



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาทองเหลืองเพื่อเพิ่มสมรรถนะด้านการผลิต
ในอุตสาหกรรมผลิตเครื่องประดับ

The Development of Brass to enhance Manufacturing
performance in the Jewelry Industry

โดย ดร.สิริวรรณ สกุลตันเจริญชัย และคณะ
ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
1 มีนาคม 2562

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาทองเหลืองเพื่อเพิ่มสมรรถนะด้านการผลิต
ในอุตสาหกรรมผลิตเครื่องประดับ

The Development of Brass to enhance Manufacturing
performance in the Jewelry Industry

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | | | |
|----|------------------|-----------------|--|
| 1. | ดร. สิริวรรณ | สกุลตันเจริญชัย | ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 2. | รศ.ดร. เอกสิทธิ์ | นิสารัตนพร | ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 3. | คุณ กนกวรรณ | แสงเกียรติยุทธ | สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |

ชุดโครงการ “การพัฒนาอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม” ปีงบประมาณ 2561

สนับสนุนโดย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานฉบับนี้เป็นของผู้วิจัย วช. - สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สัญญาเลขที่ RDG61T0042
โครงการ “การพัฒนาทองเหลืองเพื่อเพิ่มสมรรถนะด้านการผลิตใน
อุตสาหกรรมผลิตเครื่องประดับ”
สรุปรายงานความก้าวหน้า

ส่วนที่ 1 ข้อมูลโครงการ

ชื่อผู้รับทุน : ดร.สิริวรรณ สกุดตันเจริญชัย

โครงการเริ่มเมื่อ

วันที่ 1 ธันวาคม 2560 ถึงวันที่ 30 พฤศจิกายน 2561

รวมเวลาที่ทำวิจัยทั้งสิ้น 12 เดือน

รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2 ในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 ธันวาคม 2560 ถึง 30 พฤศจิกายน 2561

บทสรุปผู้บริหาร

ตามที่คณะผู้วิจัยได้รับทุนเพื่อสนับสนุนการวิจัยในชื่อโครงการ “การพัฒนาทองเหลืองเพื่อเพิ่มสมรรถนะด้านการผลิตในอุตสาหกรรมผลิตเครื่องประดับ” ตามสัญญาเลขที่ RDG61T0042 โดยระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี ตั้งแต่ 1 ธันวาคม 2560 ถึง 1 พฤศจิกายน 2561 โครงการนี้มีวัตถุประสงค์ในการทำวิจัยดังนี้

1. ศึกษาธาตุผสมที่มีผลต่อการปรับลดขนาดเกรนต่อการพัฒนาโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล และความสามารถในการหล่อของทองแดงผสม
2. ศึกษาปริมาณและชนิดของธาตุปรับลดขนาดเกรนที่เหมาะสมสำหรับทองแดงผสมเพื่อผลิตเครื่องประดับ
3. ศึกษาความสัมพันธ์ของคุณภาพผิวและสมบัติทางกลของตัวเรือนเครื่องประดับที่ผ่านการผลิตและเติมธาตุที่เหมาะสมทั้งสีผิวและความต้านทานการหมองเพื่อเป็นต้นแบบใช้งานเชิงอุตสาหกรรม

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สร้างทองแดงผสมอย่างต่ำ 2 ประเภทที่สามารถเพิ่มผลผลิตและยกระดับความสามารถการผลิตเครื่องประดับเช่น ลดปริมาณทางน้ำ ลดรอยผุ ลดการเกิดจุดแข็ง รวมถึงได้แนวทางการใช้สารเติมปรับลดขนาดเกรนที่เหมาะสมกับการผลิต
2. เผยแพร่องค์ความรู้สำหรับการผลิตทองแดงผสมเพื่อการผลิตเครื่องประดับที่มีคุณค่า และสามารถผลิตได้จริงในประเทศ

เป้าหมายหลักของงานวิจัย คือ การพัฒนาโลหะทองแดงผสมหรือทองเหลืองที่มีสมรรถนะที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการผลิตเครื่องประดับ มีความต้านทานการหมองเพิ่มสูงขึ้นและมีเกรนที่ละเอียดโดยใช้ตัวลดขนาดเกรน จากการศึกษาพบว่า ผลของธาตุผสมมีอิทธิพลต่อขนาดเกรน โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล ตลอดจนความสามารถในการหล่อ และสีของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นผลการวิจัยสามารถนำมาสรุปเป็นประเด็นหลักในกลุ่มทองแดงผสมตามสีผิวโลหะและการใช้งานได้ดังนี้

1. กลุ่มทองแดงผสมสีชมพู

ในโลหะทองแดงผสมที่ให้สีชมพูได้ดี คือ โลหะบรอนซ์ดีบุก ได้แก่ 1) Cu₃Sn 2) Cu₅Sn 3) Cu₇Sn อย่างไรก็ตามในกลุ่มนี้ โลหะทองแดงผสมที่ให้การหล่อหลอมได้ดีและไม่แข็งเกินไป ได้แก่ ชิ้นงาน 2) Cu₅Sn โดยทั่วไปกลุ่มนี้เหมาะกับการหล่อใช้อุณหภูมิ 1080 องศาเซลเซียส มีอัตราการหดตัว 3.9 % สามารถเติมธาตุลดขนาดเกรน ได้แก่ ทองแดงผสมโครเมียมที่ทำให้เกรนเล็กลงจาก 3 มม. เป็น 0.9 มม. แต่มีความแข็งแรงสูงสุดและอัตรายืดตัวลดลงเล็กน้อย

การเพิ่มปริมาณดีบุกในช่วง 3-7 % ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จาก 69.4 - 93.4 HV_{0.2} ค่าการไหลของน้ำโลหะ(Fluidity) ในช่วง 8.7 - 14 มม. มีค่าความแข็งแรงสูงสุดเพิ่มขึ้นในช่วง 277.6 - 328.6 MPa และ อัตรา

การยืดตัวเพิ่มขึ้นในช่วง 48.9-62.8% และมีขนาดเกรนเฉลี่ยที่ 3-4.8 มม. การเติมธาตุผสมดีบุกในปริมาณสูงจะส่งผลให้โลหะผสมมีโอกาสเกิดการกัดกร่อนได้ยาก อย่างไรก็ตามเมื่อการกัดกร่อนเกิดขึ้นแล้ว โลหะผสมที่มีปริมาณดีบุก 7% จะมีค่าอัตราการกัดกร่อนของสูงกว่าโลหะผสมที่มีดีบุก 5% และ 3% เท่ากับ 2.2 และ 2.75 เท่า ตามลำดับ ทำให้ทองแดงผสมดีบุก เช่น 1)Cu3Sn เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า DE ต่ำที่สุดในกลุ่มทดลอง ดังนั้นในโลหะผสมในกลุ่มนี้มีสองตัวเลือก คือ 1)Cu3Sn และ 2)Cu5Sn ขึ้นกับสมบัติการต้านทานการหมองหรือสมบัติการหล่อที่ดี

2. กลุ่มทองแดงผสมสีเหลือง ที่แยกย่อยออกเป็นทองเหลือง และบรอนซ์

โลหะที่จัดในกลุ่มนี้ ได้แก่ 8)Commercial alloy 9)Cu12Zn3Sn 10)Cu15Zn3Sn0.5Si 6)Cu20.5Zn2.25Si 4)Cu15Zn3Sn 7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1AlBe 11)Cu15Zn0.2Si2Sn โดยพบว่าโลหะในกลุ่มนี้ที่แสดงค่าการไหลตัวของน้ำโลหะได้ดี ได้แก่ 6)Cu20.5Zn2.25Si (ที่ fluidity 15.8 มม.) 10)Cu15Zn3Sn0.5Si (ที่ fluidity 15.2 มม.) 11)Cu15Zn0.2Si2Sn (ที่ fluidity 14.7 มม.) 8)Commercial alloy (ที่ fluidity 13.8 มม.) และ 4)Cu15Zn3Sn (ที่ fluidity 13.3 มม.) จากผลการเติมธาตุผสมเพื่อการหล่อ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

ซิลิคอน ช่วยส่งเสริมการหล่อ ทำให้การไหลของน้ำโลหะดีขึ้น ชิ้นงาน 4)Cu15Zn3Sn ที่เติมซิลิคอน 0.5% มีค่าการไหลของน้ำโลหะเปลี่ยนแปลงจาก 13.3 มม.เป็น 15.2 มม.ดังที่พบในชิ้นงาน 10)Cu15Zn3Sn0.5Si และส่งผลให้ขนาดเกรนโตขึ้นจาก 1.6 มม. เป็น 3.3 มม. แต่ค่าความแข็งแรงสูงสุดลดลงจาก 278 MPa (4)Cu15Zn3Sn เป็น 264 MPa (10)Cu15Zn3Sn0.5Si)

สังกะสี ที่ใช้ในปริมาณเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการขยายของเกรน ดูจากชิ้นงาน 5)Cu3Si และ 6)Cu20.6Zn2.25Si ซึ่งมีการเติมสังกะสี 20.6% ทำให้เกรนใหญ่จากขนาดเกรน 1 มม. (5)Cu3Si เป็น 2.4 มม. (6)Cu20.6Zn2.25Si) รวมถึงสังกะสีเพิ่มการไหลตัวจากจาก 12.5 มม. (5)Cu3Si เป็น 15.8 มม. (6)Cu20.6Zn2.25Si) สังกะสีช่วยเพิ่มความแข็งแรงสูงสุดจาก 315 MPa (5)Cu3Si เป็น 430.4 MPa (6)Cu20.6Zn2.25Si) แต่ลดอัตราการยืดตัวประมาณ 15% อย่างไรก็ตามการเติมธาตุสังกะสีลงในโลหะผสมทองแดงดีบุกทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ยาก ดังชิ้นงาน 4(Cu3Sn15Zn)

แมงกานีสร่วมกับซิลิคอน พบในอัลลอยการค้า 8)Commercial alloy (มี ซิลิคอน 3.3-4% แมงกานีส 0.9-1.3% สังกะสี 15-16%) มีขนาดเกรน 3.1 มม. เนื่องจากมีซิลิคอนสูงทำให้เกรนขนาดใหญ่ และมีค่าความแข็งแรงสูงสุดสูงที่ 461.45 MPa ส่วนการเติมแมงกานีสส่งผลให้อัตราการยืดตัวปานกลางที่ 59% และสามารถอบบ่มเพิ่มความแข็งแรง หรือสร้างสมบัติสปริงได้

อะลูมิเนียม และเบริลเลียม โดยในงานวิจัยใช้ปริมาณเติมที่ 0.1% ทำให้ชิ้นงาน 7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Al0.1Be มีขนาดเกรนเล็กที่ 1.9 มม. ทำให้ ค่าความแข็งแรงสูงสุด เพิ่มขึ้นจาก 224

MPa (11)Cu15Zn0.2Si2Sn) เป็น 260 MPa (7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Al0.1Be) โดยค่าอัตราการยืดตัวเพิ่มขึ้นจาก 51.6% (7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Al0.1Be) เป็น 83.48% (11)Cu15Zn0.2Si2Sn)

ผลการเติมธาตุผสมต่อสีผิว พบว่า การเติมสังกะสี ซิลิคอน อะลูมิเนียม แมงกานีส และ ดีบุกทำให้ ค่า a ลดลง สีเหลืองที่ถูกกลดสีออกจะอมเขียว ดังพบในชิ้นงาน 8)Commercial alloy 6)Cu20.6Zn2.25Si และ 7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Be0.1Al 9)Cu12Zn3Sn 10)Cu15Zn3Sn0.5Si และ 11)Cu15Zn0.2Si2Sn อีกทั้ง การเติมสังกะสี ดีบุก ซิลิคอน อะลูมิเนียม แมงกานีสยังเพิ่มค่า b ซึ่งทำให้ชิ้นงานมีสีเหลืองมากขึ้น 7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Be0.1Al และ 11)Cu15Zn0.2Si2Sn มีอะลูมิเนียมและซิลิคอนทำให้เพิ่มสีเหลืองสูงขึ้นโดยมีค่า a เพิ่มขึ้น ค่า b ไม่เปลี่ยนแปลง

ผลการทดลองเปรียบเทียบความต้านทานการหมองในเหงื่อเทียม ในช่วงระยะเวลาการทดสอบถึง 10 ชม.พบว่าความต้านทานการหมองเรียงลำดับจากสูงไปต่ำดังนี้ โลหะผสม 8)Commercial alloy > 9)Cu12Zn3Sn > 10)Cu15Zn3Sn0.5Si > 6)Cu20.5Zn2.25Si > 4)Cu15Zn3Sn > 1)Cu3Sn > 5)Cu3Si > 2)Cu5Sn > 3)Cu7Sn > 7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1AlBe > 11)Cu15Zn0.2Si2Sn โดยในกลุ่มที่มีการเปลี่ยนสีแบบค่อยเป็นค่อยไป ได้แก่ 8)Commercial alloy > 9)Cu12Zn3Sn > 1)Cu3Sn เนื่องจากกราฟไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และพบว่าชิ้นงาน 9 (Cu12Zn3Sn) ยังเป็นชิ้นงานที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงสุด คือ มีค่าเท่ากับ -0.153 V เกิดการกัดกร่อนได้ยาก และมีอัตราการกัดกร่อน 0.002 mm/year

หากพิจารณาการเติมธาตุลดขนาดเกรน พบว่า การเติมธาตุดังกล่าวส่วนใหญ่ลดความแข็งแรงและอัตราการยืดตัวในปริมาณหนึ่ง ลดความต้านทานการหมอง เพิ่มการกัดกร่อนในสภาวะเหงื่อเทียม ยกเว้น ชิ้นงาน 10/6)Cu15Zn3Sn0.5Si-Cr และ 4/6 Cu15Zn3Sn-Cr ที่พบการหมองต่ำอยู่ในระดับค่า DE ไม่ถึง 25 และ ชิ้นงาน 4/5)Cu15Zn3Sn-Zr ที่พบการหมองต่ำอยู่ในระดับค่า DE ไม่ถึง 20 และ ชิ้นงาน 8/6)Commercial alloy-Cr และ 11/8) Cu15Zn0.2Si2Sn-B

จากผลสรุปข้างต้นสามารถพิจารณาเลือกทองแดงอัลลอยที่มีความต้านทานการหมองสูง หล่อได้ง่าย และสามารถเติมธาตุปรับลดขนาดเกรนได้ ซึ่งมีหลายกลุ่มได้แก่ 2)Cu5Sn 10)Cu15Zn3Sn0.5Si 6)Cu20.5Zn2.25Si 11)Cu15Zn0.2Si2Sn 9)Cu12Zn3Sn 8)Commercial alloy และ 5)Cu3Si โดยสามารถเลือกเติมธาตุลดขนาดเกรนในกลุ่มสารประกอบโบรอน ทองแดงผสมโครเมียม ทองแดงผสมเซอร์โคเนียม และทองแดงผสมเหล็ก โดยเติมไม่เกิน 2 % ของน้ำหนักรวม เพื่อป้องกันการเกิดผิวขรุขระและจุดแข็งที่ผิวงาน อีกทั้งยังสามารถผลิตอัลลอยทองเหลืองผสมที่เหมาะสมกับการหล่อเรซิน 3D-Printing ในรูปแบบชิ้นงานตาข่ายเล็กละเอียดด้วย ทองเหลืองเส้น โดยมีส่วนผสมทองแดง 67-69% สังกะสี 28-30 % ซิลิคอน 3 % ซึ่งมีความแข็งสูงคงรูปได้ดี และ ไหลตัวดีที่อุณหภูมิหล่อไม่เกิน 1000 องศาเซลเซียส อีกทั้งยังสามารถผลิตอัลลอยทองเหลืองผสมที่เหมาะสมกับการหล่อเรซิน 3D-Printing ในรูปแบบชิ้นงานตาข่ายเล็กละเอียดด้วย ทองเหลืองเส้น โดยมีส่วนผสมทองแดง 67-69% สังกะสี 28-30 % ซิลิคอน 3 % ซึ่งมีความแข็งสูงคงรูปได้ดี และ ไหลตัวดีที่อุณหภูมิหล่อไม่เกิน 1000 องศาเซลเซียส

บทคัดย่อภาษาไทย

โครงการ “การพัฒนาทองเหลืองเพื่อเพิ่มสมรรถนะด้านการผลิตในอุตสาหกรรมผลิตเครื่องประดับ” มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาคุณภาพทองเหลืองและทองแดงผสมที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิตเครื่องประดับในปัจจุบัน การปรับปรุงอาศัยการเติมธาตุผสมต่างๆ ได้แก่ สังกะสี ซิลิคอน ดีบุก แมงกานีส อะลูมิเนียม และเบริลเลียม ชิ้นงานโลหะผสมที่ทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 11 ชุดอัลลอย เพื่อปรับปรุงความสามารถหล่อ สมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค และความต้านทานการหมอง นอกจากนี้ยังศึกษาผลของธาตุลดขนาดเกรน เช่น โครเมียม เซอร์โคเนียม เหล็กและโบรอน จากการศึกษาทองแดงผสมธาตุผสมชนิดต่างๆ ดังกล่าวเบื้องต้นพบว่า ผลทดลองสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มตามสี คือ 1) กลุ่มสีชมพู ได้แก่ ทองแดงผสมดีบุกหรือบรอนซ์ดีบุก ซึ่งผลิตได้โดยใช้อุณหภูมิหล่อที่ 1080 องศาเซลเซียส อัตราการหดตัว 3.9 % และตัวลดขนาดเกรนที่เหมาะสม(ทองแดงผสมโครเมียม) การเพิ่มปริมาณดีบุกส่งผลให้สีชมพูลดลง แต่ความแข็งแรงสูงสุดและอัตราการยืดตัวเพิ่มขึ้น โดยขนาดเกรนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 3-4.8 มม. 2)กลุ่มสีเหลือง แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย ได้แก่ ทองเหลือง และบรอนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีธาตุผสมหลัก ได้แก่ ซิลิคอน สังกะสี ดีบุก อะลูมิเนียม และเบริลเลียม กลุ่มที่มีค่าการไหลตัวของน้ำโลหะดี คือ 6)Cu20.5Zn2.25Si (ที่ 15.8 มม.) 10)Cu15Zn3Sn0.5Si (ที่ 15.2 มม.) 11)Cu15Zn0.2Si 2Sn (ที่ 14.7 มม.) 8)Commercial alloy (ที่ 13.8 มม.) 4)Cu15Zn 3Sn (ที่ 13.3 มม.) การเติมซิลิคอน สังกะสี และดีบุก ช่วยส่งเสริมการหล่อ ทำให้การไหลของน้ำโลหะดีขึ้น การเติมแมงกานีสร่วมกับซิลิคอนทำให้ส่งเสริมการหล่อและเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน สังกะสี ซิลิคอน อะลูมิเนียม แมงกานีสและดีบุก ทำให้ค่า α ลดลงสีเหลืองที่ถูกกลดสีออกเคลือบเขียว เมื่อเปรียบเทียบกับอัลลอยการค้าที่ใช้งานในปัจจุบัน พบว่า อัลลอยทดลองสามารถใช้งานได้ดีมีคุณภาพเทียบเท่าโดยเฉพาะด้านการหล่อ อีกทั้งยังพบว่ามีความต้านทานการหมองที่ดี ได้แก่ 9)Cu12Zn3Sn 10)Cu15Zn3Sn0.5Si 6)Cu20.5Zn 2.25Si 4)Cu15Zn3Sn 1)Cu3Sn 5)Cu3Si 7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1AlBe 11)Cu15Zn0.2Si2Sn ธาตุลดขนาดเกรนส่วนใหญ่ลดความแข็งแรงและอัตราการยืดตัวบ้าง ลดความต้านทานการหมอง เพิ่มการกัดกร่อนในสภาวะเหงื่อเทียม แต่ตัวปรับขนาดเกรน ช่วยชิ้นงานหล่อเรียบสวยมีคุณภาพ

Abstract

The research project, entitled “The development of brass to enhance manufacturing performance in the jewelry industry”, was aimed to develop the quality of brass and copper alloys that have recently been consumed in jewelry process. This improvement depended on the addition of various alloying elements, for examples, Zinc, Silicon, Tin, Manganese, Aluminium and Beryllium.

The alloyed specimens were divided into 11 types of alloys in order to study in the improvement of castability, mechanical properties, microstructure and tarnish resistance. Furthermore the effects of grain refiner were observed such as chromium, zirconium, iron and boron. In case of the investigation of the mentioned above copper alloys it was found that the results could be classified into 2 coloured group as follows: 1) pink colour group such as tin bronze which could be produced using casting temperature of 1080 °C shrinkage 3-9 % and proper grain refiner (Copper with chromium). An increase in tin content affected to a decrease in pink colour but ultimate tensile strength and elongation increased and the average grain size was in a range of 3-4.8 mm. 2) yellow colour group was classified into 2 subgroups such as brass and bronzes with major elements (Silicon Zinc Tin Aluminium and Beryllium) The copper alloys with high fluidity were 6)Cu20.5Zn2.25Si (15.8 mm.) 10)Cu15Zn3Sn0.5Si (15.2 mm.) 11)Cu15Zn0.2Si 2Sn(14.7 mm.) 8) Commercial alloy (13.8 mm.) 4)Cu15Zn3Sn (13.3 mm.) Silicon Zinc and Tin promoted the castability with better fluidity. The addition of manganese combined with silicon provided good castability and increased the strength of alloys. Zinc silicon Aluminium manganese and tin produced the decrease of a value thereby yellow colour was depressed. When comparing with the commercial alloy, it was found that the research alloy could be applied in jewelry production with high quality as same as commercial alloy especially in casting. In addition the tested alloys provided high tarnish resistance such as 9)Cu12Zn3Sn 10)Cu15Zn3Sn0.5Si 6)Cu20.5Zn2.25Si 4)Cu15Zn3Sn 1)Cu3Sn 5)Cu3Si 7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1AlBe and 11)Cu15Zn0.2Si2Sn Most of grain refiners in this research decreased gradually in strength and elongation, decrease anti-tarnish property but increase corrosion resistance. However grain refiner made the fine and high quality surface of casting.

สารบัญ

บทที่	หัวข้อ	หน้า
บทที่ 1	บทนำ	
1.1	ความสำคัญ และที่มาของปัญหา	16
1.2	วัตถุประสงค์ของการวิจัย	16
1.3	ขอบเขตของการวิจัย	17
1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้จากโครงการ	17
1.5	กรอบแนวความคิดของการวิจัยและขั้นตอนการวิจัย	18
1.6	การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง	18
1.7	วิธีการดำเนินการวิจัย	33
1.8	แผนงานโครงการ	35
บทที่ 2	ผลการปฏิบัติงานและสรุปผลวิจัย	
2.1	การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น	36
2.2	การทดลองหล่อต้นงานทองแดงผสม	53
2.3	ผลการศึกษาสมบัติทางกล	64
2.4	การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและขนาดเกรน	73
2.5	ผลการศึกษาสีผิวและความต้านทานการหมองในเหงื่อเทียม	79
2.6	การทดสอบพฤติกรรมการต้านทานการกัดกร่อน	84
2.7	สรุปผลการทดลอง	93
2.8	การพิจารณาด้านความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ และการเผยแพร่ความรู้เชิง สาธารณะ	104
บรรณานุกรม		
	บรรณานุกรม	107
ตารางเปรียบเทียบ Output ที่เสนอในข้อเสนอโครงการและได้จริง		
	ตารางเปรียบเทียบ Output ที่เสนอในข้อเสนอโครงการและได้จริง	110
	ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ ต่อสกว.	111
ภาคผนวก		
	ผลการตรวจสอบ Spark Emission Spectroscopy	113

สารบัญภาพ

บทที่	ภาพ	หน้า
บทที่ 1	บทนำ	
1.6.1	แสดงแสดงผิวด้านงานทองแดงผสม หลังการหล่อที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส	20
1.6.2	เฟสไดอะแกรมของทองแดงผสมสังกะสี ⁽³⁾	26
1.6.3	เฟสไดอะแกรมของทองแดงผสมดีบุก ⁽³⁾	27
1.6.4	แสดงความสัมพันธ์ของa)เฟสไดอะแกรมของทองแดงผสมดีบุก ต่อ b) สมบัติทางทางกลของทองแดงผสมดีบุกผ่านการหล่อ ⁽⁴⁾	25
1.6.5	แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณอะลูมิเนียมต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุดและอัตราการยืดตัวของทองแดงผสมอะลูมิเนียม ⁽⁴⁾	28
1.6.6	แสดงเฟสไดอะแกรมของทองแดงผสมอะลูมิเนียม	29
1.6.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลต่อปริมาณซิลิคอนในทองแดงผสม	30
1.6.8	แสดงการละลายของซิลิคอนในซิลิคอนบรอนซ์	31
1.7.1	แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน	34
บทที่ 2	ผลการปฏิบัติงานและสรุปผลวิจัย	
2.1.1	รูปแบบการเกิดรูภายในชิ้นงานโลหะที่มีช่วงการแข็งตัวยาว	41
2.1.2	ลักษณะเกรนของทองเหลืองที่เติมเซอร์โคเนียม	44
2.1.3	ลักษณะเกรนของทองเหลืองที่เติมโบรอนและ เหล็ก	44
2.1.4	ตัวขึ้นงานแหวนที่ผลิตจากเครื่องประดับเทียม ชูบนิเกิลรองพื้นและ ชูบสารอินทรีย์ ทดแทนสีทอง	45
2.1.5	ส่วนผสมเคมีและภาพอัลลอย Cu10Cr	46
2.1.6	ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบการไหลตัวของน้ำโลหะ และขนาดชิ้นงาน(มม.)	47
2.1.7	ตัวอย่างชิ้นงานแว็กซ์และแม่แบบ(เงิน)ทดสอบการไหลตัวของน้ำโลหะที่ผ่านการปรับปรุง	47
2.1.8	ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบการไหลตัวของทั้ง 2 ชนิดและชิ้นงานทดสอบการหดตัว	50
2.1.9	ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มม ยาว 50 ซม สำหรับทดสอบการไหลตัวของน้ำโลหะ	52
2.1.10	ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มม ยาว 50 ซม สำหรับทดสอบการไหลตัวของน้ำโลหะผ่านการหล่อที่อุณหภูมิเท1100องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเบ้า 550 องศาเซลเซียส	52
2.1.11	ค่าการไหลตัวของน้ำโลหะ(fluidity) สำหรับอัลลอยทดลองผ่านการหล่อในระบบสุญญากาศ	53
2.2.1	ต้นทองแดงผสมทดลองที่ผ่านการหล่อด้วยเตากระแสเหนี่ยวนำในระบบสุญญากาศ	58

บทที่	ภาพ	หน้า
	ร้อนชื้น/ยิงทราย	
2.2.2	ต้นทุนทองแดงผสมทดลองร่วมกับธาตุลดขนาดเกรนที่ผ่านการหล่อด้วยเตากระแส เหนี่ยวนำในระบบสุญญากาศ ร้อนชื้น/ยิงทราย	59
2.2.3	ตัวอย่างต้นงานทดสอบการหดตัวของทองแดงผสมสำหรับการทดลอง	63
2.3.1	ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานทดสอบทองแดงผสมและกลุ่มทดลอง ร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน	64
2.3.2	การเปรียบเทียบขนาดเกรนของชิ้นงานทองแดงผสมร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน	65
2.3.3	ค่าอัตราการยืดตัวของชิ้นงานทดสอบทองแดงผสมและกลุ่มทดลองร่วมกับธาตุลด ขนาดเกรน	68
2.3.4	ค่าความแข็ง(HV _{0.2})ของชิ้นงานทดสอบทองแดงผสมและกลุ่มทดลองร่วมกับธาตุลด ขนาดเกรน	68
2.3.5	ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานทดสอบทองแดงผสม 1)Cu3Sn 2)Cu5Sn และ 3)Cu7Sn และกลุ่มทดลองร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน	70
2.3.6	การเปรียบเทียบค่าอัตราการยืดตัวของชิ้นงานทดสอบทองแดงผสม 1)Cu3Sn 2)Cu5Sn และ 3)Cu7Sn ร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน	71
2.3.7	การเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานทดสอบทองแดงผสม 4)Cu15Zn3Sn 5)Cu3Si และ 6)Cu20.6Zn2.25Si 7) Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Al0.1Be 8)commercial alloy 9)Cu12Zn3Sn 10) Cu15Zn3Sn0.5Si 11) Cu15Zn0.2Si2Sn0 ร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน	72
2.3.8	การเปรียบเทียบค่าอัตราการยืดตัวของชิ้นงานทดสอบทองแดงผสม 4)Cu15Zn3Sn 5)Cu3Si แล ะ 6)Cu20.6Zn2.25Si 7) Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Al0.1Be 8) commercial alloy 9)Cu12Zn3Sn 1 0) Cu15Zn3Sn0 .5 Si 1 1) Cu15Zn0.2Si2Sn ร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน	72
2.4.1	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดลองด้วยระบบ BEI	74
2.4.2	ขนาดเกรนของทองแดงผสมสำหรับการทดลอง	77
2.4.3	ผิวหุระของตัวอย่างชิ้นงาน 2/5)Cu5Sn-Zr	78
2.5.1	ค่า a ในระบบ CIE ของชิ้นงานทดลองทองแดงผสม	79
2.5.2	ค่า b ในระบบ CIE ของชิ้นงานทดลองทองแดงผสม	80
2.5.3	ผลค่าความแตกต่างสีจากการทดสอบชิ้นงานในหนังสือเทียบตามมาตรฐาน EN1811	80
2.5.4	สีผิวทดสอบชิ้นงานทองแดงผสม ในหนังสือเทียบตามมาตรฐาน EN1811	82
2.5.5	ผลค่าความแตกต่างสีจากการทดสอบชิ้นงานกลุ่ม 2)Cu5Sn 4)Cu15Zn3Sn 5)Cu3Si 6)Cu20.6Zn2.25Si ร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน ในหนังสือเทียบตาม มาตรฐาน EN1811	83
2.5.6	ผลค่าความแตกต่างสีจากการทดสอบชิ้นงานกลุ่ม 4)Cu15Zn3Sn 5)Cu3Si 6)Cu20.6Zn 2.25Si 9)Cu12Zn3Sn 10)Cu15Zn3Sn0.5Si ร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน	83

บทที่	ภาพ	หน้า
	84ในหัวข้อเทียบตามมาตรฐาน EN1811	
2.5.7	ผลค่าความแตกต่างสีจากการทดสอบชิ้นงานกลุ่ม 7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1AlBe 8)com mercial alloy 11) Cu15Zn0.2Si2Sn ร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน ในหัวข้อ เทียบตามมาตรฐาน EN1811	84
2.6.1	เส้นโพลาริเซชันของโลหะทองแดงและโลหะทองแดงผสม ชิ้นงาน 1(Cu3Sn), ชิ้นงาน 2(Cu5Sn), ชิ้นงาน 3(Cu7Sn), ชิ้นงาน 4(Cu15Zn3Sn), ชิ้นงาน 5(Cu3Si) และ ชิ้นงาน 9(Cu12Zn3Sn) ในสารละลายเหงื่อเทียม EN1811	86
2.6.2	เส้นโพลาริเซชันของโลหะผสมทองแดง 4(Cu15Zn3Sn), ชิ้นงาน 5(Cu3Si), ชิ้นงาน6(Cu20.6Zn2.25Si) , ชิ้นงาน 8(Cu13Zn4Si1Mn) /Commercial alloy, ชิ้นงาน 9(Cu12Zn3Sn) และชิ้นงาน 10(Cu15Zn3Sn0.5Si) ในสารละลายเหงื่อ เทียม EN1811	88
2.6.3	เส้นโพลาริเซชันของโลหะผสมทองแดง 7(Cu15Zn2Sn0.1Si0.1Al0.05Be), ชิ้นงาน 8(Cu13Zn4Si1Mn) /Commercial alloy, ชิ้นงาน 9(Cu12Zn3Sn), ชิ้นงาน 10(Cu15Zn3Sn0.5Si) และชิ้นงาน 11(Cu15Zn2Sn0.2Si) ในสารละลาย เหงื่อเทียม EN1811	90
2.6.4	เส้นโพลาริเซชันของโลหะผสมทองแดง ชิ้นงาน 8(Cu13Zn4Si1Mn) /Commercial alloy และ ชิ้นงาน 8G(Cu13Zn4Si1Mn0.5Cr) ในสารละลายเหงื่อ เทียม EN1811	91
2.6.5	เส้นโพลาริเซชันของโลหะผสมทองแดง ชิ้นงาน 10(Cu15Zn3Sn0.5Si) และ ชิ้นงาน 10G(Cu15Zn3Sn 0.5Si0.5Cr) ในสารละลายเหงื่อเทียม EN1811	92
2.6.6	เส้นโพลาริเซชันของโลหะผสมทองแดงของชิ้นงาน 11(Cu15Zn2Sn0.2Si) และ ชิ้นงาน 11G(Cu15Zn2Sn0.2Si0.02B) ในสารละลายเหงื่อเทียม EN1811	92
2.7.1	แสดงตัวอย่างชิ้นงานทองเหลืองCu28Zn3Si ที่เหมาะสมสำหรับการ หล่อเรซิน 3D-printingเนื่องจากไหลตัวง่าย แข็งแรงสูง คงรูปได้ดี	101
2.8.1	ภาพบรรยากาศ สัมมนาเผยแพร่ความรู้เรื่อง ทองแดงผสมสำหรับใช้ในอุตสาหกรรม เครื่องประดับ ณ ศูนย์การประชุมอิมแพค เมืองทองธานี ห้องจูบิเตอร์ 12 เมื่อวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2562	105

สารบัญตาราง

บทที่	ตาราง	หน้า
บทที่ 1	บทนำ	
1.6.1	มูลค่าการส่งออกเครื่องประดับแท่งทองไทยระหว่างปี 2556-2558	19
1.6.2	ส่วนผสมของทองแดงและทองแดงผสมตามมาตรฐาน ASTM ⁽¹⁾	21
1.6.3	สมบัติการหล่อของทองแดงผสมในแบบทราย ⁽²⁾	24
1.8.1	แผนกิจกรรมหลักที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ รวมทั้งผลลัพธ์ (Output) ที่คาดว่าจะได้รับ	35
1.8.2	แผนการดำเนินงานวิจัย	37
บทที่ 2	ผลการปฏิบัติงานและสรุปผลวิจัย	
2.1.1	สมบัติทั่วไปและการใช้งานกลุ่มทองแดงผสมชนิดต่างๆ	39
2.1.2	แนวทางการใช้งาน ทองแดงผสมในสภาวะการกัดกร่อนรูปแบบต่างๆ	42
2.1.3	อัตราความต้านทานการกัดกร่อนของทองแดงหล่อในสภาวะต่างๆ	42
2.1.4	การไหลตัวของโลหะทดลองที่ผ่านการหล่อ(ที่อุณหภูมิเท 1100 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเบ้า 550 องศาเซลเซียส)	53
2.2.1	ส่วนผสมเคมี(ก่อนหล่อ)ของทองแดงผสมสำหรับหล่อ	54
2.2.2	ส่วนผสมเคมี(ก่อนหล่อ)ของทองแดงผสมสำหรับหล่อร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน	54
2.2.3	สภาวะการหล่อ อุณหภูมิเริ่มหลอมเหลว liquidus และอุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว Solidus ของชิ้นงานทดลอง	56
2.2.4	ส่วนผสมเคมีหลังการหล่อด้วย Spark Emission Spectroscopy สำหรับทองแดงผสมทดลอง	62
2.2.5	ส่วนผสมเคมีหลังการหล่อด้วย Spark Emission Spectroscopy สำหรับทองแดงผสมร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน	63
2.2.6	ค่าอัตราการหดตัวของน้ำโลหะเปรียบเทียบกับปริมาตรของเทียน	63
2.6.1	ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของโลหะทองแดงและโลหะทองแดงผสม ชิ้นงาน 1(Cu3Sn), ชิ้นงาน 2(Cu5Sn), ชิ้นงาน 3(Cu7Sn), ชิ้นงาน 4(Cu15Zn3Sn), ชิ้นงาน 5(Cu3Si) และ ชิ้นงาน 9(Cu12Zn3Sn) ในสารละลายเหงื่อเทียม EN1811	87
2.6.2	ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของโลหะผสมทองแดง 4(Cu12Zn3Sn), ชิ้นงาน	88

บทที่	ตาราง	หน้า
	5(Cu3Si), ชิ้นงาน 6(Cu20.6Zn2.25Si) , ชิ้นงาน 8(Cu13Zn4Si1Mn) /Commercial alloy, ชิ้นงาน 9(Cu12Zn3Sn) และชิ้นงาน 10(Cu15Zn3Sn0.5Si) ในสารละลายเหงื่อเทียม EN1811	
2.6.3	ค่าจากเส้นโพลาไรเซชันของโลหะผสมทองแดง ชิ้นงาน 7(Cu15Zn2Sn0.1Si0.1Al0.05Be), ชิ้นงาน 8(Cu13Zn4Si1Mn) /Commercial alloy, ชิ้นงาน 9(Cu12Zn3Sn), ชิ้นงาน 10(Cu15Zn3Sn0.5Si) และชิ้นงาน 11(Cu15Zn2Sn0.2Si) ใน สารละลายเหงื่อเทียม EN1811	90
2.6.4	ค่าจากเส้นโพลาไรเซชันของโลหะผสมทองแดง ชิ้นงาน 8(Cu13Zn4Si1Mn), ชิ้นงาน 8G(Cu13Zn4Si1Mn0.5Cr), ชิ้นงาน 10(Cu15Zn3Sn0.5Si), ชิ้นงาน 10G(Cu15Zn3Sn 0.5Si0.5Cr), 11(Cu15Zn2Sn0.2Si) และ ชิ้นงาน 11G(Cu15Zn2Sn0.2Si0.02B) ใน สารละลายเหงื่อเทียม EN1811	93
2.7.1	แสดงอิทธิพลของธาตุผสมและแนวทางการนำไปใช้งานสำหรับทองแดง ผสมในงานวิจัยฯ	96
2.7.2	สรุปสมบัติการหล่อ สมบัติทางกล และ ผลลัพธ์การกัดกร่อนจากผลการ ทดลองทั้งหมด	97
2.7.1.1	แสดงคุณลักษณะพิเศษสำหรับทองแดงผสมจากพัฒนาด้วยโครงการวิจัยฯ	101
2.7.1.2	แสดงแผนการจัดอบรมการหล่อทองเหลือง ทองแดงผสมสำหรับการผลิต เครื่องประดับ	103
2.8.1	ต้นทุนการผลิตอัลลอยต่อปริมาณการผลิต 8 กก. ด้วยเตาหลอมระบบ สุญญากาศ	104
2.8.2	แผนการดำเนินงานวิจัยที่ได้ทำดำเนินในช่วง 12 เดือน	106

บทที่ 1

บทนำ

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับเป็นกลุ่มอุตสาหกรรมที่ทำรายได้ส่งออกสูงในลำดับต้นๆ ของประเทศไทย สะท้อนการสร้างชื่อเสียงและ ความประณีตของช่างไทยมาตั้งแต่อดีต แม้ปัจจุบันวิวัฒนาการของโลกลดลงต่อการเปลี่ยนรูปทางธุรกิจและ เศรษฐกิจโลก ทำให้ความต้องการเครื่องประดับลดลง ในอดีตการผลิตเครื่องประดับนิยมมุ่งประเด็นไปที่เครื่องประดับแท้ (Fine jewelry) ที่ใช้เงิน และ ทองคำเป็นตัวเรือน แต่ในปัจจุบัน ความต้องการดังกล่าวลดลง มีความต้องการใช้เครื่องประดับที่มีราคาต่ำ ตามกลไกการเปลี่ยนแปลงสภาพเศรษฐกิจโลก และการแข่งขันทางการตลาดที่เพิ่มขึ้น ทำให้ ทองแดงและ ทองแดงผสมได้ถูกนำมาใช้งานเป็นเครื่องประดับมากขึ้น รวมถึงการพัฒนาคุณภาพผิวชุบเพิ่มการยึดเกาะทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเรือนเป็นโลหะมีค่าดังในอดีต ตัวอย่างจากรายงานผลข้อมูลการส่งออกเครื่องประดับในปี 2556-2558 จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีแห่งชาติพบการเพิ่มมูลค่าการส่งออกเครื่องประดับหมวดอื่นๆ ที่เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 59.82 ในช่วง 2556-2557 แต่กลับพบปัญหาการผลิตมากมาย อีกทั้งพบการเปลี่ยนแปลงมูลค่าการส่งออกในช่วงปี 2557 ถึง 2558 จากลักษณะดังกล่าวสามารถแจกแจงได้ดังสาเหตุต่อไปนี้

1. ผู้ผลิตขาดบุคลากรที่มีความรู้ในการหล่อและผลิตเครื่องประดับด้วยทองแดงผสม
2. ขาดความรู้ในการพิจารณาเลือกชนิดของทองแดงผสมให้เหมาะสมกับการผลิตเป็นเครื่องประดับ
3. ขาดองค์ความรู้ในการพิจารณาความต้องการลักษณะพิเศษของโลหะต่อรูปแบบเครื่องประดับและการใช้สารเติมเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับการผลิต

จากลักษณะโดยรวมจะพบว่าผู้ผลิตในประเทศไทยยังขาดความรู้ในการเลือกโลหะกลุ่มทองแดงผสมทั้งในแง่การใช้งาน และการปรับเทคโนโลยีเพื่อผลิต นอกจากนี้ยังพบแนวโน้มการซื้ออัลลอยจากต่างประเทศเพื่อใช้งานตามคำสั่งของลูกค้าเป็นหลักโดยไม่เข้าใจถึงส่วนประกอบ ข้อควรปฏิบัติในธาตุผสมแต่ละชนิด ทำให้เกิดปัญหาการผลิตมาก โดยมักพบงานผุ เกิดแผลผื่น ผุเป็นแพ เกิดจุดแข็งที่ผิวงาน มักเกิดจากการใช้สารเติมมากเกินไป การใช้เศษเก่ามาก ทางน้ำน้อย หล่ออุณหภูมิสูง ดัดดันแน่นเพื่อลดต้นทุนโดยแม้จะใช้อัลลอยราคาแพงก็ยังไม่สามารถแก้ไขได้หมด ปัญหาดังกล่าวแสดงถึงการขาดความรู้ในการใช้งานทองแดงผสม และสารเติมเช่น สารปรับลดขนาดเกรนซึ่งไม่พบการศึกษามากนักในประเทศไทยร่วมกับขาดความเข้าใจในใช้งานทองแดงผสมเพื่อการผลิตเครื่องประดับที่แตกต่างจากการหล่อและผลิตสินค้าจากทองแดงในเชิงอุตสาหกรรมทั่วไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาธาตุผสมที่มีผลต่อการปรับลดขนาดเกรนต่อการพัฒนาโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล และความสามารถในการหล่อของทองแดงผสม

2. ศึกษาปริมาณและชนิดของธาตุปรับลดขนาดเกรนที่เหมาะสมสำหรับทองแดงผสมเพื่อผลิตเครื่องประดับ
3. ศึกษาความสัมพันธ์ของคุณภาพผิวและสมบัติทางกลของตัวเรือนเครื่องประดับที่ผ่านการผลิตและเติมธาตุที่เหมาะสมทั้งสีผิวและความต้านทานการหมองเพื่อเป็นต้นแบบใช้งานเชิงอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาธาตุผสมที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค ความสามารถในการหล่อหลอมและการปรับลดขนาดเกรนของทองแดงผสม โดยเลือกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1. ทองบรอนซ์สีอมแดง 2. ทองเหลือง
2. เตรียมธาตุผสม และมาสเตอร์อัลลอยที่สามารถทำได้ในประเทศไทย เพื่อการผลิตทองแดงผสม
3. ทดลองผลิตทองแดงผสมชนิดต่างๆ เพื่อทดสอบสมบัติทางกล คุณภาพผิว คุณภาพการหล่อ เพื่อเปรียบเทียบกับอัลลอยต่างประเทศ
4. ทดลองผลิตเพื่อใช้งานในอุตสาหกรรมจริง เพื่อสร้างเป็นต้นแบบการใช้งานทองแดงผสมมาตรฐานสูงที่สามารถผลิตใช้เองในประเทศ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

1. สร้างทองแดงผสมอย่างต่ำ 2 ประเภทที่สามารถเพิ่มผลผลิตและยกระดับความสามารถการผลิตเครื่องประดับเช่น ลดปริมาณทางน้ำ ลดรอยผุ ลดการเกิดจุดแข็ง รวมถึงได้แนวทางการใช้สารเติมปรับลดขนาดเกรนที่เหมาะสมกับการผลิต
 2. เผยแพร่องค์ความรู้สำหรับการผลิตทองแดงผสมเพื่อการผลิตเครื่องประดับที่มีคุณค่า และสามารถผลิตได้จริงในประเทศ
- ☒ อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับโลหะขนาดใหญ่ในประเทศไทย
 - ☒ อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับขนาดกลางและขนาดย่อมในประเทศไทย
 - ☒ ผู้ประกอบการผลิตทองเหลืองสำหรับงานหล่อเครื่องประดับ

1.5 กรอบแนวความคิดของการวิจัยและขั้นตอนการวิจัย

- ได้ทองแดงผสมและมาสเตอร์อัลลอยเพื่อการหล่อเครื่องประดับที่มีความต้านทานการหมองสูง มีเกรนละเอียดและ มีปัญหาการเกิดจุดแข็งและแตกหลังหล่อน้อยหรือไม่เกิดปัญหาเลย โดยมีคุณภาพดีกว่าทองแดงที่ผสมในท้องตลาด
- โดยตัวชี้วัดความสำเร็จคือปริมาณการใช้จริงของมาสเตอร์อัลลอยและทองแดงผสม รวมถึงข้อมูลการหล่อทองแดงผสมภายในสถานประกอบการ
- การถ่ายทอดเทคโนโลยีสามารถดำเนินการได้โดยร่วมมือกับสำนักงานพัฒนาอุตสาหกรรมรายสาขา สาขาอัญมณีและเครื่องประดับ กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม ในงานสัมมนา อบรมที่จัดขึ้นให้กับผู้ประกอบการเครื่องประดับ ซึ่งมีการจัดขึ้นปีละหนึ่งครั้ง หรือจัดอบรมโดยภาควิชาฯ

1.6 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

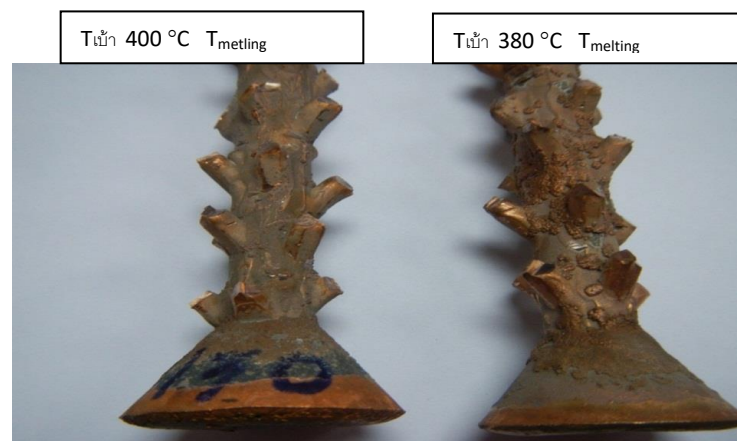
ปัจจุบันการผลิตเครื่องประดับในประเทศไทยมีความสำคัญต่อภาคเศรษฐกิจของประเทศไทย เห็นได้จากข้อมูลของสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ(องค์การมหาชน) พบว่า การส่งออกเครื่องประดับไทยยังคงทำรายได้อยู่ในช่วงไม่เกินอันดับ 6 ของประเทศสำหรับการเปรียบเทียบมูลค่าการส่งออก โดยในปี 2558 พบว่า การส่งเครื่องประดับทอง และ เงินของไทย ลดลง 2.66 และ 6.38 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับดังตารางที่ 1.1 ซึ่งสะท้อนสภาพเศรษฐกิจทั้งภายในและนอกประเทศทำให้แนวโน้มการใช้เครื่องประดับที่ผลิตด้วย ทองคำ แพลตินัมและเงิน เริ่มมีความต้องการลดลง แต่จะพบว่าความต้องการการใช้งานและผลิตเครื่องประดับกลุ่มสินค้า 4.อื่นๆ ที่เพิ่มขึ้นซึ่งในกลุ่มเครื่องประดับกลุ่มนี้มีเครื่องประดับหลักที่สามารถผลิตได้ดีคล้ายคลึงเงินและทองคำโดยจำเป็นต้องเปลี่ยนอุปกรณ์ในการผลิต คือ กลุ่มเครื่องประดับทองแดงและทองแดงผสม ซึ่งสามารถหมายรวมถึงเงินสีชมพูด้วย การเปลี่ยนแปลงมูลค่าการส่งออกที่พบอาจดูเป็นตัวเลขมูลค่าน้อย หากแต่เมื่อเปรียบเทียบกับมูลค่าของโลหะทองแดงจะพบว่า ปริมาณที่เพิ่มขึ้นมีนัยยะที่สำคัญต่อการมุ่งเน้นการพัฒนาที่เพิ่มขึ้นมากทีเดียว การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นแสดงถึงทางเลือกการผลิตเครื่องประดับด้วยโลหะที่มีราคาถูกลง และเป็นมุมมองของการสร้างสินค้าตามความต้องการและกำลังของผู้ซื้อ อีกทั้งในปัจจุบันยังพบว่า วิทยาการชุบเคลือบผิวถูกพัฒนาไปมาก ทำให้วัสดุตัวเรือนหลักสามารถเลือกโลหะกลุ่มทองแดงผสมแทนโลหะมีค่าอื่นได้ แต่ยังจำเป็นต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้และธรรมชาติของโลหะกลุ่มทองแดงและปัจจัยที่มีผลต่อความเปลี่ยนแปลงการผลิตร่วมกับการป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้นในการผลิตซึ่งคณะผู้วิจัยพบว่าเกิดปัญหาการผลิตหลายประการในการผลิตปัจจุบัน

