



รายงานผลการวิจัย

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับโลหะเงินเจือต่ำ
58.33 wt% AgCuSn

A study an optimum casting condition for manufacturing jewelry setting of
low silver alloys 58.33 wt% AgCuSn

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มาเรียม นะมิ

พันตรีหญิง ดร.บงกช เทพจारी

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณปี พ.ศ. 2557

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

- โครงการวิจัย : การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33 wt% AgCuSn
- ผู้วิจัย : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มาเรียม นะมิ
- ผู้วิจัยร่วม : พันตรีหญิง ดร.บงกช เทพจारी

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33 wt% AgCuSn โดยทำการเปรียบเทียบกับสมบัติของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33% เพื่อศึกษาสภาวะที่ดีที่สุดจากการปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีที่ส่งผลต่ออิทธิพลของคุณภาพระดับของโลหะเงินเจือตะกั่วที่เป็นไปตามมาตรฐานผลิตเครื่องประดับ

ผลจากการศึกษาโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33 % ที่อัตราส่วนผสม 58.33Ag + 41.16Cu + 0.51Sn จากการวิเคราะห์ค่าระดับสีและค่าความแตกต่างของสีและมีพฤติกรรมความต้านทานการหมองของโลหะเงินเจือตะกั่วมากที่สุด จึงทำให้อัตราส่วนผสมนี้มีความเหมาะสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับโลหะเงินเจือตะกั่ว และพบปัญหาการพองจากงานหล่อของเครื่องประดับโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33Ag + 41.16Cu + 0.51Sn ไม่พบการพองในการหล่อที่อุณหภูมิ 1,000 °C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการหล่อได้งานที่มีคุณภาพดี โลหะมีจุดหลอมเดือดที่เหมาะสม ส่วนอุณหภูมิที่ 1,040 °C จะทำให้อุณหภูมิมีจุดหลอมละลายมาก ทำให้งานมีรอยแตกบ้างจุด ส่วนอุณหภูมิที่ 1,080 °C เป็นอุณหภูมิที่สูงมากเกินไป จึงทำให้งานมีรอยแตกมาก ส่วนปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อสามารถทำการวิเคราะห์หาสาเหตุและกำหนดแนวทางการแก้ไขได้อย่างเหมาะสมเพื่อลดความสูญเสียที่อาจจะเกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เครื่องประดับโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33 wt% AgCuSn

ผลจากการทดลองและวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติเชิงกายภาพและวิเคราะห์ปัญหาของชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการทดลองในสภาวะที่ดีที่สุดมีค่าที่เป็นไปตามมาตรฐานของเครื่องประดับเงินตามมาตรฐานอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับทั้งของในประเทศและต่างประเทศ

คำสำคัญ : เครื่องประดับโลหะเงินเจือตะกั่ว คุณสมบัติเชิงกายภาพ ค่าระดับสี

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 การอบชุบความร้อนในเหล็ก	30
2.9 การชุบแข็ง (Hardening)	35
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	40
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานการวิจัย	
3.1 แผนการดำเนินงาน	42
3.2 วัสดุที่ใช้สำหรับการทดลอง	43
3.3 การดำเนินการหล่อหลอมผสมโลหะเพื่อผลิตเป็นมาสเตอร์อัลลอย	44
3.4 การดำเนินการหลอมผสมโลหะและหล่อขึ้นรูปชิ้นทดสอบโลหะเงินผสม 58.33% สำหรับการวิเคราะห์ทดสอบต่างๆ	45
3.5 การวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพ	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงดึง	52
4.2 ปัญหาการติดทางเดินน้ำโลหะ	54
4.3 ปัญหารูพรุน (ตามด) จากงานหล่อ	58
4.4 ปัญหารูจากฟองอากาศ	61
4.5 ปัญหาฟองอากาศในชิ้นงานเทียน	63
4.6 ปัญหาแตกร้าว	63
4.7 ปัญหางานหล่อไม่เต็ม	65
4.8 ปัญหางานเป็นฝ้า	66
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผล	68
5.2 ข้อเสนอแนะ	68
บรรณานุกรม	70



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	แผนภาพสมดุลโลหะเงิน-ทองแดง	9
2.2	ปริมาณธาตุเจือชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อความแข็งของโลหะเงิน	13
2.3	ลักษณะหัตถ์และรอยกดของการทดสอบความแข็ง 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
2.20	การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในระหว่างการอบอ่อนในเหล็กกล้าคาร์บอน 0.2 เปอร์เซ็นต์	31
2.21	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค	32
2.22	สัดส่วนของโครงสร้างที่ปรากฏในเหล็กกล้าที่ผ่านกรรมวิธีอบอ่อนที่ปริมาณคาร์บอนต่างๆ	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23 เหล็กกล้าคาร์บอน 1 เปอร์เซ็นต์ผ่านกระบวนการ Spheroidize Annealing ประกอบด้วยซีเมนไตต์เม็ดกลม กระจายอยู่ในโครงสร้างพื้นฐานเฟอร์ไรท์	33
2.24 การเปลี่ยนแปลงค่า Lattice Parameter a และ c ตามปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าคาร์บอน	35
2.25 โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่กำลังขยาย 2500 เท่า	36
2.26 เหล็กกล้าคาร์บอน 1 เปอร์เซ็นต์ผ่านการชุบแข็งในน้ำ ประกอบด้วยโครงสร้างออสเทนไนท์เหลือค้าง และมาร์เทนไซต์ที่มีรูปร่างคล้ายเข็มคุณสมบัติที่สำคัญหลายประการสำหรับการเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์	36
2.27 ปริมาณมาร์เทนไซต์ที่เกิดในระหว่างการเย็นตัว เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ	37
2.28 อิทธิพลของคาร์บอนที่มีต่อช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงเป็นมาร์เทนไซต์	39
2.29 ผลของธาตุคาร์บอนต่อความแข็งของโครงสร้างออสเทนไนท์ และมาร์เทนไซต์	39
3.1 แผนภาพการไหลกระบวนการทำโครงการ	42
3.2 เครื่องหลอมผสมเทเม็ดโลหะ Indutherm รุ่น VC 600	44
3.3 ลักษณะของเม็ดโลหะมาสเตอร์อัลลอย 58.45Ag+41.55Cu หลังจากผ่านการเทหัดเม็ด	45
3.4 ขั้นตอนการฉีดเทียน	46
3.5 เครื่องหล่อตูดสูญญากาศยี่ห้อ Yasui รุ่น K2	46
3.6 ขั้นตอนกระบวนการหล่อหลอมขึ้นงานทดสอบของโลหะเงินเจือตะกั่ว	47
3.7 ลักษณะโลหะหลังจากผ่านการหล่อของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33Ag + 41.57Cu + 0.10Sn อุณหภูมิในการหล่อ (1,080 °C)	48
3.8 ลักษณะโลหะหลังจากผ่านการหล่อของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33Ag + 41.57Cu + 0.10Sn อุณหภูมิในการหล่อ (1,040 °C)	48
3.9 ลักษณะโลหะหลังจากผ่านการหล่อของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33Ag + 41.57Cu + 0.10Sn อุณหภูมิในการหล่อ (1,040 °C)	49
3.10 ลักษณะโลหะหลังจากผ่านการหล่อของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33Ag + 41.16Cu + 0.51Sn อุณหภูมิในการหล่อ (1,000 °C)	49
3.11 ลักษณะโลหะหลังจากผ่านการหล่อของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33Ag + 41.16Cu + 0.51Sn อุณหภูมิในการหล่อ (1,040 °C)	50
3.12 ลักษณะโลหะหลังจากผ่านการหล่อของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33Ag + 41.16Cu + 0.51Sn อุณหภูมิในการหล่อ (1,080 °C)	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 เครื่องประดับโลหะเงินเจือดำ 58.33Ag + 41.16Cu + 0.51Sn หล่อที่อุณหภูมิ 1,000 °C	52
4.2 เครื่องประดับโลหะเงินเจือดำ 58.33Ag + 41.16Cu + 0.51Sn หล่อที่อุณหภูมิ 1,080 °C	52
4.3 เครื่องประดับโลหะเงินเจือดำ 58.33Ag + 41.16Cu + 0.51Sn หล่อที่อุณหภูมิ 1,040 °C	52
4.4 เครื่องประดับโลหะเงินเจือดำ 58.33Ag + 41.16Cu + 0.51Sn หล่อที่อุณหภูมิ 1,000 °C	53
4.5 เครื่องประดับโลหะเงินเจือดำ 58.33Ag + 41.16Cu + 0.51Sn หล่อที่อุณหภูมิ 1,400 °C	53
4.6 เครื่องประดับโลหะเงินเจือดำ 58.33Ag + 41.16Cu + 0.51Sn หล่อที่อุณหภูมิ 1,080 °C	54
4.7 การติดทางน้ำที่ไม่เหมาะสม	55
4.8 การติดทางน้ำที่เหมาะสม	56
4.9 ชิ้นงานที่ขัดแต่งแล้ว แบบที่ 1	59
4.10 ชิ้นงานที่ขัดแต่งแล้ว แบบที่ 2	59

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 แสดงคุณสมบัติของเงินเจือประเภทต่างๆ	11
2.7 ค่าความแข็งแรงของโลหะเงินเจือที่ขึ้นกับธาตุเจือต่างๆ	13
2.8 ค่าความแข็ง (HV10) ของโลหะเงินเจือที่ขึ้นกับอัตราการขึ้นรูปและสัดส่วนของธาตุเจือทองแดง	13
2.9 สัญลักษณ์ระดับสีทองคำ ค่าการวัดและพิถีพิถันตามมาตรฐาน DIN 8238	30
3.1 แผนการดำเนินโครงการ	43



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 หรือแม้แต่กำแหวน 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 และองค์ความรู้ทางด้าน การขึ้นรูปโลหะมีค่าด้วยวิธีการทางกล 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 ผู้บริโภคหันมาให้ความสนใจสินค้าเครื่องประดับที่มีราคาถูก แต่ยังคงต้องการเครื่องประดับที่ผลิตจากโลหะมีค่าต่างๆ เช่นเดิมโดยมีการลดปริมาณส่วนผสมของโลหะมีค่าลง และนอกจากนี้กลุ่มผู้บริโภคบางกลุ่มหันมาให้ความสนใจเครื่องประดับที่ผลิตจากสแตนเลสและทองเหลืองมากขึ้น ส่งผลให้ผู้ผลิตมีความต้องการพัฒนาปรับปรุงเทคโนโลยีการผลิตและวัสดุที่ใช้ในการผลิตเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการบริโภคสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับของผู้บริโภค จากปัญหาของภาคอุตสาหกรรมการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับดังที่ได้กล่าวข้างต้น การศึกษาวิจัยของโครงการวิจัยนี้ คือ การศึกษาและวิเคราะห์อิทธิพลของธาตุเจือทองแดงและดีบุกที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33 wt% AgCuSn ซึ่งเป็นโครงการวิจัยที่ 1 ใน 4 โครงการวิจัย ภายใต้แผนงานวิจัย การศึกษาและพัฒนาส่วนผสมโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33 wt% AgCuSn สำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ เพื่อการพัฒนาส่วนผสมโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33 wt% AgCuSn และสร้างองค์ความรู้เพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับผู้ประกอบการอุตสาหกรรมสาขานี้ และนอกจากนี้การดำเนินการของชุดโครงการวิจัยนี้ยังมีประโยชน์สำหรับการพัฒนาการเรียนการสอนในรูปแบบของการบูรณาการเรียนการสอนร่วมกับการศึกษาวิจัยในรายวิชาที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ โลหะวิทยาโลหะมีค่า งานหล่อขึ้นรูปและกระบวนการผลิตเครื่องประดับที่ทางมหาวิทยาลัยได้มีการจัดการเรียนการสอนในสาขาวิชาเทคโนโลยีแม่พิมพ์เครื่องประดับ ซึ่งดำเนินการมากกว่า 16 ปี ให้สามารถพัฒนาไปสู่ความเป็นศูนย์วิจัยที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีวัสดุและการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ เพื่อเป็นศูนย์กลางสำหรับการศึกษาวิจัยพัฒนาองค์ความรู้และถ่ายทอดเทคโนโลยีจากการศึกษาวิจัยทางด้านวัสดุและการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับเผยแพร่สู่ภาคการผลิต ที่สามารถรองรับการพัฒนาอุตสาหกรรมสาขานี้ของประเทศ สอดคล้องกับนโยบายต่างๆ ของรัฐบาลที่ต้องการส่งเสริมให้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางการผลิตและการค้าสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับแห่งหนึ่งของโลก

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33 wt% AgCuSn

1.2.2 เพื่อพัฒนากระบวนการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33 wt% AgCuSn

1.2.3 เพื่อพัฒนาศักยภาพในการผลิตของผู้ประกอบการภายในประเทศ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาและดำเนินการวิจัยโลหะเงินเจือต่ำที่มีปริมาณของโลหะเงินไม่ต่ำกว่า 58.33 % และมีธาตุเจือทองแดง (Cu) และดีบุก (Sn) รวมกันไม่เกิน 41.67 %

1.3.2 ศึกษาวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับโลหะเงินเจือต่ำ 58.33 wt% AgCuSn, โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล

1.3.3 การถ่ายทอดเทคโนโลยีขององค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษาวิจัยไปสู่ภาคอุตสาหกรรมการผลิต

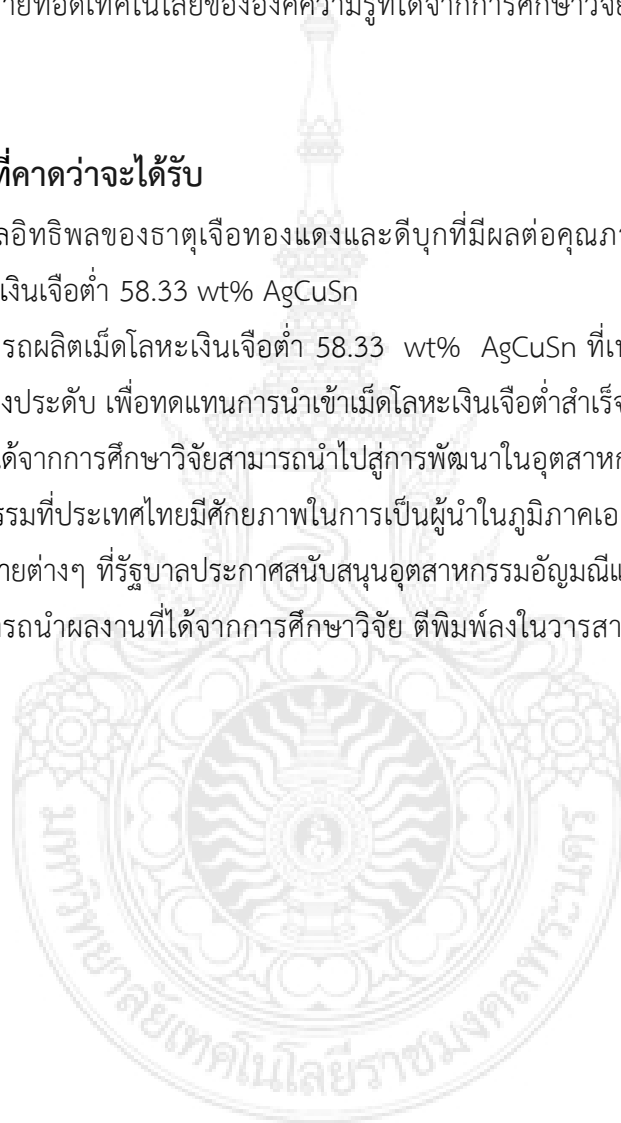
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ข้อมูลอิทธิพลของธาตุเจือทองแดงและดีบุกที่มีผลต่อคุณภาพการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับโลหะเงินเจือต่ำ 58.33 wt% AgCuSn

1.4.2 สามารถผลิตเม็ดโลหะเงินเจือต่ำ 58.33 wt% AgCuSn ที่เหมาะสำหรับการผลิต (การหล่อ) ตัวเรือนเครื่องประดับ เพื่อทดแทนการนำเข้าเม็ดโลหะเงินเจือต่ำสำเร็จรูปจากต่างประเทศ

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°C จุดเดือดที่อุณหภูมิ 2210°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 (g/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 (cal/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°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 ³)
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

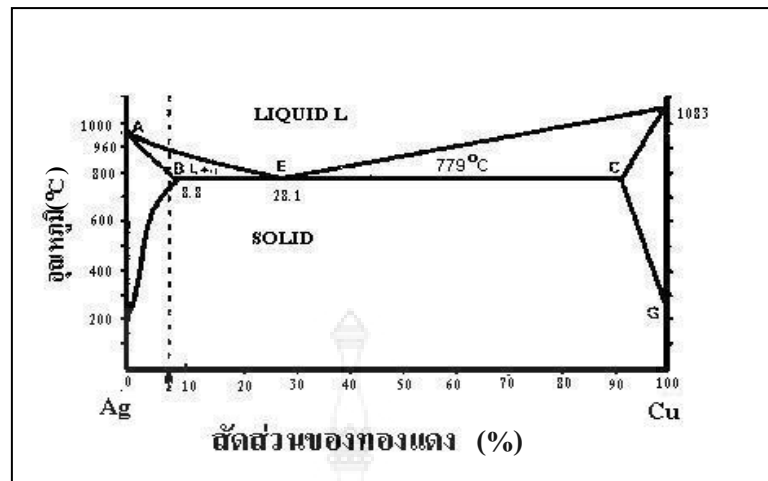
ค. คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Property) เงินละลายได้ดีในกรดไนตริก (Nitric Acid) เกิดเป็นอาร์เจนตริกไนเตรท (Argentum Nitrate) หรือที่ทราบกันทั่วไปคือลูน่าร์คอสติก (Lunar Caustic) ส่วนกรดซัลฟูริก (Sulphuric Acid) เข้มข้นที่ร้อนละลายเงินได้อย่างช้าๆ เป็นเงินอาร์เจนตริกซัลเฟต (Argentum Sulphate) กับให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (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 ความสามารถในการละลายทองแดงในเงินสูงสุดที่ 8.8 เปอร์เซ็นต์ทองแดง โดยความสามารถของการละลายทองแดงในเงินจะลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิ สำหรับในกรณีของโลหะเงินเจือทองแดงที่มี ปริมาณของทองแดง 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักหรือโลหะเงินสเตอร์ลิง เมื่อทำการหลอมละลายรวมเข้า ด้วยกันที่สถานะสมดุลแล้วลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิต่ำอย่างช้าๆ โครงสร้างจะประกอบด้วย Primary Silver-rich Solid Solution (α), Secondary Copper-rich Solid Solution (β) ที่เกิดจาก ทองแดงแยกผลึกออกมาและยังมีส่วนที่เป็นโครงสร้างที่เกิดจาก Silver-Copper Eutectic รวมอยู่ด้วย ที่ อุณหภูมิสูงประมาณ 745°C ขึ้นไปโครงสร้างจะเป็น Primary Silver-rich Solid Solution (α) เพียง เฟสเดียว แต่ถ้าหากอุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 745°C ความสามารถในการละลายทองแดงในโลหะเงิน สิ้นสุดลงทำให้เกิดโครงสร้าง Silver-Copper Eutectic และทองแดงแยกผลึกเป็นโครงสร้าง Secondary Copper-rich Solid Solution (β) ซึ่งเม็ดเกรนของโครงสร้าง Secondary Copper-rich Solid Solution (β) 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°C เย็นตัวช้า (ในเตาครึ่งชั่วโมงที่ 350°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°C ซึ่งโดยทั่วไปใช้อุณหภูมิการหลอมเหลวที่ 900°C ในการหลอมละลาย โลหะผสมนี้สามารถเพิ่มความแข็งได้จาก 40 –100 HB โดยการชุบแข็งที่ 725°C ปล่อยให้เย็น 17 ชม.ที่อุณหภูมิ 280°C [4]

ตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติของเงินเจือประเภทต่าง ๆ [4]

โลหะเงินเจือ	จุดหลอม ($^{\circ}\text{C}$)	ความแข็ง (HB)	ความต้านแรงดึง(MPa)	ความยืด (%)	ความหนาแน่น (g/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]

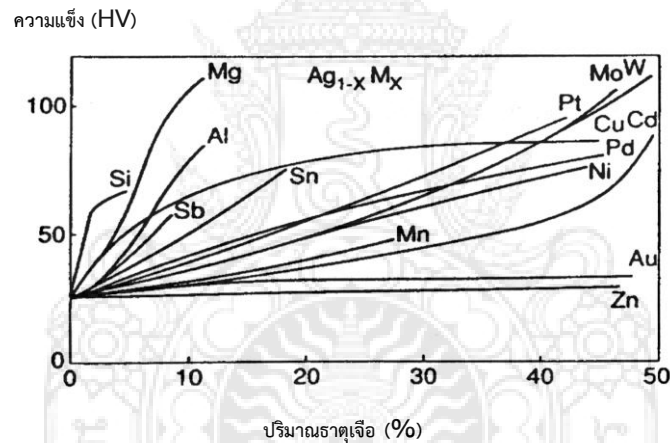
ฟอสฟอรัส(P) ที่มีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็พอที่จะทำให้อัลลอยเปราะได้ โดยอัลลอยจะมีส่วนประกอบ AgP_2 หรือ Cu_3P ซึ่งจะมีตะกอนที่ขอบเกรน จึงทำให้อัลลอยเปราะ เกิดออกซิเดชันเกิดขึ้นเร็วขึ้น ฟอสฟอรัสสามารถจะทำให้จุดหลอมเหลวลดลง สำหรับ ทองแดง - ฟอสฟอรัส ถ้าการดูดเอาออกซิเจนออกไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดทองแดงออกไซด์ [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 หรือมากกว่านั้นผสมเข้าไปด้วยเพื่อหวังผล ทางด้านการไหลตัวเข้าโพรงแบบได้ดี 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 ขนาดและคุณภาพของผลการทดสอบจะใช้ เป็นตัวบ่งบอกค่าความแข็งของวัสดุ ส่วนปริมาณการสึกหรอของพื้นผิววัสดุภายใต้เงื่อนไข การทดสอบจะใช้ในการทดสอบความแข็ง การสึกหรอและความต้านทานการขัดสี และ สุดท้ายความสามารถในการกลึงไสใช้เป็น ตัวบ่งบอกความยากง่ายในการกลึงวัสดุ

