



## รายงานผลการวิจัย

การศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของธาตุเงินทองแดงและดีบุกที่มีผลต่อสมบัติทางกล  
และโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือต่ำ 58.33 wt% AgCuSn

A study and analysis influence of copper and tin alloying element onto  
mechanical properties and microstructure of low silver alloys 58.33 wt% AgCuSn

รองศาสตราจารย์สุภัทรา โกไศยกานนท์

พันตรีหญิง ดร.บงกช เทพจारी

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณปี พ.ศ. 2556

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

โครงการวิจัย : การศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของธาตุเจือทองแดงและดีบุกที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือต่ำ 58.33 wt% AgCuSn  
ผู้วิจัย : รองศาสตราจารย์สุภัทรา โกไศยกานนท์  
ผู้วิจัยร่วม : พันตรีหญิง ดร.บงกช เทพจारी

### บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของโลหะเงินเจือต่ำ 58.33% ที่มีธาตุทองแดง (Cu) และดีบุก (Sn) เป็นธาตุผสม ซึ่งมีปริมาณการผสมอยู่ในช่วงระหว่าง 36.66 - 41.57% และ 0.10-5.01% ตามลำดับ โดยทำการเปรียบเทียบกับสมบัติของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินเจือต่ำ 58.33% เพื่อศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของธาตุเจือทองแดงและดีบุกที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือต่ำ 58.33 wt% AgCuSn และหาปริมาณของธาตุเจือทองแดงและดีบุกที่เหมาะสมในการผลิตเครื่องประดับเงินเจือต่ำ 58.33%

ผลจากการศึกษาโลหะเงินเจือต่ำ 58.33 % ที่ประกอบด้วยเงิน (Ag) และทองแดง (Cu) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 จากการศึกษาร่วมพบว่ามีค่า Yield Strength 195.2 Mpa, Ultimate tensile strength 345.25 MPa, Breaking point 301 MPa และ Elongation 61.58 % ซึ่งเป็นอัตราส่วนผสมของแต่ละธาตุที่เหมาะสมที่สุด ค่าความแข็งของโลหะเงินเจือต่ำ 58.33Ag + 41.57Cu + 0.10Sn มีค่าความแข็งน้อยที่สุด เท่ากับ 93.03 HV ซึ่งปริมาณดีบุก (Sn) ที่ผสมเข้าไปในอัตราส่วน 0.10Sn จะทำให้โครงสร้างของเงินเจือต่ำ เป็น  $\beta$ -phase เกิดการเปลี่ยนแปลงจาก  $\beta$  phase ที่มีขนาดเล็กลงเป็นโครงสร้าง Eutectic phase ที่มี  $\alpha$ -phase และ  $\beta$ -phase ขนาดเล็กและละเอียด

ผลจากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเงินเจือต่ำ 58.33% พบว่าส่วนผสมทางเคมีของโลหะเงินเจือต่ำในแต่ละอัตราส่วนผสมมีสัดส่วนของธาตุใกล้เคียงกับอัตราส่วนผสมจริง จึงทำให้โลหะเงินเจือต่ำที่ได้ทำการทดลองมีค่าที่เป็นไปตามมาตรฐานของเครื่องประดับเงินตามมาตรฐานอุตสาหกรรม การผลิตเครื่องประดับทั้งของในประเทศและต่างประเทศ

คำสำคัญ : โลหะเงินสเตอร์ลิง โลหะเงินเจือ ทองแดง ดีบุก

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่าน คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนการทำงานวิจัยของอาจารย์ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครมาตั้งแต่เริ่มต้น ทำนี้คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ได้ให้ทุนสนับสนุน จนกระทั่งงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัย



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ศึกษารวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติของโลหะเงิน และโลหะเงินสเตอร์ลิง	5
2.2 ลักษณะทั่วไปของเงินเจือประเภทต่างๆ	10
2.3 อิทธิพลของธาตุเจือในโลหะเงิน	11
2.4 อิทธิพลของธาตุเจือต่อคุณสมบัติของโลหะเงินเจือ	12
2.5 ทฤษฎีการทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)	14
2.6 การทดสอบแรงดึง (tension test)	16
2.7 เทคนิค และวิธีการวัดทดสอบระดับสีตามมาตรฐานการทดสอบ CIELAB	19
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการงานการวิจัย	
3.1 แผนการดำเนินงาน	32
3.2 วัสดุที่ใช้สำหรับการทดลอง	33
3.3 การดำเนินการหล่อหลอมผสมโลหะเพื่อผลิตเป็นมาสเตอร์อัลลอย	34
3.4 การดำเนินการหลอมผสมโลหะและหล่อขึ้นรูปขึ้นทดสอบโลหะเงินผสม 58.33% สำหรับการวิเคราะห์ทดสอบต่างๆ	35
3.5 การดำเนินการศึกษาและวิเคราะห์ชิ้นงานทดสอบโลหะเงินผสม 58.33%	40
3.6 การวิเคราะห์ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี	45
3.7 การวิเคราะห์และประเมินผลการทดลอง	45

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของโลหะเงินเจือต่ำ 58.33%	46
4.2 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือต่ำ 58.33%	49
4.3 ศึกษาส่วนผสมทางเคมีของโลหะเงินเจือต่ำ 58.33%	52
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผล	55
5.2 ข้อเสนอแนะ	55
บรรณานุกรม	56
ภาคผนวก	57



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	แผนภาพสมมูลโลหะเงิน-ทองแดง	9
2.2	ปริมาณธาตุเจือชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อความแข็งของโลหะเงิน	13
2.3	ลักษณะห้วงคดและรอยกุดของการทดสอบความแข็ง Vickers	15
2.4	รูปร่างของตัวอย่างทดสอบแบบแท่งกลม	17
2.5	ลักษณะต่างๆ ของตัวอย่างทดสอบที่ไม่ควรนำมาใช้ในการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุ	18
2.6	ตัวอย่างทดสอบมาตรฐานของเหล็กเหนียวตามมาตรฐาน ASTM E8	18
2.7	ตัวอย่างทดสอบมาตรฐานของเหล็กหล่อตามมาตรฐาน ASTM E8	19
2.8	ไดอะแกรมสี x, y ของ CIE ในปี 1931	20
2.9	ความไวแสงของตามนุษย์ (Color-matching function)	21
2.10	ภาพสีรุ้งของรุ้งกินน้ำที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ที่เกิดจากแสงอาทิตย์ทะลุผ่านหยดน้ำซึ่งทำหน้าที่เป็นปริซึม	22
2.11	ภาพคลื่นแสงในช่วงความยาวที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าที่เรียกว่า Visible light	22
2.12	ไดอะแกรมสัมประสิทธิ์สี $a^*$ , $b^*$	23
2.13	ค่าสัมประสิทธิ์สีและความสว่าง (A) ค่าสัมประสิทธิ์สีและความสว่าง (B) ปริภูมิสีระบบ $L^*a^*b$ ( $L^*a^*b$ Color Space)	24
2.14	ค่าสัมประสิทธิ์สี $a^*$ , $b^*$ ที่ใช้แสดงค่าปริภูมิสีระบบ $L^*C^*h$	25
2.15	ค่าโครมาและความสว่าง	26
2.16	ค่าความแตกต่างสีในปริภูมิสีระบบ $L^*a^*$	27
2.17	ส่วนหนึ่งของไดอะแกรมสี $a^*$ , $b^*$ ในปริภูมิสีระบบ $L^*C^*h$	27
2.18	คำที่ใช้อธิบายถึงค่าโครมาหรือความอิ่มตัวของสีและความสว่าง (Chroma and Lightness)	28
2.19	พิกัดการวัดสี	29
3.1	แผนภาพการไหลกระบวนการทำโครงการ	32
3.2	เครื่องหลอมผสมเทเม็ดโลหะ Indutherm รุ่น VC 600	34
3.3	ลักษณะของเม็ดโลหะมาสเตอร์อัลลอย 58.45Ag + 41.55Cu หลังจากผ่านการเทหดยเม็ด	35
3.4	โพรงแบบซิลิโคลนสำหรับการฉีดขึ้นรูปตัวแบบเทียนสำหรับทดสอบความต้านแรงดึง	36

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.5	ขนาดของตัวแบบเทียบขึ้นทดสอบสำหรับทดสอบความแข็งและศึกษาโครงสร้างจุลภาค	37
3.6	การติดต้นเทียบสำหรับหล่อขึ้นรูปขึ้นทดสอบสำหรับการทดสอบความต้านแรงดึงความแข็งและศึกษาโครงสร้างจุลภาค	37
3.7	เครื่องหล่อดูดสูญญากาศยี่ห้อ Yasui รุ่น K2	38
3.8	ขั้นตอนกระบวนการหล่อหลอมขึ้นงานทดสอบของโลหะเงินเจือตะกั่ว	39
3.9	ลักษณะขึ้นทดสอบที่ได้จากการหล่อขึ้นรูป	40
3.10	ลักษณะของขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 8M-99	41
3.11	เครื่องทดสอบแรงดึง	41
3.12	ลักษณะการจับขึ้นทดสอบที่สภาพต่างๆ	42
3.13	เครื่องทดสอบความแข็ง (Micro Hardness Testing Machine)	42
3.14	ตำแหน่งการทดสอบความแข็ง	43
3.15	อุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์	44
3.16	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM : Scanning Electron Microscope)	45
4.1	กราฟค่าความแข็งแรงดึงของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 (Ag+Cu) และโลหะเงินเจือตะกั่ว (Ag+Cu, Ag+Cu+Sn)	47
4.2	กราฟค่าความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 (Ag+Cu) และโลหะเงินเจือตะกั่ว (Ag+Cu, Ag+Cu+Sn)	48
4.3	โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงิน 93.71Ag + 6.30Cu	49
4.4	โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.45Ag + 41.55Cu	49
4.5	โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33Ag + 36.66Cu + 5.01Sn	50
4.6	โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33Ag + 39.48Cu + 2.19Sn	50
4.7	โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33Ag + 41.16Cu + 0.51Sn	50
4.8	โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33Ag + 41.44Cu + 0.23Sn	51
4.9	โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33Ag + 41.57Cu + 0.10Sn	51
4.10	กราฟส่วนผสมทางเคมี (Spectrum) ของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33Ag + 36.66Cu + 5.01Sn	52
4.11	กราฟส่วนผสมทางเคมี (Spectrum) ของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33Ag + 39.48Cu + 2.19Sn	53

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.12	กราฟส่วนผสมทางเคมี (Spectrum) ของโลหะเงินเจือตำ 58.33Ag + 41.16Cu + 0.51Sn	53
4.13	กราฟส่วนผสมทางเคมี (Spectrum) ของโลหะเงินเจือตำ 58.33Ag + 41.44Cu + 0.23Sn	53
4.14	กราฟส่วนผสมทางเคมี (Spectrum) ของโลหะเงินเจือตำ 58.33Ag + 41.57Cu + 0.10Sn	54





## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณธาตุโลหะมีค่าเจือที่ค่ามาตรฐานต่าง	5
2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะเงิน ทองแดง อินเดียม ฟอสฟอรัส	6
2.3 ความหนาแน่นของโลหะเงินหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ	7
2.4 ปริมาณสารเจือปนในโลหะเงินบริสุทธิ์ตามมาตรฐาน ASTM	7
2.5 คุณสมบัติทางกลของโลหะเงินบริสุทธิ์ 99.97 % ที่อัตราการขึ้นรูปต่างๆ กัน	8
2.6 แสดงคุณสมบัติของเงินเจือประเภทต่าง ๆ	11
2.7 ค่าความแข็งแรงของโลหะเงินเจือที่ขึ้นกับธาตุเจือต่างๆ	13
2.8 ค่าความแข็ง (HV10) ของโลหะเงินเจือที่ขึ้นกับอัตราการขึ้นรูปและสัดส่วนของธาตุเจือทองแดง	13
2.9 สัญลักษณ์ระดับสีทองคำ ค่าการวัดและพิถีพิถันตามมาตรฐาน DIN 8238	30
3.1 แผนการดำเนินโครงการ	33
3.2 อัตราการผสมของขึ้นทดสอบโลหะเงินเจือต่ำ 58.33%	35
3.3 ขนาดของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 8M-99	41
3.4 ส่วนผสมของกรดใช้สำหรับกัดชิ้นงานทดสอบโครงสร้างจุลภาค	44
4.1 ค่าความแข็งแรงดึงของเงินสเตอร์ลิง 925 (Ag+Cu) และโลหะเงินเจือต่ำ (Ag+Cu, Ag+Cu+Sn)	46
4.2 ค่าความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 (Ag+Cu) และโลหะเงินเจือต่ำ (Ag+Cu, Ag+Cu+Sn)	48
4.3 ผลการวิเคราะห์ทดสอบส่วนผสมทางเคมีของชิ้นทดสอบของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 (Ag+Cu) และโลหะเงินเจือต่ำ (Ag+Cu, Ag+Cu+Sn)	54

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา [1]

อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับเป็นอุตสาหกรรมที่ถือว่ามีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศมากที่สุดสาขาหนึ่ง มูลค่าการส่งออกในแต่ละปีมีมูลค่าประมาณสามแสนล้านบาท และก่อให้เกิดการจ้างงานในตำแหน่งงานต่างๆ มากมาย เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้ทักษะฝีมือ ความประณีตในการผลิตค่อนข้างสูงและต้องใช้แรงงานในการผลิตเป็นจำนวนมาก ซึ่งเครื่องจักรไม่สามารถทดแทนได้ การประกอบการของอุตสาหกรรมสาขานี้ มีทั้งผู้ประกอบการ ที่ดำเนินการผลิตขนาดใหญ่ ขนาดกลางและขนาดเล็ก (SMEs.) รวมถึงผู้ประกอบการระดับครัวเรือน สำหรับในส่วนของผู้ประกอบการ SMEs. นั้น มีผู้ประกอบการอยู่เป็นจำนวนมากและกระจายอยู่ตามภูมิภาคต่างๆ ทั่วประเทศ

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น รัฐบาลจึงให้ความสำคัญและให้การสนับสนุนอุตสาหกรรมสาขานี้เป็นพิเศษ เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่ประเทศไทยมีความได้เปรียบและสามารถพัฒนาศักยภาพให้สามารถแข่งขันหรือเป็นผู้นำทางด้านการผลิตและการค้าในการเปิดเสรีทางการค้ากับประเทศคู่ค้าต่างๆ และที่ผ่านมา รัฐบาลได้มีนโยบายต่างๆ ที่จะพยายามผลักดันให้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางการผลิตและการค้าสินค้าผลิตภัณฑ์อัญมณีและเครื่องประดับแห่งหนึ่งของโลก โดยมีการจัดทำโครงการแผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรมสำหรับอุตสาหกรรมสาขานี้ ภายใต้การดำเนินการของกรมส่งเสริมอุตสาหกรรม ในช่วงปี 2544-2546 ซึ่งรายละเอียดของโครงการได้มีการส่งเสริมและสนับสนุนให้หน่วยงานต่างๆ ดำเนินการศึกษาวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมสาขานี้ ภายใต้การบริหารโครงการโดยชุดโครงการอัญมณีและเครื่องประดับ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ตัวอย่างโครงการวิจัย อาทิเช่น การศึกษาวิจัยทางด้านการพัฒนาส่วนผสมของโลหะตัวเรือนเครื่องประดับ การศึกษาวิจัยเพื่อผลิตอัลลอยสำหรับผสมกับโลหะมีค่าต่างๆ ทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ การศึกษาวิจัยพัฒนาเทคนิคการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับ การศึกษาวิจัยพัฒนาสร้างเตาเผาพลอย การศึกษาวิจัยพัฒนาเทคนิคการเผาพลอย การศึกษาวิจัยพัฒนาเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการผลิตเครื่องประดับและอื่นๆ อีก ฯลฯ นอกจากนี้โครงการสนับสนุนการพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับดังที่กล่าวข้างต้น

จากการศึกษาวิเคราะห์ปัญหา/อุปสรรคในการพัฒนาคุณภาพการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ ที่ได้มีการประชุมร่วมกับผู้ประกอบการอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ ได้ข้อสรุปว่า ปัญหาสำคัญ (Major Problem) เกี่ยวกับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ ได้แก่

1. ปัญหาด้านวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ ซึ่งวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตส่วนใหญ่เป็นวัตถุดิบที่นำเข้าจากต่างประเทศเกือบร้อยเปอร์เซ็นต์ ทั้งในรูปของโลหะมีค่าบริสุทธิ์ โลหะเจือสำเร็จรูปหรือที่เรียกว่าอัลลอยสำหรับผสมกับโลหะมีค่า และโลหะเจือที่ใช้สำหรับการผลิตเครื่องประดับ

เทียม (อาทิเช่น ทองคำเจือ เงินเจือ แพลทินัมเจือ ทองเหลือง โลหะสีขาว ดีบุก พิวเตอร์ และตะกั่ว เป็นต้น) การศึกษาวิจัยและพัฒนาด้านวัสดุขั้นตอนนี้ควรมีการศึกษาวิจัยเพื่อผลิตอัลลอยขึ้นมาใช้เองภายในประเทศและทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ โดยเริ่มทำการศึกษาวิจัยอิทธิพลของธาตุเจือต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของโลหะมีค่า (สมบัติทางกล ความต้านทานการหมอง การปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนและสมบัติทางด้านการหล่อขึ้นรูป)

2. ปัญหาด้านวัสดุเชื่อมประสาน เนื่องจากในขบวนการผลิตเครื่องประดับจะต้องมีการเชื่อมประสานเพื่อประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของเครื่องประดับเข้าด้วยกันไม่ว่าจะเป็นในส่วนของการเชื่อมกระเปาะสำหรับฝังพลอยเข้ากับตัวเรือนของจี้ ต่างหู หรือแม้แต่กำไลแหวน และนอกจากนี้ยังรวมถึงการเชื่อมประสานเพื่อตกแต่งผิวชิ้นงานสำเร็จโดยการเชื่อมปิดรอยตำหนิหรือตามมด และหรือรอยตำหนิจากการหดตัวของชิ้นงานจากขบวนการหล่อขึ้นรูป ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมประสานเหล่านี้จะต้องมีอุณหภูมิหลอมละลายต่ำกว่าวัสดุที่ใช้เป็นตัวเรือนเครื่องประดับ แต่จะต้องมีปริมาณส่วนผสมของโลหะมีค่าผสมอยู่ตามปริมาณที่กำหนด ซึ่งเป็นปริมาณที่ใช้สำหรับการแบ่งชนิดของโลหะมีค่าเจือสำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ และนอกจากนี้สีของวัสดุเชื่อมประสานจะต้องมีสีใกล้เคียงกับวัสดุตัวเรือนให้มากที่สุดเพื่อหลีกเลี่ยงความแตกต่างระหว่างสีของวัสดุตัวเรือนและวัสดุเชื่อมประสาน

3. ปัญหาด้านการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับ เนื่องจากการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคนิคการหล่อตัวเรือนเครื่องประดับ ยังมีผลงานการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาและสร้างองค์ความรู้ค่อนข้างน้อย ไม่สามารถทำการศึกษาวิจัยได้ครอบคลุมสภาพความเป็นจริงที่เกิดขึ้นกับผู้ประกอบการในภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มผู้ประกอบการที่เป็น SMEs. เช่น อัตราส่วนผสมระหว่างก๊าซ LPG และออกซิเจนที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อที่ทำการหล่อด้วยเครื่องหล่อเหยียงที่ให้ความร้อนด้วยหัวเผา (Torch หรือ Burner) แบบสัมผัสบรรยากาศเปิดปกติ ตัวแปรของอุณหภูมิน้ำโลหะและแบบหล่อที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อ อิทธิพลของบรรยากาศที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อ อิทธิพลของธาตุเจือต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อ และอิทธิพลของขนาดทางเดินน้ำโลหะที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อ เป็นต้น

4. ปัญหาด้านการขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับด้วยวิธีการทางกล กล่าวคือ การขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับด้วยวิธีการทางกลนั้น เป็นเทคนิคการขึ้นรูปที่สามารถผลิตชิ้นงานได้อย่างรวดเร็วและผลิตได้ในปริมาณมากๆ ในลักษณะของ Mass Product ช่วยให้สามารถลดต้นทุนการผลิตให้ต่ำลง แต่สภาพความเป็นจริงที่เกิดขึ้นในภาคอุตสาหกรรมเกิดจากขาดแคลนบุคลากร และองค์ความรู้ทางด้านการขึ้นรูปโลหะมีค่าด้วยวิธีการทางกล เช่น การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูป องค์ความรู้ทางด้านพฤติกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับโลหะมีค่าในระหว่างที่ดำเนินการผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการทางกล องค์ความรู้ทางด้านปัจจัยหรือสภาวะต่างๆ ที่เหมาะสมในการขึ้นรูป (เช่น แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป ค่า Clearance ของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป สารหล่อลื่นที่ให้ประสิทธิภาพการหล่อลื่นสูงสุดสำหรับการขึ้นรูปด้วยวิธีการทางกล)

5. ปัญหาทางด้านเครื่องมืออุปกรณ์การผลิต กล่าวคือ ยังขาดแคลนเครื่องมืออุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิต เช่น เครื่องหล่อที่สามารถควบคุมบรรยากาศและอุณหภูมิได้เที่ยงตรง เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างต้นแบบได้รวดเร็ว (Rapid Prototype) เทคโนโลยี CAD/CAM จากวิกฤติเศรษฐกิจที่เกิดขึ้นตลอดช่วงระยะเวลา 2-3 ปีที่ผ่านมาและต่อเนื่องจนถึงทุกวันนี้ และราคาของโลหะมีค่าต่างๆ ที่มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องได้ส่งผลให้พฤติกรรมการบริโภคสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับของผู้บริโภคเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ผู้บริโภคหันมาให้ความสนใจสินค้าเครื่องประดับที่มีราคาถูกลง แต่ยังคงต้องการเครื่องประดับที่ผลิตจากโลหะมีค่าต่างๆ เช่นเดิมโดยมีการลดปริมาณส่วนผสมของโลหะมีค่าลง และนอกจากนี้กลุ่มผู้บริโภคบางกลุ่มหันมาให้ความสนใจเครื่องประดับที่ผลิตจากสแตนเลสและทองเหลืองมากขึ้น ส่งผลให้ผู้ผลิตมีความต้องการพัฒนาปรับปรุงเทคโนโลยีการผลิตและวัสดุที่ใช้ในการผลิตเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการบริโภคสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับของผู้บริโภค จากปัญหาของภาคอุตสาหกรรมการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับดังที่ได้กล่าวข้างต้น การศึกษาวิจัยของโครงการวิจัยนี้ คือ การศึกษาและวิเคราะห์หัตถิพลของธาตุเจือทองแดงและดีบุกที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33 wt% AgCuSn ซึ่งเป็นโครงการวิจัยที่ 1 ใน 4 โครงการวิจัย ภายใต้แผนงานวิจัย การศึกษาและพัฒนาส่วนผสมโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33 wt% AgCuSn สำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ เพื่อการพัฒนาส่วนผสมโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33 wt% AgCuSn และสร้างองค์ความรู้เพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับผู้ประกอบการอุตสาหกรรมสาขานี้ และนอกจากนี้การดำเนินการของชุดโครงการวิจัยนี้ยังมีประโยชน์สำหรับการพัฒนาการเรียนการสอนในรูปแบบของการบูรณาการเรียนการสอนร่วมกับการวิจัยในรายวิชาที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ โลหะวิทยาโลหะมีค่า งานหล่อขึ้นรูปและกระบวนการผลิตเครื่องประดับที่ทางมหาวิทยาลัยได้มีการจัดการเรียนการสอนในสาขาวิชาเทคโนโลยีแม่พิมพ์เครื่องประดับ ซึ่งดำเนินการมากกว่า 16 ปี ให้สามารถพัฒนาไปสู่ความเป็นศูนย์วิจัยที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีวัสดุและการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ เพื่อเป็นศูนย์กลางสำหรับการศึกษาวิจัยพัฒนาองค์ความรู้และถ่ายทอดเทคโนโลยีจากการศึกษาวิจัยทางด้านวัสดุและการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับเผยแพร่สู่ภาคการผลิต ที่สามารถรองรับการพัฒนาอุตสาหกรรมสาขานี้ของประเทศ สอดคล้องกับนโยบายต่างๆ ของรัฐบาลที่ต้องการส่งเสริมให้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางการผลิตและการค้าสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับแห่งหนึ่งของโลก

