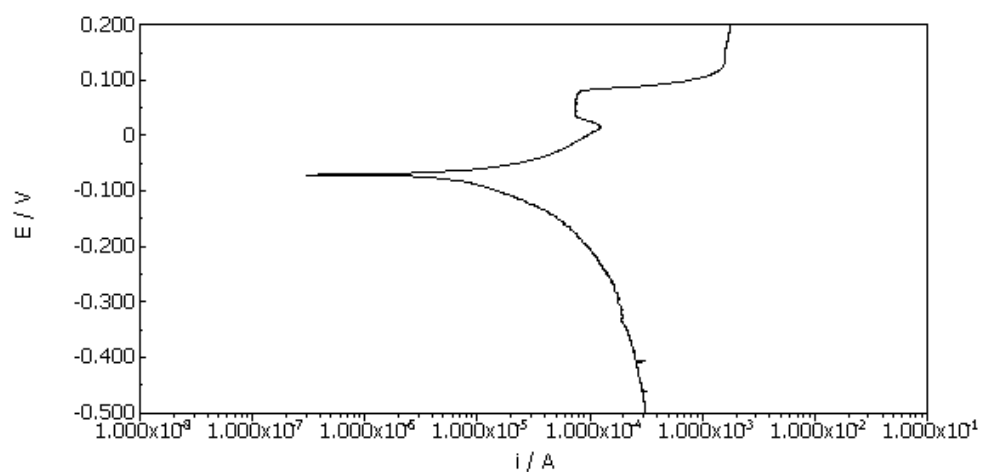
| โลหะผสม<br>ชุดที่ | ก่อนการทดสอบการหมอง |         |         | หลังการทดสอบการหมอง |         |         | ค่า $DE^*$ |
|-------------------|---------------------|---------|---------|---------------------|---------|---------|------------|
|                   | $L^*_1$             | $a^*_1$ | $b^*_1$ | $L^*_2$             | $a^*_2$ | $b^*_2$ |            |
| 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.**

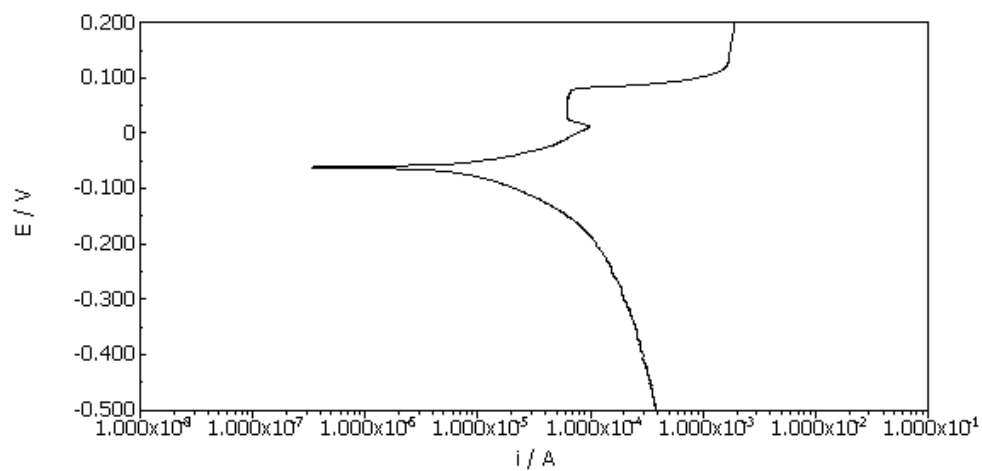
เส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดสอบการกัดกร่อนของ  
โลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง – แมงกานีส โดยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า



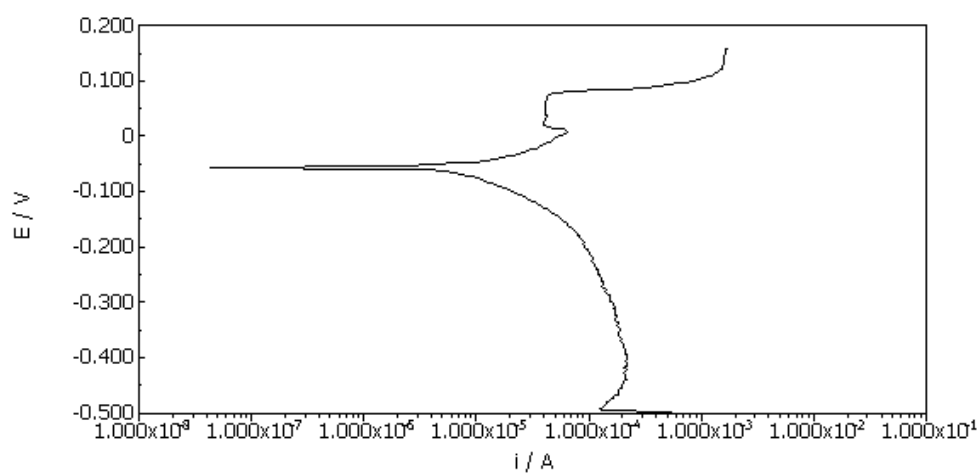
**รูปที่ จ.1-1** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่มีแมงกานีสผสม ในสารละลาย  
โซเดียมคลอไรด์ 1 โมลาร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



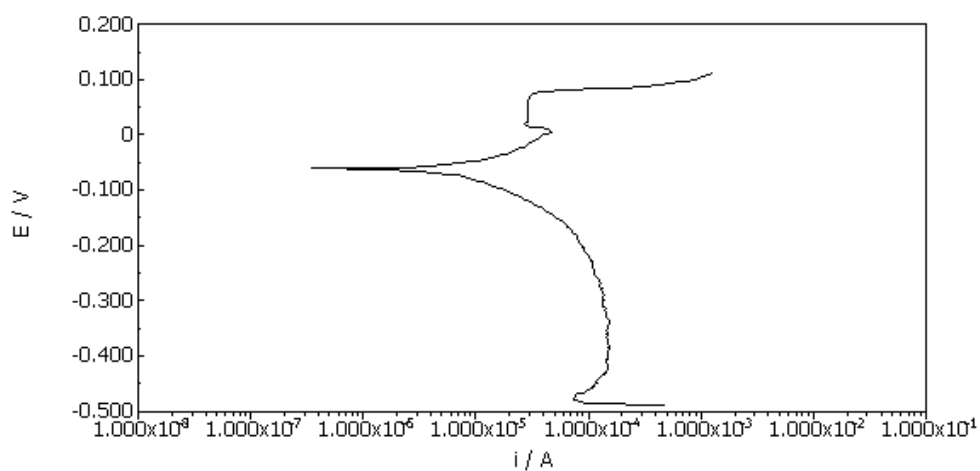
**รูปที่ จ.1-2** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 0.38 โมลาร์เซ็นต์  
โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 โมลาร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ  
25 องศาเซลเซียส



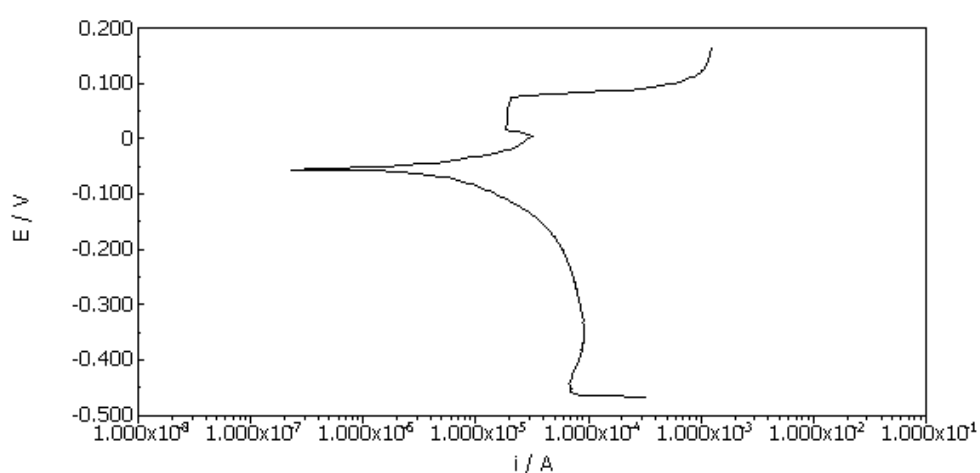
**รูปที่ จ.1-3** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 0.76 เปอร์เซ็นต์  
โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ  
25 องศาเซลเซียส



