บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะเงินบริสุทธิ์

เงินเป็นโลหะที่หายากและมีราคาสูง จึงถูกจัดอยู่ในกลุ่มโลหะมีค่า เช่นเดียวกับ ทองคำ โลหะเงินมีหมายเลขอะตอม 47 และสัญลักษณ์คือ Ag เงินเป็นโลหะทรานซิชันสีขาว มีสมบัติการนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดีมาก ในธรรมชาติอาจรวมอยู่ในแร่อื่นๆ หรืออยู่อิสระ เงินใช้ประโยชน์ในการทำเหรียญ เครื่องประดับ ภาชนะบนโต๊ะอาหาร และอุตสาหกรรมการถ่ายรูป [8]

โลหะเงินบริสุทธิ์เป็นโลหะที่มีสีขาวมันวาว สะท้อนแสงดี มีโครงสร้างผลึกเป็น FCC (Face Center-Cubic) สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนดี ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นที่อุณหภูมิห้อง แต่ในขณะที่โลหะเงินหลอมละลายในอากาศ ออกซิเจนจะแพร่เข้าไปได้มากกว่าปกติถึง 22 เท่า [9] จากบทความวิจัยของสมนึก วัฒนศรียกุล และคณะ [10] มีการอ้างอิงจากบทความอื่นถึงโลหะเงินบริสุทธิ์ว่ามีความแข็งต่ำ มีค่าประมาณ 26 วิกเกอร์ ทำให้เป็นรอยขีดข่วนง่าย เสียรูปทรงได้ง่าย ความสามารถในการยึดเกาะอัญมณีไม่ดี ดังนั้นในการทำเครื่องประดับนิยมใช้โลหะเงินผสม สมบัติทางกายภาพและทางกลที่สำคัญของโลหะเงินบริสุทธิ์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพและทางกลของโลหะเงินบริสุทธิ์ [8, 9]

สมบัติทางกายภาพและทางกล	ค่าที่วัดได้	หน่วย
ความหนาแน่น	10.5	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	962	องศาเซลเซียส
จุดเดือด	2,180	องศาเซลเซียส
ความแข็ง	26	วิกเกอร์
ความต้านทานแรงดึง	150	เมกะพาสคัล
ความเค้นคราก	28	เมกะพาสคัล
ค่ายังมอดูลัส	83	จิกะพาสคัล
การยืด	50	ร้อยละ

ในการศึกษาสมบัติทางกลของโลหะเงินนั้น จะต้องคำนึงถึงระดับความบริสุทธิ์ของโลหะเงิน โดยกำหนดให้โลหะเงินบริสุทธิ์จะต้องมีเนื้อเงินอย่างน้อยร้อยละ 99.95 โดยน้ำหนัก ปกติปริมาณของสารเจือปน (Impurities) แต่ละชนิดที่ผสมในเนื้อโลหะเงิน จะต้องมีปริมาณไม่เกินกำหนดมาตรฐาน ASTM B413-97a(2008) [11] ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณสารเจือปนในโลหะเงินบริสุทธิ์มาตรฐาน ASTM B413-97a(2008) [11]

สารเจือปน	ปริมาณสารเจือปนในโลหะเงินบริสุทธิ์ (ร้อยละ)	
	เงินร้อยละ 99.95	เงินร้อยละ 99.99
บิสมัท (Bismuth)	< 0.001	< 0.0005
ทองแดง (Copper)	< 0.040	< 0.0100
เหล็ก (Iron)	< 0.002	< 0.0010
ตะกั่ว (Lead)	< 0.015	< 0.0010
แพลเลเดียม (Palladium)	-	< 0.0010
ซีลีเนียม (Selenium)	-	< 0.0005
เทลลูเรียม (Tellurium)	-	< 0.0005

จากการทดลอง โดยนำโลหะเงินบริสุทธิ์ร้อยละ 99.97 โดยน้ำหนัก ไปทำการขึ้นรูปเย็นที่ปริมาณการขึ้นรูปต่างกัน พบว่า ความต้านแรงดึง การยืดตัว และความแข็งมีการเปลี่ยนแปลงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกลของโลหะเงินบริสุทธิ์ร้อยละ 99.97 ที่อัตราการขึ้นรูปต่างกัน [12]

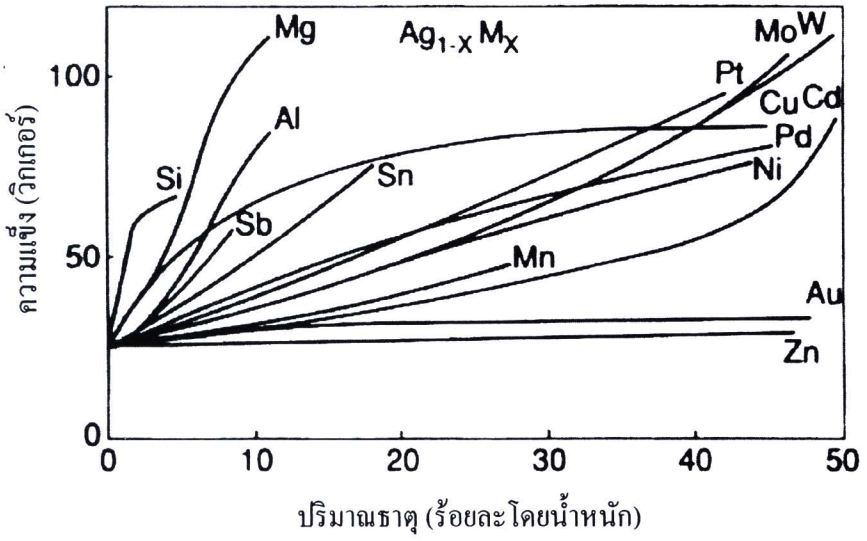
ปริมาณการขึ้นรูป (ร้อยละ)	ความต้านแรงดึง (เมกกะพาสคัล)	การยืดตัว (ร้อยละ)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
งานหล่อ	150	50	26
12	180	30	54
20	230	10	65
30	260	5	70
50	290	3	80
80	360	2	90

2.2 โลหะเงินสเตอร์ลิง

การผลิตเครื่องประดับเงินนิยมใช้โลหะเงินสเตอร์ลิง จากมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย มอก.21-2515 ให้ความหมายของโลหะเงินสเตอร์ลิง ว่าเป็นโลหะเงินที่มีธาตุอื่นผสมอยู่ไม่เกินร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนัก [2] ซึ่งธาตุผสมที่เพิ่มเข้าไปในโลหะเงินทำให้สมบัติด้านต่างๆ ของโลหะเงินเปลี่ยนแปลงไป เช่น ค่าความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิงจะมีค่า 70 วิกเกอร์ [13] จากรูปที่ 2.1 แสดงอิทธิพลของธาตุผสมที่มีผลต่อความแข็งของโลหะเงิน จะเห็นได้ว่าการเติมธาตุซิลิคอน แมกนีเซียม และอะลูมิเนียม ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 5 สามารถทำให้ความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิงเพิ่มมากขึ้น ในทางกลับกัน การเติมธาตุสังกะสี และทองในปริมาณไม่เกินร้อยละ 50 สามารถเพิ่มความแข็งได้ไม่มากนักหรือไม่เพิ่มขึ้นเลย [14]

ธาตุผสมที่เติมในโลหะเงินสเตอร์ลิง สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ธาตุผสมหลัก (Major Alloying - Elements) และธาตุผสมรอง (Minor Alloying Elements) โดยมีรายละเอียดดังนี้

- **ธาตุผสมหลัก** หมายถึง ธาตุที่ผสมลงไปในปริมาณมาก เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ตามสัดส่วนทางเคมี โดยทั่วไปนิยมเติมธาตุทองแดงลงไปในโลหะผสมเงินเพื่อเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงด้วยกลไกการเกิดสารละลายของแข็ง (Solid Solution Strengthening - Mechanism)
- **ธาตุผสมรอง** หมายถึง ธาตุผสมที่เติมลงไปในปริมาณน้อยๆ ไม่เกินร้อยละ 1 เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติเฉพาะด้านต่างๆ เช่น การเติมดีบุกในโลหะเงินสเตอร์ลิงด้วยปริมาณที่พอเหมาะ จะเป็นตัวลดออกซิเจนและเพิ่มการต้านทานความหมอง ธาตุผสมรองที่ผสมเข้าไปในโลหะเงิน ทำให้สมบัติทางกลของโลหะเงินเปลี่ยนไป ทั้งในด้านความแข็งและความแข็งแรง เช่น สังกะสี อินเดียม ซิลิคอน ดีบุก เป็นต้น อิทธิพลของธาตุผสมที่มีผลต่อโลหะเงินสเตอร์ลิงแสดงในตารางที่ 2.4



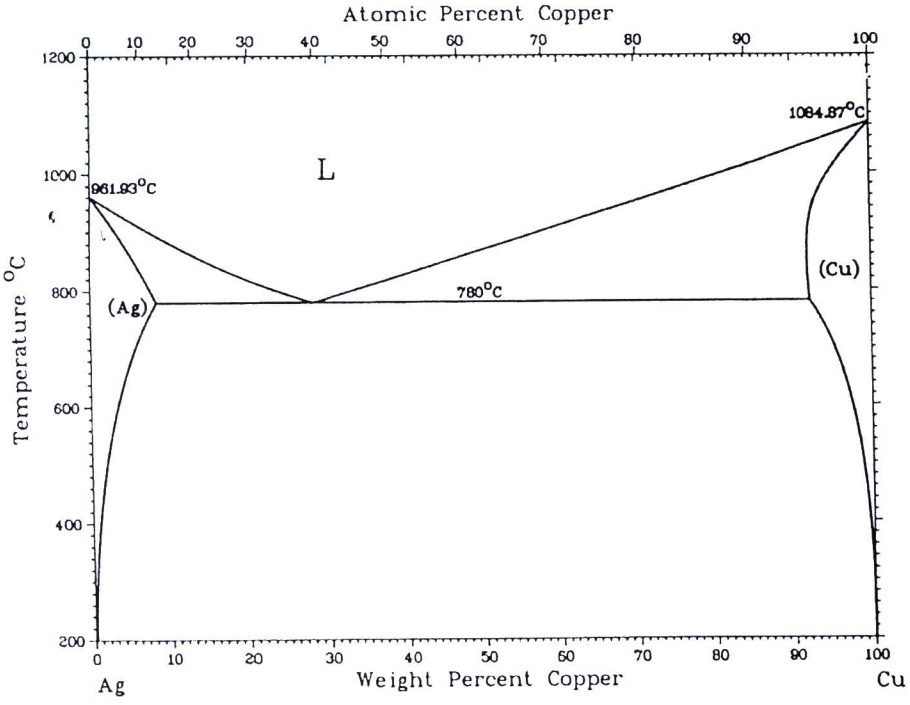
รูปที่ 2.1 อิทธิพลของธาตุผสมที่มีผลต่อความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิง [14]

ตารางที่ 2.4 อิทธิพลของธาตุผสมที่มีผลต่อโลหะเงินสเตอร์ลิง [15]

ธาตุ	สัญลักษณ์	อิทธิพลต่อสีของโลหะ (เมื่อผสมปริมาณมาก)	อิทธิพลต่อสมบัติของโลหะ
ทองคำ	Au	สีเหลือง	เพิ่มความแข็งแรงและต้านทานการหมอง
แพลทินัม	Pt	สีขาว	เพิ่มความแข็งแรงและต้านทานการหมอง
ทองแดง	Cu	สีแดงหรือชมพู	เพิ่มความแข็ง
สังกะสี	Zn	สีขาว	ลดการเกิดออกซิเดชัน (ขยายขนาดเกรน)
แพลเลเดียม	Pd	สีขาว	เพิ่มความแข็งแรงและต้านทานการหมอง
นิกเกิล	Ni	สีขาว	เพิ่มความแข็ง
ดีบุก	Sn	สีขาว	ลดจุดหลอมเหลวและต้านทานการหมอง
ซิลิคอน	Si	-	ลดการเกิดออกซิเดชัน (ขยายขนาดเกรน)