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

จากค่าความแข็ง Vickers = จะได้ DPH = เมื่อ DPH คือความแข็ง Vickers (kg/mm²) F คือน้ำหนักกด (kg) และ d คือความยาว

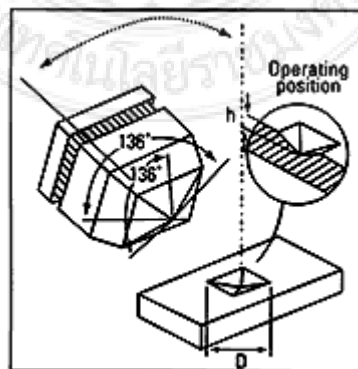
$$\text{พื้นที่รอยกด} = \frac{d^2}{2 \sin(136^\circ/2)} \text{ ซึ่งจะมีค่าโดยประมาณ} = \frac{d^2}{1.8544}$$

ดังนั้นค่าความแข็ง Vickers หัวกดเพชรปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส 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/mm²) 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/mm²

2.6 การทดสอบแรงดึง (tension test) [7]

การทดสอบแรงดึงและแรงกดอัดแบบสถิตย์ (static) เป็นการทดสอบที่ง่ายที่สุดและถูกใช้อย่าง กว้างขวางที่สุดในการทดสอบหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ซึ่งคุณสมบัติทางกลของวัสดุภายใต้แรงดึงที่ เราสนใจได้แก่

1. proportional limit, σ_{pl}
2. yielding stress, σ_y
3. ultimate stress, σ_u
4. fracture stress, σ_f
5. percent of elongation
6. percent of area reduction
7. modulus of elasticity, E
8. modulus of resilience, u_r

การที่จะเลือกว่าการทดสอบแรงดึงหรือการทดสอบแรงกดอัดอย่างไรมีความเหมาะสม มากกว่ากันนั้น เราจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่อไปนี้

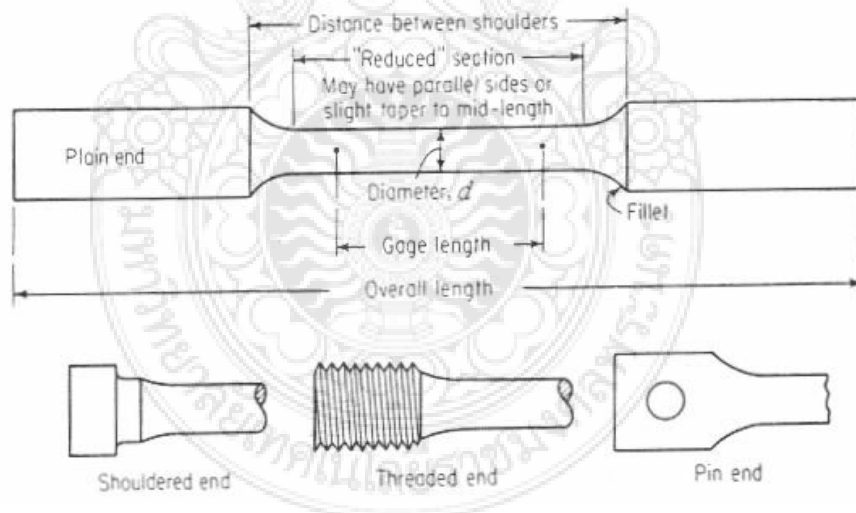
1. ความเหมาะสมของวัสดุที่เรากำลังจะทดสอบ เช่น โลหะมักจะถูกนำมาใช้ในโครงสร้างเพื่อ รับแรงดึง เพราะมีกำลังรับแรงดึงที่สูง ดังนั้น โดยส่วนใหญ่โลหะจะถูกทดสอบแรงดึง แต่ในวัสดุ เปราะบางประเภท เช่น คอนกรีตและอิฐ เป็นต้น จะมีกำลังรับแรงดึงที่ต่ำเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงกด อัด ดังนั้น วัสดุเหล่านี้จึงถูกนำไปใช้ในการรับแรงกดอัด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

2. ความแตกต่างของคุณสมบัติของวัสดุภายใต้แรงดึงและแรงกดอัด เช่น ไม้เป็นวัสดุที่มีกำลังรับแรงดึงที่ค่อนข้างสูง แต่ไม่สามารถนำมาใช้ในโครงสร้างรับแรงดึงได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากไม้มีกำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำ ทำให้เกิดการวิบัติที่จุดเชื่อมต่อได้ง่าย ดังนั้น การทดสอบแรงกดอัดของไม้จึงได้รับความนิยมมากกว่าการทดสอบแรงดึง

3. ความยากและความซับซ้อนในการจับยึดตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบ

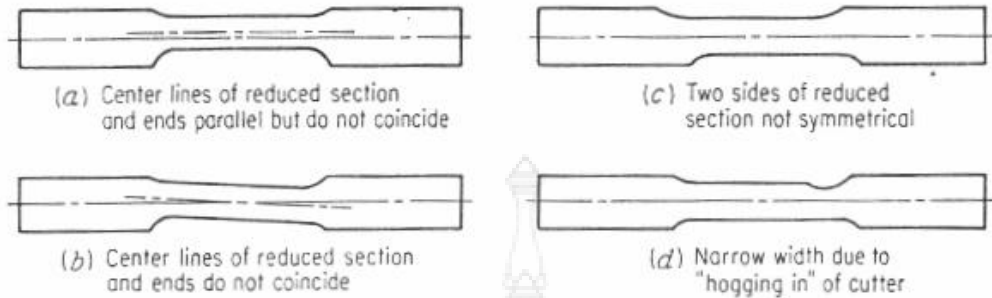
ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงอาจจะมีหน้าตัดทรงกลม สี่เหลี่ยมด้านเท่า หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าก็ได้ ถ้าแผ่นเหล็กมีความหนาพอที่จะทำการกลึงให้เป็นหน้าตัดทรงกลมได้ (>10 mm) ตัวอย่างทดสอบในรูปของแท่งกลมก็จะถูกนำมาใช้ทดสอบ แต่หากว่าแผ่นเหล็กนั้นบางมากจนไม่สามารถนำมากลึงได้แล้ว เราก็จะใช้ตัวอย่างทดสอบที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า 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]



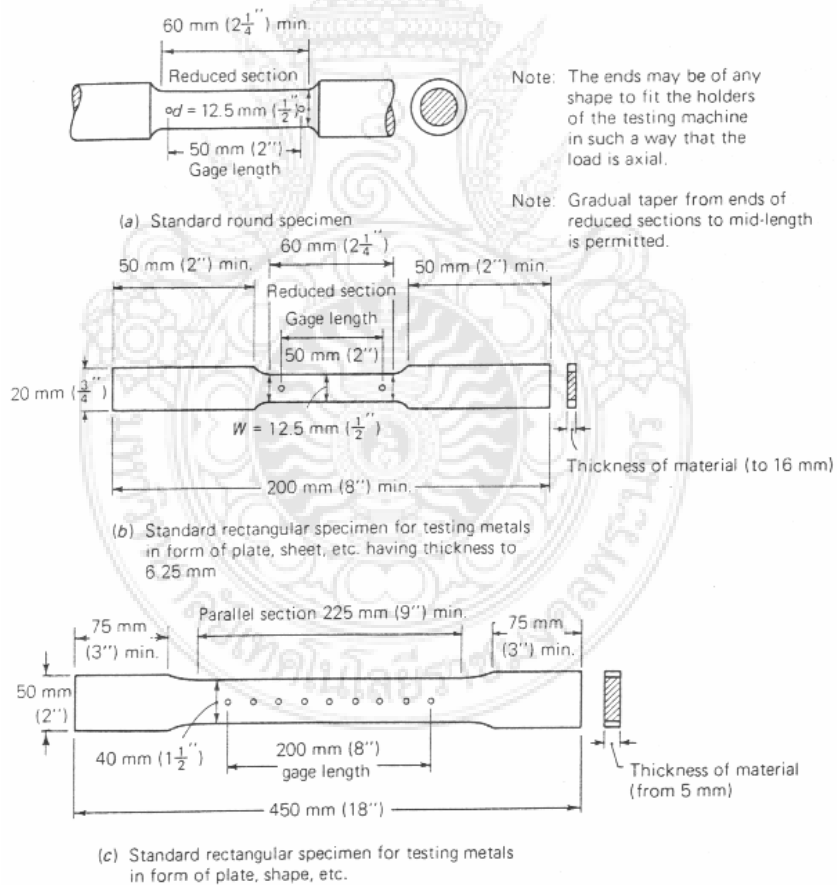
รูปที่ 2.4 รูปร่างของตัวอย่างทดสอบแบบแท่งกลม [7]

รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะต่างๆ ของตัวอย่างทดสอบที่ไม่ควรนำมาใช้ในการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุ เนื่องจากตัวอย่างทดสอบไม่มีความสมบูรณ์ ซึ่งจะทำให้ผลการทดสอบที่ได้คลาดเคลื่อนจาก

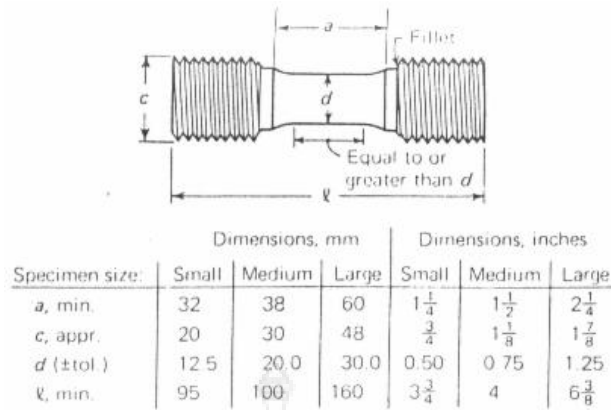
ความเป็นจริงตัวอย่างทดสอบมาตรฐานของเหล็กเหนียวและเหล็กหล่อได้ถูกกำหนดไว้ใน ASTM E8 ดังที่แสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ



รูปที่ 2.5 ลักษณะต่างๆ ของตัวอย่างทดสอบที่ไม่ควรนำมาใช้ในการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุ [7]



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างทดสอบมาตรฐานของเหล็กเหนียวตามมาตรฐาน ASTM E8 [7]



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างทดสอบมาตรฐานของเหล็กหล่อตามมาตรฐาน ASTM E8 [7]

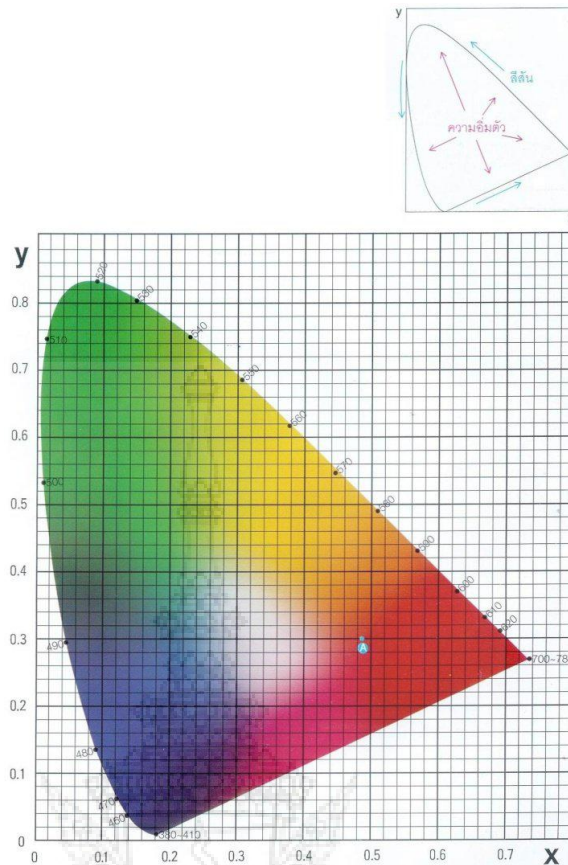
อีกรูปแบบหนึ่งของการทดสอบแรงดึงของวัสดุที่เรามักพบคือ การหาค่ารับแรงดึงของคอนกรีตซึ่งจะทำได้โดยการทำให้ splitting tensile test ตามมาตรฐานของ ASTM C496 โดยที่ตัวอย่างทดสอบจะเป็นรูปทรงกระบอกขนาด 150x300 mm และจะถูกกระทำโดยแรงกดอัด ดังที่แสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งแรงกดอัดนี้จะทำให้เกิด arch action ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดึงในแนวราบและจะทำให้เกิดการแตกร้าวในแนวตั้งในแนวตั้ง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

2.7 ทฤษฎีเทคนิคและวิธีการวัดทดสอบระดับสีตามมาตรฐานการทดสอบ CIELAB [8]

เทคนิค และวิธีการวัดทดสอบระดับสี ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นรายละเอียดเกี่ยวกับทฤษฎีการวัดสีระบบของการวัดสีและการสื่อความหมายของสี เพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับสื่อสารสีที่มองเห็น

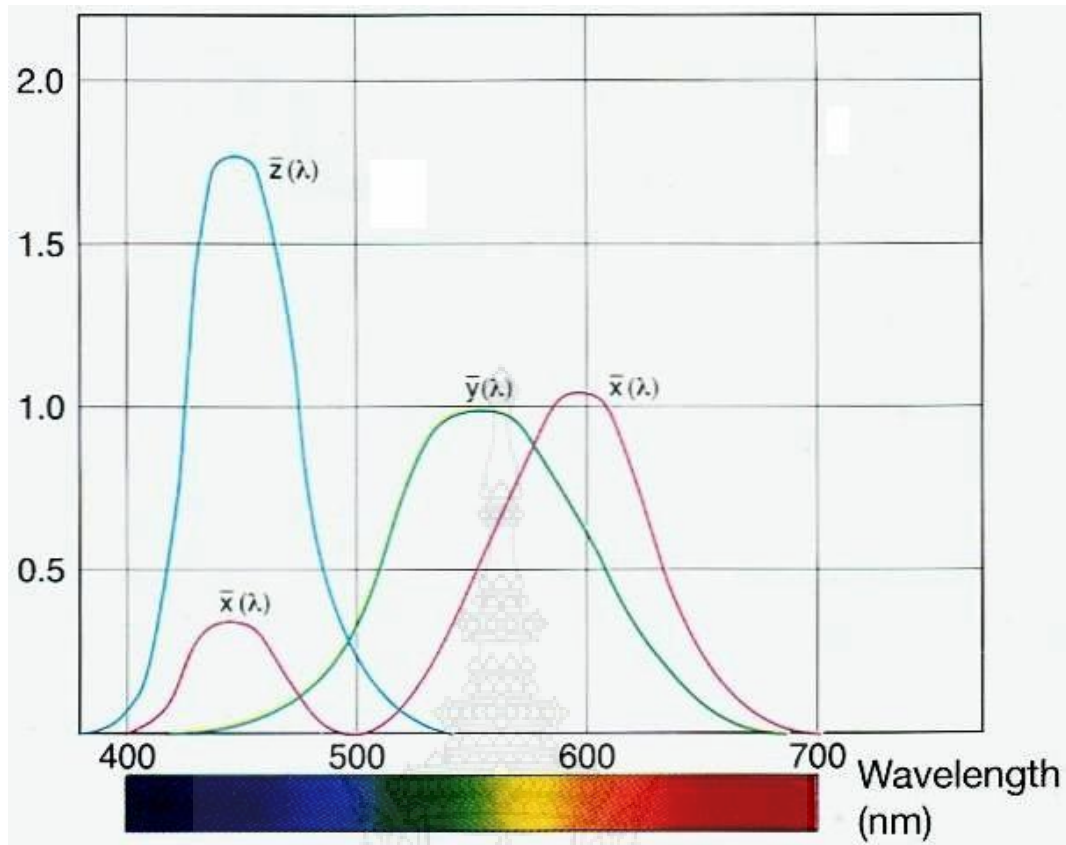
2.7.1 ทฤษฎีการมองเห็นสีและการวัดสี [8]

ในอดีตที่ผ่านมามีสิ่งสื่อสารให้มีความเข้าใจได้ยาก เนื่องจากสีหรือสีสนั้นมีความหลากหลาย การที่จะบอกคุณภาพของสีนั้นแตกต่างจากการบอกความยาวและน้ำหนัก เพราะไม่มีหน่วยบอกค่าสี ทำให้เป็นเรื่องที่วุ่นวายในการที่จะให้คำตอบหรืออธิบายให้ผู้คนที่เข้าใจอย่างชัดเจนเกี่ยวกับระดับสี เช่น การบอกความแตกต่างของสีฟ้า น้ำทะเลกับสีฟ้าท้องฟ้า ซึ่งคนแต่ละคนจะมีจินตนาการในสีทั้งสองที่ต่างกันไป 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 ความมีสีส้ม (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]

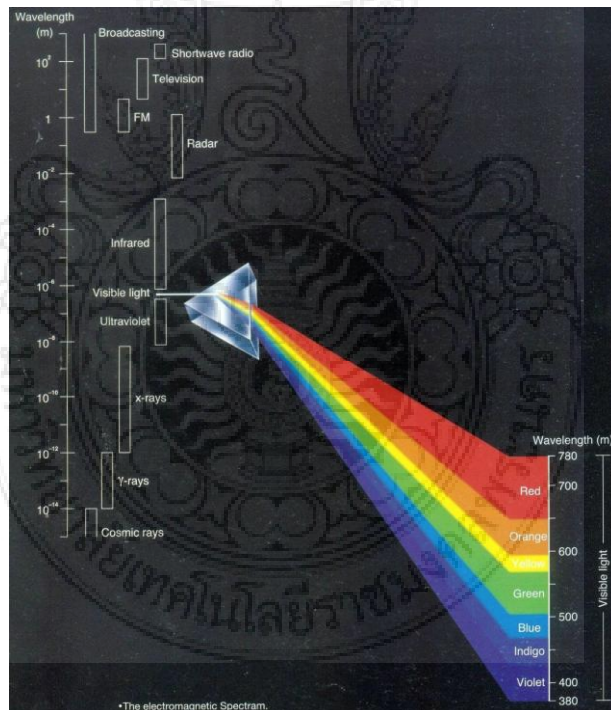


รูปที่ 2.9 ความไวแสงของตามนุษย์ (Color-matching function) [8]

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: μm) หรือบางครั้งอาจใช้หน่วยไมโครเมตร (Micrometer: μm) [8]



รูปที่ 2.10 ภาพสีรุ้งของรุ่งกินน้ำที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ที่เกิดจากแสงอาทิตย์ทะลุผ่านหยดน้ำ ซึ่งทำหน้าที่เป็นปริซึม [8]

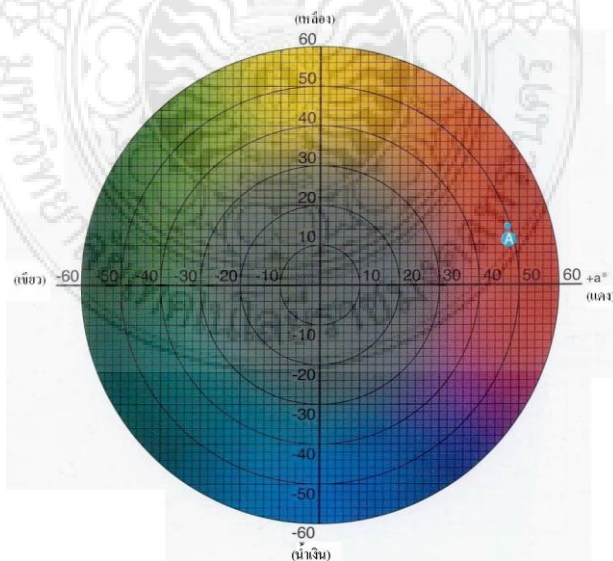


รูปที่ 2.11 ภาพคลื่นแสงในช่วงความยาวที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ที่เรียกว่า Visible light [8]

2.7.2 ระบบของปริภูมิสี (Color Space System) [8]

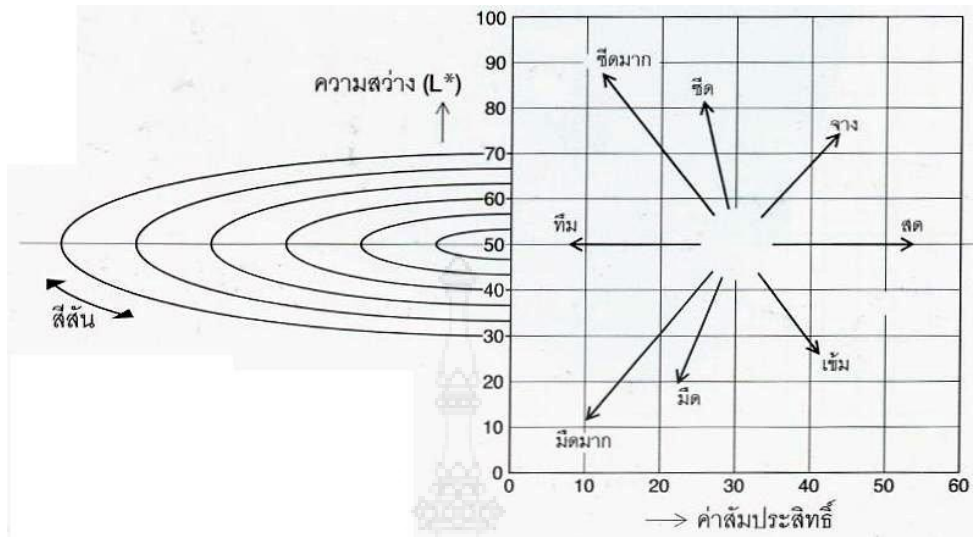
ปริภูมิสีเป็นค่าที่ใช้แสดงขอบเขตความกว้างขวางของสีของวัตถุหรือแหล่งกำเนิดแสงโดยการใช้เครื่องหมายหรือตัวเลขแสดงค่าสี ระบบปริภูมิสีที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปประกอบด้วย ปริภูมิสีระบบ L^*a^*b ปริภูมิสีระบบ L^*C^*h และปริภูมิสีระบบ Hunter Lab ซึ่งรายละเอียดของค่าปริภูมิสีในแต่ละระบบมีดังนี้

ก. ปริภูมิสีระบบ L^*a^*b (L^*a^*b Color Space) หรือบางครั้งเรียกว่า CIELAB เป็นระบบที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายในการนำมาใช้วัดค่าสีและใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในหลายๆวงการ โดยปริภูมิสีเป็นประเภทที่มีสเกลสมมาตร 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]

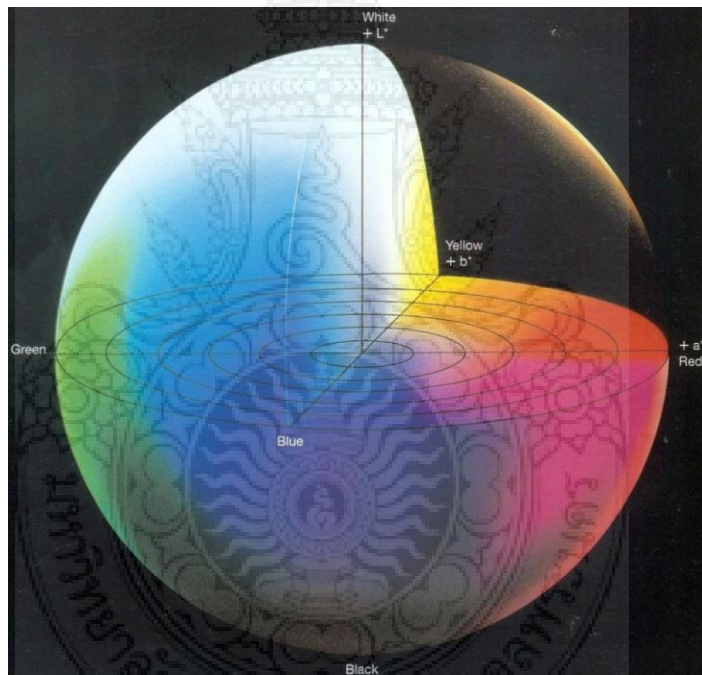


รูปที่ 2.12 ไดอะแกรมสัมประสิทธิ์สี a^* , b^* [8]

A



B



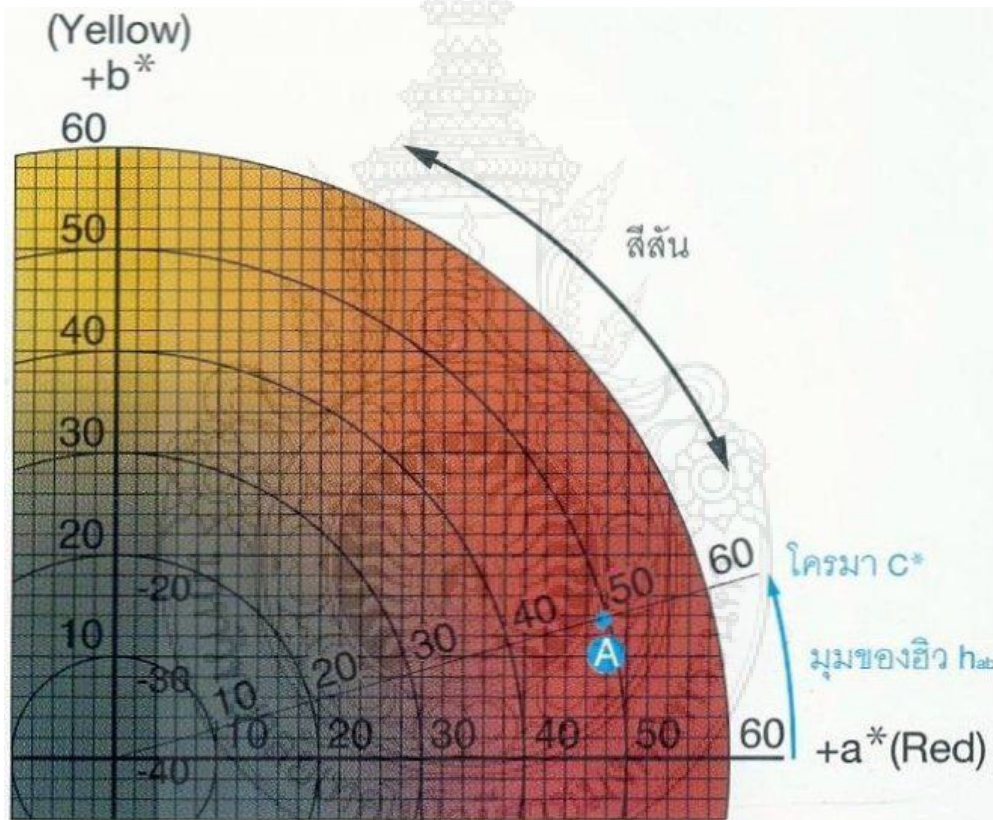
รูปที่ 2.13 ค่าสัมประสิทธิ์สีและความสว่าง (A) ค่าสัมประสิทธิ์สีและความสว่าง (B) ปริภูมิสีระบบ L^*a^*b (L^*a^*b Color Space) [8]

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

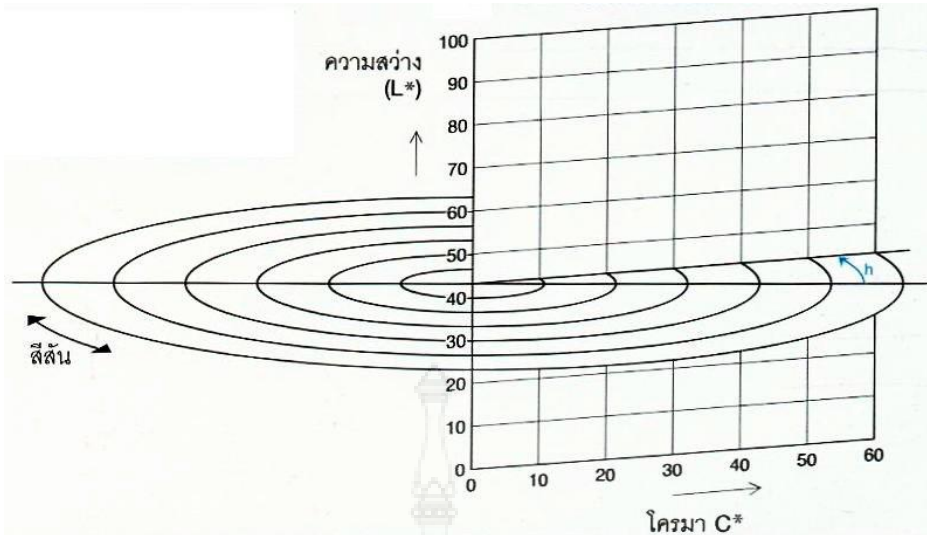
h หมายถึง มุมของฮิว (Hue angle) ค่า C^* จะมีค่าเป็น 0 ที่จุดศูนย์กลางและจะมีสีอึมตัวมากขึ้น เมื่อออกห่างจากศูนย์กลางมากขึ้น ส่วนค่ามุมฮิว ที่แทนค่าด้วย h จะเริ่มนับค่าบนแกนด้าน $+a^*$ โดยมีค่าเริ่มต้นที่ 0 องศาบนแกนด้าน $+a^*$ จะเป็น (สีแดง) เมื่อเป็นมุม 90 องศา จะเป็นแกน $+b^*$ (สีเหลือง) ที่มุม 180 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 (ΔE^*_{ab}) ค่าที่แสดงในรูปที่ 2.17-2.18 ซึ่งจะบอกเฉพาะปริมาณความแตกต่างของสีเท่านั้น แต่ไม่ได้บอกทิศทางความแตกต่างของสี ซึ่งค่า เดลต้าอี (ΔE^*_{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 $L^* = 43.31$, $a^* = +47.83$, $b^* = +14.12$

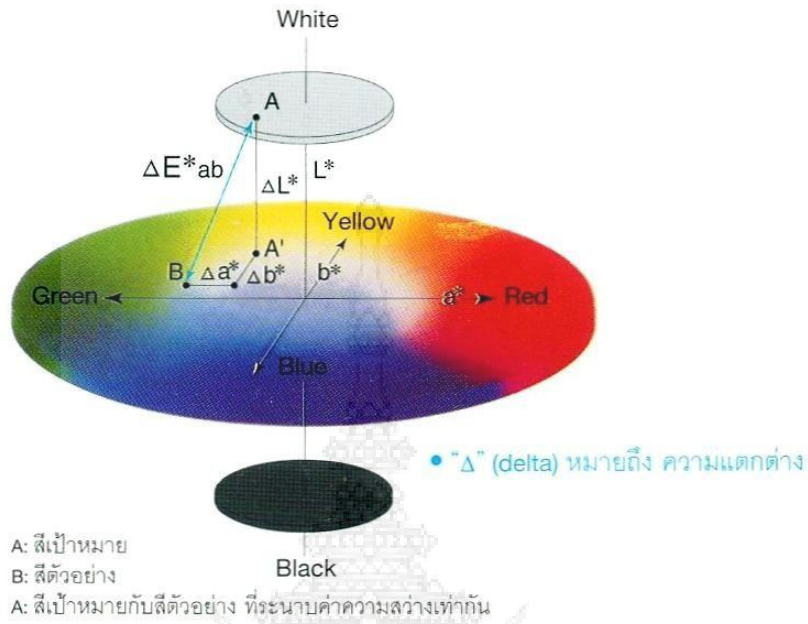
วัตถุชิ้นที่ 2 วัดสีได้ $L^* = 47.34$, $a^* = +44.78$, $b^* = +15.16$

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

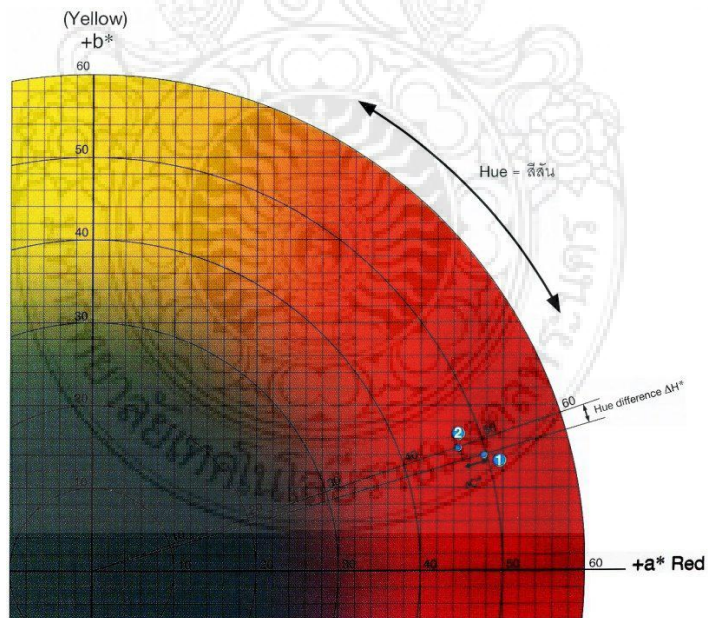
สีของวัตถุ 2 ชิ้น เมื่อนำไปแทนค่าลงในสมการจะได้ $\Delta E^*_{ab} = 5.16$

และในการทำงานเดียวกัน ถ้าวัดความแตกต่างของสีด้วยปริภูมิสีระบบ L^*C^*h

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



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



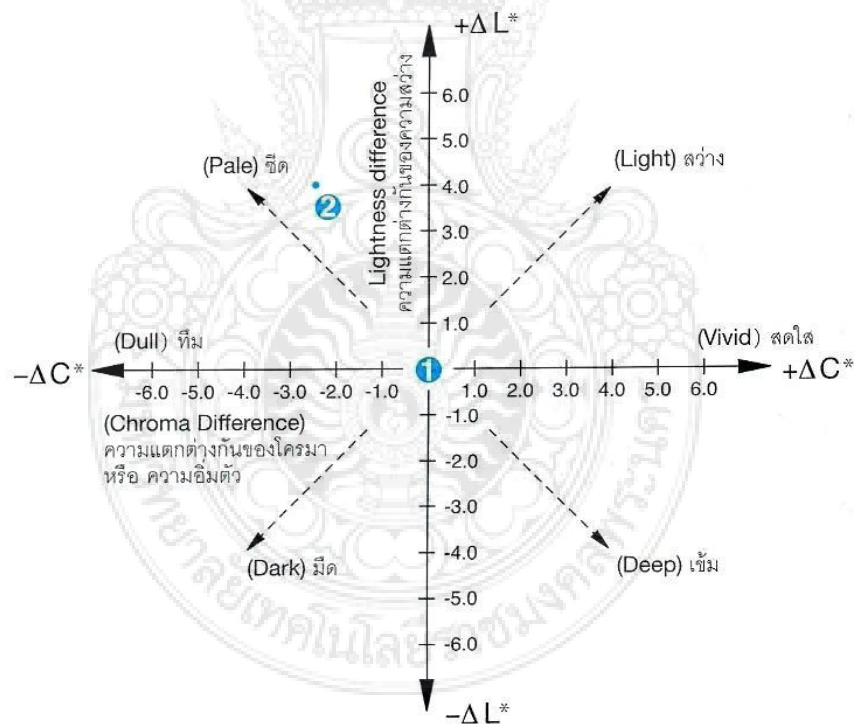
รูปที่ 2.17 ส่วนหนึ่งของไดอะแกรมสี a^*, b^* ในปริภูมิสีระบบ L^*C^*h [8]

สำหรับในส่วนของค่าความมีสีที่ต่างกันของวัตถุ 2 ชิ้น คือ ΔH^* ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

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

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

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

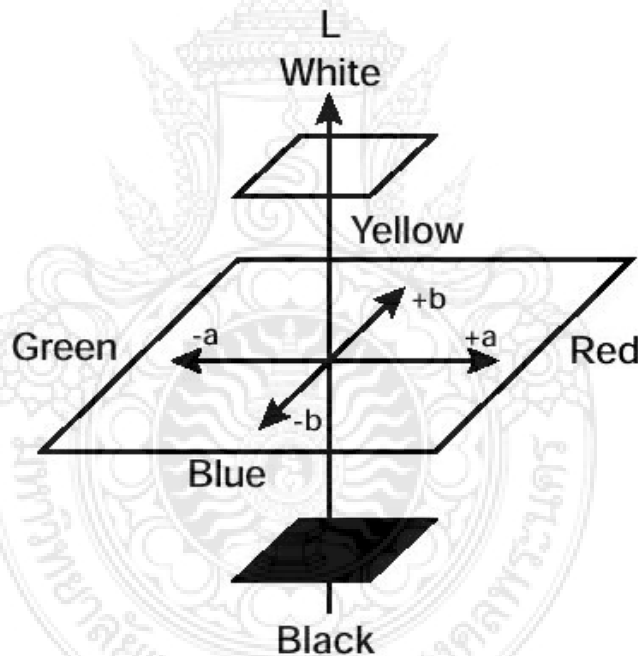


รูปที่ 2.18 คำที่ใช้อธิบายถึงค่าโครมาหรือความอิมิตัวของสีและความสว่าง (Chroma and Lightness) [8]

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 ประกอบด้วยค่าสีมาตรฐานและพิกัดความเผื่อค่าต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 สัญลักษณ์ระดับสีทองคำ ค่าการวัดและพิกัดความเผื่อตามมาตรฐาน DIN 8238 [10]

สัญลักษณ์	สี		ค่าสีมาตรฐาน					
	สี	ตรงกับมาตรฐาน NIHS-03-50 และ CETEHOR-07-07	L		a		b	
				พิกัด ความเผื่อ		พิกัด ความเผื่อ		พิกัด ความเผื่อ
8N	ขาว	-	1.2	±0.2	0.9	±0.1	1.6	±0.3
0N	เขียวเหลือง	-	24.8		1.6		1.2	
1N	เหลืองอ่อน	/	1.7	±0.1	1.7	±0.1	1.2	±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	

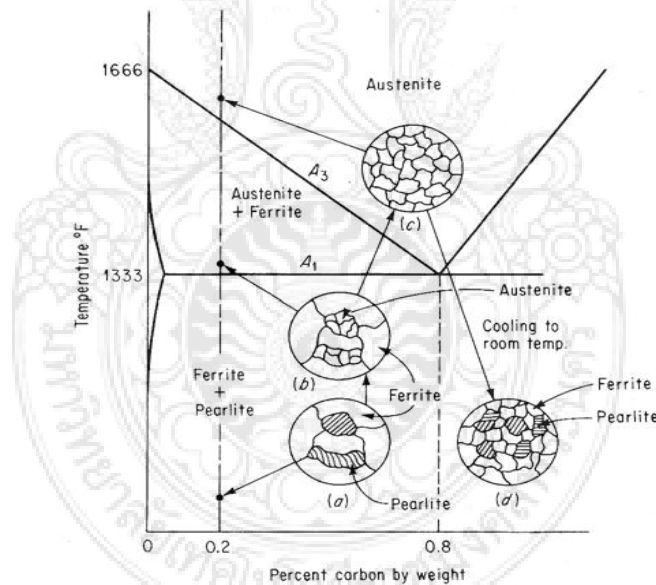
2.8 การอบชุบความร้อนในเหล็ก [15]

ความหมายของการอบชุบความร้อนให้กับเหล็กใน Metals Handbook คือ การผสมผสานระหว่างกระบวนการให้ความร้อน (Heating) และการปล่อยให้เย็นตัว (Cooling) โดยใช้อุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมกับโลหะ หรือโลหะผสมในสถานะของแข็ง (Solid State) เพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการ (Desired Properties) กระบวนการอบชุบความร้อนพื้นฐานทั้งหมดเกี่ยวข้องโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของเฟสออสเทนไนต์ (Austenite Transformation or Decomposition of Austenite) การเปลี่ยนแปลงเฟสดังกล่าวทำให้เกิดลักษณะเฉพาะทางกายภาพ และสมบัติทางกลสำหรับโลหะนั้นๆ

ขั้นตอนแรกของการอบชุบความร้อนในเหล็ก คือ การให้ความร้อนกับเหล็กจนถึงอุณหภูมิหนึ่งซึ่งเหนือกว่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature) เพื่อให้เกิดเฟสออสเทนไนต์เกือบทั้งหมดของกระบวนการให้ความร้อนกับเหล็ก มีตัวแปรมากมายที่ต้องพิจารณา เช่นอัตราการให้ความร้อน กล่าวคือ ถ้าเหล็กชนิดหนึ่งผ่านการรีดเย็นอย่างรุนแรง ทำให้มีความเค้นเหลือค้าง (Residual Stresses) ดังนั้นจำเป็นต้องควบคุมอัตราการให้ความร้อน (Heating Rate) อยู่ในระดับต่ำ เพื่อป้องกันการบิดเบี้ยว (Distortion) นอกจากต้องคำนึงถึงความแตกต่างของอุณหภูมิที่ใช้ในชิ้นงานที่มีขนาด หนา บาง ไม่เท่ากัน ซึ่งในความเป็นจริง ชิ้นส่วนที่ใช้งานในทางวิศวกรรมส่วนใหญ่จะมีรูปร่างซับซ้อน และไม่สมมาตร ดังนั้นจำเป็นต้องระวังในการให้ความร้อนกับชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิว และภายในซึ่งทำให้เกิดความเค้นเหลือค้าง เกิดการบิดเบี้ยว และการแตกร้าว

2.8.1 การอบอ่อนสมบูรณ์ (Full Annealing)

การอบอ่อนสมบูรณ์ประกอบด้วยให้ความร้อนกับเหล็ก ณ อุณหภูมิที่เหมาะสม (Proper Temperature) แล้วปล่อยให้เย็นตัว (Cooling) อย่างช้าๆ ตลอดการเปลี่ยนแปลงของเฟส ออสเทนไนท์ไปสู่เฟสอื่นๆ (ส่วนใหญ่โครงสร้างที่ได้ คือ เฟอไรต์ อย่างไรก็ตามขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมี และอัตราการเย็นตัวเป็นสำคัญ) โดยปกตินิยมให้เย็นตัวในเตา (Air-Cooled) หรือปล่อยให้เย็นในวัสดุกันความร้อน (Insulating Material) จนถึงอุณหภูมิห้องจุดประสงค์ของการอบอ่อนเป็นไปได้ทั้งทำให้เกรนมีขนาดเล็กลง (Refine Grain) ทำให้เหล็กมีความอ่อนตัว (Soften) ปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติความเป็นแม่เหล็ก (Improve Electrical and Magnetic Properties) และในบางกรณีเพื่อปรับปรุงความสามารถในการกลึง ใส (Improve Machinability) เนื่องจากอุปกรณ์เตาที่ใช้อบ และชิ้นงานเองต้องปล่อยให้เย็นไปพร้อมๆ กัน ด้วยเหตุนี้การอบอ่อนจึงเป็นกระบวนการที่เย็นตัวอย่างช้าๆ ใกล้เคียงกับระบบสมดุลในแผนภูมิเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์ สมมติว่ามีเหล็กที่มีคาร์บอน 0.2 เปอร์เซ็นต์ และมีเกรนหยาบ (จัดเป็นเหล็กกล้าไฮโปยูเทคติก) หากต้องการปรับปรุงขนาดเกรนให้เล็ก (Refine Grain) สามารถทำได้โดยการอบอ่อน (Annealing) รูปที่ 2.20 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กดังกล่าว ณ ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วปล่อยให้เย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง สามารถอธิบายได้ดังนี้



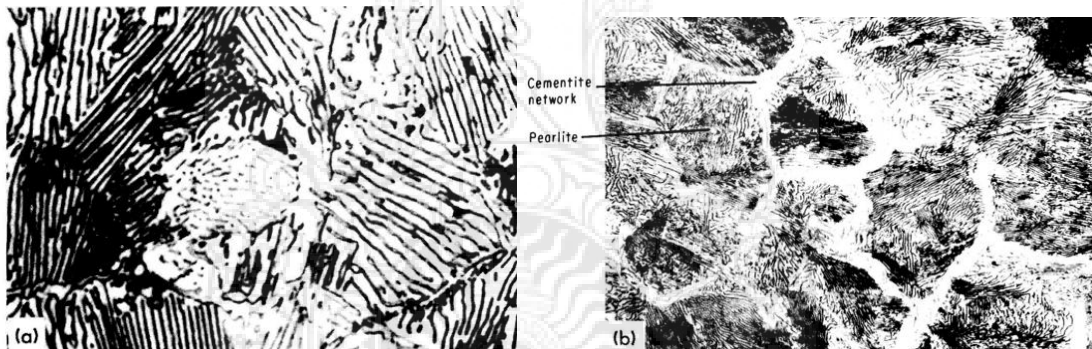
รูปที่ 2.20 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในระหว่างการอบอ่อนในเหล็กกล้า

คาร์บอน 0.2 เปอร์เซ็นต์ [15]

- โครงสร้างเดิมที่มีเกรนหยาบของเฟอร์ไรต์-เฟอไรต์
- เหนือเส้น A1 เล็กน้อย เฟอไรต์เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเกรนขนาดเล็กของออสเทนไนท์ ในขณะที่เฟอร์ไรต์ไม่เปลี่ยนแปลง
- เหนือเส้น A3 มีเพียงเกรนขนาดเล็กของออสเทนไนท์
- หลังจากเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้องประกอบด้วยเกรนขนาดเล็กของเฟอร์ไรต์-เฟอไรต์

เมื่อให้ความร้อนกับเหล็กจนถึงอุณหภูมิ ณ จุด (a) โครงสร้างพื้นฐานยังคงเป็นเกรนหยาบของ เฟอร์ไรท์-เพิร์ลไรท์ จนกระทั่งให้ความร้อนต่อไปเรื่อยๆ จนเหนือเส้น A1 เล็กน้อย เพิร์ลไรท์เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยปฏิกิริยายูเทคตอยด์เป็นเกรนขนาดเล็กของออสเตนไนท์ ณ จุด (b) ถ้าปล่อยให้เย็นตัว จากอุณหภูมิ ณ จุด (b) จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนตามต้องการแต่เมื่อให้ความร้อนต่อไปอยู่ ระหว่างเส้น A1 และ A3 ทำให้เกรนของเฟอร์ไรท์ขนาดโตบางส่วนเปลี่ยนแปลงไปเป็นออสเตนไนท์ จนกระทั่งให้ความร้อนเหนือเส้น A3 โครงสร้างเป็นออสเตนไนท์ที่มีขนาดเล็กทั้งหมด (จุด C) หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้าๆ ภายในเตาโครงสร้างสุดท้ายที่ได้ คือ เกรนขนาดเล็กของเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไรท์ ด้วยเหตุนี้จากกล่าวได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้สำหรับอบอ่อนเหล็กกล้าไฮโปยูเทคติก คือ 10°C (50°F) เหนือเส้น A3 สำหรับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนมากกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์ (เหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคตอยด์) แนะนำให้ใช้อุณหภูมิสำหรับอบอ่อนที่อุณหภูมิเหนือเส้น A_{3,1} (รูปที่ 2.20) ประมาณ 10°C (50°F)

อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงพบว่าหากอบอ่อนเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคติก ณ อุณหภูมิเหนือ เส้น A_{3,1} ประมาณ 10°C (50°F) พบว่าโครงสร้างประกอบด้วยเกรนหยาบของเพิร์ลไรท์ล้อมรอบด้วย โปริยูเทคตอยด์ซีเมนไตต์ (Pro-Eutectoid Cementite) ดังแสดงในรูป 2.21



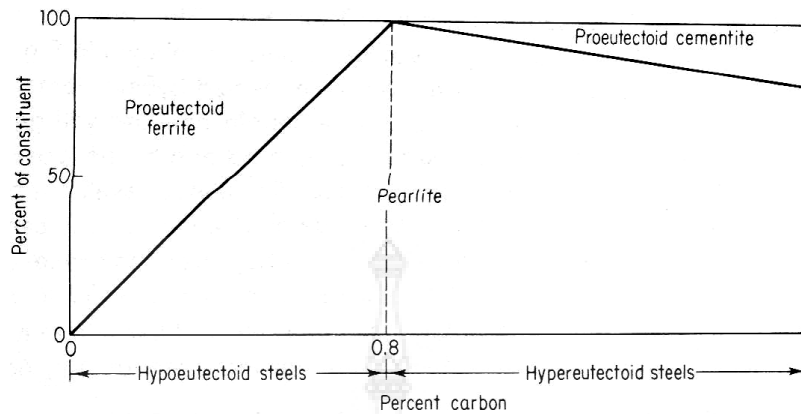
รูป 2.21 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค [15]

- (a) เหล็กกล้าคาร์บอน 1 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังขยาย 500 เท่า
- (b) เหล็กกล้าคาร์บอน 1.2 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน ที่กำลังขยาย 300 เท่า

โครงสร้างเพิร์ลไรท์ล้อมรอบด้วยโปริยูเทคตอยด์ซีเมนไตต์ ข้อสังเกตความหนาของชั้น โปริยูเทคตอยด์ซีเมนไตต์แปรตามปริมาณคาร์บอน

เนื่องจากโครงข่ายซีเมนไตต์ (Cementite Network) เปราะและมีแนวโน้มเป็นจุดเริ่มต้นของรอยแตกด้วยเหตุนี้จึงไม่แนะนำให้ทำอบอ่อนชิ้นงาน (Annealing) ในเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ (คาร์บอนมากกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์) เป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนนำไปใช้งานนอกจากนี้ชั้นของโปริยูเทคตอยด์ซีเมนไตต์ยังทำให้การกลึง ใส เป็นไปได้ยาก การศึกษาอัตราส่วนโครงสร้างของเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไรท์ (ในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์) หรือโครงสร้างเพิร์ลไรท์-ซีเมนไตต์ (ในเหล็กกล้า

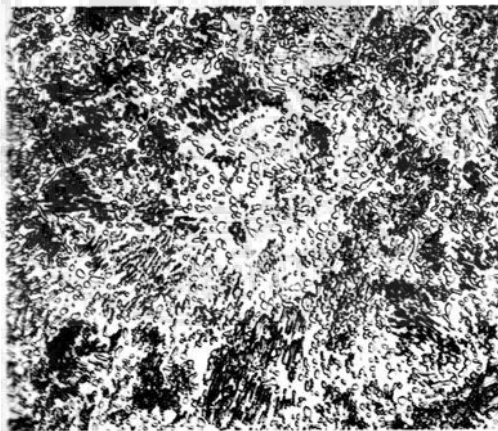
คาร์บอนมากกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์) ในเหล็กที่ผ่านการอบอ่อน (Annealing) สามารถประมาณได้จากรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 สัดส่วนของโครงสร้างที่ปรากฏในเหล็กกล้าที่ผ่านกรรมวิธีอบอ่อนที่ปริมาณคาร์บอนต่างๆ

2.8.2 การอบเพื่อเปลี่ยนแปลงรูปร่างซีเมนไตต์ให้มีลักษณะกลม (Spheroidizing)

ดังได้อธิบายไปแล้วในหัวข้อการอบอ่อน (Annealing) ว่าเหล็กกล้าคาร์บอนมากกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์ประกอบด้วยเฟิร์ลไรท์ล้อมรอบด้วยโครงข่ายซีเมนไตต์ไม่สามารถลึงใส่ได้ดี เพราะซีเมนไตต์แข็ง และเพราะ เครื่องมือตัด (Cutting Tool) ไม่สามารถตัดผ่านโครงข่ายซีเมนไตต์ได้ ดังนั้นการนํารอยตัดก็จะไม่เรียบสวยงามตามต้องการ เพื่อปรับปรุงความสามารถการลึงใส่จึงต้องอบเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงข่ายซีเมนไตต์ด้วยกรรมวิธีที่เรียกว่า Spheroidize Annealing กระบวนการดังกล่าวทำให้โครงข่ายซีเมนไตต์สลายตัวและให้คาร์ไบด์รูปร่างกลมกระจายอยู่ในโครงสร้างพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 เหล็กกล้าคาร์บอน 1 เปอร์เซ็นต์ผ่านกระบวนการ Spheroidize Annealing ประกอบด้วยซีเมนไตต์เม็ดกลม กระจายอยู่ในโครงสร้างพื้นฐานเฟอร์ไรท์ [15]

กรรมวิธีที่ใช้เพื่อเปลี่ยนแปลงรูปร่างของซีเมนต์ มีดังนี้

- ใช้เวลามากขึ้นสำหรับอบชิ้นงาน ณ อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตเล็กน้อย
- ใช้อุณหภูมิลบไปมาระหว่างการให้อุณหภูมิที่เหนือกว่า และต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต
- ใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตเล็กน้อย แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

การปล่อยแช่ชิ้นงานไว้ ที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นเวลานานทำให้โครงสร้างเพิร์ลไรท์ และซีเมนต์เกิดการแตกตัวโดยสมบูรณ์ กล่าวคือ โครงข่ายซีเมนต์ได้เปลี่ยนเป็นรูปร่างกลม แลอยู่ในสมดุลกับโครงสร้างอื่นๆ ที่ล้อมรอบ จึงอาจเรียกซีเมนต์ และโครงสร้างอื่นๆนี้ว่า Spheroidite ดังรูปที่ 2.23 ที่ตรงกันข้ามกับโครงสร้างในรูป 2.21 ซึ่งโครงสร้างพื้นฐานเพอร์ไรท์ถูกล้อมรอบด้วยโครงข่ายซีเมนต์ ทำให้กลิ้งไสได้ยาก โครงสร้าง Spheroidite เป็นที่ต้องการเมื่อ ต้องการความแข็งต่ำ (Minimum Hardness) ความเหนียวสูงสุด (Maximum Ductility) และความสามารถในการกลิ้งไสสูงสุด (Maximum Machinability) โดยเฉพาะในเหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High-Carbon Steels) ในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำไม่นิยมทำ Spheroidize สำหรับงานที่ต้องการกลิ้งไส ทั้งนี้เพราะการทำ Spheroidize ทำให้เหล็กทั้งอ่อน และเหนียว (Gummy) ซึ่งกลิ้งไสได้ยาก แทนที่ใบมีดกลิ้งจะตัดไสเนื้อเหล็กออกไป กลับเพียงแต่ทำให้เนื้อเหล็กโย้ จึงเป็นผลเสียทั้งกับชิ้นงาน คือ ได้ผิวไม่สวย และในขณะเดียวกันทำให้ใบมีดกลิ้งมีความร้อนสูง และสึกหรอได้เร็วกว่าปกติ ส่วนเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง พบว่ามีการทำ Spheroidize บ้างเพื่อให้ได้ความเหนียว (Ductility) สูงสุดในกรณีที่ชิ้นงานนั้นๆ ต้องการสมบัติเด่นอย่างใดก็ตามพึงระวังเกี่ยวกับการปล่อยให้ชิ้นงานถูกอบที่อุณหภูมิสำหรับทำ Spheroidize (Spheroidize-Annealing Temperature) นานเกินไป มีผลเสีย คือ ซีเมนต์ไต่จะรวมตัว (Coalesce) กันอีกครั้งเกิดโครงข่ายซีเมนต์ทำให้ความเหนียว และความสามารถในการกลิ้งไสลดลง

2.8.3 การอบอ่อนเพื่อคลายเครียด (Stress-Relief Annealing)

กระบวนการนี้ในบางครั้งเรียก Subcritical Annealing เป็นประโยชน์มากสำหรับการลดความเค้นเหลือค้าง (Residual Stress) ภายในชิ้นงาน เนื่องจากกระบวนการกลิ้งไส หรือการขึ้นรูปเย็น โดยปกติการอบอ่อนเพื่อคลายเครียดทำที่อุณหภูมิต่ำกว่าขอบเขตล่างของอุณหภูมิวิกฤต (Lower Critical Temperature) ซึ่งอยู่ระหว่าง 540 °C ถึง 650°C (1000 °F ถึง 1200 °F)

2.8.4 Process Annealing

เป็นกระบวนการทางความร้อนที่นิยมทำในระหว่างการขึ้นรูปเย็น (Cold Working) สำหรับเหล็กแผ่น (Sheet) และเส้นลวด (Wire) กระทำเพื่อทำให้เหล็กแผ่น หรือลวดมีความอ่อน

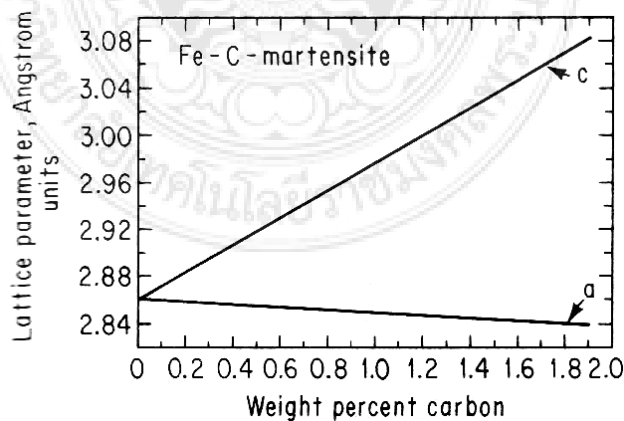
2.8.5 การอบปกติ (Normalizing)

การอบปกติสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนโดยปกติอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอุณหภูมิวิกฤต (Upper-Critical Temperature, A3 or Acm) ประมาณ 40°C (100°F) แล้วตามด้วยการปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศ ณ อุณหภูมิห้อง (Air-Cooling) ช่วงอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการอบ

อ่อน จุดประสงค์ของการอบปกติ (Normalizing) คือ เพื่อให้ได้ความแข็ง และความแข็งแรงมากกว่า เหล็กที่ผ่านการอบอ่อน (Annealing)

2.9 การชุบแข็ง (Hardening) [15]

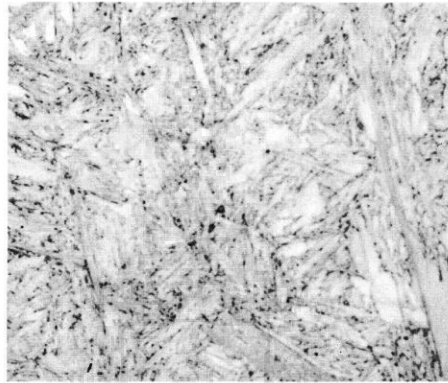
ภายใต้อัตราการเย็นตัวช้า หรือปานกลาง (Slow or Medium Cooling Rate) คาร์บอนมีความสามารถในการแพร่ออกจากโครงสร้างออสเทนไนต์ ดังนั้นอะตอมเหล็ก (Iron) เกิดการเคลื่อนที่และเปลี่ยนโครงสร้างอะตอมพื้นฐานเป็น Body Centered Cubic (BCC) การเปลี่ยนแปลงจากเหล็กแกมมา-เหล็กแอลฟา (ออสเทนไนต์ไปสู่เฟอร์ไรท์) เกิดขึ้นด้วยกระบวนการกำเนิดนิวเคลียส การโตขึ้นของเกรน และแปรตามเวลาภายใต้อัตราการเย็นตัวที่เร็ว อะตอมคาร์บอนไม่สามารถเคลื่อนย้ายออกจากสารละลายของแข็ง (ของเหล็ก) ได้ทัน โครงสร้างอะตอมพื้นฐานไม่สามารถเกิด BCC เพราะคาร์บอนอะตอมบางส่วนยังเหลือค้างในโครงข่ายของเหล็กทำให้ได้โครงสร้างชนิดหนึ่งที่เรียกว่ามาร์เทนไซต์ (Martensite) ซึ่งเป็นสารละลายของแข็งที่อิ่มตัวไปด้วยอะตอมของคาร์บอน (Supersaturated Solid Solution) ในโครงสร้าง Body Centered Tetragonal (BCT Structure) โดยปกติโครงสร้างของออสเทนไนต์ (Face Centered Cubic, FCC Structure) หรือโครงสร้างของเฟอร์ไรท์ (BCC Structure) เกิดจากหน่วยเซลล์เล็กๆ ที่เรียกว่า Unit Cell มาเรียงต่อกันเป็นจำนวนมากทั้งสามทิศทาง (Three Dimensional Directions) และหนึ่งหน่วยเซลล์เกิดจากอะตอมมารวมตัวกันเป็นรูปลูกบาศก์ โดยมีระยะห่างระหว่างอะตอม เป็น a , b และ c ที่เรียกว่า Lattice Parameter ในทิศทางแกน x , y และ z ตามลำดับโดยปกติโครงสร้าง BCC และ FCC มีระยะห่างระหว่างอะตอมที่เท่ากัน แต่ในโครงสร้างซีเมนไตต์ตั้งได้อธิบายข้างต้น เนื่องจากอัตราการเย็นตัวที่เร็วทำให้คาร์บอนอะตอมแพร่ออกจากโครงสร้างเหล็กไม่ทัน ทำให้การเปลี่ยนแปลงจาก FCC ไปเป็น BCC ไม่ทันจึงได้โครงสร้าง BCT แทน ซึ่งมีระยะห่างระหว่างอะตอมในแนวแกน Z (c) มากกว่าปกติอัตราส่วนของค่าระยะห่างระหว่าง



รูปที่ 2.24 การเปลี่ยนแปลงค่า Lattice Parameter a และ c ตามปริมาณคาร์บอน ในเหล็กกล้าคาร์บอน [15]

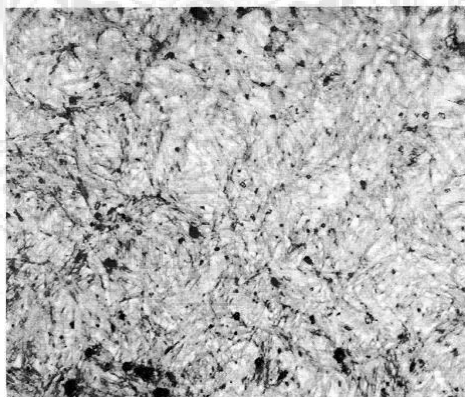
อะตอมในแกน Z ต่อแกน X (c/a) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.08 ดังแสดงในรูปที่ 2.24 ซึ่งการแทรกตัวของอะตอมคาร์บอนใน Lattice ทำให้ Lattice เกิดการบิดเบี้ยว ด้วยเหตุนี้จึงทำให้โครงสร้างมาร์เทนไซต์มีความแข็งแรงสูงเพราะคาร์บอนอะตอมที่แทรกอยู่นี้ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน

การจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างมาร์เทนไซต์ไม่อัดแน่นเท่ากับโครงสร้างออสเทนไนท์ และการขยายตัวมักเกิดขึ้นในระหว่างการเปลี่ยนแปลงเฟสการขยายตัวในระหว่างการเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ทำให้เกิดความเค้นเฉพาะที่ (Localized Stresses) ทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวรในแมทริกซ์ (Plastic Deformation of Matrix) ภายใต้การทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Drastic Cooling) ที่เรียกว่า Quenching มาร์เทนไซต์มีรูปร่างคล้ายเข็ม หรือขนนก (Needle-Like or Acicular) ดังรูปที่ 2.25



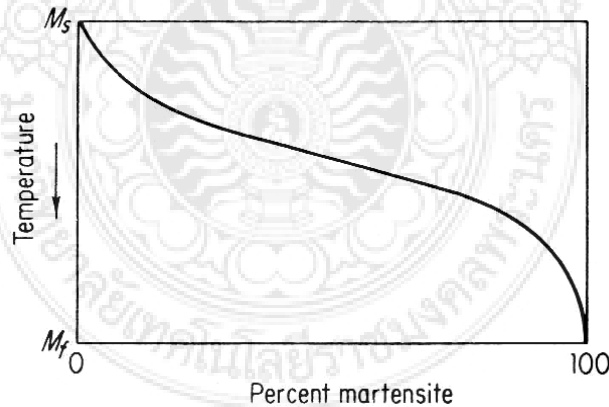
รูปที่ 2.25 โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่กำลังขยาย 2500 เท่า [15]

ในกรณีที่เหล็กมีคาร์บอนสูงโครงสร้างพื้นฐานจึงประกอบด้วยออสเทนไนท์เหลือค้าง (Retained Austenite) จึงทำให้มองเห็นโครงสร้างขนนกของมาร์เทนไซต์ได้ชัดเจนขึ้นดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 เหล็กกล้าคาร์บอน 1 เปอร์เซ็นต์ผ่านการชุบแข็งในน้ำ ประกอบด้วยโครงสร้างออสเทนไนท์เหลือค้าง และมาร์เทนไซต์ที่มีรูปร่างคล้ายเข็มคุณลักษณะที่สำคัญหลายประการสำหรับการเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ [15]

- เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบ Diffusionless และไม่มีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมี ปริมาตรเพียงเล็กน้อยของออสเตนไนท์เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกอย่างทันทีทันใดโดยอาศัยปฏิกิริยาแรงเฉือน (Shearing Reaction)
- การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดเฉพาะในระหว่างการเย็นตัว (Cooling) และหยุดเมื่อถูกรบกวน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงแปรตามอุณหภูมิที่ลดลงโดยไม่ขึ้นกับเวลา และการเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า Athermal ซึ่งตรงข้ามกับการเปลี่ยนแปลงอีกชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ และเรียกว่า Isothermal Transformation ปริมาณมาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิที่ลดลง ปริมาณมาร์เทนไซต์ที่มีรูปร่างคล้ายเข็มเกิดในชั้นแรกมีปริมาณเพียงเล็กน้อย หลังจากนั้นปริมาณเพิ่มขึ้น แล้วลดลงอีกครั้งในตอนท้ายดังแสดงในรูป 11 อุณหภูมิที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากออสเตนไนท์ไปสู่มาร์เทนไซต์ เรียก Martensite Start Temperature, M_s และอุณหภูมิสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างออสเตนไนท์ไปสู่โครงสร้างมาร์เทนไซต์ เรียก Martensite Ended Temperature, M_f ถ้าเหล็กถูกทำให้เย็นที่อุณหภูมิคงที่ ณอุณหภูมิหนึ่ง และอุณหภูมินั้นต่ำกว่าเส้น M_s การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นมาร์เทนไซต์จะหยุดทันทีและจะเกิดการเปลี่ยนแปลงต่อไปได้ถ้าอุณหภูมิต่ำลง
- จุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างออสเตนไนท์ไปเป็นมาร์เทนไซต์ (M_s -Temperature) ไม่เปลี่ยนแปลงตามอัตราการเย็นตัว (Cooling Rate) แต่ M_s -Temperature เปลี่ยนแปลงตามส่วนผสมทางเคมี (Chemical Compositions) เท่านั้น ซึ่งมีหลายสูตรด้วยกันตัวอย่างของสูตรที่ใช้คำนวณหา M_s -Temperature เช่น



รูป 2.27 ปริมาณมาร์เทนไซต์ที่เกิดในระหว่างการเย็นตัว เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ [15]

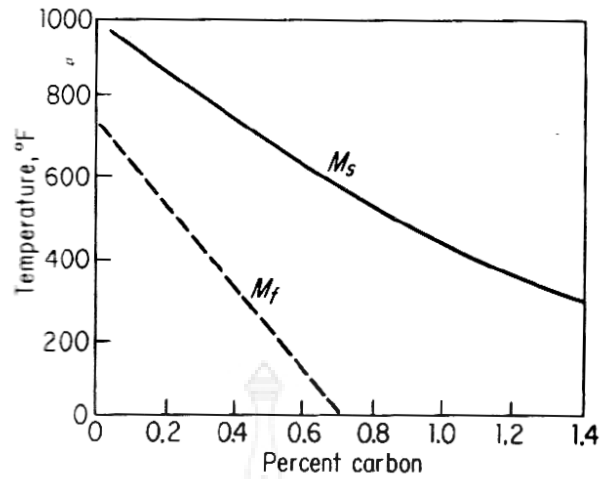
$$M_s(^{\circ}F) = 1000 - (650 \times \%C) - (70 \times \%Mn) - (35 \times \%Ni) - (70 \times \%Cr) - (50 \times \%Mo)$$

อิทธิพลของธาตุคาร์บอนต่อเส้น M_s และ M_f แสดงดังรูป 12 เส้นสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างออสเตนไนท์ไปเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (M_f) แสดงเป็นเส้นปะเนื่องจากยังไม่เป็นที่ระบุแน่ชัด จาก

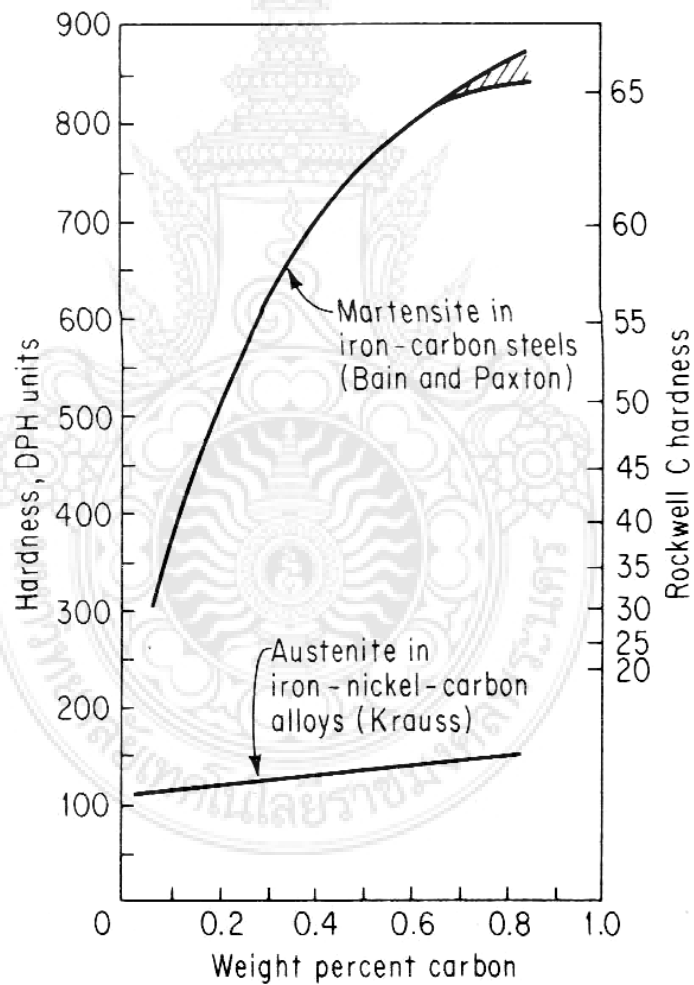
ภาคทฤษฎีอธิบายว่าการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างออสเทนไนต์ไปเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ไม่มีโอกาสเปลี่ยนได้สมบูรณ์ และมักมีปริมาณเล็กน้อยของออสเทนไนต์เหลือค้าง (Retained Austenite) แม้ว่าอุณหภูมิลดลงต่ำ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวยิ่งเป็นไปได้ยากยิ่งขึ้นเมื่อปริมาณของโครงสร้างออสเทนไนต์ลดลง อย่างไรก็ตามในรูปที่ 2.27 เป็นการประมาณการสัดส่วนของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่เกิด โดยพิจารณาจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคดังนั้นจึงเป็นไปได้ยากสำหรับการแยกออสเทนไนต์เหลือค้างจากมาร์เทนไซต์ ด้วยเหตุนี้จึงกล่าวได้ว่าเส้น Mf คือ อุณหภูมิที่การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างออสเทนไนต์ไปเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ได้เกือบสมบูรณ์

มาร์เทนไซต์จัดได้ว่าเป็นโครงสร้างที่ไม่อยู่ในระบบสมดุลอย่างแท้จริงถึงแม้ว่าโครงสร้างนี้ดำรงอยู่ได้ที่อุณหภูมิห้อง โครงสร้างมาร์เทนไซต์สามารถพิจารณาได้ว่าเป็นรอยต่อระหว่างโครงสร้างออสเทนไนต์ที่ไม่มีเสถียรภาพ (Unstable Austenite Phase) และโครงสร้างที่สมดุลของของผสมระหว่างเฟอร์ไรต์ และซีเมนไตต์ (Final Equilibrium Condition of a Mixture of Ferrite and Cementite) สมบัติที่สำคัญที่สุดของมาร์เทนไซต์ คือ มีความแข็งสูง แม้ว่าโครงสร้างมาร์เทนไซต์มีความแข็งมากกว่าโครงสร้างออสเทนไนต์ที่ปริมาณคาร์บอนเท่ากัน และ อิทธิพลของคาร์บอนที่มีต่อช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงเป็นมาร์เทนไซต์แสดงดังรูป 2.28 และแสดงในรูป 2.29 แต่มีข้อพึงจำคือ ความแข็งที่ได้ของมาร์เทนไซต์มาจากปริมาณคาร์บอนที่เพียงพอ ความแข็งของมาร์เทนไซต์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในตอนแรกตามปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นโดยมีค่าประมาณ 60 Rockwell C ที่ 0.4 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน หลังจากนั้นถึงแม้ว่าปริมาณคาร์บอนจะเพิ่มขึ้นอีก แต่ค่าความแข็งค่อยๆ เพิ่มขึ้นโดยมีค่าประมาณ 65 Rockwell C ที่ 0.8 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน สาเหตุที่ค่าความแข็งไม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อคาร์บอนมากกว่า 0.4 เปอร์เซ็นต์ คือ มีออสเทนไนต์เหลือค้างมากขึ้นเมื่อคาร์บอนเพิ่มมากขึ้นทำให้ความแข็งไม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ความแข็งของมาร์เทนไซต์เชื่อว่าเป็นผลจากอะตอมคาร์บอนไปแทรกตัวใน Lattice ทำให้ Lattice บิดเบี้ยว (จึงยากต่อการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน หรือทำให้เกิดการเสีรูปร่างของผลึก ดังนั้นจึงต้องใช้แรงกระทำมากขึ้นนั่นเอง) อย่างไรก็ตามคาร์บอนที่แทรกตัวนี้จะแทรกได้ถึงระดับหนึ่งเพราะ (มีขีดจำกัดในการละลาย/แทรกตัว) สุดท้ายอาจกล่าวสรุปได้ว่า ความแข็งของมาร์เทนไซต์เป็นฟังก์ชันของคาร์บอนเท่านั้นเป็นเวลาหลายปีที่มีความเชื่อว่าการเปลี่ยนแปลงไปเป็นมาร์เทนไซต์เกิดเฉพาะในเหล็ก

อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวพบที่สามารถเกิดในโลหะผสมอื่นๆ ด้วย เช่น เหล็ก-นิกเกิล ทองแดง-สังกะสี และทองแดง-อะลูมิเนียม ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงไปเป็นมาร์เทนไซต์ไม่เกิดเฉพาะในเหล็กเท่านั้น



รูป 2.28 อิทธิพลของคาร์บอนที่มีต่อช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงเป็นมาร์เทนไซต์ [15]



รูป 2.29 ผลของธาตุคาร์บอนต่อความแข็งของโครงสร้างออสเทนไนท์ และมาร์เทนไซต์ (ส่วนที่แรงจืดอนปลายแสดงผลของออสเทนไนท์เหลือค้ำ) [15]

จุดประสงค์หลักของการชุบแข็ง (Hardening) เพื่อทำให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์โดยสมบูรณ์ และอัตราการเย็นตัว (Cooling Rate) ที่หลีกเลี่ยงการเกิดโครงสร้างอื่น ๆ ที่มีความอ่อนตัว (Soft) แล้วได้มาร์เทนไซต์เรียกว่า อัตราการเย็นตัววิกฤต (Critical Cooling Rate) อัตราการเย็นตัววิกฤต (Critical Cooling Rate) ถูกกำหนดโดยส่วนผสมทางเคมี (Chemical Composition) และขนาดเกรนของ ออสเทนไนท์ (Austenite Grain) จัดว่าเป็นสมบัติหนึ่งที่สำคัญที่ช่างขึ้นชื่อเหล็กต้องมีอัตราการเย็นตัวเท่าไรเพื่อให้ได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาอิทธิพลของสารเจือ ฟอสฟอรัสและอินเดียม ต่อคุณสมบัติทางกลของโลหะเงินเจือทองแดงสำหรับผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ โดยผู้วิจัยได้ค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องและใกล้เคียงนำมาเสนอ ดังนี้

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

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

มาร์ค [9] ได้ศึกษาเวลาที่ใช้สำหรับการอบอ่อนด้วยเตาอบซึ่งผลจากการศึกษา ซึ่งมาร์คได้แนะนำว่าในทางปฏิบัติควรใช้เวลาประมาณ 30 นาที แต่ถ้าทำการอบอ่อนด้วยวิธีใช้หัวไฟเผาบนโต๊ะปฏิบัติงานทั่วไปให้อุณหภูมิสูงกล่าวปกติจึงใช้เวลาในการให้ความร้อนสั้น อุณหภูมิที่ใช้สำหรับการอบอ่อนสามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงสีโลหะด้วยสายตา ซึ่งแนะนำอุณหภูมิสำหรับการอบอ่อนโลหะชนิดต่าง ๆ

สมนึก และคณะ [7] ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของสารเจือสำคัญที่ใช้ผสมในโลหะเงินเจือ ได้แก่ ทองแดง สังกะสี และซิลิกอน โดยกำหนดปริมาณทองแดงประมาณ 5% สังกะสีระหว่าง 0.5 ถึง 2.5% และซิลิกอน 0.1 ถึง 0.4% ในการศึกษาถึงคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ได้แก่ คุณสมบัติทางกล การหล่อ กรรมวิธีทางความร้อน และความต้านการหมอง ซึ่งผลการศึกษา พบว่า ถ้าปริมาณสังกะสีเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การยืดตัวลดลง ถ้าปริมาณซิลิกอนเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมี แนวโน้มลดลง และพบว่าไม่ควรผสมซิลิกอนเกินกว่า 0.2% เพราะทำให้เปราะมาก ในการศึกษาคุณสมบัติด้านการหล่อเหรียญในเตาเหรียญแบบสูญญากาศด้วยเงินเจือ 4.8%Cu 1.6%Zn และ 0.1%Si ซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีคุณสมบัติ

ทางกลในเกณฑ์ที่ดี พบว่า มุมรูด 65° ความเร่ง 10G และอุณหภูมิเทหล่อ 1050°C มีสิ่งบกพร่องภายใน น้อยที่สุด 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

เอกลีทธิ 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. วิเคราะห์เชิงกายภาพของตัวเรือนเครื่องประดับ							■	■	■				
6. เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดลอง									■	■	■		
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) อุปกรณ์สำหรับการหล่อลอมผสมโลหะและหล่อขึ้นรูปขึ้นสอบนั้น ประกอบไปด้วย เบ้าลอมโลหะ ปูนสำหรับทำแบบหล่อ ยางสำหรับทำแม่พิมพ์ยาง และเทียนสำหรับฉีดขึ้นรูปตัวแบบเทียน
- 4) วัสดุสำหรับการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ซึ่งประกอบไปด้วย กระจกทราย ผ่าขีด ผงเพชรขนาดต่างๆ และสารเคมี

3.2.2 เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการทดลอง

เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้สำหรับการศึกษาวิจัยได้ดำเนินการจัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม

- 1) เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการลอมผสมโลหะและการหล่อขึ้นรูปขึ้นทดสอบ ในการทดลองศึกษาวิจัยนี้ ผู้ใช้เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการผลิตชิ้นงานเครื่องประดับ ซึ่งประกอบไปด้วย

หลอมผสมเทเม็ดโลหะ เครื่องหล่อดูดสุญญากาศและเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการเตรียมแบบหล่อ (เครื่องฉีดเทียน เครื่องผสมปูน เครื่องอบนึ่งไอน้ำและเตาอบปูนแบบหล่อ)

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

3.3 การดำเนินการหล่อหลอมผสมโลหะเพื่อผลิตเป็นมาสเตอร์อัลลอย

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



รูปที่ 3.2 เครื่องหลอมผสมเทเม็ดโลหะ Indutherm รุ่น VC 600



รูปที่ 3.3 ลักษณะของเม็ดโลหะมาสเตอร์อัลลอย 58.45Ag+41.55Cu หลังจากผ่านการเทหัตเม็ด

สภาวะของการหลอมผสมเทเม็ดโลหะเพื่อผลิตเม็ดโลหะมาสเตอร์อัลลอย

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

3.4 การดำเนินการหลอมผสมโลหะและหล่อขึ้นรูปชิ้นทดสอบโลหะเงินผสม 58.33% สำหรับการวิเคราะห์ทดสอบต่างๆ

เม็ดโลหะผสมมาสเตอร์อัลลอย (ทองแดง-ดีบุก) ที่ได้จากหัวข้อ 3.3 ถูกนำมาหลอมผสมรวมกับโลหะเงิน เพื่อหล่อขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบโลหะเงินผสม 58.33% สำหรับการศึกษาวินิจฉัยสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค เพื่อเปรียบเทียบกับโลหะเงินสเตอร์ลิงหรือโลหะเงินผสม 92.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถกำหนดอัตราการผสมของชิ้นทดสอบ คือ 58.33Ag + 41.16Cu + 0.51Sn และ 58.33Ag + 41.57Cu + 0.10Sn ได้ดำเนินการหล่อขึ้นรูปชิ้นทดสอบเป็นลักษณะเครื่องประดับเงินซึ่งตัวแบบเทียนทั้งหมดจะถูกนำไปติดเป็นต้นเทียนสำหรับการหล่อขึ้นรูปด้วยขบวนการ Investment Casting ด้วยเครื่องหล่อดูดสุญญากาศยี่ห้อ Yasui รุ่น K2 แสดงขั้นตอนการฉีดเทียนดังรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการฉีดยีน



รูปที่ 3.5 เครื่องหล่อตูดสุญญากาศยี่ห้อ Yasui รุ่น K2

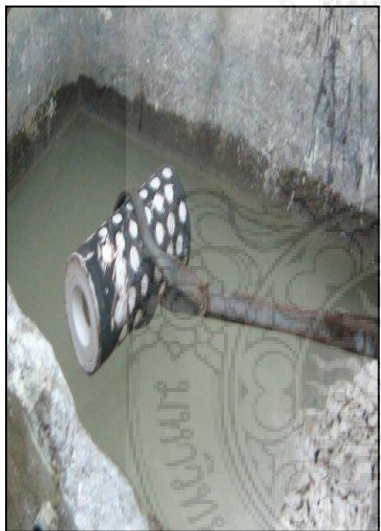
3.4.2 หลังจากทำการเตรียมต้นเทียนสำหรับหล่อขึ้นรูปขึ้นทดสอบสำหรับการทดสอบความต้านแรงดึงความแข็งแรงการศึกษาโครงสร้างจุลภาคเรียบร้อยแล้ว นำต้นเทียนไปทำการหล่อทับด้วยปูนโปสเตอร์เพื่อใช้สำหรับทำแบบหล่อ จากนั้นทำการหล่อขึ้นรูปขึ้นทดสอบแบบสุญญากาศแสดงขั้นตอนการหล่อดังรูปที่ 3.8



ก) เทปูนลงในกระบอบกปูนที่มีต้นเทียนอยู่ภายใน
แล้วนำกระบอบกปูนเข้าเครื่องหล่อ



ข) เทเม็ดโลหะลงใบเข้าหลอม



ค) แสดงการล้างปูนออกจากชิ้นทดสอบ



ง) นำชิ้นงานแช่ในกรดกัดปูนล้างปูน

รูปที่ 3.6 ขั้นตอนกระบวนการหล่อหลอมชิ้นงานทดสอบของโลหะเงินเจือดำ

สำหรับในส่วนสภาวะของการหล่อขึ้นรูปชิ้นทดสอบ ประกอบด้วย

- 1) เครื่องหล่ออุตสาหกรรม ยี่ห้อ Yasui รุ่น K2
- 2) ปริมาณการหลอมโลหะครั้งละ 250 กรัม
- 3) หลอมโลหะภายใต้สภาวะสุญญากาศ
- 4) ปกคลุมผิวหน้าโลหะด้วยก้ำซาร์กอน

- 5) อุณหภูมิกระบอบปูนโพรงแบบหล่อ 550 °C
- 6) อุณหภูมิเทหล่อ 1,010 °C และคงอุณหภูมิ 5 นาที ก่อนทำการเทหล่อ
- 7) พักกระบอบปูนแบบหล่อก่อนจุ่มน้ำล้างปูน 20 นาที



รูปที่ 3.7 ลักษณะโลหะหลังจากผ่านการหล่อของโลหะเงินเจือดำ $58.33\text{Ag} + 41.57\text{Cu} + 0.10\text{Sn}$
อุณหภูมิในการหล่อ (1,080 °C)



รูปที่ 3.8 ลักษณะโลหะหลังจากผ่านการหล่อของโลหะเงินเจือดำ $58.33\text{Ag} + 41.57\text{Cu} + 0.10\text{Sn}$
อุณหภูมิในการหล่อ (1,040 °C)



รูปที่ 3.9 ลักษณะโลหะหลังจากผ่านการหล่อของโลหะเงินเจือต่ำ $58.33\text{Ag} + 41.57\text{Cu} + 0.10\text{Sn}$
อุณหภูมิในการหล่อ ($1,040\text{ }^{\circ}\text{C}$)



รูปที่ 3.10 ลักษณะโลหะหลังจากผ่านการหล่อของโลหะเงินเจือต่ำ $58.33\text{Ag} + 41.16\text{Cu} + 0.51\text{Sn}$
อุณหภูมิในการหล่อ ($1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$)



รูปที่ 3.11 ลักษณะโลหะหลังจากผ่านการหล่อของโลหะเงินเจือตะกั่ว $58.33\text{Ag} + 41.16\text{Cu} + 0.51\text{Sn}$
อุณหภูมิในการหล่อ ($1,040\text{ }^{\circ}\text{C}$)



รูปที่ 3.12 ลักษณะโลหะหลังจากผ่านการหล่อของโลหะเงินเจือตะกั่ว $58.33\text{Ag} + 41.16\text{Cu} + 0.51\text{Sn}$
อุณหภูมิในการหล่อ ($1,080\text{ }^{\circ}\text{C}$)

3.5. การวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพ

เป็นการตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพ ของชิ้นทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะและการเปลี่ยนแปลงผิวหลังจากการหล่อ แต่ง ขัด ตัวเรื่อง ที่สามารถมองเห็นด้วย ตาได้ โดยการหล่อขึ้นรูป เพื่อการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อน การตรวจสอบโครงสร้างมีขั้นตอนการดำเนินการดังต่อไปนี้

- 1) ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบซึ่งการเตรียมทำได้โดย ตัดชิ้นงานที่ได้หลังจากการหล่อ ตัดออกจากต้น นำมาทำการร่อนเพื่อทำความสะอาด เบื้องต้น
- 2) ขั้นตอนการขัดผิวละเอียด ด้วยกระดาษทราย โดยการขัดนั้นเริ่มจาก กระดาษทรายหยาบ จนถึงละเอียดสุด ในการขัดด้วยกระดาษทราย ต้องขัดให้เกิดรอยกระดาษทรายในทิศทางเดียวกันตลอดผิวชิ้นงานแล้วหมุนไป 360 องศา ขัดจนรอยเดิมหายไป
- 3) ขั้นตอนการขัดผิวละเอียด โดยดาร์ขัดเงา ได้แก่ ลูกปอ ละเอียด ลูกผ้า แปลงขัด ยาดิน ยาขาว ยาแดง ขัดเพื่อทำการเปิดผิวดิบที่ได้จากการหล่อ โดยวิธีการขัดผิวด้วยการลงยาดิน เพื่อทำการลอกผิวหยาบของกระดาษทรายออก และตามด้วยยาขาว เพื่อลอกมิด ขั้นที่สอง และตามด้วยยา แดง เพื่อทำการปิดเงาเป็นวิธีการสุดท้าย จะได้ผิวชิ้นงานที่มีความเงาและวาว จะสามารถมองเห็นรอยแตก หรือ รอยพรุน ของชิ้นทดสอบได้
- 4) ดำเนินการทดลองหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับโลหะ โดยเลือกทำการหล่อหลังจากที่ได้โลหะที่เหมาะสมตามที่ต้องการ ผู้วิจัยจึงได้ทำการหล่อ สูตรที่ 3 และ สูตรที่ 5 ขึ้นรูป เป็นชิ้นทดสอบสำหรับการศึกษาวิเคราะห์ทดสอบสมบัติด้านต่างๆ
- 5) ทำการวิเคราะห์รอยขีดข่วนบนผิวระหว่าง ตัวเรือนเครื่องประดับโลหะ 58.33 wt% AgCuSn ทั้ง 2สูตร ตัวเรือนเครื่องประดับ เพื่อทำการวิเคราะห์รอยขีดข่วน ตามความพรุนรอยแตกของเนื้อโลหะ รวมทั้งคุณภาพของตัวเรือนที่ได้จากการผสม โดยผ่านการหล่อด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ผู้วิจัยเลือกใช้ระบบการตรวจรอยขีดข่วนความพรุนโดยใช้การขัดและการชุบเพื่อตรวจสอบ



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์

4.1 ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ต้องการทดลองหล่อเครื่องประดับเพื่อหาปัญหาที่เกิดขึ้นในงานหล่อ และต้องการการพัฒนาแนวทางแก้ไขปัญหในงานหล่อเครื่องประดับสมัยใหม่ ซึ่งปัญหาที่พบในการทดลองหล่อ เครื่องประดับโลหะเงินเจือดำ $58.33\text{Ag} + 41.16\text{Cu} + 0.51\text{Sn}$ ในครั้งนี้สามารถแสดงผลการทดลองได้ ดังนี้



รูปที่ 4.1 เครื่องประดับโลหะเงินเจือดำ $58.33\text{Ag} + 41.16\text{Cu} + 0.51\text{Sn}$ หล่อที่อุณหภูมิ 1,000 °C



รูปที่ 4.2 เครื่องประดับโลหะเงินเจือดำ $58.33\text{Ag} + 41.16\text{Cu} + 0.51\text{Sn}$ หล่อที่อุณหภูมิ 1,080 °C



รูปที่ 4.3 เครื่องประดับโลหะเงินเจือดำ $58.33\text{Ag} + 41.16\text{Cu} + 0.51\text{Sn}$ หล่อที่อุณหภูมิ 1,040 °C



รูปที่ 4.4 เครื่องประดับโลหะเงินเจือดำ $58.33\text{Ag} + 41.16\text{Cu} + 0.51\text{Sn}$ หล่อที่อุณหภูมิ $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.5 เครื่องประดับโลหะเงินเจือดำ $58.33\text{Ag} + 41.16\text{Cu} + 0.51\text{Sn}$ หล่อที่อุณหภูมิ $1,400\text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.6 เครื่องประดับโลหะเงินเจือดำ $58.33\text{Ag} + 41.16\text{Cu} + 0.51\text{Sn}$ หล่อที่อุณหภูมิ $1,080\text{ }^{\circ}\text{C}$

4.2 ปัญหาจากการหดตัว

ปัญหารูพรุนจากงานหล่อ ของเครื่องประดับโลหะเงินเจือดำ $58.33\text{Ag} + 41.16\text{Cu} + 0.51\text{Sn}$ ไม่พบรูพรุนในการหล่อที่อุณหภูมิ $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการหล่อได้งานที่มีคุณภาพดี โลหะมีสัลดหลอมเดือดที่เหมาะสม ส่วนอุณหภูมิที่ $1,040\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะทำให้อุณหภูมิมีจุดหลอมละลายมาก ทำให้งานมีรอยแตกร้าวบางจุด ส่วนอุณหภูมิที่ $1,080\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นอุณหภูมิที่สูงมากเกินไป จึงทำให้ชิ้นงานมีรอยแตกมาก เนื้อโลหะกรอบซึ่งสังเกตได้จากการหล่อเป็นต้นแล้ว เมื่อเวลาทำความสะอาดปูนออกจากชิ้นงานหลังขั้นตอนการหล่อ จะพบว่าต้นงานหล่อมมีรอยแตกและหักออกจากกัน แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานมีความเปราะมาก เนื่องด้วยการหล่อที่มีอุณหภูมิที่สูงมากเกินไปทำให้นเนื้อโลหะมีรูพรุนมาทำให้เนื้อโลหะเกิดการแข็งตัว ซึ่งเลยจุดที่เหมาะสมของการหล่อ และสามารถพบปัญหารูพรุนจากงานหล่อ ดังนี้

1) ปัญหารูจากฟองอากาศไม่เกิดขึ้นเนื่องจากได้ เครื่องหล่อแบบสุญญากาศ สามารถที่จะควบคุม ได้ไม่เกิดขึ้น

แนวทางแก้ไข

- เลือกอุณหภูมิ ที่เหมาะสมกับชิ้นงานที่ทางน้ำที่ขนาดใหญ่ขึ้นหรือเพิ่มจำนวนก้านทางน้ำควรออกแบบก้านทางน้ำ ให้มีขนาดที่เหมาะสมกับชิ้นงาน ถ้าก้านทางน้ำเล็กเกินไปน้ำโลหะจะเย็นตัวก่อนที่ก้านทางน้ำ และจะทำให้การไหลของน้ำโลหะไม่สะดวกเกิดเป็น Shrinkage ได้

2) อุณหภูมิเตาสูงเกินไป

แนวทางแก้ไข

- ให้อุณหภูมิต่ำ เพราะถ้าอุณหภูมิเตาสูงเกินไปจะทำให้ปัญหารูจากการหดตัวเพิ่มขึ้น ในกรณีที่ต้องติดชิ้นงานที่มีน้ำหนักแตกต่างกันติดต้นเดียวกัน ควรให้ชิ้นงานที่หนักกว่าอยู่ด้านล่างและชิ้นงานที่เบากว่าอยู่ตำแหน่งบน

3) ชิ้นงานอยู่ใกล้กับฐานต้นเทียนเกินไป

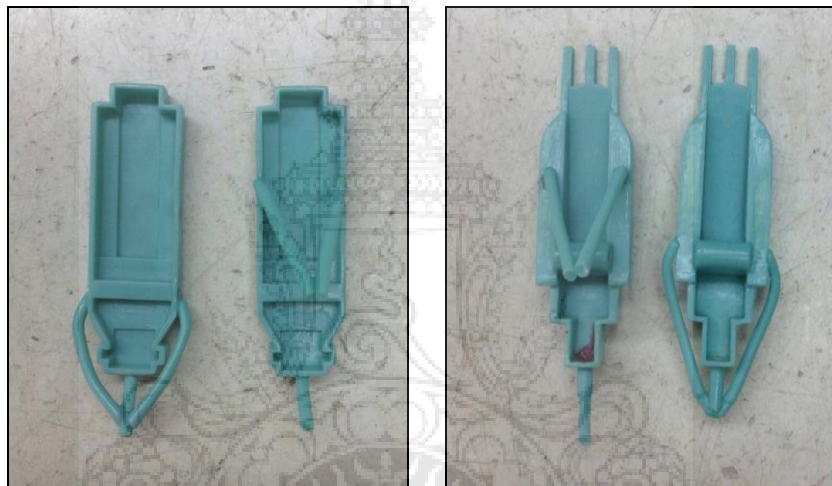
แนวทางแก้ไข

- เว้นระยะประมาณ 1 นิ้วจาก Sprue Bottom เนื่องจากหากนำต้นเงินออกจากเบ้า บริเวณฐานต้นที่สัมผัสกับอากาศจะเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะส่งผลให้

ข้อเสนอแนะ

- การวิเคราะห์แบบเทียน การติดทางน้ำและการวิเคราะห์ข้อบกพร่องในการผลิตแบบเทียน เพื่อปรับปรุงแบบเทียนให้มีทางน้ำเหมาะสมก่อนนำไปหล่อ เพื่อลดปัญหาข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการหล่อ

- การตรวจสอบทางน้ำมีความสำคัญมากในการเพิ่มคุณภาพงานหล่อให้ดีขึ้น โดยทางน้ำที่มีขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสม จะทำให้ได้งานหล่อที่มีคุณภาพดี



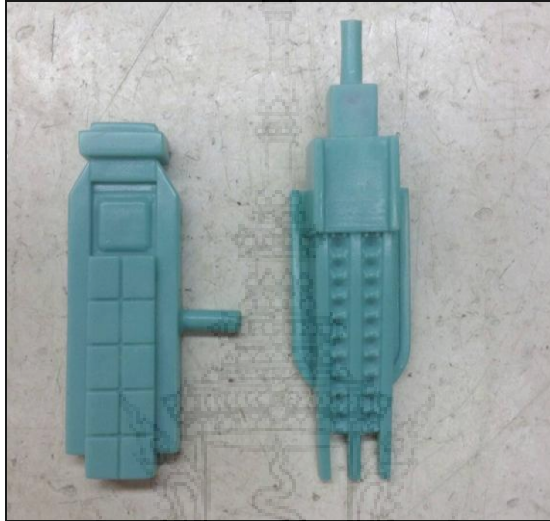
รูปที่ 4.7 การติดทางน้ำที่ไม่เหมาะสม

4.2 ปัญหาการติดทางเดินน้ำโลหะ

ปัญหาการติดก้านทางเดินน้ำโลหะไม่เหมาะสมกับรูปแบบชิ้นงาน วิธีการสำคัญที่จะทำให้ได้งานหล่อที่มีคุณภาพดี คือ การติดทางเดินน้ำโลหะที่ถูกต้อง เหมาะสมกับรูปแบบของชิ้นงาน โดยควรมีการเสริมขนาดและปริมาณของทางน้ำให้เหมาะสมกับขนาดและรูปแบบของชิ้นงาน หลักการสำคัญ คือ ต่อ ก้านทางน้ำตรงส่วนที่หนาที่สุดของชิ้นงาน เพื่อให้น้ำโลหะจากก้านทางน้ำสามารถไหลเข้าไปซดเซย ขณะที่โลหะแข็งตัวได้ทันและเพียงพอ และปริมาณของทางน้ำจะช่วยทำให้สามารถหล่องานที่มีรูปแบบซับซ้อนหรือมีลวดลายได้ นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณทางน้ำเป็นหลายทาง เพื่อช่วยให้ น้ำโลหะไหลได้ง่ายขึ้น และยังช่วยซดเซยขณะที่น้ำโลหะแข็งตัวอีกด้วย

ขนาดของทางน้ำก็เป็นอีกส่วนหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง ถ้าตำแหน่งที่ติดทางน้ำอยู่ไกลจากต้นเทียนควรเสริมให้ทางน้ำมีขนาดใหญ่ในบริเวณที่ติดกับต้นและมีปลายที่เล็กลงตรงบริเวณที่ต่อกับชิ้นงาน เพื่อช่วย

ให้การแข็งตัวเป็นไปตามเกณฑ์ทางโลหะวิทยา หากติดทางน้ำที่มีขนาดไม่เหมาะสมกับชิ้นงาน เช่น ทางน้ำมีขนาดเล็กและยาวเกินไป จะเป็นสาเหตุให้งานหล่อเกิดรูพรุนตามดจากการหดตัว และทางน้ำที่เหมาะสมไม่ควรเป็นไปในลักษณะที่มีมุมแหลม อันจะทำให้เกิดปัญหาหน้าโลหะกระแทกปูนหล่นตามมาก้านทางน้ำนี้ควรเป็นก้านที่เรียวปลาย (Taper) เพื่อให้ชิ้นงานค่อยๆ เย็นตัวจากส่วนที่บางไปหาส่วนที่หนา โดยส่วนหนาสามารถช่วยชดเชยน้ำคละขณะแข็งตัวได้ สามารถลดปัญหาการรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะขณะแข็งตัวได้



รูปที่ 4.8 การติดทางน้ำที่เหมาะสม

4.2.1 ระบบการติดทางน้ำโลหะ

เกณฑ์การพิจารณาประเภททางเดินน้ำโลหะ

- ตำแหน่งทางน้ำโลหะ
- ขนาดทางน้ำโลหะ
- จำนวนทางน้ำโลหะ
- ความซับซ้อนของรูปแบบชิ้นงาน
- รูปแบบของทางน้ำ
- ตำแหน่งทางน้ำโลหะ

4.2.2 ปัญหาติดก้านทางเดินน้ำผิดตำแหน่ง

แนวทางแก้ไข

- ติดก้านทางเดินน้ำเข้าตรงตำแหน่งที่หนาที่สุด เนื่องจากตำแหน่งที่หนาที่สุดจะเย็นตัวช้าที่สุดจะทำให้น้ำโลหะผ่านเข้าเย็นตัวในจุดที่บางกว่าจนกระทั่งเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งที่สมบูรณ์

ข้อเสนอแนะ

- การวิเคราะห์แบบเทียบ การติดทางน้ำ และการวิเคราะห์ข้อบกพร่องในการผลิตแบบเทียบ เพื่อปรับปรุงแบบเทียบให้มีทางน้ำที่เหมาะสมก่อนนำไปหล่อ เพื่อลดปัญหาข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการหล่อ

- การตรวจสอบทางน้ำมีความสำคัญมากในการเพิ่มคุณภาพงานหล่อให้ดีขึ้น โดยทางที่มีขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสม จะช่วยแก้ปัญหาการหดตัวของน้ำโลหะระหว่างการเย็นตัวได้ ทำให้งานหล่อไม่เกิดข้อบกพร่องลักษณะรูพรุนจากการหดตัว

4.2.3 ขนาดทางน้ำโลหะ

ปัญหากำแพงทางน้ำมีขนาดเล็กเกินไป

ลักษณะกำแพงทางน้ำที่มีขนาดเล็กเกินไป จะส่งผลให้งานหล่อเกิดปัญหาการรูพรุนตามรอบผิวชิ้นงาน ส่วนใหญ่ปัญหาดังกล่าวมักเกิดร่วมกับการติดทางน้ำผิดตำแหน่งด้วย สามารถแก้ไขได้โดยปรับเปลี่ยนขนาดทางน้ำให้เหมาะสมกับรูปแบบชิ้นงาน

4.2.4 ความซับซ้อนของรูปแบบชิ้นงาน

1) ปัญหาติดชิ้นงานใกล้ผนังกระบอกล่อมากเกินไป

การติดต้นเทียน โดยให้ขีดกระบอกหล่อเกินไปมีผลเสียต่องานหล่อ จะทำให้ผนังปูนบาง เมื่อเทน้ำโลหะลงเข้าปูน จะเป็นสาเหตุให้ปูนแตกหรือทะลุได้ ดังนั้นควรติดต้นเทียนให้ห่างจากด้านข้างของกระบอกล่อประมาณ 1 เซนติเมตร ด้านบนประมาณ 2 เซนติเมตร และห่างจากฐานยางประมาณ 2 เซนติเมตร และชิ้นงานที่ติดในต้นเดียวกันควรติดห่างกันประมาณ 2 มิลลิเมตร การติดต้นเทียนสำหรับหล่อสุญญากาศ ควรติดให้แบบเทียบเอียงทำมุมกับต้นเทียน 70 - 80 องศา เพื่อให้สามารถดูอากาศขณะหล่อได้ดีขึ้น ทำให้ได้งานหล่อที่เต็มมากขึ้น ส่วนงานหล่อเหวี่ยงควรติดให้แบบเทียบเอียงทำมุมกับต้นเทียน 45 องศา

2) ปัญหาที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติมในการออกแบบระบบทางเดินน้ำโลหะ

- โลหะที่ไหลต้องไม่เกิดการไหลวนของน้ำโลหะ
- การแข็งตัวภายในโพรงแบบควรมีลักษณะการแข็งตัวแบบมีทิศทาง
- ควรป้องกันสารเจือปนที่ติดมากับน้ำโลหะไม่ให้เข้าไปในโพรงแบบ
- การเชื่อมระหว่างทางเข้าแบบกับแบบหล่อควรจะเรียบเพื่อป้องกันการแยกของแบบ

ข้อเสนอแนะในการออกแบบและติดทางน้ำ

- ทางน้ำควรที่จะเป็นส่วนเดียวกับแม่พิมพ์ที่ใช้ในการหล่อเสมอและควรติดอย่างแน่นหนาตัวแม่แบบเสมอ

- ขนาดและตำแหน่งทางน้ำ ควรที่จะอยู่ในความดูแลของช่างหล่อไม่ใช่ผู้ออกแบบ
- การติดทางน้ำควรที่จะติดในส่วนที่สามารถขจัดออกได้ง่ายที่สุดไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับชิ้นงานหล่อ

- ไม่ควรใช้ทางน้ำหลายทางโดยไม่จำเป็น ควรต่อในรูปแบบที่ง่ายที่สุดที่สามารถหล่อ
งานได้
- ควรคำนึงตามหลักเศรษฐศาสตร์ ไม่ควรใช้ทางน้ำใหญ่เกินไปโดยไม่จำเป็น
ข้อแนะนำในการออกแบบต้นเทียนหลัก
- ควรมีที่ว่างเพียงพอสำหรับปริมาณโลหะหลอมเหลวที่จะไหลเข้าไปเติมเต็มแบบ
หล่อโดยสมบูรณ์
- ต้องเป็นส่วนที่โลหะยังคงอุณหภูมิไว้ได้ดีที่อุณหภูมิที่ต้องการให้กระบวนการแข็งตัว
ดำเนินไปอย่างเหมาะสม
- ขนาดของต้นเทียนขึ้นอยู่กับวิธีการหล่อที่ใช้
- ควรคำนึงตามหลักเศรษฐศาสตร์ ไม่ควรใช้ต้นเทียนขนาดใหญ่เกินไป

4.3 ปัญหารูพรุน (ตามด) จากงานหล่อ

ปัญหารูพรุนตามดที่เกิดขึ้นในงานหล่อ ส่วนใหญ่มี 2 ลักษณะคือ รูพรุนจากการหดตัวของโลหะ
และรูพรุนจากฟองก๊าซ

4.3.1 รูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของโลหะ

รูพรุนตามดที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มักเป็นรูพรุนในลักษณะนี้ โดยโลหะหดตัวในลักษณะกิ่งไม้
หรือที่เรียกกันว่าการผุนั้น มักจะเกิดขึ้นที่บริเวณส่วนหนาของชิ้นงาน เช่น หัวแหวนหรือบริเวณก้านที่มี
ความหนามาก ลักษณะรูพรุนแบบหดตัวนี้เกิดขึ้นจากก้านทางเดินน้ำโลหะมีขนาดเล็กเกินไปและติดติด
ตำแหน่ง ทำให้น้ำโลหะไหลได้ไม่ดี และขณะที่น้ำโลหะแข็งตัวเกิดการหดตัวของน้ำโลหะไม่พอเพียง
บริเวณที่เกิดการหดตัวจึงเกิดโพรงลักษณะรูพรุนขึ้น นอกจากนี้ในบางกรณียังพบ รูพรุนหรือตามดจาก
การหดตัวตรงส่วนที่บางที่สุดของชิ้นงาน ซึ่งรูพรุนลักษณะนี้เกิดจากตรงบริเวณส่วนที่บางของชิ้นงานเกิด
การหดตัวอย่างรวดเร็วทำให้ไปกั้นการไหลของน้ำโลหะที่จะเข้าไปชดเชยตรงบริเวณที่หดตัว ทำให้น้ำ
โลหะไปชดเชยบริเวณที่หดตัวไม่ทัน จึงเกิดรูพรุนขึ้น

การหดตัวเนื่องจากการแข็งตัวของโลหะ มีลักษณะเป็นช่องว่างที่มีรูปร่างไม่แน่นอนของ
โครงสร้างแบบกิ่งไม้ ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างการแข็งตัวของน้ำโลหะ โดยน้ำโลหะถูกปิดกั้นจากโลหะในส่วน
บริเวณที่แข็งตัวก่อน ทำให้ไม่สามารถไหลเข้าไปชดเชยในบริเวณที่เกิดการหดตัวที่หลัง ลักษณะเช่นนี้
เป็นสมบัติเฉพาะตัวของโลหะ ไม่สามารถหลีกเลี่ยงหรือกำจัดได้โดยสมบูรณ์ แต่สามารถลดปริมาณลงได้
รูพรุนจากการหดตัวของโลหะ มี 2 ลักษณะ คือ การหดตัวแบบโพรง และการหดตัวแบบพรุณ

ตามดแบบหดตัวหรือ Shrinkage จะแสดงให้เห็นเป็นหลุมโพรงที่มีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ
ซึ่งส่วนมากจะเป็นในรูปแบบของรูทรงเรขาคณิต

ปัญหาตามดแบบหดตัว จะสามารถหลีกเลี่ยงได้ โลหะผสมแต่ละชนิดจะมีลักษณะ
พฤติกรรมที่ส่งผลให้เกิดตามดแบบหดตัวที่แตกต่างกัน เช่น งานทองขาว จะมีโอกาสเกิดตามดแบบหด

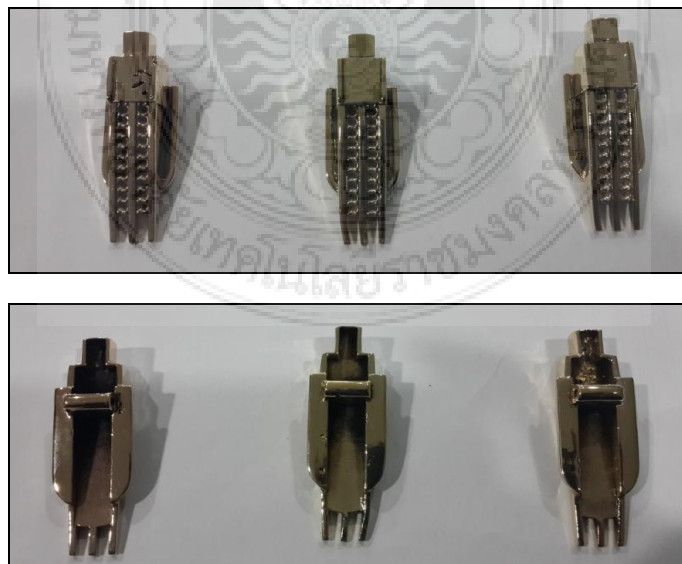
ตัวได้มากกว่างานทองสีเหลือง จะมีโอกาสเกิดตามดแบบหดตัวน้อยที่สุด การหลีกเลี่ยงและป้องกันตามดแบบหดตัวนั้น



รูปที่ 4.9 ชิ้นงานที่ขัดแต่งแล้ว แบบที่ 1

ชั้นที่ 1 จากซ้าย เป็นผลจากการติดทางนำที่ไม่เหมาะสม

ชั้นที่ 2-3 กลางและชั้นขวา เป็นผลจากการติดทางนำที่เหมาะสมจะเห็นได้ว่ามีคุณภาพดีขึ้นแต่
งานมีขนาดชั้นที่ใหญ่และหนา จึงต้องไปดูส่วนอื่นๆที่เกี่ยวข้อง เช่น อุณหภูมิ การหล่อ หรือ การอบเบา
หรือ เรื่องของคุณภาพโลหะที่นำมาหล่อ



รูปที่ 4.10 ชิ้นงานที่ขัดแต่งแล้ว แบบที่ 2

ชั้นที่ 1 จากซ้าย เป็นผลจากการติดทางน้ำที่ไม่เหมาะสม

ชั้นที่ 2-3 กลางและชั้นขวา เป็นผลจากการติดทางน้ำที่เหมาะสม จะเห็นได้ว่า มีคุณภาพดีขึ้น แต่งานมีขนาดชั้นที่ใหญ่ และหนา จึงต้อง ไปดูส่วนอื่นๆที่เกี่ยวข้องเช่น อุณหภูมิ การหล่อ หรือ การอบ เบา หรือ เรื่องของคุณภาพโลหะที่นำมาหล่อ

แนวทางแก้ไขและข้อแนะนำ

- ควรแก้ไขทางน้ำโลหะ โดยปรับเปลี่ยนและขยายขนาดทางน้ำโลหะสำหรับชิ้นงานขนาดใหญ่

- ควรแก้ไขปรับเปลี่ยนขนาดของน้ำโลหะ จำนวนและตำแหน่งที่ติดทางน้ำให้เหมาะสมกับขนาดและรูปทรงของชิ้นงาน โดยอาศัยหลักการทางด้านโลหะวิทยา มาช่วยทำความเข้าใจ และพิจารณาถึงการเสริมทางน้ำว่าควรติดทางน้ำอย่างไร จึงจะมีผลต่อการขจัดเคมีการหดตัวของโลหะได้

- ควรติดทางเดินน้ำโลหะโดยอาศัยหลักการที่ว่า “ควรติดทางน้ำตรงส่วนที่หนาที่สุดของชิ้นงาน” เพราะชิ้นงานบริเวณข้างเคียงที่บางกว่าจะแข็งตัวเร็วกว่าบริเวณส่วนหนาและเมื่อบริเวณส่วนที่บางกว่าแข็งตัวจนหมดก็เสมือนเป็นตัวกันไม่ให้ น้ำโลหะจากก้านหรือจากทางเดินน้ำโลหะเข้าบริเวณส่วนหนาได้ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดรูพรุนหดตัวที่บริเวณส่วนหนานั้นเอง

- การปรับปรุงทางเดินน้ำโลหะสามารถแก้ไขที่แม่พิมพ์โลหะได้ โดยช่างพิมพ์จะเป็นผู้ออกแบบการติดทางน้ำก่อนที่จะไปอัดแม่พิมพ์ยาง โดยก้านทางน้ำที่เสริมเข้ามาควรเป็นก้านกลมทรงกระบอก เพื่อให้ น้ำโลหะไหลเข้าโพรงแบบได้ง่าย ซึ่งช่างพิมพ์จำเป็นต้องใช้เวลาในการฝึกฝนและสร้างความชำนาญเพราะรูปแบบของงานเครื่องประดับมีความหลากหลาย

- ต้นเทียนรูปทรงกระบอกปลายเรียว จะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการขจัดเคมีการหดตัวของน้ำโลหะขณะเย็นตัว ได้ดีกว่าต้นเทียนรูปทรงกระบอก

- ควรทำบันทึกการสั่งหล่อในแต่ละครั้ง โดยในบันทึกควรมีรายละเอียดเกี่ยวกับการหล่อให้ชัดเจน เช่น รูปแบบชิ้นงาน ชนิดของโลหะ อุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการหล่อรวมถึงอัตราส่วนปูนต่อน้ำ เพื่อช่วยควบคุมและใช้ตรวจสอบการผลิตในแต่ละขั้นตอนได้ นอกจากนี้แล้วยังสามารถช่วยหาปัจจัยที่เหมาะสมในการหล่อชิ้นงานแต่ละแบบ พร้อมทั้งสามารถวิเคราะห์หาสาเหตุหากเกิดปัญหาขึ้นในงานหล่อนั้นได้

4.3.2 รูพรุนตามดจากฟองก๊าซ

อาจมีสาเหตุจากปัญหาเทียนเดือด และเขม่าเทียนที่เกิดจากเทียนไหลออกหรือเผาเทียนออกไม่หมด การนำเทียนเก่ากลับมาใช้อีก ทำให้มีโอกาสที่น้ำเทียนออกจากแบบไม่หมดและกลายเป็นคราบเขม่าของคาร์บอน ซึ่งเมื่อเทน้ำโลหะหลอมเหลวเข้าไปในโพรงแบบ น้ำโลหะจะสัมผัสกับเขม่าคาร์บอน เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือคาร์บอนมอนอกไซด์ขึ้น ก๊าซที่เกิดขึ้นนี้ไม่สามารถไล่ออกจากกระบอกปูนได้ทัน จึงทำให้เกิดปัญหา รูพรุนจากฟองก๊าซตามมา โดยรูพรุนนี้จะมีลักษณะเป็นเม็ดกลมเหมือนฟองอากาศที่ค้างอยู่ในเนื้อโลหะ และมักเกิดเป็นเม็ดกลมเล็กๆ ทั่วผิวชิ้นงาน

แนวทางแก้ไขและข้อแนะนำ

- ควรนั่งเทียนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.30 - 2 ชั่วโมง เพื่อให้เทียนไหลออกก่อนจะนำกระบอกปูนเข้าเตาอบ แต่ไม่ควรนั่งเทียนนานเกินไปเพราะจะทำให้ไอน้ำที่ไปเกาะบนปูนและซึมเข้าผนังปูน หากปูนมีน้ำซึมเข้ามากเกินไปจะทำให้ปูนมีความแข็งแรงลดลง และกะเทาะหลุดออกได้ง่าย
- ไม่ควรนำเทียนเก่าใช้ซ้ำอีก เพราะเทียนที่ใช้แล้วมีคุณสมบัติลดลง และมีความหนืดเพิ่มมากขึ้น ทำให้เทียนที่หนืดละลายออกได้ยาก ในบางตำแหน่งจะเกิดเทียนติดได้ และมีโอกาสเกิดเป็นเขม่าคาร์บอนติดอยู่ เมื่อเหน้าโลหะเข้าโพรงแบบก็จะเกิดเป็นฟองก๊าซขึ้น
- ควรตรวจดูทางน้ำคูลให้เหมาะสม เพื่อให้เทียนไหลออกได้สะดวก ลดปัญหาเทียนตกค้างและเกิดเขม่าภายในผนังปูน อันเป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาครุฑจากฟองก๊าซ
- ควรหลีกเลี่ยงการติดทางน้ำ ที่มีแนวโน้มทำให้เกิดการดักจับอากาศจากการไหลวนของน้ำโลหะ ที่ไหลเข้าไปในโพรงแบบขณะหล่อ อันเป็นสาเหตุให้เกิดครุฑจากฟองก๊าซได้
- ไม่ควรนำกระบอกปูนเข้าอบในเตาจำนวนมากเกินไป เพราะจะทำให้เกิดอากาศในเตาไหลเวียนไม่ดี ไม่ถ่ายเท ซึ่งทำให้เขม่าเทียนไม่สามารถไล่ออกได้หมด เมื่อเหน้าโลหะไปสัมผัสกับเขม่าจะกลายเป็นก๊าซ ดังนั้นจึงควรวางกระบอกปูนให้อยู่ห่างจากผนังเตาประมาณ 1 นิ้ว และระยะห่างระหว่างกระบอกไม่ควรต่ำกว่า 0.5 นิ้ว

4.4 ปัญหาครุฑจากฟองอากาศ

4.4.1 ปัญหาครุฑจากฟองอากาศ สามารถเกิดจากปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1) รูเกิดจากฟองอากาศ

ในส่วนของตามดแบบฟองนั้นจะมีลักษณะที่ตรงกันข้ามกับตามดแบบหตุตัว คือ ลักษณะของตามดแบบฟองอากาศนั้นจะเป็นลักษณะกลมเหมือนฟองอากาศซึ่งสามารถเห็นได้จากบนผิวของชิ้นงาน ภาพตัดขวางของแท่งโลหะแสดงให้เห็นตามดแบบฟองอากาศอย่างชัดเจน ตามดแบบฟองอากาศหลัก ๆ แล้วจะเกิดจากที่โลหะดูดซับฟองอากาศเป็นจำนวนมากในระหว่างที่โลหะยังเป็นของเหลวอยู่ (ตารางด้านขวาแสดงให้เห็นถึงปริมาณของออกซิเจนในเนื้อโลหะก่อนที่จะละลายและหลังจากละลาย) ดังนั้น ถ้าเงินหลอมเหลวนั้นมีปริมาณก๊าซอยู่มากแล้วนั้น (ซึ่งเราจะกล่าวถึงเหตุผลต่อไป) ก๊าซหรืออากาศเหล่านี้จะพยายามที่จะออกมาจากเนื้อโลหะในระหว่างที่เกิดการเย็นตัวตกผลึกและแปรสภาพจากของเหลวกลายเป็นของแข็ง แต่ส่วนมากก๊าซหรืออากาศเหล่านี้จะถูกกักอยู่ในเนื้อโลหะนั่นเอง และสามารถพบได้หลังจากการขัดแต่งผิวงาน

- ความร้อนน้ำโลหะสูงเกินไป
- ระยะเวลาการอบปูนไม่เพียงพอ
- การไหลของอากาศในเตาอบปูนไม่เพียงพอ
- อุณหภูมิเตาสูงเกินไป

- การผสมเงินเก่าที่ผ่านการใช้งานแล้วหลายครั้ง
- ความร้อนน้ำโลหะสูงเกินไป

แนวทางแก้ไข

- ให้ทำการลดอุณหภูมิน้ำโลหะในการหล่อ เนื่องจากถ้าอุณหภูมิสูงจะใช้เวลาการเย็นตัวนานหลังจากที่เทลงเข้าปูน ซึ่งจะเสี่ยงต่อการเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิด GAS ดังนั้นควรทำการลดอุณหภูมิลง เพื่อที่จะให้ใช้ระยะเวลาการเย็นตัวเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งเร็วขึ้น

2) ระยะเวลาการอบปูนไม่เพียงพอ

แนวทางแก้ไข

- ให้เพิ่มระยะเวลาการอบปูน เนื่องจากอาจมีการหลงเหลืออยู่ของ Carbon ซึ่งมาจาก WAX ที่ตกค้างอยู่ เมื่อมีการเทน้ำโลหะจะเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิด GAS ซึ่ง GAS เหล่านี้จะทำให้ผิวชิ้นงานเป็นรูได้

3) การไหลของอากาศในเตาอบปูนไม่เพียงพอ

แนวทางแก้ไข

- เพิ่มการไหลของอากาศในเตาอบให้เพียงพอ ตรวจสอบรอยร้าวต่าง ๆ ที่จะส่งผลต่อระบบการไหลของอากาศในเตาอบและทำการแก้ไข อาจพบรอยวงกลมสีเหลืองหลงเหลืออยู่ทำตาอบหลังใช้งาน หรือกลิ่นคล้ายไข่น้ำ หรือคราบสีดำ ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะเกิดจากการทำปฏิกิริยาในเตาอบซึ่งมาจากการไหลเวียน ของอากาศไม่เพียงพอ

4) อุณหภูมิเตาสูงเกินไป

แนวทางแก้ไข :

- ลดอุณหภูมิเตาอบ (อุณหภูมิสุดท้ายก่อนออกจากเตาที่ต้องการลง เนื่องจากผลของการเกิดปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลเฟอโร (ปูนขาว) คือ กำมะถัน (ซิลเฟอโรไดออกไซด์) เมื่อเทน้ำโลหะเข้าสู่เตาอบจะเกิดซิลเฟอโรไดออกไซด์ (กำมะถัน) และเกิดการดูดซึมเข้าสู่ผิวงานซึ่งยังคงสภาพเป็นน้ำโลหะอยู่ทำให้เกิด GAS ดังนั้นต้องแก้ไขโดยการลดอุณหภูมิเตาลงเพื่อเร่งให้น้ำโลหะเย็นตัวเร็วขึ้น

5) การผสมเงินเก่าที่ผ่านการใช้งานแล้วหลายครั้ง

แนวทางแก้ไข :

- ให้ทำการ Refine เงินเก่า หรือผสมเนื้อเงินเก่าไม่เกิน 50% เนื่องจากเงินเก่าจะมีสิ่งที่ไม่บริสุทธิ์ปนอยู่ซึ่งส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาเกิด GAS ขึ้น

4.4.2 สาเหตุต่างๆ ที่ทำให้เกิดตามดแบบฟองอากาศ คือ

- 1) ใช้วัตถุดิบโลหะที่มีคุณภาพต่ำ เช่น มาสเตอร์อัลลอยด์ที่มีสิ่งสกปรกเจือปน หรือเงินบริสุทธิ์ ทองบริสุทธิ์ ที่มีสิ่งเจือปนหรือการใช้เศษต้นเก่า ที่มีการปนเปื้อนสิ่งสกปรก เป็นต้น
- 2) ปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดกับปูน เช่น อุณหภูมิที่สูงเกินไป การอบปูนที่ไม่สมบูรณ์หรือการใช้ปูนเก่าเก็บหมดอายุ เป็นต้น

3) การใช้อุณหภูมิในการหล่อที่ไม่มี การหล่อที่ไม่ถูกต้องไม่มีการควบคุมบรรยากาศในห้อง หลอม หรือการควบคุมไม่ดีพอ เป็นต้น

4.5 ปัญหาฟองอากาศในชิ้นงานเทียน

มักพบในชิ้นงานเทียนที่มีการต่อทางน้ำไม่เหมาะสม เช่น การวางทางน้ำผิดตำแหน่งและการใช้ ขนาดทางน้ำที่ไม่เหมาะสมกับขนาดชิ้นงาน อันเป็นสาเหตุให้เกิดการไหลวนของน้ำเทียนขณะฉีด เกิด การดักอากาศขึ้น ทำให้เกิดฟองอากาศในชิ้นงานเทียน นอกจากนี้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นยังอาจเกิดจาก การปรับความดันและอุณหภูมิของเครื่องฉีดเทียนสูงเกินไป หรืออาจเกิดจากการกรีดช่องทางไหลอากาศ ไม่เพียงพอ ทำให้อากาศที่ดันเข้าไปในแม่พิมพ์ยางไหลออกไม่ทันจึงเกิดฟองอากาศขึ้น รวมถึงการใช้ หัวฉีดเทียนที่ขนาดไม่พอดีกับช่องทางเข้าในแม่พิมพ์ยางทำให้อากาศสามารถไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ยาง ขณะฉีดเทียนได้

แนวทางแก้ไขและข้อมูลแนะนำ

- ควรสร้างระบบการวางทางน้ำที่เหมาะสม และสามารถตรวจสอบโดยช่างเทียนที่มี หน้าที่ติดทางน้ำ เช่น การทำใบงานสำหรับการตรวจสอบทางน้ำพร้อมกับถ่ายเอกสารหรือสเก็ตภาพเพื่อ บันทึกตัวอย่างทางน้ำที่ถูกต้องเพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขในครั้งต่อไป และลดปัญหาเนื่องจากการขาด บุคลากรที่ชำนาญการ

- ควรมีการให้ความรู้แก่ช่างเทียนในเรื่องของระบบทางเดินน้ำโลหะการปรับเปลี่ยน อุณหภูมิและความดันที่เหมาะสมของเครื่องฉีดเทียน

- ตรวจสอบปริมาณเทียนในเครื่องฉีดเทียน หากมีปริมาณน้อยเกินไปจะเป็นสาเหตุ ให้เกิดฟองอากาศได้

- ตรวจสอบหัวฉีดกับรูเทแม่พิมพ์ยางให้พอดีกัน หากไม่พอดีจะทำให้อากาศไหลเข้า ไปในแม่พิมพ์ยางขณะฉีดเทียนได้

- ควรมีการนำเครื่องฉีดเทียนที่มีประสิทธิภาพมาใช้ในการฉีดเทียน โดยเฉพาะงานที่ มีรูปแบบซับซ้อนและมักเกิดปัญหาขึ้นบ่อย ๆ

4.6 ปัญหาแตกร้าว

ปัญหาชิ้นงานเกิดการแตกหรือฉีกขาดขณะร้อน เกิดจากใช้ดินเทียนที่มีขนาดใหญ่เกินไป เช่น เส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 14 มิลลิเมตร โดยเป็นสาเหตุให้ก้านแหวนแตกซึ่งมักเกิดการใช้ก้านเดี่ยว เพราะสาเหตุเกิดจากการดึงกันในทิศทางตรงข้าม จึงเกิดการฉีกขาดจากความร้อนขึ้น การแตกร้าวใน ลักษณะนี้มีสาเหตุหลักมาจากดินเทียนที่มีขนาดใหญ่เกินไปทำให้เมื่อน้ำโลหะลงไปในเบ้าปูน ตรงส่วน ดันจะร้อนมากทำให้เกิดความแตกต่างของความร้อนระหว่างก้านและตัน เกิดการดึงกัน ทำให้ตรง รอยต่อก้านและแหวนเกิดการแตกร้าวขึ้น นอกจากสาเหตุดังกล่าวแล้วยังอาจเกิดจากการใช้อัลลอยที่มี ธาตุซิลิกอนผสมอยู่ ซึ่งมีสมบัติทำให้โลหะแตกและเปราะได้ง่าย

แนวทางแก้ไขและข้อแนะนำ

- สามารถแก้ไขได้โดยลดขนาดของต้นเทียนและก้านทางเดินน้ำลง ไม่ใช่ต้นเทียนและก้านทางเดินน้ำโลหะขนาดใหญ่เกินไป
- ไม่ควรติดก้านทางน้ำของชิ้นงานให้ใกล้กับต้นเทียนเกินไป เพราะความร้อนจะส่งผ่านไปยังชิ้นงานเทียน ทำให้ชิ้นงานเทียนแตกจากความร้อนได้
- ลงการใช้อัลลอยด์ที่ส่งผลให้เกิดการแตกเปราะ

ตัวอย่าง สำหรับ “การแตก หักจากความร้อน” ในเงิน (Ag) 925 ซึ่งปัญหาลักษณะที่เหมือนกันนี้สามารถพบได้ในการหล่อโลหะอื่นๆ ภาพตัดขวางโครงสร้างของโลหะแสดงให้เห็นถึงบริเวณ รอยแตก หัก ซึ่งพบแค่ตามดเพียงเล็กน้อย เมื่อเราดูที่ผิวของรอยแตกโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ตรวจสอบอย่างละเอียด เผยให้เห็นผิวงานเป็นรูปทรงผลึก กลมๆ ซึ่งพิสูจน์ให้เห็นว่า รอยแตก หัก เกิดขึ้นขณะที่โลหะบางส่วนยังเป็นของเหลวอยู่ มีแต่ของเหลวเท่านั้นที่จะสร้างรูปร่างทรงกลมบนผิวงาน เนื่องจากแรงตึงผิว รูปแบบลักษณะรอยแตกที่ผิวด้าน อย่างนี้เรียกว่า “การแตกจากความร้อน” บางทีก็เรียกว่า “การฉีกขาดจากความร้อน” การแตกหักเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาของแรงตึงกันระหว่างโลหะที่กำลังเย็นลงกับในบริเวณที่โลหะยังไม่แข็งสมบูรณ์เรียบริ้ว ทำให้เกิดการฉีกขาดหรือรอยแตกขึ้น ข้อควรจำ เบ้าปูนถูกเอาออกจากเครื่องหล่อหลังจากหล่อเรียบร้อยแล้ว 50 วินาที ในขณะที่ระยะเวลาการตกผลึกเย็นตัวของโลหะเงิน 925 สำหรับชิ้นงานรูปแบบเช่นนี้จะใช้เวลาประมาณ 90 วินาที ซึ่งอยู่กับอุณหภูมิการหล่อจริงๆ และอุณหภูมิเบ้าปูนที่ใช้ ดังนั้นตัวชิ้นงานบางส่วนยังคงเป็นของเหลวอยู่เป็นของเหลวอยู่เมื่อเบ้าปูนถูกเอาออกจากเครื่องหล่อ ซึ่งนี้อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแตกร้าวดังนั้น ประสบการณ์จากบริษัทผู้ผลิตทั้งหลายยืนยันว่า การแตก หักจากความร้อนสามารถหลีกเลี่ยงได้ ถ้าทำการควบคุมสภาพการทำให้เบ้าเย็นลงอย่างระมัดระวัง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบจากการใช้ระยะเวลาเวลานานที่ทำให้ของเหลวกลายเป็นของแข็งในโลหะเงิน 925 นี้การควบคุมระยะเวลาขั้นตอนต่างๆ ในการหล่อจะทำให้การหล่อมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นอย่างเห็นชัด นี้รวมถึงการเพิ่มระยะเวลาที่ปล่อยให้เบ้าเย็นลงในเครื่องหล่อหลังจากที่หล่อเสร็จแล้ว เพื่อที่ว่าให้เบ้าถูกเคลื่อนย้าย หรือกระบบทกระเทือนหลังจากที่โลหะกลายเป็นของแข็งแล้วเท่านั้น ควรหลีกเลี่ยงปฏิกิริยาของแรงตึงต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นกับโลหะโดยไม่จำเป็นระหว่างกำลังเย็นลง (ตัวอย่างเช่นการตอกเพื่อทำเครื่องหมายต่างลงบนตุ๊ดของต้นหล่อหลังจากที่หล่อเสร็จใหม่ๆ เป็นต้น) สุดท้ายระยะเวลาในการทิ้งเบ้าให้เย็นก่อนที่จะนำไปจุ่มลงในน้ำ จะต้องถูกควบคุมซึ่งจะขึ้นอยู่กับอัลลอยด์ที่ใช้ การจุ่มลงในน้ำเร็วเกินไปบ่อยครั้งจะก่อให้เกิดการแตก หัก ตัวอย่างเช่นการหล่อเงิน แนะนำว่าควรทิ้งเบ้าปูนหลังจากหล่อเสร็จไว้ในเครื่องหล่อประมาณ 4 นาทีแล้วจะสามารถจุ่มลงในน้ำได้ทันที

การหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาของแรงตึงหรือความเครียดต่างๆ บนโลหะโดยไม่จำเป็นหลังจากการหล่อจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในหลายๆ กรณี การแตก/หักจากความร้อนเกิดขึ้นโดยมีสาเหตุพื้นฐานเกิดการแรงตึงที่มาจากหดตัวของโลหะอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาความร้อนในขณะที่โลหะเริ่มตกผลึกเย็นตัว การลดลงเชิงปริมาตรระหว่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพจากของเหลวเป็นของแข็ง ขณะที่ในเวลา

เดียวกับปูนอาจจะมีหรือมีการหดตัวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และปูนอาจจะมีการขยายตัวอันเนื่องมาจากผิวปูนร้อนขึ้นหลังจากสัมผัสกับโลหะที่ร้อนมากกว่าสถานการณ์นี้จะเกิดขึ้นมากตรงจุดสัมผัสระหว่างทางน้ำกับชิ้นงานหล่อซึ่งจะเป็นบริเวณสุดท้ายที่ชิ้นงานจะแข็งตัว การแข็งและการหดตัวของโลหะ จะเริ่มจากกันทั้งด้านซ้ายกับด้านขวาของแหวนพร้อมๆ กัน และก่อให้เกิดปฏิกิริยาของแรงดึงผิวบนของเหลวที่กำลังจะเป็นของแข็ง

4.7 ปัญหางานหล่อไม่เต็ม

การแก้ปัญหางานหล่อไม่เต็ม ซึ่งมี 2 วิธีหลักๆ คือ เลือกใช้อัลลอยด์ที่เหมาะสม เลือกใช้รูปแบบทางน้ำที่เหมาะสม เช่นเดียวกับการเลือกใช้กระบวนการหล่อที่เหมาะสม

อิทธิพลของกระบวนการหล่อที่ส่งผลให้เกิดปัญหางานหล่อไม่เต็ม การเพิ่มอุณหภูมิและอุณหภูมิ น้ำโลหะช่วยให้หล่อได้เต็มมากขึ้น แต่ก็เพิ่มโอกาสที่จะพบกับปัญหาตามดแบบพองอากาศเช่นกัน การใช้แรงดันบรรยากาศต่ำๆ ในขณะที่หลอมโลหะ (แรงดันภายในห้องหลอมก่อนที่จะทำการหล่อ) หรือ กระทั่งระบบสุญญากาศที่สามารถช่วยเรื่องการหล่อให้เต็มได้ เช่นกันในขณะที่เราทำการเทน้ำโลหะนั้น เราสามารถใช้ประโยชน์จากฟังก์ชันการใช้งานของเครื่องหล่ออื่นๆ เช่น การใช้ Over Pressure ในขณะที่ทำการเทน้ำโลหะ (ปริมาณความดันและระยะเวลามีความสำคัญ) เช่นเดียวกับการใช้ระบบสันสะเทือน ในขณะที่เทน้ำโลหะ

การตั้งค่าในการหล่อ

1) ในกรณีที่คุณหล่องานที่มีขนาดปานกลางจนถึงขนาดใหญ่เราขอแนะนำให้ท่านหลอมและการหล่อโลหะ โดยใช้ก๊าซคลุมผิวโลหะในส่วนของห้องหล่อ แต่ในส่วนของเข้าปูนให้ใช้สุญญากาศ การตั้งค่าแบบนี้จะสามารถลดปริมาณตามดแบบพองอากาศได้มากที่สุด ถ้าอุณหภูมิเข้าต่ำการใช้ระบบสุญญากาศในห้องหล่ออาจส่งผลให้เกิดปัญหาการหล่อไม่เต็ม เนื่องจากก๊าซที่อาจหลงเหลืออยู่ในเข้าปูนขยายตัวเนื่องจากความร้อนเมื่อสัมผัสกับโลหะก่อให้เกิดปฏิกิริยาการดันกลับส่งผลต่อการไหลลื่นของโลหะ และมีปัญหาเรื่องการหล่อไม่เต็มได้ แต่สำหรับการหล่อชิ้นงานที่มีขนาดหนาและใหญ่จะไม่มีปัญหานี้

2) สำหรับการหล่อชิ้นงานที่มีขนาดบางและเบาหลายๆ เราแนะนำให้หลอมและหล่อโลหะภายใต้สภาวะสุญญากาศ เข้าปูนก็เป็นสุญญากาศเช่นกัน ทันทีหลังจากที่เราหล่องานและโลหะได้ไหลออกจากเข้าหล่อหมดแล้วนั้นให้ใช้โอเวอร์เพรสเชอร์ทันที การที่ก๊าซต่างๆ ถูกดูดออกหมดพร้อมกับการใช้โอเวอร์เพรสเชอร์ทำให้เราสามารถหล่องานที่มีความบางมากๆ ได้ข้อเสียของการหล่องานแบบนี้คืออาจมีปัญหตามดแบบพองอากาศได้เนื่องจากปฏิกิริยากับน้ำโลหะกับปูนเพราะว่าการใช้ระบบสุญญากาศแบบเต็มกำลังนั้นอาจทำให้ปูนเกิดปฏิกิริยาแตกตัวได้

4.8 ปัญหางานเป็นฝ้า

4.8.1 ปัญหาฝ้า

ปัญหาฝ้า เป็นอีกปัญหาหนึ่งที่เกิดจากสีที่ไม่เท่ากันที่พบในงานเงิน (ผสมเงินกับทองแดง) ปัญหานี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการใช้อัลลอยด์ที่สามารถต้านการเกิดฝ้าได้ซึ่งหาได้ง่ายจามท้องตลาด ซึ่งจะมีส่วนผสมของสังกะสี ซิลิคอน และอื่นๆ จากนั้นเราจะได้อธิบายถึงสาเหตุในการเกิดฝ้า และอธิบายว่ากระบวนการผลิตที่ดีก็สามารถช่วยให้หลีกเลี่ยงการเกิดฝ้าที่เกิดขึ้นในการหล่อเงินได้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม สำหรับงานที่มีการหล่อฝังในเทียน การเชื่อม การที่ชิ้นงานจะต้องมีการผ่านไฟในกระบวนการอื่นๆ หลังจากกระบวนการหล่อ การเตรียมการป้องกันการเกิดปัญหาฝ้าหรือการหมองนั้น สามารถทำได้โดยการใช้อัลลอยด์ที่ต่อต้านการเกิดฝ้าเท่านั้น

ปัญหาฝ้าที่เกิดขึ้นกับพื้นผิวชิ้นงานเป็นผลมาจากกระบวนการการทำปฏิกิริยาระหว่างเนื้อโลหะเงินกับอากาศในขณะที่หล่องาน เกิดจากการที่ทิ้งเบ้าให้เย็นหลังจากที่หล่ออย่างไรไม่ถูกต้อง ถ้าเนื้อน้ำโลหะเงินสัมผัสอากาศทั้งก่อนหรือหลังการตกผลึกเย็นตัว น้ำโลหะจะทำการดูดซับออกซิเจนเป็นจำนวนมาก และนี้อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างออกซิเจนที่ถูกดูดซับไปในน้ำโลหะกับทองแดงที่เป็นส่วนผสมในมาสเตอร์อัลลอยด์ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนสีขึ้นในบริเวณผิวงานจุด (เกิดเป็นสีเทาๆ) สิ่งนี้เป็นลักษณะชนิดหนึ่งที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันกล่าวที่ที่เกิดขึ้นจากบริเวณผิวชิ้นงานและกึ่งลึกลงไปภายใต้ผิวงาน เนื่องจากออกซิเจนได้แทรกซึมลงไปลึกมาก จึงไม่สามารถกำจัดออกไปได้ด้วยการขัด

การหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหานี้สามารถทำได้โดยกระบวนการที่เหมาะสม ตามที่ให้เห็นแต่มีช่างหล่ออีกจำนวนมากที่เลือกอีกวิธีหนึ่งซึ่งปลอดภัยที่สุดคือการใช้อัลลอยด์ที่ป้องกันการเกิดฝ้า อัลลอยด์ที่ใช้เหล่านั้นมีส่วนผสมอื่นๆ เช่น สังกะสี และซิลิคอน เป็นส่วนประกอบของมาสเตอร์อัลลอยด์ (นอกเหนือจากทองแดง) สิ่งที่จะเพิ่มลงไปเหล่านี้จะไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับทองแดง นั้นเป็นความสำเร็จในการหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหาฝ้าระหว่างหล่องานถ้ามีการปล่อยให้เบ้าเย็นโดยอากาศเป็นเวลานาน ทางด้านขวานี้เป็นภาพที่แสดงให้เห็นโดยโลหะวิทยา ซึ่งต้นหล่อที่ได้จะมีลักษณะขาวสว่างถึงแม้ว่ายังไม่ได้จุ่มกรดก็ตาม สำหรับงานหล่อฝังในเทียนนั้นผิวงานหลังจากที่หล่อมีความสำคัญมากเนื่องจากผิวงานบริเวณที่อยู่ใต้พลอยที่ฝังนั้นไม่สามารถที่จะขัดหรือแม้กระทั่งน้ำกรดก็ไม่สามารถซึมเข้าไปถึง ซึ่งถ้างานในบริเวณดังกล่าวหมองดำแล้วละก็จะส่งผลกระทบต่อสีของพลอยที่ฝังเช่นกัน

4.8.2 ปัญหาฝ้าดำ ฝ้าแดง ของทองแดงออกไซด์

ฝ้าดำ ฝ้าแดง มักพบในชิ้นงานโลหะเงินสเตอร์ลิง ซึ่งเกิดจากการหลอมเหลวและหล่อโลหะที่อุณหภูมิสูงเกินไป ทำให้ก๊าซออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำโลหะทำปฏิกิริยากับทองแดงที่อยู่ในเงินสเตอร์ลิง เกิดเป็นสารประกอบทองแดงออกไซด์ ซึ่งมีอยู่ 2 สถานะ คือ คิวปริกออกไซด์ที่มีสีน้ำตาลและคิวปริสออกไซด์ มีสีแดงชมพู โดยจะกระจายตัวอยู่บริเวณผิวหน้าของงานหล่อ ทำให้ผิวงานหล่อที่ได้ไม่สวยงาม หากทองแดงออกไซด์ดังกล่าวฝังลึกที่ผิวชิ้นงาน จะทำให้ไม่สามารถกำจัดออกไซด์ออกและขัดชิ้นงานให้เงาได้ หากใช้อุณหภูมิในการหลอมโลหะสูงเท่าไรก็เกิดปริมาณฝ้าดำฝ้าแดงมากขึ้น

เท่านั้น เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำโลหะจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิของน้ำโลหะ กล่าวคือ ถ้าออกซิเจนที่ละลายในน้ำโลหะจะมีปริมาณสูงขึ้นหากน้ำโลหะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการหลอมหล่อโลหะที่อุณหภูมิสูงขึ้นเกินไป เพราะจะทำให้เกิดปัญหาดังกล่าวขึ้นได้

แนวทางแก้ไขและข้อแนะนำ

- เพิ่มขนาดและตำแหน่งของทางน้ำให้เหมาะสมกับรูปแบบของชิ้นงาน
- ลดอุณหภูมิน้ำโลหะลง โดยชิ้นงานขนาดใหญ่และหนาควรหล่อที่อุณหภูมิต่ำกว่า

ชิ้นงานบาง



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาวิเคราะห์หัตถิทธิพลของธาตุเจือทองแดงและดีบุกที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือต่ำ 58.33 wt% AgCuSn ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์และทำการทดสอบเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 สรุป

ผลจากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพพบว่าเครื่องประดับโลหะเงินเจือต่ำ $58.33\text{Ag} + 41.16\text{Cu} + 0.51\text{Sn}$ มีค่าระดับสีดีที่สุดในและเป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ

ปัญหารูพรุนจากงานหล่อ ของเครื่องประดับโลหะเงินเจือต่ำ $58.33\text{Ag} + 41.16\text{Cu} + 0.51\text{Sn}$ ไม่พบรูพรุนในการหล่อที่อุณหภูมิ $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการหล่อได้งานที่มีคุณภาพดี โลหะมีสุดหลอมเดือดที่เหมาะสม ส่วนอุณหภูมิที่ $1,040\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะทำให้อุณหภูมิมีจุดหลอมละลายมาก ทำให้งานมีรอยแตกร้าวบางจุด ส่วนอุณหภูมิที่ $1,080\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นอุณหภูมิที่สูงมากเกินไป จึงทำให้ชิ้นงานมีรอยแตกมาก

ปัญหาการติดก้านทางเดินน้ำโลหะไม่เหมาะสมกับรูปแบบชิ้นงาน วิธีการสำคัญที่จะทำให้ได้งานหล่อที่มีคุณภาพดี คือ การติดทางเดินน้ำโลหะที่ถูกต้อง เหมาะสมกับรูปแบบของชิ้นงาน โดยควรมีการเสริมขนาดและปริมาณของทางน้ำให้เหมาะสมกับขนาดและรูปแบบของชิ้นงาน

รูพรุนตามที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มักเป็นรูพรุนในลักษณะนี้ โดยโลหะหดตัวในลักษณะกิ่งไม้หรือที่เรียกกันว่าการผุ นั้น มักจะเกิดขึ้นที่บริเวณส่วนหนาของชิ้นงาน

ตามดแบบพองนั้นจะมีลักษณะที่ตรงกันข้ามกับตามดแบบหดตัว คือ ลักษณะของตามดแบบพองอากาศนั้นจะเป็นลักษณะกลมเหมือนพองอากาศซึ่งสามารถเห็นได้จากบนผิวของชิ้นงาน ภาพตัดขวางของแท่งโลหะแสดงให้เห็นตามดแบบพองอากาศอย่างชัดเจน

ปัญหาพองอากาศในชิ้นงานเทียน มักพบในชิ้นงานเทียนที่มีการต่อทางน้ำไม่เหมาะสม เช่น การวางทางน้ำผิดตำแหน่งและการใช้ขนาดทางน้ำที่ไม่เหมาะสมกับขนาดชิ้นงาน อันเป็นสาเหตุให้เกิดการไหลวนของน้ำเทียนขณะฉีดเกิดการดักอากาศขึ้นทำให้เกิดพองอากาศในชิ้นงานเทียน

ปัญหางานหล่อไม่เต็มมีอิทธิพลของกระบวนการหล่อที่ส่งผลให้เกิดปัญหางานหล่อไม่เต็ม การเพิ่มอุณหภูมิและอุณหภูมิน้ำโลหะช่วยให้หล่อได้เต็มมากขึ้น แต่ก็เพิ่มโอกาสที่จะพบกับปัญหาตามดแบบพองอากาศเช่นกัน การใช้แรงดันบรรยากาศต่ำๆ

ปัญหาฝ้าที่เกิดขึ้นกับพื้นผิวนั้นเป็นผลมาจากกระบวนการการทำปฏิกิริยาระหว่างเนื้อโลหะเงินกับอากาศในขณะที่หล่องาน เกิดจากการที่ทิ้งเบ้าให้เย็นหลังจากที่หล่ออย่างไรไม่ถูกต้อง ถ้าเนื้อน้ำโลหะเงินสัมผัสอากาศทั้งก่อนหรือหลังการตกผลึกเย็นตัว น้ำโลหะจะทำการดูดซับออกซิเจนเป็นจำนวนมาก

และนี้อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างออกซิเจนที่ถูกดูดซับไปในน้ำโลหะกับทองแดงที่เป็นส่วนผสมในวัสดุอัลลอยด์

ผลจากการทดลองและวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติเชิงกายภาพและวิเคราะห์ปัญหาของชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการทดลองในสภาวะที่ดีที่สุดมีค่าที่เป็นไปตามมาตรฐานของเครื่องประดับเงินตามมาตรฐานอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับทั้งของในประเทศและต่างประเทศ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรทำการศึกษาธาตุเจืออื่นๆ ที่ทำหน้าที่เป็นส่วนผสมรองอีกหลายชนิดที่มีผลต่อสมบัติเชิงกายภาพ และระดับสีของโลหะเงินผสม 58.33% ที่ยังไม่ได้ทำการศึกษา ดังนั้นจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งที่ควรจะมีการศึกษาวิจัยอิทธิพลของโลหะผสมรองชนิดต่างๆ ที่สามารถเข้าไปในโลหะเงิน นอกเหนือจากทองแดง สังกะสี และดีบุก

5.2.2 อัตราส่วนผสมที่ใช้ อาจมีการเปลี่ยนแปลงมากหรือน้อยไปจากค่าที่กำหนด เพราะอัตราส่วนผสมของโลหะที่นำมาผสมนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการควบคุมคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของผลิตภัณฑ์เครื่องประดับเงิน



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 นิสาร์ตนพรและคณะ. 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.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [15] พรวสา วงศ์ปัญญา. 2551 “Physical Metallurgy II”. สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [16] M. ALENIUS, P. POHJANNE, M. SOMERVUORI, AND H. HANNINEN. 2007. “Exploring the Mechanical Properties of Spot Welded Dissimilar Joints for Stainless and Galvanized Steels”. Engineering Materials, Helsinki University of Technology. WELDING JOURNAL 305-313 –s.
- [17] Ranfeng Qiu, Shinobu Satonaka, and Chihiro Iwamoto. 2009. “Effect of interfacial reaction layer continuity on the tensile strength of resistance spot welded joints between aluminum alloy and steels”. Materials and Design 30 (2009) 3686-3689.