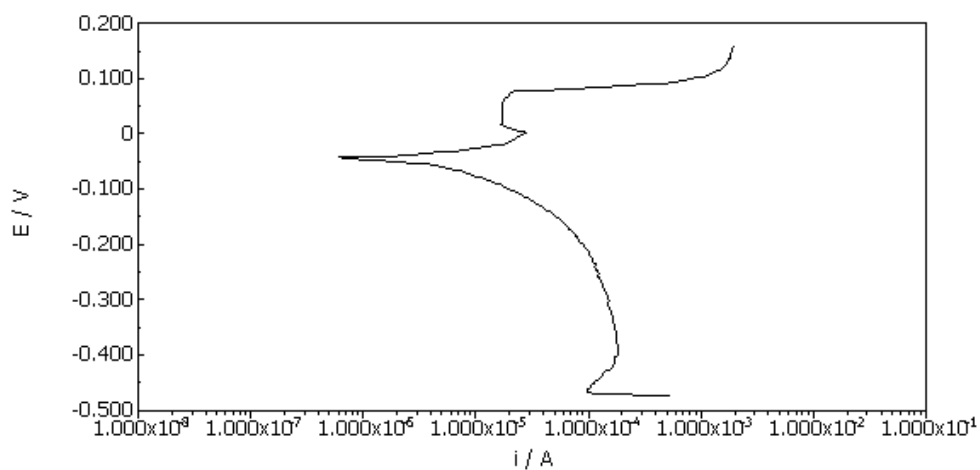
**รูปที่ จ.1-4** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 1.30 เปอร์เซ็นต์  
โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ  
25 องศาเซลเซียส



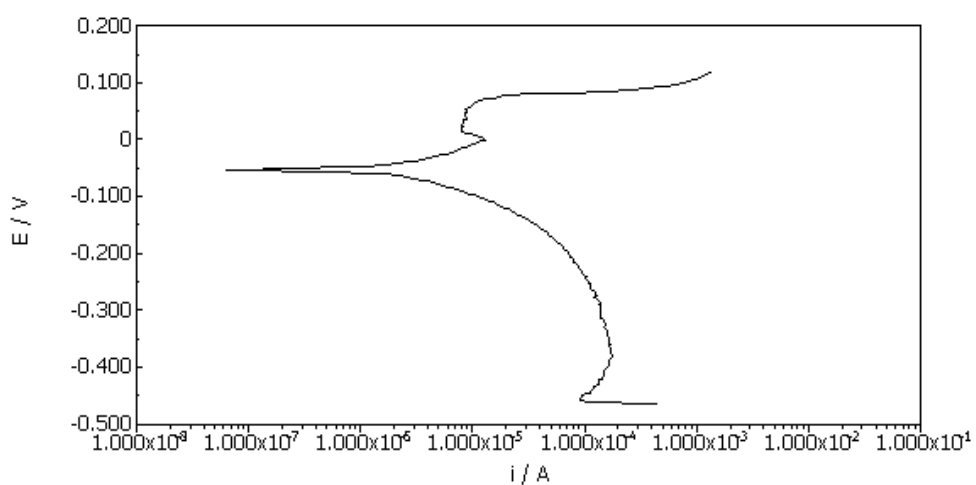
**รูปที่ จ.1-5** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 1.70 เปอร์เซนต์  
โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ  
25 องศาเซลเซียส



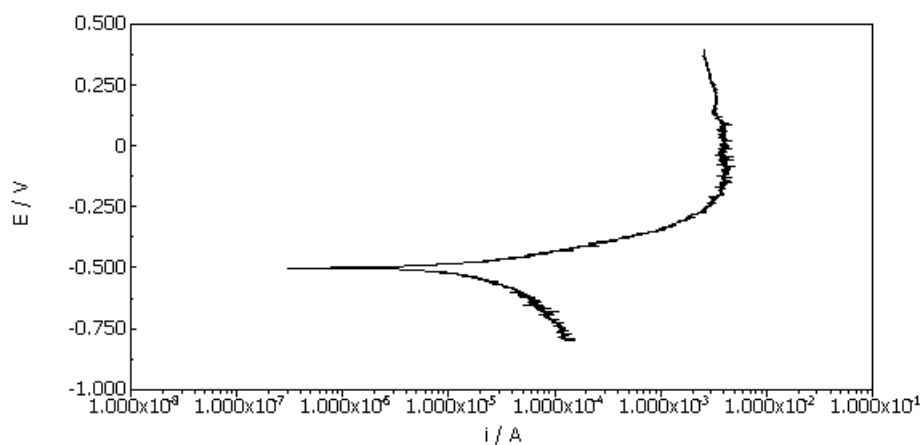
**รูปที่ จ.1-6** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 2.10 เปอร์เซนต์  
โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ  
25 องศาเซลเซียส



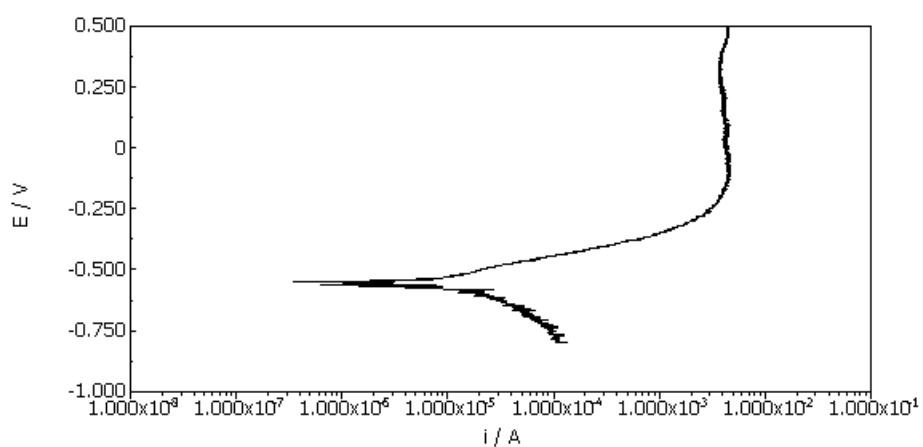
**รูปที่ จ.1-7** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 2.60 เปอร์เซ็นต์  
โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ  
๖๕ องศาเซลเซียส



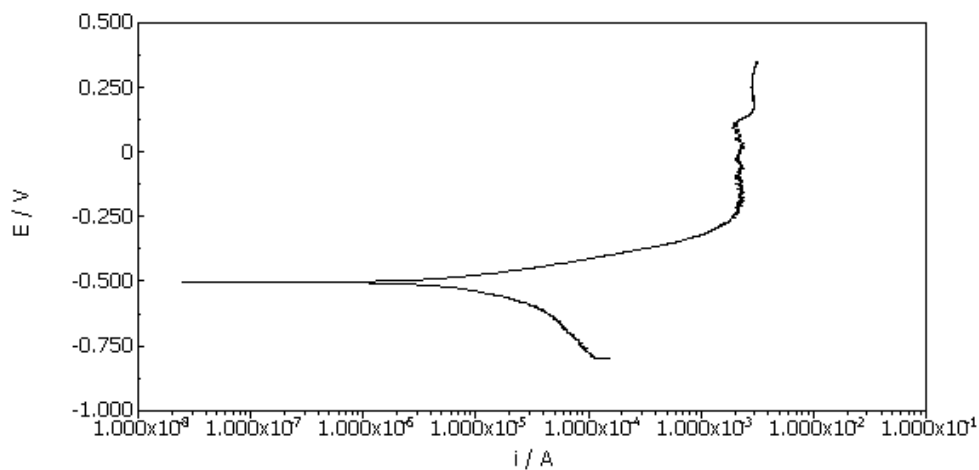
**รูปที่ จ.1-8** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 3.00 เปอร์เซ็นต์  
โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ  
๖๕ องศาเซลเซียส



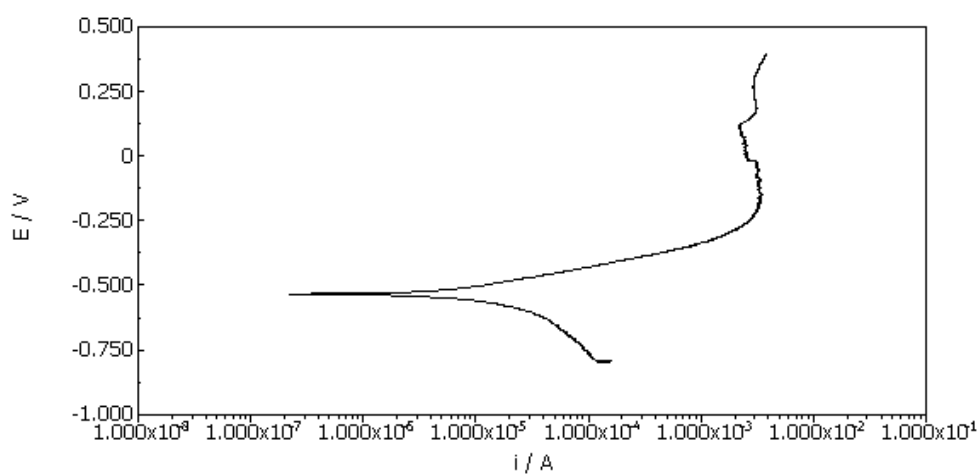
**รูปที่ จ.2-1** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่มีแมงกานีสผสม ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