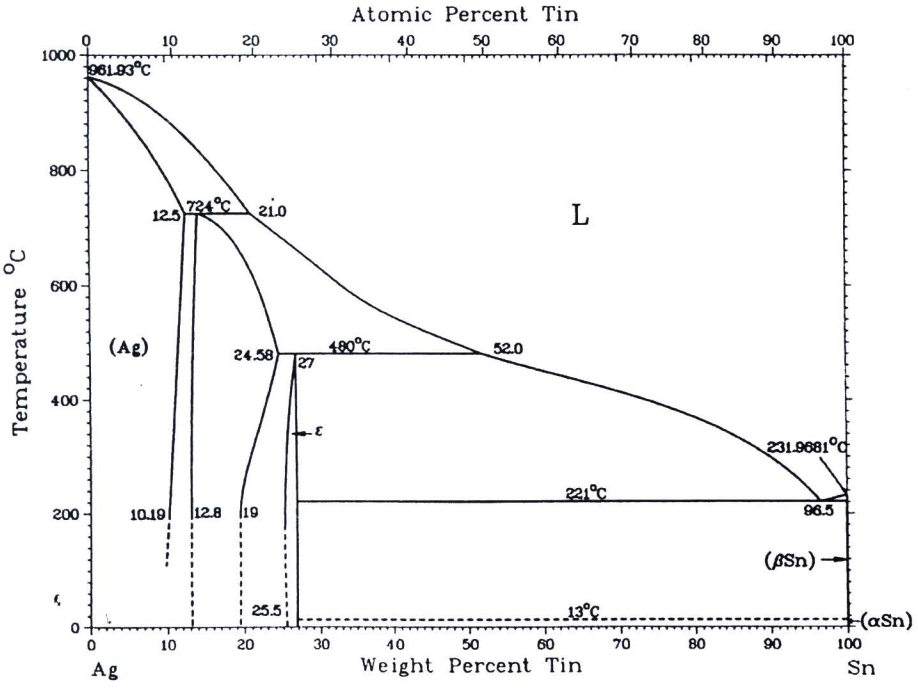
สำหรับการเติมธาตุผสมในโลหะเงินสเตอร์ลิงจะต้องพิจารณาความสามารถในการละลาย (Solubility) ของธาตุผสมจากแผนภาพสมดุลของธาตุผสมนั้นๆ ดังรูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพสมดุลของโลหะเงิน - ทองแดง จะเห็นว่าเงินมีจุดหลอมเหลว 962 องศาเซลเซียส ส่วนทองแดงมีจุดหลอมเหลว 1,084 องศาเซลเซียส ทองแดงสามารถละลายในเงินได้สูงสุดร้อยละ 8.8 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 779 องศาเซลเซียส เกิดเป็นสารละลายของแข็ง เรียกว่า เฟสแอลฟา (α - Phase) ซึ่งเป็นสารละลายของแข็ง

ที่มีเงินเป็นส่วนผสมหลัก (Ag-rich Solid Solution) ความสามารถในการละลายได้ของทองแดงจะลดลง เมื่ออุณหภูมิลดลงตามเส้นแสดงความสามารถในการละลาย (Solvus) ส่วนเงินสามารถละลายในทองแดงได้สูงสุดร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก เกิดเป็นสารละลายของแข็ง เรียกว่า เฟสบีตา (β - Phase) ซึ่งเป็นสารละลายของแข็งที่มีทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก (Cu-rich Solid Solution) การแข็งตัวอย่างช้าๆ ตามแผนภาพสมดุลจะเกิดเฟสที่มีสภาวะสมดุลเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ในการแข็งตัวในงานจริงจะเป็นการแข็งตัวที่เร็วกว่าการเกิดสภาวะสมดุล จึงทำให้เกิดโครงสร้างที่ไม่ได้อยู่ในสภาวะสมดุล



รูปที่ 2.2 แผนภาพเฟสสมดุลของโลหะเงิน - ทองแดง [16]

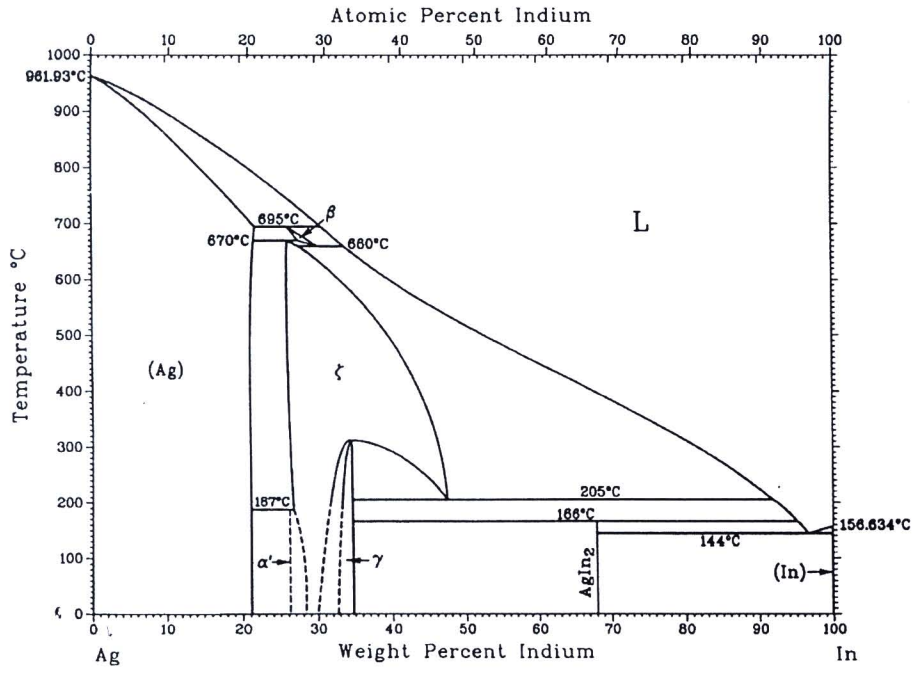
รูปที่ 2.3 แสดงแผนภาพเฟสสมดุลของโลหะเงิน-ดีบุก ธาตุดีบุกมีจุดหลอมเหลวประมาณ 232 องศาเซลเซียส สามารถละลายในเงินได้สูงสุดร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 724 องศาเซลเซียส ความสามารถในการละลายจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลงตามเส้นแสดงความสามารถในการละลาย ในทางกลับกันเงินไม่สามารถละลายได้ในดีบุก จากการสำรวจงานวิจัยพบว่า มีการนำดีบุกไปเติมในส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงแล้วช่วยเพิ่มความแข็งได้ [17]



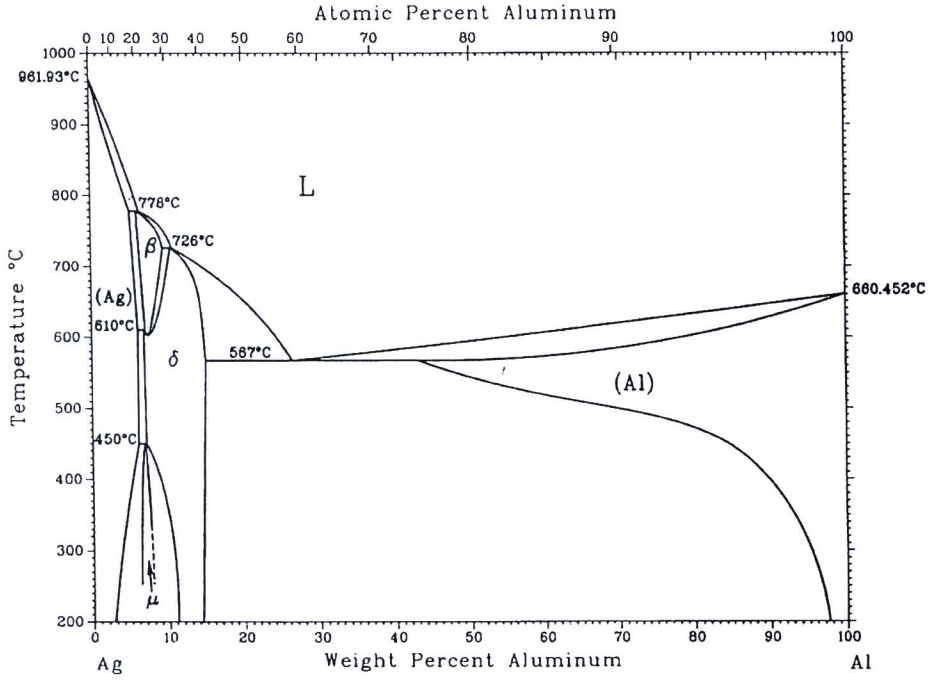
รูปที่ 2.3 แผนภาพเฟสสมดุลของโลหะเงิน-ดีบุก [16]

รูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพเฟสสมดุลของโลหะเงิน-อินเดียม ธาตุอินเดียมมีจุดหลอมเหลวประมาณ 156 องศาเซลเซียส สามารถละลายในเงินได้สูงสุดร้อยละ 21 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 595 องศาเซลเซียส ความสามารถในการละลายจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลงตามเส้นแสดงความสามารถในการละลาย ในทางกลับกันเงินไม่สามารถละลายได้ในอินเดียม เมื่อเติมอินเดียมในโลหะเงิน สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการเชื่อมประสานได้ดี และยังส่งผลให้โลหะผสมคงความมันวาว เพิ่มความต้านทานการหมองได้

รูปที่ 2.5 แสดงแผนภาพเฟสสมดุลของโลหะเงิน-อะลูมิเนียม อะลูมิเนียมมีจุดหลอมเหลวประมาณ 660 องศาเซลเซียส สามารถละลายในเงินได้สูงสุดร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 778 องศาเซลเซียส และไม่เกินร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิลดลง ความสามารถในการละลายของอะลูมิเนียมลดลง ในขณะที่เงินสามารถละลายในอะลูมิเนียมได้สูงสุดร้อยละ 58 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 567 องศาเซลเซียส จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การเติมอะลูมิเนียมในเงินสเตอร์ลิงทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น [6]



รูปที่ 2.4 แผนภาพเฟสสมดุลของโลหะเงิน-อินเดียม [16]

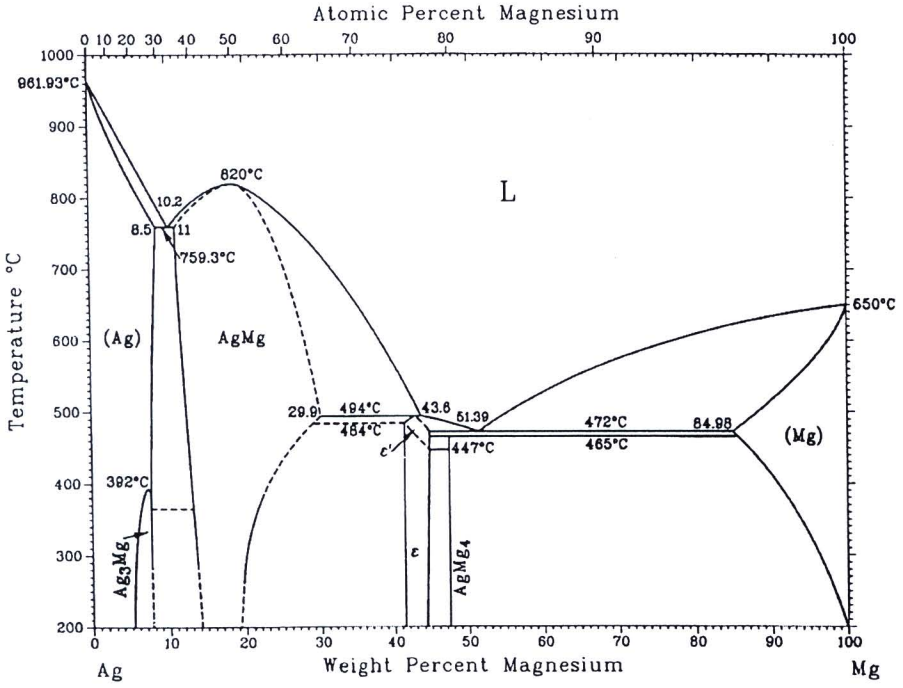


รูปที่ 2.5 แผนภาพเฟสสมดุลของโลหะเงิน-อะลูมิเนียม [16]