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาวิเคราะห์หัตถิพลของธาตุเจือทองแดงและดีบุกที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33 wt% AgCuSn

1.2.2 เพื่อศึกษาปริมาณของธาตุเจือทองแดงและดีบุกที่เหมาะสมในการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับเงินเจือตะกั่ว 58.33%

1.2.3 เพื่อพัฒนาศักยภาพในการผลิตของผู้ประกอบการภายในประเทศและทดแทนการนำเข้าโลหะเงินเจือตำสำเร็จรูปจากต่างประเทศ

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาองค์ประกอบของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ประกอบด้วยเงิน (Ag) และทองแดง (Cu) ที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ เพื่อนำมาเป็นต้นแบบในการศึกษาเปรียบเทียบ เพื่อพัฒนาโลหะเงินผสม 58.33%

1.3.2 ศึกษาความเป็นไปได้ของโลหะเงินผสม 58.33% ที่ประกอบด้วย เงิน (Ag) ทองแดง (Cu) และ ดีบุก (Sn) ที่มีผลต่อการนำไปพัฒนาเพื่อหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับ โดยเปรียบเทียบกับโลหะเงินสเตอร์ลิง 925

1.3.3 ศึกษาความเป็นไปได้ของโลหะเงินผสม 58.33% ที่ประกอบด้วย เงิน (Ag) ทองแดง (Cu) และดีบุก (Sn) ที่เหมาะสมต่อการนำไปพัฒนาเพื่อหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับ โดยเปรียบเทียบกับโลหะเงินสเตอร์ลิง 925

1.3.4 ศึกษาความเป็นไปได้ของโลหะเงินผสม 58.33% ที่ประกอบ เงิน (Ag) ทองแดง (Cu) และ ดีบุก (Sn) เพื่อให้ผลของสีโลหะผสมมีความใกล้เคียงกับโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ภายใต้เปอร์เซ็นต์ของดีบุก (Sn) 0.10-5.01%

1.3.5 การวิเคราะห์ผลของการศึกษามีดังนี้

- การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Analysis)
- การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition Analysis)
- การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Microstructure Analysis)

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงอิทธิพลของธาตุเจือทองแดงและดีบุกที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือตำ 58.33 wt% AgCuSn

1.4.2 สามารถผลิตเม็ดโลหะเงินเจือตำ 58.33 wt% AgCuSn ที่เหมาะสำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ เพื่อทดแทนการนำเข้าเม็ดโลหะเงินเจือตำสำเร็จรูปจากต่างประเทศ

1.4.3 ผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยสามารถนำไปสู่การพัฒนาในอุตสาหกรรมและเครื่องประดับ ซึ่งถือว่าเป็นอุตสาหกรรมที่ประเทศไทยมีศักยภาพในการเป็นผู้นำในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และสอดคล้องกับนโยบายต่างๆ ที่รัฐบาลประกาศสนับสนุนอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ

1.4.4 สามารถนำผลงานที่ได้จากการศึกษาวิจัย ตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการและนำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การศึกษารวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติของโลหะเงิน และโลหะเงินสเตอร์ลิง [2]

โลหะเงินสเตอร์ลิง 925หรือเงินสเตอร์ลิง 925 หมายถึงโลหะเงินเจือที่มีปริมาณเนื้อเงินบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 925 ใน 1000 ส่วนเจือรวมกับธาตุอื่นๆปริมาณไม่เกินกว่า 75 ส่วนโดยน้ำหนัก จากมาตรฐาน ISO 9202:1991(E) ได้กำหนดปริมาณธาตุโลหะมีค่าต่างๆ ที่ใช้สำหรับการทำเครื่องประดับไว้หลายระดับ ในปริมาณธาตุเป็นส่วนใน 1000 ส่วน (Values in Parts per Thousand) ไว้ดังนี้

#### ตารางที่ 2.1 ปริมาณธาตุโลหะมีค่าเจือที่ค่ามาตรฐานต่างๆ [3]

โลหะมีค่าเจือ	ปริมาณธาตุใน 1000 ส่วนอย่างต่ำ
Gold alloy	375 (ทองคำกะรัต 9K)
	585 (ทองคำกะรัต 14K)
	750 (ทองคำกะรัต 18K)
	916 (ทองคำกะรัต 22K)
Platinum alloy	850
	900
	950
Palladium alloy	500
	950
Silver alloy	800
	835
	925

#### 2.1.1 โลหะเงินบริสุทธิ์

โลหะเงินเป็นธาตุโลหะที่หายากและมีราคาแพง ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของโลหะมีค่าเช่นเดียวกับทองคำ ธาตุโลหะเงินมีสัญลักษณ์ทางเคมี Ag และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ FCC (Face Center Cubic) คุณสมบัติหลักๆ ของธาตุโลหะเงินสามารถแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้

ก. คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Property) ลักษณะโดยทั่วไปของโลหะเงิน เป็นโลหะสีขาวมันวาว อ่อนนิ่ม ก้อนโลหะเงินสามารถตีแผ่หรือรีดเป็นแผ่นบางๆ ได้บางถึง 0.00025 มม. โดยทั่วไปโลหะเงินไม่เกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง แต่จะเกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 190°C ผิวของโลหะเงิน

ถ้าทิ้งไว้ในอากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลานาน ๆ จะเปลี่ยนเป็นสีดำเนื่องจากมีซัลเฟอร์ (Sulfur) อยู่ในอากาศมาก โลหะเงินบริสุทธิ์มีจุดหลอมละลายที่อุณหภูมิ  $960.8^{\circ}\text{C}$  จุดเดือดที่อุณหภูมิ  $2210^{\circ}\text{C}$  ซึ่งจะทำให้กลายเป็นไอสีขาวเงิน ในขณะที่โลหะเงินเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งโลหะเงินสามารถดูดกลืน(Absorb)ออกซิเจนได้ประมาณ 20 เท่า คุณสมบัติต่างๆ ทางกายภาพของโลหะเงินสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

**ตารางที่ 2.2** คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะเงิน ทองแดง อินเดียม ฟอสฟอรัส [3]

คุณสมบัติต่างๆ	เงิน(Ag)	ทองแดง(Cu)	อินเดียม(In)	ฟอสฟอรัส(P)
เลขอะตอม	47	29	49	15
การจัดเรียง อิเล็กตรอน	2,8,18,18,1	2,8,18,1	2,8,18,18,3	2,8,5
น้ำหนักอะตอม	107.868	63.54	114.82	30.974
จุดหลอมเหลว ( $^{\circ}\text{C}$ )	960.8	1083	156.81	44.3
จุดเดือด ( $^{\circ}\text{C}$ )	2210	2593	2080	280.7
ความหนาแน่น ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	10.5	8.92	7.31	1.82
รัศมีอะตอม (nm)	0.144	0.128	0.167	0.110
โครงสร้างผลึก	fcc	fcc	tetragonal	triclinic
ความจุความร้อนจำเพาะ ( $\text{cal}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$ )	0.0559	0.092	0.0548	0.1833
ความร้อนในการหลอมละลาย ( $\text{cal}/\text{g}$ )	25	50.6	-	-
การนำความร้อน ( $\text{cal}/\text{cm}^2/\text{cm}/\text{s}/^{\circ}\text{C}$ )	1	0.941	-	-
ความแข็ง (HB)	30	37	-	-

ความหนาแน่น (Density) โลหะเงินบริสุทธิ์มีความหนาแน่นเท่ากับ  $10.49 \text{ g}/\text{cc}$  ที่อุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$  ค่าความหนาแน่นของโลหะเงินยังขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต การขึ้นรูปและการขึ้นรูปในลักษณะต่างๆ อาทิเช่น การหล่อขึ้นรูป การรีด การตัดและการกดลากขึ้นรูป นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นยังขึ้นอยู่กับกรรมวิธีทางความร้อนต่างๆ ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติ เช่น การอบเป็น เนื้อเดียว การอบอ่อน และการอบเพิ่มความแข็ง ค่าความหนาแน่นของโลหะเงินที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.3

**ตารางที่ 2.3** ความหนาแน่นของโลหะเงินหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ [3]

อุณหภูมิ ( °C )	ความหนาแน่น ( g/cm <sup>3</sup> )
960	9.30
976	9.285
1,000	9.259
1,043	9.210
1,070	9.188
1,092	9.200
1,094	9.170
1,145	9.150
1,195	9.100
1,250	9.050
1,302	9.000

ข. คุณสมบัติทางกล (Mechanical Property) ในการศึกษาคุณสมบัติทางกลโลหะเงินนั้น จะต้องคำนึงถึงระดับความบริสุทธิ์ของโลหะเงิน โดยกำหนดให้โลหะเงินบริสุทธิ์จะต้องมีเนื้อเงินอย่างน้อย 99.95% โดยปกติปริมาณของสารเจือปน (Impurities) แต่ละชนิดที่ผสมในเนื้อโลหะเงินจะต้องมีปริมาณไม่เกินกำหนดตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

**ตารางที่ 2.4** ปริมาณสารเจือปนในโลหะเงินบริสุทธิ์ตามมาตรฐาน ASTM [3]

สารเจือปน	ปริมาณสารเจือปน(%)	ปริมาณสูงสุด ASTM (%)
Silver	-	99.95 (min)
Copper	0.05	0.08
Lead	0.004	0.025
Iron	0.003	0.002
Nickel	< 0.001	-
Indium	< 0.001	-
Magnesium	< 0.001	-
Silicon	< 0.001	-
Bismuth	< 0.001	0.001



จากการทดลองนำโลหะเงินบริสุทธิ์ 99.97% มาทำการขึ้นรูปเย็นที่อัตราการขึ้นรูปต่างๆ กัน พบว่าความต้านทานแรงดึง อัตราการยืดตัวและความแข็งมีการเปลี่ยนแปลงดังตารางที่ 2.5

**ตารางที่ 2.5** คุณสมบัติทางกลของโลหะเงินบริสุทธิ์ 99.97 % ที่อัตราการขึ้นรูปต่างๆ กัน [3]

อัตราการขึ้นรูป(%)	ความต้านแรงดึง (MPa)	ความยืด (%)	ความแข็ง (HV)
0	150	50	26
10	180	30	54
20	230	10	65
30	260	5	70
50	290	3	80
80	360	2	90

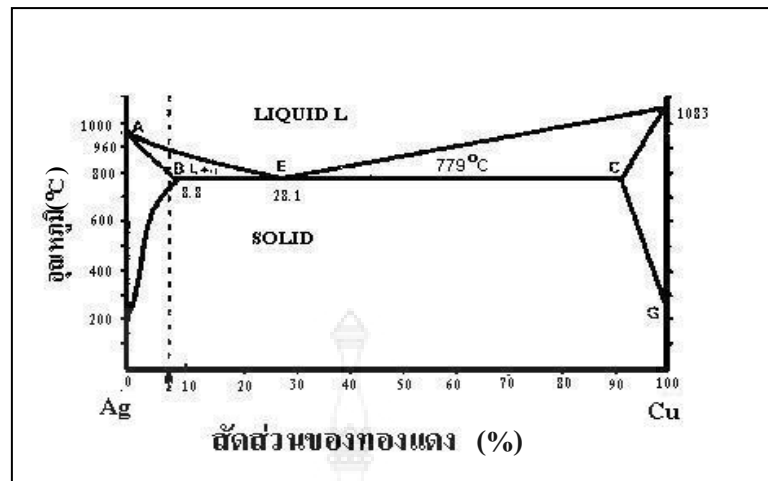
ค. คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Property) เงินละลายได้ดีในกรดไนตริก (Nitric Acid) เกิดเป็นอาร์เจนตริกไนเตรต (Argentum Nitrate) หรือที่ทราบกันทั่วไปคือลูน่าร์คอสติก (Lunar Caustic) ส่วนกรดซัลฟูริก (Sulphuric Acid) เข้มข้นที่ร้อนละลายเงินได้อย่างช้าๆ เป็นเงินอาร์เจนตริกซัลเฟต (Argentum Sulphate) กับให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulphur Dioxide) กรดซัลฟูริกเจือจางไม่สามารถทำปฏิกิริยากับเงินได้ในลักษณะของซิลเวอร์ซัลเฟต (Silver Sulphate)

- กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid) ทำปฏิกิริยากับเงินช้ามากและเกิดเพียงเฉพาะที่ผิวเท่านั้น โดยจะเกิดคลอไรด์เคลือบโลหะไว้ โพตัสเซียมไซยาไนด์ (Potassium Cyanide) สามารถละลายเงินได้ อัลคาลิสไม่ทำปฏิกิริยากับเงินด้วยเหตุนี้ เบ้าหลอมเงินจึงเป็นพวกอัลคาลีน

การตกตะกอนของเงิน กรดไฮโดรคลอริกและคลอไรด์ทำให้เงินคลอไรด์ตกตะกอนเป็นสีขาวขุ่น ซึ่งถ้าให้ความร้อนและคนให้ทั่ว สารละลายจะมีลักษณะเป็นขุยและตกตะกอนอย่างรวดเร็ว เมื่อถูกกับแสง ตะกอนจะมีสีเทาอมน้ำเงินและค่อยๆ เป็นสีม่วง จนในที่สุดจะเป็นสีน้ำตาลหรือสีดำ

### 2.1.2 โลหะวิทยาโลหะเงินสเตอร์ลิง

โลหะเงินบริสุทธิ์ที่ใช้สำหรับทำเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องเงิน มีคุณสมบัติทางกลอ่อนนุ่มความสามารถในการคงรูปต่ำไม่เหมาะสำหรับกระบวนการผลิตและการนำไปใช้งาน จึงต้องมีการเจือธาตุเจือลงไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกล คุณสมบัติด้านการหล่อขึ้นรูปและเพิ่มความต้านทานการหมอง ซึ่งธาตุเจือที่เจือเข้าไปจะต้องไม่ทำให้คุณค่าและความสวยงามของโลหะเงินลดลง ธาตุเจือหลักที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือ ทองแดง เพราะทองแดง มีคุณสมบัติที่สามารถละลายรวมกับเงินได้ในลักษณะสารละลายของแข็ง (Solid Solution) ดังรูปที่ 2.1 และนอกจากนี้ ทองแดงยังมีคุณสมบัติช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะเงิน จากการตกตะกอน (Precipitate) ของทองแดงด้วยกระบวนการ Precipitation Strengthening



รูปที่ 2.1 แผนภาพสมดุลโลหะเงิน-ทองแดง [4]

จากรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการละลายของโลหะเงินเข้ากับทองแดง ในสถานะสารละลายของแข็งของโลหะเงินเจือทองแดง (Solid Solution of Copper in Silver Alloy) และโลหะทองแดงเจือเงิน (Silver in Copper Alloy) ซึ่งมีจุดยูเทคติกส์ที่ 28.1 เปอร์เซ็นต์ทองแดง ความสามารถในการละลายทองแดงในเงินสูงที่สุดที่ 8.8 เปอร์เซ็นต์ทองแดง โดยความสามารถของการละลายทองแดงในเงินจะลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิ สำหรับในกรณีของโลหะเงินเจือทองแดงที่มี ปริมาณของทองแดง 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักหรือโลหะเงินสเตอร์ลิง เมื่อทำการหลอมละลายรวมเข้า ด้วยกันที่สถานะสมดุลแล้วลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิห้องอย่างช้าๆ โครงสร้างจะประกอบด้วย Primary Silver-rich Solid Solution ( $\alpha$ ), Secondary Copper-rich Solid Solution ( $\beta$ ) ที่เกิดจาก ทองแดงแยกผลึกออกมาและยังมีส่วนที่เป็นโครงสร้างที่เกิดจาก Silver-Copper Eutectic รวมอยู่ด้วย ที่ อุณหภูมิสูงประมาณ 745°C ขึ้นไปโครงสร้างจะเป็น Primary Silver-rich Solid Solution ( $\alpha$ ) เพียง เฟสเดียว แต่ถ้าหากอุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 745°C ความสามารถในการละลายทองแดงในโลหะเงิน สิ้นสุดลงทำให้เกิดโครงสร้าง Silver-Copper Eutectic และทองแดงแยกผลึกเป็นโครงสร้าง Secondary Copper-rich Solid Solution ( $\beta$ ) ซึ่งเม็ดเกรนของโครงสร้าง Secondary Copper-rich Solid Solution ( $\beta$ ) ที่ได้จะมีขนาดใหญ่ และมีผลทำให้โลหะเงินเจือทองแดงมีความแข็งแรงต่ำ โครงสร้างและคุณสมบัติของโลหะเงินเจือสามารถปรับปรุงเปลี่ยนแปลงได้ด้วยกระบวนการขึ้นรูปเย็น และกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)

### 2.1.3 มาตรฐานผลิตภัณฑ์เครื่องเงิน

สินค้าอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของไทยที่ทำจากโลหะเงินสเตอร์ลิง เป็น ผลผลิตที่เกิดจากงานช่างฝีมือทางด้านศิลปหัตถกรรมที่แสดงถึง วัฒนธรรมของชนชาติไทยโดยเฉพาะ จึงเป็นสินค้าที่รู้จักกันแพร่หลาย และเป็นที่ยอมรับของชาว ต่างประเทศทั่วโลก นับได้ว่าเป็นการเผยแพร่

งานศิลปหัตถกรรม วิจิตรกรรมและวัฒนธรรมไทยให้ชาวโลกได้รู้จักประเทศไทย เพื่อเป็นการรักษาชื่อเสียงของประเทศ ในการส่งออกสินค้าเครื่องเงินที่ผลิตจากโลหะเงินสเตอร์ลิงให้มีคุณภาพดีมีมาตรฐาน สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมจึงได้กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเครื่องเงิน มอก.21-2515 ซึ่งได้มีการนำมาใช้รับรอง คุณภาพสินค้าเครื่องเงินจนถึงปัจจุบัน และถือเป็นมาตรฐานผลิตภัณฑ์เครื่องเงินที่ได้รับการยอมรับจากทั่วโลก[2]

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ว่าด้วยข้อกำหนดเกี่ยวกับชนิดและคุณลักษณะที่ต้องการของเครื่องเงินรวมทั้งวิธีทดสอบเครื่องเงินและยาถมเพื่อหาปริมาณโลหะเงินบริสุทธิ์ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้ [2]

- ก. เครื่องเงิน หมายถึงวัสดุที่ทำด้วยโลหะเงินหรือประกอบขึ้นจากโลหะเงินเป็นส่วนสำคัญ
- ข. โลหะเงินมาตรฐาน หมายถึงโลหะเงินที่อาจมีโลหะชนิดอื่นปนไม่เกินร้อยละ 7.5 ของน้ำหนัก
- ค. โลหะเงินบริสุทธิ์ หมายถึงโลหะเงินที่อาจมีโลหะอื่นปนไม่เกินร้อยละ 0.01 ของน้ำหนัก
- ง. ยาถม หมายถึงสารเคมีที่มีโลหะเงินบริสุทธิ์เป็นส่วนผสมไม่น้อยกว่าร้อยละ 8 ของน้ำหนักสำหรับใช้ในการลงยาถม
- จ. ยาสี หมายถึงสารเคมีสีสำหรับใช้ในการลงยาสี

## 2.2 ลักษณะทั่วไปของเงินเจือประเภทต่างๆ [4]

Ag950 มีลักษณะเช่นเดียวกับเงินบริสุทธิ์ และด้านการเกิดออกซิเดชัน หลังการอบเหนียวจะเกิดออกไซด์ ที่ผิววนอกเกือบจะถึงผิวใน และจะไม่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกับชั้นของออกไซด์ จุดหลอมเหลวที่สูงจะเหมาะกับการชุบผิว อย่างไรก็ตาม โลหะจะมีความแข็งเท่ากับเงินบริสุทธิ์และสามารถทำเป็นแผ่นบาง ๆ และขึ้นรูปได้ดี และยังสามารถทำให้บางได้ถึง 75 % ในระหว่างการอบเหนียวและต่อเนื่องกัน เพราะฉะนั้นวัสดุนี้เหมาะกับการขึ้นรูป ( Ag950 ) และสามารถตัดเป็นลวดได้ดี ส่วนความแข็งจะเริ่มต้นจากอุณหภูมิที่ 600 °C และจำเป็นต้องเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังการ หลอมเหลวและอบเหนียว ดังนั้นความสามารถในการทนการยืดและหดจะลดลง ลักษณะด้อยของ Ag950 คือการเสีรูปร่างง่าย [4]

เมื่อเพิ่มความแข็งจาก 50HB จนเกินกว่า 100 HB ด้วยการชุบแข็ง เป็นไปได้ว่าเกือบจะไม่มีการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมขนาดเล็กมากนัก

Ag925 โดยทั่วไปจะเรียกว่า เงินสเตอร์ลิง ซึ่งเป็นที่รู้จักกันมากถึงคุณภาพเหมือนกับ Ag950 มีลักษณะเหมือนกับเงินบริสุทธิ์ นิยมจะใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ มีความต้านทานการเกิดออกซิเดชันสูง โลหะผสมชนิดนี้ใช้ในงานเกี่ยวข้องกับการชุบเคลือบผิวได้ดีเท่ากับ Ag950 อัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกันจะให้ได้คุณสมบัติที่แตกต่างกันตามความต้องการ

1. การอบเหนียวที่ 650 °C เย็นตัวเร็วจะเกิดการแตกหักด้วยอัตราการยืดตัว 42%

2. การอบเหนียวที่  $650^{\circ}\text{C}$  เย็นตัวช้า (ในเตาครึ่งชั่วโมงที่  $350^{\circ}\text{C}$ ) จะเกิดการแตกหักด้วยอัตราการยืดตัวที่ 25%

Ag835 ปกติจะใช้ในการทำเครื่องประดับ แต่ลักษณะสีของ Ag835 จะไม่ขาว สะอาดเหมือนกับเงินบริสุทธิ์มากนัก การใช้งานสามารถสู้ถึงความต้านทานการสึกหรอที่มากขึ้น

Ag800 โลหะผสมชนิดนี้เหมาะกับการนำไปเป็นอุปกรณ์บนโต๊ะอาหาร เช่น ช้อน มีด ฯลฯ เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกลที่ดี และมีความแข็งสูง และมีราคาค่อนข้างไม่แพงเมื่อเทียบกับโลหะผสมที่กล่าวมาข้างต้น เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ของเงินที่น้อยกว่า แต่โลหะชนิดนี้จะมีลักษณะออกเป็นสีเหลืองอ่อนๆ เนื่องจากเกิดออกไซด์ อย่างไรก็ตามจะนำมาทำการชุบผิวด้วยเงิน คือโลหะที่มีเปอร์เซ็นต์ของเงินสูงกว่า และจำเป็นต้องทำการอบเหนียวอีกครั้ง พร้อมกับการขัดให้เงามันในทางกลับกัน เมื่อเปอร์เซ็นต์ทองแดงสูงมากขึ้น จะทำให้เกิดเป็นพิษ เมื่อสัมผัสกับกรดอาหาร ตัวอย่างเช่น สนิมเขียวที่ทองแดง Copper Acetate ในน้ำส้มเป็นต้น ถ้าโลหะผสมมีการตัดมาก ๆ หรือมีการขึ้นรูป จำเป็นต้องมีการอบเหนียว อย่างไรก็ตาม Ag800 สามารถที่จะหลอมและหล่อ ได้ง่ายกว่าโลหะผสมที่มีเปอร์เซ็นต์เงินในปริมาณที่มากกว่า จุดหลอมเหลวจะอยู่ที่  $800^{\circ}\text{C}$  ซึ่งโดยทั่วไปใช้อุณหภูมิการหลอมเหลวที่  $900^{\circ}\text{C}$  ในการหลอมละลาย โลหะผสมนี้สามารถเพิ่มความแข็งได้จาก 40 –100 HB โดยการชุบแข็งที่  $725^{\circ}\text{C}$  ปล่อยให้เย็น 17 ชม.ที่อุณหภูมิ  $280^{\circ}\text{C}$  [4]

ตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติของเงินเจือประเภทต่าง ๆ [4]

โลหะเงินเจือ	จุดหลอม ( $^{\circ}\text{C}$ )	ความแข็ง (HB)	ความต้านแรงดึง (MPa)	ความยืด (%)	ความหนาแน่น ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
Ag 1000	960	35	180	49	10.39
Ag 925	910 / 779	68	300	29	10.29
Ag 835	840 / 779	76	300	33	10.16
Ag 800	820 / 779	79	310	30	10.13
Ag 720	779	90	330	27	10

### 2.3 อิทธิพลของธาตุเจือในโลหะเงิน [4]

ธาตุเจือที่ผสมเข้าไปในโลหะเงินทำให้คุณสมบัติทางกลต่าง ๆ ของโลหะเงินเปลี่ยนแปลงไป ธาตุมีอยู่หลายธาตุด้วยกันที่มีอิทธิพลต่อโลหะเงิน ดังตัวอย่างที่จะกล่าวต่อไปนี้

นิกเกิล (Ni) สามารถจะผสมลงไปในอัลลอยเงิน-ทองแดง ได้ถึง 1% นิกเกิลสามารถป้องกันการเกิดลักษณะเกรนโตและเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อนได้ แต่ถ้ามีนิกเกิลมากกว่า 2.5 % จะทำให้

คุณสมบัติดังกล่าวน้อยลง ดังนั้นจึงได้มีการนำนิกเกิลไปใช้น้อยลง เนื่องจากเมื่อมีเปอร์เซ็นต์นิกเกิลสูงมากจะทำให้นิกเกิลไม่สามารถละลายในน้ำโลหะเหลวได้ และทำให้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ [4]

ตะกั่ว (Pb) เมื่อผสมในอัลลอย จะทำให้เปราะเมื่อได้รับความร้อน นอกจากนี้ตะกั่วสามารถที่จะแยกจากเงินได้ ที่จุดหลอมเหลว eutectic ที่อุณหภูมิ 304 °C บางครั้งจะต้องผสมตะกั่วเพื่อให้ง่ายต่อการตัดเฉือน (machined) แต่จะไม่สามารถทำการปรับปรุงด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ [4]

ดีบุก (Sn) ปริมาณดีบุกเพียงเล็กน้อย ก็จะทำให้จุดหลอมเหลวต่ำลง เงินบริสุทธิ์ สามารถที่จะผสมดีบุกได้มากถึง 19 % อัลลอยที่มีดีบุกจะเกิดออกซิเดชันน้อยกว่า อัลลอยเงิน-ทองแดง แต่จะทำให้เนื้ออัลลอยนิ่ม และดึงเป็นเส้นได้ดี ถ้ามีดีบุกผสมมากกว่า 9 %จะทำให้เกิด  $Cu_4Sn$  ซึ่งจะช่วยให้เปราะและในระหว่างการหลอมเหลวจะทำให้มีออกซิเจนเข้าผสมทำให้เกิดเป็น  $SnO_2$  [4]

อลูมิเนียม (Al) 4 - 5% จะไม่มีผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ และการใช้งานของอัลลอย แต่ถ้ามีอลูมิเนียมมากขึ้นจะทำให้เกิดเป็น  $Ag_3Al$  และจะทำให้อัลลอยเปราะ ในระหว่างการหลอมเหลวหรือการอบเหนียวจะเกิด อลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) และเกิดตะกอนบนขอบเกรน ซึ่งเป็นสาเหตุให้วัสดุเปราะในระหว่างการใช้งาน [4]

สังกะสี (Zn) ประมาณ 20% สามารถจะละลายได้ในสถานะของแข็ง แต่ในทางปฏิบัติสามารถผสมได้ประมาณ 14 % อัลลอยที่ได้ สามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชัน และมีคุณสมบัติเป็น มันเงา จึงสามารถขัดเป็นเงาได้ง่าย และช่วยลดการรวมตัวของเงินกับออกซิเจนและทำให้น้ำโลหะไหลตัวได้ดี และมีอัตราการยืดตัวสูงขึ้น [4]

ซิลิกอน(Si) เกือบจะไม่ละลายในเงิน ซิลิกอนจะทำให้อัลลอยแข็งและเปราะ ซึ่งจะมีตะกอนบนขอบเกรน และเกือบที่จะทำให้อัลลอยใช้งานไม่ได้ แต่สามารถลดปริมาณของซิลิกอนได้ โดยการใส่หินเขี้ยวหนูมาน (Quartz) ลงในเบ้าหลอม [4]

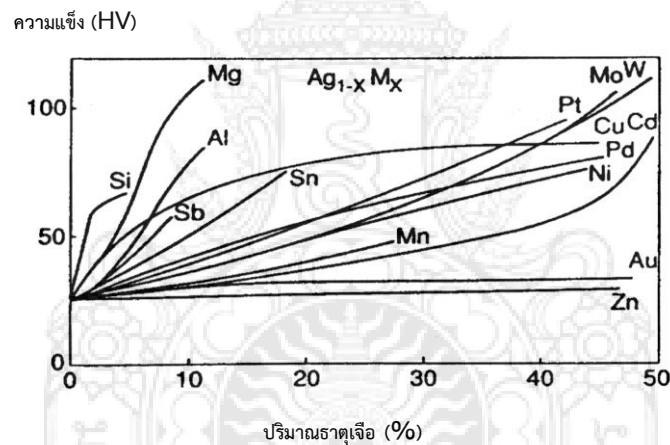
ฟอสฟอรัส(P) ที่มีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็พอที่จะทำให้อัลลอยเปราะได้ โดยอัลลอยจะมีส่วนประกอบ  $AgP_2$  หรือ  $Cu_3P$  ซึ่งจะมีตะกอนที่ขอบเกรน จึงทำให้อัลลอยเปราะ เกิดออกซิเดชันเกิดขึ้นเร็วขึ้น ฟอสฟอรัสสามารถจะทำให้จุดหลอมเหลวลดลง สำหรับ ทองแดง - ฟอสฟอรัส ถ้าการดูดเอาออกซิเจนออกไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดทองแดงออกไซด์ [4]

## 2.4 อิทธิพลของธาตุเจือต่อคุณสมบัติของโลหะเงินเจือ [4]

ธาตุเจือที่ผสมเข้าไปในโลหะเงินทำให้คุณสมบัติทางกลของโลหะเงินเปลี่ยนแปลงไป ทั้งในด้านความแข็งและความแข็งแรง ซึ่งมีอยู่หลายธาตุด้วยกันที่มีอิทธิพลต่อโลหะเงิน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ปริมาณของธาตุซิลิกอนจำนวนที่ไม่มากนักมีผลทำให้โลหะเงินมีความแข็งเพิ่มมากขึ้นและยังมีทองแดง ซึ่งเป็นธาตุที่น่าสนใจและส่วนใหญ่นิยมนำมาเป็นธาตุเจือหลักในโลหะเงินอยู่แล้ว เพราะง่ายในการหล่อหลอมและสามารถละลายเข้ากับเงินได้ดี ในด้านความแข็งแรงของโลหะเงินเจือที่ผสมธาตุเจือชนิดต่างๆ ในอัตราผสมของธาตุเจือ 2%, 5%, 10%, 20% แสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ค่าความแข็งแรงของโลหะเงินเจือที่ขึ้นกับธาตุเจือต่างๆ [5]

ธาตุเจือ	ค่าความต้านแรงดึง (MPa)			
	ปริมาณธาตุเจือ (%)			
	2	5	10	20
Au	160	170	180	200
Cd	160	170	180	210
Cu	190	240	280	310
Pd	160	180	210	270
Sb	190	240	300	-
Sn	190	240	300	-
Zn	180	190	200	-



รูปที่ 2.2 ปริมาณธาตุเจือชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อความแข็งของโลหะเงิน [5]

ตารางที่ 2.8 ค่าความแข็ง (HV10) ของโลหะเงินเจือที่ขึ้นกับอัตราการขึ้นรูปและสัดส่วนของธาตุเจือทองแดง [5]

ธาตุเจือ	ความแข็ง (HV10)		
	อัตราการขึ้นรูป (%)		
	0	40	80
ทองแดง 5%	58	108	134
ทองแดง 10%	76	126	158
ทองแดง 15%	98	136	177

สำหรับความแข็งของโลหะเงินเจือที่มีการเจือทองแดง ในสัดส่วนต่างๆ และที่อัตราการขึ้นรูปต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.8 นอกจากคุณสมบัติทางกลแล้ว จุดประสงค์ของการผสมธาตุเจือต่างๆ เข้าไปในเงิน เพื่อหวังผลทางด้านอื่นๆ อีกเช่น การหล่อขึ้นรูป (Casting) การเกิดผิวไหม้ (Fire Staining) และความต้านทานการหมอง (Tarnishing Behavior)

ในด้านการหล่อขึ้นรูปสำหรับโลหะเงินสเตอร์ลิง ผู้ผลิตและผู้ประกอบการต้องการชิ้นงาน ที่มีคุณภาพดี มีการสูญเสียน้อยที่สุด และนอกจากนี้โลหะเงินไม่สามารถขึ้นรูปได้ดีด้วยวิธีการตีขึ้นรูปร้อน (Forging) เพราะได้ผิวงานที่ไม่ดีเนื่องจากเกิดผิวไหม้ (Fire Staining) ได้ง่ายมาก สำหรับการหล่อขึ้นรูป โดยทั่วไปนิยมใช้ทองแดงและสังกะสีปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ หรือมากกว่านั้นผสมเข้าไปด้วยเพื่อหวังผลทางด้านการไหลตัวเข้าโพรงแบบได้ดี และช่วยลดก๊าซออกซิเจน (Deoxidized) ในโลหะเงินหลอมละลาย

## 2.5 ทฤษฎีการทดสอบความแข็ง (Hardness Testing) [6]

### 2.5.1 การทดสอบแบบ Vickers

ความแข็งเป็นการแสดงสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกถึงความต้านทานในการเกิดรอยกดที่พื้นผิว ในการทดสอบความแข็งไม่มีวิธีใดวิธีหนึ่งที่จะสามารถทำการทดสอบได้กับทุกวัสดุ ซึ่งในบทนี้ได้แสดงถึงกระบวนการทดสอบความแข็งแบบต่างๆ ได้แก่ ความแข็งแบบรอยกด (indentation) แบบกระดอน (rebound) แบบขีดข่วน (scratch) แบบสึกหรอ (wear) และในแบบของความสามารถในการกลึงไส (machinability) โดยการทดสอบความแข็งส่วนใหญ่ เป็นการวัดแรงที่กระทำเทียบกับการรอยกดที่เกิดขึ้นจากแรงที่กระทำนั้นด้วยกระบวนการเคลื่อน หัวกดลงบนวัสดุ ซึ่งเป็นการทดสอบความแข็งแบบรอยกด ส่วนการทดสอบในลักษณะการ ปล่อยลูกตุ้มที่ทราบน้ำหนักลงบนผิววัสดุ จากนั้นวัดการกระดอนของลูกตุ้มเรียกว่าความแข็ง แบบกระดอน และการทดสอบความแข็งที่สะดวกที่สุดคือการทดสอบความแข็งแบบรอยขีด ข่วน โดยการขีดข่วนพื้นผิววัสดุด้วยวัสดุต่างๆ ขนาดและคุณภาพของผลการทดสอบจะใช้เป็นตัวบ่งบอกค่าความแข็งของวัสดุ ส่วนปริมาณการสึกหรอของพื้นผิววัสดุภายใต้เงื่อนไข การทดสอบจะใช้ในการทดสอบความแข็ง การสึกหรอและความต้านทานการขัดสี และ สุดท้ายความสามารถในการกลึงไสใช้เป็นตัวบ่งบอกความยากง่ายในการกลึงวัสดุ

หลักการ หลักการเกี่ยวกับการทดสอบความแข็งจะเกี่ยวข้องกับการวัดความต้านทานต่อการ เกิดเป็นรอยกด ซึ่งใช้เป็นหลักการพื้นฐานของเครื่องมือวัดความแข็งแบบต่างๆ หัวกดมีทั้งที่เป็นแบบหัวบอล แบบระนาบ หรือแบบกรวยปลายมนหรือปิรามิด ซึ่งปกติทำจากเหล็กกล้าแข็งหรือเพชรและใช้ทดสอบภายใต้สภาวะน้ำหนักคงที่ โดยการวัดน้ำหนักที่จะทำให้เกิดรอย กดตามที่กำหนดหรือวัดรอยกดที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำนั้น ส่วนความแข็งแบบกระดอนการทดสอบความแข็งกับวัสดุโลหะส่วนใหญ่เป็นการทดสอบแบบ Brinell หรือ Rockwell ส่วนการ

ทดสอบแบบอื่นคือการทดสอบแบบ Shore scleroscope, Vickers, Monotron, Rockwell superficial และเครื่องทดสอบ Herbert จะใช้ในการทดสอบโลหะที่มีความแข็งสูงหรือเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบผิวแข็ง นอกจากนี้ในการทดสอบความแข็งบางครั้ง ต้องทำการทดสอบกับวัสดุที่เล็กและบางมาก หรือวัสดุที่มีระดับความแข็งแตกต่างกันที่ ผิวเป็นบริเวณแคบๆ จึงจำเป็นต้องพัฒนาเครื่องทดสอบความแข็งระดับจุลภาค (microhardness tester) เช่น นูพ (Knoop) เป็นต้น

การทดสอบความแข็ง Vickers เป็นการทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรรูปปิรามิตฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็ก ซึ่งมีองศาของปลายแหลม 136° ดังรูปที่ 7.6 และน้ำหนักกดที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 5-120 กิโลกรัม โดยจะเพิ่มครั้งละ 5 กิโลกรัม การทดสอบนี้มีหลักการเดียวกันกับการทดสอบความแข็ง Brinell คือค่าความแข็งที่ได้คิดจากน้ำหนักกดที่กระทำต่อพื้นที่ของ รอยกด และจากรูปที่ 2.3 สามารถหาค่าพื้นที่รอยกดได้ดังสมการ พื้นที่รอยกด = ซึ่งจะมีค่าโดยประมาณ = ดังนั้นค่าความแข็ง Vickers หัวกดเพชรปิรามิตฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส DPH (Vickers Diamond Pyramid Hardness) หรือ HV (Vickers Hardness) จะมีค่าดังสมการ

จากค่าความแข็ง Vickers = จะได้ DPH = เมื่อ DPH คือความแข็ง Vickers (kg/mm<sup>2</sup>) F คือน้ำหนักกด (kg) และ d คือความยาว

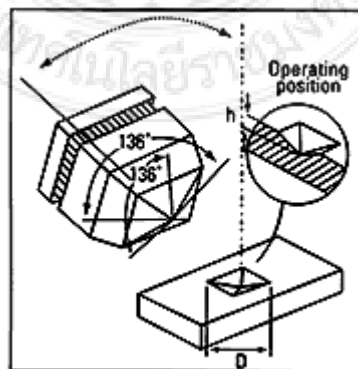
$$\text{พื้นที่รอยกด} = \frac{d^2}{2 \sin(136^\circ/2)} \text{ ซึ่งจะมีค่าโดยประมาณ} = \frac{d^2}{1.8544}$$

ดังนั้นค่าความแข็ง Vickers หัวกดเพชรปิรามิตฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส DPH (Vickers Diamond Pyramid Hardness) หรือ HV (Vickers Hardness) จะมีค่าดังสมการ

จากค่าความแข็ง Vickers = แรงกด/พื้นที่รอยกด

$$\text{จะได้ DPH} = \frac{1.8544 f}{d^2}$$

เมื่อ DPH คือความแข็ง Vickers (kg/mm<sup>2</sup>) F คือน้ำหนักกด (kg) และ d คือความยาว เส้นทแยงมุมเฉลี่ย (mm)



รูปที่ 2.3 ลักษณะหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็ง Vickers [6]



ในการทดสอบนำขึ้นทดสอบวางบนแท่นทดสอบ จากนั้นยกแท่นวางขึ้นจนชิ้นงาน เข้าใกล้ หัวกด จากนั้นให้ปลดล๊อคระบบคานน้ำหนักจะถูกส่งไปยังหัวกดในอัตรา 20:1 อย่าง ต่อเนื่อง จากนั้นนำน้ำหนักกดออก ลดระดับแท่นวางลง นำชิ้นงานไปส่องกล้องจุลทรรศน์ เพื่อทำการวัด เส้นทแยงมุมของรูปรอยกดสี่เหลี่ยมที่ปรากฏ การทดสอบความแข็งแบบ Vickers ขั้นต้นจะใช้ในงานวิจัย ข้อดีของการทดสอบนี้ คือการวัดขนาดของเส้นทแยงมุมจะมีความแม่นยำกว่าการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และสามารถใช้ทดสอบกับชิ้นงานที่บางได้ คือหนาประมาณ 0.006 นิ้ว นอกจากนั้นยังให้ค่าความ แข็งที่ถูกต้องเมื่อใช้ทดสอบกับวัสดุที่แข็งมากประมาณ 1300 HV หรือ ประมาณ 850 BHN เนื่องจากหัวกดไม่เกิดการยุบตัวขณะทดสอบ และค่าความแข็งที่ได้เป็นที่ ยอมรับมากกว่า ข้อเสียคือเป็นการทดสอบแบบทำลาย ขั้นตอนการทดสอบใช้เวลามากกว่าการ ทดสอบแบบ Brinell และ Rockwell ขึ้นทดสอบต้องทำการขัดเงาซึ่งใช้เวลามาก นอกจากนั้น เครื่องทดสอบมีราคาแพง ตัวอย่าง 7.3 หากค่าความแข็ง Vicker ของชิ้นทดสอบที่มีเส้นทแยงมุม ของรอยกดเฉลี่ย 0.75 mm จากน้ำหนักกด 100 kg DPH = = 330 kg/mm<sup>2</sup>

## 2.6 การทดสอบแรงดึง (tension test) [7]

การทดสอบแรงดึงและแรงกดอัดแบบสถิตย์ (static) เป็นการทดสอบที่ง่ายที่สุดและถูกใช้อย่าง กว้างขวางที่สุดในการทดสอบหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ซึ่งคุณสมบัติทางกลของวัสดุภายใต้แรงดึงที่ เราสนใจได้แก่

1. proportional limit,  $\sigma_{pl}$
2. yielding stress,  $\sigma_y$
3. ultimate stress,  $\sigma_u$
4. fracture stress,  $\sigma_f$
5. percent of elongation
6. percent of area reduction
7. modulus of elasticity,  $E$
8. modulus of resilience,  $u_r$

การที่จะเลือกว่าการทดสอบแรงดึงหรือการทดสอบแรงกดอัดอย่างไรมีความเหมาะสม มากกว่ากันนั้น เราจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่อไปนี้

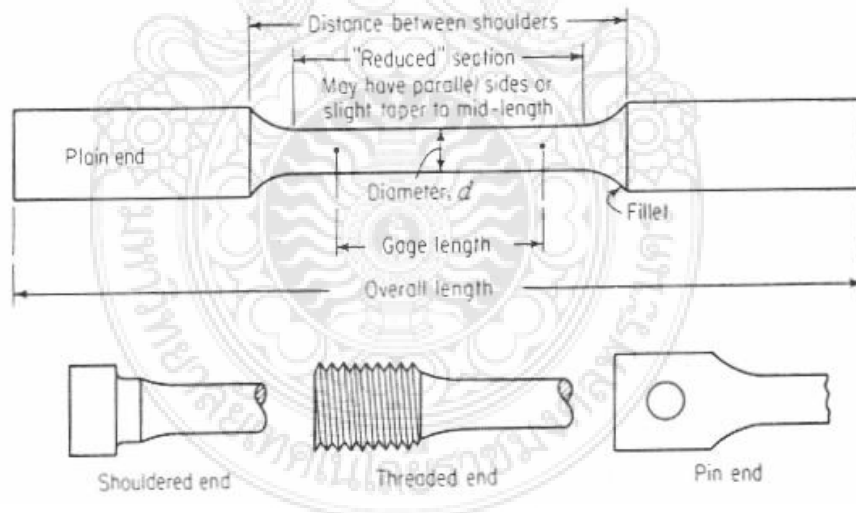
1. ความเหมาะสมของวัสดุที่เรากำลังจะทดสอบ เช่น โลหะมักจะถูกนำมาใช้ในโครงสร้างเพื่อ รับแรงดึง เพราะมีกำลังรับแรงดึงที่สูง ดังนั้น โดยส่วนใหญ่โลหะจะถูกทดสอบแรงดึง แต่ในวัสดุ เปราะบางประเภท เช่น คอนกรีตและอิฐ เป็นต้น จะมีกำลังรับแรงดึงที่ต่ำเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงกด อัด ดังนั้น วัสดุเหล่านี้จึงถูกนำไปใช้ในการรับแรงกดอัด และมักจะถูกทดสอบโดยการทดสอบแรงกดอัด

2. ความแตกต่างของคุณสมบัติของวัสดุภายใต้แรงดึงและแรงกดอัด เช่น ไม้เป็นวัสดุที่มีกำลังรับแรงดึงที่ค่อนข้างสูง แต่ไม่สามารถนำมาใช้ในโครงสร้างรับแรงดึงได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากไม้มีกำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำ ทำให้เกิดการวิบัติที่จุดเชื่อมต่อได้ง่าย ดังนั้น การทดสอบแรงกดอัดของไม้จึงได้รับความนิยมมากกว่าการทดสอบแรงดึง

3. ความยากและความซับซ้อนในการจับยึดตัวอย่างทดสอบ

#### ตัวอย่างทดสอบ

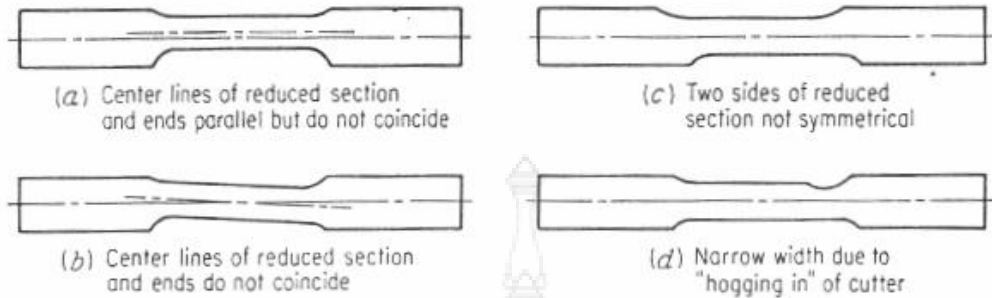
ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงอาจจะมีหน้าตัดทรงกลม สี่เหลี่ยมด้านเท่า หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าก็ได้ ถ้าแผ่นเหล็กมีความหนาพอที่จะทำการกลึงให้เป็นหน้าตัดทรงกลมได้ ( $>10$  mm) ตัวอย่างทดสอบในรูปของแท่งกลมก็จะถูกนำมาใช้ทดสอบ แต่หากว่าแผ่นเหล็กนั้นบางมากจนไม่สามารถนำมากลึงได้แล้ว เราก็จะใช้ตัวอย่างทดสอบที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปที่ 5-1 แสดงรูปร่างของตัวอย่างทดสอบแบบแท่งกลม เราควรสังเกตด้วยว่า ปลายทั้งสองของตัวอย่างทดสอบจะถูกขยายให้ใหญ่กว่าบริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบ ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่บริเวณดังกล่าวเนื่องจากผลของความเข้มข้นของหน่วยแรง (stress concentration) ที่เกิดจากการจับตัวอย่างทดสอบที่ปลายทั้งสองของตัวอย่างทดสอบ และปลายของตัวอย่างทดสอบที่นิยมใช้มี 3 แบบคือ shouldered end, threaded End, และ pin end ดังที่แสดงในรูป โดยที่ shouldered end และ threaded End จะได้รับความนิยมมากกว่า pin end [7]



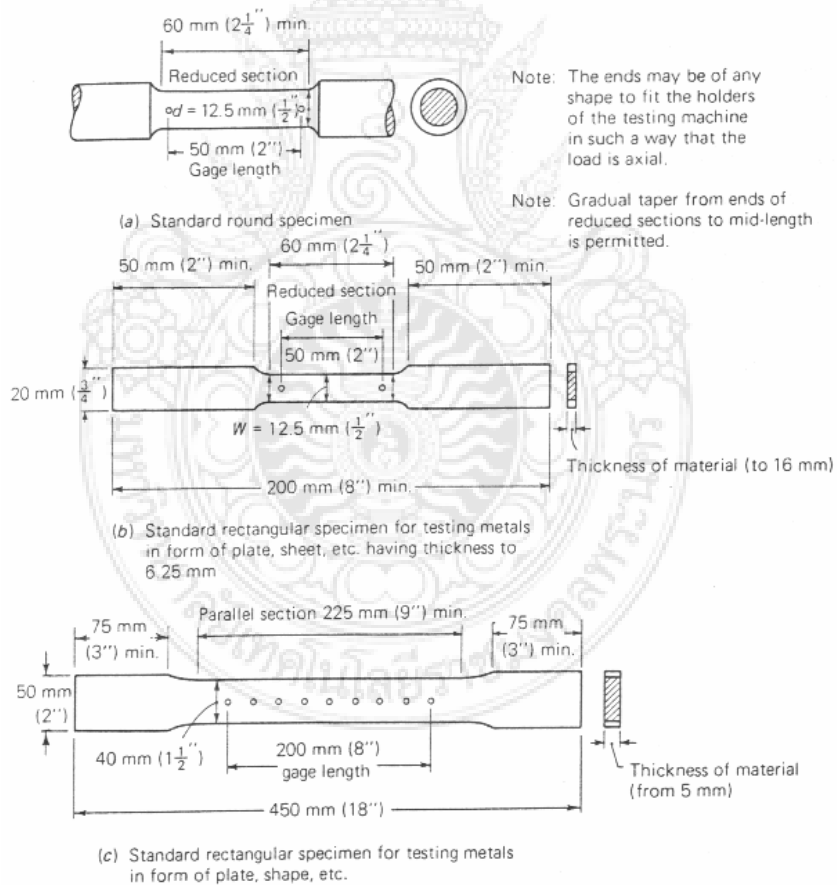
รูปที่ 2.4 รูปร่างของตัวอย่างทดสอบแบบแท่งกลม [7]

รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะต่างๆ ของตัวอย่างทดสอบที่ไม่ควรนำมาใช้ในการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุ เนื่องจากตัวอย่างทดสอบไม่มีความสมบูรณ์ ซึ่งจะทำให้ผลการทดสอบที่ได้คลาดเคลื่อนจาก

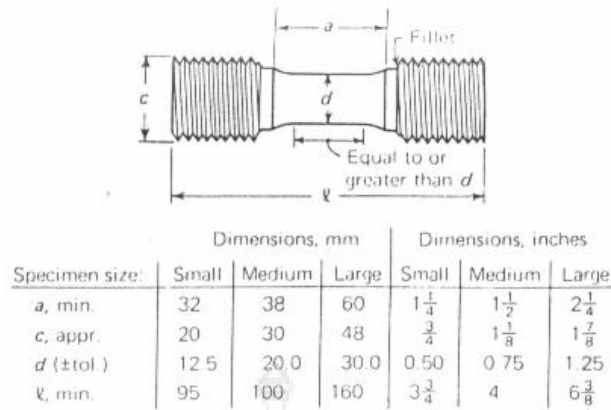
ความเป็นจริงตัวอย่างทดสอบมาตรฐานของเหล็กเหนียวและเหล็กหล่อได้ถูกกำหนดไว้ใน ASTM E8 ดังที่แสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ



รูปที่ 2.5 ลักษณะต่างๆ ของตัวอย่างทดสอบที่ไม่ควรนำมาใช้ในการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุ [7]



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างทดสอบมาตรฐานของเหล็กเหนียวตามมาตรฐาน ASTM E8 [7]



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างทดสอบมาตรฐานของเหล็กหล่อตามมาตรฐาน ASTM E8 [7]

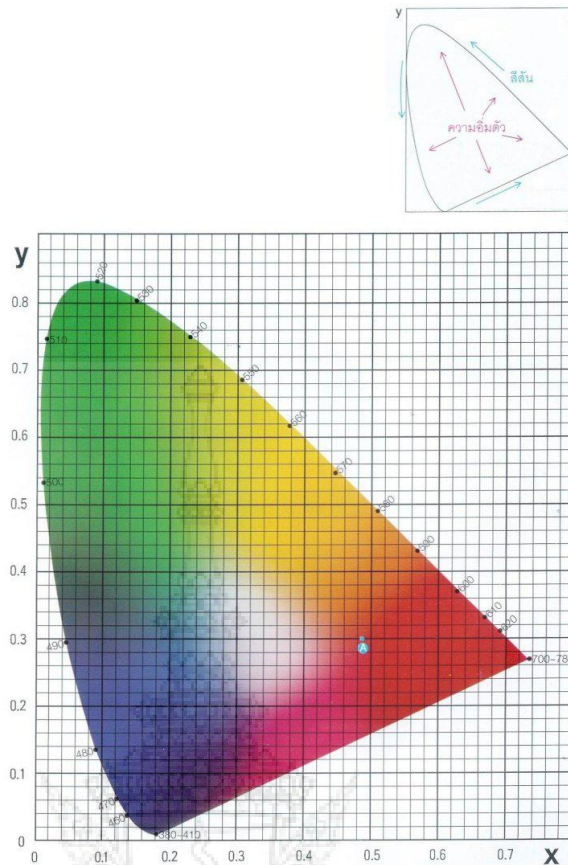
อีกรูปแบบหนึ่งของการทดสอบแรงดึงของวัสดุที่เรามักพบคือ การหากล้างรับแรงดึงของคอนกรีตซึ่งจะทำได้โดยการทำ splitting tensile test ตามมาตรฐานของ ASTM C496 โดยที่ตัวอย่างทดสอบจะเป็นรูปทรงกระบอกขนาด 150x300 mm และจะถูกกระทำโดยแรงกดอัด ดังที่แสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งแรงกดอัดนี้จะทำให้เกิด arch action ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดึงในแนวราบและจะทำให้เกิดการแตกร้าวในแนวตั้งในแนวตั้ง ดังที่แสดงในรูปที่ 2.7

## 2.7 ทฤษฎีเทคนิคและวิธีการวัดทดสอบระดับสีตามมาตรฐานการทดสอบ CIELAB [8]

เทคนิค และวิธีการวัดทดสอบระดับสี ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นรายละเอียดเกี่ยวกับทฤษฎีการวัดสีระบบของการวัดสีและการสื่อความหมายของสี เพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับสื่อสารสีที่มองเห็น

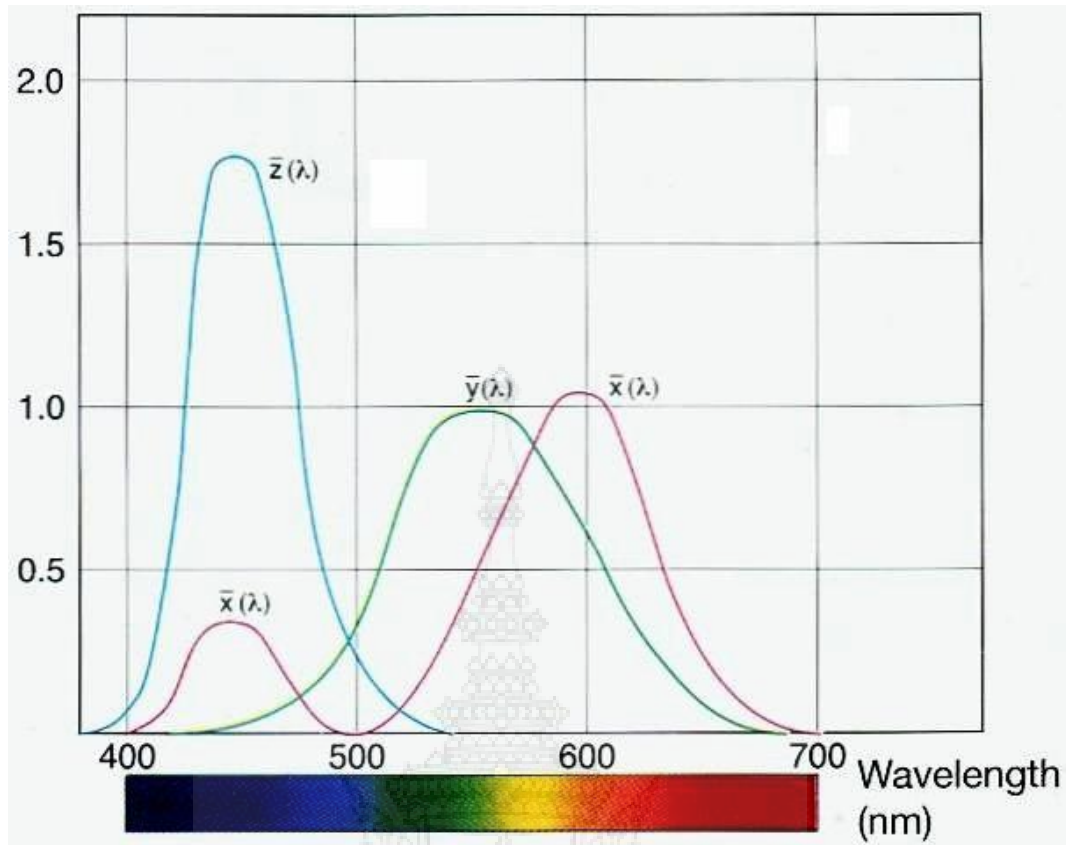
### 2.7.1 ทฤษฎีการมองเห็นสีและการวัดสี [8]

ในอดีตที่ผ่านมามีสิ่งสื่อสารให้มีความเข้าใจได้ยาก เนื่องจากสีหรือสีสนั้นมีความหลากหลาย การที่จะบอกคุณภาพของสีนั้นแตกต่างจากการบอกความยาวและน้ำหนัก เพราะไม่มีหน่วยบอกค่าสี ทำให้เป็นเรื่องที่วุ่นวายในการที่จะให้คำตอบหรืออธิบายให้ผู้คนได้เข้าใจอย่างชัดเจนเกี่ยวกับระดับสี เช่น การบอกความแตกต่างของสีฟ้า น้ำทะเลกับสีฟ้าท้องฟ้า ซึ่งคนแต่ละคนจะมีจินตนาการในสีทั้งสองที่ต่างกัน เพราะการรับรู้เรื่องสีและประสบการณ์ของแต่ละคนมีความแตกต่างกัน ดังนั้นในปี ค.ศ. 1931 The Commission International Del' Éclair age (CIE) ซึ่งเป็นองค์กรระหว่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของสีและแสง ได้พัฒนาระบบที่ทำให้เห็นความแตกต่างของสีมีระยะที่สัมพันธ์ใกล้เคียงกับความแตกต่างที่มองเห็นด้วยตามนุษย์มากขึ้น โดยกำหนดเป็นค่าปริภูมิสี (Color Space) ขึ้นมา และถูกนำมาในการสื่อสารเกี่ยวกับสีและระบบของสีที่ใช้กันทั่วโลกในปัจจุบัน



รูปที่ 2.8 ไดอะแกรมสี x, y ของ CIE ในปี 1931 [8]

ปริภูมิสี (Color Space) เป็นขอบเขตแสดงความกว้างขวางของสีของวัตถุหรือแหล่งกำเนิดแสงโดยใช้เครื่องหมายหรือตัวเลข ที่ได้รับการพัฒนาจากแนวคิดพื้นฐานจากทฤษฎี 3 องค์ประกอบในการมองเห็น คือ ความมีสีล้วน (Hue หรือ H) ความสว่าง (Value หรือ V) และความอิ่มตัวหรือโครมา (Chroma หรือ C) โดยปกติแล้วตาของมนุษย์ประกอบด้วยเซลล์ไวแสงสามสี คือ สีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน ซึ่งสีทั้งหมดที่มนุษย์มองเห็นเกิดจากการผสมผสานของสามสีดังกล่าวปริภูมิสีที่ CIE พัฒนาขึ้นเป็นกราฟสองมิติที่ไม่รวมค่าความสว่างเข้ามาด้วย เรียกว่า ปริภูมิสี Yxy (Yxy Color Space) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ทั้งนี้ให้ Y แทนค่าความสว่าง ส่วน x และ y คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของสีที่ได้จากการคำนวณฟังก์ชันความไวแสงของเซลล์ไวแสงทั้งสามสีของตามนุษย์ (Color-matching function) ดังกล่าวข้างต้น (ซึ่งประกอบด้วยสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน) คือ  $\bar{x}(\lambda)$   $\bar{y}(\lambda)$  และ  $\bar{z}(\lambda)$  ที่อยู่ในรูปของสเปกตรัมการกระจายแสงหรือความยาวคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.11 แล้วแสดงค่าออกมาในรูปของปริภูมิสีระบบต่างๆ เช่น ปริภูมิสีระบบ L\*a\*b ปริภูมิสีระบบ L\*C\*h และปริภูมิสีระบบ Hunter Lab [8]

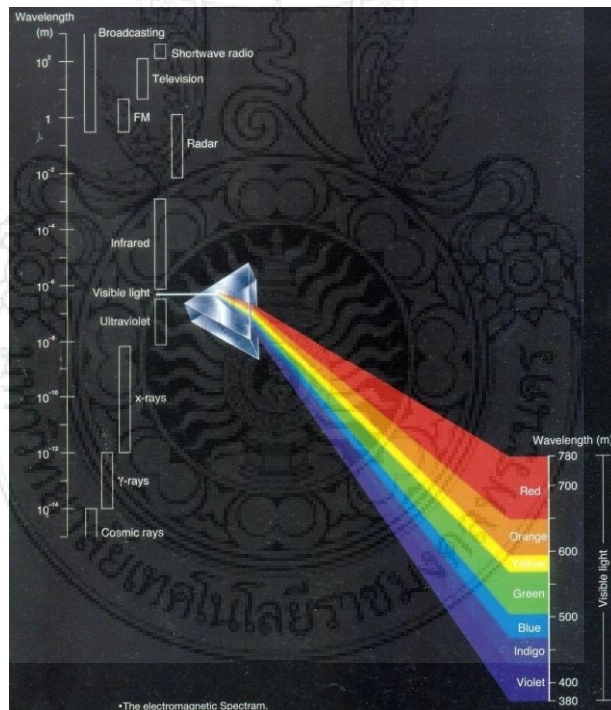


รูปที่ 2.9 ความไวแสงของตามนุษย์ (Color-matching function) [8]

ก่อนที่จะกล่าวถึงรายละเอียดปริภูมิสีระบบต่างๆ ขอทำความเข้าใจเกี่ยวกับการมองเห็นสีของมนุษย์ ซึ่งผู้คนส่วนใหญ่ทราบกันดีว่า ถ้าให้แสงอาทิตย์ส่องผ่านแท่งแก้วปริซึม แสงจะหักเหออกมาคล้ายสีรุ้งดังแสดงในรูปที่ 2.9 ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการกระจายแสงของสี หรือที่เรียกว่าสเปกตรัมการที่มนุษย์สามารถมองเห็นสเปกตรัมได้นั้น เป็นเพราะช่วงคลื่นดังกล่าวไปกระตุ้นเรตินาในตามนุษย์ ทำให้เห็นเป็นสีแดง สีส้ม สีเหลือง สีเขียว สีน้ำเงินและสีม่วง โดยขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความยาวคลื่นของแสงนั้น แสงในบริเวณที่มีความยาวคลื่นยาวที่สุด คือ สีแดง และแสงในบริเวณที่มีความยาวคลื่นสั้นที่สุด คือ สีม่วง แสงในช่วงความถี่ที่มนุษย์มองเห็นได้เรียกว่า Visible light region ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ความยาวคลื่นที่ยาวถัดขึ้นไปจะเข้าสู่ย่านคลื่นอินฟราเรด และถ้าเป็นช่วงความยาวคลื่นที่สั้นกว่าที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ก็จะเข้าสู่ย่านคลื่นอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งคลื่นทั้งสองชนิดนี้ มนุษย์ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า สำหรับหน่วยที่ใช้วัดความยาวคลื่นแสงนี้นิยมใช้เป็นหน่วยนาโนเมตร (Nanometer:  $\mu\text{m}$ ) หรือบางครั้งอาจใช้หน่วยไมโครเมตร (Micrometer:  $\mu\text{m}$ ) [8]



รูปที่ 2.10 ภาพสีรุ้งของรุ่งกินน้ำที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ที่เกิดจากแสงอาทิตย์ทะลุผ่านหยดน้ำ ซึ่งทำหน้าที่เป็นปริซึม [8]

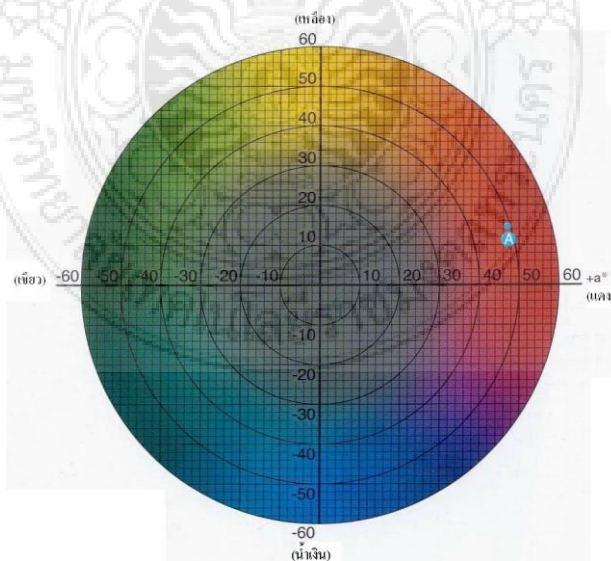


รูปที่ 2.11 ภาพคลื่นแสงในช่วงความยาวที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ที่เรียกว่า Visible light [8]

## 2.7.2 ระบบของปริภูมิสี (Color Space System) [8]

ปริภูมิสีเป็นค่าที่ใช้แสดงขอบเขตความกว้างขวางของสีของวัตถุหรือแหล่งกำเนิดแสงโดยการใช้เครื่องหมายหรือตัวเลขแสดงค่าสี ระบบปริภูมิสีที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปประกอบด้วย ปริภูมิสีระบบ  $L^*a^*b$  ปริภูมิสีระบบ  $L^*C^*h$  และปริภูมิสีระบบ Hunter Lab ซึ่งรายละเอียดของค่าปริภูมิสีในแต่ละระบบมีดังนี้

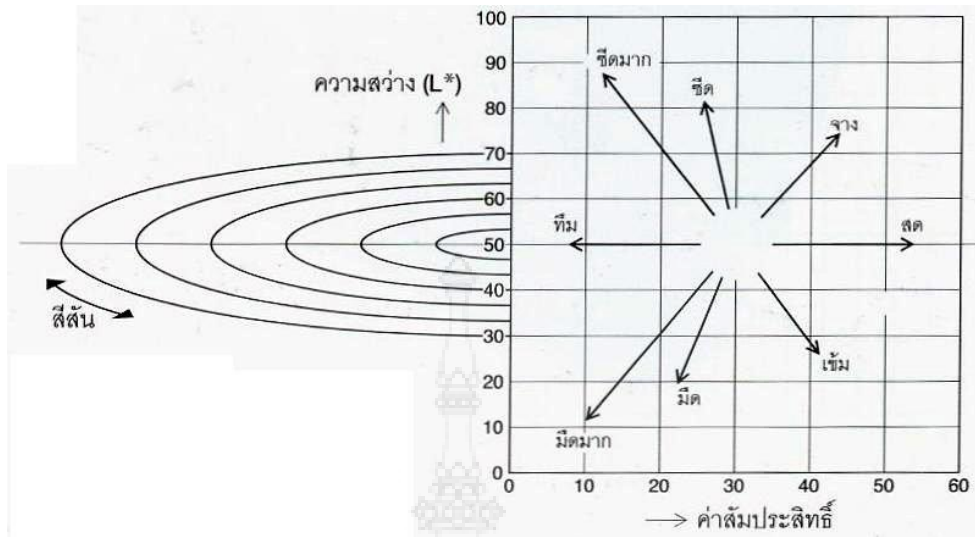
ก. ปริภูมิสีระบบ  $L^*a^*b$  ( $L^*a^*b$  Color Space) หรือบางครั้งเรียกว่า CIELAB เป็นระบบที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายในการนำมาใช้วัดค่าสีและใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในหลายๆวงการ โดยปริภูมิสีเป็นประเภทที่มีสเกลสมำเสมอ ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดย CIE ในปี ค.ศ. 1976 เพื่อแก้ปัญหาการแปลค่าสีที่เกิดขึ้นในระบบ  $Yxy$  เพราะพบว่าระยะห่างระหว่าง  $x$  กับ  $y$  บนไดอะแกรมสีจะไม่สอดคล้องกับความแตกต่างของสีที่เกิดจากการมองเห็นจริง ในระบบปริภูมิสี  $L^*a^*b$  นี้ ค่า  $L^*$  หมายถึง ความสว่าง ส่วนค่า  $a^*$  และค่า  $b^*$  หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์สี ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งไดอะแกรมดังกล่าว ค่า  $a^*$  และค่า  $b^*$  จะบอกถึงทิศทางของสี เช่น  $+a^*$  หมายถึง อยู่ในทิศทางของสีแดง  $-a^*$  หมายถึง อยู่ในทิศทางของสีเขียว  $+b^*$  หมายถึง อยู่ในทิศทางของสีเหลือง และ  $-b^*$  หมายถึง อยู่ในทิศทางของน้ำเงิน พื้นที่ตรงกลางจะไม่สามารถแยกสีได้ (achromatic) เมื่อค่า  $a^*$  และ  $b^*$  เพิ่มขึ้นและจุดดังกล่าวเคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์กลางความอึมตัวของสีก็จะเพิ่มขึ้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.15 ซึ่งแสดงให้เห็นค่าสีต่างๆ ของปริภูมิสี  $L^*a^*b$  อย่างชัดเจน จากรูปที่ 2.14 เป็นภาพตัดตามขวางโดยค่าความสว่าง ( $L$ ) มีค่าคงที่ ตัวอย่างเช่น เมื่อทำการวัดสีวัตถุชนิดหนึ่งโดยใช้ปริภูมิสีระบบ  $L^*a^*b$  ได้ค่า  $L^* = 43.31$  ค่า  $a^* = +47.63$  และค่า  $b^* = +14.12$  เมื่อพล็อตค่า  $a^*$  และค่า  $b^*$  ลงบนแกน  $a^*$  และ  $b^*$  ในรูปที่ 2.14 จุด A เป็นจุดที่แสดงสีของวัตถุ [8]



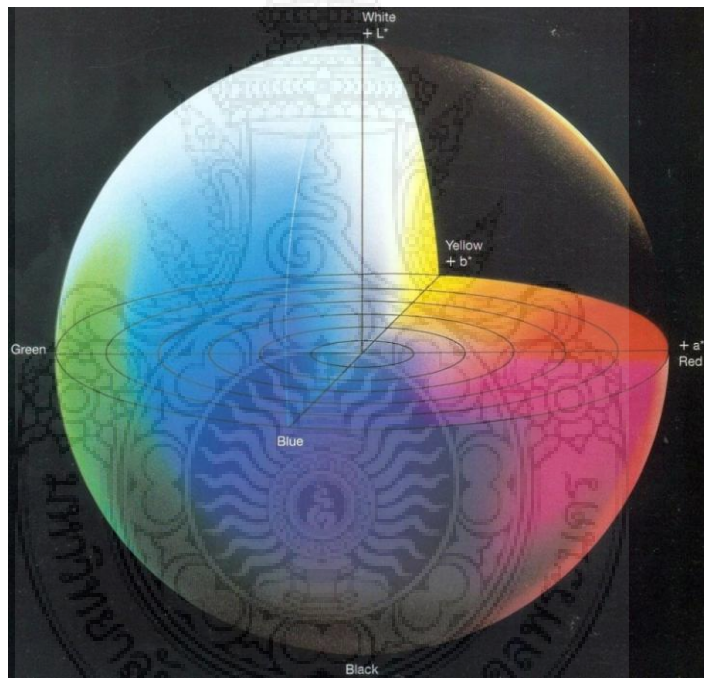
รูปที่ 2.12 ไดอะแกรมสัมประสิทธิ์สี  $a^*$ ,  $b^*$  [8]



A



B



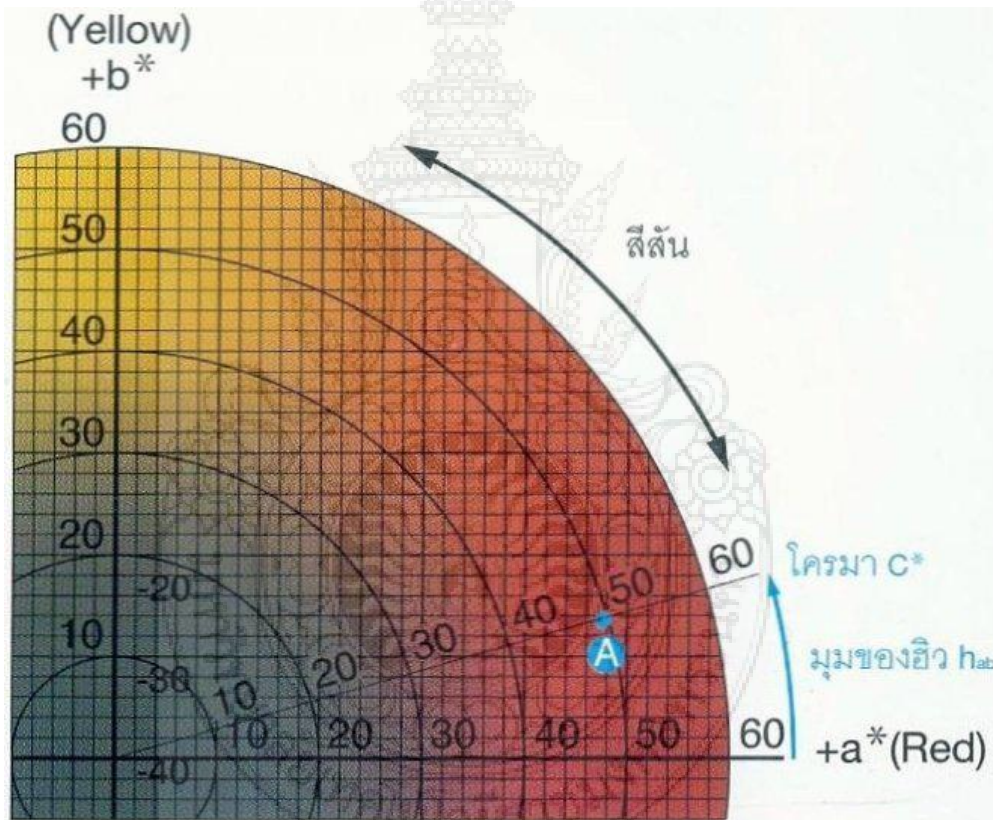
รูปที่ 2.13 ค่าสัมประสิทธิ์สีและความสว่าง (A) ค่าสัมประสิทธิ์สีและความสว่าง (B) ปริภูมิสีระบบ  $L^*a^*b$  ( $L^*a^*b$  Color Space) [8]

ข. ปริภูมิสีระบบ  $L^*C^*h$  ( $L^*C^*h$  Color Space) ปริภูมิสีระบบ  $L^*C^*h$  ใช้ไดอะแกรมสีแบบเดียวกับระบบ  $L^*a^*b$  แต่รูปร่างต่างกันที่เป็นรูปกรวยแหลมแทนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในระบบนี้ค่า  $L^*$  หมายถึงความสว่าง เช่นเดียวกับค่า  $L^*$  ในระบบ  $L^*a^*b$  โดยค่า  $C^*$  หมายถึง ค่าโครมา (Chroma) และ

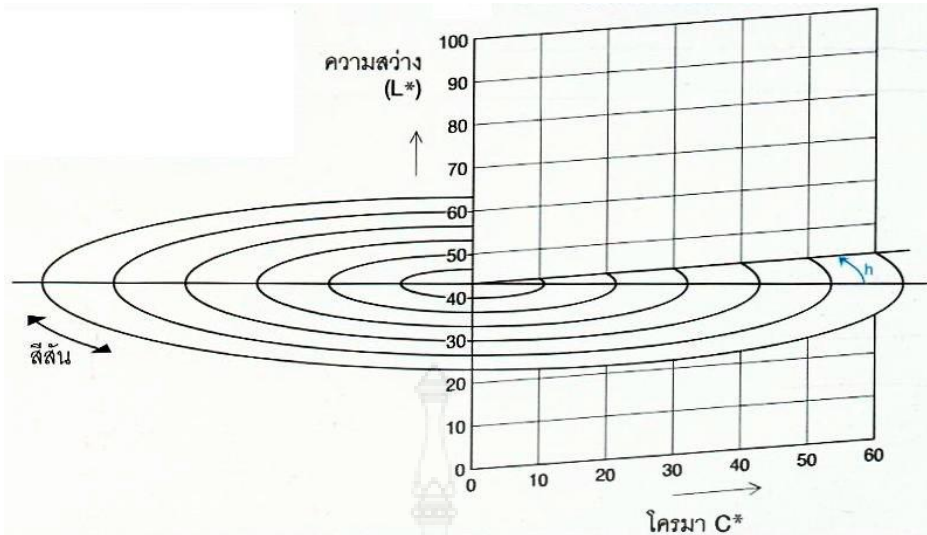
$h$  หมายถึง มุมของฮิว (Hue angle) ค่า  $C^*$  จะมีค่าเป็น 0 ที่จุดศูนย์กลางและจะมีสีอึมตัวมากขึ้น เมื่อออกห่างจากศูนย์กลางมากขึ้น ส่วนค่ามุมฮิว ที่แทนค่าด้วย  $h$  จะเริ่มนับค่าบนแกนด้าน  $+a^*$  โดยมีค่าเริ่มต้นที่ 0 องศาบนแกนด้าน  $+a^*$  จะเป็น (สีแดง) เมื่อเป็นมุม 90 องศา จะเป็นแกน  $+b^*$  (สีเหลือง) ที่มุม 180 องศา จะเป็นแกน  $-a^*$  (สีเขียว) และเมื่อเป็นมุม 270 องศา จะเป็นแกน  $-b^*$  (สีน้ำเงิน) ตัวอย่างเช่น เมื่อทำการวัดสีของวัตถุ ด้วยขอบเขตปริภูมิสีระบบ  $L^*C^*h$  ได้ค่า  $L^* = 43.31$  ค่า  $C^* = 49.68$  และค่า  $h^* = 16.5$  เมื่อพล็อตจุดบนกราฟในรูปที่ 2.16 ก็จะได้จุด A ตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.16 ซึ่ง

$$\text{ค่า } C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (2.1)$$

$$\text{Hue angle } h_{ab} = \tan^{-1}(b^* / a^*) \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.14 ค่าสัมประสิทธิ์สี  $a^*$ ,  $b^*$  ที่ใช้แสดงค่าปริภูมิสีระบบ  $L^*C^*h$  [8]



รูปที่ 2.15 ค่าโครมาและความสว่าง [8]

### 2.7.3 ความแตกต่างของสี

เนื่องจากตาของมนุษย์สามารถมองเห็นแสงได้ในช่วงความถี่ที่เห็นได้ด้วยตาเปล่าเท่านั้น ดังนั้นแสงจึงไม่ใช่สี แสงเป็นเพียงรังสีที่มากกระตุ้นเรตินาของตาและทำให้เกิดการมองเห็น จากนั้นจึงถ่ายทอดข้อมูลต่อไปยังสมอง สิ่งนี้คือแนวคิดเรื่องการเกิดสี โดยสมองจะทำการตอบสนองต่อข้อมูลที่ส่งต่อมาจากตา ซึ่งบางครั้งสายตามนุษย์อาจมองเห็นสีสองสีเป็นสีเดียวกัน และไม่สามารถแยกความแตกต่างของสีได้ แต่ถ้าเป็นเครื่องวัดสีสามารถบอกความแตกต่างของสีที่พบได้ โดยเฉพาะในกรณีของการวัดสีที่มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้การวัดสีด้วยเครื่องวัดสียังสามารถบอกความแตกต่างที่เกิดขึ้นเป็นตัวเลขที่แน่นอนได้เพื่อให้การสื่อความหมายของสีสามารถเข้าใจได้ง่าย โดยความแตกต่างของสีจะแสดงเป็นค่าเพียงค่าเดียวเรียกว่า เดลต้าอี ( $\Delta E^*_{ab}$ ) ค่าที่แสดงในรูปที่ 2.17-2.18 ซึ่งจะบอกเฉพาะปริมาณความแตกต่างของสีเท่านั้น แต่ไม่ได้บอกทิศทางความแตกต่างของสี ซึ่งค่า เดลต้าอี ( $\Delta E^*_{ab}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$(\Delta E^*_{ab}) = \sqrt{(\Delta L^*_{ab})^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2.3)$$

ตัวอย่างเช่น การหาความแตกต่างของสีของวัตถุ 2 ชิ้น ด้วยปริภูมิสีระบบ  $L^*a^*b^*$

วัตถุชิ้นที่ 1 วัดสีได้  $L^* = 43.31$ ,  $a^* = +47.83$ ,  $b^* = +14.12$

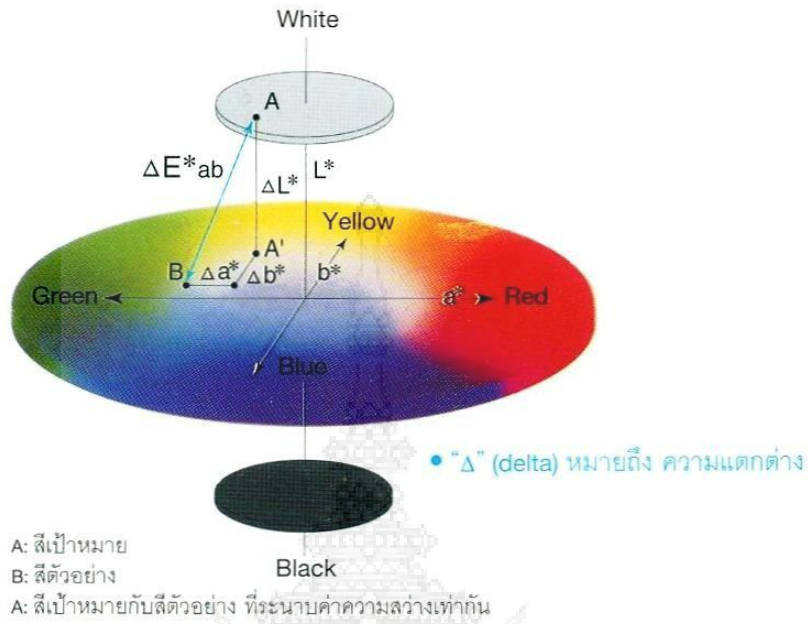
วัตถุชิ้นที่ 2 วัดสีได้  $L^* = 47.34$ ,  $a^* = +44.78$ ,  $b^* = +15.16$

จะได้ค่า  $\Delta L^* = +4.03$ ,  $\Delta a^* = -3.05$ ,  $\Delta b^* = +1.04$

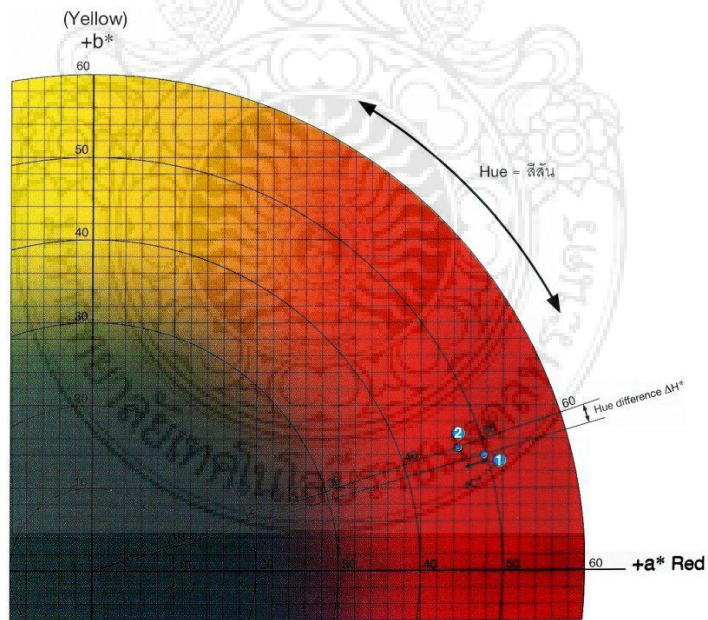
สีของวัตถุ 2 ชิ้น เมื่อนำไปแทนค่าลงในสมการจะได้  $\Delta E^*_{ab} = 5.16$

และในการทำงานเดียวกัน ถ้าวัดความแตกต่างของสีด้วยปริภูมิสีระบบ  $L^*C^*h$

ค่า  $\Delta L^*$  เป็นค่าเดียวกับปริภูมิสีระบบ  $L^*a^*b$  จะได้  $\Delta C^* = -2.59$  ซึ่งหมายความว่า วัตถุชิ้นที่ 2 มีสีสดน้อยกว่าวัตถุชิ้นที่ 1



รูปที่ 2.16 ค่าความแตกต่างสีในปริภูมิสีระบบ  $L^*a^*b$  [8]



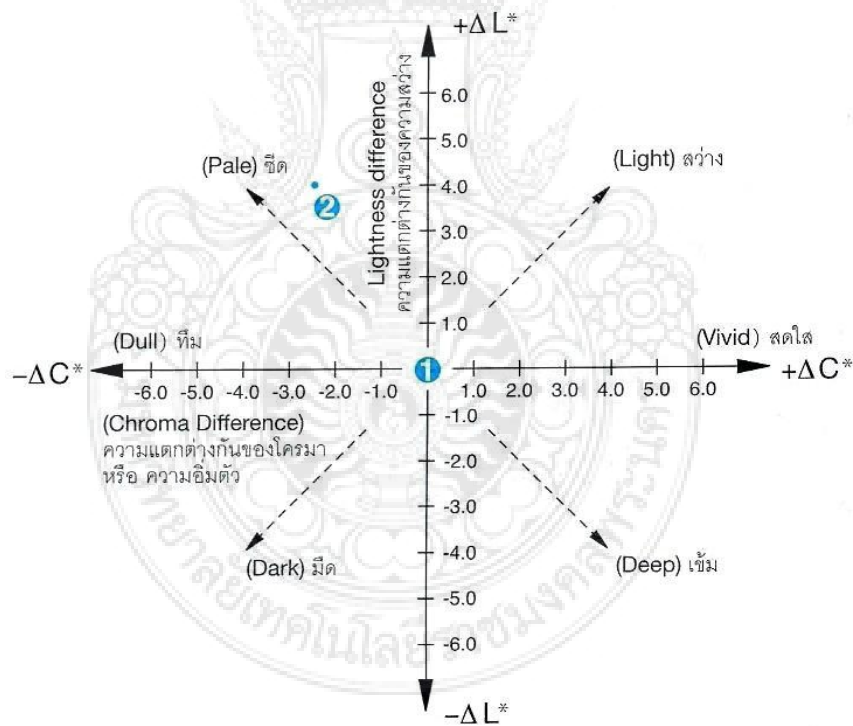
รูปที่ 2.17 ส่วนหนึ่งของไดอะแกรมสี  $a^*, b^*$  ในปริภูมิสีระบบ  $L^*C^*h$  [8]

สำหรับในส่วนของค่าความมีสีสัมที่แตกต่างกันของวัตถุ 2 ชิ้น คือ  $\Delta H^*$  ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\Delta H^* = \sqrt{(\Delta E^* ab)^2 - (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \tag{2.4}$$

ในกรณีนี้ ค่าที่ได้คือ +1.92 แต่ถ้าพิจารณาสีจากรูปที่ 2.19 จะเห็นว่าวัตถุชิ้นที่ 2 จะอยู่ใกล้กับแกน +b มากกว่า ดังนั้น จะดูมีสีเหลืองมากกว่า

ถึงแม้ว่าจะใช้คำพูดมาบรรยายสีได้ไม่ชัดเจนเท่ากับการแสดงเป็นตัวเลขก็ตาม แต่ก็สามารถใช้คำพูดอธิบายค่าความแตกต่างของสีได้เช่นกัน ในรูปที่ 2.20 แสดงให้เห็นถึงค่าบางค่าที่สามารถนำมาใช้ในการอธิบายความแตกต่างของสี เช่นบอกในเรื่องของความสว่างและโครมา เป็นค่าที่ใช้อธิบาย ซึ่งจะชี้ให้เห็นถึงทิศทางความแตกต่างของสี แต่ไม่ใช้คำขยายออกไปอีก (เช่น อ่อนๆ เข้มมากๆ เป็นต้น) ก็จะสามารถระบุระดับความแตกต่างของสีได้ ถ้าลองนำค่าสีของวัตถุทั้งสองชิ้นที่ได้มาพล็อต เราสามารถกล่าวได้ว่าวัตถุชิ้นที่ 2 มีสีซีดกว่าวัตถุชิ้นที่ 1 แต่เนื่องจากความแตกต่างกันมีไม่มาก จึงเพิ่มคำขยายท้ายออกไปว่า สีซีดกว่า เล็กน้อย เพื่อระบุถึงระดับความแตกต่าง

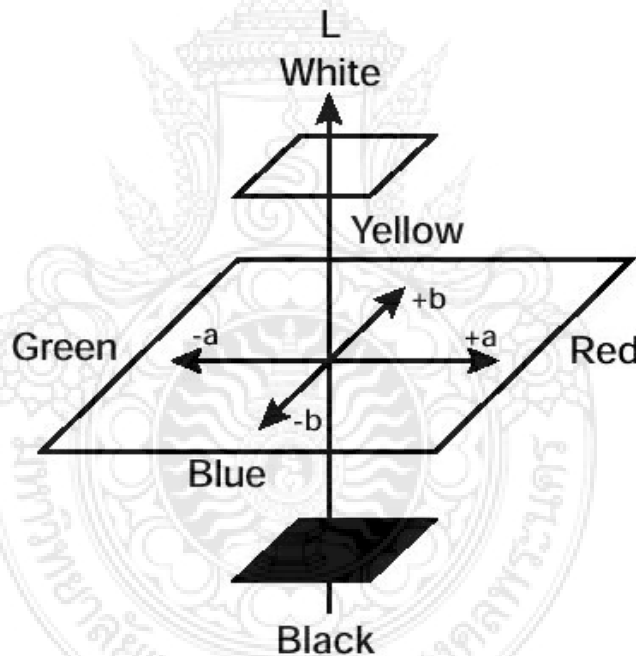


รูปที่ 2.18 คำที่ใช้อธิบายถึงค่าโครมาหรือความอิมิตัวของสีและความสว่าง (Chroma and Lightness) [8]

#### 2.7.4 การวัดระดับสีของทองคำเจือ [9]

จากระบบอ้างอิงการวัดสีของ CIELAB เป็นระบบมาตรฐานที่ใช้วัดระดับสีของวัตถุ โดยวัดการกระจายสีหรือที่เรียกว่า “สเปกตรัมการกระจายแสง” ค่าที่วัดได้จะอยู่ในรูปของความยาวคลื่น (Wavelength) ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จากนั้นสเปกตรัมการกระจายแสงหรือความยาวคลื่นที่ได้จะถูกแยกสเปกตรัมแล้วนำมาคำนวณหาค่าสีในปริภูมิสีระบบต่างๆ และแสดงค่าผลการวัดออกมาเป็นตัวเลข เช่น การวัดสีในระบบ CIELAB หรือระบบ Tristimulus หรือระบบ LCh Color Space ซึ่งต่อมา G.Graykhtsaum และ D.P.Agarwal ได้แสดงการวัดระดับสีของทองคำเจือด้วยการใช้พิกัดคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นระบบอ้างอิงปริภูมิสีของ The International Committee on Illumination (CIELAB) โดยกำหนดพิกัดแกนสีขึ้นมา 3 แกน ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ทั้ง 3 แกนแทนค่าด้วยตัวอักษร L, a และ b โดยแต่ละแกนมีรายละเอียดของแต่ละตัวอักษรดังนี้

- ตัวอักษร L แสดงค่าความสว่างของทองคำเจือ โดย L0 คือ สีดำ และ L100 คือ สีขาว
- ตัวอักษร a แสดงสีแดงถึงสีเขียว โดย a100 คือ สีแดงเข้ม และ a-100 คือ สีเขียว
- ตัวอักษร b แสดงสีเหลืองถึงสีน้ำเงิน โดย b100 คือ สีเหลือง และ b-100 คือ สีน้ำเงิน



รูปที่ 2.19 พิกัดการวัดสี [9]

#### 2.7.5 มาตรฐานสีทองคำกะรัต [10]

มาตรฐานรับรองระดับสีทองคำกะรัต ประกอบด้วยมาตรฐาน NIHS-03-50 มาตรฐาน CETEHOR-07 และมาตรฐาน DIN 8238 ที่ได้อ้างอิงระบบการวัดค่าระดับสีตามระบบ CIELAB และเป็นมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับโดยทั่วไปและใช้เป็นมาตรฐานยุโรป ที่เรียกว่ามาตรฐาน DIN EN 28654 ตลอดจนมีการนำมาใช้เป็นมาตรฐานสากล ที่เรียกว่ามาตรฐาน ISO 8654 นั้น ได้แบ่งค่าระดับสี

ทองคำกะรัตออกเป็น 8N, 0N, 1N, 2N, 3N, 4N และ 5N ซึ่งรายละเอียดของค่าระดับสีตามมาตรฐาน DIN 8238 ประกอบด้วยค่าสีมาตรฐานและพิกต์ความเผื่อค่าต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 สัญลักษณ์ระดับสีทองคำ ค่าการวัดและพิกต์ความเผื่อตามมาตรฐาน DIN 8238 [10]

สัญลักษณ์	สี		ค่าสีมาตรฐาน					
	สี	ตรงกับมาตรฐาน NIHS-03-50 และ CETEHOR-07-07	L		a		b	
			พิกต์ ความเผื่อ		พิกต์ ความเผื่อ		พิกต์ ความเผื่อ	
8N	ขาว	-	1.2	$\pm 0.2$	0.9	$\pm 0.1$	1.6	$\pm 0.3$
0N	เขียวเหลือง	-	24.8		1.6		1.2	
1N	เหลืองอ่อน	/	1.7	$\pm 0.1$	1.7	$\pm 0.1$	1.2	$\pm 0.15$
2N	เหลืองสด	/	1.8		1.8		1.3	
3N	เหลือง	/	2.0		1.8		1.3	
4N	ชมพู	/	2.4		1.6		1.4	
5N	แดง	/	2.6		1.5		1.4	

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาอิทธิพลของสารเจือ ฟอสฟอรัสและอินเดียม ต่อคุณสมบัติทางกลของโลหะเงินเจือทองแดงสำหรับผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ โดยผู้วิจัยได้ค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องและใกล้เคียงนำมาเสนอ ดังนี้

อัลโด [11] ได้ศึกษาพื้นฐานทางด้านโลหะวิทยาของเงินสเตอร์ลิงที่ผสมด้วยทองแดง โลหะที่ผสมลงไปดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดโครงสร้างจุลภาคคือเป็นตัวอธิบายว่ามาจาก Non-Equilibrium Solidification แบบใด ปริมาณทองแดงจะแยกตัวออก ซึ่งจะเป็นตัวแสดงถึงการได้มาของส่วนผสมสำหรับการทำหน้าที่ของทองแดง และโลหะผสมอื่นซึ่งสามารถทำการศึกษได้จากส่วนผสมสเตอร์ลิง และเพื่อลด Fire Staining พดติกรรม Tarnish สรุปได้ว่าจากศึกษาเพื่อเข้าใจของสัดส่วนผสมและผลกระทบของแต่ละส่วนผสมที่เติมไม่ว่าจะเป็น Zn Ge และ Si ในตัวแปรของสเตอร์ลิง

ริชาร์ด [12] ได้สรุปปัญหาจากการหล่อเงินสเตอร์ลิง ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 2 กลุ่ม คือ ปัญหาที่เกิดจากการปฏิบัติงานของผู้กระทำการหล่อหรือปัญหาที่เกิดขึ้นจากการลำดับขั้นของเทคนิคการหล่อ และปัญหาการดูดซับออกซิเจนในสถานะของเหลวซึ่งปัญหาดังกล่าวต้องมีวิธีป้องกันและจากการศึกษาถึงการดูดซับออกซิเจนโพรงอากาศ และการเกิดออกไซด์ของทองแดงที่ผสมในงานหล่อ

มาร์ค [9] ได้ศึกษาเวลาที่ใช้สำหรับการอบอ่อนด้วยเตาอบซึ่งผลจากการศึกษา ซึ่งมาร์คได้แนะนำว่าในทางปฏิบัติควรใช้เวลาประมาณ 30 นาที แต่ถ้าทำการอบอ่อนด้วยวิธีใช้หัวไฟเผาบนโต๊ะปฏิบัติงาน

ทั่วไปให้อุณหภูมิสูงกล่าวปกติจึงใช้เวลาในการให้ความร้อนสั้น อุณหภูมิที่ใช้สำหรับการอบอ่อนสามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงสีโลหะด้วยสายตา ซึ่งแนะนำอุณหภูมิสำหรับการอบอ่อนโลหะชนิดต่าง ๆ

*สมนึก และคณะ* [7] ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษถึงผลกระทบของสารเจือสำคัญที่ใช้ผสมในโลหะเงินเจือ ได้แก่ ทองแดง สังกะสี และซิลิกอน โดยกำหนดปริมาณทองแดงประมาณ 5% สังกะสีระหว่าง 0.5 ถึง 2.5% และซิลิกอน 0.1 ถึง 0.4% ในการศึกษาถึงคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ได้แก่ คุณสมบัติทางกล การหล่อ กรรมวิธีทางความร้อน และความต้านทานการหมอง ซึ่งผลการศึกษา พบว่า ถ้าปริมาณสังกะสีเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การยืดตัวลดลง ถ้าปริมาณซิลิกอนเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีแนวโน้มลดลง และพบว่าไม่ควรผสมซิลิกอนเกินกว่า 0.2% เพราะทำให้เปราะมาก ในการศึกษาคุณสมบัติด้านการหล่อเหวียงในเตาเหวียงแบบสุญญากาศด้วยเงินเจือ 4.8%Cu 1.6%Zn และ 0.1%Si ซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีคุณสมบัติทางกลในเกณฑ์ที่ดี พบว่า มุมรุ่ม 65° ความเร็ว 10G และอุณหภูมิเทหล่อ 1050°C มีสิ่งบกพร่องภายในน้อยที่สุด ด้านกรรมวิธีทางความร้อนได้ศึกษาจากโลหะเงินเจือ 4 ตัวอย่าง คือ 1) 0.05%Si 0.75%Zn 5.8%Cu 2) 0.09%Si 1.3%Zn 5.9%Cu 3) 0.1%Si 1.0%Zn 5.1%Cu และ 4) 0.14%Si 1.6%Zn 4.8%Cu พบว่าถ้าใช้อุณหภูมิอบเป็นเนื้อเดียวที่ 780°C เวลาที่เหมาะสมที่สุดคือ 65 นาที การอบเพิ่มความแข็งหลังจากการอบเป็นเนื้อเดียวและชุบน้ำ พบว่าอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่สุดคือ 300°C 2 ถึง 3 ชม. การศึกษาด้านความต้านทานการหมองพบว่าสังกะสีและซิลิกอนรวมถึงการขึ้นรูปเย็นมีผลลบ ในขณะที่ การอบเป็นเนื้อเดียวกันหลังหล่อมีผลดีอย่างชัดเจน

*เอกสิทธิ์ และคณะ* [13] ได้ศึกษาผลของซิลิกอนต่อคุณสมบัติการต้านทานการหมองและคุณสมบัติทางกลของโลหะเงินสเตอร์ลิง ซึ่งผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกอนจะทำให้ความต้านทานการหมองดีขึ้นและซิลิกอนยังช่วยให้ผิวงานหล่อมีผิวเงาและขาวขึ้นมากกว่า ผิวของชิ้นงานที่ปราศจากซิลิกอน โดยการเพิ่มปริมาณซิลิกอนทำให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็นโครงร่างตาข่ายที่เกิดจากเฟสของทองแดง-ซิลิกอนที่ขอบเกรน ซึ่งจะให้ความเหนียวลดลงอย่างเห็นได้ ชัดเจนเมื่อปริมาณซิลิกอนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (0.04%) ปริมาณซิลิกอนที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 0.02-0.2%โดยน้ำหนักซึ่งจะให้ความต้านทานการหมองร่วมกับคุณสมบัติทางกลที่ดี

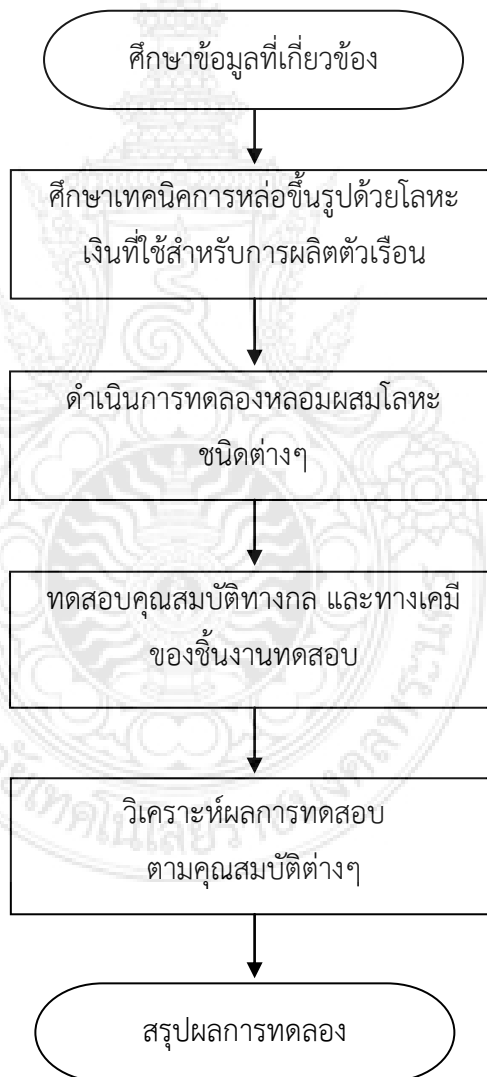


## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานการวิจัย

#### 3.1 แผนการดำเนินงาน

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33% ที่มีธาตุทองแดง (Cu) และดีบุก (Sn) เป็นธาตุผสม ซึ่งมีปริมาณการผสมอยู่ในช่วงระหว่าง 36.66-41.57% และ 0.10-5.01% ตามลำดับ โดยทำการเปรียบเทียบกับสมบัติของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33% จึงได้กำหนดแผนการดำเนินงานเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ตามแผนการดำเนินงานโดยมีแผนภาพการไหลกระบวนการทดลองดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพการไหลกระบวนการทำโครงการ

ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินโครงการจะแบ่งเป็นขั้นตอนของการดำเนินงานที่สำคัญโดยมีระยะเวลาตามความเหมาะสม และในทุกขั้นตอนจะต้องกำหนดระยะเวลาที่เหมาะสมและสามารถปฏิบัติได้จริง ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินโครงการ

รายการ	ระยะเวลาการดำเนินโครงการ												
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	
1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	■	■											
2. วางแผนการดำเนินงาน				■	■								
3. จัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์					■	■							
4. ทดลองตามเงื่อนไขที่กำหนด						■	■						
5. ทดสอบคุณสมบัติทางกล และทาง เคมี ของชิ้นงานทดสอบ							■	■	■				
6. วิเคราะห์ผลการทดสอบตามคุณสมบัติต่างๆ									■	■	■		
7. สรุปและรายงานผลการทดลอง													■

### 3.2 วัสดุที่ใช้สำหรับการทดลอง

#### 3.2.1 วัสดุ

- 1) โลหะเงิน (Ag) บริสุทธิ์ 100 เปอร์เซ็นต์
- 2) วัสดุผสม ประกอบด้วย ธาตุทองแดง (Cu) และธาตุดีบุก (Sn) ความบริสุทธิ์ 99.95 เปอร์เซ็นต์
- 3) อุปกรณ์สำหรับการหล่อลอมผสมโลหะและหล่อขึ้นรูปชิ้นสอบนั้น ประกอบไปด้วย เบ้าลอมโลหะ ปูนสำหรับทำแบบหล่อ ยางสำหรับทำแม่พิมพ์ยาง และเทียนสำหรับฉีดขึ้นรูปตัวแบบเทียน
- 4) วัสดุสำหรับการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ซึ่งประกอบไปด้วย กระจกทราย ผ่าขีด ผงเพชรขนาดต่างๆ และสารเคมี

#### 3.2.2 เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการทดลอง

เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้สำหรับการศึกษาวิจัยได้ดำเนินการจัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม

- 1) เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการลอมผสมโลหะและการหล่อขึ้นรูปชิ้นทดสอบ ในการทดลองศึกษาวิจัยนี้ ผู้ใช้เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการผลิตชิ้นงานเครื่องประดับ ซึ่งประกอบไปด้วย

หลอมผสมเทเม็ดโลหะ เครื่องหล่อดูดสุญญากาศและเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการเตรียมแบบหล่อ (เครื่องฉีดเทียน เครื่องผสมปูน เครื่องอบนึ่งไอน้ำและเตาอบปูนแบบหล่อ)

2) เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกลและศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ เหล่านี้ประกอบไปด้วย เครื่องขัดเตรียมชิ้นงาน กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) และเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์(Micro Vickers Hardness Test) เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Tensile Machine)

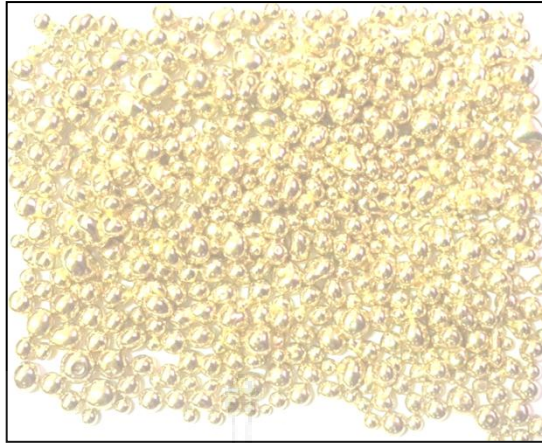
3) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM : Scanning Electron Microscope) ใช้สำหรับวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี

### 3.3 การดำเนินการหล่อหลอมผสมโลหะเพื่อผลิตเป็นมาสเตอร์อัลลอย

การดำเนินการหล่อหลอมผสมโลหะเพื่อผลิตมาสเตอร์อัลลอยสำหรับการวิจัยนี้ ดำเนินการโดยการหลอมโลหะทองแดงผสมดีบุกที่อัตราส่วนผสม  $58.45\text{Ag}+41.55\text{Cu}$  เพื่อผลิตโลหะผสมมาสเตอร์อัลลอยทองแดง ซึ่งทำการหลอมผสมด้วยเครื่องหลอมเทเม็ดโลหะที่ทำการหลอมโลหะผสมโลหะภายใต้สภาวะสุญญากาศและปกคลุมผิวหน้าโลหะด้วยก๊าซอาร์กอน ด้วยเครื่องหล่อ Indutherm รุ่น VC 600 ที่ใช้งานทั่วไปในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 หลังจากทำการหลอมผสมโลหะจนส่วนผสมต่างๆ หลอมผสมเข้าด้วยกันแล้วทำการเทหยดน้ำโลหะลงในน้ำเป็นเม็ดโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 เครื่องหลอมผสมเทเม็ดโลหะIndutherm รุ่น VC 600



รูปที่ 3.3 ลักษณะของเม็ดโลหะมาสเตอร์อัลลอย 58.45Ag + 41.55Cu หลังจากผ่านการเทหดยเม็ด

สภาวะของการหลอมผสมเทเม็ดโลหะเพื่อผลิตเม็ดโลหะมาสเตอร์อัลลอย

- 1) อัตราส่วนผสมของเม็ดโลหะมาสเตอร์อัลลอยประกอบด้วย 58.45Ag + 41.55Cu
- 2) ความจุของการหลอมผสมโลหะครึ่งละ 1/2 กิโลกรัม
- 3) อุณหภูมิหลอมผสมโลหะ 1,150 °C
- 4) ระยะเวลาของการคงอุณหภูมิก่อนทำการเทหดยเม็ดโลหะ 10 นาที
- 5) หลอมผสมโลหะภายใต้สภาวะสุญญากาศและปกคลุมผิวหน้าโลหะด้วยก๊าซอาร์กอน

### 3.4 การดำเนินการหลอมผสมโลหะและหล่อขึ้นรูปขึ้นทดสอบโลหะเงินผสม 58.33% สำหรับการวิเคราะห์ทดสอบต่างๆ

เม็ดโลหะผสมมาสเตอร์อัลลอย (ทองแดง-ดีบุก) ที่ได้จากหัวข้อ 3.3 ถูกนำมาหลอมผสมรวมกับโลหะเงิน เพื่อหล่อขึ้นรูปเป็นขึ้นทดสอบโลหะเงินผสม 58.33% สำหรับการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค เพื่อเปรียบเทียบกับโลหะเงินสเตอร์ลิงหรือโลหะเงินผสม 92.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถกำหนดอัตราการผสมของขึ้นทดสอบทั้งหมดดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.2 อัตราการผสมของขึ้นทดสอบโลหะเงินเจือดำ 58.33%

อัตราส่วนผสม	สัดส่วนการผสม (wt%) ที่กำหนดในการทดลอง			รวม (wt%)
	Ag	Cu	Sn	
93.71Ag + 6.30Cu	92.5	7.5	-	100
58.45Ag + 41.55Cu	58.33	41.76	-	100
58.33Ag + 36.66Cu + 5.01Sn	58.33	36.66	5.01	100

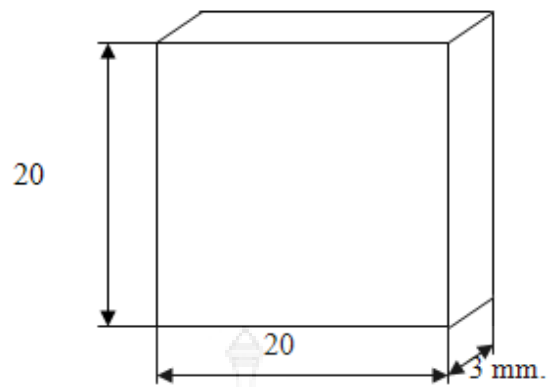
ตารางที่ 3.2 อัตราการผสมของขึ้นทดสอบโลหะเงินเนื้อต่ำ 58.33% (ต่อ)

อัตราส่วนผสม	สัดส่วนการผสม (wt%) ที่กำหนดในการทดลอง			รวม (wt%)
	Ag	Cu	Sn	
58.33Ag + 39.48Cu + 2.19Sn	58.33	39.48	2.19	100
58.33Ag + 41.16Cu + 0.51Sn	58.33	41.16	0.51	100
58.33Ag + 41.44Cu + 0.23Sn	58.33	41.44	0.23	100
58.33Ag + 41.57Cu + 0.10Sn	58.33	41.57	0.10	100

3.4.1 การหล่อหลอมขึ้นรูปขึ้นทดสอบโลหะเงินผสม 58.33% ได้ดำเนินการหล่อขึ้นรูปขึ้นทดสอบเป็นแท่งดัมเบลหรือกระดูกหมา (Dog Born) สำหรับการวิเคราะห์สมบัติความต้านแรงดึงโดยตัวแบบเทียของขึ้นทดสอบสำหรับการหล่อขึ้นรูปได้จากการฉีดเทียเข้าไปในโพรงแบบซิลิโคลนดังแสดงในรูปที่ 3.4 สำหรับในส่วนขึ้นทดสอบสำหรับการวิเคราะห์ทดสอบความแข็ง การศึกษาโครงสร้างจุลภาค ขึ้นทดสอบถูกกำหนดให้มีขนาด 20×20×3 mm ดังรูปที่ 3.5 – 3.6 ตามลำดับ ซึ่งตัวแบบเทียทั้งหมดจะถูกนำไปติดเป็นต้นเทียสำหรับการหล่อขึ้นรูปด้วยขบวนการ Investment Casting ด้วยเครื่องหล่อดูดสุญญากาศยี่ห้อ Yasui รุ่น K2 ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.4 โพรงแบบซิลิโคลนสำหรับการฉีดขึ้นรูปตัวแบบเทียสำหรับทดสอบความต้านแรงดึง



รูปที่ 3.5 ขนาดของตัวแบบเทียนขึ้นทดสอบสำหรับทดสอบความแข็งและศึกษาโครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 3.6 การติดต้นเทียนสำหรับหล่อขึ้นรูปขึ้นทดสอบสำหรับการทดสอบความต้านแรงดึงความแข็ง และศึกษาโครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 3.7 เครื่องหล่อทดสอบสุญญากาศยี่ห้อ Yasui รุ่น K2

3.4.2 หลังจากทำการเตรียมต้นเทียนสำหรับหล่อขึ้นรูปขึ้นทดสอบสำหรับการทดสอบความต้านแรงดึงความแข็งการศึกษาโครงสร้างจุลภาคเรียบร้อยแล้ว นำต้นเทียนไปทำการหล่อทับด้วยปูนโปรเตอร์เพื่อใช้สำหรับทำแบบหล่อ จากนั้นทำการหล่อขึ้นรูปขึ้นทดสอบแบบสุญญากาศแสดงขั้นตอนการหล่อดังรูปที่ 3.8



ก) เทปูนลงในกระบอกรูปวงกลมที่มีต้นเทียนอยู่ภายใน  
แล้วนำกระบอกรูปวงกลมเข้าเครื่องหล่อ



ข) เทเม็ดโลหะลงใบเข้าหลอม



ค) แสดงการล้างปูนออกจากชิ้นทดสอบ



ง) นำชิ้นงานแช่ในกรดกัดปูนล้างปูน

### รูปที่ 3.8 ขั้นตอนกระบวนการหล่อหลอมชิ้นงานทดสอบของโลหะเงินเจือดำ

สำหรับในส่วนสภาวะของการหล่อขึ้นรูปชิ้นทดสอบ ประกอบด้วย

- 1) เครื่องหล่อดูดสุญญากาศ ยี่ห้อ Yasui รุ่น K2
- 2) ปริมาณการหลอมโลหะครั้งละ 250 กรัม
- 3) หลอมโลหะภายใต้สภาวะสุญญากาศ
- 4) ปกคลุมผิวหน้าโลหะด้วยก๊าซอาร์กอน
- 5) อุณหภูมิกระบอกรูปวงกลมแบบหล่อ 550°C
- 6) อุณหภูมิเทหล่อ 1,010 °C และคงอุณหภูมิ 5 นาที ก่อนทำการเทหล่อ



### 7) พักกระบอกปูนแบบหล่อก่อนจุ่มน้ำล้างปูน 20 นาที

เมื่อทำการหล่อชิ้นงานทดสอบตามสภาพและเงื่อนไขที่ใช้สำหรับเป็นตัวแปรกำหนดในการทดลองนี้จะได้ชิ้นงานทดสอบที่ทำการหล่อด้วยอัตราส่วนผสมของโลหะเงินเจือตำดังรูปที่ 3.9



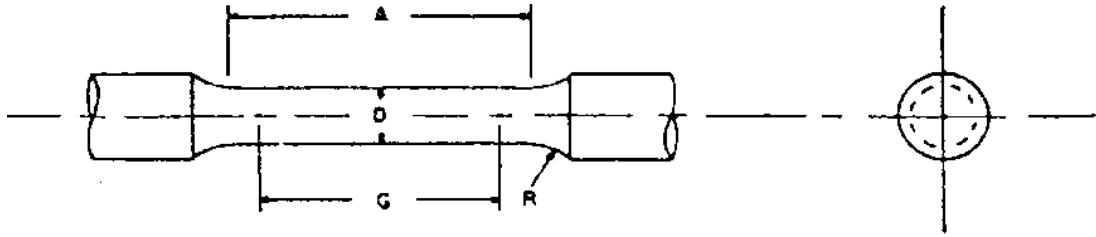
รูปที่ 3.9 ลักษณะชิ้นทดสอบที่ได้จากการหล่อขึ้นรูป

## 3.5 การดำเนินการศึกษาและวิเคราะห์ชิ้นงานทดสอบโลหะเงินผสม 58.33%

### 3.5.1 การทดสอบความต้านแรงดึง

การทดสอบความต้านแรงดึงโลหะเงินผสม 58.33% เพื่อต้องการตรวจวัดค่าความแข็งแรงสูงสุดและค่าความยืดของของโลหะเงินผสม เครื่องทดสอบความต้านแรงดึงที่ใช้สำหรับงานทดสอบเป็นเครื่องทดสอบที่ใช้สำหรับทดสอบพลาสติกและโลหะอ่อนที่มีความยืดตัวสูง

จุดประสงค์ของการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านแรงดึง ณ จุดคราก ความต้านแรงดึงสูงสุด ความต้านแรงดึง ณ จุดแตกหัก และความยืดของโลหะเงินผสมที่อัตราส่วนผสมต่างๆ โดยทำการทดสอบแรงดึงอัตราส่วนผสมละ 5 ชิ้น และเงื่อนไขการทดสอบเพิ่มความเค้นไม่เกิน 10 N/mm<sup>2</sup> ต่อวินาที ขนาดของชิ้นทดสอบช่วง Gauge length มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6 mm ยึดถือตามมาตรฐาน ASTM E 8 M – 99 ซึ่งมีสัดส่วนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ตารางที่ 3.3 และนอกจากนี้คุณสมบัติของการทดสอบ ดำเนินการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง แสดงลักษณะของเครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง และลักษณะการทดสอบดังรูปที่ 3.11 และ รูปที่ 3.12 ตามลำดับ



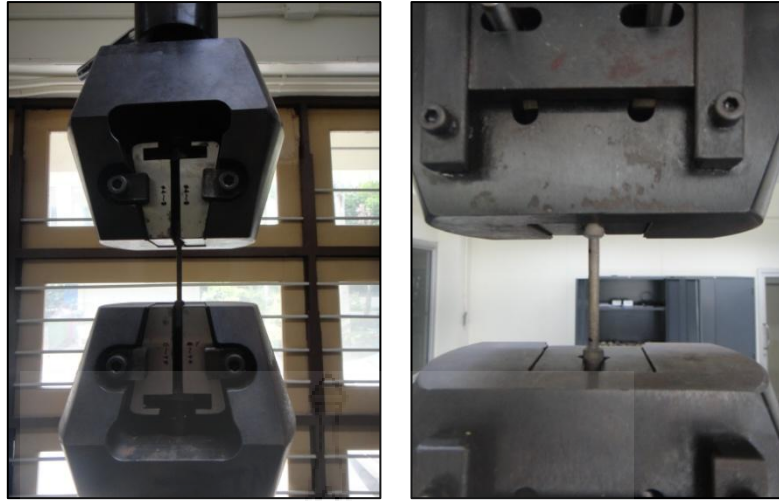
รูปที่ 3.10 ลักษณะของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 8M-99 [14]

ตารางที่ 3.3 ขนาดของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 8M-99 [14]

	Dimensions, mm.				
	Standard Specimen	Small - Size Specimens Proportional to Standard			
	12.5	9	6	4	2.5
G - Gage length	62.5 ± 0.1	45.0 ± 0.1	30.0 ± 0.1	20.0 ± 0.1	12.5 ± 0.1
D - Diameter	12.5 ± 0.2	9.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1	4.0 ± 0.1	2.5 ± 0.1
R - Radius of fillet	10	8	6	4	2
A - Length of reduced section	75	54	36	24	20



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3.12 ลักษณะการจับชิ้นทดสอบที่สภาพต่างๆ

### 3.5.2 การทดสอบความแข็ง

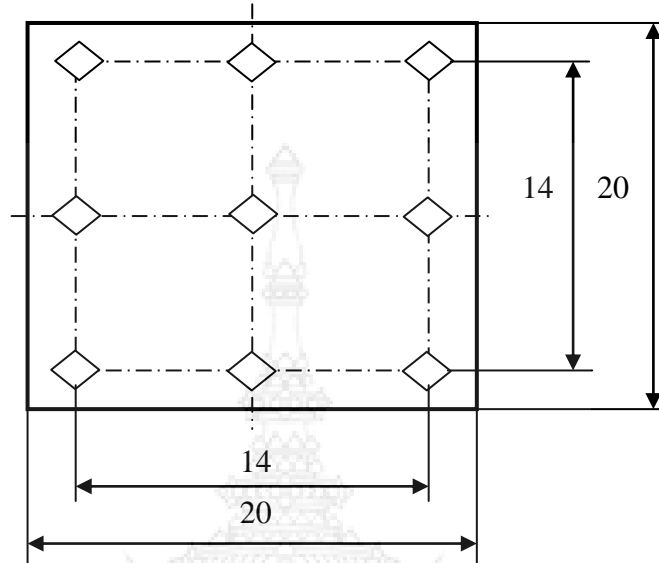
การตรวจสอบวัดค่าความแข็งสำหรับการทดสอบ ใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Microhardness testing machine ของ Mitutoyo, Japan รุ่น MVK-H11 ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ที่ได้รับการสอบเทียบความแข็งกับแผ่นทดสอบความแข็งมาตรฐานก่อนการทดสอบชิ้นทดสอบทุกครั้ง



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบความแข็ง (Micro Hardness Testing Machine)

สำหรับการศึกษานี้เลือกใช้การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers) เพราะสามารถทดสอบความแข็งโลหะที่มีความแข็งแตกต่างกันได้ดีและยังสามารถเลือกแรงกดที่เหมาะสมกับชิ้นทดสอบได้ โดยแรงกดที่เลือกใช้คือ 9.81 N (HV) เวลาในการกดแช่ 30 วินาที การทดสอบความแข็งของ

ชั้นทดสอบแต่ละชั้น จะทำการทดสอบที่ตำแหน่งหน้าตัด 9 จุด ดังตำแหน่งการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 3.14 หลังจากนั้นจึงนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย ค่าความแข็งที่ได้เป็นค่าความแข็งจำเพาะของโลหะเงินผสมตามส่วนผสมทางเคมี เพื่อต้องการทราบค่าความแข็งของโลหะเงินผสมที่อัตราส่วนผสมต่างๆ



รูปที่ 3.14 ตำแหน่งการทดสอบความแข็ง

### 3.5.3 การวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

เป็นการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินผสมที่ได้จากการหล่อขึ้นรูป และนอกจากนี้เพื่อเป็นการตรวจสอบอิทธิพลของธาตุผสมทองแดง สังกะสีและดีบุกที่ผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินผสม 58.4% ซึ่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินผสมมีขั้นตอนการดำเนินการดังต่อไปนี้

1) ขั้นตอนการเตรียมชั้นทดสอบซึ่งการเตรียมทำได้โดยตัดชิ้นงานแล้วนำไปหล่อด้วย เรซินให้จับยึดชั้นทดสอบเพื่อความสะดวกในการจับยึดชั้นทดสอบมาขัดผิวให้เรียบ

2) ขั้นตอนการขัดผิวละเอียด (Fine Grinding) การขัดผิวชิ้นงานจะใช้กระดาษทรายน้ำซิลิกอนคาร์ไบด์ติดบนเครื่องขัดแบบจานหมุน ซึ่งปกติชิ้นงานที่ผ่านการตัดด้วยแผ่นคอร์รันดัมแล้วจะมีผิวเรียบ เริ่มขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1,000 1,500 2,000 และ 4,000 ตามลำดับ ในการขัดด้วยกระดาษทรายสองขนาดสุดท้ายต้องขัดให้เกิดรอยกระดาษทรายในทิศทางเดียวกันตลอดผิวชิ้นงานแล้วหมุนไป 90 องศา ขัดจนรอยเดิมหายไป โดยมีน้ำไหลผ่านชิ้นงานตลอดเวลาที่ขัดเพื่อระบายความร้อนและกำจัดเศษผงโลหะที่ถูกขัดออกมา

3) ขั้นตอนการขัดผิวละเอียด (Polishing) หลังจากการขัดกระดาษทรายแล้วจะนำชิ้นงานมาขัดบนผ้าสักหลาด ซึ่งมีผงขัดได้แก่ ผงขัดเพชรหรือผงอะลูมินา (Aluminum Oxide) ผสมกับน้ำแล้วฉีดลงบนผ้าสักหลาดก่อนนำชิ้นงานลงขัด ซึ่งผงอะลูมินาที่ใช้โดยทั่วไปจะมีขนาดประมาณ  $1 \mu\text{m}$  การขัด

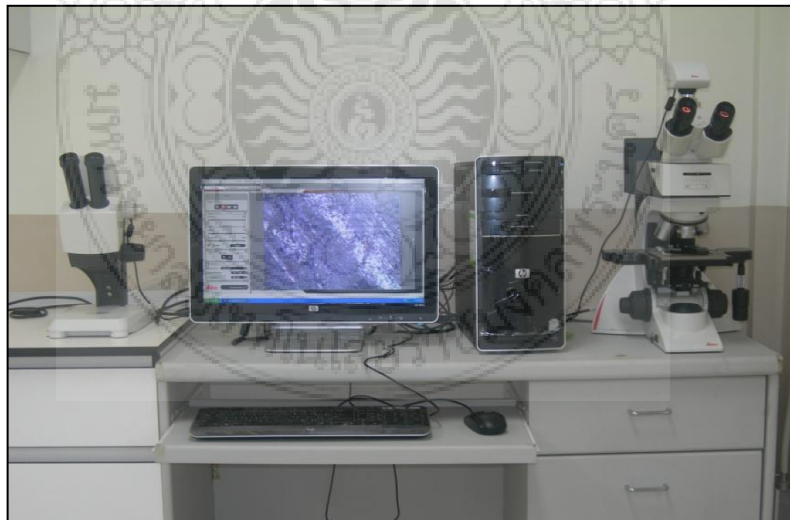
ด้วยผงขัดต่างๆ เหล่านี้ โดยจะต้องขัดจนกว่าผิวชิ้นงานเรียบและไม่มีรอยต่าง ๆ ซึ่งผิวของชิ้นงานจะมีความเงาใสและเรียบคล้ายกระจกเงา

4) การกัดกรด\_(Etching) หลังจากการขัดผิวมันแล้วนำมาล้างทำความสะอาดด้วยเอทิลหรือเมทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 96% แล้วเป่าให้แห้ง จากนั้นนำชิ้นทดสอบมากัดผิวด้วยกรดดังตารางที่ 3.4

**ตารางที่ 3.4** ส่วนผสมของกรดใช้สำหรับกัดชิ้นงานทดสอบโครงสร้างจุลภาค

ส่วนผสมของสารเคมี	การดำเนินงาน
10% KCN + 10%(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1-6 นาที เพื่อแสดงขอบเกรน
Conc. HCl + Conc. HNO <sub>3</sub> อัตราส่วนผสม (3:1)	1-3 วินาที เพื่อแสดงรายละเอียดภายในเกรน
30% (Conc. HCl + Conc. HNO <sub>3</sub> ) อัตราส่วนผสม (3:1)	เจือจางด้วยน้ำ เพื่อแสดงรายละเอียดภายในเกรน

5) เมื่อกัดผิวชิ้นทดสอบด้วยกรดดังกล่าวแล้วจะนำชิ้นทดสอบไปล้างด้วยน้ำและตามด้วยแอลกอฮอล์และเป่าด้วยลมร้อนให้แห้งสนิท จากนั้นนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อตรวจดูโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ กล้องจุลทรรศน์ กล้องถ่าย ภาพจากกล้องจุลทรรศน์เข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.15



**รูปที่ 3.15** อุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์

### 3.6 การวิเคราะห์ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

เม็ดโลหะมาสเตอร์อัลลอยที่ได้จากการหลอมผสมโลหะและเทหัตถ์เม็ดก่อนนำไปทำการผสมให้ได้ ส่วนผสมตามอัตราส่วน และทำการหล่อให้ได้ชิ้นงานทดสอบโลหะเงินเจือต่ำ แล้วนำไปทำการวิเคราะห์ ส่วนผสมทางเคมีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM : Scanning Electron Microscope) เป็นวิธีการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี ที่มีความรวดเร็วและสะดวกในการตรวจสอบ และ มีความแม่นยำสูง เพื่อหาปริมาณเงินบริสุทธิ์ตาม มอก.21-2515 แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM : Scanning Electron Microscope)

### 3.7 การวิเคราะห์และประเมินผลการทดลอง

การวิเคราะห์และประเมินผลการทดลองหลังจากทำการทดลองหาค่าคุณสมบัติเชิงกล คุณสมบัติทางเคมี และการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบโลหะเงินเจือต่ำ 58.33% และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 เพื่อศึกษาปริมาณธาตุเจือที่เหมาะสมในการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ และนำไปพัฒนาศักยภาพในการผลิตของผู้ประกอบการทั้งภายในและต่างประเทศให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่อไป

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์

ในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้มุ่งทำการศึกษาคูสมบัติของโลหะเงินผสม 58.33% ที่มีองค์ประกอบเป็น เงิน (Ag) ทองแดง (Cu) และดีบุก (Sn) ภายใต้ปริมาณโลหะเงินไม่ต่ำกว่า 58.33% โดยเทียบกับเงิน 925 ผลจากการศึกษาดังกล่าวผู้วิจัยได้ใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนา ส่วนประกอบ ของโลหะเงิน เพื่อให้ได้คุณลักษณะเชิงความหนาแน่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกับเงินในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ โดยใช้โลหะดีบุก (Sn) เป็นองค์ประกอบในการปรับความหนาแน่น สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติของโลหะเงิน และใช้หลักการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกล โครงสร้างจุลภาค และวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค SEM เป็นพื้นฐานในการกำหนดความแตกต่างและการพัฒนาผลิตภัณฑ์ แสดงผลการทดลองได้ดังนี้

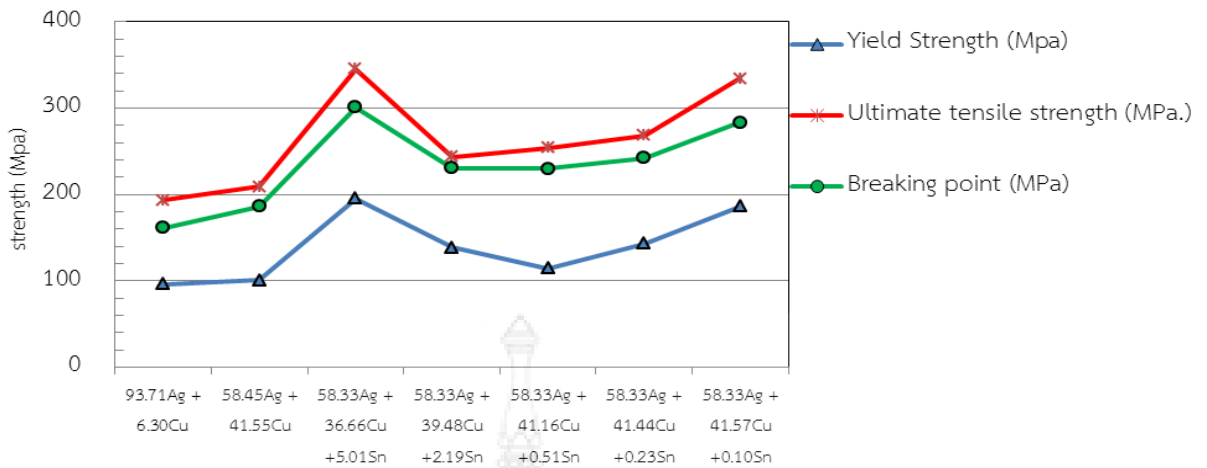
#### 4.1 ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของโลหะเงินเจือต่ำ 58.33%

##### 4.4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงดึงของโลหะเงินเจือต่ำ 58.33%

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินเจือต่ำ 58.33% (Ag+Cu, Ag+Cu+Zn) พบว่า ชิ้นทดสอบโลหะเงินผสม 58.33% ทั้งหมดมีค่า Yield strength, Ultimate tensile strength, Breaking point, Elongation สูงกว่าโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ซึ่งเกิดจากธาตุต่างๆ ที่ผสมเข้าไปแสดงรายละเอียดค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบตามอัตราส่วนผสม ดังตารางที่ 4.1

**ตารางที่ 4.1** ค่าความแข็งแรงดึงของเงินสเตอร์ลิง 925 (Ag+Cu) และโลหะเงินเจือต่ำ (Ag+Cu, Ag+Cu+Sn)

อัตราส่วนผสม	Yield Strength (Mpa)	Ultimate tensile strength (MPa.)	Breaking point (MPa)	Elongation (%)
93.71Ag + 6.30Cu	96	193.5	161.75	29.78
58.45Ag + 41.55Cu	100.63	209.25	186	32.1
58.33Ag + 36.66Cu +5.01Sn	195.2	345.25	301	61.58
58.33Ag + 39.48Cu +2.19Sn	138.6	243.8	230.4	62.2
58.33Ag + 41.16Cu +0.51Sn	114.3	254.1	229.6	61.18
58.33Ag + 41.44Cu +0.23Sn	143	268.5	242	47.7
58.33Ag + 41.57Cu +0.10Sn	186.5	334	283.25	56.1



รูปที่ 4.1 กราฟค่าความแข็งแรงดึงของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 (Ag+Cu) และโลหะเงินเจือต่ำ (Ag+Cu, Ag+Cu+Sn)

รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบพบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบของชิ้นงานโลหะเงินเจือเมื่อผสมธาตุดีบุก (Sn) เข้าไปในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ทำให้ค่า Yield strength, Ultimate tensile strength และ Breaking point มีค่าสูงกว่าโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินเจือต่ำ (58.45Ag + 41.55Cu) ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะของกราฟในแต่ละค่า และเมื่อผสมดีบุก (Sn) เข้าไปในปริมาณ 5.01Sn และ 0.10Sn ซึ่งเป็นปริมาณที่มากที่สุดและน้อยที่สุด ทำให้ได้ค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่าที่สูงตามลำดับ แต่เมื่อทำการผสมดีบุก (Sn) 2.19 - 0.23Sn ค่าที่ได้จากการทดสอบส่วนใหญ่มีค่าน้อย ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากปริมาณธาตุดีบุก (Sn) ในปริมาณที่แตกต่างกันจึงให้ค่าคุณสมบัติเชิงกลของโลหะเงินเจือต่ำมีค่าที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นโลหะเงินผสมเจือต่ำ 58.33Ag + 36.66Cu + 5.01Sn มีค่า Yield Strength 195.2 Mpa, Ultimate tensile strength 345.25 MPa, Breaking point 301 MPa และ Elongation 61.58 % ซึ่งเป็นอัตราส่วนผสมของแต่ละธาตุที่เหมาะสมที่สุด

#### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงของโลหะเงินเจือต่ำ 58.33%

จากการศึกษาค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบหลังจากเติมธาตุดีบุก (Sn) เพื่อทำการเปรียบเทียบกับโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 (93.71Ag + 6.30Cu) และโลหะเงินเจือต่ำ (Ag+Cu, Ag+Cu+Sn) สามารถแสดงค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบตามอัตราส่วนผสมดังตารางที่ 4.2



ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 (Ag+Cu) และโลหะเงินเจือต่ำ (Ag+Cu, Ag+Cu+Sn)

อัตราส่วนผสม	ค่าความแข็งเฉลี่ย (HV)
93.71Ag + 6.30Cu	52.82
58.45Ag + 41.55Cu	54.60
58.33Ag + 36.66Cu + 5.01Sn	148.87
58.33Ag + 39.48Cu + 2.19Sn	120.43
58.33Ag + 41.16Cu + 0.51Sn	119.63
58.33Ag + 41.44Cu + 0.23Sn	106.10
58.33Ag + 41.57Cu + 0.10Sn	93.03



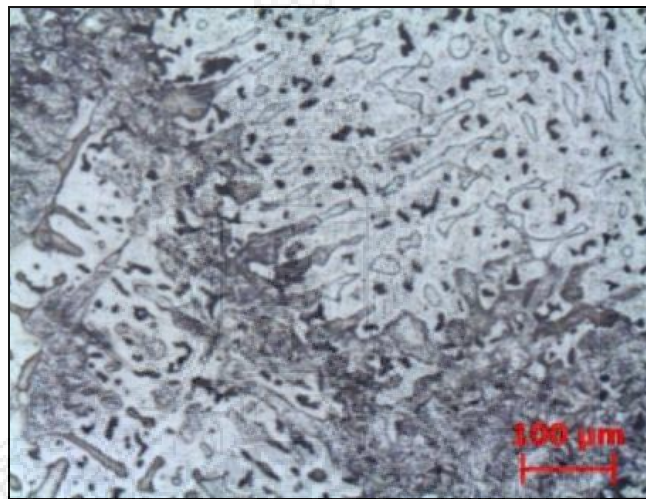
รูปที่ 4.2 กราฟค่าความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 (Ag+Cu) และโลหะเงินเจือต่ำ (Ag+Cu, Ag+Cu+Sn)

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบด้วยการทดสอบค่าความแข็งดังรูปที่ 4.2 พบว่า ค่าความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 (93.71Ag + 6.30Cu) และโลหะเงินเจือต่ำ (58.45Ag + 41.55Cu) มีค่าความแข็งใกล้เคียงกันและมีค่าที่ต่ำมาก เมื่อเทียบกับค่าความแข็งของโลหะเงินเจือต่ำ (Ag+Cu+Sn) ที่ทำการผสมธาตุดีบุก (Sn) เข้าไปตามอัตราส่วนผสมต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุดีบุกที่ผสมเข้าไป สังเกตได้จากลักษณะของกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการผสมธาตุดีบุก (Sn) เข้าไปในอัตราส่วนผสม 58.33Ag + 36.66Cu + 5.01Sn ค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบมีค่าเท่ากับ 148.87 HV และค่าความแข็งมีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อผสมธาตุดีบุก (Sn) เข้าไปใน

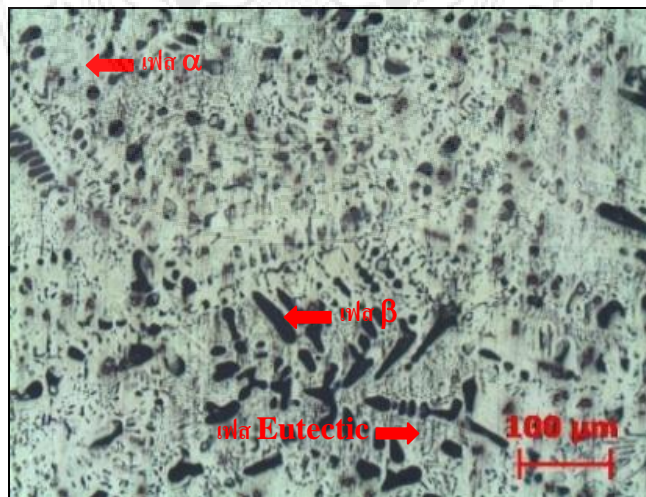
ปริมาณที่น้อย ฉะนั้นปริมาณของธาตุดีบุก (Sn) มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบโลหะเงินเจือต่ำ 58.33 %

#### 4.2 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือต่ำ 58.33%

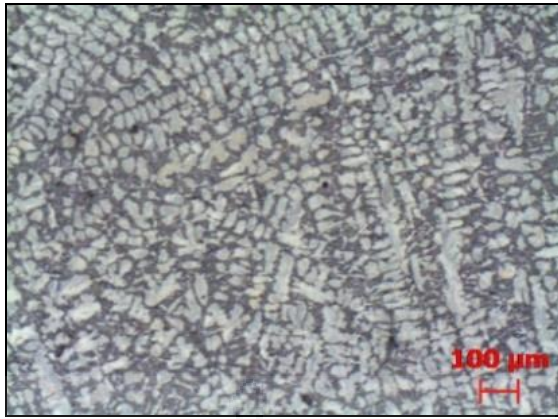
จากการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบโลหะเงินเจือต่ำ 58.33% พบว่าประมาณธาตุดีบุก (Sn) ส่งผลต่อค่าเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบเพื่อทำการเปรียบเทียบกับโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 (93.71Ag+6.30Cu) ซึ่งเป็นโลหะเงินมาตรฐานของผลิตภัณฑ์เครื่องประดับเงิน และโลหะเงินเจือต่ำ (58.45Ag+41.55Cu) ซึ่งเป็นมาตรฐานของโลหะเงินผสมเจือต่ำ ที่มีธาตุทองแดง (Cu) และดีบุก (Sn) รวมกันไม่เกิน 41.67% สามารถแสดงผลโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบได้ดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ตามลำดับ



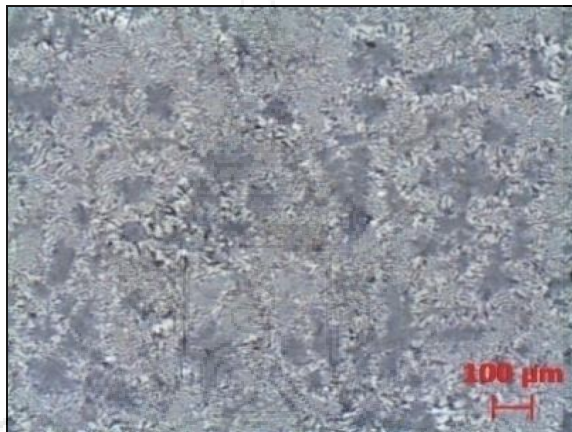
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงิน 93.71Ag + 6.30Cu



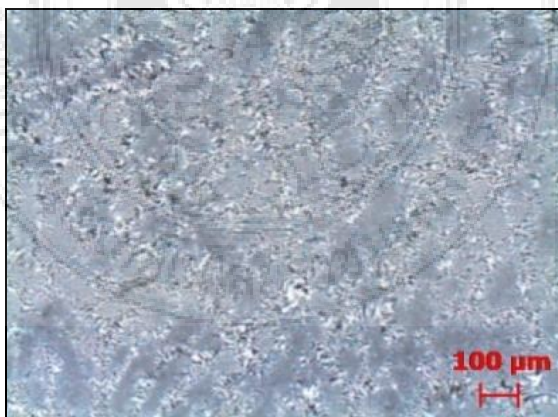
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือต่ำ 58.45Ag + 41.55C



รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33Ag + 36.66Cu + 5.01Sn



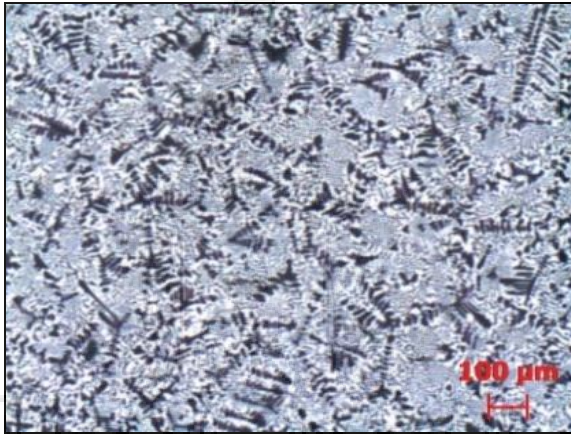
รูปที่ 5.6 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33Ag + 39.48Cu + 2.19Sn



รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33Ag + 41.16Cu + 0.51Sn



รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33Ag + 41.44Cu + 0.23Sn



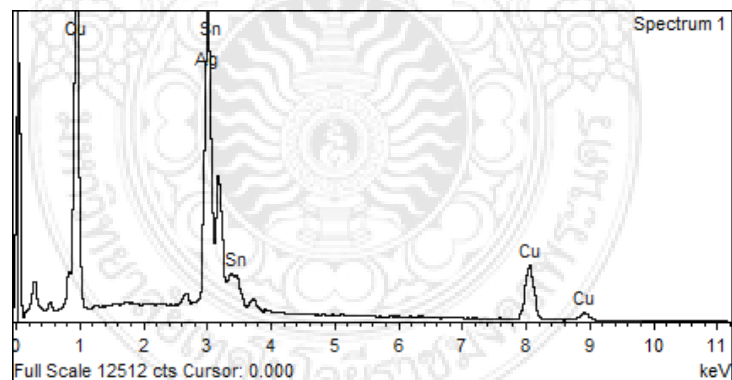
รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33Ag + 41.57Cu + 0.10Sn

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงิน 925 ซึ่งประกอบด้วย 93.71 wt%Ag + 6.30 wt%Cu ดังรูปที่ 4.3 มีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบเดนไดรต์ (Dendrite Structure) ที่เกิดจากการที่โลหะผสมเย็นตัวเร็วกว่าสภาวะสมดุลโดยมีลักษณะเป็นแกนผลึก เกิดเป็น Coring ภายในเกรน ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางกลมีค่าต่ำ และนอกจากนี้ขนาดเกรนที่ได้มีขนาดค่อนข้างใหญ่ โครงสร้างของโลหะเงินผสม 58.45 wt%Ag + 41.55 wt%Cu ซึ่งมีปริมาณการผสมของทองแดงมากเพิ่มขึ้นเป็น 41.55 wt%Cu ดังรูปที่ 4.4 พบว่า โครงสร้างจุลภาคที่ได้ พบว่าลักษณะเป็น Dendrite Structure ที่เกิดจากการเย็นตัวเร็วกว่าสภาวะสมดุลเช่นกัน และลักษณะของเกรนที่ได้มีขนาดใหญ่ไม่สามารถวัดขนาดเกรนได้ และนอกจากนี้การเย็นตัวของโลหะผสมที่เร็วกว่าสภาวะสมดุล ส่งผลให้การกระจายตัวของเฟสต่างๆ ภายในไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่ พบว่า ประกอบด้วย  $\alpha$ -phase,  $\beta$ -phase และ Eutectic phase ซึ่งมีลักษณะของเฟสที่สอดคล้องกับแผนภาพสมดุลโลหะเงิน-ทองแดง มีผลทำให้โลหะผสมมีค่าสมบัติทางกลสูงกว่าโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 (Ag+Cu)