ตารางที่ 1.6.1 มูลค่าการส่งออกเครื่องประดับแท่งของไทยระหว่างปี 2556-2558

สินค้า	มูลค่า (ล้านเหรียญสหรัฐ)			สัดส่วน (ร้อยละ)			เปลี่ยนแปลง (ร้อยละ)	
	2556	2557	2558	2556	2557	2558	57/56	58/57
1. เครื่องประดับทอง	1,937.06	1,899.16	1,848.60	52.00	49.30	50.00	-1.96	-2.66
2. เครื่องประดับเงิน	1,603.54	1,693.64	1,585.62	43.05	43.96	42.88	5.62	-6.38
3. เครื่องประดับแพลทินัม	90.74	109.93	116.34	2.44	2.85	3.15	21.15	5.83
4. อื่นๆ	93.62	149.62	146.85	2.51	3.88	3.97	59.82	-1.85
รวม	3,724.95	3,852.35	3,697.42	100.00	100.00	100.00	3.42	-4.02

ที่มา: กระทรวงพาณิชย์ ประมวลผลโดยสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

ทองแดงและทองแดงผสมจัดอยู่ในกลุ่มเครื่องประดับแฟชั่น ซึ่งมุ่งเน้นผลิตตามความต้องการของผู้ซื้อ มีรูปแบบและความต้องการใช้งานหลากหลายลักษณะ แตกต่างตามรูปแบบและความแข็งแรง รวมถึงความถนัดของผู้ผลิต มักพบว่า การผลิตเครื่องประดับแฟชั่นด้วยทองแดงและทองแดงผสมนั้นมีความยากลำบาก พบปัญหาตัวเรือนผุ ผิดหลังการขัดและชุบไม่สวยงาม ผิดหลังหล่อมีตะกรันหรือคราบเกิดปฏิกิริยากับปูนแบบหล่อทำให้ผิวหยาบได้ง่ายหากมีสถานะหล่อที่อุณหภูมิสูง ดังรูป 1.6.1 ที่แสดงผิวชิ้นงานหลังการหล่อที่สถานะอุณหภูมิแตกต่างกัน พบรอยปูนทนความร้อนจากน้ำโลหะที่สัมผัสแบบสูงไม่ไหว อีกทั้งยังพบว่าชิ้นงานที่หล่อมักมีความแข็งแรงต่ำ ผิดหลังขัดแต่งไม่เนียนสวยงาม(จากคราบออกไซด์ของสังกะสี หรือธาตุผสมจากการนำเศษเก่ามาหลอมใหม่เพื่อลดต้นทุน) และ สีผิวชิ้นงานไม่เป็นไปตามความต้องการของผู้ซื้อ สาเหตุทั้งหมดเกิดจากการขาดความรู้ในการผลิต ไม่เข้าใจถึงสมบัติทางกายของทองแดงและทองแดงผสม รวมถึงขาดข้อมูลในการใช้อัลลอยเพื่อการผลิตตามความต้องการ และการใช้ธาตุลดขนาดเกรนได้อย่างเหมาะสม โดยการเพิ่มเติมและข้อมูลด้านอัลลอยและการเลือกใช้งานมีน้อยและยากแก่การเข้าถึง ทำให้เกิดปัญหาที่ไม่สามารถแก้ไขได้ทันในปัจจุบัน



รูป 1.6.1 ผิวต้นงานทองแดงผสม หลังการหล่อที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส

ปกติการผลิตทองแดงและทองแดงอัลลอยจะเน้นการลดต้นทุนด้วยการใช้ปูนคุณภาพต่ำ ใช้ทางน้ำน้อย และใช้การหล่อด้วยความร้อนสูง ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการผุและผิวยาบจากความร้อนสะสมในระบบ โดยหากมีการปรับปรุงสภาวะการหล่อทั้งหมดจะยังพบปัญหาในเรื่องการเลือกทองแดงและทองแดงผสมที่ไม่เหมาะสมกับความต้องการของผู้ซื้อและไม่สอดคล้องกับความต้องการใช้งานและการผลิต

ปัญหาที่มักพบในการหล่อทองแดงและทองแดงผสมซึ่งไม่สามารถแก้ไขได้ คือ การใช้ทางน้ำน้อยเพื่อลดเวลาในการขัดแต่งชิ้นงาน ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว ไม่ควรลดแต่เนื่องจากเป็นการหล่อต้นทุนต่ำทำให้ไม่สามารถปฏิเสธการทำงานเช่นนี้ได้ แต่สามารถแก้ไขเพิ่มเติมด้วยการเติมธาตุปรับลดขนาดเกรนร่วมกับการเลือกธาตุผสมที่ส่งผลให้หดตัวน้อยลงร่วมกับการลดอุณหภูมิในระบบหล่อ รวมถึงปัญหาหลักอีกประการหนึ่งที่ผู้ผลิตไทยลืมนึกถึงคือทองแดงผสมที่ใช้ต้องปลอดสารพิษ เช่น ตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสารหนู ซึ่งคำนึงถึงคุณภาพการผลิตโลหะผสมทองแดงเพื่อการใช้งานเชิงวิศวกรรมทั่วไปเป็นอย่างมาก ดังตัวอย่างการใช้งานทองแดงชนิดต่างๆในงานหล่อตามมาตรฐาน ASTM ในตาราง 1.6.2 ทำให้ ผู้ผลิตที่นำโลหะเหล่านี้ไปใช้งานจะเกิดปัญหาการไม่ยอมรับของลูกค้าโดยเฉพาะในตลาดยุโรป อเมริกา และ ญี่ปุ่น ซึ่งส่งผลต่อการพัฒนาเครื่องประดับในกลุ่มนี้ไปโดยปริยาย นอกจากนี้ ธาตุปรอทในหมู่นี้มักใช้กับทองเหลืองและทองแดงผสมที่มี ตะกั่ว นิกเกิล เป็นหลักดังตัวอย่างการใช้งาน รวมถึงสารปรอทแต่ง เช่น desofin ซึ่งอ้างอิงส่วนผสมมีโปแตสเซียมคาร์บอเนต เป็นส่วนประกอบซึ่งจำเป็นต้องเติมในระบบเปิดที่ขัดแย้งกับการหล่อในระบบสุญญากาศสำหรับเครื่องประดับ และจะต้องหลอมชิ้นต่ำที่ทองแดงผสม 250 กิโลกรัม ซึ่งไม่สามารถหล่อด้วยวิธีหล่อแทนเทียนได้ เนื่องจาก การหล่อต่อ 1 เบ้าหล่อใช้เนื้อทองแดงผสมไม่เกิน 1 กิโลกรัม ทำให้ไม่สามารถใช้งานพลัดปรับเนื้อละเอียดเช่นนี้ได้ อีกทั้งไม่สามารถนำพลัดดังกล่าวมาผลิตมาสเตอร์อัลลอยเพื่อให้สามารถหล่อด้วยน้ำหนักโลหะไม่เกิน 1 กิโลกรัม เนื่องจากธาตุปรับลดขนาดเกรนอยู่ในรูปฟองแก๊ส และเป็นธาตุที่สูญเสียด้วยความร้อนได้ง่าย ทำให้ไม่สามารถผ่านความร้อนเพื่อหล่อเป็นมาสเตอร์อัลลอยได้ นอกจากนี้ยังพบคำแนะนำในการหลอมทองแดงควรมีส่วนผสมร่วมของนิกเกิลหรือตะกั่ว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสร้างสภาวะเกรนละเอียด ทำให้ไม่เหมาะสมกับการผลิตเครื่องประดับ

จากปัญหาดังกล่าวทำให้การใช้งานในการหล่อเครื่องประดับที่ต้องการส่งออกต่างประเทศอย่างได้มาตรฐาน จึงมีความนิยมใช้ทองแดงบริสุทธิ์มาเติมธาตุผสมตามสูตรเฉพาะของแต่ละสถานประกอบการหรือใช้อัลลอยราคาสูงโดยผู้ขายจากต่างประเทศ ซึ่งในบางโอกาสไม่สามารถปรับเปลี่ยนลักษณะอัลลอยได้ตามความต้องการของผลิตภัณฑ์ และความต้องการของลูกค้า อีกปัญหาสำหรับการพัฒนาโลหะทองแดงผสมคือการควบคุมคุณภาพให้ได้ตามความต้องการของผู้บริโภคและสะดวกในการผลิต ซึ่งจะพบว่า ทองเหลืองที่นิยมหล่อผลิตเครื่องประดับในไทยมักถูกตำหนิเรื่องความแข็ง และความแข็งแรงของชิ้นงานและหดตัวสูง เนื่องจากนิยมใช้ ทองเหลืองเส้น (ทองแดงผสมสังกะสี 30%) มีใช้เป็นวัตถุดิบ ซึ่งมีความอ่อนนุ่ม ประกอบตัวเรือนได้ง่ายแต่ไม่ตอบสนองการใช้งานเนื่องจาก สามารถเกิดรอยตำหนิเนื่องจากแรงกระแทกได้ง่าย ทำให้ชิ้นงานมี

คุณภาพไม่เหมาะสมกับการใช้งานและทำให้ชิ้นงานดูมีคุณภาพต่ำต่างๆที่ฝีมือการประกอบผลิตประณีตมากก็ตาม ลักษณะปัญหาที่กล่าวมาทำให้มีความจำเป็นที่ต้องพัฒนาอัลลอยทองแดงผสมเพื่อเพิ่มศักยภาพการผลิตเครื่องประดับในกลุ่มดังกล่าวซึ่งเรามักพบว่า อัตราการผลิตจะสูงขึ้นทุกปีโดยเฉพาะในช่วงที่ทองคำและเงินมีราคาสูง จะยังพบผู้ประกอบการเปลี่ยนแปลงการผลิตจากการหล่อเงิน ทอง เป็นการหล่อ ทองแดงผสมทดแทนทำให้พบปัญหาจากการผลิตเพิ่มขึ้นตลอดเวลา

สำหรับการผลิตเครื่องประดับด้วยทองแดงผสมนั้นพบว่า สามารถพิจารณาตามสีออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มโลหะสีแดง/อมแดง กลุ่มโลหะสีส้ม และกลุ่มโลหะสีเหลือง

1. กลุ่มโลหะสีแดง/อมแดง ได้แก่ ทองแดงบริสุทธิ์ บรอนซ์ดีบุก(tin bronze) ทองเหลืองอมแดง (red brass)
2. กลุ่มโลหะสีส้ม บางที่เรียกว่า นวโลหะ ได้แก่ บรอนซ์ดีบุก(tin bronze) ซึ่งมีส่วนผสมของธาตุกุดสีสูง(เช่น สังกะสี เป็นต้น)
3. กลุ่มโลหะสีเหลือง ได้แก่ ทองเหลือง(yellow brass) บรอนซ์อะลูมิเนียม(aluminum bronze) บรอนซ์เบริลเลียม(beryllium bronze)

ตาราง 1.6.2 ส่วนผสมของทองแดงและทองแดงผสมตามมาตรฐาน ASTM⁽¹⁾

Table 1 Compositions, uses, and characteristics of copper alloy castings

UNS No.	Other designations, descriptive names (former SAE No.)	Applicable casting processes(a)	Composition(b), wt%						
			Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	Other
Coppers: High-purity coppers with excellent electrical and thermal conductivities. Deoxidation of C8200 improves weldability.									
C80100	Oxygen-free copper	S, C, CL, PM, I, P	99.95(c)	...	...	...	...	...	...
C81100	High-conductivity copper	S, C, CL, PM, I, P	99.70(c)	...	...	...	...	...	...
C81200	High-conductivity copper	S, C, CL, PM, I, P	99.9(c)	...	...	...	...	...	0.045–0.065P
High-copper alloys: Relatively high-strength coppers with good electrical and thermal conductivity. Strength generally inversely proportional to conductivities. Used where good combination of strength and conductivity is needed, as in resistance welding electrodes, switch blades and components, dies, clutch rings, brake drums, as well as bearings and bushings. Beryllium coppers have highest strength of all copper alloys and are used in bearings, mechanical products, and nonsparking safety tools.									
C81400	70C	S, C, CL, PM, I, P	98.5 min(d)	...	...	...	...	...	0.02–0.10 Be, 0.6–1.0 Cr
C81500	Chromium-copper	S, C, CL, PM, I, P	98.0 min(d)	0.10	0.02	0.10	...	0.10	0.15 Si, 0.10 Al, 0.40–1.5 Cr
C81540	Chromium-copper	S, C, CL, PM, I, P	95.1 min(d)(e)	0.10	0.02	0.10	2.0–3.0(f)	0.15	0.40–0.8 Si, 0.10 Al, 0.10–0.6 Cr
C82000	10C	S, C, CL, PM, I, P, D	bal(d)	0.10	0.02	0.10	0.20	0.10	0.10 Al, 0.10 Cr, 0.15 Si, 2.40–2.70 Co(f), 0.45–0.8 Be
C82200	35C, 53B	S, C, CL, PM, I, P	bal(d)	...	...	...	1.0–2.0	...	0.35–0.80 Be, 0.30 Co
C82400	165C	S, C, CL, PM, I, P, D	bal(d)	0.10	0.02	0.10	0.20	0.20	0.20–0.65 Co, 1.60–1.85 Be, 0.15 Al, 0.10 Cr
C82500	20C	S, C, CL, PM, I, P, D	bal(d)	0.10	0.02	0.10	0.20	0.25	1.90–2.25 Be, 0.35–0.70 Co(f), 0.20–0.35 Si, 0.15 Al, 0.10 Cr
C82510	Increased-Co 20C	S, C, CL, PM, I, P, D	bal(d)	0.10	0.02	0.10	0.20	0.25	1.90–2.15 Be, 1.0–1.2 Co(f), 0.20–0.35 Si, 0.15 Al, 0.10 Cr
C82600	245C	S, C, CL, PM, I, P, D	bal(d)	0.10	0.02	0.10	0.20	0.25	2.25–2.55 Be, 0.35–0.65 Co, 0.20–0.35 Si, 0.15 Al, 0.10 Cr
C82700	Ni-Be-Cu	S, C, CL, PM, I, P	bal(d)	0.10	0.02	0.10	1.0–1.5	0.25	2.35–2.55 Be, 0.15 Si, 0.15 Al, 0.10 Cr
C82800	275C	S, C, CL, PM, I, P, D	bal(d)	0.10	0.02	0.10	0.20	0.25	2.50–2.85 Be, 0.35–0.70 Co(f), 0.20–0.35 Si, 0.15 Al, 0.10 Cr
Cu-Sn-Zn and Cu-Sn-Zn-Pb alloys (red and leaded red brasses): High-copper brasses with reasonable electrical conductivity and moderate strength. Used for electrical hardware, including cable connectors									
C83300	131, contact metal	S, C, CL	92.0–94.0(g)(h)	1.0–2.0	1.0–2.0	2.0–6.0	...	...	...
C83400	407.5, commercial bronze 90/10, gilding metal	S, C, CL	88.0–92.0(g)(h)	0.20	0.50	8.0–12.0	1.0	0.25	0.25 Sb, 0.08 S, 0.03 P, 0.005 Si, 0.005 Al
C83450	Nickel-bearing leaded red brass	S, C, CL	87.0–89.0(g)(h)	2.0–3.5	1.5–3.0	5.5–7.5	0.8–2.0(i)	0.30	0.25 Sb, 0.08 S, 0.03 P(j), 0.005 Al, 0.005 Si
C83500	Leaded nickel-bearing tin bronze	S, C, CL	86.0–88.0(g)(h)	5.5–6.5	3.5–5.5	1.0–2.5	0.50–1.0(i)	0.25	0.25 Sb, 0.08 S, 0.03 P(j), 0.005 Al, 0.005 Si
Cu-Sn-Zn and Cu-Sn-Zn-Pb alloys (red and leaded red brasses): Good corrosion resistance, excellent castability, and moderate strength. Lead content ensures pressure tightness. Alloy C83600 is one of the most important cast alloys, widely used for plumbing fittings and other water-service goods. Alloy C83800 has slightly lower strength, but is essentially similar in properties and application.									
C83600	115, 85-5-5-5, composition bronze, ounce metal, (SAE 40)	S, C, CL	84.0–86.0(g)(h)	4.0–6.0	4.0–6.0	4.0–6.0	1.0(i)	0.30	0.25 Sb, 0.08 S, 0.05 P(j), 0.005 Al, 0.005 Si
C83800	120, 83-4-6-7, commercial red brass, hydraulic bronze	S, C, CL	82.0–83.8(g)(h)	3.3–4.2	5.0–7.0	5.0–8.0	1.0(i)	0.30	0.25 Sb, 0.08 S, 0.03 P(j), 0.005 Al, 0.005 Si
C83810	Nickel-bearing leaded red brass	S, C, CL	bal(g)(h)	2.0–3.5	4.0–6.0	7.5–9.5	2.0(i)	0.50(k)	Sb(k), As(k), 0.005 Al, 0.10 Si
Cu-Sn-Zn-Pb alloys (leaded semired brasses): General-purpose alloys for plumbing and hardware goods. Good machinability and pressure tightness. Alloy C84400 is the most popular plumbing alloy in U.S. Markets.									
C84200	101, 80-5-2½-12½	S, C, CL	78.0–82.0(g)(h)	4.0–6.0	2.0–3.0	0.0–16.0	0.8(i)	0.40	0.25 Sb, 0.08 S, 0.05 P(j), 0.005 Al, 0.005 Si
C84400	123, 81-3-7-9, valve composition, 81 metal	S, C, CL	78.0–82.0(g)(h)	2.3–3.5	6.0–8.0	7.0–10.0	1.0(i)	0.40	0.25 Sb, 0.08 S, 0.02 P(j), 0.005 Al, 0.005 Si
C84410	...	S, C, CL	bal(g)(h)	3.0–4.5	7.0–9.0	7.0–11.0	1.0(i)	(m)	Sb(m), 0.01 Al, 0.20 Si, 0.05 Bi
C84500	125, 78 metal	S, C, CL	77.0–79.0(g)(h)	2.0–4.0	6.0–7.5	0.0–14.0	1.0(i)	0.40	0.25 Sb, 0.08 S, 0.02 P(j), 0.005 Al, 0.005 Si
C84800	130, 76-3-6-15, 76 metal	S, C, CL	75.0–77.0(g)(h)	2.0–3.0	5.5–7.0	3.0–17.0	1.0(i)	0.40	0.25 Sb, 0.08 S, 0.02 P(j), 0.005 Al, 0.005 Si

(continued)

ในลักษณะการใช้งานตามสีนั้น สามารถพิจารณาได้ตามรูปลักษณะของการผลิตเช่น ขึ้นงานโซว์สีผิวเนื่องจาก ชุบ e-coating หรือ รมดำในขั้นตอนสุดท้าย โดยส่วนผสมของทองแดงผสมจะแตกต่างกันตามกระบวนการและจุดประสงค์การใช้งานเป็นหลัก อย่างไรก็ตามการใช้กระบวนการหล่อด้วยสูญญากาศและมีทางน้ำเล็กในรูปแบบการหล่อเครื่องประดับปกติ นั้น จะทำให้การเย็นตัวไม่มีลำดับ(directional solidification) เกิดตามต รอยหดตัวระหว่างเดนไดรต์ได้ง่าย ซึ่งรูปแบบการหล่อเครื่องประดับใช้หลักการวางรู ล้นแบบตาบอด (Blind riser) ซึ่งไม่มีหลักการพิจารณาแน่นอน ทำให้เกิดปัญหาในการทำงานตลอดเวลาซึ่ง แ่งมุมการปรับปรุงของการเติมธาตุปรับลดขนาดเกรนจะช่วยลดการหดตัวทำให้เนื้องานหล่อแน่นมากขึ้นทำให้การทำงานง่ายขึ้นนั่นเอง

ตาราง 1.6.2 (ต่อ) ส่วนผสมของทองแดงและทองแดงผสมตามมาตรฐาน ASTM ⁽¹⁾

UNS No.	Other designations, descriptive names (former SAE No.)	Applicable casting processes(a)	Composition(b), wt %						
			Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	Other
Copper-zinc and Cu-Zn-Pb alloys (yellow and leaded yellow brasses): Low-cost, low-to-moderate strength, general-purpose casting alloys with good machinability, adequate corrosion resistance for many water-service applications including marine hardware and automotive cooling systems. Some compositions are amenable to permanent mold and die casting processes.									
C85200	400, 72-1-3-24, high copper yellow brass	S, C, CL	70.0-74.0(g)(n)	0.7-2.0	1.5-3.8	20.0-27.0	1.0(i)	0.6	0.20 Sb, 0.05 S, 0.02 P, 0.005 Al, 0.05 Si
C85400	403, 67-1-3-29, commercial No. 1 yellow brass	S, C, CL, PM, I, P	65.0-70.0(g)(o)	0.50-1.5	1.5-3.8	24.0-32.0	1.0(i)	0.7	0.35 Al, 0.05 Si
C85500	60-40 yellow brass	S, C, CL	59.0-63.0(g)(o)	0.20	0.20	bal	0.20(i)	0.20	0.20 Mn
C85700	405.2, 63-1-1-35, B2, permanent mold brass	S, C, CL, PM, I, P	58.0-64.0(g)(n)	0.50-1.5	0.80-1.5	32.0-40.0	1.0(i)	0.7	0.8 Al, 0.05Si
C85800	405.1, die casting yellow brass	S, C, CL, PM, I, P, D	57.0 min(g)(o)	1.5	1.5	31.0-41.0	0.50(i)	0.50	0.05 Sb, 0.25 Mn, 0.05 As, 0.05 S, 0.01 P, 0.55 Al, 0.25 Si
Manganese bronze and leaded manganese bronze alloys (high-strength and leaded-high-strength yellow brasses): Alloys with high mechanical strength, good corrosion resistance, and favorable castability. Can be machined, but with the exception of C86400 and C86700, are less readily machined than leaded compositions. Alloy C86300 can attain tensile strengths exceeding 115 ksi (793 MPa). Used for mechanical devices: gears, levers, brackets, and valve and pump components for fresh and seawater service. When used for high-strength bearings, alloys C86300 and C86400 require hardened shafts.									
C86100	423, 90,000 tensile manganese bronze	S, CL, PM, I, P	66.0-68.0(g)(p)	0.20	0.20	bal	...	2.0-4.0	4.5-5.5 Al, 2.5-5.5 Mn
C86200	423, 95,000 tensile manganese bronze, (SAE 430 A)	S, C, CL, PM, I, P, D	60.0-66.0(g)(p)	0.20	0.20	22.0-28.0	1.0(i)	2.0-4.0	3.0-4.9 Al, 2.5-5.0 Mn
C86300	424, 110,000 tensile manganese bronze, (SAE 430 B)	S, C, CL, PM, I, P	60.0-66.0(g)(p)	0.20	0.20	22.0-28.0	1.0(i)	2.0-4.0	5.0-7.5 Al, 2.5-5.0 Mn
C86400	420, 60,000 tensile manganese bronze	S, C, CL, PM, I, P, D	56.0-62.0(g)(p)	0.50-1.5	0.50-1.5	34.0-42.0	1.0(i)	0.40-2.0	0.50-1.5 Al, 0.10-1.5 Mn
C86500	421, 65,000 tensile manganese bronze, (SAE 43)	S, C, CL, PM, I, P	55.0-60.0(g)(m)	1.0	0.40	36.0-42.0	1.0(i)	0.40-2.0	0.50-1.5 Al, 0.10-1.5 Mn
C86700	422, 80,000 tensile manganese bronze	S, C, CL, PM, I, P	55.0-60.0(g)(p)	1.5	0.50-1.5	30.0-38.0	1.0(i)	1.0-3.0	1.0-3.0 Al, 0.10-3.5 Mn
C86800	Nickel-manganese bronze	S, C, CL, PM, I, P	53.5-57.0(g)(p)	1.0	0.20	bal	2.5-4.0(i)	1.0-2.5	2.0 Al, 2.5-4.0 Mn
Copper-silicon alloys (silicon bronzes and silicon bronzes): Moderate to high-strength alloys with good corrosion resistance and favorable casting properties. Used for mechanical products and pump components where combination of strength and corrosion resistance is important. Similar compositions are commonly die and/or permanent mold cast in Europe and the United Kingdom.									
C87300	95-1-4, silicon bronze	S, C, CL, PM, I, P	94.0 min(d)	...	0.20	0.25	...	0.20	3.5-4.5 Si, 0.80-1.5 Mn
C87400	500	S, CL, PM, I, P, D	79.0 min(d)	...	1.0	12.0-16.0	...	...	0.80 Al, 2.5-4.0 Si
C87500	500	S, CL, PM, I, P, D	79.0 min(d)	...	0.50	12.0-16.0	...	...	0.50 Al, 3.0-5.0 Si
C87600	500, low zinc silicon brass	S, CL, PM, I, P, D	88.0 min(d)	...	0.50	4.0-7.0	...	0.20	3.5-5.5 Si, 0.25 Mn
C87610	...	S, CL, PM, I, P, D	90.0 min(d)	...	0.20	3.0-5.0	...	0.20	3.0-5.0 Si, 0.25 Mn
C87800	500, die cast silicon brass	S, CL, PM, I, P, D	80.0 min(d)	0.25	0.15	12.0-16.0	0.20(i)	0.15	0.15 Al, 3.8-4.2 Si, 0.15 Mn, 0.01 Mg, 0.05 S, 0.01 P, 0.05 As, 0.05 Sb
Copper-bismuth and Cu-Bi-Se bronzes: Good lubricity and machinability with very low lead. Meets potable water standards. Used for bearings and bushings, plumbing fixtures, valves, and fittings for potable water and food processing.									
C89510	SeBiLOY I	S	86.0-88.08	4.0-6.0	0.25	4.0-6.0	1.0(i)	...	0.5-1.5 Bi, 0.35-0.7 Se
C89520	SeBiLOY II	S	85.0-87.0	5.0-6.0	0.25	4.0-6.0	1.0(i)	...	1.6-2.2 Bi, 0.8-1.1 Se
C89550	SeBiLOY III	PM	58.0-64.0	0.5-1.5	0.20	32.0-40.0	1.0(i)	0.7	0.30-0.7 Al, 0.7-1.0 Bi, 0.07-0.25 Se
Copper-tin alloys (tin bronzes): Hard, strong alloys with good corrosion resistance, especially against seawater. As bearings, they are wear resistant and resist pounding well. Moderately machinable. Widely used for gears, wormwheels, bearings, marine fittings, piston rings, and pump components.									
C90200	242, 93-7-0-0	S, C, CL, PM, I, P	91.0-94.0(g)(q)	6.0-8.0	0.30	0.50	0.50(i)	0.20	0.20 Sb, 0.05 S, 0.05 P(g), 0.005 Al, 0.005 Si
C90300	225, 88-8-0-4, Navy "G" bronze, (SAE 620)	S, C, CL, PM, I, P	86.0-89.0(g)(q)	7.5-9.0	0.30	3.0-5.0	1.0(i)	0.20	0.20 Sb, 0.05 S, 0.05 P(g), 0.005 Al, 0.005 Si
C90500	210, 88-10-0-2, gun metal, (SAE 62)	S, C, CL, PM, I, P	86.0-89.0(g)(r)	9.0-11.0	0.30	1.0-3.0	1.0(i)	0.20	0.20 Sb, 0.05 S, 0.05 P(g), 0.005 Al, 0.005 Si
C90700	205, 89-11, (SAE 65)	S, C, CL, PM, I, P	88.0-90.0(g)(q)	10.0-12.0	0.50	0.50	0.50(i)	0.15	0.20 Sb, 0.05 S, 0.30 P(g), 0.005 Al, 0.005 Si
C90710	...	S, C, CL, PM, I, P	bal(g)(q)	10.0-12.0	0.25	0.05	0.10(i)	0.10	0.20 Sb, 0.05 S, 0.05-1.2 P(g), 0.005 Al, 0.005 Si
C90800	...	S, C, CL, PM, I, P	85.0-89.0(g)(q)	11.0-13.0	0.25	0.25	0.50(i)	0.15	0.20 Sb, 0.05 S, 0.30 P(g), 0.005 Al, 0.005 Si
C90810	...	S, C, CL, PM, I, P	bal(g)(q)	11.0-13.0	0.25	0.30	0.50(i)	0.15	0.20 Sb, 0.05 S, 0.15-0.8 P(g), 0.005 Al, 0.005 Si

จากการศึกษาสมบัติการหล่อในแบบทราย(sand mold) และแบบเหล็ก(permanent mold) ซึ่งมีอัตราการเย็นตัวช้าใกล้เคียงกับการหล่อในแบบปูนปลาสเตอร์ของการหล่อเครื่องประดับมากที่สุดพบว่าความสามารถไหลตัวของน้ำโลหะ(fluidity)และ ความสามารถในการหล่อ(castability)ของทองแดงผสมเป็นอีกปัญหาที่ผู้ผลิตต้องทราบ เนื่องจาก ทองแดงอัลลอยหลายกลุ่มมีความสามารถในการหล่อต่ำ มีการหดตัวสูงแต่มีความสามารถในการไหลตัวได้ดี เช่น บรอนซ์ซิลิคอน บรอนซ์อะลูมิเนียม บรอนซ์แมงกานีส ส่วนทองแดงผสมสูงหรือ ทองเหลืองสีแดง(red brass) มีการหดตัวต่ำ แต่มีความสามารถไหลลงแบบได้ช้า^(๒) อย่างไรก็ตามการเย็นตัวยังจำเป็นต้องเน้นว่าเป็นการเย็นตัวอย่างมีทิศทางโดยจุดสุดท้ายของการเย็นตัวต้องเป็นรูสันหรือ ทางน้ำในชิ้นงานหล่อเสมอ ซึ่งการเปลี่ยนขนาดเนื่องจากการออกแบบเป็นปัญหาย่างยิ่งต่อการเย็นตัวและไม่สามารถแก้ไขได้ทั้งหมด จากปัญหาที่กล่าวมาจึงทำให้จำเป็นต้องเลือกใช้ธาตุปรับลดขนาดเกรน

เพื่อช่วยลดปัญหาเนื่องจากการหดตัวของการหล่อซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาการซ่อมงานและต้นทุนการผลิต ตาราง 1.6.3 แสดงสมบัติการหล่อของทองแดงผสมในแบบทรายซึ่งมีสภาวะใกล้เคียงการหล่อของเครื่องประดับ ซึ่งแสดงความแตกต่างของทองแดงผสมแต่ละกลุ่ม

ตาราง 1.6.3 สมบัติการหล่อของทองแดงผสมในแบบทราย⁽²⁾

UNS number	Common name	Shrink- age allow- ance, %	Approx liquidus temperature		Castability rating (a)	Fluidity rating (a)
			°C	°F		
C83600	Leaded red brass	5.7	1010	1850	2	6
C84400	Leaded semi-red brass	2.0	980	1795	2	6
C84800	Leaded semi-red brass	1.4	955	1750	2	6
C85400	Leaded yellow brass	1.5 to 1.8	940	1725	4	4
C85800	Yellow brass	2.0	925	1700	4	4
C86300	Manganese bronze	2.3	920	1690	6	2
C86500	Manganese bronze	1.9	880	1615	6	2
C87200	Silicon bronze	1.8 to 2.0			8	3
C87500	Silicon brass	1.9	915	1680	7	1
C90300	Tin bronze	1.5 to 1.8	980	1795	3	6
C92200	Leaded tin bronze	1.5	990	1810	3	6
C93700	High-lead tin bronze	2.0	930	1705	1	6
C94300	High-lead tin bronze	1.5	925	1700	1	6
C95300	Aluminum bronze	1.6	1045	1910	8	5
C95800	Aluminum bronze	1.6	1060	1940	8	5
C97600	Nickel silver	2.0	1145	2090	5	7
C97800	Nickel silver	1.6	1180	2160	5	7

(a) Relative rating for casting in sand molds. The alloys are ranked from 1 to 8 in both over-all castability and fluidity; 1 is the highest or best possible rating.

ความรู้เบื้องต้นสำหรับทองแดงและทองแดงผสม

ทองแดงจัดอยู่ในกลุ่มโลหะที่มีความแข็งแรงในเกณฑ์ต่ำ มีความเหนียวสูง มีการใช้งานเฉพาะกรณีการปรับปรุงสมบัติทางกลของทองแดงทำได้หลายวิธี เช่น การขึ้นรูปเย็น (Cold-working) การเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีจัดเรียงอะตอม (Ordering hardening) การเพิ่มความแข็งแรงด้วยการอบบ่มตกตะกอน (Precipitation hardening) และ การสร้างสารละลายของแข็ง (Solid-Solution formation) สำหรับในการผลิตเครื่องประดับ จะมุ่งเน้นการสร้างสารละลายของแข็งในช่วงการหล่อหลอมเป็นหลักเนื่องจากสามารถดำเนินการได้ง่ายโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิตจริง

การแบ่งแยกประเภทของทองแดงผสม แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ

1. ทองเหลือง (Brass) เป็นทองแดงผสมสังกะสี

ปกติสังกะสีสามารถละลายในทองแดงได้สูงสุดที่ 39 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งจะส่งผลต่อความแข็งแรง ความเหนียวของโลหะผสม รวมถึง สีของทองแดงจะซีดเป็นสีเหลืองตามปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสังกะสีเป็นธาตุกดสีสำหรับทองแดงและทองคำ

ทองเหลืองที่นิยมใช้กันเป็นประจำ ได้แก่

ทองเหลืองผสมสังกะสีไม่เกิน 5% เรียกว่า gilding metal ใช้ทำเหรียญ มีสีแดงอ่อน

ทองเหลืองผสมสังกะสี 10% เรียกว่า commercial bronze มีสมบัติคล้ายคลึงกับ gilding metal

ทองเหลืองผสมสังกะสี 12.5% เรียกว่า jewelry bronze ใช้สำหรับทำเครื่องประดับ

ทองเหลืองผสมสังกะสี 15% เรียกว่า red bronze

ทองเหลืองผสมสังกะสี 20 % เรียกว่า Low brass

ทองเหลืองผสมสังกะสี 30 % เรียกว่า cartridge brass ทองเหลืองเหนียวสูง ใช้ทำปลอกกระสุนปืน ด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป (extrusion)

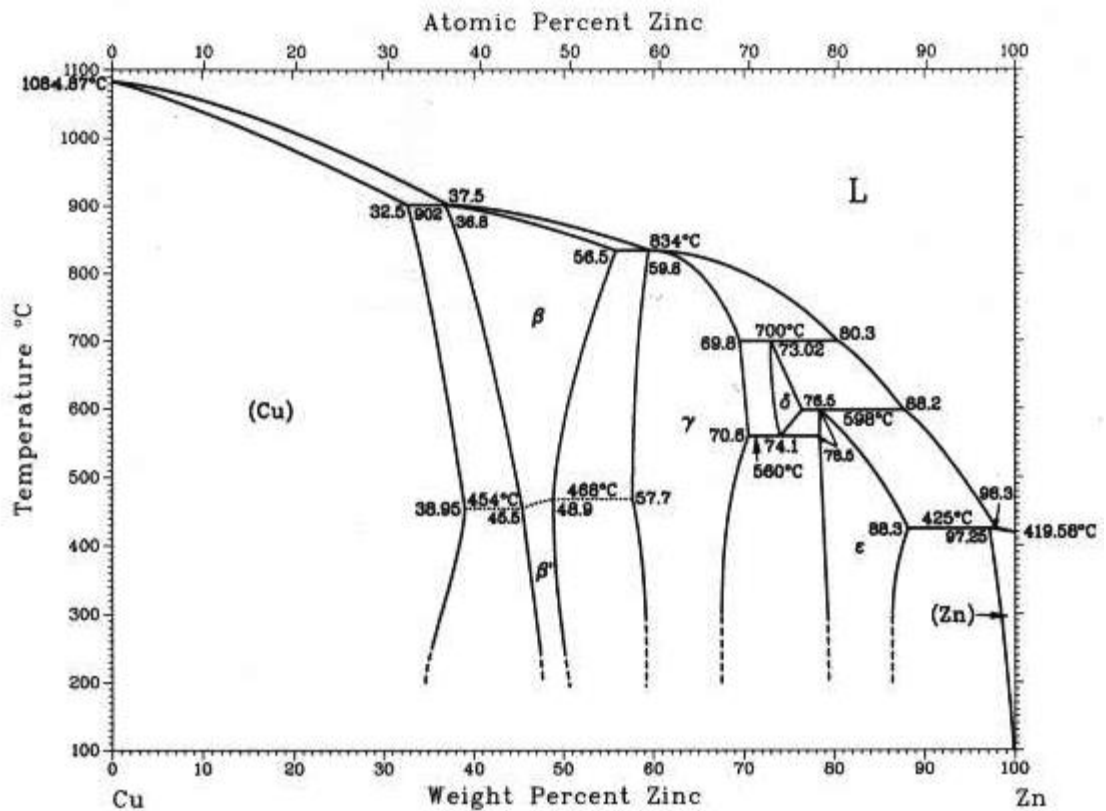
ทองเหลืองผสมสังกะสี 35 % เรียกว่า yellow brass ทองเหลืองมีสีเหลืองจัด ใช้งานใกล้เคียง cartridge brass

สมบัติเชิงกลของทองเหลือง

สังกะสีมีบทบาทต่อสมบัติทางกลและ การเปลี่ยนแปลงสี ความเหนียว ความแข็ง เนื่องจาก สังกะสีสามารถสร้างสารละลายของแข็งให้ทองแดงได้สูงสุดถึง 39% และสามารถสร้างสารประกอบเชิงโลหะกับทองแดงที่มีความแข็งแรงเปราะ ดังนั้นการเพิ่มสังกะสีสูงประมาณ 40 -45 % จะให้ความแข็งแรงสูงสุดในสภาพภายหลังการรีด และ ให้ความเหนียวจากการวัดอัตราการยืดตัวสูงสุดที่ สังกะสี 25 -35% หลังจากขอบเขตนี้ ความเหนียวจะลดลงตามการเพิ่มของสังกะสีและถูกเลือกใช้งานที่แตกต่างกัน

โลหะวิทยาของทองเหลือง

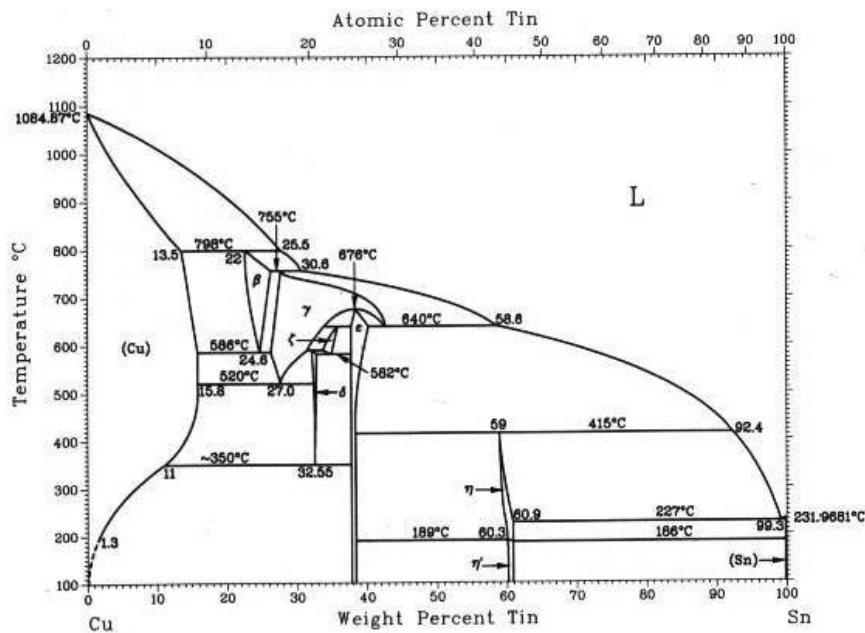
จากแผนภูมิสมดุลของทองแดงและสังกะสี (รูป 1.6.2) พบว่า สังกะสีสามารถละลายในทองแดงให้สารละลายของแข็ง(เฟสอัลฟา) สูงที่สุดที่ 39% โดยน้ำหนัก ที่ 454 องศาเซลเซียส สารละลายของแข็งอัลฟา มีระบบผลึกเป็น FCC มีความเหนียวสูง สามารถขึ้นรูปเย็นได้ดีที่ปริมาณสังกะสี 32.5% ที่ 902 องศาเซลเซียส จะเพิ่มสูงสุดที่ 39% โดยน้ำหนักที่ 454 องศาเซลเซียส และ กลับลดลงเหลือ 35.2% ที่ 250 องศาเซลเซียส เฟสอัลฟาจะมีสีแดงจนเหลืองเหมือนทองคำเมื่อปริมาณสังกะสีเพิ่มขึ้นจาก 10 จนถึง 20% และ กลับจะจางเมื่อเพิ่มสังกะสีจนถึง 30%



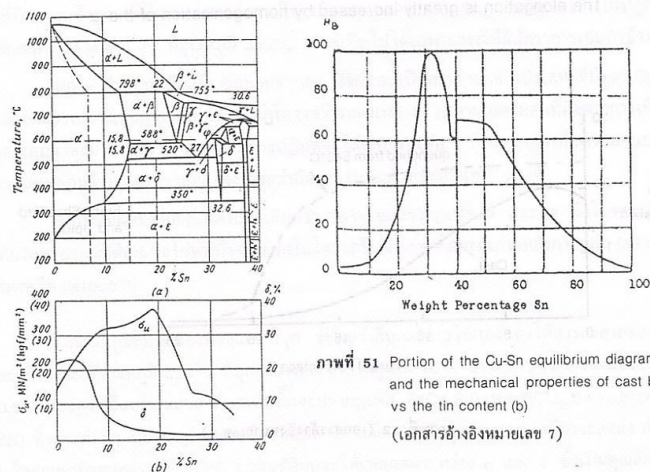
รูป 1.6.2 เฟสไดอะแกรมของทองแดงผสมสังกะสี⁽³⁾

2. **บรอนซ์(Bronze)** เป็นทองแดงผสมธาตุกลุ่มอื่นนอกจากสังกะสี หรือ ทองเหลืองที่เติมธาตุแล้ว สมบัติเปลี่ยนแปลงชัดเจน สำหรับบรอนซ์ที่สามารถใช้ผลิตเครื่องประดับ ได้แก่

บรอนซ์ดีบุก เป็นโลหะทองแดงผสมประเภทแรกที่มนุษย์เริ่มรู้จักวิธีการใช้ประโยชน์ ดังพบยุคบรอนซ์ในหลักฐานประวัติศาสตร์ โดยบรอนซ์ดีบุกสามารถผสมดีบุกอยู่ในช่วงประมาณ 10% บรอนซ์ดีบุกมีราคาแพงกว่าทองเหลือง จากรูป 1.6.3 เฟสไดอะแกรมของทองแดงผสมดีบุก แสดงให้เห็นว่า ดีบุกละลายในทองแดงสร้างสารละลายของแข็งเฟสอัลฟา (α) ส่งผลให้ความแข็งแรงของโลหะผสมเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณดีบุก โดยเมื่อปริมาณดีบุกเกินขอบเขตการละลายจะเกิดเฟสสารประกอบระหว่างทองแดงกับดีบุก ซึ่งเป็นเฟสที่มีความแข็งและเปราะแตกหักได้ง่าย ความแข็งแรงของโลหะผสมทองแดงกับดีบุกจะลดลงอย่างรวดเร็วตามปริมาณของดีบุกที่เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงจะมีค่าสูงสุดในสภาพหล่อเมื่อเติมดีบุกประมาณ 18% ดังรูป 1.6.4



รูป 1.6.3 เฟสไดอะแกรมของทองแดงผสมดีบุก⁽³⁾



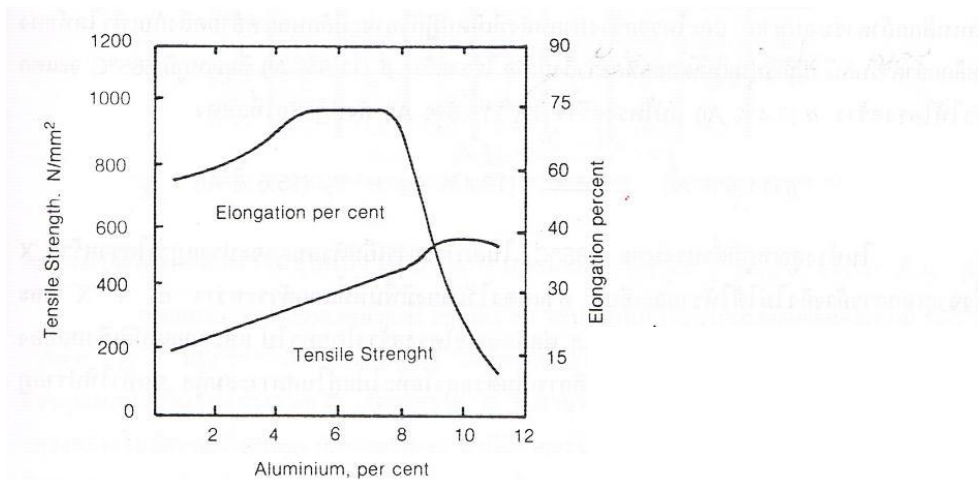
ภาพที่ 51 Portion of the Cu-Sn equilibrium diagram (a) and the mechanical properties of cast bronze vs the tin content (b)
(เอกสารอ้างอิงหมายเลข 7)

รูป 1.6.4 ความสัมพันธ์ของ a) เฟสไดอะแกรมของทองแดงผสมดีบุก ต่อ b) สมบัติทางกลของทองแดงผสมดีบุกผ่านการหล่อ⁽⁴⁾

บรอนซ์อะลูมิเนียม เป็นโลหะผสมทองแดงกับอะลูมิเนียมที่มีสมบัติทางกลในเกณฑ์สูง กล่าวคือ มีความแข็ง ความแข็งแรง ความเหนียวสูง นอกจากนี้ยังมีสมบัติต้านทานการกัดกร่อนดีทั้งที่อุณหภูมิห้อง ไปจนถึง 400 องศาเซลเซียส สามารถชุบแข็งและอบคืนตัวได้เช่นเดียวกับเหล็กกล้าคาร์บอน นิยมใช้ทำ Bearing เฟืองเกียร์ ใบพัด วาล์ว ประกับ และเครื่องมือป้องกันประกายไฟ เนื่องจากการหล่อหลอมยาก เพราะเป็นโลหะที่มีช่วงการแข็งตัวแคบ การหดตัวสูง และ ดุดแก่สาก

ตามคำจำกัดความของสมาคม ASTM บรอนซ์อะลูมิเนียม คือ ทองแดงผสมอะลูมิเนียม 5-15% อาจมีเหล็กผสมได้สูงถึง 10% และยอมให้มีแมงกานีสหรือนิกเกิลผสมได้ สำหรับซิลิคอนสามารถผสมได้ไม่เกิน 0.5%

อะลูมิเนียมมีผลต่อสมบัติเชิงกลของโลหะผสม โดยมีบทบาทเพิ่มความต้านทานแรงดึงให้สูงขึ้นและเพิ่มอัตราการยืดยาวให้สูงขึ้น มีจุดสูงสุดที่การเติมอะลูมิเนียมประมาณ 8 % หลังจากนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังรูป 1.6.5

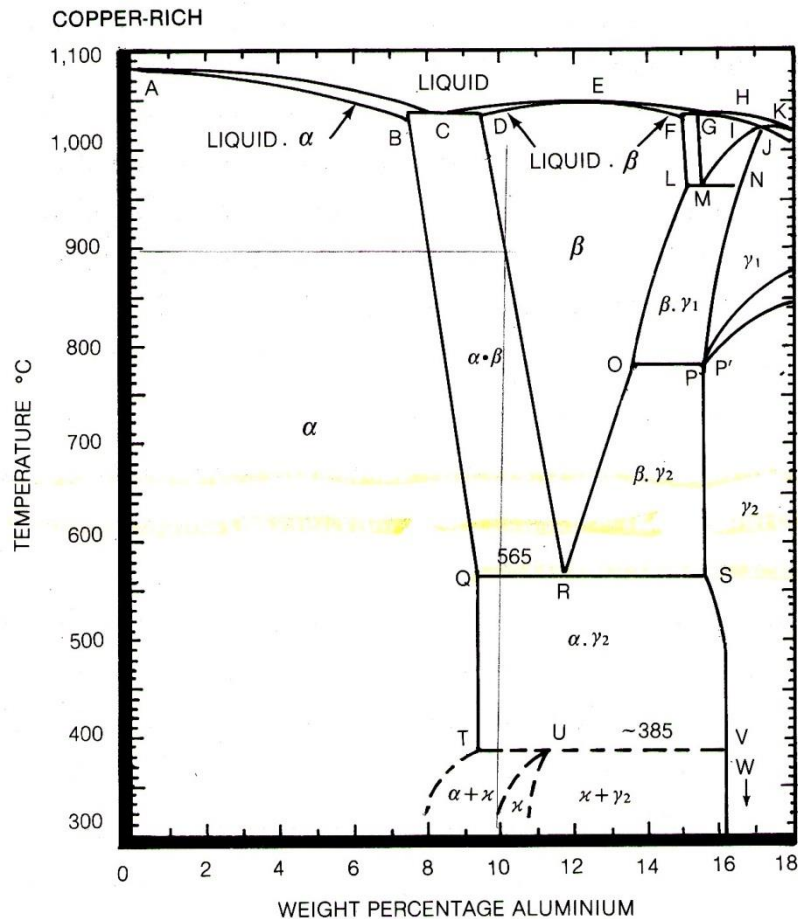


รูป 1.6.5 ความสัมพันธ์ของปริมาณอะลูมิเนียมต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุด และอัตราการยืดยาวของทองแดงผสมอะลูมิเนียม⁽⁴⁾

จากรูป 1.6.6 แสดงเฟสไดอะแกรมของทองแดงผสมอะลูมิเนียม พบว่า อะลูมิเนียมสามารถสร้างสารละลายของแข็งเฟสอัลฟา (α) (ระบบผลึก F.C.C.) โดยมีอะลูมิเนียมละลายได้สูงถึง 7.5% ที่ 1037 องศาเซลเซียส และเพิ่มเป็น 9.4% ที่ 565 องศาเซลเซียส โครงสร้างเบต้า (β) ซึ่งมีระบบผลึกเป็น B.C.C. มีความแข็งแรงมากกว่าโครงสร้างอัลฟา โดยโครงสร้างเบต้าเกิดจากปฏิกิริยายูเทคติกที่ 1037 องศาเซลเซียส จากการเปลี่ยนแปลงของเหลวเป็นสารละลายของแข็งอัลฟาและเบต้า ส่วนโครงสร้างแกมมา 1 (γ_1) มีลักษณะคล้ายคลึงกับเบต้า ส่วนโครงสร้างแกมมา 2 (γ_2) เป็นสารประกอบเชิงโลหะที่มีโครงสร้างทางเคมี Cu_9Al_4

อะลูมิเนียมบรอนซ์มีปฏิกิริยายูเทคตอย ที่ 565 องศาเซลเซียส คล้ายคลึงกับเหล็กกล้าคาร์บอนทำให้โครงสร้างผลัฟมีลักษณะคล้ายคลึงกับเฟอไรต์ในเหล็กกล้าคาร์บอน

อะลูมิเนียมบรอนซ์สามารถเติมเหล็ก นิกเกิล ซิลิกอน และแมงกานีสเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ปรับลดขนาดเกรน หรือความเหนียว ตามจุดประสงค์การใช้งานได้ต่อไป



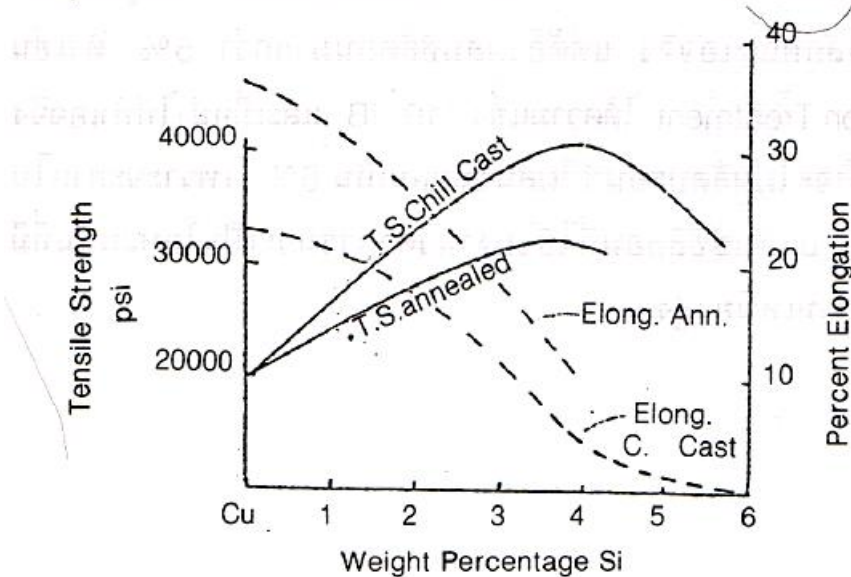
รูป 1.6.6 เฟสไดอะแกรมของทองแดงผสมอะลูมิเนียม⁽⁴⁾

บรอนซ์ซิลิคอน เป็นทองแดงผสมที่มีความแข็งแรงสูงใกล้เคียงกับบรอนซ์อะลูมิเนียมและมีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดีโดยเฉพาะในน้ำทะเลทั้งในระดับอุณหภูมิปกติและที่อุณหภูมิสูงกว่าปกติสามารถใช้ทำภาชนะทนแรงดัน (autoclave) และอุปกรณ์สำหรับใช้น้ำทะเลได้ดี

สมบัติทางกลของบรอนซ์ซิลิคอน

รูป 1.6.7 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดสัมพันธ์กับปริมาณซิลิคอนที่เติมในทองแดงผสม โดยพบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่ ปริมาณซิลิคอน 4 % และเมื่อปริมาณซิลิคอนเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการยืดตัวลดลงอย่างรวดเร็ว ทั้งในสภาพหลังหล่อและหลังการอบอ่อน

Proportion of Cu-Si Alloys



รูป 1.6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลต่อปริมาณซิลิคอนในทองแดงผสม⁽⁴⁾

โลหะวิทยาของบรอนซ์ซิลิคอน

รูป 1.6.8 แสดงการละลายของซิลิคอนในซิลิคอนบรอนซ์พบว่า ซิลิคอนมีการละลายสูงสุดได้ที่ 5.3 % ที่ 852 องศาเซลเซียส ในสารละลายของแข็งอัลฟา (α) (F.C.C.) และการละลายของซิลิคอนจะลดลงเหลือเพียง 4.6 % ที่ 555 องศาเซลเซียส และเกิดปฏิกิริยายูเทคตอย ($K \rightarrow \alpha + \gamma, 555^\circ\text{C}$) เมื่อปริมาณซิลิคอนเพิ่มขึ้นจะเกิดเฟส β (B.C.C.) สัมพันธ์กับการเกิดปฏิกิริยาเปริเทคติก ($\alpha + L \rightarrow \beta, 852^\circ\text{C}$) และเปริเทคตอยด์ ($\beta + \alpha \rightarrow K_{(H.C.P.)}, 824^\circ\text{C}$) ที่ 785 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยายูเทคตอยด์ ($\beta \rightarrow K + \delta$) ส่วน ϵ เป็นสารประกอบเชิงโลหะของทองแดงกับซิลิคอนที่นอกเหนือความสนใจศึกษาเนื่องจากในการใช้งานจะผสมซิลิคอนต่ำกว่าปริมาณที่สามารถเกิด ϵ ได้

บรอนซ์ซิลิคอนมักพบในการผลิตเครื่องประดับแฟชั่นเนื่องจากให้ผิวเรียบเนียน มีความแข็งแรงสูงทำให้ตัวเรือนมีคุณภาพดี มักพบการใช้งานเพื่อผลิตส่งออกต่างประเทศเป็นหลัก แต่มักพบปัญหาหลักจากรอยหดตัวหรือรอยผุเนื่องจากการหล่อที่ควบคุมไม่ได้โดยเฉพาะการหล่อเครื่องประดับทองแดงผสมที่เน้นต้นทุนต่ำ มีทางน้ำน้อยและทางน้ำเล็ก

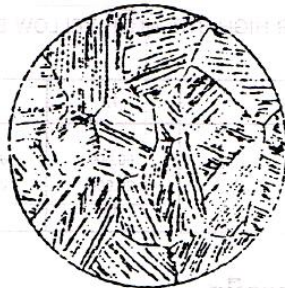
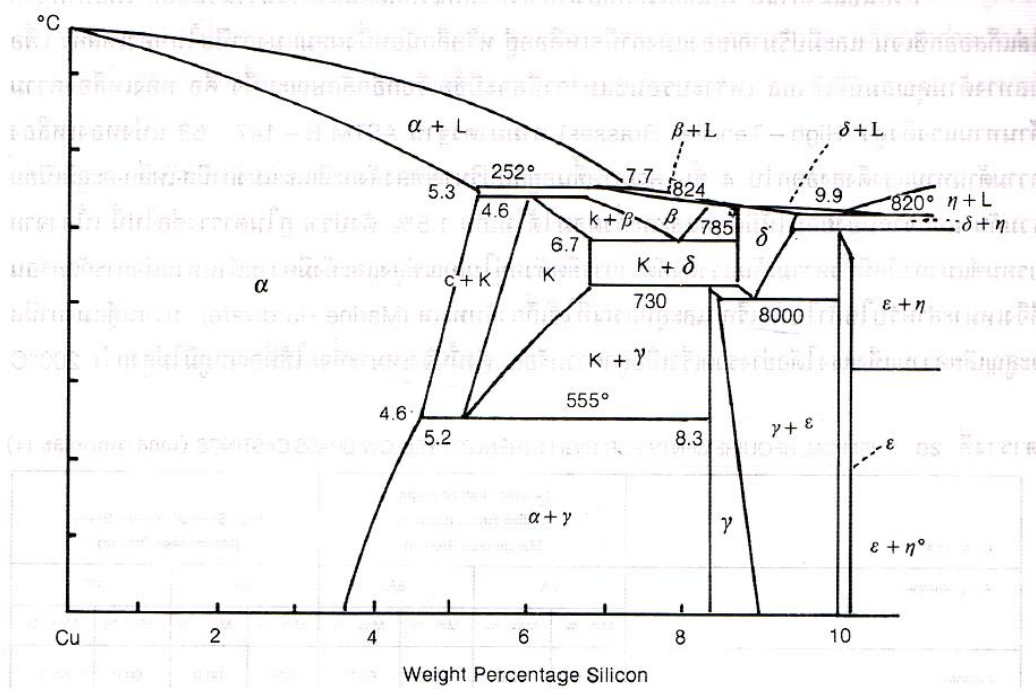
สำหรับการหล่อและควบคุมจำเป็นต้องมีลักษณะพึงพิจารณาเช่น บรอนซ์แมงกานีสและบรอนซ์อะลูมิเนียมมีลักษณะการหดตัวคล้ายคลึงของเหล็กกล้าเนื่องจากมีช่วงการเย็นตัวแคบประมาณ 40-14 องศาเซลเซียส ดังนั้นการใช้ระบบรูลันเต็มเต็มน้ำโลหะและการเย็นตัวอย่างมีทิศทาง (directional solidification) จึงมีความจำเป็นต่อการออกแบบการหล่ออย่างมาก⁽⁵⁾ บรอนซ์ดีบุกมีช่วงการแข็งตัวกว้างประมาณ 165 องศาเซลเซียสสำหรับอัลลอย C86300 ซึ่งจะเกิดสภาวะกึ่งแข็งกึ่งเหลวในช่วงการเย็นตัวส่งผลเกิดการหดตัวระหว่างโครงสร้างกึ่งไม้ เรียกว่า รอยหดตัวระหว่างเดนไดรต์ หรือ Microshrinkage ได้ง่าย ใน

ลักษณะด้วยการเติมซิลิคอนในเงินผสมทองแดง จึงจำเป็นต้องแก้ไขด้วยการควบคุมการเย็นตัวให้เร็ว⁽⁵⁾ หรือ การเติมธาตุปรับลดขนาดเกรน อย่างไรก็ตามมีการรายงานถึงการเติมธาตุปรับลดขนาดเกรนที่สามารถลดรอย หดตัวระหว่างเดนไดรต์ ได้ดี จากการศึกษาของ M. Sadayappan และ คณะ⁽⁷⁾ พบว่า สำหรับบรอนซ์ รวมถึงบรอนซ์ดีบุกที่มีการเติม ตะกั่ว สามารถลดขนาดเกรนด้วยการเติมเซอร์โคเนียม 0.3% ร่วมกับ คาร์บอน หรือ ไนโตรเจน ในน้ำโลหะหลอมเหลวที่ไม่มีซิลเฟอร์ หรือ การเติมไทเทเนียม 0.2% ผสมกับโบรอน 0.03 % หรือ เหล็ก 0.1 % ร่วมกับโบรอน 0.03 % ทำให้บรอนซ์มีเกรนขนาดเล็กลง นอกจากนี้ยังพบว่า เซอร์โคเนียม ลดขนาดเกรนของบรอนซ์ดีบุกและ ทองเหลืองสีแดง (red brass) ได้ดีแต่ไม่ได้ส่งผลลดขนาดเกรนของซิลิคอน บรอนซ์ อย่างไรก็ตามการมีอยู่ของซิลเฟอร์ ส่งผลลดขนาดเกรนด้วยเซอร์โคเนียมลดลงแต่สามารถแก้ไขได้ ด้วยการเติมธาตุเร่งออกซิเดชันเช่น แมกนีเซียม Ruddle รายงานผลการเติม เซอร์โคเนียม 0.05% หรือ เหล็ก 1% ใน บรอนซ์ดีบุกผสมตะกั่ว(gun metal) และ ทองเหลืองสีแดง⁽⁵⁾ สามารถลดขนาดเกรนได้ดี เหล็กยัง ส่งผลต่อการปรับลดขนาดเกรนให้ละเอียดได้ดีในกรณีของ ทองเหลืองเฟสหลักเบต้า Beta brass หรือ บรอนซ์ อะลูมิเนียม ที่ไม่ต้องการเหล็กผสมสามารถใช้ เซอร์โคเนียม 0.03% ร่วมกับ โบรอน 0.02% อย่างไรก็ตามการ เติมเหล็กร่วมกับโบรอนสามารถก่อจุดแข็ง(hard spot) ได้ในทองเหลือง(yellow brass) แม้จะสามารถลด ขนาดเกรนได้ดีก็ตาม⁽⁶⁾

จากการศึกษาดังกล่าวข้างต้นพบว่าขนาดเกรนปกติของโลหะทองแดงผสมที่ไม่ได้ใส่ธาตุปรับลดขนาด เกรน(สำหรับโลหะงานหล่อเชิงวิศวกรรมปกติ)อยู่ที่ 3-18 มม. ในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับนั้นพบ โลหะทองแดงผสมมีขนาดเกรนในช่วง 1-3 มม. (ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิหล่อโลหะและขนาดชิ้นงานและอัตราการ เย็นตัวรวมถึงระยะแล้วการล้างเข้าปูน) หลังจากเติมธาตุปรับขนาดเกรนคณะผู้วิจัยคาดว่าขนาดเกรนจะลดลง เป็น 0.3-0.6 มม. ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของชนิดและปริมาณธาตุปรับลดขนาดเกรนเนื่องจากคณะผู้วิจัยได้ เคยทำการทดลองธาตุปรับลดขนาดเกรนในเงินสเตอร์ลิง 950 พบว่าการเติมธาตุปรับลดขนาดเกรนทำให้ขนาด เกรนลดจาก 1.5-2.9 มม. เป็น 0.3-0.6 มม. สำหรับขนาดเกรนที่เหมาะสมไม่ได้อยู่ที่ขนาดชัดเจนแต่มี ผลกระทบต่อการลดการหดตัวและขนาดรูพรุนของชิ้นงาน และยังส่งเสริมสมบัติทางกลด้านอื่น ตลอดจน สภาพผิวชิ้นงานหลังการหล่อและแปรรูป

จากลักษณะการเติมธาตุปรับลดขนาดเกรนและธาตุกลุ่มควบคุมการทดลองสำหรับผลิตเครื่องประดับ จะพบว่าหากต้องการพัฒนาโลหะสำหรับเครื่องประดับจำเป็นต้องเลือกกลุ่มโลหะโดยพิจารณาถึงพัฒนา สมบัติทางกลเช่น ความแข็ง ความแข็งแรงและ สีผิว ควบคู่ไปกับการลดรอยหดตัวเนื่องจากการหล่อในรูปแบบ ของรอยหดตัวระหว่างเดนไดรต์ ซึ่งสามารถควบคุมได้ด้วยการปรับลดขนาดเกรน ซึ่งจะสามารถสร้างบรรทัด ฐานสำหรับการผลิตเครื่องประดับแฟชั่น ในรูปแบบของการพัฒนาตัวเรือนของเครื่องประดับให้มีมาตรฐาน และสร้างองค์ความรู้ที่โรงงานอุตสาหกรรมสามารถพัฒนาต่อยอด และลดต้นทุน อันจะนำไปสู่การเพิ่ม ศักยภาพในการแข่งขันสู่ตลาดต่างประเทศได้

Constitution of Cu – Si Alloys

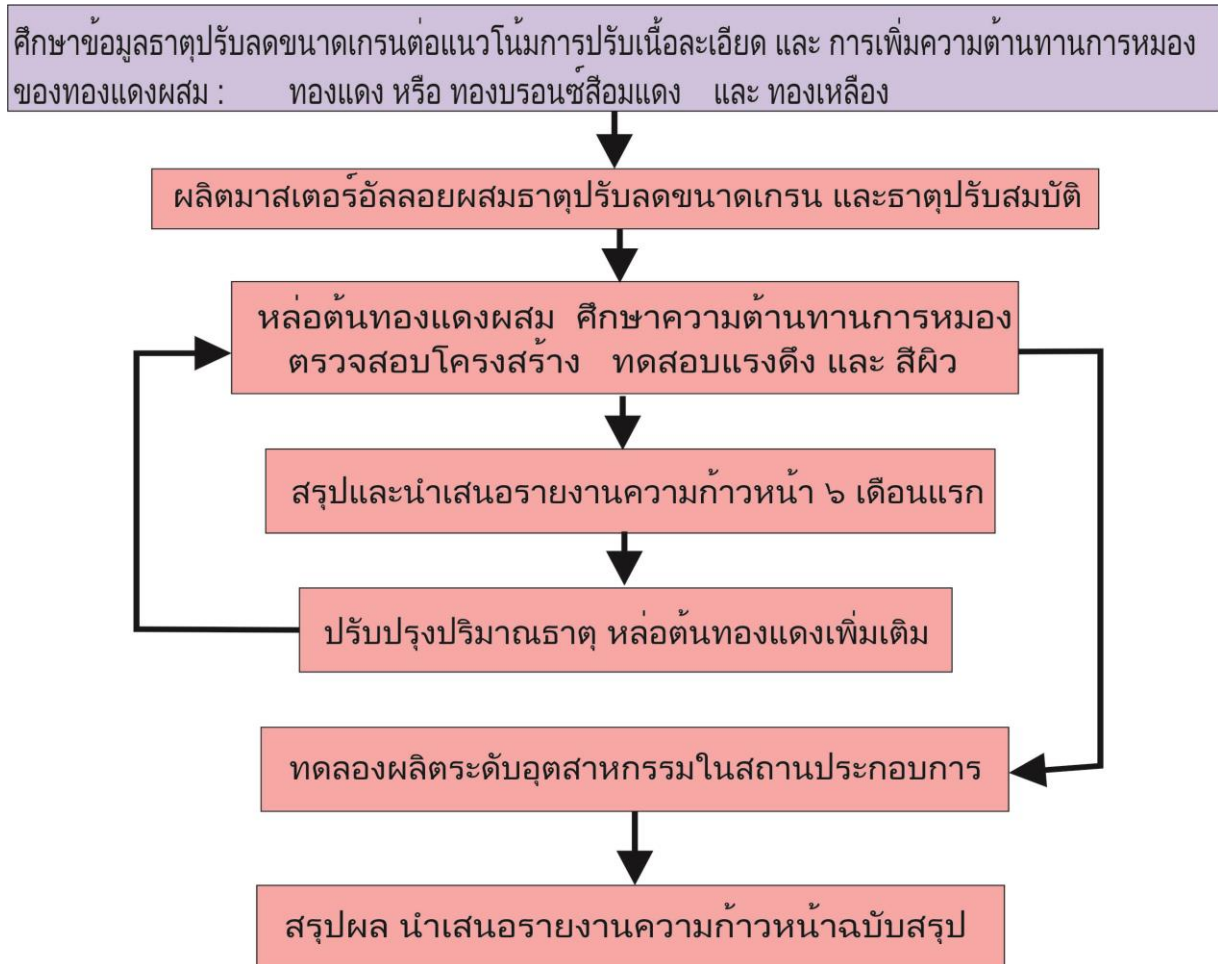


K-CuSi

รูป 1.6.8 การละลายของซิลิคอนในซิลิคอนบรอนซ์⁽⁴⁾

1.7 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลธาตุปรับลดขนาดเกรนเช่น โบรอน เซอร์โคเนียม อะลูมิเนียม เหล็ก ต่อแนวโน้มการปรับเนื้อละเอียด และการเพิ่มความต้านทานการหมองของทองแดงผสม ตั้งสมมุติฐานหลักดังนี้
 - i. เลือกทองแดงผสม 2 กลุ่มเพื่อการศึกษา ได้แก่
 1. ทองแดง หรือ ทองบรอนซ์สีแดง
 2. ทองเหลือง
2. ทดลองหล่อต้นทองแดงผสมร่วมกับธาตุปรับลดขนาดเกรน ด้วยแบบหล่อทรงถ้วย เพื่อทดสอบขนาดเกรนและการหดตัว
3. ทดลองหล่อต้นทองแดงผสมร่วมกับธาตุปรับลดขนาดเกรน ด้วยการหล่อชิ้นงานทดสอบแรงดึง และแผ่น 25*25*5 มม. เพื่อทดสอบสมบัติทางกล และขนาดเกรน รวมกับการพิจารณาปัญหาการแตกหลังหล่อ
4. ปรับปรุงปริมาณธาตุปรับลดขนาดเกรนเพื่อความเหมาะสมในการหล่อด้วยระบบสูญญากาศ
5. สรุปรายงาน และนำเสนอรายงานช่วง 6 เดือนแรก
6. ทดสอบความต้านทานการหมอง ตรวจสอบขนาดเกรน โครงสร้างจุลภาค ทดสอบแรงดึงและสีผิวของชิ้นงาน เก็บข้อมูลจุดเสียที่มักพบเพื่อการปรับปรุงในอนาคต
7. ปรับปรุงปริมาณสารประกอบโลหะผสมซิลิคอนให้เหมาะสมกับชนิดเงินอัลลอยร่วมกับการศึกษาความต้านทานการหมอง ตรวจสอบขนาดเกรน โครงสร้างจุลภาค และ สีผิวของชิ้นงาน
8. ทดลองผลิตเชิงอุตสาหกรรมในสถานประกอบการและติดตามผลการทำงานร่วมกับการศึกษาสีผิวของชิ้นงานและการแตกหลังหล่อของชิ้นงาน
9. สรุปผลการทำงานและ นำเสนอรายงานทั้งหมด โดยมีแผนผังแสดงรายละเอียดการทำงานดังรูปที่ 1.7.1



รูป 1.7.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

1.8 แผนงานโครงการ

ตาราง 1.8.1 แผนกิจกรรมหลักที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ รวมทั้งผลลัพธ์ (Output) ที่คาดว่าจะได้รับ

วัตถุประสงค์	กิจกรรมหลัก	กิจกรรมรอง	ผู้รับผิดชอบ
1. เพื่อศึกษาผลของธาตุปรับลดขนาดเกรนต่อการลดขนาดเกรน สมบัติทางกล ความต้านทานการหมอง และโครงสร้างจุลภาคของทองแดงผสมในระดับอุตสาหกรรม	1. รวบรวมข้อมูลผลธาตุผสมและแนวทางการหล่อธาตุปรับลดขนาดเกรนต่อทองแดงผสม	1.รวบรวมข้อมูลของธาตุปรับลดขนาดเกรนต่อทองแดงผสม 1.1.2 รวบรวมวิธีการเตรียมโลหะผสมเพื่อผลิตอัลลอยก่อนการหล่อทองแดงผสม	ดร.สิริวรรณ ดร.สิริวรรณและผู้ช่วยวิจัย
	1.2 จัดสร้างโลหะผสมเพื่อผลิตอัลลอยและหล่อต้นทองแดงผสม	-	ดร.สิริวรรณและผู้ช่วยวิจัย
2. เพื่อศึกษาผลของธาตุปรับลดขนาดเกรนต่อสมบัติทางกล ความต้านทานกันหมองและโครงสร้างจุลภาคของทองแดงผสม	2.1 วิเคราะห์ผลธาตุปรับลดขนาดเกรนต่อความต้านทานการหมอง สมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทองแดงผสม	-	ดร.สิริวรรณและผู้ช่วยวิจัย
3.เพื่อหาปริมาณธาตุปรับลดขนาดเกรนที่เหมาะสมต่อการเพิ่มความต้านทานการหมองโดยไม่ลดความสามารถในการหล่อ	3.1 ปรับปรุงส่วนผสมธาตุปรับลดขนาดเกรน เพื่อหล่อต้นทองแดงผสมได้ดีในสภาพการหล่อสุญญากาศ	-	รศ.ดร.เอกสิทธิ์, ดร.สิริวรรณและผู้ช่วยวิจัย
4.เพื่อศึกษาคุณภาพผิวตัวเรือน ความต้านทานการหมอง สมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของเครื่องประดับ ทองแดงผสมผสมธาตุปรับลดขนาดเกรนที่ผลิตขึ้น	4.1 รวบรวมผลสีผิวต้นทองแดงผสม ความต้านทานการหมอง สมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทองแดงผสม	4.1.1รวบรวมผลสีผิวต้นเงิน ความต้านทานการหมอง สมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาค	รศ.ดร.เอกสิทธิ์, ดร.สิริวรรณและผู้ช่วยวิจัย

		4.1.2 ทดสอบการใช้งาน ระดับอุตสาหกรรมและ สรุปผลงานวิจัยทั้งหมด	รศ.ดร.เอกสิทธิ์, ดร.สิริวรรณ และผู้ช่วยวิจัย
--	--	---	--

ตารางที่ 1.8.2 แผนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาการดำเนินการ (เดือนที่)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. รวบรวมข้อมูลธาตุปรับลดขนาดเกรน และแนวทางการหล่อโลหะผสม	←→											
2. จัดสร้างโลหะผสมเพื่อผลิตอัลลอยและ หล่อต้นทองแดงผสม		←→										
3. วิเคราะห์ผลธาตุผสม ต่อความต้านทาน การหมอง สมบัติทางกล และโครงสร้าง จุลภาคของชิ้นงานทองแดงผสม			←→									
4. ปรับปรุงส่วน ผสมอัลลอยเพื่อหล่อต้น เงินได้ดีในสภาพการหล่อสูญญากาศ						←→						
5. รวบรวมผลสีผิวต้นเงิน ความต้านทาน การหมอง สมบัติทางกล และโครงสร้าง จุลภาคของชิ้นงานทองแดงผสม								←→				
6. ทดสอบการใช้งานระดับอุตสาหกรรม และสรุปผลงานวิจัยทั้งหมด และเผยแพร่ ผลงาน										←→		

บทที่ 2

ผลการปฏิบัติงานและสรุปผลวิจัย

2. ผลการปฏิบัติงานและสรุปผลการวิจัย

2.1 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นพบว่า การพิจารณาธาตุผสมสำหรับทองแดง และทองแดงอัลลอย สามารถแยกย่อยการพิจารณาได้เป็น กลุ่มตามความบริสุทธิ์ และ การเติมธาตุผสม⁽¹⁸⁾ ดังนี้

ตาราง 2.1.1 แสดงสมบัติทั่วไปและการใช้งานกลุ่มทองแดงผสมชนิดต่างๆ

Coppers	Metals which have a designated minimum copper content of 99.3% or higher.
High-copper alloys	For the wrought products, these are alloys with designated copper contents less than 99.3% but more than 96% which do not fall into any other copper alloy group. The cast high-copper alloys have designated copper contents in excess of 94%, to which silver may be added for special properties.
Brasses	These alloys contain zinc as the principal alloying element with or without other designated alloying elements such as iron, aluminum, nickel, and silicon. The wrought alloys comprise three main families of brasses: copper–zinc alloys, copper–zinc–lead alloys (lead brasses), and copper–zinc–tin alloys (tin brasses). The cast alloys comprise five main families of brasses: copper–tin–zinc alloys (red, semired, and yellow brasses), “manganese bronze” alloys (high-strength yellow brasses), leaded “manganese bronze” alloys (leaded high-strength yellow brasses), copper–zinc–silicon alloys (silicon brasses and bronzes), and cast copper–bismuth and copper–bismuth–selenium alloys. Ingot for remelting for the manufacture of castings may vary slightly from the ranges shown.
Bronzes	Broadly speaking, bronzes are copper alloys in which the major alloying element is neither zinc nor nickel. Originally “bronze” described alloys with tin as the only or principal alloying element. Today, the term is generally used not by itself but with a modifying adjective. For wrought alloys, there are four main families of bronzes: copper–tin–phosphorus alloys (phosphor bronzes), copper–tin–lead–phosphorus alloys (leaded phosphor bronzes), copper–aluminum alloys (aluminum bronzes), and copper–silicon alloys (silicon bronzes). The cast alloys have four main families of bronzes: copper–tin alloys (tin bronzes), copper–tin–lead alloys (leaded and high-leaded tin bronzes), copper–tin–nickel alloys (nickel–tin bronzes), and copper–aluminum alloys (aluminum bronzes). The family of alloys known as “manganese bronzes,” in which zinc is the major alloying element, is included in the brasses, above.

สำหรับกลุ่มอัลลอยที่มีความเป็นไปได้สำหรับการหล่อในประเทศไทย ปัจจุบัน มักพบในกลุ่มบรอนซ์ ดีบุก ทองเหลือง (สังกะสีไม่เกิน 30 %) ทองแดงผสมไมโครอัลลอยเล็กน้อย โดยมักพิจารณาเลือกใช้งานจาก ความสามารถในการหล่อหลอม สีผิวหลังขัดแต่ง และ ความแข็งแรง โดยประเมินการใช้งานจริงให้เหมาะสมใน การผลิตเครื่องประดับหรือตรงตามความต้องการของนักออกแบบต่อไป อย่างไรก็ตาม ยังคงพบปัญหาการละ เว้นใช้ธาตุบางชนิดเช่น ตะกั่ว แคดเมียม อาร์เซนิก ซึ่งปกติเป็นธาตุที่นิยมเติมเพื่อเพิ่มสมบัติการหล่อ ลดการ กักเก็บออกซิเจน และ เพิ่มสมบัติการกลึงเจาะไส (โดยธาตุดังกล่าวจะพบมากในทองแดงผสมสำหรับการใช้ งานเชิงวิศวกรรมทั้งสิ้น) จึงทำให้โลหะกลุ่มนี้ยังคงต้องการการพัฒนาเฉพาะกลุ่มสำหรับการผลิตเครื่องประดับ อย่างเร่งด่วนเพื่อเพิ่มศักยภาพด้านการแข่งขันในเชิงอุตสาหกรรมต่อไป

โดยทั่วไปในแง่มุมมองทางวิศวกรรม การเติมอัลลอยหรือธาตุผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลและเพิ่มความ ต้านทานการกัดกร่อน ดังนั้นการเลือกธาตุผสมสำหรับทองแดงผสมจึงมักเป็นไปตามความต้องการการใช้งานที่ แตกต่างออกไป เช่น สังกะสี ดีบุก ฟอสฟอรัส เบริลเลียม ส่งผลลดค่าการนำไฟฟ้าพร้อมกับเพิ่มความแข็งแรง

ให้แก่วัสดุ รวมถึงมีการใช้งานทองเหลือง(brass Cu-Zn) บรอนซ์ฟอสฟอรัส (Cu-Sn-P) และ บรอนซ์เบริลเลียม สำหรับเป็นตัวต่อเชื่อมทางไฟฟ้าและ ข้อต่อสปริงสำหรับวงจรทางไฟฟ้า⁽¹⁸⁾

เมื่อพิจารณาในรายละเอียดแต่ละธาตุผสมพบว่า เงิน สังกะสี และ อะลูมิเนียม ส่งเสริมความแข็งแรงด้วยการสร้างสารละลายของแข็ง อีกทั้งยังลดทอนสีของชิ้นงาน ทำให้ทองแดงสีจางจนเป็นสีเหลืองได้ โครเมียม เซอร์โคเนียม เบริลเลียม ลดการละลายของสารละลายของแข็ง ส่งเสริมการสร้างความแข็งแรงด้วยการอบบ่มตกตะกอน ลดการกัดกร่อนออกซิเจนทำให้ทองแดงเกิดคราบออกไซด์ช้า กรณีของเบริลเลียมพบข้อมูลสิทธิบัตรยืนยันการเพิ่มความแข็งแรงถึง 1379 MPa และมีความแข็งถึง 40 HRC การเติมเบริลเลียมให้เพิ่มความแข็งทั้งสภาพหลังหล่อและ สามารถอบชุบความร้อนเพิ่มความแข็งแรงได้ สำหรับอะลูมิเนียมสามารถสร้างโครงสร้างคล้ายมาร์เทนไซต์ในเหล็กกล้าอบชุบส่งผลเพิ่มความแข็งแรงในทองแดงผสมได้ดีแต่ต้องพิจารณาความสามารถการไหลตัวของโลหะหลอมเหลวหากใช้เป็นธาตุเติมในทองแดงผสมสำหรับการหล่อและต้องระวังการกัดกร่อนก๊าซในช่วง Over heating ขณะหลอมโลหะ

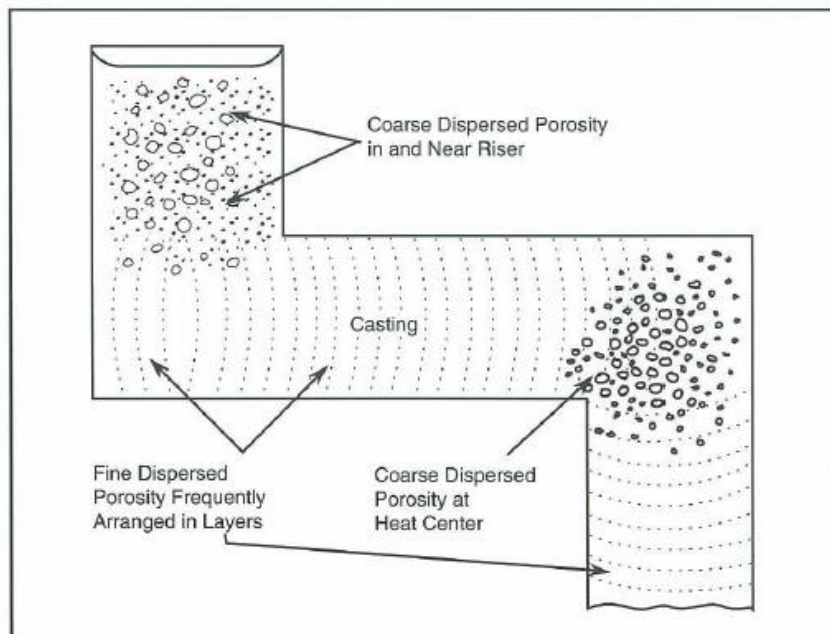
ทองแดงและทองแดงผสมสำหรับการหล่อหลอม สามารถแบ่งแยกตามช่วงการแข็งตัว (Solidification /freezing range) ได้เป็น 3 กลุ่ม⁽¹⁹⁾

กลุ่มที่ 1 – อลloyที่มีช่วงการแข็งตัวแคบ ในช่วงไม่เกิน 50 องศาเซลเซียสระหว่างเส้นliquidus และเส้น Solidus ได้แก่ ทองเหลือง บรอนซ์แมงกานีส บรอนซ์อะลูมิเนียม บรอนซ์นิกเกิล ทองแดงผสมโครเมียม

กลุ่มที่ 2 – อลloyที่มีช่วงการแข็งตัว 51-110 องศาเซลเซียส ได้แก่ ซิลิคอนบรอนซ์ บรอนซ์เบริลเลียม ทองเหลืองผสมซิลิคอน ทองแดงผสมนิกเกิล(Copper-Nickel alloys)

กลุ่มที่ 3 – อลloyที่มีช่วงการแข็งตัวกว้าง มากกว่า 110 องศาเซลเซียส (บางชนิดมีช่วงการแข็งตัว 170 องศาเซลเซียส) ได้แก่ leaded red brass, Semi-red brass, บรอนซ์ดีบุก, leaded tin bronze, high leaded tin bronze(R.F.Schmidt, D.G. Schmidt & Sahoo 1998)

หากพิจารณาทองแดงผสมสำหรับงานหล่อสามารถพิจารณาได้จาก การหดตัว(shrinkage) ร่วมกับการไหลตัวของโลหะหลอมเหลว(Fluidity) โดยกลุ่มที่มีการหดตัวสูงแต่มีการไหลตัวของโลหะหลอมเหลวได้ดีกว่า ทองเหลืองสีแดงที่มีการหดตัวต่ำ(low-shrinkage red brass) ได้แก่ บรอนซ์แมงกานีส บรอนซ์อะลูมิเนียม บรอนซ์ซิลิคอน โลหะผสมNickel-Silverหรือ เงินเยอรมัน ซึ่งจะให้ผลลัพธ์การหล่อที่สมบูรณ์ทั้งในแบบทราย แบบแม่พิมพ์เหล็กหรือแบบถาวร แบบปูนปลาสเตอร์ และกระบวนการหล่อเหวี่ยง อย่างไรก็ตามเนื่องจากเป็นทองแดงผสมที่มีการหดตัวสูงจึงต้องการการออกแบบงานที่เหมาะสมให้เกิดการเย็นตัวอย่างมีทิศทาง(directional Solidification) หลีกเลี่ยงการเปลี่ยนขนาดหรือปลายแหลม และต้องใช้รูขึ้น(riser) อย่างเหมาะสมเพื่อป้องกันรอยแตกและ รอยการหดตัวภายในชิ้นงานหล่อ⁽¹⁹⁾ ร่วมกับการใช้อุณหภูมิหล่อหลอมที่เหมาะสม ลดการกัดกร่อน ก๊าซไฮโดรเจน(มักพบในบรอนซ์ซิลิคอนเมื่อหล่อที่อุณหภูมิสูง)ดังรูปแบบการเย็นตัวในรูป 2.1.1



รูป 2.1.1 รูปแบบการเกิดรูภายในชิ้นงานโลหะที่มีช่วงการแข็งตัวยาว⁽¹⁹⁾

ในการใช้งานเพื่อผลิตเครื่องประดับ จะพบการใช้งานทองแดงผสมหลายกลุ่ม ได้แก่ ทองเหลืองสีแดง บรอนซ์ซิลิคอน บรอนซ์แมงกานีส ทองเหลืองซิลิคอน บรอนซ์ดีบุก และ เงินเยอรมัน ซึ่งการแบ่งการใช้งานหลักจะแยกตามสีเพื่อผลิตเครื่องประดับเช่น เลือกใช้บรอนซ์ดีบุกสีแดงปานกลางผลิตเครื่องประดับชุบทองสีชมพูหรือ ใช้ทองเหลืองสีทอง(คล้ายทอง 18 k) ผลิตเครื่องประดับชุบทองคำเป็นต้น โดยเบื้องต้น ผู้ผลิตไทยมักนิยมใช้ บรอนซ์ดีบุก(ทองแดงผสมดีบุก) และ ทองเหลืองเส้น ซึ่งหาได้ง่ายในท้องตลาดมาใช้ผลิตแต่ด้วยความต้องการเพิ่มของผู้บริโภคทำให้การใช้ทองแดงอัลลอยชนิดอื่นเริ่มสร้างบทบาทสำคัญโดยมักจะเข้ามาในรูปแบบเม็ดอัลลอยจากต่างประเทศ ซึ่งในความเป็นจริงนั้นเป็นกลุ่มบรอนซ์และทองเหลืองชนิดต่างๆทั้งสิ้น โดยสามารถเติมสารปรับปรุงสมบัติได้แก่ ธาตุปรับลดขนาดเกรน(Grain refiner) ธาตุลดการดูดก๊าซ(Oxidizer) ซึ่งเทคโนโลยีการใช้กลุ่มธาตุดังกล่าวยังไม่เป็นที่แพร่หลายทำให้ไม่สามารถใช้งานได้อย่างถูกต้อง ส่งผลต่อการผลิตเครื่องประดับที่มีคุณภาพต่ำกว่าความต้องการ รวมถึงยังรอการใช้เทคโนโลยีและอัลลอยจากต่างประเทศที่มีราคาสูง อย่างไรก็ตามการใช้งานธาตุผสมยังจำเป็นต้องพิจารณาความเป็นไปได้สำหรับการสั่งซื้อ/หาใช้อย่างภายในประเทศ เนื่องจากธาตุบางชนิดไม่สามารถนำเข้าหรือไม่มีขายในประเทศไทยเกิดอุปสรรคในการทำงานอย่างมากหรือทำให้มีราคาสูงเกินจริง

ในมุมมองการใช้งานจริงของเครื่องประดับสามารถเปรียบเทียบการใช้งานโลหะในอากาศปกติที่ไม่เจอบนไอน้ำกรดและต่างด้วยการเปรียบเทียบความต้านทานการกัดกร่อนเป็นไป ดังตารางที่ 2.1.2 พบว่าการใช้บรอนซ์ดีบุก บรอนซ์ซิลิคอน เงินเยอรมัน บรอนซ์อะลูมิเนียม และ ทองเหลืองผสมสังกะสีต่ำสามารถใช้งานได้ซึ่งเป็นไปตามแนวโน้มการใช้จริงในประเทศไทย นอกจากนี้หากพิจารณาภาวะใกล้เคียงที่เครื่องประดับ

สามารถสัมผัสได้เช่น การสัมผัสน้ำทะเล น้ำสบู่มากพบการเกิดสภาวะกัดกร่อนดังตารางที่ 2.1.3 ซึ่งในภาพรวมจะพบว่า กลุ่มทองเหลือง และทองเหลืองผสมซิลิคอน ไม่แนะนำให้สัมผัสบรรยากาศดังกล่าว แต่กลุ่มบรอนซ์ดีบุก บรอนซ์อะลูมิเนียม เงินเยอรมัน บรอนซ์ซิลิคอน ยังสามารถใช้งานได้ อย่างไรก็ตามยังจำเป็นต้องพิจารณาการเกิดฟิล์มกันหมองเนื่องจากธาตุผสมแต่ละชนิดเพิ่มเติมซึ่งจำเป็นต้องทดสอบเฉพาะในแต่ละวัสดุต่อไป

ตารางที่ 2.1.2 แสดงแนวทางการใช้งาน ทองแดงผสมในสภาวะการกัดกร่อนรูปแบบต่างๆ⁽¹⁸⁾

Environment	Comments
Concentrated or dilute acids or alkalis not containing air or other oxidants (nitric acid, dichromates, chlorine and ferric salts), complexing agents [cyanides, ammonia, chlorides (when hot), amines], and compounds that react directly with copper (sulfur, hydrogen sulfide, silver salts, mercury and its compounds, acetylene)	Tin bronzes, silicon bronzes, nickel-silver, copper-aluminum bronzes and low-zinc bronzes are generally acceptable.
Dilute or concentrated acids or acid salts, both organic and inorganic	Yellow bronzes and other high-zinc alloys should not be specified.
Dilute or concentrated alkalis, neutral chloride or sulfate solutions or mild oxidizing agents such as calcium hypochlorite, hydrogen peroxide, and sodium nitrate	High-zinc alloys should not be specified.
Nonoxidizing acetic, hydrochloric, and phosphoric acids	Tin bronzes, aluminum bronzes, nickel-silver, copper and silicon bronzes recommended. High-zinc alloys should not be specified.
Hot and concentrated hydrochloric acid	May be aggressive toward alloys that resist attack when the acid is cold and dilute.
Nitric, chromic, and other oxidizing acids	Copper alloys not recommended.
Alkalis	70-30 copper nickel alloys recommended for concentrated bases; high-tin bronzes, nickel-silver, silicon bronzes, and most other alloys except high-zinc bronzes can be used with dilute bases. Aluminum bronzes not containing tin are susceptible to dealuminification in hot dilute alkalis. Copper alloys should be avoided.
Ammonium hydroxide, substituted ammonium compounds, amines, and cyanides; mercury, mercury salts	
Neutral salt solutions	Generally safe with most copper alloys, although corrosion rates may vary. Chlorides are more aggressive than sulfates and carbonates, especially in aerated solutions. Copper-nickels and aluminum bronzes are preferred for use with concentrated brines.