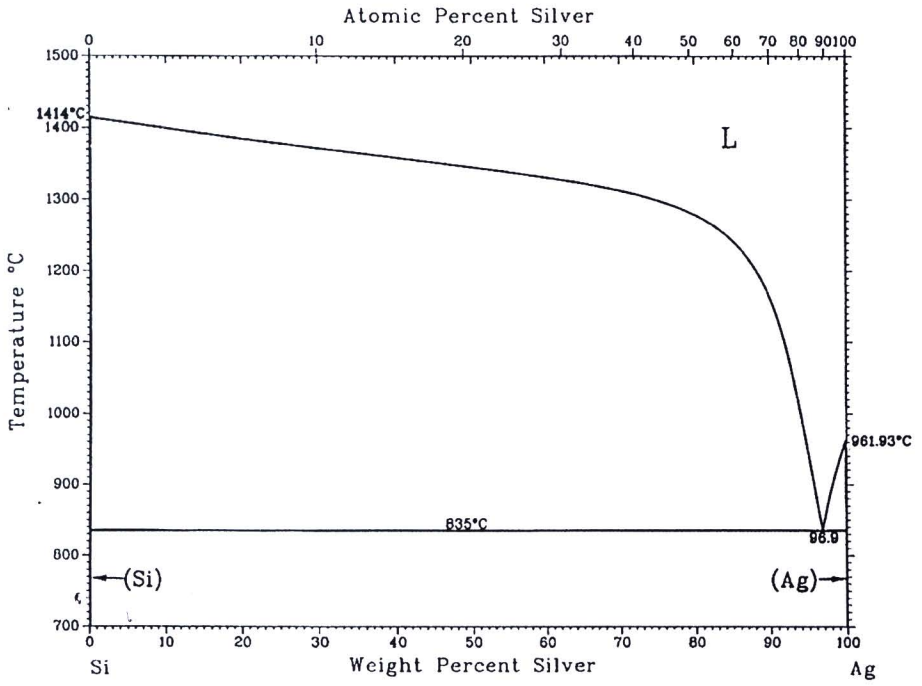
รูปที่ 2.6 แสดงแผนภาพเฟสสมดุลของโลหะเงิน-แมกนีเซียม ธาตุแมกนีเซียมสามารถละลายในเงินได้สูงสุดร้อยละ 8.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 759.3 องศาเซลเซียส ในทางกลับกันเงินสามารถละลายได้ในแมกนีเซียมได้สูงสุดร้อยละ 15.04 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 472 องศาเซลเซียส จากการศึกษางานวิจัยพบว่า มีการเติมแมกนีเซียมเพื่อเพิ่มความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิง [6]

รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพเฟสสมดุลของโลหะเงิน-ซิลิคอน ธาตุซิลิคอนแทบจะไม่สามารถละลายในโลหะเงินได้เลย และพบจุดยูเทคติกที่อุณหภูมิ 835 องศาเซลเซียส โดยมีส่วนผสมทางเคมีของเงินอยู่ร้อยละ 96.9 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังพบว่า โครงสร้างยูเทคติกประกอบด้วยเฟสเงินและเฟสซิลิคอน ซึ่งความสามารถในการละลายระหว่างกันของธาตุทั้งสองต่ำมาก ทำให้ไม่เกิดสารละลายของแข็งขึ้น

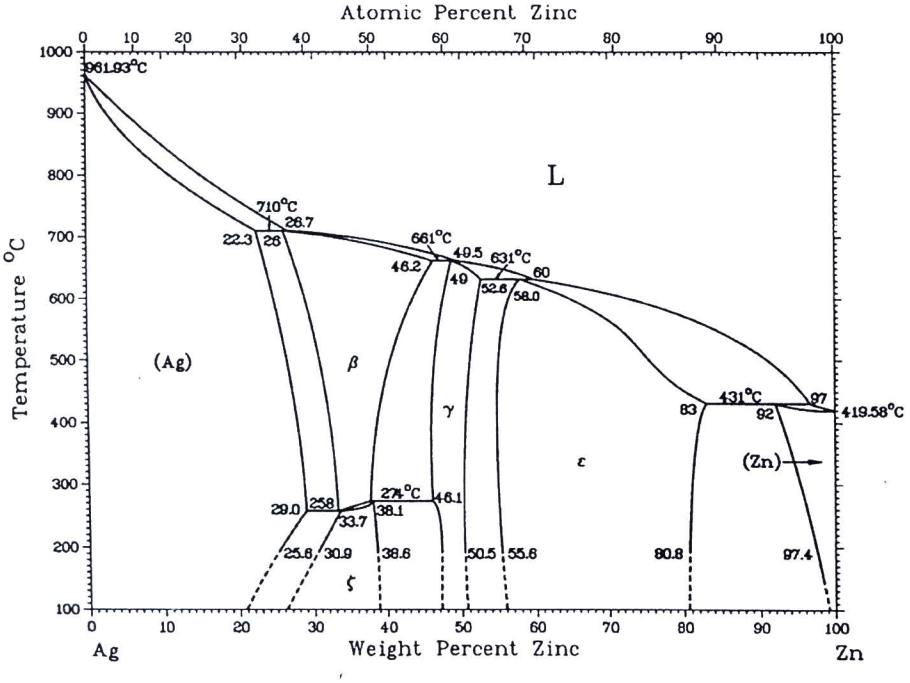
รูปที่ 2.8 แสดงแผนภาพเฟสสมดุลของโลหะเงิน-สังกะสี ธาตุสังกะสีมีจุดหลอมเหลวประมาณ 420 องศาเซลเซียส และสามารถละลายได้ในเงินประมาณร้อยละ 22.3 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 710 องศาเซลเซียส สังกะสีสามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ ช่วยลดการรวมตัวของโลหะเงินกับออกซิเจน ทำให้น้ำโลหะไหลตัวได้ดี มีสมบัติเป็นมันเงา จึงทำให้สามารถขัดเงาได้



รูปที่ 2.6 แผนภาพเฟสสมดุลของโลหะเงิน-แมกนีเซียม [16]



รูปที่ 2.7 แผนภาพเฟสสมดุลของโลหะเงิน-ซิลิคอน [16]



รูปที่ 2.8 แผนภาพเฟสสมดุลของโลหะเงิน-สังกะสี [16]

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

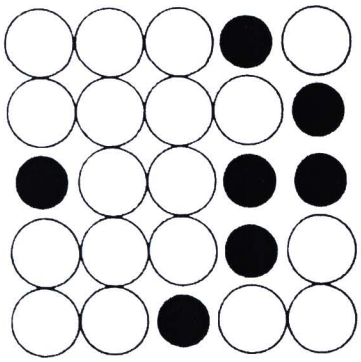
2.3 กลไกการเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงของวัสดุ

ความแข็งและความแข็งแรงของโลหะถูกควบคุมโดยจำนวนของดิสโลเคชัน (Dislocation) และความสามารถในการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน โลหะจะมีความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันถูกขัดขวาง การใช้กลไกการเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงของวัสดุมีหลักการโดยทั่วไป [18] ดังต่อไปนี้

2.3.1 การเพิ่มความแข็งด้วยการเกิดสารละลายของของแข็ง

เป็นกลไกการทำให้โลหะมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น โดยการเติมธาตุชนิดอื่นลงไปเป็นตัวถูกละลายในธาตุหลักที่เป็นตัวทำละลาย ธาตุที่เติมลงไปจะเกิดกลไกที่ทำให้เพิ่มความแข็งได้ 2 แบบ คือ

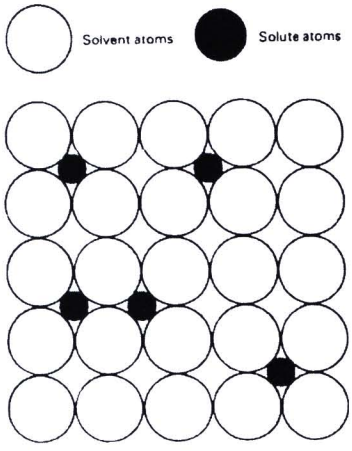
- **สารละลายของของแข็งแบบแทนที่ (Substitution Solid Solution)** มีกลไกการเกิดที่สำคัญ คือ ช่องว่างระหว่างอะตอม (Vacancy) ในตัวทำละลาย เมื่ออะตอมที่อยู่รอบช่องว่างของอะตอมของตัวมันเอง หรืออะตอมของธาตุอื่น เมื่อได้รับพลังงานที่มากพอจนทำให้เกิดการสั่นสะเทือน อะตอมจะเกิดการเคลื่อนที่เข้าไปแทนที่ช่องว่างได้พอดี ดังรูปที่ 2.9 ในการเกิดสารละลายของของแข็งทั้ง 2 แบบที่กล่าวมาแล้วนั้น อะตอมของธาตุที่มีขนาดต่างกันทำให้เกิดสนามความเครียด (Strain Field) ทำหน้าที่ในการช่วยขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ทำให้โลหะผสมมีความแข็ง และความแข็งแรงเพิ่มขึ้น [18]



รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดสารละลายแบบแทนที่ [18]

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 13 มิ.ย. 2555
เลขทะเบียน 246674
เลขเรียกหนังสือ

- **สารละลายของของแข็งแบบแทรก (Interstitial Solid Solution)** เกิดจากอะตอมของธาตุที่เติมลงไปสามารถเข้าไปแทรกอยู่ภายในโครงสร้างผลึกของตัวทำละลาย ซึ่งขนาดของอะตอมของตัวถูกละลายจะเล็กกว่าอะตอมของตัวทำละลาย จึงสามารถแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของอะตอมของตัวทำละลายได้ แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กลไกการเกิดสารละลายของแข็งแบบแทรกที่ [18]

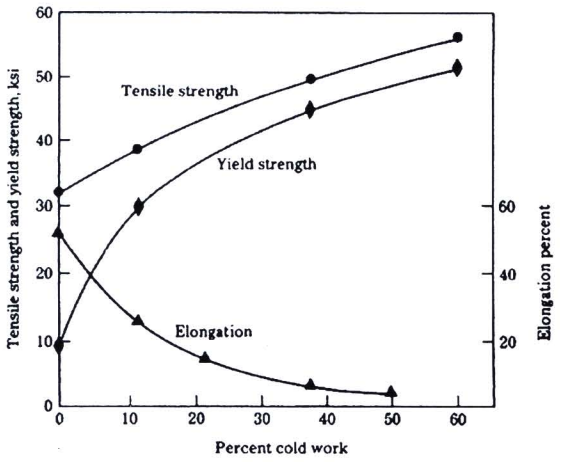
2.3.2 การเพิ่มความแข็งจากความเครียด (Strain Hardening)

การเพิ่มความแข็งจากความเครียดเป็นการทำให้โลหะบริสุทธิ์หรือโลหะผสม มีความแข็งเพิ่มขึ้นโดยการขึ้นรูปเย็น (Cold Working) หมายถึง การแปรรูปวัสดุที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ โดยในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปนั้น วัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและเกิดดิสโลเคชันเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก จนทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันด้วยกันเอง ส่งผลให้วัสดุมีความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่ความเหนียวจะลดลง [19] ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ร้อยละของการแปรรูปเย็น (Percent of Cold Work, %CW) สามารถคำนวณได้จากความหนาหรือพื้นที่ซึ่งเปลี่ยนแปลงไป [18] ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$\%CW = \frac{100(A_0 - A_d)}{A_0}$$

โดย A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นที่เกิดการแปรรูปขึ้น

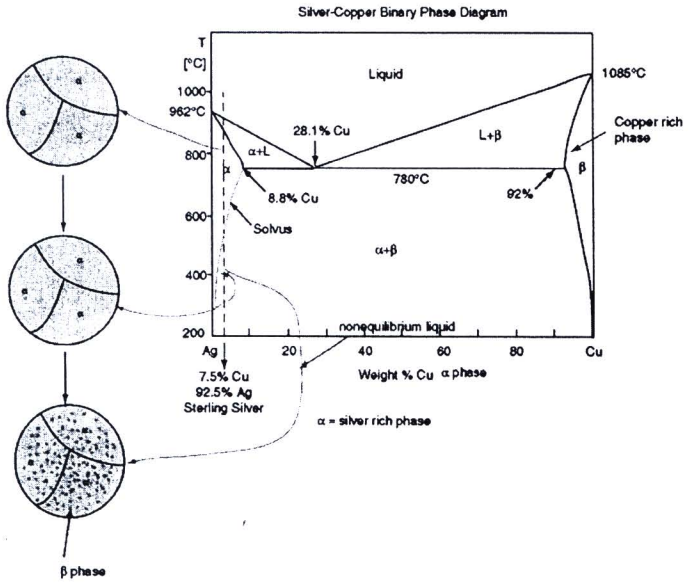
A_d คือ พื้นที่หน้าตัดหลังการขึ้นรูป



รูปที่ 2.11 ผลของปริมาณการแปรรูปเย็นต่อสมบัติทางกล [19]

2.3.3 การเพิ่มความแข็งด้วยการทำให้เกิดอนุภาคขนาดเล็ก

การเพิ่มความแข็งโดยการทำให้เกิดอนุภาคขนาดเล็ก คือ กลไกการเพิ่มความแข็งโดยทำให้อนุภาคขนาดเล็ก (Precipitated Phase) เกิดการตกตะกอนออกมาและเกิดการกระจายตัวในเนื้อพื้นอย่างสม่ำเสมอโดยอนุภาคขนาดเล็กนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน [17] กระบวนการทำให้เกิดอนุภาคขนาดเล็กของโลหะผสมเงิน-ทองแดง แสดงดังรูปที่ 2.12 โดยกระบวนการนี้ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ



รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน – ทองแดง [20]