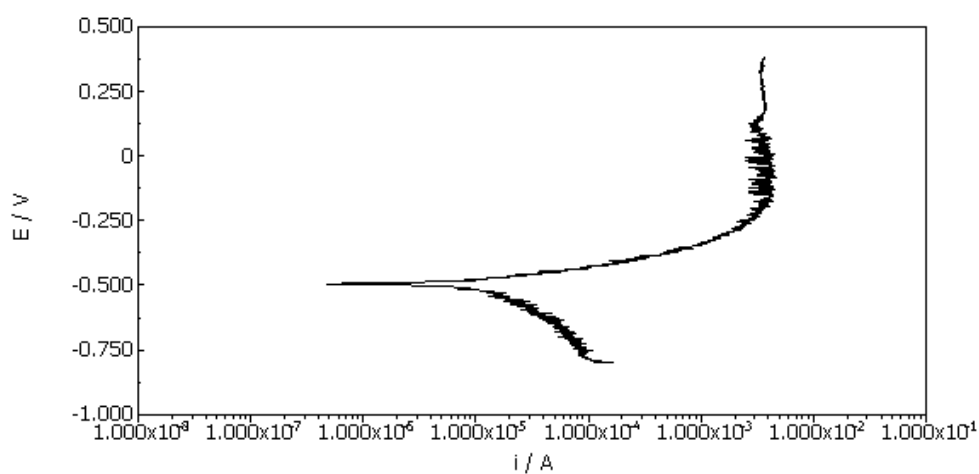
**รูปที่ จ.2-2** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 0.38 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



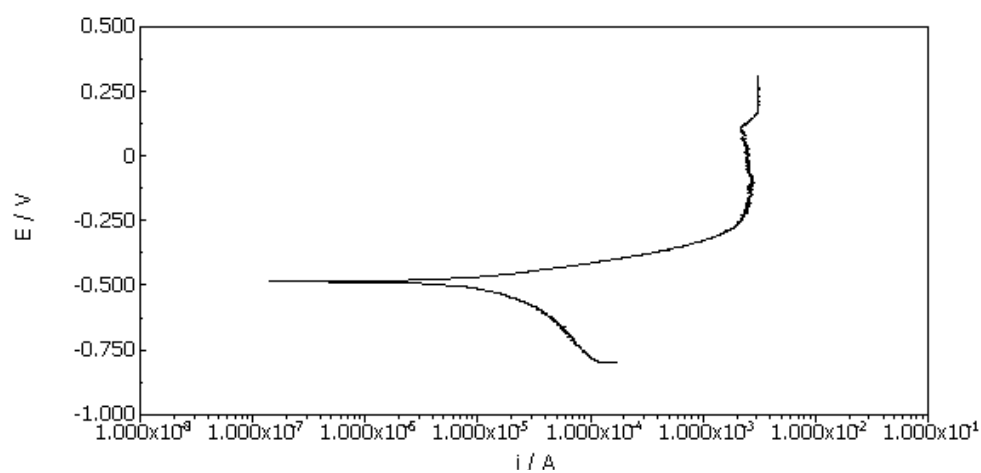
**รูปที่ จ 2-3** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 0.76 เปอร์เซ็นต์  
โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วย  
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



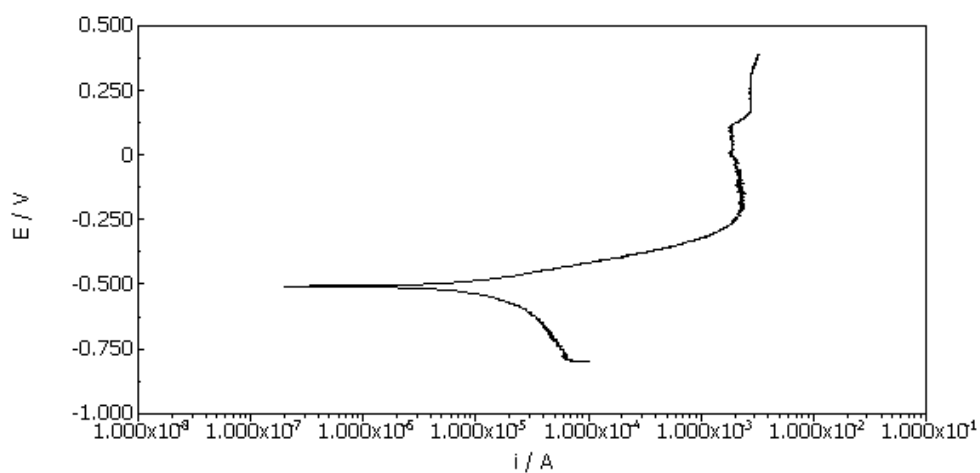
**รูปที่ จ 2-4** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 1.30 เปอร์เซ็นต์  
โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วย  
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



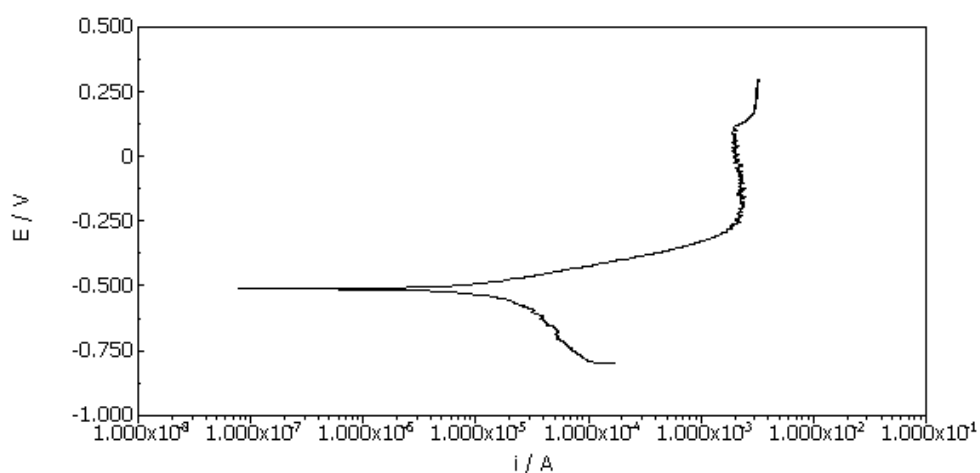
**รูปที่ จ.2-5** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 1.70 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วย ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



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

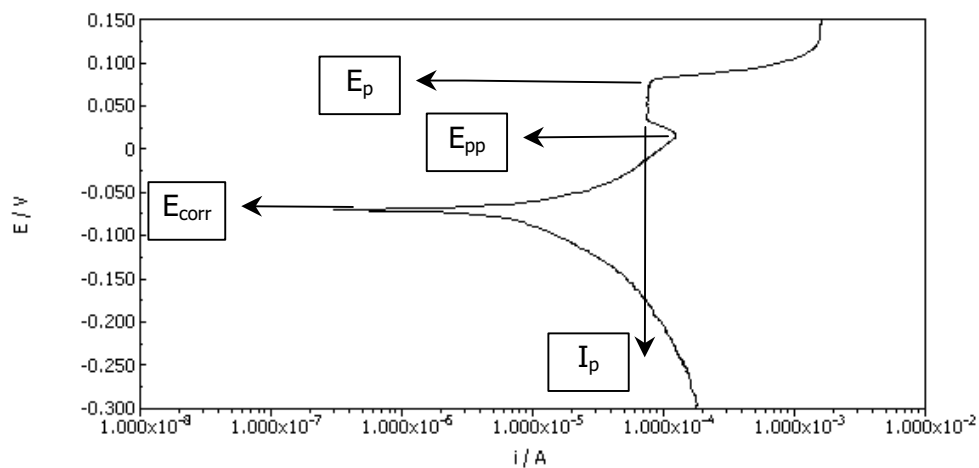


**รูปที่ จ.2-7** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 2.60 เปอร์เซ็นต์  
โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วย  
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

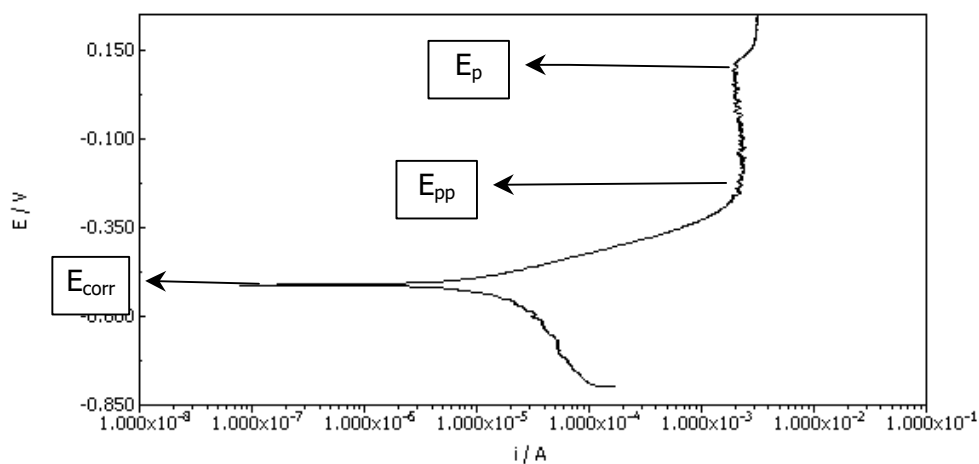


**รูปที่ จ 2-8** เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 3.00 เปอร์เซ็นต์  
โดยน้ำหนัก ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วย  
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

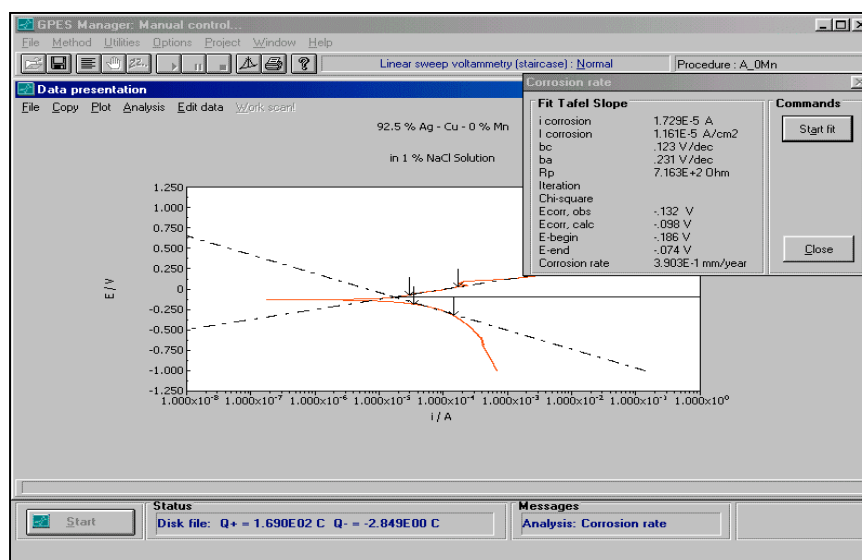
การหาค่า  $E_{\text{corr}}$ ,  $E_p$ ,  $E_{pp}$  และ  $I_p$  และอัตราการกัดกร่อน  
จากเส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิง



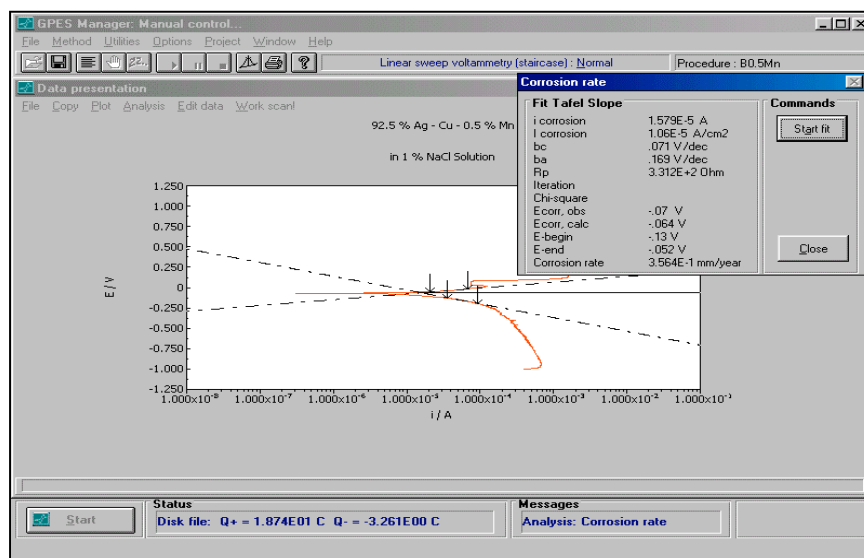
รูปที่ จ.3-1 ตัวอย่างการหาค่า  $E_{\text{corr}}$ ,  $E_p$ ,  $E_{pp}$  และ  $I_p$  จากเส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 0.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์



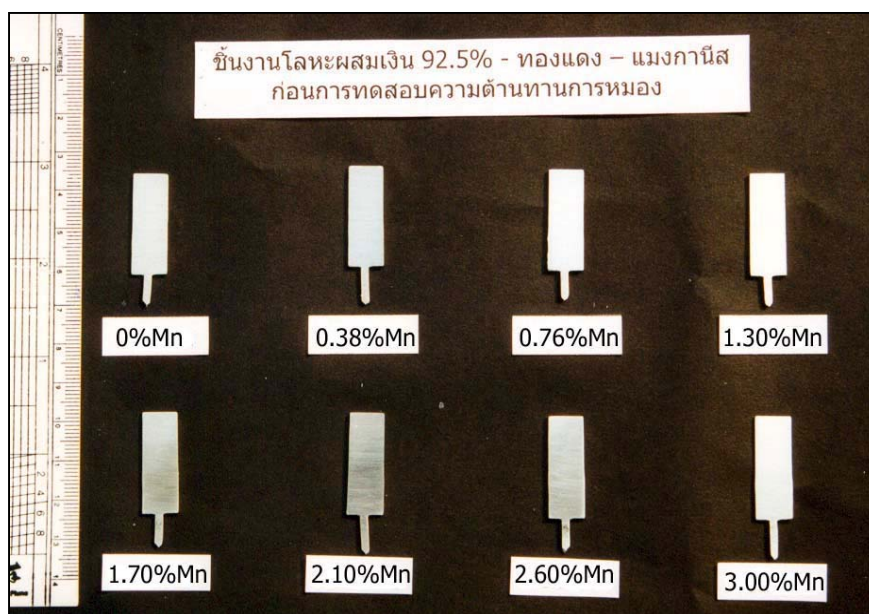
รูปที่ จ 3-2 ตัวอย่างการหาค่า  $E_{\text{corr}}$ ,  $E_p$  และ  $E_{pp}$  จากเส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ ซึ่งอ้อมตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์



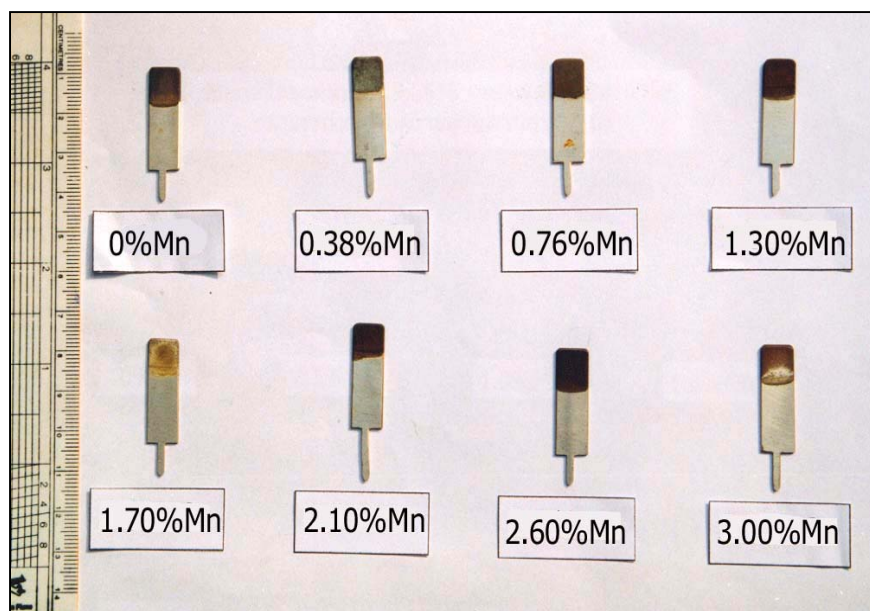
รูปที่ จ.3-3 การหาค่า  $I_{\text{corr}}$  และอัตราการกัดกร่อนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์  
จากเส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่มีปริมาณแมงกานีส  
ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



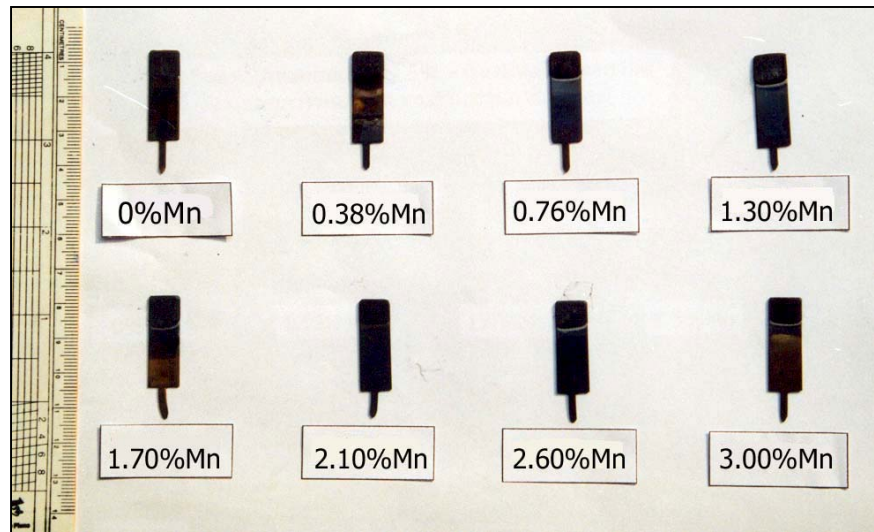
รูปที่ จ.3-4 การหาค่า  $I_{\text{corr}}$  และอัตราการกัดกร่อนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จาก  
เส้นโพลาริเซชันของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณแมงกานีส 0.38  
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



