



## รายงานผลการวิจัย

การศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมการอบชุบด้วยกระบวนการทางความร้อน  
ของโลหะเงินเจือต่ำ 58.33 wt% AgCuSn

A study and analysis heat treatment process behavior  
of low silver alloys 58.33 wt% AgCuSn

ผศ. ดร. วิหาร ดีปัญญา

นางสาวนวรรตน์ การะเกษ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณปี พ.ศ. 2557

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

โครงการวิจัย : การศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมการอบชุบด้วยกระบวนการทางความร้อนของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33 wt% AgCuSn  
ผู้วิจัย : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิหาร ดีปัญญา  
ผู้วิจัยร่วม : นางสาวนวรรตน์ การะเกษ

### บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการอบชุบด้วยกระบวนการทางความร้อนของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.45wt%Ag +41.55wt%Cu โดยทำการเปรียบเทียบกับสมบัติของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33% เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในทางการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือตะกั่วที่เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์

ผลจากการศึกษาโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33 % ที่อัตราส่วนผสม 58.33Ag+36.66Cu+5.01Sn ซึ่งมีค่าคุณสมบัติเชิงกลจากการทดสอบเบื้องต้นมีค่าเหมาะสมที่สุด จากนั้นทำการศึกษาค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดแบบเส้นลวดพบว่ามีความต้านทานแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 0.36 MPa, ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว 0.11% เมื่อทำการอบที่อุณหภูมิ 650 °C เวลาในการอบ 10 นาที ซึ่งปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศที่อุณหภูมิห้องปกติ และค่าความแข็งจากการทดสอบมีค่าสูงสุดเท่ากับ 105.12 HV อบที่อุณหภูมิ 600 °C เวลาในการอบ 10 นาที ซึ่งปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศที่อุณหภูมิห้องปกติ ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33Ag+41.57Cu+0.10Sn เมื่อทำการอบปรับปรุงคุณสมบัติทางความร้อนและการชุบแข็งแบบต่างๆ พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบหลังปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ เกิดการเปลี่ยนแปลงจาก  $\beta$  phase ที่มีขนาดเล็กกลเป็นโครงสร้าง Eutectic phase ที่มี  $\alpha$  -phase และ  $\beta$  -phase ขนาดเล็กและละเอียด ซึ่งมีลักษณะสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคของเฟสไดอะแกรมสมดุโลหะเงิน-ทองแดง

ผลจากการทดลองและวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบและโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการทดลองในสภาวะต่างๆ มีค่าที่เป็นไปตามมาตรฐานของเครื่องประดับเงินตามมาตรฐานอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับ ทั้งของในประเทศและต่างประเทศ

**คำสำคัญ :** โลหะเงินสเตอร์ลิง โลหะเงินเจือ ค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความแข็ง ทองแดง-ดีบุก

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่องนี้สำเร็จล่วงด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่าน คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนการทำงานวิจัยของอาจารย์ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครมาตั้งแต่เริ่มต้น ทำนี้คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ได้ให้ทุนสนับสนุน จนกระทั่งงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จล่วงลงได้ด้วยดี

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 การดำเนินการหลอมผสมโลหะและหล่อขึ้นรูปขึ้นทดสอบโลหะเงินผสม 58.33% สำหรับการวิเคราะห์ทดสอบต่างๆ	45
3.5 การดำเนินการศึกษาและวิเคราะห์ชิ้นงานทดสอบโลหะเงินผสม 58.33%	52
3.6 การวิเคราะห์และประเมินผลการทดลอง	56

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงดึง	58
4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็ง	63
4.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	64
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผล	71
5.2 ข้อเสนอแนะ	71
บรรณานุกรม	72



## 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
3.2 อัตราการผสมของชิ้นทดสอบโลหะเงินเจือต่ำ 58.33%	45
3.3 ขนาดของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 8M-99	52
3.4 ส่วนผสมของกรดใช้สำหรับกัดชิ้นงานทดสอบโครงสร้างจุลภาค	55
4.1 ค่าคุณสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิง 925 (Ag+Cu) และโลหะเงินเจือต่ำ (Ag+Cu, Ag+Cu+Sn)	57
4.2 ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่สภาวะการเย็นตัวแตกต่างกัน	58
4.3 ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่สภาวะการเย็นตัวแตกต่างกัน	63

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	แผนภาพสมดุลโลหะเงิน-ทองแดง	9
2.2	ปริมาณธาตุเจือชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อความแข็งของโลหะเงิน	13
2.3	ลักษณะห้วงคดและรอยกุดของการทดสอบความแข็ง Vickers	15
2.4	รูปร่างของตัวอย่างทดสอบแบบแท่งกลม	17
2.5	ลักษณะต่างๆ ของตัวอย่างทดสอบที่ไม่ควรนำมาใช้ในการทดสอบหาคณสมบัติของวัสดุ	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 ตามปริมาณคาร์บอน ในเหล็กกล้าคาร์บอน	35
2.25	โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่กำลังขยาย 2500 เท่า	36
2.26	เหล็กกล้าคาร์บอน 1 เปอร์เซ็นต์ผ่านการชุบแข็งในน้ำ ประกอบด้วยโครงสร้าง ออสเทนไนท์เหลือค้าง และมาร์เทนไซต์ที่มีรูปร่างคล้ายเข็มคุณสมบัติที่สำคัญหลายประการสำหรับการเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์	36
2.27	ปริมาณมาร์เทนไซต์ที่เกิดในระหว่างการเย็นตัว เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ	37
2.28	อิทธิพลของคาร์บอนที่มีต่อช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงเป็นมาร์เทนไซต์	39
2.29	ผลของธาตุคาร์บอนต่อความแข็งของโครงสร้างออสเทนไนท์ และมาร์เทนไซต์	39
3.1	แผนภาพการไหลกระบวนการทำโครงการ	42
3.2	เครื่องหลอมผสมเทเม็ตโลหะ Indutherm รุ่น VC 600	44
3.3	ลักษณะของเม็ตโลหะมาสเตอร์อัลลอย 58.45Ag+41.55Cu หลังจากผ่านการ เทหยดเม็ต	45
3.4	โพรงแบบซิลิโคลนสำหรับการฉีดขึ้นรูปตัวแบบเทียนสำหรับทดสอบความต้าน แรงดึง	46
3.5	ขนาดของตัวแบบเทียนขึ้นทดสอบสำหรับทดสอบความแข็งและศึกษาโครงสร้าง จุลภาค	47
3.6	การติดตั้งเทียนสำหรับหล่อขึ้นรูปขึ้นทดสอบสำหรับการทดสอบความต้านแรง ดึงความแข็งและศึกษาโครงสร้างจุลภาค	47
3.7	เครื่องหล่อดูดสุญญากาศยี่ห้อ Yasui รุ่น K2	48
3.8	ขั้นตอนกระบวนการหล่อหลอมขึ้นงานทดสอบของโลหะเงินเจือต่ำ	49
3.9	ลักษณะขึ้นทดสอบที่ได้จากการหล่อขึ้นรูป	50
3.10	การดึงเส้นลวด	50
3.11	ลักษณะของเส้นลวดและขึ้นงานทดสอบ	51
3.12	เตาอบขึ้นงานทดสอบ	51
3.13	ลักษณะของขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 8M-99	52
3.14	เครื่องทดสอบแรงดึง	53
3.15	ลักษณะการจับขึ้นทดสอบที่สภาพต่างๆ	53

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.16 เครื่องทดสอบความแข็ง (Micro Hardness Testing Machine)	54
3.17 ตำแหน่งการทดสอบความแข็ง	54
3.18 ลักษณะของชิ้นงานทดสอบแรงกด	56
3.19 อุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์	56
4.1 กราฟค่าความต้านทานแรงดึงที่อุณหภูมิ 600 °C เย็นตัวในเตา	59
4.2 กราฟค่าความต้านทานแรงดึงที่อุณหภูมิ 600 °C เย็นตัวในอากาศ	59
4.3 กราฟค่าความต้านทานแรงดึงที่อุณหภูมิ 650 °C เย็นตัวในเตา	60
4.4 กราฟค่าความต้านทานแรงดึงที่อุณหภูมิ 650 °C เย็นตัวในอากาศ	60
4.5 กราฟค่าความต้านทานแรงดึงที่อุณหภูมิ 700 °C เย็นตัวในเตา	61
4.6 กราฟค่าความต้านทานแรงดึงที่อุณหภูมิ 700 °C เย็นตัวในอากาศ	61
4.7 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบเย็นตัวในเตาที่อุณหภูมิและเวลาที่ต่างกัน	62
4.8 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบเย็นตัวในอากาศที่อุณหภูมิและเวลาที่ต่างกัน	62
4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบเมื่อเย็นตัวที่สภาวะต่างๆ	64
4.10 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงิน 93.71Ag + 6.30Cu	65
4.11 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือดำ 58.45Ag + 41.55Cu	65
4.12 แผนภาพสมดุลโลหะเงิน-ทองแดง	65
4.13 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือดำที่ส่วนผสมต่างๆ	66
4.14 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบหลังการอบที่เย็นตัวในเตา	67
4.15 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบหลังการอบที่เย็นตัวในอากาศ	68
4.16 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบหลังการอบที่เย็นตัวในน้ำ	69

# 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 นอกจากนี้โครงการสนับสนุนการพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับดังกล่าวข้างต้น

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) การศึกษาวิจัยและพัฒนาด้านวัสดุขั้นนี้ควรที่จะมีการศึกษาวิจัยเพื่อผลิตอัลลอยขึ้นมาใช้เองภายในประเทศและทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ โดยเริ่มทำการศึกษาวิจัยอิทธิพลของธาตุเจือต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของโลหะมีค่า (สมบัติทางกล ความต้านทานการหมอง การปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนและสมบัติทางด้านการหล่อขึ้นรูป)

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

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

4. ปัญหาด้านการขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับด้วยวิธีการทางกล กล่าวคือ การขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับด้วยวิธีการทางกลนั้น เป็นเทคนิคการขึ้นรูปที่สามารถผลิตชิ้นงานได้อย่างรวดเร็วและผลิตได้ในปริมาณมากๆ ในลักษณะของ Mass Product ช่วยให้สามารถลดต้นทุนการผลิตให้ต่ำลง แต่สภาพความเป็นจริงที่เกิดขึ้นในภาคอุตสาหกรรมเกิดจากขาดแคลนบุคลากร 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 และนอกจากนี้การดำเนินการของชุดโครงการวิจัยนี้ยังมีประโยชน์สำหรับการพัฒนาการเรียนการสอนในรูปแบบของการบูรณาการเรียนการสอนร่วมกับการวิจัยในรายวิชาที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ โลหะวิทยาโลหะมีค่า งานหล่อขึ้นรูปและกระบวนการผลิตเครื่องประดับที่ทางมหาวิทยาลัยได้มีการจัดการเรียนการสอนในสาขาวิชาเทคโนโลยีแม่พิมพ์เครื่องประดับ ซึ่งดำเนินการมากกว่า 16 ปี ให้สามารถพัฒนาไปสู่ความเป็นศูนย์วิจัยที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีวัสดุและการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ เพื่อเป็นศูนย์กลางสำหรับการศึกษาวิจัยพัฒนาองค์ความรู้และถ่ายทอดเทคโนโลยีจากการศึกษาวิจัยทางด้านวัสดุและการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับเผยแพร่สู่ภาคการผลิต ที่สามารถรองรับการพัฒนาอุตสาหกรรมสาขานี้ของประเทศ สอดคล้องกับนโยบายต่างๆ ของรัฐบาลที่ต้องการส่งเสริมให้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางการผลิตและการค้าสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับแห่งหนึ่งของโลก

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อการศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมการอบชุบด้วยกระบวนการทางความร้อนของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33 wt% AgCuSn

1.2.2 เพื่อพัฒนากระบวนการปรับปรุงสมบัติของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33 wt% AgCuSn ด้วยกระบวนการทางความร้อน

1.2.3 เพื่อพัฒนาศักยภาพในการผลิตของผู้ประกอบการภายในประเทศ

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

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

1.3.2 ศึกษาวิเคราะห์ทดสอบพฤติกรรมกรรมการอบชุบด้วยกระบวนการทางความร้อนของโลหะเงินเจือต่ำ 58.33 wt% AgCuSn, โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล

1.3.3 การถ่ายทอดเทคโนโลยีขององค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษาวิจัยไปสู่ภาคอุตสาหกรรมการผลิต

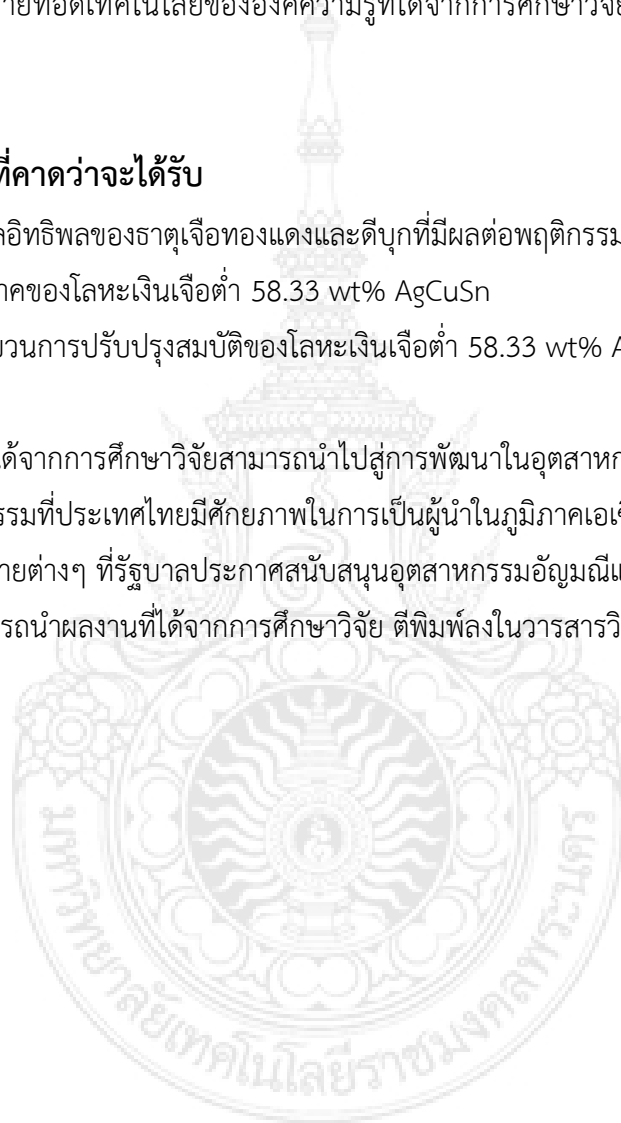
### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ข้อมูลอิทธิพลของธาตุเจือทองแดงและดีบุกที่มีผลต่อพฤติกรรมกรรมการอบชุบทางความร้อนและโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือต่ำ 58.33 wt% AgCuSn

1.4.2 กระบวนการปรับปรุงสมบัติของโลหะเงินเจือต่ำ 58.33 wt% AgCuSn ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน

1.4.3 ผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยสามารถนำไปสู่การพัฒนาในอุตสาหกรรมและเครื่องประดับ ซึ่งถือว่าเป็นอุตสาหกรรมที่ประเทศไทยมีศักยภาพในการเป็นผู้นำในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และสอดคล้องกับนโยบายต่างๆ ที่รัฐบาลประกาศสนับสนุนอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ

1.4.4 สามารถนำผลงานที่ได้จากการศึกษาวิจัย ตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการและนำเสนอในที่ประชุมวิชาการ



## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การศึกษารวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติของโลหะเงิน และโลหะเงินสเตอร์ลิง [2]

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

#### ตารางที่ 2.1 ปริมาณธาตุโลหะมีค่าเจือที่ค่ามาตรฐานต่างๆ [3]

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

#### 2.1.1 โลหะเงินบริสุทธิ์

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

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

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

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

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

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

**ตารางที่ 2.3** ความหนาแน่นของโลหะเงินหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ [3]

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

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

**ตารางที่ 2.4** ปริมาณสารเจือปนในโลหะเงินบริสุทธิ์ตามมาตรฐาน ASTM [3]

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

จากการทดลองนำโลหะเงินบริสุทธิ์ 99.97% มาทำการขึ้นรูปเย็นที่อัตราการขึ้นรูปต่างๆ กัน พบว่าความต้านทานแรงดึง อัตราการยืดตัวและความแข็งมีการเปลี่ยนแปลงดังตารางที่ 2.5

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

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

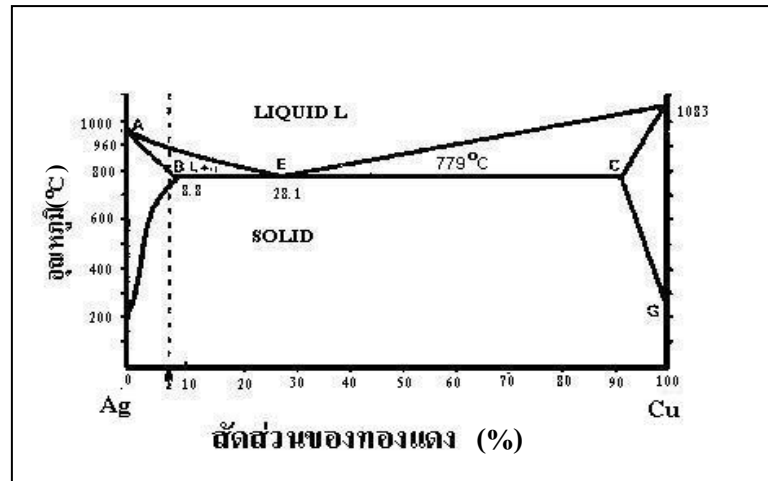
ค. คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Property) เงินละลายได้ดีในกรดไนตริก (Nitric Acid) เกิดเป็นอาร์เจนตริกไนเตรต (Argentum Nitrate) หรือที่ทราบกันทั่วไปคือลูนาเรอคาสติก (Lunar Caustic) ส่วนกรดซัลฟูริก (Sulphuric Acid) เข้มข้นที่ร้อนละลายเงินได้อย่างช้าๆ เป็นเงินอาร์เจนตริกซัลเฟต (Argentum Sulphate) กับให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์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