- **การอบละลายเฟส (Solution Treatment)** เป็นการให้ความร้อนกับชิ้นงาน ซึ่งค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วงระหว่างเส้น Solvus และเส้น Solidus หลังจากนั้นแช่ไว้ที่อุณหภูมินั้น เพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีความสม่ำเสมอ วัตถุประสงค์ของขั้นตอนนี้ คือ การทำให้เฟสที่สองที่อยู่ตามขอบเกรนของเฟสแรก ละลายกลับเข้าไปในเฟสแรกทั้งหมด ดังนั้นเนื้อโลหะที่ได้จากการอบละลายเฟสจะเป็นเฟสสารละลายของของแข็งอิ่มตัว (Saturated Solid Solution)
- **การทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching)** เป็นการทำให้ชิ้นงานลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิที่อบละลายเฟสถึงอุณหภูมิห้อง เพื่อเป็นการยับยั้งการแพร่ของอะตอมธาตุผสมไม่ให้กลับมาที่ขอบเกรน หรือเป็นการขัดขวางไม่ให้โลหะผสมเปลี่ยนแปลงตามแผนภูมิสมดุล ทำให้ชิ้นงานเป็นสารละลายของของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (Super Saturated Solid Solution)
- **การบ่มแข็ง (Aging)** เป็นการสร้างอนุภาคขนาดเล็ก และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากในการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว โลหะผสมกลายเป็นสารละลายของของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดซึ่งไม่เสถียร เมื่ออบที่อุณหภูมิเหมาะสมจะทำให้เฟส θ' ตกตะกอนในเฟสแอลฟา (α) โดยจะเป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่ถ้าบ่มนานเกินไป (Over Ageing) จะทำให้ขนาดของเฟส θ' ใหญ่ขึ้นจนค่อยๆ เปลี่ยนเป็นเฟส θ ทำให้ความแข็งและความแข็งแรงลดลง

2.4 การหล่อโลหะ

การหล่อโลหะ (Casting) เป็นกระบวนการขึ้นรูปโดยการเทโลหะที่หลอมเหลวลงในโพรงแบบแม่พิมพ์ และเมื่อโลหะเกิดการแข็งตัวแล้วจึงถอดแม่พิมพ์ออกแล้วตกแต่ง การหล่อเครื่องประดับในปัจจุบันใช้วิธีการหล่อแบบแทนที่ขี้ผึ้ง (Investment Casting) และใช้วิธีเทน้ำโลหะเข้าสู่โพรงแบบแม่พิมพ์ซึ่งมีอยู่ 2 วิธี ได้แก่ การใช้แรงเหวี่ยงจากการหมุนของแม่พิมพ์ดันน้ำโลหะเข้าไปในโพรงแบบแม่พิมพ์ปูน (Centrifugal Casting) กับใช้ระบบสุญญากาศ (Vacuum Casting) ดูดน้ำโลหะเหลวเข้าสู่โพรงแบบแม่พิมพ์ปูนทำให้เนื้อชิ้นงานแน่นและมีความละเอียดของงานมาก [21]

หลักการหล่อเหวี่ยงโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง อาศัยหลักการของการมัดก้อนหินไว้ที่ปลายเชือกแล้วจับปลายเชือกอีกด้านหนึ่งและออกแรงเหวี่ยงให้ก้อนหินหมุนไปรอบๆ เชือกจะตึงจนเป็นเส้นตรง ขณะเดียวกันก้อนหินก็จะพยายามพุ่งออกไปในทิศทางตรงข้ามกับจุดหมุนซึ่งเรียกว่า "แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง" [22] การประยุกต์ใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางมาใช้ในการหล่อโลหะจะทำเป็นคานตรงจุดหมุนที่กึ่งกลางคาน ปลายคานด้านหนึ่งวางแบบปูนหล่อที่มีโพรงแบบภายใน ถัดมาเป็น

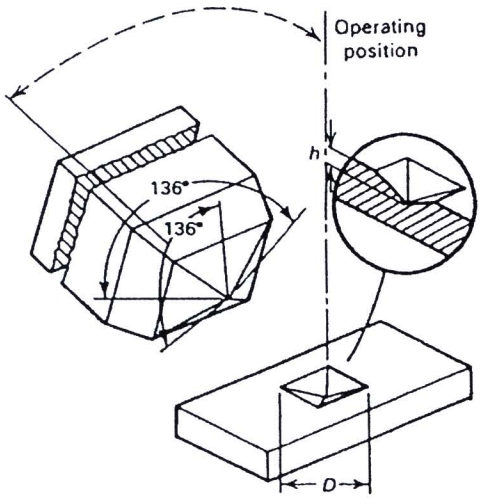
เบ้าหลอมสำหรับใส่น้ำโลหะ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งมีน้ำหนักสำหรับถ่วงให้คานนี้สมดุล จากนั้นจึงออกแรงหมุนคานนี้ แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นจะทำให้น้ำโลหะที่เป็นของเหลวพุ่งเข้าไปในโพรงแบบ

หลักการหล่อโดยใช้ระบบสุญญากาศ เป็นวิธีการที่พัฒนามาจากการใช้แรงโน้มถ่วงของโลกมาช่วยในการหล่อโลหะ เริ่มจากการเทน้ำโลหะลงในโพรงแบบปูนหล่อโดยตรง แรงดึงดูดของโลกจะดึงให้น้ำโลหะไหลลงไปในโพรงแบบ ซึ่งเหมาะกับชิ้นงานขนาดใหญ่ ไม่มีลวดลายซับซ้อนมากนัก แต่จะไม่เหมาะสำหรับชิ้นงานเครื่องประดับที่มีขนาดเล็ก และมีลวดลายซับซ้อนเพราะน้ำโลหะที่ไหลลงสู่โพรงแบบด้วยแรงดึงดูดของโลก จะไม่สามารถไหลแทรกไปตามลวดลายที่ละเอียดได้ดีเท่าที่ควร จึงมีการประยุกต์นำระบบสุญญากาศเข้ามาช่วยในการหล่อลักษณะนี้ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยการดูดอากาศที่อยู่ในโพรงแบบออกจนหมด ทำให้ในโพรงแบบมีสภาพเกือบเป็นสุญญากาศ ในขณะที่บรรยากาศภายนอกโพรงแบบยังมีแรงดันเป็นปกติ คือ 14.7 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (1 บาร์) [23] ดังนั้นเมื่อเทน้ำโลหะเข้าไปในโพรงแบบ น้ำโลหะจะไหลไปตามรายละเอียดเล็กๆ ได้ดี เนื่องจากภายในโพรงแบบไม่มีแรงดันอากาศต้านการไหลของน้ำโลหะ ทำให้น้ำโลหะไหลลงไปในโพรงแบบด้วยแรงดึงดูดของระบบสุญญากาศ เครื่องหล่อขึ้นรูประบบสุญญากาศที่ใช้กันโดยทั่วไปในการผลิตเครื่องประดับมี 2 ลักษณะ คือ เครื่องหล่อโลหะระบบสุญญากาศแบบธรรมดา และเครื่องหล่อโลหะระบบสุญญากาศแบบควบคุมบรรยากาศ

2.5 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็ง เป็นการวัดความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ซึ่งอธิบายถึงสภาพหรือสมบัติของวัสดุ ในแง่ความต้านทานต่อแรงทางกลที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทรงหรือขนาดอย่างถาวร การวัดความแข็งมีหลายสเกล เช่น การวัดความแข็งสเกลร็อคเวล (Rockwell Test) บริเนลล์ (Brinell Test) และวิกเกอร์ (Vicker Test) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การวัดความแข็งสเกลวิกเกอร์ เนื่องจากชิ้นงานที่ทดสอบมีขนาดเล็ก มีความหนาไม่เกิน 5 มิลลิเมตร

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ลักษณะหัวกดเป็นเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีมุมยอด 136 องศา การทดสอบชนิดนี้มีช่วงของค่าความแข็งที่กว้าง ทำให้สามารถเลือกใช้ได้หลายวัสดุ ค่าความแข็งที่ได้สามารถหาได้จากหลักการของแรงที่กระทำต่อพื้นที่รอยกด ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ลักษณะหัวกด รอยกดและการวัดขนาดของเส้นทแยง [24]

ค่าความแข็งสามารถคำนวณได้จากสูตร [24]

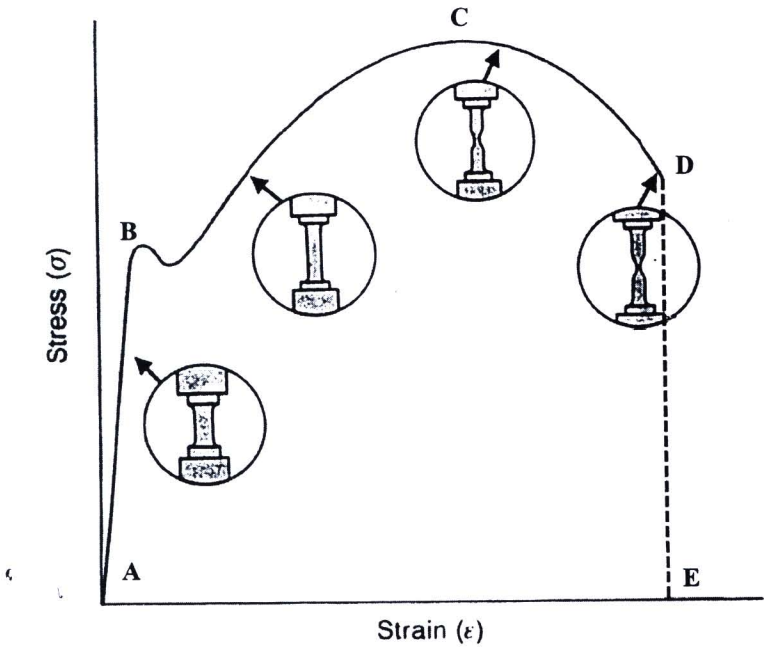
$$HV = \frac{2P\sin(136^\circ/2)}{d^2} = 1.8544\,\frac{P}{d^2}$$

โดยที่ P คือ น้ำหนักที่ใช้กดในหน่วยกิโลกรัม

d คือ ขนาดเส้นทแยงมุมของรอยกดในหน่วยมิลลิเมตร

2.6 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบวัสดุเพื่อหาค่าความต้านแรงดึงของวัสดุ ทำได้โดยนำชิ้นงานที่มีขนาดมาตรฐานมาดึงจนขาดในระยะเวลาสั้นๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นไว้ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด แสดงในรูปที่ 2.14 ค่าที่ได้จากการทดสอบนี้บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านแรงที่มากระทำชิ้นงานจนเกิดความเสียหายและเสียรูป ขนาดและรูปร่างของชิ้นงานที่ทดสอบจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ มาตรฐานของการทดสอบมีหลายแบบ เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials), BS (British Standards), JIS (Japanese Industrial Standards) และ มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) เป็นต้น ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้ พร้อมกับกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วย



รูปที่ 2.14 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด [25]

ในการดึงชิ้นงานโลหะ ช่วงแรกจากจุด A ถึงจุด B โลหะจะเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติก (Elastic - Deformation) แต่หากปลดแรงที่กระทำออกไป ชิ้นงานจะกลับสู่ความยาวเริ่มต้น ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นแบบเส้นตรงในช่วงของอิลาสติก ค่าความชันของกราฟในช่วงนี้จะเรียกว่าค่า Modulus of Elasticity หรือค่า Young's Modulus ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงของพันธะระหว่างอะตอมของโลหะหรือโลหะผสม จุด B เป็นบริเวณที่กราฟเกิดการเปลี่ยนแปลงจากช่วงอิลาสติกเป็นช่วงเสียรูปแบบถาวร เรียกบริเวณนี้ว่าจุดคราก (Yield Point) ค่าความเค้นที่จุดนี้มีความสำคัญในการออกแบบทางวิศวกรรม

สำหรับวัสดุบางชนิดที่ไม่มีจุดครากได้มีการกำหนดค่าความเค้นที่ค่า Offset Yield Point ของค่าความเครียดร้อยละ 0.2 ในบริเวณสูงสุดของกราฟที่จุด C เรียกว่า ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) เป็นจุดที่วัสดุเกิดการคอด (Necking) ของพื้นที่หน้าตัด (ในกรณีที่วัสดุเหนียว) ก่อนที่วัสดุจะเกิดความเสียหาย ส่วนค่าที่บ่งบอกถึงความอ่อนตัวของโลหะนั้นสามารถพิจารณาได้จากค่าร้อยละการยืดตัวซึ่งเป็นค่าระหว่างจุด A ถึงจุด E โดยโลหะยิ่งอ่อนแสดงว่ามีร้อยละการยืดตัวมาก [26]

