

บทที่ 1

โลหะวิทยาเบื้องต้นสำหรับเงินสเตอร์ลิง

1.1 บทนำ

เงินสเตอร์ลิงเป็นโลหะเงินเจือ (Silver alloy) ซึ่งนิยมนำมาใช้ทำเครื่องประดับ เหตุผลที่ไม่ใช้โลหะเงินบริสุทธิ์ทำเครื่องประดับ เนื่องจากโลหะเงินบริสุทธิ์มีความแข็งต่ำ ความเหนียวสูง สารเจือที่นิยมใช้ผสม คือ ทองแดง (Cu) ซึ่งเป็นโลหะสามารถผสมเข้ากันได้ดีกับโลหะเงิน และยังมีราคาไม่สูง

อักษรย่อของโลหะเงิน คือ Ag ซึ่งมาจากภาษาละติน Argentum โลหะเงินถูกค้นพบมานานแล้วคือ ประมาณ 4000 ปี ก่อนคริสตกาล แต่ก็ยังพบหลังทองคำและทองแดง แต่การผลิตโลหะเงินจำนวนมากพบว่าเกิดขึ้นประมาณ 500 ปี ก่อนคริสตกาล โดยชาวกรีก ในอาณาจักรโรมัน ได้ใช้โลหะเงินเป็นเหรียญเงินตรา ในช่วงปี ค.ศ. 800 ถึง 1500 การผลิตเงินส่วนใหญ่อยู่บริเวณยุโรปกลาง ซึ่งในช่วงนี้มีการผลิตเงินออกมาประมาณ 200,000 ถึง 300,000 ตัน ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1500 หลังจากที่ได้ค้นพบอเมริกา มีการผลิตผลิตภัณฑ์จากโลหะเงิน ที่อเมริกากลางและอเมริกาใต้ (เปรู โบลิเวีย ชิลี อาร์เจนตินา) หลังจากนั้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1800 การผลิตส่วนใหญ่เคลื่อนไปทางอเมริกาเหนือ (เม็กซิโก แคนาดา สหรัฐอเมริกา) นอกจากนั้นในปัจจุบันยังมีการผลิตในออสเตรเลีย รัสเซีย โปแลนด์ และจีน

ปัจจุบันการผลิตโลหะเงินได้จากการถลุงจากสินแร่ตะกั่วและสังกะสีที่มีโลหะเงินผสม โดยมีการผลิตโลหะเงินจากสินแร่ประมาณ 12,000 ตัน/ปี และจนถึงปัจจุบันมีการผลิตโลหะเงินมาแล้วทั้งหมดประมาณ 1,000,000 ตัน

1.2 ชั้นคุณภาพของโลหะเงิน

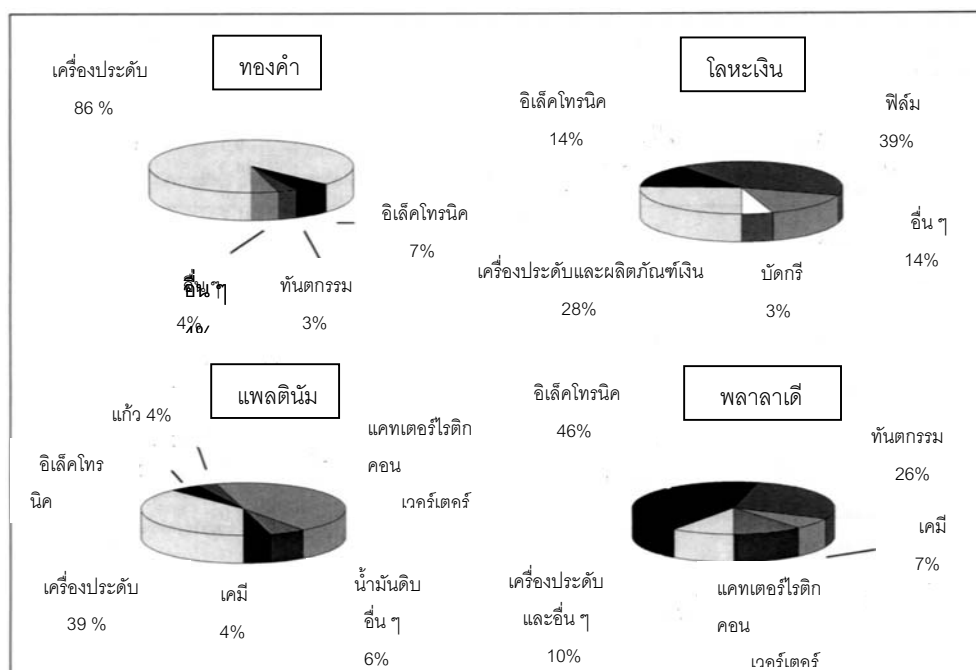
โลหะเงินมีการซื้อขายกันที่ชั้นงานคุณภาพต่าง ๆ (ตารางที่ 1-1) ชั้นคุณภาพพิเศษจะถูกกำหนดไว้เฉพาะ เช่น fine silver 99.999 % โดยส่วนใหญ่ที่ซื้อขายกันนั้นจะอยู่ในชั้นคุณภาพ good delivery สำหรับงานทางเทคนิค ส่วนใหญ่จะใช้โลหะเงิน 99.97 % หรือ 99.99 % สำหรับทำคอนแทกไฟฟ้า หรือ ทำกาต้มน้ำ และเป็นกรณีเฉพาะเท่านั้นที่จะใช้ชั้นงานคุณภาพ 99.999 %

ตารางที่ 1-1 : ความบริสุทธิ์ของเงินบริสุทธิ์ (Fine silver)

ชั้นคุณภาพ	ปริมาณโลหะเงิน	ส่วนผสมของสารที่อยู่ในโลหะเงิน (ppm)
โลหะเงิน good delivery	≥ 99.9	โลหะชนิดอื่น (ทองแดง) ≤ 1000
Fine silver	≥ 99.97	ทองแดง ≤ 300 ตะกั่ว ≤ 10 วิสมัส ≤ 10 Selen ≤ 5 Tellur ≤ 5
Fine silver 999.9	≥ 99.99	ทองแดง ≤ 100 ตะกั่ว ≤ 10 วิสมัส ≤ 10 Selen ≤ 5 Teller ≤ 5
Fine silver , high pure	≥ 99.99	เหล็ก ≤ 2 ตะกั่ว ≤ 1 ทอง ≤ 1 ทองแดง ≤ 1 แคดเมียม ≤ 0.5 วิสมัส ≤ 0.5 Selen ≤ 0.5 Tellur ≤ 0.5

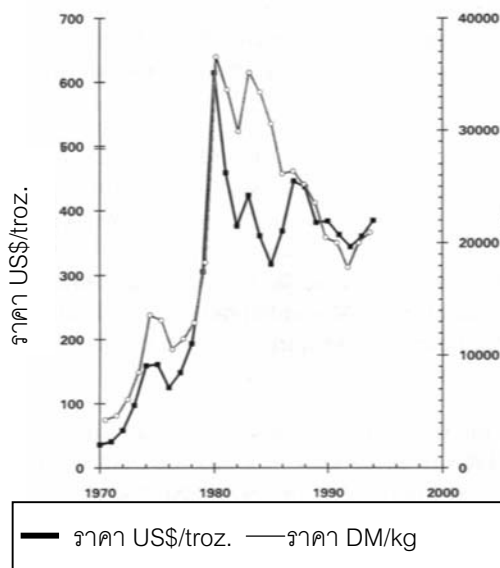
1.3 ความสำคัญด้านเศรษฐกิจ

กลุ่มโลหะมีค่าเงิน (Ag) ทองคำ (Au) แพลตินัม (Pt) และ พัลลาเดียม (Pd) เป็นโลหะที่หายาก และยังมีคุณสมบัติด้านฟิสิกส์ และเคมีที่ดีจึงทำให้กลายเป็นโลหะที่มีค่าของมนุษย์ สำหรับโลหะเงินและทองคำ นอกจากนิยมนำมาใช้สำหรับทำเป็นเครื่องประดับแล้วยังถูกนำมาใช้เกี่ยวกับด้านการเงินด้วย และยังถูกนำมาทำเป็นเหรียญกษาปณ์โดยตรงด้วย ในปัจจุบันโลหะเงินและแพลตินัมยังถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมด้วย สำหรับทองคำนอกจากถูกนำไปทำเหรียญกษาปณ์โดยตรงแล้ว หลายประเทศยังนำไปเป็นทุนสำรองเงินตราของประเทศด้วย



รูปที่ 1-1 : โครงสร้างการใช้โลหะมีค่าของปี ค.ศ.1992 [1]

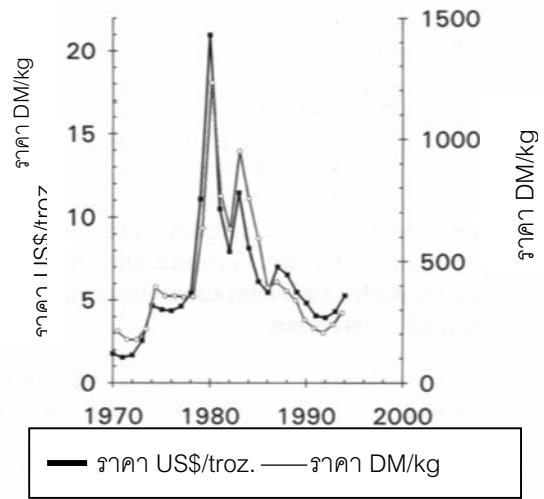
ในรูปที่ 1-2 ถึง 1-5 แสดงราคาของทองคำ โลหะเงิน แพลตินัม และ พัลลาเดียม



รูปที่ 1-2 : ราคาของทองคำ

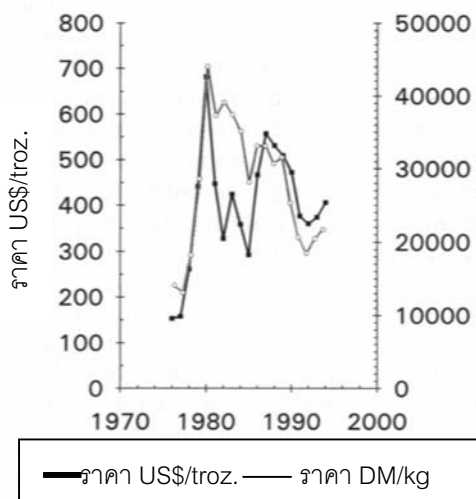
ช่วงระหว่าง ค.ศ.1970 – 1993

1 troz. = 31.1035 g



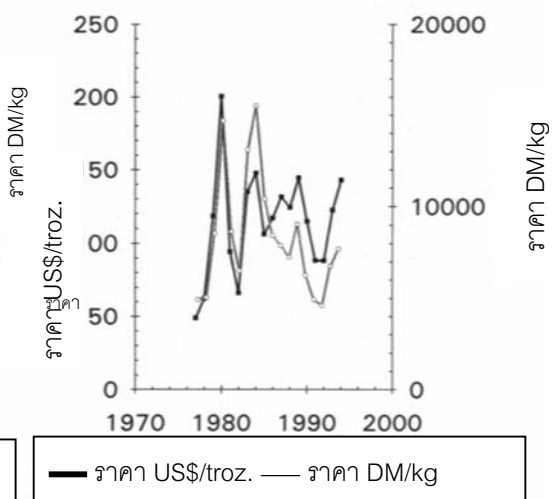
รูปที่ 1-3 : ราคาของโลหะเงิน

ช่วงระหว่าง ค.ศ.1970 – 1993



รูปที่ 1-4 : ราคาของแพลตินัม

ช่วงระหว่าง ค.ศ.1976 – 1992



รูปที่ 1-5 : ราคาของพัลลาเดียม

ช่วงระหว่าง ค.ศ.1976 – 1993

1.4 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางกล

ในตารางที่ 1-2 แสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางกลที่สำคัญของโลหะมีค่า และโลหะที่นิยมใช้ในการผสม

ตารางที่ 1-2 : เปรียบเทียบคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางกลของโลหะมีค่ากับโลหะทั่วไป

คุณสมบัติ	เงิน Ag	ทองคำ Au	แพลตินัม Pt	พัลลาเดียม Pd	ทองแดง Cu	สังกะสี Zn	ซิลิกอน Si
ความหนาแน่น (g/cm ³)	10.5	19.3	21.5	12.02	8.96	7.13	2.33
จุดหลอมเหลว (°C)	961.5	1064	1769	1552	1083	419.5	1423
จุดเดือด (°C)	2180	2707	4300		2595	907	2355
ความแข็ง (HV)	26	25	48	50	45	30	
ความต้านแรงดึง (สภาพอบ) (MPa)	150	125	135	190	210	140	
ความเค้นคราก (สภาพอบ) (MPa)	28	30	50	50	40		
ความยืด (สภาพอบ) (%)	50	45	40	25	35	45	

โลหะมีค่าทั้ง 4 ชนิด มีความหนาแน่นมากกว่า 10 g/cm³ จุดหลอมเหลวของเงิน ทองคำ และทองแดงมีขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งทำให้การหลอมผสมกันทำได้ง่าย ค่าความแข็งและความต้านแรงดึงของโลหะมีค่า มีขนาดค่อนข้างต่ำ แต่มีความยืดสูง ทำให้มีความสามารถในการขึ้นรูปดีมาก แต่ความแข็งแรงที่ต่ำทำให้การรักษารูปทรงไม่ดี การเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะมีค่าก็สามารถใช้หลักการเดียวกับโลหะอื่นทั่วไป คือ

- การผสมสารเจือ
- การทำให้เกรนละเอียด
- การขึ้นรูปเย็น (work hardening)
- การทำกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)

1.5 โลหะวิทยาเบื้องต้น

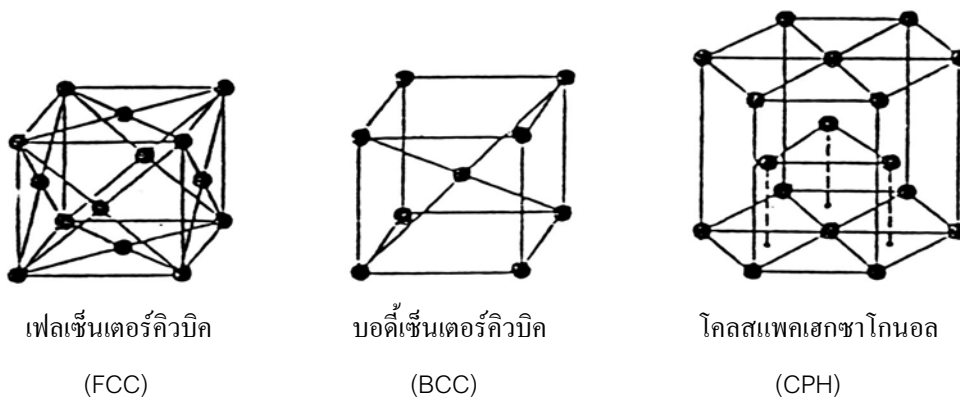
1.5.1 การยึดตัวและเรียงตัวของอะตอมโลหะ

การยึดตัวของอะตอมโลหะจะมีลักษณะพิเศษ คือการเรียงตัวจะเป็นไปอย่างมีกฎเกณฑ์ที่แน่นอน ในขณะที่อิเล็กตรอนจะสามารถวิ่งอิสระไม่เป็นของอะตอมใดอะตอมหนึ่ง และเป็นเหตุให้โลหะเป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนที่ดี

โลหะประกอบด้วยผลึกขนาดเล็กเกาะติดกันอยู่ โดยในผลึก หรือเกรนบางที่เรียกว่าเกรนของโลหะจะประกอบด้วยอะตอมที่เรียงตัวอย่างมีกฎเกณฑ์ที่แน่นอน ระบบการเรียงตัวของอะตอมในผลึกมีหลายรูปแบบ สำหรับโลหะรูปแบบที่พบบ่อย ได้แก่ คิวบิก (Cubic) และเฮกซาโกนอล (Hexagonal) แบบคิวบิกธรรมดาแน่นมักจะพบในโลหะ แต่ที่พบในโลหะมักมี 2 แบบ คือ

- เฟสเซ็นเตอร์คิวบิก FCC (Face Centered Cubic) โลหะที่มีการเรียงตัวของอะตอมแบบนี้ เช่น อลูมิเนียม (Al) เงิน (Ag) ทองคำ (Au) ทองแดง (Cu) นิกเกิล (Ni) ตะกั่ว (Pb) และเหล็กแกมมา (γ - Fe) เป็นต้น
- บอดีเซ็นเตอร์คิวบิก BCC (Body Centered Cubic) โลหะที่มีการเรียงตัวของอะตอมแบบนี้ เช่น โครเมียม (Cr) โมลิบดีนัม (Mo) และเหล็กอัลฟา (α - Fe) เป็นต้น

สำหรับแบบเฮกซาโกนอล ก็มักจะพบแบบโคลสแพคเฮกซาโกนอล CPH (Close Packed Hexagonal) เช่น สังกะสี (Zn) และแมกนีเซียม (Mg) เป็นต้น

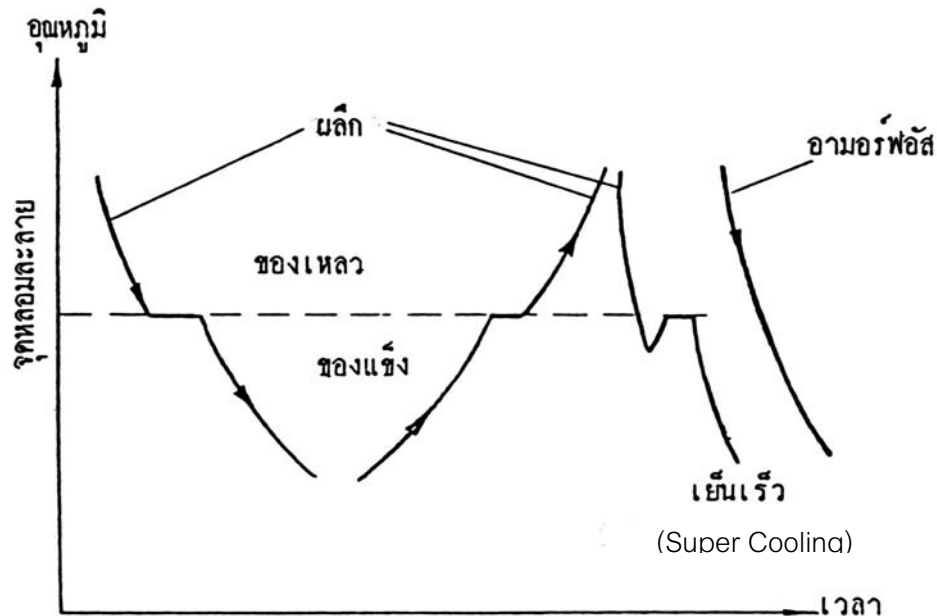


รูปที่ 1-6 : รูปแบบของการเรียงตัวของอะตอมที่พบบ่อยในโลหะ

1.5.2 การเป็นผลึกของโลหะ

โลหะเมื่อได้รับความร้อนจนหลอมละลายอยู่ในสภาพเป็นของเหลว อะตอมของโลหะจะไม่เรียงตัวอย่างมีกฎเกณฑ์ เมื่อโลหะเหลวเย็นตัวลง อะตอมของโลหะจะเคลื่อนตัวน้อยลง และจะมารวมตัวกันเป็นผลึก การเกิดผลึกมักจะเริ่มเกิดพร้อม ๆ กัน หลาย ๆ จุด และขนาดผลึกจะค่อย ๆ ขยายตัวใหญ่ขึ้น จนกระทั่งทั้งหมดเป็นของแข็ง ช่วงที่โลหะเหลวกำลังเปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นของแข็ง โลหะเหลวจะคลายความร้อนออกมา ซึ่งจะเห็นได้จากเส้นโค้งอุณหภูมิที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่จะหยุดอยู่กับที่ในช่วงที่มีการเปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นของแข็ง ความร้อนช่วงนี้เรียกว่าความร้อนของการเป็นผลึก ในทาง

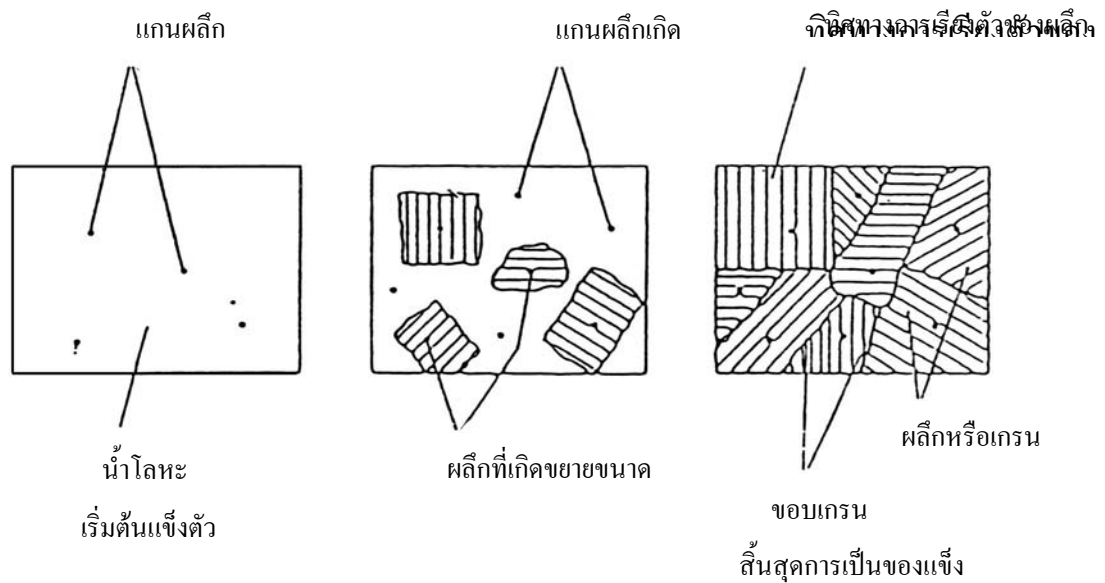
กลับกันเมื่อให้ความร้อนกับโลหะในสภาพของแข็ง โลหะจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดหลอมเหลว เส้นโค้งของอุณหภูมิจะหยุด ทั้ง ๆ ที่ยังคงให้ความร้อนแก่โลหะ ความร้อนนี้เรียกว่า ความร้อนในการหลอมละลาย ซึ่งจะทำให้อะตอมของโลหะซึ่งเรียงตัวอย่างมีระเบียบ กลายเป็นการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ สำหรับของแข็งที่ไม่ใช่โลหะซึ่งอะตอมเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ จะไม่มีจุดหยุดของเส้นโค้งของอุณหภูมิเหมือนเช่นโลหะ ซึ่งวัสดุลักษณะนี้เรียกว่า อามอร์ฟัส (Amorphous)



รูปที่ 1-7 : เส้นโค้งของการเย็นตัวของผลึกและอามอร์ฟัส

อุณหภูมิของการเปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นของแข็ง หรือจากของแข็งเป็นของเหลวของโลหะบริสุทธิ์แต่ละชนิดจะเป็นอุณหภูมิที่แน่นอน ในการแข็งตัวเป็นผลึกได้จะต้องเริ่มจากการเป็นแกนผลึก (Crystal nucleus) ก่อน แกนผลึกมี 2 ชนิด คือ มาจากวัสดุอื่น และเกิดขึ้นในตัวเอง

โดยทั่วไปไม่มีโลหะใดมีความบริสุทธิ์ 100 % โดยจะมีสิ่งอื่นปะปนมาด้วย ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะกลายเป็นแกนผลึกอย่างไม่ตั้งใจ แต่บางครั้งก็มีการตั้งใจเติมวัสดุอื่นเข้าไป เพื่อทำหน้าที่เป็นแกนผลึก โลหะที่มีความบริสุทธิ์มาก ๆ ก็จะมีแกนผลึกเกิดขึ้นเอง โดยเมื่อโลหะเหลวเริ่มเย็นตัวลงพลังงานความร้อนจะคลายออกมา ทำให้อะตอมเคลื่อนตัวเข้าหากันช้า เริ่มเรียงตัวเป็นระเบียบกลายเป็นผลึก ซึ่งจะเกิดพร้อม ๆ กันหลายจุด เมื่อผลึกขยายขนาดโตขึ้นจนกระทั่งติดกับผลึกอื่น ๆ บริเวณที่ติดต่อกันกับผลึกอื่นจะเป็นที่รวมกันของสิ่งเจือปนต่าง ๆ และขอบของผลึกนี้ เรียกว่า ขอบเกรน (Grain boundary) และผลึกเรียกอีกอย่างว่าเกรน (Grain) โดยขอบเกรนของโลหะนี้สามารถมองเห็นได้ชัดเจนด้วยกล้องจุลทรรศน์สำหรับโลหะ ซึ่งส่วนใหญ่มีอัตราขยายไม่เกิน 1000 เท่า



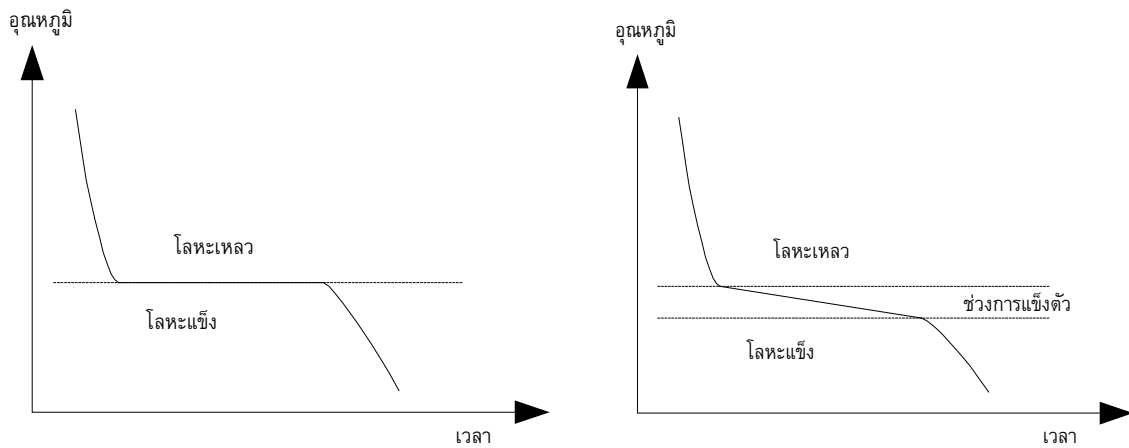
รูปที่ 1-8 : แสดงขั้นตอนการแข็งตัวของโลหะ

ขนาดและรูปร่างของเกรนของโลหะมีผลต่อคุณสมบัติของโลหะอย่างมาก โดยเฉพาะคุณสมบัติทางกล ได้แก่ ความแข็งแรงและความเหนียว โดยปกติจะพยายามให้โลหะมีเกรนขนาดเล็กที่สุด เพราะทำให้มีค่าความแข็งแรงและความเหนียวสูง