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

การตกตะกอนของเงิน กรดไฮโดรคลอริกและคลอไรด์ทำให้เงินคลอไรด์ตกตะกอนเป็นสีขาวขุ่น ซึ่งถ้าให้ความร้อนและคนให้ทั่ว สารละลายจะมีลักษณะเป็นขุยและตกตะกอนอย่างรวดเร็ว เมื่อถูกกับแสง ตะกอนจะมีสีเทาอมน้ำเงินและค่อยๆ เป็นสีม่วง จนในที่สุดจะเป็นสีน้ำตาลหรือสีดำ

### 2.1.2 โลหะวิทยาโลหะเงินสเตอร์ลิง

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



รูปที่ 2.1 แผนภาพสมดุลโลหะเงิน-ทองแดง [4]

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

### 2.1.3 มาตรฐานผลิตภัณฑ์เครื่องเงิน

สินค้าอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของไทยที่ทำจากโลหะเงินสเตอร์ลิง เป็น ผลผลิตที่เกิดจากงานช่างฝีมือทางด้านศิลปหัตถกรรมที่แสดงถึง วัฒนธรรมของชนชาติไทยโดยเฉพาะ จึงเป็นสินค้าที่รู้จักกันแพร่หลาย และเป็นที่ยอมรับของชาว ต่างประเทศทั่วโลก นับได้ว่าเป็นการเผยแพร่

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

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ว่าด้วยข้อกำหนดเกี่ยวกับชนิดและคุณลักษณะที่ต้องการของเครื่องเงินรวมทั้งวิธีทดสอบเครื่องเงินและยาถมเพื่อหาปริมาณโลหะเงินบริสุทธิ์ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้ [2]

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

## 2.2 ลักษณะทั่วไปของเงินเจือประเภทต่างๆ [4]

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

เมื่อเพิ่มความแข็งจาก 50HB จนเกินกว่า 100 HB ด้วยการชุบแข็ง เป็นไปได้ว่าเกือบจะไม่มีการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมขนาดเล็กมากนัก

Ag925 โดยทั่วไปจะเรียกว่า เงินสเตอร์ลิง ซึ่งเป็นที่รู้จักกันมากถึงคุณภาพเหมือนกับ Ag950 มีลักษณะเหมือนกับเงินบริสุทธิ์ นิยมจะใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ มีความต้านทานการเกิดออกซิเดชันสูง โลหะผสมชนิดนี้ใช้ในงานเกี่ยวข้องกับชุบเคลือบผิวได้ดีเท่ากับ Ag950 อัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกันจะให้ได้คุณสมบัติที่แตกต่างกันตามความต้องการ

1. การอบเหนียวที่ 650 °C เย็นตัวเร็วจะเกิดการแตกหักด้วยอัตราการยืดตัว 42%

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

Ag835 ปกติจะใช้ในการทำเครื่องประดับ แต่ลักษณะสีของ Ag835 จะไม่ขาว สะอาดเหมือนกับเงินบริสุทธิ์มากนัก การใช้งานสามารถรู้สึกลงถึงความต้านทานการสึกหรอที่มากขึ้น

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

ตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติของเงินเจือประเภทต่าง ๆ [4]

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

### 2.3 อิทธิพลของธาตุเจือในโลหะเงิน [4]

ธาตุเจือที่ผสมเข้าไปในโลหะเงินทำให้คุณสมบัติทางกลต่าง ๆ ของโลหะเงินเปลี่ยนแปลงไป ธาตุมีอยู่หลายธาตุด้วยกันที่มีอิทธิพลต่อโลหะเงิน ดังตัวอย่างที่จะกล่าวต่อไปนี้

นิกเกิล (Ni) สามารถจะผสมลงไปในอัสลอยเงิน-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]

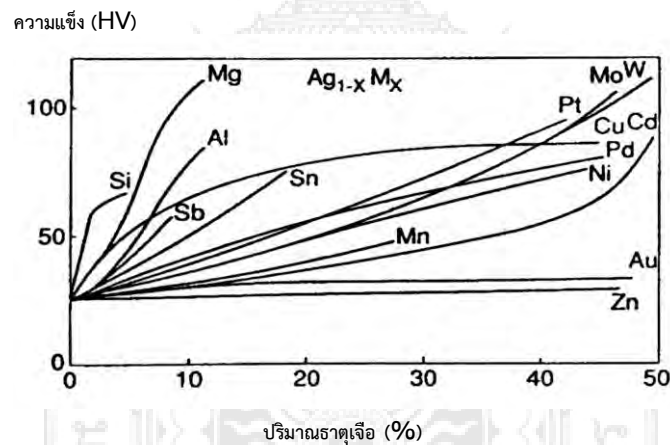
ฟอสฟอรัส(P) ที่มีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็พอที่จะทำให้อัลลอยเปราะได้ โดยอัลลอยจะมีส่วนประกอบ  $AgP_2$  หรือ  $Cu_3P$  ซึ่งจะมีตะกอนที่ขอบเกรน จึงทำให้อัลลอยเปราะ เกิดออกซิเดชันเกิดขึ้นเร็วขึ้น ฟอสฟอรัสสามารถจะทำให้จุดหลอมเหลวลดลง สำหรับ ทองแดง - ฟอสฟอรัส ถ้าการดูดเอาออกซิเจนออกไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดทองแดงออกไซด์ [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 หรือมากกว่านั้นผสมเข้าไปด้วยเพื่อหวังผลทางด้าน การไหลตัวเข้าโพรงแบบได้ดี 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 การสึกหรอและความต้านทานการขีดสี 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

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

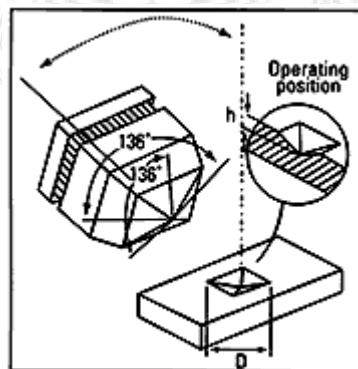
$$\text{พื้นที่รอยกด} = \frac{d^2}{2 \sin(136^\circ/2)} \text{ ซึ่งจะมีค่าโดยประมาณ} = \frac{d^2}{1.8544}$$

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

จากความแข็ง Vickers = แรงกด/พื้นที่รอยกด

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

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



รูปที่ 2.3 ลักษณะหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็ง Vickers [6]

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

## 2.6 การทดสอบแรงดึง (tension test) [7]

การทดสอบแรงดึงและแรงกดอัดแบบสถิตย์ (static) เป็นการทดสอบที่ง่ายที่สุดและถูกใช้อย่าง กว้างขวางที่สุดในการทดสอบหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ซึ่งคุณสมบัติทางกลของวัสดุภายใต้แรงดึงที่ เราสนใจได้แก่

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

การที่จะเลือกว่าการทดสอบแรงดึงหรือการทดสอบแรงกดอัดอย่างไรมีความเหมาะสม มากกว่ากันนั้น เราจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่อไปนี้

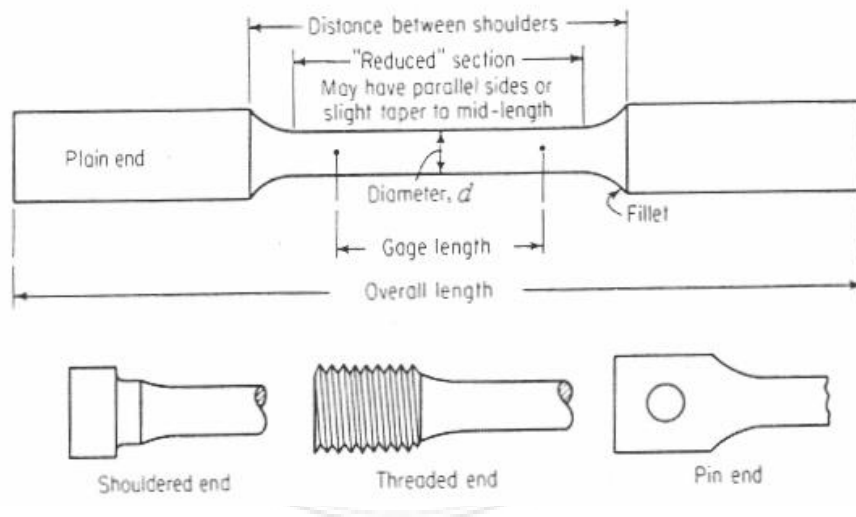
1. ความเหมาะสมของวัสดุที่เรากำลังจะทดสอบ เช่น โลหะมักจะถูกนำมาใช้ในโครงสร้างเพื่อ รับแรงดึง เพราะมีกำลังรับแรงดึงที่สูง ดังนั้น โดยส่วนใหญ่โลหะจะถูกทดสอบแรงดึง แต่ในวัสดุ เปราะบางประเภท เช่น คอนกรีตและอิฐ เป็นต้น จะมีกำลังรับแรงดึงที่ต่ำเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงกด อัด ดังนั้น วัสดุเหล่านี้จึงถูกนำไปใช้ในการรับแรงกดอัด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

2. ความแตกต่างของคุณสมบัติของวัสดุภายใต้แรงดึงและแรงกดอัด เช่น ไม้เป็นวัสดุที่มีกำลังรับแรงดึงที่ค่อนข้างสูง แต่ไม่สามารถนำมาใช้ในโครงสร้างรับแรงดึงได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากไม้มีกำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำ ทำให้เกิดการวิบัติที่จุดเชื่อมต่อได้ง่าย ดังนั้น การทดสอบแรงกดอัดของไม้จึงได้รับความนิยมมากกว่าการทดสอบแรงดึง

3. ความยากและความซับซ้อนในการจับยึดตัวอย่างทดสอบ

#### ตัวอย่างทดสอบ

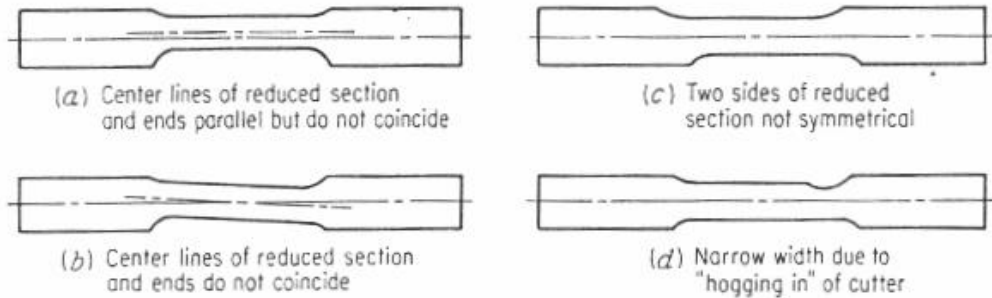
ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงอาจจะมีหน้าตัดทรงกลม สี่เหลี่ยมด้านเท่า หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าก็ได้ ถ้าแผ่นเหล็กมีความหนาพอที่จะทำการกลึงให้เป็นหน้าตัดทรงกลมได้ ( $>10$  mm) ตัวอย่างทดสอบในรูปของแท่งกลมก็จะถูกนำมาใช้ทดสอบ แต่หากว่าแผ่นเหล็กนั้นบางมากจนไม่สามารถนำมากลึงได้แล้ว เราก็จะใช้ตัวอย่างทดสอบที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า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



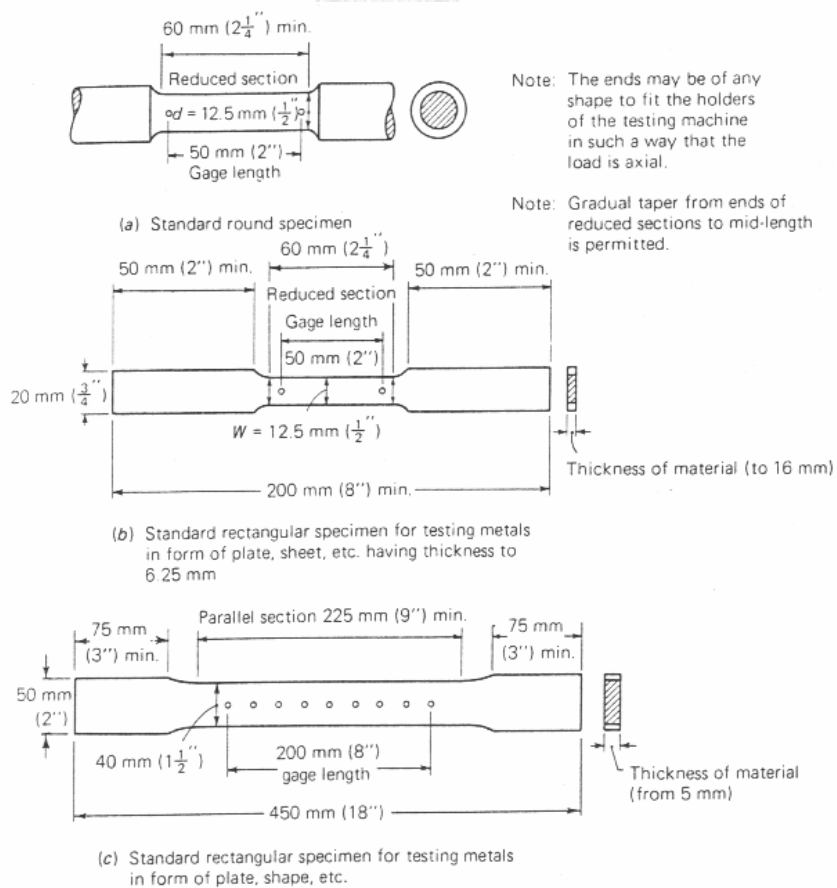
รูปที่ 2.4 รูปร่างของตัวอย่างทดสอบแบบแท่งกลม [7]

รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะต่างๆ ของตัวอย่างทดสอบที่ไม่ควรนำมาใช้ในการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุ เนื่องจากตัวอย่างทดสอบไม่มีความสมบูรณ์ ซึ่งจะทำให้ผลการทดสอบที่ได้คลาดเคลื่อนจาก

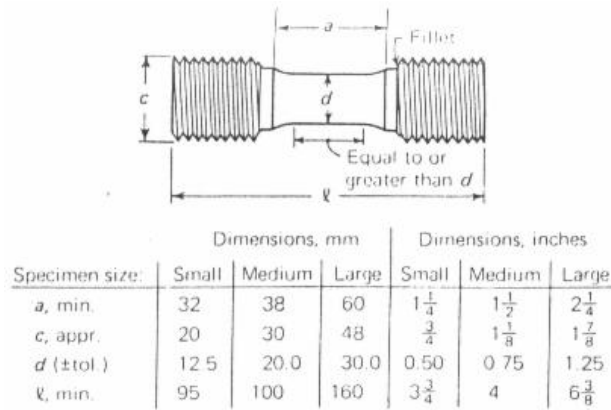
ความเป็นจริงตัวอย่างทดสอบมาตรฐานของเหล็กเหนียวและเหล็กหล่อได้ถูกกำหนดไว้ใน ASTM E8 ดังที่แสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ



รูปที่ 2.5 ลักษณะต่างๆ ของตัวอย่างทดสอบที่ไม่ควรนำมาใช้ในการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุ [7]



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างทดสอบมาตรฐานของเหล็กเหนียวตามมาตรฐาน ASTM E8 [7]



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างทดสอบมาตรฐานของเหล็กหล่อตามมาตรฐาน ASTM E8 [7]

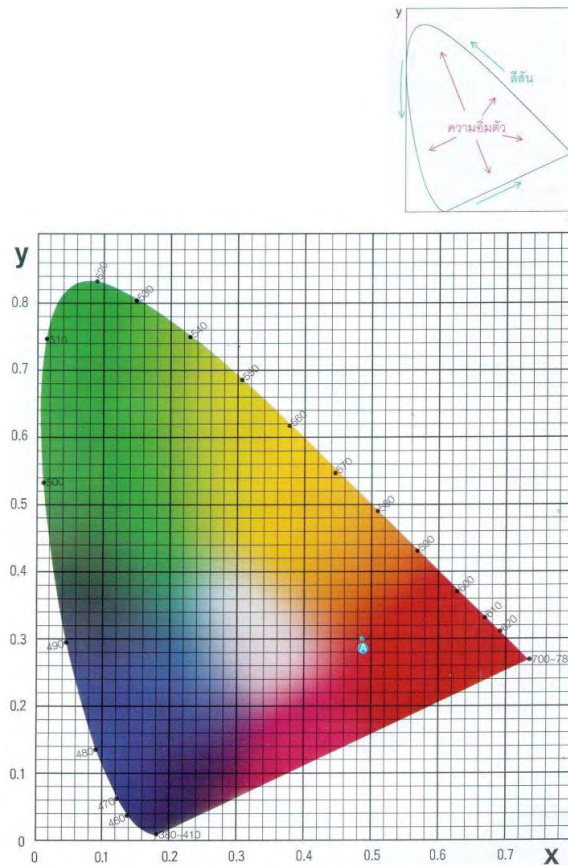
อีกรูปแบบหนึ่งของการทดสอบแรงดึงของวัสดุที่เรามักพบคือ การหากล้างรับแรงดึงของคอนกรีตซึ่งจะทำได้โดยการทำให้ splitting tensile test ตามมาตรฐานของ ASTM C496 โดยที่ตัวอย่างทดสอบจะเป็นรูปทรงกระบอกขนาด 150x300 mm และจะถูกกระทำโดยแรงกดอัด ดังที่แสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งแรงกดอัดนี้จะทำให้เกิด arch action ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดึงในแนวราบและจะทำให้เกิดการแตกร้าวในแนวตั้งในแนวตั้ง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

## 2.7 ทฤษฎีเทคนิคและวิธีการวัดทดสอบระดับสีตามมาตรฐานการทดสอบ CIELAB [8]

เทคนิค และวิธีการวัดทดสอบระดับสี ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นรายละเอียดเกี่ยวกับทฤษฎีการวัดสีระบบของการวัดสีและการสื่อความหมายของสี เพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับสื่อสารสีที่มองเห็น