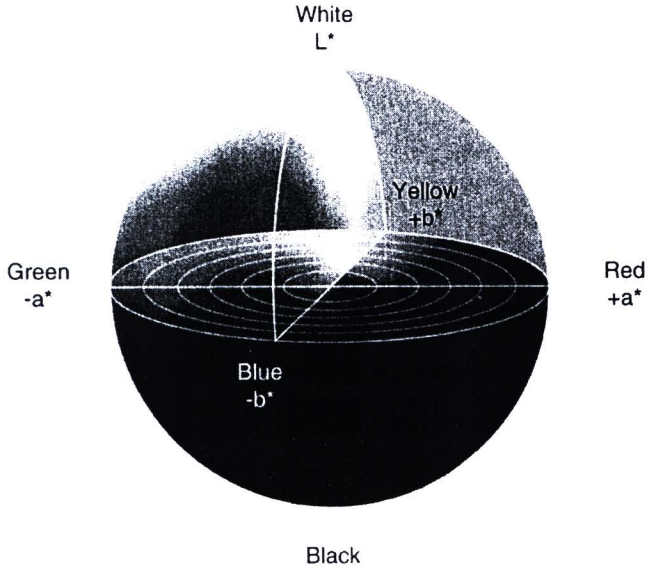
2.7 ความต้านทานการหมองของโลหะเงินสเตอร์ลิง

การหมอง (Tarnish) ที่ผิวของเงินสเตอร์ลิง เกิดขึ้นเนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเงินกับสารประกอบของซัลเฟอร์ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) หรือซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เป็นต้น ทำให้เกิดสารประกอบซัลไฟด์ของเงินขึ้น ในเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสมของโลหะเงินมากกว่าร้อยละ 83 จะเกิดชั้นฟิล์มของซิลเวอร์ซัลไฟด์ได้ [27] ซึ่งสารประกอบของชั้นฟิล์มที่มีซิลเวอร์ซัลไฟด์เป็นองค์ประกอบหลักนั้น จะทำให้ผิวชิ้นงานเป็นสีน้ำตาล สีน้ำตาลอมเขียว (Greenish-brown) จนถึงสีดำ โดยขึ้นกับชั้นความหนาของฟิล์มที่เกิดขึ้น นอกจากนี้เมื่อมีความชื้นปนอยู่กับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในปริมาณที่เข้มข้นสูง ฟิล์มของสารประกอบซัลไฟด์จะมีซัลเฟต (Ag_2SO_4) ปนอยู่ด้วย [28]

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีการเติมธาตุบางชนิดเพื่อไปปรับปรุงสมบัติด้านความต้านทานการหมองหรือการเกิดออกไซด์ของทองแดง ธาตุที่เติมลงไปจะเกิดเป็นชั้นฟิล์มบางที่ผิว ทำหน้าที่ป้องกันการทำปฏิกิริยากับบรรยากาศที่มีซัลเฟอร์ปะปนอยู่ อาทิเช่น การเติมโครเมียม แทนทาลัม ไทเทเนียม และทอเรียม เป็นต้น โดยเติมไม่เกินร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ลงในเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสม Ag-Cu, Ag-Au และ Ag-Cu-Au ทำให้เกิดเป็นชั้นฟิล์มบางๆ ที่ผิวของเงินสเตอร์ลิง และไม่ทำให้สมบัติด้านอื่นๆ แย่ลง [29] การเติมปริมาณแมงกานีสร้อยละ 1.3-3.0 โดยน้ำหนัก สามารถเพิ่มความต้านทานการหมอง แต่ในทางกลับกันปริมาณแมงกานีสที่สูงกว่าร้อยละ 1.7 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้สมบัติทางกลต่ำลง [30] การเติมดีบุกร้อยละ 0.01-0.03 โดยน้ำหนัก ช่วยเพิ่มความต้านทานการหมองและเพิ่มความแข็ง ส่วนการเติมอินเดียมร้อยละ 0.03-0.05 โดยน้ำหนัก ทำให้ขนาดเกรนลดลง และช่วยลดแรงตึงผิว (Wetability) ของน้ำโลหะ และการเติมซิลิคอนสามารถลดการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ลดรูพรุนในงานหล่อ และช่วยเพิ่มความแข็ง ปริมาณที่เติมอยู่ระหว่างร้อยละ 0.5-0.9 โดยน้ำหนัก [31] แต่การเติมซิลิคอนที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มสมบัติทางกลควรเติมปริมาณร้อยละ 0.02-0.20 โดยน้ำหนัก ถ้าเติมมากกว่าร้อยละ 0.20 โดยน้ำหนัก จะทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายตามขอบเกรน ทำให้มีความเปราะมาก [12]

โดยสรุป การป้องกันไม่ให้เงินสเตอร์ลิงสัมผัสกับอากาศจนเกิดการหมองทำได้โดย (1) เคลือบผิวเงินสเตอร์ลิงด้วยโลหะที่ทนการหมองได้ดี (2) ห่อหุ้มผิวหรือควบคุมบรรยากาศไม่ให้มีซัลเฟอร์ และ(3) ผสมด้วยธาตุผสมที่ช่วยให้ทนการหมองได้ดี สำหรับวิธีการกำจัดฟิล์มของการหมองสามารถทำได้โดย การเผาที่อุณหภูมิ 350 - 600 องศาเซลเซียส หรือ การทำ Electrolysis ในกรณีที่เป็นฟิล์มบางๆ แต่ถ้าความหนาของฟิล์มมากจะต้องใช้วิธีขัดละเอียดจึงจะสามารถกำจัดออกได้ [32]

การทดสอบการหมองของโลหะเงินหรือโลหะเงินสเตอร์ลิง เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงสีโดยใช้มาตรฐานของ CIE (The Commission International Del'Eclairage) และระบบ L*a*b* ซึ่งเป็นระบบสีที่ครอบคลุมทุกสีที่ตามนุษย์มองเห็น ในระยะแรก CIE ได้กำหนดสเกลการวัดสีเป็น X-Y-Z ซึ่งใช้บรรยายสีแดง (**R**ed) เขียว (**G**reen) และน้ำเงิน (**B**lue) แต่เนื่องจากระบบสีดังกล่าวไม่สามารถบรรยายถึงลักษณะความมืด-สว่างของสีได้ CIE ได้พัฒนาต่อมาเป็นระบบ X-Y-L ซึ่งบรรยายถึงค่าสีแดง สีเขียว และความสว่าง (Lightness) อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวก็ยังขาดส่วนที่บรรยายถึงค่าสีน้ำเงิน CIE จึงได้พัฒนาระบบสีจนเป็นระบบที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันคือระบบ L*a*b* ซึ่งเป็นระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ ลักษณะการบรรยายสีของ CIE แสดงในรูปที่ 2.15 โดยที่แกน L* จะบรรยายถึงความสว่าง จากค่า +L* แสดงถึงสีขาวจนไปถึง –L* แสดงถึงสีดำ แกน a* จะบรรยายถึงสีเขียว -a* ไปจนถึงสีแดง +a* ส่วนแกน b* จะบรรยายถึงสีน้ำเงิน -b* ไปยังสีเหลือง +b* ส่วนในการวัดค่าต่างๆ จะอาศัยหลักการสะท้อนแสงจากผิวของวัตถุ โดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีก่อนและหลังการทดสอบของโลหะเงินสเตอร์ลิง ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ส่วนผสม ความละเอียดของผิว โครงสร้างของโลหะผสม และเวลาที่ใช้ในการทดสอบ เป็นต้น



รูปที่ 2.15 ปริภูมิสีระบบ CIELAB [33]

ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีและแสง อาจจะวิเคราะห์ได้ด้วยสายตาโดยตรง แต่เมื่อต้องการทราบค่าที่บอกเชิงปริมาณก็สามารถใช้เครื่องวัดค่าสี โดยใช้หลักการวัดค่า L*, a* และ b* จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงของสีเทียบกับค่ามาตรฐาน หรือค่าสีของชิ้นงานก่อนการทดสอบตามสมการ [34]

$$DE^* = \sqrt{\left(L_2^* - L_1^*\right)^2 + \left(a_2^* - a_1^*\right)^2 + \left(b_2^* - b_1^*\right)^2}$$

โดยที่ L_1^* และ L_2^* คือ ค่าความสว่างของชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบตามลำดับ

a_1^* และ a_2^* คือ ค่าสีแดง-เขียวของชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบตามลำดับ

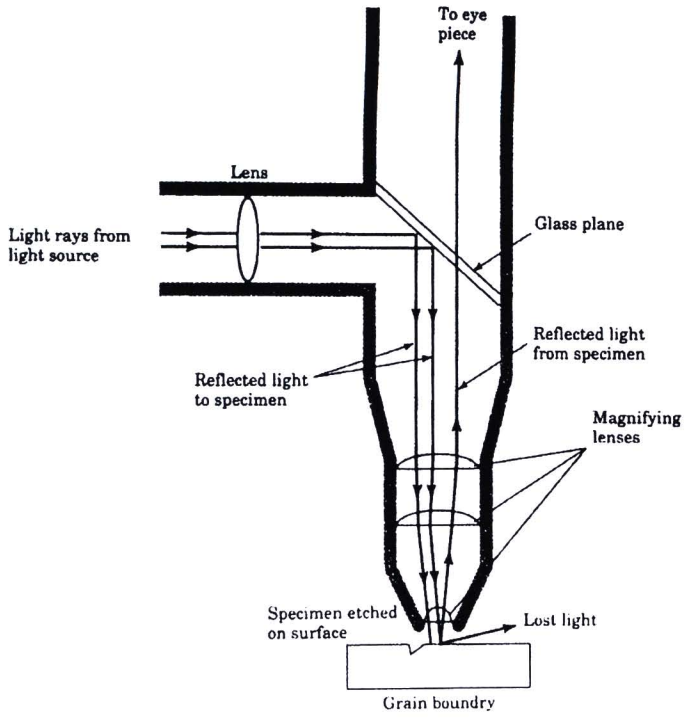
b_1^* และ b_2^* คือ ค่าสีน้ำเงิน-เหลืองของชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบตามลำดับ

2.8 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค เป็นการศึกษาโครงสร้างเล็กๆ ของโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อขยายดูรูปร่างของเกรน อนุภาคที่เกิดขึ้น หรือสิ่งเจือปนต่างๆ ที่อยู่ในเนื้อโลหะหลังผ่านกระบวนการต่างๆ สามารถแบ่งการตรวจสอบโครงสร้างเป็น 2 แบบ คือ แบบมหภาค สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือใช้กล้องจุลทรรศน์ในการตรวจสอบ โดยจะมีกำลังขยายไม่เกิน 50 เท่า สามารถมองเห็นรอยร้าว รูพรุน หรือลักษณะการเชื่อมได้ ส่วนการตรวจสอบโครงสร้างแบบจุลภาคจะใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 50 เท่าขึ้นไป เพื่อดูลักษณะของเกรน หรือวัดขนาดเกรน เป็นต้น

กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่อาศัยแสงจากแหล่งกำเนิดสะท้อนผ่านเลนส์วัตถุและตกกระทบบนผิวหน้าของชิ้นงานที่ผ่านการขัดมันมาอย่างดี และสะท้อนผ่านกลับเข้าไปในเลนส์วัตถุและผ่านเข้าสู่ช่องมองภาพ จากหลักการทำงานของกล้องชนิดนี้จึงเป็นที่มาของชื่อกล้องจุลทรรศน์แสงสะท้อน (Reflected Light Microscope) หรือเรียกว่ากล้องจุลทรรศน์สำหรับงานโลหะวิทยา (Metallographic Microscope) [35]

จากรูปที่ 2.16 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของกล้องจุลทรรศน์แสง แหล่งกำเนิดแสงใช้หลอดไฟแรงดันต่ำไส้ทำจากทังสเตน แสงสว่างที่ออกมาจะวิ่งเข้าเลนส์ ซึ่งทำหน้าที่รวมแสงอยู่ในตำแหน่งของทางเดินแสง แล้ววิ่งไปกระทบกับผิวแก้ว ทำให้แสงสะท้อนเป็นมุม 90 องศา วิ่งไปกระทบกับชิ้นงานแล้วสะท้อนกลับเข้าชุดเลนส์ขยายตัวล่าง ซึ่งทำหน้าที่ในการรับแสงที่สะท้อนเข้ามาเกิดเป็นรูปภาพขึ้น ลำแสงที่ผ่านการขยายจะถูกส่งไปขยายอีกครั้งที่ชุดเลนส์ตัวบนก่อนที่จะผ่านเข้าสู่ตาของผู้ตรวจสอบ