ความเร็วในการเย็นตัวของโลหะมีผลต่อขนาดของเกรนโลหะที่จะได้ โดยโลหะที่เย็นตัวเร็ว จะได้เกรนละเอียด ดังนั้นการหล่อด้วยแบบทรายจะได้เกรนหยาบกว่าแบบโลหะ ในขณะที่เดียวกันโลหะบริสุทธิ์ซึ่งไม่มีแกนผลึกจากภายนอก จะมีเกรนอ่อนและค่อนข้างหยาบเมื่อเทียบกับโลหะผสม

1.5.3 การเกิดผลึกของโลหะเจือ

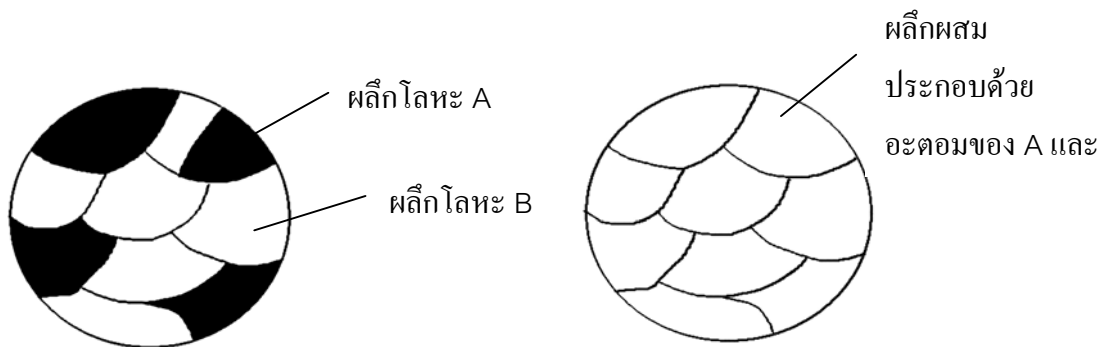
โลหะเจือ (Alloy) คือโลหะที่เกิดจากการผสมกับวัสดุอื่นอย่างน้อย 1 ชนิดขึ้นไป โดยทั่วไปโลหะเจือจะไม่แข็งตัวที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่งเหมือนโลหะบริสุทธิ์ แต่การแข็งตัวหรือหลอมละลายจะเกิดในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง เช่น เมื่อโลหะเหลวเย็นตัวลง จนถึงอุณหภูมิหนึ่ง จะมีบางส่วนของโลหะกลายเป็นของแข็ง และจะเพิ่มปริมาณมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง จนถึงอุณหภูมิหนึ่งทั้งหมดจะกลายเป็นของแข็ง และลักษณะเดียวกัน เมื่อโลหะเจือเปลี่ยนสภาพจากของแข็งเป็นของเหลว



รูปที่ 1-9 : เส้นโค้งการเย็นตัวของโลหะบริสุทธิ์ (ซ้าย) และโลหะเจือ (Alloy) (ขวา)

ผลึกของโลหะเจือมีสองลักษณะ คือ แบบเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) หรือ 1 เฟส และแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneity) หรือ 2 เฟส โลหะเจือเมื่ออยู่ในสภาพของเหลวจะผสมกันเป็นเนื้อเดียวกันเสมอ (1 เฟส)

ผลึกของโลหะเจือที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน หมายถึงผลึกของโลหะแต่ละชนิดในสภาพของแข็ง จะแยกตัวเป็นผลึกของโลหะแต่ละชนิดอยู่เคียงข้างกัน ในขณะที่ผลึกของโลหะเจือที่เป็นเนื้อเดียวกันนั้น ผลึกทั้งหมดที่เกิดขึ้นจะมีคุณลักษณะเหมือนกัน โดยภายในผลึกจะประกอบด้วยอะตอมของโลหะทั้ง 2 ชนิดและไม่สามารถเห็นความแตกต่างของผลึกแต่ละอันได้



รูปที่ 1-10 : เปรียบเทียบลักษณะของผลึกโลหะเจือ

ซ้าย : ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneity) – 2 เฟส

ขวา : เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) – 1 เฟส

ผลึกของโลหะเจือที่เป็นเนื้อเดียวกันเรียกว่า ผลึกผสม (Mixed Crystal) ซึ่งมี 2 ลักษณะ คือ ผลึกผสมแบบแทนที่ (Substitution solid solution) และแบบแทรกที่ (Interstitial solid solution)

ผลึกผสมแบบแทนที่มีลักษณะที่อะตอมของธาตุเจือเข้าไปแทนที่ตำแหน่งของอะตอมของโลหะฐาน โลหะที่สามารถผสมกันลักษณะนี้ได้ดี ต้องมีระบบการเรียงตัวของอะตอมเหมือนกันและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอะตอมใกล้เคียงกัน ซึ่งจะทำให้สามารถผสมกันได้ในอัตราส่วนผสมไม่จำกัด เช่น โลหะเงิน (Ag) กับทองคำ (Au) หรือ ทองแดง (Cu) กับ นิกเกิล (Ni) เป็นต้น ในขณะที่การผสมกันระหว่างทองแดง (Cu) กับ สังกะสี (Zn) สามารถผสมกันเป็นเนื้อเดียวกันได้ถ้ามีสังกะสีไม่เกิน 37 % ถ้าเกินกว่านี้ก็จะเกิดเป็น 2 เฟส เพราะสังกะสีมีระบบการเรียงตัวของอะตอมเป็น CPH ในขณะที่ทองแดงเรียงตัวแบบ FCC

ตารางที่ 1-3 : ระบบการเรียงตัวของอะตอมและขนาดรัศมีของอะตอมของโลหะแต่ละชนิด

ชนิดของโลหะ	ระบบการเรียงตัวของอะตอม	ขนาดรัศมีอะตอม (A°) ($1 A^\circ = 10^{-8} \text{ cm}$)
อลูมิเนียม (Al)	FCC	1.431
โครเมียม (Cr)	FCC	1.249
ทองแดง (Cu)	FCC	1.278
ทองคำ (Au)	FCC	1.441
เหล็ก (α -Fe)	BCC	1.241
เหล็ก (γ -Fe)	FCC	1.270
ตะกั่ว (Pb)	FCC	1.750
โมลิบดีนัม (Mo)	BCC	1.362
นิกเกิล (Ni)	FCC	1.246
แพลตินัม (Pt)	FCC	1.386
เงิน (Ag)	FCC	1.444
ทังสเตน (W)	BCC	1.367
พัลลาเดียม (Pd)	FCC	1.376
สังกะสี (Zn)	CPH	1.330

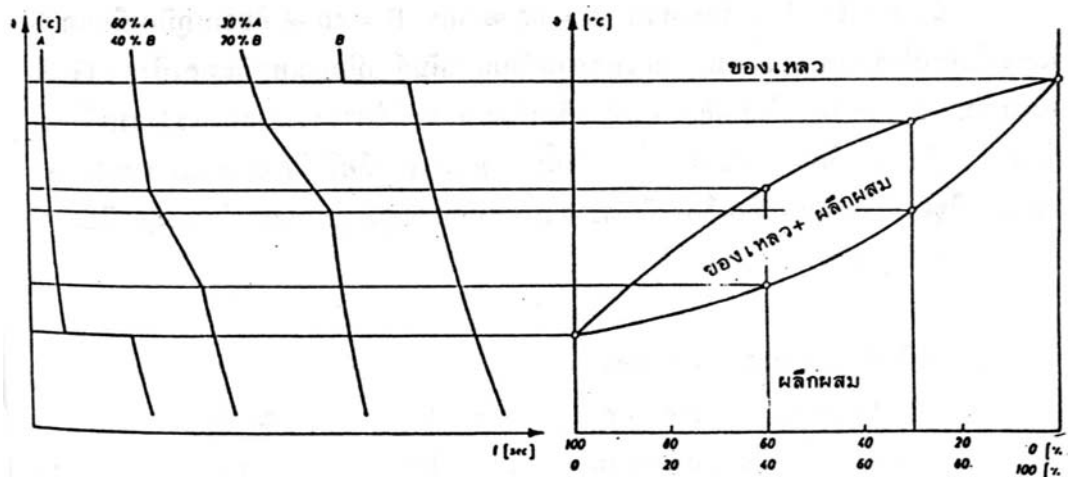
ผลึกผสมแบบแทรกที่ จะเกิดได้ดีเมื่ออะตอมของธาตุเจือมีขนาดเล็ก สามารถเข้าไปแทรกตัวในช่องว่างภายในผลึก ตัวอย่างเช่น เหล็กกับคาร์บอน

1.5.4 แผนภาพสมดุล (Phase diagram)

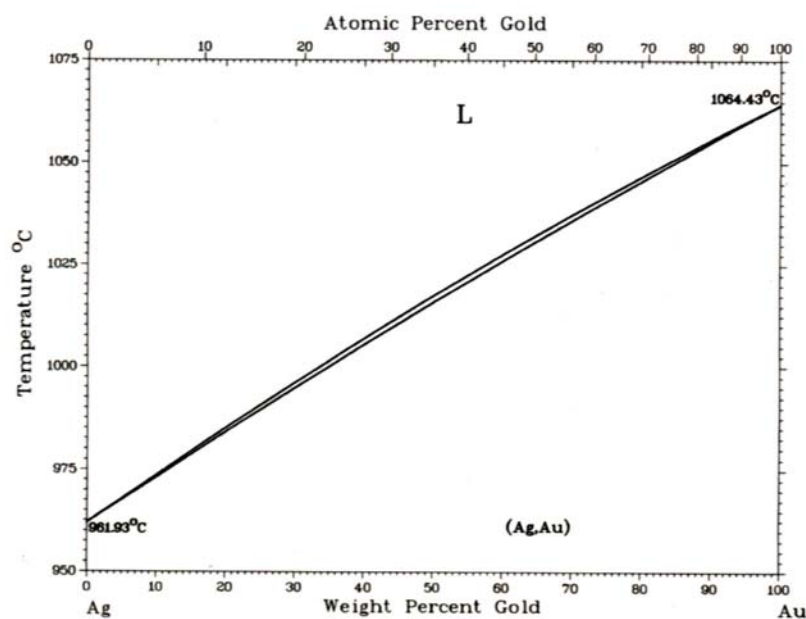
เนื่องจากโลหะเงินมีจุดหลอมเหลวที่ไม่คงที่ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของการผสม และยังมีผสมกันเป็นแบบผลึกผสม (1 เฟส) หรือแยกผลึกกัน (2 เฟส) ในการผลิตโลหะเจือชนิดต่าง ๆ จึงควรมีความเข้าใจถึงลักษณะของแผนภาพสมดุลของโลหะที่จะผสมกันก่อน ซึ่งรูปแบบของแผนภาพสมดุลมีหลายลักษณะ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

- แผนภาพสมดุล แบบสภาพของแข็งและของเหลวผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

การผสมกันในลักษณะนี้จะได้ผลึกผสม (Mixed crystal) การแข็งตัวจะเกิดในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งเมื่ออุณหภูมิต่ำลงถึงช่วงของการแข็งตัว ก็จะเกิดผลึกผสมบางส่วนแข็งตัวแยกจากของเหลว และเมื่ออุณหภูมิต่ำลงเรื่อย ๆ จำนวนผลึกผสมจะเพิ่มขึ้นจนทั้งหมดเป็นของแข็ง โลหะเจือที่มีการผสมลักษณะนี้เช่น ทองแดงกับนิกเกิล และ เงินกับทองคำ เป็นต้น



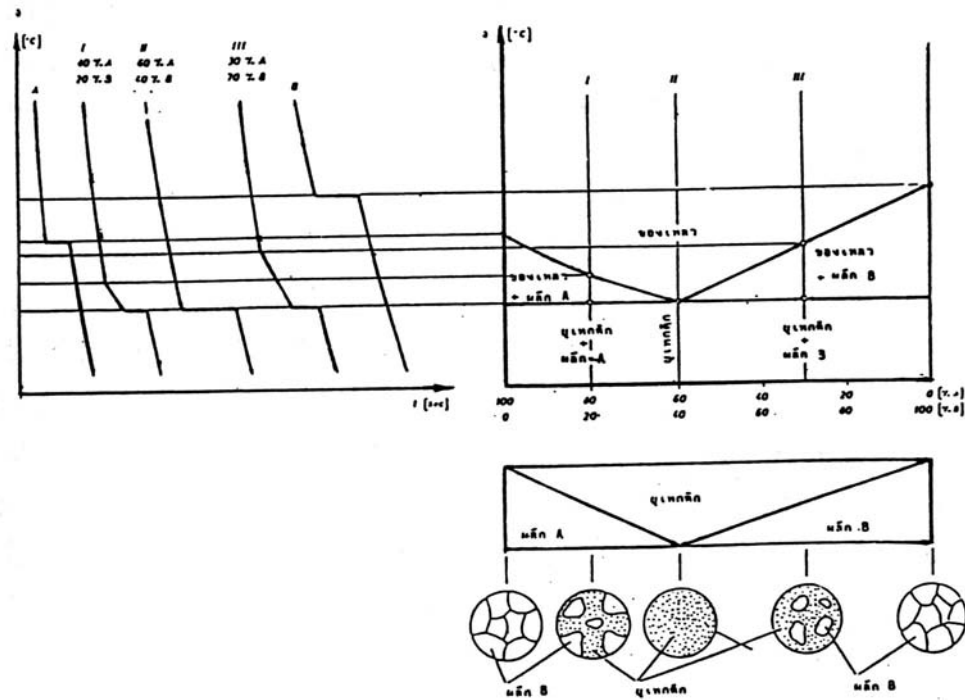
รูปที่ 1-11 : เส้นโค้งการเย็นตัว และแผนภาพสมดุลแบบสภาพของแข็งและของเหลวผสมเป็นเนื้อเดียวกัน



รูปที่ 1-12 : แผนภาพสมดุล เงิน - ทองคำ

- แผนภาพสมดุล แบบในสภาพของเหลวเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ในสภาพของแข็งไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

ในระบบนี้ไม่เกิดเป็นผลึกผสม แต่จะเกิดเป็นผลึก 2 ชนิด หรือ 2 เฟส เมื่ออุณหภูมิลดลงจะเริ่มเกิดผลึกโลหะบริสุทธิ์แยกตัวออกมา ก่อน หลังจากนั้น โลหะเหลวที่เหลือจะเปลี่ยนสภาพเป็นของแข็งทันทีที่อุณหภูมิแน่นอน คล้ายโลหะบริสุทธิ์ อุณหภูมินี้เรียกว่า ยูเทคติก (Eutectic) ซึ่งเป็นจุดที่มีของเหลวมีอุณหภูมิได้ต่ำที่สุด



รูปที่ 1-13 : แผนภาพสมดุลแบบของเหลวเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ของแข็งไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

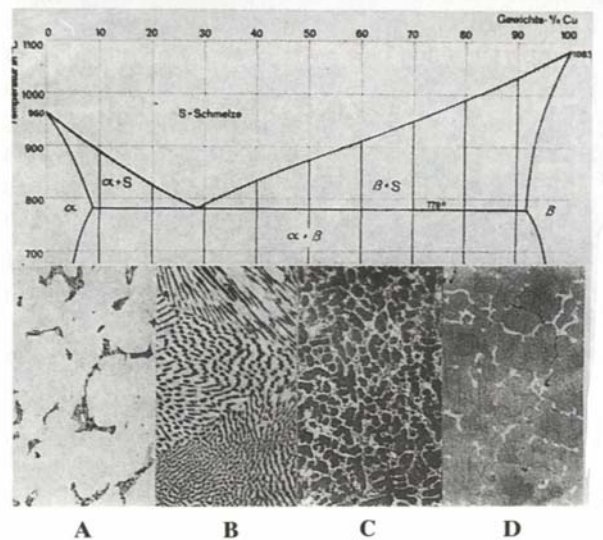
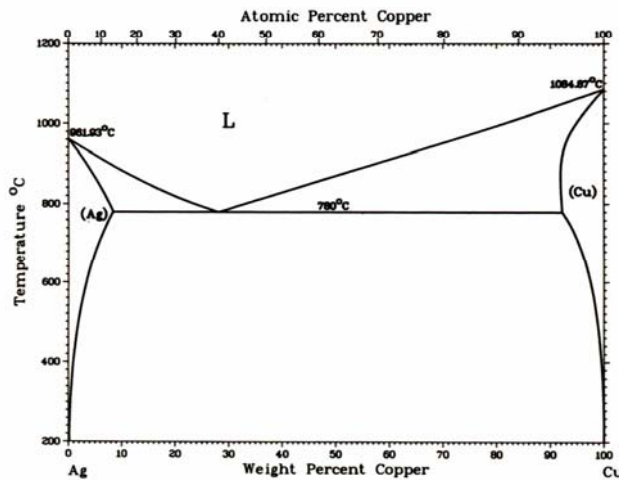
ตารางที่ 1-4 : จุดยูเทคติกของโลหะเงินคู่ต่าง ๆ

คู่โลหะเงิน		จุดยูเทคติก T_E ($^{\circ}\text{C}$)
แพลตินัม 85 %	นิกเกิล 15 %	1400
พัลลัดเดียม 60 %	นิกเกิล 40 %	1250
ทองคำ 82 %	นิกเกิล 18 %	950
ทองคำ 81.5 %	ทองแดง 18.5 %	884
เงิน 71.9 %	ทองแดง 28.1 %	779

* จุดหลอมเหลวของนิกเกิลบริสุทธิ์ = 1455°C

- แผนภาพสมดุลแบบในสภาพของเหลวเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ในสภาพของแข็งเป็นเนื้อเดียวกันเพียงบางส่วน

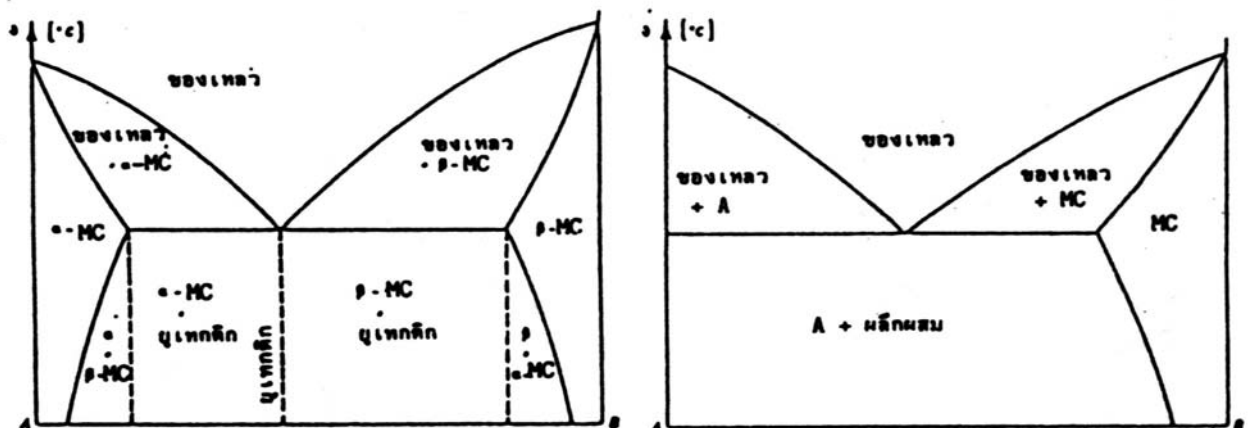
ในระบบนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ของโลหะเจือทั้งคู่ โดยมีเส้นของการผสม (Solubility curve) เป็นสิ่งชี้บ่งถึงความสามารถในการผสม ซึ่งสามารถใช้ประโยชน์เมื่อต้องการทำกรรมวิธีทางความร้อน (Heat treatment) กับโลหะตัวอย่างของโลหะที่มีรูปแบบนี้ ได้แก่ เงินกับทองแดง



รูปที่ 1-14 : ซ้าย แผนภาพสมดุลโลหะเงิน กับ ทองแดง

ขวา ลักษณะของโครงสร้าง ที่เปอร์เซ็นต์ของโลหะเงินในช่วงต่าง ๆ

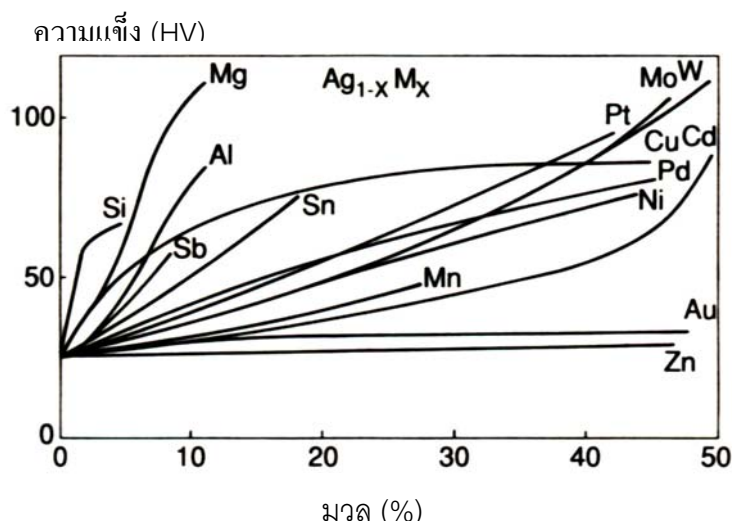
- A 92.5 % Ag ผลึกโลหะเงินและยูเทคติก
- B 72 % Ag ยูเทคติก
- C 40 % Ag ผลึกทองแดงและยูเทคติกจำนวนมาก
- D 10 % Ag ผลึกทองแดงและยูเทคติกจำนวนน้อย



รูปที่ 1-15 : แผนภาพสมดุลในสภาพของแข็งเป็นเนื้อเดียวกันเพียงบางส่วน

1.6 ส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิง

โลหะเงินบริสุทธิ์มีความแข็งแรงต่ำ แต่ความเหนียวสูงไม่เหมาะกับการนำไปทำตัวเรือนเครื่องประดับ การผสมสารเจือจะช่วยเพิ่มความแข็งแรง โดยโลหะที่นิยมใช้เป็นสารเจือ ได้แก่ ทองแดง เนื่องจากเป็นโลหะที่มีราคาไม่สูงมากนัก และสามารถเพิ่มความต้านแรงดึงให้กับโลหะเงินได้ด้วยอัตราส่วนที่สูงพอสมควร



รูปที่ 1-16 : ความแข็งของโลหะเงินเจือขึ้นกับสารเจือชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 1-5 : ค่าความต้านแรงดึงของโลหะเงินเจือ ขึ้นกับสารเจือชนิดต่าง ๆ

สารเจือ	ค่าความต้านแรงดึง (MPa)			
	ปริมาณสารเจือ (%)			
	2	5	10	20
ทองคำ (Au)	160	170	180	200
แคดเมียม (Cd)	160	170	180	210
ทองแดง (Cu)	190	240	280	310
พาลเลเดียม (Pd)	160	180	210	270
แอนติโมน (Sb)	190	240	300	-
ดีบุก (Sn)	190	240	300	-
สังกะสี (Zn)	180	190	300	-

โลหะมีค่าที่ใช้ทำตัวเรือนเครื่องประดับตามมาตรฐาน ISO 9202 กำหนดปริมาณของโลหะไว้หลายระดับ โดยกำหนดไว้ใน 1000 ส่วน ดังนี้

ตารางที่ 1-6 : ปริมาณโลหะมีค่าเจือตามค่ามาตรฐาน

โลหะมีค่าเจือ	ปริมาณธาตุใน 1,000 ส่วน อย่างต่ำ			
ทองคำเจือ	375	585	750	916
แพลตตินั่ม	850	900	950	
พาลัลดียมเจือ	500	950		
เงินเจือ	800	835	925	

เงินสเตอร์ลิงที่นิยมใช้ทำตัวเรือนเครื่องประดับ นิยมใช้อย่างน้อย 925 (เนื้อเงิน $\geq 92.5\%$) ซึ่งในทางปฏิบัติต้องควบคุมไม่ให้สารเจือมีปริมาณมากกว่า 7.5 % โดยเด็ดขาด ดังนั้นจึงผสมทองแดงระหว่าง 5 – 6 % และอาจมีสารเจืออื่น ๆ อีกไม่เกิน 1 % เป็นต้น

1.7 เอกสารอ้างอิง

1. Green, T; The Gold Companion. London, Rosen Dale Pres, 1991
2. Degussa AG, Edelmetah – Taschenbuch, Hüthig – Verlage Heidelberg, 1995
3. Diego Pinton, Jewellery Technology, Edizioni Gold – Milano, 1999
4. ผ.ศ.สมนึก วัฒนศรีกุล, โลหะวิทยา, ศูนย์ผลิตตำราเรียน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2538

บทที่ 2

การทดสอบด้านคุณสมบัติทางกล

จากวิธีการวิจัยที่กำหนด ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเงิน สเตอรืลิ่งในส่วนประกอบต่างๆ ที่ได้ผลการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีทางเคมี โดยกองเคมี กรมวิทยาศาสตร์บริการและนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับสมบัติทางกล เช่น ความต้านแรงดึง ความยืด ความแข็ง และโครงสร้างจุลภาคที่อัตราการขึ้นรูปต่างๆ เพื่อหาส่วนผสมทางเคมีในเงินสเตอรืลิ่ง เช่น ซิลิกอน และสังกะสี ที่เหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นตัวเรือนเครื่องประดับต่อไป

2.1 ผลของการวิเคราะห์ธาตุเจือหลังการหลอมโลหะเงินสเตอรืลิ่ง 925

การหลอมโลหะเงินประสมตามสัดส่วนที่วางแนวทางไว้ได้ผลจากการทำเคมีวิเคราะห์หาปริมาณธาตุของซิลิกอนกับสังกะสีจากกองเคมี กรมวิทยาศาสตร์บริการ และจากการทำวิเคราะห์เมื่อหาปริมาณธาตุเงิน ปรากฏผลดังแสดงในตารางที่ 2-1 ถึง 2-4

ตารางที่ 2-1 : ผลการทดสอบส่วนผสมทางเคมี กลุ่มซิลิกอน 0.1%

ตัวอย่าง		Si(%)	Zn(%)	Cu(%)	Ag(%)
S02-16	ส่วนผสมที่ ต้องการ	0.1	0.5	6.9	92.5
	วิเคราะห์ทางเคมี	0.05	0.75	5.8	93.4
S02-12	ส่วนผสมที่ ต้องการ	0.1	0.75	6.65	92.5
	วิเคราะห์ทางเคมี	0.1	1.0	5.1	93.8
S02-08	ส่วนผสมที่ ต้องการ	0.1	1.0	6.4	92.5
	วิเคราะห์ทางเคมี	0.14	1.6	4.8	93.4
S02-01	ส่วนผสมที่ ต้องการ	0.1	1.25	6.15	92.5
	วิเคราะห์ทางเคมี	0.09	1.3	5.9	92.7