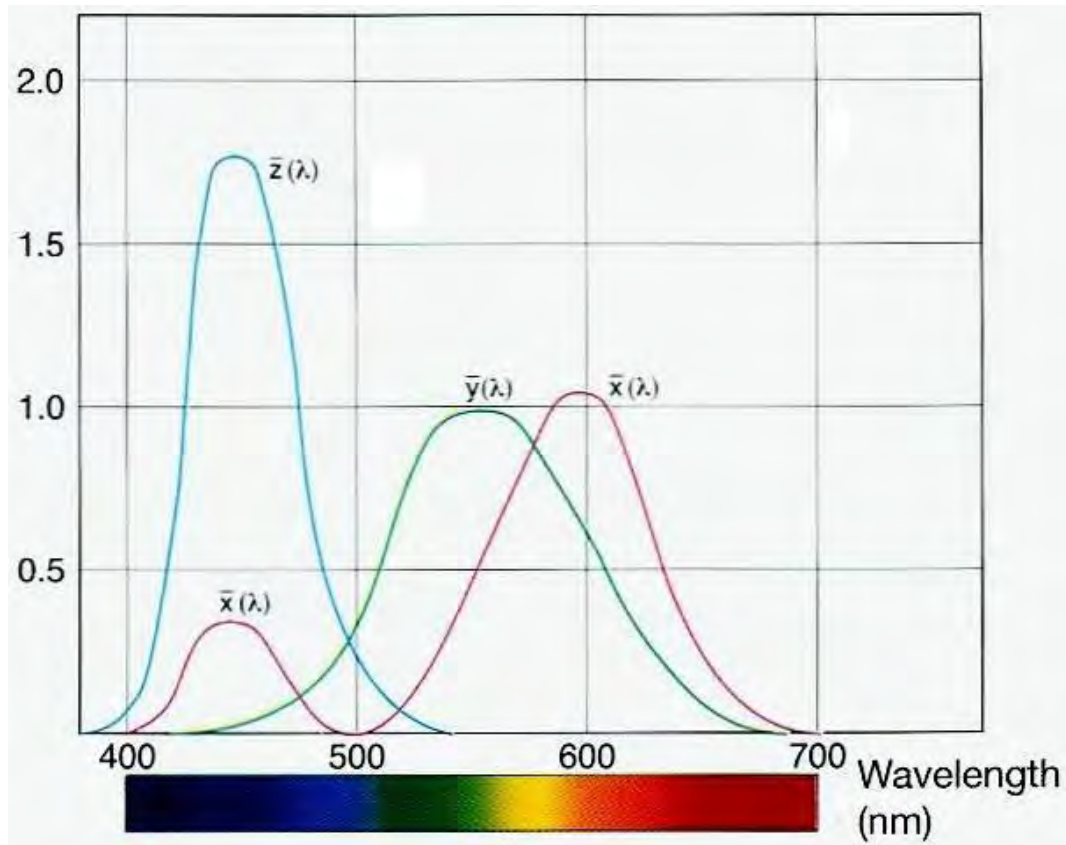
### 2.7.1 ทฤษฎีการมองเห็นสีและการวัดสี [8]

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



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

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

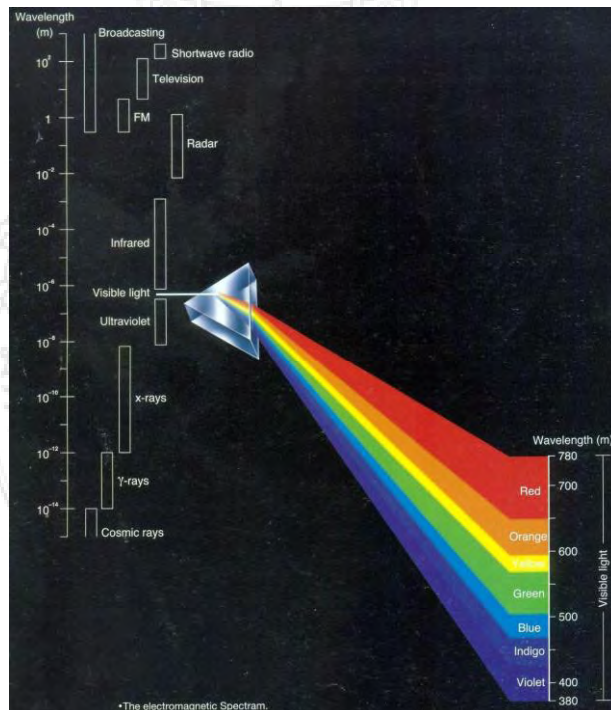


รูปที่ 2.9 ความไวแสงของตามนุษย์ (Color-matching function) [8]

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



รูปที่ 2.10 ภาพสีรุ้งของรังสีน้ำที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ที่เกิดจากแสงอาทิตย์ทะลุผ่านหยดน้ำ ซึ่งทำหน้าที่เป็นปริซึม [8]

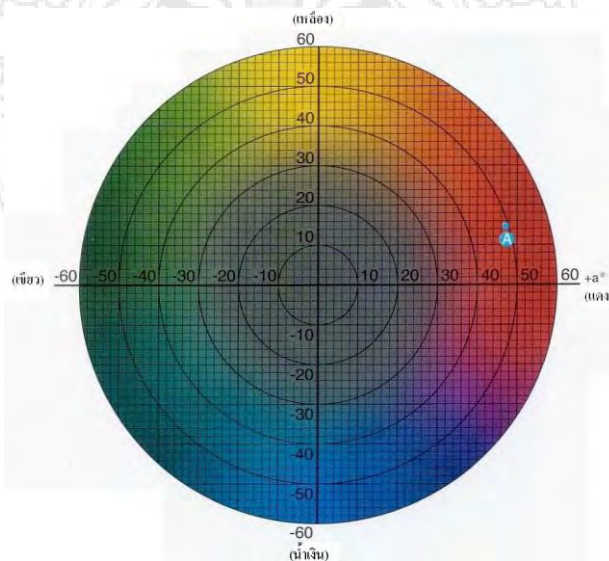


รูปที่ 2.11 ภาพคลื่นแสงในช่วงความยาวที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ที่เรียกว่า Visible light [8]

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

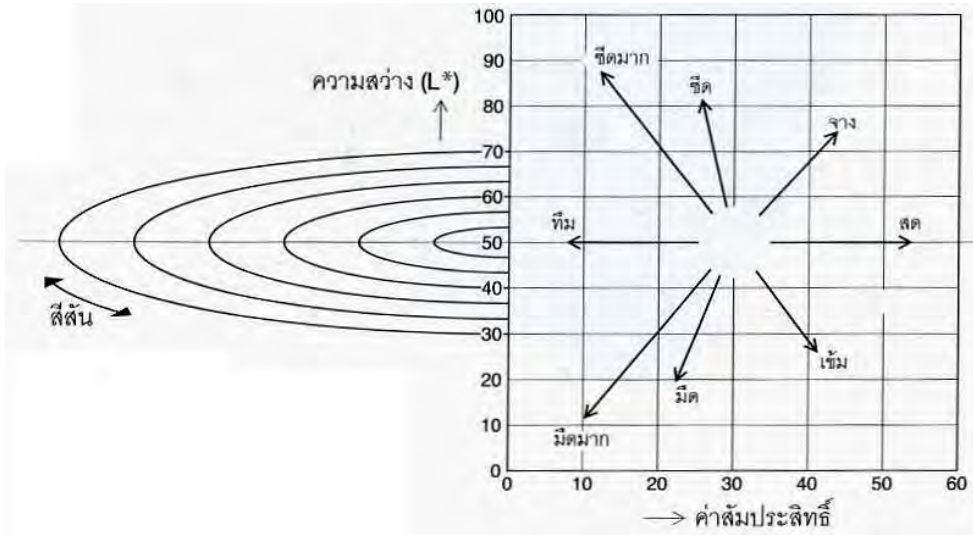
ปริภูมิสีเป็นค่าที่ใช้แสดงขอบเขตความกว้างขวางของสีของวัตถุหรือแหล่งกำเนิดแสงโดยการใช้เครื่องหมายหรือตัวเลขแสดงค่าสี ระบบปริภูมิสีที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปประกอบด้วย ปริภูมิสีระบบ  $L^*a^*b$  ปริภูมิสีระบบ  $L^*C^*h$  และปริภูมิสีระบบ Hunter Lab ซึ่งรายละเอียดของค่าปริภูมิสีในแต่ละระบบมีดังนี้

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

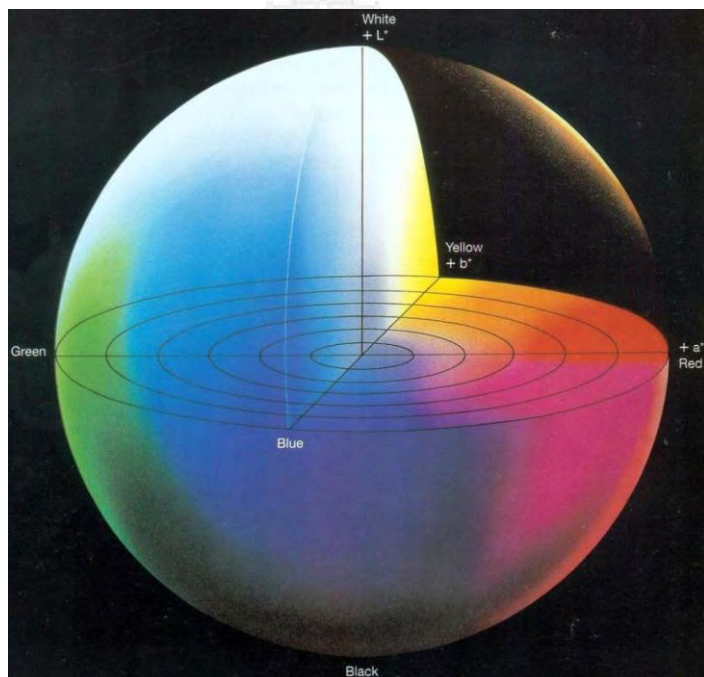


รูปที่ 2.12 ไดอะแกรมสัมประสิทธิ์สี  $a^*$ ,  $b^*$  [8]

A



B



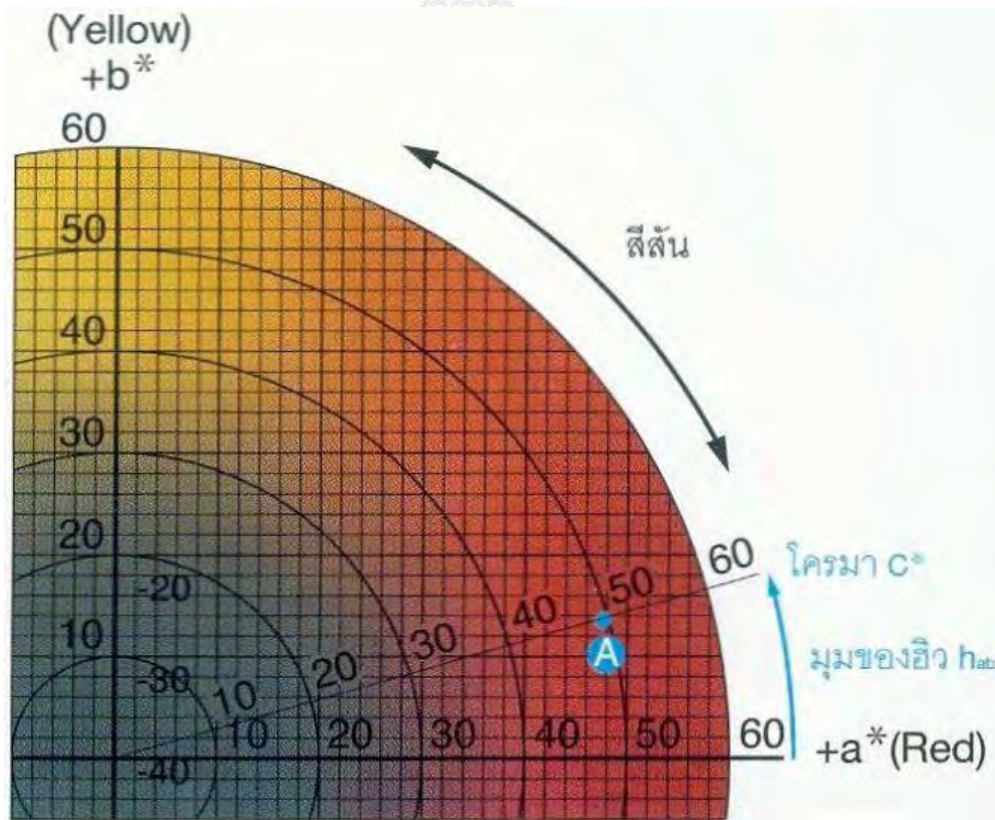
รูปที่ 2.13 ค่าสัมประสิทธิ์สีและความสว่าง (A) ค่าสัมประสิทธิ์สีและความสว่าง (B) ปริภูมิสีระบบ  $L^*a^*b$  ( $L^*a^*b$  Color Space) [8]

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

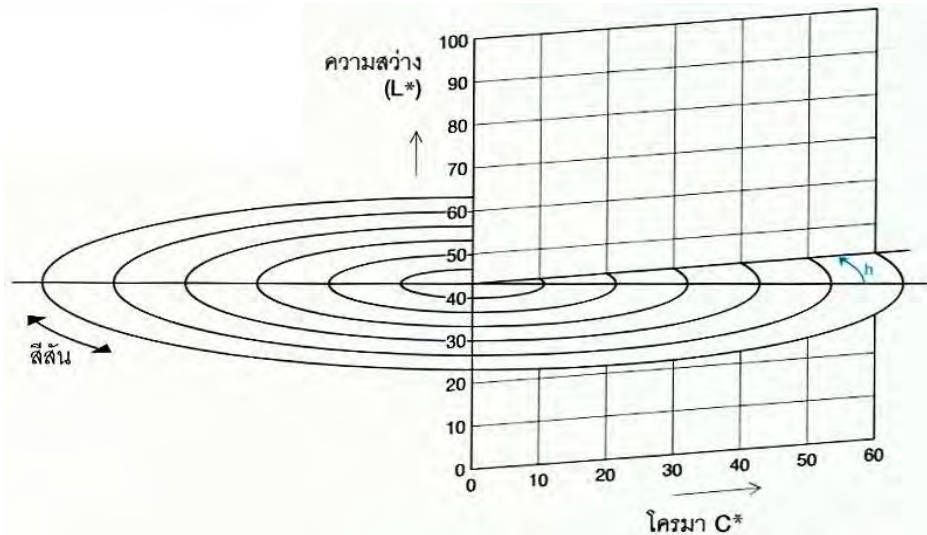
h หมายถึง มุมของฮิว (Hue angle) ค่า  $C^*$  จะมีค่าเป็น 0 ที่จุดศูนย์กลางและจะมีสีอึมตัวมากขึ้น เมื่อออกห่างจากศูนย์กลางมากขึ้น ส่วนค่ามุมฮิว ที่แทนค่าด้วย h จะเริ่มนับค่าบนแกนด้าน  $+a^*$  โดยมีค่าเริ่มต้นที่ 0 องศาบนแกนด้าน  $+a^*$  จะเป็น (สีแดง) เมื่อเป็นมุม 90 องศา จะเป็นแกน  $+b^*$  (สีเหลือง)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

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

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



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



รูปที่ 2.15 ค่าโครมาและความสว่าง [8]

### 2.7.3 ความแตกต่างของสี

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

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

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

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

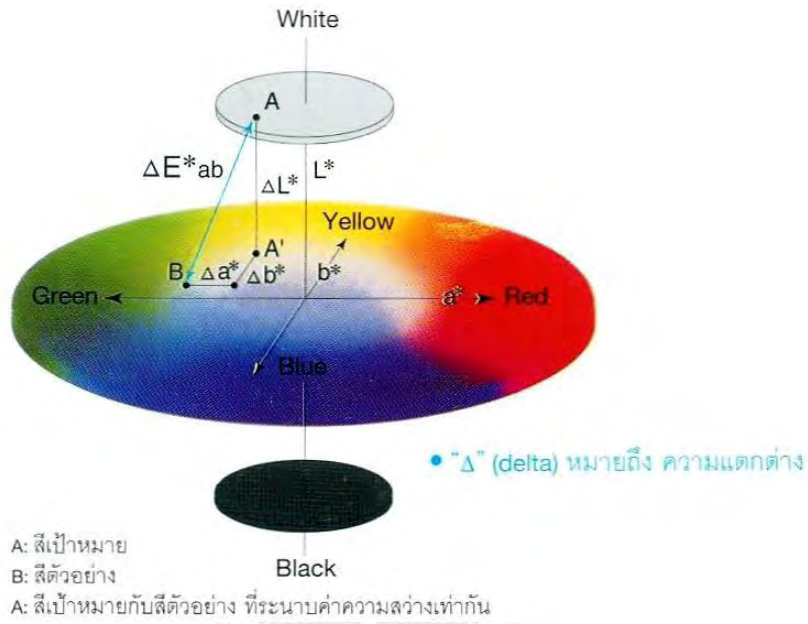
วัตถุชิ้นที่ 2 วัดสีได้  $L^* = 47.34$ ,  $a^* = +44.78$ ,  $b^* = +15.16$

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

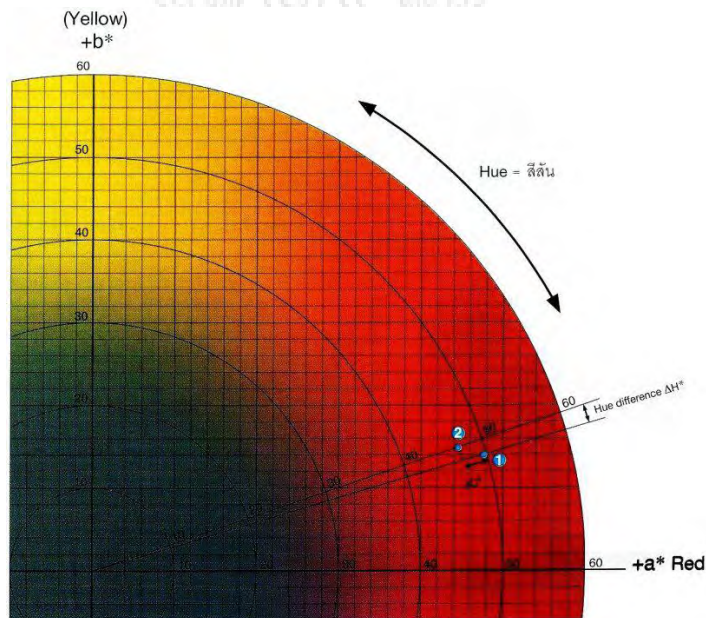
สีของวัตถุ 2 ชิ้น เมื่อนำไปแทนค่าลงในสมการจะได้  $\Delta E^*_{ab} = 5.16$