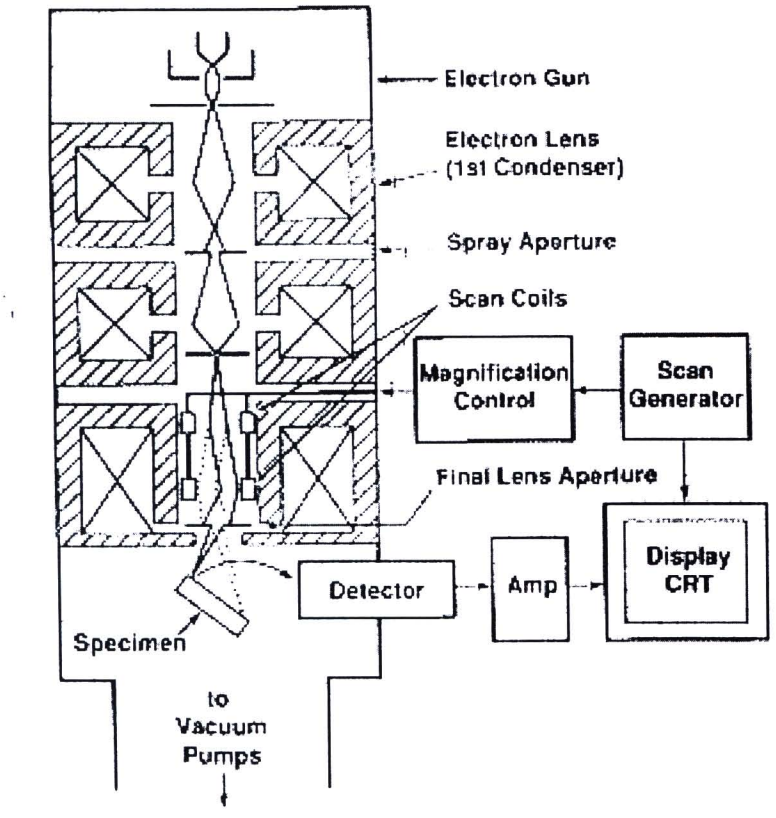


รูปที่ 2.16 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แสง [36]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ขยายวัตถุได้เช่นเดียวกับกล้องจุลทรรศน์แบบแสง สามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพได้มากกว่ากล้องจุลทรรศน์แสง เนื่องจากมีกำลังแยกภาพ (Resolution) สูงกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะอุปกรณ์ทั้งสองใช้แหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นต่างกัน กล้องจุลทรรศน์แบบแสงใช้คลื่นแสง ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 นาโนเมตร ทำให้ไม่สามารถขยายวัตถุที่เล็กกว่า 0.2 ไมครอน ส่วนกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะใช้สมบัติของคลื่นอิเล็กตรอน ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่า ทำให้มีอำนาจแยกแยะได้มากถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบๆ ได้ ทำให้ได้ภาพที่มีความชัดลึกสูง นอกจากนี้ยังสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่นได้ เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) เพื่อให้ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดของธาตุองค์ประกอบทางเคมี

ส่วนประกอบที่สำคัญและลักษณะการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงในรูปที่ 2.17 อิเล็กตรอนถูกสร้างขึ้นโดยใช้แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Source) หรือ ปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) โดยอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ ซึ่งภายในมีสภาพเป็นสุญญากาศด้วยความต่างศักย์ 0-30 กิโลโวลท์ (kV) โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูก

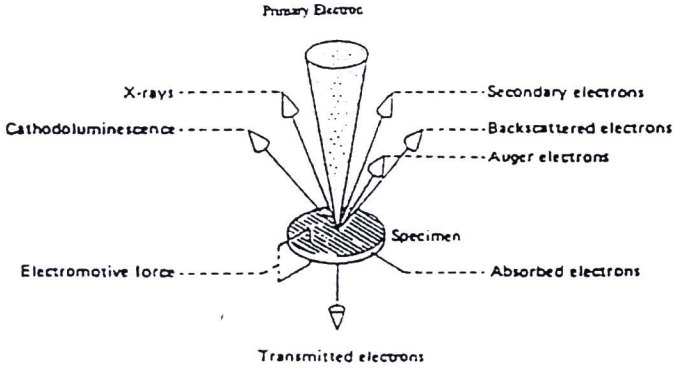
ควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Lens) 2 ชุดหรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะควบคุมโดย ช่องเปิด (Aperture) ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กันตามลักษณะการใช้งาน เลนส์คอนเดนเซอร์อันแรก (First Condenser Lens) นับเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญสูงสุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์ของอิเล็กตรอน (Electron Optics) เนื่องจากเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนที่ส่งมาจากแหล่งกำเนิดให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective Lens) ซึ่งเป็นเลนส์ที่อยู่บริเวณช่องเปิดสุดท้าย (Final Lens Aperture) ทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิวของวัตถุเป้าหมายโดยมีคอยล์กวาดภาพ (Scan Coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนบนผิววัตถุในกรอบ 4 เหลี่ยม คล้ายกับการกวาดภาพบนจอโทรทัศน์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างซับซ้อนในเนื้อสสารของวัตถุตัวอย่างจะให้สัญญาณต่าง ๆ ออกมาหลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทจะถูกตรวจจับและนำไปแสดงผลต่อไป [37]



รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบและลักษณะการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด [37]

สัญญาณอิเล็กตรอนในลักษณะต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยา แสดงดังรูปที่ 2.18 โดยสัญญาณที่นำมาใช้ประโยชน์ ได้แก่

- **อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons, SE)** เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary - Electrons) ไปชนอิเล็กตรอนที่ผิวตัวอย่างหลุดออกมาโดยจะหลุดออกจากผิวตัวอย่างที่ความลึกจากพื้นผิวไม่เกิน 10 นาโนเมตร ความเข้มของอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะขึ้นกับมุมที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิตกใส่และสภาพพื้นผิวตัวอย่าง จะให้ภาพที่มีรายละเอียดสูง ภาพที่ได้เรียกว่า Secondary Electron Image (SEI)
- **อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered Electrons, BSE)** คือ อิเล็กตรอนปฐมภูมิที่วิ่งเข้าใกล้หรือเข้าชนนิวเคลียสของอะตอมบนผิวตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนทิศทางกระเจิงกลับออกมาจากผิวตัวอย่าง โดยอิเล็กตรอนกระเจิงกลับจะเกิดมากกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง ความเข้มของสัญญาณจะขึ้นกับมุมที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิตกใส่ตัวอย่างและเลขอะตอมของธาตุที่ผิวตัวอย่าง ภาพที่ได้จากอิเล็กตรอนกระเจิง เรียกว่า Backscattered Electron Image (BEI) หรือ Primary - Electron Image
- **รังสีเอ็กซ์เฉพาะธาตุ (Characteristic X-rays)** เกิดจากการที่อิเล็กตรอนวงในของธาตุตัวอย่างถูกชนโดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิจนหลุดออกไป เกิดเป็นระดับชั้นพลังงานที่ว่าง ทำให้อิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานสูงกว่าลดระดับพลังงานลง พร้อมกับปล่อยพลังงานในรูปรังสีเอกซ์ออกมา รังสีเอกซ์ที่ได้จะมีรูปแบบเฉพาะตัวแตกต่างกันไปในแต่ละธาตุ เรียกว่า Characteristic X-rays ดังนั้น จึงสามารถวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบที่ผิวตัวอย่างโดยอาศัยการวิเคราะห์พลังงานหรือความยาวคลื่นของ X-rays ที่เกิดขึ้น สำหรับอุปกรณ์ที่นิยมใช้ติดเข้ากับ SEM เรียกว่า Energy Dispersive Spectrometer (EDS) เพื่อวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพและปริมาณ



รูปที่ 2.18 สัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยา [38]

2.9 การทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยวิธี Difference Thermal Analysis

Difference Thermal Analysis (DTA) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เชิงความร้อน โดยวัดออกมาในรูปของอุณหภูมิที่ต่างกันระหว่างสารตัวอย่าง (Sample) กับสารอ้างอิง (Reference) ในระหว่างการให้ความร้อนอุณหภูมิของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงในลักษณะการดูดความร้อน (Endothermic) หรือการคายความร้อน (Exothermic) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานภายใน (Enthalpic Transition) เช่น การเปลี่ยนเฟส การละลาย การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก การหาจุดเดือดของสาร การเผาไหม้ การระเหย การคายน้ำ การแตกตัว กระบวนการ Oxidation Reduction และปฏิกิริยาเคมีต่างๆ เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิถูกตรวจวัดแล้วบันทึกเป็นกราฟ [39]

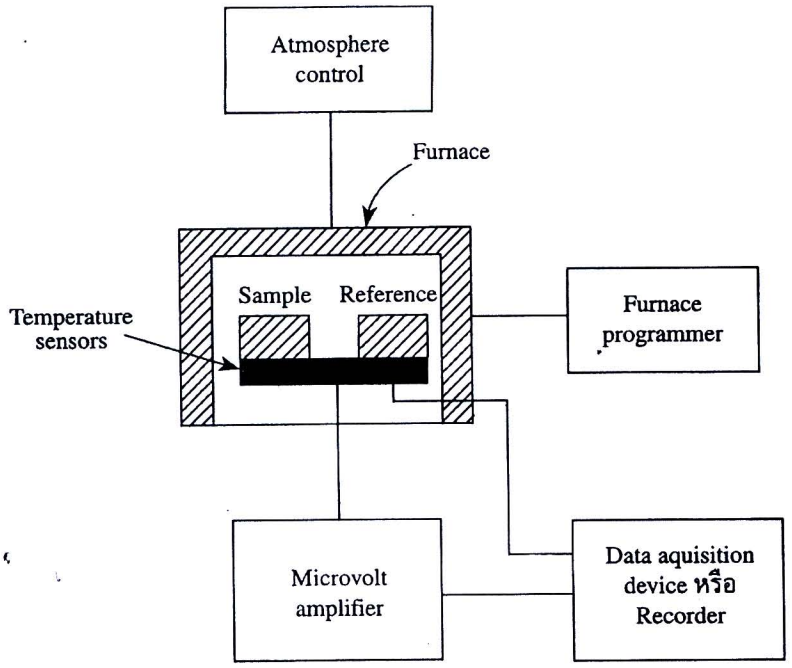
ในรูปที่ 2.19 แสดงลักษณะการทำงานของ DTA สารตัวอย่างและสารอ้างอิงจะถูกให้ความร้อนจากแหล่งพลังงานที่เดียวกันและความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ระหว่างชิ้นงานตัวอย่างและชิ้นงานอ้างอิงจะถูกบันทึกเมื่อเริ่มให้ความร้อน ถ้าอุณหภูมิของชิ้นงานตัวอย่างต่ำกว่าชิ้นงานอ้างอิง แสดงว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน แต่ถ้าอุณหภูมิของชิ้นงานตัวอย่างสูงกว่าชิ้นงานอ้างอิงแสดงว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบคายความร้อน [40] ความแตกต่างของอุณหภูมิสามารถคำนวณได้ดังสมการนี้

$$T_S - T_R = \Delta T$$

โดยที่ T_S คือ อุณหภูมิของสารตัวอย่าง
T_R คือ อุณหภูมิของสารอ้างอิง

ส่วนประกอบหลักของ DTA [40] ดังนี้

- เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) นิยมใช้ Pt - Pt/Rh หรือ Ni - Ni/Cr มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.1 ถึง 0.3 มิลลิเมตร
- ถ้วยใส่ตัวอย่างและสารอ้างอิง ทำจากวัสดุที่มีสมบัติเฉื่อยต่อการเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิที่ทดลอง และมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) สูงเพื่อให้สามารถนำความร้อนสู่ชิ้นงานตัวอย่างหรือสารอ้างอิงได้ดี
- ควบคุมบรรยากาศในการทดลองโดยการใช้ก๊าซเฉื่อยปกคลุม