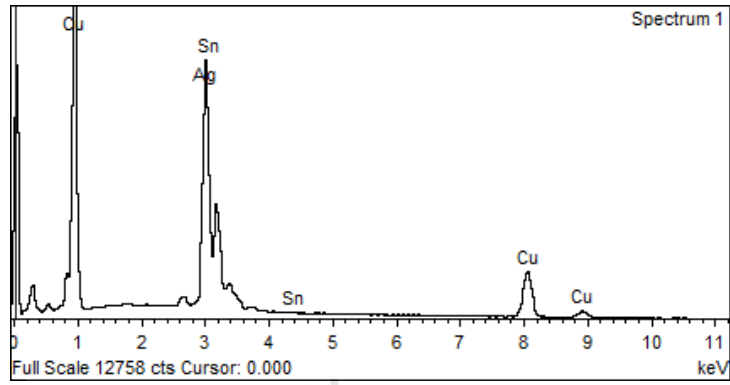
จากรูปที่ 4.8 เมื่อมีการผสมดีบุกเข้าไปในโลหะเงินผสม 58.33% (ที่ผสม Ag+Cu+Sn) ด้วยอัตราส่วนที่ต่างกันไป (ปริมาณการผสมก่อนทำการหล่อหลอม 5.01, 2.19, 0.51, 0.23 และ 0.10 Sn) พบว่าปริมาณดีบุกที่ผสมเข้าไปมีผลทำให้การกระจายตัวของเฟส Eutectic phase มีความสม่ำเสมอมากขึ้น แต่ถ้าวิเคราะห์จากปริมาณดีบุกที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน พบว่า บริเวณที่มีโครงสร้างเป็น  $\beta$ -phase เกิดการเปลี่ยนแปลงจาก  $\beta$  phase ที่มีขนาดเล็กกลึงเป็นโครงสร้าง Eutectic phase ที่มี  $\alpha$ -phase และ  $\beta$ -phase ขนาดเล็กและละเอียดอยู่ภายใน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 – 4.9 ตามลำดับ ทั้งนี้ ปริมาณธาตุดีบุก (Sn) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกลดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

#### 4.3 ศึกษาส่วนผสมทางเคมีของโลหะเงินเจือดำ 58.33%

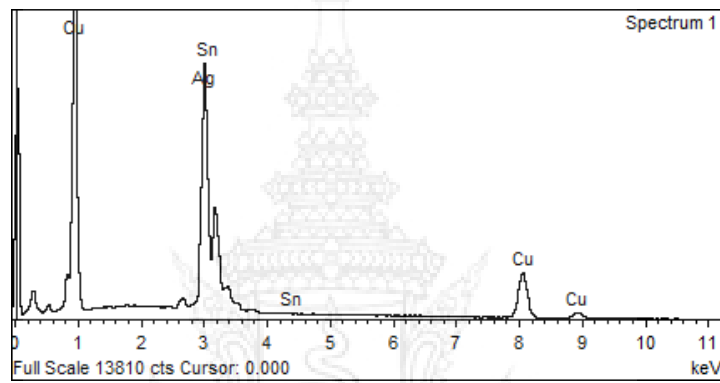
ในการศึกษาโลหะเงินเจือดำ 58.33% ได้ทำการกำหนดสัดส่วนการผสม (wt%) หลังจากที่ได้ดำเนินการหลอมผสมโลหะต่างๆ ที่เป็นส่วนผสมสำหรับทำการหล่อขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบ และหลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบที่ได้จากการการหล่อขึ้นรูปทั้งหมดไปทำการวิเคราะห์ทดสอบส่วนผสมทางเคมีของชิ้นทดสอบด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscope) เพื่อทำการศึกษาองค์ประกอบของเนื้อวัสดุหลังทำการทดสอบ จากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี พบว่าส่วนผสมทางเคมีของโลหะเงินเจือดำที่มีปริมาณของเงินที่มากกว่า 58.33% เป็นตัวแปรกำหนดในการทดสอบ โดยมีเปอร์เซ็นต์ความต่างที่ 1.05% (ปริมาณเงินประมาณ  $58.95 \pm 0.386$  โดย wt%) แสดงลักษณะปริมาณธาตุดังกล่าวที่รูปที่ 4.10 ถึง รูปที่ 4.14 ตามลำดับ



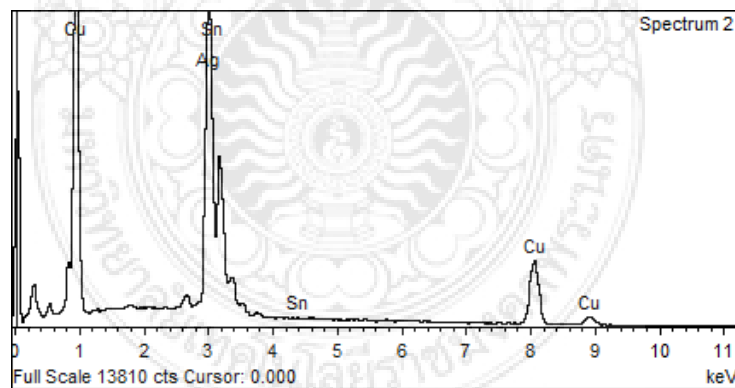
รูปที่ 4.10 กราฟส่วนผสมทางเคมี (Spectrum) ของโลหะเงินเจือดำ 58.33Ag + 36.66Cu + 5.01Sn



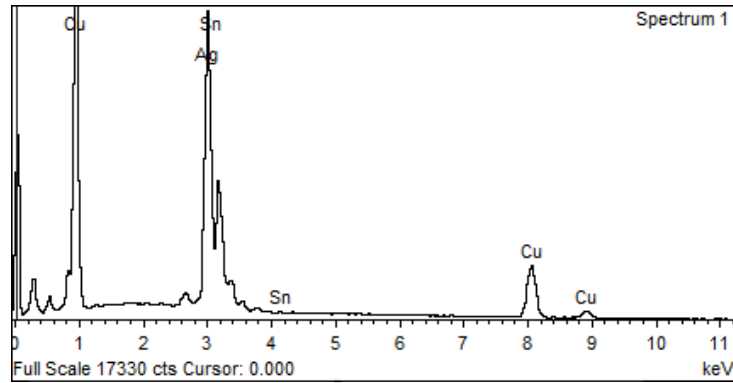
รูปที่ 4.11 กราฟส่วนผสมทางเคมี (Spectrum) ของโลหะเงินเจือดำ  $58.33\text{Ag} + 39.48\text{Cu} + 2.19\text{Sn}$



รูปที่ 4.12 กราฟส่วนผสมทางเคมี (Spectrum) ของโลหะเงินเจือดำ  $58.33\text{Ag} + 41.16\text{Cu} + 0.51\text{Sn}$



รูปที่ 4.13 กราฟส่วนผสมทางเคมี (Spectrum) ของโลหะเงินเจือดำ  $58.33\text{Ag} + 41.44\text{Cu} + 0.23\text{Sn}$



รูปที่ 4.14 กราฟส่วนผสมทางเคมี (Spectrum) ของโลหะเงินเจือดำ 58.33Ag + 41.57Cu + 0.10Sn

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ทดสอบส่วนผสมทางเคมีของชิ้นทดสอบของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 (Ag+Cu) และโลหะเงินเจือดำ (Ag+Cu, Ag+Cu+Sn)

อัตราส่วนผสม	สัดส่วนการผสม (wt%) ที่กำหนดในการทดลอง			ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ (wt%)		
	Ag	Cu	Sn	Ag	Cu	Sn
93.71Ag + 6.30Cu	92.5	7.5	-	93.71	6.3	-
58.45Ag + 41.55Cu	58.33	41.76	-	58.45	41.55	-
58.33Ag + 36.66Cu + 5.01Sn	58.33	36.66	5.01	58.42	36.63	4.95
58.33Ag + 39.48Cu + 2.19Sn	58.33	39.48	2.19	58.37	39.59	2.04
58.33Ag + 41.16Cu + 0.51Sn	58.33	41.16	0.51	58.49	41.12	0.39
58.33Ag + 41.44Cu + 0.23Sn	58.33	41.44	0.23	58.51	41.32	0.17
58.33Ag + 41.57Cu + 0.10Sn	58.33	41.57	0.10	58.38	41.54	0.08

จากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบโลหะเงินเจือดำ 58.33Ag + 36.66Cu + 5.01Sn, 58.33Ag + 39.48Cu + 2.19Sn, 58.33Ag + 41.16Cu + 0.51Sn, 58.33Ag + 41.44Cu + 0.23Sn และ 58.33Ag + 41.57Cu + 0.10Sn เมื่อเทียบกับโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 (93.71Ag + 6.30Cu) และโลหะเงินเจือดำ (58.45Ag + 41.55Cu) เพื่อนำค่าที่ได้ไปยืนยันผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบที่ทำการผสมดีบุกเข้าไป และผลที่ได้จากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีพบว่า ปริมาณธาตุดีบุก (Sn) ลดลงเมื่อเทียบกับสัดส่วนผสม (wt%) ที่กำหนดในการทดลอง ทั้งนี้เกิดเนื่องจากการสูญเสียหรือสูญเพี้ยนไปในขณะทำการหล่อหลอมส่งผลให้ปริมาณของธาตุอื่นๆ เพิ่มขึ้นหรือลด แสดงผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเงินเจือดำ (Ag+Cu, Ag+Cu+Sn) ดังตารางที่ 4.3

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของธาตุเจือทองแดงและดีบุกที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33 wt% AgCuSn ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์และทำการทดสอบเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

#### 5.1 สรุป

5.1.1 ผลจากการศึกษาโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33 % ที่ประกอบด้วยเงิน (Ag) และทองแดง (Cu) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 จากการศึกษาร่วมกันพบว่าโลหะเงินผสมเจือตะกั่ว 58.33Ag + 36.66Cu + 5.01Sn มีค่า Yield Strength 195.2 Mpa, Ultimate tensile strength 345.25 MPa, Breaking point 301 MPa และ Elongation 61.58 % ซึ่งเป็นอัตราส่วนผสมของแต่ละธาตุที่เหมาะสมที่สุด

5.1.2 ผลการศึกษาค่าความแข็งของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33Ag + 41.57Cu + 0.10Sn มีค่าความแข็งน้อยที่สุด เท่ากับ 93.03 HV

5.1.3 ปริมาณดีบุก (Sn) ที่ผสมเข้าไปในอัตราส่วน 0.10Sn จะทำให้โครงสร้างของเงินเจือตะกั่วเป็น  $\beta$ -phase เกิดการเปลี่ยนแปลงจาก  $\beta$  phase ที่มีขนาดเล็กลงเป็นโครงสร้าง Eutectic phase ที่มี  $\alpha$ -phase และ  $\beta$ -phase ขนาดเล็กและละเอียด

5.1.4 ผลจากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33% พบว่าส่วนผสมทางเคมีของโลหะเงินเจือตะกั่วในแต่ละอัตราส่วนผสมมีสัดส่วนของธาตุใกล้เคียงกับอัตราส่วนผสมจริง จึงทำให้โลหะเงินเจือตะกั่วที่ได้ทำการทดลองมีค่าที่เป็นไปตามมาตรฐานของเครื่องประดับเงินตามมาตรฐานอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับ ทั้งของในประเทศและต่างประเทศ

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรทำการศึกษาธาตุเจืออื่นๆ ที่ทำหน้าที่เป็นสวมนผสมรองอีกหลายชนิดที่มีผลต่อสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค และระดับสีของโลหะเงินผสม 58.33% ที่ยังไม่ได้ทำการศึกษาดังนั้นจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งที่ควรจะมีการศึกษาวิจัยอิทธิพลของโลหะผสม รองชนิดต่างๆ ที่สามารถเข้าไปในโลหะเงิน นอกเหนือจากทองแดง สังกะสี และดีบุก

5.2.2 อัตราส่วนผสมที่ใช้ อาจมีการเปลี่ยนแปลงมากหรือน้อยไปจากค่าที่กำหนด เพราะอัตราส่วนผสมของโลหะที่นำมาผสมนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการควบคุมคุณสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์

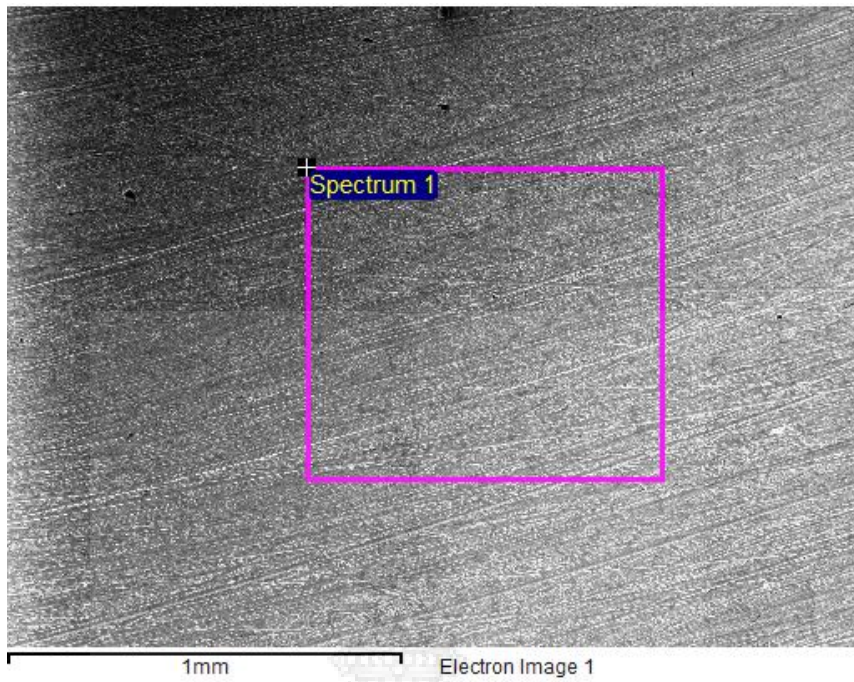


## บรรณานุกรม

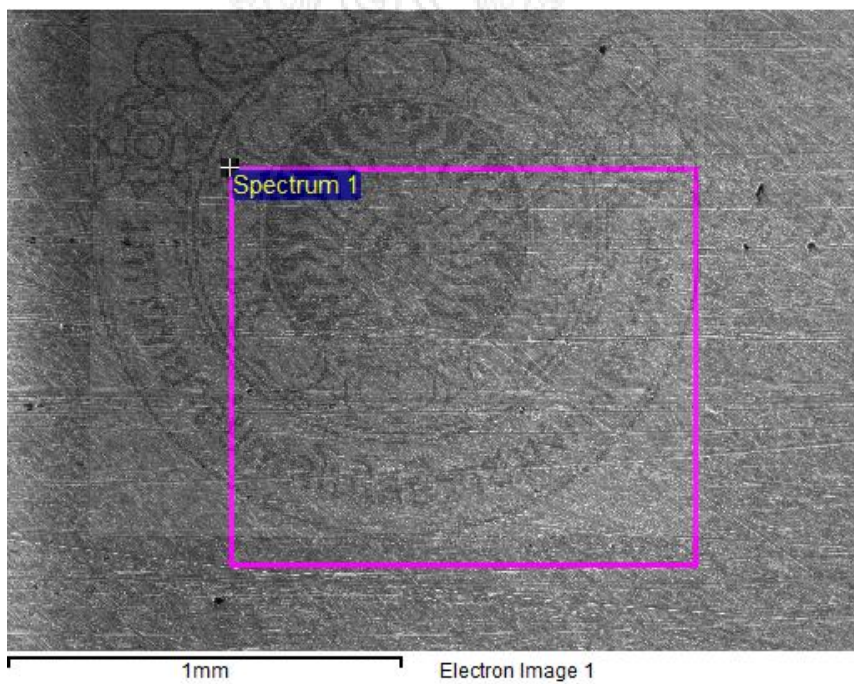
- [1] ยุทธศาสตร์วัสดุแห่งชาติ ยุทธศาสตร์ 3, วัสดุสำหรับอุตสาหกรรมแพชั่น สิ่งทอ เครื่องหนัง และเครื่องประดับ, Mtec ศูนย์เทคโนโลยีวัสดุแห่งชาติ
- [2] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม. มอก.21-2515 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเครื่องเงิน. กรุงเทพมหานคร : กระทรวงอุตสาหกรรม 2515.
- [3] เอกสารสัมมนาทางวิชาการ. คุณสมบัติของโลหะมีค่าสำหรับอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ. รวบรวมโดย ศูนย์วิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2541.
- [4] สมนึก วัฒนศรีกุล และคณะ. โครงการการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของโลหะเงินเจือสำหรับผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.), 2544.
- [5] สุรัตน์ วรรณศรี. “การศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติของโลหะเงินสเตอร์ลิงจากกรรมวิธีทางความร้อน.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม การผลิต บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2543.
- [6] Gven Beck. Edelmetall-Taschenbuch. Degussa AG. Frankfurt Huething, 1995.
- [7] สมนึก วัฒนศรีกุล. การทดสอบวัสดุ. เอกสารประกอบการสอน มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2545.
- [8] สิทธิชัย แสงอาทิตย์. Material Testing: Lecture. วิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2545
- [9] Mark F. Grimwade. “Basic Metallurgy for Goldsmiths : Working and Annealing.” Jour Gold Technology Issue No. 2. (June 1990) : 17-20.
- [10] Deusch. Normen. DIN 8238 Colours of Gold. August 1996
- [11] Aldo M. Reti. “Understanding Sterling Silver.” The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. Santa Fe, New Mexico, 1997 : 339-356.
- [12] Richard V. Carrano. “Sterling Silver Casting Problem.” The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. Santa Fe, New Mexico, 1990 : 91-128
- [13] เอกสิทธิ์ นิสารัตนพรและคณะ. โครงการการปรับปรุงคุณภาพเงินสเตอร์ลิงโดยการเติมธาตุซิลิกอน. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), 2546.
- [14] ASTM Section 3. “Metals Test Methods and Analytical Procedures.” Annual Book of ASTM Standard 1999. by American Society for Testing and Materials. (Publishers) Ltd., 1983.

ภาคผนวก  
ตำแหน่งวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี

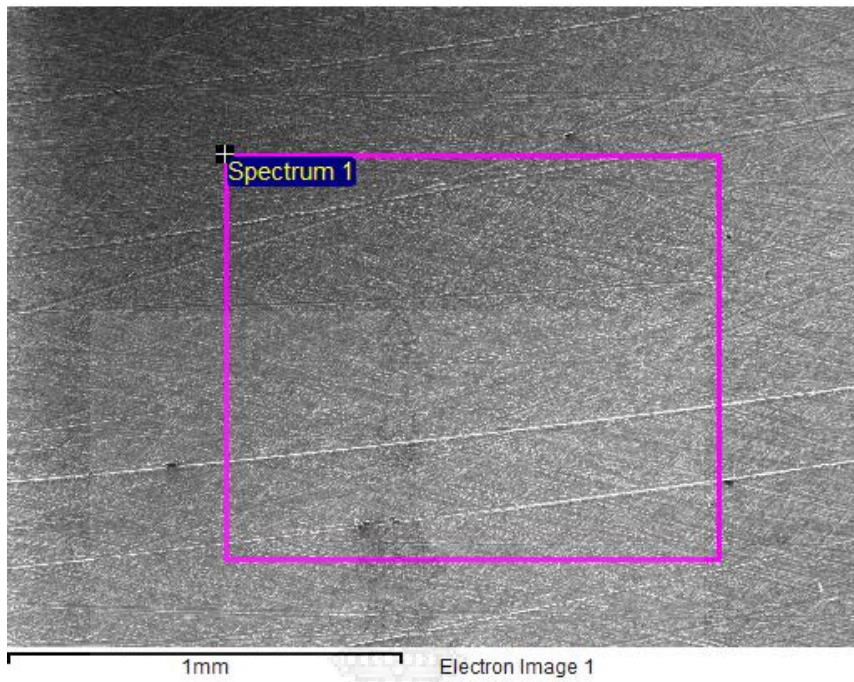




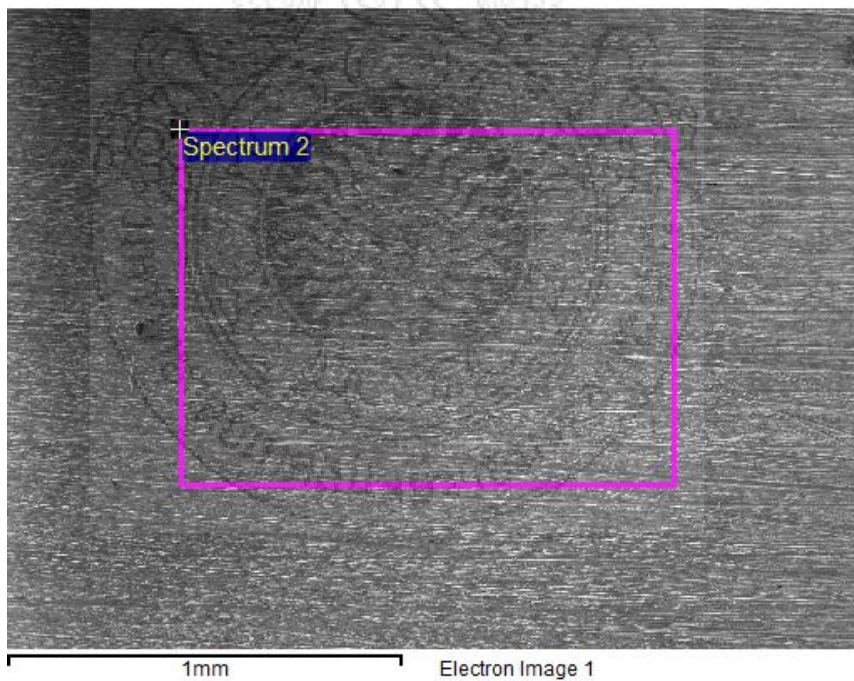
รูปที่ 1 ตำแหน่งวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี (Spectrum) ของโลหะเงินเจือดำ  
 $58.33\text{Ag} + 36.66\text{Cu} + 5.01\text{Sn}$



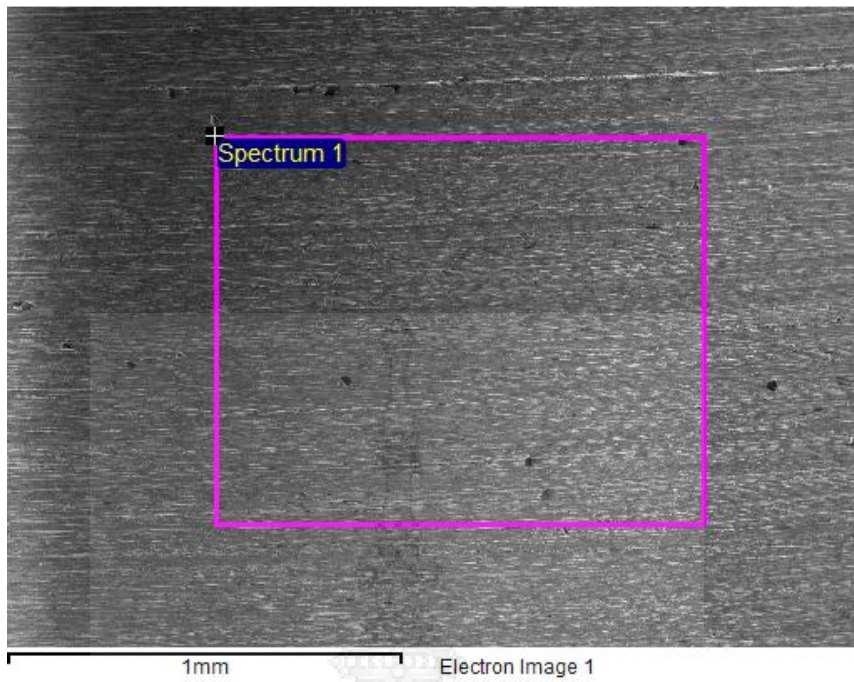
รูปที่ 2 ตำแหน่งวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี (Spectrum) ของโลหะเงินเจือดำ  
 $58.33\text{Ag} + 39.48\text{Cu} + 2.19\text{Sn}$



รูปที่ 3 ตำแหน่งวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี (Spectrum) ของโลหะเงินเจือดำ  
 $58.33\text{Ag} + 36.66\text{Cu} + 5.01\text{Sn}$



รูปที่ 4 ตำแหน่งวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี (Spectrum) ของโลหะเงินเจือดำ  
 $58.33\text{Ag} + 41.44\text{Cu} + 0.23\text{Sn}$



รูปที่ 5 ตำแหน่งวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี (Spectrum) ของโลหะเงินเจือตะ  
 $58.33\text{Ag} + 41.57\text{Cu} + 0.10\text{Sn}$