และในการทำงานเดียวกัน ถ้าวัดความแตกต่างของสีด้วยปริภูมิสีระบบ  $L^*C^*h$

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



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



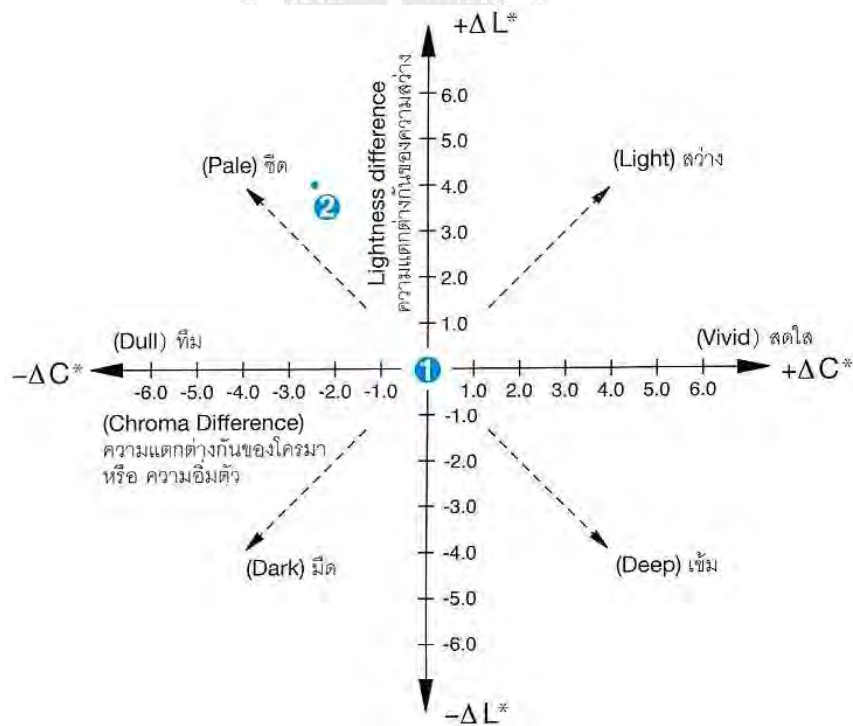
รูปที่ 2.17 ส่วนหนึ่งของไดอะแกรมสี  $a^*, b^*$  ในปริภูมิสีระบบ  $L^*C^*h$  [8]

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

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

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

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

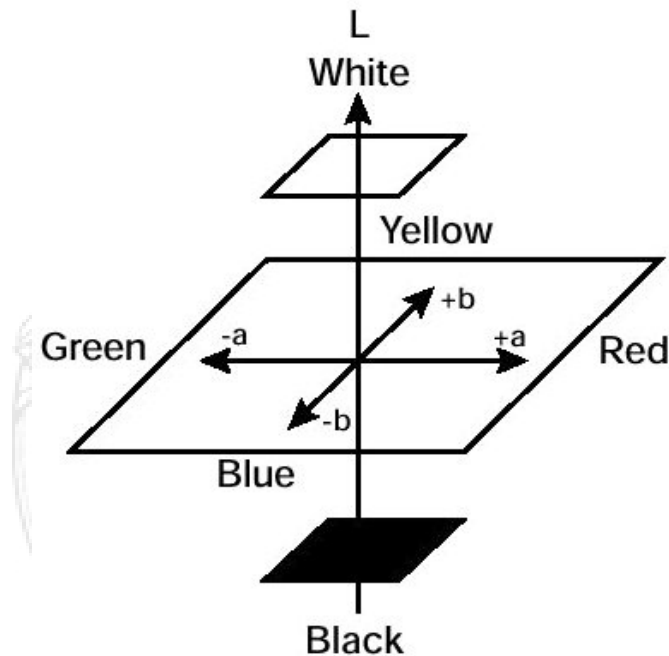


รูปที่ 2.18 ค่าที่ใช้อธิบายถึงค่าโครมาหรือความอิ่มตัวของสีและความสว่าง (Chroma and Lightness) [8]

#### 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

ทองคำกระจัดออกเป็น 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	

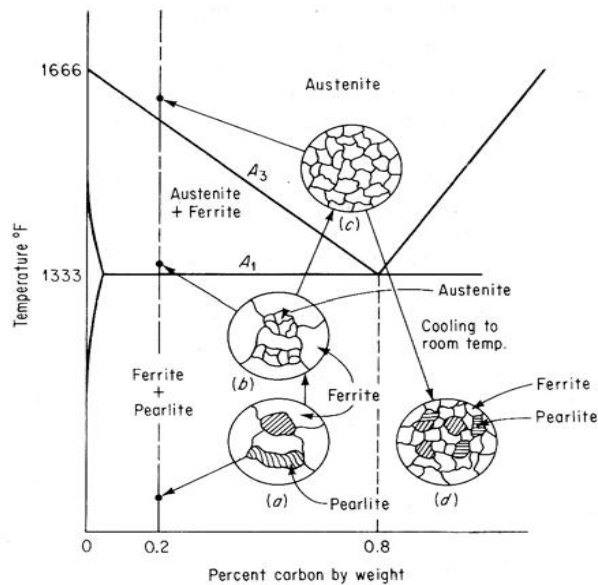
## 2.8 การอบชุบความร้อนในเหล็ก [15]

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



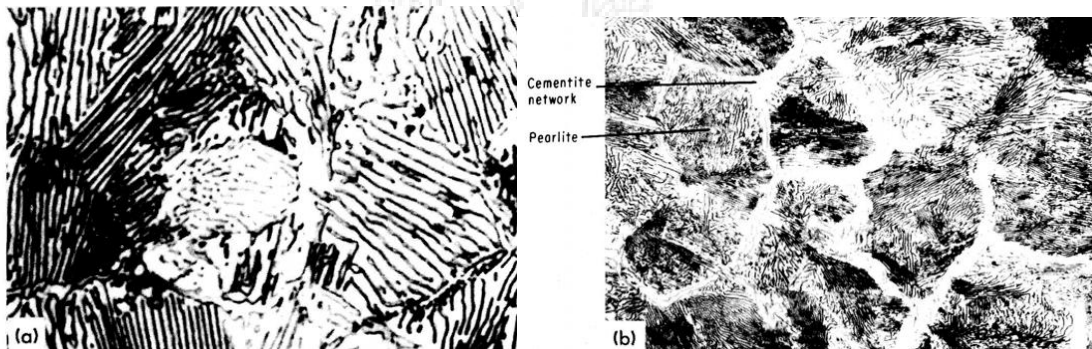
รูปที่ 2.20 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในระหว่างการอบอ่อนในเหล็กกล้า

คาร์บอน 0.2 เปอร์เซ็นต์ [15]

- โครงสร้างเดิมที่มีเกรนหยาบของเฟอร์ไรต์-เพิร์ลไรต์
- เหนือเส้น A1 เล็กน้อย เพิร์ลไรต์เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเกรนขนาดเล็กของออสเทนไนท์ ในขณะที่เฟอร์ไรต์ไม่เปลี่ยนแปลง
- เหนือเส้น A3 มีเพียงเกรนขนาดเล็กของออสเทนไนท์
- หลังจากเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้องประกอบด้วยเกรนขนาดเล็กของเฟอร์ไรต์-เพิร์ลไรต์

เมื่อให้ความร้อนกับเหล็กจนถึงอุณหภูมิ ณ จุด (a) โครงสร้างพื้นฐานยังคงเป็นเกรนหยาบของ เฟอร์ไรท์-เพิร์ลไรท์ จนกระทั่งให้ความร้อนต่อไปเรื่อยๆ จนเหนือเส้น A1 เล็กน้อย เพิร์ลไรท์เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยปฏิกิริยายูเทคตอยด์เป็นเกรนขนาดเล็กของออสเทนไนท์ ณ จุด (b) ถ้าปล่อยให้เย็นตัว จากอุณหภูมิ ณ จุด (b) จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนตามต้องการแต่เมื่อให้ความร้อนต่อไปอยู่ ระหว่างเส้น A1 และ A3 ทำให้เกรนของเฟอร์ไรท์ขนาดโตบางส่วนเปลี่ยนแปลงไปเป็นออสเทนไนท์ จนกระทั่งให้ความร้อนเหนือเส้น A3 โครงสร้างเป็นออสเทนไนท์ที่มีขนาดเล็กทั้งหมด (จุด C) หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้าๆ ภายในเตาโครงสร้างสุดท้ายที่ได้ คือ เกรนขนาดเล็กของเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไรท์ ด้วยเหตุนี้อาจกล่าวได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้สำหรับอบอ่อนเหล็กกล้าไฮโปยูเทคติก คือ  $10^{\circ}\text{C}$  ( $50^{\circ}\text{F}$ ) เหนือเส้น A3 สำหรับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนมากกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์ (เหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคตอยด์) แนะนำให้ใช้อุณหภูมิสำหรับอบอ่อนที่อุณหภูมิเหนือเส้น A<sub>3,1</sub> (รูปที่ 2.20) ประมาณ  $10^{\circ}\text{C}$  ( $50^{\circ}\text{F}$ )

อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงพบว่าหากอบอ่อนเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคติก ณ อุณหภูมิเหนือ เส้น A<sub>3,1</sub> ประมาณ  $10^{\circ}\text{C}$  ( $50^{\circ}\text{F}$ ) พบว่าโครงสร้างประกอบด้วยเกรนหยาบของเพิร์ลไรท์ล้อมรอบด้วย โปริยูเทคตอยด์ซีเมนไตต์ (Pro-Eutectoid Cementite) ดังแสดงในรูป 2.21



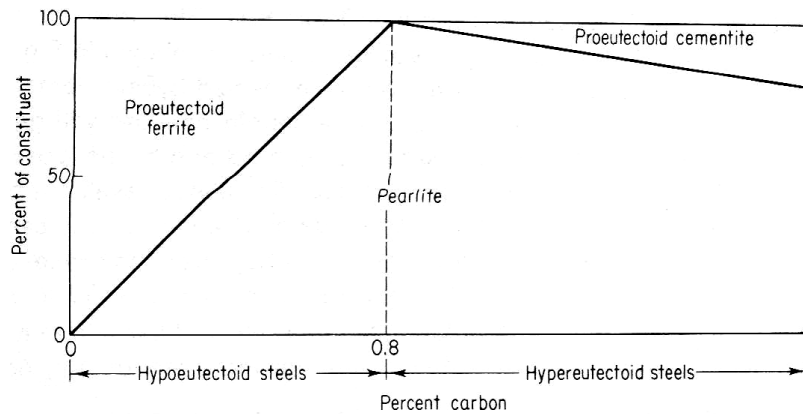
รูป 2.21 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค [15]

- (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

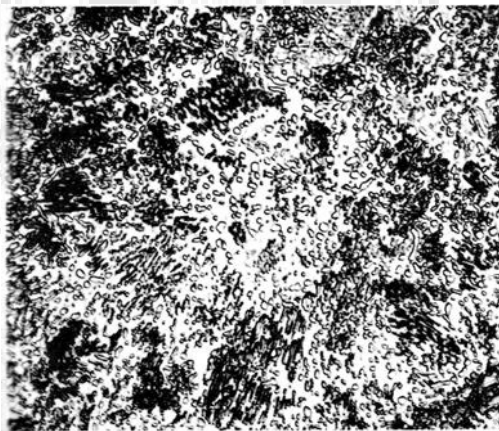
คาร์บอนมากกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์) ในเหล็กที่ผ่านการอบอ่อน (Annealing) สามารถประมาณได้จากรูปที่ 2.22



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 และสึกหรอได้เร็วกว่าปกติส่วนเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง พบว่ามีการทำ Spheroidize บ้างเพื่อให้ได้ความเหนียว (Ductility) สูงสุดในกรณีที่ชิ้นงานนั้นๆ ต้องการสมบัติเด่นอย่างใดก็ตามพึงระวังเกี่ยวกับการปล่อยให้ชิ้นงานถูกอบที่อุณหภูมิสำหรับทำ Spheroidize (Spheroidize-Annealing Temperature) นานเกินไป มีผลเสีย คือ ซีเมนต์จะรวมตัว (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

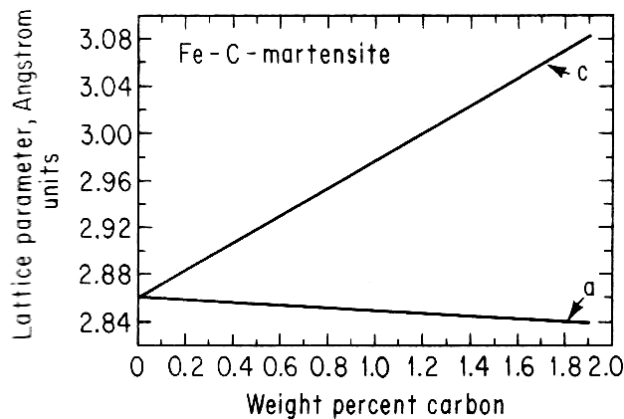
### 2.8.5 การอบปกติ (Normalizing)

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]

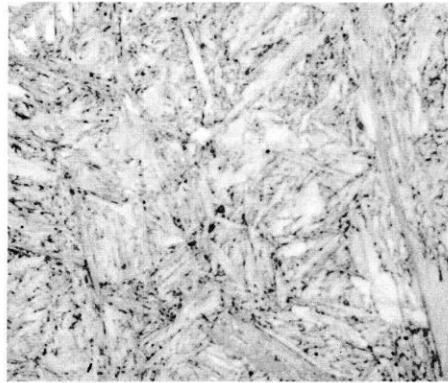
ภายใต้อัตราการเย็นตัวช้า หรือปานกลาง (Slow or Medium Cooling Rate) คาร์บอนมีความสามารถในการแพร่ออกจากโครงสร้างออสเตนไนท์ ดังนั้นอะตอมเหล็ก (Iron) เกิดการเคลื่อนที่และเปลี่ยนโครงสร้างอะตอมพื้นฐานเป็น Body Centered Cubic (BCC) การเปลี่ยนแปลงจากเหล็กแกมมา-เหล็กแอลฟา (ออสเตนไนท์ไปสู่เฟอร์ไรท์) เกิดขึ้นด้วยกระบวนการกำเนิดนิวเคลียส การโตขึ้นของเกรน และแปรตามเวลาภายใต้อัตราการเย็นตัวที่เร็ว อะตอมคาร์บอนไม่สามารถเคลื่อนย้ายออกจากสารละลายของแข็ง (ของเหล็ก) ได้ทัน โครงสร้างอะตอมพื้นฐานไม่สามารถเกิด BCC เพราะคาร์บอนอะตอมบางส่วนยังเหลือค้างในโครงข่ายของเหล็กทำให้ได้โครงสร้างชนิดหนึ่งที่เรียกว่ามาร์เทนไซต์ (Martensite) ซึ่งเป็นสารละลายของแข็งที่อิ่มตัวไปด้วยอะตอมของคาร์บอน (Supersaturated Solid Solution) ในโครงสร้าง Body Centered Tetragonal (BCT Structure) โดยปกติโครงสร้างของออสเตนไนท์ (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  $c$  ตามปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าคาร์บอน [15]

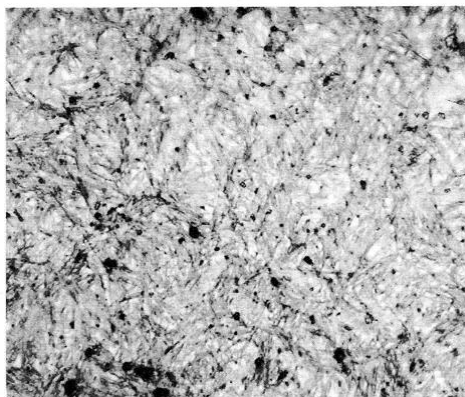
อะตอมในแกน Z ต่อแกน X ( $c/a$ ) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.08 ดังแสดงในรูปที่ 2.24 ซึ่งการแทรกตัวของอะตอมคาร์บอนใน Lattice ทำให้ Lattice เกิดการบิดเบี้ยว ด้วยเหตุนี้จึงทำให้โครงสร้างมาร์เทนไซต์มีความแข็งแรงสูงเพราะคาร์บอนอะตอมที่แทรกอยู่นี้ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน

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



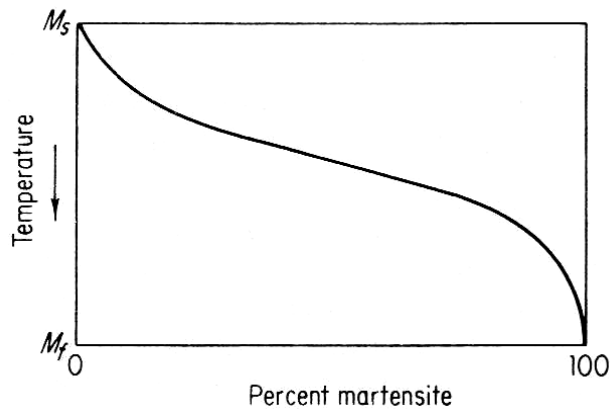
รูปที่ 2.25 โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่กำลังขยาย 2500 เท่า [15]

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]

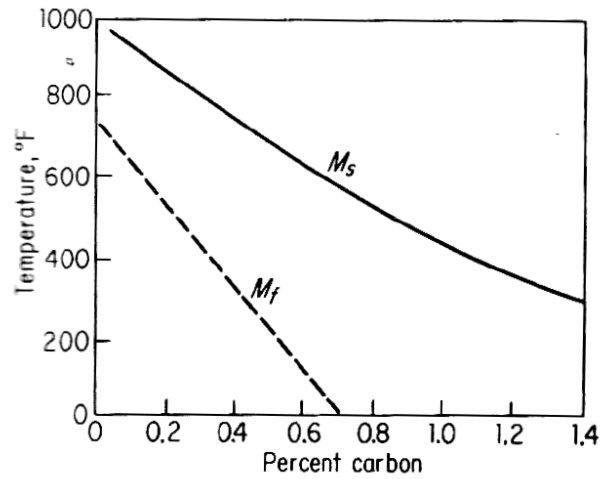
$$M_s(^{\circ}F) = 1000 - (650 \times \%C) - (70 \times \%Mn) - (35 \times \%Ni) - (70 \times \%Cr) - (50 \times \%Mo)$$

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

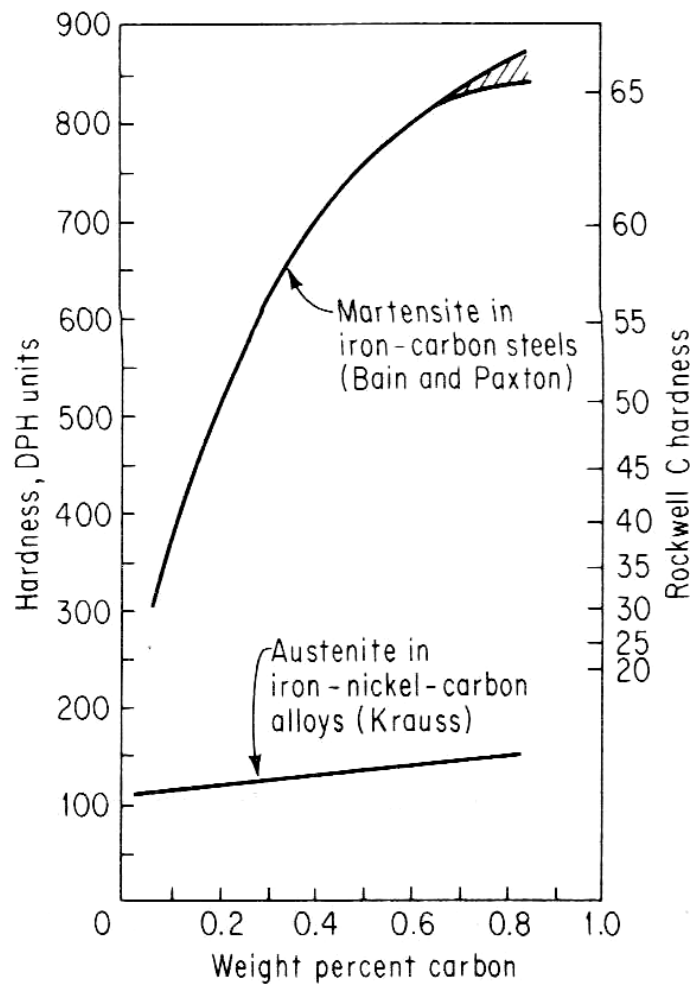
ภาคทฤษฎีอธิบายว่าการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างออสเทนไนต์ไปเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่ไม่มีโอกาสเปลี่ยนได้สมบูรณ์ และมักมีปริมาณเล็กน้อยของออสเทนไนต์เหลือค้าง (Retained Austenite) แม้ว่าอุณหภูมิลดลงต่ำ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวยิ่งเป็นไปได้ยากยิ่งขึ้นเมื่อปริมาณของโครงสร้างออสเทนไนต์ลดลง อย่างไรก็ตามในรูปที่ 2.27 เป็นการประมาณการสัดส่วนของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่เกิด โดยพิจารณาจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคดังนั้นจึงเป็นไปได้ยากสำหรับการแยกออสเทนไนต์เหลือค้างจากมาร์เทนไซต์ ด้วยเหตุนี้จึงกล่าวได้ว่าเส้น  $M_f$  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

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



รูป 2.28 อิทธิพลของคาร์บอนที่มีต่อช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงเป็นมาร์เทนไซต์ [15]



รูป 2.29 ผลของธาตุคาร์บอนต่อความแข็งของโครงสร้างออสเทนไนท์ และมาร์เทนไซต์ (ส่วนที่แรเงาตอนปลายแสดงผลของออสเทนไนท์เหลือค้าง) [15]

จุดประสงค์หลักของการชุบแข็ง (Hardening) เพื่อทำให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์โดยสมบูรณ์ และอัตราการเย็นตัว (Cooling Rate) ที่หลีกเลี่ยงการเกิดโครงสร้างอื่น ๆ ที่มีความอ่อนตัว (Soft) แล้วได้มาร์เทนไซต์เรียกว่า อัตราการเย็นตัววิกฤต (Critical Cooling Rate) อัตราการเย็นตัววิกฤต (Critical Cooling Rate) ถูกกำหนดโดยส่วนผสมทางเคมี (Chemical Composition) และขนาดเกรนของ ออสเตนไนท์ (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° ความเร็ว 10G และอุณหภูมิหล่อ 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

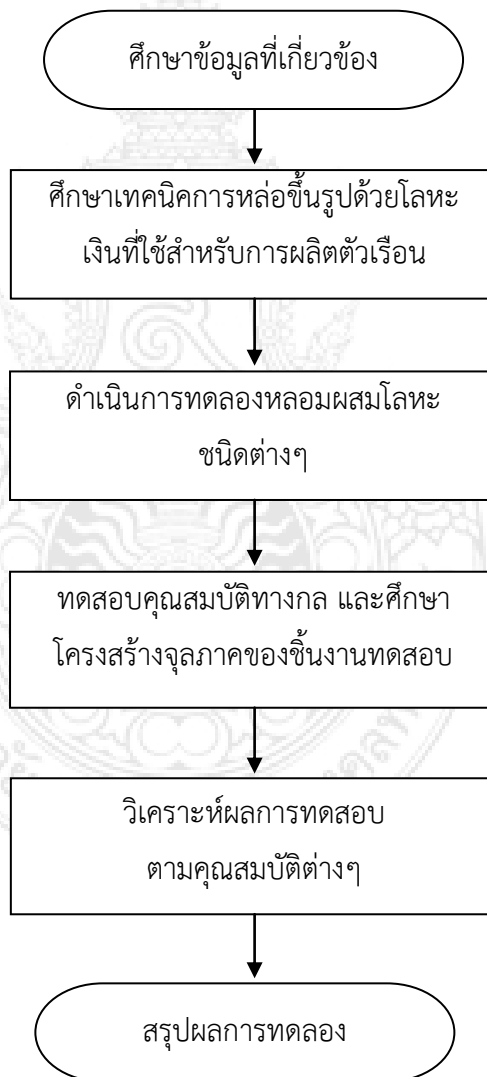
เอกลีทธี และคณะ [13] ได้ศึกษาผลของซิลิกอนต่อคุณสมบัติการต้านทานการหมองและคุณสมบัติทางกลของโลหะเงินสเตอร์ลิง ซึ่งผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกอนจะทำให้ความต้านทานการหมองดีขึ้นและซิลิกอนยังช่วยให้ผิวงานหล่อมีผิวเงาและขาวขึ้นมากกว่า ผิวของชิ้นงานที่ปราศจากซิลิกอน โดยการเพิ่มปริมาณซิลิกอนทำให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็นโครงร่างตาข่ายที่เกิดจากเฟสของทองแดง-ซิลิกอนที่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



### บทที่ 3 วิธีดำเนินงานการวิจัย

#### 3.1 แผนการดำเนินงาน

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



รูปที่ 3.1 แผนภาพการไหลกระบวนการทำโครงการ

ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินโครงการจะแบ่งเป็นขั้นตอนของการดำเนินงานที่สำคัญโดยมีระยะเวลาตามความเหมาะสม และในทุกขั้นตอนจะต้องกำหนดระยะเวลาที่เหมาะสมและสามารถปฏิบัติได้จริง ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินโครงการ

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

### 3.2 วัสดุที่ใช้สำหรับการทดลอง

#### 3.2.1 วัสดุ

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

#### 3.2.2 เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการทดลอง

เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้สำหรับการศึกษาวิจัยได้ดำเนินการจัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม

- 1) เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการลอมผสมโลหะและการหล่อขึ้นรูปชิ้นทดสอบ ในการทดลองศึกษาวิจัยนี้ ผู้ใช้เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการผลิตชิ้นงานเครื่องประดับ ซึ่งประกอบไปด้วย

หลอมผสมเทเม็ดโลหะ เครื่องหล่อดูดสุญญากาศและเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการเตรียมแบบหล่อ (เครื่องฉีดเทียน เครื่องผสมปูน เครื่องอบนึ่งไอน้ำและเตาอบปูนแบบหล่อ)

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

3) เตาอบทางโลหะวิทยา

### 3.3 การดำเนินการหล่อหลอมผสมโลหะเพื่อผลิตเป็นมาสเตอร์อัลลอย

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



รูปที่ 3.2 เครื่องหลอมผสมเทเม็ดโลหะ Indutherm รุ่น VC 600



รูปที่ 3.3 ลักษณะของเม็ดโลหะมาสเตอร์อัลลอย 58.45Ag+41.55Cu หลังจากผ่านการเทหดยเม็ด

สภาวะของการหลอมผสมเทเม็ดโลหะเพื่อผลิตเม็ดโลหะมาสเตอร์อัลลอย

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

### 3.4 การดำเนินการหลอมผสมโลหะและหล่อขึ้นรูปขึ้นทดสอบโลหะเงินผสม 58.33% สำหรับการวิเคราะห์ทดสอบต่างๆ

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

ตารางที่ 3.2 อัตราการผสมของขึ้นทดสอบโลหะเงินเจือดำ 58.33%

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

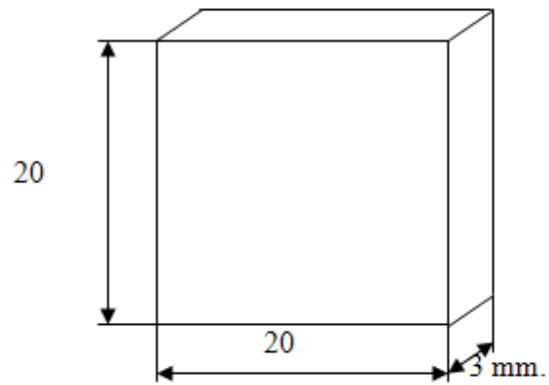
ตารางที่ 3.2 อัตราการผสมของขึ้นทดสอบโลหะเงินเนื้อต่ำ 58.33% (ต่อ)

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

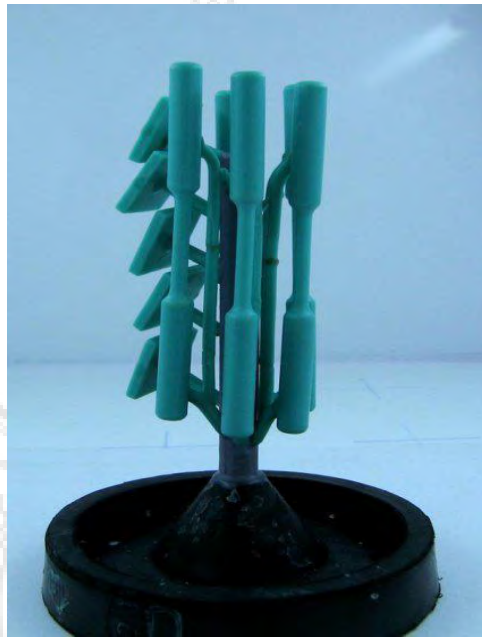
3.4.1 การหล่อหลอมขึ้นรูปขึ้นทดสอบโลหะเงินผสม 58.33% ได้ดำเนินการหล่อขึ้นรูปขึ้นทดสอบเป็นแท่งดัมเบลหรือกระดูกหมา (Dog Born) สำหรับการวิเคราะห์สมบัติความต้านแรงดึงโดยตัวแบบเทียนของขึ้นทดสอบสำหรับการหล่อขึ้นรูปได้จากการฉีดเทียนเข้าไปในโพรงแบบซิลิโคนดังแสดงในรูปที่ 3.4 สำหรับในส่วนขึ้นทดสอบสำหรับการวิเคราะห์ทดสอบความแข็ง การศึกษาโครงสร้างจุลภาค ขึ้นทดสอบถูกกำหนดให้มีขนาด  $20 \times 20 \times 3$  mm ดังรูปที่ 3.5 – 3.6 ตามลำดับ ซึ่งตัวแบบเทียนทั้งหมดจะถูกนำไปติดเป็นต้นเทียนสำหรับการหล่อขึ้นรูปด้วยขบวนการ Investment Casting ด้วยเครื่องหล่อดูดสุญญากาศยี่ห้อ Yasui รุ่น K2 ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.4 โพรงแบบซิลิโคนสำหรับการฉีดขึ้นรูปตัวแบบเทียนสำหรับทดสอบความต้านแรงดึง



รูปที่ 3.5 ขนาดของตัวแบบเทียนขึ้นทดสอบสำหรับทดสอบความแข็งและศึกษาโครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 3.6 การติดต้นเทียนสำหรับหล่อขึ้นรูปขึ้นทดสอบสำหรับการทดสอบความต้านแรงดึงความแข็ง และศึกษาโครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 3.7 เครื่องหล่อทดสอบสุญญากาศยี่ห้อ Yasui รุ่น K2

3.4.2 หลังจากทำการเตรียมต้นเทียนสำหรับหล่อขึ้นรูปขึ้นทดสอบสำหรับการทดสอบความต้านแรงดึงความแข็งการศึกษาโครงสร้างจุลภาคเรียบร้อยแล้ว นำต้นเทียนไปทำการหล่อทับด้วยปูนโปรเตอร์เพื่อใช้สำหรับทำแบบหล่อ จากนั้นทำการหล่อขึ้นรูปขึ้นทดสอบแบบสุญญากาศแสดงขั้นตอนการหล่อดังรูปที่ 3.8



ก) เทปูนลงในกระบอกรูปวงกลมที่มีต้นเทียนอยู่ภายใน  
แล้วนำกระบอกรูปวงกลมเข้าเครื่องหล่อ



ข) เทเม็ดโลหะลงใบเข้าหลอม



ค) แสดงการล้างปูนออกจากชิ้นทดสอบ



ง) นำชิ้นงานแช่ในกรดกัดปูนล้างปูน

### รูปที่ 3.8 ขั้นตอนกระบวนการหล่อหลอมชิ้นงานทดสอบของโลหะเงินเจือต่ำ

สำหรับในส่วนสภาวะของการหล่อขึ้นรูปชิ้นทดสอบ ประกอบด้วย

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

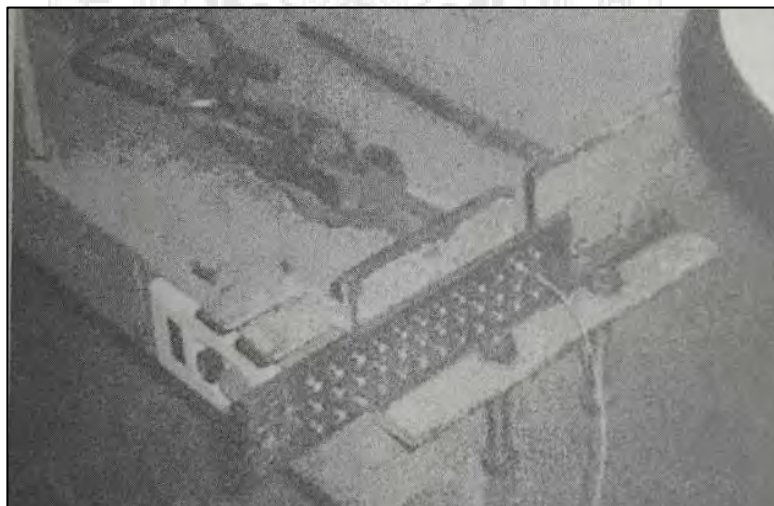
7) พักกระบอกปืนแบบหล่อก่อนจุ่มน้ำล้างปืน 20 นาที

เมื่อทำการหล่อชิ้นงานทดสอบตามสภาพอะและเงื่อนไขที่ใช้สำหรับเป็นตัวแปรกำหนดในการทดลองนี้จะได้ชิ้นงานทดสอบที่ทำการหล่อด้วยอัตราส่วนผสมของโลหะเงินเจือตำดำรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ลักษณะชิ้นทดสอบที่ได้จากการหล่อขึ้นรูป

8) เตรียมชิ้นงานทดสอบในลักษณะแบบเส้นลวดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. ดึงด้วยเครื่องดึงลวด เพื่อใช้ในการปรับปรุงชิ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการทางความร้อนและการชุบแข็ง แสดงลักษณะการดึงเส้นลวดดังรูปที่ 3.10 และชิ้นงานทดสอบแบบเส้นลวดดังรูปที่ .3.11 ตามลำดับ



รูปที่ 3.10 การดึงเส้นลวด



รูปที่ 3.11 ลักษณะของเส้นลวดและชิ้นงานทดสอบ

9) ปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนและชุบแข็งเพื่อศึกษาค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความแข็งและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบ โดยทำการทดสอบที่สภาวะต่างๆ ดังนี้

- อุณหภูมิในการอบ 600 650 และ 700 700 °C
  - เวลาที่ใช้ในการอบ 5 10 และ 15 นาที
  - ปล่อยให้เย็นตัวในเตา เย็นตัวในอากาศที่อุณหภูมิห้องและเย็นตัวในน้ำที่อุณหภูมิห้อง
- ใช้เตาอบชิ้นงานทดสอบแสดงลักษณะของเตาอบดังรูปที่ 3.12



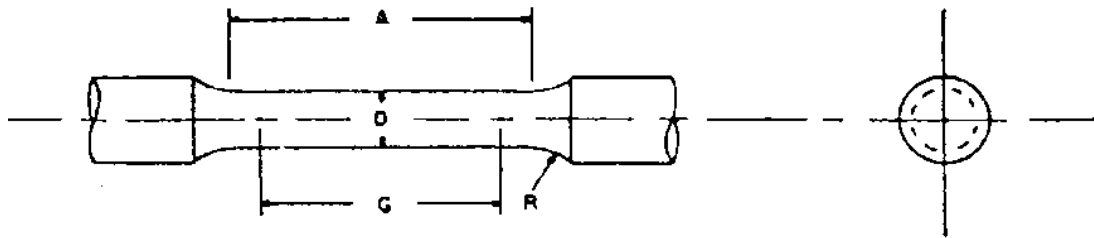
รูปที่ 3.12 เตาอบชิ้นงานทดสอบ

### 3.5 การดำเนินการศึกษาและวิเคราะห์ชิ้นงานทดสอบโลหะเงินผสม 58.33%

#### 3.5.1 การทดสอบความต้านแรงดึง

การทดสอบความต้านแรงดึงโลหะเงินผสม 58.33% เพื่อต้องการตรวจวัดค่าความแข็งแรงสูงสุดและค่าความยืดของของโลหะเงินผสม เครื่องทดสอบความต้านแรงดึงที่ใช้สำหรับงานทดสอบเป็นเครื่องทดสอบที่ใช้สำหรับทดสอบพลาสติกและโลหะอ่อนที่มีความยืดตัวสูง

จุดประสงค์ของการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านแรงดึง ณ จุดคราก ความต้านแรงดึงสูงสุด ความต้านแรงดึง ณ จุดแตกหัก และความยืดของโลหะเงินผสมที่อัตราส่วนผสมต่างๆ โดยทำการทดสอบแรงดึงอัตราส่วนผสมละ 5 ชิ้น และเงื่อนไขการทดสอบเพิ่มความเค้นไม่เกิน  $10 \text{ N/mm}^2$  ต่อวินาที ขนาดของชิ้นทดสอบช่วง Gauge length มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6 mm ยึดถือตามมาตรฐาน ASTM E 8 M - 99 ซึ่งมีสัดส่วนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ตารางที่ 3.3 และนอกจากนี้คุณสมบัติของการทดสอบ ดำเนินการทดสอบที่อุณหภูมิห้องแสดงลักษณะของเครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึงและลักษณะการทดสอบดังรูปที่ 3.14 และ รูปที่ 3.15 ตามลำดับ



รูปที่ 3.13 ลักษณะของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 8M-99 [14]

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

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



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3.15 ลักษณะการจับชิ้นทดสอบที่สภาพต่างๆ

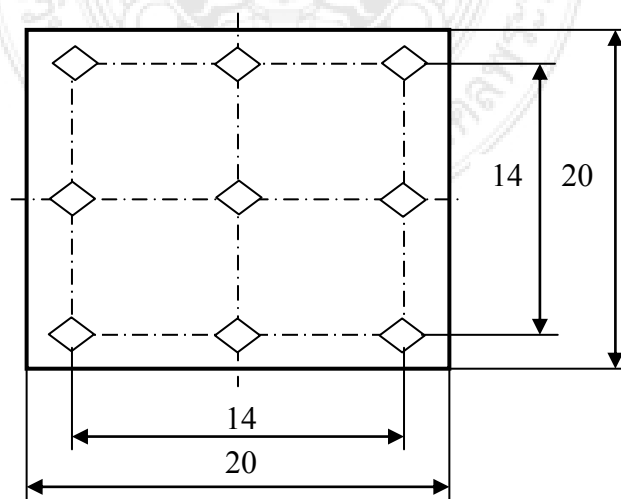
### 3.5.2 การทดสอบความแข็ง

การตรวจสอบวัดค่าความแข็งสำหรับการทดสอบ ใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Microhardnesstestingmachine ของ Mitutoyo, Japan รุ่น MVK-H11 ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ที่ได้รับการสอบเทียบความแข็งกับแผ่นทดสอบความแข็งมาตรฐานก่อนการทดสอบขึ้นทดสอบทุกครั้ง



รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบความแข็ง (Micro Hardness Testing Machine)

สำหรับการศึกษานี้เลือกใช้การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers) เพราะสามารถทดสอบความแข็งโลหะที่มีความแข็งแตกต่างกันได้ดีและยังสามารถเลือกแรงกดที่เหมาะสมกับชิ้นทดสอบได้ โดยแรงกดที่เลือกใช้ คือ 9.81 N (HV) เวลาในการกดแช่ 30 วินาที การทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบแต่ละชิ้น จะทำการทดสอบที่ตำแหน่งหน้าตัด 9 จุด ดังตำแหน่งการกดทดสอบที่แสดงในรูปที่ 3.17 หลังจากนั้นจึงนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย ค่าความแข็งที่ได้เป็นค่าความแข็งจำเพาะของโลหะเงินผสมตามส่วนผสมทางเคมี เพื่อต้องการทราบค่าความแข็งของโลหะเงินผสมที่อัตราส่วนผสมต่างๆ



รูปที่ 3.17 ตำแหน่งการทดสอบความแข็ง

### 3.5.3 การวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

เป็นการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินผสมที่ได้จากการหล่อขึ้นรูป และนอกจากนี้เพื่อเป็นการตรวจสอบอิทธิพลของธาตุผสมทองแดง สังกะสีและดีบุกที่ผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินผสม 58.4% ซึ่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินผสมมีขั้นตอนการดำเนินการดังต่อไปนี้

1) ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบซึ่งการเตรียมทำได้โดยตัดชิ้นงานแล้วนำไปหล่อด้วย เรซินให้จับยึดชิ้นทดสอบเพื่อความสะดวกในการจับยึดชิ้นทดสอบมาขัดผิวให้เรียบ

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

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

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

ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมของกรดใช้สำหรับกัดชิ้นงานทดสอบโครงสร้างจุลภาค

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

5) เมื่อกัดผิวชิ้นทดสอบด้วยกรดดังกล่าวแล้วจะนำชิ้นทดสอบไปล้างด้วยน้ำและตามด้วยแอลกอฮอล์และเป่าด้วยลมร้อนให้แห้งสนิทจากนั้นนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อตรวจดูโครงสร้าง

จุลภาคของชิ้นทดสอบที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ กล้องจุลทรรศน์ กล้องถ่ายภาพ จากกล้องจุลทรรศน์เข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ แสดงลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงกดและ ศึกษาโครงสร้างจุลภาค และชุดอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์ แสดงดังรูปที่ 3.18 และรูปที่ 3.19 ตามลำดับ



รูปที่ 3.18 ลักษณะของชิ้นงานทดสอบแรงกด



รูปที่ 3.19 อุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์

### 3.6 การวิเคราะห์และประเมินผลการทดลอง

การวิเคราะห์และประเมินผลการทดลองหลังจากทำการทดลองหาค่าคุณสมบัติเชิงกล และการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบโลหะเงินเจือต่ำ 58.33% และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 เพื่อศึกษาค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความแข็ง และโครงสร้างจุลภาคที่เหมาะสมจากการปรับปรุงคุณสมบัติก่อนทำการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ และนำไปพัฒนาศักยภาพในการผลิตของผู้ประกอบการทั้งภายในและต่างประเทศให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่อไป

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้มุ่งทำการศึกษาคุณสมบัติของโลหะเงินผสม 58.33% ที่มีองค์ประกอบเป็น เงิน (Ag) ทองแดง (Cu) และดีบุก (Sn) ภายใต้ปริมาณโลหะเงินไม่ต่ำกว่า 58.33% โดยเทียบกับเงิน 925 ผลจากการศึกษาดังกล่าวผู้วิจัยได้ใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนา ส่วนประกอบ ของโลหะเงิน เพื่อให้ได้คุณลักษณะทางเคมีและทางกายภาพ และคุณสมบัติทางกล ใกล้เคียงกับเงินในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ โดยศึกษาหาค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความแข็ง และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุโลหะเงินเจือต่ำ เป็นพื้นฐานในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุเอใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ต่อไป

จากการศึกษาคุณสมบัติทางกลเบื้องต้นของชิ้นงานทดสอบโลหะเงินเจือต่ำ เพื่อหาค่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์เครื่องประดับเงิน สรุปผลการทดลองดังตารางที่ 4.1

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

อัตราส่วนผสม	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HV)
93.71Ag + 6.30Cu	193.5	29.78	52.82
58.45Ag + 41.55Cu	209.25	32.1	54.60
58.33Ag + 36.66Cu + 5.01Sn	345.25	61.58	148.87
58.33Ag + 39.48Cu + 2.19Sn	243.8	62.2	120.43
58.33Ag + 41.16Cu + 0.51Sn	254.1	61.18	119.63
58.33Ag + 41.44Cu + 0.23Sn	268.5	47.7	106.10
58.33Ag + 41.57Cu + 0.10Sn	334	56.1	93.03

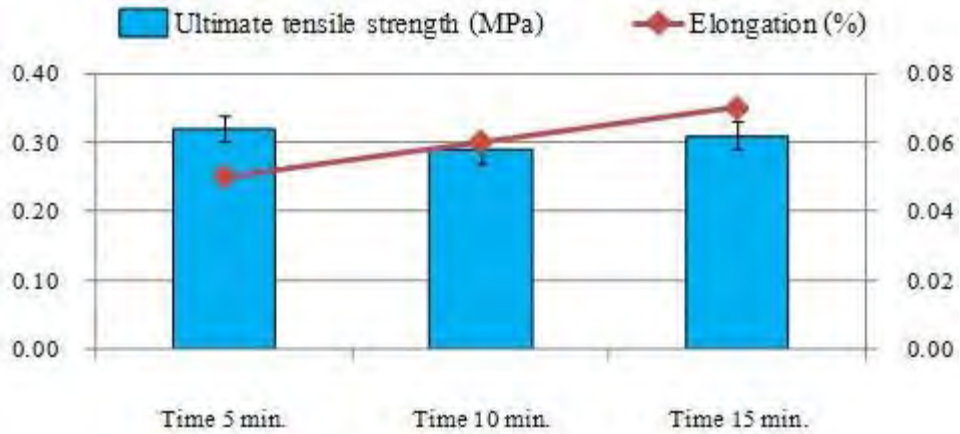
จากการประเมินคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานทดสอบโลหะเงินเจือต่ำที่อัตราส่วนผสมต่างๆ พบว่า โลหะเงินเจือต่ำ 58.33Ag+41.57Cu+0.10Sn มีค่า Ultimate tensile strength, Elongation และ Hardness มีค่าที่เหมาะสมทางคุณสมบัติของวัสดุโลหะเงินเจือต่ำสำหรับผลิตภัณฑ์เครื่องประดับเงิน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำอัตราส่วนผสมทางเคมีนี้มาดำเนินการทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดึงแบบเส้นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. ศึกษาค่าความแข็งตามมาตรฐานของชิ้นงานทดสอบ และศึกษาโครงสร้างจุลภาคจากการปรับปรุงคุณสมบัติทางความร้อน สามารถแสดงผลการทดลองได้ดังนี้

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงดึง

การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบแบบเส้นลวดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. ด้วยวิธีการทดสอบหาค่าแรงดึงของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนเพื่อลดความเครียดในเนื้อวัสดุหลังดึงขึ้นรูปเป็นเส้นลวด โดยทำการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิอบ 600 650 และ 700 °C เวลาที่ใช้ในการอบ 5 10 และ 15 นาที จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในเตา เย็นตัวในอากาศที่อุณหภูมิห้องปกติ เพื่อเทียบกับชิ้นงานมาตรฐานก่อนทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางความร้อนมีค่า ความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 0.47 MPa และ Elongation 0.35% สามารถแสดงผลการทดลองได้ดังตารางที่ 4.2 และแสดงกราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation) ดังรูปที่ 4.1 ถึง รูปที่ 4.8 สามารถแสดงรายละเอียดได้ ดังนี้

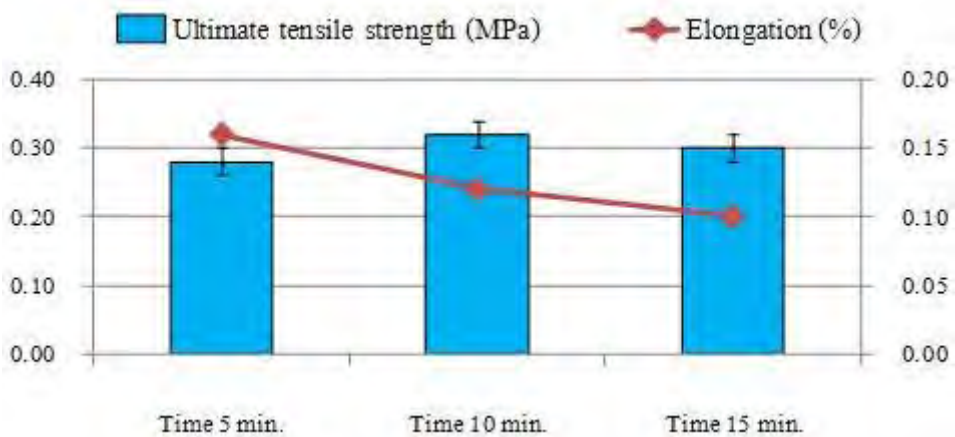
ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่สภาวะการเย็นตัวแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	เย็นตัวในเตา		เย็นตัวในอากาศ	
		Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)
600	5	0.32	0.05	0.28	0.16
	10	0.29	0.06	0.32	0.12
	15	0.31	0.07	0.3	0.1
650	5	0.32	0.08	0.32	0.06
	10	0.34	0.11	0.36	0.11
	15	0.33	0.11	0.35	0.11
700	5	0.31	0.07	0.32	0.08
	10	0.30	0.08	0.34	0.08
	15	0.29	0.07	0.34	0.08



รูปที่ 4.1 กราฟค่าความต้านทานแรงดึงที่อุณหภูมิ 600 °C เย็นตัวในเตา

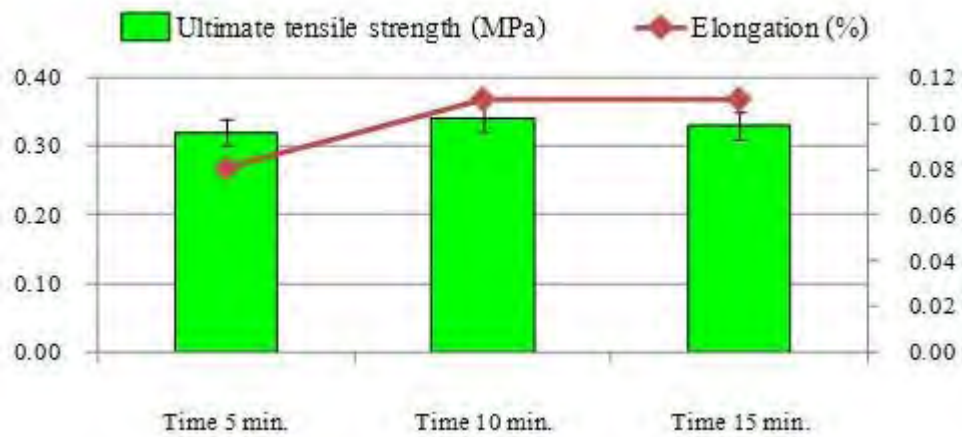
รูปที่ 4.1 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิอบ 600 °C ปล่อยให้เย็นตัวในเตา พบว่าเมื่อทำการอบเป็นเวลา 5 นาที ชิ้นงานทดสอบมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 0.32 MPa และมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเท่ากับ 0.05 % เมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบ 10 และ 15 นาที พบว่ามีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ลดน้อยลง



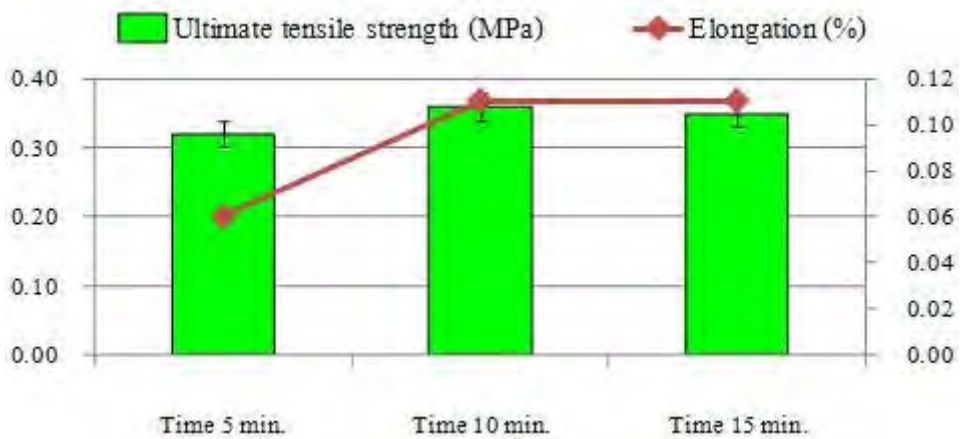
รูปที่ 4.2 กราฟค่าความต้านทานแรงดึงที่อุณหภูมิ 600 °C เย็นตัวในอากาศ

รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 600 °C ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ พบว่ามีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 0.32 MPa และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเท่ากับ 0.12 % แต่เมื่อทำการลดเวลาในการอบเป็น 5 นาที และเพิ่มเวลาในการอบเป็น 15 นาที พบว่ามีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดลดลงตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทดสอบเดียวกันแต่มีลักษณะการเย็นตัวที่ไม่เหมือนกัน ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าแตกต่างกัน

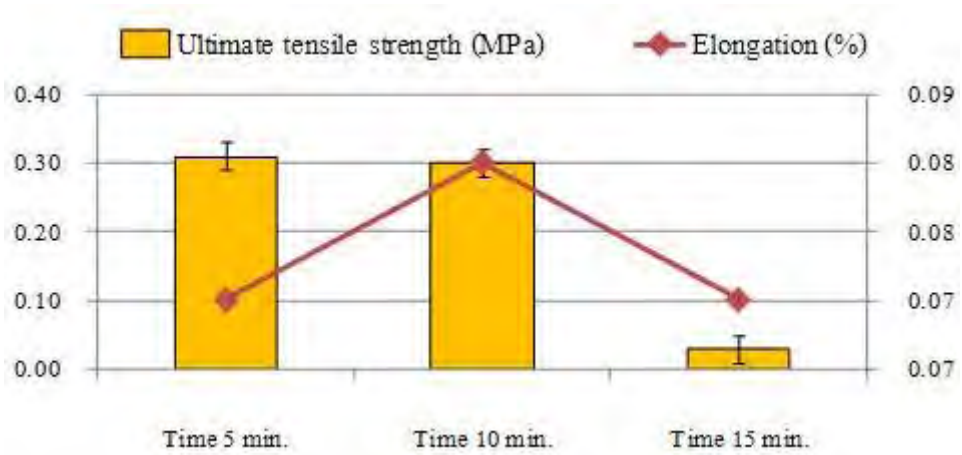


รูปที่ 4.3 กราฟค่าความต้านทานแรงดึงที่อุณหภูมิ 650 °C เย็นตัวในเตา

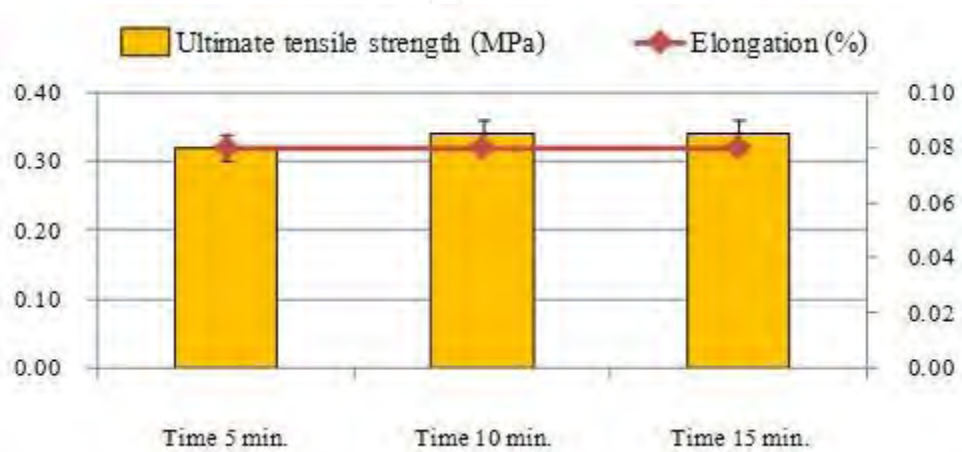


รูปที่ 4.4 กราฟค่าความต้านทานแรงดึงที่อุณหภูมิ 650 °C เย็นตัวอากาศ

รูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบเมื่อทำการอบที่อุณหภูมิ 650 °C และเวลาที่ใช้ในการอบ 5 10 และ 15 นาที จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในเตาและเย็นตัวในอากาศ พบว่า ชิ้นงานทดสอบที่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเมื่อทำการอบที่อุณหภูมิ 650 °C เวลาที่ใช้ในการอบ 10 นาที และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศมีค่าเท่ากับ 0.36 MPa และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเท่ากับ 0.11 % เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการอบและลดเวลาในการอบพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าลดต่ำลง นั้นแสดงได้ว่าเวลาที่ใช้ในการอบแลปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในสภาวะที่แตกต่างกันส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ

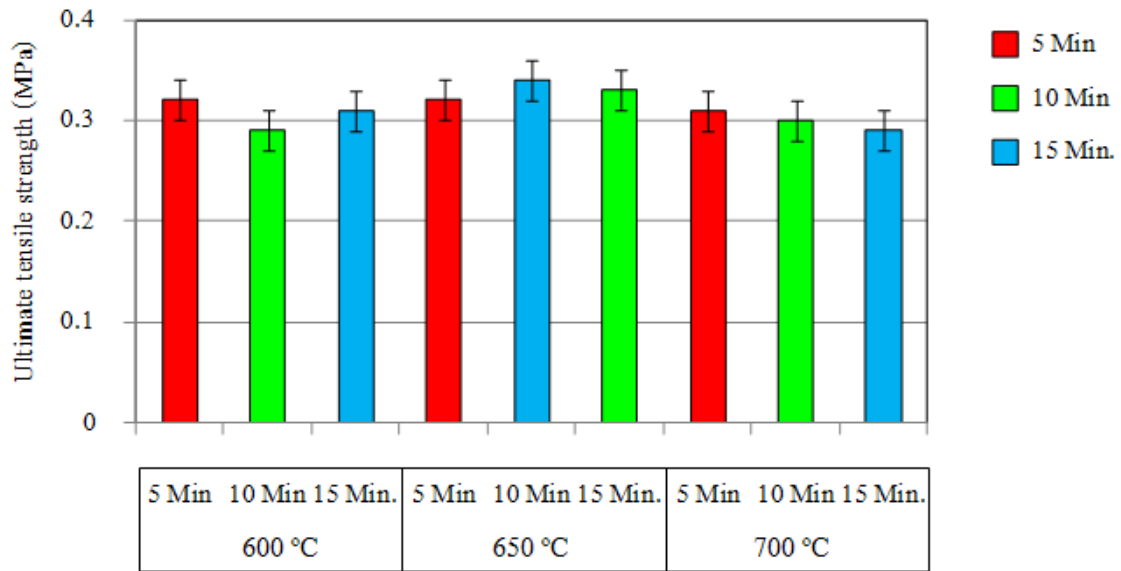


รูปที่ 4.5 กราฟค่าความต้านทานแรงดึงที่อุณหภูมิ 700 °C เย็นตัวในเตา

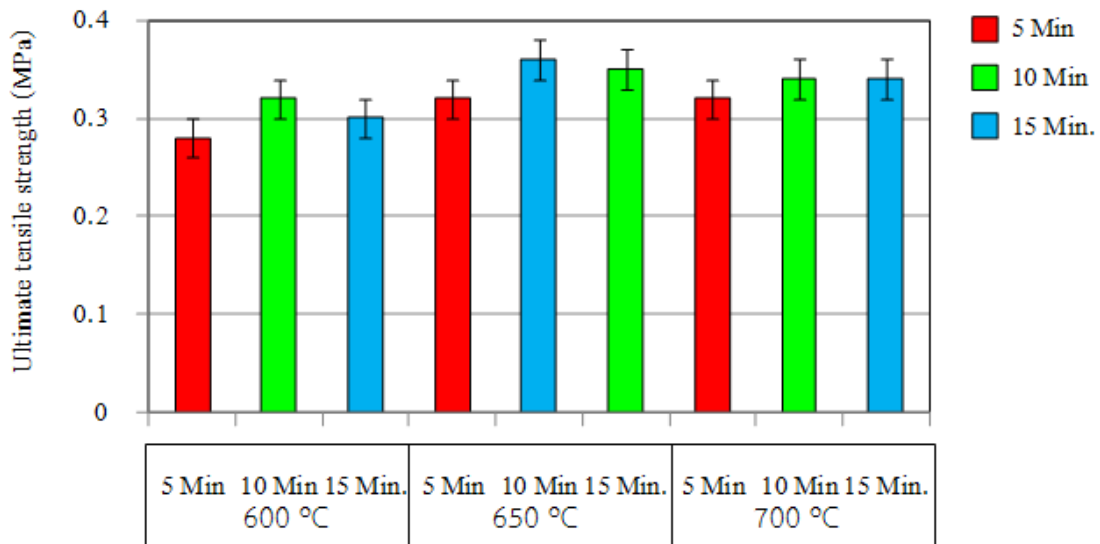


รูปที่ 4.6 กราฟค่าความต้านทานแรงดึงที่อุณหภูมิ 700 °C เย็นตัวในอากาศ

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 700 °C ปล่อยให้เย็นตัวในเตา และรูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 700 °C ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ใช้เวลาในการอบที่ 700 °C เวลาที่ใช้ในการอบ 10 นาที ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 0.34 MPa และมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว 0.08% แสดงดังกราฟรูปที่ 4.6 ส่วนชิ้นงานทดสอบที่ปล่อยให้เย็นตัวในเตามีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 0.31 MPa และมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว 0.07 % แสดงดังกราฟรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบเย็นตัวในเตา ที่อุณหภูมิและเวลาที่ต่างกัน



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบเย็นตัวในอากาศ ที่อุณหภูมิและเวลาที่ต่างกัน

จากการวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบแบบเส้นลวดเบื้องต้น พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบเมื่อทำการอบที่อุณหภูมิ 600 650 และ 700 °C เวลาที่ใช้ในการอบ 5 10 และ 15 นาที จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในเตาและเย็นตัวในอากาศ สามารถแสดงค่าที่ได้จากการทดสอบดังกราฟรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 ตามลำดับ พบว่า มีค่าความต้านทานแรงดึงและ

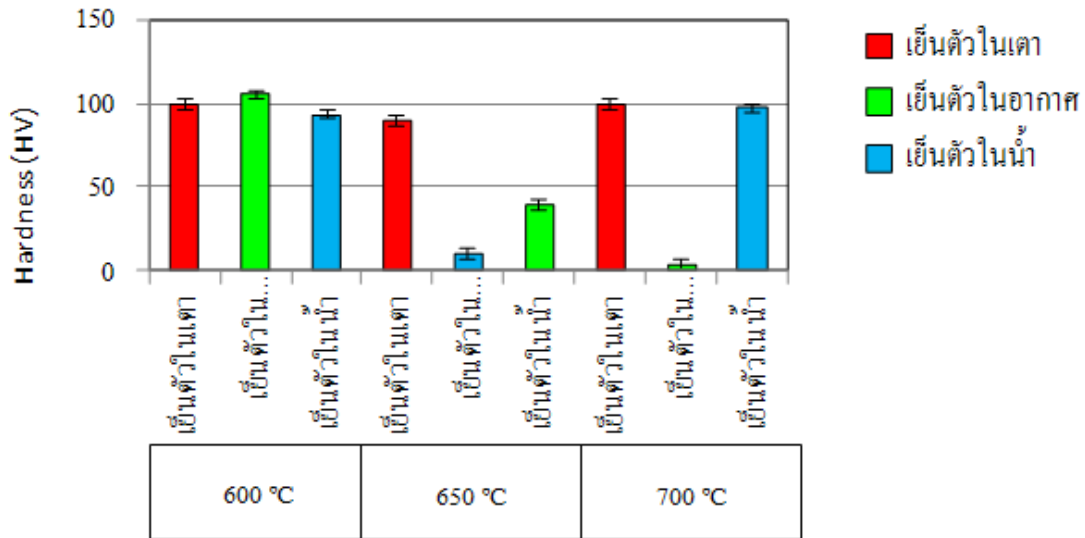
เปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่แตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ เวลาที่ใช้ในการอบ และลักษณะการเย็นตัวที่แตกต่างกันซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ใช้ในการดำเนินการทดสอบ เมื่อเทียบกับชิ้นงานทดสอบมาตรฐานที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติทางความร้อนและการชุบแข็งซึ่งมีค่าโดยรวมน้อยกว่าชิ้นงานทดสอบลวดมาตรฐาน แสดงให้เห็นว่าหลังจากทำการปรับปรุงคุณสมบัติของเนื้อวัสดุ พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์มีค่าลดลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองส่งผลทำให้คุณสมบัติทางกลของเนื้อวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลง

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็ง

จากการศึกษาอัตราส่วนผสมทางเคมีของโลหะเงินเจือดำ ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบเบื้องต้นพบว่าโลหะเงินเจือดำ  $58.33\text{Ag} + 41.57\text{Cu} + 0.10\text{Sn}$  ซึ่งมีค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบเท่ากับ 93.03 HV และมีค่าความต้านทานแรงดึงที่ค่อนข้างสูง ถือได้ว่าเป็นอัตราส่วนผสมทางเคมีที่ทำให้คุณสมบัติเชิงกลดีที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำชิ้นงานทดสอบที่อัตราส่วนผสมนี้มาทำการศึกษาระบวนการทางความร้อนเพื่อทำการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์โลหะเงินเจือดำให้ดีขึ้น โดยกำหนดค่าเวลาที่ใช้ในการอบคงที่เท่ากับ 10 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่เหมาะสมที่สุดจากการทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดึงของเส้นลวด ดังผลการทดลองข้างต้น และทำการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการอบได้แก่ 600 650 และ 700 °C จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในเตา เย็นตัวในอากาศ และเย็นตัวในน้ำ สามารถแสดงผลการทดลองหาค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่สภาวะการเย็นตัวแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	ค่าความแข็งเฉลี่ย (HV)		
	เย็นตัวในเตา	เย็นตัวในอากาศ	เย็นตัวในน้ำ
600	99.76	105.12	93.42
650	89.98	96.92	98.7
700	98.8	96.28	91.48

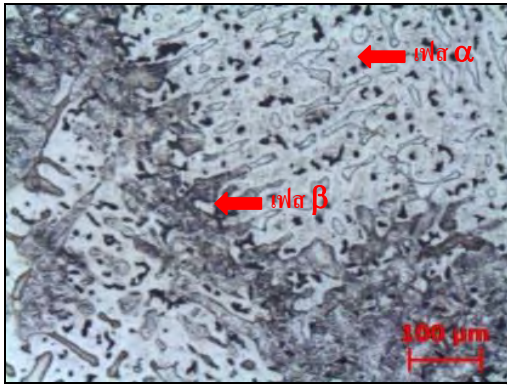


รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบเมื่อเย็นตัวที่สภาวะต่างๆ

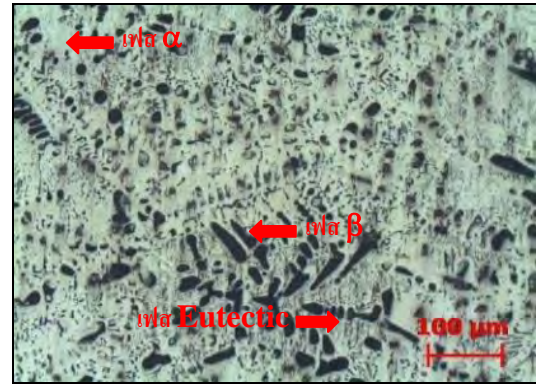
รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ เมื่อทำการอบที่อุณหภูมิ 600 650 และ 700 °C เวลาที่ใช้ในการอบ 10 นาที ปล่อยให้เย็นตัวในเตา เย็นตัวในอากาศที่อุณหภูมิห้อง และเย็นตัวในน้ำที่อุณหภูมิห้อง พบว่า ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบส่วนใหญ่มีค่ามากกว่าค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการชุบแข็งหรือกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติทางความร้อน ชิ้นงานทดสอบที่มีค่าความแข็งมากที่สุดเมื่อทำการอบที่อุณหภูมิ 600 °C และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ มีค่าเท่ากับ 105 HV เมื่อทำการปรับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 650 และ 700 °C พบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบมีค่าลดลง และมีค่าความแข็งใกล้เคียงกับอุณหภูมิและลักษณะการเย็นตัวที่แตกต่างกัน ทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างที่เปลี่ยนไปของเนื้อวัสดุที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากอิทธิพลของอุณหภูมิและลักษณะการเย็นตัวที่แตกต่างกัน จึงทำให้ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบมีค่ามาก-น้อย ที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะทดสอบ

#### 4.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

จากการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบโลหะเงินเจือดำ 58.33% พบว่าประมาณธาตุดีบุก (Sn) ส่งผลต่อค่าเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบเพื่อทำการเปรียบเทียบกับโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 (93.71Ag+6.30Cu) ซึ่งเป็นโลหะเงินมาตรฐานของผลิตภัณฑ์เครื่องประดับเงิน และโลหะเงินเจือดำ (58.45Ag+41.55Cu) ซึ่งเป็นมาตรฐานของโลหะเงินผสมเจือดำ ที่มีธาตุทองแดง (Cu) และดีบุก (Sn) รวมกันไม่เกิน 41.67% สามารถแสดงผลโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบได้ดังรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 ตามลำดับ

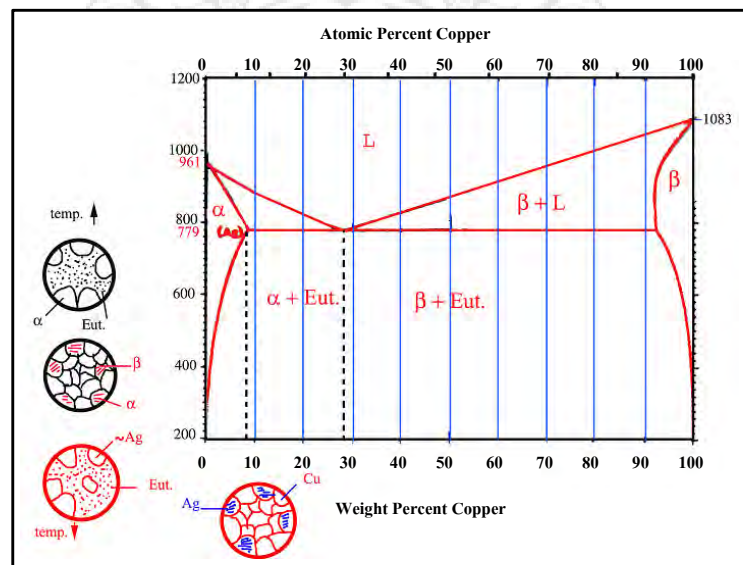


รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงิน  
93.71Ag + 6.30Cu



รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือต่ำ  
58.45Ag + 41.55Cu

โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงิน 925 ซึ่งประกอบด้วย 93.71wt%Ag + 6.30wt%Cu มีลักษณะเป็นโครงสร้างเดนไดรต์ (Dendrite Structure) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ที่เกิดจากการที่โลหะผสมเย็นตัวเร็วกว่าสภาวะสมดุลโดยมีลักษณะเป็นแกนผลึก (Core structure) เกิดเป็น Coring ภายในเกรน ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางกลมีค่าต่ำและนอกจากนี้ขนาดเกรนที่ได้มีขนาดค่อนข้างใหญ่ไม่สามารถวัดขนาดเกรนได้และส่งผลให้สมบัติทางกลมีค่าต่ำเช่นกัน เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเทียบกับแผนภาพสมดุลโลหะเงิน-ทองแดง ดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่า โลหะเงินผสม 93.71wt%Ag + 6.30wt%Cu ประกอบด้วยเฟสของแข็ง  $\alpha$ -phase + Eutectic phase

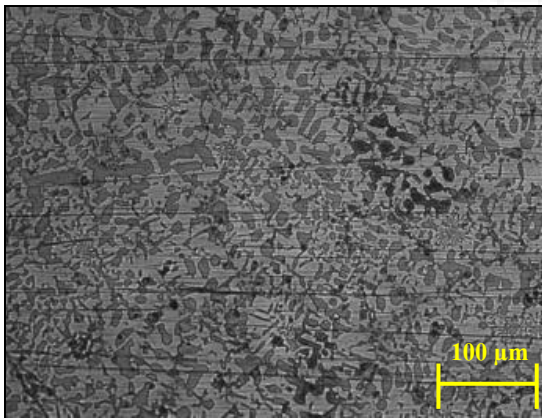


รูปที่ 4.12 แผนภาพสมดุลโลหะเงิน-ทองแดง

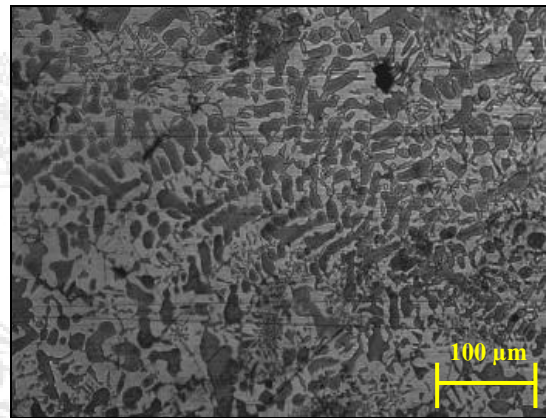
สำหรับในกรณีของโลหะเงินผสม 58.45wt%Ag + 41.55wt%Cu ซึ่งมีปริมาณการผสมของทองแดงมากเพิ่มขึ้นเป็น 41.55wt%Cu มีผลทำให้โลหะผสมมีค่าสมบัติทางกลสูงขึ้น โครงสร้างจุลภาคที่ได้ พบว่าลักษณะเป็นโครงสร้างเดนไดรต์ที่เกิดจากการเย็นตัวเร็วกว่าสภาวะสมดุลเช่นกัน และลักษณะ

ของเกรนที่ได้มีขนาดใหญ่ไม่สามารถวัดขนาดเกรนได้ และนอกจากนี้การเย็นตัวของโลหะผสมที่เร็วกว่าสภาวะสมดุล ส่งผลให้การกระจายตัวของเฟสต่างๆ ภายในไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่แสดงในรูปที่ 4.11 พบว่า ประกอบด้วย  $\alpha$ -phase,  $\beta$ -phase และ Eutectic phase ซึ่งมีลักษณะของเฟสที่สอดคล้องกับแผนภาพสมดุลโลหะเงิน-ทองแดง ที่แสดงในรูปที่ 4.12

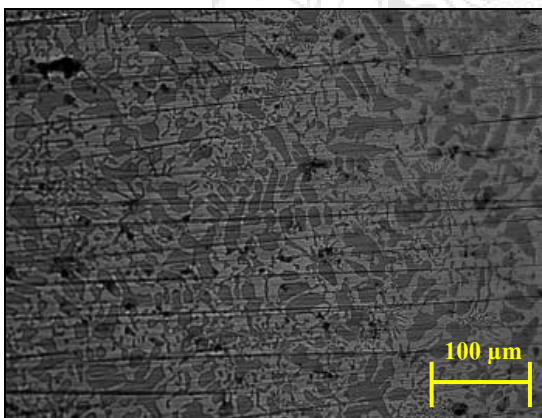
รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะเงินเจือดำที่อัตราส่วนผสมต่างๆ มีลักษณะโครงสร้างการกระจายตัวของเฟสต่างๆ ไม่สม่ำเสมอ จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นของชิ้นงานทดสอบ พบว่าโลหะเงินเจือดำ 58.33Ag+36.66Cu+5.01Sn ดังรูปที่ 4.13 (ก) มีลักษณะของเฟสต่างๆ ค่อนข้างเล็กและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งมีลักษณะที่แตกต่างไปจากโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือดำ 58.33Ag+41.57Cu+0.10Sn ดังรูปที่ 4.13 (จ) ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบ  $\beta$ -phase ที่มีขนาดใหญ่และน้อย กระจายตัวห่างกัน นั้นแสดงให้เห็นได้ว่าปริมาณ Cu และ Sn ที่ผสมเข้าไปในเนื้อโลหะเงินนั้นส่งผลต่อการเกิดเฟสต่างๆ ในโครงสร้างของชิ้นงานทดสอบ



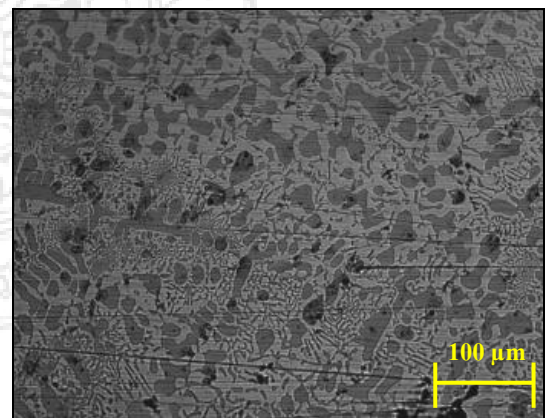
(ก) 58.33Ag + 36.66Cu + 5.01Sn



(ข) 58.33Ag + 39.48Cu + 2.19Sn

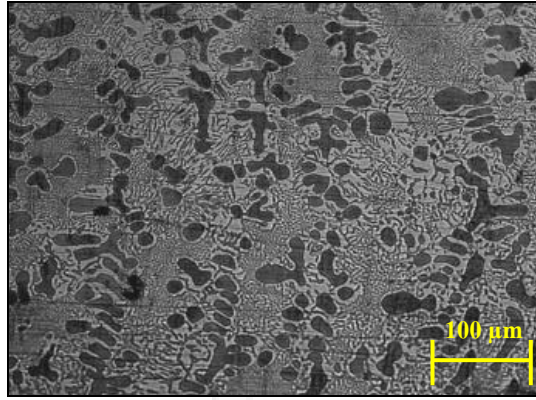


(ค) 58.33Ag + 41.16Cu + 0.51Sn



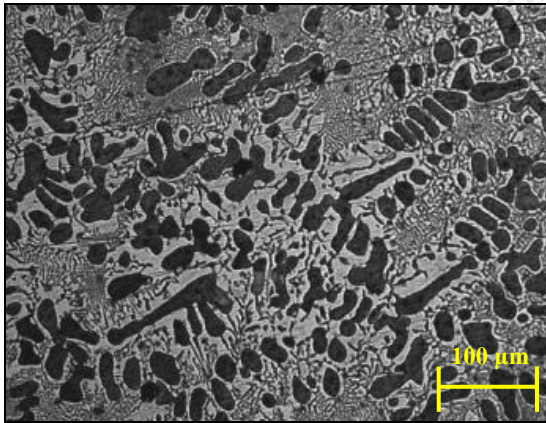
(ง) 58.33Ag + 41.44Cu + 0.23Sn

รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือดำที่ส่วนผสมต่างๆ

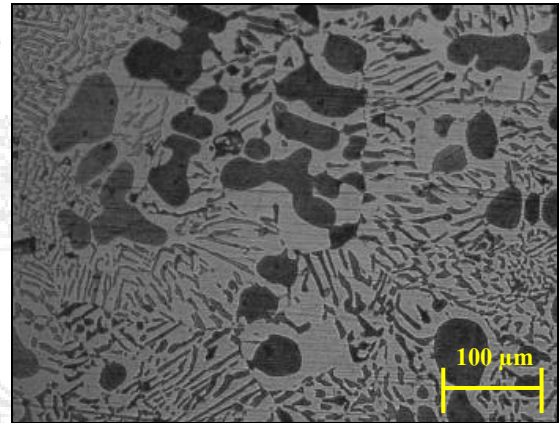


(จ) 58.33Ag + 41.57Cu + 0.10Sn

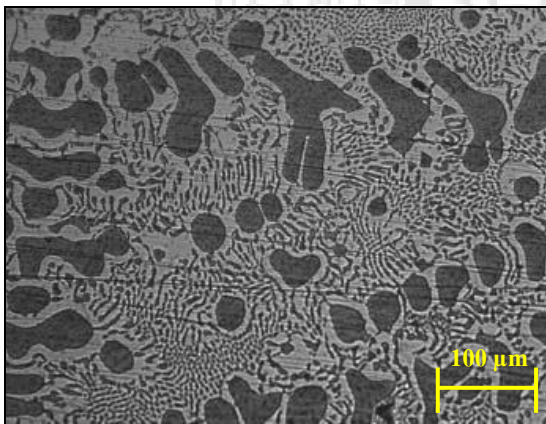
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือตะกั่วที่ส่วนผสมต่างๆ (ต่อ)



(ก) อุณหภูมิ 600 °C



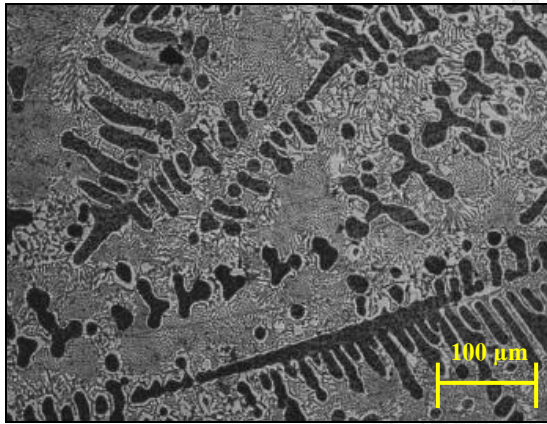
(ข) อุณหภูมิ 650 °C



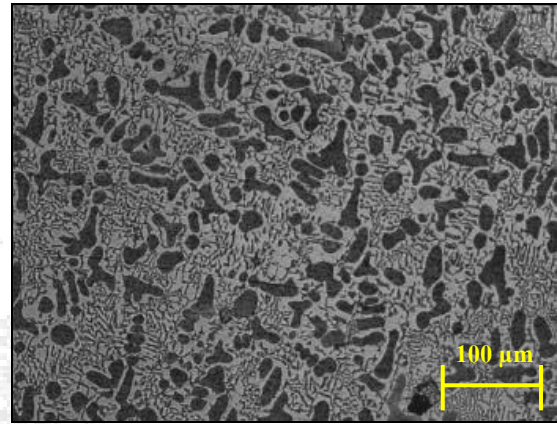
(ค) อุณหภูมิ 700 °C

รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบหลังการอบที่เย็นตัวในเตา

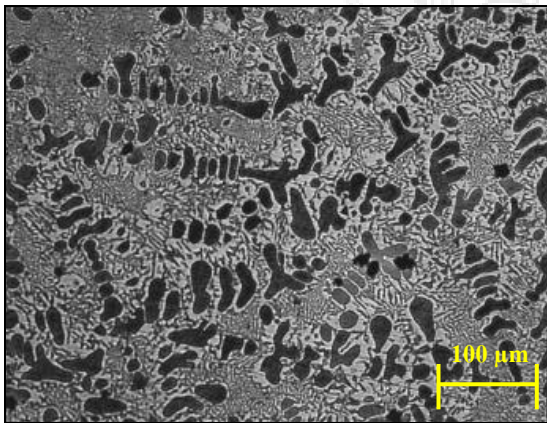
รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบหลังการอบที่อุณหภูมิ 600 650 และ 700 °C ตามลำดับ เวลาที่ใช้ในการอบ 10 นาที จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในเตา พบว่า โครงสร้างมีการกระจายตัวของเฟสและมีขนาดต่างๆ ไม่สม่ำเสมอ ทั้งนี้โครงสร้างหรือลักษณะเกรนของเนื้อวัสดุทดสอบแต่ละตัวแปรทดสอบมีโครงสร้างเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ และพบ Eutectic-phase ที่อุณหภูมิ 700 °C ดังรูปที่ 4.14 (ค) มีการกระจายตัวและมีปริมาณมากกว่าโครงสร้างของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 600 และ 650 °C ดังรูปที่ 4.14 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) อุณหภูมิ 600 °C



(ข) อุณหภูมิ 650 °C

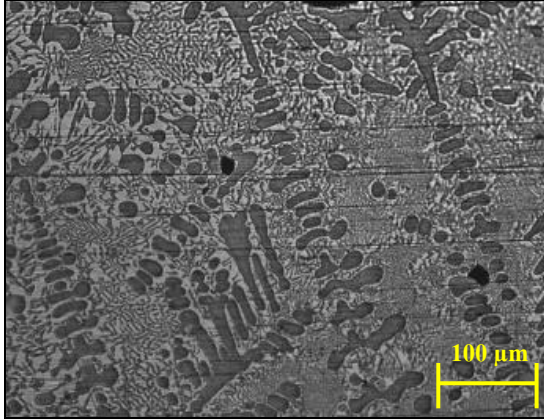


(ค) อุณหภูมิ 700 °C

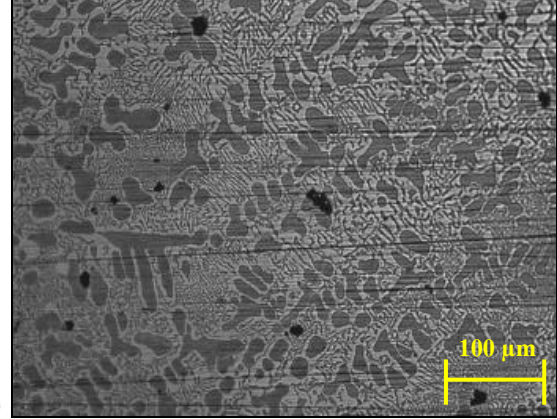
#### รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบหลังการอบที่เย็นตัวในอากาศ

รูปที่ 4.15 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบหลังทำการอบที่อุณหภูมิ 600 650 และ 700 °C ตามลำดับ ใช้เวลาในการอบคงที่ 10 นาที และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศที่อุณหภูมิห้องปกติ พบว่า โครงสร้างของเฟสต่างๆ โดยทั่วไปมีขนาดและกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ ประกอบด้วย  $\alpha$ -phase,  $\beta$ -phase และ Eutectic phase มีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 650 และ 700 °C แสดงดังรูปที่ 4.15 (ข) และ (ค) ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างไปจากโครงสร้างของ

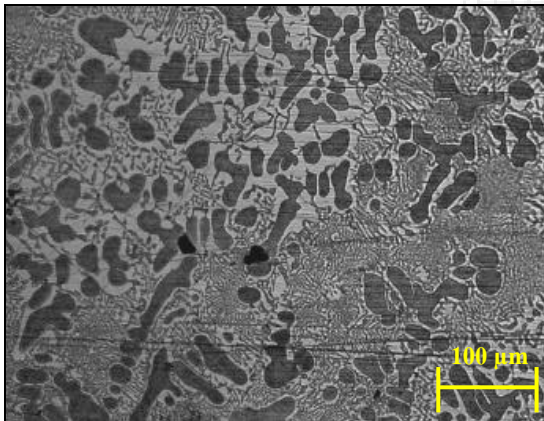
ชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 600 °C ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบ Eutectic phase ในปริมาณที่มาก ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการอบมีผลต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ทำให้เกิดเฟสต่างๆ มีลักษณะที่แตกต่างกัน



(ก) อุณหภูมิ 600 °C



(ข) อุณหภูมิ 650 °C



(ค) อุณหภูมิ 700 °C

#### รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบหลังการอบที่เย็นตัวในน้ำ

รูปที่ 4.16 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบเมื่อทำให้เย็นตัวในน้ำที่อุณหภูมิห้องปกติ พบว่า โครงสร้างมีเฟสต่างๆ คล้ายกับชิ้นงานทดสอบที่ทำให้เย็นตัวในอากาศ ดังที่ได้อธิบายแล้วข้างต้น ที่มีการกระจายตัวของเฟสต่างๆ ซึ่งลักษณะโครงสร้างทั่วไปจะมีความแตกต่างไปจากโครงสร้างของชิ้นงานทดสอบที่ปล่อยให้เย็นตัวในเตา และพบ  $\beta$ -phase มีขนาดใหญ่กว่าโครงสร้างของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิอื่นๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการเย็นตัวของชิ้นงานทดสอบที่ส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคในลักษณะที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือตะกั่ว ทำการอบที่อุณหภูมิ 600 650 และ 700 °C เวลาที่ใช้ในการอบ 10 นาที ปล่อยให้เย็นตัวในเตา เย็นตัวในอากาศ และเย็นตัวในน้ำที่อุณหภูมิห้อง

ปกติ ซึ่งเป็นกระบวนการชุบแข็งเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของเนื้อวัสดุทดสอบโลหะเงินเจือดำ พบว่า โครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยปัจจัยหรือตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมีผลที่สอดคล้องกับค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ จึงทำให้งานวิจัยนี้สามารถนำผลการทดลองไปประยุกต์และพัฒนาปรับปรุงใช้กับงานอุตสาหกรรมเครื่องประดับเรือนได้อย่างมีคุณภาพในอนาคต



## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของธาตุเจือทองแดงและดีบุกที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33 wt% AgCuSn ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์และทำการทดสอบเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

#### 5.1 สรุป

5.1.1 ผลจากการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลจากการทดสอบแบบเส้นลวดของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33Ag+41.57Cu+0.10Sn มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 0.36 MPa และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว 0.11% จากกระบวนการชุบแข็งทางความร้อนที่อุณหภูมิ 650 °C เวลาในการอบ 10 นาที ซึ่งปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศที่อุณหภูมิห้องปกติ

5.1.2 ผลการศึกษาค่าความแข็งของโลหะเงินเจือตะกั่ว 58.33Ag + 41.57Cu + 0.10Sn มีค่าสูงสุดเท่ากับ 105.12 HV อบที่อุณหภูมิ 600 °C เวลาในการอบ 10 นาที ซึ่งปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศที่อุณหภูมิห้องปกติ

5.1.3 โครงสร้างจุลภาคของเงินโลหะเจือตะกั่ว 58.33Ag + 41.57Cu + 0.10Sn เมื่อทำการอบปรับปรุงคุณสมบัติทางความร้อนและการชุบแข็งแบบต่างๆ พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบหลังปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ เกิดการเปลี่ยนแปลงจาก  $\beta$  phase ที่มีขนาดเล็กลงเป็นโครงสร้าง Eutectic phase ที่มี  $\alpha$ -phase และ  $\beta$ -phase ขนาดเล็กและละเอียด ซึ่งมีลักษณะสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคของเฟสไดอะแกรมสมดุลโลหะเงิน-ทองแดง

ผลจากการทดลองและวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบและโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการทดลองในสภาวะต่างๆ มีค่าที่เป็นไปตามมาตรฐานของเครื่องประดับเงินตามมาตรฐานอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับ ทั้งของในประเทศและต่างประเทศ

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรทำการศึกษาธาตุเจืออื่นๆ ที่ทำหน้าที่เป็นสวณผสมรองอีกหลายชนิดที่มีผลต่อสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค และระดับสีของโลหะเงินผสม 58.33% ที่ยังไม่ได้ทำการศึกษานั้นจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งที่ควรจะมีการศึกษาวิจัยอิทธิพลของโลหะผสม รองชนิดต่างๆ ที่สามารถเข้าไปในโลหะเงิน นอกเหนือจากทองแดง สังกะสี และดีบุก

5.2.2 อัตราส่วนผสมที่ใช้ อาจมีการเปลี่ยนแปลงมากหรือน้อยไปจากค่าที่กำหนด เพราะอัตราส่วนผสมของโลหะที่นำมาผสมนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการควบคุมคุณสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์

## บรรณานุกรม

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

### 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.