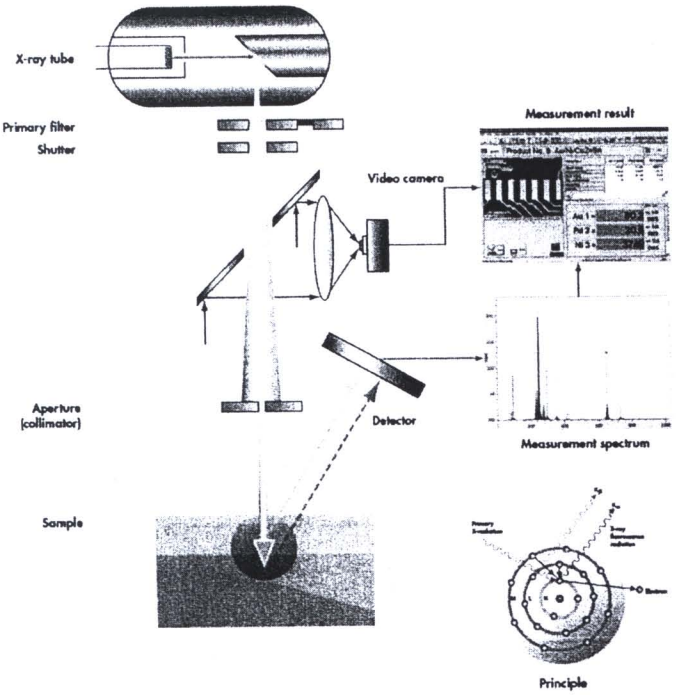
รูปที่ 2.19 ลักษณะการทำงานของ DTA [40]

2.10 การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วยวิธี ICP-OES

Inductive Coupled Plasma (ICP-OES) เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถตรวจวัดความเข้มข้นในระดับมิลลิกรัมต่อลิตร และบางธาตุอาจถึงไมโครกรัมต่อลิตร มีช่วงการตรวจวัดกว้าง สามารถตรวจสอบได้หลายธาตุในคราวเดียวกัน ลักษณะองค์ประกอบของเครื่องมือแสดงดังรูปที่ 2.20 สำหรับหลักการทำงานของเครื่องที่สำคัญ คือ คบพลาสมา (Torch) ซึ่งประกอบด้วยหลอด 3 ชั้น ทำจากควอร์ตหรือวัสดุอื่นที่เหมาะสม ที่บริเวณส่วนปลายมีขดลวดทองแดงเรียกว่า Load Coil ล้อมรอบอยู่ ซึ่งต่อกับเครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุเมื่อปล่อยพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุช่วง 700-1,500 วัตต์ เข้าไปในขดลวด ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นหรือเกิดการสั่นด้วยอัตราเร็วเท่ากับความถี่ของคลื่นความถี่วิทยุ ในเครื่อง ICP-OES ส่วนมากใช้ความถี่ 27 หรือ 40 เมกะเฮิรตซ์ การสั่นนี้ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่บริเวณปลายคบ ทำให้เกิดการชักนำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ แล้วทำให้ตัวนำเกิดความร้อนขึ้น เมื่อก๊าซอาร์กอนไหลผ่านเข้าไปในแนวตั้งฉากเพื่อให้เกิดการหมุนไปรอบคบพลาสมาซึ่งไม่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง จึงจำเป็นต้องทำให้เป็นตัวนำด้วยการทำให้เกิดประกายในก๊าซอาร์กอนก่อน เพื่อทำให้ก๊าซอาร์กอนแตกตัวให้อิเล็กตรอนเกิดขึ้น สนามแม่เหล็กช่วยเร่งให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น ประกอบกับมีขดลวดทองแดง จึงทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้น เรียกว่าเกิด Inductive Coupling อิเล็กตรอนที่มี

2.11 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence Analysis

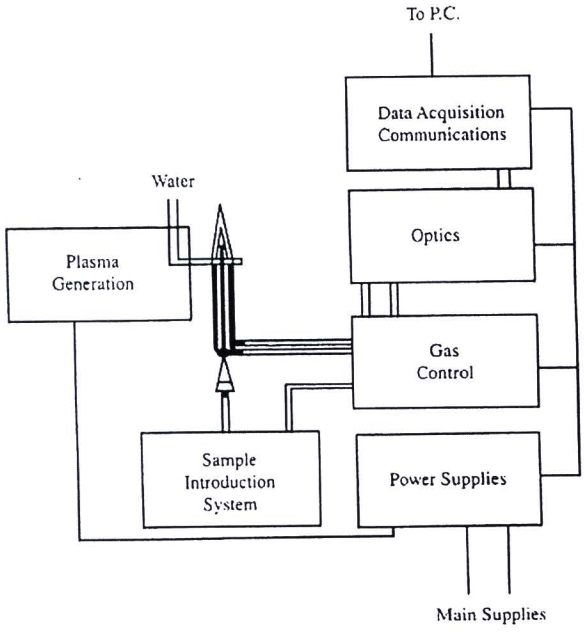
เอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนต์ อาศัยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในรูปแบบของลำแสงในย่านรังสีเอ็กซ์ที่กำเนิดจาก X-ray Tube อาศัยความต่างศักย์ของแรงดันไฟฟ้า ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแรงดันไฟฟ้าต่ำไปหาแรงดันไฟฟ้าสูงในย่านรังสีเอ็กซ์ จากนั้นรังสีถูกบังคับให้ตกกระทบบนชิ้นงาน ทำให้เกิดการ Ionization คือ เมื่ออิเล็กตรอนในธาตุต่างๆ ถูกพลังงานจากภายนอกมากระทำ จะทำให้อิเล็กตรอนของธาตุนั้นๆ หลุดออกจากวงโคจร เมื่ออิเล็กตรอนชั้น K (K-Shell) หลุดออกไป ธาตุนั้นๆ (อะตอม) จะต้องมีการรักษาสมดุลหรือถ่ายพลังงาน โดยมีการกระโดดของอิเล็กตรอนจากชั้นอื่นมาแทนที่เท่ากับปริมาณของอิเล็กตรอนที่สูญเสียไป จากพฤติกรรมนี้จึงทำให้เกิดการปลดปล่อยรังสีในระหว่างกระโดดข้ามชั้น ทำให้เกิดการเปล่งรังสีย่านรังสีเอ็กซ์ออกมา จากรูปที่ 2.21 แสดงแผนภาพของการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเทคนิค XRF และรูปที่ 2.22 แสดงพฤติกรรมการเกิดรังสีเอ็กซ์ โดยรังสีที่แผ่ออกมานั้นแสดงลักษณะเฉพาะของธาตุนั้นๆ ออกมา รวมถึงปริมาณของโลหะที่อ้างอิงจากความเข้มของรังสี ซึ่งสามารถตรวจจับได้ด้วยตัวตรวจจับพลังงาน (Detector) แล้วแสดงออกมาในรูปกราฟพลังงานหรือเรียกว่า สเปคตรัม (Spectrum) ความละเอียดของสเปคตรัมนี้ขึ้นอยู่กับตัวตรวจจับพลังงาน หลังจากนั้นจะประมวลผลสเปคตรัมด้วยโปรแกรม เมื่อเปรียบเทียบสเปคตรัมได้ผลแล้ว ค่าการวิเคราะห์แสดงในรูปร้อยละ [43]



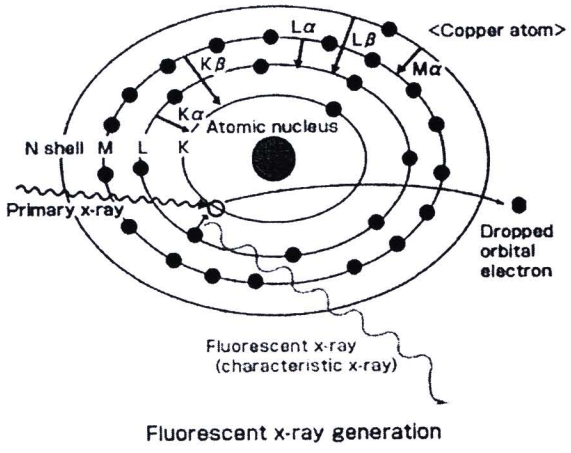
รูปที่ 2.21 แผนภาพของการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเทคนิค XRF [44]

พลังงานสูงจะชนกับอะตอมของก๊าซอาร์กอน ทำให้เกิดอิเล็กตรอนมากขึ้นเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ กลายเป็นพลาสมา จึงเรียกว่า Inductively Coupled Plasma (ICP) การปล่อยประจุจากพลาสมานี้จะให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 1,000-10,000 เคลวินและมีความเสถียรเมื่อใช้กำลังไฟฟ้า 1-2 กิโลวัตต์ [41, 42]

ตัวอย่างที่จะวิเคราะห์จะถูกทำให้เป็นสารละลาย โดยสารละลายจะถูกเปลี่ยนให้เป็นละอองเล็กๆ โดยกระบวนการ Nebulization ผ่าน Peristalic Pump เข้าไปยังพลาสมาของ ICP Torch สารละลายตัวอย่างที่จะวิเคราะห์เมื่อได้รับพลังงานสูงจะเกิดการสลายตัวเป็นอะตอมและอะตอมจะถูกกระตุ้น (Excited) ไปยังสถานะกระตุ้นและบางส่วนกลายเป็นไอออนเรียกว่าเกิดอนุภาค (Atomization) และการเกิดไอออน (Ionization) อะตอมหรือไอออนที่ถูกกระตุ้นจะเปล่งแสงออกมามีลักษณะเฉพาะตัวโดยมีความยาวคลื่นของแสงโดยเฉพาะ (Characteristic) โดยมีความยาวคลื่นของแสงโดยเฉพาะ แสงที่เกิดขึ้นนี้จะผ่านเข้าไปในเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ เพื่อแยกเอาเฉพาะแสงที่มีความยาวคลื่นของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์แล้วให้แสงดังกล่าวตกลงบนดีเทคเตอร์เพื่อวัดออกมาเป็นสัญญาณ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายที่วัด ในการควบคุมแต่ละขั้นตอน ตลอดจนการเก็บข้อมูลและการประมวลผลจะทำด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ [41, 42]



รูปที่ 2.20 แผนภาพส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง ICP-OES [42]



รูปที่ 2.22 พฤติกรรมการเกิดรังสีเอ็กซ์ [45]

ข้อดีของเทคนิค XRF

- การวิเคราะห์ทำได้ง่าย และสะดวกรวดเร็ว
- การเตรียมชิ้นงานไม่ยุ่งยาก
- ชิ้นงานไม่ถูกทำลาย
- วิเคราะห์ได้หลายธาตุพร้อมกัน
- มีค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ต่ำกว่าเทคนิค Assay, ICP-OES
- วิเคราะห์ชิ้นงานหลายรูปแบบได้ เช่น ของแข็ง ของเหลว และผง เป็นต้น
- ความถูกต้องของการวิเคราะห์ร้อยละ 0.5

ข้อเสียของเทคนิค XRF

- ผู้ใช้ต้องมีพื้นฐานความรู้ทางโลหะวิทยา เพื่อช่วยให้การวิเคราะห์ธาตุมีความถูกต้องมากขึ้น
- ต้องมีโลหะมาตรฐานในการอ้างอิง
- ไม่สามารถวิเคราะห์ส่วนผสมของชิ้นงานที่ผ่านการชุบ ที่มีความหนาเกิน 10 ไมครอน

2.12 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฉัตรลัดดา วรรณทอง [46] ได้ศึกษาส่วนผสมทางเคมีของมาสเตอร์อัลลอยทองแดง ซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศและไม่ทราบส่วนผสมจำนวน 6 ชนิด โดยเลือกมาจากปริมาณการใช้งานสูงสุดของผู้ผลิตเครื่องประดับเงินสเตอร์ลิงแห่งหนึ่ง พบว่า มีส่วนผสมของทองแดง สังกะสี ซิลิคอน ดีบุก อะลูมิเนียม แมกนีเซียม เจอร์เมเนียม และอินเดียมในปริมาณที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์ใช้เทคนิค ICP-OES และความแข็งของเงินสเตอร์ลิงที่ใช้มาสเตอร์อัลลอยทองแดง A-F มีค่า 75-86 วิกเกอร์ แสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของมาสเตอร์อัลลอยทองแดง โดยเทคนิค ICP-OES และผลความแข็งของเงินสเตอร์ลิงที่ใช้มาสเตอร์อัลลอยทองแดง A-F [46]

ชนิดของอัลลอย	ชนิดและปริมาณของธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)									ความแข็งของเงินสเตอร์ลิง (วิกเกอร์)
	Cu	Zn	Si	Sn	Al	Mg	P	Ge	In	
A	68.25	31.09	0.043	0.470	0.004	0.001	trace	-	0.051	81
B	63.23	35.36	0.980	0.160	-		-	1.39	0.168	78
C	66.65	31.68	0.464	0.480	-		trace	-	0.342	81
D	65.57	31.58	0.588	-	0.235		trace	-	0.165	75
E	69.75	29.38	0.009	0.350	0.007		trace	-	-	78
F	85.04	14.23	0.009	0.034	-		trace	-	0.013	86