ตารางที่ 2.1.3 อัตราความต้านทานการกัดกร่อนของทองแดงหล่อในสภาวะต่างๆ⁽¹⁸⁾

Corrosive Medium	Coppers (C361100-C362800)	Tin Bronzes (C362200-C361700)	Leaded Tin Bronzes (C362200-C362300)	High-Leaded Tin Bronzes (C361100-C364500)	Leaded Red Bronzes (C363300-C36310)	Leaded Semi-Red Bronzes (C364200-C364800)	Leaded Yellow Bronzes (C362500-C363000)	Leaded High-Strength Yellow Bronzes (C364400-C365100)	High-Strength Yellow Bronzes (C365100-C365000)	Aluminum Bronzes (C363200-C363500)	Leaded Nickel Brasses (C361300-C361400)	Leaded Nickel Brasses (Nickel Silvers) (C361600-C361800)	Silicon Brasses (C361700)	Silicon Brasses (C361400-C361800)
Potassium Hydroxide	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C
Potassium Sulfate	A	A	A	A	A	C	C	C	C	A	C	C	A	C
Propane Gas	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Sea Water	A	A	A	A	A	C	C	C	C	A	C	C	B	B
Soap Solutions	A	A	A	A	B	C	C	C	C	A	C	C	A	C
Sodium Bicarbonate	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B

นอกจากธาตุผสมหลักที่ใช้ในการแบ่งประเภททองแดงผสมข้างต้น ยังธาตุที่ช่วยเสริมประสิทธิภาพทองแดงผสม เพื่อความเสี่ยงในการหดตัวและลดแนวโน้มการหมองของทองแดง ได้แก่ กลุ่มธาตุลดขนาดเกรน หรือธาตุปรับเนื้อละเอียด และ ธาตุลดการละลายของก๊าซ(Oxidizer) แม้ธาตุกลุ่มนี้จะใช้งานน้อยแต่ในทาง

ปฏิบัติกลับพบว่าการเติมธาตุปรับเนื้อละเอียด และ ธาตุลดการละลายของก๊าซในอัลลอยการค้าจากต่างประเทศเป็นหลัก และพบการใช้งานเพิ่มมากขึ้นในช่วง 4 ปีที่ผ่านมา(โดยเฉพาะมักพบตามแหล่งผลิตเครื่องประดับใหญ่ เช่น กรุงเทพฯ เชียงใหม่ เป็นต้น ซึ่งมักพบกับบริษัทที่ส่งออกสินค้าไปต่างประเทศ) สำหรับกับธาตุลดขนาดเกรนได้แก่ ไทเทเนียม โบรอน เซอร์โคเนียม ดีบุก และ เหล็ก จากการศึกษาของ Couture และ Edwards พบว่า เซอร์โคเนียมส่งผลลดขนาดเกรนในทองเหลืองสีแดง บรอนซ์ และบรอนซ์ดีบุกที่ไม่มีซัลเฟอร์เจือปน แต่ไม่ลดขนาดเกรนของบรอนซ์ซิลิคอน⁽⁸⁾ การศึกษาของ Raddle แสดงให้เห็นถึงการเติมเซอร์โคเนียม 0.01% หรือ เหล็ก 1% ส่งผลให้บรอนซ์ดีบุก ทองเหลืองแดง บรอนซ์อะลูมิเนียม และบรอนซ์แมงกานีสมีขนาดเกรนลดลงได้ และการเติมเซอร์โคเนียม 0.03% ร่วมกับโบรอน 0.02% สามารถลดขนาดเกรนของบรอนซ์อะลูมิเนียมและ Beta brass ได้⁽⁹⁾ ผลการศึกษาของ Wallace แสดงว่าการเติมผงเหล็ก 1% ลดขนาดเกรนของทองเหลือง และการเติมเซอร์โคเนียม 0.06% และ โบรอน 0.02% ส่งผลลดขนาดเกรนของ Cu-33Zn-4Al⁽¹⁰⁾ อย่างไรก็ตามต้องระวังการเกิดจุดแข็งสำหรับการเติม โบรอนและเหล็ก ซึ่งเป็นตำหนิที่ไม่ควรเกิดในตัวเรือนเครื่องประดับ การศึกษาของ Reif พบว่า ทองแดงผสมที่มีสังกะสี 25-42 % สามารถถูกลดขนาดเกรนด้วยการเติม เซอร์โคเนียม แมกนีเซียม เหล็กและ ฟอสฟอรัส^(11,12) ภาพรวมการใช้งานธาตุปรับเนื้อละเอียดสามารถสรุปเป็นแนวทางได้ดังนี้⁽¹³⁻¹⁷⁾

* โบรอนลดขนาดเกรนในทองเหลืองสีแดง(ไม่มีตะกั่ว) ส่วน เซอร์โคเนียมลดขนาดเกรนของทองเหลืองสีแดงที่มีตะกั่ว ดังรูป 2.1.2 และ 2.1.3

* EnviroBrass II สามารถลดขนาดเกรนด้วยการเติมเซอร์โคเนียม

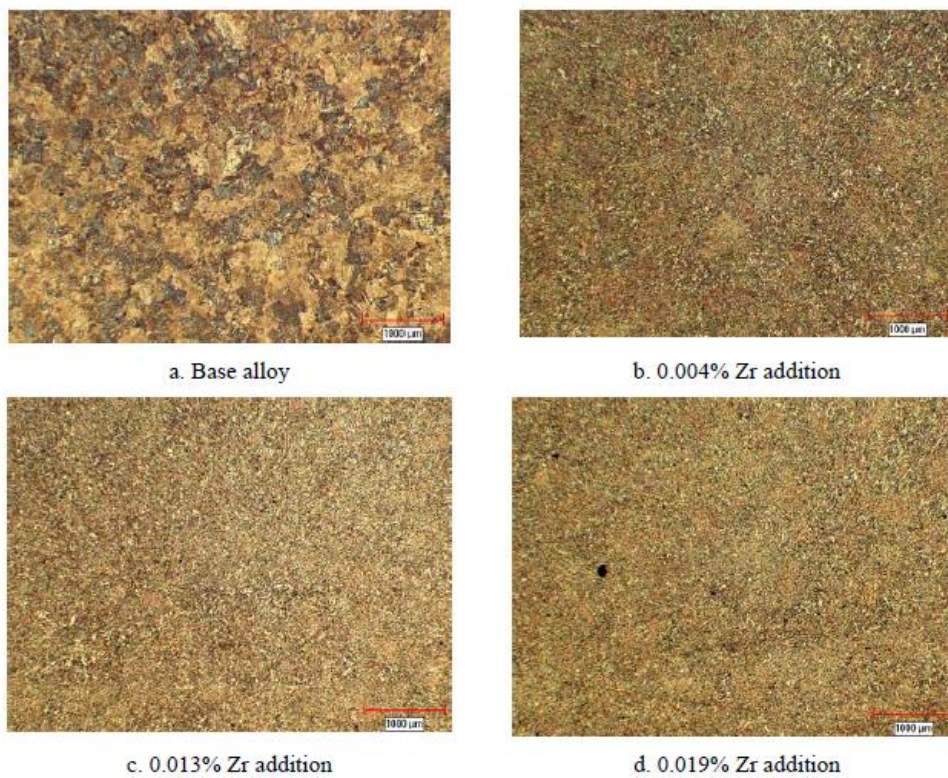
* ทองเหลือง(C85800) สามารถลดขนาดเกรนด้วยโบรอนโดยไม่จำเป็นต้องเติมดีบุก

* EnviroBrass III สามารถลดขนาดเกรนด้วยโบรอนโดยต้องมีดีบุกประมาณ 0.3% และจำเป็นต้องเติม เซอร์โคเนียมหากมีดีบุกสูงถึง 1 %

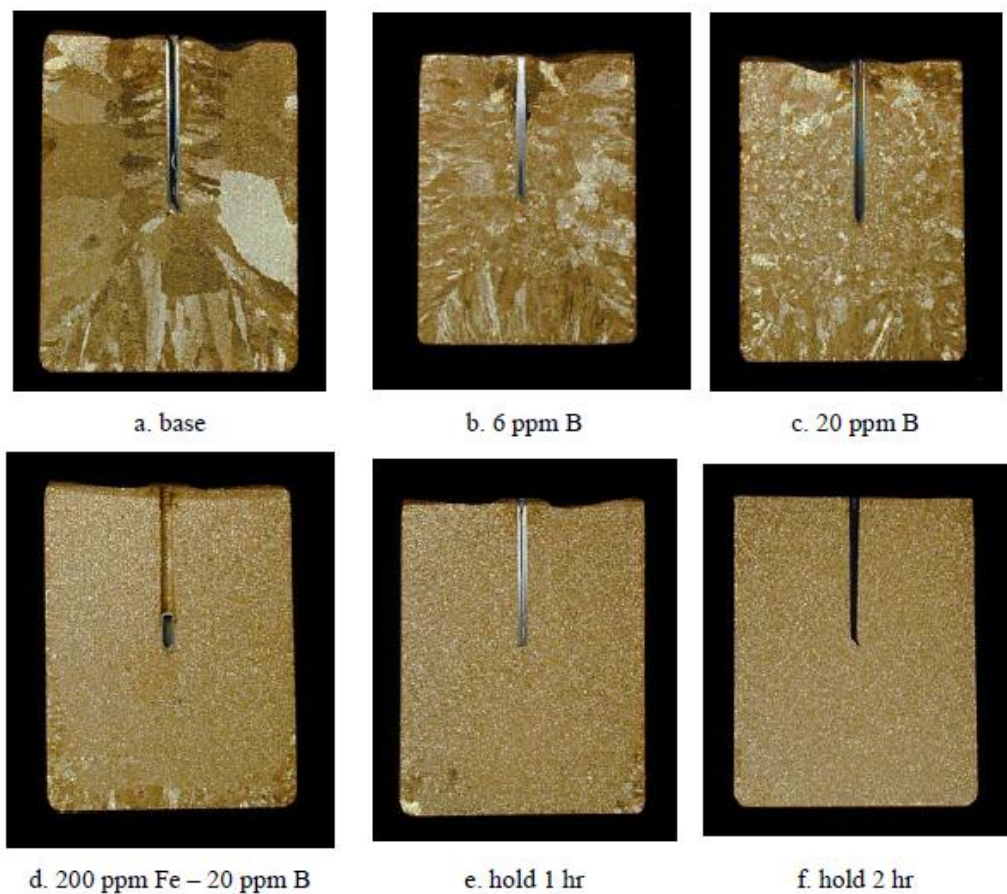
* การเติมธาตุปรับลดขนาดเกรนจะลดการแตกหลังหล่อในทองแดงทุกประเภท

* การเกิดจุดแข็งเกิดจากการมีเหล็กมากกว่า 0.05% ร่วมกับการเติมโบรอน

จุดแข็งอาจเกิดจากการมีโบรอนร่วมกับเหล็ก ซิลิคอนและ นิกเกิลทำให้เกิดสารประกอบกึ่งโลหะได้ (เป็นไปตามการเย็นตัวในแผนภูมิสมดุลของโบรอนกับธาตุอื่นที่พบการสร้างสารประกอบกึ่งโลหะได้ง่าย) ในทองเหลืองมักพบเกิดจุดแข็งในกรณีการเติมเซอร์โคเนียม 150 ppm ร่วมกับ โบรอน <5 ppm ซึ่งจะเกิดร่วมกับการหนีตัวของโลหะหลอมเหลวในช่วงการเทลงแบบ



รูป 2.1.2 ลักษณะเกรนของทองเหลืองที่เติมเซอร์โคเนียม⁽⁷⁾

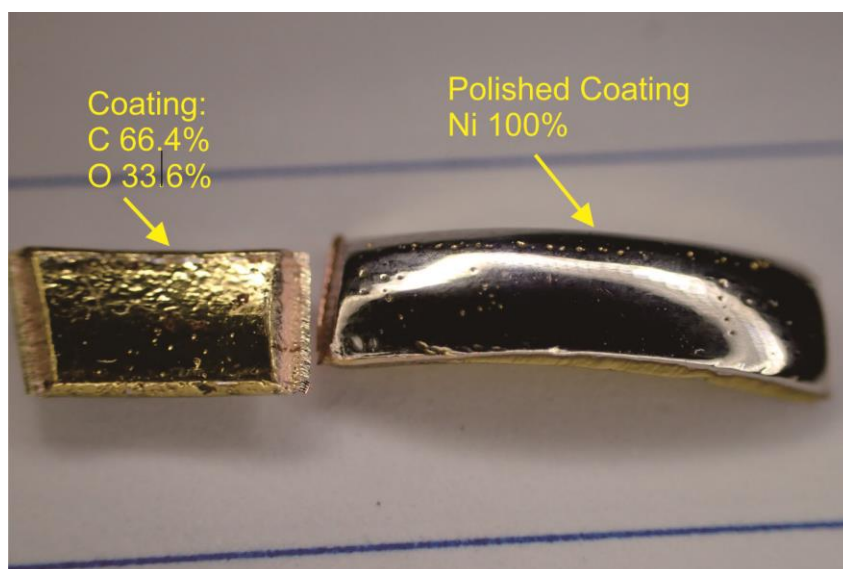


รูป 2.1.3 ลักษณะเกรนของทองเหลืองที่เติมโบรอนและเหล็ก

จากการตรวจสอบอัลลอยการค้าในท้องตลาดเพื่อการผลิตเครื่องประดับ พบว่ามีการให้อัลลอยกลุ่มทองแดงผสมหลักๆ 3 กลุ่มตามสีและความแข็งแรง ได้แก่

- กลุ่มทองแดงผสมสีแดง/ชมพู ได้แก่ ทองแดงบริสุทธิ์ บรอนซ์ฟอสฟอรัส บรอนซ์ดีบุก(ดีบุก 3-12%)
- กลุ่มทองแดงผสมสีเหลือง ได้แก่ ทองเหลืองเส้น(Cartridge brass) ทองเหลืองซิลิคอน(ซิลิคอน 2-4%) ทองเหลืองแมงกานีส ทองเหลืองผสมนิกเกิล บรอนซ์ซิลิคอน
- กลุ่มทองเหลืองสปริง ได้แก่ บรอนซ์แมงกานีส บรอนซ์ดีบุก(สูง) บรอนซ์เบอร์ลิเลียม

ส่วนการเติมธาตุปรับลดขนาดเกรนและ ธาตุลดก๊าซนั้นพบการเติมเฉพาะในอัลลอยการค้าบางกลุ่มเท่านั้น คณะผู้วิจัยได้ตรวจสอบสินค้าเครื่องประดับเทียมที่พบในท้องตลาด (ดังรูป 2.1.4) พบว่าเป็นกลุ่มดีบุกเคลือบนิกเกิลและชุบสารอินทรีย์สีทองทดแทนการชุบทองซึ่งมีคุณภาพต่ำ ไม่สวยงาม มีอายุการใช้งานสั้นเหมาะสำหรับเป็นสินค้าตลาดล่างหากพิจารณาการพัฒนาการผลิตในตลาดในระดับกลางถึงบนยังเป็นการใช้ทองเหลืองและทองแดงผสมที่มีคุณภาพสูงกว่าแม้ยังคงพบการหมองคล้ำตามธรรมชาติบ้างแต่ยังสามารถชุบโรเดียม เงิน หรือทองคำได้สวยงามใกล้เคียงกับเครื่องประดับแท้ อีกทั้งเครื่องประดับที่ผลิตยังมีน้ำหนักใกล้เคียงกับเครื่องประดับกลุ่มเงินและสามารถใช้เครื่องมือเพื่อการผลิตร่วมกับเทคนิคการผลิตคล้ายคลึงกันมาก จึงเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับผู้ผลิตเครื่องประดับเพื่อเพิ่มทางเลือกให้แก่ผู้บริโภค



รูป 2.1.4 ตัวชิ้นงานแหวนที่ผลิตจากเครื่องประดับเทียม ชุบนิกเกิลรองพื้นและ ชุบสารอินทรีย์ทดแทนสีทอง

ในการเตรียมธาตุผสมปรับลดขนาดเกรน ธาตุลดการกักเก็บก๊าซ ธาตุเพิ่มความสามารถการหล่อหลอม ทางคณะผู้วิจัยได้เตรียมกลุ่มอัลลอยผสม ได้แก่

- ทองแดงผสมเหล็ก 2 % (ธาตุปรับลดขนาดเกรน)
- สารประกอบ Cu₂Te (Oxidizer/ธาตุปรับลดขนาดเกรน)
- ทองแดงผสมโครเมียม 10% (ดังรูป 2.1.5)
- ทองแดงผสมซิลิคอน
- ผงโครเมียม 99.6%
- สารประกอบโบรอน
- สารประกอบเซอร์โคเนียม
- ดิบุก

เพื่อเป็นทางเลือกในการผลิตอัลลอยที่ต้องการความสามารถการหล่อและ ความต้านทานการหมองที่ดี สำหรับการทดแทนการใช้งานอัลลอยการค้าจากต่างประเทศอีกทั้งสามารถผลิตใช้งานเองในสถานประกอบการได้เพื่อต่อยอดการพัฒนาที่พึ่งพาตนเองในอนาคตต่อไป

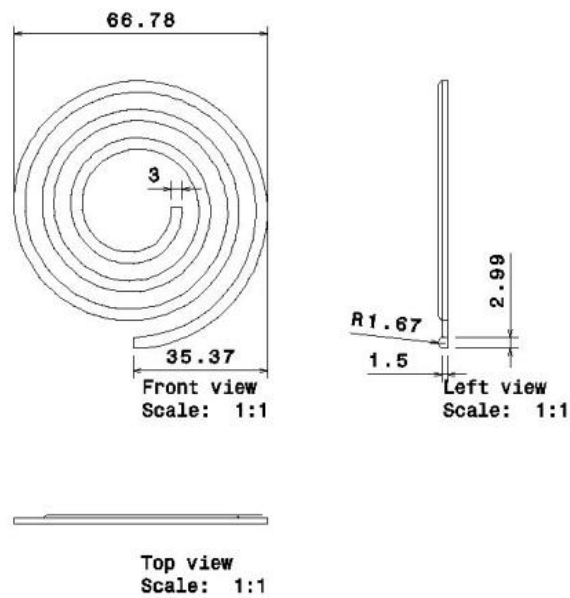
คณะผู้วิจัยได้เพิ่มเติมการศึกษาความสามารถการไหลของน้ำโลหะซึ่งพิจารณาได้จากการทดสอบการไหลตัวของน้ำโลหะที่นิยมใช้กับโลหะผสมอะลูมิเนียมโดยได้ปรับเปลี่ยนขนาดเพื่อทดสอบกับโลหะผสมทองแดงและทองเหลืองในแบบปูนปลาสเตอร์ทนไฟซึ่งมีรูปแบบชิ้นงานดังตัวอย่างในรูป 2.1.6 ซึ่งพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการหล่อเต็มทุกส่วนผสมทั้งกลุ่มทองแดงผสมและทองเหลือง จำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนขนาดรูปแบบให้มีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นเล็กลง 50% และเพิ่มความยาวอีก 50 % ได้ชิ้นงานและแม่พิมพ์สำหรับอัดบล็อกอย่างดังรูป 2.1.7 โดยจะทำการทดสอบการหล่อกับทองแดงผสมต่อไป

Composition (weight%)											
Master alloy	Cr	Cu	Fe max.	Sn max.	Pb max.	Si max.	Al max.	P max.	Cr ₂ O ₃ max.	Others total	max.
CuCr10	9.0 - 11.0	balance	0.08	0.02	0.02	0.02	0.02	0.007	0.5	0.15	

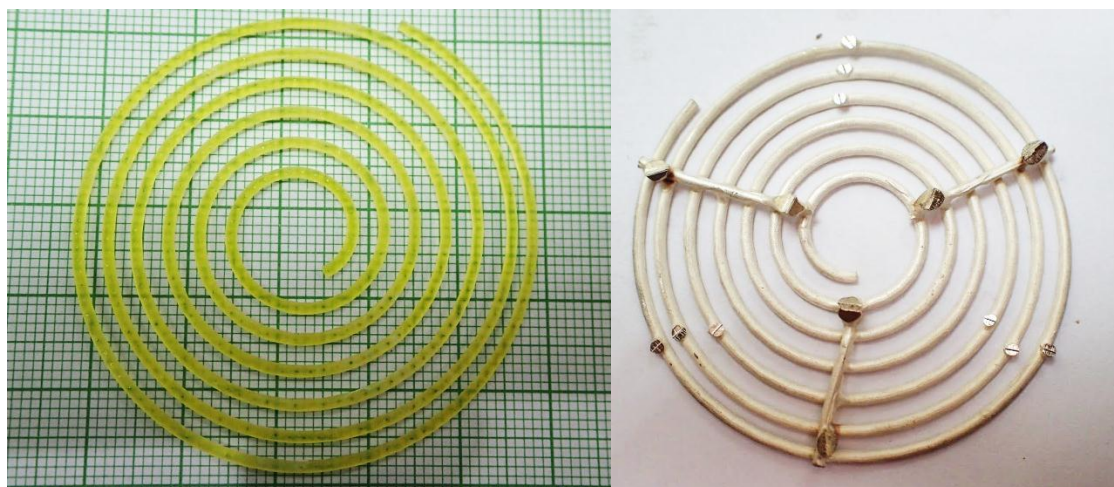
Other composition, form and packaging upon request. A Material Safety Data Sheet is available.



รูป 2.1.5 ส่วนผสมเคมีและภาพอัลลอย Cu10Cr



รูป 2.1.6 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบการไหลตัวน้ำโลหะและขนาดชิ้นงาน (มม.)



รูป 2.1.7 ตัวอย่างชิ้นงานแวกซ์และแม่แบบ(เงิน)ทดสอบการไหลตัวน้ำโลหะที่ผ่านการปรับปรุง

ในการทดลองหล่อชิ้นงานตามรูป 2.1.7 พบปัญหาการจัดวางชิ้นงานซึ่งเกิดจากการใช้เทียนที่ผ่านการฉีดยาและหล่อในแบบปูนปลาสเตอร์ เนื่องจากเกิดการขาดและหลุดของชิ้นงานทำให้ไม่สามารถหล่องานได้

สมบูรณ์ดังที่พบในรูป 2.1.8 อย่างไรก็ตามยังคงทำการหล่อขึ้นงาน ในรูป 2.1.6 และ 2.1.7 พร้อมกับขึ้นงานทดสอบการหดตัวที่มีขนาด $1.5 \times 1.5 \times 5$ มม ติดทางน้ำ 4 มม ดังรายละเอียดในรูป 2.1.8 โดยกำหนดส่วนผสมดังตาราง 2.1.4 ซึ่งในการหล่อใช้สภาวะไม่อัดแรงดัน และ ให้อุณหภูมิเท 1080 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเบ้า 550 องศาเซลเซียส จากรูป 2.1.8 จะพบว่าขึ้นงาน 4)Cu15Zn3Sn 6)Cu20.6Zn2.25Si 7)Cu15Zn0.2Si0.1Al2Sn0.1Be 8)Commercial Alloy สามารถหล่อได้เต็มแบบแต่พบว่าการหดตัวและผิวหยาบในขึ้นงาน 7)Cu15Zn0.2Si0.1Al2Sn0.1Be อย่างชัดเจน และ ขึ้นงาน 4)Cu15Zn3Sn 6)Cu20.6Zn2.25Si มีเปลือกสีดำที่ผิวแสดงถึงขึ้นงานมีความร้อนสูงมีแนวโน้มไม่ควรหล่อที่อุณหภูมิ 1080 องศาเซลเซียส หรือ เสี่ยงผิวเสียเมื่อใช้ความร้อนสูงได้ง่าย ซึ่งมีความเป็นไปได้จากการใช้ตีกุและสังกะสีสูง ส่วนกลุ่มที่มีซิลิคอนสูงหรือมีสังกะสีหรือดีบุกจะพบการไหลตัวเต็มแบบได้ง่าย ทำให้สามารถสรุปเบื้องต้นถึงธาตุที่มีความเหมาะสมสำหรับการปรับการไหลตัวของน้ำโลหะได้ดีด้วยการเติมซิลิคอน หรือ ซิลิคอนร่วมกับสังกะสี และดีบุก อย่างไรก็ตามยังจำเป็นต้องทดสอบสมบัติทางกลและการหดตัวของโลหะต่อไป ส่วนอัลลอยที่มีผิวสนิมบางได้แก่ 7)Cu15Zn0.2Si0.1Al2Sn0.1Be 8)Commercial Alloy และ 5)Cu3Si แต่สำหรับขึ้นงาน 5)Cu3Si มีการไหลตัวไม่เต็มชุดแสดงถึงอัลลอยดังกล่าวมีการไหลตัวต่ำ ซึ่งน่าจะเกิดจากมีปริมาณซิลิคอน 3 % โดยน้ำหนักซึ่งสามารถเพิ่มให้อยู่ในช่วง 4 % เพื่อเพิ่มความสามารถการไหลตัวได้ในการทดลองต่อไป

รูป 2.1.8 แสดงการเปรียบเทียบการไหลตัว พบว่า ขึ้นงาน 1)Cu3Sn 2)Cu5Sn 3)Cu7Sn แสดงการไหลตัวที่แตกต่างกันโดย ขึ้นงานที่ไหลตัวสูงได้แก่ 3)Cu7Sn ซึ่งหล่อเต็มชุด และสามารถเรียงความสามารถการไหลตัวจากมากไปน้อย 3)Cu7Sn 2)Cu5Sn 1)Cu3Sn ตามลำดับ ซึ่งมีความเป็นไปได้เนื่องจากการเติมดีบุกสูงทำให้ จุดหลอมเหลวต่ำลงตามแผนภูมิสมดุล ทำให้การไหลตัวของน้ำโลหะดีขึ้น อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องระวังการหดตัวเนื่องจากการเติมดีบุกมากเกินไป ซึ่งมีรายงานการหดตัวรุนแรงที่เรียกว่า Inverse segregation ที่พบว่าเกิดชัดเจนในทองแดงผสมดีบุก 10 %

ในรูป 2.1.8 พบว่า การเติมสังกะสี ดังการเปรียบเทียบ ขึ้นงาน 1)Cu3Sn กับ 4)Cu15Zn3Sn แสดงให้เห็นการเพิ่มสังกะสีที่ 15 % ช่วยเพิ่มการไหลตัวของน้ำโลหะได้ดี จากที่พบว่า ขดลวดหล่อเต็ม

เมื่อการพิจารณาซิลิคอน จากรูป 2.1.8 แสดงให้เห็นว่า การเติมซิลิคอน 3 % ในทองแดงเพิ่มการไหลตัวได้ไม่มากพอในขณะที่เพิ่ม ซิลิคอน 2.25% ร่วมกับ เติมสังกะสี 20.6% ในขึ้นงาน 6)Cu20.6Zn2.25Si ที่มีการไหลตัวทำให้ขดลวดเต็ม สำหรับขึ้นงาน 7)Cu15Zn0.2Si0.1Al2Sn0.1Be ที่ดูเหมือนจะมีความสามารถการไหลตัวดีแต่กลับเกิดการหดตัวสูงโดยพบว่า ขึ้นงานนี้ต้องเพิ่มอุณหภูมิเท จาก 1080 เป็น 1150 องศาเซลเซียส แต่ขึ้นงานนี้จะมีความสวยงามและ มีผิวสนิมจากการหล่อน้อย ซึ่งการมีผิวสนิมน้อยเป็นลักษณะที่เป็นที่ต้องการในงานหล่อทองแดงอัลลอยสำหรับเครื่องประดับเนื่องจากทำให้ทำงานได้ง่าย ใช้เวลานั้น

ชิ้นงาน 8) Commercial alloy ซึ่งมี Si 3.3% Zn 13.9% Mn 1.3% มีการไหลตัวดีและให้อุณหภูมิต่ำที่ 1000 องศาเซลเซียส แต่สามารถพบคราบสนิมจากการหล่อในปริมาณหนึ่งเนื่องจากแมงกานีส จากการทดลองการหล่อดังรูป 2.1.8 สามารถพิจารณาได้ถึงความสามารถการไหลตัวของน้ำโลหะปานกลาง แต่ยังไม่ชัดเจนทำให้มีการปรับรูปแบบขดลวดที่หล่อซึ่งคณะผู้วิจัยได้พัฒนาลักษณะขดลวดดังรูปแบบในรูป 2.1.9 เพื่อปรับตามสภาพเทียนที่ให้ในการหล่อและการไหลตัวของปูนปลาสเตอร์ โดยใช้สภาวะการหล่อที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเข้าปูน 550 องศาเซลเซียส ได้ผลดังรูป 2.1.10 และสามารถพิจารณาเปรียบเทียบผลการไหลตัวของน้ำโลหะได้ดังรูป 2.1.11

ตาราง 2.1.4 และ รูป 2.1.11 แสดงการไหลตัวของน้ำโลหะ (Fluidity) ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเข้า 550 องศาเซลเซียส โดยเมื่อพิจารณาการเติมดีบุกจาก 3-7 % ดังตัวอย่าง 1) Cu₃Sn 2) Cu₅Sn 3) Cu₇Sn พบว่า การเพิ่มปริมาณดีบุก ทำให้ค่า Fluidity เพิ่มขึ้นจาก 8.7 เป็น 9.2 และ 14 มม. ตามลำดับ การเพิ่มสังกะสีทำให้ค่า Fluidity เพิ่มขึ้นดังเช่นการพิจารณาชิ้นงาน 1) Cu₃Sn 9) Cu₁₂Zn₃Sn และ 4) Cu₁₅Zn₃Sn ที่ปริมาณสังกะสีที่ 12-15% ทำให้ค่า Fluidity เพิ่มขึ้นจาก 8.7 มม. (ชิ้นงาน 1) Cu₃Sn) เป็น 11.2 มม. (ชิ้นงาน 9) Cu₁₂Zn₃Sn) และ 13.3 มม. (ชิ้นงาน 4) Cu₁₅Zn₃Sn) ตามลำดับ สำหรับผลการเพิ่มซิลิคอนและดีบุกที่เท่ากันส่งผลต่อ Fluidity แตกต่างกัน โดยชิ้นงาน 5) Cu₃Si มี ค่า Fluidity ที่ 12.5 มม. ส่วน 1) Cu₃Sn มี ค่า Fluidity 8.7 มม. แสดงให้เห็นว่าซิลิคอนส่งเสริมการไหลตัวของน้ำโลหะได้ดีกว่าดีบุกที่การเติมในปริมาณเท่ากัน การเติมสังกะสี 20.6 % ในทองแดงผสมซิลิคอนดังชิ้นงาน 6) Cu_{20.6}Zn_{2.25}Si มีค่า Fluidity ที่ 15.8 มม. สูงกว่าชิ้นงาน 5) Cu₃Si (ค่า Fluidity 12.5 มม.) สำหรับการเติมซิลิคอนในชิ้นงาน 4) Cu₁₅Zn₃Sn ได้เป็นชิ้นงาน 10) Cu₁₅Zn₃Sn_{0.5}Si ทำให้ค่า Fluidity เพิ่มขึ้นจาก 13.3 เป็น 15.2 มม. สำหรับการเติมอะลูมิเนียมร่วมกับเบอริลเลียมที่ 0.1% ทำให้ค่า Fluidity ลดลง จาก 14.7 มม. (ชิ้นงาน 11) Cu₁₅Zn_{0.2}Si₂Sn₀) เป็น 10.2 มม. (ชิ้นงาน 7) Cu₁₅Zn_{0.2}Si₂Sn_{0.1}Al_{0.1}Be)



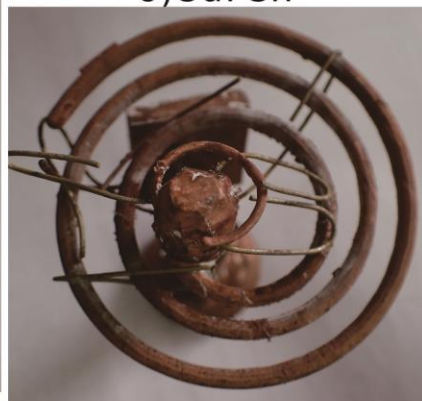
1)Cu₃Sn



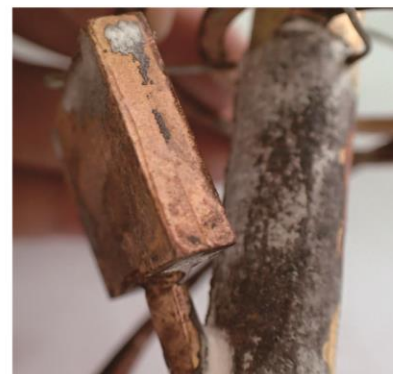
2)Cu₅Sn



3)Cu₇Sn



4)Cu₁₅Zn₃Sn



รูป 2.1.8 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบการไหลตัวทั้ง 2 ชนิดและชิ้นงานทดสอบการหดตัว



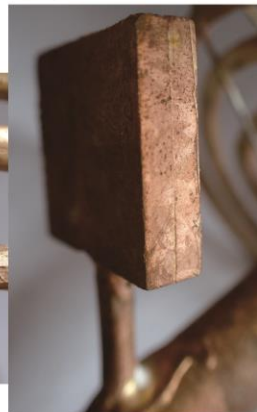
5)Cu₃Si



6)Cu_{20.6}Zn_{2.25}Si



7)Cu₁₅Zn_{0.2}Si_{0.1}Al₂Sn_{0.1}Be



8)commercial alloy



รูป 2.1.8 (ต่อ) ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบการไหลตัวทั้ง 2 ชนิดและชิ้นงานทดสอบการหดตัว



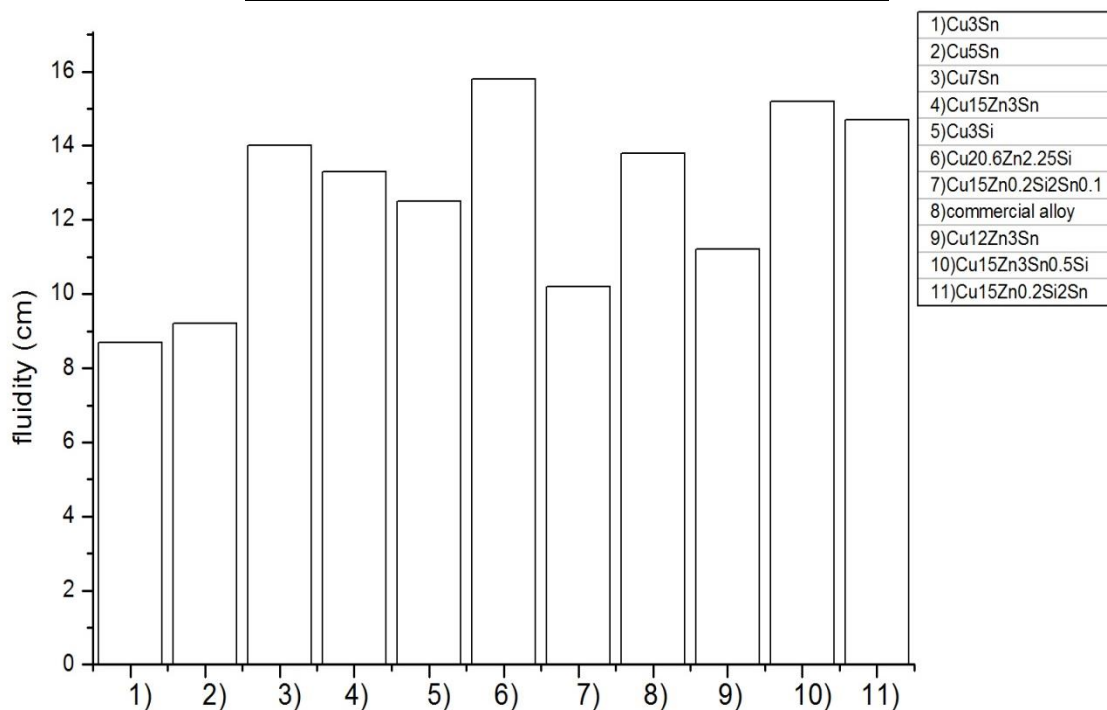
รูป 2.1.9 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. ยาว 50 ซม. สำหรับทดสอบการไหลตัวของน้ำโลหะ



รูป 2.1.10 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. ยาว 50 ซม. สำหรับทดสอบการไหลตัวของน้ำโลหะ
ผ่านการหล่อที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.1.4 การไหลตัวของโลหะทดลองที่ผ่านการหล่อ(ที่อุณหภูมิเท 1100 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเป่า 550 องศาเซลเซียส)

ชิ้นงาน	fluidity (cm)
1)Cu3Sn	8.7
2)Cu5Sn	9.2
3)Cu7Sn	14
4)Cu15Zn3Sn	13.3
5)Cu3Si	12.5
6)Cu20.6Zn2.25Si	15.8
7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Al0.1Be	10.2
8)commercial alloy	13.8
9)Cu12Zn3Sn	11.2
10)Cu15Zn3Sn0.5Si	15.2
11)Cu15Zn0.2Si2Sn	14.7



รูปที่ 2.1.11 ค่าการไหลตัวของน้ำโลหะ (fluidity) สำหรับอัลลอยทดลองผ่านการหล่อในระบบสุญญากาศ

2.2 การทดลองหล่อต้นงานทองแดงผสม

จากกลุ่มทองแดงผสมที่นำมาใช้งานในท้องตลาดคณะผู้วิจัยได้แบ่งประเภทการทดลองตามสีของกลุ่มทองแดงผสมดังนี้

1. กลุ่มสีเหลือง ได้แก่ ทองเหลืองซิลิคอน ซิลิคอนบรอนซ์ อะลูมิเนียมบรอนซ์และ จิวเวลรีบรอนซ์
จัด ใน ก ลุ่ ม ท ด ล อ ง 4)Cu15Zn3Sn 5)Cu3Si 6)Cu20.6zn2.25Si
7)Cu15Zn0.2Si0.1Al2Sn0.1Be 9)Cu12Zn3Sn 10)Cu15Zn3Sn0.5Si 11)Cu15Zn0.2Si2Sn
2. กลุ่มสีชมพู ได้แก่ บรอนซ์ดีบุก จัดในกลุ่มทดลอง 1)Cu3Sn 2)Cu5Sn 3)Cu7Sn
3. กลุ่มอ้างอิงอัลลอยการค้าจากต่างประเทศ ซึ่งจากเอกสารแสดงลักษณะของอัลลอยเป็น
ทองเหลืองผสมกลุ่มบรอนซ์แมงกานีสที่มีซิลิคอนสูง (ดังรายละเอียดในเอกสารอ้างอิง) ในกลุ่ม
ทดลอง 8)Commercial alloy

โดยได้กำหนดส่วนผสมของทองแดงผสมตามตารางที่ 2.2.1 และ 2.2.2 โดยใช้สภาวะการหล่อดัง
ตารางที่ 2.2.3

ตาราง 2.2.1 แสดงส่วนผสมเคมี(ก่อนหล่อ)ของทองแดงผสมสำหรับหล่อ

ชิ้นงาน	Zn (wt%)	Sn (wt%)	Si (wt%)	Al (wt%)	Be (wt%)	Mn (wt%)	Cu (wt%)
1)Cu3Sn	-	3	-	-	-	-	Bal
2)Cu5Sn	-	5	-	-	-	-	Bal
3)Cu7Sn	-	7	-	-	-	-	Bal
4)Cu15Zn3Sn	15	3	-	-	-	-	Bal
5)Cu3Si	-	-	3	-	-	-	Bal
6)Cu20.6zn2.25Si	20.6	-	2.25	-	-	-	Bal
7)Cu15Zn0.2Si0.1Al2Sn0.1Be	15	2	0.2	0.1	0.1	-	Bal
8)Commercial alloy	12	-	3.3-4	-	-	0.9-1.3	Bal
9)Cu12Zn3Sn	12	3	-	-	-	-	Bal
10)Cu15Zn3Sn0.5Si	15	3	0.5	-	-	-	Bal
11)Cu15Zn0.2Si2Sn	15	2	0.2	-	-	-	Bal

ตาราง 2.2.2 แสดงส่วนผสมเคมี(ก่อนหล่อ)ของทองแดงผสมสำหรับหล่อร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน

ชื่อชิ้นงาน	CuFe (wt %)	CuB (wt%)	CuZr (wt%)	CuCr (wt%)	ชื่อชิ้นงาน	CuFe (wt%)	CuB (wt%)	CuZr (wt%)	CuCr (wt%)
1/1) Cu3Sn-FeB	0.4	0.8	-		6/1)Cu20.6Zn2.25Si-FeB	0.4	0.8	-	
1/2) Cu3Sn-FeZr	0.4		0.4		6/2)Cu20.6Zn2.25Si-FeZr	0.4		0.4	
1/3)Cu3Sn-Zr			0.4		6/3)Cu20.6Zn 2.25Si-Zr			0.4	
1/4) Cu3Sn-Fe-B	1	1			6/4)Cu20.6Zn2.25Si-FeB	1	1		
1/5)Cu3Sn-Zr			1		6/5)Cu20.6Zn2.25Si-Zr			1	
1/8)Cu3Sn-B		1			6/6) Cu20.6Zn2.25 Si-0.5Cr				0.5
2/1)Cu5Sn-FeB	0.4	0.8	-		6/7)Cu20.6Zn2.25Si-Fe	1			
2/2)Cu5Sn-FeZr	0.4		0.4		6/8)Cu20.6Zn2.25Si-B		1		
2/3)Cu5Sn-Zr			0.4		7/4)Cu15Zn0.2Si0.1Al2Sn0 .1Be-FeB	1	1		
2/4)Cu5Sn-FeB	1	1			7/5)Cu15Zn0.2Si0.1Al2Sn0 .1Be-Zr			1	
2/5)Cu5Sn-Zr			1		7/6)Cu15Zn0.2Si0.1Al2Sn0 .1BeCr				0.5
2/6)Cu5Sn-Cr				0.5	7/7)Cu15Zn0.2Si0.1Al2Sn0 .1Be-Fe	1			
2/7)Cu5Sn-Fe	1				7/8)Cu15Zn 0.2Si 0.1Al 2Sn0.1Be-B		1		
2/9)Cu5Sn-FeZr	1		1		8/4(commercial alloy)- FeB	1	1		
3/1)Cu7Sn-FeB	0.4	0.8			8/5(commercial alloy)-Zr			1	
3/2)Cu7Sn-FeZr	0.4		0.4		8-6(commercial alloy)-Cr				0.5
3/3)Cu7Sn-Zr			0.4		8/7(commercial alloy)-Fe	1			
4/1)Cu15Zn3Sn- FeB	0.4	0.8			8/8(commercial alloy)-B		1		
4/2) Cu15Zn3 Sn- FeZr	0.4		0.4		9/4)Cu12Zn3Sn-FeB	1	1		
4/3) Cu15Zn 3Sn- Zr			0.4		9/5)Cu12Zn3Sn-Zr			1	
4/4) Cu15Zn 3Sn- FeB	1	1			9/6)Cu12Zn3Sn-Cr				0.5
4/5) Cu15Zn 3Sn- Zr			1		9/7)Cu12Zn3Sn-Fe	1			
4/6) Cu15Zn 3Sn- Cr				0.5	9/8)Cu12Zn3Sn-B		1		
4/7) Cu15Zn 3Sn-	1				10/4)Cu12Zn3Sn0.5Si-FeB	1	1		

Fe									
4/9) Cu ₁₅ Zn ₃ Sn-FeZr	1		1		10/5)Cu ₁₂ Zn ₃ Sn _{0.5} Si-Zr			1	
5/1)Cu ₃ Si-FeB	0.4	0.8			10/6)Cu ₁₂ Zn ₃ Sn _{0.5} Si-Cr				0.5
5/2)Cu ₃ Si-Fe ₁ Zr	0.4		0.4		10/7)Cu ₁₂ Zn ₃ Sn _{0.5} Si-Fe	1			
5/3)Cu ₃ Si ₁ -Zr			0.4		10/8)Cu ₁₂ Zn ₃ Sn _{0.5} Si-B		1		
5/4) Cu ₃ Si-FeB	1	1			11/4)Cu ₁₅ Zn _{0.2} Si ₂ Sn-FeB	1	1		
5/6) Cu ₃ Si-Cr				0.5	11/5)Cu ₁₅ Zn _{0.2} Si ₂ Sn-Zr			1	
5/7) Cu ₃ Si-Fe	1				11/6)Cu ₁₅ Zn _{0.2} Si ₂ Sn-Cr				0.5
5/8) Cu ₃ Si-B		1			11/7)Cu ₁₅ Zn _{0.2} Si ₂ Sn-Fe	1			
					11/8)Cu ₁₅ Zn _{0.2} Si ₂ Sn-B		2		

ตาราง 2.2.3 แสดงสภาวะการหล่อ อุณหภูมิเริ่มหลอมเหลว liquidus และอุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว Solidus ของชิ้นงานทดลอง

ชิ้นงาน	อุณหภูมิเท (°C)	อุณหภูมิเป้า (°C)	อุณหภูมิเริ่มหลอมเหลว liquidus (°C)	อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว Solidus (°C)
1)Cu ₃ Sn	1080	550	1070.5**	829.9**
2)Cu ₅ Sn	1080	550	1061.5**	829.9**
3)Cu ₇ Sn	1080	550	1043.5**	829.9**
4)Cu ₁₅ Zn ₃ Sn	1080	550	1004.8**	825.2**
5)Cu ₃ Si	1080	550	1041.6**	829.8**
6)Cu _{20.6} Zn _{2.25} Si	1080	550	1027.2**	828.3**
7)Cu ₁₅ Zn _{0.2} Si _{0.1} Al ₂ Sn _{0.1} Be	1150	550	1027.8	802.9
8)Commercial alloy	1000	550	913.8*	831*
9)Cu ₁₂ Zn ₃ Sn	1080	550	1009.4	794.2
10)Cu ₁₅ Zn ₃ Sn _{0.5} Si	1050	550	1017.9	801.2
11)Cu ₁₅ Zn ₂ Sn _{0.2} Si	1130	550	1017.3	829.9

**ตรวจสอบโดยเทคนิค DSC จากสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ

*ตรวจสอบโดยเทคนิค TG จากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 2.2.3 แสดงให้เห็นแนวโน้มการไหลตัวของสอดคล้องกับการทดสอบการไหลตัวเบื้องต้นในรูป 2.2.1 โดยการเติมสังกะสี ดีบุก ซิลิคอน ทำให้การไหลตัวของน้ำโลหะเพิ่มขึ้น จุดหลอมเหลวลดลง การเติม

อะลูมิเนียมและ เบอริลเลียม ทำให้จุดหลอมเหลวเพิ่มขึ้น ดังผลการหล่อชิ้นงาน 7) $\text{Cu}_{15}\text{Zn}_{0.2}\text{Si}_{0.1}\text{Al}_{2}\text{Sn}_{0.1}\text{Be}$ รวมถึงเกิดการหดตัวมากขึ้นดังรูป 2.1.8

ในการเปรียบเทียบอุณหภูมิสำหรับการหล่อหลอมพบว่า ชิ้นงาน 11) $\text{Cu}_{15}\text{Zn}_{2}\text{Sn}_{0.2}\text{Si}$ และ 7) $\text{Cu}_{15}\text{Zn}_{0.2}\text{Si}_{0.1}\text{Al}_{0.1}\text{Be}$ มีแนวโน้มจุดหลอมเหลวสูงในช่วง 1130-1150 องศาเซลเซียส เสี่ยงต่อการเกิดผิวสนิมและผิวผุจากความร้อนรวมถึงผิวหยาบ สำหรับชิ้นงาน 8) commercial alloy ที่ใช้อุณหภูมิเท 1000 องศาเซลเซียส ทำให้หล่องานได้ง่าย หากพิจารณาธาตุผสมพบว่าการมี ซิลิคอน 3.3-4 % แมงกานีส 0.9-1.3% สังกะสี 11-13 % เป็นตัวปรับลดจุดหลอมเหลวโดยแมงกานีสยังส่งเสริมความแข็งแรง สอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคที่พบการแยกตัวในลักษณะกิ่งไม้ทำให้ความแข็งแรงสูง การเติมซิลิคอนเพียง 0.5 % ในชิ้นงาน 4) $\text{Cu}_{15}\text{Zn}_{3}\text{Sn}$ ทำให้อุณหภูมิเทลดลงจาก 1080 องศาเซลเซียส เป็น 1050 องศาเซลเซียส รวมถึงพบว่า ผิวหล่อและล้างปูนสะอาดไม่มีคราบออกไซด์เกาะติด เหมาะสำหรับการผลิตทองแดงผสมในโรงงานหล่อเครื่องประดับ รวมถึงสามารถผสมได้ง่ายในรูปสารประกอบทองแดงและซิลิคอนลงในเครื่องหล่อได้โดยไม่ต้องหยุดเม็ด



1)Cu₃Sn



2)Cu₅Sn



3)Cu₇Sn



4)Cu₁₅Zn₃Sn



5)Cu₃Si



6)Cu_{20.6}Zn
2.25Si



7)Cu₁₅Zn_{0.2}Si
0.1Al₂Sn_{0.1}Be



8)Commercial
alloy)



9)Cu₁₂Zn₃Sn



10)Cu₁₅Zn₃Sn_{0.5}Si



11)Cu₁₅Zn₂Sn₂Si

รูป 2.2.1 ต้นทองแดงผสมทอลงที่ผ่านการหล่อด้วยเตากระแสเหนี่ยวนำในระบบสุญญากาศ
ร้อนเต็ม/ยิงทราย



รูป 2.2.2 ต้นทองแดงผสมทดลองร่วมกับธาตุลดขนาดเกรนที่ผ่านการหล่อด้วยเตากระแสเหนี่ยวนำ
ในระบบสุญญากาศ ร่อนเข็ม/ยิงทราย



รูป 2.2.2 (ต่อ) ต้นทองแดงผสมทดลองร่วมกับธาตุลดขนาดเกรนที่ผ่านการหล่อด้วยเตากระแสเหนี่ยวนำ
ในระบบสุญญากาศ ร่อนเข็ม/ยิงทราย



รูป 2.2.2 (ต่อ) ต้นทองแดงผสมทดลองร่วมกับธาตุลดขนาดเกรนที่ผ่านการหล่อด้วยเตากระแสเหนี่ยวนำ
ในระบบสุญญากาศ ร่อนเข็ม/ยิงทราย

จากผลการตรวจสอบด้วย Spark Emission Spectroscopy จากตาราง 2.2.4 และ 2.2.5 แสดงให้เห็นแนวโน้มของธาตุแต่ละชนิดที่ได้เติมลงไปพบว่ามีความเข้มข้นได้แก่ ดีบุก สังกะสี ซึ่งเป็นธาตุหลักที่ใช้ ส่วนซิลิคอนนั้นมีปริมาณลดลงเหลือ ส่วนธาตุที่เติมในปริมาณน้อย เช่น เหล็ก เซอร์โคเนียม โบรอน มีค่าน้อยมากทำให้บางครั้งไม่สามารถตรวจสอบได้เนื่องจากมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่สามารถตรวจสอบได้รวมถึงธาตุบางกลุ่มเช่น เบอริลเลียม และ โบรอน ที่มีสัญญาณได้ง่ายทำให้ไม่สามารถตรวจพบเนื่องจากในปริมาณน้อย

จากตาราง 2.2.5 ธาตุลดขนาดเกรนที่ยังยืนยันการมีอยู่ในทองแดงผสมได้แก่ เหล็ก โครเมียม เซอร์โคเนียม ส่วนโบรอนไม่สามารถตรวจพบจากเทคนิค Spark Emission Spectroscopy อย่างไรก็ตามคณะผู้วิจัยยังคงอภิปรายผลตามธาตุลดขนาดเกรนที่เติมในทองแดงผสมเนื่องจากยังคงมีความจำเป็นในการพิจารณาเพื่อการผลิตในลักษณะเดียวกับเงินสเตอร์ลิงที่ผสมธาตุดังกล่าวและนิยมใช้งานกันในปัจจุบัน

จากการพิจารณาผลการปรับลดขนาดเกรนของทองแดงผสมในงานวิจัยนี้ที่มีจำนวนมาก ทำให้คณะผู้วิจัยจำเป็นต้องเลือกส่วนผสมที่ให้ผลปรับลดขนาดเกรนชัดเจนเพื่อศึกษาต่อไป โดยได้เลือกตัวอย่างดังตาราง 2.2.4 และ 2.2.5 โดยได้นำไปศึกษาการหดตัวโดยการหล่อที่สภาวะดังตาราง 2.2.6 โดยจัดทำตัวอย่างขนาด 15*15*5 มม. ติดต้นดังรูป 2.2.3 และตรวจสอบผลค่าอัตราการหดตัวของน้ำโลหะเปรียบเทียบกับปริมาตรของเทียนได้ผลดังตาราง 2.2.6 โดยธาตุลดขนาดเกรนกลุ่มโครเมียมและโบรอน มักลดอัตราการหดตัวของน้ำโลหะได้ดี ยกเว้นในกรณี ทองแดงผสมดีบุกที่พบว่าอัตราการหดตัวเพิ่มขึ้น โดยอัตราการหดตัวที่ลดลงมากที่สุดพบใน 4)Cu15Zn3Sn ที่เติมสารประกอบทองแดงโครเมียมที่ 0.5% ในชิ้นงาน 4/6)Cu15Zn3Sn-0.5CuCr ที่ลดลงจาก 5.1 เป็น 1.5% หรือ ลดลง 70.5%ของโลหะที่ยังไม่เติมธาตุลดขนาดเกรน โดยในกลุ่มทองแดงผสมสังกะสีผสมดีบุกสามารถใช้โครเมียมเป็นธาตุลดขนาดเกรนได้ดี ดังในชิ้นงาน 4)Cu15Zn3Sn 9)Cu12Zn3Sn 10)Cu15Zn2Sn0.5Si ส่วนกลุ่มชิ้นงาน 7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Al0.1Be 11)Cu15Zn0.2Si2Sn ควรใช้โบรอนเป็นธาตุลดขนาดเกรน อย่างไรก็ตามยังจำเป็นต้องพิจารณาการใช้งาน ราคาและ ต้นทุนการผลิตควบคู่ไปด้วย

ตาราง 2.2.4 ส่วนผสมเคมีหลังการหล่อด้วย Spark Emission Spectroscopy สำหรับทองแดงผสมทดลอง

ชิ้นงาน cu alloy	Sn(wt%)		Zn(wt%)		Si(wt%)		P(wt%)	Cr(wt%)	Al(wt%)	Mn(wt%)	
	ก่อนหลอม	หลังหลอม	ก่อนหลอม	หลังหลอม	ก่อนหลอม	หลังหลอม	หลังหลอม	หลังหลอม	หลังหลอม	ก่อนหลอม	หลังหลอม
1) Cu3Sn	3	3.38	-	0.211		<0.002					
2) Cu5Sn	5	5.306	-	0.19		<0.002					
3) Cu7Sn	7	7.45	-	0.181		<0.002					
4) Cu15Zn3Sn	3	3.2	12	13.78		<0.002					
5) Cu3Si	-	0.0042	-	0.137	3	2.767					
6) Cu20.6Zn2.25Si	-	0.0028	20.6	25.25	2.25	2.243					
7 Cu15Zn0.2Si0.1Al2Sn0.1Be	3	2.244	15	11.87	0.2	0.066	<0.001		0.045		
8 (commercial alloy)	-	0.0036	11.9-13.9	13.06	2.9-3.3	3.934	0.0052	0.0033	<0.002	0.8-1.3	0.983
9) Cu12Zn3Sn	3	3.224	12	10.02							
10) Cu15Zn3Sn0.5Si	3	3.38	15	11.15	0.5	0.41					
11) Cu15Zn2Sn0.2Si	2	2.19	15	11.36	0.2	0.147					

ตาราง 2.2.5 ส่วนผสมเคมีหลังการหล่อด้วย Spark Emission Spectroscopy สำหรับทองแดงผสมร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน

ชิ้นงาน cu alloy	Sn(wt%)	Zn(wt%)	Si(wt%)	Mn(wt%)	Zr(ppm)	Fe(ppm)	Cr(ppm)
	หลังหลอม	หลังหลอม	หลังหลอม	หลังหลอม	หลังหลอม	หลังหลอม	หลังหลอม
2/6)Cu5Sn-0.5CuCr	5.41	-					1620
4/5)Cu15Zn3Sn-1CuZr	3.24	10.35				31	55
4/6)Cu15Zn3Sn0.5CuCr	1.68	12.35				140	<10
4/9)Cu15Zn3Sn-1CuFe1CuZr	3.18	9.845			<20	250	55
8/6 (commercial alloy)-0.5CuCr	0.011	9.29	3.65	1.46		260	120
9/6)Cu12Zn3Sn-0.5CuCr	3.22	10.01	0.39			240	210
10/6)Cu15Zn3Sn0.5Si-0.5CuCr	0.3	9.43	0.036	0.0028	180	27	770
11/6)Cu15Zn2Sn0.2Si-0.5CuCr	2.19	11.64	0.143			37	<10

*ตรวจสอบโดยเทคนิค Spark Emission Spectroscopy จากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 2.2.6 ค่าอัตราการหดตัวของน้ำโลหะเปรียบเทียบกับปริมาตรของเทียน

ชิ้นงาน	อัตราการหดตัว	ชิ้นงานผสมธาตุปรับลดขนาดเกรน	อัตราการหดตัว
2)Cu5Sn	3.9	2/6)Cu5Sn-Cr	5.7
4)Cu15Zn3Sn	5.1	4/6)Cu15Zn3Sn-Cr	1.5
7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Al0.1Be	3.6	7/8)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Al0.1Be-B	3.2
8)commercial alloy	4.7	8/6)Commercial alloy-Cr	4
9)Cu12Zn3Sn	4	9/6)Cu12Zn3Sn-Cr	2.36
10)Cu15Zn2Sn0.5Si	4.8	10/6)Cu15Zn0.5Si3Sn-Cr	3.8
11)Cu15Zn0.2Si2Sn	5.3	11/8)Cu15Zn0.2Si2Sn-B	4.5



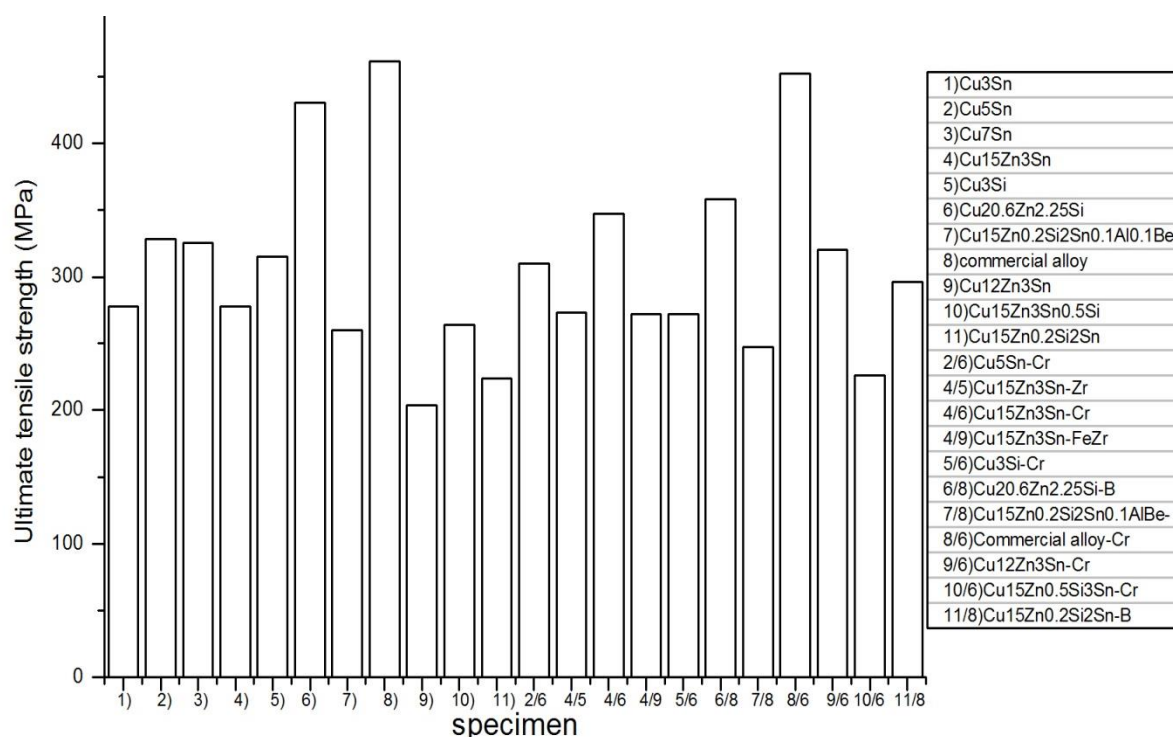
รูป 2.2.3 ตัวอย่างต้นงานทดสอบการหดตัวของทองแดงผสมสำหรับการทดลอง

2.3 ผลการศึกษาสมบัติทางกล

การศึกษาสมบัติทางกลสำหรับชิ้นงานหล่อที่ผลิตได้นั้น ทางคณะผู้วิจัยได้ศึกษาด้วยการทดสอบแรงดึงเป็นหลักเพื่อแสดงให้เห็นถึงเปลี่ยนแปลงของการเติมธาตุต่อค่าสมบัติทางกลของวัสดุทดลอง โดยผลิตชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM E8-96 โดยทดสอบในสภาวะ strain rate ที่ $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ด้วยแรงดึงสูงสุดที่ 10 KN ณ อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีผลสมบัติทางกลดังรูป 2.3.1 2.3.3 และ 2.3.4

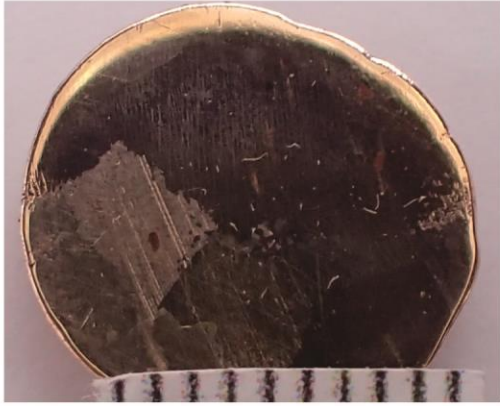
จากรูป 2.3.1 การเพิ่มปริมาณดีบุกทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดที่ชิ้นงาน 2)Cu5Sn และ ลดลงซึ่งเกิดจากการแยกตัวของเฟสที่มีดีบุกสูง ดังพบในผลของชิ้นงาน 1)Cu3Sn 2)Cu5Sn และ 3)Cu7Sn สอดคล้องกับการเกิด inverse-segregation ที่พบทั่วไปในการหล่อบรอนซ์ดีบุกที่ปริมาณดีบุก 9-10 %โดยน้ำหนัก ที่มีความเป็นไปได้ว่าค่าความต้านทานแรงดึงลดลงเนื่องจากรูช่องว่างจากการหดตัวอย่างรุนแรง ณ ส่วนผสมดังกล่าว

เนื่องจากการวิจัยนี้ชิ้นงานทดสอบการเติมธาตุลดขนาดเกรนจำนวนมากจึงจำเป็นต้องพิจารณากลุ่มที่มีประสิทธิภาพโดยไม่เกิดการเป็นพิษ ด้วยการสร้างประกอบที่ผิวทำให้ผิวขรุขระ เกิดเม็ดแข็ง โดยเลือกลักษณะการลดขนาดเกรนผลลัพธ์ในรูป 2.3.2

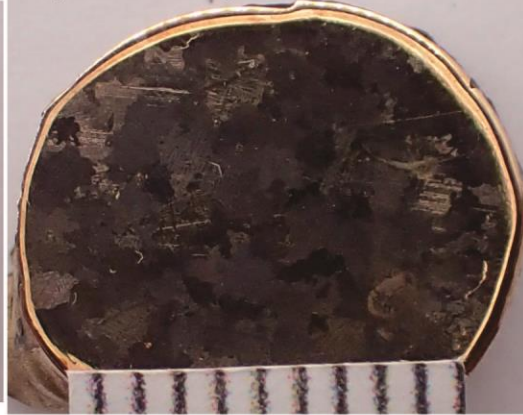


รูป 2.3.1 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานทดสอบทองแดงผสมและกลุ่มทดลองร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน

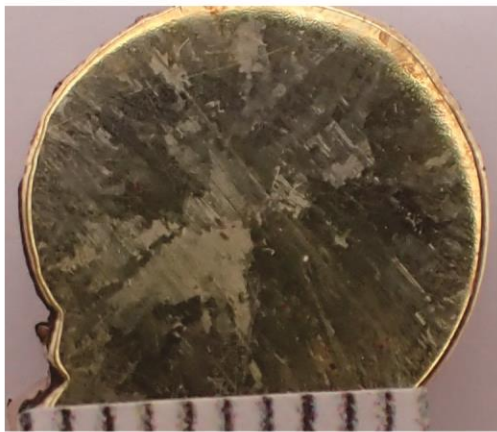
2)Cu5Sn grain size 3 mm



2/6)Cu5Sn-Cr grain size 0.9 mm



4)Cu15Zn3Sn grain size 1.6 mm



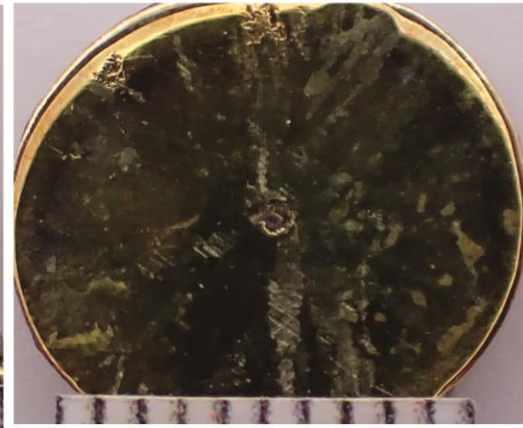
4/6)Cu15Zn3Sn-Cr grain size 1.6 mm



4/5)Cu15Zn3Sn-Zr grain size 1.2 mm

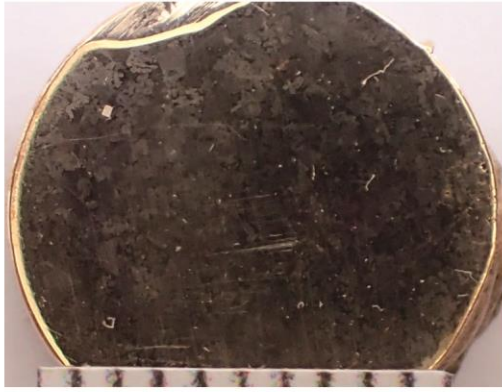


4/9)Cu15Zn3Sn-FeZr grain size 0.6 mm

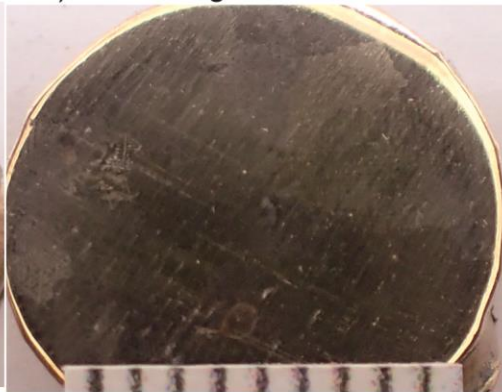


รูป 2.3.2 การเปรียบเทียบขนาดเกรนของชิ้นงานทองแดงผสมร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน

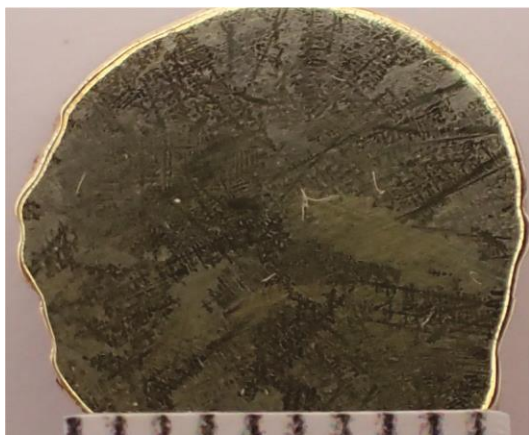
5)Cu₃Si grain size 1 mm



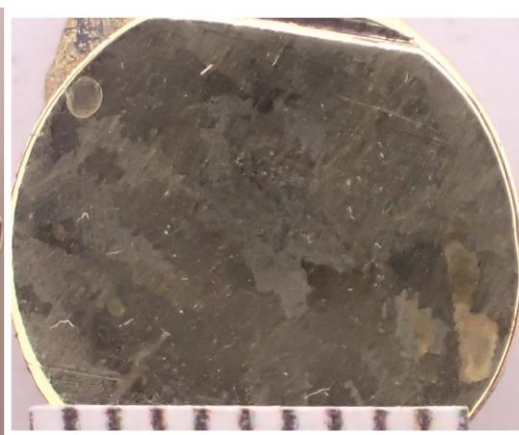
5/6)Cu₃Si-Cr grain size 1.7 mm



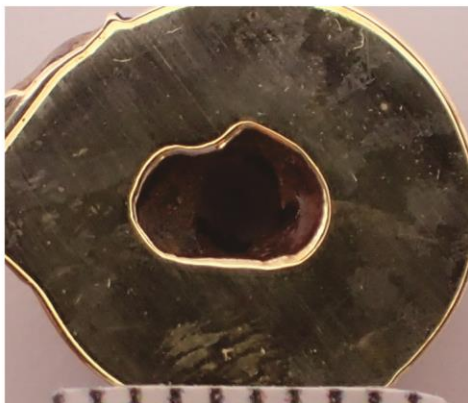
6)Cu_{20.6}Zn_{2.25}Si grain size 2.4 mm



6/8)Cu_{20.6}Zn_{2.25}Si-B
grain size 2.3 mm



7)Cu₁₅Zn_{0.2}Si₂Sn_{0.1}Al_{0.1}Be
grain size 1.9 mm

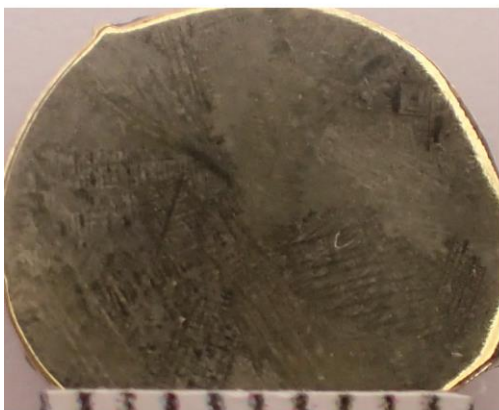


7/8)Cu₁₅Zn_{0.2}Si₂Sn_{0.1}Al_{0.1}Be-B
grain size 0.8mm

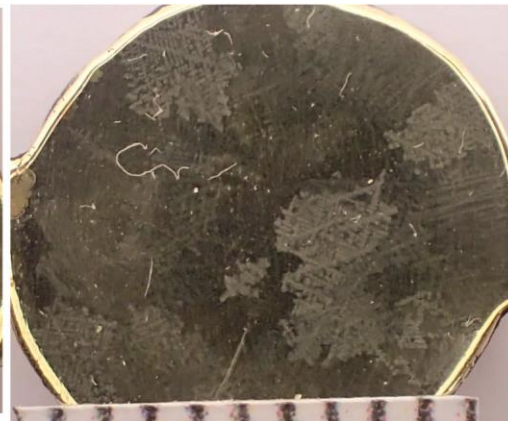


รูป 2.3.2 (ต่อ) การเปรียบเทียบขนาดเกรนของชิ้นงานทองแดงผสมร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน

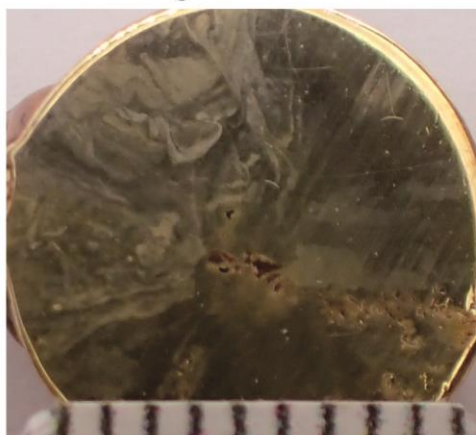
8) commercial alloy
grain size 3.1 mm



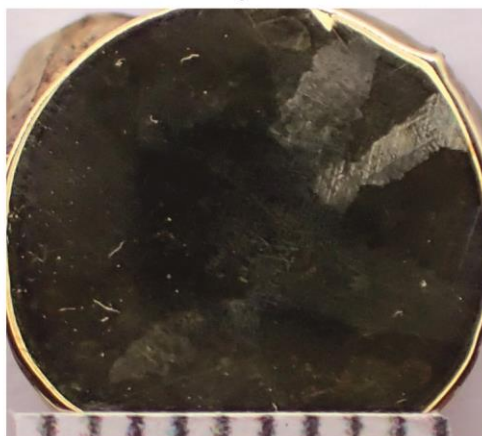
8/6) Commercial alloy-Cr
grain size 2.3 mm



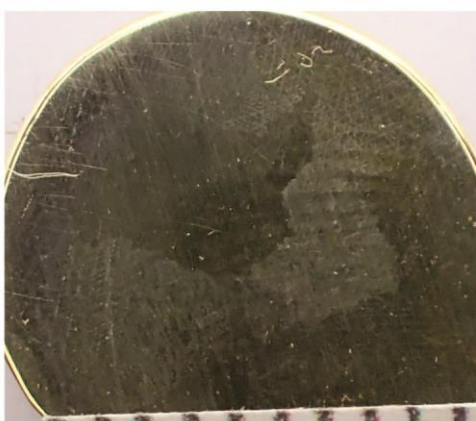
9) Cu₁₂Zn₃Sn
grain size 2.95 mm



9/6) Cu₁₂Zn₃Sn-Cr
grain size 3.1 mm



10) Cu₁₅Zn₃Sn_{0.5}Si
grain size 3.3 mm



10/6) Cu₁₅Zn_{0.5}Si₃Sn-Cr
grain size 0.9 mm



รูป 2.3.2 (ต่อ) การเปรียบเทียบขนาดเกรนของชิ้นงานทองแดงผสมร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน

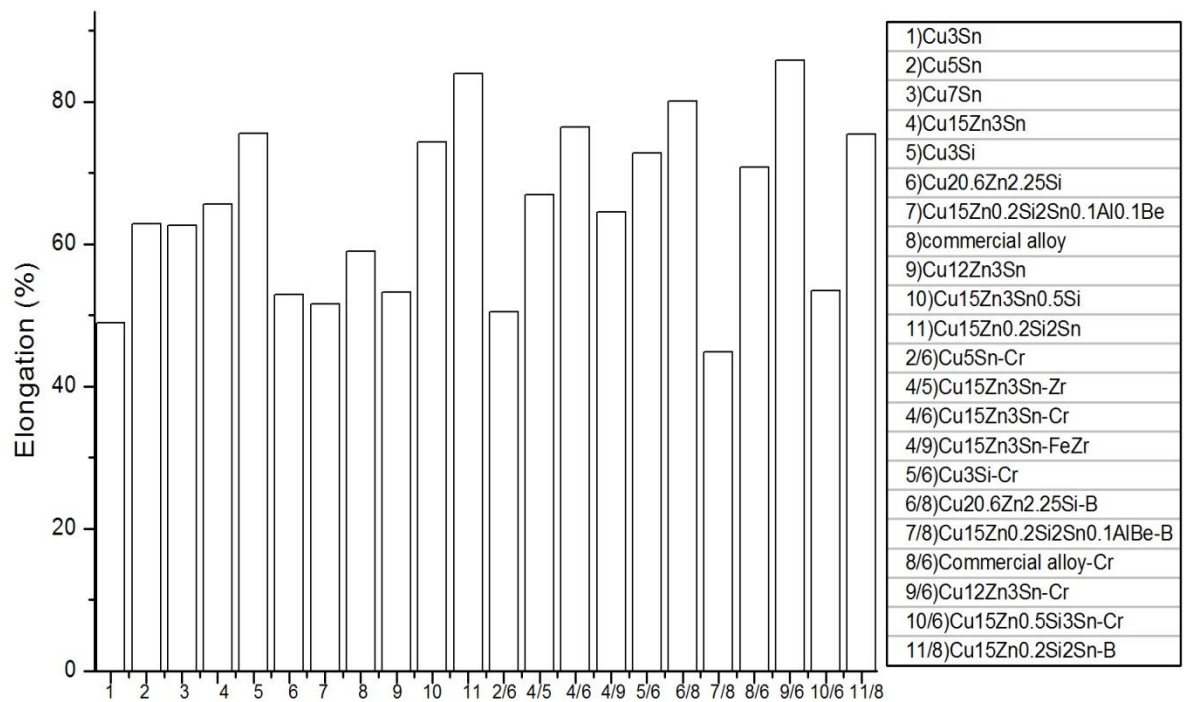
11)Cu15Zn0.2Si2Sn
grain size 3.4 mm



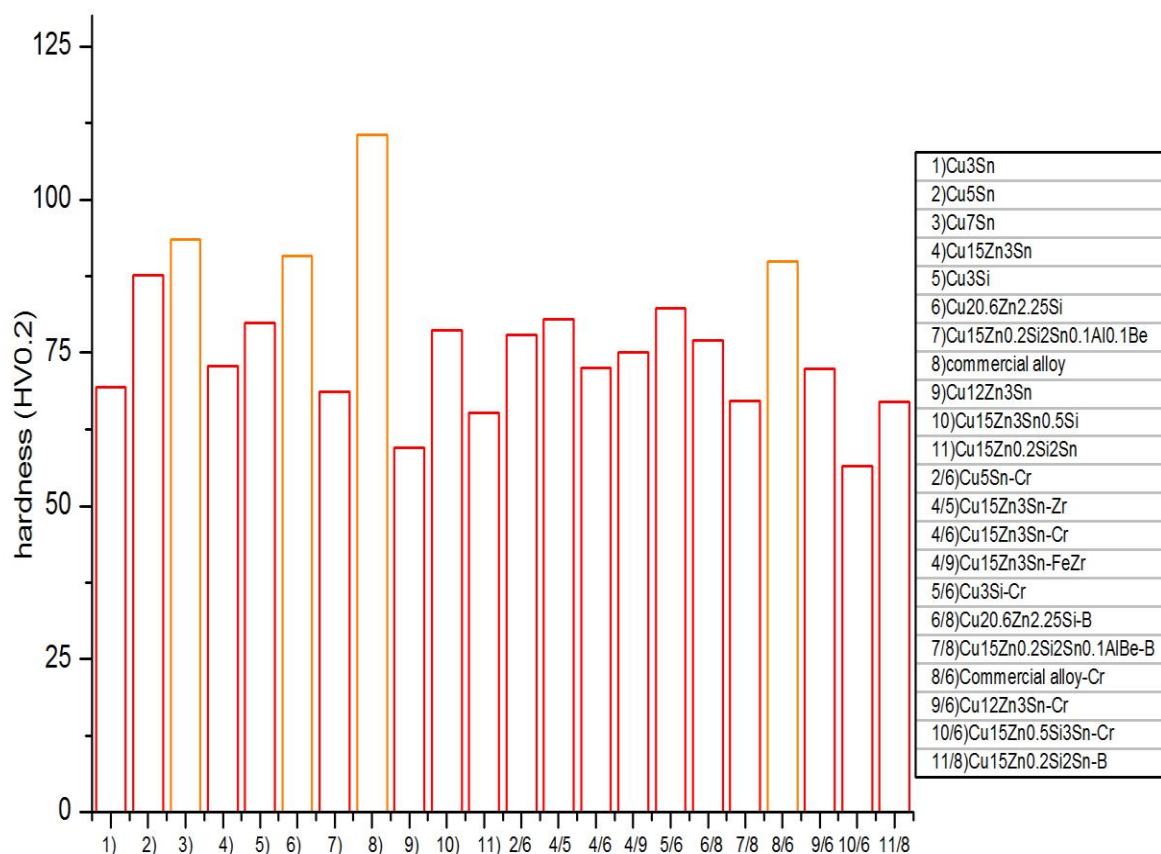
11/8)Cu15Zn0.2Si2Sn-B
grain size 3.3 mm



รูป 2.3.2 (ต่อ) การเปรียบเทียบขนาดเกรนของชิ้นงานทองแดงผสมร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน



รูป 2.3.3 ค่าอัตราการยืดตัวของชิ้นงานทดสอบทองแดงผสมและกลุ่มทดลองร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน



รูป 2.3.4 ค่าความแข็ง (HV_{0.2}) ของชิ้นงานทดสอบทองแดงผสมและกลุ่มทดลองร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน

จากรูป 2.3.3 แสดงให้เห็นการเพิ่มตีบูกในชิ้นงาน 1)Cu3Sn 2)Cu5Snและ 3)Cu7Sn ทำให้ความแข็งแรงสูงสุด และอัตราการยืดเพิ่มขึ้นจาก 48.9 62.8 และ 62.6 (สำหรับอัตราการยืดตัว) และ 277.6 328.6 และ 325.7 สำหรับความแข็งแรงสูงสุด ซึ่งเป็นผลจากการเกิดสภาวะการสลายตัวของแข็งระหว่างทองแดงกับตีบูกจนเกิดสภาวะแกนเนื่องจากการเย็นตัวอย่างไม่สมดุลซึ่งการแยกตัวนี้จะเพิ่มมากขึ้นจากการเพิ่มปริมาณตีบูก

การเพิ่มสังกะสีในทองแดงผสมตีบูกทำให้อัตราการยืดตัวของทองแดงผสมตีบูกขึ้นดังเช่นในชิ้นงาน 1)Cu3Sn และ 4)Cu15Zn3Sn ที่มีอัตราการยืดตัวจาก 48.9% เป็น 65.6% โดยความแข็งแรงไม่เปลี่ยนแปลงจากการสลายตัวของแข็งระหว่างสังกะสีและทองแดง ดังผลยืนยันในแผนภูมิสมดุลทองแดง-สังกะสี

สำหรับการเพิ่มซิลิคอนทำให้อัตราการยืดตัวเพิ่มขึ้นในชิ้นงาน 5)Cu3Si ที่มีค่าอัตราการยืดตัวสูงกว่า 1)Cu3Sn(จาก 48.9% เป็น 75.5% ในอัตราการเพิ่มซิลิคอนและตีบูกที่ 3%ในทองแดง) ในการพิจารณาชิ้นงาน 5)Cu3Si และ 6)Cu20.6Zn2.25Si พบว่า การมีปริมาณสังกะสีร่วมกับซิลิคอนดังชิ้นงาน 6)Cu20.6Zn2.25Si จะทำให้อัตราการยืดตัวลดลงอย่างมากจาก 75.5% เป็น 52.9%

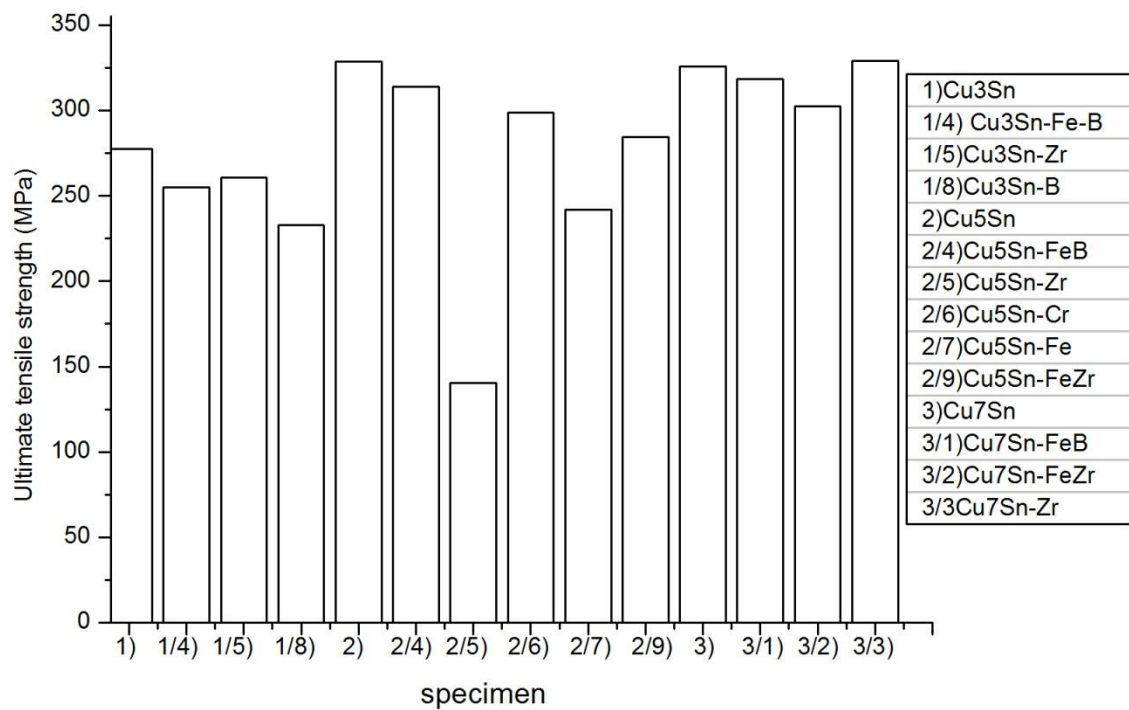
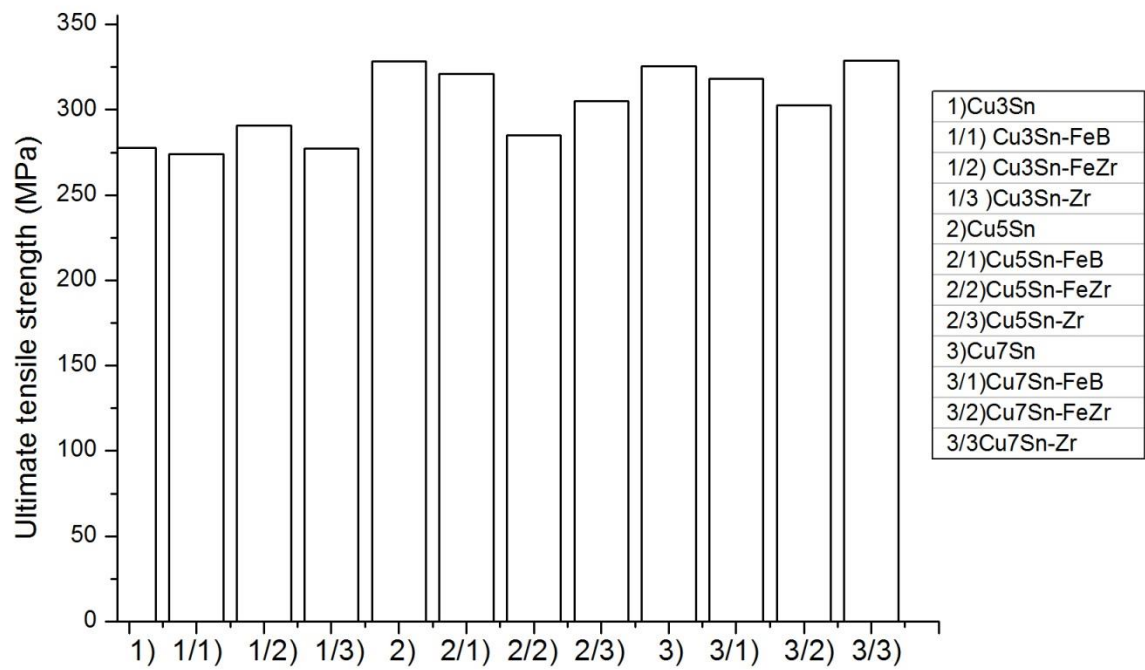
การลดปริมาณอะลูมิเนียมและเบอริลเลียมจากชิ้นงาน 7) $\text{Cu}_{15}\text{Zn}_{0.2}\text{Si}_{2}\text{Sn}_{0.1}\text{Al}_{0.1}\text{Be}$ เป็นชิ้นงาน 11) $\text{Cu}_{15}\text{Zn}_{0.2}\text{Si}_{2}\text{Sn}$ จะทำให้ความแข็งแรงลดลงจาก 260 MPa เป็น 224 MPa โดยมีอัตรายืดตัวเพิ่มขึ้นจาก 51.6% เป็น 83.98%

จากรูป 2.3.4 แสดงการเพิ่มปริมาณดีบุกจาก 3% ถึง 7% ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นในชิ้นงาน 1) Cu_3Sn 2) Cu_5Sn และ 3) Cu_7Sn เพิ่มขึ้นจาก 69.4 เป็น 87.6 และ 93.4 $\text{HV}_{0.2}$ ตามลำดับ

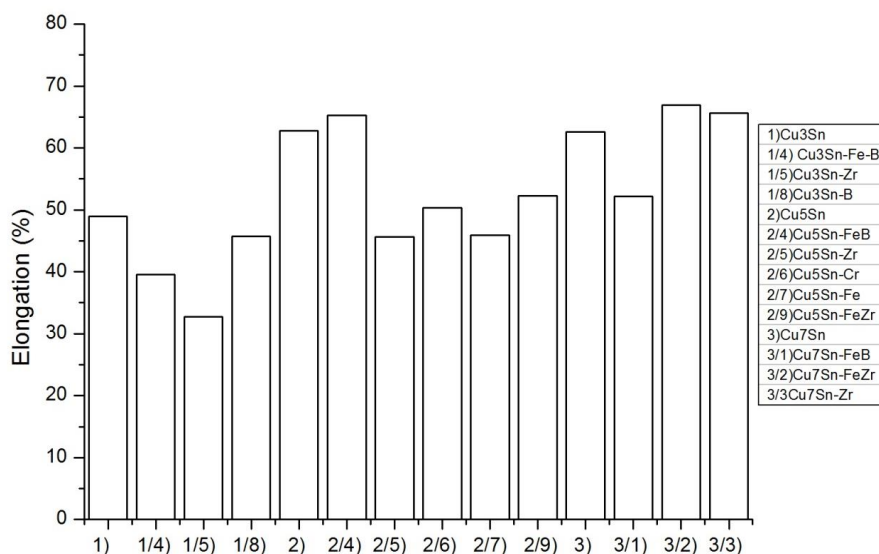
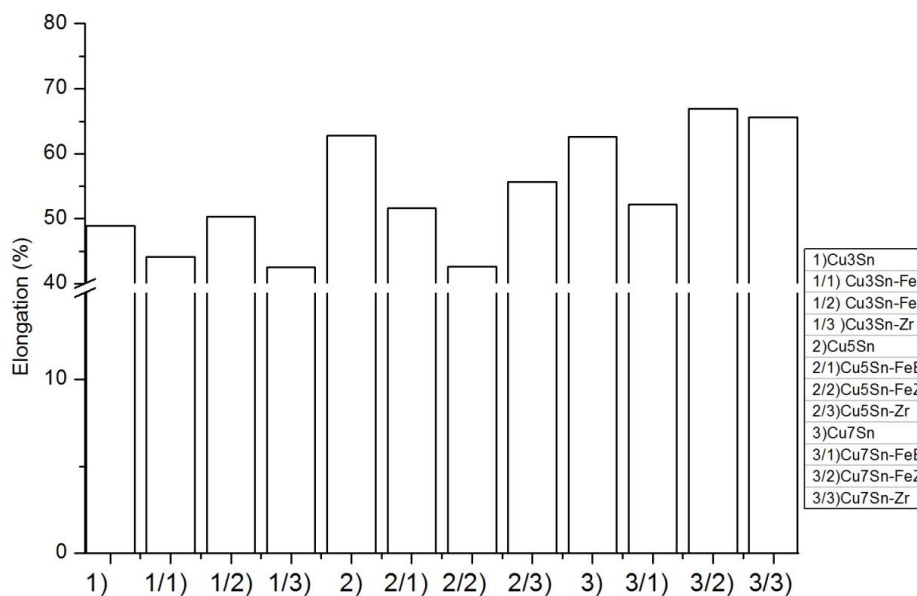
จากรูป 2.3.4 หากเปรียบเทียบการเติมดีบุกและซิลิคอนที่ 3% ในทองแดง ชิ้นงาน 1) Cu_3Sn และ 5) Cu_3Si พบว่า ซิลิคอนสามารถเพิ่มความแข็งได้มากกว่าดีบุกที่เติมในปริมาณเดียวกันจากการเปลี่ยนความแข็ง ที่ 79.9 $\text{HV}_{0.2}$ (5) Cu_3Si และ 69.4 $\text{HV}_{0.2}$ (1) Cu_3Sn อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องระวังการแยกตัวของเฟสที่มีดีบุกสูงซึ่งจะส่งผลต่อความแข็งแรงและการหดตัวขณะหล่อได้ ส่วนซิลิคอนนั้นไม่แนะนำให้เติมเกิน 3.5 % เนื่องจากสามารถเกิดการแตกหลังหล่อเพราะการเย็นตัวตัดผ่านเส้นการเปลี่ยนเฟสแม้ว่าการเติมซิลิคอนสูงจะทำให้อุณหภูมิหล่อต่ำและไหลตัวได้ดีก็ตามดังภาพ 1.6.8

การเติมสังกะสีในทองแดงผสมซิลิคอนดังการเปรียบเทียบ ชิ้นงาน 5) Cu_3Si และ 6) $\text{Cu}_{20.6}\text{Zn}_{2.25}\text{Si}$ ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นจาก 79.9 $\text{HV}_{0.2}$ (สำหรับชิ้นงาน 5) Cu_3Si) เป็น 90.8 $\text{HV}_{0.2}$ (สำหรับ 6) $\text{Cu}_{20.6}\text{Zn}_{2.25}\text{Si}$) และมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจาก 315 MPa (สำหรับชิ้นงาน 5) Cu_3Si) เป็น 430.4 MPa (สำหรับ 6) $\text{Cu}_{20.6}\text{Zn}_{2.25}\text{Si}$) แต่มีอัตราการยืดตัวลดลง จาก 75.5% (สำหรับชิ้นงาน 5) Cu_3Si) เป็น 52.9% (สำหรับ 6) $\text{Cu}_{20.6}\text{Zn}_{2.25}\text{Si}$)

การเติมอะลูมิเนียมร่วมกับเบริลเลียมดังชิ้นงาน 7) $\text{Cu}_{15}\text{Zn}_{0.2}\text{Si}_{2}\text{Sn}_{0.1}\text{Al}_{0.1}\text{Be}$ ทำให้การไหลตัวน้ำโลหะต่ำลง ความแข็งแรง อัตราการยืดตัวและความแข็งแรงลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงาน 11) $\text{Cu}_{15}\text{Zn}_{0.2}\text{Si}_{2}\text{Sn}$ แต่ได้ผิวงานหล่อที่สวยงามคล้ายทอง 14-18 กระรัต และไม่มีคราบออกไซด์ที่ผิว แต่จำเป็นต้องหล่อที่อุณหภูมิสูงเสี่ยงการผุเป็นแพ

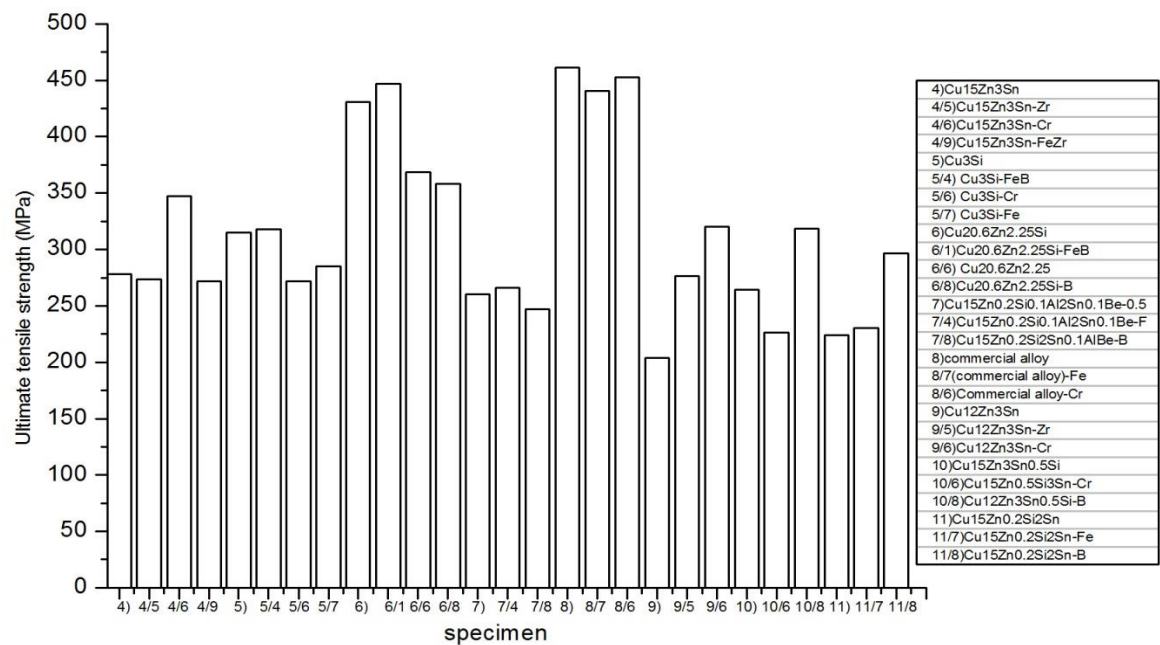


รูป 2.3.5 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานทดสอบทองแดงผสม 1)Cu3Sn 2)Cu5Sn และ 3)Cu7Sn และกลุ่มทดลองร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน

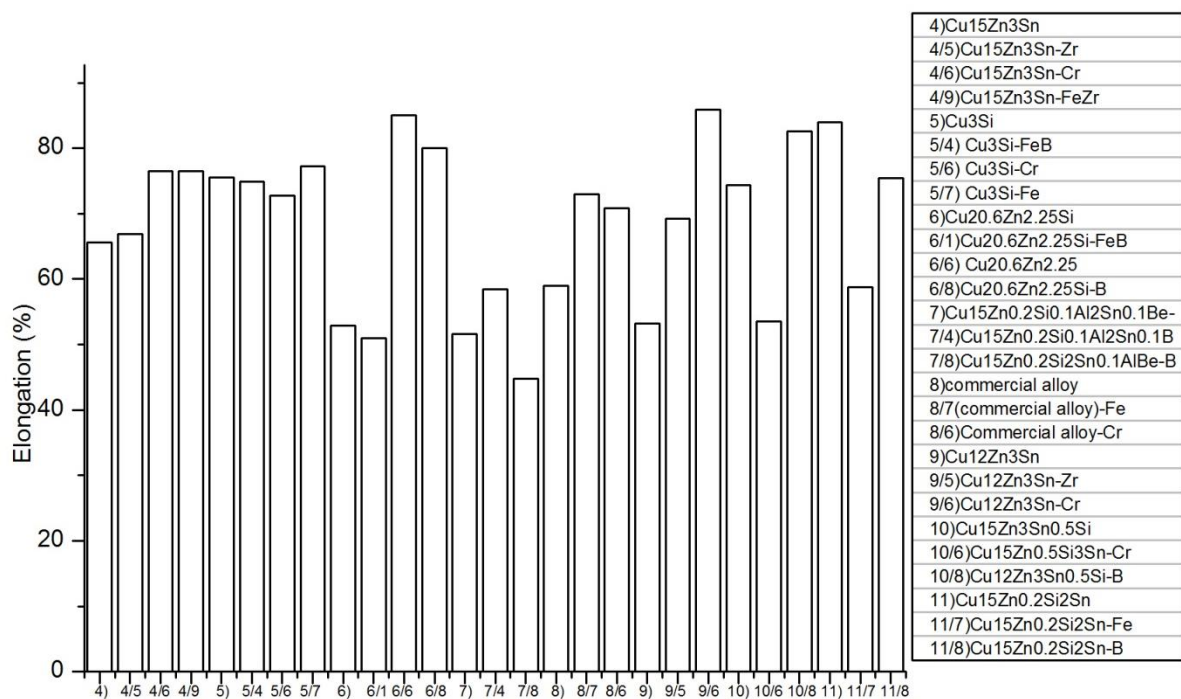


รูป 2.3.6 การเปรียบเทียบค่าอัตราการยืดตัวของชิ้นงานทดสอบทองแดงผสม 1)Cu3Sn 2)Cu5Sn และ 3)Cu7Sn ร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน

รูป 2.3.5 และ 2.3.6 แสดงความต้านทานแรงดึงสูงสุดและอัตราการยืดตัวของชิ้นงานทดสอบทองแดงผสม 1)Cu3Sn 2)Cu5Sn และ 3)Cu7Sn ที่ผ่านการเติม เหล็ก โบรอน เซอร์โคเนียมและโครเมียม พบว่า การเติม เหล็ก โบรอน เซอร์โคเนียมและโครเมียม ในปริมาณต่ำไม่เกิน 1 % มีแนวโน้มทำให้ความแข็งแรงสูงสุดและอัตราการยืดตัวลดลงเล็กน้อย แต่สามารถลดอัตราการยืดตัวได้อย่างมีนัยยะ เนื่องจากสามารถสร้างสารประกอบเชิงโลหะทำให้สมบัติทางกลลดลงได้มาก ดังชิ้นงาน 2/5)Cu5Sn-Zr ที่พบผิวขรุขระและความแข็งแรงลดลงมาก ไม่แนะนำให้ใช้ผลิตเชิงอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามการใช้งานจำเป็นต้องพิจารณาถึงความต้องการของเครื่องประดับและการเลือกอัลลอยเพื่อให้การผลิตง่ายมากขึ้น



รูป 2.3.7 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานทดสอบทองแดงผสม 4)Cu15Zn3Sn 5)Cu3Si และ 6)Cu20.6Zn2.25Si 7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Al0.1Be 8)commercial alloy 9)Cu12Zn3Sn 10)Cu15Zn3Sn0.5Si 11)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Al0.1Be ร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน



รูป 2.3.8 การเปรียบเทียบค่าอัตราการยืดตัวของชิ้นงานทดสอบทองแดงผสม 4)Cu15Zn3Sn 5)Cu3Si และ 6)Cu20.6Zn2.25Si 7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Al0.1Be 8) commercial alloy 9)Cu12Zn3Sn 10) Cu15Zn3Sn0.5Si 11) Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Al0.1Be ร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน

รูป 2.3.7 และ 2.3.8 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลด้วยการเติมธาตุลดขนาดเกรน พบว่า การเติมโครเมียมใน 4)Cu15Zn3Sn 6)Cu20.6Zn2.25Si 8)commercial alloy 9)Cu12Zn3Sn ในอัตราส่วนมาสเตอร์อัลลอย 0.5% จะเพิ่มความแข็งแรงสูงสุด และความแข็ง ในช่วง 15-30% อีกทั้งช่วยเพิ่มอัตราการยืดตัว ได้ในช่วงประมาณ 3-40% ซึ่งถือเป็นธาตุปรับลดขนาดเกรนที่น่าสนใจสำหรับชิ้นงาน 2 กลุ่มนี้ สำหรับในกลุ่ม 5)Cu3Si และ 7) Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Al0.1Be 10) Cu15Zn3Sn0.5 Si 11) Cu15Zn0.2Si2Sn การเติม เซอร์โคเนียม เหล็ก และ โบรอนในปริมาณมาสเตอร์อัลลอยไม่เกิน 1% ทำให้ค่าความแข็งแรงและอัตราการยืดตัวลดลง

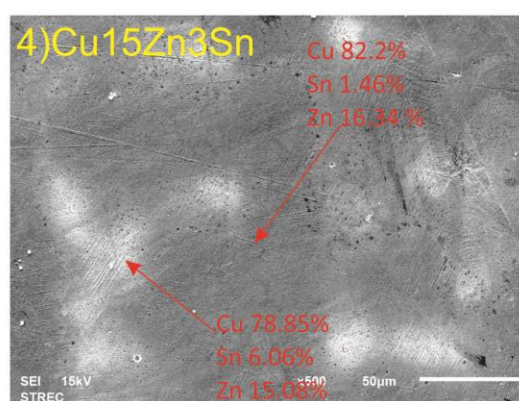
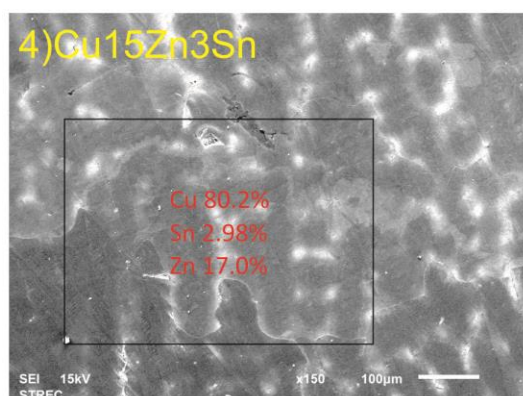
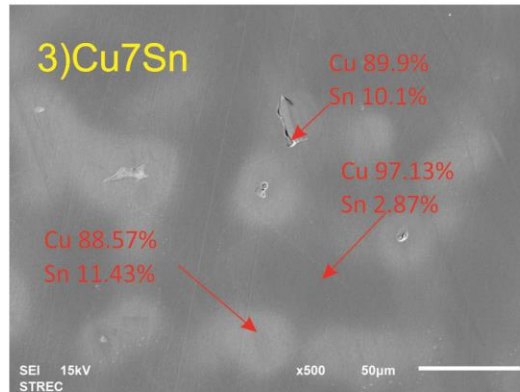
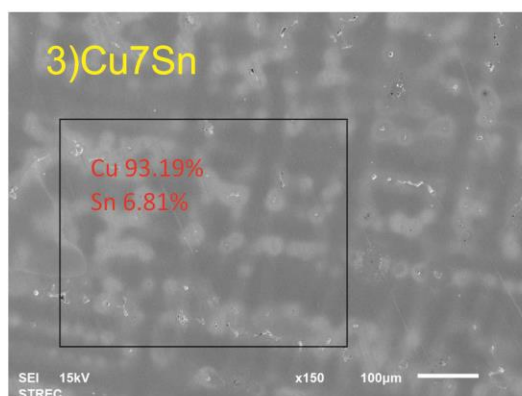
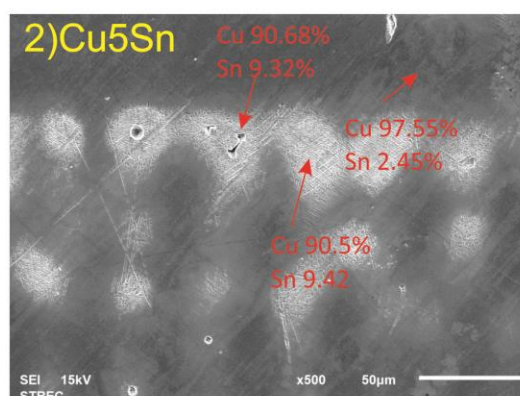
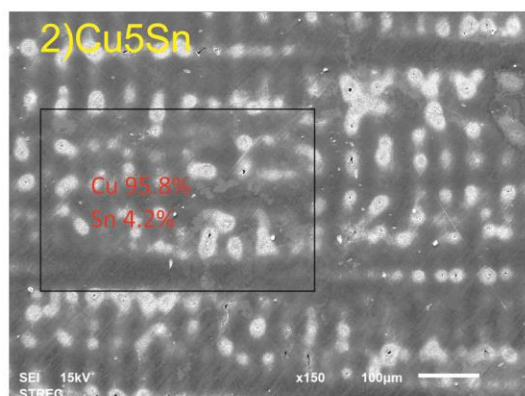
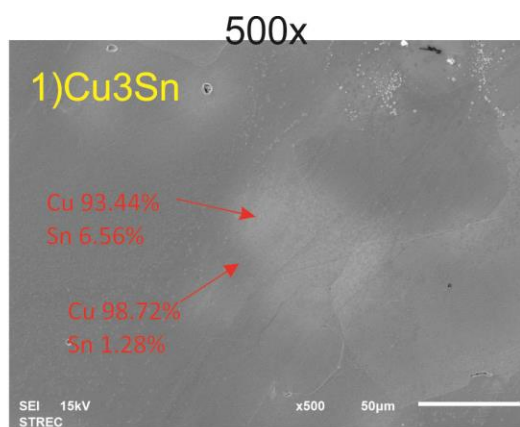
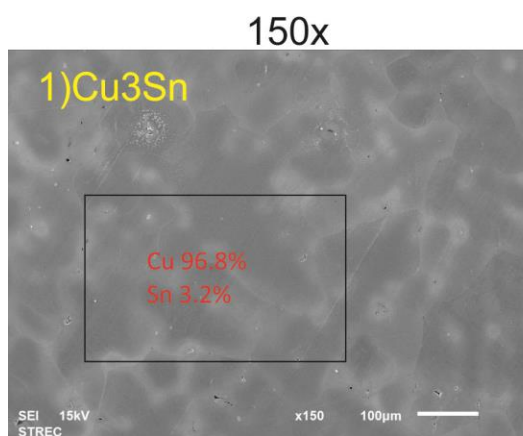
2.4 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและขนาดเกรน

ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทองแดงผสมได้ตัดตัวอย่างจากฐานต้นที่ความหนา 5 มม. เพื่อขัดหยาบด้วยกระดาษทราย 150 300 400 600 800 1000 1200 2000 mesh ตามลำดับและ ขัดละเอียดด้วยผงเพชร ขนาด 6 3 1 0.5 ไมครอน วิเคราะห์ถ่ายภาพด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเฟสโครงสร้างด้วย Energy Dispersive spectrometry-EDS ได้ผลการศึกษาดังรูป 2.4.1

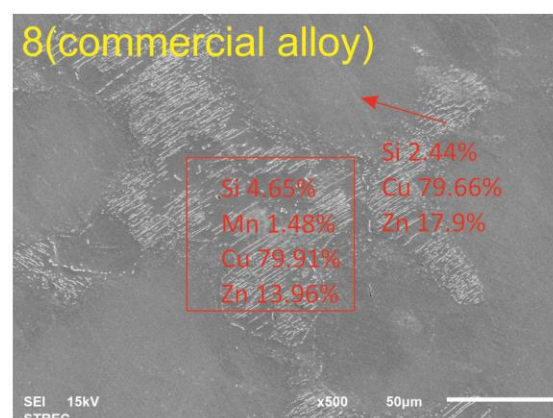
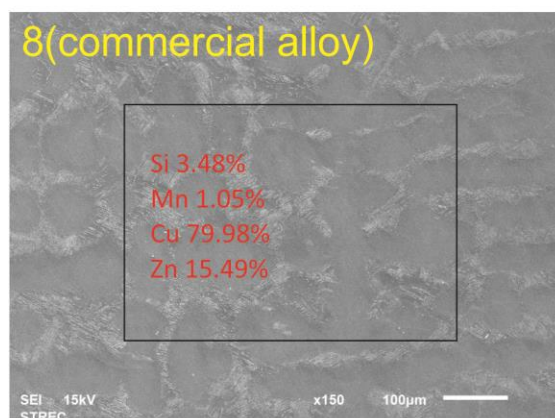
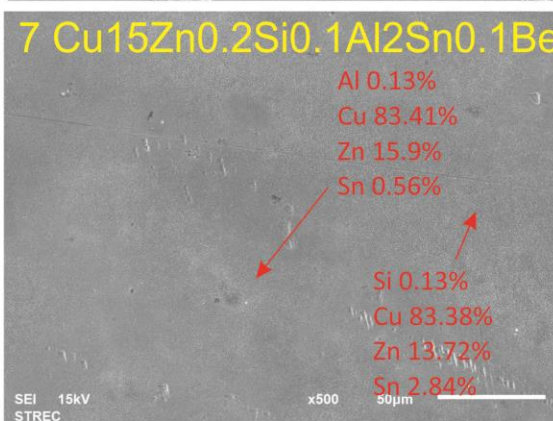
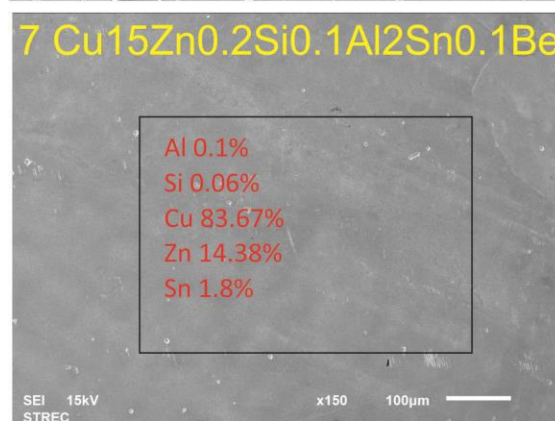
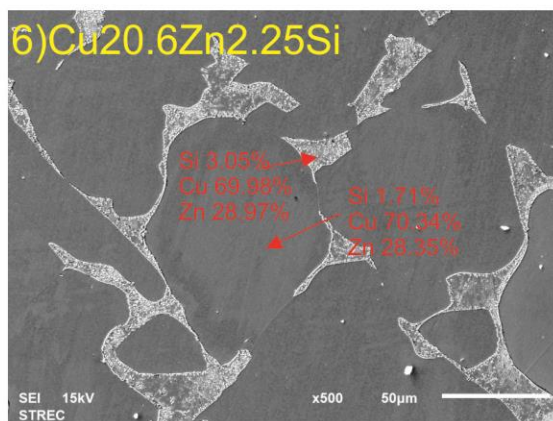
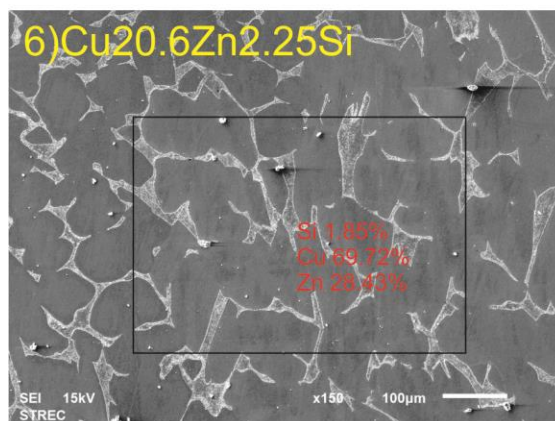
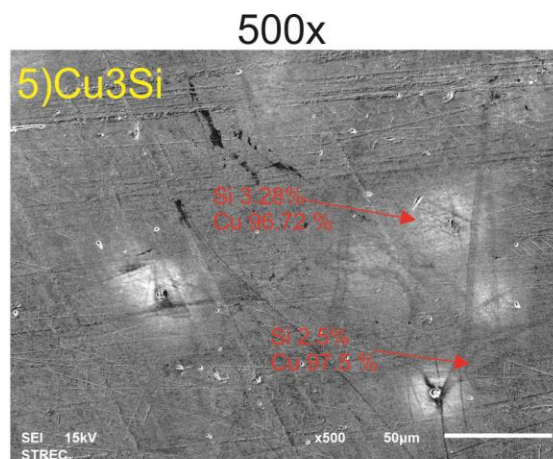
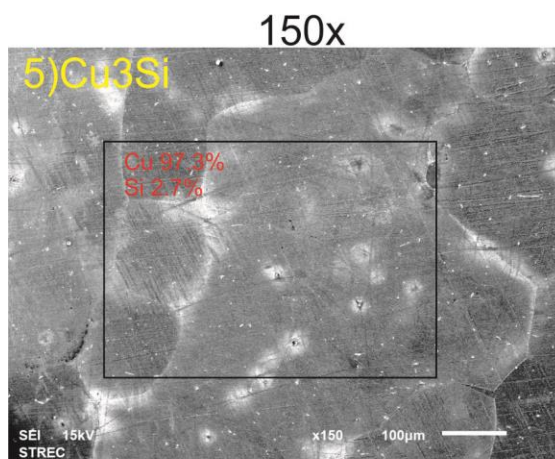
รูป 2.4.1 แสดงให้เห็นการแยกตัวของสารละลายที่มีดีบุกสูงในชิ้นงาน 1)Cu3Sn 2)Cu5Sn และ 3)Cu7Sn โดยการเพิ่มปริมาณดีบุกทำให้การแยกตัวของสารละลายดีบุกสูงชัดเจนขึ้นและส่งผลกระทบต่ออัตราการยืดตัวและสมบัติทางกล พบว่า ในชิ้นงาน4)Cu12Zn3Sn มีการแยกตัวจนมีเฟสที่มีส่วนผสมสังกะสีและดีบุกสูง สำหรับในชิ้นงาน 5)Cu3Si และ 6)Cu20.6Zn2.25Si พบการแยกตัวของเฟสที่มีซิลิคอนสูงที่บริเวณแขนเดนไดรต์ ซึ่งเกิดจากการละลายของซิลิคอนและสังกะสีในทองแดงเกิดขึ้นได้ดีและทองแดงสามารถละลายสังกะสีและซิลิคอนในปริมาณมากตามแผนภูมิสมดุลของทองแดง-สังกะสี และ ทองแดง-ซิลิคอน

ในกรณีชิ้นงาน 8) Commercial alloy พบว่ามี ซิลิคอน 3.48% แมงกานีส 1.05% สังกะสี 15.49% โดยพบเฟสที่มีซิลิคอนและแมงกานีสสูงแยกตัวออกมาที่ระหว่างแขนเดนไดรต์ มีลักษณะเดียวกันกับการแยกตัวของเฟสที่มีดีบุกสูงในชิ้นงาน 9)Cu12Zn3Sn ที่พบระหว่างแขนเดนไดรต์เช่นกัน

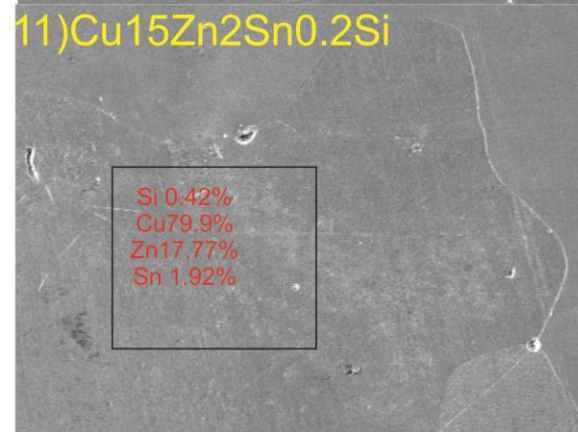
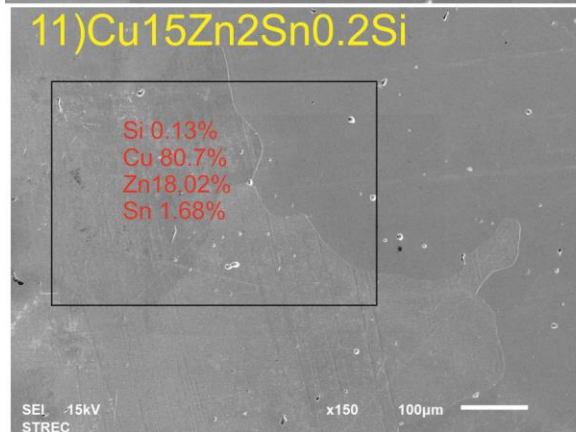
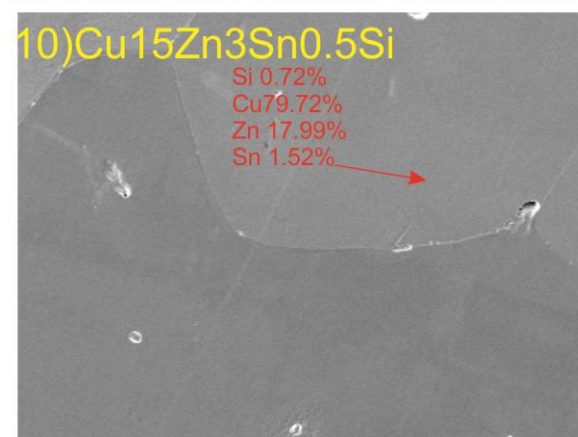
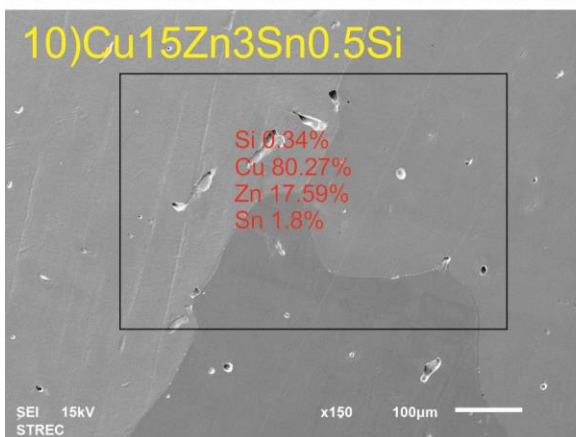
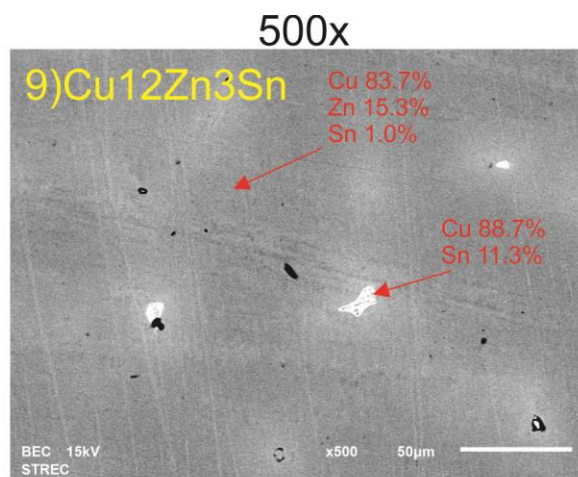
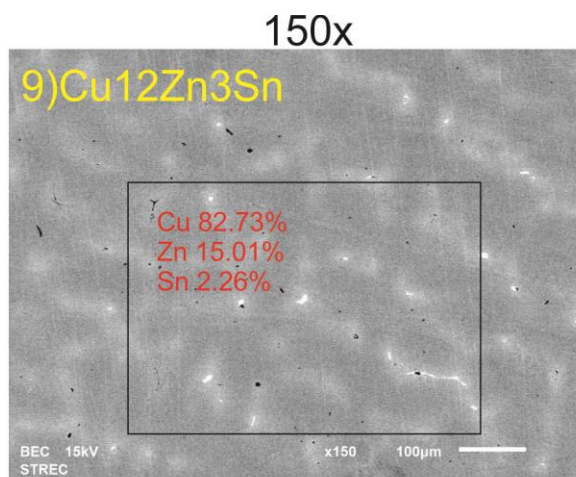
สำหรับโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 10)Cu15Zn3Sn0.5Si และ 11)Cu15Zn0.2Si2Sn มีลักษณะโครงสร้างคล้ายคลึงกันคือ ไม่เกิดการแยกตัวของเฟสผสมสูงเนื่องจากการผสมของดีบุกไม่มากรวมถึงการมีซิลิคอนละลายในทองแดงทำให้ไม่เกิดการแยกตัวดังกล่าวรวมถึงไม่พบโครงสร้างกิ่งไม้ ดังรูป 2.4.1



รูป 2.4.1 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดลองด้วยระบบ BEI

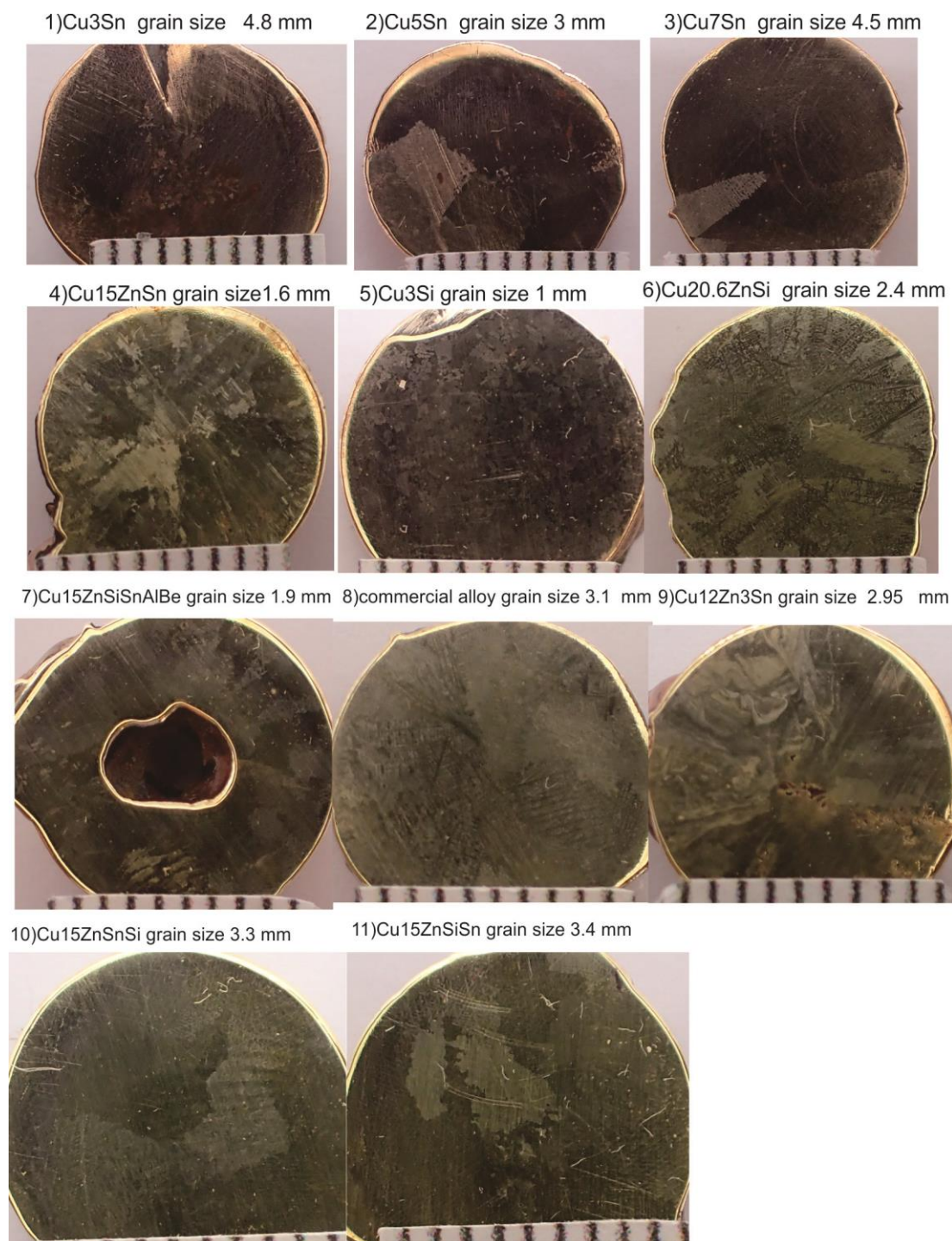


รูป 2.4.1 (ต่อ) แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดลองด้วยระบบ BEI



รูป 2.4.1 (ต่อ) แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดลองด้วยระบบ BEI

2.4.1 การศึกษาขนาดเกรน



รูป 2.4.2 แสดงขนาดเกรนของทองแดงผสมสำหรับการทดลอง

สำหรับการตรวจสอบเกรน คณะผู้วิจัยได้นำชิ้นงานผ่านการขัดเงาไปกัดกรดที่ประกอบด้วย กรดเกลือ 10 % FeCl_3 3% แอลกอฮอล์ 92 % ได้ลักษณะเกรนดังรูป 2.4.2

จากรูป 2.4.2 แสดงขนาดเกรนของตำแหน่งฐานต้นทดลองซึ่งเป็นจุดเย็นตัวช้าที่สุดและมีขนาดเกรนใหญ่ที่สุด ผ่านการกัดกรด โดยชิ้นงานกลุ่มทองแดงผสมดีบุก 3 -7 % (ชิ้นงาน 1)Cu3Sn 2)Cu5Sn และ

3)Cu7Sn) มีขนาดเกรนในช่วง 3-4.8 มม. มีค่าความแข็งแรงสูงสุดในช่วง 277.7-328.6 MPa และ อัตรายืดตัว 48.4-62.8% โดยการเพิ่มดีบุกทำให้ค่าสมบัติทางกลทั้งสองประเภทเพิ่มขึ้น

ในการพิจารณาการเติมซิลิคอนจากชิ้นงาน 4)Cu15Zn3Sn และ 10)Cu15Zn3Sn0.5Si พบว่า การเติมซิลิคอน 0.5% ทำให้ขนาดเกรนขยายเพิ่มขึ้นจาก 1.6 มม. (4)Cu15Zn3Sn) เป็น 3.3 มม. (10)Cu15Zn3Sn0.5Si) รวมถึงมีค่าความแข็งแรงสูงสุดลดลง จาก 278 MPa (4)Cu15Zn3Sn) เป็น 264 MPa(10)Cu15Zn3Sn0.5Si)

สำหรับชิ้นงาน 5) Cu3Si และ 6) Cu20.6Zn2.25Si ซึ่งมีการเติมสังกะสี 20.6% ทำให้เกรนใหญ่จากขนาดเกรน 1 มม. (5)Cu3Si) เป็น 2.4 มม.(6)Cu20.6Zn2.25Si)

สำหรับอัลลอยการค้า 8)Commercial alloy (มี ซิลิคอน 3.3-4% แมงกานีส 0.9-1.3% สังกะสี 15-16%) มีขนาดเกรน 3.1 มม. เนื่องจากมีซิลิคอนสูง ทำให้เกรนขนาดใหญ่ และ มีค่าความแข็งแรงสูงสุดสูงที่ 461.45 MPa เนื่องจากการเติมแมงกานีส โดยมีอัตราการยืดตัวปานกลางที่ 59% พบว่าในเชิงการใช้งานมีความขึ้นขบลักษณะของทองแดงผสมขึ้นนี้ รวมถึงการมีแมงกานีสทำให้สามารถอบบ่มเพิ่มความแข็งแรง หรือ สร้างสมบัติสปริงได้ด้วย

ชิ้นงาน 7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Al0.1Be มีขนาดเกรน 1.9 มม. ซึ่งถือว่าขนาดเล็กเนื่องจากการเติม อะลูมิเนียม และ เบริลเลียม หากแต่เมื่อไม่เติมอะลูมิเนียมและเบริลเลียม ดังชิ้นงาน 11) Cu15Zn0.2Si2Sn ซึ่งมีขนาดเกรน 3.4 มม. อาจกล่าวได้ว่า อะลูมิเนียม และ เบริลเลียม ในปริมาณ 0.1% ช่วยลดขนาดเกรน และ ทำให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด เพิ่มขึ้นจาก 224 MPa (11) Cu15Zn0.2Si2Sn) เป็น 260 MPa (7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Al0.1Be) โดยค่าอัตราการยืดตัวเพิ่มขึ้นจาก 51.6% (7)Cu15Zn0.2Si2Sn 0.1Al0.1Be) เป็น 83.48% (11)Cu15Zn0.2Si2Sn)

หากพิจารณาการเติมธาตุลดขนาดเกรน พบว่า การเติมธาตุดังกล่าวส่วนใหญ่ลดความแข็งแรงและ อัตราการยืดตัวในปริมาณหนึ่ง และในบางกรณีธาตุเหล่านี้เกิดปฏิกิริยากับธาตุผสมหลักทำให้เกิดผิวหล่อหยาบ ขรุขระ ดังรูป 2.4.3 ที่แสดงลักษณะผิวของชิ้นงาน 2/5)Cu5Sn-Zr



รูป 2.4.3 แสดงผิวขรุขระของตัวอย่างชิ้นงาน 2/5Cu5Sn-Zr

2.5 ผลการศึกษาสีผิวและความต้านทานการหมองในเหงื่อเทียม

ในการศึกษาสีผิวของชิ้นงานทดลองคณะผู้วิจัยใช้ Spectrophotometer(Hunter Lab) ซึ่งจะได้ผลออกมาเป็นค่า L^* (ค่าความสว่าง) , a^* และ b^* (ค่าสี)

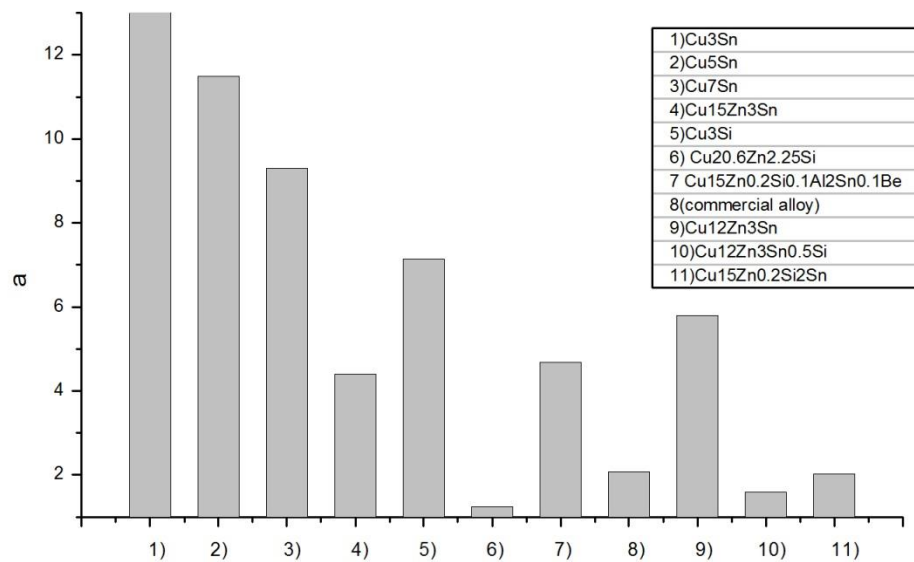
ถ้า a^* มีค่า + สีจะไปในทิศทางของสีแดง แต่ ถ้า a^* มีค่า - สีจะไปในทิศทางของสีเขียว

ถ้า b^* มีค่า + สีจะไปในทิศทางของสีเหลือง ถ้า b^* มีค่า - สีจะไปในทิศทางของสีน้ำเงิน

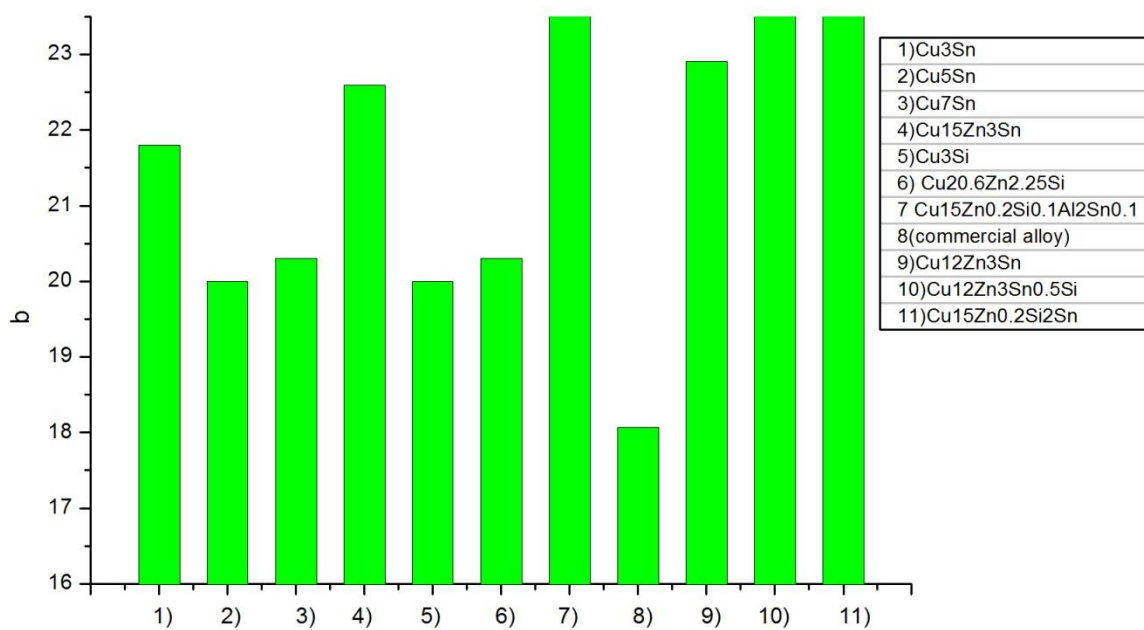
จากรูป 2.5.1 แสดงผลการวัดค่าสีภายหลังการขัดเงาพบว่า การเพิ่มดีบุกในชิ้นงาน 1)Cu3Sn 2)Cu5Sn และ 3)Cu7Sn ทำให้ค่า a และ ค่า b ลดลง หรือแสดงถึงแนวโน้มสีแดงที่ลดลงโดยการเพิ่มดีบุกทำให้สีแดงลดลง สีเขียวและเหลืองเพิ่มขึ้น และเมื่อเติมสังกะสีในทองแดงผสมดีบุก 3% จะพบว่า สังกะสีที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่า a ลดลง ค่า b เพิ่มขึ้น มีสีแดงที่น้อยลงและสีเหลืองเพิ่มขึ้นดังการเปรียบเทียบ 1)Cu3Sn กับ 4)Cu12Zn3Sn โดยแนวโน้มการเติมซิลิคอนในปริมาณ 3 % ทำให้ค่า a ลดลงไม่มากกว่าการเติมดีบุก 3 % ดังการเปรียบเทียบชิ้นงาน 1)Cu3Sn และ 5)Cu3Si

ในการเติมสังกะสี ซิลิคอน อะลูมิเนียม แมงกานีส และ ดีบุกทำให้ ค่า a ลดลงสีเหลืองที่ถูกกลดสีออกเคลือบเขียวดังพบในชิ้นงาน 8)Commercial alloy 6)Cu20.6Zn2.25Si และ 7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Be0.1Al 9)Cu12Zn3Sn 10)Cu15Zn3Sn0.5Si และ 11)Cu15Zn0.2Si2Sn อีกทั้งการเติมสังกะสี ดีบุก ซิลิคอน อะลูมิเนียม แมงกานีสยังเพิ่มค่า b ซึ่งทำให้ชิ้นงานมีสีเหลืองมากขึ้น ดังรูป 2.5.2

7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Be0.1Al และ 11)Cu15Zn0.2Si2Sn มีอะลูมิเนียมและ ซิลิคอนทำให้เพิ่มสีเหลืองสูงขึ้นโดยมีค่า a เพิ่มขึ้น ค่า b ไม่เปลี่ยนแปลง

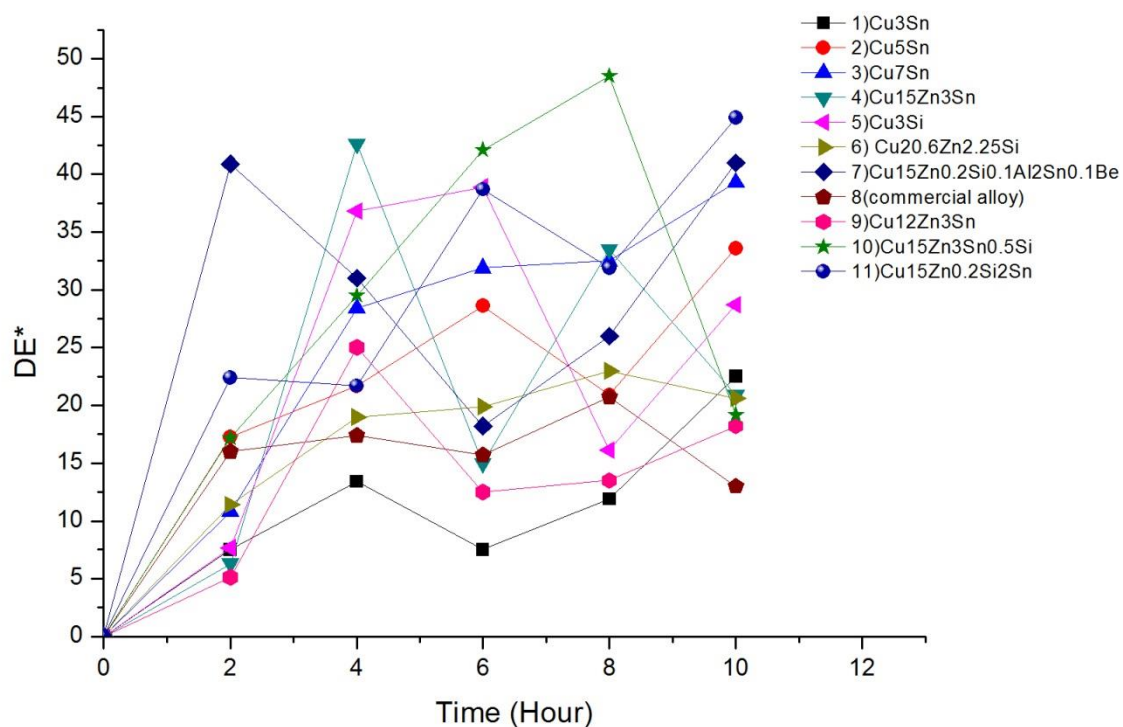


รูป 2.5.1 ค่า a ในระบบ CIE ของชิ้นงานทดลองทองแดงผสม



รูป 2.5.2 ค่า b ในระบบ CIE ของชิ้นงานทดลองทองแดงผสม

ในการทดลองการหมองตามมาตรฐาน EN1811 ได้ทดสอบในช่วง 0 1 2 4 6 8 10 ชั่วโมง ได้ผลดัง
รูป 2.5.3 และ 2.5.4 ตามลำดับ

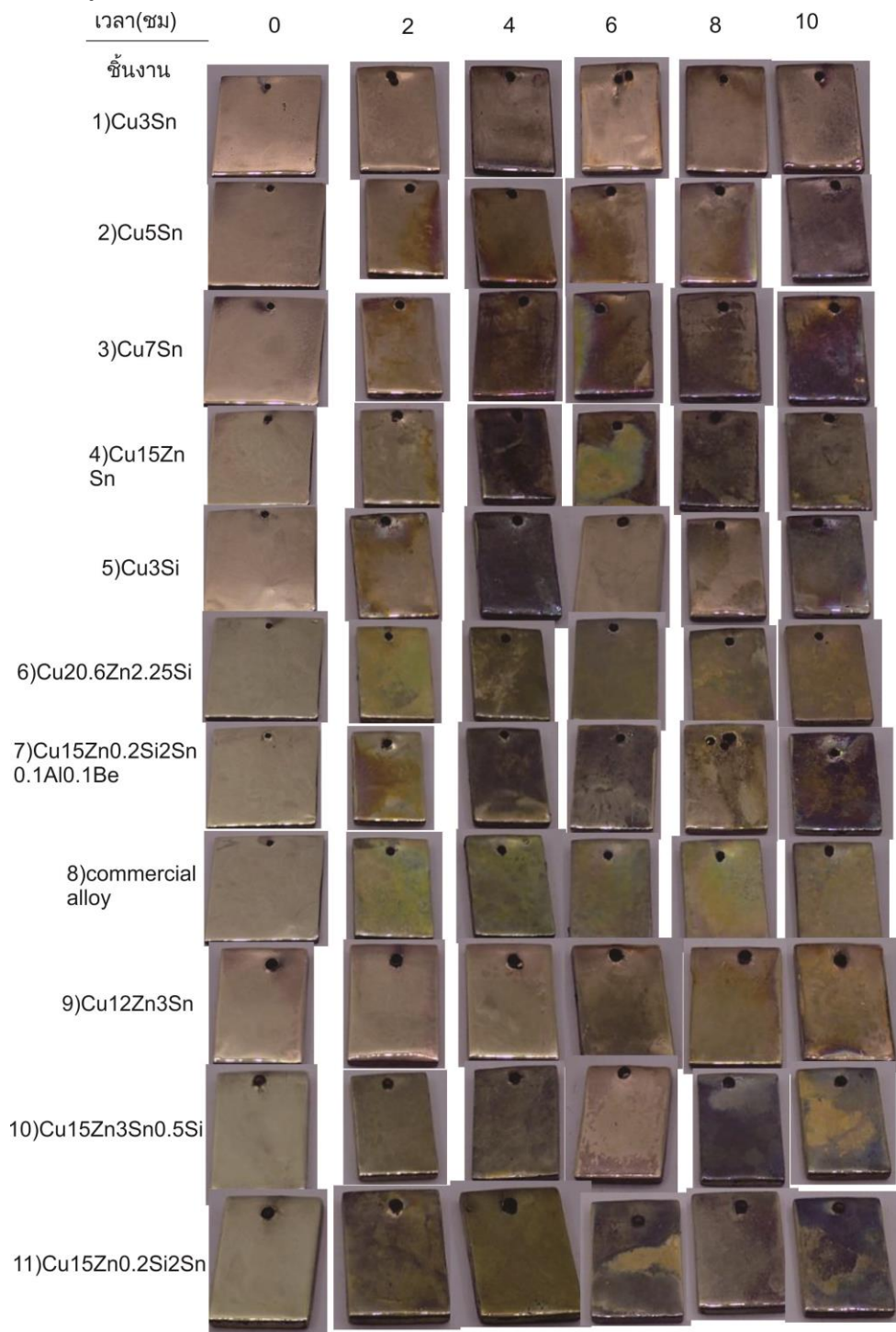


รูป 2.5.3 ผลค่าความแตกต่างสีจากการทดสอบชิ้นงานในเหงือเทียมตามมาตรฐาน EN1811

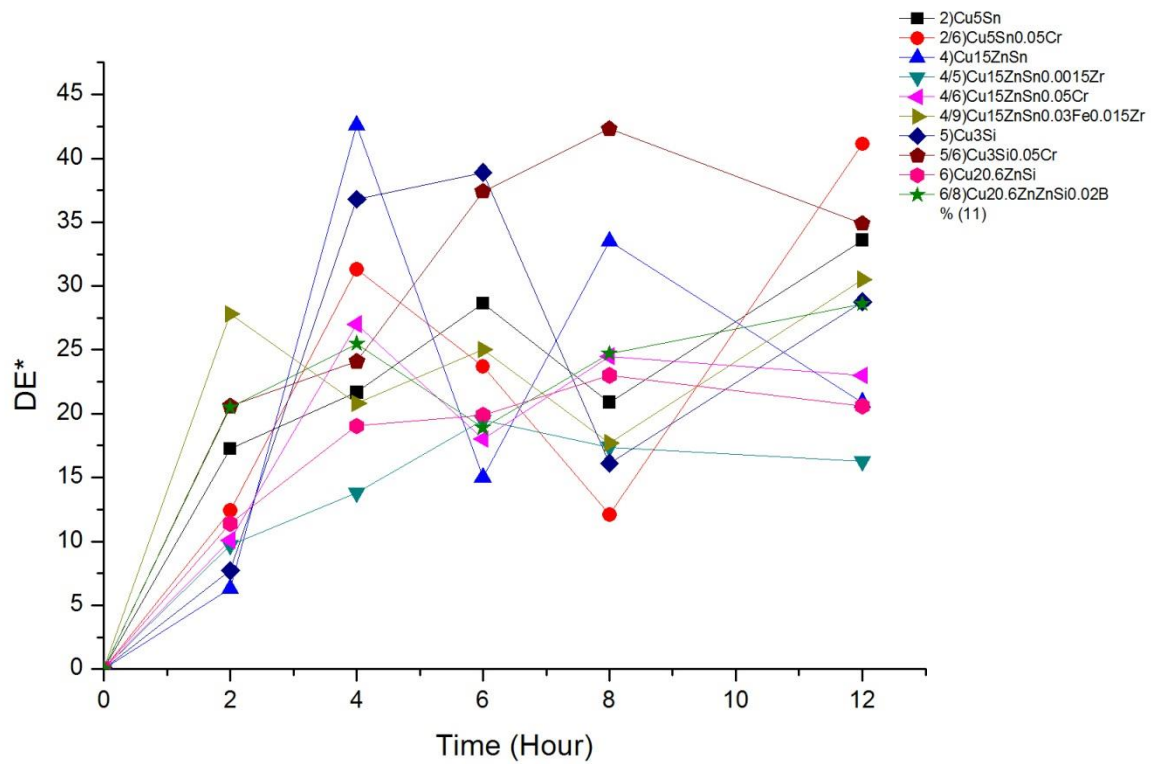
รูป 2.5.3 อธิบายค่าความแตกต่างสีในการทดสอบเหงือเทียม หากพิจารณาในภาพรวมชิ้นงานมีความด้านการมองเห็นไล่ระดับจากสูงไปต่ำ ในช่วง 10 ชม. ในเหงือเทียมได้แก่ 8) Commercial alloy > 9) Cu12Zn3Sn > 10) Cu15Zn3Sn0.5Si > 6) Cu20.5Zn2.25Si > 4) Cu15Zn3Sn > 1) Cu3Sn > 5) Cu3Si > 2) Cu5Sn > 3) Cu7Sn > 7) Cu15Zn0.2Si2Sn0.1AlBe > 11) Cu15Zn0.2Si2Sn โดยในกลุ่มที่มีการเปลี่ยนสีแบบค่อยเป็นค่อยไป ได้แก่ 8) Commercial alloy > 9) Cu12Zn3Sn > 1) Cu3Sn เนื่องจากกราฟไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

หากพิจารณาที่การทดสอบ 6 ชม. ซึ่งเป็นช่วงที่ชิ้นงานลดความเงาสวยงามแล้วพบว่า ชิ้นงานมีความด้านการมองเห็นไล่ระดับจากสูงไปต่ำได้ดังนี้ 9) Cu12Zn3Sn > 8) Commercial alloy > 4) Cu15Zn3Sn > 6) Cu20.5Zn2.25Si > 7) Cu15Zn0.2Si2Sn0.1AlBe > 1) Cu3Sn > 2) Cu5Sn > 3) Cu7Sn > 11) Cu15Zn0.2Si2Sn > 5) Cu3Si > 10) Cu15Zn3Sn0.5Si สำหรับการพิจารณาเพื่อใช้งานจริงยังจำเป็นต้องเลือกกลุ่มที่มีการเปลี่ยนแปลงสีน้อย เช่น 1) Cu3Sn 5) Cu3Si 9) Cu12Zn3Sn 10) Cu15Zn3Sn0.5Si ดังรูป 2.5.4 อย่างไรก็ตามยังจำเป็นต้องพิจารณาความเป็นไปได้ในการผลิต ความสามารถในการหล่อและไหลตัวของน้ำโลหะและการเกิดผิวคราบออกไซด์ที่ตัวเรือนเครื่องประดับ

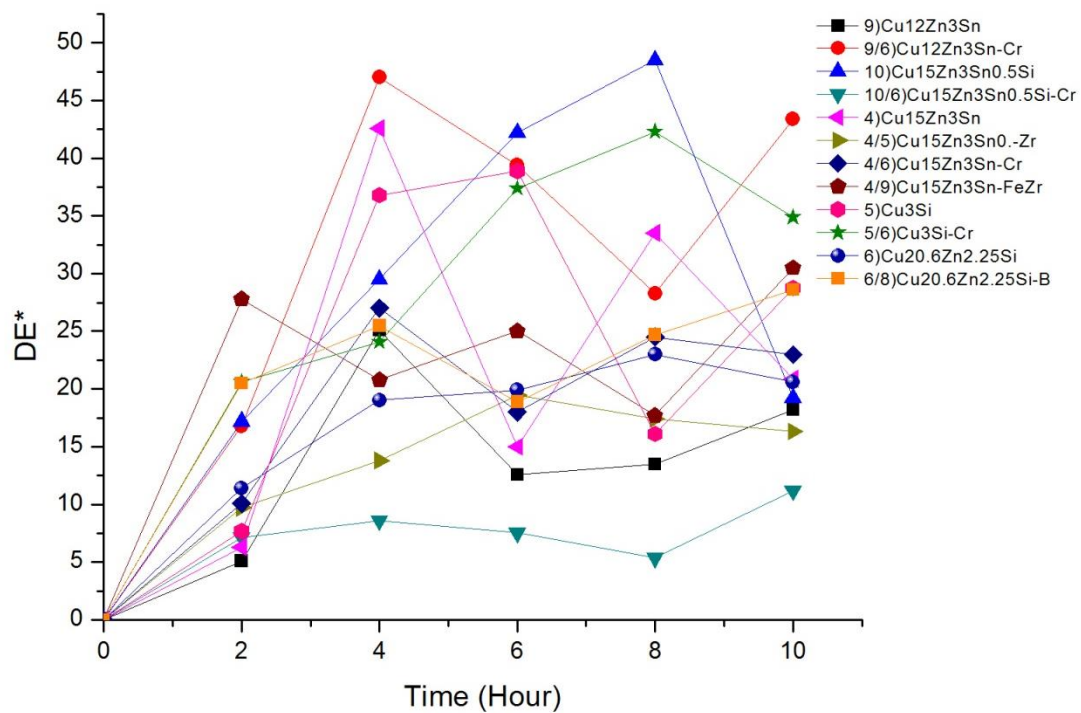
รูป 2.5.5 แสดงการเติมธาตุลดขนาดเกรนใน 2)Cu5Sn 4)Cu15Zn3Sn 5)Cu3Si 6)Cu20.6Zn2.25Si ที่ทำให้ค่าความต้านทานการหมองลดลงทั้งสิ้น ยกเว้น ชิ้นงาน 4/5)Cu15Zn3Sn-Zr ที่พบการหมองดำอยู่ในระดับค่า DE ไม่ถึง 20



รูป 2.5.4 สีสันทดสอบชิ้นงานทองแดงผสมในเชิงเปรียบเทียบตามมาตรฐาน EN1811

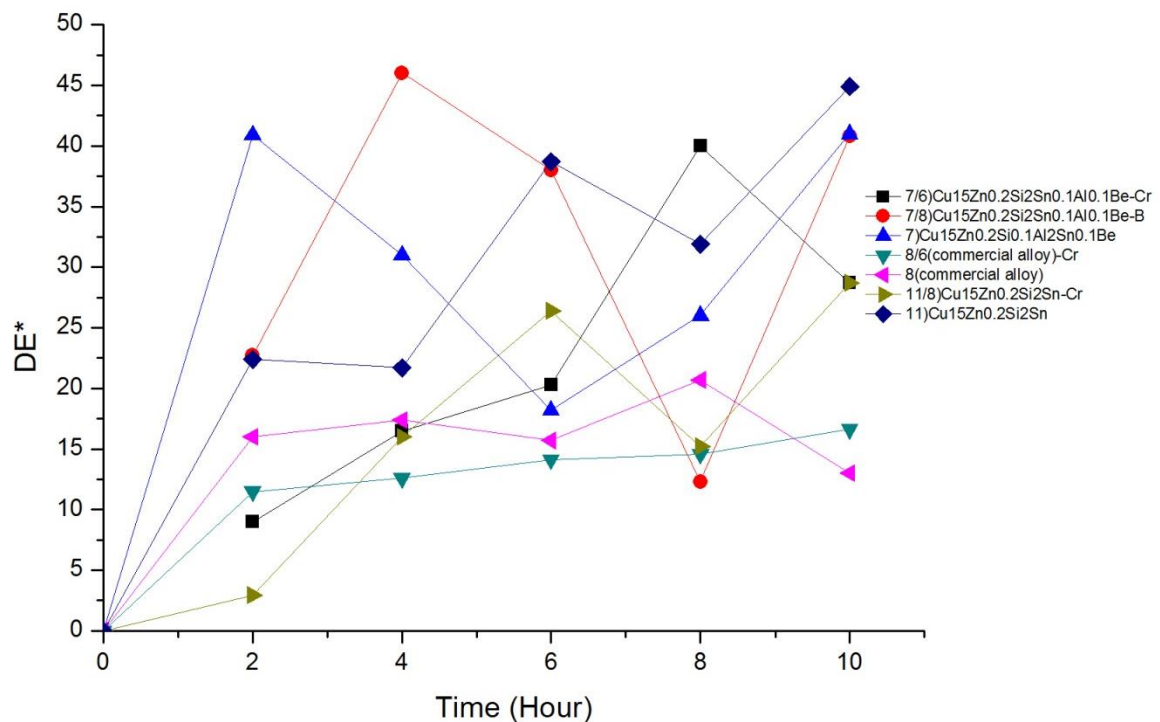


รูป 2.5.5 ผลค่าความแตกต่างจากการทดสอบชิ้นงานกลุ่ม 2)Cu5Sn 4)Cu15Zn3Sn 5)Cu3Si 6)Cu20.6Zn2.25Si ร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน ในเนื้อเทียมตามมาตรฐาน EN1811



รูป 2.5.6 ผลค่าความแตกต่างจากการทดสอบชิ้นงานกลุ่ม 4)Cu15Zn3Sn 5)Cu3Si 6)Cu20.6Zn 2.25Si 9)Cu12Zn3Sn 10)Cu15Zn3Sn0.5Si ร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน ในเนื้อเทียมตามมาตรฐาน EN1811

รูป 2.5.6 แสดงความแตกต่างของค่า DE ในการทดสอบ ชิ้นงานกลุ่ม 4)Cu15Zn3Sn 5)Cu3Si 6)Cu20.6Zn 2.25Si 9)Cu12Zn3Sn 10)Cu15Zn3Sn0.5Si ที่ผ่านการเติมธาตุลดขนาดเกรนทำให้ค่าความต้านทานการหมองลดลงทั้งสิ้น ยกเว้น ชิ้นงาน 10/6) Cu15Zn3Sn0.5Si-Cr และ 4/6) Cu15Zn3Sn-Cr ที่พบการหมองต่ำอยู่ในระดับค่า DE ไม่ถึง 25



รูป 2.5.7 ผลค่าความแตกต่างสีจากการทดสอบชิ้นงานกลุ่ม 7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1AlBe 8)com mercial alloy 11) Cu15Zn0.2Si2Sn ร่วมกับธาตุลดขนาดเกรน ในเชิงเปรียบเทียบตามมาตรฐาน EN1811

รูป 2.5.7 ค่า DE ทดสอบชิ้นงานกลุ่ม 7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1AlBe 8)commercial alloy 11) Cu15Zn0.2Si2Sn ในเชิงเปรียบเทียบ พบว่า การเติมธาตุลดขนาดเกรน ทำให้ความต้านทานการหมองเพิ่มขึ้น ยกเว้น ชิ้นงาน 8/6)commercial alloy-Cr และ 11/8) Cu15Zn0.2Si2Sn-B

2.6 การทดสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

ผลการทดสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานทดสอบด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าจะใช้เครื่อง Potentiostat/Galvanostat Model : μ Autolab Type III ใช้เทคนิค Linear polarization โดยวัดค่า ศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเป็นเวลา 1200 วินาที ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น -0.25 โวลต์จากค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด อัตราการเพิ่มความต่างศักย์ 0.001 โวลต์/วินาที ทำการติดตั้งชิ้นงานที่เซลล์ทดสอบ ใช้ Platinum Rod เป็น Counter electrode และ Saturated calomel electrode (SCE) เป็น Reference electrode สารละลายทดสอบ คือ เหมือเทียม (NaCl 0.5% Urea 0.1% Lactic acid 0.1% ปรับ pH ให้เท่ากับ 6.6 ด้วย NH_4Cl)

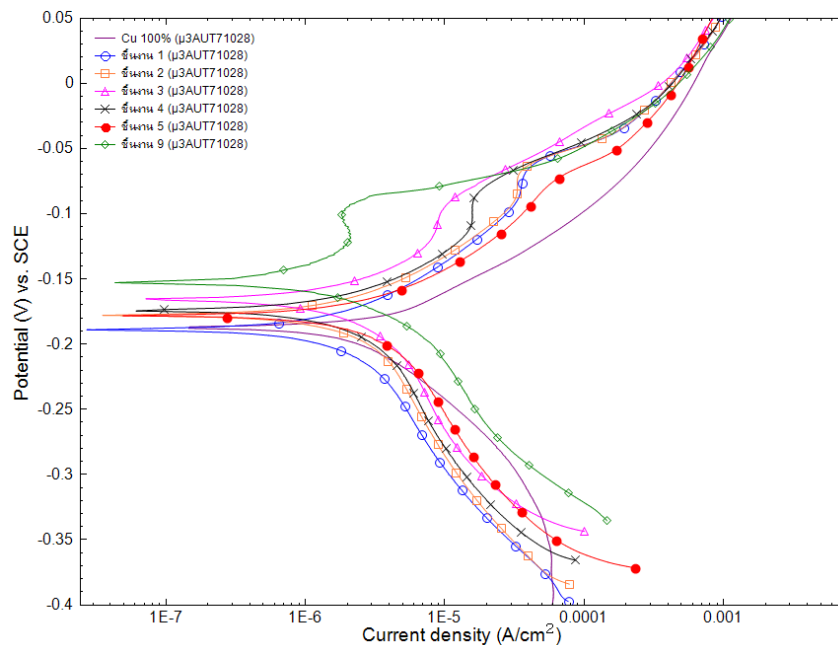
ปริมาตร 300 ml ทำการวิเคราะห์ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) จากเส้นโพลาริเซชัน เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณธาตุผสมดีบุก และสังกะสีในโลหะทองแดง (เส้นโพลาริเซชันในรูป 2.6.1) แสดงให้เห็นว่า โลหะทองแดงมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเท่ากับ -0.190 V ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดในชิ้นงานทดสอบกลุ่มนี้ โดยมีอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.005 mm/year การเติมธาตุผสมดีบุกในปริมาณ 7% โดยน้ำหนัก (ชิ้นงาน 3(Cu7Sn)) ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเท่ากับ -0.160 V ซึ่งสูงกว่าการเติมธาตุผสมดีบุกที่ 5% (ชิ้นงาน 2(Cu5Sn)) และ 3% (ชิ้นงาน 1(Cu3Sn)) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าโลหะผสมทองแดงดีบุกที่ 7% (ชิ้นงาน 3(Cu7Sn)) มีโอกาสเกิดการกัดกร่อนได้ยากกว่าการเติมธาตุผสมดีบุกที่ 5% (ชิ้นงาน 2(Cu5Sn)) และ 3% (ชิ้นงาน 1(Cu3Sn)) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน ซึ่งแสดงถึงอัตราการกัดกร่อนนั้น พบว่า การเติมธาตุผสมดีบุกที่ 7% (ชิ้นงาน 3(Cu7Sn)) นั้น มีอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.011 mm/year สูงกว่าการเติมธาตุผสมดีบุกที่ 5% (ชิ้นงาน 2(Cu5Sn)) (0.005 mm/year) และ 3% (ชิ้นงาน 1(Cu3Sn)) (0.004 mm/year) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า การเติมธาตุผสมดีบุกในปริมาณสูงจะส่งผลให้โลหะผสมมีโอกาสดำรงการกัดกร่อนได้ยาก เมื่อใช้งานในสิ่งแวดล้อมที่มีฤทธิ์การกัดกร่อน แต่เมื่อการกัดกร่อนเกิดขึ้นแล้ว โลหะผสมที่มีปริมาณดีบุก 7% จะมีค่าอัตราการกัดกร่อนของสูงกว่าโลหะผสมที่มีดีบุก 5% และ 3% เท่ากับ 2.2 และ 2.75 เท่า ตามลำดับ

สำหรับการเติมธาตุสังกะสีในปริมาณ 12% โดยน้ำหนักในโลหะผสมทองแดงดีบุก (ชิ้นงาน 4(Cu15Zn3Sn)) พบว่า โลหะผสมทองแดงสังกะสีดีบุก ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเท่ากับ -0.172 V ซึ่งเกิดการกัดกร่อนได้ยากกว่าโลหะผสมทองแดงดีบุก (ชิ้นงาน 1(Cu3Sn)) ที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเท่ากับ -0.184 V ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การเติมธาตุสังกะสีลงในโลหะผสมทองแดงดีบุกทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ยาก อย่างไรก็ตาม พบว่า อัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน 1(Cu3Sn) และ ชิ้นงาน 4(Cu15Zn3Sn) มีค่าอัตราการกัดกร่อนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คือ มีค่าเท่ากับ 0.004 mm/year และ 0.005 mm/year ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบการเติมธาตุผสมซิลิคอน 3% (ชิ้นงาน 5(Cu3Si)) กับการเติมธาตุผสมดีบุก 3% ในโลหะทองแดง (ชิ้นงาน 1(Cu3Sn)) นั้น พบว่า การเติมธาตุผสมซิลิคอนในโลหะทองแดง (ชิ้นงาน 5(Cu3Si)) ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ -0.171 V ส่วนการเติมธาตุผสมดีบุก (ชิ้นงาน 1(Cu3Sn)) ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเท่ากับ -0.184 V แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงาน 5(Cu3Si) เกิดการกัดกร่อนได้ยากกว่าชิ้นงาน 1(Cu3Sn) อย่างไรก็ตามพบว่า อัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน 1(Cu3Sn) และ ชิ้นงาน 5(Cu3Si) มีค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเท่ากับ 0.004 และ 0.006 mm/year ตามลำดับ

ชิ้นงาน 1(Cu3Sn), ชิ้นงาน 2(Cu5Sn), ชิ้นงาน 3(Cu7Sn) ชิ้นงาน 4(Cu15Zn3Sn) และ ชิ้นงาน 9 (Cu12Zn3Sn) แสดงพฤติกรรมการเกิดพาสซีฟฟิล์ม ที่ช่วงศักย์ไฟฟ้าประมาณ -0.084 V ถึง -0.111 V โดยค่าความหนาแน่นกระแสในช่องพาสซีฟ ซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงของฟิล์มนั้น พบว่า ชิ้นงาน 9 (Cu12Zn3Sn) มีความแข็งแรงของฟิล์มพาสซีฟมากที่สุดในชิ้นงานทดสอบกลุ่มนี้ ทั้งนี้สามารถเรียงลำดับความแข็งแรงของฟิล์มพาสซีฟจากมากไปน้อย คือ ชิ้นงาน 3(Cu7Sn), ชิ้นงาน 4(Cu15Zn3Sn), ชิ้นงาน 2(Cu5Sn) และ ชิ้นงาน 1(Cu3Sn) ตามลำดับ นอกจากนี้ ชิ้นงาน 9 (Cu12Zn3Sn) ยังเป็นชิ้นงานที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงที่สุด

คือ มีค่าเท่ากับ -0.153 V แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงาน 9 (Cu12Zn3Sn) เกิดการกัดกร่อนได้ยาก และมีอัตราการกัดกร่อน 0.002 mm/year ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดในชิ้นงานทดสอบกลุ่มนี้ด้วย



รูป 2.6.1 เส้นโพลาริเซชันของโลหะทองแดงและโลหะทองแดงผสม ชิ้นงาน 1(Cu3Sn), ชิ้นงาน 2(Cu5Sn), ชิ้นงาน 3(Cu7Sn), ชิ้นงาน 4(Cu15Zn3Sn), ชิ้นงาน 5(Cu3Si) และ ชิ้นงาน 9(Cu12Zn3Sn) ในสารละลายเหงื่อเทียม EN1811

ตารางที่ 2.6.1 ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของโลหะทองแดงและโลหะทองแดงผสม ชิ้นงาน 1(Cu3Sn), ชิ้นงาน 2(Cu5Sn), ชิ้นงาน 3(Cu7Sn), ชิ้นงาน 4(Cu15Zn3Sn), ชิ้นงาน 5(Cu3Si) และ ชิ้นงาน 9(Cu12Zn3Sn) ในสารละลายเหงื่อเทียม EN1811

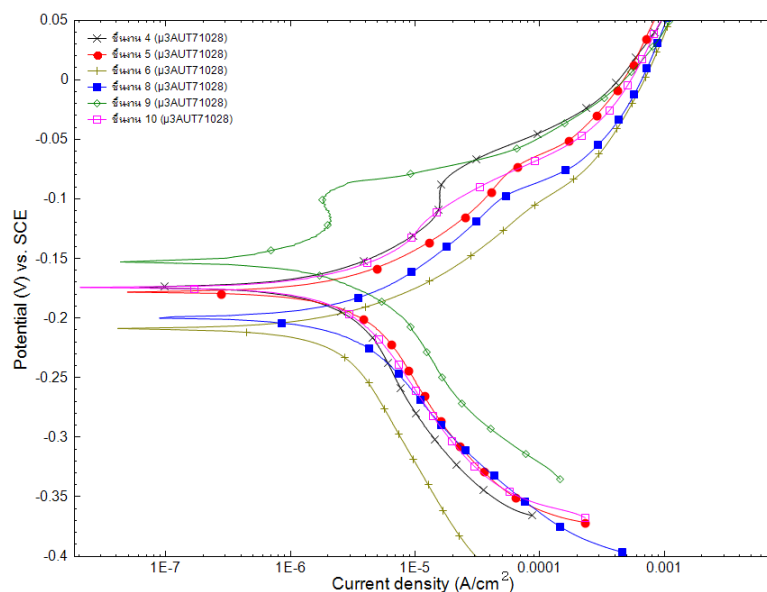
ชิ้นงาน	ส่วนผสมทางเคมี	Corrosion parameter				
		E_{corr} (V)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	E_{pit} (V)	I_p ($\mu A/cm^2$)	Corrosion rate (mm/year)
-	Cu 100%	-0.190	4.051			0.005
1	Cu 97% Sn 3%	-0.184	3.350	-0.068	34.88	0.004
2	Cu 95% Sn 5%	-0.173	4.443	-0.070	32.90	0.005
3	Cu 93% Sn 7%	-0.160	9.608	-0.097	8.76	0.011
4	Cu 82% Zn 15% Sn 3%	-0.172	4.590	-0.089	15.68	0.005
5	Cu 97% Si 3%	-0.171	5.178			0.006
9	Cu 85.0% Zn 12%Sn3%	-0.153	1.872	-0.074	1.99	0.002

เส้นโพลาริเซชันในรูปแบบที่ 2.6.2 แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงาน 9(Cu12Zn3Sn) และชิ้นงาน 4(Cu15Zn3Sn) แสดงพฤติกรรมการเกิดพาสซีฟฟิล์มในชิ้นงานทดสอบกลุ่มนี้ โดยฟิล์มพาสซีฟของชิ้นงาน 9(Cu12Zn3Sn) มีความแข็งแรงมากกว่าฟิล์มของชิ้นงาน ชิ้นงาน 4(Cu15Zn3Sn) อย่างเห็นได้ชัด ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงาน 9(Cu12Zn3Sn) มีค่าเท่ากับ -0.153 V ซึ่งสูงที่สุดในชิ้นงานทดสอบกลุ่มนี้ ทำให้ชิ้นงาน 9(Cu12Zn3Sn) เกิดการกัดกร่อนได้ยากกว่าชิ้นงานอื่น และยังพบว่าชิ้นงาน 9(Cu12Zn3Sn) มีอัตราการกัดกร่อนน้อยที่สุดในชิ้นงานทดสอบกลุ่มนี้ด้วย คือ มีค่าเท่ากับ 0.002 mm/year

กรณีโลหะผสมทองแดงดีบุกสังกะสี ชิ้นงาน 4(Cu15Zn3Sn) พบว่า มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเท่ากับ -0.172 V เมื่อเติมธาตุผสมซิลิกอน 0.5% ในโลหะผสมทองแดงดีบุกสังกะสี (ชิ้นงาน 10(Cu15Zn3Sn0.5Si)) มีผลทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นเท่ากับ -0.169 V และทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลงเพียงเล็กน้อย อย่างไม่มีนัยสำคัญ คือ มีค่าเท่ากับ 0.004 mm/year

กรณีโลหะผสมทองแดงซิลิกอน ชิ้นงาน 5(Cu3Si) เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงาน 8(Cu13Zn4Si1Mn)/Commercial alloy พบว่า ชิ้นงาน 5(Cu3Si) มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเท่ากับ -0.171 V ซึ่งสูงกว่าชิ้นงาน 8(Cu13Zn4Si1Mn)/Commercial alloy ดังนั้นชิ้นงาน 5(Cu3Si) จึงเกิดการกัดกร่อนได้ยากกว่าชิ้นงาน 8(Cu13Zn4Si1Mn)/Commercial alloy อย่างไรก็ตามพบว่า ชิ้นงาน 5(Cu3Si) และชิ้นงาน 8(Cu13Zn4Si1Mn)/Commercial alloy มีอัตราการกัดกร่อนที่เท่ากัน คือ เท่ากับ 0.006 mm/year

สำหรับโลหะผสมทองแดงสังกะสีซิลิกอน (ชิ้นงาน 6(Cu20.6Zn2.25Si)) พบว่า มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเท่ากับ -0.208 V ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดสำหรับชิ้นงานทดสอบในกลุ่มนี้ จึงทำให้ชิ้นงาน 6(Cu2.25Si20.6Zn) มีโอกาสเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายที่สุด โดยมีค่าอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.006 mm/year ซึ่งเท่ากับชิ้นงาน 5(Cu3Si) และชิ้นงาน 8(Cu13Zn4Si1Mn)/Commercial alloy



รูป 2.6.2 เส้นโพลาริเซชันของโลหะผสมทองแดง 4(Cu15Zn3Sn), ชิ้นงาน 5(Cu3Si), ชิ้นงาน 6(Cu20.6Zn2.25Si) , ชิ้นงาน 8(Cu13Zn4Si1Mn)/Commercial alloy, ชิ้นงาน 9(Cu12Zn3Sn) และชิ้นงาน 10(Cu15Zn3Sn0.5Si) ในสารละลายเหงื่อเทียม EN1811

ตาราง 2.6.2 ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของโลหะผสมทองแดง 4(Cu12Zn3Sn), ชิ้นงาน 5(Cu3Si), ชิ้นงาน 6(Cu20.6Zn2.25Si) , ชิ้นงาน 8(Cu13Zn4Si1Mn)/Commercial alloy, ชิ้นงาน 9(Cu12Zn3Sn) และ ชิ้นงาน 10(Cu15Zn3Sn0.5Si) ในสารละลายเหงื่อเทียม EN1811

ชิ้นงาน	ส่วนผสมทางเคมี	Corrosion parameter				
		E_{corr} (V)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	E_{pit} (V)	I_p ($\mu A/cm^2$)	Corrosion rate (mm/year)
4	Cu 82% Zn 15% Sn 3%	-0.172	4.590	-0.089	15.68	0.005
5	Cu 97% Si 3%	-0.171	5.178			0.006
6	Cu 77.15% Zn 20.6% Si 2.25%	-0.208	5.141			0.006
8	Cu 82% Zn 13% Si 4% Mn 1%	-0.195	4.810			0.006
9	Cu 85.0% Zn 12%Sn 3%	-0.153	1.872	-0.074	1.99	0.002
10	Cu 81.5% Zn 15% Sn 3.0% Si 0.5%	-0.169	3.812			0.004

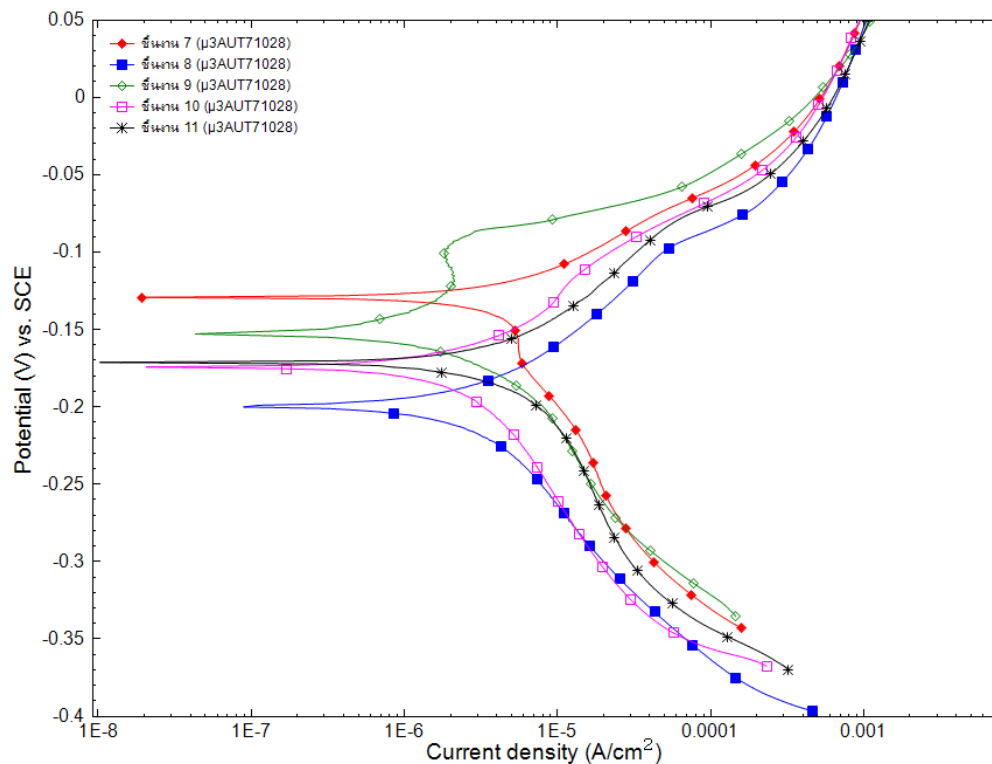
เส้นโพลาริเซชันในรูป 2.6.3 แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงาน 7(Cu15Zn2Sn0.1Si0.1Al0.05Be) ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเท่ากับ -0.130 V ซึ่งสูงที่สุดในชิ้นงานทดสอบกลุ่มนี้ จึงทำให้ชิ้นงาน 7(Cu15Zn2Sn0.1Si0.1Al0.05Be) เกิดการกัดกร่อนได้ยากกว่าชิ้นงานอื่น อย่างไรก็ตามพบว่า เมื่อมีการกัดกร่อนเกิดขึ้นแล้ว ชิ้นงาน 7(Cu15Zn0.1Si0.05Be0.1Al2Sn) จะมีอัตราการกัดกร่อนสูงกว่าชิ้นงานอื่น โดยมีค่าอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.034 mm/year

ชิ้นงาน 9(Cu12Zn3Sn) เป็นชิ้นงานเดียวในโลหะผสมทองแดงกลุ่มนี้ที่แสดงพฤติกรรมการเกิดพาสซีฟฟิล์ม ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.118 V ถึง -0.074 V และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงาน 9 (Cu12Zn3Sn) มีค่าเท่ากับ -0.153 V ซึ่งมีค่าสูงเป็นอันดับ 2 รองจาก ชิ้นงาน 7(Cu15Zn2Sn0.1Si0.1Al0.05Be) อย่างไรก็ตาม พบว่า ชิ้นงาน 9(Cu12Zn3Sn) มีอัตราการกัดกร่อนน้อยกว่าชิ้นงาน 7(Cu15Zn2Sn0.1Si0.1Al0.05Be) ประมาณ 17 เท่า

ชิ้นงาน 10(Cu15Zn3Sn0.5Si) และชิ้นงาน 11(Cu15Zn2Sn0.2Si) เป็นโลหะผสมทองแดงสังกะสีดิบและซิลิกอน มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนใกล้เคียงกัน คือ มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเท่ากับ -0.169 V และ -0.170 V ตามลำดับ โดยชิ้นงาน 11(Cu15Zn2Sn0.2Si) มีค่าอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.031 mm/year ซึ่งมากกว่าชิ้นงาน 10(Cu15Zn3Sn0.5Si) (0.004 mm/year) ประมาณ 7.75 เท่า

ชิ้นงาน 8(Cu13Zn4Si1Mn)/Commercial alloy มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเท่ากับ -0.195 V ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดในชิ้นงานทดสอบกลุ่มนี้ ดังนั้นชิ้นงาน 8(Cu13Zn4Si1Mn)/Commercial alloy จึงเกิดการกัด

กร่อนได้ง่ายที่สุด อย่างไรก็ตาม พบว่า ชิ้นงาน 8(Cu13Zn4Si1Mn)/Commercial alloy มีค่าอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.006 mm/year ซึ่งมีค่าสูงกว่าชิ้นงาน 10(Cu15Zn3Sn0.5Si) ประมาณ 1.5 เท่า



รูป 2.6.3 เส้นโพลาริเซชันของโลหะผสมทองแดง ชิ้นงาน 7(Cu15Zn2Sn0.1Si0.1Al0.05Be), ชิ้นงาน 8(Cu13Zn4Si1Mn) /Commercial alloy, ชิ้นงาน 9(Cu12Zn3Sn), ชิ้นงาน 10(Cu15Zn3Sn0.5Si) และชิ้นงาน 11(Cu15Zn2Sn0.2Si) ในสารละลายเกลือเทียม EN1811

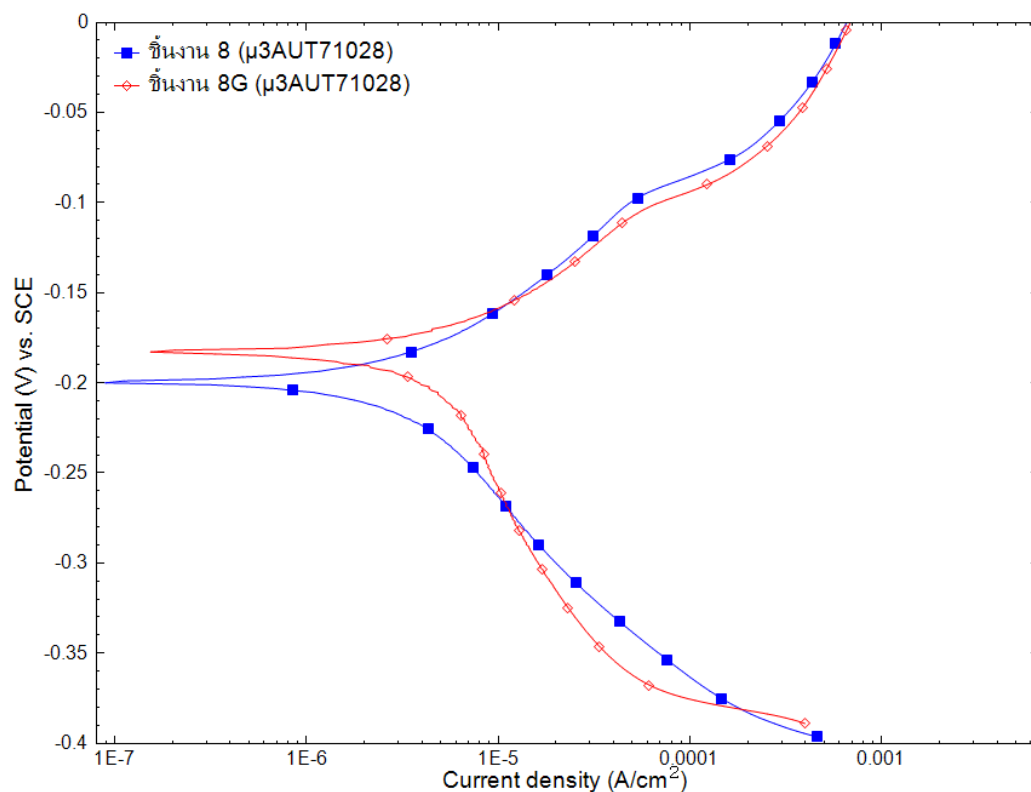
ตาราง 2.6.3 ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของโลหะผสมทองแดง ชิ้นงาน 7(Cu15Zn2Sn0.1Si0.1Al0.05Be), ชิ้นงาน 8(Cu13Zn4Si1Mn) /Commercial alloy, ชิ้นงาน 9(Cu12Zn3Sn), ชิ้นงาน 10(Cu15Zn3Sn0.5Si) และ ชิ้นงาน 11(Cu15Zn2Sn0.2Si) ในสารละลายเกลือเทียม EN1811

ชิ้นงาน	ส่วนผสมทางเคมี	Corrosion parameter				
		E_{corr} (V)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	E_{pit} (V)	I_p ($\mu A/cm^2$)	Corrosion rate (mm/year)
7	Cu 82.75% Zn 15% Sn 2.0% Si 0.1% Al 0.1% Be 0.05%	-0.130	29.028			0.034
8	Cu 85% Zn 13% Si 4% Mn 1%	-0.195	4.810			0.006
9	Cu 85.0% Zn 12%Sn3%	-0.153	1.872	-0.074	1.99	0.002
10	Cu 81.5% Zn 15% Sn 3.0% Si 0.5%	-0.169	3.812			0.004
11	Cu 82.8% Zn 15% Sn 2.0% Si 0.2%	-0.170	27.018			0.031

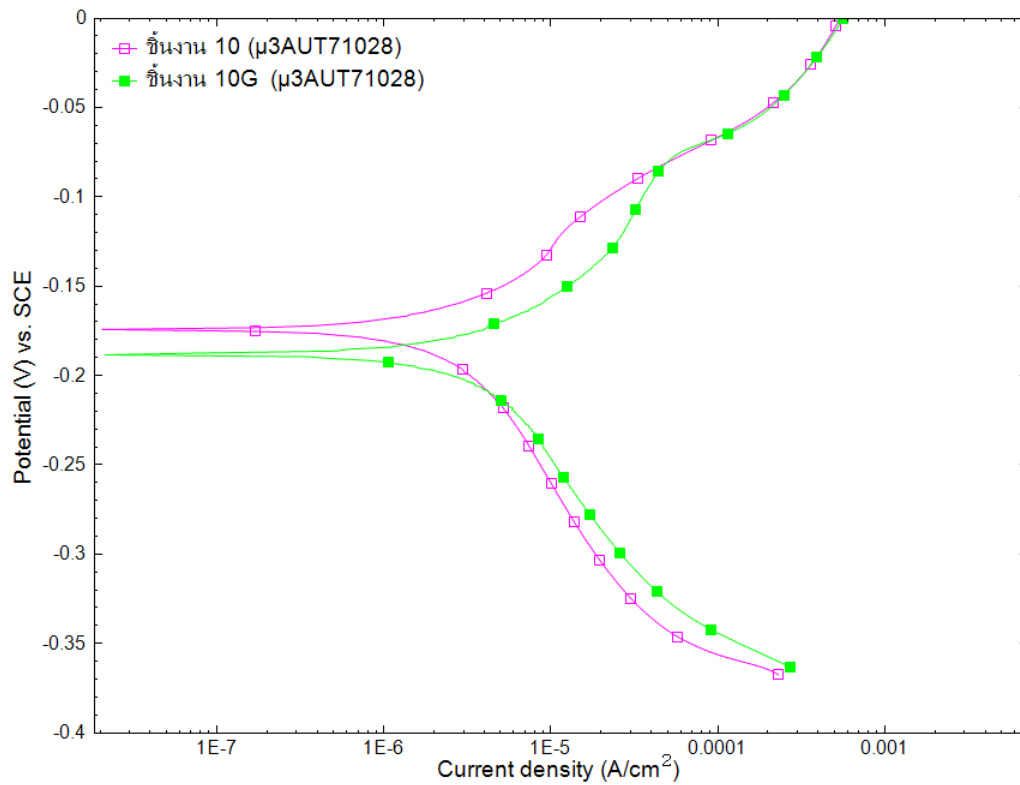
รูป 2.6.4 การเติมธาตุผสมโครเมียม 0.5% (ชิ้นงาน 8G(Cu13Zn4Si1Mn0.5Cr)) เพื่อลดขนาดเกรน ในโลหะผสมทองแดงสังกะสีซิลิกอนแมงกานีส (ชิ้นงาน 8(Cu13Zn4Si1Mn)/Commercial alloy) พบว่า ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น จาก -0.195 V เป็น -0.182 V โดยมีอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเพิ่มขึ้น 2.3 เท่า จาก 0.006 mm/year เป็น 0.014 mm/year

รูป 2.6.5 การเติมธาตุผสมโครเมียม 0.5% (ชิ้นงาน 10G(Cu15Zn3Sn0.5Si0.5Cr)) เพื่อลดขนาดเกรน ในโลหะผสมทองแดงสังกะสีดีบุกซิลิกอน (ชิ้นงาน 10(Cu15Zn3Sn0.5Si)) พบว่า ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลง จาก -0.169 V เป็น -0.191 V โดยมีอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเพิ่มขึ้น 3.5 เท่า จาก 0.004 mm/year เป็น 0.014 mm/year

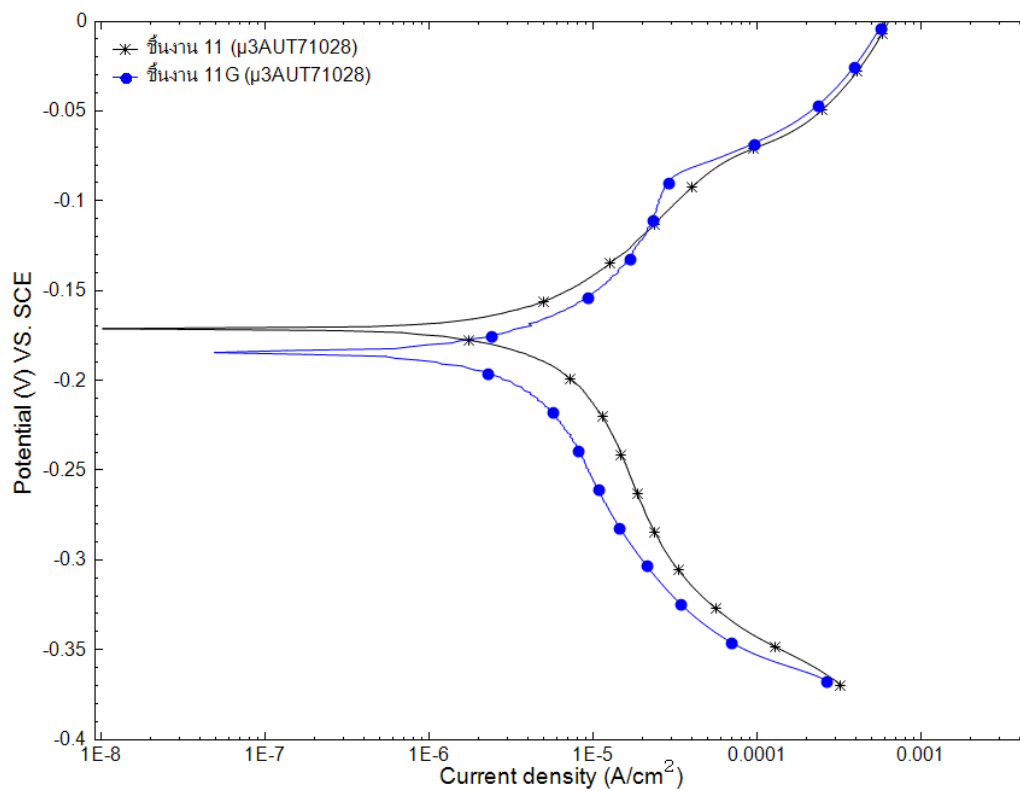
รูป 2.6.6 การเติมธาตุผสมโบรอน 0.02% (ชิ้นงาน 11(Cu15Zn2Sn0.2Si0.02B)) เพื่อลดขนาดเกรน ในโลหะผสมทองแดงสังกะสีดีบุกซิลิกอน (ชิ้นงาน 11(Cu15Zn2Sn0.2Si)) พบว่า ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลง จาก -0.170 V เป็น -0.182 V โดยมีอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเพิ่มขึ้น 1.4 เท่า จาก 0.031 mm/year เป็น 0.043 mm/year



รูป 2.6.4 เส้นโพลาริเซชันของโลหะผสมทองแดง ชิ้นงาน 8(Cu13Zn4Si1Mn)/Commercial alloy และ ชิ้นงาน 8G(Cu13Zn4Si1Mn0.5Cr) ในสารละลายเกลือเทียม EN1811



รูป 2.6.5 เส้นโพลาริเซชันของโลหะผสมทองแดง ชิ้นงาน 10(Cu15Zn3Sn0.5Si) และ ชิ้นงาน 10G(Cu15Zn3Sn0.5Si0.5Cr) ในสารละลายเหงื่อเทียม EN1811



รูป 2.6.6 เส้นโพลาริเซชันของโลหะผสมทองแดงของชิ้นงาน 11(Cu15Zn2Sn0.2Si) และ ชิ้นงาน 11G(Cu15Zn2Sn0.2Si0.02B) ในสารละลายเหงื่อเทียม EN1811

ตาราง 2.6.4 ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของโลหะผสมทองแดง ขึ้นงาน 8(Cu13Zn4Si1Mn)/Commercial alloy, ขึ้นงาน 8G(Cu13Zn4Si1Mn0.5Cr), ขึ้นงาน 10(Cu15Zn3Sn0.5Si), ขึ้นงาน 10G(Cu15Zn3Sn0.5Si0.5Cr), 11(Cu15Zn2Sn0.2Si) และ ขึ้นงาน 11G(Cu15Zn2Sn0.2Si0.02B) ในสารละลายเกลือเทียม EN1811

ขึ้นงาน	ส่วนผสมทางเคมี	Corrosion parameter		
		E _{corr} (V)	I _{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Corrosion rate (mm/year)
8	Cu 82% Zn 13% Si 4% Mn 1%	-0.195	4.810	0.006
8G	Cu 81.5% Zn 13% Si 4% Mn 1% Cr 0.5%	-0.182	11.879	0.014
10	Cu 81.5% Zn 15% Sn 3.0% Si 0.5%	-0.169	3.812	0.004
10G	Cu 81% Zn 15% Sn 3.0% Si 0.5% Cr 0.5%	-0.191	12.452	0.014
11	Cu 82.8% Zn 15% Sn 2.0% Si 0.2%	-0.170	27.018	0.031
11G	Cu 82.78% Zn 15% Sn 2.0% Si 0.2% B 0.02%	-0.182	37.254	0.043

2.7 สรุปผลการทดลอง

เนื่องจากข้อมูลสำหรับพิจารณามีรายละเอียดแยกย่อยมาก อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องมุ่งเน้นตามจุดประสงค์งานวิจัยหลักเพื่อสร้างทองแดงผสมที่เหมาะสมสำหรับการหล่อเครื่องประดับ ด้วยเติมธาตุผสมรองและ ธาตุปรับลดขนาดเกรน โดยคำนึงถึงความเป็นไปได้ในการใช้งานจริง และสามารถผลิตเองในสถานประกอบการได้ โดยเบื้องต้นจะแยกประเภทตามสีเพื่อการใช้งานได้เป็น 2 สี

3. กลุ่มทองแดงผสม สีชมพู

ได้แก่ 1)Cu3Sn 2)Cu5Sn 3)Cu7Sn โดยพบว่ากลุ่มที่ให้การหล่อหลอมได้ดีและไม่แข็งเกินไป ได้แก่ ขึ้นงาน 2) Cu5Sn โดยทั่วไปกลุ่มนี้เหมาะสมกับการหล่อใช้อุณหภูมิ 1080 องศาเซลเซียส มีอัตราการหดตัว 3.9 % สามารถเติมธาตุลดขนาดเกรน ได้แก่ ทองแดงผสมโครเมียม ที่ทำให้เกรนเล็กลง จาก 3 มม.เป็น 0.9 มม. แต่มีความแข็งแรงสูงสุดและ อัตรายืดตัวลดลงเล็กน้อย

การเพิ่มปริมาณดีบุกในช่วง 3-7 % ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จาก 69.4 -93.4 HV_{0.2} ค่าการไหลของน้ำโลหะ(Fluidity) ในช่วง 8.7-14 ซม. มีค่าความแข็งแรงสูงสุดเพิ่มขึ้นในช่วง 277.6-328.6 MPa และ อัตราการยืดตัวเพิ่มขึ้นในช่วง 48.9-62.8% และมีขนาดเกรนเฉลี่ยที่ 3-4.8 มม การเติมธาตุผสมดีบุกในปริมาณสูงจะส่งผลให้โลหะผสมมีโอกาสเกิดการกัดกร่อน แต่เมื่อการกัดกร่อนเกิดขึ้นแล้ว โลหะผสมที่มีปริมาณดีบุก 7% จะ

มีค่าอัตราการกัดกร่อนของสูงกว่าโลหะผสมที่มีดีบุก 5% และ 3% เท่ากับ 2.2 และ 2.75 เท่า ตามลำดับ ทำให้ทองแดงผสมดีบุกเช่น 1)Cu3Sn เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า DE ต่ำที่สุดในกลุ่มทดลอง

4. กลุ่มทองแดงผสมสีเหลือง ที่แยกย่อยออกเป็นทองเหลือง และบรอนซ์

ได้แก่ 8) Commercial alloy 9)Cu12Zn3Sn 10)Cu15Zn3Sn0.5Si 6)Cu20.5Zn2.25Si 4)Cu15Zn3Sn 7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1AlBe 11)Cu15Zn0.2Si2Sn

โดยพบว่ากลุ่มที่มีค่าการไหลตัวของน้ำโลหะได้ดีได้แก่ 6)Cu20.5Zn2.25Si (ที่ fluidity 15.8 ซม.)

10)Cu15Zn3Sn0.5Si (ที่ fluidity 15.2 ซม.) 11)Cu15Zn0.2Si2Sn (ที่ fluidity 14.7 ซม.) 8)

Commercial alloy (ที่ fluidity 13.8 ซม.) 4)Cu15Zn3Sn (ที่ fluidity 13.3 ซม.) จากผลการเติมธาตุผสมเพื่อการหล่อ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

ซิลิคอน ช่วยส่งเสริมการหล่อ ทำให้การไหลของน้ำโลหะดีขึ้น ชื่นงาน 4)Cu15Zn3Sn ที่เติม ซิลิคอน 0.5% มีค่าการไหลของน้ำโลหะเปลี่ยนแปลงจาก 13.3 ซม. เป็น 15.2 ซม. ดังใน ชื่นงาน 10)Cu15Zn3Sn0.5Si ทำให้ขนาดเกรนโตขึ้นจาก 1.6 มม. เป็น 3.3 มม. รวมถึงมีค่าความแข็งแรงสูงสุดลดลงจาก 278 MPa (4)Cu15Zn3Sn เป็น 264 MPa (10)Cu15Zn3Sn0.5Si

สังกะสี ที่ใช้ในปริมาณเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการขยายของเกรนดัง ชื่นงาน 5) Cu3Si และ 6) Cu20.6Zn2.25Si ซึ่งมีการเติมสังกะสี 20.6% ทำให้เกรนใหญ่จาก ขนาดเกรน 1 มม. (5) Cu3Si เป็น 2.4 มม. (6) Cu20.6Zn2.25Si รวมถึงสังกะสีเพิ่มการไหลตัวจาก จาก 12.5 ซม. (5)Cu3Si เป็น 15.8 ซม. (6)Cu20.6Zn2.25Si) สังกะสีช่วยเพิ่มความแข็งแรงสูงสุดจาก 315 MPa (5) Cu3Si เป็น 430.4 MPa (6) Cu20.6Zn2.25Si) แต่ลดอัตรายืดตัวประมาณ 15% สำหรับการเติมธาตุสังกะสีลงในโลหะผสมทองแดงดีบุกทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ยาก ดัง ชื่นงาน 4(Cu3Sn15Zn))

แมงกานีสร่วมกับซิลิคอน พบในอัลลอยการค้า 8)Commercial alloy (มี ซิลิคอน 3.3-4% แมงกานีส 0.9-1.3% สังกะสี 15-16%) มีขนาดเกรน 3.1 มม. เนื่องจากมี ซิลิคอนสูง ทำให้เกรนขนาดใหญ่ และ มีค่าความแข็งแรงสูงสุดสูงที่ 461.45 MPa เนื่องจากการเติม แมงกานีส โดยมีอัตราการยืดตัวปานกลาง ที่ 59% สามารถอบบ่มเพิ่มความแข็งแรง หรือสร้างสมบัติสปริงได้

อะลูมิเนียม และเบริลเลียม โดยในงานวิจัยใช้ปริมาณเติมที่ 0.1% ทำให้ ชื่นงาน 7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Al0.1Be มีขนาดเกรนเล็กที่ 1.9 มม. ทำให้ ค่าความแข็งแรงสูงสุด เพิ่มขึ้นจาก 224 (11) Cu15Zn0.2Si2Sn) MPa เป็น 260 (7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Al0.1Be) MPa โดยค่าอัตราการยืดตัว เพิ่มขึ้นจาก 51.6% (7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Al0.1Be) เป็น 83.48% (11) Cu15Zn0.2Si2Sn)

ผลการเติมธาตุผสมต่อสีผิว พบว่าในการเติมสังกะสี ซิลิคอน อะลูมิเนียม แมงกานีส และ ดีบุกทำให้ ค่า a ลดลงสีเหลืองที่ถูกกลสีออกเคลือบเขียวดังพบใน ชื่นงาน 8)Commercial alloy 6)Cu20.6Zn2.25Si และ 7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Be0.1Al 9)Cu12Zn3Sn 10)Cu15Zn3Sn0.5Si และ 11)Cu15Zn0.2Si2Sn อีกทั้ง การเติมสังกะสี ดีบุก ซิลิคอน อะลูมิเนียม แมงกานีสยังเพิ่มค่า b ซึ่งทำให้ ชื่นงาน มีสีเหลืองมากขึ้น

7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Be0.1Al และ 11)Cu15Zn0.2Si2Sn มีอะลูมิเนียมและ ซิลิคอนทำให้เพิ่มสีเหลืองสูงขึ้นโดยมีค่า a เพิ่มขึ้น b ไม่เปลี่ยนแปลง

จากผลการทดลองสามารถเปรียบเทียบความต้านทานการหมองจากสูงไปต่ำ ในช่วง 10 ชม.ในเหงื่อเทียมได้แก่ 8) Commercial alloy >9)Cu12Zn3Sn 10)Cu15Zn3Sn0.5Si> 6)Cu20.5Zn2.25Si> 4)Cu15Zn3Sn> 1)Cu3Sn> 5)Cu3Si>2)Cu5Sn>3)Cu7Sn > 7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1AlBe> 11)Cu15Zn0.2Si2Sn โดยในกลุ่มที่มีการเปลี่ยนสีแบบค่อยเป็นค่อยไป ได้แก่ 8) Commercial alloy >9)Cu12Zn3Sn>1)Cu3Sn เนื่องจากกราฟไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และพบว่าชิ้นงาน 9 (Cu12Zn3Sn) ยังเป็นชิ้นงานที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงที่สุด คือ มีค่าเท่ากับ -0.153 V เกิดการกัดกร่อนได้ยาก และมีอัตราการกัดกร่อน 0.002 mm/year

หากพิจารณาการเติมธาตุลดขนาดเกรน พบว่าการเติมธาตุดังกล่าวส่วนใหญ่ลดความแข็งแรงและอัตราการยึดตัวในปริมาณหนึ่ง ลดความต้านทานการหมอง เพิ่มการกัดกร่อนในสภาวะเหงื่อเทียม ยกเว้น ชิ้นงาน 10/6) Cu15Zn3Sn0.5Si-Cr และ 4/6) Cu15Zn3Sn-Cr ที่พบการหมองต่ำอยู่ในระดับค่า DE ไม่ถึง 25 และชิ้นงาน 4/5)Cu15Zn3Sn-Zr ที่พบการหมองต่ำอยู่ในระดับค่า DE ไม่ถึง 20 และชิ้นงาน 8/6)commercial alloy-Cr และ 11/8) Cu15Zn0.2Si2Sn-B

จากผลสรุปข้างต้นสามารถพิจารณาเลือกทองแดงอัลลอยที่มีความต้านทานการหมองสูง หล่อได้ง่าย และสามารถเติมธาตุปรับลดขนาดเกรนได้ ซึ่งมีหลายกลุ่มได้แก่ 2)Cu5Sn 10)Cu15Zn3Sn0.5Si 6)Cu20.5Zn2.25Si (11) Cu15Zn0.2Si2Sn) 9)Cu12Zn3Sn 8) Commercial alloy และ 5)Cu3Si โดยสามารถเลือกเติมธาตุลดขนาดเกรนในกลุ่มสารประกอบโบรอน ทองแดงผสมโครเมียม ทองแดงผสมเซอร์โคเนียม และทองแดงผสมเหล็ก โดยเติมไม่เกิน 2 % ของน้ำหนักรวมเพื่อป้องกันการเกิดผิวขรุขระและจุดแข็งที่ผิวงาน โดยสามารถสรุปรวมของการเติมธาตุผสมสำหรับทองแดงผสมและแนวทางการนำไปใช้งานได้ตามตารางที่ 2.7.1 และ 2.7.2 อีกทั้งยังสามารถผลิตอัลลอยทองเหลืองผสมที่เหมาะสมกับการหล่อเรซิน 3D-Printing ในรูปแบบชิ้นงานตาข่ายเล็กละเอียดด้วย ทองเหลืองเส้น โดยมีส่วนผสมทองแดง 67-69% สังกะสี 28-30 % ซิลิคอน 3 % ซึ่งมีความแข็งแรงสูงคงรูปได้ดี และ โหลตัวดีที่อุณหภูมิหล่อไม่เกิน 1000 องศาเซลเซียส ดังรูป 2.7.1

ตารางที่ 2.7.1 แสดงอิทธิพลของธาตุผสมและแนวทางการนำไปใช้งานสำหรับทองแดงผสมในงานวิจัยฯ

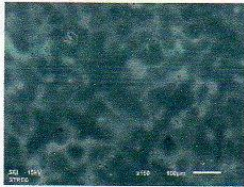
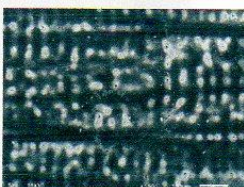
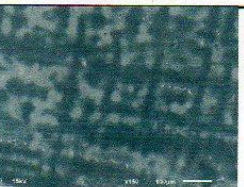
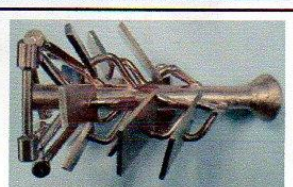
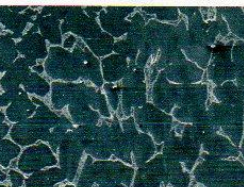
ธาตุ	ปริมาณ(wt%)	ผลลัพธ์	สูตรที่แนะนำ	จุดเด่น	ข้อควรระวัง
ดีบุกSn	3-7%	*เพิ่มการไหลตัวน้ำโลหะ+ความแข็ง + ความแข็งแรง+ อัตราการยึดตัว+ อัตราการกัดกร่อน+ มีสีชมพู ลดสีเหลือง	2)Cu5Sn	เหมาะกับงานหล่อที่ต้องการโลหะสีแดงอมชมพู ไม่เกิดควัน หล่อหลอมสะดวก	เติมดีบุก ที่ 9-10 % เกิดการหดตัวอย่างรุนแรง ควบคุมตามดยาก โลหะแข็งสูงแม้จะหล่อง่าย
ดีบุกSn สังกะสีZn	3% 12-13%	*เพิ่มการไหลตัวน้ำโลหะ+ความแข็ง	4)Cu15Zn3Sn 9)Cu12Zn3Sn	เหมาะกับงานหล่อที่ต้องการโลหะสีเหลือง ความแข็งแรงไม่มาก สามารถดัดแปรรูปได้ดี	พิจารณาความแข็งและความแข็งแรงให้เหมาะสมกับตัวเรือนเครื่องประดับ
ซิลิคอน Si	0.5-3.5 %	*เพิ่มการไหลตัวน้ำโลหะ+ความแข็ง *ลดอัตราการยึดตัว+อัตราการกัดกร่อน+สีเหลือง	5)Cu3Si	เหมาะกับงานหล่อที่ต้องการโลหะสีเหลือง ความแข็งแรงไม่มาก สามารถดัดแปรรูปได้ดี	พิจารณาความแข็งและความแข็งแรงให้เหมาะสมกับตัวเรือนเครื่องประดับ
สังกะสี Zn ซิลิคอน Si	13-28% 0.5-3.5%	*เพิ่มการไหลตัวน้ำโลหะ+ความแข็ง *ลดอัตราการยึดตัว+อัตราการกัดกร่อน+สีเหลือง	6)Cu20.Zn 2.25Si 10)Cu15Zn3Sn0.5Si Cu28Zn 3Si	*Cu20.Zn 2.25Siและ Cu15Zn3Sn0.5Si เหมาะกับงานหล่อที่ต้องการโลหะสีเหลือง ความแข็งแรงไม่มาก สามารถดัดแปรรูปได้ดี * Cu28Zn 3Siเหมาะกับงานหล่อ เรซิน 3D-Printing	พิจารณาความแข็งและความแข็งแรงให้เหมาะสมกับตัวเรือนเครื่องประดับ
อะลูมิเนียม Al เบริลเลียม Be	0.1% 0.1%	*ลดการไหลตัวน้ำโลหะ *คงอัตราการยึดตัว *ลดอัตราการกัดกร่อน	7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1Al0.1Be	*เหมาะกับงานหล่อที่ต้องการโลหะสีเหลือง ความแข็งแรงไม่มาก สามารถดัดแปรรูปได้ดี สีเหลืองสวยคล้ายทองคำ 18k	พิจารณาการใช้งานควบคู่กับการปรับสภาพการหล่อที่อุณหภูมิสูง
โครเมียม Cr	0.1-0.5%	*ลดขนาดเกรน *ลดตามด	เติมได้ในทุกอัลลอยที่ต้องการสีเหลือง แต่สำหรับ สีชมพู-แดง ต้องระวังเนื่องจากกดสีมาก	*เหมาะสมกับงานหนาเรียบ กว้าง ลดตามดและการหดตัว *ลดทอนสีเหลือง และเพิ่มความแข็งแม้เติมในปริมาณน้อย	พิจารณาความแข็งและความแข็งแรงให้เหมาะสมกับตัวเรือนเครื่องประดับ

โบรอน B	0.1-1%	*ลดขนาดเกรน *ลดตามด	นิยมเติมใน CuผสมZn Si Mn	*มักสูญเสียง่ายทำให้ นิยมใช้กับการนำเศษเก่า กลับมาใช้ใหม่	มักเกิดผิวทองแดง บนชิ้นงานต้องใน เวลาในการขัดแต่ง เพิ่มขึ้น
เซอร์โคเนียม เหล็ก	0.1-1% 0.1-1%	*ลดขนาดเกรน *ลดตามด	นิยมเติมในกลุ่ม ทองแดงผสม สังกะสี ดีบุก และ ซิลิคอน ที่มีสี เหลือง	เป็นธาตุลดขนาดเกรนที่ มีประสิทธิภาพ ในบาง กลุ่มสามารถหล่อค้ำใน เศษเก่าที่นำไปหลอมซ้ำ	หากมีปริมาณสูงจะ เกิดจุดแข็ง และเป็น พิษในเนื้อโลหะ
แมงกานีสMn และ ซิลิคอนSi	1-1.3% 3-4%	*เพิ่มการไหลตัวน้ำ โลหะ+ความแข็ง *ลดอัตราการยัด ตัว+อัตราการกัด กร่อน+สีเหลือง	8) commercial alloy Cu13Zn3-4Si1-1.3Mn	*หล่อง่าย จุดหลอมเหลว ต่ำ *เพิ่มความแข็งแรงจาก การอบตกตะกอนได้	พิจารณาความแข็ง และความแข็งแรงให้ เหมาะสมกับตัว เรือนเครื่องประดับ

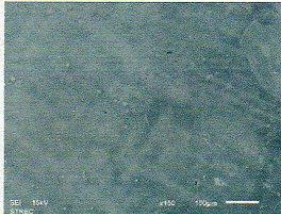
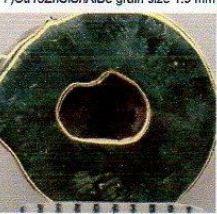
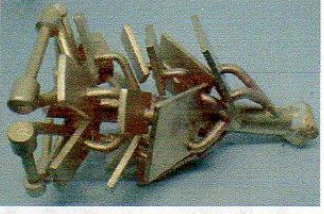
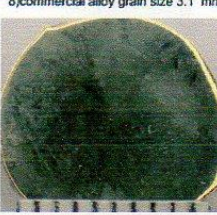
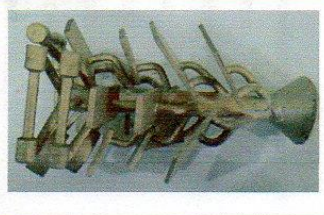
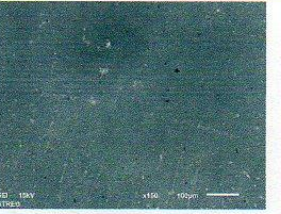
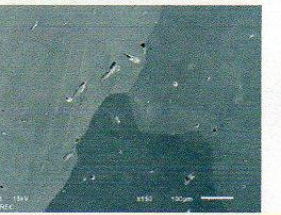
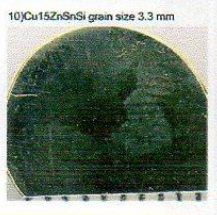
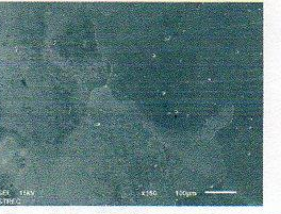
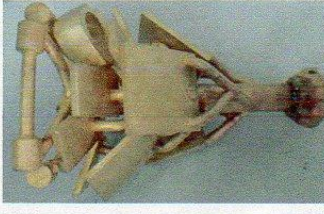
ตารางที่ 2.7.2 สรุปสมบัติการหล่อ สมบัติทางกล และ ผลลัพธ์การกัดกร่อนจากผลการทดลองทั้งหมด

สูตรชิ้นงานทดสอบ	1. Castability ความสามารถในการหล่อ		2. Mechanical propertiesสมบัติทางกล		
	Fluidity	Shrinkage	Ultimate tensile strength	Elongation	Hardness
	mm	%	Mpa	%	HV0.2
1)Cu3Sn	8.7	n/a	277.65	48.9	69.4
2)Cu5Sn	9.2	3.9	328.6	62.8	87.6
3)Cu7Sn	14	n/a	325.7	62.6	93.4
4)Cu15Zn3Sn	13.3	5.1	278	65.6	72.9
5)Cu3Si	12.5	n/a	315	75.53	79.9
6)Cu20.5Zn2.25Si	15.8	n/a	430.4	52.93	90.8
7)Cu15Zn0.2Si2Sn0.1AlBe	10.2	3.6	260	51.6	68.7
8) Commercial alloy (Cu13Zn4Si1Mn)	13.8	4.7	461.45	59	110.6
9)Cu12Zn3Sn	11.2	4	204	53.2	59.5
10)Cu15Zn3Sn0.5Si	15.2	4.8	264	74.4	78.7
11)Cu15Zn0.2Si2Sn	14.7	5.3	224	84	65.2
Remarks:	n/a ไม่ได้รับการตรวจสอบ				

ตารางที่ 2.7.2 (ต่อ) สรุปลสมบัติการหล่อ สมบัติทางกล และ ผลลัพธ์การกัดกร่อนจากผลการทดลองทั้งหมด

สูตรชิ้นงานทดสอบ	3. Microstructure พัฒนาโครงสร้างจุลภาค		
	โครงสร้างจุลภาค(BEI)	ขนาดเกรน	ผิวหล่อ
1)Cu3Sn		1)Cu3Sn grain size 4.8 mm 	
2)Cu5Sn		2)Cu5Sn grain size 3 mm 	
3)Cu7Sn		3)Cu7Sn grain size 4.5 mm 	
4)Cu15Zn3Sn		4)Cu15Zn3Sn grain size 1.6 mm 	
5)Cu3Si		5)Cu3Si grain size 1 mm 	
6)Cu20.5Zn2.25Si		6)Cu20.6ZnSi grain size 2.4 mm 	

ตารางที่ 2.7.2 (ต่อ) สรุปสมบัติการหล่อ สมบัติทางกล และ ผลลัพธ์การกัดกร่อนจากผลการทดลองทั้งหมด

สูตรชิ้นงานทดสอบ	3. Microstructure พัฒนาโครงสร้างจุลภาค		
	โครงสร้างจุลภาค(BEI)	ขนาดเกรน	ผิวหล่อ
7) Cu15Zn0.2Si2Sn0.1		7) Cu15ZnSiSnAlBe grain size 1.9 mm 	
8) Commercial alloy		8) commercial alloy grain size 3.1 mm 	
9) Cu12Zn3Sn		9) Cu12Zn3Sn grain size 2.95 mm 	
10) Cu15Zn3Sn0.5Si		10) Cu15ZnSiSnSi grain size 3.3 mm 	
11) Cu15Zn0.2Si2Sn		11) Cu15ZnSiSn grain size 3.4 mm 	

ตารางที่ 2.7.2 (ต่อ) สรุปลักษณะการหล่อ สมบัติทางกล และ ผลลัพธ์การกัดกร่อนจากผลการทดลองทั้งหมด

สูตรชิ้นงานทดสอบ	4.Tarnish resistanceความต้านทานการหมอง(เหลืองเทียม)(ระบบ CIE)									
	a*	b*	ค่า DE	ค่า DE	ค่า DE	(E _{corr})	(I _{corr})	E _{pit}	I _p	Corrosion rate
			2 hr	6 hr	10hr					(mm/year)
1)Cu3Sn	13.4	21.8	7.5	7.52	22.5	-0.184	3.35	-0.068	34.88	0.004
2)Cu5Sn	11.49	20	17.26	28.6	33.6	-0.173	4.443	-0.07	32.9	0.005
3)Cu7Sn	9.3	20.3	10.8	31.9	39.6	-0.16	9.608	-0.097	8.76	0.011
4)Cu15Zn3Sn	4.4	22.59	6.3	15	20.9	-0.172	4.59	-0.089	15.68	0.005
5)Cu3Si	7.13	20	7.7	39	28.7	-0.171	5.178	-	-	0.006
6)Cu20.5Zn2.25Si	1.25	20.3	11.4	19.9	20.6	-0.208	5.141	-	-	0.006
7)Cu15Zn0.2Si2Sn n0.1Al0.1Be	4.68	23.9	40.9	18.2	41	-0.13	29.03	-	-	0.034
8) Commercial alloy(Cu13Zn4Si1 Mn)	2.07	18.07	16	15.7	13	-0.195	4.81	-	-	0.006
9)Cu12Zn3Sn	5.8	22.9	5.1	12.5	18.2	-0.153	1.872	-0.074	1.99	0.002
10)Cu15Zn3Sn0.5 Si	1.6	23.66	17.2	42	19.2	-0.169	3.812	-	-	0.004
11)Cu15Zn0.2Si2Sn	2.03	24.27	22.4	38.7	44.9	-0.17	27.02	-	-	0.031

จากการทดลองผลิตชิ้นงานทองแดงผสมพบว่าการใช้งานบางกลุ่มจำเป็นต้องปรับปรุงส่วนผสมทางเคมีเพื่อเพิ่มสมบัติทางกลและ ความสามารถในการไหลตัวของน้ำโลหะดังตัวอย่างชิ้นงานแหวนม้งลวดในภาพ 2.7.1 ที่ผลิตจากการหล่อโดยตรงจากเรซิน 3D-Printing ซึ่งต้องการความแข็ง ความแข็งแรงสูงเนื่องจาก ชิ้นงานบางมาก และ ต้องการการไหลตัวของน้ำโลหะที่ดี เพื่อให้หล่อได้เต็ม และสามารถใช้งานได้เหมาะสม ทางคณะผู้วิจัยจึงตัดสินใจผลิตทองเหลืองเกรดใหม่ที่มีความแข็งและความแข็งแรงสูง รวมถึงมีความสามารถในการไหลตัวของน้ำโลหะดีเยี่ยมซึ่งมักจะมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียส และเนื่องจากพบว่าสถานประกอบการนิยมใช้ ทองเหลืองเส้นที่มีสังกะสี 28-30 % เพื่อหล่อเครื่องประดับจึงนำมาปรับปรุง ด้วยการเติมสารประกอบซิลิคอน ได้ส่วนผสมทองเหลืองที่มีความแข็งแรงสูง ไหลตัวดี โดยมีสังกะสี 25-28% ซิลิคอน3% ดังรูป 2.7.1



รูป 2.7.1 แสดงตัวอย่างชิ้นงานทองเหลืองCu28Zn3Si ที่เหมาะสมสำหรับการหล่อเรซิน 3D-printing เนื่องจากไหลตัวง่าย แข็งแรงสูง คงรูปได้ดี

2.7.1 แผนการจัดอบรมการความรู้จากการวิจัยเพื่อพัฒนาต่อยอดสู่ภาคอุตสาหกรรม

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปความรู้แสดงรูปแบบการใช้งานอัลลอยทดลองดังตารางที่ 2.7.1.1 และสามารถวางแผนการจัดอบรมการหล่อทองเหลืองเพื่อสร้างองค์ความรู้พัฒนาอุตสาหกรรมกลุ่มนี้

2.7.1.1 และสามารถวางแผนการจัดอบรมการหล่อทองเหลืองในตารางที่ 2.7.1.2 ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยงบประมาณเพื่อสร้างกิจกรรมดังกล่าว เนื่องจากการปฏิบัติงานในแผนงานนั้นนอกเหนือจากขอบเขตงบประมาณที่ได้ใช้ในโครงการฯแต่ยังคงนำเสนอไว้สำหรับแผนการส่งเสริมความรู้ต่อไปในอนาคต รวมถึงคณะผู้วิจัยได้จัดเตรียมร่างอนุสิทธิบัตรทองแดงผสมสำหรับการผลิตเครื่องประดับเพื่อสร้างและบันทึกองค์ความรู้เพื่อประโยชน์ในการพัฒนากลุ่มอุตสาหกรรมฯในองค์กรต่อไป

ตารางที่ 2.7.1.1 แสดงคุณลักษณะพิเศษสำหรับทองแดงผสมจากพัฒนาด้วยโครงการวิจัยฯ

อัลลอย	ลักษณะ สี	จุดเด่น	จุดด้อย
2)Cu5Sn	สี ชมพูอมแดง	หล่อง่าย ไม่เกิดควัน การหดตัวปานกลาง	ห้ามเติมร่วมกับ Zr เพราะเกิดฉิวหายาบ
10)Cu15Zn3Sn0.5Si	สีเหลืองจาง	หล่อง่าย น้ำโลหะไหลตัวดี ผิวงานหล่อไม่มีคราบสนิม มีความแข็งแรงปานกลาง ทำให้ แปรรูป ประกอบตัวเรือนง่าย	ตัวเรือนไม่คงทน เสียรูปง่าย ต้องเพิ่มความหนา
6)Cu20.5Zn2.25Si	สีเหลืองจาง	หล่อง่าย น้ำโลหะไหลตัวดีกว่า 10)Cu15Zn3Sn0.5Si ผิวงานหล่อ	ไม่เหมาะกับชิ้นงานหนา ผิวเรียบกว้าง จะเกิดฉิวยิบ ไม่

		ไม่มีคราบสนิม มีความแข็งแรงปานกลาง ทำให้ แปรรูป ประกอบตัวเรือนง่าย	เรียบจากการหลุดระหว่างแซนกิ่งไม้
(11) Cu15Zn0.2Si2Sn	สีเหลือง	น้ำโลหะไหลตัวปานกลาง เน้นงานที่มีผิวสวย	ไม่เหมาะกับชิ้นงานขนาดใหญ่เพราะหลุดตัวที่อุณหภูมิหล่อสูง
9)Cu12Zn3Sn	สีเหลือง	หล่อง่าย น้ำโลหะไหลตัวดี ผิวงานหล่อไม่มีคราบสนิม มีความแข็งแรงปานกลาง ทนการหมองดี	
8) Commercial alloy ผสม Mn 1-1.3% Si 3-4% Zn 13%	สีเหลืองจาง	หล่อง่าย น้ำโลหะไหลตัวดี มีความแข็งแรงสูง สามารถอบเพิ่มความแข็งแรงได้	หมอง-เปลี่ยนสีง่าย ไม่เหมาะใช้ก้านทางน้ำ ใหญ่ เพราะปากคีมหัก
5)Cu3Si	สีเหลืองบรอนซ์	น้ำโลหะไหลตัวปานกลาง เน้นงานที่มีผิวสวย มีความแข็งแรงปานกลาง	การไหลตัวต่ำกว่า 10)Cu15Zn3Sn0.5Si

2.7.1.1 ตัวอย่างแผนการจัดอบรมการหล่อทองเหลือง ทองแดงผสมสำหรับการผลิตเครื่องประดับ

วัตถุประสงค์

- เพื่อแนะนำการเลือกใช้ทองเหลือง ทองแดงผสม จากการเติมธาตุที่เหมาะสม ส่งผลให้คุณภาพผิวและสมบัติทางกลของตัวเรือนเครื่องประดับและความต้านทานการหมองดีขึ้นเพื่อเป็นต้นแบบใช้งานเชิงอุตสาหกรรม
- เพื่อแนะนำการผลิตด้วยการเติมธาตุผสม จากการผลิตในสถานประกอบ

ผู้เข้าร่วมอบรม

จำนวนผู้เข้าร่วมอบรม 40 คน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- เผยแพร่องค์ความรู้สำหรับการผลิตทองแดงผสมเพื่อการผลิตเครื่องประดับที่มีคุณค่า และสามารถผลิตได้จริงในประเทศ โดยเป็นอัลลอยที่สามารถเพิ่มผลผลิตและยกระดับความสามารถการผลิตเครื่องประดับเช่น ลดปริมาณทางน้ำ ลดรอยผุ ลดการเกิดจุดแข็ง รวมถึงได้แนวทางการใช้สารเติมปรับลดขนาดเกรนที่เหมาะสมกับการผลิต

ตารางที่ 2.7.1.2 แสดงตัวอย่างแผนการจัดอบรมการหล่อทองเหลือง ทองแดงผสมสำหรับการผลิตเครื่องประดับ

เวลา	รายละเอียด	จุดประสงค์
9.00-10.30น.	ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับทองเหลืองและทองแดงผสม กับงานเครื่องประดับ	ปรับความรู้ และ ลักษณะที่ควรทราบของทองเหลืองและทองแดงผสมต่องานเครื่องประดับ
10.45-12.00 น.	อัลลอยสำหรับผลิตทองเหลืองและทองแดงผสมและวิธีการผลิต	แนะนำชนิดอัลลอยและการผลิต
13.00-14.30 น.	แนะนำรูปแบบงานต่อการเลือกใช้ทองเหลืองหรือทองแดงผสม	แนะนำการเลือกใช้งานให้ถูกต้องต่อความต้องการและการผลิต
14.45-15.30	ปัญหาและการแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในงานหล่อเครื่องประดับทองแดงผสม	แนะนำการแก้ไขปัญหาและตรวจสอบข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในงานหล่อ

**หมายเหตุ แผนการจัดอบรมการหล่อทองเหลือง ทองแดงผสมนี้ ไม่มีงบประมาณสนับสนุน จึงไม่มีการดำเนินงานในโครงการวิจัย อย่างไรก็ตามได้มีการอบรมเบื้องต้นใน งาน Bangkok Gems and Jewelry Fair ในวันที่ 21 มีนาคม 2562 ณ ศูนย์การประชุมอิมแพค เมืองทองธานี ห้องจูปีเตอร์12 เวลา 13.00-15.30 น.

2.8 การพิจารณาความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ และการเผยแพร่ความรู้เชิงสาธารณะ

ในการพิจารณาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ คณะผู้วิจัยได้พิจารณาจาก การทดลองผลิตอัลลอยที่ ปริมาณ 8 กก. โดยมีต้นทุนการผลิตอัลลอยแต่ละชนิดดังตารางที่ 2.8.1 โดยเป็นการแสดงต้นทุนการผลิตอัลลอยต่อปริมาณการผลิต 8 กก. ด้วยเตาหลอมระบบสุญญากาศคลุมบรรยากาศด้วย ไนโตรเจน ใช้เวลาการผลิตเฉลี่ย 1 ชม./ครั้ง ทั้งนี้ผู้ผลิตต้องพิจารณาตามความเหมาะสมในการผลิตและการทำงานเป็นหลักและ จำเป็นต้องระวังธาตุสูญหายง่ายเช่น โครเมียม เซอร์โคเนียม และโบรอนที่มักสูญเสียจากการหลอม

ตาราง 2.8.1 แสดงต้นทุนการผลิตอัลลอยต่อปริมาณการผลิต 8 กก. ด้วยเตาหลอมระบบสุญญากาศ

รายละเอียดการผลิต	กลุ่ม สังกะสี	กลุ่ม ซิลิคอน สังกะสี	กลุ่ม ดีบุก ซิลิคอน	กลุ่ม ดีบุก
ค่าไฟฟ้า	60	60		60
ค่าอุปกรณ์และเข้า หลอม	200	200		200
ซิลิคอน สังกะสี ดีบุก	300	1500	2000	400
ทองแดง	2800	2800	2800	2800
สารประกอบซิลิคอน	-	-		260
ธาตุลดขนาดเกรน	300	300	300	300
รวม(ต่อ 8 กก)	3660	4860	5100	4020

เมื่อเปรียบเทียบกับราคาทองแดงอัลลอยการค้าในท้องตลาดพบว่าราคาอัลลอยการค้าสูงมากในช่วง 600-1400 บาท ต่อ กก. ในขณะที่ อัลลอยที่แนะนำการผลิตหากผลิตใช้เองจะมีราคาในช่วง 457.5-637.5 บาท ต่อ กก. ซึ่งลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มศักยภาพการทำงานได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถปรับส่วนผสมให้เหมาะสมกับรูปแบบ และลดต้นทุนการผลิตได้ภายในโรงงาน นอกจากนี้ยังสามารถสร้างอัลลอยจากทองเหลืองเส้นที่หาง่ายผสม มาสเตอร์ทองแดง10%ซิลิคอน หรือ ดีบุกเพื่อผลิตอัลลอยใช้ภายในโรงงานได้เอง และยังสามารถควบคุมความแข็ง การไหลตัวได้ดี

สำหรับการเผยแพร่ความรู้สู่สาธารณะนั้น คณะผู้วิจัยได้จัดสัมมนาเผยแพร่ความรู้เรื่อง ทองแดงผสม สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ จัดที่ งาน Bangkok Gems and Jewelry Fair ในวันที่ 21 มีนาคม 2562 ณ ศูนย์การประชุมอิมแพค เมืองทองธานี ห้องจูบิเตอร์12 เวลา 13.00-15.30 น. มีบรรยากาศการประชุมดังรูป 2.8.1



รูป 2.8.1 แสดงบรรยากาศ สัมมนาเผยแพร่ความรู้เรื่อง ทองแดงผสมสำหรับใช้ในอุตสาหกรรม

เครื่องประดับ ณ ศูนย์การประชุมอิมแพค เมืองทองธานี ห้องจูปีเตอร์ 12 เวลา 13.00-15.30 น.

ตาราง 2.8.2 แผนการดำเนินงานวิจัยที่ได้ทำดำเนินในช่วง 12 เดือน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาการดำเนินการ เดือนที่											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. รวบรวมข้อมูลธาตุปรับลดขนาดเกรน และแนวทางการหล่อโลหะผสม												
2. จัดสร้างโลหะผสมเพื่อผลิตอัลลอยและหล่อต้นทองแดงผสม												
3. วิเคราะห์ผลธาตุผสม ต่อความต้านทาน การหมอง สมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทองแดงผสม												
4. ปรับปรุงส่วน ผสมอัลลอยเพื่อหล่อต้นเงินได้ดีในสภาพการหล่อสูญญากาศ												
5. รวบรวมผลสีผิวต้นเงิน ความต้านทาน การหมอง สมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทองแดงผสม												
6. ทดสอบการใช้งานระดับอุตสาหกรรม และสรุปผลงานวิจัยทั้งหมด และเผยแพร่ผลงาน												

บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

1. Robert F. Schmidt and Donald G. Schmidt, Copper and Copper alloys, ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloy and Special purpose, ASM International, 1992, pp.85-87.
2. Cast copper and copper alloys, ASM Specialty Handbook, ASM International, 2001, p.92.
3. Hugh Baker, Hiroaki Okamoto, ASM Handbook Volume 3: Alloy Phase Diagram, ASM International, 1992, pp.2•178, 2•182.
4. ศ.มนัส สิริจินดา, โลหะนอกกลุ่มเหล็ก, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538 หน้า 67-100.
5. Ruddle, R.W. "Solidification of copper alloy" Modern Casting, Vol.38, pp.81-86 (Dec 1960)
6. Romankiewicz, F., Ellefbrok, R. and Engler, S., "Effect of grain refinement by zirconium on the morphology of solidification, feeding capacity and mechanical properties of brass CuZn30 and silicon brass CuZn15Si4" Giessereiforschung, Vol. 39, pp. 23-33(1987).
7. Sadayappan, M., Thomson, J.P., Elboudjaini, M., Ping Gu, G., and Sahoo, M., " Grain refinement of Permanent mold cast copper base alloys" Materials Technology Laboratory – Final Report MTL report 2004, pp 3-5.
8. Couture, A., Edwards, J.O., "Grain refinement of sand cast bronzes and its influence on their properties," AFS Transactions, Vol. 81, pp 453-361 (1973)
9. Ruddle, R.W., "Solidification of copper alloys," Modern Castings, Vol. 38, pp 81-86 (Dec. 1960)
10. Wallace, J.F., Kissling, J., "Grain refinement in copper and Cu alloy castings," Foundry, Vol. 91, Part 1, Aug. pp 54-57, Part 2, Sept. pp 74-77 (1963)
11. Reif, W., Weber, G., "A new grain refiner for copper-zinc alloys containing 25-42% zinc," Metall, Vol. 41, pp 1131-1137 (1987)
12. 6. Reif, W., Weber, G., "Study of CuZn36 concerning the mechanisms of grain refinement in copper alloys by added zirconium, magnesium, iron and phosphorus," Solidification Processing 1987, Sheffield, UK, 21-24 Sept. 1987. Published by Institute of Metals, London, (1988)

13. Fasoyinu, F.A., et al., "Grain Refinement Of Permanent Mold Cast Yellow Brass", Proc. Conf., 4th Decennial International Conference on "Solidification Processing - 97", 7-10 July, 1997, Sheffield. UK.
14. Sadayappan, M., et al., "Grain Refinement Studies on Permanent Mold Cast SeBiLOY III," AFS Transactions, Vol.106, 1998.
15. Fasoyinu, F.A., et al., "Effect of Grain Refinement on the Hot Tear Resistance and Shrinkage Characteristics of Permanent Mold Cast Yellow Brass (C85800)," AFS Transactions, Vol. 106, 1998.
16. Sadayappan, M., Fasoyinu, F.A., Sahoo, M., "Grain refinement of copper alloys," Fourth International Conference, Edited by Eltringham, G.A., Piret, N.L., Sahoo, M., Copper 99 – Cobre 99, Vol. 1, pp 279-291 (1999)
17. Sahoo, M. , et al., "A review of bismuth and selenium modified copper alloys for plumbing applications," Fourth International Conference, Edited by Eltringham, G.A., Piret, N.L., Sahoo, M., Copper 99 – Cobre 99, Vol. 1, pp 327-341 (1999)
18. Konrad J.A. Kundig., " Chapter 4. Copper and Copper alloys", Mechanical Engineers' Handbook: Materials and Mechanical Design, Volume1, 3th edition, John Wiley, pp.117-217(2006)
19. Radomila K., Stanislava F., " Copper and Copper Alloys: Casting, Classification and Characteristic Microstructure", University of Zilina, Slovak Republic, www.Intechopen.com

โครงการพัฒนาทองเหลืองเพื่อเพิ่มสมรรถนะด้านการผลิตในอุตสาหกรรมผลิตเครื่องประดับ
สรุปรายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2

ตารางเปรียบเทียบผลผลิต (Output) ที่เสนอในข้อเสนอโครงการและที่ดำเนินการได้จริงในรอบ 12 เดือน

ผลผลิต (Output)		ในกรณีล่าช้า (ผลสำเร็จไม่ถึง 100%) ให้ท่าน ระบุสาเหตุและการแก้ไขที่ท่านดำเนินการ
กิจกรรมในข้อเสนอโครงการ/หรือจากการปรับ แผน	ผลสำเร็จ (%)	
1. รวบรวมข้อมูลธาตุปรับลดขนาดเกรน และแนวทางการหล่อโลหะผสม	100%	-
2. จัดสร้างโลหะผสมเพื่อผลิตอัลลอยและ หล่อต้นทองแดงผสม	100%	-
3. วิเคราะห์ผลธาตุผสม ต่อความสามารถ การหล่อของชิ้นงานทองแดงผสม (ช่วง เดือนที่ 3 -7)	100%	-
4. ปรับปรุงส่วน ผสมอัลลอยเพื่อหล่อต้นเงิน ได้ดีในสภาพการหล่อสุญญากาศ(ช่วงเดือนที่ 6-10)	100%	-
5. รวบรวมผลสีผิวต้นเงิน ความต้านทานการ หมอง สมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาค ของชิ้นงานทองแดงผสม	100%	-
6. ทดสอบการใช้งานระดับอุตสาหกรรมและ สรุปผลงานวิจัยทั้งหมด และเผยแพร่ผลงาน	100%	-

ลงนาม.....

(ดร. สิริวรรณ สกุลตันเจริญชัย)

หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

วันที่ 1 มีนาคม 2562

ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ ต่อ สกว.

จากผลการดำเนินงาน ช่วง 12 เดือนที่ผ่านมา พบว่าคณะผู้วิจัยสามารถตรวจเช็คและใช้เครื่องมือวิจัยได้บางชนิด รวมถึงพบว่า เครื่องมือวิจัยในมหาวิทยาลัยฯ มีความเก่าและเสียหายในบางกลุ่มเช่น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM และ เครื่องตรวจสอบ DTA (Differential Thermal Analysis) ที่พบว่าเครื่องเสียและรอการซ่อมแซมทำให้งานล่าช้า รวมถึงไม่สามารถเร่งเวลาการตรวจสอบ DTA ได้ และเนื่องจากระยะเวลาการปฏิบัติงานค่อนข้างกระชั้นทำให้ผลการดำเนินงานเชิงอุตสาหกรรมมีน้อยลงเนื่องจากควบคุมเวลาภายใน 1 ปี

ลงนาม.....

(ดร. สิริวรรณ สกุลตันเจริญชัย)

หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

วันที่ 1 มีนาคม 2562

ภาคผนวก

ผลการตรวจสอบ Spark Emission Spectroscopy

ชิ้นงาน 1 Cu3Sn

CHULALONGKORN UNIVERSITY										
Sample Identification										
SampleNo	610904-8405-1				AverOutN		QMDelete			
	Sn	Pb	Zn	P	Mn	Fe	Ni	Si	Mg	Cr
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	3.419	0.014	0.209	0.042	<0.0020	<0.0020	0.0059	<0.0020	<0.0020	<0.0010
2.	3.361	0.014	0.212	0.043	<0.0020	<0.0020	0.0062	<0.0020	<0.0020	<0.0010
3.	3.361	0.015	0.211	0.042	<0.0020	<0.0020	0.0061	<0.0020	<0.0020	<0.0010
↑										
↑										
∅	3.380	0.014	0.211	0.042	<0.0020	<0.0020	0.0061	<0.0020	<0.0020	<0.0010
↓										
↓										
σ	0.033	0.00071	0.0016	0.00071			0.00016			
υ	0.976	5.071	0.758	1.690			2.623			
	Al	S	As	Be	Ag	Co	Bi	Sb	Zr	Ti
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.027	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
2.	<0.0020	0.0021	<0.0020	<0.0010	0.027	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
3.	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.027	<0.0020	<0.0020	0.0026	<0.0020	<0.0010
↑										
↑										
∅	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.027	<0.0020	<0.0020	0.0022	<0.0020	<0.0010
↓										
↓										
σ		0.00007						0.00035		
υ		3.500						15.91		
	C	Nb	Se	Te	Cu					
	%	%	%	%	%					
1.	0.0098	0.012	<0.0020	<0.0020	96.23					
2.	0.0064	0.012	<0.0020	<0.0020	96.29					
3.	0.0090	0.012	<0.0020	<0.0020	96.29					
↑										
↑										
∅	0.0084	0.012	<0.0020	<0.0020	96.27					
↓										
↓										
σ	0.0018				0.035					
υ	21.43				0.036					

Cu100
Bruker Elemental

Concentrations
1/1

CHULALONGKORN UNIVERSITY

Sample Identification										
SampleNo	610904-8405-1/1	AverOutN					QMDelete			

	Sn %	Pb %	Zn %	P %	Mn %	Fe %	Ni %	Si %	Mg %	Cr %
1.	3.315	0.014	0.197	0.039	<0.0020	0.0026	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
2.	3.215	0.015	0.194	0.039	<0.0020	0.0024	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
3.	3.378	0.015	0.202	0.040	<0.0020	0.0024	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
↑										
↑										
∅	3.303	0.015	0.198	0.039	<0.0020	0.0025	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
↓										
↓										
σ	0.082	0.00071	0.0041	0.00071		0.00012				
υ	2.483	4.733	2.071	1.821		4.800				

	Al %	S %	As %	Be %	Ag %	Co %	Bi %	Sb %	Zr %	Ti %
1.	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.0019	<0.0020	<0.0020	0.0026	<0.0020	<0.0010
2.	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.0020	<0.0020	<0.0020	0.0021	<0.0020	<0.0010
3.	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.0021	<0.0020	<0.0020	0.0031	<0.0020	<0.0010
↑										
↑										
∅	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.0020	<0.0020	<0.0020	0.0026	<0.0020	<0.0010
↓										
↓										
σ					0.00010			0.00050		
υ					5.000			19.23		

	C %	Nb %	Se %	Te %	Cu %
1.	0.0048	0.012	<0.0020	<0.0020	96.38
2.	0.0065	0.011	<0.0020	<0.0020	96.49
3.	0.0056	0.012	<0.0020	<0.0020	96.31
↑					
↑					
∅	0.0056	0.012	<0.0020	<0.0020	96.39
↓					
↓					
σ	0.00085	0.00071			0.091
υ	15.18	5.917			0.094

Cu100
Bruker Elemental

Concentrations
1/1

CHULALONGKORN UNIVERSITY

Sample Identification										
SampleNo	610904-8405-1/2				AverOutN	QMDDelete				
	Sn %	Pb %	Zn %	P %	Mn %	Fe %	Ni %	Si %	Mg %	Cr %
1.	3.240	0.014	0.201	0.040	<0.0020	0.0025	<0.0020	0.0020	<0.0020	<0.0010
2.	3.237	0.015	0.200	0.037	<0.0020	0.0022	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
3.	3.263	0.015	0.202	0.037	<0.0020	0.0024	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
↑										
↑										
∅	3.247	0.015	0.201	0.038	<0.0020	0.0024	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
↓										
↓										
σ	0.014	0.00071	0.0010	0.0017		0.00016				
υ	0.431	4.733	0.498	4.474		6.667				
	Al %	S %	As %	Be %	Ag %	Co %	Bi %	Sb %	Zr %	Ti %
1.	<0.0020	0.0022	<0.0020	<0.0010	0.0019	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
2.	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.0019	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
3.	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
↑										
↑										
∅	<0.0020	0.0021	<0.0020	<0.0010	0.0019	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
↓										
↓										
σ		0.00012			0.00007					
υ		5.714			3.684					
	C %	Nb %	Se %	Te %	Cu %					
1.	0.0049	0.013	<0.0020	<0.0020	96.45					
2.	0.0048	0.010	<0.0020	<0.0020	96.46					
3.	0.0048	0.010	<0.0020	<0.0020	96.43					
↑										
↑										
∅	0.0048	0.011	<0.0020	<0.0020	96.45					
↓										
↓										
σ	0.00007	0.0017			0.016					
υ	1.458	15.45			0.017					

Cu100

Concentration

ชิ้นงาน 1-3 Cu3Sn-1.5Zr

19.04.2018 17:05:03

CHULALONGKORN UNIVERSITY

Sample Identification									
SampleNo	610904-8405-1/3	AverOutN					QMDelete		

	Sn %	Pb %	Zn %	P %	Mn %	Fe %	Ni %	Si %	Mg %	Cr %
1.	3.302	0.015	0.199	0.038	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
2.	3.196	0.014	0.200	0.037	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
3.	3.237	0.015	0.206	0.037	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
↑										
↑										
∅	3.245	0.015	0.202	0.037	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
↓										
↓										
σ	0.053	0.00071	0.0038	0.00071						
υ	1.633	4.733	1.881	1.919						

	Al %	S %	As %	Be %	Ag %	Co %	Bi %	Sb %	Zr %	Ti %
1.	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.0019	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
2.	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.0019	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
3.	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
↑										
↑										
∅	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.0019	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
↓										
↓										
σ					0.00007					
υ					3.684					

	C %	Nb %	Se %	Te %	Cu %
1.	0.0043	0.011	<0.0020	<0.0020	96.40
2.	0.0045	0.011	<0.0020	<0.0020	96.50
3.	0.0046	0.0098	<0.0020	<0.0020	96.46
↑					
↑					
∅	0.0045	0.011	<0.0020	<0.0020	96.45
↓					
↓					
σ	0.00016	0.00085			0.050
υ	3.556	7.727			0.052

Cu100
Bruker Elemental

Concentrations
1/1

CHULALONGKORN UNIVERSITY

Sample Identification										
SampleNo	610904-8405-2				AverOutN		QMDelete			
	Sn	Pb	Zn	P	Mn	Fe	Ni	Si	Mg	Cr
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	5.365	0.013	0.198	0.038	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
2.	5.282	0.014	0.185	0.037	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
3.	5.272	0.014	0.187	0.036	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
↑↑										
↑										
∅	5.306	0.014	0.190	0.037	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
↓										
↓↓										
σ	0.051	0.00071	0.0070	0.0010						
υ	0.961	5.071	3.684	2.703						
	Al	S	As	Be	Ag	Co	Bi	Sb	Zr	Ti
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	<0.0020	0.0020	<0.0020	<0.0010	0.0030	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
2.	<0.0020	0.0021	<0.0020	<0.0010	0.0031	<0.0020	<0.0020	0.0021	<0.0020	<0.0010
3.	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.0032	<0.0020	<0.0020	0.0020	<0.0020	<0.0010
↑↑										
↑										
∅	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.0031	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
↓										
↓↓										
σ		0.00007			0.00010			0.00007		
υ		3.500			3.226			3.500		
	C	Nb	Se	Te	Cu					
	%	%	%	%	%					
1.	0.0053	0.0091	<0.0020	0.0028	94.34					
2.	0.0051	0.0094	<0.0020	0.0029	94.43					
3.	0.0048	0.0085	<0.0020	0.0023	94.44					
↑↑										
↑										
∅	0.0051	0.0090	<0.0020	0.0027	94.40					
↓										
↓↓										
σ	0.00025	0.00046		0.00032	0.055					
υ	4.902	5.111		11.85	0.058					

CHULALONGKORN UNIVERSITY

Sample Identification										
SampleNo	610904-8405-2/1			AverOutN			QMDelete			

	Sn %	Pb %	Zn %	P %	Mn %	Fe %	Ni %	Si %	Mg %	Cr %
1.	5.550	0.013	0.191	0.041	<0.0020	0.0023	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
2.	5.503	0.013	0.195	0.040	<0.0020	0.0024	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
3.	5.469	0.014	0.197	0.040	<0.0020	0.0024	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
↑↑ ↑ ∅ ↓ ↓↓	5.507	0.013	0.194	0.040	<0.0020	0.0024	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
σ	0.041	0.00071	0.0031	0.00071		0.00007				
υ	0.745	5.462	1.598	1.775		2.917				

	Al %	S %	As %	Be %	Ag %	Co %	Bi %	Sb %	Zr %	Ti %
1.	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.0020	<0.0020	<0.0020	0.0021	<0.0020	<0.0010
2.	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.0021	<0.0020	<0.0020	0.0021	<0.0020	<0.0010
3.	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.0021	<0.0020	<0.0020	0.0023	<0.0020	<0.0010
↑↑ ↑ ∅ ↓ ↓↓	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.0021	<0.0020	<0.0020	0.0022	<0.0020	<0.0010
σ					0.00007			0.00012		
υ					3.333			5.455		

	C %	Nb %	Se %	Te %	Cu %
1.	0.0046	0.0091	<0.0020	0.0028	94.16
2.	0.0048	0.0096	<0.0020	0.0029	94.20
3.	0.0049	0.0090	<0.0020	0.0031	94.23
↑↑ ↑ ∅ ↓ ↓↓	0.0048	0.0092	<0.0020	0.0029	94.20
σ	0.00016	0.00032		0.00016	0.035
υ	3.333	3.478		5.517	0.037

CHULALONGKORN UNIVERSITY

Sample Identification										
SampleNo	610904-8405-2/2	AverOutN					QMDelete			

	Sn %	Pb %	Zn %	P %	Mn %	Fe %	Ni %	Si %	Mg %	Cr %
1.	5.503	0.012	0.190	0.038	<0.0020	0.0022	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
2.	5.468	0.013	0.191	0.038	<0.0020	0.0023	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
3.	5.522	0.013	0.195	0.039	<0.0020	0.0023	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
↑↑										
↑										
∅	5.498	0.013	0.192	0.038	<0.0020	0.0023	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
↓										
↓↓										
σ	0.027	0.00071	0.0026	0.00071		0.00007				
υ	0.491	5.462	1.354	1.868		3.043				

	Al %	S %	As %	Be %	Ag %	Co %	Bi %	Sb %	Zr %	Ti %
1.	<0.0020	0.0021	<0.0020	<0.0010	0.0017	<0.0020	<0.0020	0.0035	<0.0020	<0.0010
2.	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.0017	<0.0020	<0.0020	0.0034	<0.0020	<0.0010
3.	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.0018	<0.0020	<0.0020	0.0042	<0.0020	<0.0010
↑↑										
↑										
∅	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.0017	<0.0020	<0.0020	0.0037	<0.0020	<0.0010
↓										
↓↓										
σ		0.00007			0.00007			0.00044		
υ		3.500			4.118			11.89		

	C %	Nb %	Se %	Te %	Cu %
1.	0.0065	0.011	<0.0020	0.0030	94.20
2.	0.0055	0.010	<0.0020	0.0034	94.24
3.	0.0047	0.0099	<0.0020	0.0030	94.18
↑↑					
↑					
∅	0.0056	0.010	<0.0020	0.0031	94.21
↓					
↓↓					
σ	0.00090	0.00071		0.00023	0.031
υ	16.07	7.100		7.419	0.033

CHULALONGKORN UNIVERSITY

Sample Identification										
SampleNo	610904-8405-2/3			AverOutN			QMDelete			
	Sn %	Pb %	Zn %	P %	Mn %	Fe %	Ni %	Si %	Mg %	Cr %
1.	5.323	0.013	0.250	0.035	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
2.	5.520	0.013	0.256	0.036	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
3.	5.418	0.014	0.259	0.036	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
↑										
↑										
∅	5.420	0.013	0.255	0.036	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010
↓										
↓										
σ	0.099	0.00071	0.0046	0.00071						
υ	1.827	5.462	1.804	1.972						

	Al %	S %	As %	Be %	Ag %	Co %	Bi %	Sb %	Zr %	Ti %
1.	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.0076	<0.0020	<0.0020	0.0026	<0.0020	<0.0010
2.	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.0080	<0.0020	<0.0020	0.0028	<0.0020	<0.0010
3.	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.0081	<0.0020	<0.0020	0.0027	<0.0020	<0.0010
↑										
↑										
∅	<0.0020	<0.0020	<0.0020	<0.0010	0.0079	<0.0020	<0.0020	0.0027	<0.0020	<0.0010
↓										
↓										
σ					0.00026			0.00010		
υ					3.291			3.704		

	C %	Nb %	Se %	Te %	Cu %
1.	0.0045	0.0096	<0.0020	0.0021	94.33
2.	0.0046	0.0091	<0.0020	0.0028	94.12
3.	0.0046	0.0088	<0.0020	0.0027	94.22
↑					
↑					
∅	0.0046	0.0092	<0.0020	0.0025	94.22
↓					
↓					
σ	0.00007	0.00041		0.00038	0.105
υ	1.522	4.457		15.20	0.111