ตารางที่ 2-2 : ผลการทดสอบส่วนผสมทางเคมี กลุ่มซิลิกอน 0.25%

ตัวอย่าง		Si(%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (%)
S02-15	ส่วนผสมที่ ต้องการ	0.25	0.5	6.75	92.5
	วิเคราะห์ทางเคมี	0.23	0.83	4.4	94.5
S02-11	ส่วนผสมที่ ต้องการ	0.25	0.75	6.5	92.5
	วิเคราะห์ทางเคมี	0.23	1.6	5.2	92.9
S02-07	ส่วนผสมที่ ต้องการ	0.25	1.0	6.25	92.5
	วิเคราะห์ทางเคมี	0.27	1.3	4.5	93.9
S02-02	ส่วนผสมที่ ต้องการ	0.25	1.25	6.0	92.5
	วิเคราะห์ทางเคมี	0.15	1.16	5.2	93.4

ตารางที่ 2-3 : ผลการทดสอบส่วนผสมทางเคมี กลุ่มซิลิกอน 0.45%

ตัวอย่าง		Si(%)	Zn(%)	Cu(%)	Ag(%)
S02-14	ส่วนผสมที่ ต้องการ	0.45	0.5	6.55	92.5
	วิเคราะห์ทางเคมี	0.2	0.85	5.8	93.1
S02-10	ส่วนผสมที่ ต้องการ	0.45	0.75	6.3	92.5
	วิเคราะห์ทางเคมี	0.2	1.1	4.6	94.1
S02-06	ส่วนผสมที่ ต้องการ	0.45	1.0	6.05	92.5
	วิเคราะห์ทางเคมี	0.28	1.7	3.3	94.7
S02-03	ส่วนผสมที่ ต้องการ	0.45	1.25	5.8	92.5
	วิเคราะห์ทางเคมี	0.19	2.1	3.9	93.8

ตารางที่ 2-4 : ผลการทดสอบส่วนผสมทางเคมี กลุ่มซิลิกอน 0.6%

ตัวอย่าง		Si(%)	Zn(%)	Cu(%)	Ag(%)
S02-13	ส่วนผสมที่ ต้องการ	0.6	0.5	6.4	92.5
	วิเคราะห์ทางเคมี	0.24	0.79	5.7	93.2
S02-09	ส่วนผสมที่ ต้องการ	0.6	0.75	6.15	92.5
	วิเคราะห์ทางเคมี	0.28	1.2	4.1	94.4
S02-05	ส่วนผสมที่ ต้องการ	0.6	1.0	5.9	92.5
	วิเคราะห์ทางเคมี	0.31	2.0	4.4	93.2
S02-04	ส่วนผสมที่ ต้องการ	0.6	1.25	5.65	92.5
	วิเคราะห์ทางเคมี	0.21	1.7	3.1	94.9

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์นำมาเรียบเรียงใหม่โดยยึดถือผลของ ทองเคมี กรมวิทยาศาสตร์บริการ เป็นหลัก เรียงลำดับปริมาณซิลิกอนจากน้อยไปมาก ดังแสดงในตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 : ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925

ตัวอย่างที่	Si(%)	Zn(%)	Cu(%)	Ag(%)
1 (S02-16)	0.05	0.75	5.8	93.4
2 (S02-01)	0.09	1.30	5.9	92.7
3(S02-12)	0.10	1.0	5.1	93.8
4(S02-08)	0.14	1.6	4.8	93.4
5(S02-02)	0.15	1.16	5.2	93.4
6(S02-03)	0.19	2.10	3.9	93.8
7(S02-14)	0.20	0.85	5.8	93.1
8(S02-10)	0.20	1.10	4.6	94.1
9(S02-04)	0.21	1.70	3.1	94.9
10(S02-15)	0.23	0.83	4.4	94.5
11(S02-11)	0.23	1.60	5.2	92.9

ตารางที่ 2-5 : ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	Si(%)	Zn(%)	Cu(%)	Ag(%)
12(S02-13)	0.24	0.79	5.7	93.2
13(S02-07)	0.27	1.30	4.5	93.9
14(S02-09)	0.28	1.20	4.1	94.4
15(S02-06)	0.28	1.70	3.3	94.7
16(S02-05)	0.31	2.0	4.4	93.2

ผลการหลอมถึงแม้จะไม่ได้ตามเป้าหมายซิลิกอนและสังกะสีที่กำหนดไว้แต่ผลที่ออกมาได้ตัวอย่างเงินสเตอร์ลิงที่มี ซิลิกอนตั้งแต่ 0.05 % ถึง 0.31 % และสังกะสีตั้งแต่ 0.75 % ถึง 2.1 % ซึ่งธาตุทั้งสองใน 16 สูตร มีการแปรเปลี่ยนปริมาณธาตุที่ถึและอยู่ในสัดส่วนใกล้เคียงเพียงพอที่จะนำไปทดสอบหาสมบัติทางกลต่างๆ เพื่อการศึกษาเปรียบเทียบได้

2.2 ผลการทดสอบแรงดึงสภาพหลังการหล่อ

การทดสอบแรงดึง สามารถให้ค่าความต้านแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว โดยการทดสอบทำอย่างละ 3 ชิ้น และหาค่าเฉลี่ย ตัวอย่างกำหนดให้เปอร์เซ็นต์ของทองแดงคงที่ 5% พบว่าเมื่อมีสังกะสีเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การยืดตัวลดลงเล็กน้อย ในขณะที่การผสมซิลิกอนเพิ่มขึ้น ค่าความต้านแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีแนวโน้มลดลงชัดเจน ในขณะที่เมื่อผสมทั้งสังกะสีและซิลิกอน โดยกำหนดให้สังกะสีคงที่ที่ 1% และเพิ่มซิลิกอนพบว่าเมื่อเพิ่มซิลิกอน ค่าความต้านแรงดึง จะเพิ่มขึ้นในช่วงต้น และจะลดลงเมื่อซิลิกอนมากกว่า 0.2% ในขณะที่ค่าความต้านแรงดึงจะลดลงตลอดเมื่อซิลิกอนเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2-6 : ค่าความต้านแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของโลหะเงินเจือ สภาพหลังหล่อ

หมายเลข ตัวอย่าง	ส่วนผสม *) (%)				ค่าความต้านแรงดึง (N/mm ²)				เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%)			
					ทดสอบครั้งที่			ค่าเฉลี่ย	ทดสอบครั้งที่			ค่าเฉลี่ย
	Ag	Cu	Zn	Si	1	2	3		1	2	3	
1	94.5%	5%	0.5%	-	177.1	227.2	214.5	206.26	22	38	40.5	33.5
2	94%	5%	1%	-	227.3	240.5	217	228.26	42	35	24	33.66
3	93.5%	5%	1.5%	-	239.3	253.4	220.4	231.7	15.5	48.5	29.5	31.16
4	93%	5%	2%	-	221.5	235.9	235.2	230.86	27	36.5	27.5	30.33
5	92.5%	5%	2.5%	-	231.4	247.7	249.5	242.86	22.5	29	12	21.16

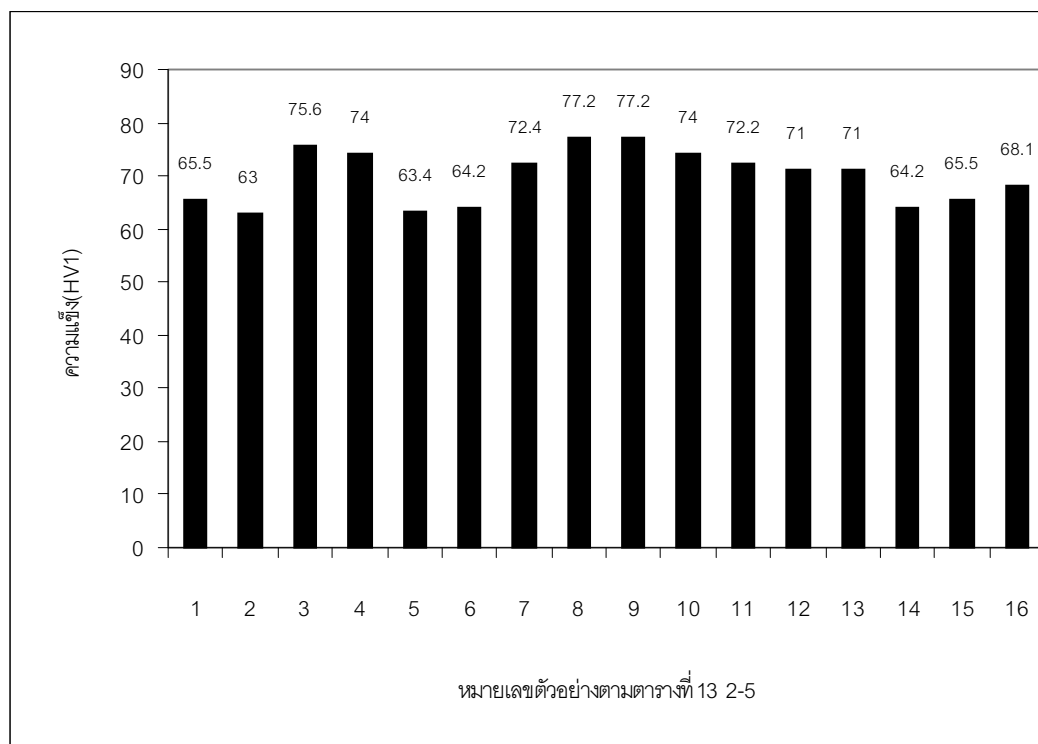
ตารางที่ 2-6 : ค่าความต้านแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของโลหะเงินเจือ สภาพหลังหล่อ (ต่อ)

หมายเลข ตัวอย่าง	ส่วนผสม *) (%)				ค่าความต้านแรงดึง (N/mm ²)				เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%)			
					ทดสอบครั้งที่			ค่าเฉลี่ย	ทดสอบครั้งที่			ค่าเฉลี่ย
	Ag	Cu	Zn	Si	1	2	3		1	2	3	
6	94.9%	5%	-	0.1%	177.2	188.9	208.3	191.46	31	22.5	35.5	29.67
7	94.85%	5%	-	0.15%	225.3	220.6	229.6	225.16	26	29	34.5	29.83
8	94.8%	5%	-	0.2%	169.9	246.9	242.5	219.76	12.5	26.5	24.5	21.16
9	94.7%	5%	-	0.3%	164.5	177.1	153.7	165.1	9.5	6.5	10	8.66
10	94.6%	5%	-	0.4%	63.02	65.27	61.18	63.16	6.5	1.5	4	4
11	93.9%	5%	1%	0.1%	232.6	213.6	222.1	222.76	44	34.5	48	42.16
12	93.85%	5%	1%	0.15%	233.7	238.7	226	232.8	33	42	34	36.33
13	93.8%	5%	1%	0.2%	230.3	231.5	245.1	235.63	33.5	34.5	33	33.66
14	93.75%	5%	1%	0.25%	198.5	212.2	211.6	207.43	17	22	21.5	20.16

*) ส่วนผสมทางเคมีในตารางนี้เป็นส่วนผสมที่หลอม ส่วนผสมที่มีอยู่จริงได้ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีและเครื่อง ICP แล้ว แต่ผลการวิเคราะห์ยังไม่น่าเชื่อถือ

2.3 ผลการทดสอบความแข็งสภาพหลังการหล่อ

การทดสอบความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ที่ได้จากการหลอมเป็นโลหะที่อ่อน การทดสอบความแข็งที่นิยมใช้กันเป็นการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์สโดยเลือกใช้แรงกด 9.8N (HV1) ซึ่งสามารถทดสอบความแข็งเปรียบเทียบโลหะเงินสเตอร์ลิงจากสภาพหลังการหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 มม จนถึงการดึงขึ้นรูปเย็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มม ที่มีอัตราการขึ้นรูปเย็น 95.6% ได้ผลของความแข็งหลังการหล่อดูจากตารางที่ 2-18 ถึง 2-23 ในภาคผนวก ก ที่แสดงให้เห็นความแข็งในแต่ละสูตร นำค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 จุดมาแสดงเปรียบเทียบความแข็งให้เห็นได้ชัดเจนดังในรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 : เปรียบเทียบค่าความแข็งโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 สภาพหลังการหล่อทุกสูตร

2.4 ผลการทดสอบความแข็งสภาพหลังการดัดขึ้นรูปเย็น

การทดสอบความแข็งจะทดสอบหลังจากการดัดขึ้นรูปเย็นขึ้นทดสอบด้วยการลดขนาดจากเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 มม หลังการหล่อ ลดขนาดลงเหลือ 3 มม 2 มม 1.5 มม และ 1 มม ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราการขึ้นรูปเย็นที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2-7 : อัตราการขึ้นรูปเงินสเตอร์ลิง 925 ขนาดต่างๆ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	3.0	2.0	1.5	1.0	0.85
อัตราการขึ้นรูป (%)	60.9	82.6	90.2	95.6	97

การดัดขึ้นรูปเย็นในกลุ่มที่มีซิลิกอนตั้งแต่ 0.05% ถึง 0.14% สามารถดัดขึ้นรูปได้จนถึงอัตราขึ้นรูป 97% ค่าความแข็งที่ได้ปรากฏในตารางที่ 2-9 ส่วนในกลุ่มที่มีปริมาณของซิลิกอนมากกว่า 0.14% การดัดขึ้นรูปเย็นกระทำได้อย่างเพราะเปราะแตกหักง่าย แต่มีบางกลุ่มที่สามารถดัดขึ้นรูปเย็นได้บ้าง ดังแสดงในตารางที่ 2-8 ส่วนค่าความแข็งดูตารางที่ 2-9

ตารางที่ 2-8 : อัตราการขึ้นรูปเย็นกลุ่มซิลิกอน 0.15% ถึง 0.27% ที่ปริมาณสังกะสีต่างๆ

ปริมาณ ซิลิกอน (%)	ปริมาณ สังกะสี (%)	ดึงขึ้นรูปเย็นได้ขนาด (มม)	อัตราขึ้นรูป (%)
0.27	1.3	3.75	39
0.23	0.83	3.5	47
0.23	1.6	3.3	53
0.15	1.6	3.24	54

ในกลุ่มอื่นๆ นอกจากนี้ การดึงขึ้นรูปเย็นในสภาพหลังการหล่อไม่สามารถดึงขึ้นรูปได้เพราะมีความเปราะแตกหักง่าย

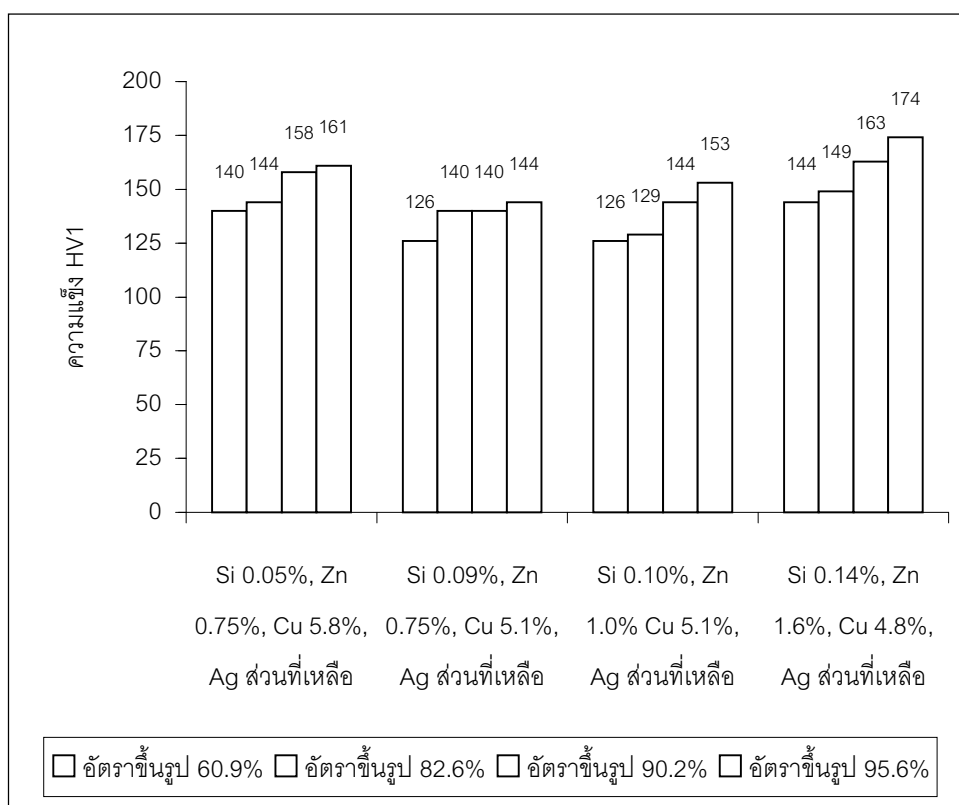
ตารางที่ 2-9 : ค่าความแข็ง HV1 ของเงินสเตอร์ลิงกลุ่มซิลิกอน 0.05% ถึง 0.14% ที่อัตราขึ้นรูปต่างๆ

ปริมาณธาตุ (%)	อัตราขึ้นรูป 60.9%			อัตราขึ้นรูป 82.6%			อัตราขึ้นรูป 90.2%			อัตราขึ้นรูป 95.6%		
Si Zn Cu Ag ที่เหลือ	ความ แข็ง 3 จุด (HV1)	ค่า เฉลี่ย (HV1)	SD	ความ แข็ง 3 จุด (HV1)	ค่า เฉลี่ย (HV1)	SD	ความ แข็ง 3 จุด (HV1)	ค่า เฉลี่ย (HV1)	SD	ความ แข็ง 3 จุด (HV1)	ค่า เฉลี่ย (HV1)	SD
0.05 0.75 5.8	140 140 140	140	0	140 153 140	144	7.5	168 153 153	158	8.6	153 168 162	161	7.5
0.09 1.3 5.9	119 129 129	126	5.7	140 140 140	140	0	140 140 140	140	0	140 153 140	144	7.5
0.1 1.1 5.1	129 129 119	126	5.7	129 119 140	129	10	140 153 140	149	7.6	153 153 153	153	0
0.14 1.6 4.8	140 153 140	144	7.5	153 153 140	149	7.5	153 168 168	163	8.6	185 168 168	174	9.8

SD = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากตารางที่ 2-9 แสดงให้เห็นถึงความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเงินสเตอร์ลิงมีอัตราการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นในทุกสูตรส่วนผสมทางเคมี โดยการวัดค่าความแข็ง 3 ตำแหน่งหาค่าเฉลี่ยและคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าความแข็งเงินสเตอร์ลิงหลังการขึ้นรูปเย็นที่อัตราขึ้นรูปต่างๆ ตามตารางที่ 2-9 นำมาแสดงเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างในรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 : ค่าความความแข็งเงินสเตอร์ลิง หลังการดึงขึ้นรูปที่ส่วนผสมและอัตราขึ้นรูปต่างๆ

ตารางที่ 2-10 : ค่าความแข็ง HV1 ของเงินสเตอร์ลิงกลุ่มซิลิกอน 0.15% ถึง 0.27% ที่อัตราขึ้นรูปต่างๆ

ปริมาณธาตุ (%)	อัตราขึ้นรูป 40.6%			อัตราขึ้นรูป 47%			อัตราขึ้นรูป 53%			อัตราขึ้นรูป 70%		
Si Zn Cu Ag ที่เหลือ	ความ แข็ง 3 จุด (HV1)	ค่า เฉลี่ย (HV1)	SD	ความ แข็ง 3 จุด (HV1)	ค่า เฉลี่ย (HV1)	SD	ความ แข็ง 3 จุด (HV1)	ค่า เฉลี่ย (HV1)	SD	ความ แข็ง 3 จุด (HV1)	ค่า เฉลี่ย (HV1)	SD
0.15 1.16 5.2	82 82 82	82	0	- - -	- - -	-	- - -	- - -	-	- - -	- - -	-
0.23 0.83 4.4	- - -	- - -	-	82 95 95	91	7.5	- - -	- - -	-	- - -	- - -	-
0.23 1.6 5.2	- - -	- - -	-	- - -	- - -	-	110 102 112	108	5.2	- - -	- - -	-
0.27 1.3 4.5	- - -	- - -	-	- - -	- - -	-	- - -	- - -	-	110 110 119	113	5.1

SD = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2.5 ผลการทดสอบหาความต้านแรงดึงสภาพหลังการหล่อ

การทดสอบความต้านแรงดึงสภาพหลังการหล่อได้กึ่งขึ้นทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 มม ความยาวพิคัด 20 มม (ดูรูปที่ 2-3) และขึ้นทดสอบที่ถูกดึงทดสอบแล้วปรากฏในรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 : ชิ้นทดสอบเงินสเตอร์ลิง 925 ก่อนทำการทดสอบแรงดึง

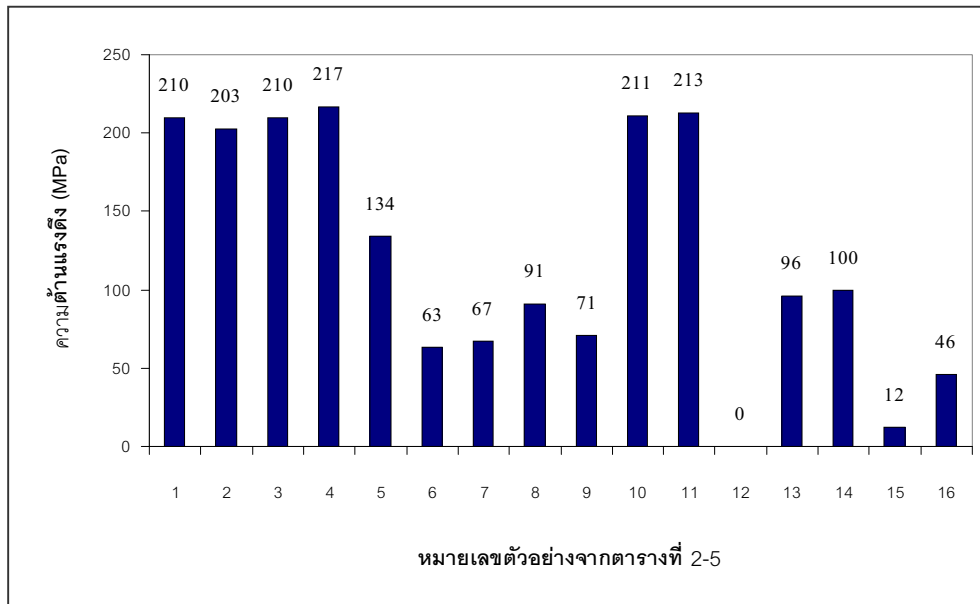


รูปที่ 2-4 : ชิ้นทดสอบเงินสเตอร์ลิง 925 หลังดึงทดสอบแล้ว

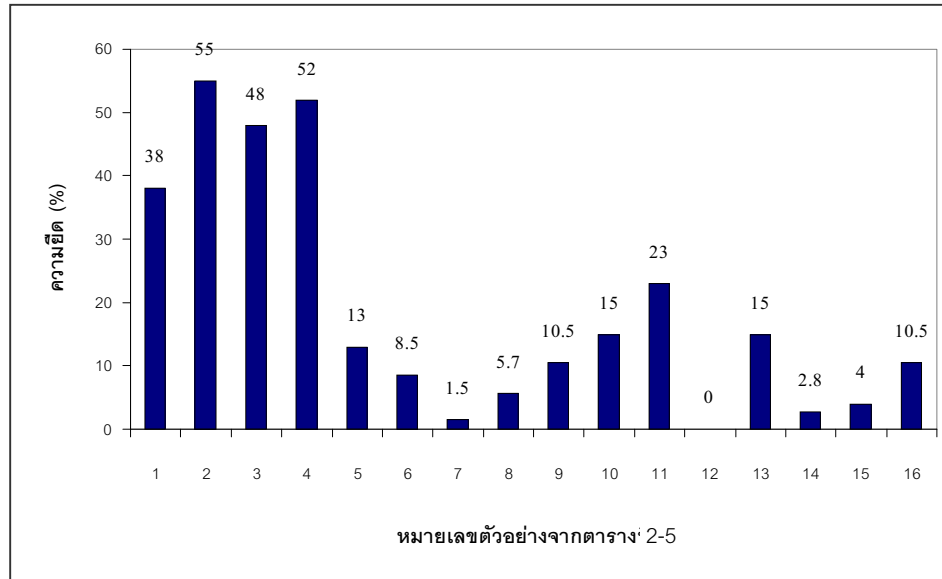


รูปที่ 2-5 : ลักษณะการจับดึงทดสอบ โลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพหลังการหล่อ

ค่าความต้านแรงดึงและความยืดของเงินสเตอร์ลิง 925 ทุกสูตร ที่ได้จากการทดสอบนำมาหาค่าเฉลี่ยตัวอย่างละ 3 ชิ้น มาเขียนเป็นกราฟแท่งเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่าง ไว้ในรูปที่ 2-6 และรูปที่ 2-7 ตัวอย่างหมายเลข 12 เพราะแตกหักง่ายไม่สามารถทดสอบหาความต้านแรงดึงได้



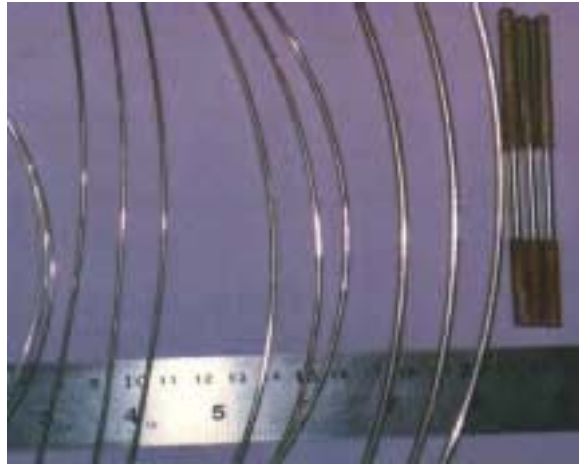
รูปที่ 2-6 : ไดอะแกรมเปรียบเทียบความต้านแรงดึงสภาพหลังการหล่อ



รูปที่ 2-7 : ไดอะแกรมเปรียบเทียบความยืดสภาพหลังการหล่อ

2.6 ผลการทดสอบความต้านแรงดึงหลังการดึงขึ้นรูปเย็น

การดึงขึ้นรูปของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 มีการดึงขึ้นรูปลดขนาดจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 มม หลังการหล่อ ลงมาเป็นชิ้นๆ และมีอัตราการขึ้นรูปต่างๆ ตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2-7

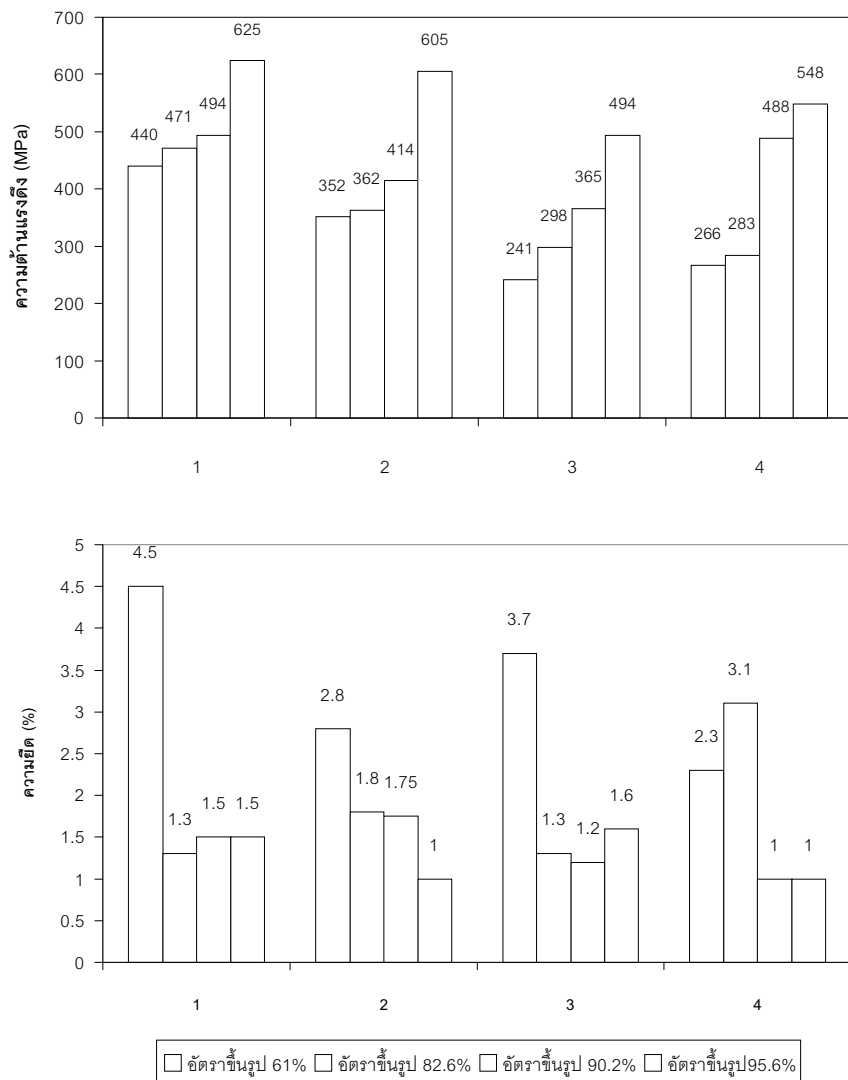


รูปที่ 2-8 : โลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการดึงขึ้นรูป ขนาด 1.0, 1.5, 2.0 และ 3.0 มม ตามลำดับ



รูปที่ 2-9 : ลักษณะการจับดึงโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพหลังการดึงขึ้นรูป

ค่าความต้านแรงดึงและความยืดที่อัตราขึ้นรูปเย็น 61%, 82.6%, 90.2% และ 95.6 % จากการทดสอบได้นำมาแสดงเปรียบเทียบให้เห็นการเปลี่ยนแปลงชัดเจนขึ้นในรูปที่ 2-10



กลุ่มที่ 1 Si 0.05% Zn 0.75% Cu 5.8% Ag ส่วนที่เหลือ

กลุ่มที่ 2 Si 0.09% Zn 1.30% Cu 5.9% Ag ส่วนที่เหลือ

กลุ่มที่ 3 Si 0.10% Zn 1.0% Cu 5.1% Ag ส่วนที่เหลือ

กลุ่มที่ 4 Si 0.14% Zn 1.6 % Cu 4.8% Ag ส่วนที่เหลือ

รูปที่ 2-10 : เปรียบเทียบค่าความต้านแรงดึงและความยืดที่อัตราขึ้นรูปต่างๆ

ผลความต้านแรงดึงและความยืดสภาพหลังการขึ้นรูปเย็นที่อัตราขึ้นรูป 61%, 82.6%, 90.2% และ 95.6% ที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 2-10 ทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงความต้านแรงดึงที่เพิ่มขึ้นตามอัตราการขึ้นรูปที่เพิ่มขึ้นด้วย แต่ความยืดมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจนนัก มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่ออัตราขึ้นรูปเพิ่มขึ้น

กลุ่มที่น่าสนใจที่สุดคือ กลุ่มที่ 1 Si 0.05% Zn 0.75% Cu 5.8% และ Ag ส่วนที่เหลือ เพราะมีความต้านแรงดึงที่อัตราขึ้นรูปต่างๆสูงกว่ากลุ่มอื่นและมีความยืดที่สม่ำเสมอ

กลุ่มที่น่าสนใจรองลงไปคือ กลุ่มที่ 2 Si 0.09% Zn 1.30% Cu 5.9% และ Ag ส่วนที่เหลือ มีความต้านแรงดึงที่อัตราขึ้นรูปต่างๆน้อยกว่ากลุ่มที่ 1 แต่การดึงขึ้นรูปเย็นทำงานง่ายกว่ากลุ่มที่ 1

ทั้งสองกลุ่มนี้สามารถนำไปผลิตเป็นตัวเรือนเครื่องประดับได้ดี เลือกใช้โดยพิจารณาที่อัตราขึ้นรูป ความต้านแรงดึงและความยืดที่เหมาะสมต่อไป

บทที่ 3

เทคนิคการหล่อเหรียญเงินศูนย์กลางโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 สำหรับทำตัวเรือนเครื่องประดับ

3.1 การหล่อโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

การหล่อโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เป็นกรรมวิธีหล่อโลหะที่มีลักษณะพิเศษจำเพาะ คือ จะบรรจุโลหะเหลวเข้าสู่โพรงแบบในขณะที่หมุนอยู่รอบแกน และปล่อยให้ชิ้นงานแข็งตัวในระหว่างที่โพรงแบบยังคง หมุนอยู่เช่นเดิม แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นเนื่องจากการหมุนของโพรงแบบจะทำให้โลหะเหลวอัดตัวแน่นเข้ากับผนังโพรงแบบ จึงทำให้เกิดรูปร่างของชิ้นงานคล้ายตามผิวของผนังโพรงแบบโดยตลอดด้วย นอกจากนั้นยังทำให้เกิดระบบการป้อนเดิมที่แตกต่างกันจากขบวนการหล่อกรรมวิธีอื่น ๆ แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะคล้ายกับ แรงไฮโดรสแตติก (Hydrostatic Force) ซึ่งก่อให้เกิดประโยชน์ขึ้น 2 ทางคือ

1. ในขณะที่จะเห็นว่าแรงเหวี่ยงนี้ สามารถสลัดโลหะเหลวให้กระจายแผ่ออกไปสัมผัสกับผิวของผนังโพรง ลักษณะเช่นนี้จะทำให้สามารถหล่อชิ้นงานรูปทรงกระบอกกลวงภายในได้เลย รวมทั้งรูปทรงแหวนอื่น ๆ ด้วย
2. แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง จะทำให้เกิดความดันสูงยิ่งขึ้นภายในชิ้นงานขณะที่โลหะเหลวกำลังจะแข็งตัว ลักษณะเช่นนี้หากทิศทางการแข็งตัวเริ่มต้นจากผนังโพรงแบบมุ่งเข้าสู่จุดศูนย์กลางของแกนหมุนแล้ว ย่อมจะช่วยให้เกิดลักษณะการป้อนเดิมที่ดีขึ้น และยังสามารถทำให้สิ่งมลทินต่าง ๆ แยกตัวออกจากเนื้อโลหะ และแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางยังสามารถขับไล่แก๊สให้ออกจากโมเลกุลของโลหะเหลวอีกด้วย

แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force)

Beeley (1974 : 490-493) ได้สรุปไว้ว่า แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจะเกิดขึ้นได้ขณะหมุน มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับรัศมีของการหมุน และความเร็วยกกำลังสอง ดังนี้

$$F_C = mr\omega^2 = \frac{mv^2}{r} \quad (3-1)$$

เมื่อกำหนดให้ F_C คือ แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (N)

m คือ มวลสาร (kg)

r คือ รัศมี (m)

ω คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

v คือ ความเร็วรอบที่เส้นรอบวง(m/s)

ในขณะที่กำลังหล่อโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางอยู่นั้นจะได้รับแรงดึงดูดของโลกกระทำด้วยเช่นกันโดย

$$F_g = m \cdot g \quad (3-2)$$

เมื่อกำหนดให้ g คือ อัตราความเร่ง (m/s^2)

เช่นนี้เอง ทำให้เกิดองค์ประกอบของแรงดึงดูดของโลกในระหว่างการหมุน กล่าวคือองค์ประกอบของแรงดึงดูดของโลกหรือการเหวี่ยงนั้น มีค่า

$$G_{factor} = \frac{F_c}{F_g} = \frac{r \cdot \omega^2}{g} \quad (3-3)$$

โดยทั่วไปมักกล่าวเป็นหน่วยความเร็วรอบต่ออนาที n นั่นคือ

$$G_{factor} = \frac{r}{g} \cdot \frac{\pi}{30}^2 n^2 = \frac{0.011rn^2}{g} \quad (3-4)$$

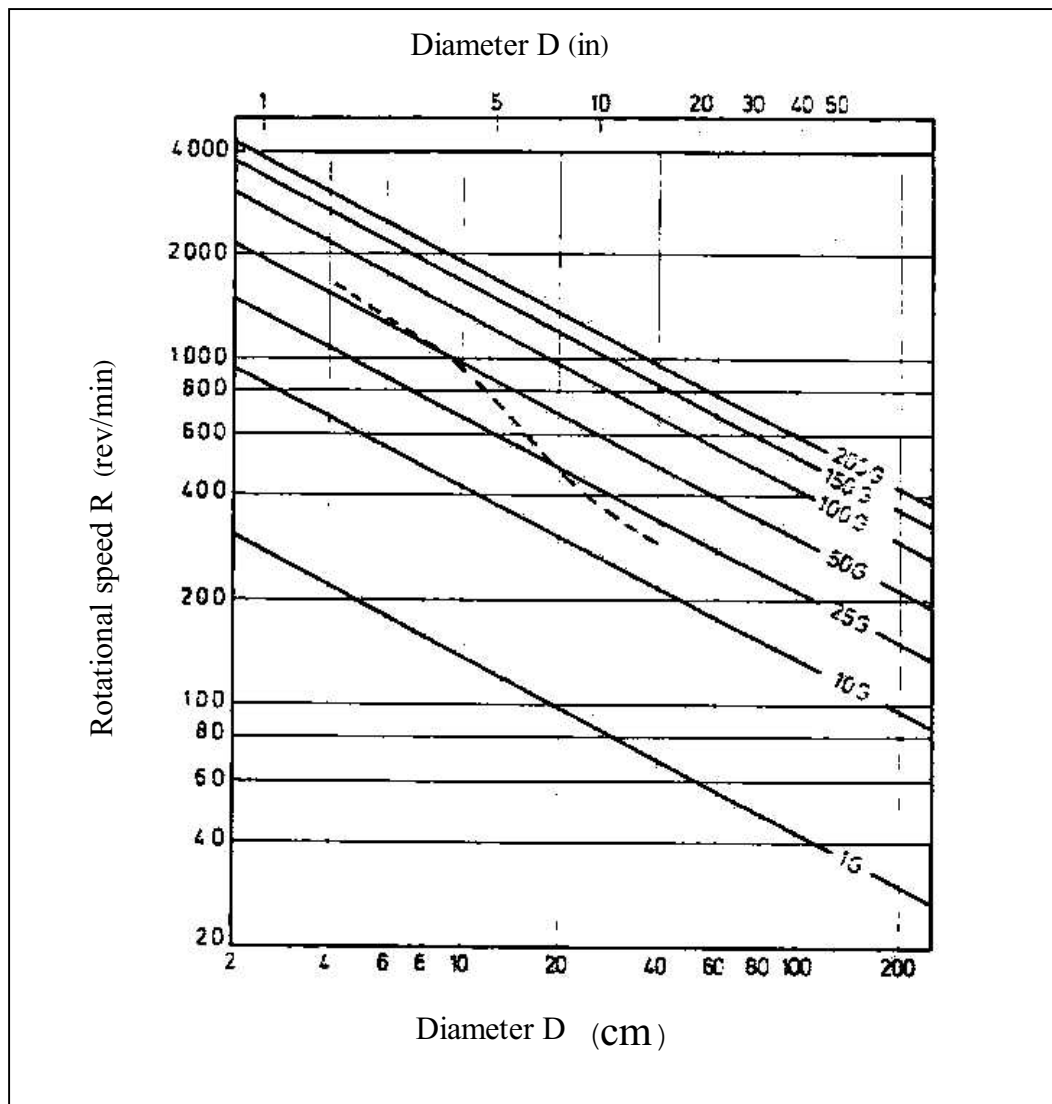
หรือ

$$\begin{aligned} n &= \frac{G_{factor} \cdot g^{\frac{1}{2}}}{0.011r} = 29.9 \frac{G_{factor}^{\frac{1}{2}}}{r} \\ &= 42.3 \frac{G_{factor}^{\frac{1}{2}}}{d} \quad (\text{rev/min}) \end{aligned} \quad (3-5)$$

เมื่อกำหนดให้ d คือเส้นผ่านศูนย์กลาง (m)

$$n = 265 \frac{G_{factor}^{\frac{1}{2}}}{d} \quad (\text{rev/min}) \quad (3-6)$$

เมื่อกำหนดให้ d คือเส้นผ่านศูนย์กลาง (in)



รูปที่ 3-1 : แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมในการหมุนกับขนาดความโตของชิ้นงานซึ่งแปรเปลี่ยนตามค่าของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมในการหมุน ขนาดความโตของชิ้นงาน และกับแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ได้แสดงเป็นเส้นกราฟไว้ให้เห็นในรูปที่ 3-1 จากภาพถ้าเราหาหรือกำหนดค่าองค์ประกอบของการเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง G ได้ เราจะทราบความเร็วรอบที่จะใช้ในการหมุนโพรงแบบเพื่อทำการเทหล่อได้เช่นกันไม่มีเกณฑ์มาตรฐานอะไรสำหรับหลักในการเลือกขนาดของการเหวี่ยงหนีศูนย์กลางอันนี้ ในการหล่อโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่แท้จริง หรือการหล่อโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางชิ้นงานรูปทรงกระบอกกลวงนั้น ความเร็วขอบนอกที่เส้นรอบวงของโพรงแบบกับโลหะเหลว จะมีความแตกต่างกัน เนื่องจากแรงฝืดที่เกิดขึ้นระหว่างผนังโพรงแบบกับคุณสมบัติภายในของเนื้อโลหะ เช่นการหล่อโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางตามแกนนอก โลหะจะถูกเทเข้าสู่โพรงแบบในขณะที่มันยังคงหมุนอยู่ซึ่งจะต้องมีความเร็วพอเพียง เพื่อให้โลหะเหลวเกาะยึดติดกับผนังโพรงแบบ

ได้แน่น โดยไม่เลื่อนหลุด มีฉนวนโลหะเหลวอาจจะหยดย้อยลงข้างล่างได้ในขณะที่มันถูกเหวี่ยงพาห มุนเลยครึ่งวงกลมส่วนบนขึ้นไป เนื่องจากโลหะเหลวอาจจะเลื่อนหลุด (Slip) ออกจากผนังโพรงแบบ ก่อนที่จะแข็งตัวโดยปกติมันจะต้องใช้การเหวี่ยงหนีศูนย์กลางนี้มีค่าไม่ต่ำกว่า 1G จึงจะทำให้โลหะ เหลวถูกแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางพาห มุนไปพร้อม ๆ กับผนังโพรงแบบได้ แต่จากการทดลองค่าที่ให้ผล ดีที่สุดจะจำกัดค่าของการเหวี่ยงหนีศูนย์กลางมีค่าต่ำสุดอยู่ระหว่าง 3-4.5 G ซึ่งอาจจะเป็ นแรงที่มาก มายเกินไปสำหรับการปฏิบัติงาน

3.2 เทคนิคการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

Beeley (1974 : 493-503) ได้สรุปเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้

1. มุมของแกนหมุน (Axis of rotation)

การหล่อเหวี่ยงนั้นอาจใช้แกนหมุนมุมใด ๆ ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโพรงแบบ ลักษณะ และวิธีการเทโลหะ การออกแบบเครื่องจักรและอุปกรณ์สำหรับจับห มุนโพรงแบบ โดยทั่วไปแล้วจะ นิยมหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลางกันตามแนวแกนกับชิ้นงานที่มีสัดส่วนความยาวต่อความโตมีค่ามาก ๆ และถ้าหากชิ้นงานมีเส้นผ่านศูนย์กลางโตมากกว่าความยาวแล้ว ก็มักจะหล่อเหวี่ยงตามแนวแกนตั้ง หรือชิ้นงานอาจหมุนในมุมอื่นก็ได้

2. ชนิดของโพรงวัสดุ

วัสดุที่นำมาใช้สร้างโพรงแบบจะพิจารณากันจากรูปร่างและจำนวนของชิ้นงานที่ต้องการผลิตถ้า ชิ้นงานมีรูปร่างธรรมดา เช่น รูปทรงกระบอกแท่งตรงก็มักจะใช้โพรงแบบโลหะ เนื่องจากจะให้ผลดี มากกว่า เป็นต้นว่า ผลิตชิ้นงานได้จำนวนมากและโพรงโลหะยังสามารถช่วยให้ทิศทางการแข็งตัวของ ชิ้นงานเกิดขึ้นอย่างถูกต้อง วัสดุที่ใช้สร้างโพรงแบบหรือแม่พิมพ์นี้จะใช้ทั้งเหล็กเหนียวและเหล็กหล่อ โดยมีเหล็กเหนียวหุ้มเป็นเปลือกนอก โพรงแบบโลหะเหล่านี้จะใช้สารเคลือบได้หลายชนิดเพื่อช่วย ป้องกันผิวของผนังโพรงแบบเสียหายและจะช่วยให้ง่ายต่อการถอดแบบชิ้นงาน สารทนไฟที่นำมาใช้ สำหรับเคลือบนั้นมีทั้งจำพวกแกรไฟต์ เพอร์โรซิลิกอน และอื่น ๆ สารเคลือบจะนำมาใช้ทั้งภาพเหลว ขึ้นหรือผงแห้ง สารเคลือบนอกจากจะช่วยให้โพรงสามารถต้านทานต่อความร้อนอย่างฉับพลันแล้วยัง มีคุณสมบัติการเป็นฉนวนและเป็นสารกำเนิดได้ด้วย ถ้าหากชิ้นงานมีรูปร่างซับซ้อนมากหรือต้องการ จำนวนไม่มาก การเหวี่ยงก็อาจใช้โพรงแบบเป็นสารทนไฟเม็ดโดยจะเลือกเอาส่วนผสมที่มีความแข็ง แรงสูง อาจเป็นส่วนผสมคล้ายกับทรายไล่แบบ หรือทรายโพรงแบบหุ้มผิวบางที่โพรงแบบแกรไฟต์ อาจนำมาใช้ในกรณีพิเศษด้วยเช่นกัน

3. การแข็งตัวและการป้อนเติมของชิ้นงานหล่อห่วยงหนีศูนย์กลาง

ชิ้นงานหล่อโลหะจะมีคุณภาพสูง ทั้งความสมบูรณ์ของเนื้อโลหะและทางด้านโลหะวิทยาพร้อมกันได้นั้นจะต้องเกิดขึ้นได้จากผลของการควบคุมรูปแบบการแข็งตัวของชิ้นงาน ซึ่งจะแตกต่างกันไปแล้วแต่กรรมวิธีการหล่อ รวมทั้งขนาดและรูปร่างของชิ้นงานด้วย การที่โลหะสามารถควบคุมทิศทางการแข็งตัวของโลหะได้ และใช้ระบบที่มีความดันช่วย ย่อมจะทำให้การหล่อโลหะที่กล่าวมานั้นบรรลุผลดีสูงสุดแน่นอน แต่ควรเข้าใจด้วยว่า การป้อนที่มีความดันสูงแต่เพียงอย่างเดียวจะไม่สามารถควบคุมทิศทางการแข็งตัวของโลหะหรือชิ้นงานหล่อได้

3.3 การควบคุมคุณภาพของชิ้นงานหล่อห่วยงหนีศูนย์กลาง

การหล่อห่วยงหนีศูนย์กลางนั้นมืองค์ประกอบที่สำคัญหลายประการ เกี่ยวข้องกับการควบคุมคุณภาพของชิ้นงานเช่น ความเร็วในการหมุนโพรงแบบ อุณหภูมิเทหล่อ อัตราการเท และอุณหภูมิของโพรงโลหะ

3.3.1 ความเร็วในการหมุน การเลือกความเร็วในการหมุนโพรงแบบนั้นเป็นเรื่องสำคัญที่สุดของกระบวนการ ในขบวนการหล่อห่วยงหนีศูนย์กลางแท้จริงนั้น รูภายในของชิ้นงานจะถูกเร่งเอาไว้ด้วยแรงดึงดูดของโลก แต่แรงห่วยงจะช่วยทำให้ชิ้นงานหลุดพ้นจากการฉีกร้าตามแนวความยาวเนื่องจากแรงดึงดูดอย่างมากตามแนววงแหวนที่เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดของโลก สำหรับในขบวนการหล่อกึ่งห่วยงหนีศูนย์กลางและขบวนการหล่อความดันห่วยงนั้น จะต้องพิจารณาตามค่าความดันในการป้อนเติม ความเร็วในการหมุนโพรงแบบจะมีอิทธิพลเหนือเม็ดโครงสร้างของโลหะงาน ถ้าความเร็วในการหมุนโพรงแบบเพิ่มขึ้น ก็ยังจะทำให้ชิ้นงานที่ได้มีผลึกแข็งเม็ดเล็กละเอียดยิ่งขึ้นตามไปด้วย ถึงแม้ว่าโพรงแบบที่หมุนเร็ว ๆ นั้น จะทำให้โลหะเหลวเกิดการอลวนมากขึ้นก็ตามแต่ก็ยังดีกว่าการหมุนรอบต่ำ ๆ ทั้งนี้การหมุนรอบจัดจะทำให้ชิ้นงานไม่เกิดการฉีกร้าซึ่งย่อมจะให้คุณภาพประโยชน์มีค่ามากกว่า

3.3.2 อุณหภูมิเท จะเกี่ยวข้องโดยตรงกับรูปแบบการแข็งตัวของโลหะ การเทหล่อห่วยงหนีศูนย์กลางโลหะอุณหภูมิต่ำย่อมจะทำให้ได้ผลึกเม็ดเล็กละเอียด เป็นชนิดเม็ดหลายเหลี่ยมมุมเท่า (Equiaxed) ในขณะที่ใช้อุณหภูมิสูงก็จะทำให้ได้เม็ดโครงสร้างเป็นผลึกรูปแท่ง (Columnar) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติจะต้องใช้อุณหภูมิสูงพอที่จะให้ความมั่นใจได้ว่า โลหะเหลวจะสามารถไหลแผ่กระจายโดยไม่เกิดความบกพร่องเรื่องผิวย่น เหตุนี้จึงทำให้ไม่สามารถที่หลีกเลี่ยงต่อการก่อรูปผลึกแข็งหยาบ และยังเสี่ยงต่อการฉีกร้าเนื่องจากอุณหภูมิละลายสูงยิ่งยวดมากเกินไป

3.3.3 อัตราการเทมีหลักการง่าย ๆ อยู่ว่าจะต้องเทโลหะให้เสร็จสิ้นก่อนที่มันจะเกิดการแข็งตัวพอกนูน หรือไม่ไหลตัวแผ่กระจาย ถึงแม้ในบางครั้งจะต้องใช้อัตราการเทสูงจนเกิดการอลวนและฟุ้งกระเซ็นก็ตาม ในทางปฏิบัติควรจะใช้อัตราการเทที่ต่ำเนื่องจากจะทำให้เกิดประโยชน์ในการสร้าง

ทิศทางการแข็งตัวของชิ้นงานกับผิวนอกของชิ้นงาน (ติดผนังโพรงแบบ) ซึ่งจะช่วยลดการเสี่ยงต่อเรื่องการฉีกร้าวมะร่อนของชิ้นงานหล่อได้

3.3.4 คุณสมบัติของโพรงแบบการหล่อเหวี่ยงด้วยโพรงแบบโลหะถาวร ย่อมจะทำให้ได้เมล็ดลึกละเอียดมากกว่าการเทหล่อในโพรงแบบทราย ซึ่งคุณสมบัติของโพรงแบบจะมีอิทธิพลเป็นอันดับรองในเรื่องที่กล่าวนี้ คุณสมบัติของโพรงแบบจะเกี่ยวข้องโดยตรงในเรื่องการขยายตัวของโลหะเสียมากกว่า การอุ่นโพรงแบบโลหะให้ร้อนไว้ก่อนการหล่อเหวี่ยงนั้นจะช่วยไล่ความชื้นออกให้หมด และช่วยลดการเสี่ยงต่อการฉีกร้าวมะร่อนของชิ้นงานในขบวนการหล่อเหวี่ยงนี้ศูนย์กลางแท้จริง

3.4 การตรวจสอบงานหล่อ

มาตรฐานคุณภาพการตรวจสอบด้วยตา สารี และ ทวิทรัพย์ (2535 : 123) ได้สรุปมาตรฐานคุณภาพเมื่อดูด้วยตาไว้ดังนี้

- **ผิว** เนื่องจากผิวงานหล่อวัดแบบเดียวกับงานกลึงได้ยาก จึงเปรียบเทียบผิวงานหล่อมาตรฐาน SIS-1 ของ Alloy Casting Institute Surface Indicator Scale ซึ่งเปรียบเทียบกับตารางงานหล่อ ประเมินจะมีผิวเปรียบเทียบได้กับความหยาบประมาณ 150 RMS ความหยาบของผิวรวมเนื้อส่วนเกินส่วนขาด หากถูกจำกัดไปได้หมดในขบวนการต่อเนื่อง เช่น การกลึงไส ให้ถือว่าเป็นคุณภาพผิวที่ยอมรับกันได้ 2.