หมายเหตุ Trace หมายถึง ปริมาณที่วิเคราะห์ได้มีค่าต่ำกว่า 0.0001 มิลลิลิตร

สิริพร โรจนนันต์ และคณะ [47] พบว่า อินกอตของเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสม Ag-6.0Cu-0.3Sn มีค่าความแข็งเฉลี่ย 73 วิกเกอร์ และจากงานวิจัยของเกศราพร วทัญญู และคณะ [17] พบว่า การเติมดีบุกปริมาณร้อยละ 0.12-0.47 โดยน้ำหนัก แทนที่ปริมาณของทองแดงในโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีส่วนผสม Ag-7Cu ทำให้มีค่าความแข็งอยู่ระหว่าง 81-87 วิกเกอร์

จากข้อมูลสิทธิบัตรหมายเลข 2005/0211342 ของ Menon [48] รายงานว่า การศึกษาการเติมแมงกานีสในโลหะเงินสเตอร์ลิง เพื่อเพิ่มความแข็งในงานหล่อ และในกระบวนการทางความร้อน รวมทั้งเพื่อลดการเกิดออกไซด์ของทองแดง ลดการเกิดช่องว่าง รูพรุน ลดขนาดเกรน พบว่าส่วนผสมที่เหมาะสมประกอบด้วย (92.5-92.8)Ag-(2.0-3.0)Cu-(2.0-3.0)Zn-(0.03-0.05)In-(0.01-0.03)Sn-(0.2-0.5)(98Cu-2B)-(0.5-0.9)(90Cu-10Si)-(0.01-0.1)Mn หรือ 0.3(70Cu-30Mn) หน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก

เอกสิทธิ์ นิสารัตนพรและศิริรัตน์ นิสารัตนพร [5] พบว่า อิทธิพลในการเติมธาตุอินเดียม ซิลิคอนและแมงกานีส มีผลต่อโลหะเงินสเตอร์ลิง เมื่อผสมอินเดียมที่ปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก พบว่าความแข็งลดลงและความต้านแรงดึงลดลง และการเติมธาตุอินเดียมเพียงอย่างเดียวไม่ช่วยเพิ่มความต้านทานการหมอง การเติมธาตุซิลิคอนปริมาณที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงร้อยละ 0.02-0.20 โดยน้ำหนัก สามารถปรับปรุงความแข็ง ความแข็งแรง ความเหนียวและความต้านทานการหมองได้ การเติมธาตุแมงกานีส ร้อยละ 1.3-3.0 โดยน้ำหนัก มีผลในความต้านทานการหมองที่ดี แต่ถ้าแมงกานีสสูงขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 1.7 โดยน้ำหนัก จะทำให้สมบัติทางกลลดลง สภาวะในการทดสอบความต้านทานการหมอง คือ การตั้งชิ้นงานทดสอบในบรรยากาศของสารละลายอิ่มตัวโซเดียมซัลไฟด์ ใช้เวลาในการทดสอบต่างกันขึ้นอยู่กับธาตุที่เติมลงไป

ณรงฤทธิ์ สนใจธรรม และคณะ [49] พบว่า การเติมทองแดงมีผลในการเพิ่มความแข็งให้กับเงินสเตอร์ลิง แต่การเติมอินเดียมและฟอสฟอรัสทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นไม่มากนักเมื่อเทียบกับเงินสเตอร์ลิงที่มีเฉพาะทองแดง แต่เมื่อปริมาณฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.018 เป็น 0.074 และ 0.097 โดยน้ำหนัก ทำให้ความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงในตารางที่ 2.6 ส่วนผสมทางเคมีได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP

จากข้อมูลสิทธิบัตรหมายเลข 5,021,214 ของ Sasaki และ Nishiya [50] อ้างว่า การเติมธาตุอินเดียมร้อยละ 0.2-9.0 โดยน้ำหนัก และอะลูมิเนียมร้อยละ 0.02-2.0 โดยน้ำหนัก ทดแทนธาตุแพลเลเดียม ซึ่งมีราคาแพงในโลหะเงินผสมแพลเลเดียม (Ag-Pd) สามารถปรับปรุงสมบัติทางกล และความต้านทานการเปลี่ยนสี (Discolorations Resistance) หรือความต้านทานการหมองของเงินสเตอร์ลิงในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ อุปกรณ์ตกแต่งบ้าน รวมถึงเครื่องใช้ในครัวเรือน นอกจากนี้ยังเติมธาตุผสมอื่นๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกล ได้แก่ (0.3-3.0)Cu, 1.6Cd, 1.0Sn, (1.0-3.0)Ga และ (1.5-1.7)Zn

ตารางที่ 2.6 ปริมาณส่วนผสมทางเคมีจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP และความแข็งจุลภาคของเงินสเตอร์ลิง [49]

ปริมาณธาตุผสม(ร้อยละโดยน้ำหนัก)				ความแข็งของเงินสเตอร์ลิง (วิกเกอร์)
Ag	Cu	P	In	
Balance	2.998	-	-	50.00
Balance	4.987	-	-	55.67
Balance	5.898	-	-	73.33
Balance	5.129	0.018	0.931	53.80
Balance	5.700	0.074	0.997	58.63
Balance	6.122	0.097	0.995	61.27

จากสิทธิบัตรหมายเลข 7,198,683 B2 ของ Dwarika และ Grigory [51] อ้างว่า ส่วนผสมทางเคมีที่เหมาะสมของเงินสเตอร์ลิงเพื่อเพิ่มความต้านทานการหมองและความแข็ง แสดงในตารางที่ 2.7 พบว่าส่วนผสมทางเคมี มีหน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก ประกอบด้วยธาตุทองแดงร้อยละ 1.43-5.25 สังกะสีไม่เกินร้อยละ 5.94 ดีบุกไม่เกินร้อยละ 0.85 ลิเทียมไม่เกินร้อยละ 0.05 ซิลิคอนร้อยละ 0.05-0.5 และเจอร์เมเนียมไม่เกินร้อยละ 0.50 ได้แบ่งระดับการหมองของเงินสเตอร์ลิง (Tarnish Rate) ตามค่าการเปลี่ยนแปลงสี (DE*) เป็นเกณฑ์ไว้ 5 ระดับ ตั้งแต่ระดับ 0 ถึง 5 ระดับ 0 หมายถึงเงินสเตอร์ลิงไม่หมอง มีค่า DE* เท่ากับ 14-19 ระดับ 5 หมายถึงเงินสเตอร์ลิงหมองที่สุด มีค่า DE* เท่ากับ 30-40 จากสิทธิบัตรนี้ กำหนดค่าการหมองที่ยอมรับได้ไม่เกินระดับ 3.5 นั่นคือค่า DE* มีค่าไม่เกิน 25 ทดสอบในบรรยากาศของสารละลายแอมโมเนียมซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้น 650 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 66 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที

Peter [4] ได้รายงานว่าการเติมเจอร์เมเนียมร้อยละ 2-4 โดยน้ำหนัก ในโลหะเงินสเตอร์ลิงช่วยเพิ่มความต้านทานการหมองได้ แต่ไม่ช่วยในการเพิ่มความแข็ง และพบว่าปริมาณเจอร์เมเนียมร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนัก ทำให้เกิดปัญหาการแตกร้าวในการรีดขึ้นรูป ปริมาณเจอร์เมเนียมที่เหมาะสมในการเติมคือ ร้อยละ 1.1 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเจอร์เมเนียมมีผลให้เกรนของงานหล่อมีขนาดใหญ่ ทำให้สมบัติทางกลลดลงเพราะขนาดเกรนที่ใหญ่จะทำให้โลหะอ่อนลง จึงต้องเติมโบรอนเพื่อทำหน้าที่ลดขนาดเกรน ช่วยให้เกรนมีขนาดเล็กลง โดยเติมจากมาสเตอร์อัลลอยของทองแดงมีโบรอนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2.7 ส่วนผสมทางเคมี ความแข็ง ระดับการหมองและค่าการเปลี่ยนแปลงสีของเงินสเตอร์ลิง จากสิทธิบัตรหมายเลข 7,198,683 B2 [51]

ปริมาณของธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)								สมบัติ		
Ag	Cu	Zn	Sn	Li	Si	Ge	B	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระดับความหมอง	ค่าการเปลี่ยนแปลงสี (DE*)
92.70	7.30	0	0	0	0	0	0	75	5.0	30-40
92.70	7.23	0	0	0	0.07	0	0	75	5.0	30-40
92.50	5.47	1.79	0	0	0	0.24	0	75	5.0	30-40
92.50	4.66	2.23	0.51	0	0.10	0	0	65	3.5	20-24
92.50	2.96	4.40	0	0	0.14	0	0	59	4.0	25-29
92.50	2.00	5.36	0	0	0.14	0	0	55	3.5	20-24
92.50	1.43	5.94	0	0	0.14	0	0	55	3.0	14-19
92.70	6.40	0	0.85	0.05	0	0	0	70	4.0	25-29
93.40	6.20	0	0.32	0.08	0	0	0	56	4.0	25-29
93.35	5.70	0	0.85	0.10	0	0	0	55	4.0	25-29
93.25	5.70	0	0.85	0.20	0	0	0	56	4.0	25-29
93.15	5.70	0	0.85	0.30	0	0	0	58	4.0	25-29
92.70	5.40	1.00	0.85	0.05	0	0	0	71	4.0	25-29
92.60	5.25	0.65	0.85	0.05	0.10	0.50	0	70	3.0	14-19
92.60	5.25	0.70	0.85	0.05	0.05	0.50	0	70	3.0	14-19
92.70	5.00	0.20	0.85	0.05	0	1.20	0	60	4.0	25-29
92.70	5.00	0.70	0.85	0.05	0.20	0.50	0	60	3.0	14-19
92.70	5.00	0.90	0.85	0.05	0.50	0	0	66	3.5	20-24

Reti [52] พบว่า การเติมธาตุสังกะสี หรือธาตุเจอร์เมเนียมปริมาณน้อย ในเงินสเตอร์ลิงสามารถลดปัญหาคราบดำแดงที่เกิดจากออกไซด์ของทองแดง (Fire Stain) ได้ และจากสิทธิบัตรหมายเลข 4,973,446 ของ Bernhard และ Sivertsen [7] ได้ทำการปรับปรุงส่วนผสมของโลหะเงินสเตอร์ลิง ซึ่งส่วนผสมทางเคมีที่เหมาะสม ประกอบด้วย Ag-0.5Cu-4.25Zn-0.02In-0.48Sn-1.25(Cu-2B)และ 1(Cu-10Si) (หน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก) เพื่อลดปัญหาในการเกิดสารประกอบออกไซด์ของทองแดง การลดขนาดรูพรุน และลดขนาดของเกรน

สุรัตน์ วรรณศรี และคณะ [9] ได้ศึกษารวบรวมข้อมูล พบว่าธาตุสังกะสี ซิลิคอน และอินเดียม มีผลต่อการไหลตัวของน้ำโลหะขณะหลอมเหลวและการปรับปรุงคุณภาพของผิวชิ้นงานหล่อ โดยธาตุเหล่านี้ช่วยปรับปรุงสมบัติ ทำให้น้ำโลหะสามารถไหลเข้าโพรงแบบได้ดียิ่งขึ้น การแข็งตัวของโลหะจากของเหลวเป็นของแข็งมีความต่อเนื่องอย่างสมดุล และช่วยป้องกันการเกิดความไม่สม่ำเสมอของธาตุในโครงสร้าง (Core Structure) และช่วยปรับปรุงผิวชิ้นงานหล่อให้มีความเรียบ ความเงางามขึ้น

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องและข้อมูลจากสิทธิบัตรข้างต้น พบว่าการเติมธาตุต่างๆ มีผลต่อสมบัติทางกล ได้แก่ ความแข็ง ความต้านแรงดึงและร้อยละการยืดตัว สมบัติด้านความต้านทานการหมอง การเติมธาตุผสมบางชนิดสามารถเพิ่มความแข็งควบคู่กับการเพิ่มความต้านทานการหมองได้ ซึ่งการศึกษาเกี่ยวกับธาตุผสมที่ซื้อหาได้ตามท้องตลาดเพื่อผสมในเงินสเตอร์ลิงยังมีไม่มากนัก ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่งที่จะทำการพัฒนาส่วนผสมเพื่อเพิ่มความแข็งโดยการเติมธาตุผสมในเงินสเตอร์ลิงโดยมีส่วนผสมที่แตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อให้ได้ส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่มีความแข็งเพิ่มขึ้น และไม่เสียสมบัติด้านความต้านทานการหมอง และสามารถลดขั้นตอนการเพิ่มความแข็งให้เหลือเพียงขั้นตอนการหล่อเพียงอย่างเดียว ทำให้สามารถนำไปใช้งานในภาคอุตสาหกรรมเครื่องประดับ นอกจากนี้ยังได้มาซึ่งองค์ความรู้ในการทำวิจัยและเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป