



เครือข่ายองค์กรบริหารงานวิจัยแห่งชาติ
Thailand Research Organizations Network (TRON)



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ การปรับปรุงขนาดเกรนและความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิง๙๕๐

ด้วยสารประกอบซิลิคอน

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร และคณะ

๑๕ กันยายน ๒๕๕๘

คำนำ

รายงานฉบับสมบูรณ์ (15 กันยายน 2557- 15 กันยายน 2558) ฉบับนี้ จัดทำขึ้นเพื่อนำเสนอผลงานงานวิจัยของโครงการวิจัยเรื่อง การปรับปรุงขนาดเกรนและความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิง 950 ด้วยสารประกอบซิลิคอน ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนจากเครือข่ายองค์กรบริหารงานวิจัยแห่งชาติ (โครงการมุ่งเป้า SMEs ด้านอัญมณีและเครื่องประดับ) โดยมีความต้องการเพื่อปรับปรุงคุณภาพเครื่องประดับเงินให้มีคุณภาพสูงเป็นที่ต้องการของผู้บริโภค การดำเนินการวิจัยจะเกี่ยวข้องกับการใช้สารประกอบซิลิคอนในรูปของทองแดงซิลิคอนและแคลเซียมซิลิไซด์ในโลหะเงินผสมทั้งกลุ่มที่เติมทองแดงอย่างเดียว ทองแดง-ดีบุก ทองแดง-สังกะสี และทองแดง-อะลูมิเนียม เพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานการหมองและยังคงสมบัติทางกลอื่นๆ ที่เหมาะสม แม้ว่าในอดีตที่ผ่านมาจะมีผลงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่ระบุสมบัติของธาตุผสมทองแดง ดีบุก สังกะสีและอะลูมิเนียม แต่การพัฒนาในด้านความต้านทานการหมองยังไม่มากนัก ดังนั้นการดำเนินงานวิจัยนี้จึงเป็นต่อยอดผลงานวิจัยโดยใช้แนวความคิดในเรื่องผลของตัวปรับขนาดเกรนและธาตุกันหมองชนิดต่างๆ มาผสมผสานกันเพื่อให้ได้สูตรอัลลอยใหม่ที่ใช้เติมในเงินสเตอร์ลิงเพื่อมีขนาดเกรนลดลงเพื่อป้องกันการแตกหักและยังมีสมบัติด้านการต้านทานกันหมองสูงมากขึ้นด้วย อันจะนำไปเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมเครื่องประดับมีคุณภาพสูงและต้นทุนการผลิตลดลงไม่จำเป็นต้องใช้อัลลอยนำเข้าจากต่างประเทศที่มีราคาแพง ซึ่งจะเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของไทยให้ยั่งยืนต่อไป

สุดท้ายนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และเครือข่ายองค์กรบริหารงานวิจัยแห่งชาติ ที่สนับสนุนการวิจัยโครงการนี้ และขอขอบคุณ คุณรุ่งวิทย์ เต็มพิทยาเวช บริษัท โอลด์มูน จำกัด ซึ่งผลิตชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิงและเนื้อโลหะเงินที่ใช้ในการวิจัยนี้ ตลอดจนนักวิจัย บุคลากร และเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ช่วยเหลือในงานต่าง ๆ ของโครงการนี้ ที่ช่วยเหลือให้ผลงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์ตามความมุ่งหวังทุกประการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร)

หัวหน้าโครงการ

บทสรุปผู้บริหาร

ตามที่คณะผู้วิจัยได้รับทุนเพื่อสนับสนุนในโครงการวิจัยเรื่อง การปรับปรุงขนาดเกรนและความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิง 950 ด้วยสารประกอบซิลิโคน และมีระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี ตั้งแต่ 15 กันยายน 2557 ถึง 15 กันยายน 2558 โดยมีวัตถุประสงค์ในการทำวิจัยดังนี้

1 เพื่อศึกษาผลของสารประกอบซิลิโคน ในโลหะเงินผสมธาตุหลักทองแดง ดีบุก อะลูมิเนียมและสังกะสี ต่อการลดขนาดเกรน สมบัติทางกล ความต้านทานการหมองและโครงสร้างจุลภาคของเงินผสมในระดับอุตสาหกรรม

2 เพื่อหาปริมาณสารประกอบโลหะผสมซิลิโคนที่เหมาะสมต่อการลดขนาดเกรนและเพิ่มความต้านทานการหมองโดยไม่เกิดผลเสียเนื่องจากหล่อ

3 เพื่อศึกษาคุณภาพผิวตัวเรือนเครื่องประดับเงินที่ผสมอัลลอยที่ผลิตขึ้น (สีผิวสะท้อนและความต้านทานการหมอง)

4 เพื่อนำกระบวนการและเทคนิคการผลิตอัลลอยเผยแพร่ให้แก่ผู้ประกอบการ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1 ได้อัลลอยที่ผสมสารประกอบซิลิโคน เพื่อใช้ในเครื่องประดับโลหะเงินผสมธาตุหลักทองแดง ดีบุก อะลูมิเนียมและสังกะสี โดยมีสมบัติขนาดเกรนเล็ก ความต้านทานการหมองสูง และยังคงสมบัติทางกลที่เหมาะสม

2 ได้ปริมาณโลหะผสมซิลิโคนที่เหมาะสมต่อการลดขนาดเกรน และเพิ่มความต้านทานการหมองโดยไม่เกิดผลเสียเนื่องจากหล่อ

3 สามารถนำอัลลอยไปใช้ได้จริงในระดับอุตสาหกรรมรวมถึงได้รับข้อมูลการหล่อเงินผสมที่เหมาะสมกับอัลลอยในสถานประกอบการ

4 ผู้ประกอบการในระดับอุตสาหกรรมได้รับการถ่ายทอดเผยแพร่องค์ความรู้เกี่ยวกับการผลิตอัลลอยชนิดนี้

ในการวิจัยคณะผู้วิจัยได้แบ่งโลหะเงินสเตอร์ลิงผสมอัลลอยออกเป็น 4 กลุ่ม คือ เงินผสมทองแดง เงินผสมทองแดง ดีบุก เงินผสมทองแดงสังกะสีและเงินผสมทองแดงอะลูมิเนียม ในแต่ละกลุ่มยังแยกออกเป็นเต็มและไม่เต็มโบรอน เพื่อศึกษาการลดขนาดเกรนจากโบรอน หลังจากนั้นจะเติมสารประกอบซิลิไซด์ ซึ่งคือแคลเซียมซิลิไซด์ เพื่อศึกษาความสามารถในการต้านทานการหมองของชิ้นงาน

จากผลการวิจัย สามารถสรุปได้ว่า ทองแดงเป็นตัวหลักที่ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นแต่ส่งผลต่อความต้านทานการหมองให้ต่ำลง ในกลุ่มที่เติมสังกะสีหรือดีบุกแม้ว่าจะเพิ่มความต้านทานการหมองแต่ยังไม่สูงมากนัก ดังนั้นกลุ่มที่เป็นเงินสเตอร์ลิงผสมทองแดงอะลูมิเนียมมีสมบัติต้านทานต่อการหมองดี

ในกรณีของการลดขนาดเกรน จะเห็นได้ว่า โบรอนมีความสามารถในการลดขนาดเกรน แต่ไม่มากนัก ขณะที่อะลูมิเนียมมีความสามารถในการลดขนาดเกรนได้โดยไม่ต้องอาศัยการเติมโบรอน ซึ่งอาจจะมาจากการเกิดนิวเคลียสเทียมหรือปรากฏการณ์อื่น

ซิลิคอนส่งผลด้านการหมองที่ดีต่อโลหะเงินผสมทุกกลุ่ม แต่เมื่อปริมาณซิลิคอนตั้งแต่ 0.15% โดยน้ำหนัก จะพบปรากฏการณ์การแตกหักหลังหล่อ โบรอนช่วยลดขนาดเกรนได้ในกลุ่มเงิน-ทองแดง-สังกะสีได้ดีเยี่ยมถึง 67.7% และเงิน-ทองแดง-อะลูมิเนียม ได้ถึง 10.7% แต่ในกลุ่มเงิน-ทองแดง-ดีบุก โบรอนไม่ส่งผลต่อการลดขนาดเกรน

การเติมสังกะสีส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการยึดตัว จาก 40%(8 Cu) เป็น 46%(6CuZn) แต่ลดความแข็งแรงจาก 150(8Cu) เป็น 141(6CuZn) MPa และลดจุดหลอมเหลวของน้ำโลหะ เพิ่มการไหลตัวของน้ำโลหะ และส่งผลเพิ่มความต้านทานการหมองได้ดีในช่วงการทดสอบ 1ชม.แรก

การเติมอะลูมิเนียมส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการยึดตัว แต่ลดความแข็งแรง เพิ่มความต้านทานการหมองได้ดีจนถึงการทดสอบที่ 3 ชม. ทำให้เงินมีอัตราการยึดตัวได้ดีจาก 40%(8 Cu) เป็น 46%(4CuAl) สามารถลดขนาดเกรน จาก 2.1 มม.(8 Cu) เป็น 0.75มม. (4 CuAl)

การเติมสารประกอบซิลิคอนทำให้เพิ่มปริมาณซิลิคอนและแคลเซียมในเนื้อเงิน เมื่อเพิ่มปริมาณสารประกอบซิลิคอนทำให้ความต้านทานการหมองสูงขึ้น แต่ลดความแข็งแรงจากการเกิดโครงตาข่ายของเฟสเบตา

ในการวิจัยด้านสมบัติทางกลของโลหะเงินผสมกลุ่มต่างๆ พบว่าธาตุผสมมีสมบัติทางกลแตกต่างกัน โดยสามารถจำแนกออกเป็น 3 กลุ่มเมื่อเทียบกับกลุ่มที่เติมทองแดงอย่างเดียว ได้ดังนี้

- 1 กลุ่มธาตุเพิ่มอัตราการยึดตัว แต่ลดความแข็งแรง ได้แก่ อะลูมิเนียม โบรอน และสังกะสี
- 2 กลุ่มธาตุลดอัตราการยึดตัว แต่เพิ่มความแข็งแรง ได้แก่ ดีบุก โบรอน
- 3 กลุ่มธาตุลดอัตราการยึดตัว แต่ลดความแข็งแรง ได้แก่ สารประกอบซิลิคอนและแคลเซียมซิลิไซด์

ส่วนความต้านทานการหมองสามารถเรียงลำดับได้เป็น 3 แบบ คือ กลุ่มที่มีความต้านทานการหมองต่ำ กลุ่มที่มีความต้านทานการหมองปานกลาง และกลุ่มที่มีความต้านทานการหมองสูง โดยธาตุอะลูมิเนียมจะให้ผลความต้านทานการหมองสูงสุด ธาตุสังกะสีให้ความต้านทานการหมองปานกลาง และธาตุกลุ่มทองแดง ทองแดงผสมดีบุกจะให้ความต้านทานการหมองที่ต่ำที่สุด อย่างไรก็ตามธาตุซิลิคอนและแคลเซียมช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานการหมองให้กับโลหะเงินผสมทุกกลุ่ม ส่วนสูตรต่างๆ ที่เหมาะสมจำแนกออกเป็น 3 กลุ่มตามที่กล่าวข้างต้นและได้ระบุไว้ในรายละเอียดของงานวิจัยนี้

ท้ายสุดนี้การใช้งานอัลลอยสูตรใดจะขึ้นอยู่กับลักษณะความต้องการของลูกค้า และกระบวนการผลิต ตลอดจนเครื่องจักรและครุภัณฑ์ที่ใช้ในการผลิต เนื่องจากผลวิจัยดังกล่าวข้างต้นระบุว่ายังมีหลายสูตรที่เป็นไปได้ที่จะนำไปใช้ในการผลิต ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่กล่าวมา ความต้องการของผู้บริโภคที่ต้องการสมบัติกันหมองระดับใด ถ้าต้องการไม่มากนักก็ควรเลือกจากกลุ่มที่มีสังกะสีและซิลิคอนอยู่ด้วย ในกรณีผู้ผลิตต้องการสมบัติด้านความแข็งแรงหรือความสามารถในการหล่อแล้วไม่เกิดปัญหาการแตกร้าวในชิ้นงาน ก็ต้องเติมตัวปรับขนาดเกรนร่วมด้วย นอกจากนี้ในการผลิตอัลลอยเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์ยังต้องคำนึงถึงลักษณะเครื่องจักรและเครื่องหล่อหลอมที่มีอยู่ด้วย เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของอัลลอยต่อสมบัติต่างๆ

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	2
บทสรุปผู้บริหาร	3
สารบัญ	5
บทที่ 1 บทนำ	10
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง	10
1.2. วัตถุประสงค์โครงการ	11
1.3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	11
1.4. รายละเอียดโครงการ	12
บทที่ 2 ปรีทรรศน์วรรณกรรม	16
บทที่ 3 กระบวนการดำเนินการวิจัย	25
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	27
บทที่ 5 สรุปผล	79
เอกสารอ้างอิง	81
ภาคผนวก	83

สารบัญญภาพ

	หน้า
2.1 แผนภูมิของ Ellingham สำหรับการเกิดออกไซด์ของธาตุต่างๆ ⁽⁹⁾	17
2.2 แผนภูมิสมมูลเฟสของโลหะผสมเงิน - ทองแดง ⁽¹²⁾	18
2.3 แผนภูมิสมมูลเฟสของโลหะผสมเงิน - สังกะสี ⁽¹²⁾	18
2.4 แผนภูมิสมมูลเฟสของโลหะผสมเงิน - อะลูมิเนียม ⁽¹²⁾	19
2.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงการสักร้าง Passive In ₂ O ₃ band ใน Ag-In alloy ที่มี In 7 % ที่กำลังขยาย 21700x ⁽¹³⁾	20
2.6 แสดงการเปรียบเทียบ ผิวหลังการหล่อและล้างปูนระหว่างเงินสเตอร์ลิงผสม ทองแดงและซิลิคอน กับ เงินสเตอร์ลิงผสม ทองแดง สังกะสี ซิลิคอน ⁽¹⁴⁾	21
2.7 แสดงปริมาณธาตุผสมชนิดต่างๆ ที่มีต่อค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ในโลหะผสมเงิน ⁽¹⁶⁾	22
2.8 โครงสร้างจุลภาคแสดงกลไกการปรับเนื้อละเอียดของโบรอนที่เกิดขึ้นใน เงินผสมทองแดง และ ซิลิคอน เกรด 950 ที่ของเกรน ⁽¹⁾	24
3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน	26
4.1 สมบัติทางกลของโลหะเงิน-ทองแดง ⁽¹⁾	28
4.2 ผิวชิ้นงานเงิน 95%ผสมซิลิคอน 0.1 - 0.5% และ ทองแดง 4.5 - 4.9 %	29
4.3 กราฟการเปลี่ยนแปลงค่าสี(dE*) ที่เวลาและปริมาณซิลิคอนต่างกันบนผิวเงิน 95.0% ⁽¹⁸⁾	29
4.4 โครงสร้างเงินสเตอร์ลิง 95.0% ผสมซิลิคอน	30
4.5 แสดงตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของเงินผสมทองแดง ซิลิคอนและแคลเซียม ⁽¹⁹⁾	31
4.6 แผนภูมิสมมูลเฟสระบบเงิน-ดีบุก ⁽¹²⁾	33
4.7 แผนภูมิสมมูล Liquidus line ระบบเงิน-ทองแดง-ดีบุก ⁽²¹⁾	33
4.8 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 925 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM)	36
4.9 โครงสร้างจุลภาคตรวจสอบด้วย EPMA ของชิ้นงาน 10.7B(75B) ⁽¹⁾	38
4.10 แสดงผลของปริมาณโบรอนต่อขนาดเกรนของเงินผสมทองแดง สังกะสี ซิลิคอน ⁽¹⁾	40
4.11 ลักษณะจุดสีดำที่ผิวชิ้นงานหล่อเงิน และคราบสีขาวที่ผิวชิ้นงาน 2.26(150B) ⁽¹⁾	41
4.12 การกระจายตัวของอนุภาคกลุ่มทองแดงโบรอนของชิ้นงาน 10.7B(75B) ด้วย FIB ⁽¹⁾	41
4.13 การเปรียบเทียบการเกิดอนุภาคที่รอยต่อเกรน	42
4.14 ความสัมพันธ์ของปริมาณโบรอนในเนื้อเงินต่อค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด(Ultimate tensile strength-UTS) ความแข็งแรงดึงที่จุดคราก(Yield strength – YS) และ Elongation(%) และขนาดเกรนของเงินเกรด 950 ผสม ทองแดง สังกะสี ดีบุก ซิลิคอนโบรอน ⁽¹⁾	43
4.15 ตัวอย่างอัลลอยทดลองผ่านการหลอมผสมที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ในเตาหลอมระบบสุญญากาศ	46
4.15 ก มาสเตอร์อัลลอยทองแดงผสมซิลิคอนร่วมกับสารประกอบซิลิคอน ในอัตราส่วนCu10 Si 760 กรัม กับสารประกอบซิลิคอน 43 กรัมหลอมที่ 1130 องศาเซลเซียส	46
4.16 ตัวอย่างสีของต้นเงิน 950 ที่ผสมอัลลอย1(CuSn) ถึง 8(Cu)ตามตารางที่ 4.5 ผ่านการหล่อที่อุณหภูมิเบ้า 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเท1050 องศาเซลเซียสและล้างปูนโดยไม่ผ่านการกัดกรด	48

สารบัญญภาพ

	หน้า
4.16ก ตัวอย่างสีของต้นเงิน 950 ผสมอัลลอยต่างชนิด ร่วมกับมาสเตอร์อัลลอยทองแดงผสมสารประกอบซิลิคอน ผ่านการหล่อที่อุณหภูมิเบ้า 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเท1050 องศาเซลเซียสและล้างปูนโดยไม่ผ่านการกัดกรด	49
4.16 ข ตัวอย่างฐานต้นเงินผสมอัลลอยร่วมกับมาสเตอร์อัลลอย ก) 7/1(CuZnB0.1SiCa) ข) 7/4(CuZnB0.5SiCa) ค) ฐานต้นเงิน 5/4(CuAlB0.5SiCa)มีรอยหดตัวแบบเดนไดรต์	50

4.17	แสดง ส่วนบริเวณฐานต้นเงินที่ใช้ตรวจสอบหาขนาดเกรนหลังหล่อ	51
4.18	แสดงขนาดเกรนโดยรวมของเงินผสมอัลลอยทดสอบเกรด 950	53
4.19	แสดงขนาดเกรนโดยรวมของเงินผสมอัลลอยทดสอบร่วมกับสารประกอบซิลิคอน	54
4.19 ก	แสดงขนาดเกรนโดยรวมของเงินผสมอัลลอยทดสอบร่วมกับสารประกอบซิลิคอน	54
4.19 ข	แสดงขนาดเกรนโดยรวมของเงินผสมอัลลอยทดสอบร่วมกับสารประกอบซิลิคอน	55
4.19 ค	แสดงขนาดเกรนโดยรวมของเงินผสมอัลลอยทดสอบร่วมกับสารประกอบซิลิคอน	55
4.20	แสดงสมบัติทางกลที่ตรวจสอบด้วยการทดสอบแรงดึงที่อัตราเร็ว 0.75 มม/นาที ของชิ้นงานทดสอบเงิน 950	57
4.21	แผนภูมิสมดุระหว่าง เงิน-อะลูมิเนียม และ เงิน-สังกะสี ⁽¹³⁾	57
4.22	แสดงสมบัติทางกลที่ตรวจสอบด้วยการทดสอบแรงดึงที่อัตราเร็ว 0.75 มม/นาที ของชิ้นงานทดสอบเงิน 950ผสมสารประกอบซิลิคอน	58
4.23	แสดงผลชิ้นงานโลหะเงินผสมธาตุต่างๆ ที่มีโบรอนและไม่เติมโบรอนหลังการขัดทั้ง 8 ชุด	59
4.24	แสดงผลการทดสอบกันหมองของชิ้นงานทดสอบเงินผสมธาตุต่างๆ ทั้ง 8 ชุด	60
4.25	แสดงค่าความแตกต่างสีผิวจากผลการทดสอบกันหมองของชิ้นงานทดสอบเงินผสมธาตุต่างๆ ทั้ง 8 ชุด	61
4.26	แสดงผลการทดสอบกันหมองของชิ้นงานทดสอบเงินผสมธาตุต่างๆร่วมกับสารประกอบซิลิคอน ทั้ง 8 ชุด	61
4.27	แสดงผลวิเคราะห์ฟิล์มจากการทดสอบกันหมองใน H ₂ S 2 ชม. ด้วย Raman spectroscopy ของชิ้นงานเงิน 4(CuAl) และ 5(CuAlB)	62
4.28	การตรวจสอบเชิงเส้นและเชิงจุดบนฟิล์มหมองที่ผิวของชิ้นงานเงิน 5(CuAlB) ผ่านบรรยากาศ H ₂ S 2 ชม.	63
4.29	แสดงผลตรวจสอบฟิล์ม ที่ผิวเงิน 8(Cu) ที่ผ่าน/ไม่ผ่านการทดสอบการหมองใน H ₂ S 2 ชม.	64
4.30	การตรวจสอบเชิงเส้นและเชิงจุดบนฟิล์มหมองที่ผิวของชิ้นงานเงิน 8(Cu) ผ่านบรรยากาศ H ₂ S 2 ชม.	65
4.31	แสดงผลวิเคราะห์ฟิล์มจากการทดสอบกันหมองใน H ₂ S 2 ชม. ด้วย Raman spectroscopy ของชิ้นงานเงิน 8(Cu) และ 1(CuSn)	66
4.32	แสดงผลวิเคราะห์ฟิล์มจากการทดสอบกันหมองใน H ₂ S 2 ชม. ด้วย Raman spectroscopy ของชิ้นงานเงิน 6(CuZn) และ 7(CZnB)	66

สารบัญภาพ

	หน้า
4.33 แสดงค่าความแตกต่างสีผิวจากผลการทดสอบกันหมองของชิ้นงานทดสอบเงินผสมธาตุต่างๆร่วมกับสารประกอบซิลิคอน ทั้ง 8 ชุด	67
4.34 แผนภูมิสมมูลของอะลูมิเนียม-โบรอน ⁽²⁴⁾	69
4.35 แสดงผลการตรวจสอบพื้นผิวหมองด้วย SEM และ EDS ผ่านการทดสอบการหมองในบรรยากาศH ₂ S 3 ชม.	70
4.36 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 150 เท่าของชิ้นงานเงินผสม 8(Cu) และ 3(CuB) ผสมสารประกอบซิลิคอน ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM	71
4.37แสดงโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1000 เท่าของชิ้นงานเงินผสม 8(Cu) และ 3(CuB) ผสมสารประกอบซิลิคอน ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM	72
4.38แสดงโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 150 เท่าของชิ้นงานเงินผสม 1(CuSn) และ 2(CuSnB)ผสมสารประกอบซิลิคอนถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM	73
4.39แสดงโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1000 เท่าของชิ้นงานเงินผสม 1(CuSn) และ 2(CuSnB)ผสมสารประกอบซิลิคอนถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM	74
4.40 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 150 เท่าของชิ้นงานเงินผสม 6(CuZn) และ 7(CuZnB)ผสมสารประกอบซิลิคอนถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM	74
4.41 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1000 เท่าของชิ้นงานเงินผสม 6(CuZn) และ 7(CuZnB)ผสมสารประกอบซิลิคอนถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM	75
4.42 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 150 เท่าของชิ้นงานเงินผสม 4(CuAl)และ 5(CuAlB) ผสมสารประกอบซิลิคอนถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM	75
4.43 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1000 เท่าของชิ้นงานเงินผสมกลุ่ม 4(CuAl)และ 5(CuAlB) ผสมสารประกอบซิลิคอนถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM	77

สารบัญตาราง

	หน้า
1.1 แสดงผลการดำเนินงาน	14
2.1 สมบัติทางกายภาพของโลหะที่ผสมอยู่ในเงินสเตอร์ลิง	16
2.2 แสดงผลค่า DE ที่แตกต่างของเงินที่มีส่วนผสมอัลลอยมากกว่า 1 ชนิดจากกระบวนการหล่อ ⁽¹⁵⁾	23
4.1 ความแข็ง(Hardness; HV) ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength; UTS) ความเค้นจุดคราก (Yield Strength; σ_y),ค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus; E)และค่า %Elongation ของเงินผสม ทองแดง และ ดีบุก	36
4.2 ปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของเงินสเตอร์ลิง 925 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM)	38
4.3 แสดงการใช้โบรอนในสิทธิบัตร	39
4.4 แสดงส่วนผสมเคมีก่อนหล่อและหลอมผลิตอัลลอยทดลองประเภทต่างๆ	44
4.5 แสดงส่วนผสมเคมีก่อนหล่อและหลอมผลิตเงิน(95%) ผสมอัลลอยทดลอง ด้วย ICP-OES	47
4.6 แสดงอัตราส่วนของพีค Ka_{Ag}/La_{Ag} ของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบในบรรยากาศ H_2S 0.5 และ 3 ซม.	69
4.7 แสดงต้นทุนการผลิตอัลลอยต่อปริมาณการผลิต 8 กก. ด้วยเตาหลอมระบบสุญญากาศ	77

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง

แม้ว่าเครื่องประดับเงินเป็นผลิตภัณฑ์ที่สร้างรายได้ในลำดับต้นของไทยและสร้างแรงงานจำนวนมาก การผลิตเครื่องประดับเงินในปัจจุบันเพื่อส่งออกยังคงใช้กระบวนการหล่อเป็นหลักแต่การพัฒนาในด้านเทคโนโลยีการผลิตยังมีไม่มากเท่าที่ควร จุดแข็งและข้อได้เปรียบของประเทศไทยคือฝีมือและความประณีตของช่างไทย แต่จุดอ่อนคือ การพึ่งพาและนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศแม้ว่าจะมีการพัฒนาในประเทศเพิ่มขึ้นก็ตาม โดยเฉพาะอัลลอยที่ต้องอาศัยความรู้ทางด้านโลหะวิทยาเพื่อปรับปรุงคุณภาพเพื่อให้ได้เครื่องประดับเงินที่มีคุณภาพสูงและเป็นที่ต้องการของผู้บริโภค ปัจจุบันอัลลอย (โลหะผสม) ที่ใช้ผสมกับเงินมีหลายกลุ่ม ได้แก่ ทองแดงหรือทองแดงผสมเป็นหลักการเติมทองแดงเพียงธาตุเดียวแม้ว่าจะเพิ่มความแข็งแรง ความคงทนของชิ้นงานเครื่องประดับและทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำก็ตาม แต่ก็จะมีปัญหาเรื่องออกไซด์ของทองแดงส่วนการเติมอัลลอยที่เป็นทองแดงผสมธาตุผสมที่ใช้เพื่อแก้ปัญหาออกไซด์ของทองแดง ได้แก่ ดีบุก สังกะสี อะลูมิเนียมแมกนีเซียม อินเดียม ซิลิคอน เฮอร์มาเนียม เป็นต้นซึ่งออกไซด์ดังกล่าวจะมีคุณสมบัติป้องกันผิวและเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ วิธีการนี้เป็นแนวทางที่สามารถเพิ่มความต้านทานการหมองในเนื้อโลหะได้โดยยังใช้ปริมาณเนื้อเงินคงเดิมและไม่ต้องชุบผิว อย่างไรก็ตามปริมาณของธาตุดังกล่าว เช่น ซิลิคอน และเฮอร์มาเนียมยังไม่สามารถเติมในปริมาณที่สูงได้ เพราะเกิดปัญหาการแตกหักของตัวเรือนหลังการหล่อ หรือเรียกว่าการฉีกขาดขณะร้อน (hot tearing) คณะผู้วิจัยได้เคยทำการศึกษาและวิจัยในการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยใช้ตัวปรับขนาดเกรน เช่น โบรอนและสตรอนเทียมในเครื่องประดับเงินผสมทองแดงอย่างเดียว ซึ่งช่วยยับยั้งการแตกหักได้ทำให้สามารถใส่ซิลิคอนได้มากขึ้นและส่งผลความต้านทานการหมองสูงขึ้น ถึงกระนั้นก็ตามความต้องการของผู้บริโภคยังคงต้องการให้เครื่องประดับเงินมีความต้านทานการหมองสูงจนถึงระดับที่เครื่องประดับไม่หมอง ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งที่จะต่อยอดผลงานวิจัยโดยใช้แนวความคิดในเรื่องผลของตัวปรับขนาดเกรนและธาตุกันหมองชนิดต่างๆ มาผสมผสานกันเพื่อให้ได้สูตรอัลลอยใหม่ที่ใช้เติมในเงินสเตอร์ลิงเพื่อมีขนาดเกรนลดลงเพื่อป้องกันการแตกหักและยังมีสมบัติด้านการต้านทานกันหมองสูงมากขึ้นด้วยความพร้อมในด้านองค์ความรู้ ประสบการณ์ในการวิจัยและอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ คณะผู้วิจัยจึงขอเสนอโครงการการปรับปรุงขนาดเกรนและความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิง 950 ด้วยสารประกอบซิลิคอนนี้เพื่อพัฒนาให้ได้อัลลอยที่มีคุณภาพสูงขึ้นและมีต้นทุนการผลิตต่ำอันจะส่งผลทำให้เครื่องประดับเงินมีคุณภาพสูงและไม่จำเป็นต้องใช้อัลลอยนำเข้าจากต่างประเทศที่มีราคาแพง ซึ่งจะเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของไทยให้ยั่งยืนต่อไป

ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง (อังกฤษ)

Although silver jewelry is the product which provide a lots of income to Thailand and produce the huge amount of labour jobs. At present the jewelry production for export still majority uses the casting technique however the production and technology development in jewelry production is very low and not enough. The strength and advantage of Thailand are the capability and craftsmanship of technicians. Meanwhile the weakness is the dependence in technology import. Although an increase in technology development can be seen in some cases. In case of alloy

development this must rely on metallurgical knowledge to obtain the high quality of silver jewelry and to meet the customer requirement. Nowadays the alloy for silver jewelry can be categorized in several groups such as copper, copper alloys etc. Only copper addition though can improve strength and durability of jewelry articles and give the low cost of production. However the defect of surface is still present due to the oxidation of copper and the copper oxides layers obtained. In the other groups,

copper alloys are used to solve the copper oxides by adding the other elements such as tin, zinc, aluminium, magnesium, indium, silicon and germanium in order to protect the surface of silver articles and increase the anti-tarnish resistance. This technique can be used to increase corrosion resistance and the content of silver can be maintained along with the sterling silver standard and no need for any surface coating i.e. electroplating. However the content of those elements such as silicon and germanium can not be increased in higher level because the jewelry articles can be easily broken or so-called hot tearing effect. Our researchers have been studied to solve this problem by adding grain refiner such as boron or strontium in the copper-added silver. The results shows that grain refiners can prohibit the hot tearing and also the silicon content can be increase in order to obtain higher anti-tarnish resistance. However the customer's requirement is so high that they need the very high anti-tarnish or non-tarnish resistance. Therefore it is very interesting to do the integrated research by using the combined concept of grain refiner and anti-tarnish alloy in order to remove the tearing effect and to produce the new alloy with very high resistance. With the readiness on metallurgical knowledge, research experience in this precious metal area, we would like to propose the proposal with the title of "an improvement in grain size and anti-tarnish resistance of 950 sterling silver with a Si-based compound"

คำสำคัญ (ไทย)

การปรับเนื้อละเอียด, โลหะเงินผสมเกรด 950, สารประกอบซิลิคอน, เงินต้านทานการหมอง

คำสำคัญ (อังกฤษ)

grain refinement, 950 silver alloy, Si-based compound, anti-tarnish silver

1.2 วัตถุประสงค์โครงการ

- 1 เพื่อศึกษาผลของสารประกอบซิลิคอน ในโลหะเงินผสมธาตุหลักทองแดง ดีบุก อะลูมิเนียมและสังกะสี ต่อการลดขนาดเกรน สมบัติทางกล ความต้านทานการหมองและโครงสร้างจุลภาคของเงินผสมในระดับอุตสาหกรรม
- 2 เพื่อหาปริมาณสารประกอบโลหะผสมซิลิคอนที่เหมาะสมต่อการลดขนาดเกรนและเพิ่มความต้านทานการหมองโดยไม่เกิดผลเสียเนื่องจากหล่อ
- 3 เพื่อศึกษาคุณภาพผิวตัวเรือนเครื่องประดับเงินที่ผสมอัลลอยที่ผลิตขึ้น (สีผิวสะท้อน และ ความต้านทานการหมอง)
- 4 เพื่อนำกระบวนการและเทคนิคการผลิตอัลลอยเผยแพร่ให้แก่ผู้ประกอบการ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1 ได้อัลลอยที่ผสมสารประกอบซิลิคอน เพื่อใช้ในเครื่องประดับโลหะเงินผสมธาตุหลักทองแดง ดีบุก อะลูมิเนียมและสังกะสี โดยมีสมบัติขนาดเกรนเล็ก ความต้านทานการหมองสูง และยังคงสมบัติทางกลที่เหมาะสม
- 2 ได้ปริมาณโลหะผสมซิลิคอนที่เหมาะสมต่อการลดขนาดเกรน และเพิ่มความต้านทานการหมองโดยไม่เกิดผลเสียเนื่องจากหล่อ
- 3 สามารถนำอัลลอยไปใช้ได้จริงในระดับอุตสาหกรรมรวมถึงได้รับข้อมูลการหล่อเงินผสมที่เหมาะสมกับอัลลอยในสถานประกอบการ
- 4 ผู้ประกอบการในระดับอุตสาหกรรมได้รับการถ่ายทอดเผยแพร่องค์ความรู้เกี่ยวกับการผลิตอัลลอยชนิดนี้

1.4 รายละเอียดโครงการ

แม้ว่าเครื่องประดับเงินเป็นผลิตภัณฑ์ที่สร้างรายได้ในลำดับต้นของไทยและสร้างแรงงานจำนวนมาก โดยในช่วง 4 เดือนแรกของปี 2555 พบการส่งออกเครื่องประดับเงินปรับตัวลดลงร้อยละ 2.99 จากการส่งออกไปอันดับ 1 ไปยังสหรัฐในอัตราส่วนแบ่งตลาดสูงสุดราวร้อยละ 44 ของมูลค่าการส่งออกโดยรวมมีการ สำหรับในตลาดหลักในลำดับ 3 เดนมาร์ก และ 4 ออสเตรเลีย ที่มีการขยายตัวลดลง ร้อยละ 10.55, 49.70 และ 1.45 ตามลำดับ แต่ยังคงพบการส่งออกที่เพิ่มขึ้นใน เยอรมนีและฮ่องกงที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 53.84 และ 29.03 ตามลำดับ การผลิตเครื่องประดับเงินในปัจจุบันเพื่อส่งออกยังคงใช้กระบวนการหล่อเป็นหลัก แต่การพัฒนาในด้านเทคโนโลยีการผลิตยังมีไม่มากเท่าที่ควร จุดแข็งและข้อได้เปรียบของประเทศไทยคือ ฝีมือและความประณีตของช่างไทย แต่จุดอ่อนคือ การพึ่งพาและนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศ แม้ว่าจะมีการพัฒนาในประเทศเพิ่มขึ้นก็ตามโดยเฉพาะอัลลอยที่มีคุณภาพสูงยังต้องนำเข้า การพัฒนาอัลลอยทำโดยอาศัยความรู้ทางด้านโลหะวิทยาเพื่อปรับปรุงคุณภาพเพื่อให้ได้เครื่องประดับเงินที่มีคุณภาพสูงและเป็นที่ต้องการของผู้บริโภคปัจจุบันอัลลอย (โลหะผสม) ที่ใช้ผสมกับเงินมีหลายกลุ่ม ได้แก่ ทองแดงหรือทองแดงผสมเป็นหลัก การเติมทองแดงเพียงธาตุเดียวแม้ว่าจะเพิ่มความแข็งแรง ความคงทนของชิ้นงานเครื่องประดับ และทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำ ก็ตามแต่ก็จะมีปัญหาเรื่องออกไซด์ของทองแดง .. แนวทางแก้ไขปัญหาคือออกไซด์นี้มีหลายแนวทาง ดังนี้

1 การเพิ่มปริมาณเนื้อโลหะเงิน เช่น เพิ่มเป็น 95%(จากเดิมใช้ที่ 93-94 %) หรือบางแห่งใช้เนื้อเงินที่นำเข้าจากต่างประเทศที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 97-99.99% แม้ว่าการใช้เนื้อโลหะเงินสูงจะลดปัญหาในด้านคุณภาพผิวหลังหล่อได้บางประการ แต่ความแข็งแรง ความแข็งของตัวเรือนมีค่าลดลงอย่างมาก ทำให้ในสภาวะใช้งานตัวเรือนขูดขีดเป็นรอยและบิดเบี้ยวได้ง่าย รวมถึงการเกิดการหมองเนื่องจากการเกิดสารประกอบเงินกับกำมะถันที่หลีกเลี่ยงไม่ได้

2 การชุบเคลือบผิว เช่น การชุบด้วยธาตุหรือวัสดุกันหมอง การชุบด้วยโรเดียม การชุบด้วยสารอินทรีย์ต่าง ๆ การชุบในลักษณะนี้สามารถป้องกันผิวโลหะไม่ให้หมองคล้ำได้ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิด ความหนาและความสามารถในการยึดเกาะของผิวชุบอย่างไรก็ตามเมื่อผิวเคลือบหลุดลอกออกหรือล่อนจากการเสียดสี ขูดขีด หรือการกระแทก ก็จะเผยเนื้อโลหะข้างในออกมาและเกิดการหมอง ซึ่งต้องนำไปชุบเคลือบผิวซ้ำ

3 การใช้อัลลอยกันหมอง วิธีการนี้เป็นแนวทางที่สามารถเพิ่มความต้านทานการหมองในเนื้อโลหะได้อย่างดีโดยยังคงใช้ปริมาณเนื้อเงินคงเดิม และไม่ต้องชุบผิว การเติมธาตุผสมรอง (minor alloying elements) เข้าไปเพิ่มเติมทำได้โดยอาศัยธาตุในกลุ่มมีตระกูล เช่น ทอง แพลตินัม หรือธาตุที่สามารถเกิดออกซิเดชันได้ดีกว่าทองแดงและออกไซด์ที่เกิดขึ้นไม่มีสีและยึดเกาะผิวดี คล้ายกับกระบวนการเกิดออกไซด์ของโครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิม หรืออะลูมิเนียมออกไซด์ในอะลูมิเนียม ธาตุกลุ่มหลังนี้ได้แก่ ดีบุก สังกะสี อะลูมิเนียม แมกนีเซียม อินเดียม เยอรมานเนียม และซิลิคอน เป็นต้น ซึ่งออกไซด์ดังกล่าวจะมีคุณสมบัติป้องกันผิวและเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ ในการศึกษาที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการเติมธาตุกลุ่มซิลิคอน อินเดียม สังกะสีและ ดีบุก ร่วมกับทองแดง ซึ่งก็ให้ผลการต้านทานการหมองเพิ่มขึ้น สิทธิบัตรหลายฉบับยืนยันการเติมสังกะสีและ อะลูมิเนียม ทำให้ค่า DE (Color different)ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเงินผสมทองแดง7.5% US5,021,214(3) Hiroshi Sasaki และ Makato Nishiya ยืนยันการเติม อะลูมิเนียม และ อินเดียม เพิ่มความต้านทานการหมองได้ดีทั้งในบรรยากาศของ Na₂S และ NaCl และ US 6,139,652(5) Richard V . Carrona และ คณะ แสดงผลค่าDEของเงินผสม Ag-7.5Cu, Ag-0.43Al และ Ag-0.45Zn มีค่า 38.6, 13.2และ 12.4 ตามลำดับ เมื่อเงิน99.98% มีค่าDE 13.4 นอกจากนี้ยังมีการรายงานพบ อะลูมิเนียมและแมกนีเซียมในเม็ดเงินบริสุทธิ์ในระดับน้อยมากในลักษณะธาตุแทรกซึ่งทำให้เม็ดเงินมีความเงางามเป็นพิเศษ แต่เนื่องจาก อะลูมิเนียมเป็นธาตุที่สามารถเกิดสารประกอบออกไซด์ ทำให้เพิ่มความหนืดของน้ำโลหะ ก่อปัญหาการหล่อไม่เต็มแบบ ธาตุดังกล่าวก็สามารถสร้างผลในทางลบ ได้แก่ ปัญหาการแตกหลังหล่อ หรือการฉีกขาดขณะร้อน โดยเฉพาะในกลุ่มเงินอัลลอยที่เติม ซิลิคอน สังกะสีและเยอรมานเนียม ดังนั้นการเติมธาตุซิลิคอนสังกะสีและเยอรมานเนียมกลุ่มนี้จึงต้องระมัดระวังในปริมาณการใช้งานไม่ให้สูงเกินไปจนเกิดการแตกหัก อย่างไรก็ตามการแก้ไขปัญหาการแตกหลังหล่อหรือการฉีกขาดดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยนำผลการศึกษาของคุณสิริวรรณ สุกุลตันเจริญชัย(วิทยานิพนธ์) (ผู้วิจัยคนหนึ่งในโครงการนี้) ในหัวข้อผลของโบรอนและสตรอนเชียมต่อการปรับขนาดเกรนของโลหะเงินผสมเกรด 950 ยืนยันผลการเติมโบรอน และ สตรอนเชียม ทำให้ขนาดเกรนเล็กลงและลดปัญหาการฉีกขาดได้อย่างชัดเจนโดยเติมโบรอนในช่วง 1.8 – 10.7 ppm และ/หรือร่วมกับ สตรอนเชียม 140 – 570 ppb ทำให้สามารถใส่ซิลิคอนได้มากขึ้นและส่งผลความต้านทานการหมองสูงขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลการวิจัยที่คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยมาแล้วที่เป็นข้อมูลสนับสนุนการวิจัยในโครงการนี้เพื่อสนองความต้องการของผู้บริโภคที่ยังคงต้องการให้เครื่องประดับเงินมีความต้านทานต่อการหมองสูงจนถึงระดับที่เครื่องประดับไม่หมอง ผลงานวิจัยของ ผศ.ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร และคณะ(2) แสดงให้เห็นว่าการเติมสารประกอบแคลเซียม-ซิลิคอนช่วยลดขนาดเกรน

สำหรับเงินสเตอร์ลิงเกรด 925 ที่ผสมทองแดงอย่างเดียว โดยจะพบเกรนขนาดเล็กเกิดขึ้นในเนื้อชิ้นงาน และยังพบการสร้างผิวสะท้อนที่เงางามกว่าเดิม ลักษณะดังกล่าวสามารถเกิดได้จากสารประกอบแคลเซียม-ซิลิโคนสามารถสร้าง congruent melting compound ซึ่งสามารถแสดงตัวเป็นนิวเคลียสเทียมภายในโลหะหลอมเหลวได้ และซิลิโคนจะส่งเสริมการมีผิวสะท้อนที่เงางามกว่าในกรณีที่ไม่ได้เติม อย่างไรก็ตามการผลิตเครื่องประดับเงินในปัจจุบันยังคงพบการนำอัลลอยหลายกลุ่มมาใช้ เช่น อัลลอยกลุ่มทองแดงอย่างเดียว กลุ่มทองแดง-สังกะสี กลุ่มทองแดง-อะลูมิเนียม และกลุ่มทองแดง-ดีบุก ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจในการวิจัยผลของการเติมสารประกอบแคลเซียม-ซิลิโคน ต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรนและความต้านทานการหมอง นอกจากนี้สารประกอบแคลเซียม-ซิลิโคนยังมีราคาถูกซึ่งในปัจจุบันการเลือกใช้อัลลอยในการผลิตเครื่องประดับเงินจะนิยมใช้ธาตุกลุ่มที่มีราคาไม่สูงเพื่อลดค่าใช้จ่ายและ ปรับปรุงความสามารถในการผลิต ส่วนในธาตุที่มีราคาสูงเช่น อินเดียมและ เฮอร์มาเนียมมีแนวโน้มการใช้งานที่ลดลงเพราะกลไกตลาดไม่ยอมรับดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งที่จะต่อยอดผลงานวิจัยโดยใช้แนวความคิดในเรื่องผลของตัวปรับขนาดเกรนและธาตุกันหมองชนิดต่างๆ มาผสมผสานกันเพื่อให้ได้สูตรอัลลอยใหม่ที่ใช้เติมในเงินสเตอร์ลิง เพื่อมีขนาดเกรนลดลงเพื่อป้องกันการแตกหักและยังมีสมบัติด้านการต้านทานกันหมองสูงมากขึ้น ด้วยความร่วมมือในด้านองค์ความรู้ ประสบการณ์ในการวิจัยและอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ คณะผู้วิจัยจึงขอยื่นข้อเสนอโครงการการปรับปรุงขนาดเกรนและความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิง 950 ด้วยสารประกอบซิลิโคน นี้เพื่อพัฒนาให้ได้อัลลอยที่มีคุณภาพสูงขึ้นและมีต้นทุนการผลิตต่ำ อันจะส่งผลทำให้เครื่องประดับเงินมีคุณภาพสูงและไม่จำเป็นต้องใช้อัลลอยนำเข้าจากต่างประเทศที่มีราคาแพง ซึ่งจะเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของไทยให้ยั่งยืนต่อไป

สมมุติฐานของงานวิจัยนี้ (Hypothesis)

คณะผู้วิจัยมีสมมุติฐานในงานวิจัย สารประกอบจะช่วยทำให้สามารถใส่ซิลิโคนและธาตุผสมอื่นแทนซิลิโคนอย่างเดียวที่แม้ว่ามีผลทำให้ความต้านทานการหมองสูงขึ้นแต่ไม่สามารถใช้ในปริมาณสูงได้เพราะเกิดการแตกร้าวในตัวเรือนเครื่องประดับ ดังนั้นสารประกอบซิลิโคนจะช่วยทำให้เกรนมีขนาดเล็กและทำให้เพิ่มปริมาณซิลิโคนได้สูงขึ้นและมั่นใจว่าถ้านำไปใช้ในโลหะเงินผสมชนิดต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น เงินผสมทองแดงอย่างเดียว หรือผสมธาตุกันหมองชนิดอื่นๆ เช่น ดีบุก สังกะสี อะลูมิเนียม และตัวปรับเกรนต่างๆ เช่น แคลเซียม โบรอน เป็นต้น ก็จะช่วยเพิ่มความสามารถในด้านความต้านทานต่อการหมองสูงเพิ่มขึ้นอีก ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งที่จะต่อยอดผลงานวิจัยโดยใช้แนวความคิดในเรื่องผลของตัวปรับขนาดเกรนและธาตุกันหมองชนิดต่างๆ ตลอดจนสารประกอบซิลิโคนมาผสมผสานกันเพื่อให้ได้สูตรอัลลอยใหม่ที่ใช้เติมในเงินสเตอร์ลิง เพื่อมีขนาดเกรนลดลงเพื่อป้องกันการแตกหักและยังมีสมบัติด้านการต้านทานกันหมองสูงมากขึ้น และพัฒนาให้ได้อัลลอยที่มีคุณภาพสูงขึ้นและมีต้นทุนการผลิตต่ำซึ่งจะเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของไทยให้ยั่งยืนต่อไป

ตารางที่ 1.1 แสดงผลการดำเนินงาน

วัตถุประสงค์	กิจกรรมหลัก	กิจกรรมรอง	ช่วงระยะเวลา ดำเนินการ	จำนวน วันที่ใช้	ผู้รับผิดชอบ
1. เพื่อศึกษาผลของสารประกอบโลหะผสมซิลิคอน ต่อการลดขนาดเกรน สมบัติทางกล ความต้านทานการหมอง และโครงสร้างจุลภาคของเงินผสม ในระดับอุตสาหกรรม	1. รวบรวมข้อมูลผลธาตุผสมและแนวทางการหล่อของสารประกอบโลหะผสมซิลิคอน ต่อเงินสเตอร์ลิง	1.รวบรวมข้อมูลของสารประกอบโลหะผสมซิลิคอน ต่อ เงินสเตอร์ลิง 1.1.2 รวบรวมวิธีการเตรียมโลหะผสมเพื่อผลิตอัลลอยก่อนการหล่อเงินสเตอร์ลิง	เดือนที่ 1 เดือนที่ 1-2	25 50	ผศ.ดร.เอกสิทธิ์ ผศ.ดร.เอกสิทธิ์ และ ผู้ช่วยวิจัย
	1.2 จัดสร้างโลหะผสมเพื่อผลิตอัลลอยและหล่อต้นเงินสเตอร์ลิง950	-	เดือนที่ 3-5	60	ผศ.ดร.เอกสิทธิ์ และ ผู้ช่วยวิจัย
2. เพื่อศึกษาผลของสารประกอบโลหะผสมซิลิคอน ต่อสมบัติทางกล ความต้านทานกันหมอง และโครงสร้างจุลภาคของเงินผสม	2.1 วิเคราะห์ผลสารประกอบโลหะผสมซิลิคอน ต่อความต้านทานการหมอง สมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเงิน	-	เดือนที่ 3-7	100	รศ.ดร.กอบบุญญ, รศ.ดร. ธรณินทร์ และผู้ช่วยวิจัย

3. เพื่อหาปริมาณสารประกอบโลหะผสมซิลิคอนที่เหมาะสมต่อการเพิ่มความต้านทานการหมอง โดยไม่ลดความสามารถในการหล่อ	3.1 ปรับปรุงส่วนสารประกอบโลหะผสมซิลิคอน เพื่อหล่อต้นเงินได้ดีในสภาพการหล่อสุญญากาศ		เดือนที่ 6-10	100	ผศ.ดร.เอกสิทธิ์, รศ.ดร.กอบบุญ, รศ.ดร. ธรณินทร์ และ ผู้ช่วยวิจัย
4. เพื่อศึกษาคุณภาพผิวตัวเรือน ความต้านทานการหมอง สมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของเครื่องประดับเงินผสมสารประกอบโลหะผสมซิลิคอน ที่ผลิตขึ้น	4.1 รวบรวมผลสีผิวต้นเงิน ความต้านทานการหมอง สมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเงิน		เดือนที่ 8-11	80	ผศ.ดร.เอกสิทธิ์, รศ.ดร.กอบบุญ, รศ.ดร. ธรณินทร์ และ ผู้ช่วยวิจัย

บทที่ 2 ปรีทรรศน์วรรณกรรม

2.1. การทบทวนวรรณกรรม (Literature review) และขั้นตอนการดำเนินงาน

2.1.1. ความรู้ทั่วไปของโลหะเงิน

ในสมัยก่อนได้มีการใช้โลหะเงินในการผลิตเหรียญกษาปณ์ และต่อมาได้ใช้ทำเครื่องประดับทั้งในรูปของแหวน ต่างหู กำไล สร้อยต่างๆ และใช้ทำเครื่องเรือนเครื่องใช้ในโต๊ะอาหารเช่น ช้อน ส้อม ทั้งในประเภทเป็นเงินสเตอร์ลิง เงินที่มีปริมาณเนื้อโลหะ 80% และ 90% โดยน้ำหนักซึ่งเรียกว่าเครื่องเงิน นอกจากนี้ยังนำเงินมาใช้เป็นวัสดุเคลือบผิวโลหะชนิดอื่น โดยการชุบด้วยเทคนิคการชุบด้วยไฟฟ้าหรือไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroplating or Electroless plating) เพราะโลหะเงินมีสีสวยงามและสามารถนำมาชุบได้ ในอดีตยังนำโลหะเงินมาใช้ในอุตสาหกรรมภาพถ่ายแต่ปัจจุบันการใช้งานด้านนี้ลดน้อยลงเนื่องจากมีการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิตอลมากขึ้นจึงไม่ได้ใช้ในฟิล์มถ่ายรูป แต่ยังคงใช้ในฟิล์มเอกซเรย์ที่ใช้ในทางการแพทย์ เงินยังถูกใช้ในทางทันตกรรม เช่น เงินอมัลกัม (Silver Amalgam) ทำแผ่นเคลือบเครื่องมือทางเคมี ใช้เป็นวัสดุทางไฟฟ้า เช่น ทำหน้าสัมผัสไฟฟ้าหรือใช้เป็น Bearing Metal ในส่วนที่เรียกว่าแบบบิต (Babbitt) ซึ่งใช้เงินผสมแคดเมียมโดยมีเงินผสมอยู่ไม่เกิน 5% รวมถึงการผลิตลวดประสาน (Solder wire) สำหรับการเชื่อมต่อทางไฟฟ้า (ทดแทนตะกั่วและโลหะเป็นพิษที่ใช้เพื่อลดจุดหลอมเหลว) โดยพบว่า อัตราการใช้โลหะมีค่าในกลุ่มอุปกรณ์วงจรไฟฟ้าขนาดเล็ก มีอัตราเพิ่มสูงขึ้น เงินยังได้ถูกนำไปใช้ในการผลิตสายไฟทองแดงที่ต้องการความต้านทานต่อความเค้นสูงแต่ยังคงมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงด้วย ในตารางที่ 1 แสดงสมบัติทางกายภาพของเงิน และของโลหะที่ใช้ผสมในงานวิจัยนี้ได้แก่ ทองแดง อินเดียม และซิลิคอน ดังนี้

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของโลหะที่ผสมอยู่ในเงินสเตอร์ลิง

สมบัติ	เงิน	ทองแดง	อะลูมิเนียม	สังกะสี	ดีบุก	แคลเซียม
สัญลักษณ์	Ag	Cu	Al	Zn	Sn	Ca
เลขอะตอม	47	29	13	30	50	20
น้ำหนักอะตอม	196.8665	63.546	26.98	65.39	118.7	40.7
โครงสร้างผลึกที่ 25 °C	FCC	FCC	FCC	HCP	Tetrago na	Cubic Face Centered
สี	ขาวเงา	แดงเงา	ขาวเงา	ขาวเงา	ขาวเงิน	
ความถ่วงจำเพาะ	10.5	8.96	2.375	7.14	7.265	1.55
จุดหลอมเหลว (°C)	960	1,083	660.32	419.6	231.9	842
จุดเดือด(°C)	2,195	2,600	2519	907	2602	1484
สีสารประกอบออกไซด์	ใส-น้ำตาลดำ	น้ำตาลแดง,ดำ	ขาว-ใส	ขาวอมเหลือง	ขาวอมเหลือง	ขาวอมเหลือง,น้ำตาล
สีสารประกอบซัลไฟด์	ใส-ดำ	ขาวอมเขียว-ฟ้า,ดำ	-	ใส, ขาวอมเหลือง	-	-
สีสารประกอบซัลเฟต	-	-	ขาว	-	-	ขาว

จากสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน ส่งให้เกิดสารละลายของแข็งที่มีสมบัติแตกต่างกันซึ่งสามารถพิจารณาเบื้องต้นจากแผนภูมิสมมูล 2 ธาตุ และจากความต่างต่างนี้ทำให้การเติมธาตุเสริมเอื้อประโยชน์ในการใช้งานในรูปแบบที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปมุ่งเน้นการเพิ่มความต้านทานการหมองและการปรับเนื้อละเอียดของเงินสเตอร์ลิงเป็นหลักดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.1.2 อิทธิพลธาตุผสมต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเงินสเตอร์ลิง

จากการพัฒนาการใช้งาน รวมถึงรูปแบบความต้องการของเงินที่มีความหลากหลาย อันได้แก่ การพัฒนาสมบัติการนำไฟฟ้าควบคู่กับความแข็งแรงของโลหะผสมกลุ่มเงินเพื่อใช้ทำอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือการพัฒนาสมบัติการสะท้อนแสงกับอุตสาหกรรมการถ่ายภาพ ทำให้สามารถแบ่งลักษณะความต้องการของสมบัติของเงินสเตอร์ลิงสำหรับทำเครื่องประดับด้วยการหล่อหลอมในระบบสูญญากาศออกได้เป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

1. การเพิ่มอายุการใช้งานและความต้องการการดูแลรักษาง่าย
 2. การลดระยะเวลาการผลิต รวมถึงต้นทุนการผลิตเพื่อส่งเสริมศักยภาพการแข่งขันทางการตลาดในต่างประเทศ
- จากลักษณะความต้องการดังกล่าวทำให้มีการพัฒนาการใช้ธาตุผสมเสริม เพื่อปรับปรุงสมบัติของเครื่องประดับที่ผลิตจากการหล่อหลอมโดยมุ่งเน้น กลไกของทำงานของธาตุผสมหรืออัลลอย ออกเป็น 2 ส่วนคือ
1. ธาตุผสมเพิ่มความต้านทานการหมอง
 2. ธาตุผสมเพิ่มความแข็งแรง และสมบัติทางกล

2.1.2 ธาตุผสมเพิ่มความต้านทานการหมอง

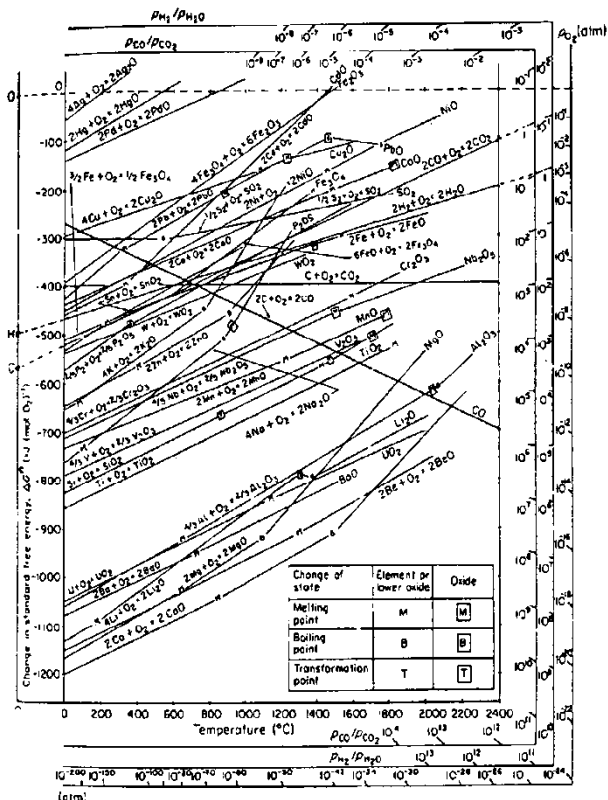
ธาตุกลุ่มดังกล่าวส่งผลเพิ่มอายุการใช้งานของเครื่องประดับ และทำให้ง่ายต่อการดูแลรักษา ซึ่งหมายรวมถึงการพัฒนาคุณภาพในด้านมุมมองทางกายภาพให้แก่เครื่องประดับโดยทั่วไปการหมองที่เกิดขึ้นที่ผิว (Tarnishing) เครื่องประดับเกิดขึ้นเนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเงินกับสารประกอบที่มีกำมะถัน เช่น H_2S หรือ SO_2 เป็นต้น ทำให้เกิดสารประกอบซัลไฟด์ของเงินขึ้น ซึ่งพบว่าจะมี Ag_2S เป็นองค์ประกอบหลัก โดยจากการศึกษาของ Raub⁽⁴⁾ พบว่าในเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมของโลหะเงินมากกว่า 83 % เท่านั้นจึงจะเกิดชั้นฟิล์มของ Ag_2S ได้ ซึ่งสารประกอบของชั้นฟิล์มที่มี Ag_2S เป็นองค์ประกอบหลักนั้น จะทำให้ผิวของชิ้นงานเป็นสีน้ำตาล สีน้ำตาลอมเขียว (Greenish-brown) จนถึงสีดำโดยขึ้นกับชั้นความหนาของฟิล์มที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ Price และ Thomas⁽⁵⁾ ยังพบว่า เมื่อมีความชื้นปนอยู่กับ SO_2 ในปริมาณที่เข้มข้นสูงฟิล์มของสารประกอบซัลไฟด์จะมีซัลเฟต (Ag_2SO_4) ปนอยู่ด้วย

ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ เงินสเตอร์ลิงจะมีการหมองที่ผิวในอัตราที่เร็วกว่าเงินบริสุทธิ์ซึ่ง Vinal และ Schramm⁽⁶⁾ พบว่า อัตราการหมองของเงินสเตอร์ลิงจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณทองแดงที่ผสมอยู่ เนื่องจากการเกิดออกซิเดชันของทองแดง ทำให้เกิดความหมองเพิ่มขึ้นโดย CuO ที่มีสีเทาดำ และ Cu_2O ที่มีสีแดง ดังนั้นจึงได้มีการเติมธาตุบางตัว เช่น สังกะสี ดีบุก ซิลิคอน อลูมิเนียม พัลลาเดียม และ อินเดียม เป็นต้น เพื่อให้มีการสร้างฟิล์มออกไซด์ของธาตุเหล่านี้ และสามารถป้องกันการหมองได้ โดยไปหน่วงการทำปฏิกิริยาของเงินกับสารประกอบที่มีกำมะถัน

กลไกการเกิดออกไซด์บนผิวโลหะโดยอาศัยความสามารถในการเกิดออกไซด์ของธาตุผสมที่ดีกว่าธาตุหลักในโลหะผสมนี้เรียกว่า Selective Oxidation โดยถ้าออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนผิวนั้นมีความหนาพอ และไม่มีช่องว่างพอที่จะเกิดออกไซด์ของธาตุหลัก (Main Oxidation) ภายหลังได้ เรียกว่าออกไซด์นั้นสามารถคลุมผิวได้ทั้งหมดจึงเรียกออกไซด์ฟิล์มที่เกิดขึ้นนั้นว่าเป็นชั้นฟิล์มป้องกันผิว (Protective Layer) ซึ่งชั้นของออกไซด์ (Oxide Layer) จะต้องมีแรงดึงผิวมาก มีความแข็งแรงและเสถียรภาพสูง ทนทานต่อการแพร่ผ่านของออกซิเจน หรือซัลเฟอร์ได้ดี ความสามารถในการแพร่ผ่านของไอออนบวกและไอออนลบต่ำ สำหรับเงินสเตอร์ลิงพบว่าธาตุผสมหลายตัวมีคุณสมบัติในการสร้างฟิล์มออกไซด์ ดังกล่าว เช่น อลูมิเนียมและซิลิคอน เป็นต้น ทำให้สามารถป้องกันอากาศและซัลเฟอร์ได้ดี

จากการศึกษาของ Carrano⁽⁷⁾ ใน US Pat No. 6,139,652 พบว่า เงินสเตอร์ลิงจำเป็นต้องมีฟิล์มออกไซด์ของธาตุอย่างน้อย 1 ชนิดขึ้นไปเพื่อปรับปรุงสมบัติต้านทานการหมองที่มักเกิดจากออกไซด์ของทองแดงที่มักผสมเป็นธาตุหลัก โดยธาตุที่นิยมเติมได้แก่ อะลูมิเนียม พลวง แคดเมียม ซิลิคอน โทเทเนียม สังกะสี และธาตุที่กล่าวมาบางตัวสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับเงินสเตอร์ลิงโดยการอบชุบความร้อน

US, Pat. No. 4,973,446 โดย Bernhard⁽⁸⁾ กล่าวถึงธาตุที่จำเป็นสำหรับการปรับปรุงสมบัติทางกลของเงิน ได้แก่ การลดขนาดเกรน และลดการเกิดรูพรุนเนื่องจากการกักเก็บ ออกซิเจน ยังพบว่า ธาตุผสมช่วยลดฝ้าสีต่างๆโดยอัลลอยที่ใช้มีส่วนประกอบของ ซิลิคอน โบรอน สังกะสี ทองแดง ดีบุก และ อินเดียม จากแนวทางที่กล่าวมาทำให้สามารถพิจารณา ลักษณะการเกิดสารประกอบออกไซด์ของโลหะชนิดต่างๆที่สัมพันธ์กับ ค่าพลังงานอิสระของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สามารถอธิบายโดยแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่าง พลังงานอิสระสำหรับการเกิดปฏิกิริยากับอุณหภูมิ (Ellingham Diagram) ดังรูปที่ 1 ซึ่งบ่งบอกความเป็นไปได้ในการเกิดออกไซด์ของโลหะแต่ละประเภทที่มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิแตกต่างกันและแนวโน้มในการเกิดสารประกอบออกไซด์แต่ละชนิดที่นำมาผสมเป็นอัลลอย



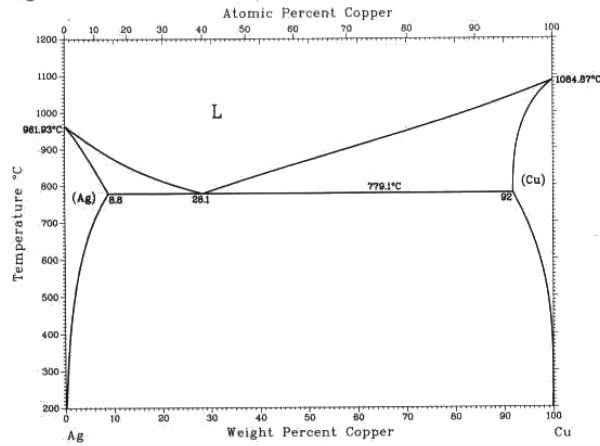
รูปที่ 2.1 แผนภูมิของ Ellingham สำหรับการเกิดออกไซด์ของธาตุต่างๆ⁽⁹⁾

จากการศึกษาของ Croce; Scott M.⁽¹⁰⁾ ใน US, Pat. No. 6,841,012 และ ผลการวิจัยของในหัวข้อ ผลของอินเดียมต่อสมบัติทางกลและความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิงผสมซิลิคอน โดย เจษฎา จอกแก้ว⁽¹¹⁾ พบว่า การเติมซิลิคอน อินเดียม ร่วมกับ สังกะสีและ ดีบุก ส่งผลส่งเสริมความต้านทานการหมองอีกทั้งสามารถสร้างผิวงานหลังหล่อและล้างปูนที่มีความขาวสวยงามกว่าการเติมธาตุเพียง 1 ชนิด แต่เนื่องจากธาตุผสมในงานวิจัยจำเป็นต้องผลิตได้จริงในเชิงอุตสาหกรรม ปัญหาที่พบคือ อินเดียมมีราคาแพงทำให้ไม่สามารถผลิตเชิงการค้าได้ในยุคปัจจุบัน

แม้ว่าการผสมธาตุกลุ่มซิลิคอนและดีบุกจะเพิ่มความต้านทานการหมองแก่เงินสเตอร์ลิง 950 แต่เนื่องจากธาตุหลัก (Major alloy) ยังคงเป็นทองแดง ทำให้การหมองในเงินยังคงเกิดโดยการเติมธาตุซิลิคอนและดีบุกเป็นการชะลอเวลาและเพิ่มระยะเวลาการใช้งานเครื่องประดับเท่านั้น คณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการเติมธาตุที่เพิ่มความต้านทานการหมองได้ดีได้แก่ อะลูมิเนียม ซึ่งมีราคาถูกและสามารถใช้เป็นอัลลอยเชิงอุตสาหกรรมได้จริง อีกทั้งเมื่อพิจารณาการเติมธาตุผสมควรพิจารณา ลักษณะการเกิดเฟสสารประกอบของธาตุผสมซึ่งสามารถส่งผลเสียต่อการทำงาน เช่น การใช้ปริมาณซิลิคอนในปริมาณมาก ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งสูงและเปราะแตกหักเนื่องจากการบิดงอได้ง่าย การเติมดีบุกมากส่งผลให้เกิดการรวมตัวของสารประกอบที่มีสีขาวอมเทาฝังลึกในเนื้อชิ้นงานยากแก่การขัดออก จากตัวอย่างดังกล่าว สามารถแสดงศึกษาความสัมพันธ์ของการเกิดสารประกอบ รวมถึงการผสมกับเงินได้จากแผนภูมิสมดุลเฟสของธาตุดังกล่าวกับเงิน (Binary phase diagram)

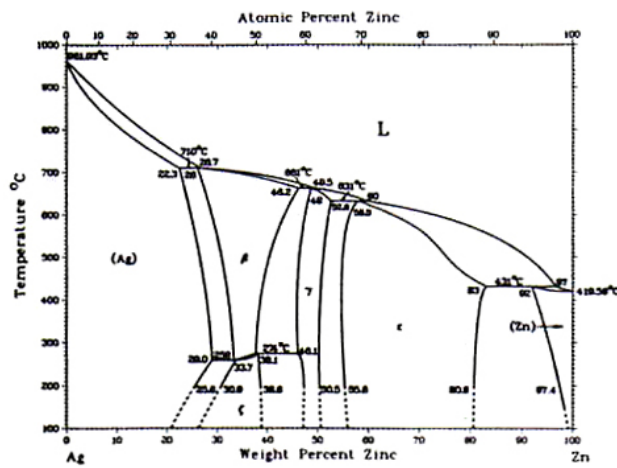
แผนภูมิสมดุลเฟสระหว่างธาตุผสม 2 ธาตุ เช่น แผนภูมิสมดุลเฟสระหว่างเงินและอะลูมิเนียม, เงินและแมกนีเซียม และ แผนภูมิสมดุลเฟสระหว่างเงินและสังกะสี ใช้ศึกษาความเป็นไปได้ของการเกิดสารประกอบที่สามารถส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติของเงินสเตอร์ลิง หรือการสร้างสารละลายของแข็งที่ส่งผลดีต่อสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิง นอกจากนี้การสร้างสารประกอบของแข็งของเงินกับอะลูมิเนียม และ เงินกับแมกนีเซียม เพิ่มความต้านทานการหมองได้ดีต่อการเกิดสารประกอบซัลไฟด์และซัลเฟต ในสิทธิบัตร US 6,139,652⁽⁷⁾ Richard V. Carrano และคณะแสดงผลค่า DE ของเงินผสม Ag-7.5Cu, Ag-0.43Al และ Ag-0.45Zn มีค่า 38.6, 13.2 และ 12.4 ตามลำดับ ขณะที่เงิน 99.98% มีค่า DE 13.4 อย่างไรก็ตามยังมีการรายงานพบอะลูมิเนียมและแมกนีเซียมในเม็ดเงินบริสุทธิ์ในระดับน้อยมากในลักษณะธาตุแทรกซึ่งทำให้เม็ดเงินมีความเงางามเป็นพิเศษ แต่เนื่องจาก อะลูมิเนียมเป็นธาตุที่สามารถเกิดสารประกอบออกไซด์ ทำให้เพิ่มความหนืดของน้ำโลหะก่อปัญหาการหล่อไม่เต็มแบบ โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาและผลิตอัลลอยที่เหมาะสมที่ผสมอะลูมิเนียม และ สังกะสีเป็นหลัก โดยมุ่งเน้นการลดปริมาณทองแดงลง แต่ยังสามารถให้ผลการทำงานในกระบวนการหล่อได้ดี ตัวอย่างแผนภูมิสมดุลระหว่าง 2 ธาตุที่น่าสนใจงานวิจัยนี้เป็นไปดังรูป 2.2 - 2.4 ดังต่อไปนี้

Ag-Cu



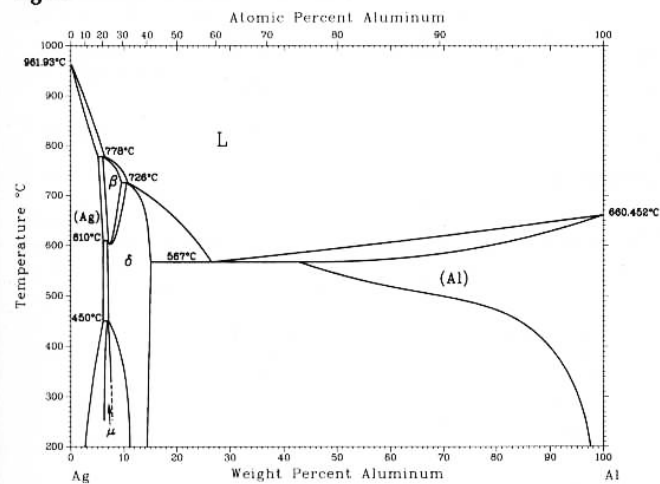
รูปที่ 2.2 แผนภูมิสมมูลเฟสของโลหะผสมเงิน - ทองแดง⁽¹²⁾

Ag-Zn



รูปที่ 2.3 แผนภูมิสมมูลเฟสของโลหะผสมเงิน - สังกะสี⁽¹²⁾

Ag-Al



รูปที่ 2.4 แผนภูมิสมมูลเฟสของโลหะผสมเงิน - อะลูมิเนียม⁽¹²⁾

จากการศึกษาในสิทธิบัตรหลายฉบับยืนยันการเติมสังกะสี และ อะลูมิเนียม ทำให้ค่า DE (Color different) ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับเงินผสมทองแดง 7.5% US 5,021,214⁽³⁾ Hiroshi Sasaki และ Makato Nishiya ยืนยันการเติม อะลูมิเนียม และ อินเดียม เพิ่มความต้านทานการหมองได้ดีทั้งในบรรยากาศของ Na₂S และ NaCl รวมถึงจากการศึกษาของ

ผศ.ดร. สิริพร โรจนนันต์และคณะ⁽¹⁸⁾ ที่แสดงผลการเติมอะลูมิเนียมในเงินสเตอร์ลิง 930 สามารถเพิ่มความต้านทานการหมองและความแข็งแรงได้

จากข้อมูลข้างต้นยืนยันผลการเติมสังกะสี อะลูมิเนียม ต่อการเพิ่มความต้านทานการหมอง อีกทั้งสารประกอบออกไซด์ของธาตุดังกล่าวมีสีขาว และมีเสถียรภาพสูง โดยในบางธาตุสามารถพบว่ามีเกิดการสร้างฟิล์มออกไซด์ได้ดีดังตัวอย่างในรูปที่ 2.5 แสดงการเกิดสารประกอบออกไซด์ของอินเดียมในเงินที่อุณหภูมิสูงจากการสัมผัสของออกซิเจนในช่วงการอบดงภาพต่อไปนี้

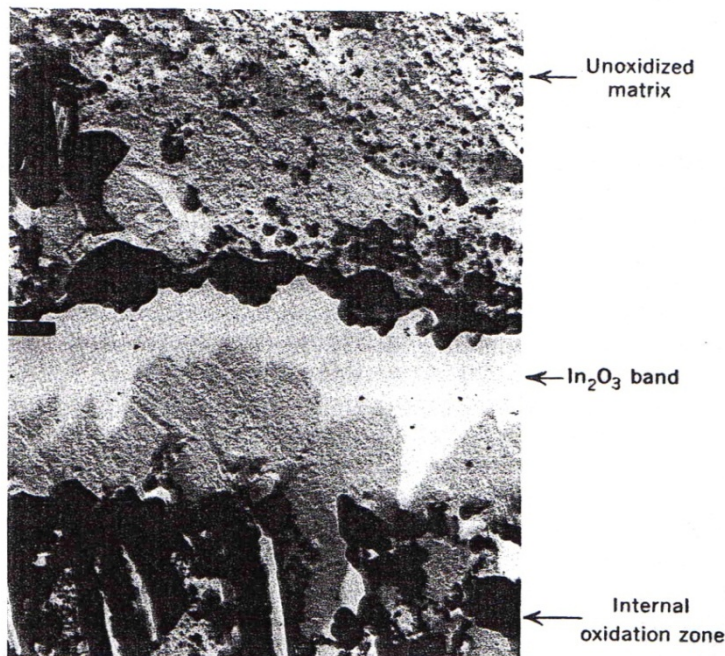


Fig. 8.18 Electron micrograph of formation of passivating In_2O_3 band in an Ag-In alloy with 7.7% In. 21,700 \times . After Rapp et al.⁶³

รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงการสร้าง Passive In_2O_3 band ใน Ag-In alloy ที่มี In 7 % ที่ กำลังขยาย 21700 \times ⁽¹³⁾

โดยสรุปการเพิ่มความต้านทานการหมองสำหรับเงินสเตอร์ลิงทำได้ ดังนี้

- 1) เคลือบฟิล์มสารประกอบออกไซด์ที่ผิวเงินสเตอร์ลิงด้วยโลหะที่ทนการหมองได้ดี โดยชั้นฟิล์มๆจะมีสีขาวใส มีความหนาแน่นสูงและ ยึดติดกับชิ้นงานเงินได้ดี ทำให้ ออกซิเจน สารประกอบซัลเฟอร์ เข้าทำปฏิกิริยากับ ทองแดงและ เงินได้ยาก
- 2) หุ้มห่อผิวชิ้นงานเงินฯ หรือควบคุมบรรยากาศไม่ให้มีซัลเฟอร์
- 3) เคลือบผิวด้วยสารประกอบอินทรีย์ที่มีลักษณะโปร่งแสง หรือ ซุปเคลือบด้วยโรเดียม ทำให้ ออกซิเจน สารประกอบซัลเฟอร์ เข้าทำปฏิกิริยากับ ทองแดงและ เงินได้ยาก

นอกจากนี้ ในการศึกษาข้อมูลของคณะวิจัยโครงการ “โครงการผลิตอัลลอยผสมอินเดียมและซิลิคอนเพื่ออุตสาหกรรมเครื่องประดับเงิน” โดย ผศ.ดร. เอกสิทธิ์ นิสาร์ตันพร และ คุณศิริรัตน์⁽¹⁴⁾ นิสาร์ตันพร พบผลลักษณะทางกายภาพที่สังเกตแนวโน้มความต้านทานการหมองจากผิวหลังการหล่อ กล่าวคือ เงินสเตอร์ลิงที่มีความต้านทานการหมองสูงซึ่งมักผสมด้วย ทองแดง สังกะสี ดีบุก และ ซิลิคอน จะมีผิวหลังการหล่อและล้างปูนที่ขาวสะอาดกว่าอัลลอยที่เติมทองแดงเพียงชนิดเดียวดังรูปที่ 2.6 อีกทั้ง จากข้อมูล US, Pat. No. 2006/0045792 A1⁽¹⁵⁾ พบว่าเงินที่มีธาตุผสมต้านทานการหมองมากกว่า 1 ธาตุ มีค่า DE และ อัตราการหมองที่ต่ำกว่า เงินสเตอร์ลิงที่ผสมทองแดง และ ทองแดงร่วมกับซิลิคอน ดังตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบ ฝักหลังการหล่อและล้างปูนระหว่างเงินสเตอร์ลิงผสม ทองแดงและซิลิคอน กับ เงินสเตอร์ลิงผสม ทองแดง สังกะสี ซิลิคอน ⁽¹⁴⁾

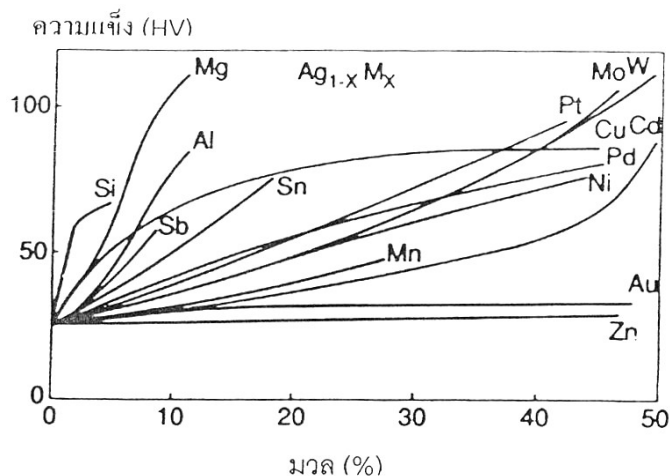
ตารางที่ 2.2 แสดงผลค่า DE ที่แตกต่างของเงินที่มีส่วนผสมอัลลอยมากกว่า 1 ชนิดจากกระบวนการหล่อ ⁽¹⁵⁾

Table 1													
Alloy No.	Composition									Properties			
	%Ag	%Cu	%Zn	%Sn	%Li	%Si	%Ge	%B	Total	VHNwq ¹	Tarnish Rate	DE**	VHNht***
1	92.70	7.30	0	0	0	0	0	0	100.00	75	5.0	30-40	100
2	92.70	7.23	0	0	0	0.07	0	0	100.00	75	5.0	30-40	75
3	92.50	5.47	1.79	0	0	0	0.24	0	100.00	75	5.0	30-40	120
4	92.50	4.66	2.23	0.51	0	0.10	0	0	100.00	65	3.5	20-24	115
5	92.50	2.96	4.40	0	0	0.14	0	0	100.00	59	4.0	25-29	75
6	92.50	2.00	5.36	0	0	0.14	0	0	100.00	55	3.5	20-24	80
7	92.50	1.43	5.94	0	0	0.14	0	0	100.00	55	3.0	14-19	75
8	92.70	6.40	0	0.85	0.05	0	0	0	100.00	70	4.0	25-29	130
9	93.40	6.20	0	0.32	0.08	0	0	0	100.00	56	4.0	25-29	120
10	93.35	5.70	0	0.85	0.10	0	0	0	100.00	55	4.0	25-29	130
11	93.25	5.70	0	0.85	0.20	0	0	0	100.00	56	4.0	25-29	138
12	93.15	5.70	0	0.85	0.30	0	0	0	100.00	58	4.0	25-29	140
13	92.70	5.40	1.00	0.85	0.05	0	0	0	100.00	71	4.0	25-29	155
14	92.60	5.25	0.65	0.85	0.05	0.10	0.50	0	100.00	70	3.0	14-19	135
15	92.60	5.25	0.70	0.85	0.05	0.05	0.50	0	100.00	70	3.0	14-19	140
16	92.70	5.00	0.20	0.85	0.05	0	1.20	0	100.00	60	4.0	25-29	125
17	92.70	5.00	0.70	0.85	0.05	0.20	0.50	0	100.00	60	3.0	14-19	125
18	92.70	5.00	0.90	0.85	0.05	0.50	0	0	100.00	66	3.5	20-24	130

2.1.3 วัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิง

การเพิ่มความแข็งแรงและสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิงที่ผลิตจากการหล่อ ทำให้ 3 วิธี ดังนี้

1. การสร้างสารละลายของแข็งเพื่อให้เกิดกลไกการแทนที่ และ แทรกที่ภายในโครงสร้างการเรียงของอะตอม ส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เช่น กรณี เงินผสมทองแดง และ เงินผสมอัลลอยทางการค้าทั่วไป แนวโน้มการเติมธาตุผสมเกือบทุกชนิดสนับสนุนการเพิ่มความแข็งแรง ซึ่งเป็นไปตาม Hume Rothery Rule ซึ่งอธิบายถึงความสัมพันธ์ของขนาดอะตอม ลักษณะโครงสร้างผลึกและ พลังงานพันธะในการสร้างสารละลายของแข็งต่างๆ รวมถึงตั้งตัวอย่างการศึกษาการเติมธาตุต่อความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นของเงิน ดังรูปที่ 2.7 แต่เนื่องจากภาพที่ได้เป็นผลจากการคำนวณจึงมีความจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อความเหมาะสมในการผลิตด้วยการหล่อสุญญากาศ ร่วมกับการใช้ธาตุร่วมตัวอื่นด้วย



รูปที่ 2.7 แสดงปริมาณธาตุผสมชนิดต่างๆ ที่มีต่อค่าความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ในโลหะผสมเงิน⁽¹⁶⁾

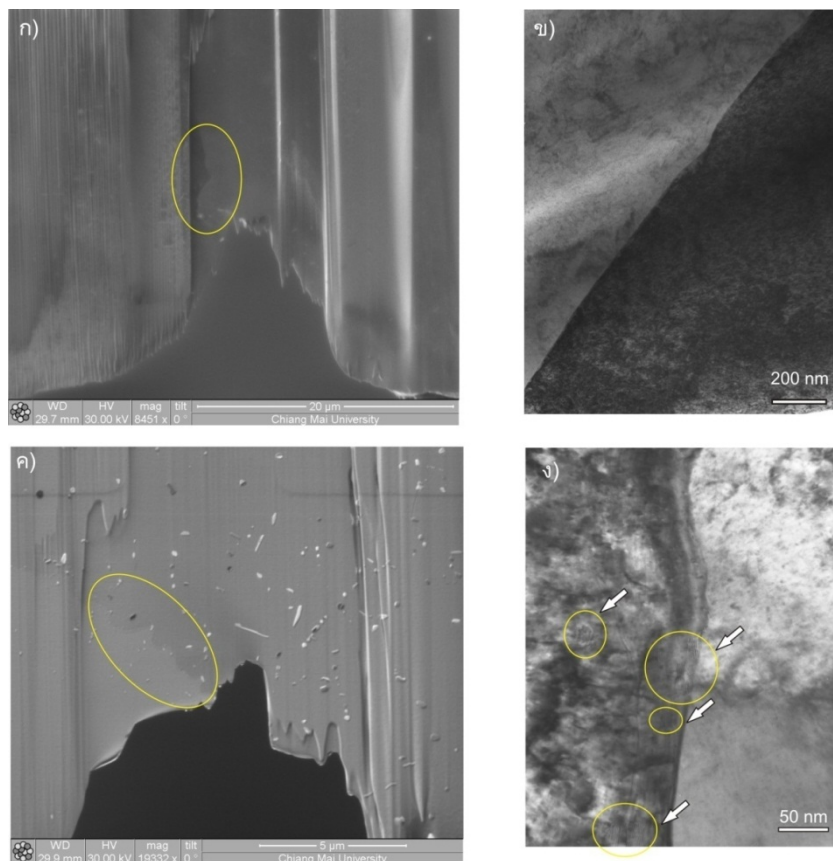
2. การเกิดกลไกการตกตะกอน (Precipitation hardening) ใช้การตกตะกอนแยกตัวของ Cu-rich phase ออกจาก Ag - rich phase เนื่องจากความสามารถในการละลายของทองแดงจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลงซึ่งเป็นอิทธิพลของเส้น Solvus

line และหากทำการชุบแข็งอย่างรวดเร็วขณะโลหะกำลังแข็งตัว จะสามารถยับยั้งการตกตะกอนของทองแดงได้ และเมื่อทำการอบกระตุ้นที่อุณหภูมิต่ำ Cu – rich phase ที่ได้จะมีขนาดเล็กมากกระจายตัวในเนื้อพื้นทำให้มีความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น กลไกการเพิ่มความแข็งแรงแบบนี้นิยมใช้ในการผลิตเงินสปริงสำหรับข้อต่อและชิ้นส่วนของเครื่องประดับ

3. การปรับเนื้อละเอียด (Grain refinement) ใช้การเติมธาตุบางชนิดที่ทำให้เกิดนิวเคลียสเทียม เพื่อสร้างเกรนจำนวนมากโดยแนวโน้มของธาตุที่สามารถปรับเนื้อละเอียดมักพบ congruent melting phase ทำหน้าที่นิวเคลียสเทียมเกิดขึ้นในเงินผสมในช่วงสถานะของเหลว หรือการเติมธาตุบางชนิดเพื่อสร้างอนุภาคป้องกันการขยายตัวของเกรนทำให้เกรนมีขนาดเล็กดังที่พบในการเติมธาตุโบรอนในสารประกอบเงินผสมทองแดงและ ซิลิคอนดังรูปที่ 8

การปรับเนื้อละเอียดส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็กลงสำหรับในเงินเกรด 950 พบขนาดเกรนเล็กลงจากขนาดเกรนลดลงจาก 1.1 mm เป็น 0.62 – 0.77 สำหรับกรณีการเติมธาตุกลุ่มโบรอนในเงินผสมทองแดง และ ซิลิคอน⁽¹⁾ ทำให้เพิ่มความแข็งแรงถึงสูงสุดจาก 172.4 MPa เป็น 199 – 210 MPa และป้องกันการฉีกขาดขณะร้อนในตัวเรือนหลังการหล่อ และสามารถลดขนาดและจำนวนทางน้ำ เพื่อเพิ่มจำนวนชิ้นงานต่อต้น และป้องกันตามดแบบผุเป็นแพ และ ตามดเนื่องจากการหดตัวของน้ำโลหะ

อย่างไรก็ตามในการผลิตอัลลอยสำหรับหล่อเครื่องประดับเงิน ต้องการคุณสมบัติที่แตกต่างจากการใช้งานเงินด้านอื่น คือ 1. ต้องการความต้านทานการหมองสูงเพื่อให้เครื่องประดับสวยงามได้นาน 2. ความแข็งที่เหมาะสมเพื่อกักขัดแต่งที่รวดเร็วใช้เวลาขัดละเอียดสั้น รวมถึงการมีเกรนที่เล็กละเอียดเพื่อเพิ่มการเติมเต็มของน้ำโลหะแม้ว่าจะใช้ทางน้ำที่มีขนาดเล็กก็ตาม 3. ความแข็งแรงที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มอายุการใช้เครื่องประดับ และ 4. สีผิวและประกายสะท้อนแสงที่สวยงามตามความต้องการของผู้ใช้งาน ปัจจุบันยังคงพบปัญหาในส่วนข้อ 1 3 และ 4 ซึ่งการเลือกธาตุเสริมที่เหมาะสมจะแก้ไขหรือกำจัดปัญหาดังกล่าวได้ดีแต่ต้องการการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมอีกระดับหนึ่ง



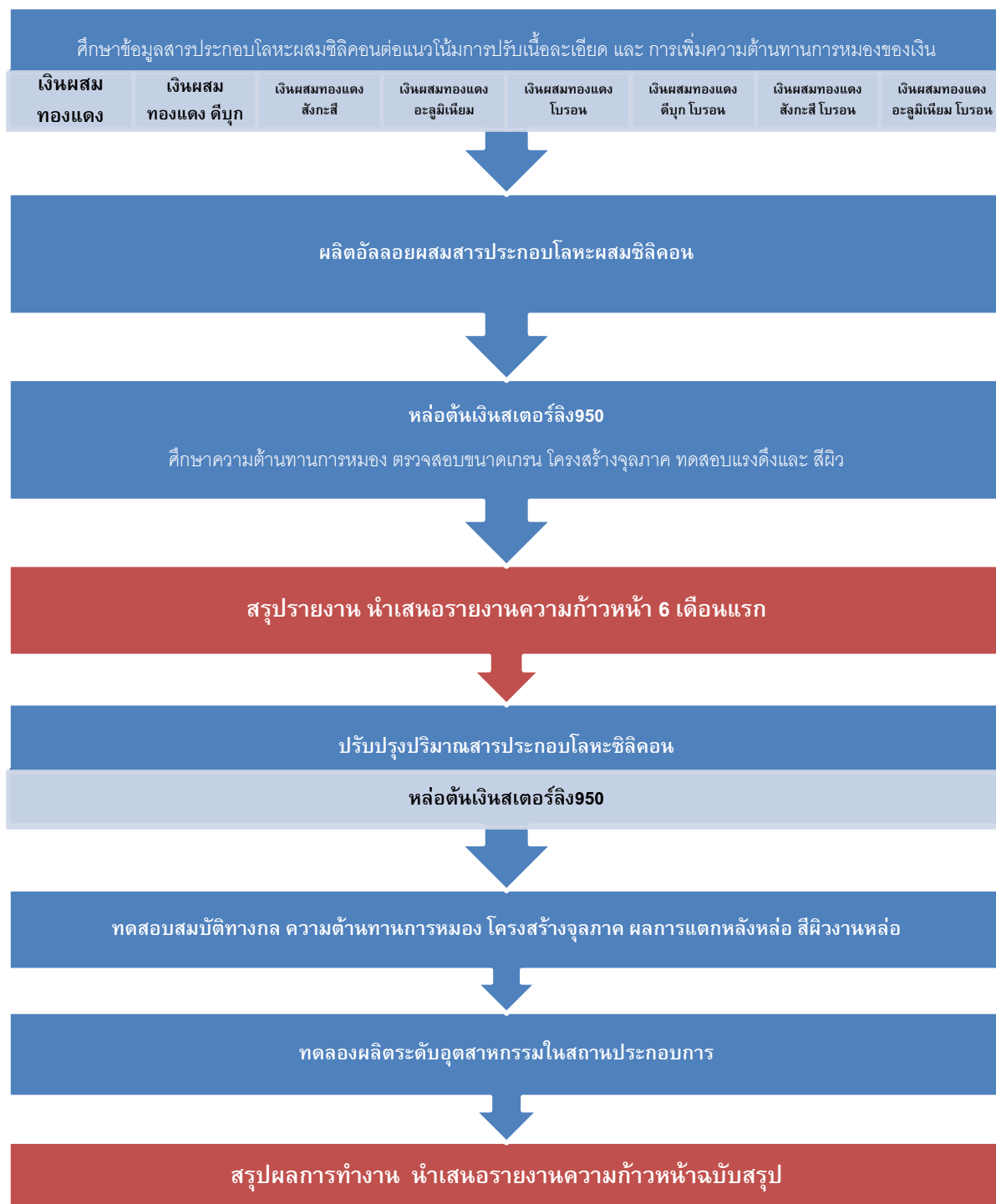
รูปที่ 2.8 โครงสร้างจุลภาคแสดงกลไกการปรับเนื้อละเอียดของโบรอนที่เกิดขึ้นใน เงินผสมทองแดง และ ซิลิคอน เกรด 950 ที่ของเกรน⁽¹⁾ :

- ก) ชิ้นงาน Ag-Cu(NO, B, Sr) ถ่ายภาพด้วย Focus Ion Beam(FIB)ที่รอยต่อเกรน
- ข) ชิ้นงาน Ag-Cu(NO, B, Sr) ถ่ายภาพด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน(Transmission electron Microscope TEM)ที่รอยต่อเกรน
- ค) ชิ้นงาน Ag-Cu-Si 10.7B(75B) ถ่ายภาพด้วย Focus Ion Beam(FIB)ที่รอยต่อเกรน
- ง) ชิ้นงาน Ag-Cu-Si 10.7B(75B) ถ่ายภาพด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน(Transmission electron Microscope TEM)ที่รอยต่อเกรน

บทที่ 3 กระบวนการดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยโครงการนี้ คณะผู้วิจัยมีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

- 3.1. ศึกษาข้อมูลสารประกอบโลหะผสมซิลิคอน เช่น สารประกอบแคลเซียม-ซิลิคอน ต่อแนวโน้มการปรับเนื้อละเอียด และการเพิ่มความต้านทานการหมองของเงิน ตั้งสมมุติฐานหลักดังนี้
 - a. เลือกเงินผสมอัลลอยเกรด 950 4 กลุ่มเพื่อการศึกษา ได้แก่
 - i. เงินผสมทองแดง (เต็ม หรือไม่เต็มโบรอน)
 - ii. เงินผสมทองแดง ดีบุก(เต็ม หรือไม่เต็มโบรอน)
 - iii. เงินผสมทองแดง สังกะสี(เต็ม หรือไม่เต็มโบรอน)
 - iv. เงินผสมทองแดง อะลูมิเนียม(เต็ม หรือไม่เต็มโบรอน)
- 3.2. หล่อเม็ดอัลลอยผสมสารประกอบโลหะผสมซิลิคอน
- 3.3. ทดลองหล่อต้นเงินสเตอร์ลิง 950 ที่มีส่วนผสมอัลลอย 5 % โดยน้ำหนัก
- 3.4. ปรับปรุงปริมาณสารประกอบโลหะผสมซิลิคอนเพื่อความเหมาะสมในการหล่อด้วยระบบสูญญากาศ
- 3.5. สรุปรายงาน และนำเสนอรายงานช่วง 6 เดือนแรก
- 3.6. ทดสอบความต้านทานการหมอง ตรวจสอบขนาดเกรน โครงสร้างจุลภาค ทดสอบแรงดึงและ สีผิวของชิ้นงาน เก็บข้อมูลจุดเสียที่มักพบเพื่อการปรับปรุงในอนาคต
- 3.7. สรุปรายงาน และนำเสนอรายงานช่วง 6 เดือนที่สอง
- 3.8. ปรับปรุงปริมาณสารประกอบโลหะผสมซิลิคอนให้เหมาะสมกับชนิดเงินอัลลอยร่วมกับการศึกษาความต้านทานการหมอง ตรวจสอบขนาดเกรน โครงสร้างจุลภาค และ สีผิวของชิ้นงาน
- 3.9. ทดลองผลิตเชิงอุตสาหกรรมในสถานประกอบการและติดตามผลการทำงาน ร่วมกับการศึกษาสีผิวของชิ้นงานและการแตกหลังหล่อของชิ้นงาน
- 3.10. สรุปรายงานการทำงานและ นำเสนอรายงานทั้งหมด โดยมีแผนผังแสดงรายละเอียดการทำงาน ดังรูป 3.1 ต่อไป



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน

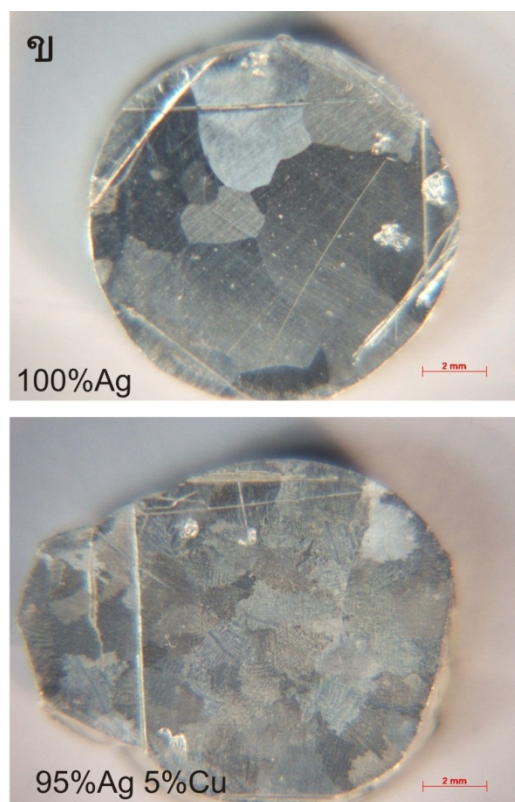
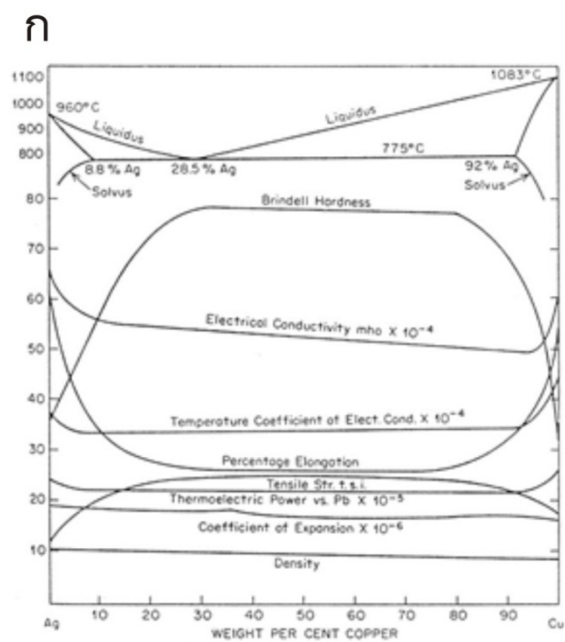
ผลการดำเนินงานผลการศึกษาในช่วง 6 เดือนแรก

จากการศึกษาผลของธาตุผสมตามแผนการทดลอง อันได้แก่ ทองแดง ดีบุก สังกะสี อะลูมิเนียม และโบรอน เพื่อปรับปรุงขนาดเกรนและความต้านทานการหมอง พบว่าได้มีการศึกษาโดยสังเขปธาตุผสมในเงินผสมทองแดงดังข้อมูลต่อไปนี้

4.1 ผลของทองแดงต่อเงิน

ทองแดงเป็นธาตุหลักที่มักใช้ผสมในเงิน โดยเติมในช่วง 4-6.5%โดยน้ำหนัก ช่วยเพิ่มความขาว มันวาว แต่กลับทำให้เงินหมองหรือลดความต้านทานการหมอง และความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากเกิดสารประกอบออกไซด์และซัลไฟด์ได้ง่ายขึ้น จากรูป 4.1 แผนภูมิสมดุลของเงินผสมทองแดงพบว่าทองแดงสามารถละลายในเงินให้สารละลายของแข็งเฟสแอลฟา (α phase) ได้สูงสุด 8.8%โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 779.1 °C และที่อุณหภูมินี้จะเกิดปฏิกิริยายูเทคติกซึ่งจะมีส่วนผสมของทองแดง 28.1%โดยน้ำหนัก ความสามารถในการละลายของทองแดงในสารละลายของแข็งเฟสอัลฟาจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ส่วนเงินจะสามารถละลายในทองแดงให้สารละลายของแข็งเบตา (β phase) ได้สูงสุด 8%โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิห้อง โลหะผสมเงินและทองแดงจะประกอบไปด้วยเฟส 2 เฟส คือ เฟสอัลฟาและเฟสเบตา โลหะเงินสเตอร์ลิงที่ถูกหล่อขึ้นภายใต้สภาวะสมดุล เมื่อปล่อยให้เกิดการแข็งตัวของเฟสที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยสารละลายของแข็ง (Primary Solid Solution) ที่เป็นเนื้อเดียวกัน แต่โดยปกติการแข็งตัวของงานหล่อจะไม่อยู่ในสภาวะสมดุล นั่นคือโครงสร้างภายหลังที่ได้จะประกอบด้วยสารละลายของแข็ง Primary Silver-rich (α phase) ซึ่งเริ่มเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 896 °C ในลักษณะการแข็งตัวแบบกิ่งไม้ (Dendritic Solidification) ส่วนของเหลวที่เหลืออยู่ขณะเกิดการแข็งตัวจะมีส่วนผสมของทองแดงสูงกว่าของเหลวเริ่มต้น ต่อมาจะเกิดโครงสร้างยูเทคติกที่ประกอบด้วยเฟสอัลฟาผสมกับ เฟสเบตา ที่แทรกอยู่ระหว่างกิ่งต่างๆของเดนไดรท์ที่อุณหภูมิ 796 °C ดังนั้นเฟสที่เกิดขึ้นทั้งหมดของโลหะเงินสเตอร์ลิงหล่อที่อุณหภูมิห้องจะประกอบไปด้วยสารละลายของแข็ง Primary Silver-rich และโครงสร้างยูเทคติกของโลหะเงินและทองแดง นอกจากนี้ขนาดเกรนของโครงสร้างเงินทั้งเงินบริสุทธิ์และเงินผสมทองแดงหลังหล่อจะมีขนาดใหญ่ โดยเฉพาะเงินบริสุทธิ์ เนื่องจากการเกิดไฮโดรเจนที่ขึ้นกับข้อข้างยากในเงินบริสุทธิ์ ส่งผลให้เกิดนิวเคลียสที่มีจำนวนน้อยและสามารถโตได้ในทุกทิศทาง

ทองแดงพบการใช้งานทั้งในเงินสำหรับการรีดและการหล่อ และเป็นโลหะเบื้องต้นสำหรับการผลิตเครื่องประดับเงิน เนื่องจากมีความเงางาม (ภายหลังการผลิตได้ไม่เกิน 15 วัน จะหมองลงเนื่องจากบรรยากาศปกติโดยเฉพาะที่มีซัลเฟอร์เจือปน ดังตัวอย่างในรูปการทดสอบที่ 4.2) อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณทองแดงจะส่งผลเพิ่มสมบัติทางกลดังรูป 4.1 เนื่องจากทองแดงสามารถเพิ่มความแข็งแรงแบบสารละลายของแข็งและยังเกิดโครงสร้างยูเทคติกในเนื้อโลหะ รวมถึงการเติมทองแดงทำให้ขนาดเกรนลดลงจากเดิมเงินบริสุทธิ์มีขนาดเกรนใหญ่มากในช่วงตั้งแต่ 2- 6 มม. เป็นเงินผสมทองแดงที่มีขนาดเกรนไม่เกิน 2 มม. ซึ่งมีผลทำให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นจากกลไกขนาดเกรน (grain size strengthening)



รูปที่ 4.1 สมบัติทางกลของโลหะเงิน-ทองแดง⁽¹⁾

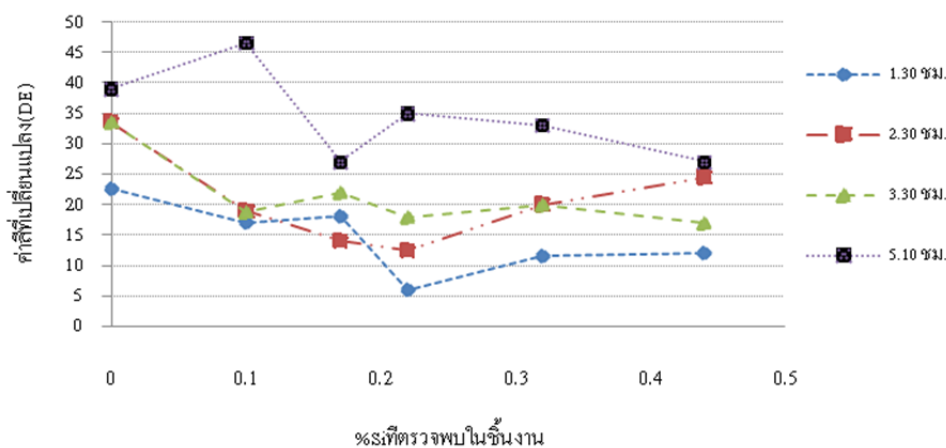
4.2 ผลของซิลิคอนต่อเงินสเตอร์ลิงผสมทองแดง

ซิลิคอนทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดเซอร์ ลดออกซิเจนโดยจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในช่วงการหลอมเหลว สิ่งนี้ส่งผลให้ช่วยลดโพรงอากาศ (Porosity) ประเภทรูพรุนจากก๊าซที่เกิดขึ้นในช่วงการหลอมโลหะหลอมเหลว นั่นคือลดปริมาณรูพรุนฟองก๊าซออกซิเจนนั่นเอง นอกจากนี้ธาตุซิลิคอนยังมีผลเพิ่มความสามารถในการต่อต้านการหมอง และเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะเงินสเตอร์ลิง จากการศึกษาของผศ.ดร.เอกสิทธิ์ และนางศิริรัตน์ นิสารัตนพร ในโครงการวิจัย “การปรับปรุงคุณภาพเงินสเตอร์ลิงโดยการเติมธาตุซิลิคอน”⁽¹⁸⁾ แสดงผลการเพิ่มซิลิคอนในช่วง 0 - 0.5% ทำให้ความต้านทานการหมองเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนดังภาพแสดงความแตกต่างของผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการหมองด้วย Na_2S ในช่วงเวลา 1.30 - 5.10 ชม. ดังรูปที่ 4.2 โดยค่าวัดสีที่เปลี่ยนแปลง(DE) แสดงดังรูปที่ 4.3 จากภาพในการทดสอบกันหมองที่ 5.10 ชม. เมื่อปริมาณซิลิคอนเพิ่มขึ้นถึง 0.45% ค่า DE จะลดลง จาก 45 ไปอยู่ที่ประมาณ 27 โดยเงินที่ผ่านการทดสอบมีสีผิวคล้ายคลึงกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบกันหมองดังรูปที่ 4.2 อย่างไรก็ตามการเติมซิลิคอนมากขึ้นจะส่งผลให้โครงสร้างของเฟสที่สองเปลี่ยนแปลงไป เกิดการต่อเนื่องของเฟสในลักษณะโครงตาข่ายคล้าย Cementite network ดังรูปที่ 4.4 ลักษณะดังกล่าวทำให้เนื้อเงินเปราะ และเกิดการฉีกขาดขณะร้อนได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อเสียอย่างมากของการเติมธาตุผสมชนิดนี้ สำหรับงานหล่อ



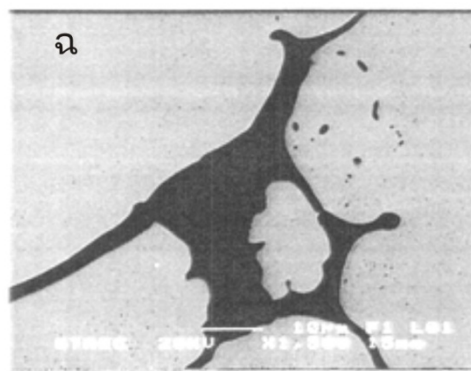
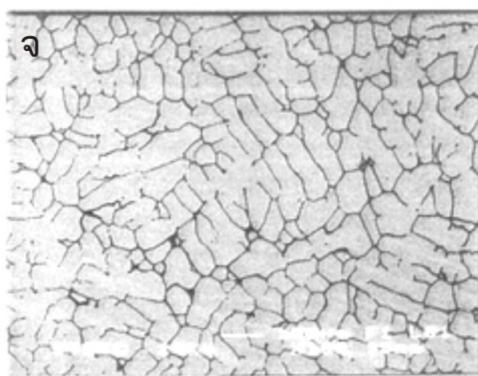
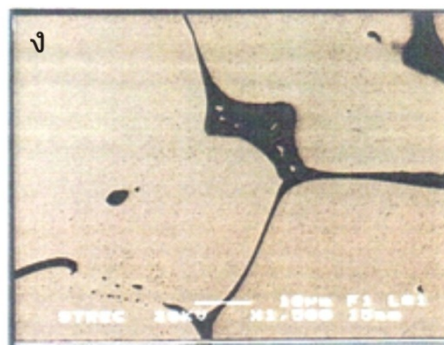
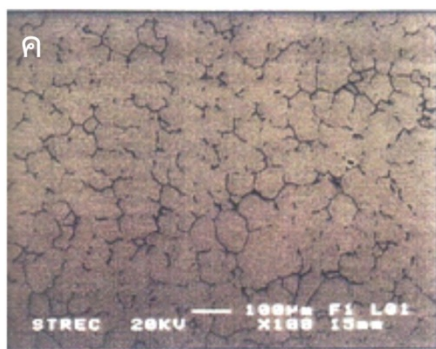
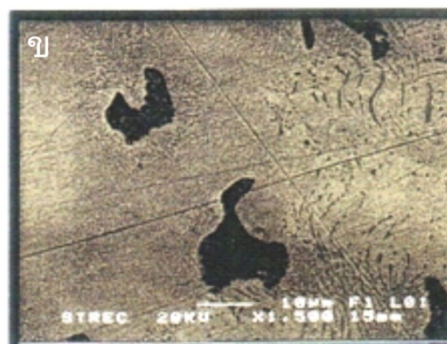
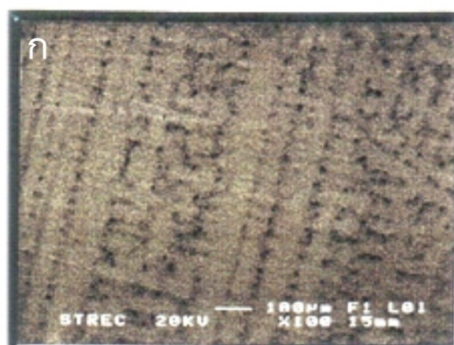
รูปที่ 4.2 ผิวชิ้นงานเงิน 95% ผสมซิลิคอน 0.1 - 0.5% และ ทองแดง 4.5 - 4.9 % ผ่านการทดสอบกันหมองในบรรยากาศ H_2S ที่เวลา 1.30 - 1.50 ชม.⁽¹⁸⁾

ค่าสีที่เปลี่ยนแปลง (DE) ในชิ้นงาน AG 95.0%



รูปที่ 4.3 กราฟการเปลี่ยนแปลงค่าสี (dE*) ที่เวลาและปริมาณซิลิคอนต่างกันบนผิวเงิน 95.0%⁽¹⁸⁾

การศึกษาผลของแคลเซียมและซิลิคอนต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของโลหะเงินผสมทองแดงเกรด 925 โดยคุณ วสัน คุรัตน์เวช⁽¹⁹⁾ สามารถแบ่งโลหะผสมออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกเป็นโลหะเงินผสมทองแดงที่ใส่แคลเซียมอย่างเดียวและกลุ่มที่สองเติมซิลิคอนอย่างเดียว โครงสร้างจุลภาคของเงินผสมทองแดงประกอบด้วยเนื้อพื้นที่เป็นสารละลายของแข็งที่มีปริมาณเงินมากและโครงสร้างยูเทคติกที่เป็นทั้งเฟสอัลฟาและเบตา เมื่อเติมแคลเซียมลงไปพบว่าปรากฏอยู่ในเนื้อพื้นเฟสอัลฟามากกว่าในโครงสร้างยูเทคติก ขณะที่พบซิลิคอนมากในเฟสเบตาที่มีปริมาณทองแดงมากเนื่องจากความสามารถในการละลายของซิลิคอนในทองแดงมากกว่าในเงิน เมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมหรือซิลิคอนลงในโลหะเงินสเตอร์ลิงพบว่าปริมาณยูเทคติกลดลง ดังรูปที่ 4.5 และส่งผลให้คุณสมบัติด้านความต้านทานแรงดึง ความแข็งแรง ผน จุดคราก และความแข็งของโลหะผสมลดลงด้วย ดังนั้นปริมาณแคลเซียมที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 0.06% และปริมาณซิลิคอนไม่เกิน 0.08% เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดเฟสเบตา (β) และเฟส Ag-Cu-Ca ที่มีขนาดใหญ่และเป็นโครงร่างตาข่ายซึ่งจะส่งผลให้ความแข็งแรงและความแข็งลดลง⁽¹⁹⁾



รูปที่ 4.4 โครงสร้างเงินสเตอร์ลิง 95.0% ผสมซิลิคอน⁽¹⁸⁾

ก) ซิลิคอน 0 % ที่กำลังขยาย 100 เท่า

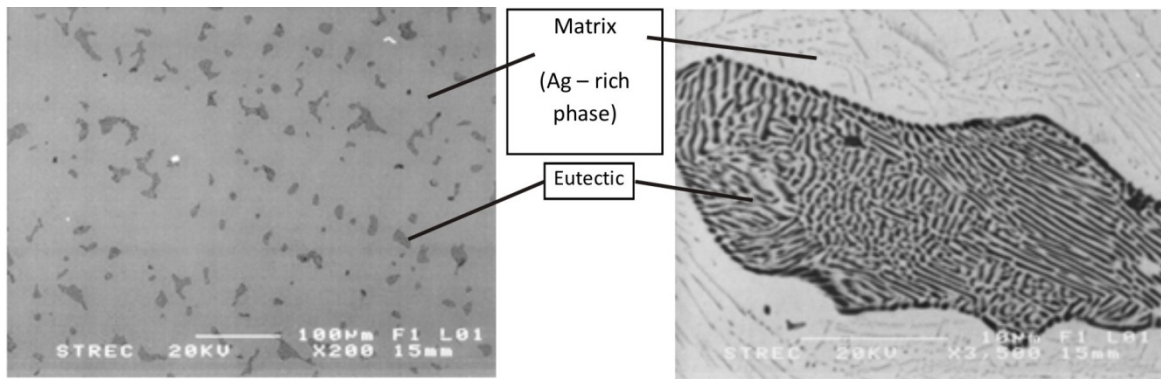
ข) ซิลิคอน 0 % ที่กำลังขยาย 1500 เท่า

ค) ซิลิคอน 0.17 % ที่กำลังขยาย 100 เท่า

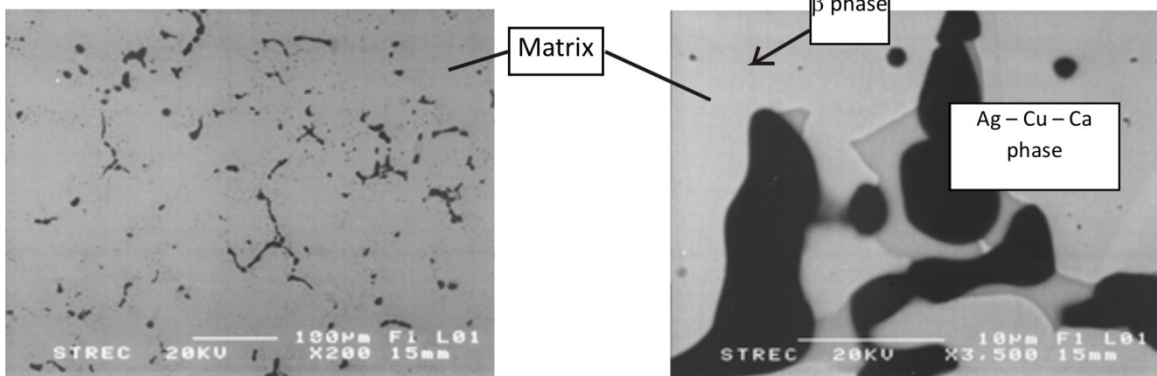
ง) ซิลิคอน 0.17 % ที่กำลังขยาย 1500 เท่า

จ) ซิลิคอน 0.44 % ที่กำลังขยาย 100 เท่า

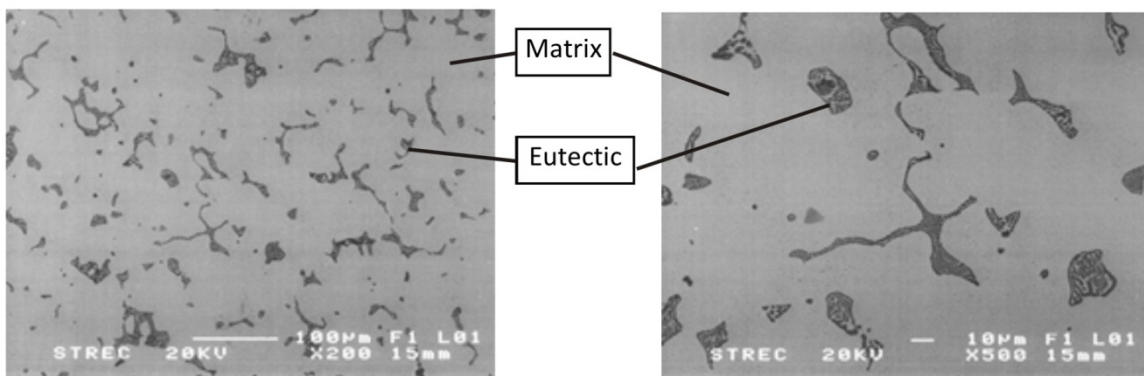
ฉ) ซิลิคอน 0.44 % ที่กำลังขยาย 1500 เท่า



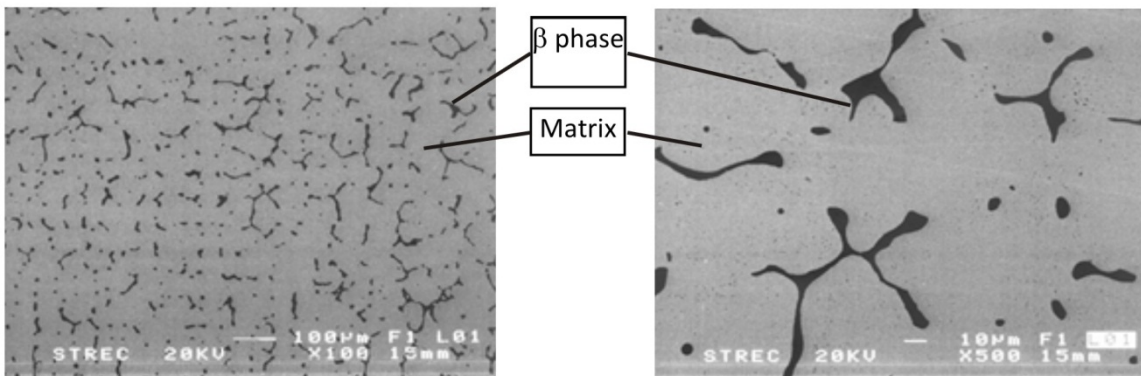
Sterling silver No.1: 7.46%Cu – balance of Ag



Sterling Silver No.4: 7.19%Cu – 0.063%Ca – balance of Ag



Sterling Silver No.8: 7.40%Cu – 0.08%Si – balance of Ag



Sterling Silver No.9: 7.36%Cu – 0.165%Si – balance of Ag

รูปที่ 4.5 แสดงตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของเงินผสมทองแดง ซิลิคอนและแคลเซียม⁽¹⁹⁾

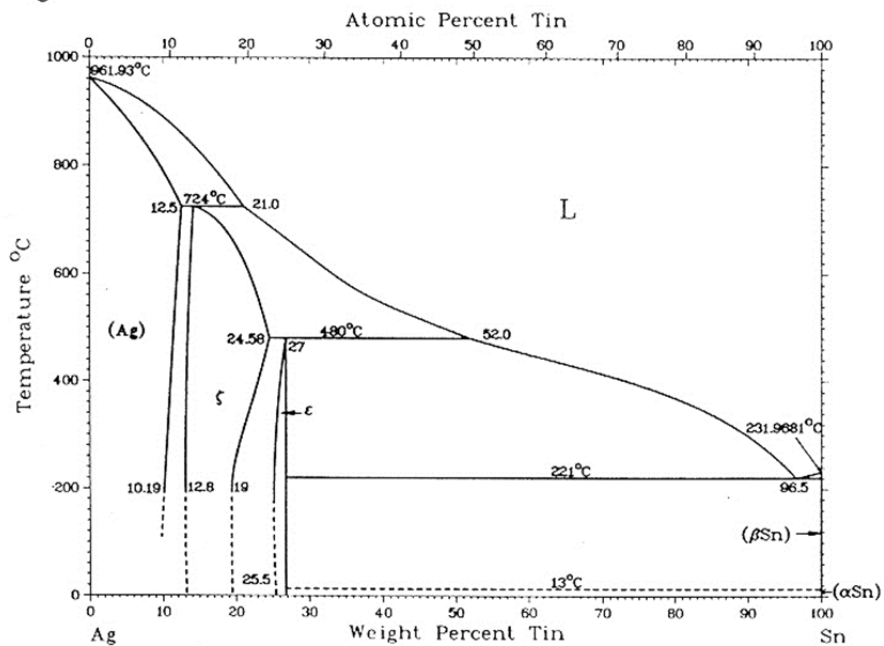
นอกจากนี้ Davitz Daniel⁽²⁰⁾ ยังได้ทำการวิจัยพบว่า เงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมโดยน้ำหนักของ 0.25-0.5 % Ni ,0-0.5% In ,0.1-0.25 % Si ,0.25-1% Cu ,0.1-0.25 % Metal Silicate และ 5.75-7.5 %Zn โดยทำการหลอมที่อุณหภูมิ 900-960°C ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความต้านทานการหมองและการกัดกร่อนได้ดี และมีความแข็งแรงไม่เปราะง่ายโดยนิกเกิลจะมีคุณสมบัติในการทำให้เกรนมีขนาดเล็กละเอียด และป้องกันการเปราะที่เกิดขึ้นหลังการหล่อเงินสเตอร์ลิง แต่นิกเกิลมีผลทำให้เกิดการแพ้ซึ่งในปัจจุบันประเทศในกลุ่มยุโรปมีระเบียบห้ามใช้นิกเกิลในเครื่องประดับ เนื่องจาก Davitz⁽²⁰⁾ ต้องการลดปริมาณของทองแดงเพื่อให้ผลิตภัณฑ์สามารถต้านทานการหมองดีขึ้น จึงได้ใช้สังกะสีและอินเดียมเติมลงไปแทนสัดส่วนเดิมของทองแดง และนำไปทดลองการหมองด้วย บรรยากาศของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พร้อมกับนำไปทดสอบความทนทานต่อการผุกร่อนด้วย บรรยากาศของคลอไรด์ ผลที่ได้คือผลิตภัณฑ์มีความสามารถในการต้านทานการหมองและการกัดกร่อนดีที่สุด พร้อมทั้งมีความแข็งแรงสูง โดยมีส่วนผสมของธาตุต่าง ๆ ประกอบด้วย 92.5% Ag 6.57% Zn 0.25% Cu 0.25% Ni 0.18% Metal Silicate 0.25% In ชิ้นงานมีค่าความแข็งอยู่ที่ 160 Brinell และเมื่อนำไปผ่านการอบด้วยความร้อนในเตาที่อุณหภูมิ 454°C แล้ว จุ่มเย็น (Quench) จะได้ค่าความสามารถในการยืดตัว (%Elongation) เท่ากับ 15% - 28%

4.3 ผลของดีบุกต่อเงินสเตอร์ลิงผสมทองแดง

จากการพิจารณา แผนภูมิสมดุลในรูปที่ 4.6 ดีบุกสามารถละลายในเงินในรูปแบบของสารละลายของแข็งได้ดีจนถึง 12.5% โดยน้ำหนัก ณ 724 องศาเซลเซียส และมีความสามารถในการละลาย ณ อุณหภูมิ ที่ประมาณ 10%โดยน้ำหนัก จึงมีความเป็นไปได้ในการละลายในเนื้อเงินเป็นหลัก อย่างไรก็ตามจากการพิจารณาแผนภูมิสมดุลแบบ 3 ส่วนประกอบดังรูปที่ 4.7 จะพบว่า การเติมดีบุกทำให้เกิดแนวโน้มการแยกตัวของดีบุกที่ผสมในเฟสที่มีทองแดงผสมสูงดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะพบเฟสที่มีทองแดงผสมสูงมีดีบุกผสมด้วยในปริมาณหนึ่ง อย่างไรก็ตามหากมีการเติมธาตุอื่นเพิ่มเติมการจะส่งผลต่อการเปลี่ยนส่วนผสมของเฟสดังกล่าวรวมถึงสามารถเกิดสารประกอบอื่นเกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามความเป็นไปได้ที่ดีบุกจะมีส่วนหนึ่งละลายในเนื้อเงินยังคงเป็นไปได้ตามรูปที่ 4.6

พบเฟสที่มีทองแดงผสมสูงมีดีบุกผสมด้วยในปริมาณหนึ่ง อย่างไรก็ตามหากมีการเติมธาตุอื่นเพิ่มเติมการจะส่งผลต่อการเปลี่ยนส่วนผสมของเฟสดังกล่าวรวมถึงสามารถเกิดสารประกอบอื่นเกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามความเป็นไปได้ที่ดีบุกจะมีส่วนหนึ่งละลายในเนื้อเงินยังคงเป็นไปได้ตามรูปที่ 4.6

Ag-Sn



รูปที่ 4.6 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน-ดีบุก⁽¹²⁾

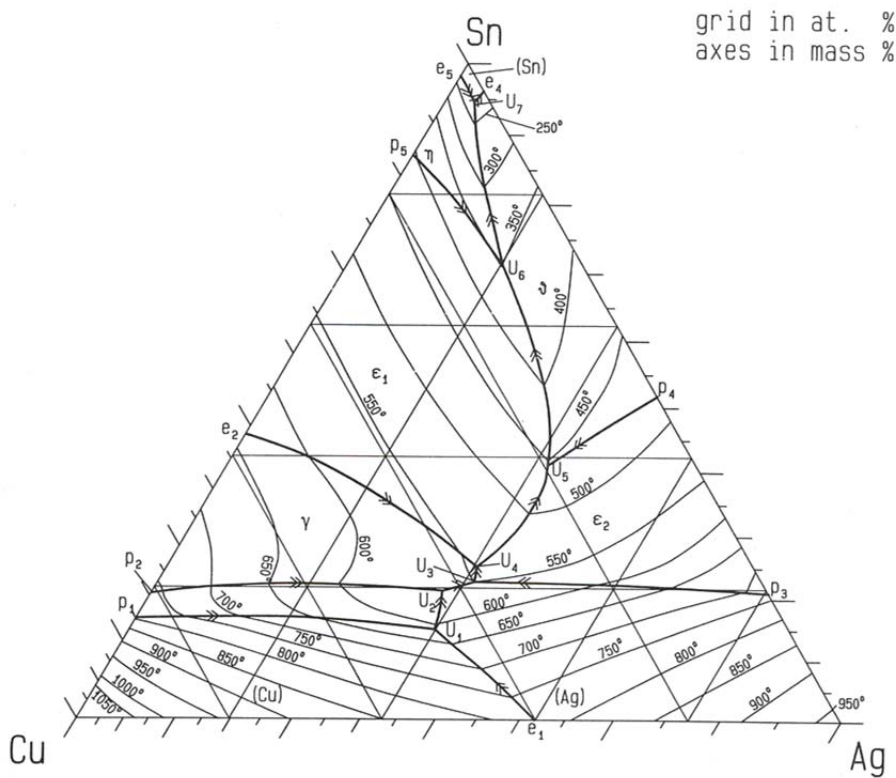


Figure 2: Liquidus surface [59Geb].

รูปที่ 4.7 แผนภูมิสมดุล Liquidus line ระบบเงิน-ทองแดง-ดีบุก⁽²¹⁾

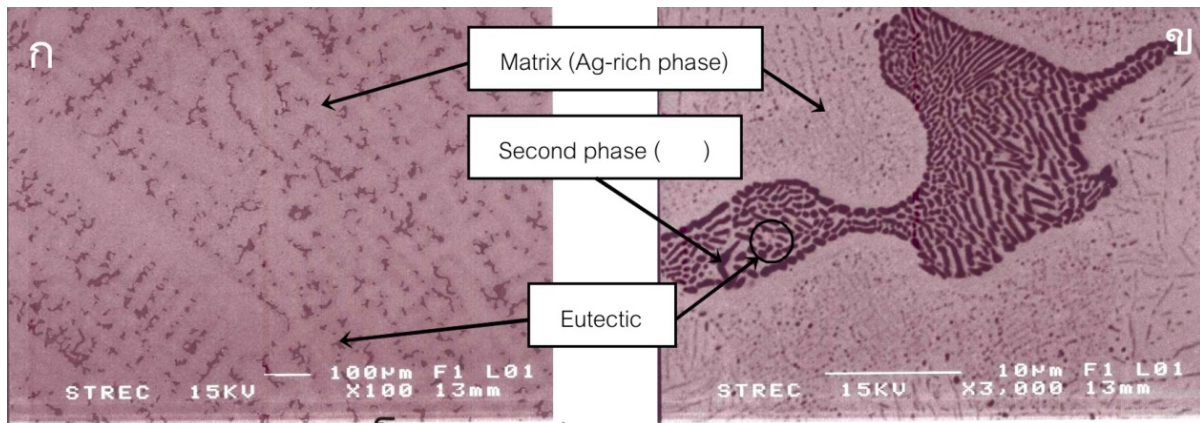
จากผลการศึกษาของ สวงนลักษณ์ โล่ห์วานิชย์เจริญ⁽²²⁾ ยืนยันผลดีบุกที่เติมเข้าไปจะพบใน Second phase ที่อยู่บนโครงสร้างยูเทคติกในปริมาณที่สูงกว่าในโครงสร้างเนื้อพื้น และลักษณะของ Second phase จะมีรูปร่างกลมและมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อปริมาณดีบุกเพิ่มขึ้นโดยการเติมดีบุกตั้งแต่ 0.31-0.63%โดยน้ำหนัก ในเงินสเตอร์ลิง 935 สามารถเพิ่มค่าความแข็ง ค่าความเค้นจุดครากและความต้านทานแรงดึงให้สูงขึ้นได้ทั้งในสภาพหล่อต้งผลตารางที่ 4.1 และพบการเพิ่มขนาดเกรนเมื่อเพิ่มปริมาณดีบุกในเนื้อเงิน และหากนำชิ้นงานเงินผสมดีบุกและทองแดงไปอบชุบความร้อนพบว่าผิวชิ้นงานของเงินสเตอร์ลิงที่เติมดีบุก หลังอบมีสีขาวกว่าเมื่อเทียบกับเงินสเตอร์ลิงที่ไม่มีดีบุกที่มีสีดำคล้ำเนื่องจากเกิดทองแดงออกไซด์ได้ง่ายกว่า

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิง 925 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก ในสภาพหล่อก่อนการกัดกรด ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิงทุกอัตราส่วนผสมภายหลังจากการหล่อที่กำลังขยาย 100 เท่า จะมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ (Dendrite) เมื่อพิจารณาภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยายสูงขึ้น จะปรากฏโครงสร้างหลัก 2 ชนิด คือ โครงสร้างพื้น (Matrix) ซึ่งจะมีเงินเป็นองค์ประกอบสูง เรียกว่า Ag-rich solid solution (α -phase) และโครงสร้างยูเทคติก (Eutectic structure) มีลักษณะเป็นแถบสีดำสลับกับแถบสีขาวกระจายอยู่ โดยแถบสีขาวจะมี Ag-rich solid solution (เฟสอัลฟา) ส่วนแถบสีดำจะมี Cu-rich solid solution (เฟสเบตา)

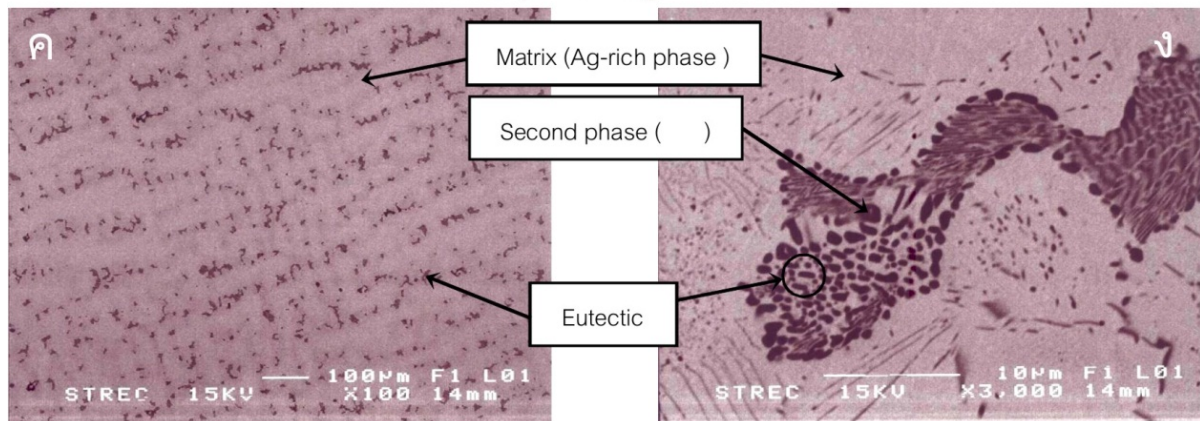
โลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมดีบุกมีส่วนผสมทางเคมี Ag-7.35%Cu รูปที่ 17(ก)และ(ข) และ โลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ได้เติมดีบุกมีส่วนผสมทางเคมี Ag-6.36%Cu รูปที่ 4.8 (ค)และ(ง) จะพบลักษณะโครงสร้างเป็นเดนไดรต์ บริเวณโครงสร้างเนื้อพื้น Ag-rich solid solution (α -phase) มีลักษณะเป็นเนื้อพื้นสีขาว พบว่ามีปริมาณธาตุเงินเป็นองค์ประกอบสูงมากที่กำลังขยาย 3000 เท่า จะพบโครงสร้างที่มีลักษณะแถบลายขาวดำ ซึ่งเป็นโครงสร้างยูเทคติกระหว่างเฟสอัลฟา และเฟสเบตา เนื่องจากโครงสร้างยูเทคติกมีขนาดเล็ก ดังนั้นจากการตรวจสอบด้วย EDX จึงครอบคลุมพื้นที่ยูเทคติกทำให้ไม่สามารถวัดค่าปริมาณทองแดงในเฟสเบตา ได้ ค่าที่วัดได้ในตาราง 4.2 จึงแสดงถึงส่วนผสมโดยรวมของเฟสทั้งสองนี้ ซึ่งค่าที่ได้พบว่ามีค่าใกล้เคียงจุดยูเทคติกของแผนภูมิสมมูลของเงิน-ทองแดง (28.1%ทองแดง) ยกเว้นกรณีของเงินผสมดีบุก 0.54% และ 0.63% ที่มีขนาดของ Second phase ที่ใหญ่จึงจะได้ปริมาณทองแดงสูงถึง 61.39% และ 68.31%

ตารางที่ 4.1 ความแข็ง(Hardness; HV) ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength; UTS) ความเค้นจุดคราก (Yield Strength; σ_y),ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus; E)และค่า %Elongation ของเงินผสม ทองแดง และ ดีบุก

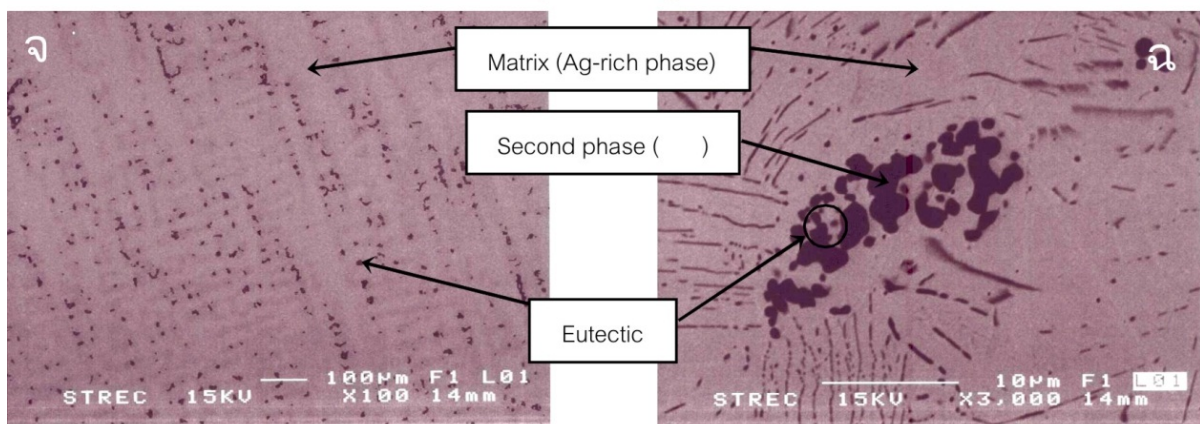
ส่วนผสมทางเคมี (wt%)	ครั้งที่ทดสอบ	σ_y (MPa)	UTS (MPa)	E (GPa)	%Elongation	σ_y เฉลี่ย (MPa)	ความแข็งเฉลี่ย (HV)	UTS เฉลี่ย (MPa)	E เฉลี่ย (GPa)	%Elongation
ชุดที่ 1 Ag-7.35%Cu	1	101.5	218.0	51.0	20.8	90.9	63.5	199.6	54.5	19.7
	2	73.3	182.4	49.5	20.2					
	3	97.8	198.3	63.1	18.3					
ชุดที่ 2 Ag-6.36%Cu	1	90.8	182.4	50.6	19.6	82.7	56	184.9	48.6	22.2
	2	81.0	189.2	50.8	26.7					
	3	76.3	183.2	44.5	20.4					
ชุดที่ 3 5.95%Cu- 0.31%Sn-Ag	1	84.9	200.8	56.1	26.7	84.1	58.8	187.6	55.5	24.1
	2	81.7	177.0	51.6	23.3					
	3	85.7	185.1	58.9	22.3					
ชุดที่ 4 5.85%Cu- 0.38%Sn-Ag	1	86.7	197.4	59.0	22.8	85.3	62.7	189.5	54.1	24.3
	2	82.0	178.5	51.9	26.7					
	3	87.2	192.5	51.4	23.3					
ชุดที่ 5 5.78%Cu- 0.43%Sn-Ag	1	88.6	197.7	56.5	26.7	87.8	62.9	195.7	57.4	28.4
	2	87.0	193.6	58.3	30.0					
	3	-	-	-	-					
ชุดที่ 6 5.74%Cu- 0.50%Sn-Ag	1	85.4	178.0	48.0	23.6	82.2	61.7	179.2	49.4	34.3
	2	79.0	180.4	50.8	45.0					
	3	-	-	-	-					
ชุดที่ 7 5.68%Cu- 0.54%Sn-Ag	1	80.0	202.4	53.6	26.7	83.2	61.2	184.0	51.7	27.1
	2	82.9	175.3	52.5	30.0					
	3	86.7	174.4	49	24.7					
ชุดที่ 8 5.61%Cu- 0.63%Sn-Ag	1	104.4	199.5	50.8	28.3	88.0	60.8	187.5	51.4	25.0
	2	71.5	175.4	52.0	21.7					
	3	-	-	-	-					



โลหะผสมชุดที่ 1 : Ag - 7.35%Cu



โลหะผสมชุดที่ 2 : Ag - 6.36%Cu



โลหะผสมชุดที่ 3 : Ag - 5.95%Cu - 0.32%Sn

รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง 925 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM)

ตารางที่ 4.2 ปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของเงินสเตอร์ลิง 925 และเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM)

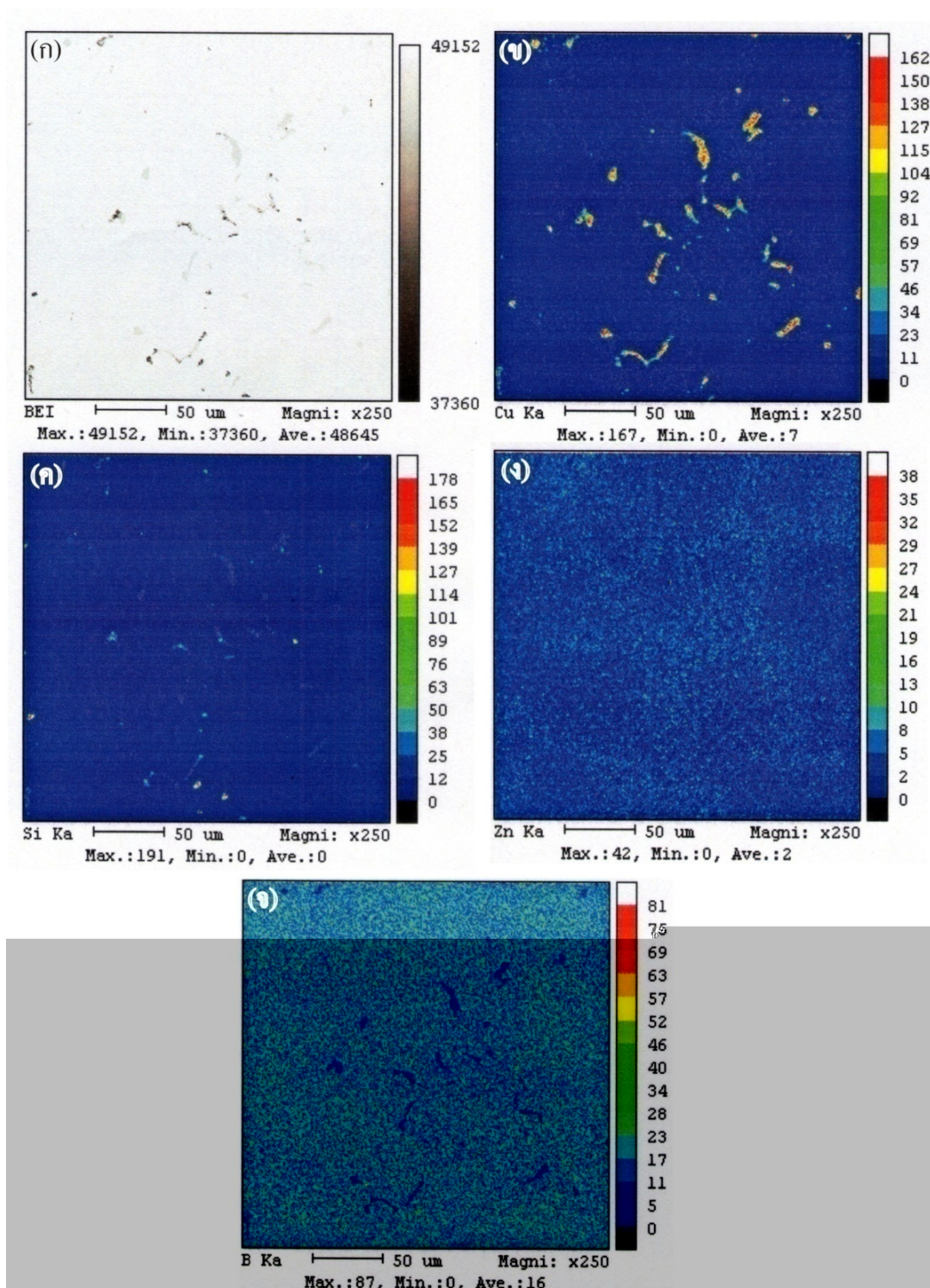
ชุดโลหะผสม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)			ส่วนผสมทางเคมีที่ตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด(SEM) (wt%)								
	Cu	Sn	Ag	All			Matrix			Second phase(สีดำ)		
				Cu	Sn	Ag	Cu	Sn	Ag	Cu	Sn	Ag
1	7.35	_	Balance	7.82	_	92.18	4.42	_	95.58	25.71	_	74.30
2	6.36	_	Balance	6.72	_	93.28	4.67	_	95.33	37.86	_	62.14
3	5.95	0.31	Balance	6.76	ND	92.89	4.46	0.47	95.08	36.00	ND	63.78
4	5.85	0.38	Balance	6.71	0.47	92.83	6.79	0.83	92.38	43.60	ND	56.21
5	5.78	0.43	Balance	6.30	ND	93.36	8.61	0.52	90.87	58.09	0.31	41.60
6	5.74	0.50	Balance	6.31	0.48	93.22	6.00	0.57	93.43	31.41	0.61	67.98
7	5.68	0.54	Balance	6.44	0.40	93.21	7.32	0.73	91.95	61.39	0.48	38.13
8	5.61	0.63	Balance	5.85	0.58	93.57	4.36	0.67	94.97	68.31	0.61	31.09

ND-ตรวจไม่พบ

4.4 ผลของสังกะสีต่อเงินสเตอร์ลิงผสมทองแดง

สังกะสีทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะผสมลดลง เนื่องจากสังกะสีมีจุดหลอมเหลวที่ประมาณ 419.6°C และเพิ่มความสว่างความขาวให้โลหะผสมเนื่องจากอะตอมสังกะสีจะเข้าไปแทนที่อะตอมทองแดงและเงิน อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลของโลหะหลอมเหลวขณะหล่อสังกะสียังถูกนำไปใช้เป็นตัวกันหมองได้ด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ธาตุสังกะสียังทำหน้าที่เป็น Flux และตัวลดการเกิดออกไซด์ (Deoxidizer) ในการหล่อหลอม ลดการกักเก็บฟองก๊าซในเนื้อเงิน อย่างไรก็ตามการใช้สังกะสีผสมในเนื้อเงินมากเกินไปจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสัณฐานของผิวเงินจากขาวสว่างในเงินผสมทองแดงเป็นเงินสีขาวประกายเหลืองและเกิดคราบเหลืองที่ผิวได้ง่ายในชิ้นงานที่ใช้งานมาระยะหนึ่ง

สังกะสีสร้างสารละลายของแข็งร่วมกับเงินได้ดีโดยสามารถละลายสูงสุดรูปที่ประมาณ 28 % โดยน้ำหนัก ณ 250°C และสารละลายของแข็งจะเหลือที่ประมาณ 30% โดยน้ำหนักที่ 100°C ลักษณะดังกล่าวแสดงแนวโน้มการกระจายตัวของสังกะสีในเนื้อพื้นเงินดังรูป 4.9 แต่ยังคงพบว่าสังกะสีมีแนวโน้มการละลายในทองแดงได้ดีเช่นกันจึงสามารถพบการกระจายตัวของสังกะสีทั้งในเฟส อัลฟาและ เบตา อย่างไรก็ตามหากนำเศษเก่าของเงินที่ผสมสังกะสีกลับไปหลอมเพื่อผลิตชิ้นงานใหม่จะพบจุดสารประกอบสังกะสีออกไซด์และ ในบางส่วนพบการแยกตัวของสังกะสีทำให้เกิดการประทุหรือเดือดขณะเชื่อมประสานได้



รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคตรวจสอบด้วย EPMA ของชิ้นงาน 10.7B(75B)⁽¹⁾

ก) โครงสร้างจุลภาคแบบรูปพื้นสว่าง (bright-field(BF) image)

ข) การกระจายตัวของทองแดง

ค) การกระจายตัวของซิลิคอน

ง) การกระจายตัวของสังกะสี

จ) การกระจายตัวของโบรอน

4.5 ผลของอะลูมิเนียมต่อเงินสเตอร์ลิงผสมทองแดง

ในแผนภูมิสมดุลของระบบเงิน-อะลูมิเนียมพบว่าอะลูมิเนียมสามารถรวมตัวกับเงินเป็นสารละลายของแข็ง โดยที่ 200°C มีความสามารถการละลายของอะลูมิเนียมได้ประมาณ 3%โดยน้ำหนัก โดยปกติอะลูมิเนียมถูกใช้เป็นตัวหล่อออกซิเจนในน้ำเหล็กหรือเป็นอัลลอยผสมในสังกะสีผสมและแมกนีเซียมผสม จากสิทธิบัตร US5,021,214⁽³⁾ ได้ยืนยันการเพิ่มความต้านทานการหมองของอะลูมิเนียมร่วมกับอินเดียมในบรรยากาศ Na₂S และ NaCl ได้ดีขึ้น ลักษณะการละลายของอะลูมิเนียมในเงินสอดคล้องการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการหมองยังส่งผลให้คราบหมองที่เกิดหลุดลอกได้ง่ายเนื่องจากเนื้อพื้นเงินที่มีอะลูมิเนียมสูงนั่นเองซึ่งพฤติกรรมความต้านทานการหมองที่พบทำให้ชิ้นงานมีผิวเรียบเงาหลังการเช็ดคราบหมองแตกต่างจากอัลลอยกลุ่มซิลิคอนที่มีการเพิ่มความต้านทานการหมองที่เฟส β เนื่องจากสามารถละลายได้ดีในทองแดงและแม้จะเช็ดคราบหมองออกก็ไม่สามารถสร้างพื้นผิวเรียบบนชิ้นงานได้ลักษณะที่กล่าวไปเป็นแนวทางการสร้างมุมมองของการผลิตอัลลอยใหม่ที่น่าสนใจ อย่างไรก็ตามการใช้อะลูมิเนียมสร้างปัญหาได้เนื่องจากเพิ่มความหนืดของน้ำโลหะและทำให้เกิดรอยผุเนื่องจากสารประกอบอะลูมินากระจายในเนื้อเงินโดยเฉพาะในการนำเศษเก่ากลับไปหลอมใช้ใหม่ รวมถึงเงินผสมทองแดงรวมอะลูมิเนียมมีประกายสีขาวอมเหลืองมีความงามไม่เท่าเงินผสมทองแดงปกติจึงไม่เป็นที่นิยมในการผลิต

4.6 ผลของโบรอนร่วมกับซิลิคอนต่อเงินสเตอร์ลิงผสมทองแดง

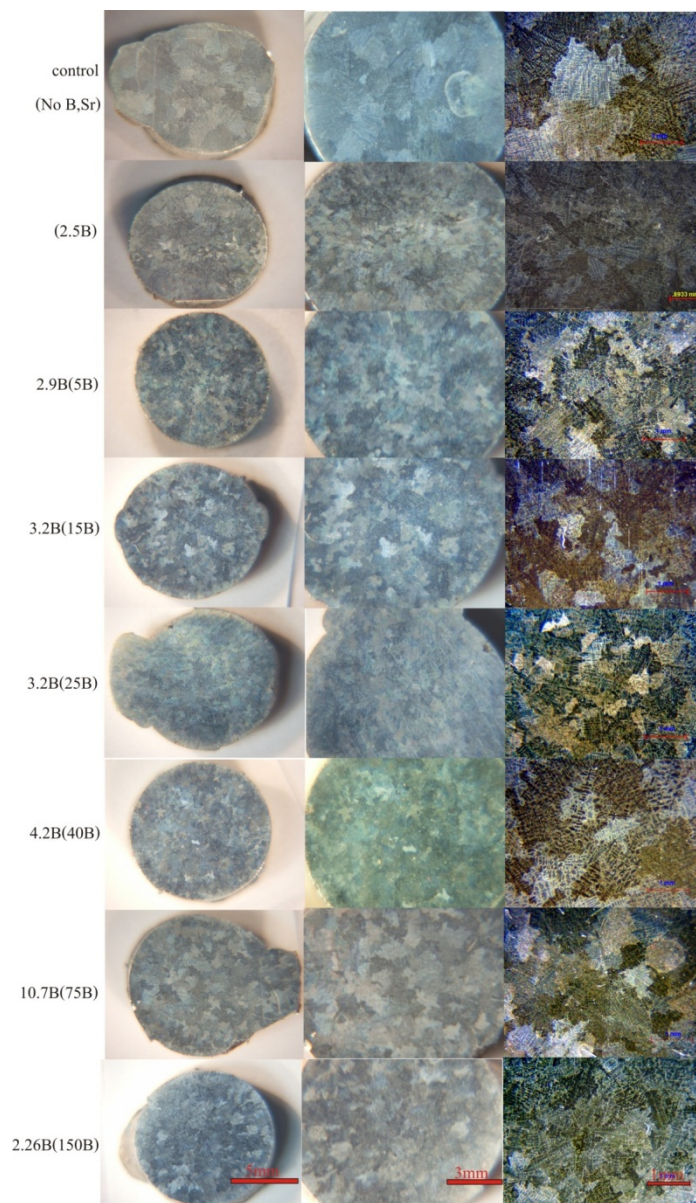
โบรอนลดแรงตึงผิว (Surface tension) ในขณะที่หลอมเหลวและทำให้การผสมขณะหลอมเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น สร้างความสะอาดให้ผิวงานหล่อ นอกจากนี้ยังมีหลายงานวิจัยที่กล่าวถึงธาตุโบรอนเป็นตัวปรับลดขนาดเกรน แม้ว่ากลไกการลดขนาดเกรนยังไม่มีคำอธิบายมากนักแต่กลับเป็นธาตุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอัลลอยการค้าหลายรุ่น แต่พบการใช้ประโยชน์ในสิทธิบัตรหลายฉบับดังตัวอย่างในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงการใช้โบรอนในสิทธิบัตร

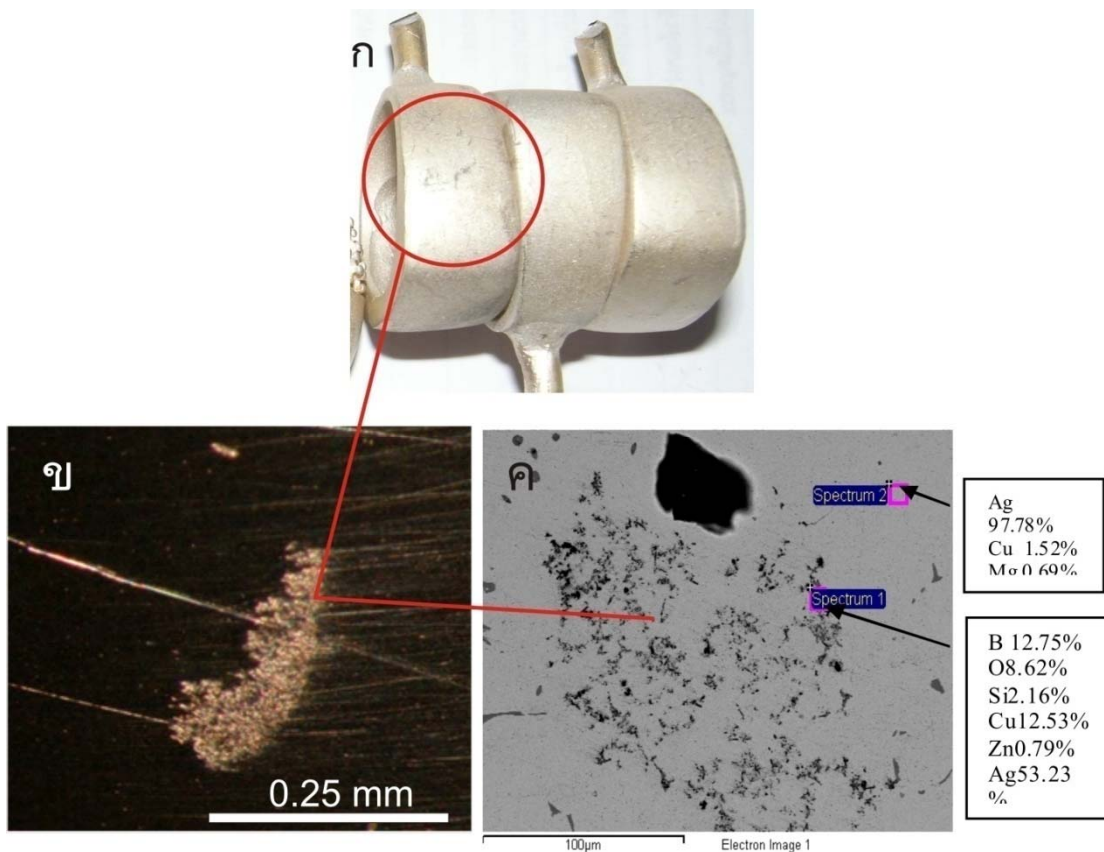
ธาตุ	อิทธิพลต่อเงิน	ปริมาณที่เหมาะสม	ผู้เขียน	สิทธิบัตร	ปี
โบรอน	ลด surface tension	0.05-17 % (ใน master alloy)	Bernhard et al.	US 5039479	1991
	ทำให้หลอมรวมสม่ำเสมอ เป็นตัวลดขนาดเกรน		Bernhard et al.	US 4973446	1990
	ลด fire scale	0-0.001%	Croce	US2004/0249055A1	2004
	ป้องกันการโตของเกรนในโลหะเชื่อมประสาน	-	Menon	US2005/0211342A1	2005
			Peter	US2007/0009375A1	2007

จากการศึกษาของ คุณสิริวรรณ สกุลตันเจริญชัย⁽¹⁾ พบว่าการเปลี่ยนแปลงโบรอนในเงินผสมทองแดง ซิลิคอน สังกะสี และ ดีบุก ในช่วง 1.7 – 10.7 ppm ทำให้ขนาดเกรนลดลงจาก 1.1 mm เป็น 0.62 – 0.77 mm (ดังรูป 19) โดยปริมาณโบรอนที่เหมาะสมสำหรับการลดขนาดเกรนเงินอยู่ในช่วง 2.9-4.2 ppm เพื่อป้องกันการเกิดสารประกอบสีขาวที่ผิวชิ้นงานดังรูป 4.10 และทำให้ขนาดเกรนลดลงจาก 1.1 mm เป็น 0.62 – 0.77 mm และเพิ่มความแข็งแรงสูงสุดจาก

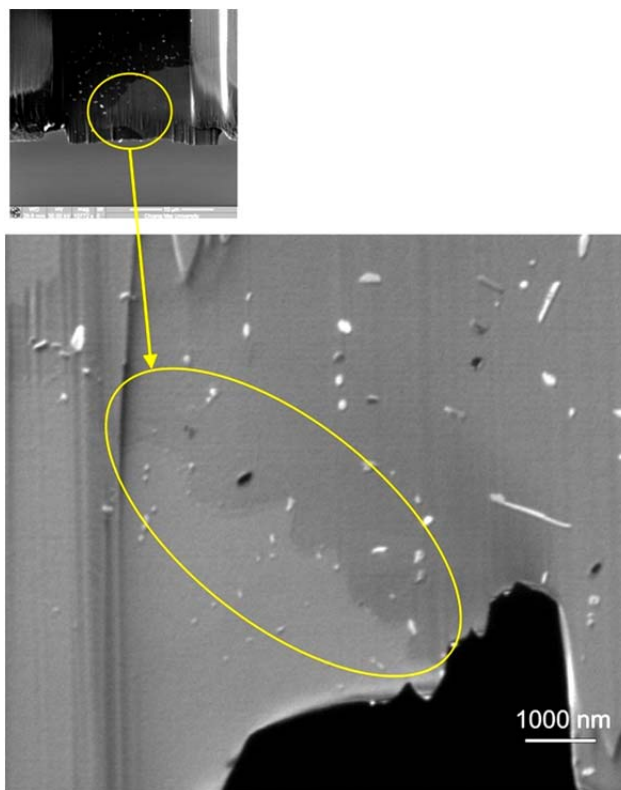
172.4 MPa เป็น 199 – 210 MPa ในโลหะเงินผสมทองแดงการเติมโบรอนเพื่อลดขนาดเกรนจำเป็นต้องเติมควบคู่กับซิลิคอน อนุภาคที่คาดว่าส่งผลลดขนาดเกรนคืออนุภาคของโลหะเงินผสมทองแดงซึ่งมีขนาดประมาณ 20 นาโนเมตร ระยะห่างระหว่างอนุภาค 50 – 100 นาโนเมตรเรียงตัวตามรอยต่อเกรนทำให้ขัดขวางการขยายตัวของเกรนดังรูปที่ 4.11-4.12



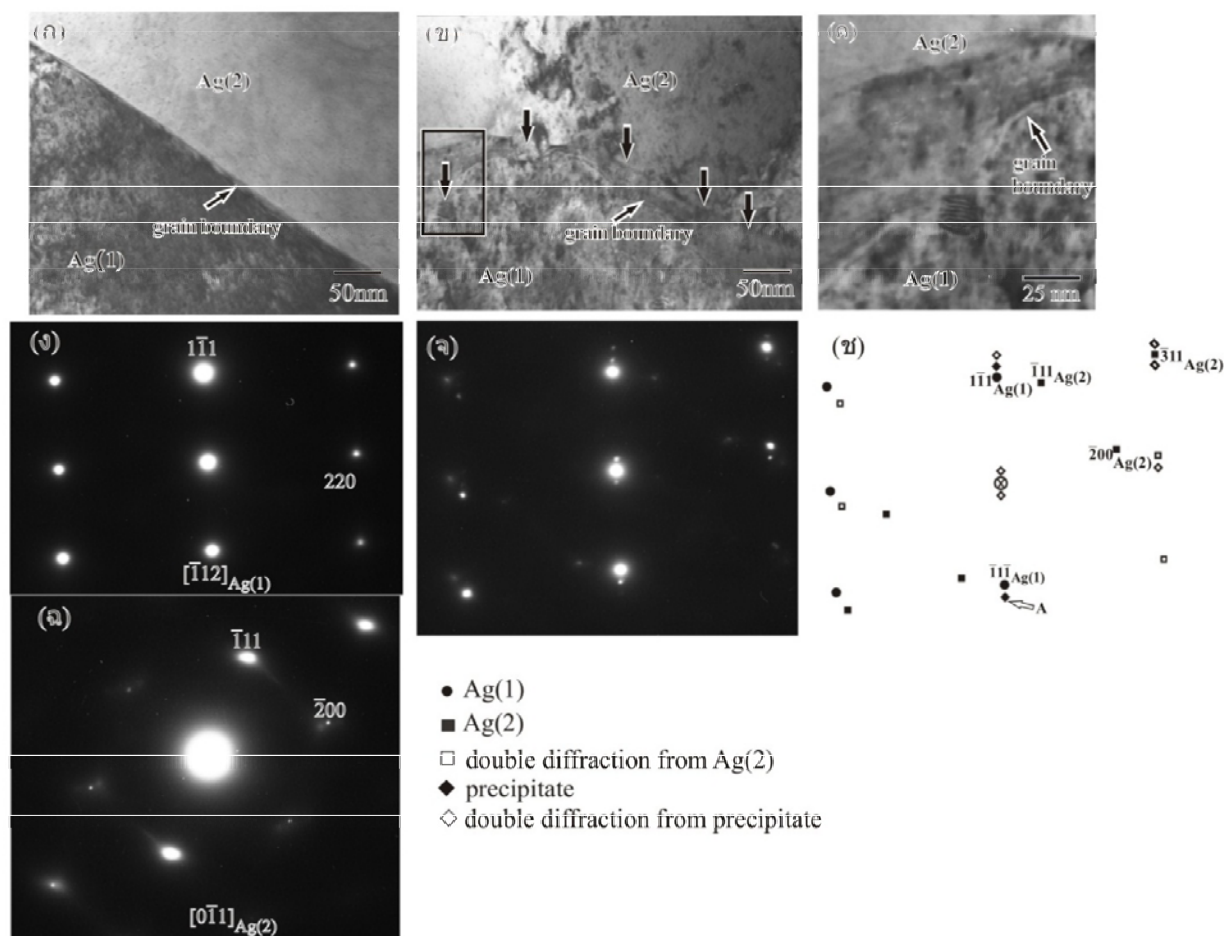
รูปที่ 4.10 แสดงผลของปริมาณโบรอนต่อขนาดเกรนของเงินผสมทองแดง สังกะสี ซิลิคอน⁽¹⁾



รูปที่ 4.11 ลักษณะจุดสีดําที่ผิวชิ้นงานหล่อเงิน และคราบสีขาวที่ผิวชิ้นงาน 2.26(150B)⁽¹⁾

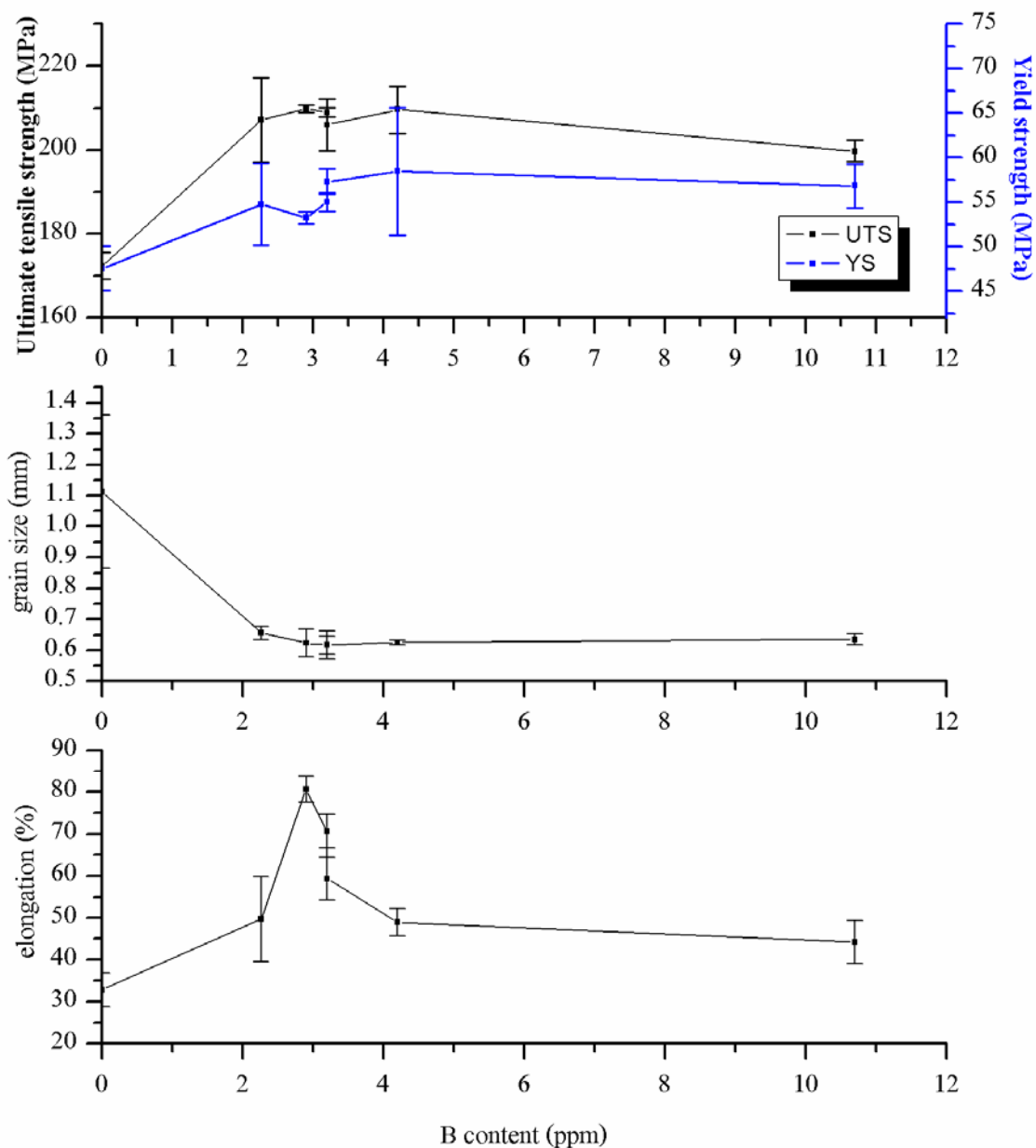


รูปที่ 4.12 การกระจายตัวของอนุภาคกลุ่มทองแดงโบรอนของชิ้นงาน 10.7B(75B) ด้วย FIB⁽¹⁾



รูปที่ 4.13 ก)โครงสร้างจุลภาคแบบภาพพื้นสว่างของรอยต่อเกรนชิ้นงาน control(No B, Sr) ข)โครงสร้างจุลภาคแบบพื้นสว่างของรอยต่อเกรนชิ้นงาน ค)แถบสว่างมีดมอเรของอนุภาค ง)รูปแบบการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนแบบเลือกที่ของเกรนที่ 1 Ag(1) ฉ)รูปแบบการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนแบบเลือกที่ของเกรนที่ 2Ag(2) จ)รูปแบบการเลี้ยวเบนสองครั้งของอนุภาคทับซ้อนกับเกรนที่1 และ 2

การเพิ่มโบรอนในเงินสเตอร์ลิง 950 ให้แนวโน้มการลดขนาดเกรน และการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลเช่นเดียวกับเงินสเตอร์ลิงที่เติมโบรอน โดยการเพิ่มค่าความแข็งแรงดึงยังคงสัมพันธ์กับขนาดเกรนที่ลดลง โดยพบว่า มีการลดขนาดเกรนมากกว่าในกรณีการเติมโบรอนเพียงอย่างเดียว กล่าวคือ มีการลดขนาดเกรนจาก 1.11 mm (ที่ความแปรปรวน 0.247) ไปอยู่ในช่วง 0.43-0.45 mm (ที่ความแปรปรวน 0.017 - 0.11) (โดยชิ้นงานเติมโบรอน 400 ppb - 150 ppm จะลดขนาดเกรนในช่วง 0.62 - 0.77 mm มีความแปรปรวนที่ 0.00082 - 0.056) ทำให้เพิ่มค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด จาก 172 MPa เป็น 195 - 216 MPa (ชิ้นงานเติมโบรอน 0.4 - 150 ppm มีค่าความแข็งแรงดึงช่วง 199 - 210 MPa) ค่าความแข็งแรงดึงที่จุดครากเปลี่ยนแปลงจาก 47.6 MPa เป็น 56 - 66 MPa การเปลี่ยนแปลง อัตราการยืด (percentage of Elongation) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 32.83 เป็น 55.8 - 66.18 % ดังผลในรูปที่ 4.14 เป็นไปตามกลไกการเพิ่มความแข็งแรงจากผลของขนาดเกรนที่ลดลง (Grain boundary strengthening)



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของปริมาณโบรอนในเนื้อเงินต่อค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด(Ultimate tensile strength-UTS) ความแข็งแรงดึงที่จุดคราก(Yield strength – YS) และ Elongation(%) และขนาดเกรนของเงินเกรด 950 ผสม ทองแดง สังกะสี ดีบุก ซีลีคอนโบรอน⁽¹⁾

ในช่วงต่อไป คณะผู้วิจัยได้เริ่มทดลองผลิตอัลลอยผสมโดยใช้ส่วนผสมหลักดังตารางที่ 8 (โดยมีอัลลอยดังรูปที่ 4.15) รวมถึงได้ทดสอบปริมาณธาตุผสมเพื่อการเปรียบเทียบดังรายละเอียดตามตารางที่ 4.4 และทดลองผลิตเงิน 950 ผสมอัลลอย ทดสอบทั้ง 8 ชนิดซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงต่อไปในรายงานการวิจัย

ตารางที่ 4.4 แสดงส่วนผสมเคมีก่อนหล่อและหลอมผลิตอัลลอยทดลองประเภทต่างๆ

ประเภทอัลลอย	Sn%±SD		Al%±SD		Zn%±SD		B(ppm)±SD		Cu*%
	ก่อนหลอม	หลังหลอม	ก่อนหลอม	หลังหลอม	ก่อนหลอม	หลังหลอม	ก่อนหลอม	หลังหลอม	
1(CuSn)**	3	3.15	NA	NA	NA	NA	NA	NA	96.85
2(CuSnB)**	3	3.1	NA	NA	NA	NA	400	94.8	96.89
3(CuB)*	NA	NA	NA	NA	NA	NA	400	77.4	97.63
4(CuAl)***	NA	NA	2.5	2.36	NA	NA	NA	NA	97.64
5(CuAlB)****	NA	NA	2.5	2.31	NA	NA	400	177.8	97.67
6(CuZn)*****	NA	NA	NA	NA	20	15.82	NA	NA	84.18
7(CuZnB)*****	NA	NA	NA	NA	20	21.2	400	40	78.796
8(Cu)*	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	99.99

* อัลลอยผสมหลักทองแดง

**อัลลอยผสมหลักทองแดง-ดีบุก

***อัลลอยผสมหลักทองแดง-อะลูมิเนียม

****อัลลอยผสมหลักทองแดง-สังกะสี

จากการพิจารณาปริมาณธาตุด้วย ICP-OES เพื่อเปรียบเทียบการสูญหายพบว่า อะลูมิเนียมอัตราการสูญเสียน้อยที่ 5.6 -7.6% และ ดีบุกมีแนวโน้มการเหลือค้ำในอัลลอยผสมทองแดงได้ดี และอาจพบว่าดีบุกไม่สูญหายในส่วนผสม สำหรับการมีปริมาณดีบุกเกินจากปริมาณก่อนหล่ออาจเกิดจากธาตุที่บางตัวสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้เกิดการสูญหายในช่วงการหลอมผลิตอัลลอย สำหรับสังกะสี มีการสูญหายจากการหลอม 20.9 %หรือ ไม่สูญหายเลย โบรอนมีการสูญหายที่ 55.5-90% ขึ้นอยู่กับสภาพอ็อกซิเดชันและคลุมนไนโตรเจนในเตาหลอมเป็นหลักซึ่งจากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าโบรอนเป็นธาตุที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันไวมากทำให้สามารถสูญหายจนหมดจากการหลอมได้ง่ายและควบคุมได้ยาก จากรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นลักษณะทางกายภาพของเม็ดอัลลอย โดยการเติมโบรอนส่งผลต่อรูปแบบเม็ดอัลลอยที่ผ่านการหล่อและหยุดเม็ดพบว่า อัลลอยผสมทองแดงที่เติมโบรอนจะมีลักษณะเม็ดกลมและ ผิวเงางาม ซึ่งเป็นไปตามสมบัติของโบรอนในการลดแรงตึงผิว และมีความสามารถในการเกิดออกซิเดชันแยกคราบออกไซด์จากเม็ดอัลลอยทำให้อัลลอยที่เติมโบรอนมักมีผิวเงางามรวมถึงทำให้เม็ดมีความกลม และเงาเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม คณะผู้วิจัยยังมีความมั่นใจในการหล่อต้นเงินเพื่อทดสอบสมบัติเบื้องต้นและตรวจสอบความต้านทานการร่อนเพื่อหาข้อมูลเพิ่มเติมดังรายงานในช่วงต่อไป

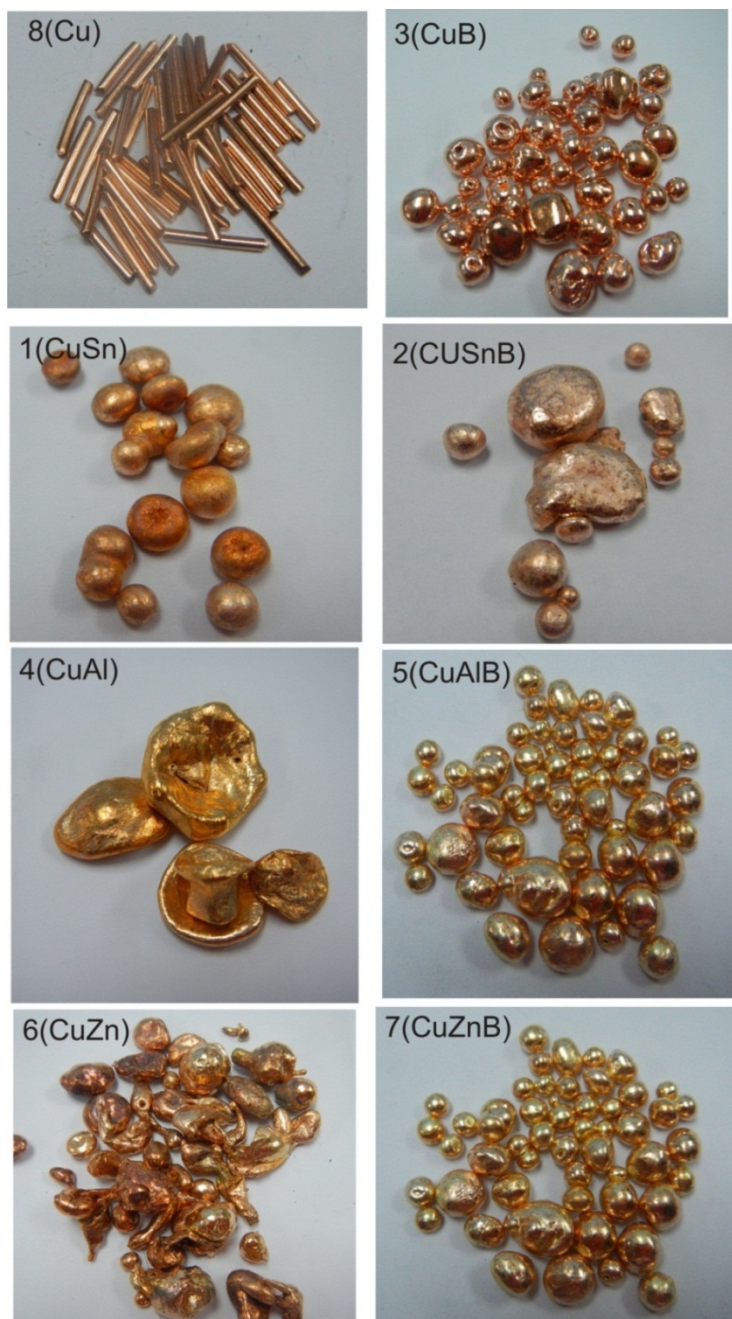
ภายหลังการผลิตอัลลอยทองแดงผสมจนมีความมั่นใจในส่วนผสมเคมีแล้วนั้น คณะผู้วิจัยได้เริ่มการผลิตมาสเตอร์อัลลอย ด้วยทองแดงผสมซิลิคอนและสารประกอบซิลิคอน โดยใช้ทองแดงผสมซิลิคอน 10% โดยน้ำหนักร่วมกับ สารประกอบซิลิคอน ในอัตราส่วน Cu10 Si 760 กรัม กับ สารประกอบซิลิคอน 43 กรัมหลอมที่ 1130 องศาเซลเซียส พบการหลอมละลายเริ่มต้นที่ 600 องศาเซลเซียส และสามารถละลายร่วมกันได้ดี โดยพบว่าภายหลังการละลายมาสเตอร์อัลลอยจะแตกเปราะและมีเนื้อโลหะสีขาวดังรูปที่ 4.15 ก โดยมาสเตอร์อัลลอยทองแดงผสมสารประกอบซิลิคอนมีปริมาณซิลิคอน Si 8.47% โดยน้ำหนัก และแคลเซียม Ca 1.22% โดยน้ำหนัก(ด้วยเทคนิคการละลายร่วมกับ การวิเคราะห์ด้วย ICP-OES)

ตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณส่วนผสมเคมีของธาตุผสมในเงินสปริงเกรด 935 ที่ผ่านการหล่อในระบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเข้า 550 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์ด้วย ICP-OES พบว่า ปริมาณธาตุมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการหลอมทำให้ธาตุสามารถสูญเสียนอกจากการเกิดปฏิกิริยากับบรรยากาศในการหลอมที่ยังคงมีออกซิเจนเหลือค้ำ อีกทั้งยังพบบางธาตุผสมมีปริมาณเพิ่มขึ้นเนื่องจากการสูญเสียน้อยของธาตุบางตัวมีปริมาณสูงสุดส่วนของธาตุรวมอื่นมีปริมาณเฉลี่ยในอัลลอยเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม แคลเซียม ซิลิคอน และ โบรอนสามารถพบการสูญเสียน้อยกว่า 50 % เนื่องจากธาตุดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนที่เหลือบ้างในบรรยากาศการหล่อได้ดี ทำให้เกิดการสูญหายได้มาก

จากการพิจารณา สีต้นเงินที่ผ่านการหล่อและล้างปูนดังรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่า เงินผสมทองแดง และ เงินผสมทองแดงร่วมกับดีบุกจะให้ผิวชิ้นงานหล่อที่มีสีคล้ำ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในช่วงน้ำโลหะสัมผัสเข้าปูนขณะหล่อร่วมกับการเติมทองแดงซึ่งเป็นธาตุที่สามารถเกิดสารประกอบออกไซด์ได้สีคล้ำได้ดี ส่วนการเติมดีบุกในเงินผสมกลุ่มนี้ไม่

สามารถลดทอนสีผิวให้อ่อนลง เมื่อเปรียบเทียบกับสีผิวของเงินที่ผสมทองแดงและอะลูมิเนียมและ เงินผสมทองแดงสังกะสี ซึ่งมีสีผิวที่อ่อนกว่า โดยเฉพาะกลุ่มเงินผสมทองแดงและอะลูมิเนียมจะมีสีผิวหลังหล่อ-ล้างปูนขาวอมเหลือง ซึ่งให้สีผิวหลังหล่อและล้างปูนที่ขาวและสว่างกว่ากลุ่มอื่นเนื่องจากอะลูมิเนียมเป็นธาตุที่ป้องกันการเกิดออกซิเดชันได้ดี รวมถึงอะลูมิเนียมมีความสามารถในการละลายในเงินได้ดีจนถึงไม่เกิน 3 % น้ำหนัก ส่วนการเติมทองแดงผสมสารประกอบซิลิคอนทำให้ผิวชิ้นงานมีสีสว่างมากขึ้น โดยมีความคล้ำลดลงเนื่องจากมีชั้นสารประกอบออกไซด์ที่ลดลง แต่กลับต้องเพิ่มเวลาการล้างปูนหลังหล่อจากเดิม ใช้เวลาที่ 10-15 นาที เป็น 30-60 นาที เนื่องจากเกิดการแตกหลังหล่อ(Hot Tearing) จากการเติมซิลิคอน อีกทั้งชิ้นงานทดสอบแรงดึง หรือชิ้นงานที่มีความหนาบางสามารถแตกหลังหล่อได้ง่ายแม้จะทำให้ความต้านทานการหมองสูงขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียก่อนการใช้งาน อย่างไรก็ตามเคลือบซึ่งพบในสารประกอบซิลิคอนสามารถลดแนวโน้มการแตกหลังหล่อเมื่อควบคุมปริมาณซิลิคอนไม่เกิน 0.1 % โดยน้ำหนัก ร่วมกับการล้างปูนหลังหล่อที่ช้าลง แต่กลับพบว่าการเติมเคลือบอาจส่งผลต่อการเพิ่มความต้านทานการหมองได้ ดังผลการทดสอบการหมองในส่วนต่อไป

ผลของสีผิวหลังหล่อและล้างปูนสามารถนำมาบ่งบอกการเกิดฝ้าแดง-ดำบนผิวชิ้นงานเบื้องต้นได้ กล่าวคือเมื่อสีผิวชิ้นงานหลังหล่อมีสีที่คล้ำเพิ่มขึ้นแสดงถึงแนวโน้มการเกิดฝ้าแดงฝ้าดำที่สามารถเกาะติดลึกในผิวชิ้นงานและไม่สามารถขัดออกได้ง่าย โดยกลุ่มชิ้นงานทดสอบที่มีสีผิวหล่อเข้มจะมีความเป็นไปได้ในการเกิดฝ้าแดงฝ้าดำได้ง่ายดังผลการทดสอบในรูปที่ 4.22 อย่างไรก็ตามการเกิดฝ้าแดงฝ้าดำที่พบยังมีส่วนมาจาก การสะสมความร้อนในชิ้นงานและอิทธิพลของธาตุผสม กล่าวคือหากชิ้นงานมีความหนาบางซึ่งแสดงถึงปริมาณความร้อนในชิ้นงานสูง และถ้าต้นหล่อมีย่าน้ำหนักมากในช่วงตั้งแต่ 500 กรัมขึ้นไปจะพบผิวหลังหล่อที่คล้ำได้ง่ายและมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดฝ้าแดงฝ้าดำที่หนามากขึ้นที่ผิวชิ้นงาน โดยบางส่วนไม่สามารถขัดออกได้ดังรูปที่ 4.22 โดยจากการพิจารณาร่วมกันระหว่างรูปที่ 4.16 และ 4.22 จะพบว่าเงินกลุ่มที่ผสม ทองแดง และผสมทองแดงร่วมกับดีบุกมีแนวโน้มการเกิดฝ้าแดงฝ้าดำสูง เงินที่ผสมทองแดงร่วมกับสังกะสีมีแนวโน้มการเกิดฝ้าแดงฝ้าดำลดลง ส่วนเงินผสมทองแดงร่วมกับอะลูมิเนียมและโบรอนไม่พบฝ้าแดงฝ้าดำ เมื่อพิจารณาผลการเกิดฝ้าแดงฝ้าดำที่พบเราสามารถนำข้อมูลเหล่านี้เชื่อมโยงกับความต้านทานการหมองกล่าวคือ หากมีแนวโน้มการเกิดฝ้าแดงง่าย จะพบว่ามีความต้านทานการหมองต่ำโดยผลดังกล่าวแสดงในการทดสอบในรูปที่ 4.23 สำหรับการเติมโบรอนไม่พบความแตกต่างในการเกิดฝ้าแดงมากนัก หากแต่พบการเติมโบรอนลดเศษตะกรันจากงานหล่อในเงินผสมทองแดง และหรือ ดีบุก สังกะสีซึ่งส่งผลต่อรูปลักษณะการใช้งานอัลลอยที่มักได้รับความสนใจจากผู้ใช้งานเป็นหลัก



รูปที่ 4.15 ตัวอย่างอัลลอยทดลองผ่านการหลอมผสมที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ในเตาหลอมระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.15 ก มาสเตอร์อัลลอยทองแดงผสมซิลิคอนร่วมกับสารประกอบซิลิคอน ในอัตราส่วนCu10 Si 760 กรัม กับสารประกอบซิลิคอน 43 กรัมหลอมที่ 1130 องศาเซลเซียส

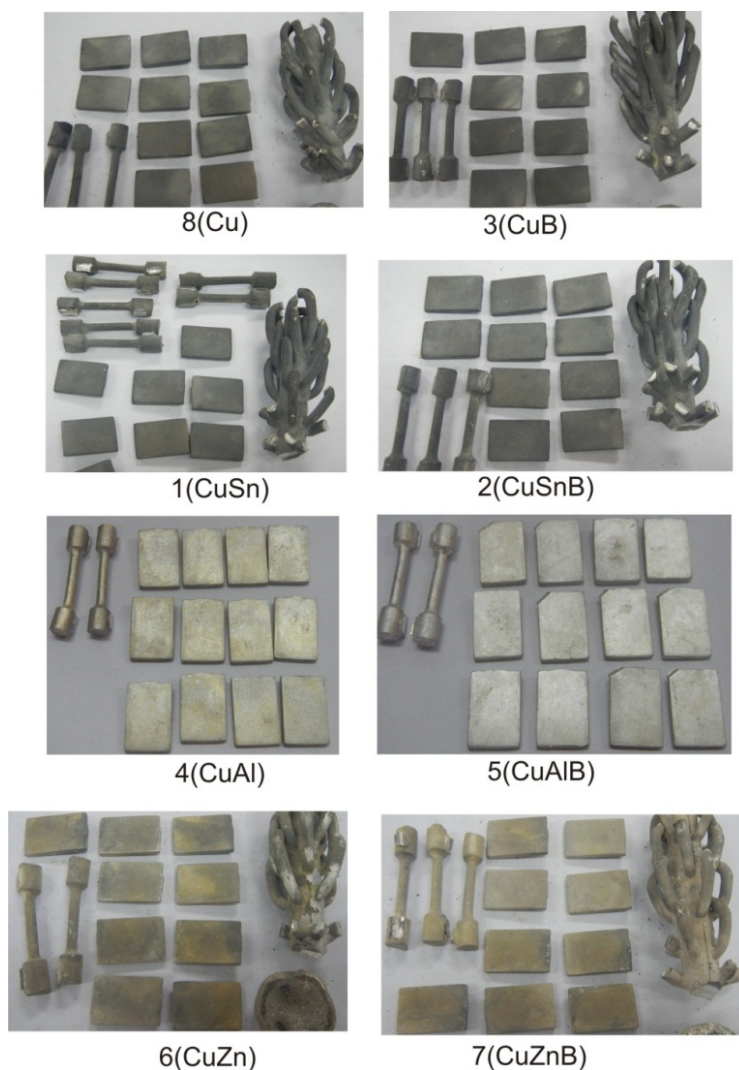
ตารางที่ 4.5 แสดงส่วนผสมเคมีก่อนหล่อและหลอมผลิตเงิน(95%) ผสมอัลลอยทดลอง ด้วย ICP-OES

เงินผสมอัลลอย	Cu%±SD		Sn%±SD		Al%±SD		Zn%±SD		S%±SD		Ca(ppm) ±SD		B(ppm) ±SD	
	BF	AF	BF	AF	BF	AF	BF	AF	BF	AF	BF	AF	BF	AF
1(CuSn)	4.86	3.62±0.0095	0.141	0.12±0.0004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1/1(CuSn0.1SiCa)	4.79	3.52±0.0651	0.133	0.10±0.0046	-	-	-	-	0.067	0.03±0.0076	96.38	75.3±10.4096	-	-
1/2(CuSn0.15SiCa)	4.76	2.83±0.0252	0.120	0.09±0.0021	-	-	-	-	0.102	0.07±0.0021	146.4	43.00±2.6458	-	-
1/3(CuSn0.3SiCa)	4.70	4.06±0.0814	0.083	0.10±0.0065	-	-	-	-	0.202	0.28±0.0057	290.4	189.0±4.0000	-	-
1/4(CuSn0.5SiCa)	4.58	3.83±0.0954	0.033	0.043±0.0034	-	-	-	-	0.373	0.53±0.0180	480.0	302.33±11.93	-	-
2(CuSnB)	4.88	4.07±0.0134	0.12	0.14±0.0009	-	-	-	-	-	-	-	-	4.75	9.95±0.02886
2/1(CuSnB0.1SiCa)	4.79	3.7±0.0656	0.131	0.135±0.0083	-	-	-	-	0.067	0.07±0.0006	96.38	23.48±0.8618	3.99	C/D
2/2(CuSnB0.15SiCa)	4.76	3.63±0.2452	0.119	0.12±0.0100	-	-	-	-	0.102	0.11±0.0020	146.4	60.23±2.9388	3.60	C/D
2/3(CuSnB0.3SiCa)	4.69	3.54±0.0600	0.082	0.16±0.0067	-	-	-	-	0.202	0.25±0.0036	290.4	233.84±18.16	2.50	C/D
2/4(CuSnB0.5SiCa)	4.58	3.15±0.0379	0.0324	0.07±0.0006	-	-	-	-	0.337	0.34±0.0058	480.0	384.33±4.041	1.00	C/D
3(CuB)	5.00	3.91±0.0451	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.87	11.42±0.1100
3/1(CuB0.1SiCa)	4.92	3.88±0.0115	-	-	-	-	-	-	0.067	0.06±0.0000	96.38	35.43±2.3587	3.25	C/D
3/2(CuB0.15SiCa)	4.88	3.57±0.0850	-	-	-	-	-	-	0.120	0.08±0.0015	146.4	73.33±0.5774	2.94	C/D
3/3(CuB0.3SiCa)	4.77	4.06±0.1332	-	-	-	-	-	-	0.202	0.19±0.0021	290.4	203.35±1.494	2.03	C/D
3/4(CuB0.5SiCa)	4.62	3.93±0.0902	-	-	-	-	-	-	0.337	0.35±0.0006	480.0	391.33±21.22	0.80	C/D
4(CuAl)	4.89	3.39±0.0077	-	-	0.116	0.11±0.0001	-	-	-	-	-	-	-	-
4/1(CuAl0.1SiCa)	4.89	4.65±0.1153	-	-	0.100	0.70±0.0473	-	-	0.067	0.19±0.0020	96.38	93.17±0.2887	-	-
4/2(CuAl0.15SiCa)	4.79	3.55±0.1102	-	-	0.090	0.35±0.0306	-	-	0.102	0.13±0.0030	146.4	62.33±0.5774	-	-
4/3(CuAl0.3SiCa)	4.71	5.85±0.2914	-	-	0.062	0.92±0.0451	-	-	0.202	0.32±0.0023	290.4	178.0±3.0000	-	-
4/4(CuAl0.5SiCa)	4.59	4.10±0.0306	-	-	0.025	1.11±0.0231	-	-	0.337	0.37±0.0058	480.0	434.0±3.6056	-	-
5(CuAlB)	4.88	2.13±0.0108	-	-	0.116	0.05±0.0002	-	-	-	-	-	-	8.90	9.10±0.2139
5/1(CuAlB0.1SiCa)	4.83	4.07±0.0751	-	-	0.097	0.06±0.0026	-	-	0.067	0.05±0.0012	96.38	102.5±6.0622	7.50	C/D
5/2(CuAlB0.15SiCa)	4.80	4.05±0.0462	-	-	0.088	0.05±0.0006	-	-	0.102	0.09±0.0036	146.4	134.37±2.248	6.76	C/D
5/3(CuAlB0.3SiCa)	4.71	4.11±0.2013	-	-	0.061	0.04±0.0006	-	-	0.202	0.17±0.0015	290.4	319.33±9.291	4.66	C/D
5/4(CuAlB0.5SiCa)	4.59	4.16±0.0950	-	-	0.024	0.02±0.0017	-	-	0.337	0.36±0.0058	480.0	598.0±14.799	1.85	C/D
6(CuZn)	4.72	3.41±0.0078	-	-	-	-	0.791	0.69±0.0067	-	-	-	-	-	-
6/1(CuZn0.1SiCa)	4.25	2.83±0.0557	-	-	-	-	0.670	0.49±0.0058	0.067	0.06±0.0010	96.38	35.20±1.3856	-	-
6/2(CuZn0.15SiCa)	4.28	3.12±0.0278	-	-	-	-	0.600	0.49±0.0058	0.102	0.09±0.0036	146.4	34.36±2.1079	-	-
6/3(CuZn0.3SiCa)	4.36	3.15±0.0503	-	-	-	-	0.410	0.44±0.01528	0.202	0.14±0.0064	290.4	21.33±1.8147	-	-
6/4(CuZn0.5SiCa)	4.45	3.00±0.0058	-	-	-	-	0.165	0.14±0.0031	0.337	0.41±0.0200	480.0	332.33±2.367	-	-
7(CuZnB)	4.75	3.60±0.0111	-	-	-	-	1.060	0.48±0.0026	-	-	-	-	2.00	29.38±0.5140
7/1(CuZnB0.1SiCa)	4.03	4.13±0.3535	-	-	-	-	0.890	0.44±0.0058	0.067	0.08±0.0015	96.38	49.04±1.2788	1.70	C/D
7/2(CuZnB0.15SiCa)	4.07	3.69±0.1401	-	-	-	-	0.810	0.37±0.0058	0.102	0.09±0.0006	146.4	59.60±2.0421	1.52	C/D
7/3(CuZnB0.3SiCa)	4.20	3.51±0.1039	-	-	-	-	0.560	0.25±0.0006	0.202	0.21±0.0020	290.4	242.0±10.440	1.05	C/D
7/4(CuZnB0.5SiCa)	4.40	3.34±0.0529	-	-	-	-	0.220	0.09±0.0012	0.337	0.36±0.0029	480.0	442.7±34.933	0.40	C/D
8(Cu)	5.00	4.12±0.0067	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8/1(Cu0.1SiCa)	4.92	3.83±0.0029	-	-	-	-	-	-	0.067	0.017±0.0070	96.38	0	-	-
8/2(Cu0.15SiCa)	4.88	3.57±0.0355	-	-	-	-	-	-	0.102	0.048±0.0075	146.4	88.96±2.0091	-	-
8/3(Cu0.3SiCa)	4.77	3.25±0.1179	-	-	-	-	-	-	0.202	0.130±0.0060	290.4	102.2±2.9627	-	-
8/4(Cu0.5SiCa)	4.62	3.43±0.0557	-	-	-	-	-	-	0.337	0.27±0.01115	480.0	224.57±2.779	-	-

BF : Before melting

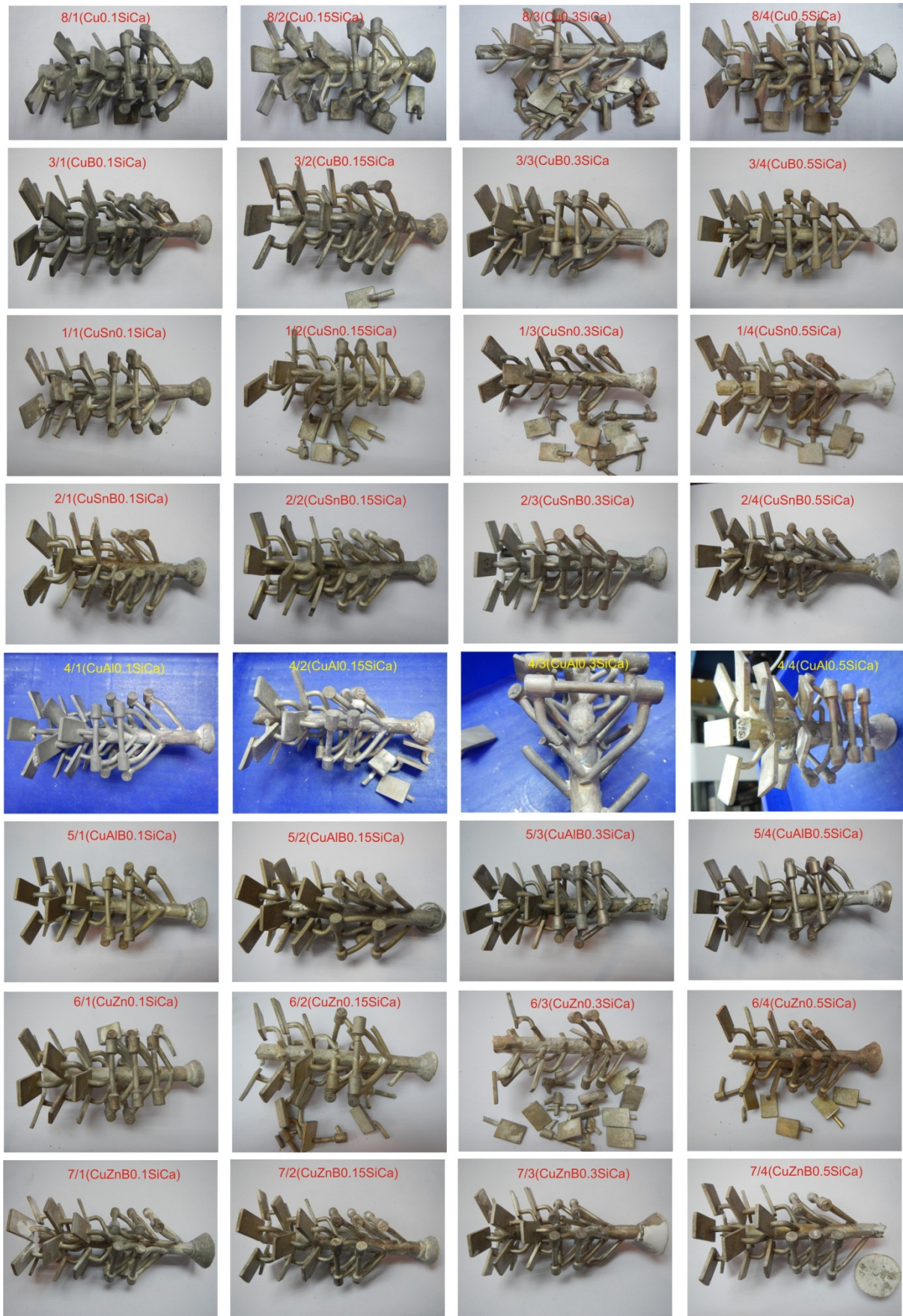
AF : After melting

C/D : Cannot Detect



รูปที่ 4.16 ตัวอย่างสีของต้นเงิน 950 ที่ผสมอัลลอย 1(CuSn) ถึง 8(Cu) ตามตารางที่ 4.5 ผ่านการหล่อที่อุณหภูมิเข้า 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเท 1050 องศาเซลเซียส และล้างปูนโดยไม่ผ่านการกัดกรด

จากรูปที่ 4.16 จะพบว่าการเติมสารประกอบซิลิคอนโดยควบคุมการเติมซิลิคอนตั้งแต่ 0.15% โดยน้ำหนักจะเริ่มพบการแตกหลังหล่อ แต่กลับไม่พบการแตกหลังเมื่อเติมซิลิคอนในเนื้อเงินที่ 0.5% โดยน้ำหนัก (Si เหลือค้ำในเงิน 0.27%) อย่างไรก็ตามจะพบโครงสร้างของ เฟสที่สอง (เฟส β) ในลักษณะร่างแหคล้าย โครงตาข่ายซีเมนไทต์ ทดแทน ดังจะพบในการแสดงภาพในช่วงต่อไป โครงสร้างดังกล่าวแม้จะแสดงถึงการมีปริมาณซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นแต่ก็ยังไม่ทำให้ชิ้นงานขาดความแข็งแรงและไม่สามารถยึดติงรวมถึงเกิดการแตกหลังหล่อได้ดังการแสดงผลการทดสอบเชิงกลในช่วงต่อไป นอกจากนี้ยังพบการหลุดตัวรุนแรงที่บริเวณฐานต้นเงินที่มีการเติมสารประกอบซิลิคอนโดยควบคุมปริมาณซิลิคอนที่ 0.5% โดยน้ำหนัก อีกทั้งเมื่อพิจารณาฐานต้นจะพบว่า รูปแบบฐานต้นจะแตกต่างกันไปมีลักษณะฐานต้นมีขอบและเว้าลงที่ส่วนกลางเนื่องจากการมีแรงดึงผิวเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.16 ข



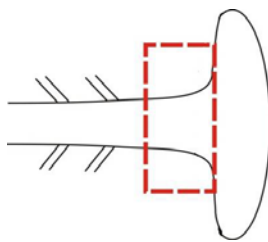
รูปที่ 4.16ก ตัวอย่างสีของต้นเงิน 950 ผสมอัลลอยต่างชนิด ร่วมกับมาสเตอร์อัลลอยทองแดงผสมสารประกอบซิลิคอน ผ่านการหล่อที่อุณหภูมิเบา 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเท1050 องศาเซลเซียสและล้างปูนโดยไม่ผ่านการกัดกรด



รูปที่ 4.16 ข ตัวอย่างฐานต้นเงินผสมอัลลอยร่วมกับมาสเตอร์อัลลอย ก) $7/1(\text{CuZnB0.1SiCa})$ ข) $7/4(\text{CuZnB0.5SiCa})$
 ค) ฐานต้นเงิน $5/4(\text{CuAlB0.5SiCa})$ มีรอยหดตัวแบบเดนไดรต์

4.6 การตรวจสอบขนาดเกรนและ สมบัติทางกล

ในการศึกษาขนาดเกรน และ สมบัติทางกล คณะผู้วิจัยได้เลือกบริเวณที่แข็งตัวช้าที่สุดในการหล่อคือบริเวณลำต้นหลักที่ติดฐานต้นหล่อ ดังรูปที่ 4.17 เพื่อเตรียมชิ้นงานสำหรับตรวจสอบโครงสร้างขนาดเกรนด้วยการขัดละเอียดและกัดกรดด้วย สารละลายผสมกรดโครมิก 5%โดยน้ำหนัก และกรดกำมะถัน 10% โดยปริมาตร โดยสารละลายดังกล่าวแสดงรายละเอียดของเกรนดังรูปที่ 4.18 ลักษณะที่พบเบื้องต้นของเกรนจะมีรูปแบบกิ่งไม้(dendrite)เนื่องจากการเย็นตัวของน้ำโลหะ ลักษณะกิ่งไม้ที่พบทำให้ขนาดเกรนที่ได้มีความแตกต่างกันตามชนิดอัลลอย ดังรายละเอียดในรูปที่ 4.17 ซึ่งเปรียบเทียบกับขนาดชิ้นงานอ้างอิง 8(Cu) พบว่าชิ้นงานอ้างอิง 8(Cu) มีขนาดเกรนใหญ่ 2.1 มม. โดยเมื่อเติมโบรอนทำให้เกรนไม่ลดขนาดลงเป็นเพียงการทำให้ขอบเกรนมีรอยยักมากขึ้นเป็นไปตามเนื้อหาในงานวิจัย “โครงการการผลิตอัลลอยกันหมองที่มีเกรนเล็กละเอียดเพื่ออุตสาหกรรมเครื่องประดับเงิน”⁽²³⁾ โบรอนไม่ส่งผลลดขนาดเกรนใน เงินผสม 2 กลุ่มคือ เงินผสมทองแดง 8(Cu) และเงินผสมทองแดงดีบุก 1(CuSn) แต่การเติมโบรอนส่งผลลดขนาดเกรนในเงินผสม ทองแดง ร่วมกับอะลูมิเนียม หรือ สังกะสี โดยในกรณีของเงินผสมทองแดงและสังกะสี สามารถลดขนาดเกรนได้สูงถึง 67.4% จาก 2.3เป็น 0.75มม. โดยจะมีปริมาณโบรอนเหลือค้างในเงินอัลลอย 29.38ppm ส่วนเงินผสม ทองแดง อะลูมิเนียม ลดขนาดเกรน 10.7% จาก 0.75 มม. เป็น 0.67มม. มีโบรอนเหลือค้าง 9.1ppm(ดังตารางที่ 4.5) ส่วนการเหลือค้างของโบรอนในเงินผสมทองแดง และหรือร่วมกับดีบุก แม้จะมีปริมาณ โบรอนเหลือค้าง9.9-11.4 ppm แต่ไม่สามารถลดขนาดเกรนลงได้



รูปที่ 4.17 แสดง ส่วนบริเวณฐานต้นเงินที่ใช้ตรวจสอบหาขนาดเกรนหลังหล่อ

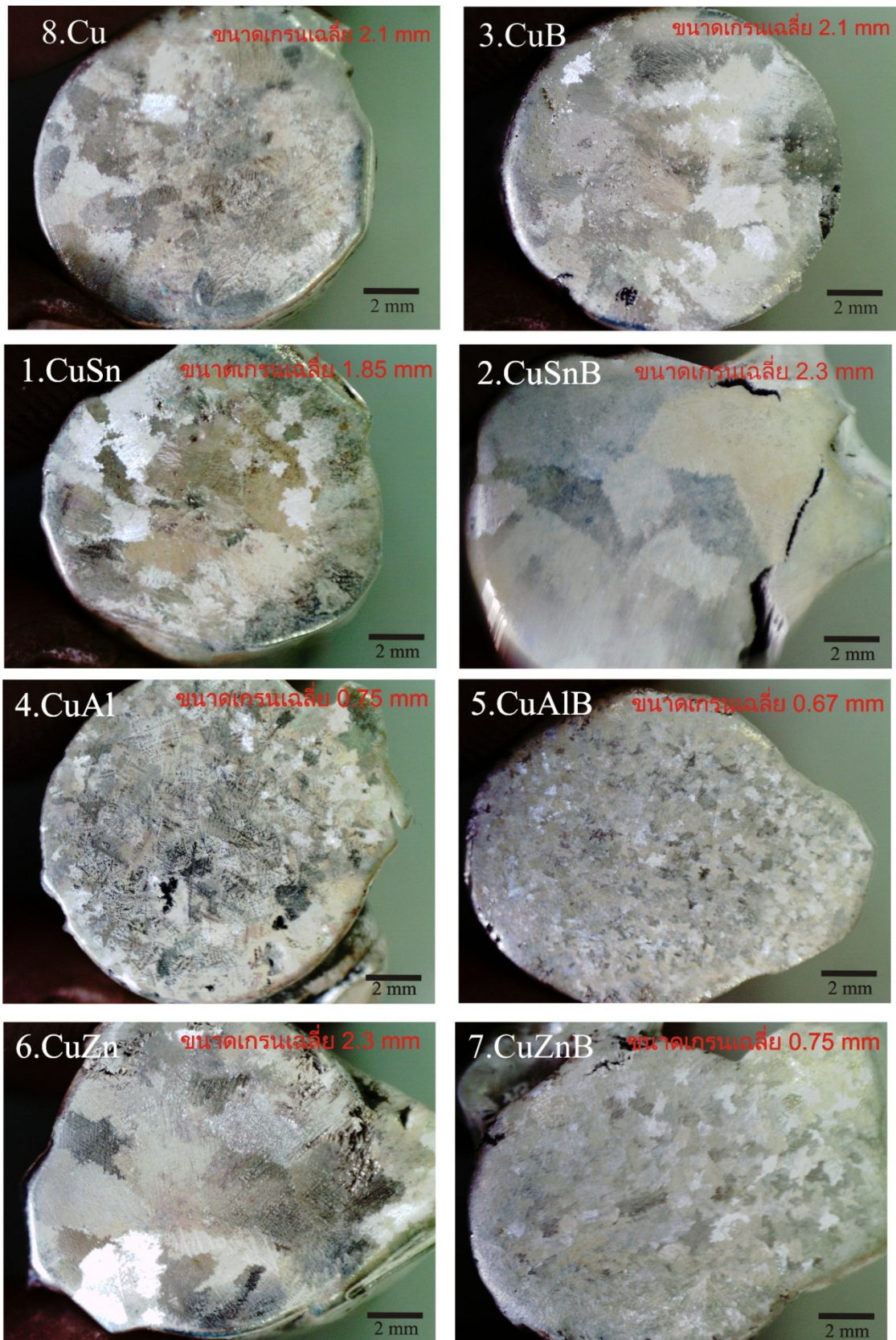
จากรูปที่ 4.18 พบว่า การเติมธาตุกลุ่ม อะลูมิเนียมร่วมกับทองแดงทำให้เงินมีเกรนที่ละเอียดขึ้นโดยขนาดเกรนเปลี่ยนแปลงจาก 2.1 มม.(ชิ้นงาน8(Cu)) เป็น 0.75 มม. (ชิ้นงาน4(CuAl)) ลดลง 64.76% ส่วนเติมดีบุก จะให้ผลการลดขนาดเกรนเพียงเล็กน้อยจาก 2.1 มม.(ชิ้นงาน8(Cu)) เป็น 1.85 มม. (ชิ้นงาน 1(CuSn)) โดยลดลง 11.9% สำหรับการเติมสังกะสี ไม่สามารถลดขนาดเกรนได้และยังพบการขยายตัวของเกรน จาก 2.1 มม.(8(Cu)) เป็น 2.3 มม.(1(CuSn)) ส่วนการเติมโบรอนไม่สามารถลดขนาดเกรนในกลุ่มเงินผสมทองแดง และ กลุ่มเงินผสมทองแดงกับดีบุก ดังพบในชิ้นงานเงินผสม 3(CuB) และ 2(CuSnB) แต่โบรอนสามารถลดขนาดเกรนของเงินผสมทองแดงกับสังกะสีได้ดี สามารถลดขนาดเกรนได้สูงถึง 67.4% จาก 2.3(6(CuZn)) เป็น 0.75มม.(7(CuZnB)) โดยจะมีปริมาณโบรอนเหลือค้างในเงินอัลลอย 29.38ppm นอกจากนี้โบรอนสามารถลดขนาดเกรนของเงินผสมทองแดงกับอะลูมิเนียมได้เล็กน้อย ลดขนาดเกรน 10.7% จาก 0.75 มม. เป็น 0.67มม. ซึ่งมีโบรอนเหลือค้าง 9.1ppm **จากผลข้างต้นจะพบว่า โบรอนสามารถลดขนาดเกรนดีในระบบ เงินผสมทองแดงร่วมกับสังกะสีหรือ อะลูมิเนียม และ ไม่ลดขนาดเกรนในระบบเงินผสมทองแดง และ เงินผสมทองแดงและดีบุก** และจากผลการศึกษาเบื้องต้น⁽¹⁾ พบโบรอนทำให้ขอบเกรนเกิดรอยหยักโดยมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดอนุภาคขนาดเล็ก กั้นที่ขอบเกรนไม่ให้ขยายตัวผ่านกลุ่มอนุภาคได้

รูปที่ 4.19 แสดงผลการเติมสารประกอบซิลิคอน ในเงิน 8(Cu) และ 3(CuB) โดยพบว่าการเพิ่มปริมาณซิลิคอน (หมายรวมถึงการเพิ่ม แคลเซียม ในระบบ) ทำให้ขนาดเกรนเพิ่มขึ้น ในกรณีไม่มีสารประกอบซิลิคอน เช่น ชิ้นงาน 8(Cu) มีขนาดเกรนเฉลี่ย 2.1 มม. ขยายขนาดเป็น 4 มม. ในชิ้นงานเติมสารประกอบซิลิคอน 8/4(Cu0.5SiCa)ซึ่งมีแคลเซียม 224.6 ppm ซิลิคอน 0.27 % โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามในกรณี เงิน 3 (CuB) พบว่าเกิดการชะลอการโตของเกรนเนื่องจากการเพิ่มปริมาณซิลิคอนสาเหตุหลักเป็นเพราะการมีโบรอนในเงินนั่นเอง ผลร่วมกันของโบรอนและแคลเซียมทำให้เงิน 3/1(CuB0.1SiCa) 3/2(CuB0.15SiCa) 3/3(CuB0.3SiCa) ยังคงขนาดเกรนเท่าเดิม(ดังรูป4.19) โดยมีปริมาณโบรอน 0.5-3.25 ppm แคลเซียม 96.4-391 ppm ทำให้มีความเป็นไปได้ในการใช้งานในช่วงการเติมสารประกอบซิลิคอน มีปริมาณซิลิคอนสูงได้

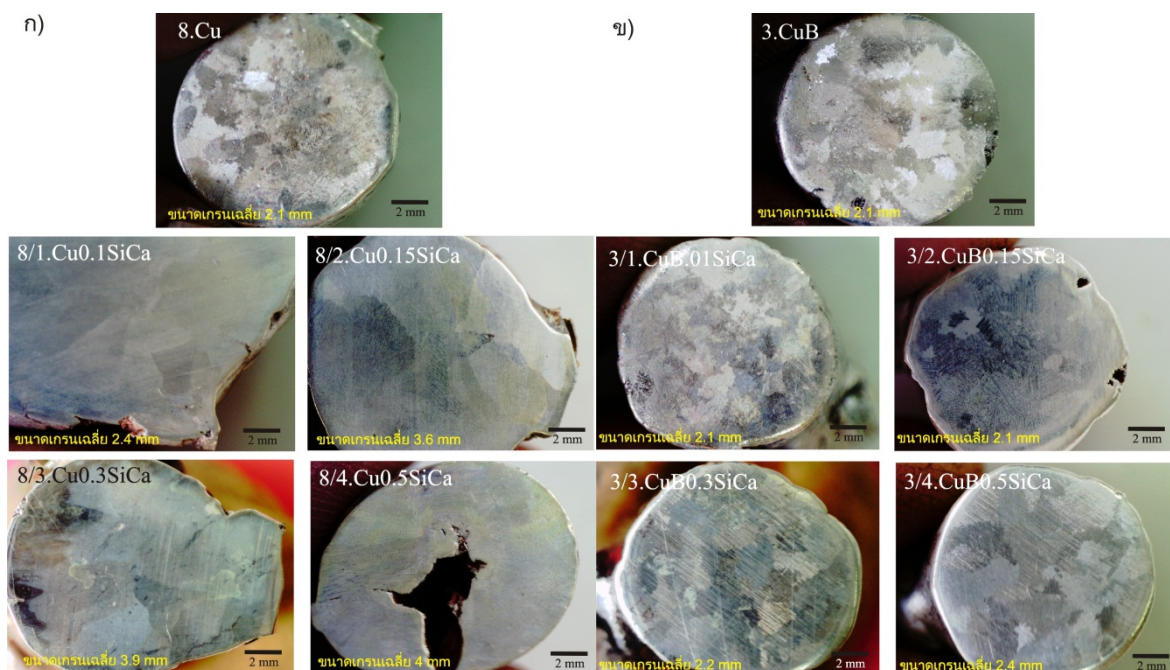
จากรูป 4.19 ก. พบเกรนโตขึ้นเนื่องจากการเติมสารประกอบซิลิคอน สำหรับชิ้นงาน 1(CuSn) โดยชิ้นงาน 1/4 CuSn0.5SiCa เกรนโตที่สุด ที่ขนาดเกรนเฉลี่ย 2.75 มม. มี ซิลิคอน 0.37 % แคลเซียม 302 ppm ในกลุ่ม 2 CuSnB พบการเติมสารประกอบซิลิคอนจะให้ผลการขยายของเกรนในช่วงการควบคุมซิลิคอนมากกว่า 0.3 % ขึ้นไป รวมถึงพบชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเล็กลงจากเดิมขนาดเกรนเฉลี่ยที่ 2.3 มม. (2 CuSnB) เป็น 0.75 มม.(2/1 CuSnB0.1SiCa) มีซิลิคอน 0.07% แคลเซียม 23.48 ppm และ 0.95 มม.(2/2 CuSnB0.15SiCa) มีซิลิคอน 0.11% แคลเซียม 60.23 ppm อย่างไรก็ตามพบว่า มีสมบัติทางกลของชิ้นงาน 2/1 CuSnB0.1SiCa 2/2 CuSnB0.15SiCa ในเกณฑ์ดี คือ ความแข็งแรงไม่ลดลง ดังรูป 4.22 จึงสามารถผลิตเพื่อใช้งานได้ดีในส่วนผสม 2/1 CuSnB0.1SiCa 2/2 CuSnB0.15SiCa

จากรูป4.19ข พบว่าเงินผสม ทองแดง อะลูมิเนียม เกิดการขยายตัวของเกรนเมื่อเติมสารประกอบซิลิคอนอย่างรวดเร็ว จาก ขนาดเกรน0.75 มม. (4 CuAl) เป็น 2.85 มม. (4/1CuAl0.1SiCa) จนถึง 3.4 มม.(4/4CuAl0.5SiCa) การเพิ่มขนาดเกิดจากการเพิ่มซิลิคอน โดยการเติมแคลเซียมเพียงอย่างเดียวไม่สามารถควบคุมขนาดเกรนไว้ได้ แต่หากเปรียบเทียบสมบัติทางกลพบว่ายังสามารถใช้งานในกลุ่ม 4/1CuAl0.1SiCa ได้ดี ส่วนกลุ่ม 4/2 - 4/4 นั้น มีสมบัติทางกลต่ำแต่มีความต้านทานการหมองสูงต้องให้งานกับชิ้นงานไม่รับน้ำหนักแต่ต้องการความต้านทานการหมองสูงเช่น จี้ ต่างหู โดยใช้ผลิตเส้นสร้อยเงินจากการแปรรูปไม่ได้ สำหรับเงินกลุ่ม 5CuAlB เนื่องจากมี โบรอนร่วมกับ แคลเซียม ควบคุมขนาดเกรนได้ดี คือแม้จะมีSi สูง ยังไม่เกิดการขยายตัวของเกรน เช่นใน 5/4CuAlB0.5SiCa ที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 0.75 มม. จากเดิม 0.67 มม. (5CuAlB) รวมถึงมีสมบัติทางกลสูงสามารถใช้งานได้ดีจนถึงส่วนผสมของชิ้นงาน 5/4CuAlB0.5SiCa ที่มีSi 0.36% Ca 596 ppm

จากรูป 4.19 ค. ชิ้นงาน 6CuZn พบการขยายตัวของเกรนจาก 2 มม. เป็น 3.1 มม. (6/4 CuZn0.5SiCa) เนื่องจากซิลิคอนเพิ่มขึ้นโดยแนวโน้มการเปลี่ยนเหมือนที่เกิดในชิ้นงาน 4 CuAl ดังนั้นชิ้นงานที่ยังสามารถใช้งานได้คือ 6/1CuZn0.1SiCa ซึ่งมี Si 0.06% Ca 35ppm สำหรับชิ้นงานที่มีการเติม Ca ร่วมกับ B เช่น 7/1 CuZnB0.1SiCa ถึง 7/4 CuZnB0.5SiCa จะพบการขยายตัวของเกรนช้าลงเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิคอน โดยขนาดเกรนใหญ่ที่สุดคือ 3.55 มม. (7/4 CuZnB0.5SiCa มี Si 0.36 % Ca 443 ppm) หากพิจารณาความสามารถในการใช้งานพบว่า 6/1CuZn0.1SiCa และ 7/1 CuZnB0.1SiCa มีความเหมาะสมในการใช้งานเนื่องจากความแข็งแรงไม่ลดลงมาก มีอัตราการยืดตัวไม่ลดลง ซึ่งเกิดจากโครงสร้างจุลภาคยังไม่เกิดโครงตาข่ายของเฟส β ดังรูป 4.40



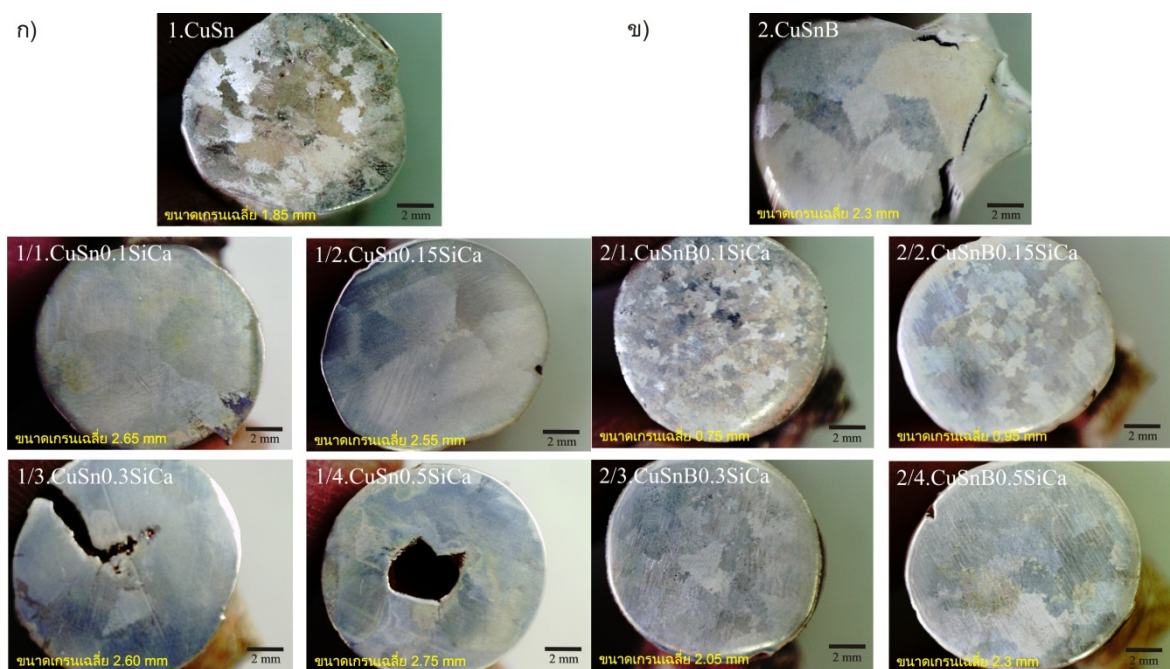
รูปที่ 4.18 แสดงขนาดเกรนโดยรวมของเงินผสมอัลลอยทดสอบเกรด 950



รูปที่ 4.19 แสดงขนาดเกรนโดยรวมของเงินผสมอัลลอยทดสอบร่วมกับสารประกอบซิลิคอน

ก) 8(Cu) และ 8/1(Cu0.1SiCa) – 8/4(Cu0.5SiCa)

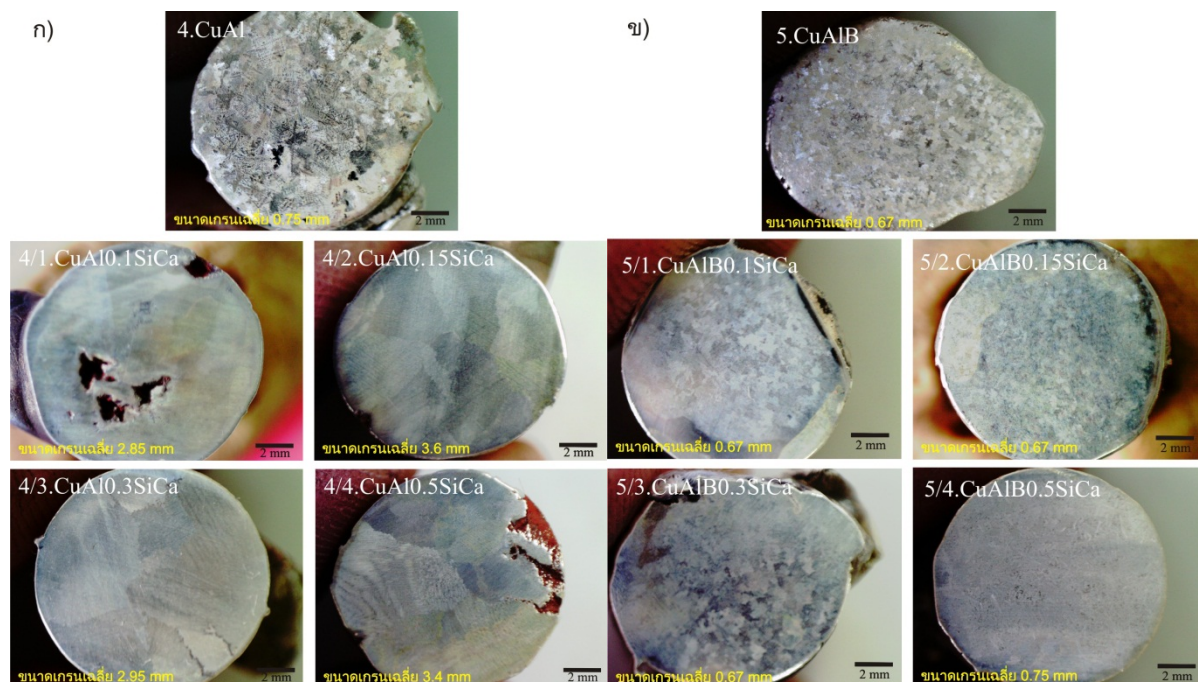
ข) 3(CuB) และ 3/1(CuB0.1SiCa) – 3/4(CuB0.5SiCa)



รูปที่ 4.19 ก แสดงขนาดเกรนโดยรวมของเงินผสมอัลลอยทดสอบร่วมกับสารประกอบซิลิคอน

ก) 1(CuSn) และ 1/1(CuSn0.1SiCa) – 1/4(CuSn0.5SiCa)

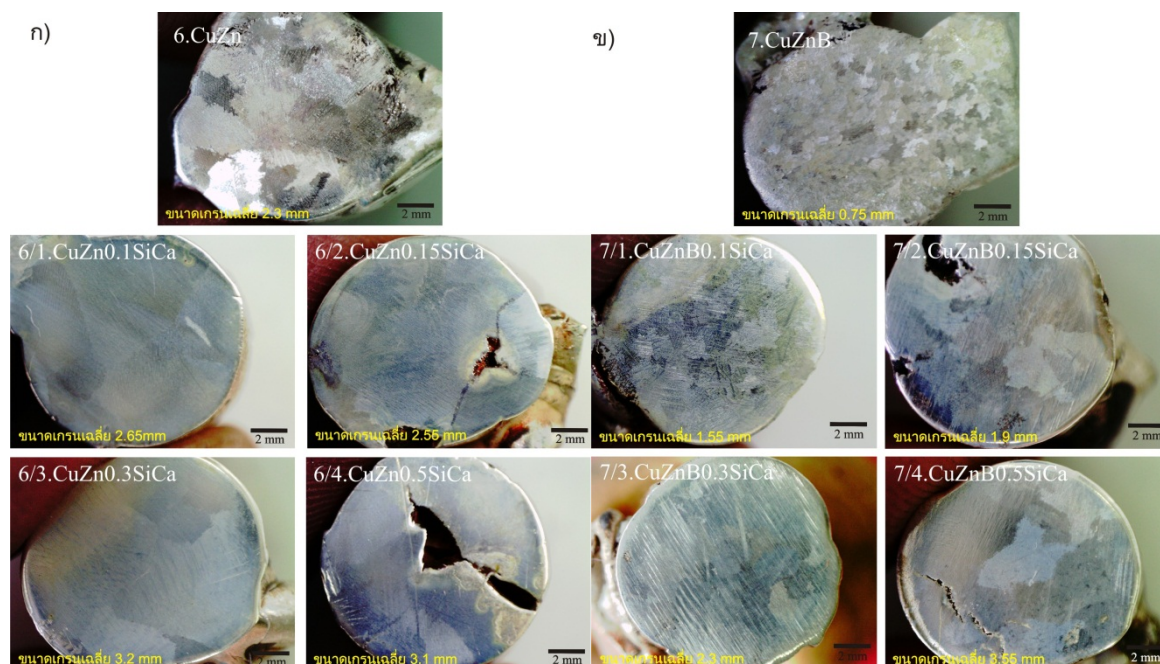
ข) 2(CuSnB) และ 2/1(CuSnB0.1SiCa) – 2/4(CuSnB0.5SiCa)



รูปที่ 4.19 ข แสดงขนาดเกรนโดยรวมของเงินผสมอัลลอยทดสอบร่วมกับสารประกอบซิลิคอน

ก) 4(CuAl) และ 4/1(CuAl0.1SiCa) – 4/4(CuAl0.5SiCa)

ข) 5(CuAlB) และ 5/1(CuAlB0.1SiCa) – 5/4(CuAlB0.5SiCa)



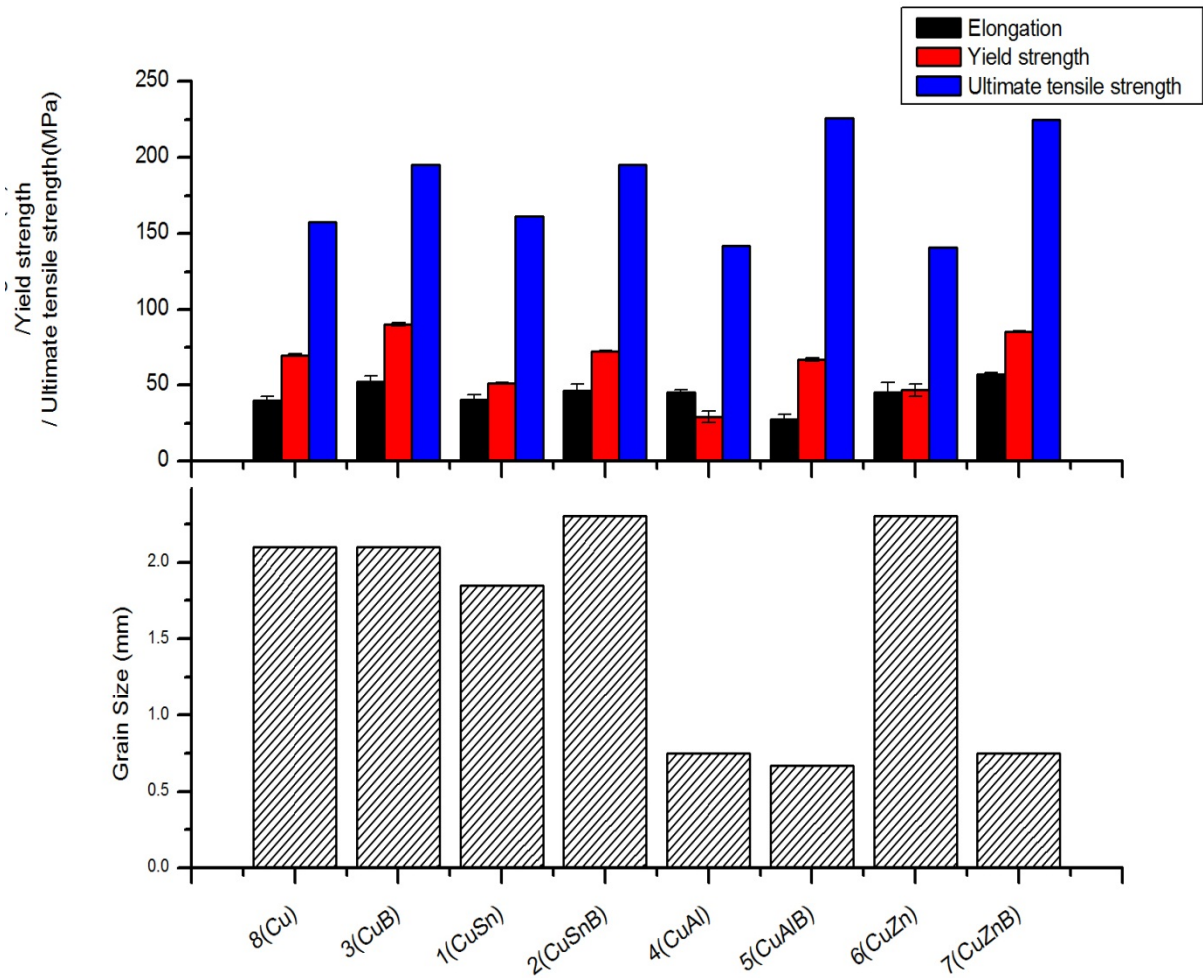
รูปที่ 4.19 ค แสดงขนาดเกรนโดยรวมของเงินผสมอัลลอยทดสอบร่วมกับสารประกอบซิลิคอน

ก) 6(CuZn) และ 6/1(CuZn0.1SiCa) – 6/4(CuZn0.5SiCa)

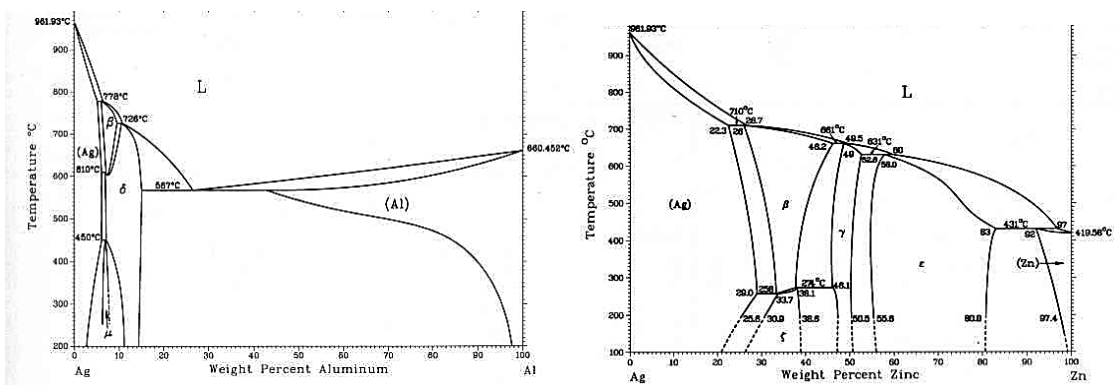
ข) 7(CuZnB) และ 7/1(CuZnB0.1SiCa) – 7/4(CuZnB0.5SiCa)

สำหรับการพิจารณาผลการเติมดีบุก สังกะสี อะลูมิเนียม โบรอน และสารประกอบซิลิคอน ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มคือ

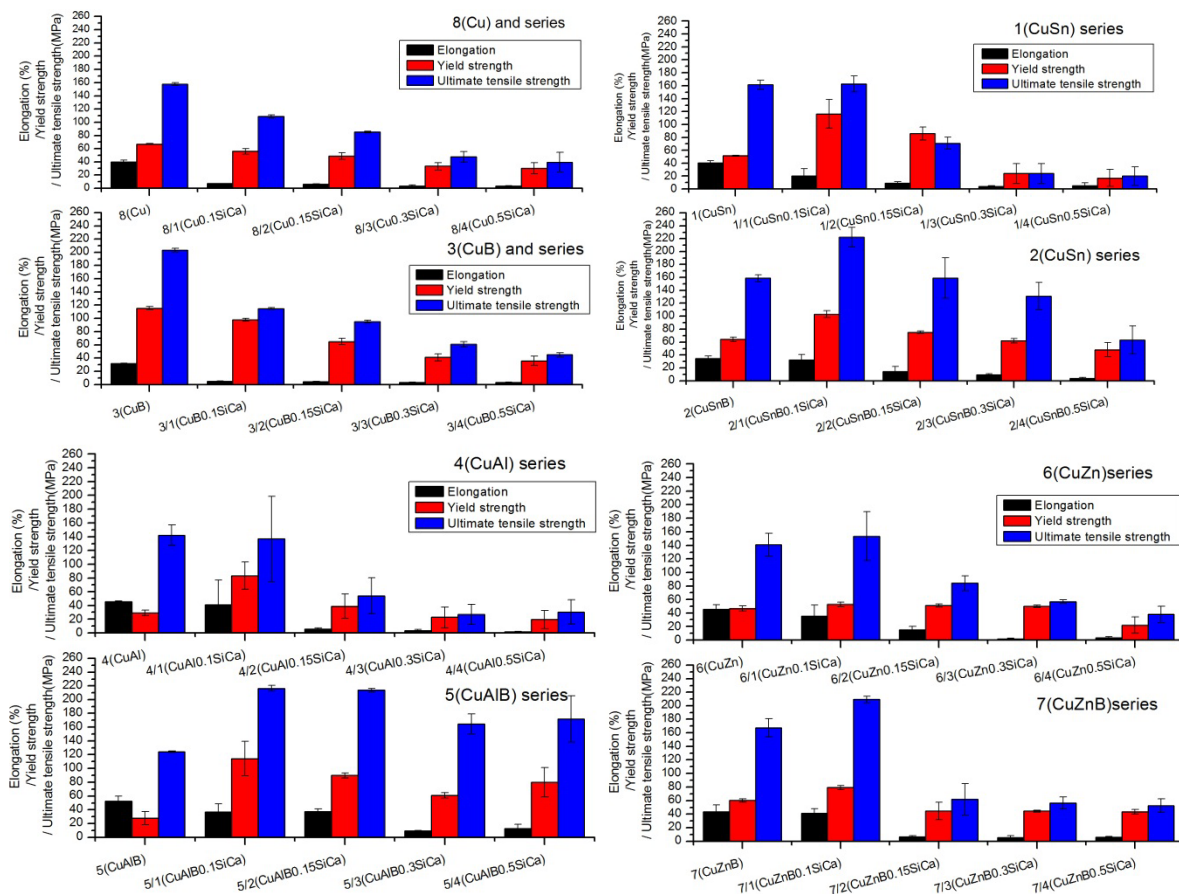
- 1 กลุ่มธาตุเพิ่มอัตราการยืดตัว ลดความแข็งแรงของเงินผสมทองแดง ได้แก่ อะลูมิเนียม โบรอนและ สังกะสี โดยการเติมอะลูมิเนียมในเงินผสมทองแดงพบว่า มีขนาดเกรนลดลง ลดลง 64.76% โดยขนาดเกรนเปลี่ยนแปลงจาก 2.1 มม.(ชิ้นงาน8(Cu)) เป็น 0.75 มม. (ชิ้นงาน4(CuAl)) แต่กลับมีความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความต้านทานแรงดึงที่จุดครากลดลงเป็น 142 และ 29.3 MPaตามลำดับ และมีค่าอัตราการยืดตัวสูงขึ้นไปเป็น 45.67 % (ดังรูปที่ 4.20) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงนี้สัมพันธ์กับกลไกการสร้างสารละลายของแข็งในเงินเนื่องจาก อะลูมิเนียมสามารถละลายได้ดีในเงินจนถึง ประมาณ 3 %โดยน้ำหนักทำให้เงินที่ผสมอะลูมิเนียมจะแสดงความอ่อนนิ่มและ มักมีความแข็งแรงต่ำลง (ดังรูปที่ 4.21) โดยลักษณะดังกล่าวจะพบได้ในเงินที่ผสมทองแดงร่วมกับ สังกะสี หรือ อะลูมิเนียม ดังแผนภูมิสมดุลในรูปที่ 30 ส่วนสังกะสี ส่งผลลดความต้านทานแรงดึงสูงสุดและ ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก เป็น 140.67 และ 46.67 MPa ตามลำดับ โดยมีค่าอัตราการยืดตัวสูงขึ้นไปเป็น 45.67 % สำหรับโบรอนส่งผลเพิ่มความแข็งแรงในเงินผสมทองแดงในทุกกรณีการเติมโบรอน และไม่ส่งผลต่ออัตราการยืดตัวดังที่จะพบในดีบุก ดังรูปที่ 4.20
- 2 กลุ่มธาตุลดอัตราการยืดตัว เพิ่มความแข็งแรงของเงินผสมทองแดง ได้แก่ ดีบุกและโบรอน โดยการเติมดีบุกในเงินผสมทองแดงมักพบการแยกตัวของดีบุกเข้าไปรวมตัวกับทองแดงเป็นส่วนใหญ่ ดังผลการศึกษาของ คุณสงวนลักษณ์ โฉ่ววานิชย์เจริญ[4] โดยการเติมดีบุกในเงินผสมทองแดงพบว่า มีขนาดเกรนลดลง ลดลง 11.9% โดยขนาดเกรนเปลี่ยนแปลงจาก 2.1 มม.(ชิ้นงาน8(Cu)) เป็น 1.85 มม. (ชิ้นงาน1(CuSn)) แต่กลับมีความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความต้านทานแรงดึงที่จุดครากเพิ่มขึ้นเป็น 161.3 และ 51.3 MPaตามลำดับ จะสังเกตว่า การเติมดีบุกมักเพิ่มความต้านทานแรงดึงสูงสุดได้ดี แต่ในบางกรณียังคงลดค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดครากลง ดังในชิ้นงาน 1(CuSn) เนื่องจากดีบุกมักรวมตัวกับ ทองแดงเกิดเฟสที่สองที่ไม่มีการเชื่อมต่อกับโครงสร้างพื้นฐาน(incoherent precipitation) จึงมีลักษณะเหมือนเม็ดทรายแทรกในเนื้อเงินส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก และสูงสุดลดลง และมักพบรอยอนุภาคมีสีคล้ายที่ผิวรอยแตกของชิ้นงานทดสอบแรงดึง สำหรับโบรอน จะเพิ่มความต้านทานแรงดึงสูงสุดในทุกกรณี และสามารถลดขนาดเกรนได้ดีในกลุ่มอัลลอย เงินผสมทองแดง ร่วมกับอะลูมิเนียมหรือ สังกะสี โดยในเงินผสมทองแดง อะลูมิเนียม (4(CuAl)) สามารถลดขนาดเกรนจาก 0.75 มม. เป็น 0.67 มม. และในเงินผสมทองแดง สังกะสี(6(CuZn)) สามารถลดขนาดเกรนจาก 2.3 มม. เป็น 0.75 มม.ซึ่งในกลุ่มที่มีการลดขนาดเกรนจะพบการเพิ่มของค่าความแข็งแรงทั้งสองประเภทในวัสดุอย่างชัดเจน
- 3 กลุ่มธาตุลดอัตราการยืดตัว ลดความแข็งแรงของเงินผสมทองแดง ได้แก่ สารประกอบซิลิคอน โดยในงานวิจัยนี้มีธาตุร่วมเป็นแคลเซียม การเพิ่มสารประกอบซิลิคอนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคเกิดเฟสที่สองที่มีทองแดงสูงร่วมกับซิลิคอนเพิ่มขึ้น โดยรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของเฟสจะเกิดในลักษณะเพิ่มปริมาณและ แยกตัวเป็นโครงตาข่าย ล้อมรอบโครงสร้างพื้นที่มีความเหนียวสูงทำให้สมบัติทางกลของวัสดุลดลงทั้ง อัตราการยืดตัวและความแข็งแรง จากรูปที่ 4.22 จะพบว่า การเพิ่มปริมาณซิลิคอนทำให้ความต้านทานแรงดึงลดลงและ อัตราการยืดตัวต่ำลงในทุกกรณี โดยชิ้นงานกลุ่มเงินผสมทองแดงอะลูมิเนียมหรือสังกะสี จะมีสมบัติทางกลลดลงน้อยและยังคงความเป็นไปได้ในการใช้งานได้ดีกว่าชิ้นงานกลุ่มอื่น โดยเฉพาะในการเติมสารประกอบซิลิคอนที่ควบคุมซิลิคอนไม่เกิด 0.15 %โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.20 แสดงสมบัติทางกลที่ตรวจสอบด้วยการทดสอบแรงดึงที่อัตราเร็ว 0.75 มม/นาที ของชิ้นงานทดสอบเงิน 950

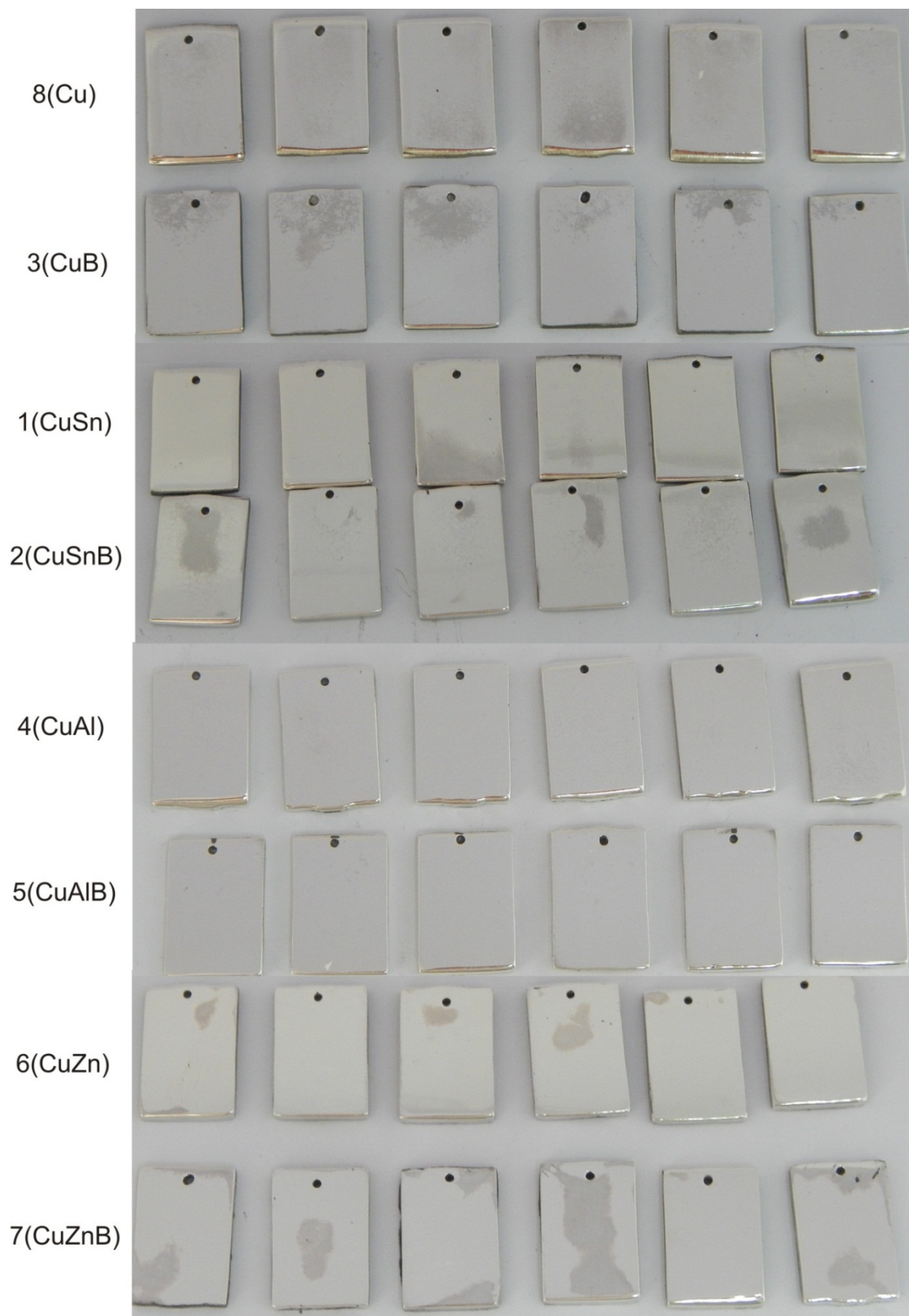


รูปที่ 4.21 แผนภูมิสมดุระหว่าง เงิน-อะลูมิเนียม และ เงิน-สังกะสี (13)

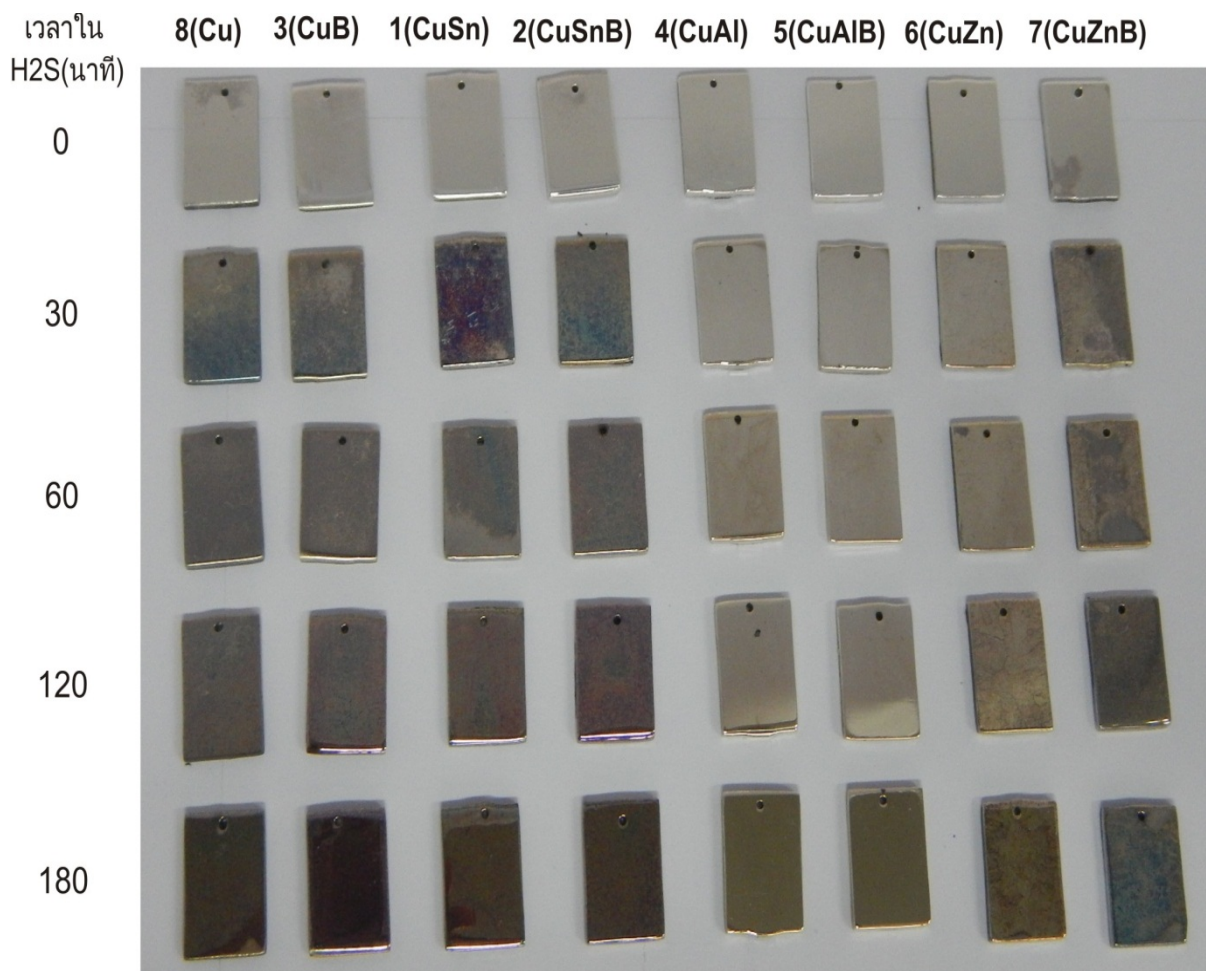


รูปที่ 4.22 แสดงสมบัติทางกลที่ตรวจสอบด้วยการทดสอบแรงดึงที่อัตราเร็ว 0.75 มม/นาที ของชิ้นงานทดสอบเงิน 950ผสมสารประกอบซิลิคอน

จากรูปที่ 4.22 ชิ้นงานกลุ่มที่คงรักษาสมบัติทางกลได้ดีที่สุดเป็นกลุ่ม 5(CuAlB) โดยยังคงมีค่าความแข็งแรงที่จุดครากจุดสูงสุด มากกว่าในกรณีอื่นคือ ชิ้นงาน 5/4(CuAlB0.5SiCa) มี ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด 172 MPa ความต้านทานแรงดึงจุดคราก 79.7MPa อัตราการยืดตัว 12.8 (จากเดิมชิ้นงาน 5(CuAlB)มี ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด 124 MPa ความต้านทานแรงดึงจุดคราก 28 MPa อัตราการยืดตัว 52.7%) รวมถึงในเพิ่มปริมาณสารประกอบซิลิคอนจะมีการลดลงของสมบัติทางกลน้อยที่สุดจึงมีความเป็นไปได้ในการใช้งานที่อัตราการเติมสารประกอบซิลิคอนที่ปริมาณสูงได้ดี คือในช่วงปริมาณซิลิคอนไม่เกิน 0.3 % โดยน้ำหนัก แต่ต้องพิจารณาผลการตรวจสอบความต้านทานการหมองรวมด้วย ชิ้นงาน 1 2 6 และซึ่งเป็นกลุ่มเงินผสมทองแดงร่วมกับสังกะสี หรือดีบุก จะพบว่าสมบัติทางกลลดลงเร็วเมื่อเพิ่มซิลิคอน โดยปริมาณซิลิคอนที่นำใช้งานจึงไม่ควรเกิน 0.15 % โดยน้ำหนัก ส่วนเงินผสมทองแดงควรควบคุมปริมาณซิลิคอนไม่เกิน 0.1% โดยน้ำหนัก เนื่องจากสมบัติทางกลลดลงอย่างรวดเร็ว และการหลีกเลี่ยงโครงสร้างโครงตาข่ายของเฟส β ที่มีพบในการเติมสารประกอบซิลิคอนตั้งแต่ 0.3%Si ขึ้นไป การเติมโบรอนทำให้การลดลงของสมบัติทางกลเมื่อเพิ่มสารประกอบซิลิคอนมีแนวโน้มน้อยลงในทุกกลุ่มการศึกษา อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องพิจารณาผลการศึกษากการใช้งานด้านอื่นเช่นความต้านทานการหมอง ผิวหลังหล่อ และความสามารถในการผลิตร่วมด้วยเพื่อป้องกันปัญหาในการผลิตที่เกิดขึ้นต่อไป ดังเช่นตัวอย่างในรูป 4.23 ชิ้นงานที่มีผิวขัดแต่งไม่มีฝ้าแดงคือ 4(CuAl) และ 5(CuAlB)



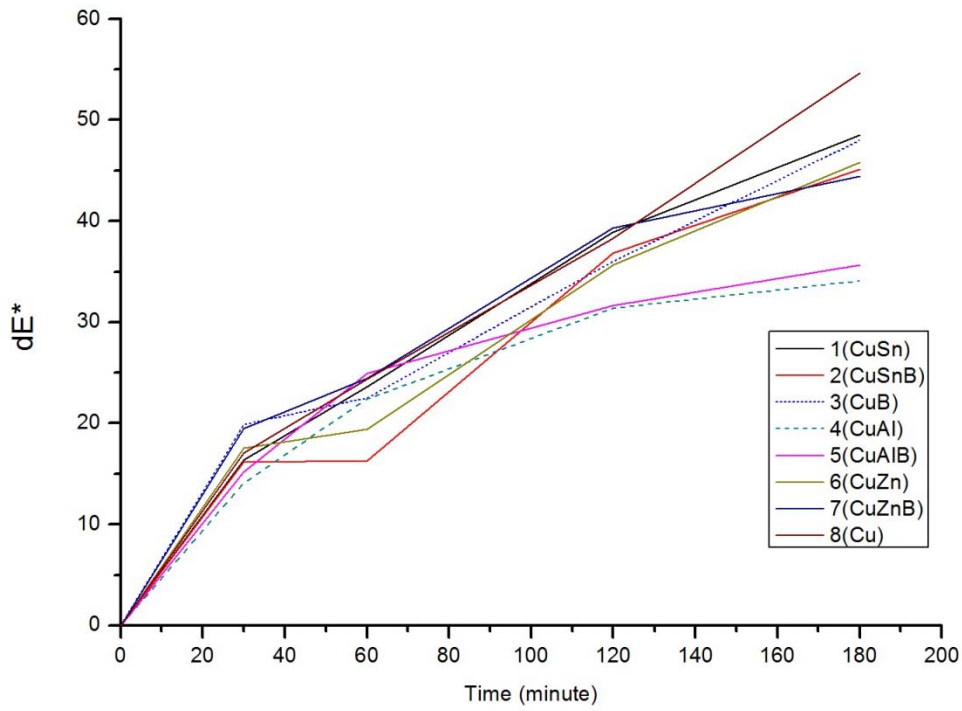
รูปที่ 4.23 แสดงผลชิ้นงานโลหะเงินผสมธาตุต่างๆ ที่มีโบรอนและไม่เติมโบรอนหลังการขัดทั้ง 8 ชุด



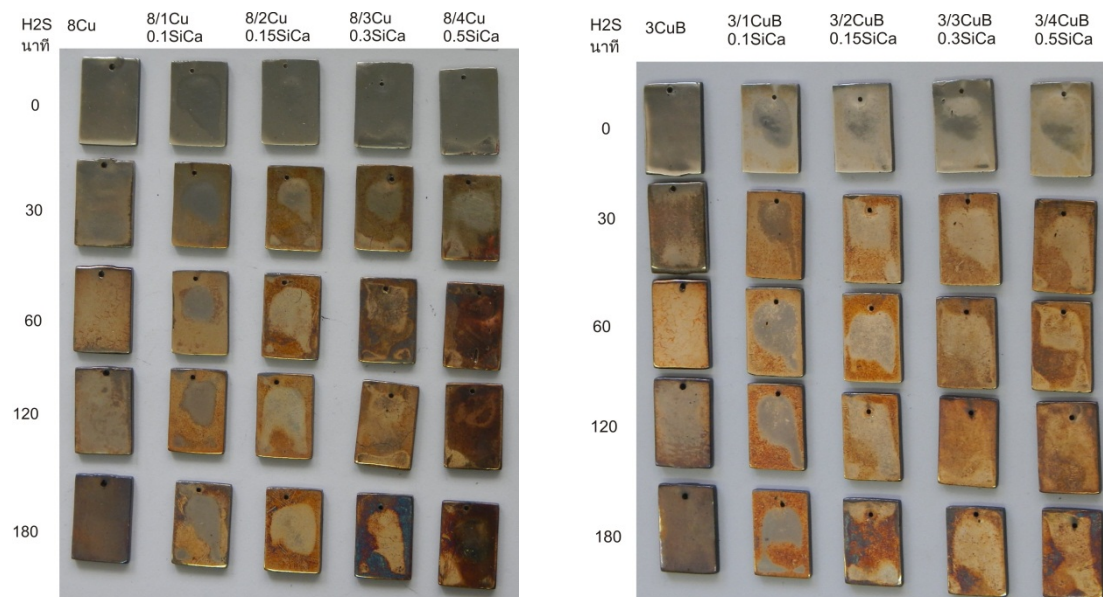
รูปที่ 4.24 แสดงผลการทดสอบกันหมองของชิ้นงานทดสอบเงินผสมธาตุต่างๆ ทั้ง 8 ชุด

รูปที่ 4.24 และ 4.25 แสดงผลการทดสอบกันหมองของชิ้นงานทดสอบเงิน 950 ทั้ง 8 ชุด(ไม่เติมสารประกอบซิลิคอน) พบว่า กลุ่มที่มีความแตกต่างของสี(dE^*)เนื่องจากการหมองน้อยหรือมีความต้านทานการหมองสูงในช่วงการทดสอบในบรรยากาศ H₂S นาน 3 ชม. ได้แก่ 4(CuAl) 5(CuAlB) ส่วนกลุ่มที่มีความแตกต่างของสีเนื่องจากการหมองน้อยในช่วงการทดสอบในบรรยากาศ H₂S นาน 1 ชม. แรกคือกลุ่ม 6(CuZn) และ 7(CuZnB) หากพิจารณาเวลาต่อการหมองจะพบว่า กลุ่ม 4(CuAl) 5(CuAlB) มีความน่าสนใจเพื่อผลิตเนื่องจากมีอัตราการหมองต่ำ และ ลักษณะฟิล์มมีสีเหลืองเทา หลุดลอกได้ง่ายด้วยการเช็ดถูหรือจากการสัมผัส โดยลักษณะดังกล่าวจะพบในเงินผสมกลุ่ม 6(CuZn) และ 7(CuZnB) ในช่วงการทดสอบในบรรยากาศ H₂S นาน 1 ชม. แรก และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเงินผสมกลุ่ม 6(CuZn) และ 7(CuZnB) จะพบฟิล์มหนาสีคล้ำถึงดำ เกาะติดผิวงาน อย่างไรก็ตาม ฟิล์มของชิ้นงาน 4(CuAl) 5(CuAlB) จะมีสีเหลืองทำให้มีค่าความแตกต่างของสี(dE^*) สูงดังรูปที่ 4.24 จากการศึกษาคาดว่า เป็น Al₂O₃ ดังผลการศึกษาชั้นฟิล์มด้วย Raman spectroscopy ในรูป 4.27 ซึ่งพบ ยอดพีคของ Al₂O₃ ในชิ้นงาน 4(CuAl) 5(CuAlB) ทั้งผ่านและไม่ผ่านการทดสอบการหมอง รูป 4.28 ยืนยันการพบ ออกซิเจน และ อะลูมิเนียมที่บริเวณผิวสูงกว่าปกติ ทำให้มีความเป็นไปได้ของการเกิด Al₂O₃ ที่ผิวฟิล์ม ซึ่งเกิดฟิล์ม Al₂O₃ ตั้งแต่ในกรณีไม่ผ่านการทดสอบกันหมอง ทำให้ผลการกันหมองดีกว่าอัลลอยกลุ่มอื่น

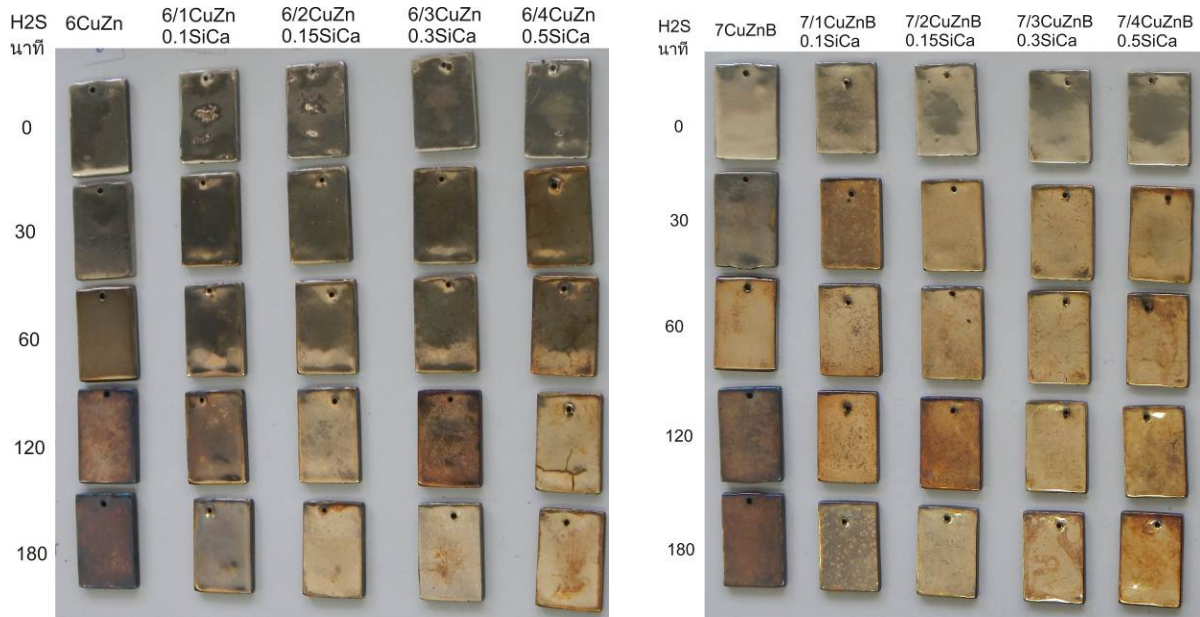
การพิจารณากลุ่มเงินผสม ทองแดงและ ดีบุก พบอัตราการหมองสูงและฟิล์มสีดำคล้ำที่ช่วงเวลาตั้งแต่ 1 ชั่วโมงขึ้นไป จาก ผลการวิเคราะห์ XPS EDS และ Raman spectroscopy พบไอออน Cu และ S ที่ผิวหมอง ดังรูปที่ 4.29 4.30 และ 4.31 ส่วนกลุ่มเงินผสมทองแดง และ สังกะสี พบอัตราการหมองที่เกิดอาจเนื่องจาก ฟิล์ม Ag₂S CuS ZnO เป็นต้น ดังรูปที่ 4.32



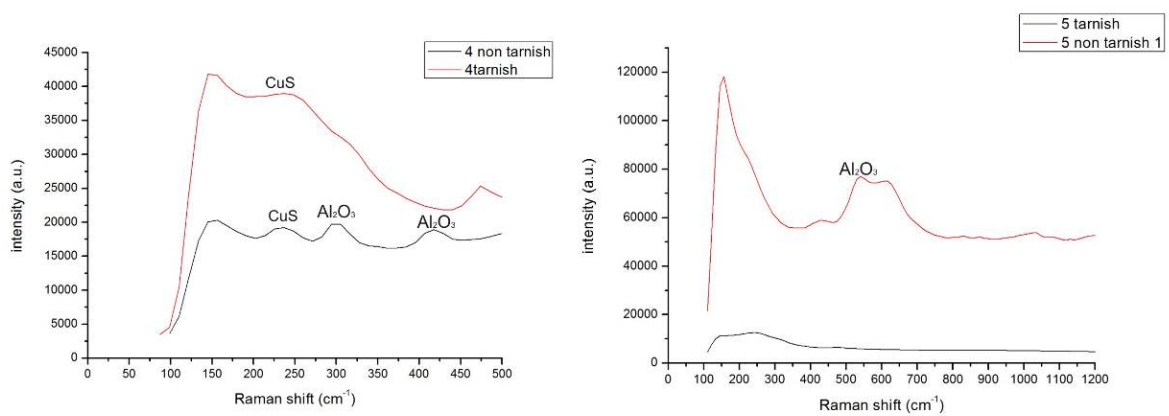
รูปที่ 4.25 แสดงค่าความแตกต่างสีผิวจากผลการทดสอบกันหมองของชิ้นงานทดสอบเงินผสมธาตุต่างๆ ทั้ง 8 ชุด



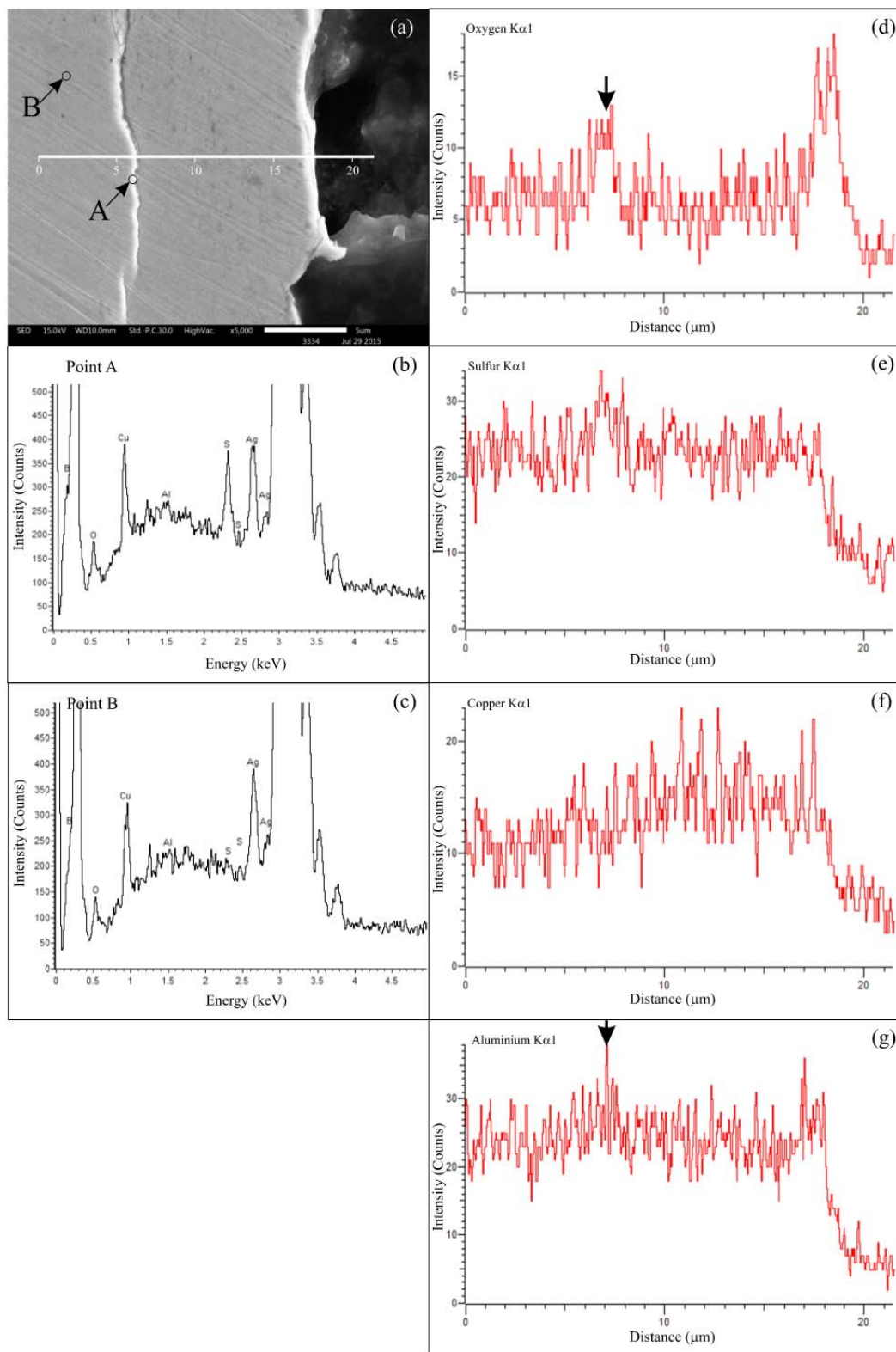
รูปที่ 4.26 แสดงผลการทดสอบกันหมองของชิ้นงานทดสอบเงินผสมธาตุต่างๆร่วมกับสารประกอบซิลิคอน ทั้ง 8 ชุด



รูปที่ 4.26(ต่อ) แสดงผลการทดสอบกันหมองของชิ้นงานทดสอบเงินผสมธาตุต่างๆร่วมกับสารประกอบซัลไฟคอน ทั้ง 8



รูปที่ 4.27 แสดงผลวิเคราะห์ฟิล์มจากการทดสอบกันหมองใน H_2S 2 ซม. ด้วย Raman spectroscopy ของชิ้นงานเงิน 4(CuAl) และ 5(CuAlB)



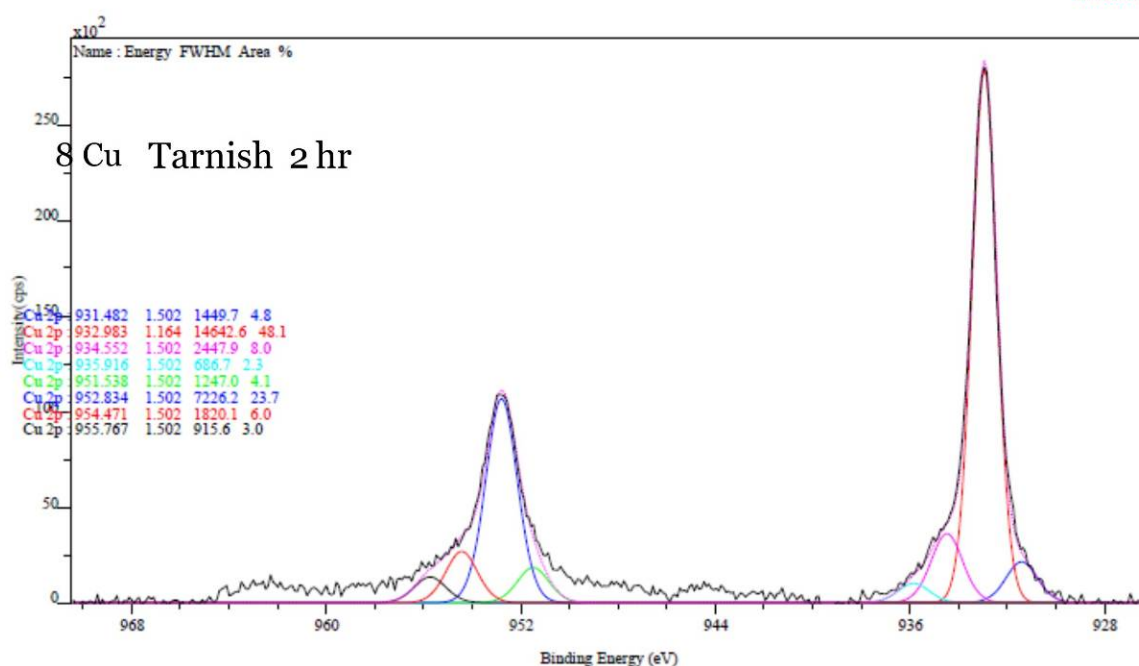
รูปที่ 4.28 การตรวจสอบเชิงเส้นและเชิงจุดบนฟิล์มทองที่ผิวของชิ้นงานเงิน 5(CuAlB) ผ่านบรรยากาศ H₂S2 ชม. a) ภาพแสดงภาคตัดขวางของผิวถ่ายด้วย SEI mode b)การทดสอบเชิงจุดที่ จุดA แสดงธาตุ Cu S Al O สูง c) การทดสอบเชิงจุดที่ จุดB แสดงโครงสร้างพื้นฐานเงิน d) การทดสอบเชิงตรวจหา oxygen K_{α1} e) การทดสอบเชิงตรวจหา sulphur K_{α1} f) การทดสอบเชิงตรวจหา copper K_{α1} g)การทดสอบเชิงตรวจหา aluminium K_{α1}

Non tarnish

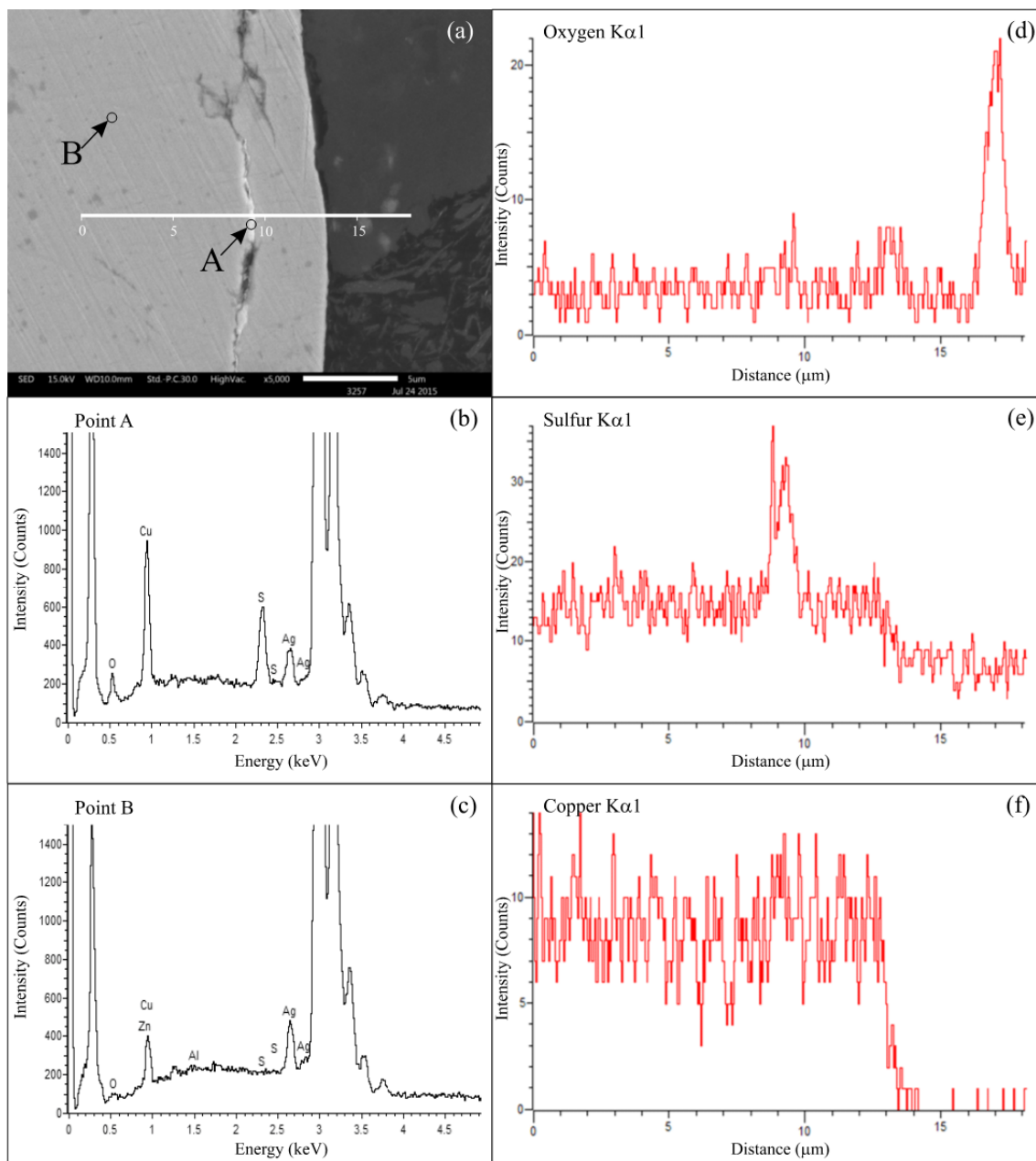
Peak	Type	Position BE (eV)	FWHM (eV)	Raw Area (cps eV)	RSF	Atomic Mass	Atomic Conc %	Mass Conc %
Cu 2p	Reg	932.300	3.330	271640.0	5.321	63.549	4.33	10.70
O 1s	Reg	531.300	3.034	148540.0	0.780	15.999	17.26	10.75
Ag 3d	Reg	368.300	1.582	715360.0	5.987	107.878	11.23	47.16
C 1s	Reg	284.300	2.844	191955.0	0.278	12.011	67.18	31.40

Tarnish 2 hr

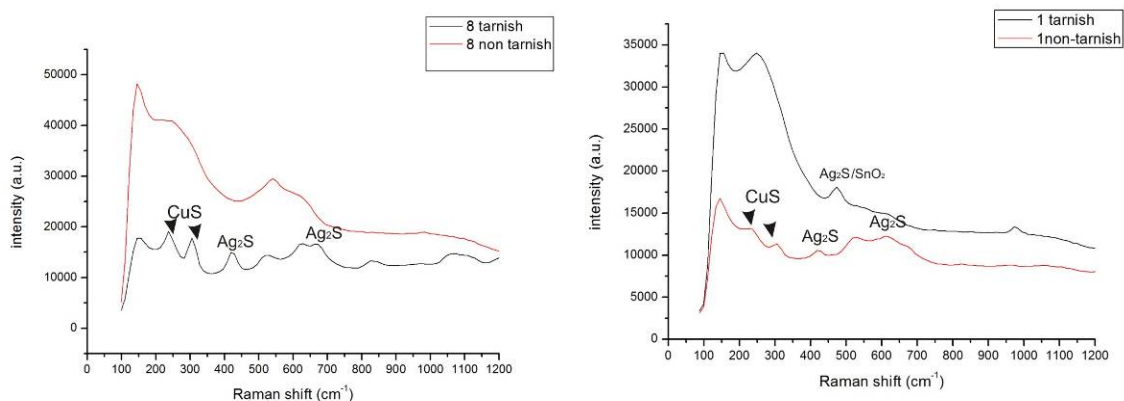
Peak	Type	Position BE (eV)	FWHM (eV)	Raw Area (cps eV)	RSF	Atomic Mass	Atomic Conc %	Mass Conc %
Cu 2p	Reg	932.400	2.297	412000.0	5.321	63.549	5.41	16.71
O 1s	Reg	531.400	2.830	119210.0	0.780	15.999	11.41	8.88
Ag 3d	Reg	368.400	1.579	360960.0	5.987	107.878	4.67	24.49
C 1s	Reg	284.400	2.307	257785.0	0.278	12.011	74.33	43.40
S 2p	Reg	162.400	2.370	35640.0	0.668	32.065	4.18	6.52



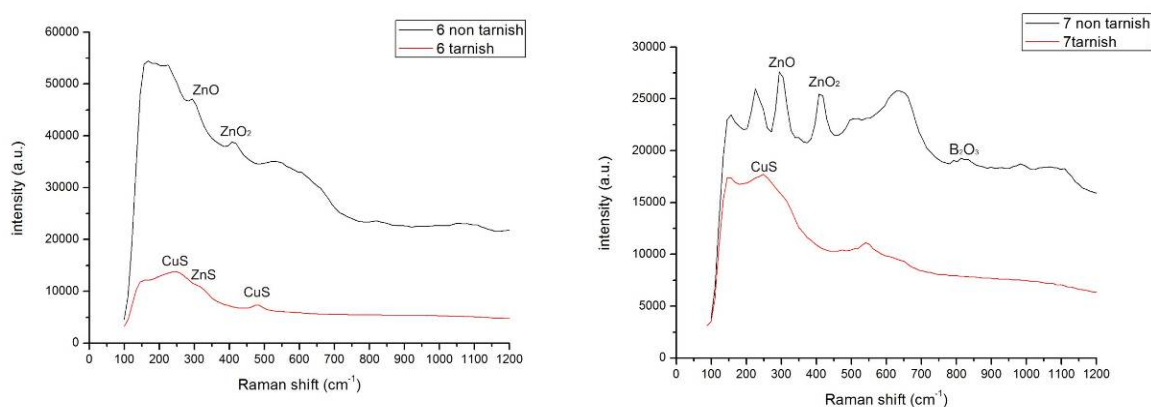
รูปที่ 4.29 แสดงผลตรวจสอบฟิล์ม ที่ผิวเงิน 8(Cu) ที่ผ่าน/ไม่ผ่านการทดสอบการหมองใน H₂S 2 ชม.



รูปที่ 4.30 การตรวจสอบเชิงเส้นและเชิงจุดบนฟิล์มทองที่ผิวของชิ้นงานเงิน 8(Cu) ผ่านบรรยากาศ H_2S 2 ชม. (a) ภาพแสดงภาคตัดขวางของผิวถ่ายด้วย SEI mode (b)การทดสอบเชิงจุดที่ จุดA แสดงธาตุ Cu S สูง (c) การทดสอบเชิงจุดที่ จุด B แสดงโครงสร้างพื้นฐานเงิน (d) การทดสอบเชิงตรวจหา oxygen $K_{\alpha 1}$ (e) การทดสอบเชิงตรวจหา sulphur $K_{\alpha 1}$ (f) การทดสอบเชิงตรวจหา copper $K_{\alpha 1}$



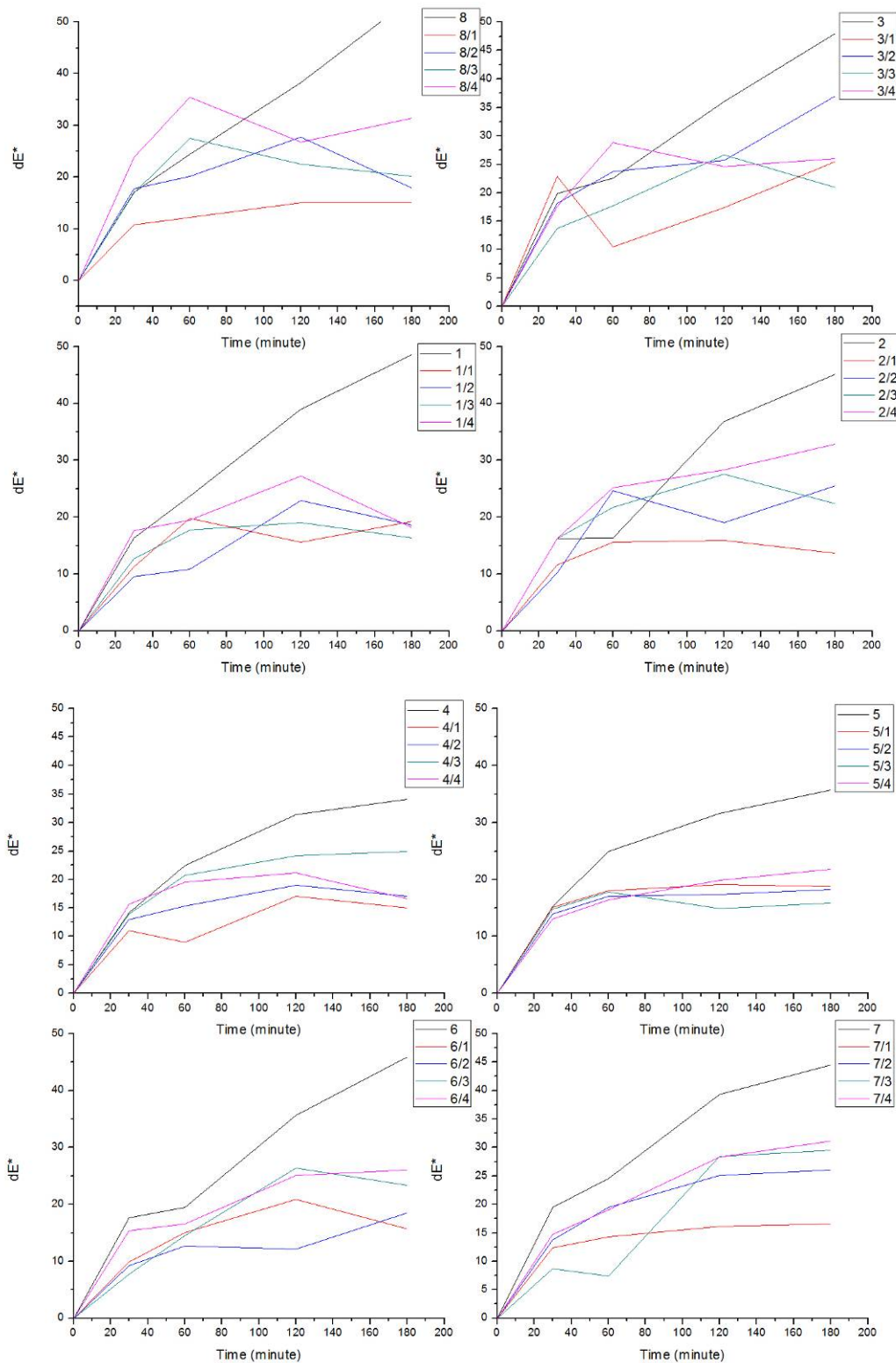
รูปที่ 4.31 แสดงผลวิเคราะห์ฟิล์มจากการทดสอบกันหมองใน H_2S 2 ชม. ด้วย Raman spectroscopy ของชิ้นงานเงิน 8(Cu) และ 1(CuSn)



รูปที่ 4.32 แสดงผลวิเคราะห์ฟิล์มจากการทดสอบกันหมองใน H_2S 2 ชม. ด้วย Raman spectroscopy ของชิ้นงานเงิน 6(CuZn) และ 7(CZnB)

รูปที่ 4.33 แสดงผลการทดสอบกันหมองของเงินทดลองผสมสารประกอบซิลิคอนในปริมาณแตกต่างกันพบว่า การเติมสารประกอบซิลิคอนทำให้เพิ่มความต้านทานการหมองส่งผลให้ค่าความแตกต่างของสีหลังทดสอบการหมอง ลดลงในทุกกรณีศึกษา โดยค่าความแตกต่างของสีหลังทดสอบการหมองจะลดลงมากที่สุดในกลุ่ม เบอร์ 5(CuAlB) 1(CuSn) และ 8(Cu) อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณสารประกอบซิลิคอนทำให้เกิดโครงตาข่ายของเฟสที่สองซึ่งมีทองแดงและซิลิคอนสูง ทำให้ชิ้นงานแข็ง และแตกร้าวเมื่อถูกแรงกระทำ ดังรอยแตกในรูปที่ 4.26 ซึ่งเกิดจากการตอกข้อชิ้นงานก็สามารถดึงรอยแตกขึ้นได้ สำหรับชิ้นงาน เบอร์ 5 (CuAlB) 7(CuZnB) มักพบว่าให้สมบัติทางกลที่สูงในช่วงการเติมสารประกอบซิลิคอนที่ควบคุมซิลิคอนไม่เกิน 0.3 % โดยน้ำหนัก

จากการศึกษาด้วย Energy dispersive spectroscopy (EDS) พบการเติมสารประกอบซิลิคอน ในเงินทำให้ซิลิคอน และ แคลเซียมละลายในแต่ละส่วนของโครงสร้างเงินซึ่งส่งผลต่อความต้านทานการหมองในเนื้อเงินซึ่งจะกล่าวต่อไปในช่วงการศึกษาโครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 4.33 แสดงค่าความแตกต่างสีผิวจากผลการทดสอบกันหมองของชิ้นงานทดสอบเงินผสมธาตุต่างๆร่วมกับสารประกอบซิลิโคน ทั้ง 8 ชุด

จากรูปที่ 4.24 และ 4.25 แสดงผลการทดสอบความต้านทานการหมองในบรรยากาศ H_2S ที่เวลา 0-3 ชม พบว่าสามารถแยกประเภทของเงินทดสอบตามความต้านทานการหมองได้ 3 กลุ่ม คือ

1 กลุ่มที่มีความต้านทานการหมองต่ำ ได้แก่ เงินผสมกลุ่ม 8(Cu), 3(CuB), 1(CuSn), 2(CuSnB) โดยในกลุ่มนี้สามารถเห็นคราบดำเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยากับ H_2S เร็วตั้งแต่ 30 นาทีที่สัมผัสบรรยากาศ H_2S และคราบหมองสีดำจะเพิ่มขึ้นจนที่เวลา 60 นาที

2 กลุ่มที่มีความต้านทานการหมองปานกลาง ได้แก่ เงินผสมกลุ่ม 6(CuZn) และ 7(CuZnB) โดยในกลุ่มนี้พบคราบสีเหลืองจนถึงเหลืองเข้มที่เวลาทดสอบ 30 นาที และคราบเหลืองจะเปลี่ยนเป็นสีดำมากเมื่อทดสอบนานกว่า 30 นาที และสีผิวจะเปลี่ยนเป็นสีเกือบดำในเวลา 180 นาที ลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นแนวโน้มการใช้สังกะสีสามารถเพิ่มความต้านทานการหมองได้ดีในช่วงแรกๆของการสวมใส่ แต่หากทิ้งคราบการหมองไว้นาน จะพบว่าคราบหมองเปลี่ยนเป็นสีดำ จะเริ่มทำลายผิวตัวเรือนและไม่สามารถเช็ดออกด้วยผ้าเช็ดเงินได้

3 กลุ่มที่มีความต้านทานการหมองสูง ได้แก่ เงินผสมกลุ่ม 4(CuAl) และ 5(CuAlB) กลุ่มนี้พบคราบสีเหลืองจางและยังรักษาความเงางามได้ดี เกิดขึ้นในช่วงการทดสอบ 30 -60 นาทีแรก และ คราบสีเหลืองที่พบจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองที่เข้มขึ้นและยังเงาอยู่จนการทดสอบถึงระยะเวลา 180 นาที โดยสามารถเช็ดคราบดังกล่าวจนชิ้นงานกลับมามีความเงางามได้ ลักษณะดังกล่าวแสดงความเป็นไปได้ของการละลายของอะลูมิเนียมในเนื้อเงินทำให้เพิ่มความต้านทานการหมอง และยังพบเม็ดแข็ง (Hard spot) ในชิ้นงานกลุ่ม 5(CuAlB) ซึ่งน่าจะเกิดการรวมตัวของธาตุผสมเกิดสารประกอบกึ่งโลหะได้ดังแผนภูมิสมดุลของอะลูมิเนียม กับ โบรอนในรูปที่ 4.34 จากการเกิดเม็ดแข็งที่พบทำให้สามารถสรุปข้อมูลเบื้องต้นสำหรับ เงินผสมกลุ่ม 5(CuAlB) สามารถใช้ผลิตชิ้นงานที่แสดงความซับซ้อนของลวดลายได้แต่ไม่สามารถผลิตเป็นชิ้นงานที่แสดงผิวเรียบกว้างมีความเงางามสูงได้เนื่องจากปัญหาเม็ดแข็งที่พบ

จากรูป 4.26 4.33 และตารางที่ 4.5 ยืนยันผลการมีซิลิคอนและแคลเซียมในเนื้อเงินเกรด 950เพิ่มความต้านทานการหมองได้ในทุกกรณีการเติมสารประกอบซิลิคอน โดยพบว่ากลุ่มที่มีความต้านทานการหมองสูงได้แก่

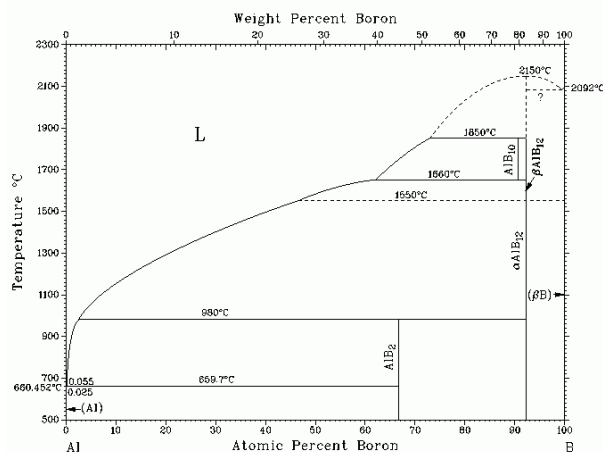
8/1Cu0.1SiCa 3/1CuB0.1SiCa

1/1CuSn0.1SiCa 1/2CuSn0.15SiCa 2/1CuSnB0.1SiCa 2/2CuSnB0.15SiCa

4/1CuAl0.1SiCa 4/2CuAl0.15SiCa 5/1 CuAlB0.1SiCa 5/2 CuAlB0.5SiCa 5/3CuAlB0.3SiCa

6/1CuZn0.1SiCa 6/2CuZn0.15SiCa 7/1CuZnB0.1SiCa 7/2 CuZnB0.15SiCa

ลักษณะดังกล่าวเป็นไปตามผลการศึกษาเบื้องต้น ที่กล่าวถึงการเพิ่ม Si จะเพิ่ม ความต้านทานการหมอง โดยจากผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค พบว่า Ca ละลายในMatrix และ Siละลายใน เฟสβ มากกว่าละลายใน Matrix ดังนั้นแนวโน้มการเพิ่มความต้านทานการหมองจะเกิดที่เฟสβ ดีกว่า Matrix แต่พบว่า Zn Al สามารถละลายได้ดีใน Matrix จึงเพิ่มความต้านทานการหมอง ส่วน Ca เพิ่มความต้านทานการหมองร่วมกับ Si แต่ยังพบการสร้างฟิล์มออกไซด์ ที่ผิวในการกัดกรด ตรวจสอบเกรน อย่างชัดเจนดังรูปที่ 4.19 จึงควรมีการควบคุมปริมาณการเติมให้เหมาะสม

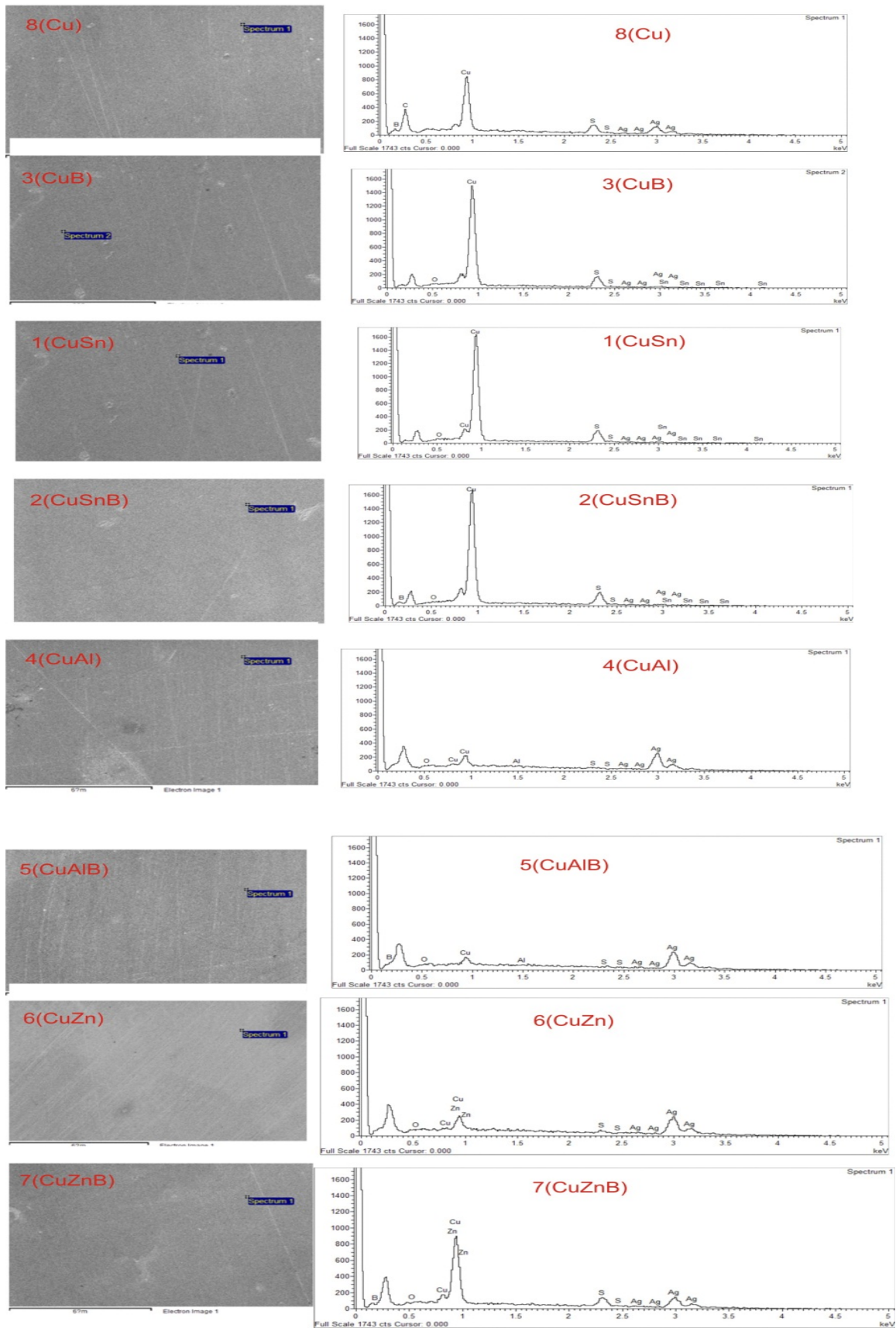


รูปที่ 4.34 แผนภูมิสมมูลของอะลูมิเนียม-โบรอน⁽²⁴⁾

จากรูปที่ 4.23 พบความแตกต่างของความต้านทานการหมองสูงที่เห็นเด่นชัดในกลุ่ม 4(CuAl) และ 5(CuAlB) ทำให้คณะผู้วิจัยมีความจำเป็นต้องตรวจสอบผิวหมองที่เกิดขึ้นโดยเบื้องต้นได้ตรวจสอบลักษณะสารประกอบด้วยรังสีเอกซเรย์ (EDS) และศึกษาลักษณะชั้นฟิล์มด้วย SEM ดังผลในรูปที่ 4.35 และตารางที่ 4.6 จากรูปแสดงการตรวจสอบผลชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการหมองที่ 0.5 และ 3 ชม ตามลำดับ เนื่องจากเป็นการศึกษาพื้นผิวทำให้ผู้วิจัยให้รังสีที่กำลัง 5 keV เพื่อให้เกิดการวิเคราะห์เฉพาะพื้นผิวเท่านั้น และศึกษาอัตราส่วนของพีค Ka ของ S / La ของ Ag ซึ่งพบว่า ในกลุ่ม 4(CuAl) 5(CuAlB) 6(CuZn) และ 7(CuZnB) มีอัตราส่วนของพีค ซัลเฟอร์ ต่อเงินต่ำกว่า ในกลุ่ม 8(Cu) 3(CuB) และ กลุ่ม 1(CuSn) 2(CuSnB) มาก โดยที่การสัมผัส H₂S 3 ชม ชิ้นงาน 4(CuAl) 5(CuAlB) 6(CuZn) และ 7(CuZnB) มีอัตราส่วนของพีค Ka_S/La_{Ag} 0.09 0.15 0.2 2.53 ตามลำดับ ในขณะที่ชิ้นงานกลุ่ม 8(Cu) 3(CuB) และ กลุ่ม 1(CuSn) 2(CuSnB) มีอัตราส่วนของพีค Ka_S/La_{Ag} 2.4 13.83 19.7 17.55 ตามลำดับ ซึ่งลักษณะดังกล่าวแสดงความเป็นไปได้ของการเกิดสารประกอบระหว่างเงินกับซัลเฟอร์ที่ลดลงในเงินผสมทองแดงร่วมกับอะลูมิเนียม ดังผลการพบ ยอดพีคของ Al₂O₃ ZnO ในรูปที่ 4.27 4.31 และ 4.32 กับชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบด้วย Raman spectroscopy

ตารางที่ 4.6 แสดงอัตราส่วนของพีค Ka_S/La_{Ag} ของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบในบรรยากาศ H₂S 0.5 และ 3 ชม.

ชิ้นงาน	H ₂ S 0.5 hrs.				H ₂ S 3 hrs.			
	Ka _S /La _{Ag}				Ka _S /La _{Ag}			
	Spectrum1	Spectrum2	Spectrum3	ค่าเฉลี่ย	Spectrum1	Spectrum2	Spectrum3	ค่าเฉลี่ย
8(Cu)	0.62	0.74	1.44	2.8	0.74	0.98	0.68	2.4
3(CuB)	0.06	1.02	0.99	2.08	6.88	2.97	3.98	13.83
1(CuSn)	0.17	0.25	0.28	0.7	10.66	6.03	3.01	19.7
2(CuSnB)	14.43	0.91	4.02	19.35	14.92	0.34	2.29	17.55
4(CuAl)	0.03	0.03	0.00	0.06	0.02	0.02	0.05	0.09
5(CuAlB)	0.02	0.03	0.02	0.06	0.03	0.09	0.04	0.15
6(CuZn)	0.02	0.01	0.03	0.06	0.09	0.06	0.04	0.2
7(CuZnB)	0.03	-0.03	0.01	0.02	0.54	1.27	0.76	2.57



รูปที่ 4.35 แสดงผลการตรวจสอบพื้นผิวหมองด้วย SEM และ EDS ผ่านการทดสอบการหมองในบรรยากาศ H_2S 3 ชม.

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM

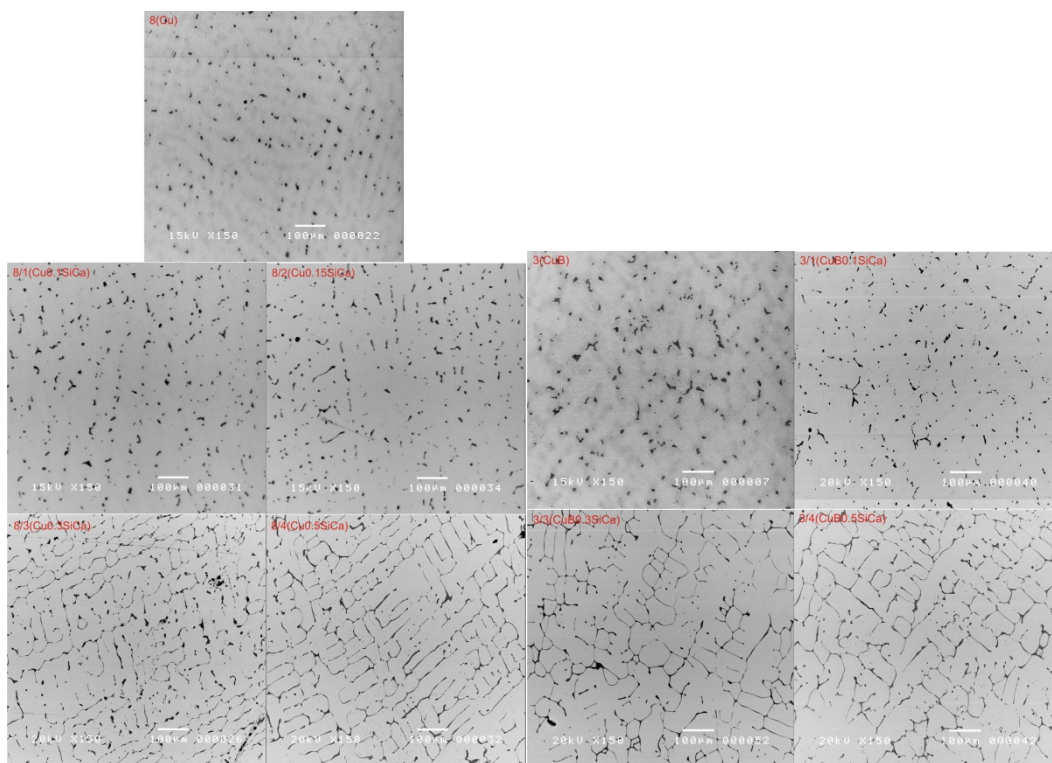
การพิจารณาโครงสร้างจุลภาคจะแบ่งการพิจารณาตามกลุ่มธาตุผสม คือ

1. กลุ่มเงินผสมทองแดง ได้แก่ 8(Cu) และ 3(CuB)

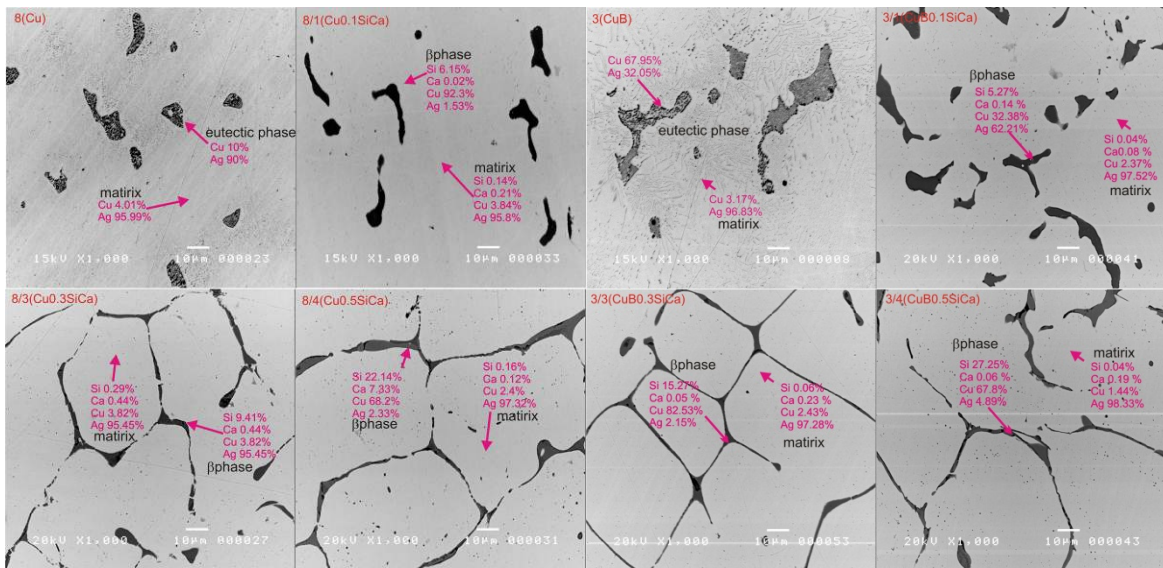
จากรูป 4.36 การเติม B ไม่ส่งผลต่อการกระจายตัวของ เฟสยูเทคติก โดยจะส่งผลให้ขอบเกรนยักดังรูปที่ 4.18 แต่ไม่มีผลต่อการลดขนาดเกรนหรือทำให้เนื้อเงินละเอียดขึ้น แต่เพิ่มความแข็งแรงให้วัสดุเงินผสมทองแดงได้ดี (ดังรูปที่ 4.20) ส่วนการเติมสารประกอบซิลิคอนทำให้ปริมาณซิลิคอนเพิ่มขึ้นส่งผลให้เฟสยูเทคติกเปลี่ยนรูปมีลักษณะมนกลม เรียกว่า เฟส β การเพิ่ม Si ร่วมกับ Ca ทำให้เกรนโตขึ้นในทุกกรณี การมี Si Ca ร่วม B ทำให้การโตของเกรนช้าลง(เมื่อเพิ่มปริมาณ Si) และเกิดการสะสม Si ในเฟส β เป็นหลัก ทำให้เฟส β เปลี่ยนรูปร่างเกิดโครงตาข่ายดังรูป 4.37 และส่งผลความต้านทานการหมองโดยเฉพาะในเฟส β ดีขึ้นจึงทำให้ค่า dE^* ลดลงอย่างเห็นได้ชัด(เมื่อเพิ่มสารประกอบซิลิคอน) โดย Ca ที่เพิ่มขึ้นจะสะสมในเนื้อเงิน Matrix ทำให้ความต้านทานการหมองเพิ่มขึ้นดังรูป 4.24 และ 4.25 แต่หากพิจารณาการกัดกรดจะพบฟิล์มออกไซด์ของแคลเซียมที่ผิวงาน ซึ่งจะเกิดที่ Matrix จึงควรควบคุมปริมาณ Ca ให้ต่ำ และยังสามารถพบการแตกหลังหล่อ(Hot tearing crack) มาก โดยเฉพาะในกรณี 8(Cu) ส่วนในกลุ่ม 3(CuB) จะมีแนวโน้มการแตกหลังหล่อน้อยลงเนื่องจากผลรวมของ โบรอน ซิลิคอน และแคลเซียม ทำให้ลดการขยายตัวของเกรน หากเติมสารประกอบซิลิคอน จำเป็นต้องเพิ่มเวลาดำเนินการหลังหล่อจาก 15 นาทีเป็น 30-60 นาที โดยขึ้นงานที่เหมาะสมใช้งานคือ

8/1Cu0.1SiCa มีปริมาณ Si 0.017 % ขนาดเกรน 2.4 มม.

3/1CuB0.1SiCa มีปริมาณ Ca 35.4 ppm Si 0.06 % ขนาดเกรน 2.1 มม.



รูปที่ 4.36 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 150 เท่าของชิ้นงานเงินผสม 8(Cu) และ 3(CuB) ผสมสารประกอบซิลิคอน ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM



รูปที่ 4.37 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1000 เท่าของชิ้นงานเงินผสม 8(Cu) และ 3(CuB) ผสมสารประกอบซิลิคอน ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM

2. กลุ่มเงินผสมทองแดง ดีบุกได้แก่ 1(CuSn) และ 2(CuSnB)

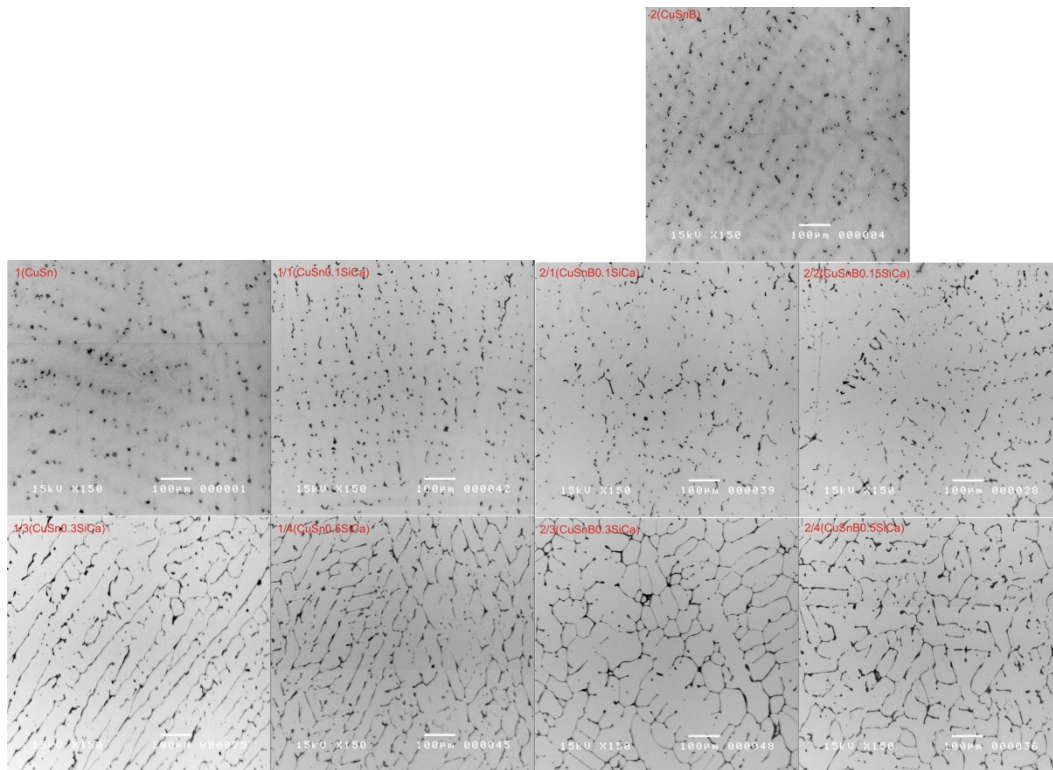
จากรูปที่ 4.38 โบรอนไม่ส่งผลต่อการกระจายตัวของ เฟสยูเทคติก และ ขนาดเกรน แต่ส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งแรง ดังรูปที่ 4.20 การเติม ดีบุก ในโครงสร้างจะพบการกระจายตัวของดีบุกในเฟส ยูเทคติก หรือ β มากกว่าใน Matrix การเพิ่ม Si ร่วมกับ Ca ทำให้เกรนโตขึ้นในทุกกรณี การเพิ่ม Si Ca ร่วม B ทำให้การโตของเกรนช้าลง(เมื่อเพิ่มปริมาณ Si) การเติม ดีบุกส่งผลให้ ความต้านทานแรงดึงสูงสุด เพิ่มขึ้นแต่ลด ความต้านทานแรงดึงจุดคราก และ อัตราการยืดตัว การเพิ่ม Si ร่วมกับ Ca ทำให้เกรนโตขึ้นในทุกกรณี การมี Si Ca ร่วม B ทำให้การโตของเกรนช้าลง(เมื่อเพิ่มปริมาณ Si) การเติม Si ในโครงสร้างมีแนวโน้มสะสมในเฟส β และ การเติม Ca จะสะสมใน Matrix เช่นเดียวกับกรณีของกลุ่มเงินผสมทองแดง 8(Cu) และ 3(CuB) ทำให้ความต้านทานการหมองเพิ่มขึ้นในภาพรวมแต่ยังคงต้องควบคุมปริมาณ Ca ที่จะเกิดคราบออกไซด์ที่ผิวงานได้ในกรณีใส่มากเกินไป รวมถึงต้องระวังการเกิด โครงตาข่ายของเฟส β ทำให้สมบัติทางกลไม่เหมาะสมในการผลิตเครื่องประดับและสามารถพบการแตกหลังหล่อได้ จึงยังจำเป็นต้องเพิ่มเวลาการล้างปูนเป็น 60 นาที โดยชิ้นงานที่เหมาะสมใช้งานคือ

1/1CuSn0.1SiCa มีปริมาณ Ca 75.3 ppm Si 0.03 % ขนาดเกรน 2.65 มม.

1/2CuSn0.15SiCa มีปริมาณ Ca 43 ppm Si 0.07 % ขนาดเกรน 2.55 มม.

2/1CuSnB0.1SiCa มีปริมาณ Ca 23.48 ppm Si 0.07 % ขนาดเกรน 0.78 มม.

2/2CuSnB0.15SiCa มีปริมาณ Ca 60.23 ppm Si 0.11 % ขนาดเกรน 0.95 มม.



รูปที่ 4.38 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 150 เท่าของชิ้นงานเงินผสม 1(CuSn) และ 2(CuSnB)ผสมสารประกอบซิลิคอนถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM

3. กลุ่มเงินผสมทองแดง สังกะสี ได้แก่ 6(CuZn) และ 7(CuZnB)

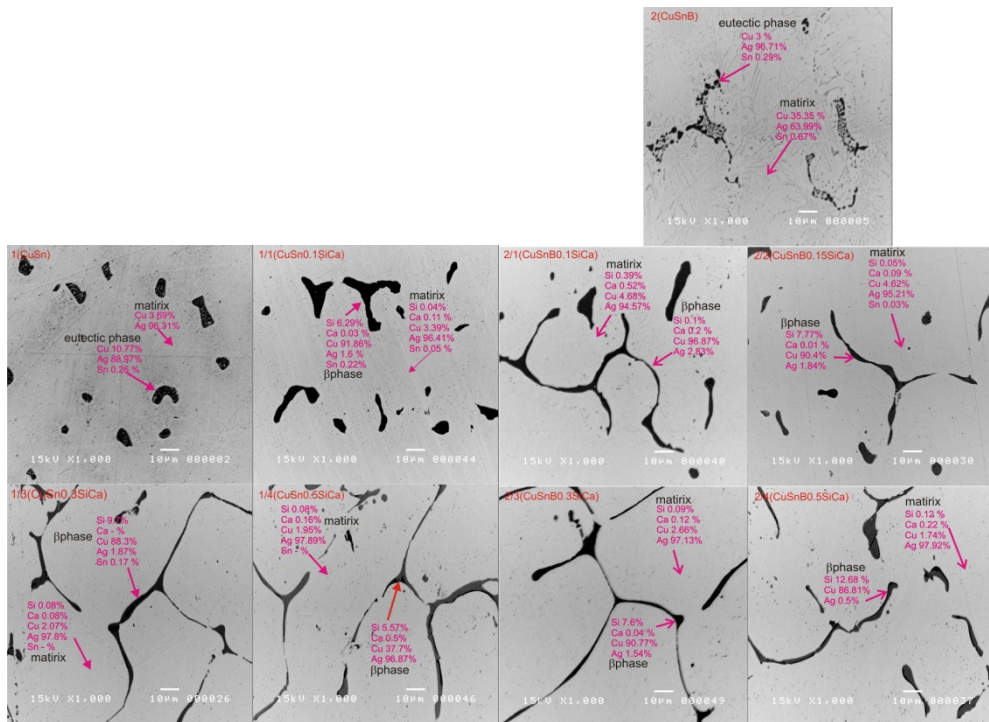
จากรูปที่ 4.40 โบรอนไม่ส่งผลต่อการกระจายตัวของ เฟสยูเทคติก แต่ส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งแรง ด้วยการลดขนาดเกรน จาก ขนาดเกรนเฉลี่ย 2.3 มม. (6(CuZn)) เป็น 0.67 มม. (7(CuZnB)) มีโบรอนเหลือค้าง 29.4 ppm) ดังรูปที่ 4.20 การเพิ่ม Si ร่วมกับ Ca ทำให้เกรนโตขึ้นในทุกกรณี การเพิ่ม Si Ca ร่วมกับ B ทำให้การโตของเกรนช้าลง(เมื่อเพิ่มปริมาณ Si) การเติมสังกะสี ในโครงสร้างจะพบการกระจายตัวของสังกะสีทั้งในเฟส ยูเทคติก หรือ β และ Matrix โดยสังกะสีส่งผลให้ ความต้านทานแรงดึงสูงสุดและอัตราการยืดตัวเพิ่มขึ้น การเพิ่ม Si ร่วมกับ Ca ทำให้เกรนโตขึ้นในทุกกรณี การมี Si Ca ร่วมกับ B ทำให้การโตของเกรนช้าลง(เมื่อเพิ่มปริมาณ Si) ดังพบในชิ้นงาน 7/1CuZnB0.1SiCa(ขนาดเกรน 1.55 มม.) และ 7/2CuZnB0.15SiCa(ขนาดเกรน 1.9 มม.) การเติม Si ในโครงสร้างมีแนวโน้มสะสมในเฟส β และ การเติม Ca จะสะสมใน Matrix เช่นเดียวกับกรณีของกลุ่มเงินผสมทองแดง 8(Cu) และ 3(CuB) ทำให้ความต้านทานการร่อนเพิ่มขึ้นในภาพรวมแต่ยังคงต้องควบคุมปริมาณ Ca ที่จะเกิดคราบออกไซด์ที่ผิวงานได้ในกรณีใส่มากเกินไป รวมถึงต้องระวังการเกิด โครงตาข่ายของเฟส β ทำให้สมบัติทางกลไม่เหมาะสมในการผลิตเครื่องประดับ ในกลุ่ม 7(CuZnB) ที่ผสมสารประกอบซิลิคอนจะพบว่า มีเกรนขนาดเล็ก และมีแนวโน้มการแตกหลังหล่อต่ำ แต่ยังคงจำเป็นต้องเพิ่มเวลาล้างปูน อย่างไรก็ตามจะพบว่าผิวหล่อไม่ยังคงมีคราบออกไซด์น้อยกว่ากรณีไม่เติมสารประกอบซิลิคอน โดยชิ้นงานที่เหมาะสมใช้งานคือ

6/1CuZn0.1SiCa มีปริมาณ Ca 75.3 ppm Si 0.03 % ขนาดเกรน 2.65 มม.

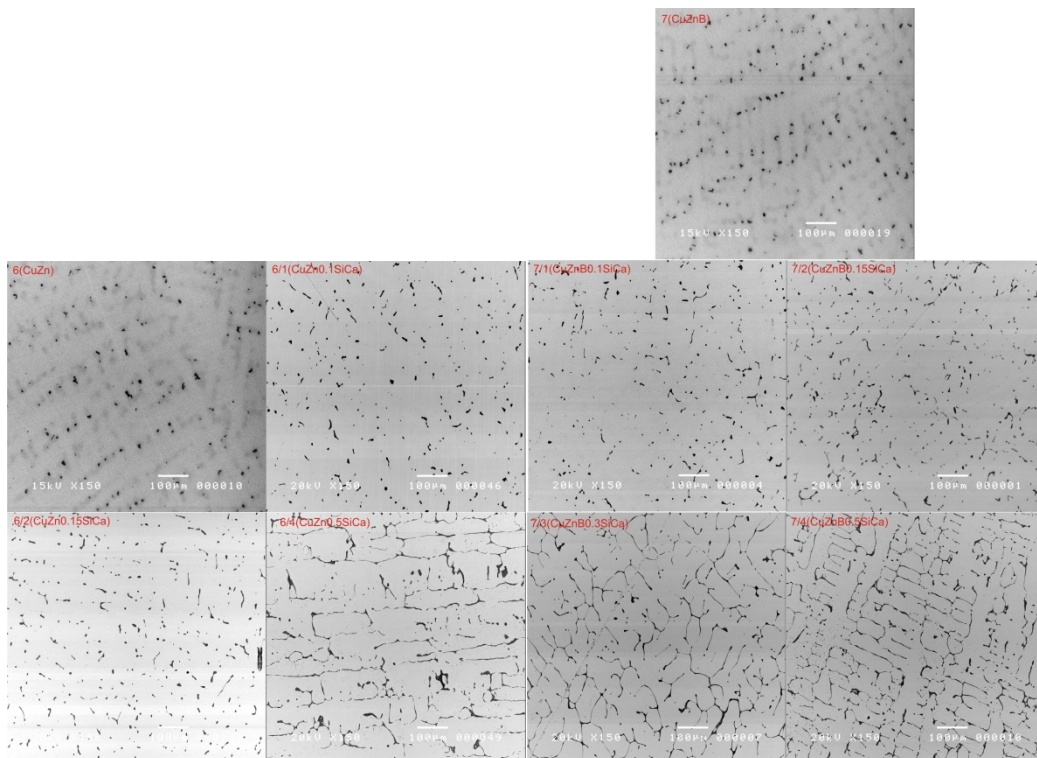
6/2CuZn0.15SiCa มีปริมาณ Ca 75.3 ppm Si 0.03 % ขนาดเกรน 2.55 มม.

7/1CuZnB0.1SiCa มีปริมาณ Ca 75.3 ppm Si 0.03 % ขนาดเกรน 1.55 มม.

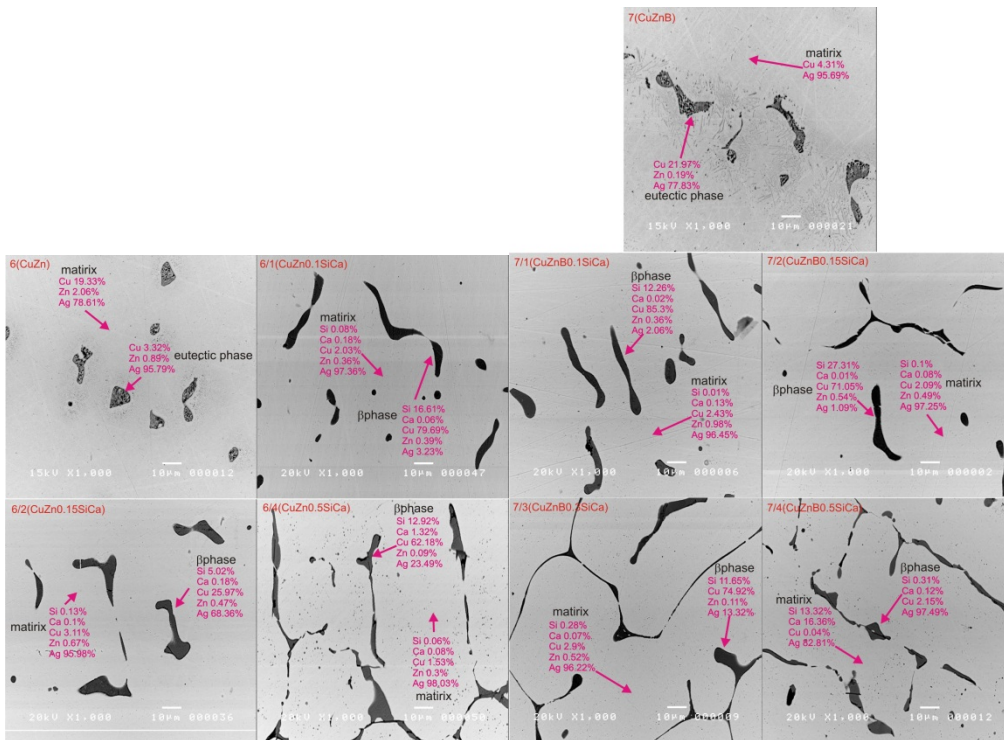
7/2 CuZnB0.15SiCa มีปริมาณ Ca 75.3 ppm Si 0.03 % ขนาดเกรน 1.9 มม.



รูปที่ 4.39 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1000 เท่าของชิ้นงานเงินผสม 1(CuSn) และ 2(CuSnB)ผสมสารประกอบซิลิคอนถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM

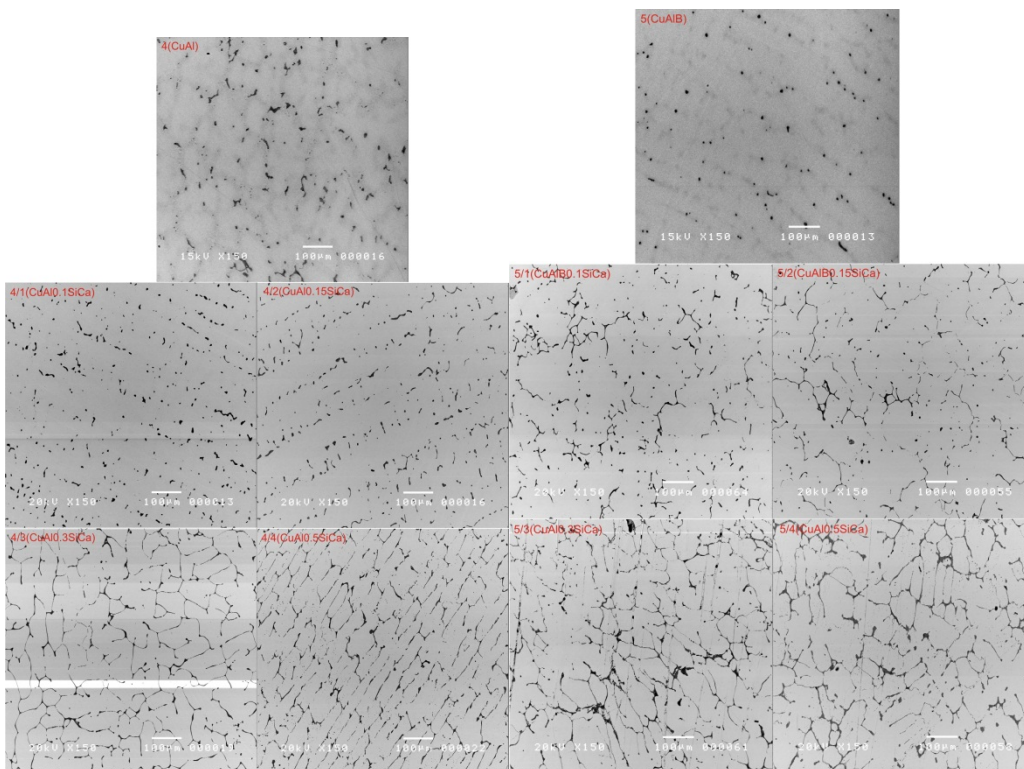


รูปที่ 4.40 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 150 เท่าของชิ้นงานเงินผสม 6(CuZn) และ 7(CuZnB)ผสมสารประกอบซิลิคอนถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM



รูปที่ 4.41 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1000 เท่าของชิ้นงานเงินผสม 6(CuZn) และ 7(CuZnB)ผสมสารประกอบซิลิคอนถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM

4. กลุ่มเงินผสมทองแดง อะลูมิเนียม ได้แก่ 4(CuAl)และ 5(CuAlB)



รูปที่ 4.42 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 150 เท่าของชิ้นงานเงินผสม 4(CuAl)และ 5(CuAlB) ผสมสารประกอบซิลิคอนถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM

จากรูปที่ 4.40 โบรอนไม่ส่งผลต่อการกระจายตัวของ เฟสยูเทคติก แต่ส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งแรง ด้วยการลดขนาดเกรน จาก ขนาดเกรนเฉลี่ย 0.75 มม. (4(CuAl)) เป็น 0.67 มม. (5(CuAlB)) มีโบรอนเหลือค้าง 9.1ppm) ดังรูปที่ 4.20 การเพิ่มSiร่วมกับCaทำให้เกรนโตขึ้นในทุกกรณี การเพิ่มSi Ca ร่วม B ทำให้การโตของเกรนช้าลง(เมื่อเพิ่มปริมาณSi)ดังรูป 4.19x ซึ่งจะพบว่า การโตของเกรนเนื่องจากการเพิ่มSi Ca ร่วม B ต่ำมาจาก 0.67 มม.(5CuAlB)เป็น 0.75 มม.(5/4CuAlB0.5SiCa) การเติม อะลูมิเนียม ในโครงสร้างจะพบการกระจายตัวของอะลูมิเนียมทั้งในเฟส ยูเทคติก หรือ β และ Matrix โดยอะลูมิเนียมส่งผลให้ ความต้านทานแรงดึงสูงสุดลดลง แต่ตรากการยึดตัวเพิ่มขึ้น ทำให้เงินสามารถยึดตัวได้ดีเหมาะแก่การทำเงินแปรรูปที่เพิ่มความต้านทานการหมอง การเพิ่มSiร่วมกับCaทำให้เกรนโตขึ้นในทุกกรณีดังในรูป 4.19x การมีSi Ca ร่วม B ทำให้การโตของเกรนช้าลง(เมื่อเพิ่มปริมาณSi) การเติมSi ในโครงสร้างมีแนวโน้มสะสมในเฟส β และ การเติม Ca จะสะสมใน Matrix เช่นเดียวกับกรณีของกลุ่มเงินผสมทองแดง8(Cu) และ 3(CuB) ทำให้ความต้านทานการหมองเพิ่มขึ้นในภาพรวมแต่ยังคงต้องควบคุมปริมาณ Ca ที่จะเกิดคราบออกไซด์ที่ผิวงานได้ในกรณีใส่มากเกินไป รวมถึงต้องระวังการเกิด โครงตาข่ายของเฟส β ทำให้สมบัติทางกลไม่เหมาะสมในการผลิตเครื่องประดับโดยชิ้นงานที่เหมาะสมใช้งานคือ

4/1CuAl0.1SiCa มีปริมาณ Ca 93.17 ppm Si 0.019 % ขนาดเกรน 2.85 มม.

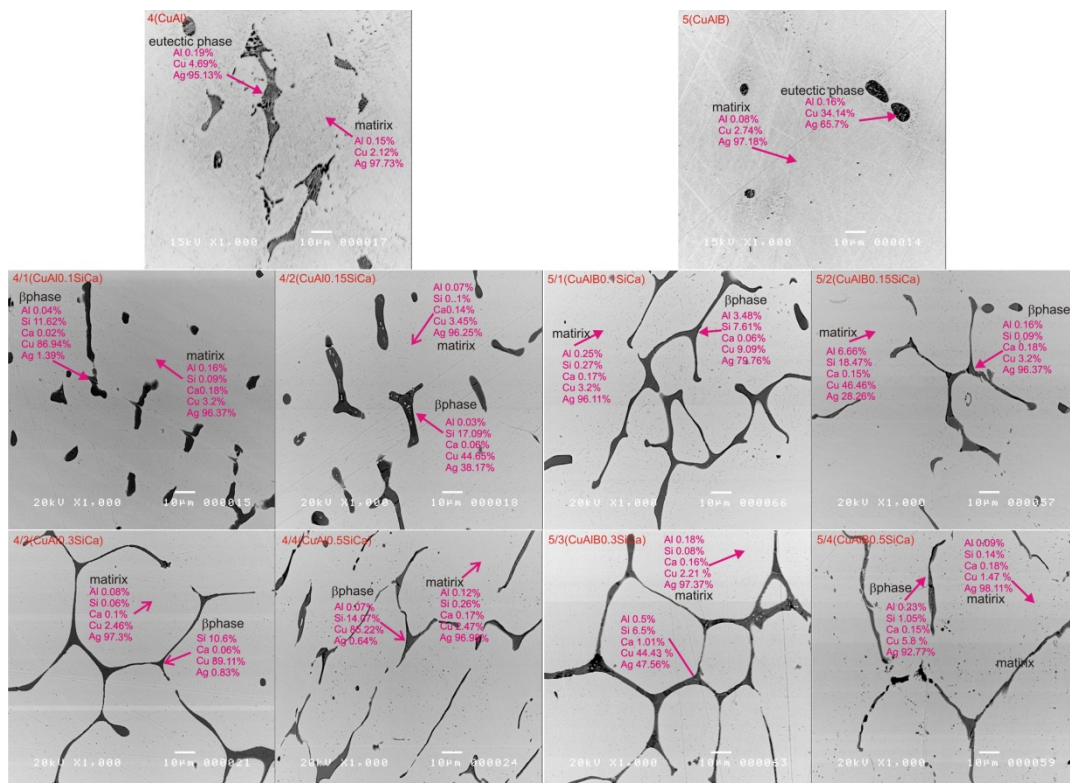
4/2CuAl0.15SiCa มีปริมาณ Ca 62.33 ppm Si 0.13 % ขนาดเกรน 3.6 มม.

5/1 CuAlB0.1SiCa มีปริมาณ Ca 102.5 ppm Si 0.05 % ขนาดเกรน 0.67 มม.

5/2 CuAlB0.5SiCa มีปริมาณ Ca 134.4 ppm Si 0.09 % ขนาดเกรน 0.67 มม.

5/3CuAlB0.3SiCa มีปริมาณ Ca 319.3 ppm Si 0.17 % ขนาดเกรน 0.67 มม.

อย่างไรก็ตามการใช้งานอัลลอยกลุ่มนี้จำเป็นต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ในการผลิตและ ต้นทุนการทำงาน เนื่องจากเป็นอัลลอยที่ไหลตัวช้า และ ทิ้งเศษเข้ตักค้างประมาณ 3-5% ที่ไม่สามารถนำกลับมาหลอมให้ใหม่ได้ เหมือนกับในอัลลอยกลุ่มอื่น และ สีผิวหลังล้างปูนเป็นสีอมเหลือง แต่เมื่อผ่านการขัดจะมีสีไม่แตกต่างจากเงินผสมทองแดงทำให้คนมักเข้าใจผิดว่าต้านทานการหมองต่ำ



รูปที่ 4.43 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1000 เท่าของชิ้นงานเงินผสมกลุ่ม 4(CuAl)และ 5(CuAlB) ผสมสารประกอบซิลิคอนถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM

การพิจารณาความเป็นไปได้เชิง เศรษฐศาสตร์

ในการพิจารณาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ คณะผู้วิจัยได้พิจารณาจาก การทดลองผลิตอัลลอยที่ปริมาณ 8 กก. โดยมีต้นทุนการผลิตอัลลอยแต่ละชนิดดังตารางที่ 4.7 โดยเป็นการแสดงต้นทุนการผลิตอัลลอยต่อปริมาณการผลิต 8 กก. ด้วยเตาหลอมระบบสุญญากาศคลุมบรรยากาศด้วย ไนโตรเจน ใช้เวลาการผลิตเฉลี่ย 1 ชม./ครั้ง เพื่อเอื้อกับการผลิตอัลลอยที่เติมโบรอนและ สารประกอบซิลิคอนซึ่งสูญเสียง่ายหากผลิตในระบบเปิดแบบปกติ อย่างไรก็ตาม การผลิตอัลลอยทองแดงผสมที่ไม่เติมโบรอนและสารประกอบซิลิคอนสามารถใช้การหลอมประเภทอื่นที่มีต้นทุนต่ำกว่าได้ ทั้งนี้ผู้ผลิตต้องพิจารณาตามความเหมาะสมในการผลิตและการใช้งานเป็นหลัก

ตารางที่ 4.7 แสดงต้นทุนการผลิตอัลลอยต่อปริมาณการผลิต 8 กก. ด้วยเตาหลอมระบบสุญญากาศ

รายละเอียดการผลิต	กลุ่ม ทองแดงผสม ดีบุก อะลูมิเนียม สังกะสี	กลุ่ม ทองแดงผสม ดีบุก อะลูมิเนียม สังกะสี เติมโบรอน	กลุ่ม ทองแดงผสม ดีบุก อะลูมิเนียม สังกะสี เติม สารประกอบซิลิคอน
ค่าไฟฟ้า	30	30	30
ค่าอุปกรณ์และเข้าหลอม	100	100	100
ทองแดง	400	400	400
สังกะสี/อะลูมิเนียม/ดีบุก	40	40	40
สารประกอบซิลิคอน	-	-	260
วัสดุอะลูมิเนียมผสมโบรอน	-	30	30
รวม	570	600	860

เมื่อเปรียบเทียบกับราคาการอัลลอยการค้าในท้องตลาดพบว่าแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเพิ่มสมบัติการหล่อปานกลางและความต้านทานการหมองต่ำ ราคาอยู่ในช่วง 1000-1700 บาท ส่วนกลุ่มเพิ่มสมบัติการหล่อสูงและต้านทานการหมองมีราคาในช่วง 2100-3200 บาทแล้วแต่จุดประสงค์และสมบัติพิเศษของอัลลอย ซึ่งยังคงคุณลักษณะใกล้เคียงกับอัลลอยที่ผลิตได้ในงานวิจัย

ผลการถ่ายทอดความรู้สู่สาธารณะ

คณะผู้วิจัยได้จัดการเผยแพร่ความรู้ด้านการผลิตอัลลอยสู่สาธารณะโดยผ่านการอบรมในงาน Bangkok Gem and Jewelry 2015 ในวันที่ 13 กันยายน 2558 เวลา 15.00-16.00 น. ณ ห้องจูปีเตอร์ 8-9 อาคารชาเลนเจอร์ อิมแพคเมืองทอง เพื่อสรุปการทำงานสำหรับงานวิจัยในหัวข้อ “อิทธิพลของธาตุผสมเพื่อเพิ่มความต้านทานการหมองในโลหะเงินสเตอร์ลิง” ดังรูปที่ 4.44

จากผลการเผยแพร่ความรู้พบว่าผู้ฟังบรรยายเสนอให้มีการเปิดเผยแพร่สูตรอัลลอยและ แนวทางการผลิตให้มากขึ้น รวมถึงต้องการทราบสูตรสำเร็จของอัลลอยที่สามารถผลิตได้ อย่างไรก็ตามการผลิตอัลลอยจำเป็นต้องพิจารณาเครื่องมือสำหรับการผลิต เช่น เตาหลอม และ ชนิดของอัลลอยรวมถึงความต้องการของลูกค้าเพื่อเปรียบเทียบความเป็นไปได้ในการผลิต รวมถึงความพร้อมของบุคลากร ซึ่งจำเป็นต้องเข้าใจจุดอ่อน จุดแข็งของการผลิตอัลลอยแต่ละชนิดที่มีความแตกต่างกัน เช่น กลุ่ม ทองแดงผสมดีบุก สังกะสี หรือ อะลูมิเนียมสามารถผลิตได้ในเตาหลอมแบบเปิด แต่ในกลุ่มที่มีการเติมโบรอน และ สารประกอบซิลิคอนจำเป็นต้องมีการผลิตที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีน้อยที่สุดทำให้ต้องหลอมในเตาหลอมสุญญากาศแบบปิดเป็นหลักเพื่อลดการสูญเสีย โบรอน ซิลิคอนและ แคลเซียม เป็นต้น โดยหากมองภาพรวมอัลลอยทดลองทั้งหมดสามารถถ่ายทอดให้ฝ่ายอุตสาหกรรมเลือกผลิตได้ในทั้งกลุ่มอุตสาหกรรมเล็กที่มีเครื่องมือน้อยและ กลุ่มอุตสาหกรรมมาตรฐานที่มีเครื่องมือพร้อม รวมถึงกลุ่มที่ต้องการความต้านทานการหมองเป็นพิเศษเช่น การเติมอะลูมิเนียมในเงิน ก็สามารถผลิตอัลลอยได้



รูปที่ 4.44 แสดงบรรยากาศการอบรมเผยแพร่ความรู้ด้านการผลิตอัลลอยด์สังเคราะห์โดยผ่านการอบรมในงาน Bangkok Gem and Jewelry 2015

บทที่ 5

สรุปผล

จากผลการศึกษาทำให้สามารถระบุธาตุผสมหลักที่เหมาะสมในการผลิตเครื่องประดับ ตามหลักเกณฑ์ด้านความต้านทานการหมอง และสมบัติทางกลดังนี้

การเติมดีบุกเพิ่มสมบัติทางกลด้านความแข็งแรง และอัตราการยืดตัว เล็กน้อย และส่งผลเพิ่มความต้านทานการหมองเพียงเล็กน้อย แต่ในทางอุตสาหกรรมจะพบความนิยมในการใช้งานเพื่อลดออกซิเจนในเนื้อเงิน และลดจุดหลอมเหลวของน้ำโลหะ

การเติมสังกะสีส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการยืดตัว จาก 40%(8 Cu) เป็น 46%(6CuZn) แต่ลดความแข็งแรงจาก 150(8Cu) เป็น 141(6CuZn) MPa เนื่องจากมีแนวโน้มละลายทั้งในเงินและทองแดง โดยในทางอุตสาหกรรมจะพบความนิยมในการใช้งานเพื่อลดออกซิเจนในเนื้อเงิน และลดจุดหลอมเหลวของน้ำโลหะ เพิ่มการไหลตัวของน้ำโลหะ และส่งผลเพิ่มความต้านทานการหมองได้ดีในช่วงการทดสอบ 1 ชม.แรก

การเติมอะลูมิเนียมส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการยืดตัว แต่ลดความแข็งแรงเนื่องจากมีแนวโน้มละลายทั้งในเงินและทองแดง ไม่นิยมใช้ผสมในเงินเนื่องจากสามารถเพิ่มความเหนียว ลดการไหลตัวของน้ำโลหะ แต่เพิ่มความต้านทานการหมองได้ดีจนถึงการทดสอบที่ 3 ชม. ทำให้เงินมีอัตราการยืดตัวได้ดีจาก 40%(8 Cu) เป็น 46%(4CuAl) และต้านทานการหมองที่โครงสร้างพื้นฐานMatrix เนื่องจากละลายได้ดีในเงิน อีกทั้งอะลูมิเนียมสามารถลดขนาดเกรน จาก 2.1 มม.(8 Cu) เป็น 0.75 มม. (4 CuAl)

การเติมโบรอนในเงินผสมธาตุหลักเป็นทองแดง ทำให้เงินเพิ่มความแข็งแรงได้ในทุกกรณี และสามารถขนาดเกรนในกรณีของ เงินผสมทองแดงร่วมกับสังกะสี จากขนาดเกรน และความต้านทานแรงดึงสูงสุด 2.3 มม. และ 140.7 MPa(6CuZn) เป็น 0.75 มม.และ 225MPa(7CuZnB) เงินผสมทองแดงร่วมกับอะลูมิเนียมจากขนาดเกรน 0.75 มม.และ 142 MPa (4CuAl) เป็น 0.67 มม.และ 226MPa (5CuAlB) โดยจะพบโบรอนเหลือค้างในเนื้อเงิน 9-29 ppm

เงินผสมทองแดงร่วมกับสังกะสี มีความต้านทานการหมองปานกลาง โดยต้านทานการหมองได้ดีในช่วงทดสอบ 1 ชม.แรก ส่วน เงินผสมทองแดงร่วมกับอะลูมิเนียม มีความต้านทานการหมองสูงจนถึงช่วงการทดสอบ 3 ชม.เนื่องจากการเกิดฟิล์ม Al_2O_3 ที่ผิว

การเติมสารประกอบซิลิคอนทำให้เพิ่มปริมาณซิลิคอนและแคลเซียมในเนื้อเงิน โดย ซิลิคอนจะกระจายตัวหลักในเฟสβ ส่วนแคลเซียมกระจายตัวในโครงสร้างพื้นฐานMatrix เป็นหลัก โดยการเพิ่มสารประกอบซิลิคอนทำให้เฟสยูเทคติกลดรูปเป็นเฟสβ เกิดโครงตาข่ายของเฟสβ เมื่อเพิ่มปริมาณสารประกอบซิลิคอนทำให้ความต้านทานการหมองสูงขึ้น แต่ลดความแข็งแรงจากการเกิดโครงตาข่ายของเฟสβ โดยขึ้นงานที่มีความแข็งแรงเหมาะสม และมีความต้านทานหมองสูงโดยไม่เกิดโครงตาข่ายของเฟสβ ที่สามารถเลือกเป็นส่วนผสมต้นแบบสำหรับการผลิตเครื่องประดับเงิน ได้แก่

4/1CuAl0.1SiCa มีปริมาณ Ca 93.17 ppm Si 0.019 % ขนาดเกรน 2.85 มม.

4/2CuAl0.15SiCa มีปริมาณ Ca 62.33 ppm Si 0.13 % ขนาดเกรน 3.6 มม.

5/1 CuAlB0.1SiCa มีปริมาณ Ca 102.5 ppm Si 0.05 % ขนาดเกรน 0.67 มม.

5/2 CuAlB0.5SiCa มีปริมาณ Ca 134.4 ppm Si 0.09 % ขนาดเกรน 0.67 มม.

5/3CuAlB0.3SiCa	มีปริมาณ Ca 319.3 ppm Si 0.17 %	ขนาดเกรน 0.67 มม.
6/1CuZn0.1SiCa	มีปริมาณ Ca 75.3 ppm Si 0.03 %	ขนาดเกรน 2.65 มม.
6/2CuZn0.15SiCa	มีปริมาณ Ca 75.3 ppm Si 0.03 %	ขนาดเกรน 2.55 มม.
7/1CuZnB0.1SiCa	มีปริมาณ Ca 75.3 ppm Si 0.03 %	ขนาดเกรน 1.55 มม.
7/2 CuZnB0.15SiCa	มีปริมาณ Ca 75.3 ppm Si 0.03 %	ขนาดเกรน 1.9 มม.
1/1CuSn0.1SiCa	มีปริมาณ Ca 75.3 ppm Si 0.03 %	ขนาดเกรน 2.65 มม.
1/2CuSn0.15SiCa	มีปริมาณ Ca 43 ppm Si 0.07 %	ขนาดเกรน 2.55 มม.
2/1CuSnB0.1SiCa	มีปริมาณ Ca 23.48 ppm Si 0.07 %	ขนาดเกรน 0.78 มม.
2/2CuSnB0.15SiCa	มีปริมาณ Ca 60.23 ppm Si 0.11 %	ขนาดเกรน 0.95 มม.
1/1CuSn0.1SiCa	มีปริมาณ Ca 75.3 ppm Si 0.03 %	ขนาดเกรน 2.65 มม.
1/2CuSn0.15SiCa	มีปริมาณ Ca 43 ppm Si 0.07 %	ขนาดเกรน 2.55 มม.
2/1CuSnB0.1SiCa	มีปริมาณ Ca 23.48 ppm Si 0.07 %	ขนาดเกรน 0.78 มม.
2/2CuSnB0.15SiCa	มีปริมาณ Ca 60.23 ppm Si 0.11 %	ขนาดเกรน 0.95 มม.

การเลือกอัลลอยด์สำหรับการผลิตในอุตสาหกรรมเครื่องประดับเงินแต่ละกลุ่มจะขึ้นอยู่กับความเป็นไปได้ในการผลิตซึ่งหมายถึงเครื่องมือร่วมกับความเข้าใจของบุคลากร ความต้องการของผู้บริโภค และต้นทุนการผลิตที่เป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณาดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยดังกล่าวอย่างถี่ถ้วนเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาในการผลิตจริง เช่นกรณีโรงงานผลิตมีเตาหลอมแบบเปิด ไม่สามารถควบคุมบรรยากาศการหลอมได้ควรเลือกใช้อัลลอยไม่เติมสารประกอบซิลิคอนและอัลลอยไม่เติมโบรอน เพราะธาตุดังกล่าวเกิดการสูญเสียไม่เหมาะสมกับการหลอมในระบบเปิดอย่างยิ่ง

การเพิ่มสารประกอบซิลิคอน หรือการเติม ซิลิคอน แคลเซียมสามารถลดขนาดเกรนของ เงินผสมทองแดงสังกะสี โบรอนและเงินผสมทองแดงอะลูมิเนียมโบรอน รวมถึงชะลอการขยายตัวของขอบเกรนใน เงินผสมทองแดงร่วมกับอะลูมิเนียม และเงินผสมทองแดงร่วมกับสังกะสี

การเติมอะลูมิเนียม สังกะสี โบรอน และ สารประกอบซิลิคอนทำให้ผิวต้นเงินขาวมากขึ้นและจำเป็นต้องระวังการเกิดโครงสร้างตาข่ายของเฟส β ซึ่งทำให้สมบัติทางกลต่ำไม่เหมาะใช้ผลิตเครื่องประดับ

เอกสารอ้างอิง

1. สิริวรรณ สกกุลตันเจริญชัย, ผลของโบรอนและสตรอนเซียมต่อการปรับขนาดเกรนของโลหะเงินผสมเกรด 950, สาขาวิศวกรรมโลหการ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2555
2. ผศ.ดร. เอกสิทธิ์ และคณะ, โครงการ การผลิตอัลลอยผสมอินเดียมและซิลิคอนเพื่ออุตสาหกรรมเครื่องประดับเงิน, สำนักงานส่งเสริมการวิจัย, 2550
3. Hiroshi Sasaki and Makato Nishiyo. Ag alloy of high discolouration Resistance. US. Patent No.5,021,214, Date. Jun4. 1991
4. Christopher Raub. Use of Silver in Jewelry. The Proceeding of the Santa Fe Symp of Jewelry Manufacturing Technology, 1989. pp. 241-256
5. Price, L.E. and Thomas G.J. Inst Metals. 1938, pp. 357-385
6. Vinal, G.W. and Schramm G.M. Metal Industry (N.T.). 1934, pp 1,15,22,100,151,231
7. Carrano V Richard, and Mondillo A Ronald. Tarnish-resistant Hardenable Fine Silver Alloys. US. Patent No. 6,139,652 , Date Oct. 31, 2000
8. Bernhard Melvin, and Sivertson T. Jame. Silver Alloy Compositions. US. Patent No. 4,973,446, Date Nov. 27, 1990
9. J.J. Moore, Chemical Metallurgy, Butterworth Heinemann, 1990, p85
10. Croce; Scott M. Anti-Tarnish Silver Alloy. US. Patent No.6,841,012 , Date Nov. 27,1990
11. เจษฎา จอกแก้ว. ผลของอินเดียมต่อสมบัติทางกลและความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิงที่ผสมซิลิคอน, สาขาวิศวกรรมโลหการ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2544 : 48
12. Allison Butts. Silver Economics, Metallurgy, and Use. Lehigh University, Pennsylvania. P249
13. Hugh Baker, Hiroaki Okamoto, ASM Handbook Volume 3 Alloy Phase Diagram. ASM International , 1992 , pp 2.31,2.37,2.40 2.85,2.121,2.148
14. Per Kofstad, Internal Oxidation, High Temperature Oxidation of Metal, Jonh Willey & Sons.Inc, 1966, p291
15. Dwarika P.A., Sterling Silver Alloy Composition of Exception and Reversible Hardness and Enhanced Tarnish Resistance. US Patent No. 2006/0045792 A1. Date. Mar. 2. 2006
16. สมนึก วัฒนศรีกุล และคณะ รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของโลหะเงินเจือสำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), มกราคม 2544, หน้า 13
17. ผศ.ดร.สิริพร วิจารณ์ต์ ศันสนีย์ ฉิมกุล และ สุรศิษฐ์ วิจารณ์นต์, อิทธิพลของอะลูมิเนียมผสมที่มีผลต่อความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิง. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24, 20-22 มกราคม 2553
18. ผศ.ดร. เอกสิทธิ์ และ ศิริรัตน์ นิสารัตนพร , การปรับปรุงคุณภาพเงินสเตอร์ลิงโดยการเติมธาตุซิลิคอน, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2546
19. วสันต์ คุรัตน์เวช, กอบบุญ หล่อทองคำ และเอกสิทธิ์ นิสารัตนพร “ผลของแคลเซียมและซิลิคอนต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของโลหะผสมเงิน-ทองแดง” วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์ (Section T) ปีที่ 4 ฉบับที่ 3 กันยายน-ธันวาคม 2548
20. Daniel Davitz. Silver Colored Alloy with low alloy percentage of Ni and Cu. US. Patent No. 5, 187, 195. Date Oct. 6, 1998
21. G.Petzow and G.Effenberg. Ternary alloys A Comprehensive Compendium of Evaluate Constitutional Data and Phase Diagram Ag-Al-Au...Ag-Cu-P Volume1..p42.

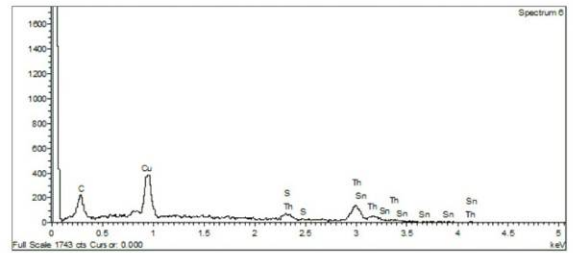
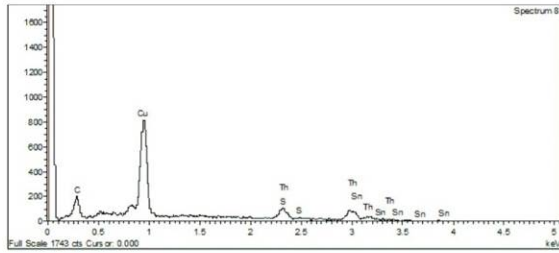
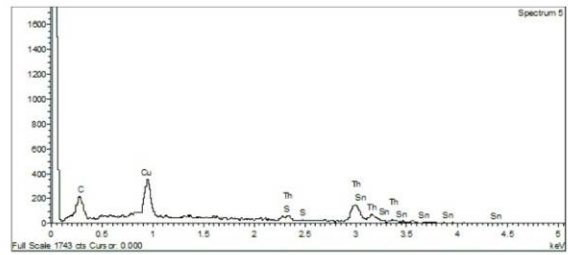
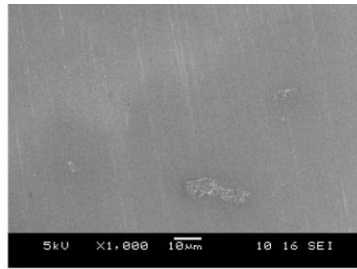
22. สงวนลักษณ์ โล่ห์วานิชย์เจริญ, ผลของดีบุกต่อสมบัติทางกลของสปริงเงินสเตอร์ลิง, สาขาวิศวกรรมโลหการ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2547
23. ผศ.ดร. เอกสิทธิ์ และ คณะ , โครงการการผลิตอัลลอยกันหมองที่มีเกรนเล็กละเอียดเพื่ออุตสาหกรรมเครื่องประดับเงิน, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2552
24. O.N. Carlson, 1990 ออนไลน์ แหล่งที่มา: <http://www.himikatus.ru/art/phase-diagr1/Al-B.php>.

ภาคผนวก

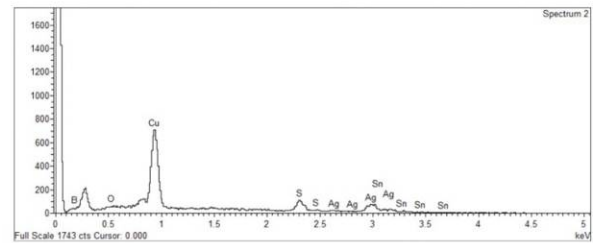
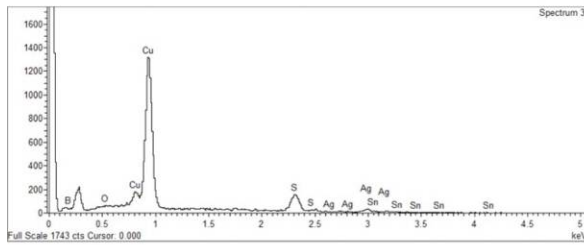
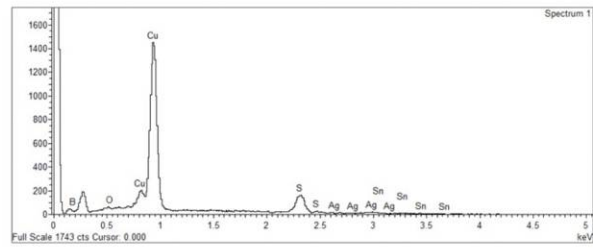
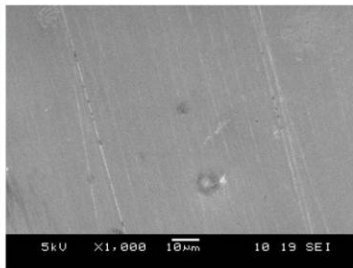
ก. ผลการศึกษาปริมาณธาตุในการทดสอบการหมองด้วย H_2S วิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS

ผลการศึกษาปริมาณธาตุในการทดสอบการหมองด้วย H₂S ในเวลา 0.5 ชม. วิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS

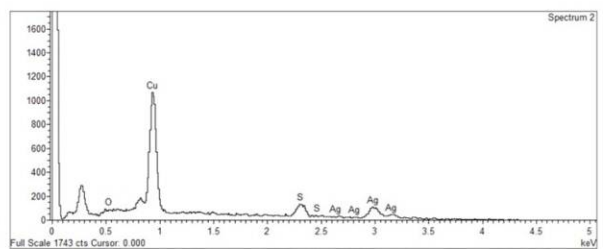
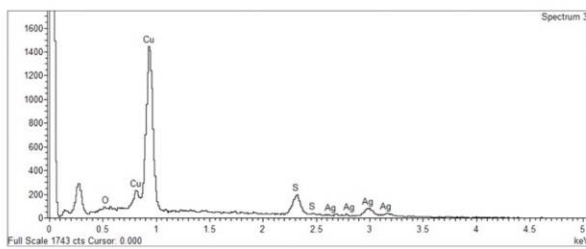
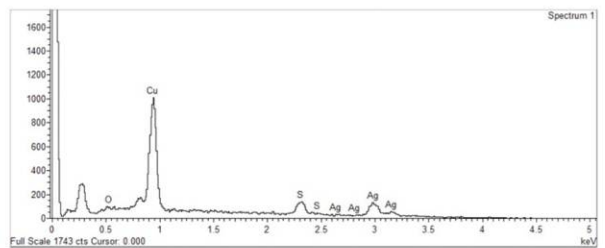
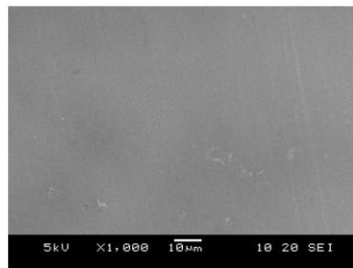
1. CuSn



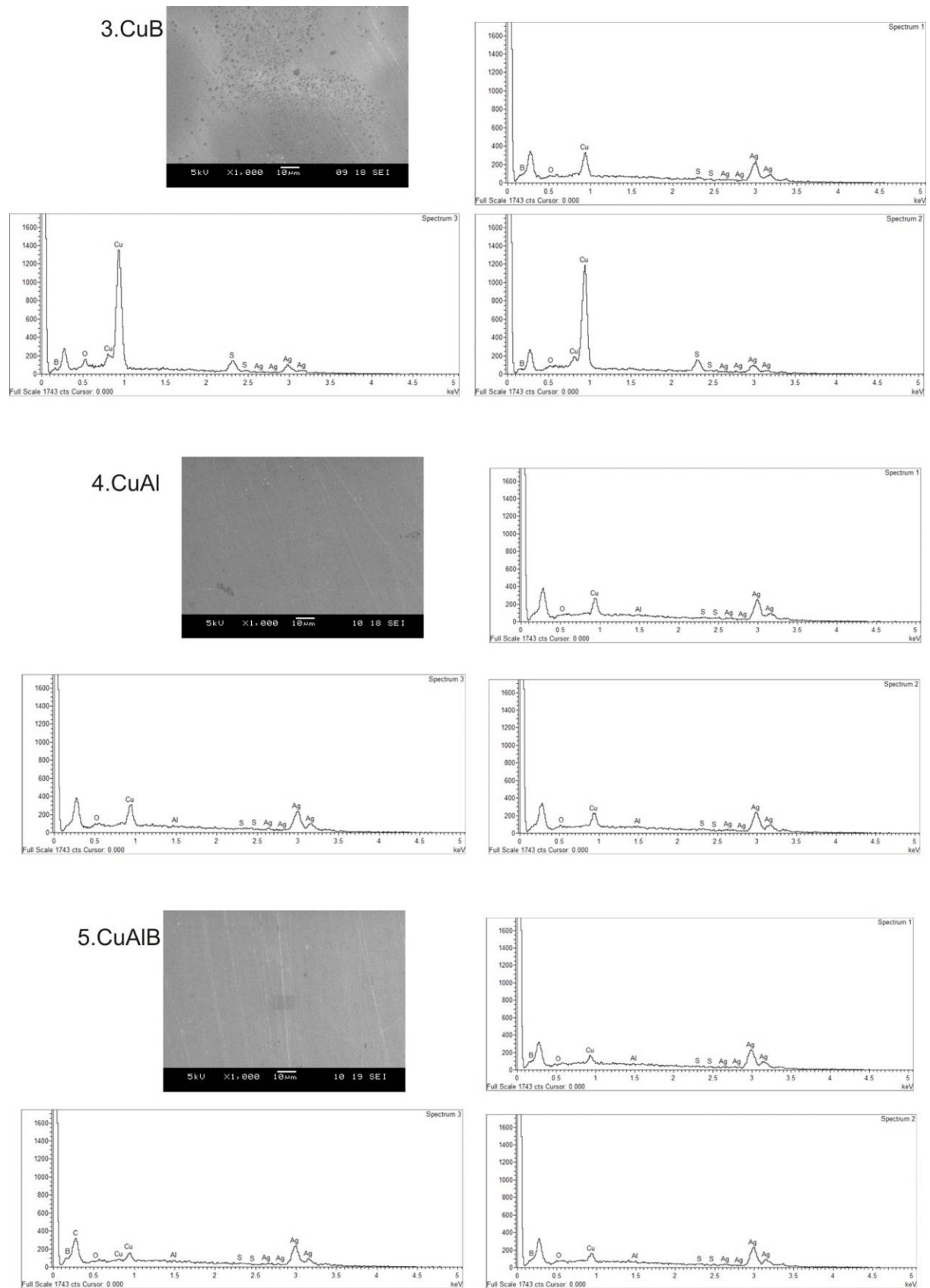
2. CuSnB



8. Cu

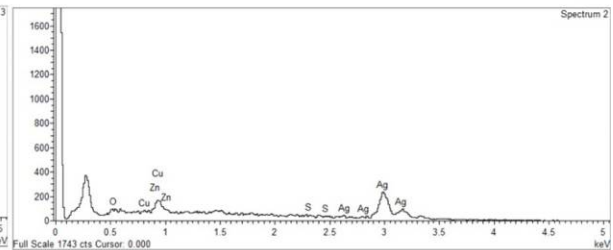
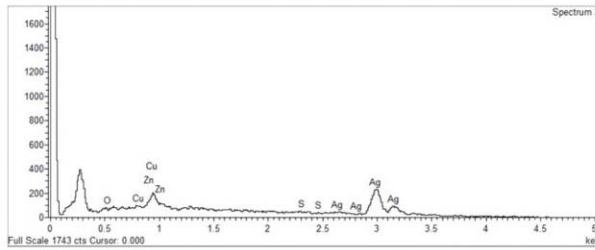
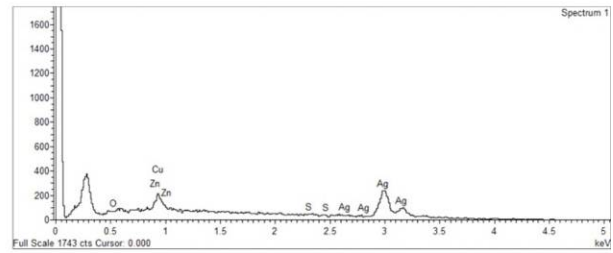
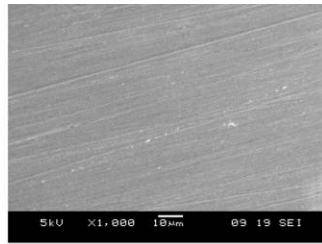


ผลการศึกษาปริมาณธาตุในการทดสอบการหมองด้วย H_2S ในเวลา 0.5 ชม. วิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS

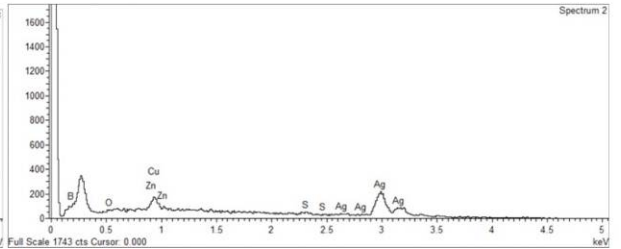
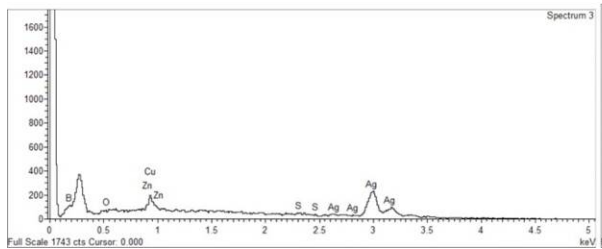
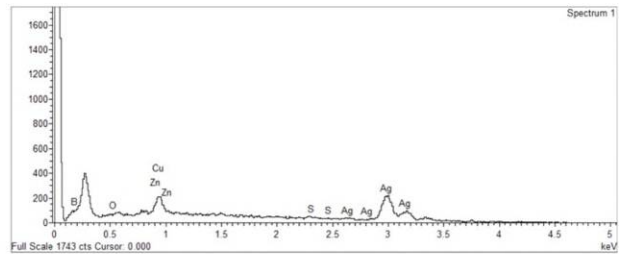
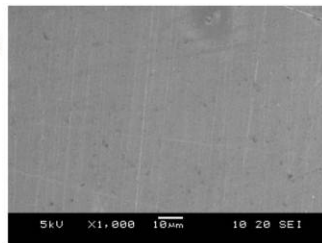


ผลการศึกษาปริมาณธาตุในการทดสอบการหมองด้วย H_2S ในเวลา 0.5 ชม. วิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS

6. CuZn

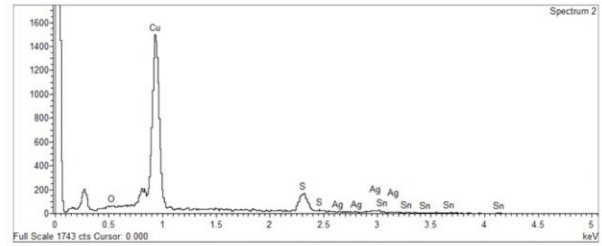
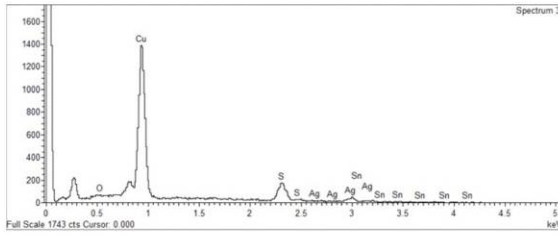
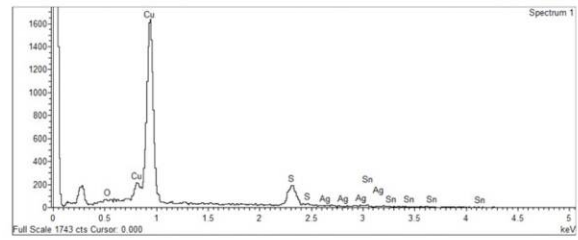
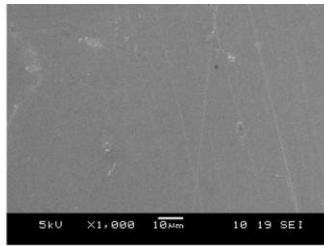


7. CuZnB

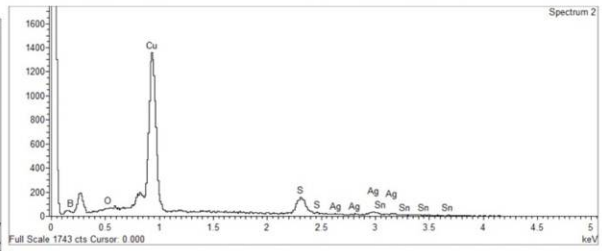
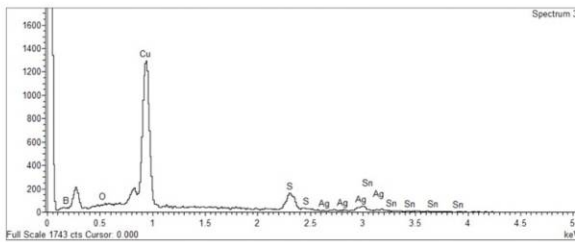
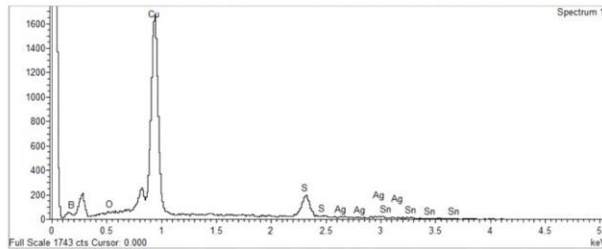
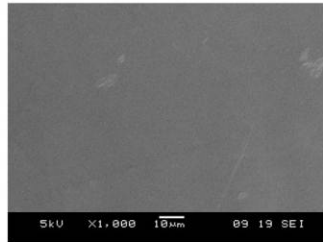


ผลการศึกษาปริมาณธาตุในการทดสอบการหมองด้วย H_2S ในเวลา 3 ชม. วิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS

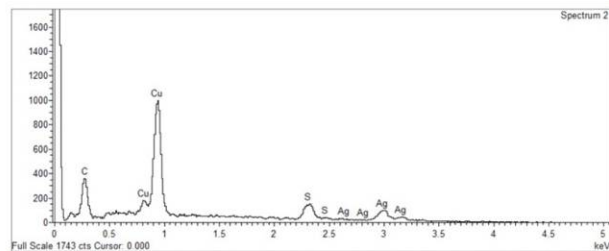
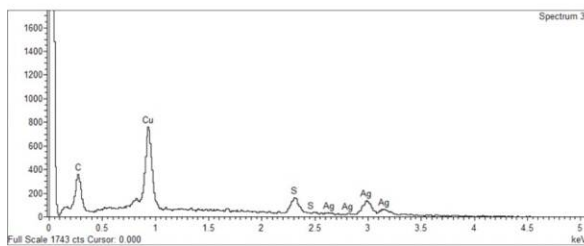
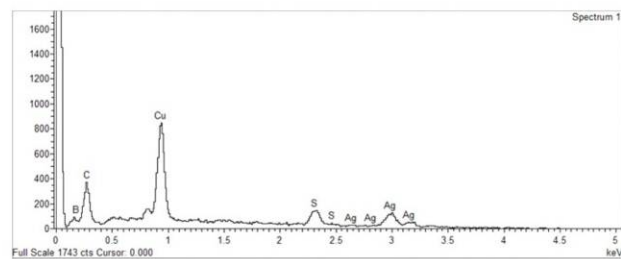
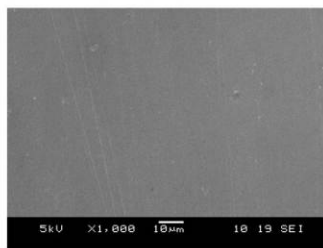
1. CuSn



2. CuSnB

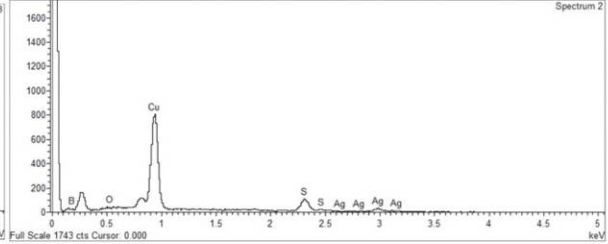
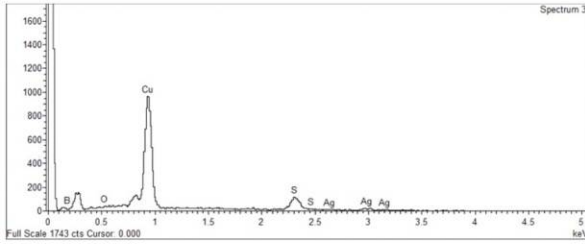
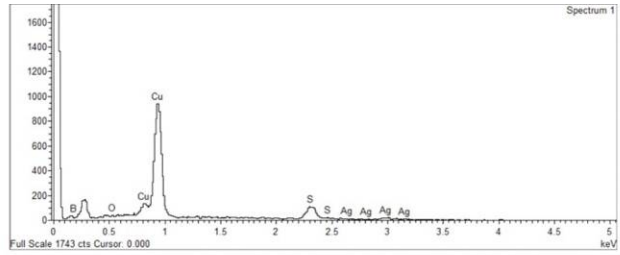
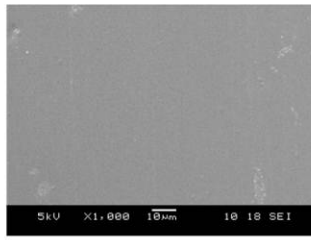


8. Cu

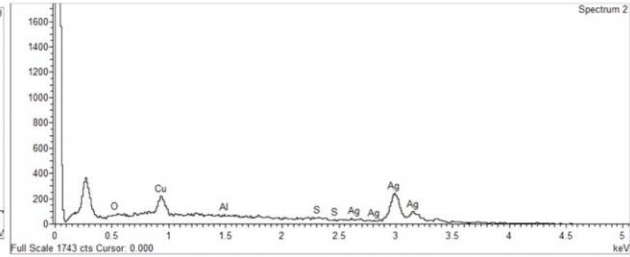
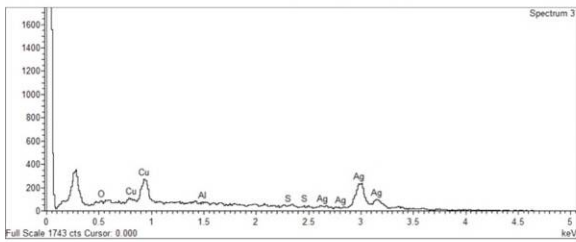
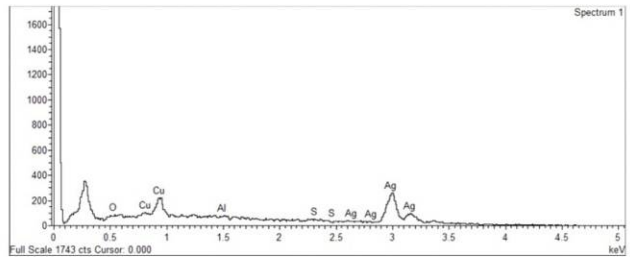
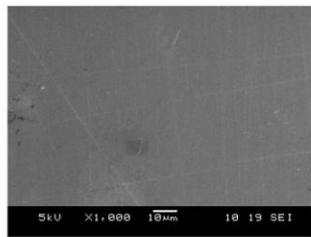


ผลการศึกษาปริมาณธาตุในการทดสอบการหมองด้วย H₂S ในเวลา 3 ชม. วิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS

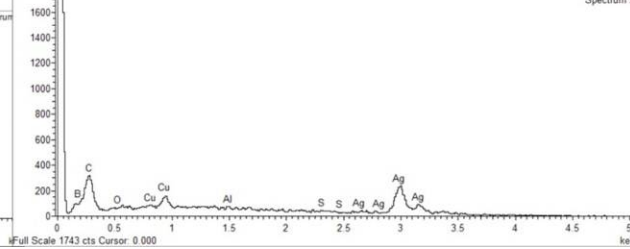
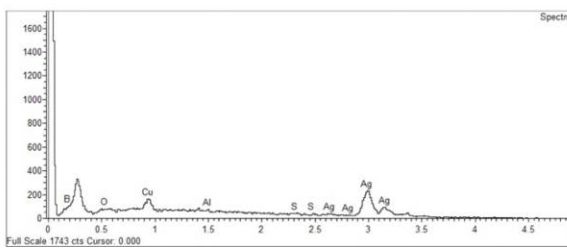
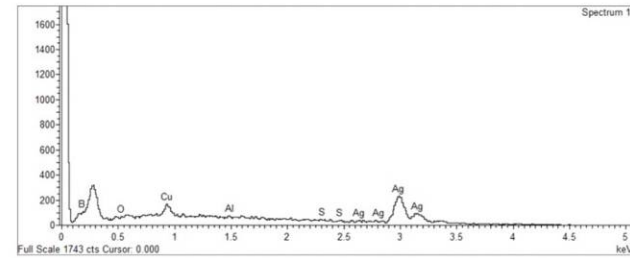
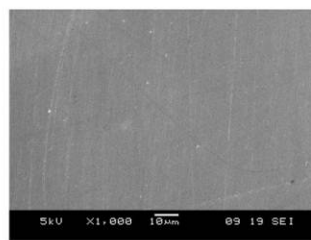
3. CuB



4. CuAl

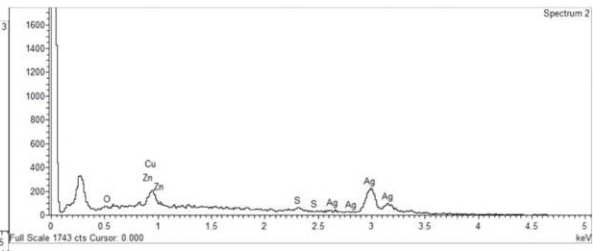
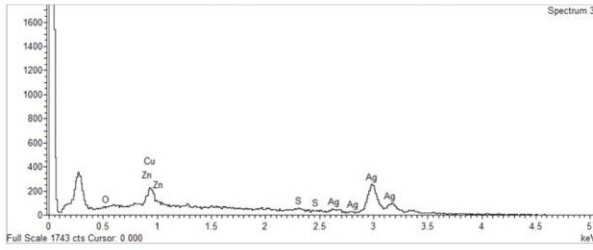
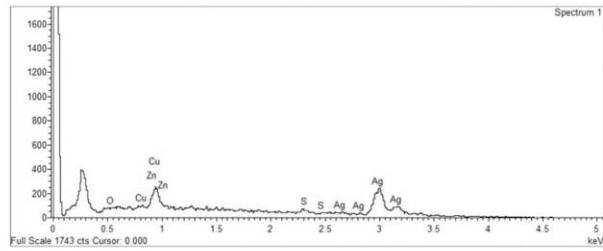
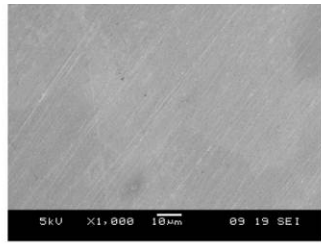


5. CuAlB

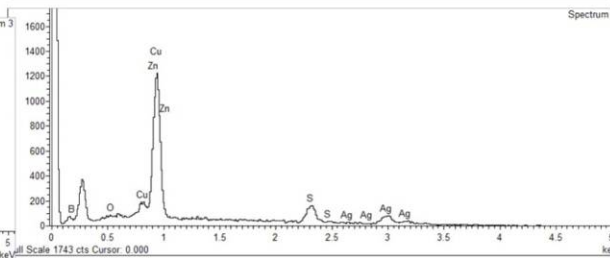
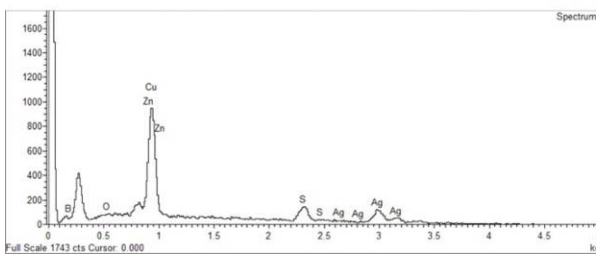
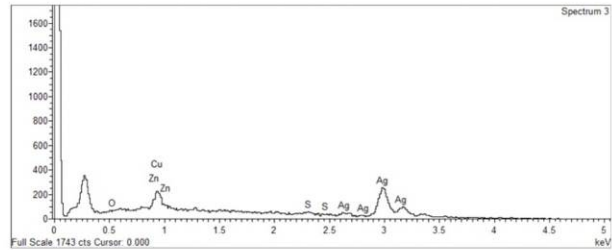
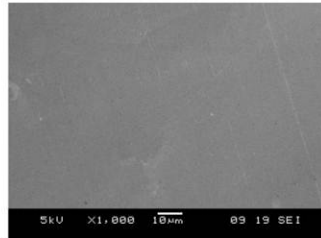


ผลการศึกษาปริมาณธาตุในการทดสอบการหมองด้วย H₂S ในเวลา 3 ชม. วิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS

6. CuZn

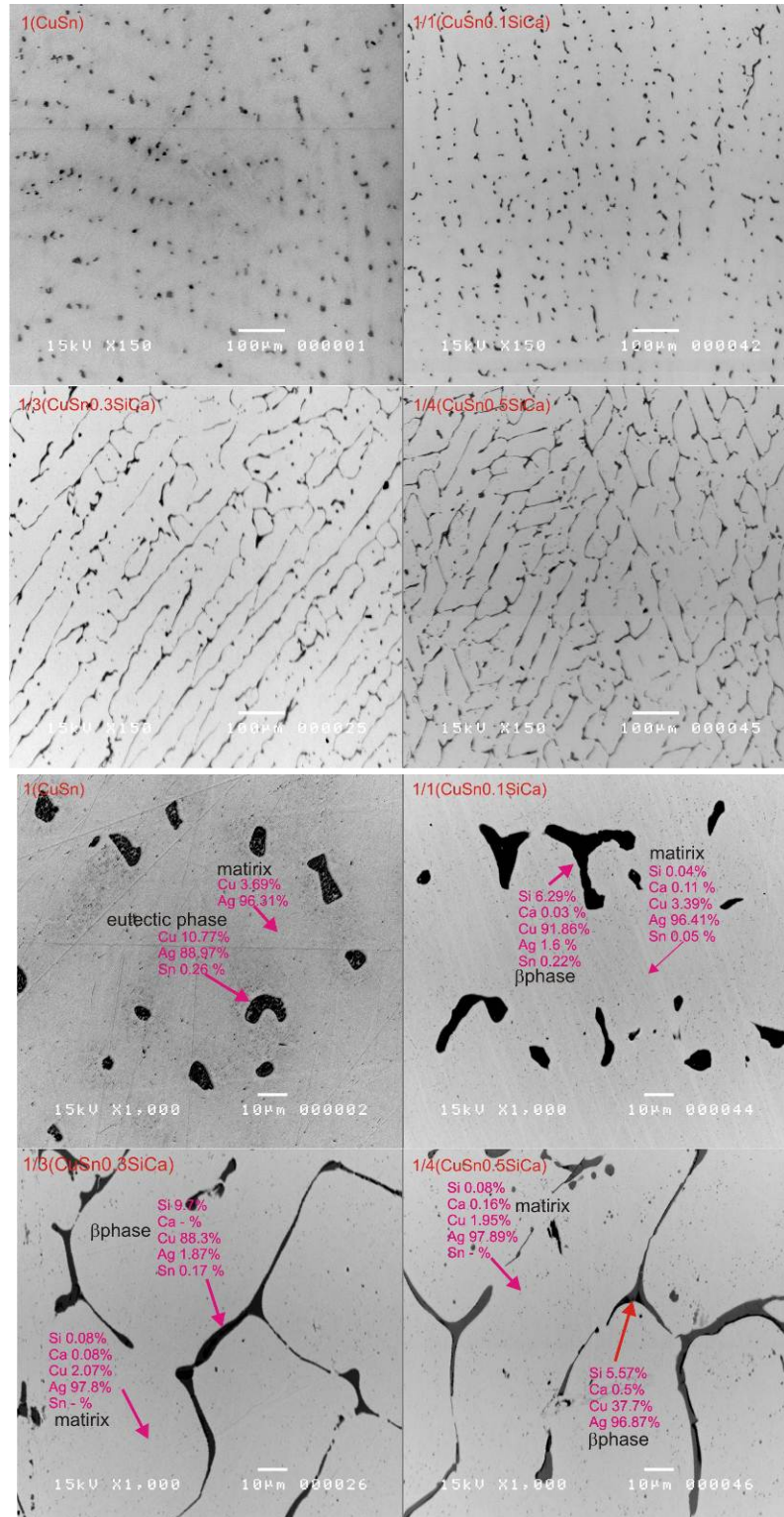


7. CuZnB

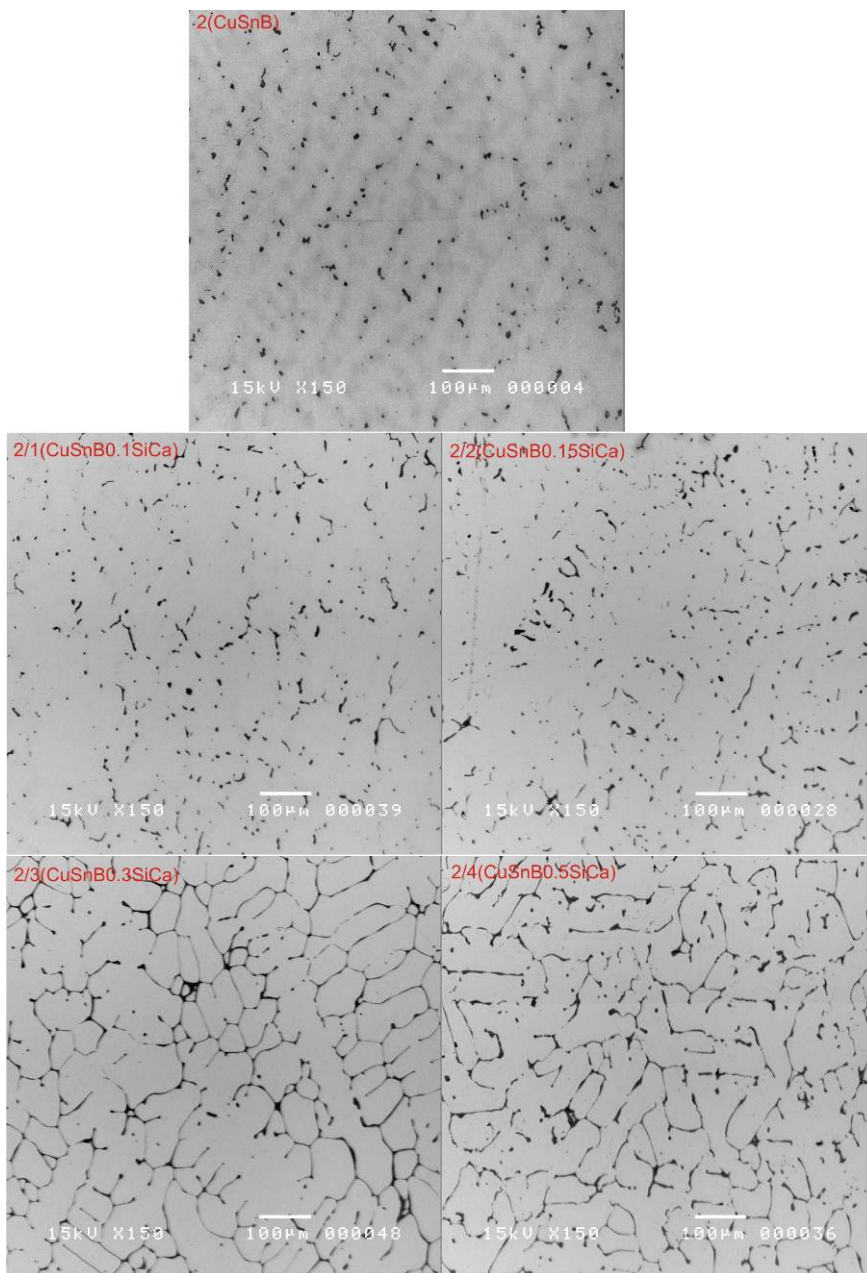


ข. ผลการศึกษาปริมาณธาตุและโครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS

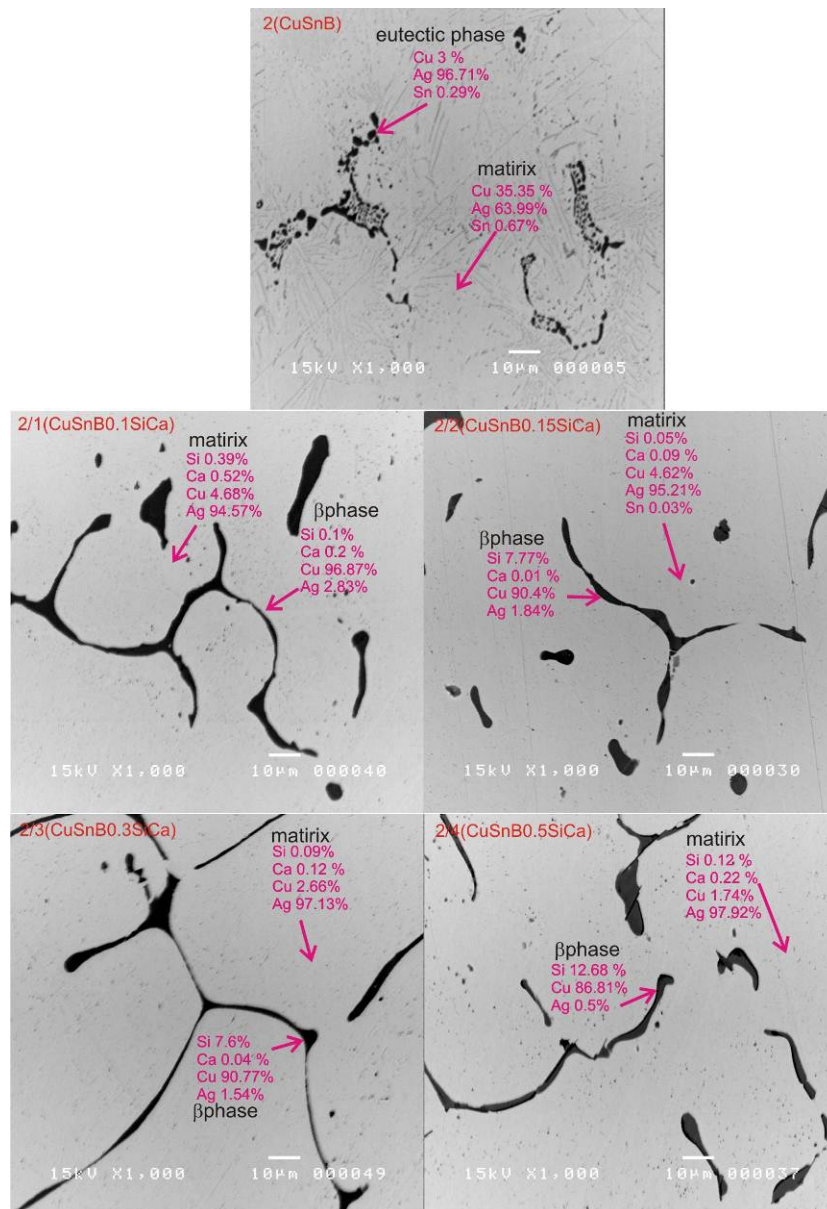
ผลการศึกษ ปริมาณธาตุและโครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS



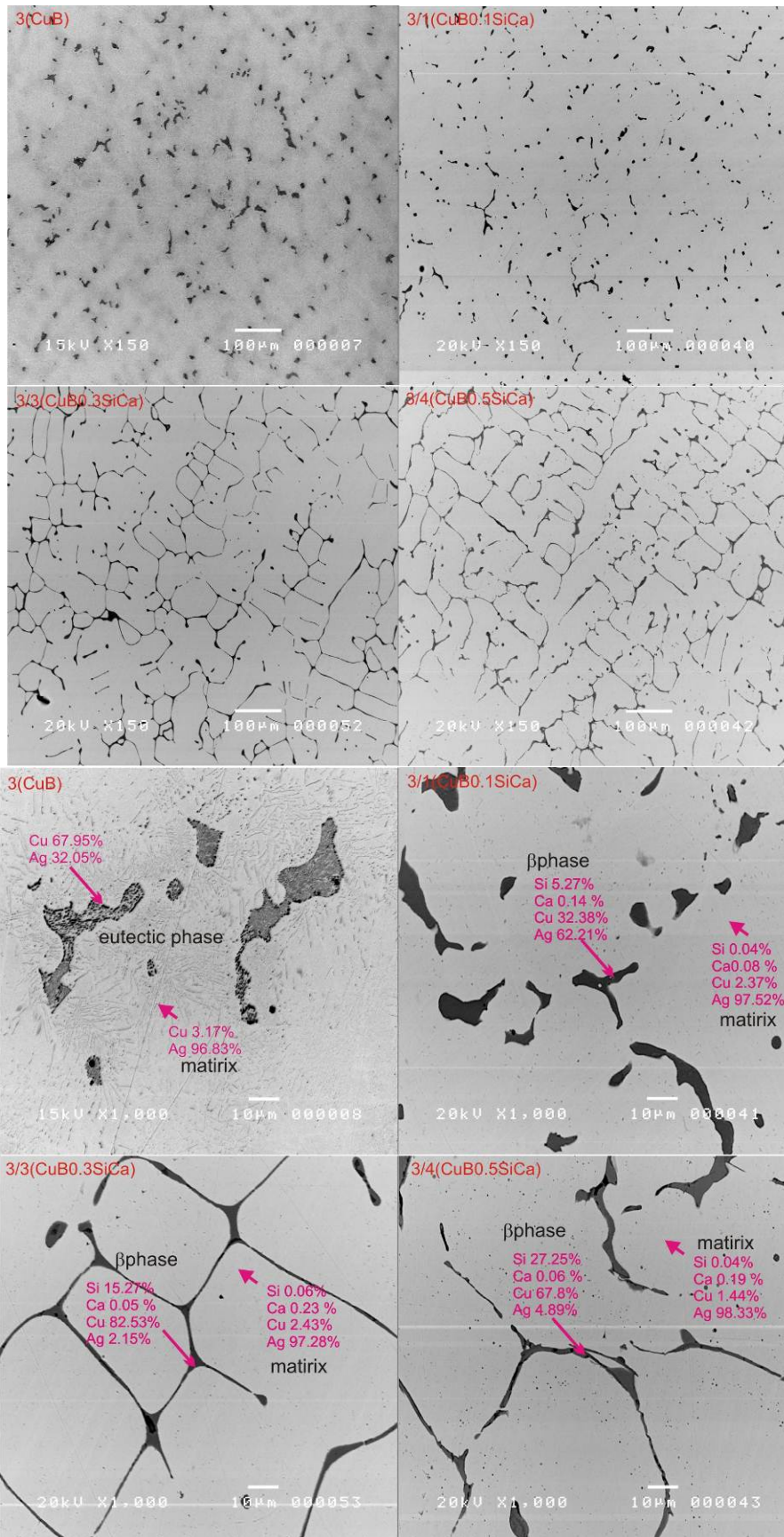
ผลการศึกษ ปริมาณธาตุและโครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS



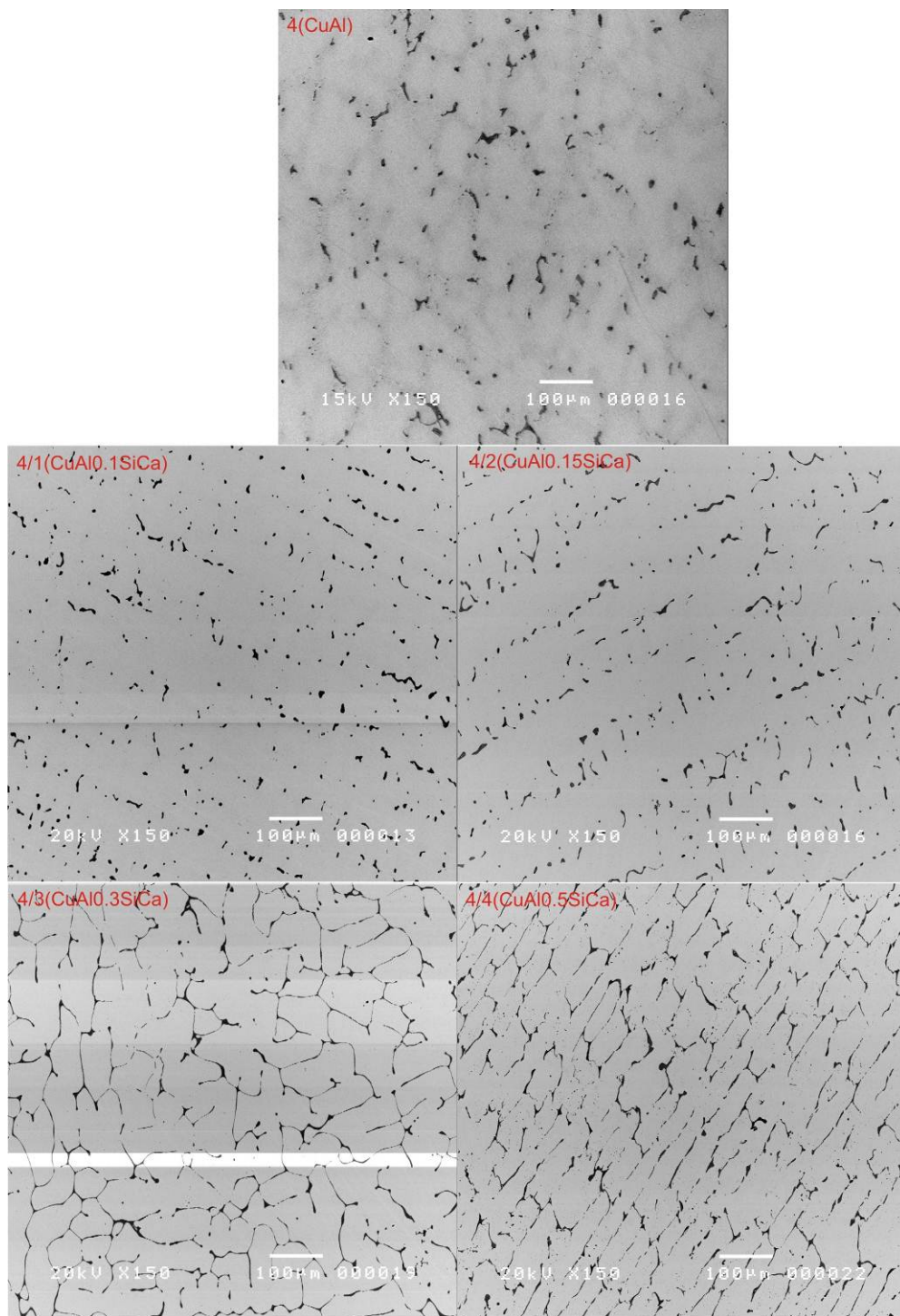
ผลการศึกษ ปริมาณธาตุและโครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS



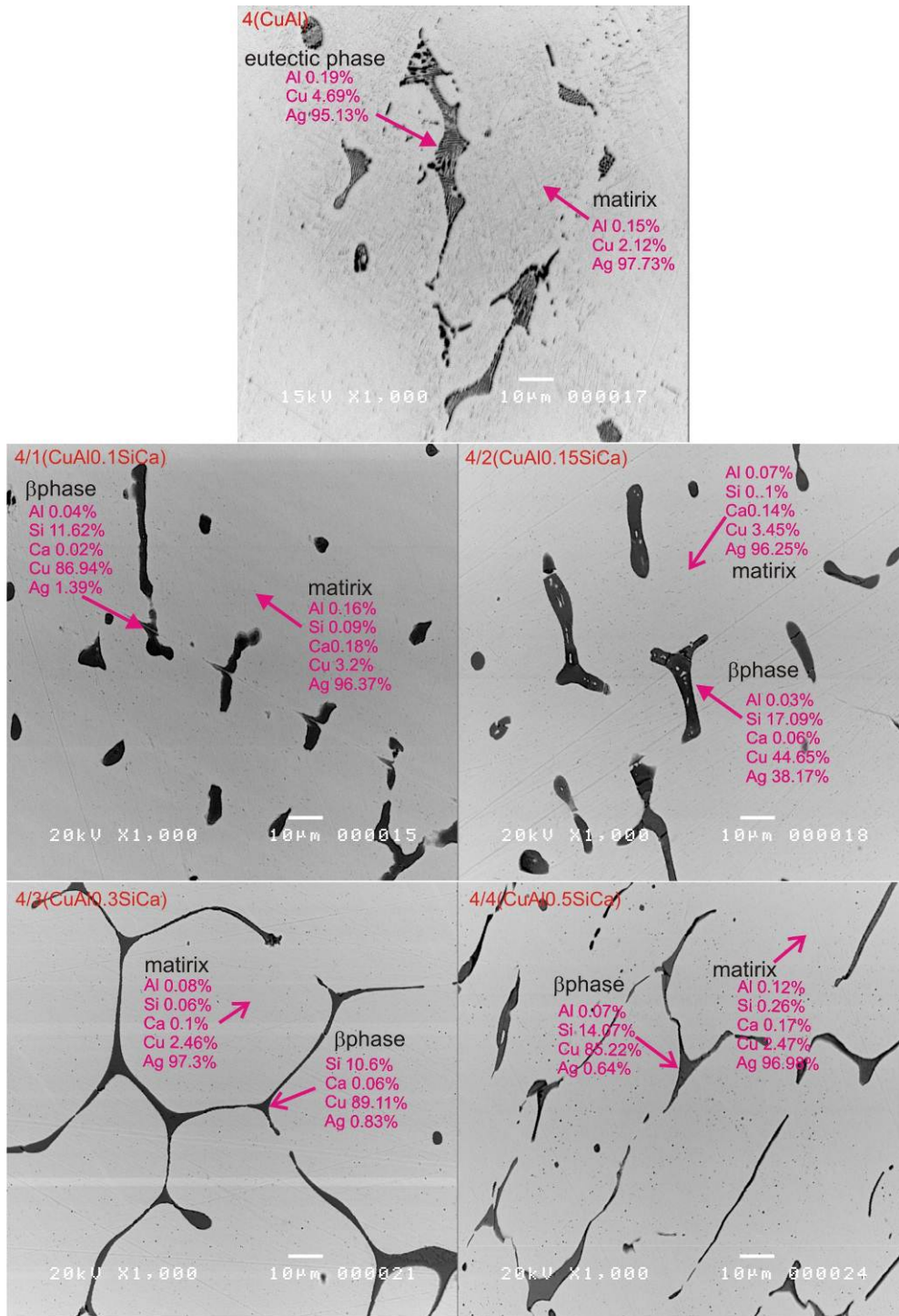
ผลการศึกษ ปริมาณธาตุและโครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS



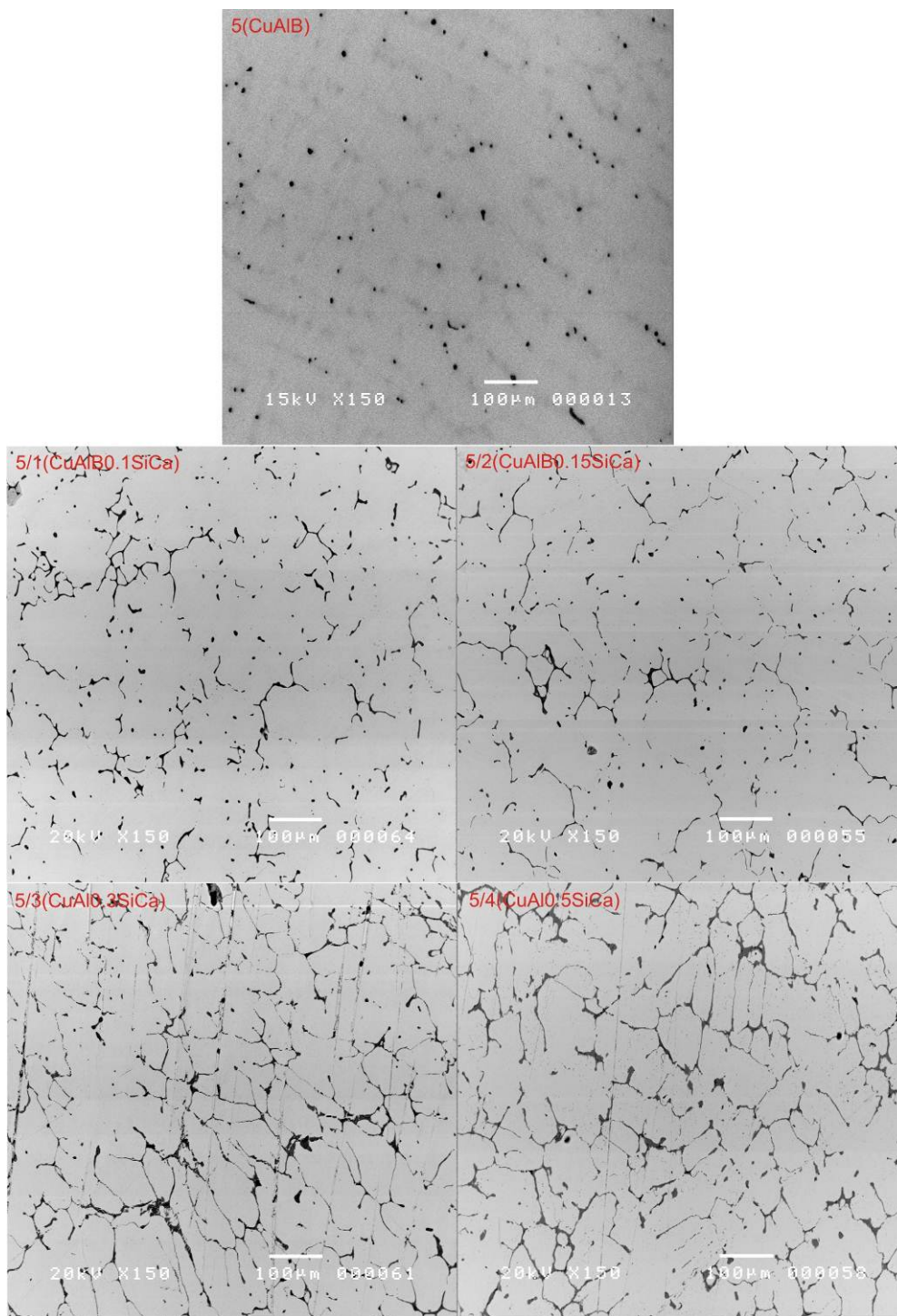
ผลการศึกษาปริมาณธาตุและโครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS



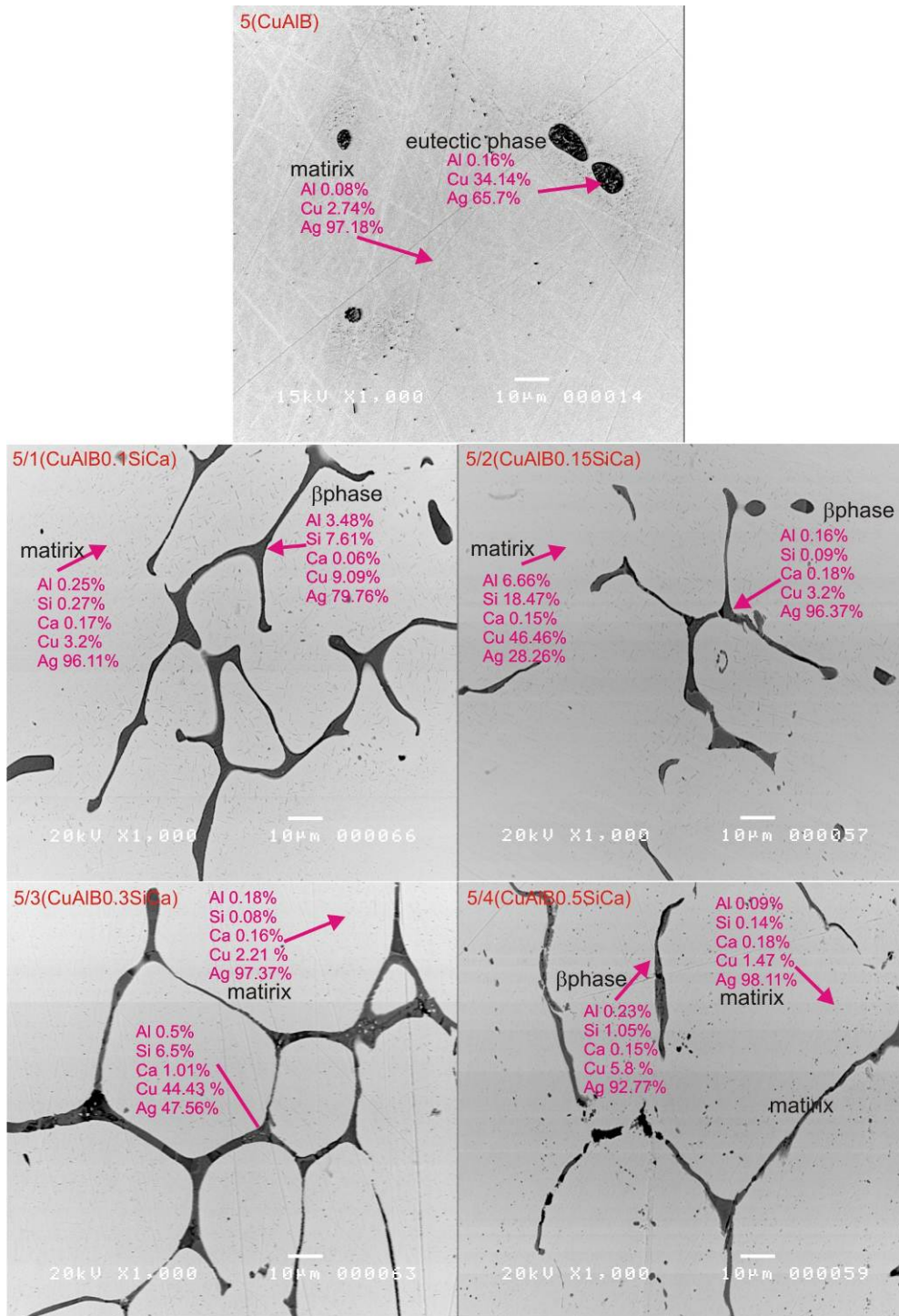
ผลการศึกษ ปริมาณธาตุและโครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS



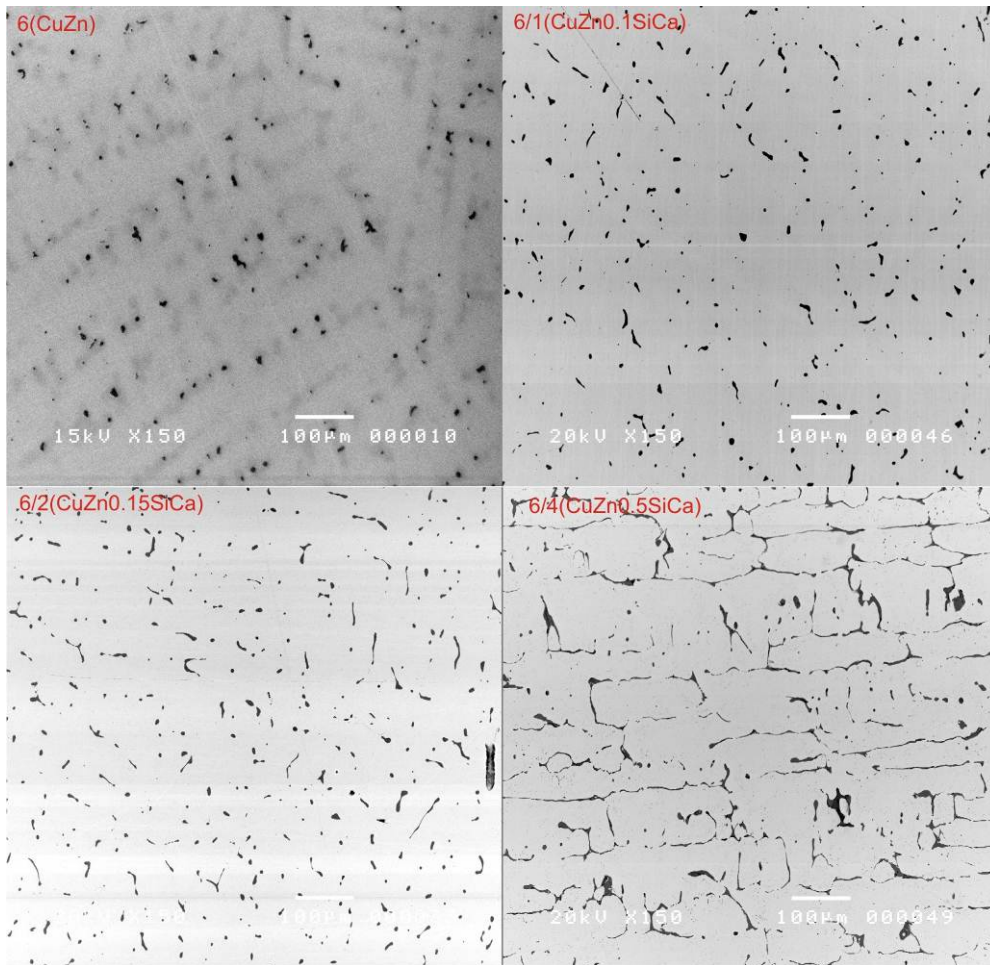
ผลการศึกษาปริมาณธาตุและโครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS



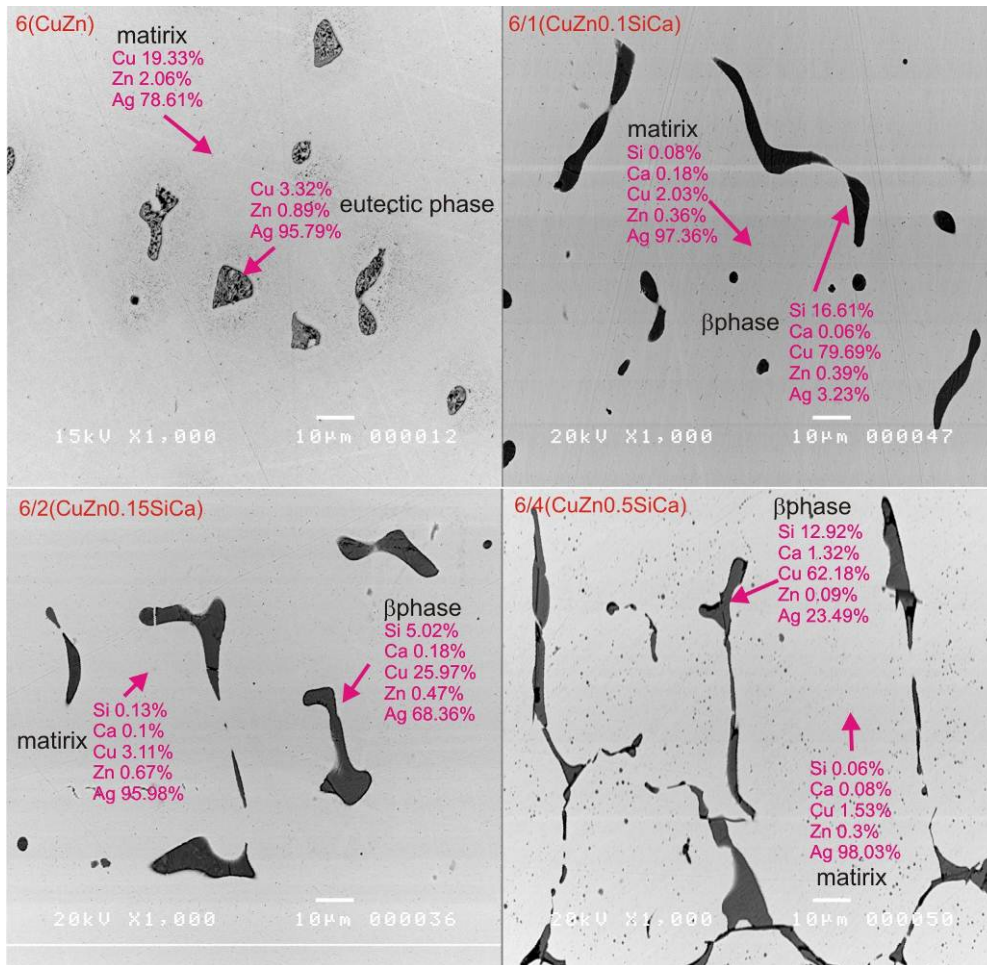
ผลการศึกษ ปริมาณธาตุและโครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS



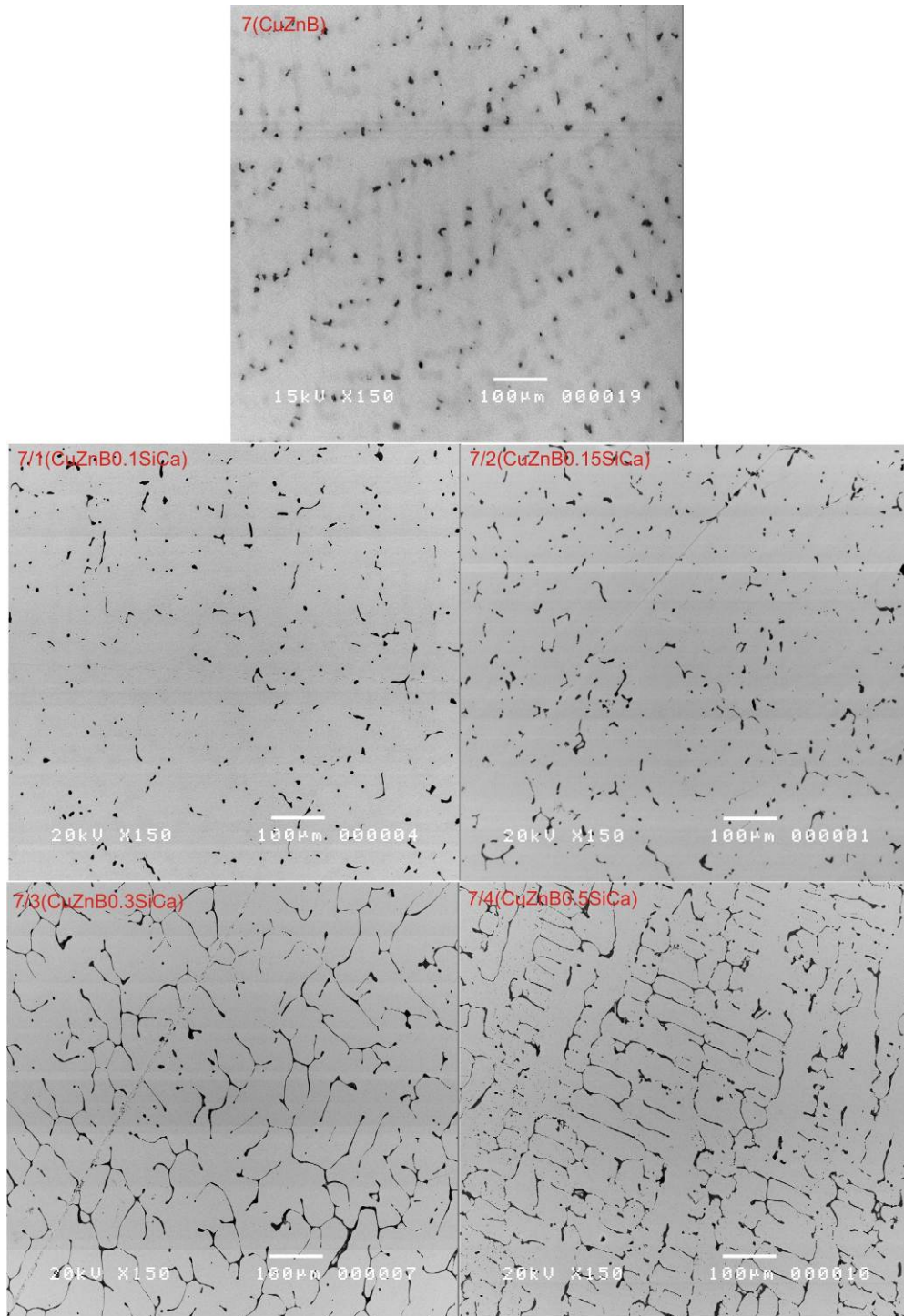
ผลการศึกษาปริมาณธาตุและโครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS



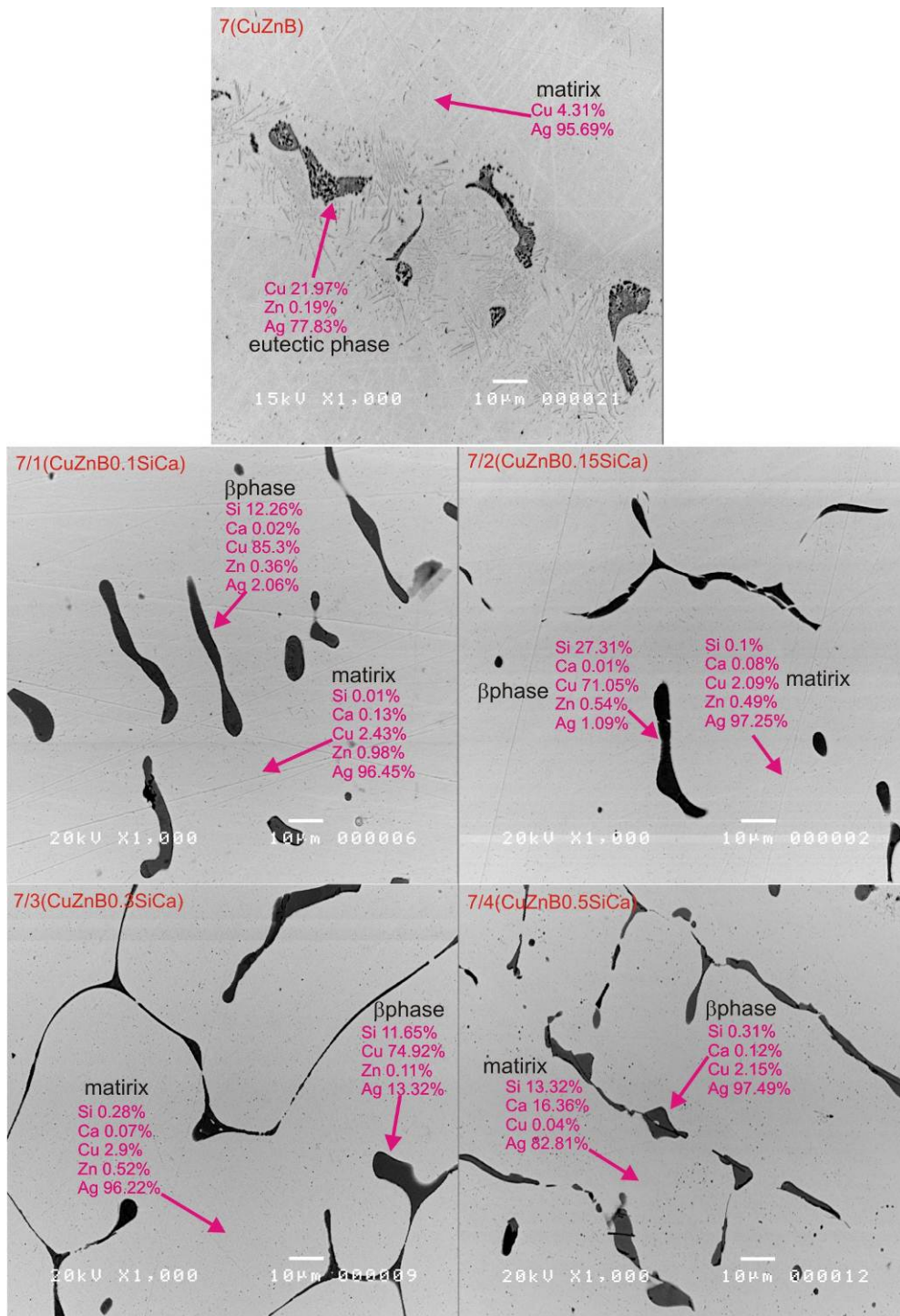
ผลการศึกษ ปริมาณธาตุและโครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS



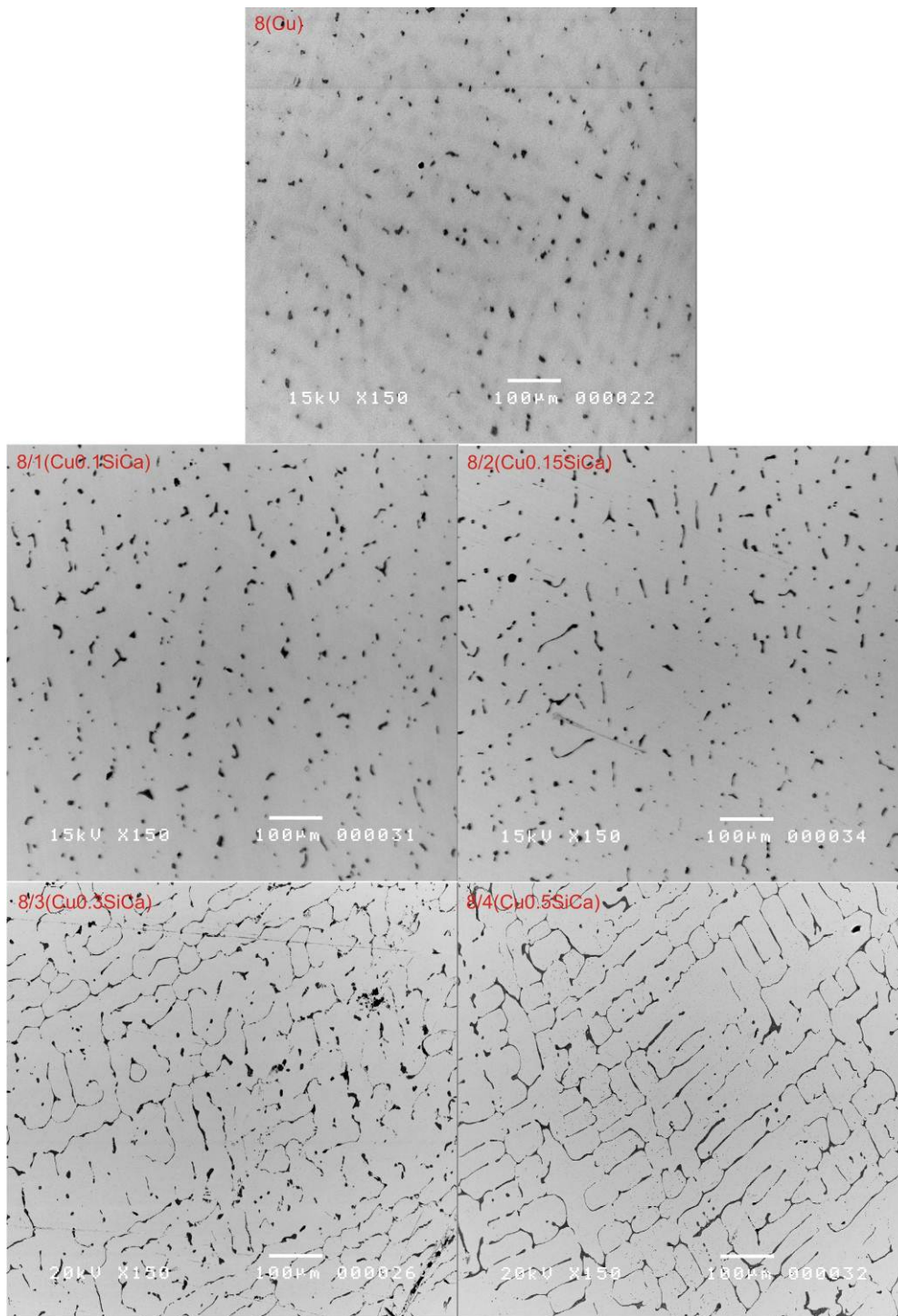
ผลการศึกษ ปริมาณธาตุและโครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS



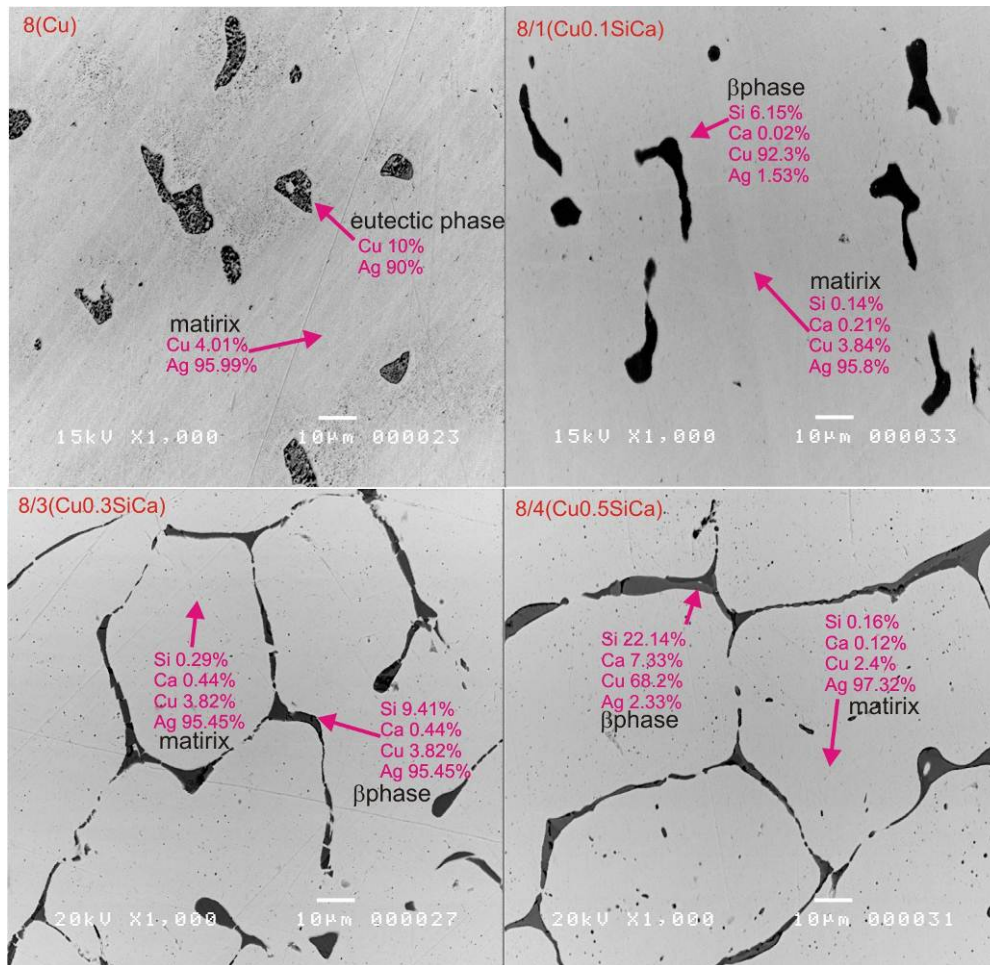
ผลการศึกษ ปริมาณธาตุและโครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS



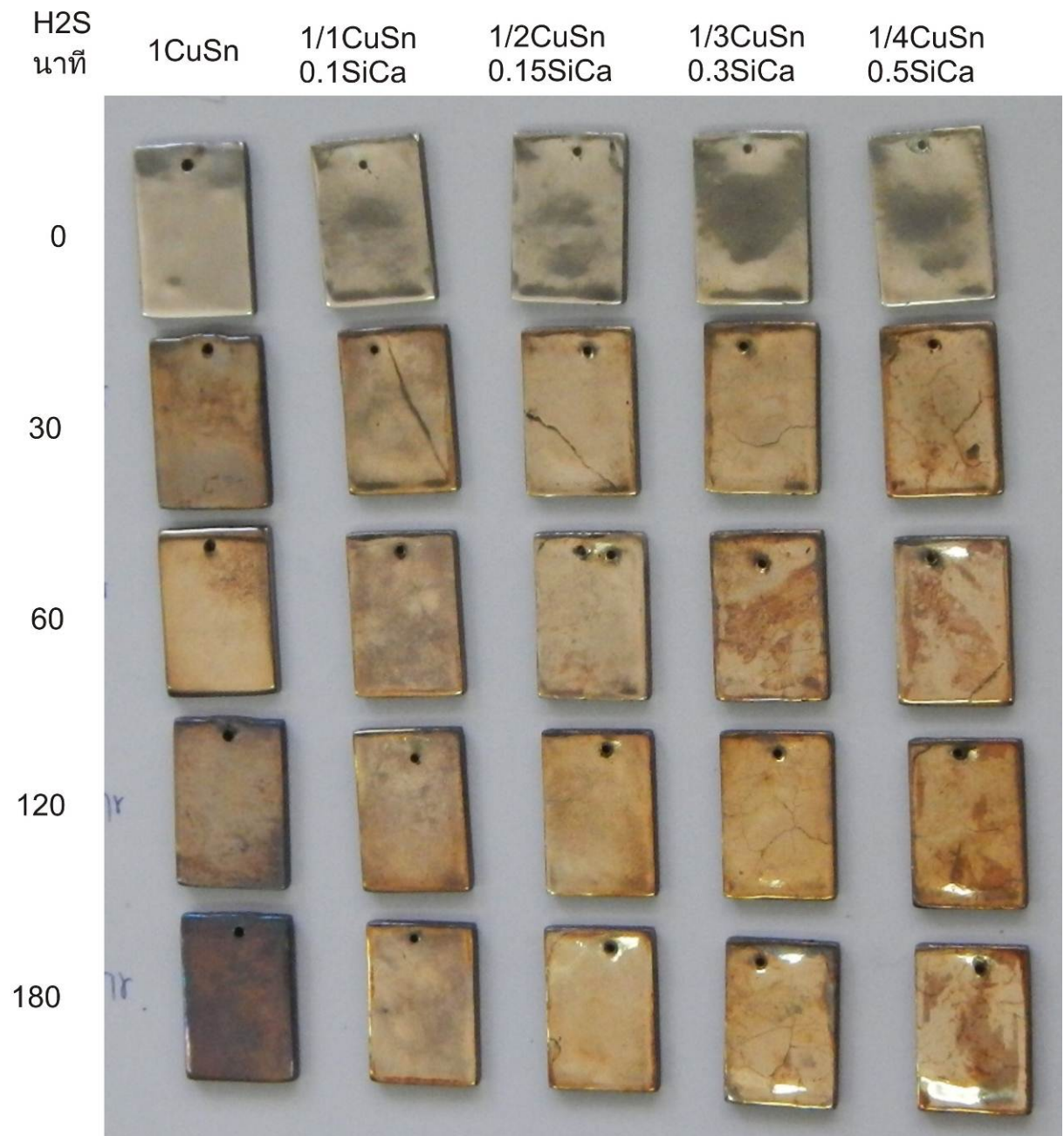
ผลการศึกษาปริมาณธาตุและโครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS

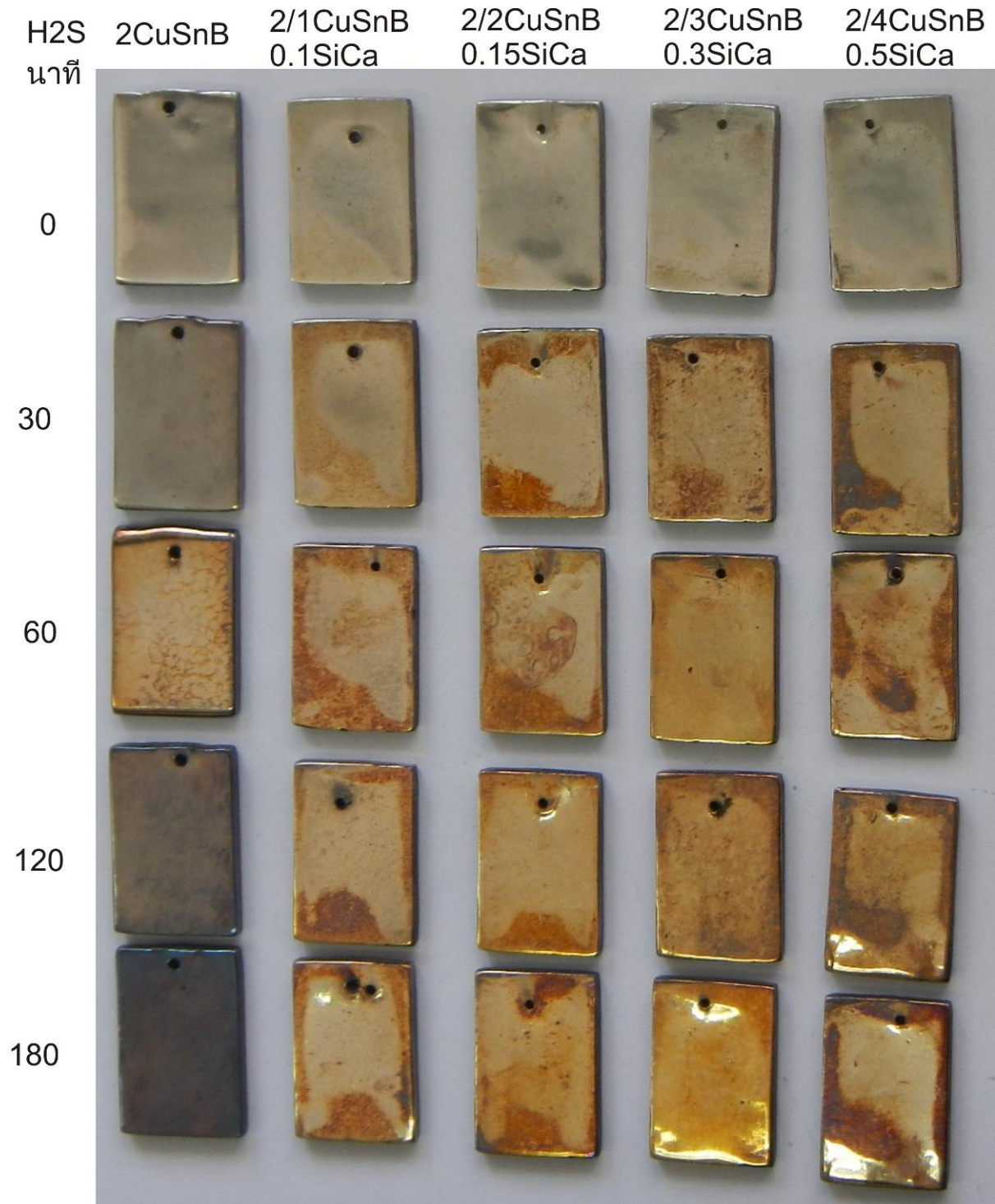


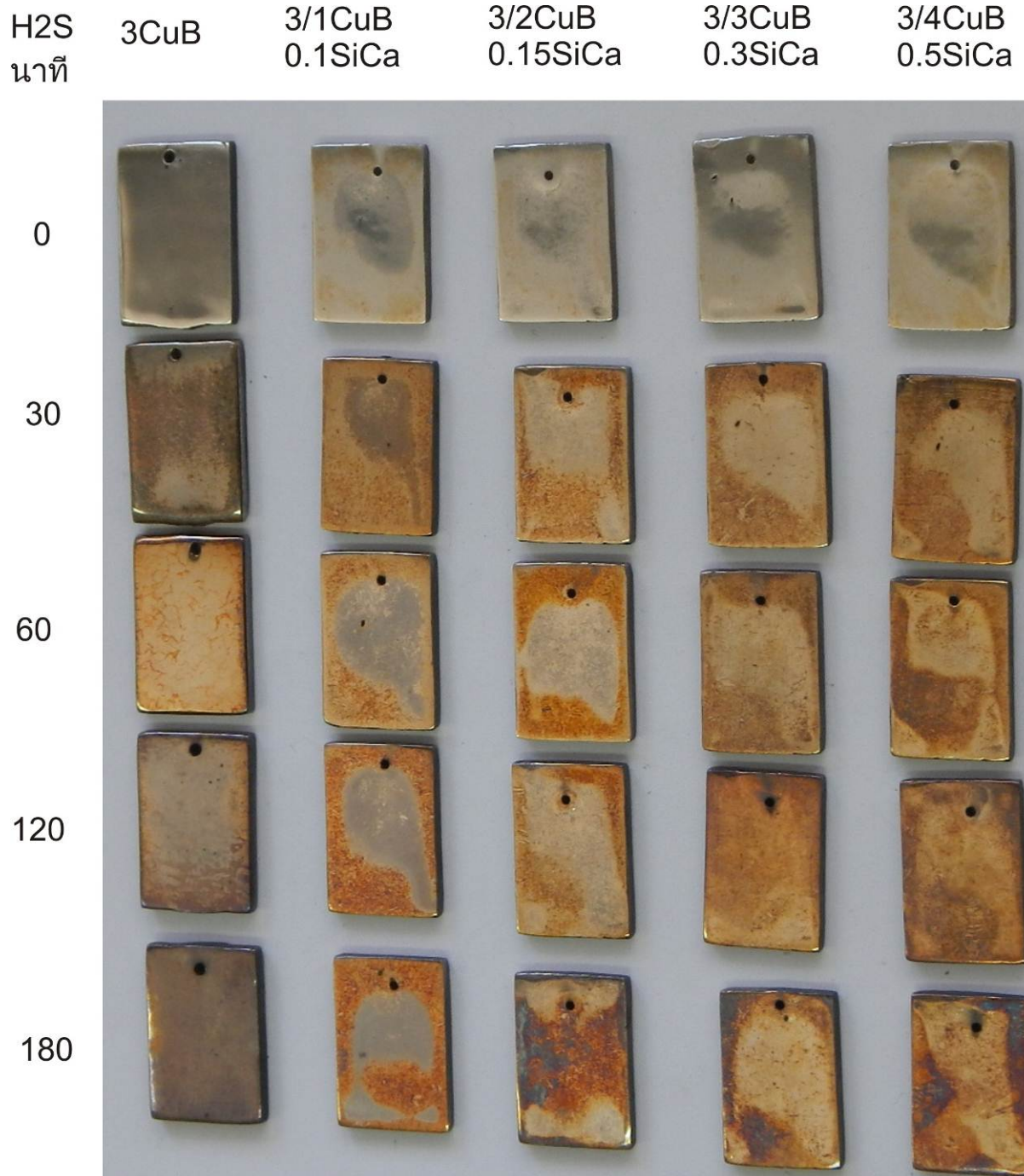
ผลการศึกษ ปริมาณธาตุและโครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS

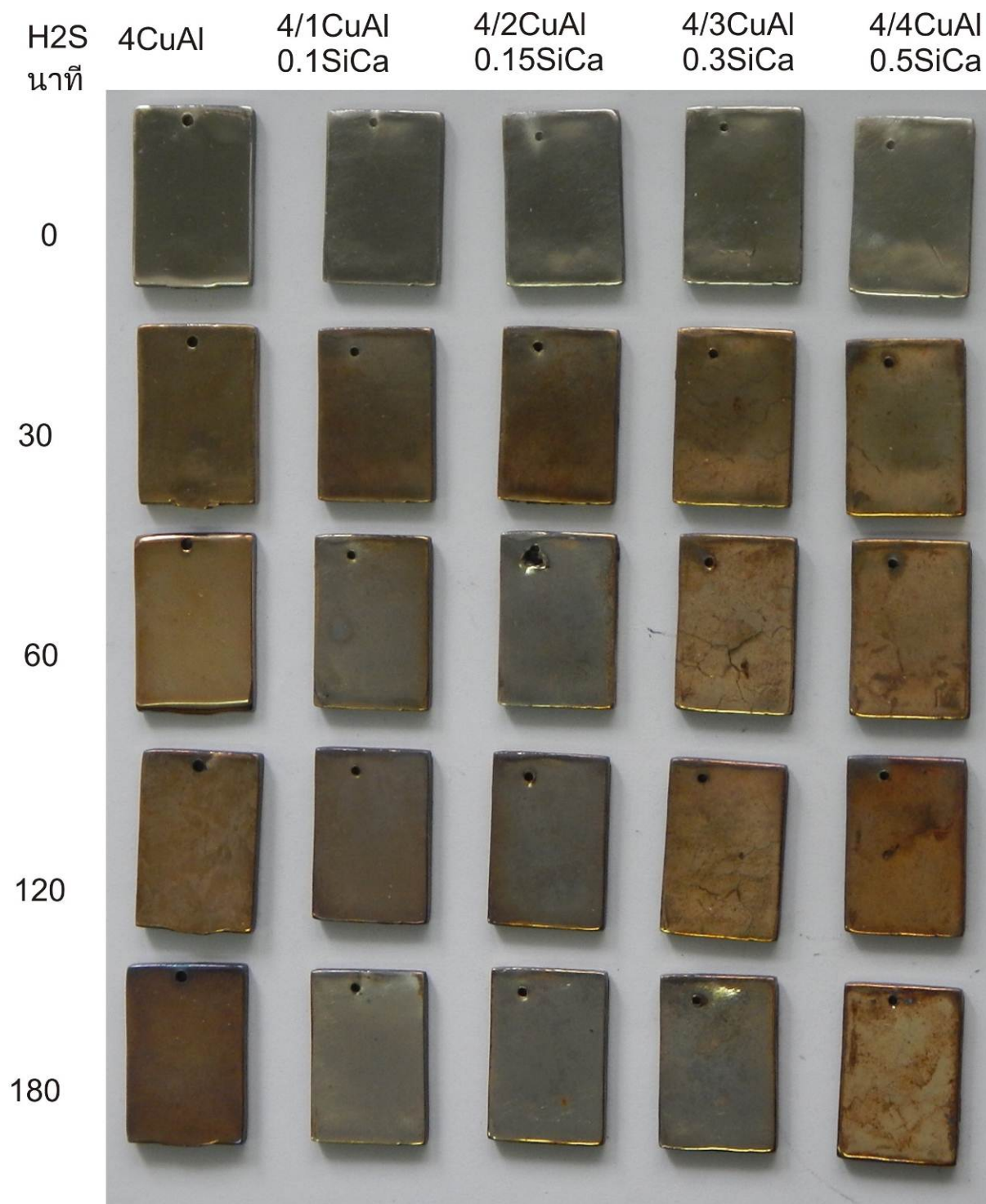


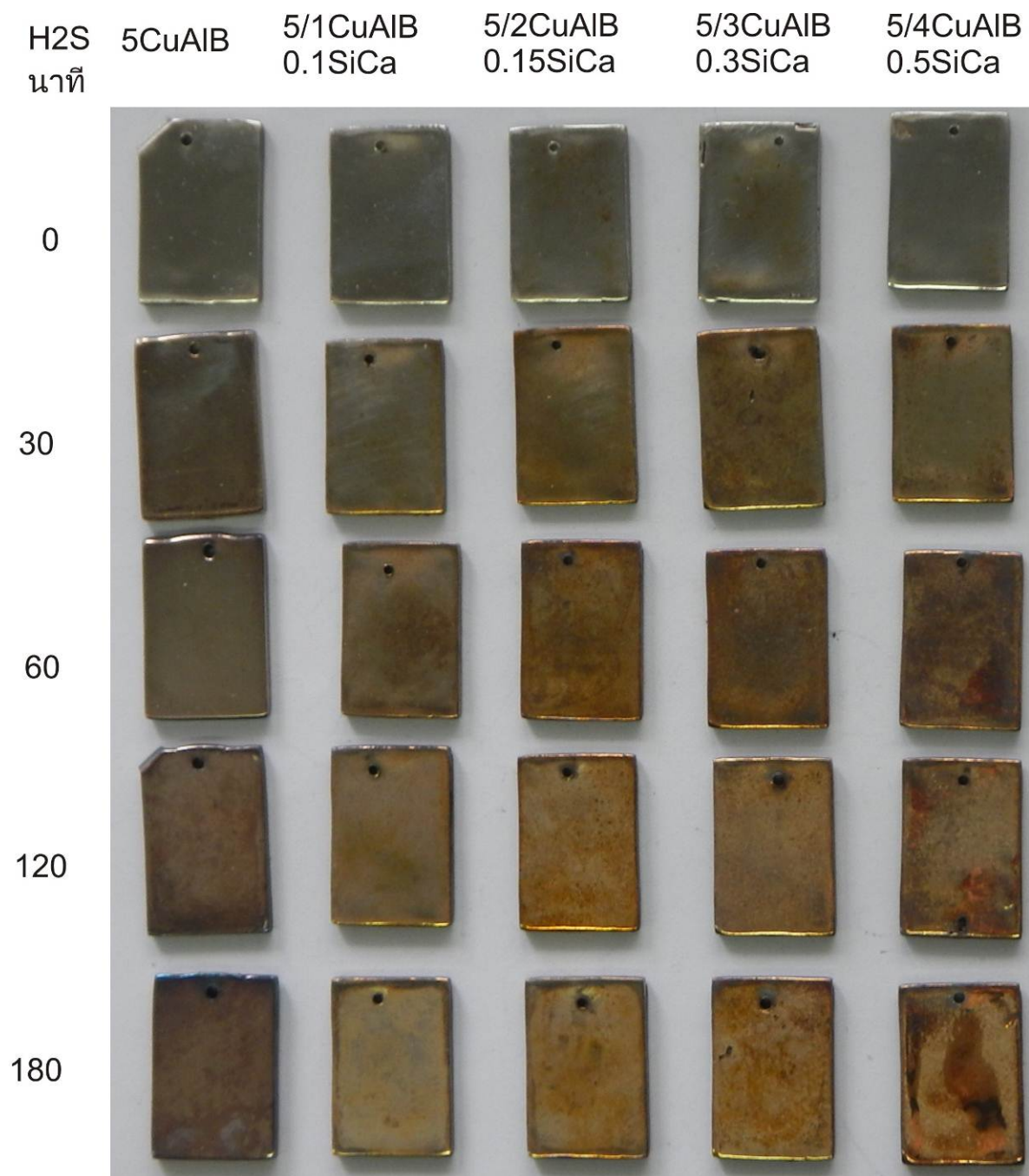
ค. ผลการศึกษาความต้านทานการหมองจากความแตกต่างของสี dE^* ในบรรยากาศ H_2S

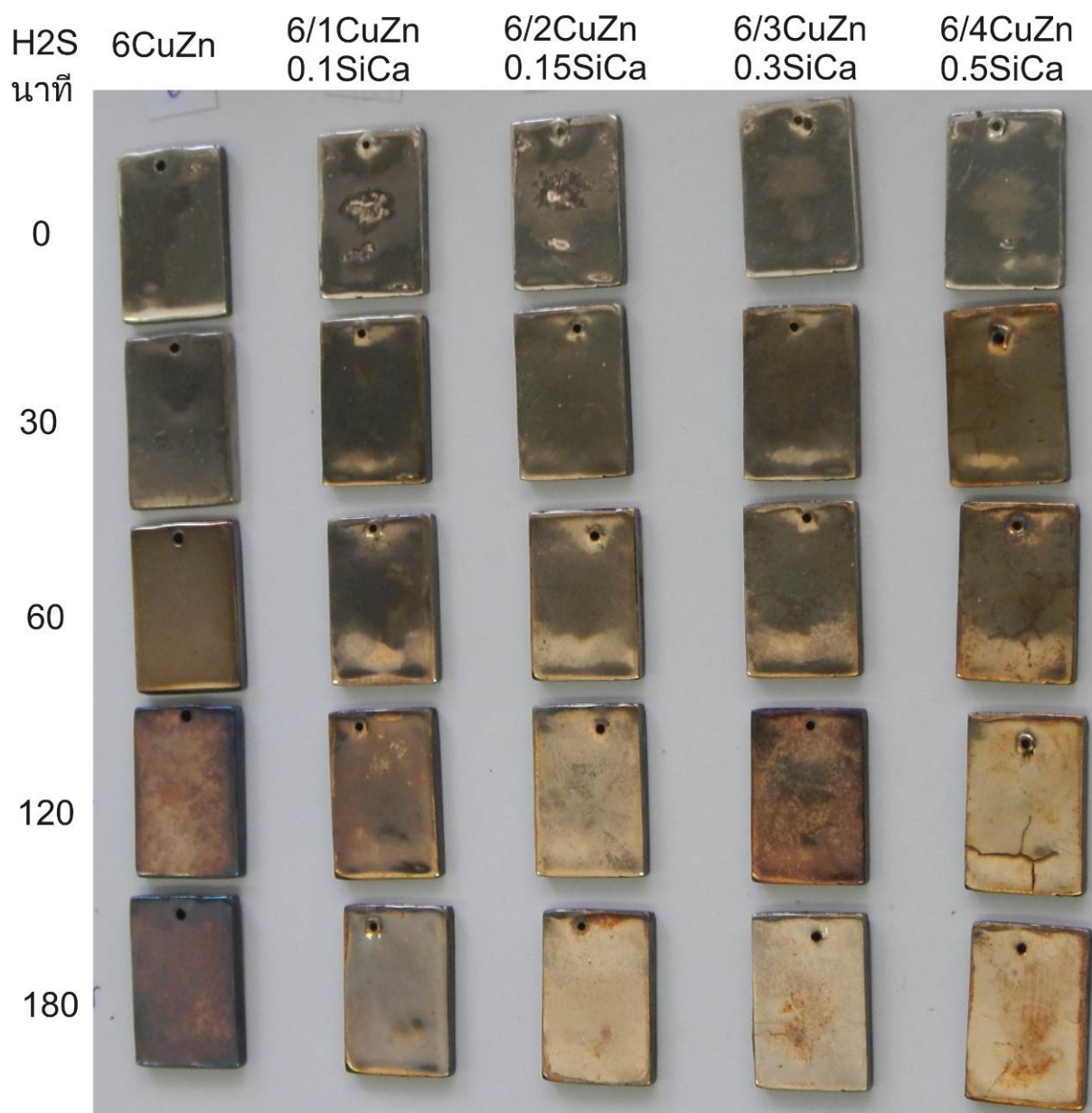
ผลการศึกษาค่าความต้านทานการหมองในบรรยากาศ H_2S 

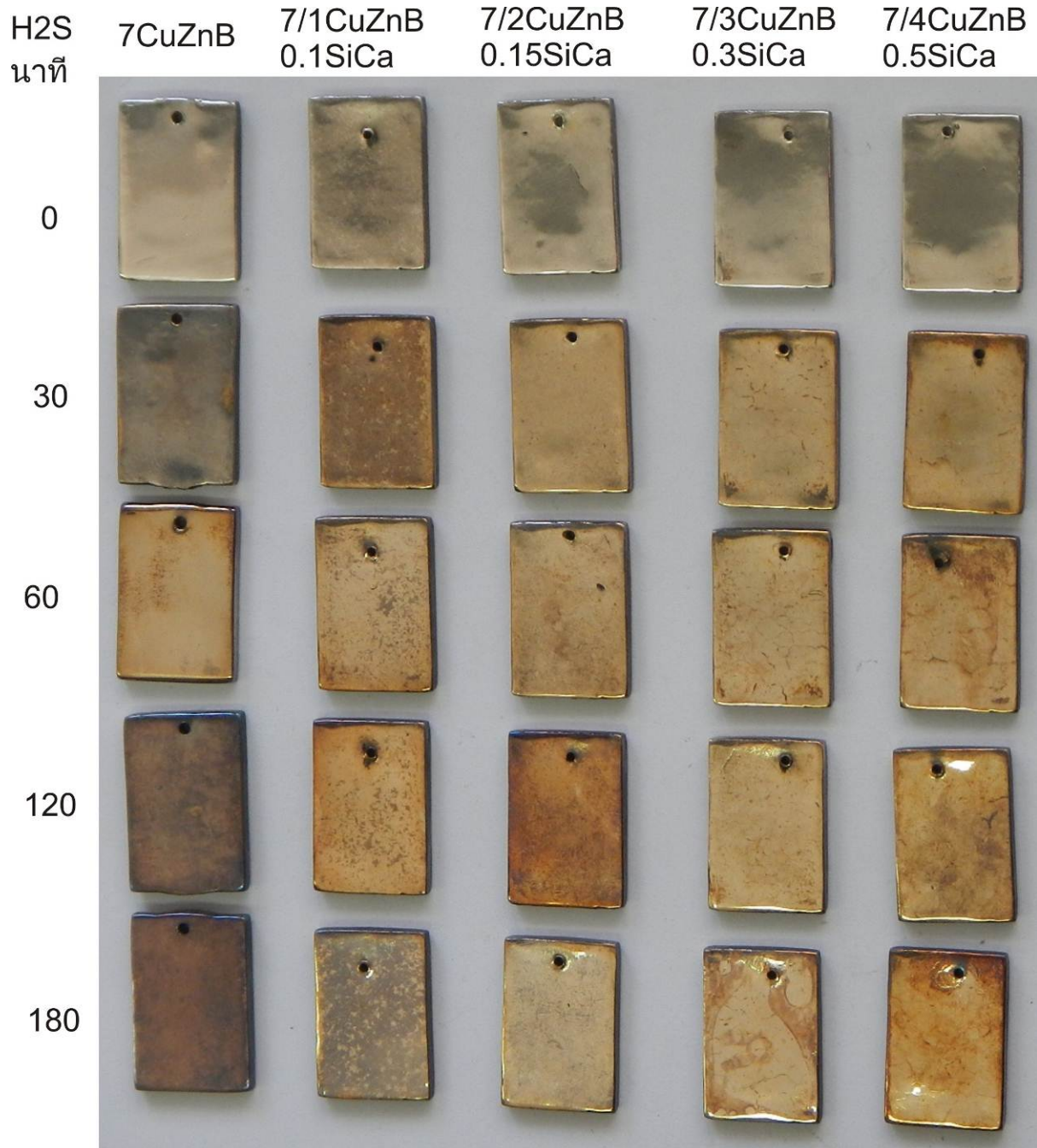
ผลการศึกษาค่าความต้านทานการหมองในบรรยากาศ H_2S 

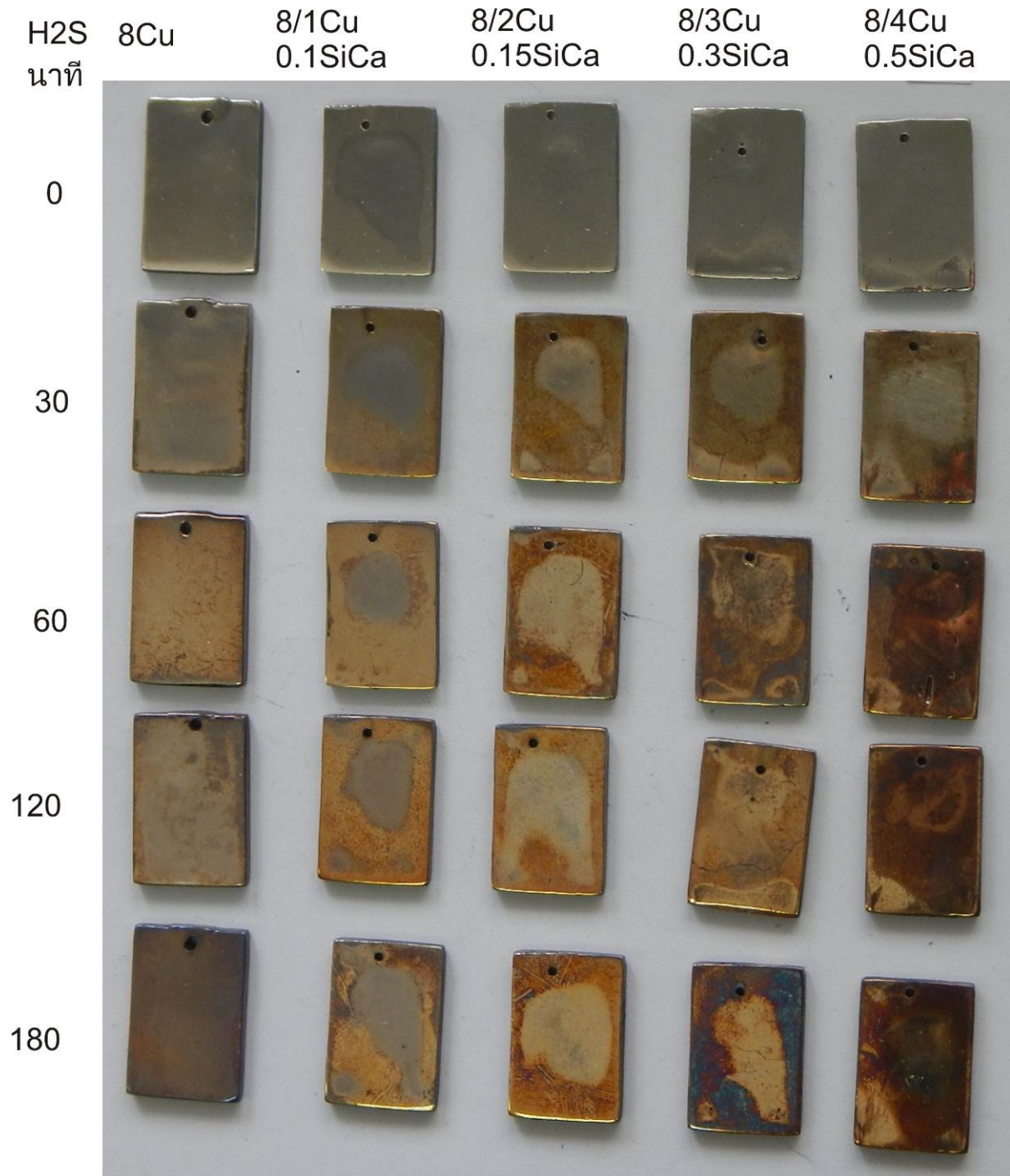
ผลการศึกษาความต้านทานการหมองในบรรยากาศ H_2S 

ผลการศึกษาค่าความต้านทานการหมองในบรรยากาศ H_2S 

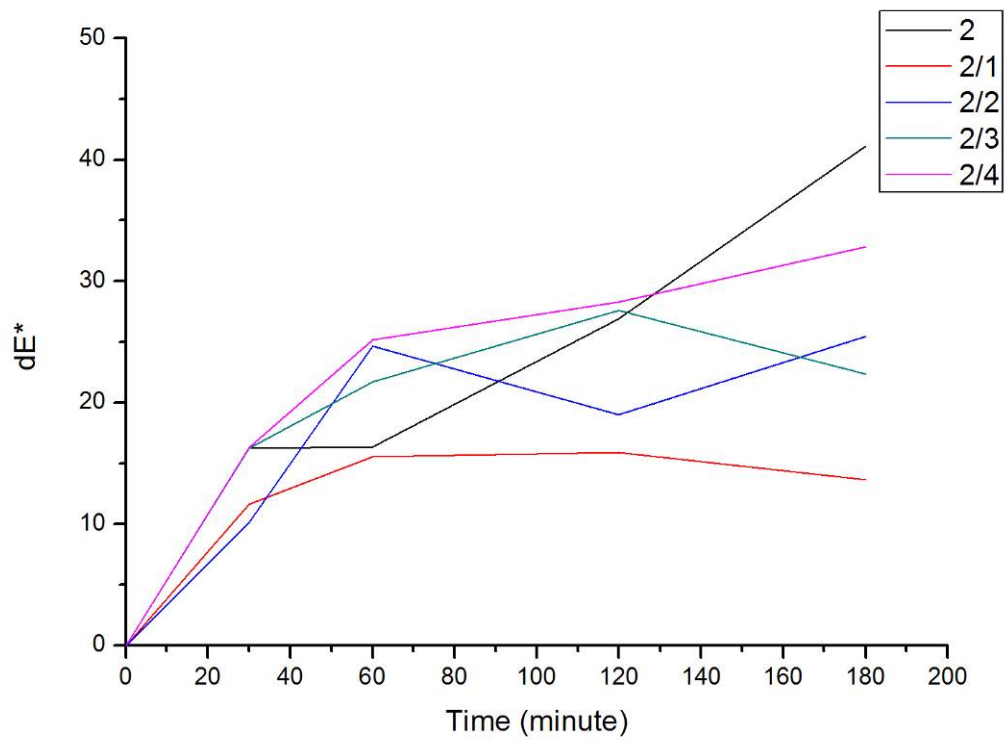
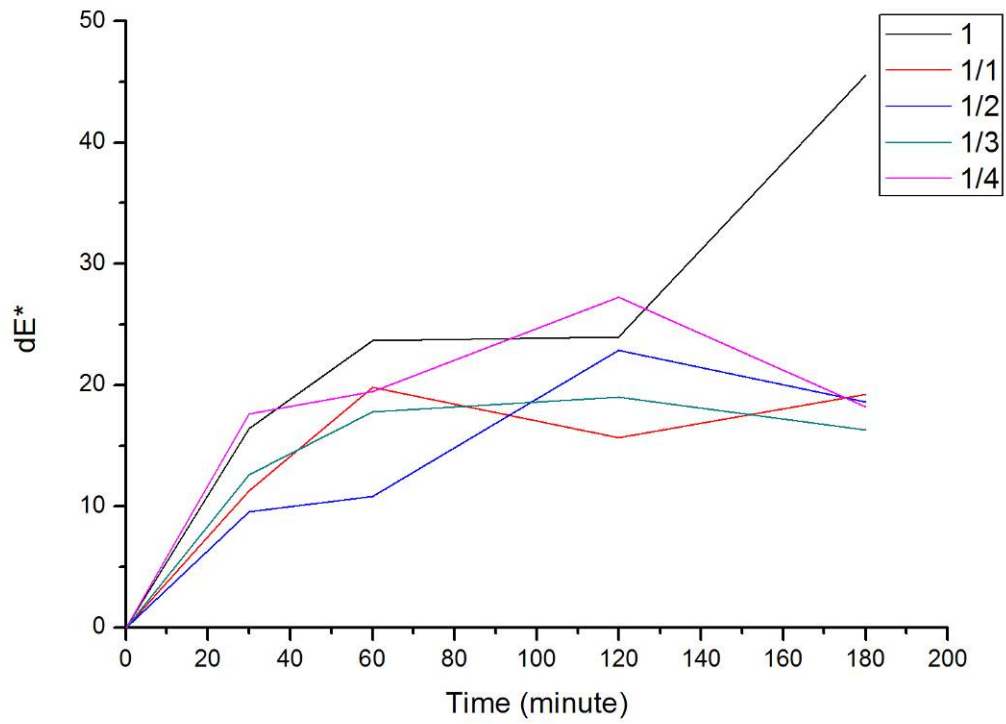
ผลการศึกษาค่าความต้านทานการหมองในบรรยากาศ H₂S

ผลการศึกษาค่าความต้านทานการหมองในบรรยากาศ H_2S 

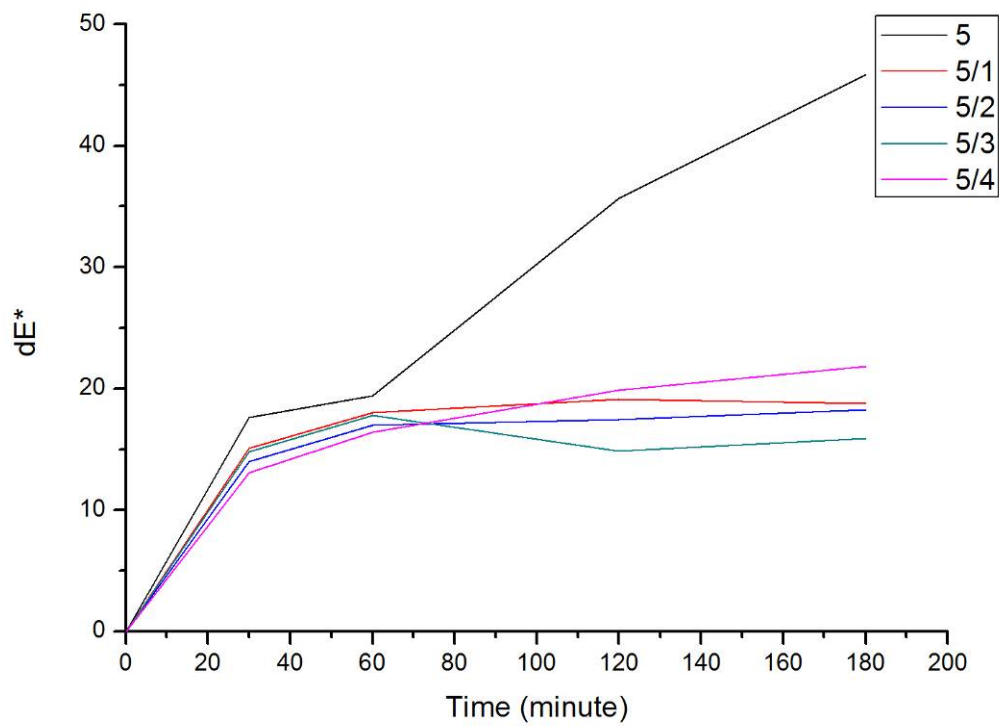
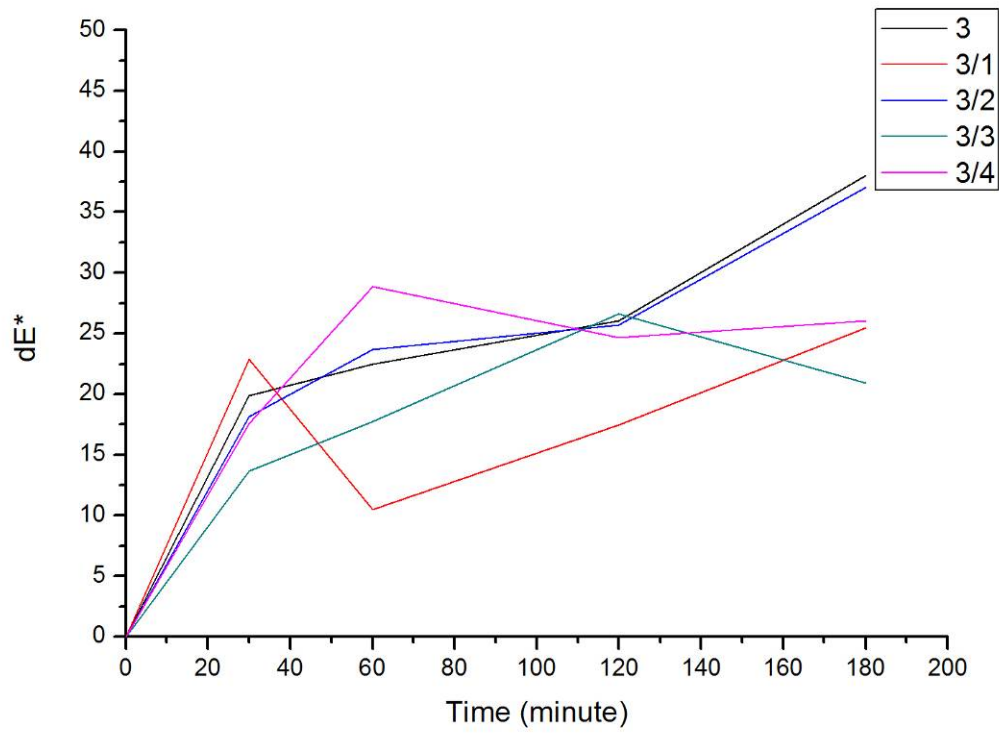
ผลการศึกษาค่าความต้านทานการหมองในบรรยากาศ H_2S 

ผลการศึกษาค่าความต้านทานการหมองในบรรยากาศ H_2S 

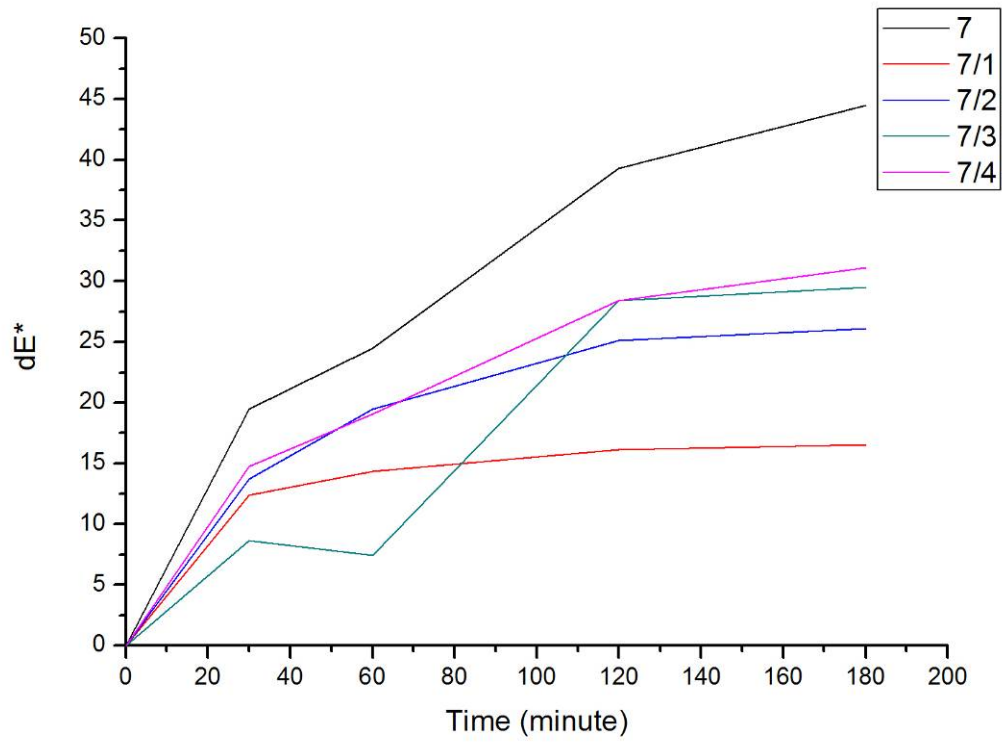
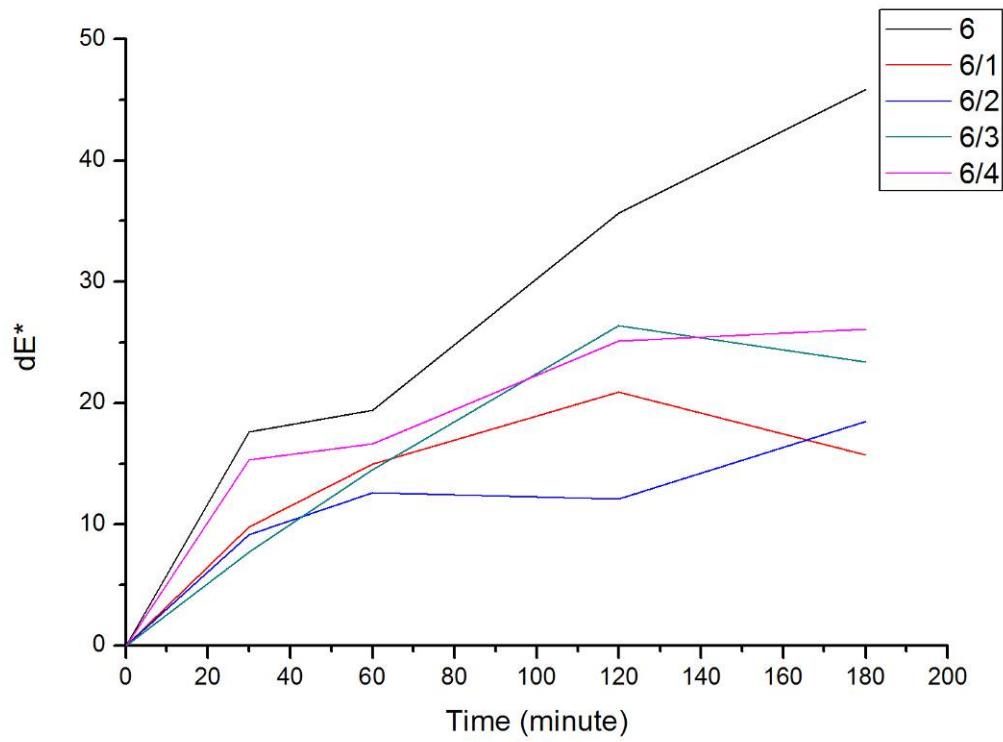
ผลการศึกษาค่าความต้านทานการหมองจากความแตกต่างของสี dE^* ในบรรยากาศ H_2S



ผลการศึกษาค่าความต้านทานการหมองจากความแตกต่างของสี dE^* ในบรรยากาศ H_2S



ผลการศึกษาค่าความต้านทานการหมองจากความแตกต่างของสี dE^* ในบรรยากาศ H_2S



ผลการศึกษาค่าความต้านทานการหมองจากความแตกต่างของสี dE^* ในบรรยากาศ H_2S