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



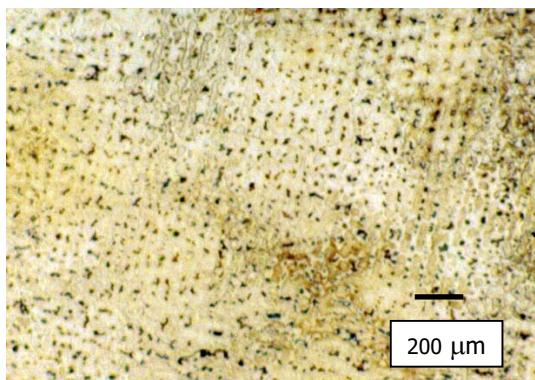
รูปที่ ๔.4-2 ภาพแสดงชิ้นงานโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส  
หลังการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนโดยเทคนิคเคมีไฟฟ้า  
ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ  
25 องศาเซลเซียส



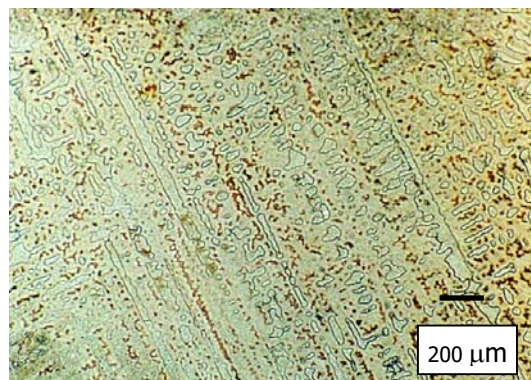
รูปที่ จ.4-3 ภาพแสดงชิ้นงานโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง – แมงกานีส  
 หลังการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนโดยเทคนิคเคมีไฟฟ้า  
 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วย  
 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

## **ภาคผนวก จ.**

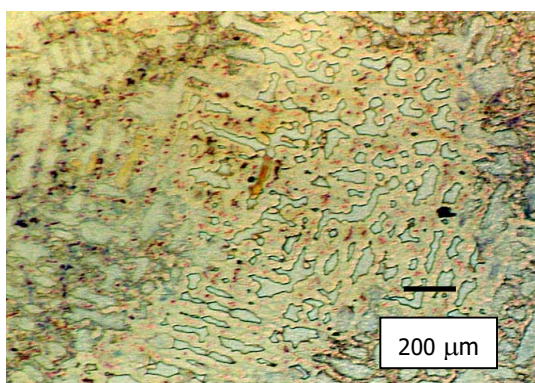
โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง -  
แมงกานีสในสภาพหล่อ



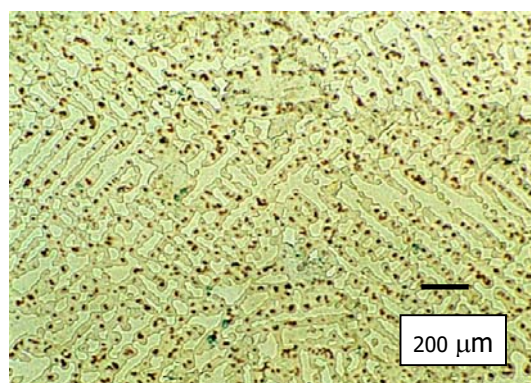
ฉ.1-1



ฉ.1-2

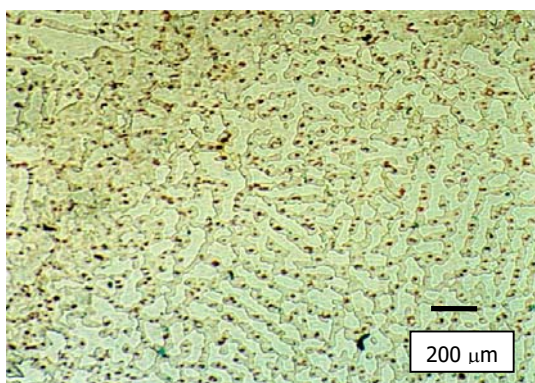


ฉ.1-3

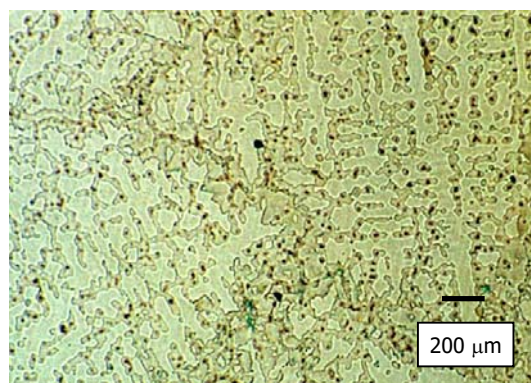


ฉ.1-4

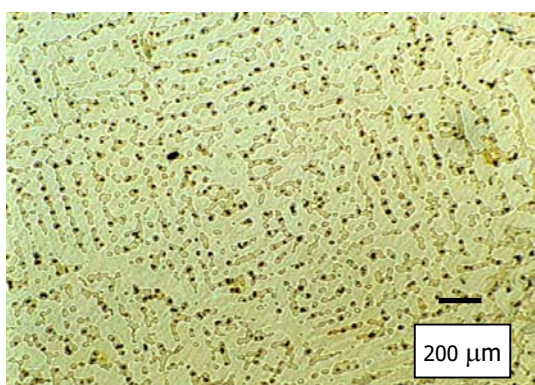
- รูปที่ ฉ.1** ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส  
 ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 50 เท่า
- ฉ.1-1 โลหะผสมชุดที่ 1 : 7.65%Cu – balance of Ag
- ฉ.1-2 โลหะผสมชุดที่ 2 : 6.97%Cu – 0.38%Mn – balance of Ag
- ฉ.1-3 โลหะผสมชุดที่ 3 : 6.63%Cu – 0.76%Mn – balance of Ag
- ฉ.1-4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



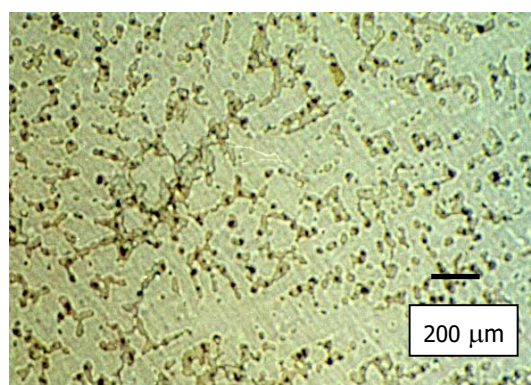
ด.1-5



ด.1-6



ด.1-7



ด.1-8

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

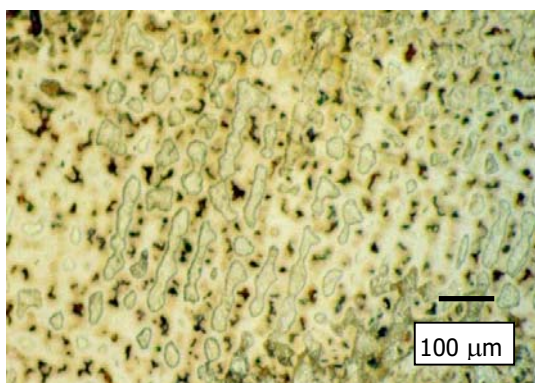
ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 50 เท่า

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

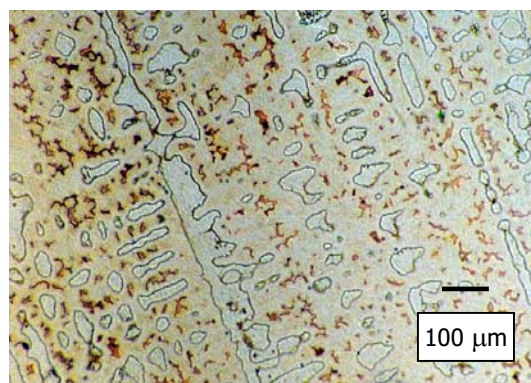
ด.1-6 โลหะผสมชุดที่ 6 : 4.90%Cu – 2.10%Mn – balance of Ag

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

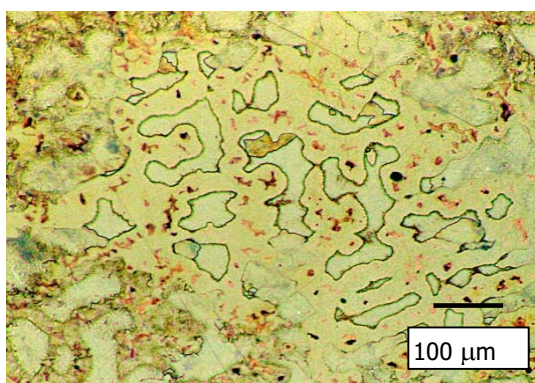
ด.1-8 โลหะผสมชุดที่ 8 : 4.00%Cu – 3.00%Mn – balance of Ag



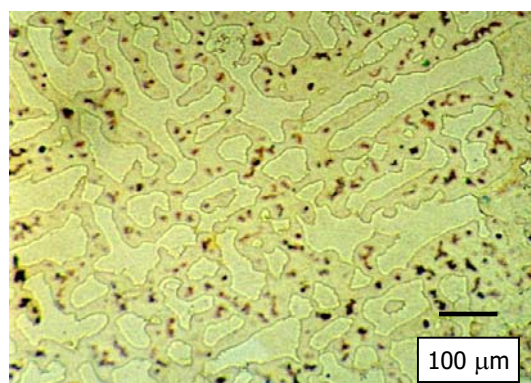
ด.2-1



ด.2-2



ด.2-3



ด.2-4

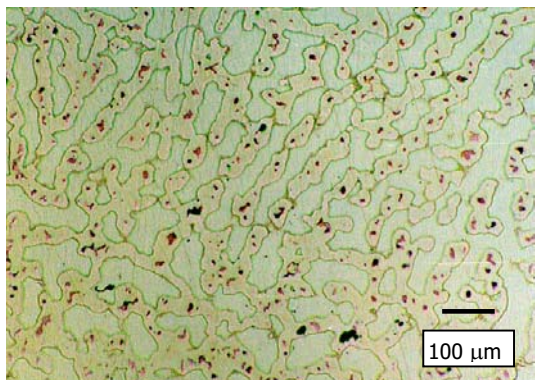
**รูปที่ ด.2** ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส  
ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 100 เท่า

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

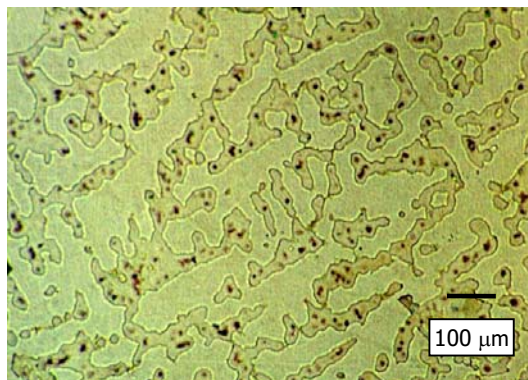
ด.2-2 โลหะผสมชุดที่ 2 : 6.97%Cu – 0.38%Mn – balance of Ag

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

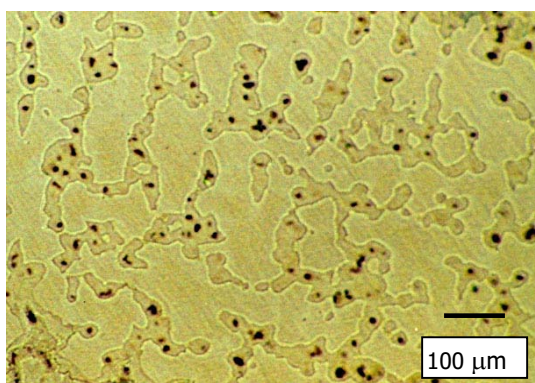
ด.2-4 โลหะผสมชุดที่ 4 : 6.14%Cu – 1.30%Mn – balance of Ag



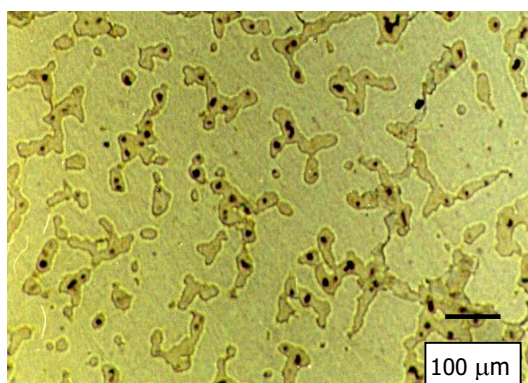
ฉ.2-5



ฉ.2-6



ฉ.2-7



ฉ.2-68

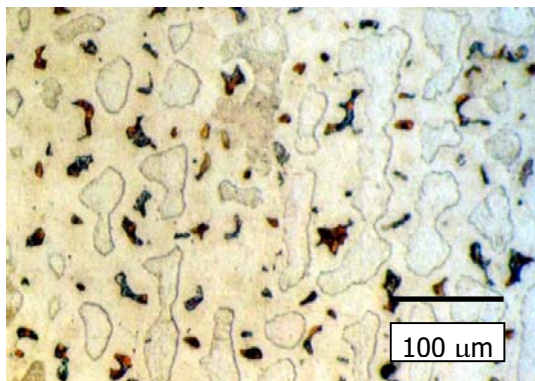
**รูปที่ ฉ.2 (ต่อ)** ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 92.5% - ทองแดง - แมงกานีส  
ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 100 เท่า

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

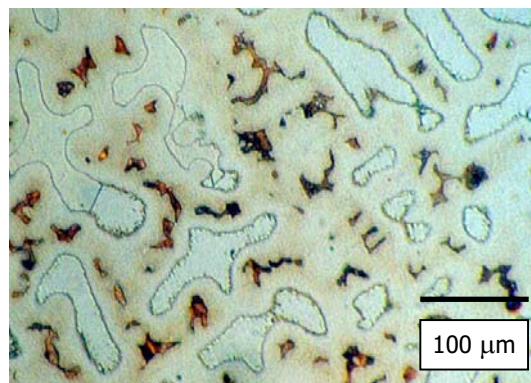
ฉ.2-6 โลหะผสมชุดที่ 6 : 4.90%Cu – 2.10%Mn – balance of Ag

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

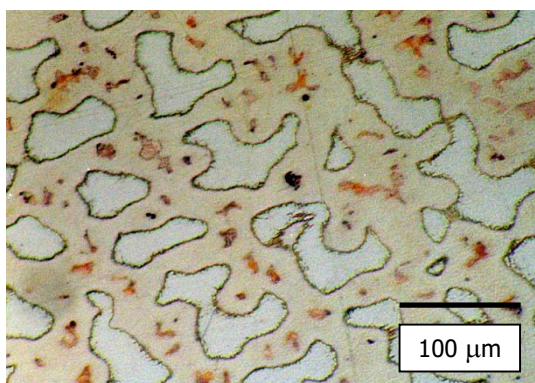
ฉ.2-8 โลหะผสมชุดที่ 8 : 4.00%Cu – 3.00%Mn – balance of Ag



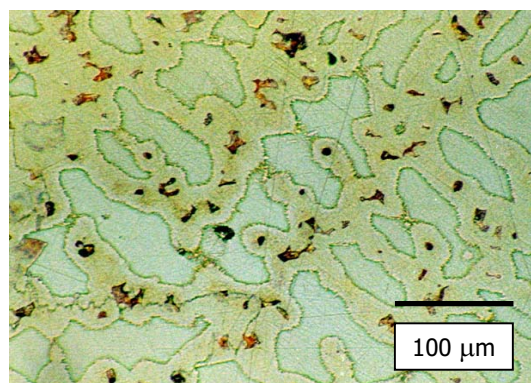
ฉ.3-1



ฉ.3-2



ฉ.3-3



ฉ.3-4

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

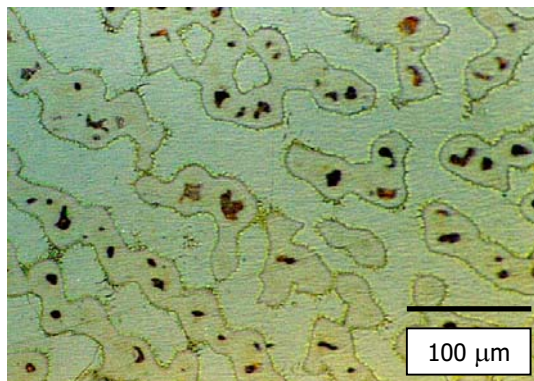
ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 200 เท่า

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

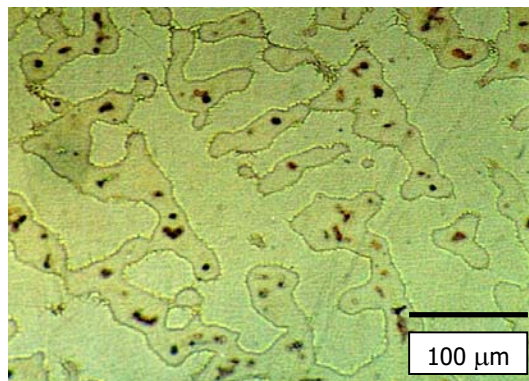
ฉ.3-2 โลหะผสมชุดที่ 2 : 6.97%Cu – 0.38%Mn – balance of Ag

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

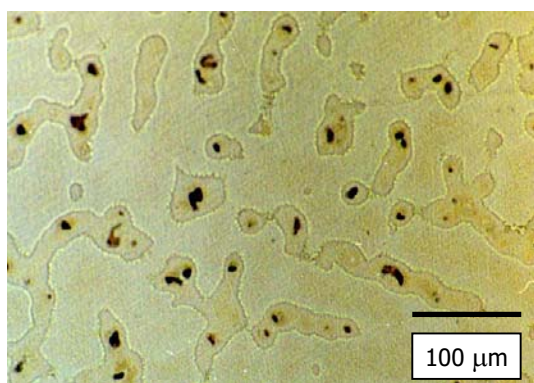
ฉ.3-4 โลหะผสมชุดที่ 4 : 6.14%Cu – 1.30%Mn – balance of Ag



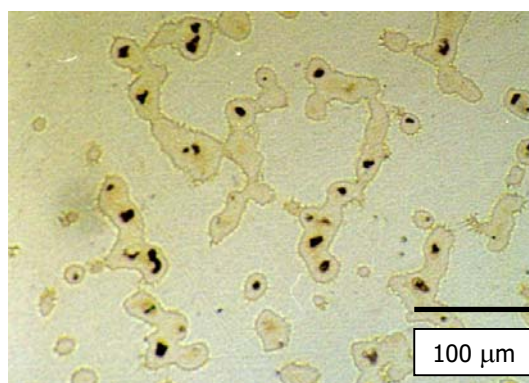
ด.3-5



ด.3-6



ด.3-7



ด.3-8

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

ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 200 เท่า

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

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

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

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

## ภาคผนวก ช.

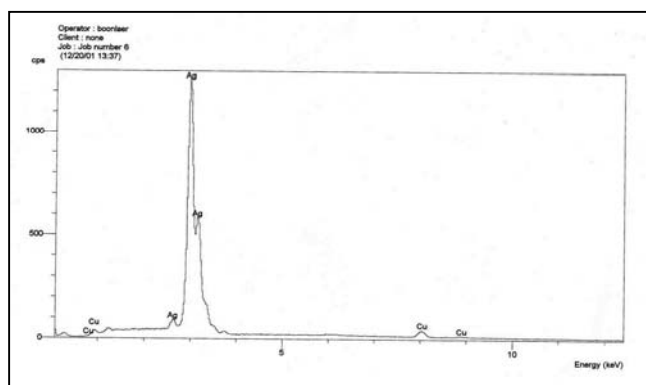
ปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของโลหะเงินผสม

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

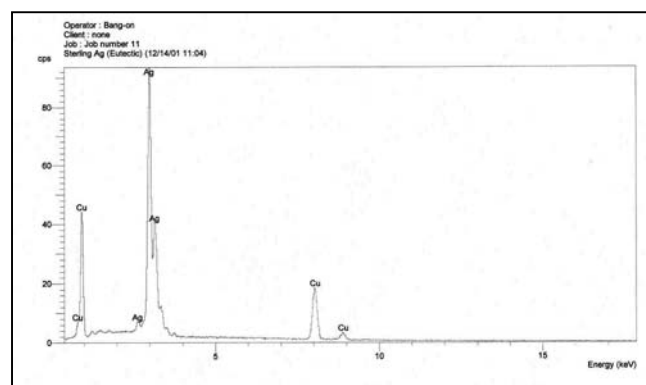
| Sample |         |      | Chemical Composition of Samples |       |      |      |       | Chemical Composition from EDX * (wt.%) |      |                     |       |      |  |                            |  |
|--------|---------|------|---------------------------------|-------|------|------|-------|----------------------------------------|------|---------------------|-------|------|--|----------------------------|--|
|        |         |      |                                 |       |      |      |       | 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

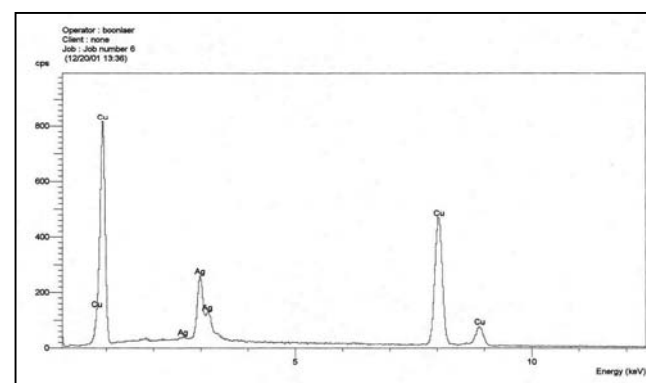
ND = not determined



๗.1-1



๗.1-2



๗.1-3

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

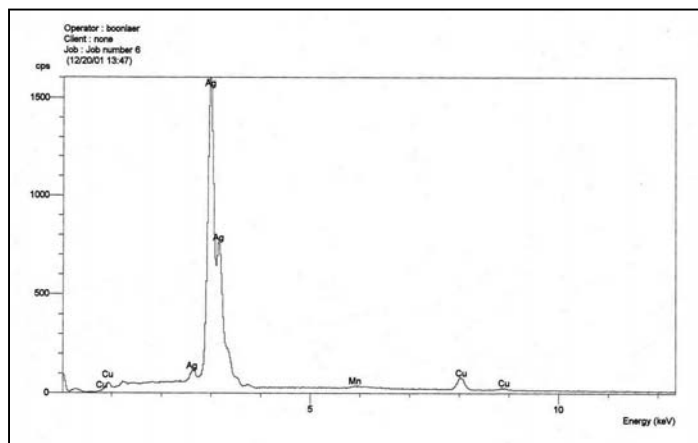
ที่ไม่มีแมงกานีสผสม ด้วย EDX\* (ชิ้นงานชุดที่ 1, 0% Mn) โดยตำแหน่งที่ตรวจสอบมีดังนี้

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

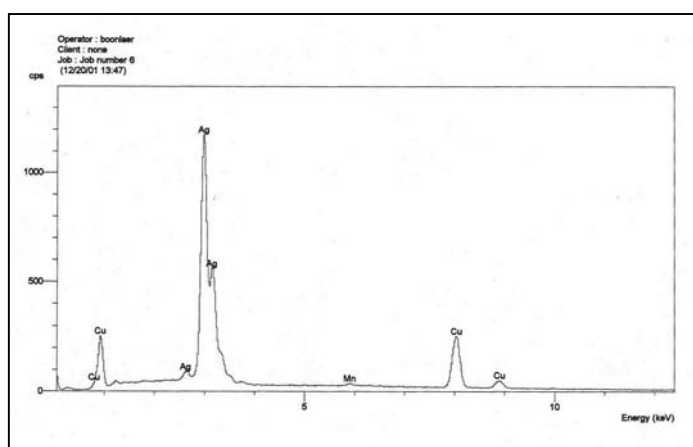
๗.1-2 บริเวณโครงสร้างยูเทคติก : 69.53%Ag – 30.47Cu ( ตำแหน่ง A. )

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

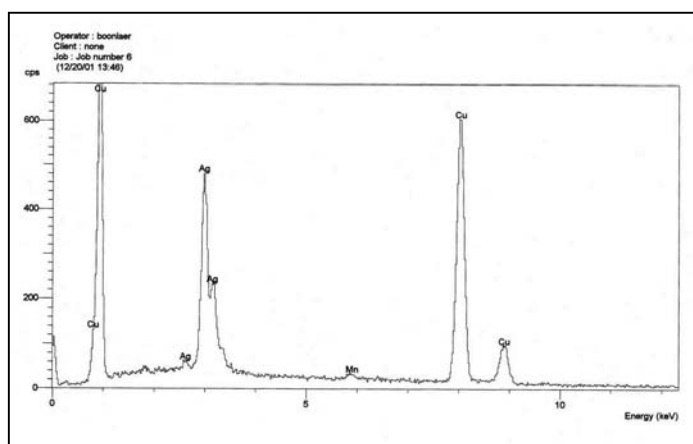
\* หมายเหตุ : ชิ้นงานที่ทำการทดสอบ (ชุดที่ 1) มีโครงสร้างจุลภาค หน้า 4.41 รูปที่ 4.21 ก. - ข.



รูป.2-1



รูป.2-2



รูป.2-3

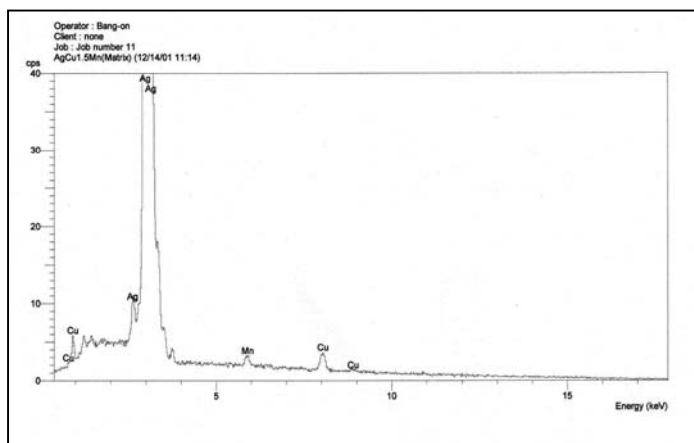
รูปที่ ข..2 กราฟแสดงผลจากการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของโลหะเงินสเตอร์ลิง  
ที่มีแมงกานีส 0.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วย EDX

ข.2-1 บริเวณโครงสร้างเนื้อพื้น : 92.46%Ag – 7.23%Cu – 0.31%Mn (ตำแหน่ง Matrix)

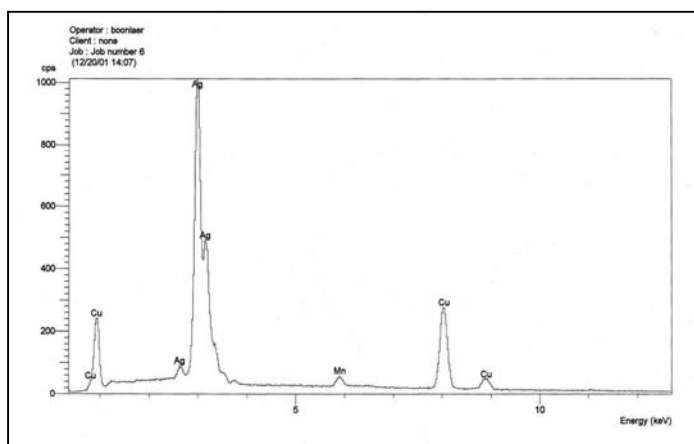
ข.2-2 บริเวณโครงสร้างยูเทคติก : 70.90%Ag – 28.62Cu – 0.48%Mn (ตำแหน่ง C)

ข.2-3 บริเวณอนุภาคสีดำในโครงสร้างยูเทคติก : 29.29%Ag – 70.17%Cu – 0.54%Mn (ตำแหน่ง D)

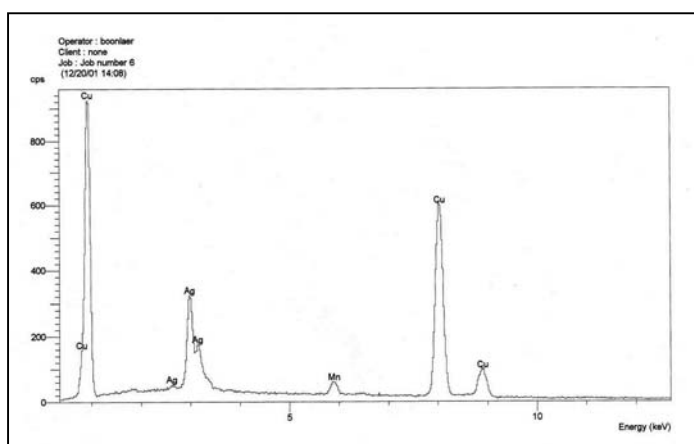
\* หมายเหตุ : ชิ้นงานทำการทดสอบ (ชุดที่ 2) มีโครงสร้างจุลภาคอยู่ในหน้า 4-41 (รูปที่ 4.21 ค - ง)



๗.3-1



๗.3-2



๗.3-3

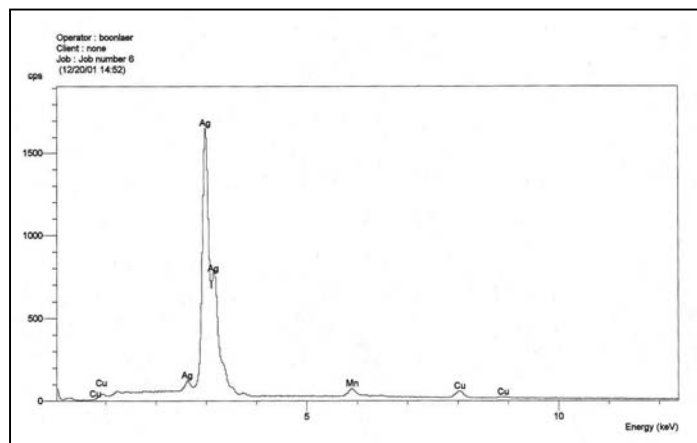
**รูปที่ ๓** กราฟแสดงผลจากการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีแมงกานีส 1.30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วย EDX

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

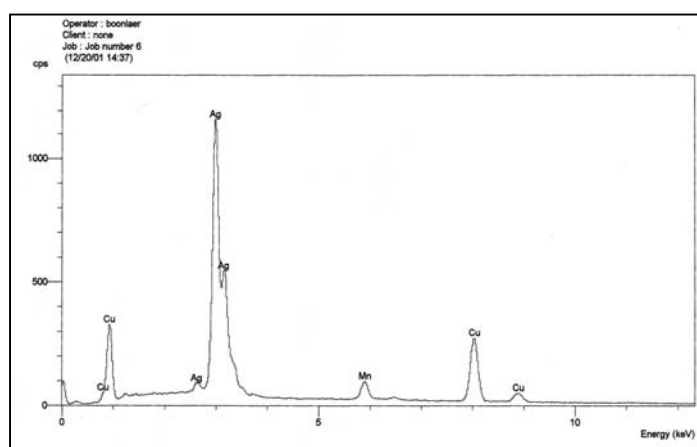
๗.3-2 บริเวณโครงสร้างยูเทคติก : 65.19%Ag – 32.92Cu – 1.88%Mn (ตำแหน่ง E)

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

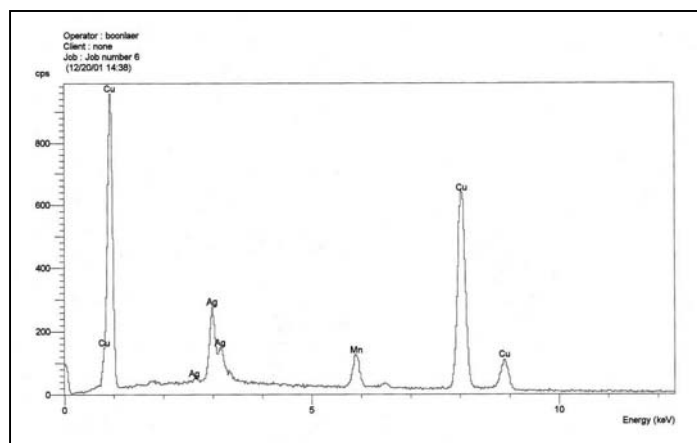
\* หมายเหตุ : ชิ้นงานที่ทำการทดสอบ (ชุดที่ 4) มีโครงสร้างจุลภาคอยู่ในหน้า 4-42 (รูปที่ 4.21 ข – ซ)



๗.4-1



๗.4-2



๗.4-3

รูปที่ ๗.4 กราฟแสดงผลจากการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของโลหะเงินสเตอร์ลิง  
ที่มีแมงกานีส 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)

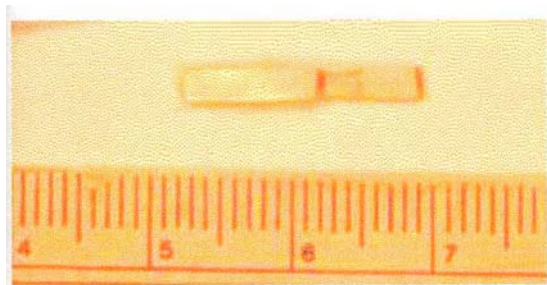
๗.4-3 บริเวณอนุภาคสีดำในโครงสร้างยูเทคติก : 15.76%Ag – 78.52%Cu – 5.71%Mn

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

**ภาคผนวก ซ.**

*ผลการทดสอบ Lap Shear*

๗. แสดงลักษณะรูปชิ้นงานทดสอบ Lab Shear

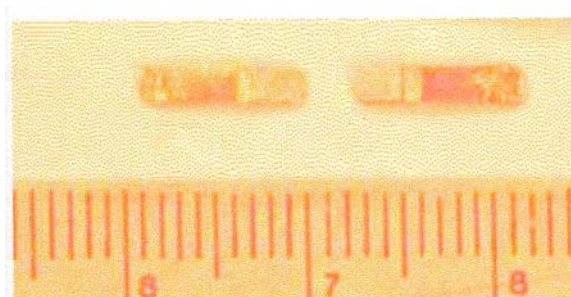


(ก.)



(ข.)

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



(ค.)



(ง.)

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