- **โลหะส่วนเกิน** โดยธรรมชาติของงานหล่อมักจะมีส่วนเกินจากการหล่ออันเกิดจากธรรมชาติของเนื้อโลหะเอง หรือลักษณะรูปร่างของชิ้นงาน หากไม่มีการตกลงไว้ก่อนพิกัดสูง 0.381 ถึง 0.762 mm บนพื้นที่ 3.175 mm² 6.35mm และมีได้ไม่เกิน 1 จุดใน 645.16 mm² คำหนึ่เล็ก ๆ อาจเกิดได้ทั่วทุกเว้นบนพื้นที่กำหนดเฉพาะสำหรับงาน

- **หลุม** ผิวงานหล่ออาจเกิดหลุมกระจายไม่แน่นอนสำหรับงานหล่อประเมินจะมีหลุมลึกไม่เกิน 0.762 mm ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 0.762 – 1.524 mm ในจำนวนไม่เกิน 1 จุด ต่อ 645.16 mm² หากไม่กำหนดโดยผู้ซื้อ หลุมที่เล็กกว่าขนาดที่กล่าวข้างต้น อาจเกิดขึ้นได้ทั่วไป หากไม่มีผลกระทบต่อการใช้งาน

- **นอนฟิลล์ (Nonfill)** ในงานหล่อบางครั้งมุมต่าง ๆ ที่หล่อได้อาจไม่มีคมเหมือนกับที่กำหนดไว้ เป็นที่ยอมรับกันในอุตสาหกรรมหล่อโลหะประณีต ว่ายอมให้เกิดมุมโค้งบนสันต่าง ๆ มีรัศมีโค้งไม่เกิน 0.381 mm ยกเว้นผู้ซื้อหรือโรงหล่อมีข้อกำหนดเป็นอย่างอื่น

- **ความสะอาดของผิว** โดยปกติงานหล่อจะได้รับการทำความสะอาดผิวด้วยวิธีพ่นด้วยเม็ดเหล็กหรือเม็ดทราย เพื่อขจัดคราบที่เกิดจากการหล่อ หรือสนิมเหล็ก อันเกิดจากการอบด้วยความร้อน หากผู้ซื้อต้องการขัดแต่งด้วยวิธีอื่น ๆ ต้องตกลงกับโรงหล่อเป็นกรณี ๆ ไป

- **อื่น ๆ** ชิ้นงานไม่ควรมีตำหนิที่เป็นอันตรายต่อการใช้งาน เช่น รอยร้าว โพรงหดตัวที่เห็นด้วยตาเปล่า ยกเว้นผู้ซื้อจะมีข้อกำหนดเป็นอย่างอื่น

3.5 ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในงานหล่อ

การผลิตใด ๆ ย่อมเกิดข้อเสีย ในขบวนการผลิตเครื่องประดับก็เช่นกัน มีปัญหาพิเศษมากมาย โดยเฉพาะในเรื่องของผิวของชิ้นงาน ซึ่งมีข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นดังนี้

3.5.1 สิ่งแปลกปลอมในเนื้อ (Inclusions)

สาเหตุของการเกิดข้อบกพร่อง มีสิ่งแปลกปลอมเล็ก ๆ (Particle) จากภายนอกมาปน เช่น ชิ้นส่วนของปูนทำแบบ สิ่งแปลกปลอมที่เกิดจากปฏิกิริยาของโลหะ และธาตุอื่น ชิ้นส่วนแปลกปลอมมักทำให้เกิดจุดแข็ง และเป็นรอยเป็นทางยาว ซึ่งมีสาเหตุมาจากการนำโลหะมาหลอมใหม่กับวัสดุที่ปนเปื้อน แบบปูนที่ไม่แข็งแรงหรือปูนมีคุณภาพต่ำ โพรงเข้าหล่อมีความแหลมคม จะทำให้เกิดการแตกชำรุดเมื่อนำโลหะไหลมากระทบ การใช้เบ้าที่ไม่สะอาด เศษของตะกอนสามารถทำให้เกิดปัญหาการแยกตัวหรือทำให้เกิดการแตกร้าว

การหลีกเลี่ยงการเกิดสิ่งแปลกปลอม

- ทำความสะอาดวัสดุที่จะหลอมใหม่
- ดันเทียนมีบริเวณแหลมคมน้อย
- มีแบบหล่อที่แข็งแรงเพียงพอ
- เบ้าหลอมต้องสะอาดและแข็งแรง

3.5.2 ข้อบกพร่องเนื่องจากการหล่อแบบหล่อประณีต (Investment casting)

คราบน้ำ (Water mark) จะทำให้ผิวของชิ้นงานไม่เรียบ ซึ่งจะวิ่งตามแนวตั้งจากบนลงล่าง เกิดระหว่างที่แบบถูกแทนที่ให้เต็มด้วยโลหะ รอยคราบน้ำจะปรากฏชัดบนโลหะแผ่นบน

- **สาเหตุของการเกิดข้อบกพร่อง** ผงปูนเมื่อผสมกับน้ำมีแนวโน้มการแยกตัวออก ถ้าหากการผสมถูกทิ้งไว้นี้เป็นเวลาก่อนข้างนานก่อนการแข็งตัว การกวนจะป้องกันการแข็งตัว ถ้าการแยกตัวเกิดขึ้นน้ำที่รวมตัวบนผิวขี้ผึ้งจะปรากฏรอยขึ้นบนผิวชิ้นงาน

- **การแก้ไข** ผงปูนแต่ละรุ่นมีอายุการใช้งานต่างกัน ซึ่งรวมเวลาตั้งแต่ปูนสัมผัสกับน้ำจนถึงจุดแข็งตัวโดยเฉลี่ยใช้เวลา 10 นาที แต่เวลาจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและชนิดของน้ำ เพื่อป้องกันรอยคราบน้ำ กรรมวิธีผสมปูน (การผสม ไล่ฟองอากาศ ไล่ปูนลงในเบ้า การสั่นสะเทือน) ต้องรีบให้เสร็จภายในเวลากำหนดทั้งหมดก่อนการแข็งตัว

ผิวหน้าหยาบและมีครีบ (Sandy surface and fine)

- **สาเหตุของการเกิดข้อบกพร่อง** โลหะที่หลอมไหลเข้าไปในรูพรุนของปูน (Investment) ผิวของชิ้นงานหล่อมีลักษณะหยาบ (Sandy) ถ้าปูนหล่อแตกเนื่องจากแรงดันในน้ำ โลหะมากขึ้นงานหล่อจะมีครีบเนื่องจากน้ำโลหะซึมลงไปในรอยร้าวของแบบหล่อ และเกิดครีบบอยที่ด้านหน้าตัดหน้าของชิ้นงาน ความเสียหายทั้งสองอย่างเกิดจากใช้ปูนหล่อที่มีแรงยึดตัวต่ำ หรือใช้แรงอัดของโลหะมากเกินไป (เหวี่ยงหนีศูนย์กลางมีความเร็วสูงเกินไป)

- **สาเหตุและการป้องกัน** ส่วนมากการเกิดข้อบกพร่องดังกล่าวเกิดจากการใช้ปูนหล่อเหลวมาก ซึ่งสามารถแก้ไขได้ คือ อัตราส่วนของน้ำกับปูนสูงเกินไป อุณหภูมิในการอบเข้าปูนสูงกว่า 750 °C พองปูนนั้นเสื่อมคุณภาพ

เม็ดโลหะบนผิวงาน การเกิดเม็ดโลหะบนผิวงาน เนื่องจากมีฟองอากาศอยู่บนผิวแบบขึ้นฝั่งระหว่างการหล่อปูน ถ้าการหล่อไม่ได้ทำสุญญากาศ อากาศจะติดเข้าไป อากาศจะติดอยู่ที่ผิวหน้าของขึ้นฝั่งในลักษณะฟองเล็ก ๆ การดูดอากาศออกจากน้ำปูนภายหลังการผสมและภายหลังการตกแบบจะช่วยลดเม็ดโลหะได้ค่อนข้างมาก แต่การหล่อปูนที่ดีต้องมีการสั่นของแบบหล่อด้วย

รูพรุนจากฟองอากาศ (Gas porosity) ทำให้เกิดรูเข็มบนผิวหน้าโลหะ เพราะรูเข็มอาจจะมีหลายสาเหตุ สาเหตุของการเสียหายสามารถพิสูจน์ได้โดยการดูด้วยกล้องขยายอาจมีรูปร่างรูพรุนคล้ายเนยแข็ง บางครั้งรูพรุนรวมกันอยู่เป็นชั้นใกล้เคียงกับผิวโลหะ บางครั้งชิ้นงานที่ดูว่าเรียบร้อยกลับปรากฏรอยรูพรุนเมื่อขัดหรือปอกผิว

- **การเสียหายเกิดจากปฏิกิริยากับปูนหล่อปูนยับยั้ง** ซึ่งประกอบด้วยสารประกอบซิลิกา เป็นตัวสำคัญและแคลเซียมซิลเฟต เป็นตัวยึดแคลเซียมซิลเฟตสามารถมีปฏิกิริยาโลหะเหลวหลายรูปแบบ แต่ปฏิกิริยาสุดท้ายทำให้เกิดรูพรุนเนื่องจากซิลเฟอไรไดออกไซด์ เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นค่อนข้างซับซ้อนและจะไม่กล่าวในที่นี้ อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงพบว่าโลหะเหลวสามารถทำให้แคลเซียมซิลเฟตแตกตัวโดยตรง ให้ซิลเฟอไรไดออกไซด์ ผลพลอยได้คือ คอปเปอร์ซิลิเกต หรือคอปเปอร์ออกไซด์ หรือสารประกอบที่เกี่ยวข้องกับโลหะตัวอื่น ๆ ถ้าโลหะเหลวกำลังจะแข็งตัว ฟองอากาศไม่สามารถผ่านออกได้จะรวมตัวกันเป็นฟองใกล้ผิวชิ้นงาน แคลเซียมซิลเฟตจะถูกปลดปล่อยออกซิเจนทำให้เกิดซัลไฟด์ของทองแดง เงิน สังกะสี หรือนิกเกิล ซัลไฟด์ สารเหล่านี้ หากถูกออกซิไดซ์ในเวลาถัดมาเป็นแก๊สซิลเฟอไรไดออกไซด์ได้

- **การรวมตัวโดยตรงของซิลเฟอไรไดออกไซด์** ในการรวมตัวมีปัจจัยเหมือนกัน 3 ประการ ได้แก่ ความร้อนที่นำมาใช้ในการหลอม ดังนั้นอุณหภูมิจึงมีผลกระทบกับหน้าสัมผัสระหว่างโลหะกับปูน กับภาวะอากาศในการหล่อ ประการสุดท้ายส่วนผสมของเนื้อโลหะผสม

- **ความร้อนและอุณหภูมิ** การหล่อใช้อุณหภูมิสูง มีผลเสียกับการเกิดรูพรุน อย่างไรก็ตามก็ดูหน้าตัดของเนื้อโลหะของชิ้นงานที่จะหล่อต้องถูกพิจารณาด้วย จำนวนความร้อนที่เข้าไปในแบบขึ้น

อยู่กับปริมาณโลหะ การหล่อโลหะจำนวนมากขึ้นจะต้องหล่อด้วยเบ้าและอุณหภูมิเทน้อยกว่าขึ้นโลหะบางและน้อยขึ้น

- **ภาวะอากาศ** การแตกตัวของแคลเซียมซัลเฟต จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง ภายใต้บรรยากาศสรีดิวซ์ ซึ่งส่วนมากช่างทำเครื่องประดับมีความเข้าใจผิดเสมอว่าบรรยากาศที่ดีต้องใช้เครื่องมือที่แพง ซึ่งคำว่าบรรยากาศที่ดีคือ ไม่มีออกซิเจนหรือเป็นสภาพรีดิวซ์ของแก๊สผสมไนโตรเจนและไฮโดรเจนใช้เป็นแก๊สรีดิวซ์ บรรยากาศสุญญากาศ ก็นับว่าเป็นรีดิวซ์ การคลุมเบ้าหลอมด้วยแก๊สที่ผสมไฮโดรเจน หรือแก๊สธรรมชาติในเบ้าหลอมแบบเปิดจะเกิดปัญหาล้ำกัน ในกรณีเหล่านี้แทนที่จะดีกลายเป็นเลวมีผลให้รูพรุนเกิดขึ้น การแก้ปัญหาคือใช้บรรยากาศกลางแม้มีออกซิเจนอยู่บ้าง แก๊สไนโตรเจนที่มีคุณภาพระดับใช้ในห้องทดลอง นำมาใช้ได้เช่นเดียวกันจะใช้แก๊สอาร์กอนก็ได้ แต่อาร์กอนราคาแพงกว่าและได้ประโยชน์ไม่มากกว่าไนโตรเจน การรวมตัวของซัลไฟด์ในระยะกลางตามหลักการรวมตัวของซัลไฟด์เช่นเดียวกับการกำเนิดโดยตรงของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ การเกิดซัลไฟด์จะเกิดได้เพราะโลหะเก่าที่มีผงปูน ภายใต้บรรยากาศรีดิวซ์ซัลไฟด์ทำให้เกิดการชำระได้โดยตรงหรืออาจจะชักนำให้เกิดซัลเฟอร์ไดออกไซด์

การแก้ไขรูพรุน

- ใช้โลหะที่สะอาด
- ถ้าโลหะสะอาดอย่าใช้อากาศรีดิวซ์ ในการหล่อโลหะทำเครื่องประดับ
- หากหลอมโลหะในเครื่องมือปิดให้ใช้ในโตรเจนหรืออาร์กอนแทนสุญญากาศ การมีออกซิเจนเล็กน้อย ดูเหมือนจะมีประโยชน์มากกว่าเสียประโยชน์
- รักษาอุณหภูมิของเบ้าและอุณหภูมิหลอมอยู่ภายในกำหนด
- หลีกเลี่ยงการผสมสังกะสีเกิน 2-3%

ผิวหน้าเดนดริติก (Dendritic surface) การเปลี่ยนแปลงของรูพรุนเป็นการชำระแบบผิวหน้าเดนดริติก (Dendritic surface) รูปแบบนี้เกิดเมื่อแก๊สเกิดขึ้นไปผลักดันโลหะเหลวออกไปจากผิวหน้าของโลหะที่แข็งตัวแล้วบางส่วน สามารถพบได้บนส่วนกว้างของรูเทโลหะบริเวณที่มีมวลใหญ่และอมความร้อน บ่อยครั้งจะพบบนชิ้นงานบางและเล็ก การหลีกเลี่ยง ให้ใช้วิธีการแก้ปัญหารูพรุน

รูพรุนแบบหดตัว (Shrinkage porosity) รูพรุนแบบการหดตัวซึ่งผิวหน้าจะแตกเป็นลักษณะของโพรงเดนไดรต์ ทำให้โลหะอ่อนแอและแตกหักเมื่อมีแรงเพียงเล็กน้อยมากระทำ

- **สาเหตุของการเกิดข้อบกพร่อง** รูพรุนนี้เกิดจากการหดตัวอย่างรวดเร็วของโลหะ ในขณะที่เหลวเปลี่ยนเป็นของแข็ง การหดตัว แข็งตัวเป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของโลหะบริสุทธิ์ และโลหะผสมส่วนมากไม่สามารถแก้ไขได้ ผลกระทบจากการหดตัวของวัสดุจะต้องอยู่ภายใต้ขอบเขต

- การหลีกเลี่ยงการเกิดรูพรุนในระหว่างการแข็งตัว การหดตัวของปริมาตรในชิ้นงานจะต้องได้รับการชดเชยโดยการเติมโลหะเหลวลงในรูเท ซึ่งอาจจะขัดข้องดังนี้
- ชิ้นงานออกแบบไม่เหมาะสม หรือการแข็งตัวของโลหะที่รูเทหรือชิ้นงานบางเกิดขึ้นก่อนชิ้นงานหลักซึ่งทำให้การไหลของโลหะเหลวไหลไม่ได้ ทำให้เกิดรูพรุนเกิดขึ้นขณะแข็งตัวเดนใดรท์ที่มีลักษณะเป็นเข็มและมีลักษณะเป็นผลึกเติบโตไม่สม่ำเสมอในสามทิศทางของที่ว่าง บางทิศทางที่เกิดได้ดีก็จะงอกยาวและนำไปสู่การเริ่มต้นการเกิดโครงสร้างที่คล้ายดินไม่ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างกิ่งซึ่งถูกบรรจุด้วยโลหะเหลวที่กำลังจะแข็งตัว หากมีน้ำโลหะไม่เพียงพอ จะมีรูปร่างของรูพรุนที่ยังค้างอยู่ระหว่างกิ่ง
- การโตของเดนใดรท์ของผลึก จับตัวคล้ายฟองอากาศซึ่งขัดขวางการไหลของโลหะเหลวระหว่างผิวโลหะบางไปผิวโลหะหนา

รอยร้าวจากการหดตัว รูพรุนขนาดใหญ่สามารถรวมตัวเข้าด้วยกัน ในรูปเป็นเครือข่ายซึ่งทำให้ชิ้นงานหล่อมีความอ่อนแออย่างมาก ทำให้แตกเมื่อมีแรงกระทบค่อย ๆ มีการร้าวจะพบในโลหะผสมที่ไม่ตกผลึกพร้อมกับโครงสร้างแบบเดนใดรท์ แต่มันมีโครงสร้างผลึกแบบหยาบ ๆ มีลักษณะกลม ในกรณีนี้รูพรุนจะรวมตัวอยู่รอบ ๆ เกรนทำให้เกิดรอยร้าว การหลีกเลี่ยงโพรงอากาศที่เกิดจากการหดตัว เป็นไปไม่ได้ที่จะไม่ให้เกิดโพรงอากาศที่เกิดจากการหดตัวอย่างสมบูรณ์ ทำได้แต่เพียงลดจำนวนให้น้อยลง ซึ่งอาจทำได้คือ การออกแบบชิ้นงานจะต้องลดการออกแบบชิ้นงานที่ลดขนาดอย่างฉับพลัน ออกแบบรูเทที่ถูกต้อง รวมไปถึงการใช้อุณหภูมิของเบ้า และการผสมโลหะผสมจำพวกสังกะสี

3.6 อิทธิพลของธาตุผสม

ธาตุผสมแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ ธาตุผสมหลัก (Major alloying element) และธาตุผสมรอง (Minor alloying element) ธาตุหลักจะถูกเติมลงในปริมาณมาก โดยมากนอกจากจะทำให้สีของโลหะเปลี่ยนแปลงไปยังทำให้คุณสมบัติทางกลเปลี่ยนไปตามส่วนผสมทางเคมีของโลหะ และกรณีที่มีโลหะอื่น ๆ ผสมอยู่ในปริมาณน้อยธาตุเหล่านี้ทำให้เกิดผลดีหรือผลเสียต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของโลหะผสมได้ บางครั้งธาตุผสมชนิดหนึ่งจะส่งผลทั้งดีและเสียได้ ขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุชนิดนั้นที่มีอยู่ในโลหะ เช่น สังกะสีและซิลิกอน ถ้าใช้ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้านการหล่อโลหะ แต่ถ้าใช้ในปริมาณที่ไม่ถูกต้องก็ก่อให้เกิดปัญหาขึ้นได้ ธาตุที่อยู่ในเนื้อโลหะในปริมาณที่น้อยนี้จะต้องมีในโลหะเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ จะไม่ถือว่าเป็นธาตุผสมหลักแต่จะเรียกว่าธาตุผสมรองหรือบางครั้งเรียกว่า Addition ในขณะที่มีผลเสียและจะไม่ต้องการให้มีอยู่ในเนื้อแต่ยากที่จะขจัดออกได้ จะถูกเรียกว่าสารเจือปน (Impurities) นอกจากนี้จะต้องพิจารณาเมื่อผสมในเนื้อวัสดุคือ

- ธาตุใดธาตุหนึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติของวัสดุหลายด้านหรือบางครั้งธาตุนั้นปรับปรุงคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งให้ดีขึ้น แต่ส่งผลเสียต่อคุณสมบัติอีกอย่าง

- ธาตุใด ๆ อาจจะแสดงทั้งผลดีและผลเสียให้กับคุณสมบัติของวัสดุได้ โดยขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุที่ผสมอยู่ และส่วนผสมเคมีของโลหะผสม

ธาตุทองส่วนใหญ่ที่ผสมเข้าไปในเนื้อโลหะมักจะไม่เกิน 1 %

3.6.1 ธาตุผสมที่มีผลต่อการเหลว

ตัวลดออกซิเจน ธาตุผสมที่มีต่อการลดออกซิเจนเราเรียกธาตุเหล่านี้ว่าตัวลดออกซิเจน (Deoxidizer) ออกซิเจนในอากาศจะทำปฏิกิริยากับเงินและทองแดงได้ง่าย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ตัวลดออกซิเจน ถ้าสามารถควบคุมการหล่อได้อย่างถูกต้อง เช่นการควบคุมบรรยากาศในการหลอมโลหะพบว่าทองแดงออกไซด์สามารถขจัดออกได้ง่ายโดยใช้บรรยากาศรีดิวซ์ซึ่งอ่อน ๆ หรือปกคลุมโลหะหลอมเหลวด้วยผงถ่านไม้ หรือบางครั้งใช้ตัวลดออกซิเจนเพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ เพื่อลดออกซิเจนซึ่งจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแทนทองแดง นอกจากนี้มีแอฟฟิไนต์กับออกซิเจนอย่างรุนแรงมาก ธาตุเหล่านี้ได้แก่ สังกะสี ซิลิกอน โบรอน และฟอสฟอรัส

สังกะสี การใส่สังกะสีลงไปทำให้เกิดสังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นควันสีขาวและทำให้ทองแดงทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเป็นออกไซด์ไม่ได้ นอกจากนี้ปริมาณสังกะสี 1-2 % ช่วยทำให้ผิวเรียบสวยงามขึ้น โดยลดข้อบกพร่องที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ผิวโลหะทำกับปูนลง และทำให้ผิวเงาขึ้นด้วยแม้ว่าจะดูในสภาพก่อนนำไปกัดผิวก็ตาม

ซิลิกอน ธาตุนี้จะไวต่อการเกิดออกซิเดชันมากกว่าธาตุสังกะสี แต่การใส่ซิลิกอนมากเกินไปจะทำให้เกิดการแตกเกิดขึ้นได้โดยเฉพาะในการผลิตลวด นอกจากใช้เป็นตัวลดออกซิเจนแล้ว ซิลิกอนยังมีคุณสมบัติทำให้ผิวเงาขึ้นด้วย เนื่องจากมีแรงตึงผิวเกิดขึ้นทำให้เนื้อโลหะมีผิวเงาสวยงาม

3.6.2 ธาตุเพิ่มการไหลของโลหะเหลวและปรับปรุงคุณภาพผิว

เหตุผลที่สำคัญในการเติมธาตุในปริมาณน้อย คือการปรับปรุงพฤติกรรมการณ์การหล่อและคุณภาพผิวงานหล่อ ธาตุ 2 ชนิด ที่ใช้สำหรับเป้าหมายนี้คือ

3.6.2.1 สังกะสี การเติมสังกะสีปริมาณความเข้มข้นตั้งแต่ 1-2 % ในการหล่อโลหะผสมจะมีผลทั้งผลดีและผลเสียต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของโลหะ

ผลดีของสังกะสีต่อคุณสมบัติด้านการหล่อ

- สังกะสีลดแรงที่เพิ่มขึ้นระหว่างผิวโลหะและผิวปูน ดังนั้นจึงปรับปรุงเพิ่มการไหลของโลหะให้เต็มแบบมากขึ้นและเก็บรายละเอียดได้ดีขึ้นในส่วนที่ออกแบบซับซ้อน และมีรายละเอียดมาก นอกจากนี้ความเรียบของผิวงานก็ดีขึ้นอีกด้วย

- เนื่องจากสังกะสีเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนได้เร็วเป็นออกไซด์ที่ไม่มีสีเนื้อแน่นดังนั้น สังกะสีออกไซด์จะเกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นงานเมื่อชิ้นงานหล่อเย็นแข็งตัว และทำให้เกิดทองแดงออกไซด์สีดำเข้มขึ้นที่ผิว ดังนั้นงานหล่อจะมีสีสวยงามโดยไม่จำเป็นต้องกัดผิวด้วยกรด

ผลเสียของการเติมสังกะสีมากถึง 2% ในการหล่อแบบประณีต

- สังกะสีออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการหลอมโลหะในอากาศ กำจัดออกได้ยากกว่าทองแดงออกไซด์ ทองแดงออกไซด์จะลอยตัวขึ้นมาอยู่บนผิวของโลหะหลอมเหลวได้ง่ายกว่า ซึ่งทำให้สามารถตัดออกได้ ในขณะที่สังกะสีมักจะอยู่ในเนื้อและทำให้เกิดข้อบกพร่องต่าง ๆ กัน

- ปริมาณสังกะสีที่เกินกว่าที่ต้องการจะเพิ่มปฏิกิริยาของโลหะหลอมเหลวกับปูน

- สังกะสีเป็นธาตุที่มีจุดเดือดต่ำ ประมาณ 900°C สำหรับสังกะสีบริสุทธิ์ ทำให้การผลิตโลหะผสมยากมากขึ้น ดังนั้นการใส่สังกะสีในรูปของ Master Alloy โดยปกติจะใส่ในรูปของทองเหลือง สังกะสีสามารถระเหยได้ในขณะที่มีสังกะสีอยู่สูงถ้าหลอมในสภาวะความดันลดลง โลหะผสมสังกะสีประมาณ 2% สามารถหลอมแม้ในสภาพสุญญากาศโดยสูญเสียสังกะสีน้อยมาก

3.6.2.2 ซิลิกอน การนำซิลิกอนมาใช้ในโลหะผสมนั้นยังสรุปไม่ได้ว่าอิทธิพลของธาตุนี้จะส่งผลดีหรือเป็นสารเจือที่เป็นผลเสียต่อโลหะผสม

ข้อดี

- ปรับปรุงการไหลของโลหะเหลว ทำให้น้ำโลหะไหลเต็มแบบ

- ผลิตผิวงานโลหะที่สะอาดและปราศจากทองแดงออกไซด์เกาะที่ผิว

ในทางตรงข้ามกันซิลิกอนส่งผลเสียรุนแรงคือธาตุนี้ทำให้เกิดเกรนขนาดใหญ่และยังเกิดเป็นสารประกอบที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ทำให้มีคุณสมบัติเปราะแตกง่ายและแตกเมื่อร้อน ผลนี้จะรุนแรงมากน้อยขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของโลหะ

3.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในงานหล่อเงินสเตอร์ลิง 925 ด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ซึ่งยังไม่มีผู้วิจัยมาก่อน ดังนั้นผู้วิจัยจึงเสนองานวิจัยที่ใกล้เคียงดังนี้

พอล (Paul, 1987 : 29-55) ได้ศึกษาพื้นฐานของหลักเคมีและฟิสิกส์ เพื่อส่งเสริมให้ความรู้ในเรื่องของข้อบกพร่อง ซึ่งเป็นการเตรียมขั้นพื้นฐาน เพื่อเป็นหลักสำหรับโลหะวิทยาโดยเฉพาะความสัมพันธ์ของขบวนการเป็นสารละลายของแข็ง โลหะผสม และแก๊สในโลหะ และยังได้ศึกษาโครงสร้างของอะตอม การจับยึดอะตอม สถานะของวัสดุ โครงสร้างผลึก โดยเปรียบเทียบระหว่างโลหะผสมกับโลหะบริสุทธิ์ สรุปได้ว่าความยุ่งยากทางเคมีและฟิสิกส์ คือผลที่เกิดขึ้นระหว่างขบวนการหล่อในการตัดสินใจสามารถนำเอามำกำหนดในขบวนการผลิตได้ รวมไปถึงโลหะวิทยางานหล่อ และความเข้าใจย่อมส่งผลถึงคุณภาพที่ดีของขบวนการผลิต

ลาร์รี่ (Larry, 1987 :149-201) ได้สรุปข้อบกพร่องจากโมเดลที่ได้ขึ้นสุดท้ายของการผลิต โดย ขบวนการหล่อแบบ Lost wax ซึ่งใช้สำหรับงานที่มีปริมาณมาก ๆ ซึ่งวิธีการผลิตจะมีลำดับการทำงาน ที่เป็นเส้นตรง โดยมีลำดับขั้นตอนของการผลิตในปริมาณมาก ดังนั้นการทำโมเดล การทำโมลด์ การ ฉีดต้นเทียน การทำหุ่นขี้ผึ้ง การสร้างแบบหล่อ Investment การนั่งเทียน การออกแบบ และการหล่อ ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดข้อบกพร่องทุก ๆ ขั้นตอน

ดิอีเตอร์ (Dieter, 1987 : 223-245) ได้ศึกษาถึงองค์ประกอบที่ทำให้งานหล่อมีคุณภาพ ซึ่งบาง องค์ประกอบจะเกี่ยวข้องกับเทคนิค คือการปฏิบัติงานตามลำดับ และในหลาย ๆ กรณีของโลหะวิทยา หรือปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งถ้าพิจารณาตัวอย่าง คือ การหดตัวของสารละลายของแข็ง ซึ่งปัญหาที่สำคัญ ซึ่งปฏิกิริยาในขณะหลอมละลายกับแบบหล่อสวมซึ่งจะมีความเกี่ยวข้องกัน อิทธิพลของบรรยากาศ ซึ่ง สรุปได้ว่าอิทธิพลต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นย่อมมีผลที่สูงต่อหลาย ๆ องค์ประกอบที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบก พร่อง

อัลเบิร์ต (Albert, 1987 : 357-367) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้สัญลักษณ์เพื่อที่จะกำหนดของความ สัมพันธ์และการใช้ให้เกิดประโยชน์ ในการกำหนดสัญลักษณ์เพื่อส่งเสริมขบวนการผลิตเครื่องประดับ ให้ดีขึ้น และนำไปใช้ในการหล่อแบบ Lost Wax ซึ่งจะทำให้เกิดความเป็นอิสระในการออกแบบ และ การประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานหล่อ เพื่อให้เกิดเป็นเอกลักษณ์เฉพาะของทักษะในการผลิตเครื่อง ประดับ

จอห์น และ คณะ (John and ect , 1987 : 77-98) ศึกษาเกี่ยวกับความแตกต่างของโมลด์สำหรับ อุตสาหกรรมงานหล่อ และความแข็งแรงความคงตัวของโมลด์ ที่ได้จาก Lost Wax เมื่อโมลด์คงตัวและ แข็งสามารถทำให้เกิดโพรงในโมลด์ และบางครั้งอาจมีส่วนเกินเกิดขึ้นเมื่อทำการหล่อย่อมทำให้เกิด การเสียหายกับโมลด์ และเกิดความต้านทานกับบ่า ซึ่งตรงที่ดังกล่าวจะทำให้เกิดปัญหาได้ คือ Hot Tear ในการตัดสินใจสำหรับงานหล่อเครื่องประดับโดยส่วนมากจะพิจารณาตัดสินใจจากประสบการณ์ และวิเคราะห์จากเครื่องประดับ ซึ่งศึกษาครอบคลุมไปถึง

- Casting Intricacy and the Mode of Solidification
- Molten Metal and Superheat
- Mold Material and Mold Temperature

4. Castability Chart

ดิอีเตอร์ (Dieter, 1988 : 203-216) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการหล่อแบบสวมหรือหล่อประณีต (Investment casting)ซึ่งในขบวนการหล่อได้แยกขบวนการหล่อออกเป็น 2 ส่วนโดยพิจารณาจากข้อ ได้เปรียบเสียเปรียบของแต่ละวิธี คือ ขบวนการหลอม จะใช้เตาไฟฟ้าชนิดความต้านทานแปลงไฟ และ เตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าในการหลอม ซึ่งเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะสามารถใช้ประโยชน์ได้มาก และใช้กันอย่าง แพร่หลาย ขบวนการหล่อจากการวิจัยได้ประยุกต์งานหล่อ 2 วิธี คือจะใช้แรงสถิตในการหล่อโดย

ใช้ความดันและ ระบบสุญญากาศ และการเหวี่ยงหนีศูนย์กลางในการหล่อ วิธีการที่ใช้ในขบวนการหล่อโดยพิจารณาใช้ดังนี้

- การหลอมเหลวจะใช้วิธีการ ให้ความร้อนโดยตรงและใช้ความร้อนจากด้านนอกของวัสดุ ผลที่ได้คือการเปรียบเทียบข้อได้เปรียบเสียเปรียบของเตาที่ใช้ในการหลอม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป โดยพิจารณาเข้าหล่อและบรรยากาศในการควบคุมด้วย
- การหล่อ ในการหล่อจะประยุกต์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและในการวิจัยใช้วิธีการวิธีการแรงทางสถิติ คือ จะใช้ความดันในการหล่อ ใช้ระบบสุญญากาศ รวมไปถึงการใช้วิธีการที่ผสมผสาน และในการหล่อโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจะพิจารณาจากองค์ประกอบ คือ รัศมีของแกนหมุน ความเร็วในการหมุน และมวลของวัตถุที่ใช้หมุน

ริชาร์ด (Richard , 1988 : 11-28) เป็นการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบในการหล่อโลหะผสม 18 กระรัต โดยใช้ 2 ส่วนผสม โดยแต่ละส่วนผสมจะใช้ส่วนผสมของโลหะเงินที่แตกต่างกัน และทำการหล่อโดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ใช้เตาสุญญากาศในการหล่อ และหล่อแบบการหล่อที่ใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและจะเพิ่มธาตุเข้าไป คือ อิริเดียม (Iridium) ซิลิกอน (Silicon) โบรอน (Boron) โคบอลต์ (Cobalt) วิธีการวิจัยคือ ใช้ส่วนผสมของโลหะผสม 18 กระรัต 2 ส่วนผสม โดยมีส่วนผสมของทอง เงิน ทองแดง และสังกะสี โดยผสมลงไปตามเกณฑ์ คือ ส่วนผสมที่ 1 มีเงินผสมอยู่ไม่เกิน 8.35 เปอร์เซ็นต์ และไม่เกิน 13.9 เปอร์เซ็นต์ และธาตุอื่นที่ผสมลงไปจะคงที่ คือ 0.0136 Ir 0.05Si 0.03B และ 0.4C ผลที่ได้นำไปทำการตรวจสอบและศึกษาดังนี้ คือ รูปร่าง ความหนาผิว โพรงอากาศ หนาขนาดของเกรน ความแข็ง ความแข็งแรง และทดสอบความกลมของงานหล่อ

เดฟ (Dave, 1988 : 293-298) ได้ศึกษาอากาศและฟองอากาศในขี้ผึ้งซึ่งทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นในขบวนการฉีดหุ่นขี้ผึ้ง ซึ่งอาจส่งผลทำให้หัวฉีดพังขณะเป็นสุญญากาศเนื่องจากการปกคลุมของควัน การเกิดฟองอากาศจะทำให้เข้าที่จะเทโลหะเกิดโพรง เนื่องจากผิวของหุ่นขี้ผึ้งเป็นโพรง และส่งผลทำให้ชิ้นงานหล่อเป็นโพรงเช่นกัน ซึ่งสามารถสรุปสาเหตุของปัญหา คือ เกิดจากหัวฉีด จะเกิดมากหรือน้อยจะมี 2 ประการคือ

- อากาศที่เกิดจากการจับดักของเครื่องระหว่างขบวนการหลอมจะมีผลที่เกิดขึ้น คือผิวของหุ่นขี้ผึ้งจะเป็นสะเก็ดหรือแผ่นบาง
- ปัญหาการระเหยของสารเติมแต่งในขี้ผึ้งซึ่งจะทำให้เกิดร่องรอยขึ้นบนวัสดุขณะเย็น

ริชาร์ด (Richard, 1990 : 91-128) ได้สรุปปัญหาจากการหล่อเงินสเตอร์ลิงซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 2 กลุ่ม คือ ปัญหาที่เกิดจากการปฏิบัติงานของผู้กระทำการหล่อหรือปัญหาที่เกิดขึ้นจากการลำดับขั้นของเทคนิคการหล่อ และปัญหาการดูดซับออกซิเจนในสถานะของเหลวซึ่งปัญหาดังกล่าวต้องมีวิธีป้องกันและจากการศึกษาถึงการดูดซับออกซิเจน โพรงอากาศ และการเกิดออกไซด์ของทองแดงที่ผสมในงานหล่อ

ดิอิตอร์ (Dieter, 1991 : 171-197) ได้ศึกษาและนำเสนอบทความคือการเกิดของข้อบกพร่องถือว่าเป็นจุดสุดยอดของความคิดของช่างที่สามารถประดิษฐ์ ไม่ใช่แค่ห้เหลี่ยมของช่างแต่จะขึ้นอยู่กับอุปกรณ์และวัสดุต่างหากวิธีการทำวิจัยจะใช้ 2 วิธีการคือ

- วิเคราะห์ตัวอย่าง บรรยายถึงสาเหตุของข้อบกพร่องด้วยพื้นฐานทางโลหะวิทยา
- แบ่งชิ้นงานเป็นกลุ่ม และแยกชนิดของการเกิดข้อบกพร่องโดยตั้งชื่อและทำเป็นบัญชีรายชื่อของชนิดของตัวอย่าง สาเหตุซึ่งจำเป็นต้องมีพื้นฐานโลหะวิทยาและสามารถนำข้อบกพร่องไปใช้เปรียบเทียบกับตัวอย่างจากบัญชี

จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า ทุก ๆ ข้อบกพร่องย่อมมีมากกว่า 1 สาเหตุ และต้องใช้ประสบการณ์แตกต่างกัน รวมไปถึงการไม่เข้าใจขบวนการย่อมนำไปสู่การเกิดข้อบกพร่อง

ทิโม (Timo, 1995 : 213-227) ได้ทำการศึกษางานหล่อพบว่าในงานหล่อหลาย ๆ อย่างจะแสดงผลถึงส่วนต่าง ๆ ของขบวนการผลิต โดยพิจารณาความเป็นไปได้ของเทคโนโลยีที่ใช้ในอุตสาหกรรม อัญมณี ซึ่งนำมาพิจารณาและเป็นข้อเปรียบเทียบถึงข้อได้เปรียบเสียเปรียบ สำหรับการหาวิธีการเพื่อช่วยตัดสินใจและใช้วิธีการแต่ละชนิดในขบวนการหล่อจะใช้ตัวเลข เป็นเกณฑ์พื้นฐาน เพื่อกำหนดความถูกต้อง และกำหนดวิธีการหลอมเหลวรวมถึงขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งจะรวมถึงขณะเป็นสารละลายของแข็ง สรุปได้ว่าการศึกษาเป็นการกำหนดวิธีการต่าง ๆ ในการผลิต เพื่อกำหนดเทคนิคหรือเลือกเทคนิคโดยจะพิสูจน์ความแน่นอนและความเป็นไปได้

อัลเบิร์ต (Albert, 1995 :247-267) เป็นการศึกษาถึงต้นทุนในการตัดและการหล่อเพื่อปรับปรุงคุณภาพให้สูงขึ้น มีมาตรฐาน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับส่วนย่อยของการเริ่มต้นของขบวนการหล่อด้วยการออกแบบ และรูปร่างของโมเดล ประโยชน์ของโมเดลและโมลด์ คือสามารถลดต้นทุนในการสร้างหุ่นขี้ผึ้งและเพิ่มต้นทุนในการขึ้นเทียน

ดิอิตอร์ (Dieter, 1996 : 383-406) ได้ศึกษาคุณภาพของงานหล่อจะเป็นตัวที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบ ซึ่งจากองค์ประกอบดังกล่าวย่อมทำให้เกิดโพรงอากาศ บางครั้งผลกระทบขององค์ประกอบสามารถทำนายข้อสงสัยโดยใช้การทำนายทางคณิตศาสตร์ แต่อย่างไรก็ตามในหลายกรณีจะทำนายความเกี่ยวข้องกันทางด้านสถิติ ในบางครั้งบางพฤติกรรมเราสามารถทำนายได้ถูกต้อง ในลักษณะดังกล่าวเรียกว่า Chaotic ผลที่ได้คือองค์ประกอบต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อโพรงอากาศและค่าความสำคัญที่มีในความเป็นอยู่ขณะนั้น จุดประสงค์คือการวิเคราะห์ความแปรปรวน และการประเมินผลความแตกต่างของแต่ละวิธีการหล่อ

ริชาร์ด (Richard, 1996 : 237-337) ได้ทำการศึกษาและนำเสนอการตัดสินใจเกี่ยวกับข้อบกพร่อง และความยากในการหล่อพลาตินัม ความยากและข้อบกพร่องอันเนื่องมาจากความได้เปรียบเสียเปรียบของจุดข้างเคียงของข้อบกพร่องของกรรมวิธีการหล่อ เพื่อป้องกันปัญหาและเพื่อนำไปสู่จุด

หมายต่าง ๆ จากการศึกษาค้นคว้าได้พบว่าโพรง (Porosity) เกิดจากสาเหตุ 2 ประการ คือ การหดตัว และ โพรงของแก๊ส ซึ่งสาเหตุดังกล่าวเนื่องมาจาก อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิเท เทคนิคการทำรูสัน รูเท ความเร่งในการหมุนของการหล่อเหวี่ยง ลักษณะต้นเทียน หรือหุ่นขี้ผึ้ง

อามิตัน (Hamiton, 1996 : 535-553) ได้ศึกษาหุ่นขี้ผึ้งสำหรับการหล่อตัวเรือนเครื่องประดับ คือการสร้างโพรงหลังเอาขี้ผึ้งออกเรียกว่า ฮอลโล ทรี (Hollow Tree) และใช้ในการเทแบบโดยแรง สติต สุญญากาศ ความดัน ซึ่งจะใช้สำหรับหล่อทอง เงิน ทองเหลือง วิธีการดังกล่าวถือว่าการปรับปรุง เพื่อใช้สำหรับต้นที่ต้น ให้เป็นต้นกลวง เพื่อลดวัสดุที่ใช้ตรงกลางต้นและส่งผลทำให้เพิ่มผลผลิตขึ้นได้ และช่วยให้คุณภาพผิวดีขึ้น

เวอร์การา และ ซาลาซาร์ (Vergara and Salazar, 1997 : 765-769) ได้ศึกษาการใช้โมลด์ พลาสติกมาทำการฉีดโดยการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลางแทน โดยการประยุกต์ให้เกิดความเหมาะสมกับการหล่อ โดยพิจารณาความแตกต่างของอุณหภูมิเท และแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง โดยใช้ทองแดงที่ส่วนผสมของ ดีตาเนียม และโครเมียม โดยใช้โมลด์อลูมิเนียม ซึ่งจะเลือกใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 6-8 G โดยปราศจากตัวกรองเซรามิก วิธีการทดลองจะใช้เครื่องหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่หมุนแบบ ราบ หลังจากทำการหล่อแล้วจะนำชิ้นงานไปทำการวัดขนาด และความหยาบผิว ของชิ้นงานแต่ละชิ้น และดูโครงสร้างภายในเพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของภาคตัด และเปรียบเทียบกับที่หล่อเหวี่ยงที่ระดับ G ที่ต่างกัน ผลที่ได้คือแรงเหวี่ยงประมาณ 4-6 G อุณหภูมิเทประมาณ 1150-1200 °C โมลด์ดังกล่าวไม่สามารถใช้กับงานหล่อเหวี่ยงตั้งแต่ 8 G ขึ้นไป และตัวกรองเซรามิก ไม่สามารถควบคุมคุณภาพงานหล่อได้ การเพิ่มแรงเหวี่ยงเท่ากับการเพิ่มขนาดของชิ้นงาน และความหยาบผิว

อัลโด (Aldo, 1997 : 341-356) ได้ศึกษาพื้นฐานทางด้านโลหะวิทยาของเงินสเตอร์ลิงที่ผสมด้วย ทองแดง โลหะที่ผสมลงไปดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดโครงสร้างจุลภาค คือเป็นตัวอธิบายว่ามาจาก Non-Equilibrium Solidification แบบใด ปริมาณทองแดงจะแยกตัวออก ซึ่งจะเป็นตัวแสดงถึงการได้มาของส่วนผสม สำหรับการทำหน้าที่ของทองแดง และโลหะผสมอื่นซึ่งสามารถทำการศึกษได้จาก ส่วนผสมสเตอร์ลิงและเพื่อลด Fire Staining พฤติกรรม Tamish สรุปได้ว่าการศึกษาเพื่อเข้าใจ ของสัดส่วนผสมและผลกระทบของแต่ละส่วนผสมที่เดิมไม่ว่าจะเป็น Zn Ge และ Si ในตัวแปร ของสเตอร์ลิง

จากงานวิจัยที่กล่าวมาแล้วนับพบว่า แรงเหวี่ยงในการเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง อุณหภูมิเทและทางเดินน้ำโลหะ รวมไปถึงขั้นตอนการปฏิบัติงาน และส่วนผสมในการผสมของธาตุต่าง ๆ ซึ่งตัวแปรที่น่าสนใจและมีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อทั้งสิ้นจึงทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาตัวแปรของอุณหภูมิเท และแรงที่ใช้ในการเหวี่ยงหนีศูนย์กลางในการหล่อเพื่อทำการศึกษาวิจัยต่อไป

3.8 การดำเนินการและวิธีการวิจัย

การหล่อเป็นงานที่ใช้ประโยชน์จากสมบัติของโลหะมีค่าโดยเฉพาะอย่างยิ่งทองคำ เงิน และทองคำขาวโดยใช้กระบวนการหล่อเป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก ในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ เมื่อต้องการผลิตชิ้นงานแบบเดียวกันให้เหมือนกันทุกประการเป็นจำนวนมากในคราวเดียวกัน

3.8.1 การเตรียมแบบหุ่นหรือต้นแบบเครื่องประดับ

เมื่อออกแบบเครื่องประดับที่จะทำการหล่อแล้ว ขั้นตอนต่อมา คือ จะต้องทำต้นแบบเครื่องประดับหรือแบบหุ่น เพื่อนำไปทำแม่พิมพ์สำหรับหล่อแม่แบบขึ้นต่อไป วิธีทำต้นแบบเครื่องประดับ สามารถทำได้ 2 วิธี

- ทำต้นแบบเครื่องประดับด้วยขี้ผึ้ง แล้วนำแบบหุ่นขี้ผึ้งนี้ไปทำแบบปูนหล่อ เพื่อหล่อแบบหุ่นถาวร ซึ่งจะเป็นทองเหลือง เงิน หรือโลหะชนิดอื่นก็ได้
- ทำต้นแบบเครื่องประดับด้วยโลหะ ทอง ทองเหลือง หรือเงิน โดยวิธีช่างทองทั่ว ๆ ไป และควรชุบแบบหุ่นโลหะด้วยโรเดียม หรือนิกเกิล เสียก่อน เพื่อให้ได้ผิวที่สวยงาม

ต้นแบบเครื่องประดับ ซึ่งนำมาใช้ทำแม่พิมพ์ยาง ส่วนใหญ่จะทำมาจาก ทองเหลือง เงิน ทองแดง ทองคำ ทองคำขาว หรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีอุณหภูมิหลอมละลายมากกว่า 65.5°C ทองเหลืองกับเงินเป็นโลหะที่นิยมนำมาทำต้นแบบเครื่องประดับ เนื่องจากราคาไม่แพง และนำมาขึ้นรูปด้วยมือได้ง่ายและสามารถประดิษฐ์แบบที่มีรายละเอียดมาก ๆ ได้ เช่น หนามเตยของกระเปาะพลอยชนิดต่าง ๆ หรือลวดลายของชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นเส้นละเอียดเป็นต้น

ในการนำต้นแบบตัวเรือนเครื่องประดับมาใช้หรือทำขึ้นเอง สิ่งที่ต้องคำนึงอย่างมากคือ เมื่อหล่องานออกมาแล้วจะหล่อได้ขนาดไหน เช่น ในการหล่อทองคำ จะสามารถหล่อชิ้นงานบาง ๆ ได้ดีกว่าโลหะเงิน เป็นต้น

3.8.2 การทำแม่พิมพ์ยาง

ในการทำตัวแบบขี้ผึ้ง ขึ้นเพื่อใช้ในขบวนการหล่อตัวเรือนเครื่องประดับด้วย กรรมวิธีการหล่อแบบขี้ผึ้งหาย หรือหล่อประณีต จะต้องเริ่มต้นด้วยการทำแม่พิมพ์ยางเสียก่อน แล้วจึงนำไปหล่อขี้ผึ้ง (ฉีดขี้ผึ้ง) ออกมาเป็นตัวแบบได้จำนวนมาก ๆ ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในวงการอุตสาหกรรมอัญมณีเครื่องประดับ

เหตุผลที่ต้องใช้ยางมาทำเป็นแบบแม่พิมพ์

- ขี้ผึ้งหรือแว็กซ์ ที่นำมาใช้ทำตัวแบบขี้ผึ้ง ที่อุณหภูมิหลอมละลายไม่สูงมากนัก คือ ประมาณ $60-70^{\circ}\text{C}$ เท่านั้น
- คุณสมบัติของยาง มีความยืดหยุ่น และสามารถพิมพ์รายละเอียดต่าง ๆ ของเครื่องประดับลงไปได้ และที่สำคัญ คือสามารถตัดส่วนต่าง ๆ ของแม่พิมพ์ตามต้องการได้ง่าย
- ถ้ามีการเก็บรักษาอย่างถูกต้อง จะสามารถใช้งานได้นานถึง 20 ปี

ในการเริ่มฝึกหัดทำแบบแม่พิมพ์ ควรเริ่มทำงานจำพวกแหวน หรือเข็มกลัดติดเสื้อผ้าที่มีลักษณะเรียบ เสียก่อน ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความชำนาญในการประกอบแม่พิมพ์ และตัดแม่พิมพ์ เพราะในการทำแม่พิมพ์เครื่องประดับที่มีความซับซ้อนต่าง ๆ จะเป็นงานที่มีความละเอียดและยากมากจะต้องใช้ความพยายาม ความอดทน และการเรียนรู้อย่างมาก จึงจะประสบผลสำเร็จได้

เครื่องมือ อุปกรณ์ และวัสดุที่ใช้ มีดังนี้

- **กรอบสำหรับทำแม่พิมพ์** เป็นกรอบสำหรับประกอบแม่พิมพ์ยาง มีลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำจากโลหะ ส่วนใหญ่จะใช้อลูมิเนียม เพราะมีน้ำหนักเบาสะดวกในการใช้งาน แต่มีบ้างใช้เหล็ก แต่ไม่ค่อยสะดวกเพราะมีน้ำหนักมากและเป็นสนิมง่าย ขนาดของกรอบที่ใช้ จะมีความแตกต่างกันตามขนาดของต้นแบบเครื่องประดับ แต่ขนาดที่ใช้กันโดยทั่วไปมีขนาดกว้าง 47.6 mm ยาว 69.8 mm ลึก 22.2 mm สำหรับงานที่มีความโตมาก ๆ จะสั่งทำกรอบเป็นพิเศษ และมักใช้กรอบที่ทำจากเหล็กโดยการเชื่อม หรือยึดโบลท์ (Bolt) กรอบสำหรับทำแม่พิมพ์ที่มีอยู่หลายลักษณะ เช่น กรอบเดี่ยว กรอบคู่ หรือกรอบแบบมี 4 ช่อง ลักษณะของกรอบ จะแบ่งเป็นแผ่นบนและแผ่นล่าง แนวกึ่งกลางระหว่างแผ่นบนและล่างของกรอบเจาะรูสำหรับสอดก้าน (ที่เชื่อมติดกับหุ่นแล้ว ทำให้หุ่นลอยอยู่ในระดับกึ่งกลางของกรอบสวมก้านโลหะรูปกรวยให้ฐานกรวยชนกับด้านในของกรอบ กรวยนี้จะทำให้เกิดช่องสำหรับอัดซีฟิ่งเข้าแบบหล่อ

- **ยางทำแบบ ยางสำหรับทำแม่พิมพ์** มีลักษณะเป็นแผ่น เป็นยางที่ยังไม่เคยผ่านการอบร้อนมาก่อน หรือเรียกว่ายางดิบ มีลักษณะไม่หยุ่นตัวเหมือนยางทั่วไป ถ้าบีบดองแรง ๆ อาจฉีกขาดได้โดยง่าย แต่หลังจากนำเข้าอบให้ความร้อนแล้ว จะมีคุณสมบัติเป็นแม่พิมพ์ยางที่ดีคือ มีความยืดหยุ่นมากทนต่อการฉีกขาด ตัดง่าย และรอยตัดเรียบ นอกจากนี้ยังมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ยางทำแบบที่มีขายโดยทั่วไปจะมีความหนาหลายขนาด เช่น ลักษณะเป็นแผ่นขนาดกว้าง 73 mm ยาว 475 mm หรือชนิดม้วน ขนาดหน้ากว้าง 475 mm ลักษณะทั่วไปจะมีแผ่นผ้าหรือพลาสติกปิดด้านหน้าแผ่นยางไว้ด้านหนึ่งเพื่อป้องกันสิ่งสกปรก อายุของแผ่นยางที่ยังไม่ผ่านการอบร้อนจะมีอายุประมาณ 1 ปี เมื่อเก็บรักษาที่ถูกต้อง คือต้องเก็บอยู่ในที่มืดและไม่มีความร้อน มิฉะนั้นยางจะแข็งตัวใช้งานไม่ได้

- **มิดตัดพิมพ์ยาง** เป็นมิดสำหรับใช้ฟ่ายางที่ผ่านการอบให้เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งเป็นการฟ่ายแม่พิมพ์ยางนี้ ต้องการรอยตัดที่คมมาก ดังนั้นมิดฟ่ายแม่พิมพ์ จึงเป็นมิดชนิดเดียวกับที่หมอฟันตัดใช้ในโรงพยาบาลทั่วไป ค้ามิดนิยมใช้โลหะไร้สนิม เช่น สแตนเลส ส่วนใบมิดสามารถถอดเปลี่ยนได้มีทั้งชนิดใบตรงและชนิดใบโค้ง จากการที่งานฟ่ายแม่พิมพ์ยางต้องการความคมมากในการตัด ดังนั้นใบมิดจะต้องเปลี่ยนบ่อยมากเมื่อรู้สึกว่ายางแม่พิมพ์ไม่ขาดเพียงครั้งเดียว

- **น้ำมันเบนซิน** จะใช้ในการทำความสะอาดแผ่นยางก่อนทำการประกอบเข้ากับกรอบทำแม่พิมพ์ และนำยางไปอบให้ความร้อน ความสกปรกเป็นสิ่งที่ต้องระมัดระวังเป็นอย่างยิ่งได้แก่พวกฝุ่นต่าง ๆ แป้ง น้ำมันจารบี หรือสิ่งสกปรกที่เกิดจากมือที่จับแผ่นยางทำแบบ

- **ก้านของต้นแบบ** มักนิยมทำจากทองเหลืองแต่ก็อาจใช้โลหะอื่นก็ได้ โดยทั่วไปจะใช้เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 mm ยาว 38 mm นำไปเชื่อมต่อกับต้นแบบตัวเรือนเครื่องประดับ โดยจะทำหน้าที่เป็นทางสำหรับฉีดซีฟิ่งเหลวเข้าไปในแบบยาง เมื่อซีฟิ่งเย็นตัวจะได้เป็นแบบซีฟิ่ง

- **หัวจุกทองเหลืองจะติดอยู่ตรงส่วนปลายของก้านต้นแบบ** ทำหน้าที่เป็นทางเข้าของซีฟิ่งเพื่อให้ฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ยางได้ง่ายขึ้น (หัวจุกทองเหลืองนี้อาจทำขึ้นเองด้วยวิธีกลโดยใช้โลหะทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโต 12.7 mm

3.8.3 การติดก้าน

นำหุ่นที่เตรียมไว้มาติดกับก้านโลหะ (ก้านจะทำหน้าที่เป็นช่องทางไหลของน้ำโลหะ เข้าโพรงแบบหล่อ) ขนาดหน้าตัดของก้านนี้ จะได้สัดส่วนกับขนาดของชิ้นงาน โดยปกติแล้วจะใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.2 mm และติดในตำแหน่งที่เหมาะสม คือสะดวกสำหรับการไหลของน้ำโลหะและสะดวกในการตกแต่งผิวภายหลัง เช่น การหล่อแหวนส่วนใหญ่จะติดก้านกับท้องแหวนด้านนอก (ตรงข้ามกับหัวแหวน) และมีขนาดหน้าตัดเท่ากับหน้าตัดของแหวนตรงส่วนที่ติด ความยาวก้านของเพียงพอให้จับได้นิด ในการติดก้านกับหุ่นพยามหลีกเลี่ยงไม่ให้มีมุมหักในทิศทางที่น้ำโลหะไหล ควรทำให้มุมหักที่รอยต่อนั้นมนขึ้น

ก้านหรือทางเดินน้ำโลหะ ควรมีความหนาพอ เพื่อว่าน้ำโลหะจะได้ไหลเข้าสะดวกและไม่เกิดการแข็งตัวก่อนจะไหลลงไปในเต็มแบบ

3.8.4 การประกอบแม่พิมพ์ยาง

ในการประกอบแม่พิมพ์ยาง ให้เริ่มด้วยการคัดเลือกต้นแบบที่นำมาทำแม่พิมพ์ ดูความเรียบร้อยของต้นแบบให้ถูกต้องคือขนาดสัดส่วนที่ถูกต้องตามความต้องการ ความเรียบร้อยของต้นแบบ จะต้องไม่มีครีบหรือส่วนเกินอื่นใด ร่องรอยการต่อเชื่อมต้องสนิทเรียบร้อยไม่มีน้ำประสานโลหะทะเอะ ผิวงานต้องเรียบ มีขอบคม ไม่มีตามด ทั้งนี้เพราะถ้าต้นแบบไม่ดี งานที่ได้จากการหล่อก็จะไม่ดีด้วย จากนั้นให้ทำการคัดเลือกกรอบสำหรับทำแม่พิมพ์ โดยวางต้นแบบอยู่ตรงกลางช่องแม่พิมพ์ โดยจะต้องให้ขอบของต้นแบบห่างจากขอบด้านข้างของกรอบไม่น้อยกว่า 9.5 mm ด้านบนและด้านล่างต้องไม่น้อยกว่า 19 mm และด้านความหนาไม่น้อยกว่า 3.2 mm ดังแสดงในรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-2 : แสดงการวางต้นแบบกับกรอบแม่พิมพ์

ขั้นตอนการทำแม่พิมพ์ยาง มีดังนี้

- ตัดแผ่นยางให้ได้ขนาดเท่ากับกรอบด้านในพอดี
- ทำความสะอาดยางที่สกปรกด้วยแอลกอฮอล์ หรือทินเนอร์ เสียก่อน ถ้าแผ่นยางสกปรก เวลาอบแผ่นยางจะไม่ติดกันและลอกแผ่นที่ปะด้านหลังแผ่นยางออก
- ใส่แผ่นยางรองไว้ด้านล่างครึ่งหนึ่งของความหนาของกรอบ
- ติดตั้งหุ่น โดยสอดก้านและใส่กรอบให้เข้าที่ (ตรงกลางแผ่นยาง) ให้หุ่นอยู่ในแนวนาน กับส่วนบนของกรอบ
- ตัดแผ่นยางให้มีขนาดเท่ากับแผ่นยางแผ่นแรก วางทับบนแบบหุ่นให้ความหนาของแผ่นยางแผ่นบนนี้สูงกว่ากรอบเล็กน้อย
- นำแผ่นอลูมิเนียมรองแผ่นยางด้านล่างและทับแผ่นยางด้านบน แล้วนำเข้าเครื่องอัดยาง ที่อุณหภูมิประมาณ 150°C ประมาณ 30-45 นาที ขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นยาง

3.8.5 การอบแม่พิมพ์ยาง

การอบแม่พิมพ์ยาง จะกระทำเมื่อทำการประกอบแม่พิมพ์ยางเสร็จเรียบร้อยแล้ว โดยสาเหตุที่ต้องมีการอบแม่พิมพ์ยางเนื่องจากยางทำแบบที่ยังไม่ผ่านการอบจะไม่มีคามยืดหยุ่น เมื่อดึงแรง ๆ จะฉีกขาดได้ง่าย แต่เมื่อผ่านขบวนการอบแม่พิมพ์ยางแล้วคุณสมบัติของยางจะเปลี่ยนแปลงไปคือ จะมีความยืดหยุ่นมากขึ้น มีความเหนียวสามารถบิดงอได้โดยไม่ขาด มีผิวเรียบสามารถตัดได้ง่าย นอกจากนั้นในขณะที่ทำการอบแม่พิมพ์ยาง ยางทำแบบจะอ่อนตัวลง ซึ่งเมื่อมีการกดอัดระหว่างทำการอบ ก็จะทำให้เนื้อยางแทรกไปตามช่องว่าง หรือลวดลายต่าง ๆ ของต้นแบบ โดยจะพิมพ์ลวดลายเหล่านั้นไว้บนผิวยางอย่างถาวรตลอดไป

ในการอบแม่พิมพ์ยางนั้นได้กำหนดสภาวะต่าง ๆ ไว้ดังนี้

อุณหภูมิที่ใช้ 150 °C

เวลา 49 ถึง 90 นาที

แรงกดอัด สูงสุด

เวลาที่ใช้ในการอบแม่พิมพ์ยาง จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความหนาของแม่พิมพ์ยาง ถ้ามีความหนามากจะใช้เวลามากกว่าแม่พิมพ์ที่มีความหนาน้อยกว่า แนะนำให้ใช้เวลา 15 นาทีต่อความหนาของแม่พิมพ์ยาง 6.4 mm หรือจำนวนของยางทำแบบ 6 แผ่น กับระยะเวลา 45 นาที

เครื่องอัดแม่พิมพ์ยางเป็นเครื่องที่มีความแข็งแรง มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือแผ่นความร้อนตัวบน และแผ่นความร้อนตัวล่าง โดยแผ่นความร้อนจะติดแน่นกับฐานเครื่องและแผ่นความร้อนตัวบนที่เลื่อนขึ้นลงในแนวดิ่งตามแกนของเครื่องโดยใช้สกรูหรือกระบอกสูบนิวแมติก เป็นตัวควบคุมการขึ้นลง นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ควบคุมความร้อนหรือเทอร์โมสแตท และอุปกรณ์ตั้งเวลา และอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 3-3



รูปที่ 3-3 : แสดงเครื่องอัดแม่พิมพ์ยาง

ตารางที่ 3-1 : แสดงเวลาที่ใช้ในการอัดแม่พิมพ์ยาง

ความหนาของยางแผ่น (mm)	จำนวนชั้นของยาง	เวลาที่ใช้ (150° C) (min)
12.7	4	30
15.8	5	37
19.0	6	45
25.4	8	60
31.7	10	75
38.1	12	90

3.8.6 การตัดแบบยาง

เมื่ออัดพิมพ์ยางแล้ว ให้นำแผ่นยางนั้นออกมาผ่าแบ่งครึ่งด้วยมีดผ่าตัด พิมพ์ยางที่เย็นก่อนข้างจะผ่ายากกว่าพิมพ์ยางที่ยังอุ่นอยู่ควรเปลี่ยนใบมีดบ่อย ๆ เพื่อความคมของใบมีดและจะทำให้การผ่าอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น การจุ่มใบมีดในน้ำผงซักฟอกในบางโอกาสทำให้การผ่าง่ายขึ้น ใบมีดที่ทื่อทำให้ผ่ายากและเกิดอุบัติเหตุจากการผ่าได้ง่าย

เริ่มต้นตัดโดยใช้มีดผ่าตัดจากด้านที่มีก้านทางเดินน้ำโลหะไหลออกมา เริ่มจากแนวกึ่งกลางก้านไปตามแนวมีขีดเส้นแบ่งครึ่งไว้จนครบรอบ แล้วค่อย ๆ ตัดเข้าไปด้านในหาตัวหุ่น โดยตัดแบ่งแบบส่วนบนและส่วนล่าง ให้อยู่แนวกึ่งกลางหุ่นพอดี หลังจากนั้นจึงแกะหุ่นโลหะออกจากแบบยาง แล้วทำการตัดส่วนที่เหลือเพื่อตัดแบบยางออกเป็น 2 ซีก (รูปที่ 3-4)



รูปที่ 3-4 : แสดงตัวอย่างการตัดแบบยาง

3.8.7 การหล่อหรือฉีดขี้ผึ้ง

การหล่อขี้ผึ้งเป็นขั้นตอนหนึ่งในขบวนการหล่อตัวเรือนเครื่องประดับ ซึ่งจะกระทำหลังจากกระบวนการทำแม่พิมพ์ยางเสร็จแล้ว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตตัวแบบขี้ผึ้ง สำหรับทำแม่พิมพ์ปูนหล่อซึ่งเป็นขบวนการที่สำคัญมากก่อนที่จะทำการหล่อโลหะ

แว็กซ์หรือขี้ผึ้งที่ใช้ทำตัวแบบขี้ผึ้งนี้ เป็นการผสมของขี้ผึ้งหลาย ๆ ชนิด เช่น ขี้ผึ้งคานูบาที่มีคุณสมบัติแข็งมาก ขี้ผึ้งแคนเดลิลา เป็นขี้ผึ้งที่มีความแข็ง และบีแว็กซ์ เป็นขี้ผึ้งที่มีความอ่อนนุ่ม นอกจากนี้ยังมีขี้ผึ้งที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น พวกวาราฟิน ที่ได้จากน้ำมันปิโตรเลียม และขี้ผึ้งที่เตรียมได้จากแร่ธาตุต่าง ๆ เช่น จำพวกถ่านหินชนิดต่าง ๆ

ในขบวนการหล่อตัวเรือนเครื่องประดับ ขั้นตอนการผลิตตัวแบบขี้ผึ้ง เป็นขั้นตอนที่มีต้นทุนไม่สูงมากนัก ดังนั้นการเลือกใช้ขี้ผึ้งที่ดีที่สุดเพื่อนำมาใช้ในขบวนการหล่อตัวเรือนจะเป็นการป้องกันปัญหาต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้ขี้ผึ้งคุณภาพต่ำ เช่น การแตกหักง่ายในขณะที่แกะตัวแบบขี้ผึ้งออกจากแม่พิมพ์ยาง หรือมีสิ่งสกปรกปะปนอยู่กับเนื้อขี้ผึ้ง นอกจากนี้ยังเป็นการเสียเวลาอย่างมากที่จะทำการผสมขี้ผึ้งใช้เอง คุณสมบัติที่ดีของขี้ผึ้งหรือแว็กซ์ที่จะนำมาใช้เป็นตัวแบบขี้ผึ้ง คือ ต้องมีความแข็งแรงและ

เหนียว สามารถคงรูปอยู่ได้เมื่อมีการเทปูนหล่อไปหุ้มที่ตัวแบบขึ้นผึ้ง นอกจากนี้ เมื่อนำแม่พิมพ์ปูนหล่อไปอบเผาตามขบวนการแล้วอุณหภูมิของแม่พิมพ์ปูนสูงขึ้นถึง 700°C ขึ้นผึ้งหรือแว็กซ์ต้องมีการเผาไหม้ทั้งหมดไม่มีเหลือแม้กระทั่งขี้ผึ้งหรือเศษตกค้างใด ๆ ในแม่พิมพ์ปูนหล่อ มิฉะนั้นจะเป็นปัญหาใหญ่ในขบวนการหล่อโลหะที่จะตามมา

ในการหล่อขึ้นผึ้งหรือแว็กซ์จะใช้อุปกรณ์ที่สำคัญ คือ เครื่องฉีดขึ้นผึ้ง (รูปที่ 3-5) ซึ่งมีทั้งแบบธรรมดาและแบบอัตโนมัติ สำหรับเครื่องแบบธรรมดามีลักษณะเป็นถังกลมภายในจะมีขดลวดให้ความร้อนโดยมีสวิทช์สำหรับปรับอุณหภูมิความร้อนของเครื่อง ความร้อนที่ได้จะทำหน้าที่หลอมละลายขี้ผึ้งหรือแว็กซ์ให้มีลักษณะเป็นของเหลวขึ้น นอกจากนี้ในส่วนของการให้ความร้อนแล้วเครื่องฉีดขึ้นผึ้งจะมีลักษณะเป็นถังความดัน โดยจะใช้ความดันจากปั๊มลม ซึ่งความดันจะทำหน้าที่ดันขี้ผึ้งหรือแว็กซ์ที่หลอมละลายฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ยางโดยผ่านหัวฉีดของเครื่อง ซึ่งในการใช้เครื่องฉีดขึ้นผึ้งหรือแว็กซ์ผู้ใช้ต้องมีความรู้ที่จะควบคุมความร้อนและความดันของเครื่องด้วย

สำหรับเครื่องฉีดขึ้นผึ้งแบบอัตโนมัติจะมีหลักการทำงานคล้ายกับเครื่องธรรมดา แต่จะเพิ่มขั้นตอนการทำงานอีกขั้นตอนหนึ่ง คือ ขั้นตอนก่อนการฉีดขึ้นผึ้งเครื่องจะทำการดูดอากาศภายในแม่พิมพ์ยางออกจนหมดเสียก่อนที่จะฉีดขึ้นผึ้งเข้าไป ซึ่งจะทำให้ตัวแบบขึ้นผึ้งที่ได้มีความสมบูรณ์และลดความสูญเสียในการฉีดขึ้นผึ้ง นอกจากนี้ที่เครื่องฉีดขึ้นผึ้งแบบอัตโนมัติจะมีหน้าปัทม์แสดงค่าต่าง ๆ ทั้งนี้เพื่อการปรับแต่งเครื่องเป็นไปด้วยความแม่นยำ และมีประสิทธิภาพ

สำหรับอุณหภูมิและความดันที่ใช้งานในถังฉีดขึ้นผึ้งควรมีอุณหภูมิประมาณ 70°C และมีความดันประมาณ 4-10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



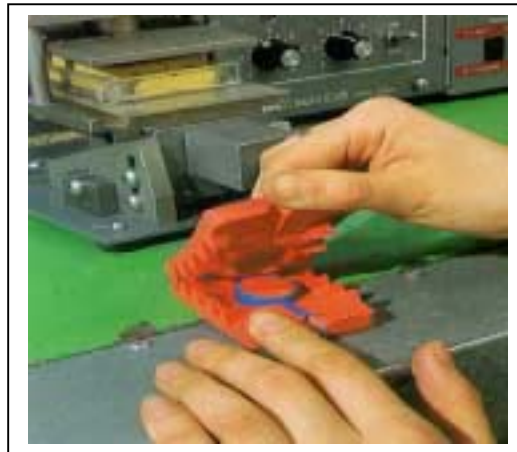
รูปที่ 3-5 : แสดงลักษณะของเครื่องฉีดขึ้นผึ้ง

3.8.7.1 การอัดขึ้นผึ้ง

ต้องใช้สารหล่อลื่นต่าง ๆ เช่น ทาด้วยน้ำมันพืชผสมแอลกอฮอล์ 50 เปอร์เซ็นต์ หรือพ่นด้วยสารละลายซิลิโคน หรือใช้รอยด้วยแปรงฝุ่นบนแบบยาง เพื่อป้องกันการเกาะติดกันของขี้ผึ้งเหลวที่ร้อนกับแม่พิมพ์ยาง ทำให้แกะแบบขึ้นผึ้งออกจากแบบยางได้ง่ายรวดเร็ว ทำให้ขี้ผึ้งไม่แตกหักหรือเสียหาย ถ้า

ใช้แปรงฝุ่นจะต้องระวัง ไม่ให้แปรงฝุ่นจับตามมุมหรือตามซอกเล็ก ๆ มากเกินไป เพราะจะลดความคมหรือความละเอียดของแบบนั้น

ใช้แผ่นเหล็กประกบด้านบนและด้านล่างของแบบยาง ใช้มือบีบแผ่นเหล็กทั้งสองให้แน่นพอสมควรแล้วนำไปอัดขึ้นพิมพ์เข้าแบบในขณะที่อุณหภูมิของขึ้นพิมพ์อยู่ระหว่าง $65-75^{\circ}\text{C}$ และมีความดันของลมอัดอยู่ในระหว่าง 5- 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เมื่ออัดขึ้นพิมพ์เต็มแบบยางแล้ว ทิ้งไว้ให้เย็นประมาณ 2-3 นาที แล้วจึงแกะออกจากแบบยางอย่างระมัดระวัง (รูปที่ 3-6)



รูปที่ 3-6 : แสดงการแกะหุ่นขึ้นพิมพ์ออกจากแม่พิมพ์ยาง

3.8.7.2 การประกอบแม่แบบขึ้นพิมพ์

ในการประกอบแม่แบบขึ้นพิมพ์นั้นต้องใช้แม่แบบขึ้นพิมพ์ที่สมบูรณ์ แต่มีแม่แบบบางชิ้นอาจจะไม่สมบูรณ์ก็ต้องนำมาตกแต่ง เช่น บริเวณที่เกิดจากฟองอากาศในขึ้นพิมพ์ รอยประกบระหว่างแบบยางขึ้นบนและขึ้นล่าง ขึ้นพิมพ์ส่วนที่เกินออกมาก็อาจจะใช้มีดขูดออกแล้วทำให้เรียบ บางส่วนที่ต้องเติมขึ้นพิมพ์ให้ใช้แปรงขนอ่อนจุ่มลงในขึ้นพิมพ์ที่หลอมเหลวแล้วทาบบนส่วนที่ต้องการถ้าหนาเกินไปก็อาจใช้ตะไบถูออกหลังจากที่ขึ้นงานหล่อแล้ว

จุดประสงค์ในการประกอบแม่แบบขึ้นพิมพ์หลายชิ้นเข้าด้วยกัน ก็เพื่อเพิ่มจำนวนชิ้นงานหล่อในแบบปูนหล่อให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ที่นิยมทำกันมากคือ ประกอบรูปคล้ายต้นไม้ โดยใช้แท่งขึ้นพิมพ์เป็นลำต้นและกิ่ง แต่ละปลายกิ่งติดกับแม่แบบขึ้นพิมพ์ที่ต้องการหล่อ ลำต้นและกิ่งทำหน้าที่เป็นทางเดินน้ำโลหะในแบบปูนหล่อ จำนวนของแบบขึ้นพิมพ์ที่จะประกอบขึ้นอยู่กับขนาดของแม่แบบ แต่ช่องว่างระหว่างแม่แบบขึ้นพิมพ์ไม่ควรชิดเกินกว่า 3.2 mm การเชื่อมแบบขึ้นพิมพ์ติดกับลำต้นให้ใช้แท่งเหล็กเผากับเปลวไฟตะเกียงแอลกอฮอล์หรือหัวแร้งนำไปแตะกับส่วนที่ต้องการให้เชื่อมติดกัน ขึ้นพิมพ์ส่วนนั้นจะละลายและเป็นเนื้อเดียวกันเมื่อเย็นตัวลง

ไม่ว่าจะประกอบแบบใดก็ตามพึงระลึกอยู่เสมอว่า ส่วนที่เป็นขึ้นพิมพ์ทั้งหมดจะถูกแทนที่ด้วยน้ำโลหะ ดังนั้นทางน้ำโลหะไหลควรจะวางเป็นแนวตรงไม่มีสิ่งกีดขวาง และขนาดไม่เล็กจนเกินไปจน

ไม่ได้สัดส่วนกับชิ้นงานหล่อที่ต้องการ ต้นไม้จี๊ดจะต้องอยู่บนฐานโลหะโดยให้ลำต้นอยู่บนช่องที่เจาะไว้ที่ศูนย์กลางฐาน การติดตั้งต้นไม้จี๊ดต้องทำให้แน่นเพื่อจะได้ไม่หลุดเมื่อนำไปสั่นในสุญญากาศ แต่ก่อนที่จะติดตั้งควรชั่งน้ำหนักของต้นไม้จี๊ดก่อน เพื่อที่จะคำนวณน้ำหนักของโลหะที่จะใช้หล่อก่อนทาศาติบับเบอร์ไรเซอร์บนแม่แบบจี๊ดบ้าง ๆ เพื่อเป็นตัวประสานระหว่างน้ำกับจี๊ด



รูปที่ 3-7 : แสดงการติดแม่แบบจี๊ด

หลังจากนั้นจึงสวมกระบอกหล่อครอบต้นไม้จี๊ดวางลงบนฐานพอดิ ะให้มีระยะห่างอย่างน้อยสุดจากแบบจี๊ดถึงผนังด้านในของกระบอก 6.3 mm โดยรอบและกระบอกควรจะยาวกว่าส่วนสูงของแบบต้นไม้ 12.7 mm เพื่อว่าเมื่อเทขี้ผึ้งน้ำโลหะที่หลอมเหลวเข้าในแบบแล้วจะไม่ทำให้ปูนหล่อทะลุแตกได้ (รูปที่ 3-7 , และ 3-8)



รูปที่ 3-8 : แสดงลักษณะแม่แบบจี๊ดที่ติดตั้งกับฐานเรียบร้อยแล้ว

3.8.8 การทำแบบปูนหล่อ

เมื่อนำแม่แบบขี้ผึ้งมาติดที่แท่งขี้ผึ้งหรือต้นเทียนนั้นแล้ว จะนำต้นเทียนนั้นไปหล่อด้วยปูน

3.8.8.1 คุณสมบัติของปูนหล่อ หลังจากที่ทำกระบอบแบบหล่อสวมครอบลงบนแม่แบบขี้ผึ้งแล้ว จะต้องใช้ปูนชนิดหนึ่งซึ่งสามารถทนความร้อนได้สูง เทล่อมรอบแบบแม่แบบขี้ผึ้ง เพื่อที่จะทำเป็นแบบขั้นสุดท้ายก่อนที่จะนำโลหะมาเทเข้าแบบ ปูนชนิดนี้เรียกว่าปูนหล่อ (Investment)

ปูนหล่อที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- ต้องมีผิวที่ละเอียด
- ต้องทนต่อความร้อนได้สูงถึง 760°C
- ต้องทนต่อแรงดันของน้ำโลหะ ในขณะที่น้ำโลหะถูกเทเข้าสู่อุปกรณ์ได้โดยไม่มี รอยร้าว
- ส่วนผสมของปูนนั้น จะต้องไม่มีสารจำพวกที่ทำให้ผู้กร่อน หรือกรด ซึ่งจะทำลายเตาอบ กระบอบแบบหล่อ หรือชิ้นงานหล่อได้
- จะต้องทำลายออกจากกระบอบแบบหล่อได้ง่าย หลังจากเทน้ำโลหะเข้าไปในอุปกรณ์แล้ว

จากการค้นคว้าทดลองของบริษัทผู้ผลิตปูนหล่อต่าง ๆ เพื่อที่จะได้ปูนหล่อให้มีคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้นปูนหล่อจะต้องประกอบด้วยวัสดุต่าง ๆ คือ คริสโตโบไลต์ (Critobolite) ยิบซัม (Gypsum) ซิลิกา (Silica) และตัวประสาน (Modifying agents)

เครื่องมืออุปกรณ์ที่จำเป็นในการทำแบบปูนหล่อ

- เครื่องปั๊มสุญญากาศ (เครื่องดูดอากาศ) ประกอบด้วยเครื่องปั๊มซึ่งสามารถทำให้บริเวณภายในเป็นสุญญากาศได้ และที่ฐานนั้นสามารถเขย่าหรือทำให้สั่นได้
- ผงปูนหล่อ เป็นผงปูนสำเร็จรูปซึ่งบริษัทผู้ผลิตได้ทำขึ้นมา เพื่อใช้ในการหล่อชนิดนี้โดยเฉพาะ
- คาซัง และกระบอบทอง เพื่อใช้ขังน้ำหนักของผงปูนหล่อและน้ำที่ใช้ผสม
- ถ้วยยางและใบพายกวนหรือเครื่องผสม เพื่อใช้เป็นภาชนะสำหรับผสมผงปูนหล่อกับน้ำ

3.8.8.2 การผสมปูนหล่อ

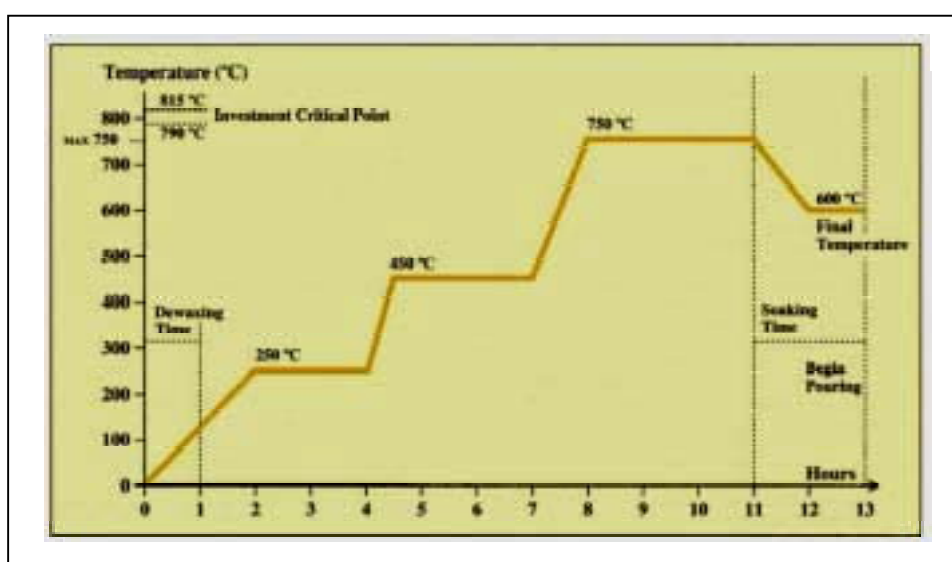
นำผงปูนหล่อผสมกับน้ำในอัตราส่วนที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้ เช่น ปูนตราดาว (Gold Star Plus) ซึ่งเป็นปูนผลิตจากบริษัท โฮเบนเดวิส ประเทศอังกฤษ จะใช้ผงปูน 1 กิโลกรัมต่อน้ำ 400 CC ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอัตราส่วนผสมจะอยู่ในเกณฑ์ดังนี้ น้ำหนักของผงปูนหล่อจะมากกว่าน้ำหนักของน้ำ 2.5 ถึง 3 เท่า

ชั่งน้ำหนักหรือตวงน้ำ และผงปูนให้มีสัดส่วนถูกต้องตามที่กำหนดไว้ เทน้ำลงในถ้วยยางสำหรับผสมปูนและตักปูนหล่อลงผสมในน้ำพร้อมกับคนให้ทั่ว ถ้าเป็นไปได้ควรใช้เครื่องผสมปูนจะทำให้ปูน

ละลายน้ำและเข้ากันได้ดีโดยเริ่มจากเบา ๆ ก่อนแล้วค่อยแรงใช้เวลาในการผสมปูนไม่เกิน 3 นาที เมื่อผสมละลายเป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำด้วยผสมเข้าเครื่องดูดอากาศประมาณ 2-3 นาที เพื่อดูดฟองอากาศที่มีอยู่ในส่วนผสมนั้นออกเสียก่อน จากนั้นจึงนำส่วนผสมนี้ค่อย ๆ เทลงภายในกระบอกแบบหล่อซึ่งเตรียมเอาไว้แล้ว โดยเทลงข้าง ๆ ของกระบอกหล่อ ให้สูงกว่ายอดของแม่พิมพ์ซีฟิ่งเล็กน้อยแล้วจึงนำเข้าเครื่องดูดอากาศอีกครั้งหนึ่งประมาณ 3 นาที ระหว่างที่อยู่ในเครื่องดูดอากาศนี้จะต้องเขย่าหรือสั่นสะเทือนเล็กน้อย ส่วนผสมของปูนจะได้ไหลลงไปตามซอกต่าง ๆ ของแม่แบบซีฟิ่งได้ทั่ว หลังจากที้นำออกจากเครื่องดูดอากาศแล้วเติมส่วนผสมของปูนลงไปอีกให้เสมอกับขอบบนของกระบอกแบบหล่อ แล้วทิ้งไว้ให้แข็งตัวโดยไม่ขยับเขยื้อนอย่างน้อย 1 ชั่วโมง รวมระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการผสมปูนดูดอากาศประมาณ 9 นาที (ไม่เกิน 10 นาที)

3.8.8.3 การนึ่งเทียน เพื่อกำจัดซีฟิ่งออกจากเบ้าปูน โดยตั้งอุณหภูมิของเตาหนึ่งประมาณ 100-150 °C นานประมาณ 2 ชั่วโมง ซีฟิ่งที่หลอมละลายไหลออกมา สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้โดยนำไปล้าง ต้ม แล้วกรองให้สะอาด ในขั้นตอนนี้ใช้หลักการของการหล่อแบบซีฟิ่งหายนั่นเอง

3.8.8.4 การเตรียมการเผาไล่เทียน หลังจากการนึ่งเทียนเสร็จแล้วนำกระบอกแบบหล่อวางไว้ในเตาอบโดยให้ส่วนที่มีปากกรวยอยู่ด้านล่าง เพื่อที่จะให้ซีฟิ่งละลายและไหลออกจากแบบได้หมดจากนั้นจึงค่อย ๆ เพิ่มความร้อนของเตาอบจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ เผาเซ้ไว้ระยะหนึ่งจนกระทั่งซีฟิ่งถูกกำจัดออกหมด จึงค่อย ลดความร้อนลงมาจนได้อุณหภูมิที่ต้องการใช้หล่อ จึงนำกระบอกหล่อเข้าเครื่องหล่อเพื่อทำการเหวี่ยงโลหะเข้าไปในแบบปูนหล่อต่อไป (รูปที่ 3-9)



รูปที่ 3-9 : แสดงการการเผาไล่เทียน หรือการอบเบ้าปูน

3.8.8.5 อุณหภูมิเป้าหมายหล่อที่ใช้หล่อ

อุณหภูมิที่ต้องการสำหรับปูนหล่อ ที่ใช้ในการเทน้ำโลหะดังแสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 : แสดงอุณหภูมิเป้าหมายสำหรับงานหล่อ

ชิ้นงาน	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
ทองคำขาวชิ้นงานที่บาง	565
ทองคำขาวชิ้นงานที่หนา	480
งานหล่อเงิน เช่น แหวน เข็มกลัด	450
งานหล่อเงิน เช่น จี้ ต่างหู	500
งานหล่อเงิน ขนาดใหญ่ เช่น กำไล	450
งานหล่อทองเหลืองขนาดปานกลาง	550
งานหล่อทองเหลือง ขนาดเล็ก	600
งานหล่อทอง	600

3.8.9 กรรมวิธีการหล่อ

เนื่องจากการหล่อจะต้องทำในขณะที่แบบหล่อมีอุณหภูมิสูงอยู่ ดังนั้นตำแหน่งที่วางเตากับเครื่องหล่อเหวี่ยงจะต้องอยู่ใกล้กันเพื่อสะดวกในการปฏิบัติงาน เริ่มต้นด้วยการใส่โลหะตามปริมาณที่ต้องการหล่อในเบ้าหล่อ ถ้าเป็นจำพวกโลหะผสมต้องเติมน้ำประสาน (Flux) ลงไปเพื่อให้โลหะเพื่อให้โลหะทั้งสองหรือหลายชนิดผสมกันเป็นเนื้อเดียวกัน เสร็จแล้วนำเข้าหลอมหรือใช้หัวพ่นความร้อนเป่าก็ได้ ไม่ควรใช้ความร้อนสูงเกินไปในการหลอมทองผสมหรือเงิน เพราะจะทำให้เกิดรูพรุนในเนื้อโลหะเมื่อแข็งตัว ในการปฏิบัติงานจำเป็นต้องใช้เครื่องเหวี่ยงอยู่ในลักษณะเตรียมพร้อมที่จะทำงานนำเบ้าหล่อเข้าติดกับเครื่องเหวี่ยงแล้วนำกระบอกล่อออกจากเตาอบ เมื่อถึงอุณหภูมิที่ต้องการทำการหล่อนำเข้าติดตั้งติดกับเครื่องเหวี่ยงใช้หัวพ่นความร้อนพ่นให้โลหะในเบ้าหล่อหลอมละลายหรือถ้าหล่อจำนวนมากอาจใช้เตาหลอมโลหะแล้วนำไปเทใส่เบ้าหล่อ จากนั้นก็กดสวิทช์ไฟฟ้าให้เครื่องหล่อเหวี่ยงทำงาน น้ำโลหะจะถูกแรงเหวี่ยงเหวี่ยงเข้าไปในกระบอกล่อแบบหล่อ

3.8.10 การทำความสะอาดชิ้นงาน

3.8.10.1 การล้างด้วยกรด หลังจากที่น้ำโลหะในแบบหล่อแข็งตัวดีแล้วในกระบอกล่อนำกระบอกล่อใส่ลงในถังน้ำเย็น ซึ่งจะทำให้ปูนหล่อ แตกออกเองเหลือแต่ชิ้นงานหล่อ ทำความสะอาดชิ้นแรกโดยแยกปูนหล่อออกจากชิ้นงานหล่อให้หมดอาจใช้หัวฉีดลมไล่หรือแปรงลวดช่วย หลังจากนั้นนำชิ้นงานหล่อไปแช่กรดซัลฟูริกเจือจางโดยใช้กรด 1 ส่วนผสมกับน้ำ 10 ส่วน จากนั้นนำไป

ตัดก้านออกจากชิ้นงานหล่อ หรือใช้เลื่อยขนาดเล็กเลื่อยออก การตกแต่งเล็กน้อยอาจใช้ตะไบขนาดเล็กช่วยแล้วจึงนำชิ้นงานไปขัดด้วยเครื่องหรือถังหมุนถ้ามีจำนวนมาก

3.8.10.2 การตกแต่งด้วยการชุบเคลือบผิว ชิ้นงานที่ได้อาจตกแต่งโดยการนำไปชุบเคลือบผิวให้ดูสวยงามยิ่งขึ้น โดยการนำไปชุบทอง เงิน หรืออื่น ๆ

3.8.11 การตรวจสอบข้อบกพร่องภายนอก

ในการทำการวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการตรวจสอบข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นภายนอก จะทำโดยการนำชิ้นงานแต่ละชิ้นมาหาปริมาตรของชิ้นงาน เพื่อวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของปริมาตร และวิเคราะห์หาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานหล่อ สำหรับการวิเคราะห์ผลของแฟคทอเรียลที่มีหลาย ๆ ปัจจัย ผู้วิจัยได้สร้างตารางเพื่อสะดวกในการวิเคราะห์และทำการทดลองแสดง ในตารางที่ 4 แล้วนำผลที่ได้จากการทดลอง วิเคราะห์หาค่าทางสถิติตามทฤษฎีของ ดักลาส (Douglas, 1991 : 197-294) โดยให้ความเชื่อมั่นอย่างน้อย 95 เปอร์เซ็นต์

3.8.12 การตรวจสอบความหนาแน่นของเนื้อโลหะ

ในการทำการวิจัยครั้งนี้ การตรวจสอบความหนาแน่นของเนื้อโลหะ จะทำโดยการนำชิ้นงานแต่ละชิ้นมาชั่งน้ำหนักและหาค่าปริมาตร เพื่อวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของความหนาแน่นของเนื้อโลหะ เงินสเตอร์ลิง 925 และวิเคราะห์หาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานหล่อ สำหรับการวิเคราะห์ผลของแฟคทอเรียลที่มีหลาย ๆ ปัจจัย ผู้วิจัยได้สร้างตารางเพื่อสะดวกในการวิเคราะห์และทำการทดลอง แสดงในตารางที่ 3-4 แล้วนำผลที่ได้จากการทดลอง วิเคราะห์หาค่าทางสถิติตามทฤษฎีของ ดักลาส (Douglas, 1991 : 197-294) โดยให้ความเชื่อมั่นอย่างน้อย 95 เปอร์เซ็นต์

การหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานนี้อาศัยหลักการของอาร์คิมิดีสที่กล่าวไว้ว่า “เมื่อจุ่มของแข็งลงในของเหลวจะมีแรงพยุงเกิดขึ้นบนของแข็งนั้น โดยแรงพยุงที่เกิดขึ้นจะเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่แทนที่ด้วยปริมาตรของของแข็ง” วิธีการทำได้โดยการหามวลของวัตถุในอากาศและขณะที่และขณะที่จุ่มอยู่ในน้ำ

$$\rho = \frac{W_a}{W_a - W_f} \rho_f \quad (3-7)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน (g/cm^3)

ρ_f คือ ความหนาแน่นของของเหลว (g/cm^3)

W_a คือ น้ำหนักแห้งของชิ้นงาน (g)

W_f คือ น้ำหนักของชิ้นงานในของเหลว (g)

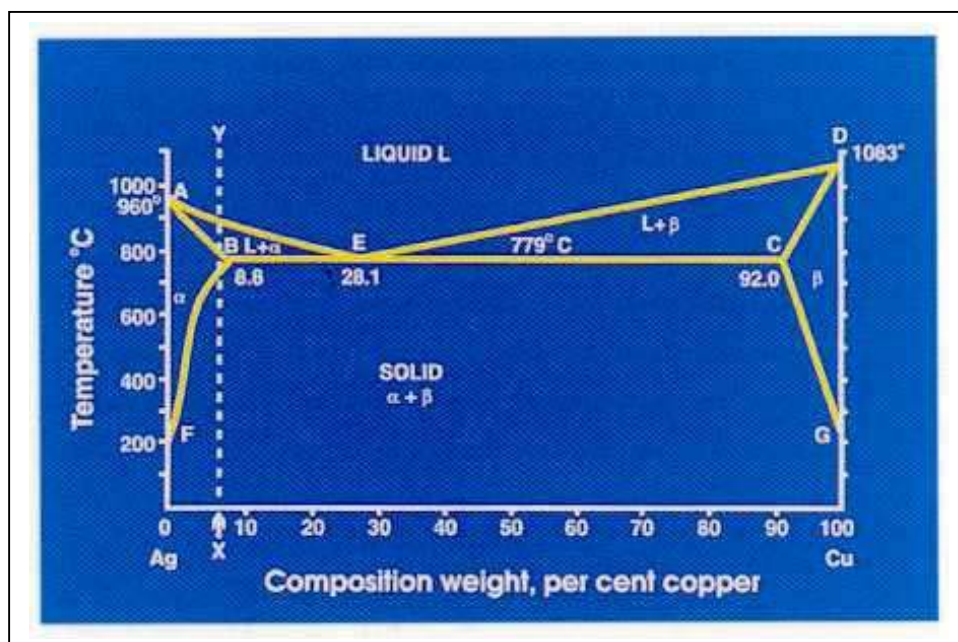
3.8.13 การออกแบบการทดลอง

3.8.13.1 ความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ

ความเร่งที่มผลต่อความเร็วรอบของเครื่องหล่อเหวียงหนีศูนย์กลางซึ่งค่าความเร็วรอบที่สูงสุดของเครื่อง และรัศมีการหมุนเท่ากับ 15 mm สามารถค่า G ซึ่งที่ประมาณ 15G ดังนั้นจึงกำหนด 15G สูงสุดและลดลงมาที่ระดับ 10G และ 5G

3.8.13.2 อุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวียงหนีศูนย์กลาง

สำหรับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวียงหนีศูนย์กลางซึ่งจากแผนภาพสมดุลย์ของเงินและทองแดง โดยพิจารณาที่ส่วนผสมของเงิน 92.5 % และทองแดง 7.5% อุณหภูมิของเส้นลิกวิดัส (Liquidus Line) ประมาณ 896°C แต่เพื่อความสะดวกในการควบคุมและการวัดจึงกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 900°C แต่ที่ระดับดังกล่าวเป็นเพียงอุณหภูมิหลอมเหลวเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติในงานหล่ออุณหภูมิที่เหมาะสมและไหลตัวในการหล่อจะอยู่เหนือเส้นลิกวิดัสประมาณ 50 ถึง 150°C ดังนั้นจึงกำหนดระดับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวียงหนีศูนย์กลาง เท่ากับ 950 1000 และ 1050°C



รูปที่ 3-10 : แสดงแผนภาพสมดุลย์ของเงินกับทองแดง

3.8.13.3 มุมของทางเดินน้ำโลหะที่ทำกับรูเท

จากการสำรวจจากการปฏิบัติงานของสถานประกอบการซึ่งส่วนมากในการติดตั้งเทียน จะใช้มุมของทางเดินน้ำโลหะที่ทำกับรูเท เท่ากับ 45° แต่ไม่ได้ทำการวัดมุมดังกล่าวอย่างจริงจัง จึงทำให้มุมดังกล่าวเกิดการคลาดเคลื่อน และให้เกิดข้อบกพร่องขึ้น ดังนั้นจึงได้พิจารณามุมที่ 45° เป็นมุมหลักโดยเพิ่มและลด 20° จึงได้กำหนดมุมของทางเดินน้ำโลหะที่ทำกับรูเท ในการติดตั้งเทียน เท่ากับ 25° 45° และ 65°

ตารางที่ 3-3 : แสดงจำนวนของงานหล่อที่ใช้ในการทดลอง

ความเร็ว ใน การเหวี่ยง	อุณหภูมิที่ใช้ในการเท (จำนวนชิ้นทดสอบ : ชิ้น)								
	950 °C			1000 °C			1050 °C		
	มุมของทางเดินน้ำโลหะ			มุมของทางเดินน้ำโลหะ			มุมของทางเดินน้ำโลหะ		
	25°	45°	65°	25°	45°	65°	25°	45°	65°
5G	3	3	3	3	3	3	3	3	3
10G	3	3	3	3	3	3	3	3	3
15G	3	3	3	3	3	3	3	3	3

3.8.14 การเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ดังนี้

- ทำการตรวจสอบหาจุดบกพร่องภายนอก และ บันทึกภาพ ด้วยการตรวจสอบด้วยสายตา เพื่อหาข้อบกพร่อง ทำการบันทึกผลการทดลอง หาสาเหตุ และวิธีแก้ไข ของการเกิดข้อบกพร่อง
- นำชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบด้วยสายตาข้างน้ำหนักและหาปริมาตร เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของปริมาตรและความหนาแน่นของเนื้อโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และวิเคราะห์หาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อปริมาตรและความหนาแน่นเพื่อแปลผลค่าดังกล่าวเป็นผลกระทบที่ส่งต่อคุณภาพในการหล่อโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ทั้งภายนอกและภายในเนื้อโลหะ โดยให้ความเชื่อมั่นอย่างน้อย 95 เปอร์เซ็นต์
- ทำการตรวจสอบหาจุดบกพร่องภายใน และ บันทึกภาพ ด้วยการตรวจสอบโครงจุลภาคเพื่อหาข้อบกพร่อง ทำการบันทึกผลการทดลอง หาสาเหตุ และวิธีแก้ไข ของการเกิดข้อบกพร่อง
- ใส่วัดข้อมูลในแผ่นบันทึก (Diskette)
- วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์

3.8.15 การวัดขนาดและรูปร่างของเกรน

การวัดขนาดและรูปร่างของเกรนสามารถทำได้หลายวิธี เช่น โดยการวัดขนาดของเกรนแต่ละเกรนด้วยไมโครมิเตอร์ ผ่านกล้องขยาย หรือโดยการใช้สเกลซึ่งขีดบนกระจกใสและถูกใส่ไว้ในเลนส์ขยาย แต่วิธีที่ใช้กันมากที่สุด คือ การถ่ายภาพโครงสร้างและอัดเป็นภาพกระดาษและเพื่อรักษาภาพไว้จะใช้แผ่นกระจกใสวางทับ จากนั้นจึงทำการวัด และยังมีวิธีอื่น ๆ อีก คือ วิธีวัดขนาดของเกรน โดยการขีดเส้นตรงขนานกัน 5 ถึง 10 เส้น ลงบนภาพโครงสร้างและทุกเส้นมีความยาวเท่ากับ L (mm) จากนั้นจึงนับจำนวนเกรน (z) ที่ถูกเส้นตรงตัดผ่าน และให้นับเกรนแรกซึ่งแม้จะถูกตัดเป็นบางส่วนไปด้วยแต่ละเส้นไม่นับเกรนสุดท้าย ขนาดเฉลี่ยของเกรนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$D_m = \frac{LP \cdot 10^3}{zV} \quad (3-8)$$

เมื่อ D_m คือ ขนาดของเกรนเฉลี่ย (μm)

L คือ ความยาวของเส้น (mm)

P คือ จำนวนเส้น

V คือ อัตราขยาย

z คือ จำนวนเกรน

ในมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing Materials) ได้กำหนดระบบเฉพาะเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ขนาดของเกรนโดยการให้ จำนวนเกรน (z) เป็นจำนวนเกรนที่มีอยู่ในพื้นที่ 1 ตารางนิ้ว เมื่อขยายภาพโครงสร้าง 100 เท่า ค่าจำนวนเกรนนี้จะนำไปใช้กำหนดระดับเกรดของเกรน โดยให้ N คือ เกรดของเกรนซึ่งมีความสัมพันธ์กับจำนวนเกรน คือ

$$Z = 2^{N-1}$$

$$N = \frac{\lg \cdot z}{\lg 2} + 1 \quad (3-9)$$

3.8.16 สถิติที่ใช้ในการวิจัย

สถิติที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งต้องใช้ในการวิเคราะห์ ค่าความหนาแน่น และค่าปริมาตรของชิ้นงานหล่อ ดังนั้นที่ใช้ในงานวิจัย คือ สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) เพื่อหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และ สถิติเชิงอนุมาน (Inferential Statistics) เพื่อทดสอบความแปรปรวน และอิทธิพลของปัจจัย

3.9 ผลการวิจัยการหล่อเหรียญ

ในการวิจัยเพื่อศึกษาการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางในบรรยากาศที่เป็นสุญญากาศ โดยใช้วัสดุเงินสเตอร์ลิง 925 ซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมต่าง ๆ คือ ซิลิกอน (Si) 0.10% สังกะสี (Zn) 1.6% ทองแดง (Cu) 4.8% และเงิน (Ag) 93.5% แล้วทำการหล่อขึ้นรูปเป็นลักษณะตัวเรือนเครื่องประดับคือ แหวน ดังนั้นผู้ทำวิจัยได้ทำการศึกษาข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในงานดังกล่าวได้ดังต่อไปนี้

3.9.1 การตรวจสอบ วิเคราะห์ค่าความหนาแน่น และข้อบกพร่องภายใน

ผลการตรวจสอบค่าความหนาแน่น และจำนวนข้อบกพร่องภายใน การตรวจสอบความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการหล่อขึ้นรูป ซึ่งความหนาแน่นดังกล่าวหมายถึงน้ำหนักของวัสดุต่อปริมาตร โดยที่วัสดุเป็นของแข็ง การคิดปริมาตรจะรวมรูพรุนแบบปิด ไม่รวมรูพรุนแบบเปิด ค่าความหนาแน่นที่ได้จะมีค่าเท่ากับค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีถ้าวัสดุนั้นปราศจากรูพรุนใด ๆ ซึ่งค่าที่ได้นั้นจะได้จากชิ้นงานหล่อจำนวน 9 ชิ้น และนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยความหนาแน่น จำนวนข้อบกพร่องภายใน ซึ่งหาได้

โดยการสุ่มจากชิ้นงานจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคแนวตัดแนวต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ดังแสดงตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 : แสดงผลการตรวจสอบค่าความหนาแน่นและจำนวนข้อบกพร่องภายในของชิ้นงานหลังหล่อขึ้นรูปมุมทางเดินน้ำโลหะ

หมายเลข ตัวอย่าง	มุม ทางเดิน น้ำโลหะ	ความเร่ง	อุณหภูมิ เทหล่อ (°C)	ค่าเฉลี่ยความ หนาแน่น (g/cm ³)	จำนวนข้อบก พร่องภายใน (จุด)
1	25 ⁰	5G	950	10.1987	3
2	25 ⁰	5G	1000	10.1336	3
3	25 ⁰	5G	1050	10.2551	5
4	25 ⁰	10G	950	10.2164	3
5	25 ⁰	10G	1000	10.2272	2
6	25 ⁰	10G	1050	10.1683	5
7	25 ⁰	15G	950	10.2712	3
8	25 ⁰	15G	1000	10.2891	5
9	25 ⁰	15G	1050	10.3087	2
10	45 ⁰	5G	950	10.2015	4
11	45 ⁰	5G	1000	10.0458	6
12	45 ⁰	5G	1050	10.1491	1
13	45 ⁰	10G	950	10.1367	4
14	45 ⁰	10G	1000	10.2438	3
15	45 ⁰	10G	1050	10.3037	3
16	45 ⁰	15G	950	10.1466	3
17	45 ⁰	15G	1000	10.1738	1
18	45 ⁰	15G	1050	10.1566	1

ตารางที่ 3-4 : แสดงผลการตรวจสอบค่าความหนาแน่นและจำนวนข้อบกพร่องภายในของชิ้นงานหลังหล่อขึ้นรูปมุมทางเดินน้ำโลหะ (ต่อ)

หมายเลข ตัวอย่าง	มุม ทางเดิน น้ำโลหะ	ความเร่ง	อุณหภูมิ เทหล่อ (°C)	ค่าเฉลี่ยความ หนาแน่น (g/cm ³)	จำนวนข้อบก พร่องภายใน (จุด)
19	65 ⁰	5G	950	10.1092	3
20	65 ⁰	5G	1000	10.0424	2
21	65 ⁰	5G	1050	10.2009	2
22	65 ⁰	10G	950	10.1311	2
23	65 ⁰	10G	1000	10.1881	3
24	65 ⁰	10G	1050	10.3204	0
25	65 ⁰	15G	950	10.1619	2
26	65 ⁰	15G	1000	10.2694	2
27	65 ⁰	15G	1050	10.1892	2

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการหล่อขึ้นรูป ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังทำการหล่อขึ้นรูปสามารถจำแนกได้สามประเด็นหลักคือ ศึกษาความแตกต่างระหว่างค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของชิ้นงานหลังทำการหล่อขึ้นรูป โดยจำแนกตามอุณหภูมิหลอมก่อนทำการเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง จำแนกตามค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ และจำแนกตามมุมของทางเดินน้ำโลหะ และผลกระทบของปัจจัยปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของชิ้นงานหลังทำการหล่อขึ้นรูป ดังแสดงตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 : แสดงค่าต่าง ๆ ของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของชิ้นงาน
หลังหล่อขึ้นรูป

Source of Variation	Sum of Squares	.df	Mean Square	F	Sig.
ANGLE	0.1571	2	0.0786	3.3647	0.036 [*]
RPM	0.2523	2	0.1262	5.4029	0.005 [*]
TEMP	0.1410	2	0.0705	3.0200	0.051
ANGLE * RPM	0.1804	4	0.0451	1.9309	0.106
ANGLE * TEMP	0.0554	4	0.0138	0.5928	0.668
RPM * TEMP	0.2759	4	0.0690	2.9538	0.021 [*]
ANGLE * RPM * TEMP	0.2034	8	0.0254	1.0890	0.372
Error	5.0440	216	0.0234		
Total	25,258.63	243			

* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 3-6 ปัจจัยต่าง ๆ ในงานหล่อโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ที่ส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการหล่อขึ้นรูป คือ มุมของทางเดินน้ำโลหะและค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ระดับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลางส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของชิ้นงานที่แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ปัจจัยร่วมต่าง ๆ ในงานงานหล่อโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ที่ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของชิ้นงานโดยพิจารณาผลกระทบจากค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการหล่อขึ้นรูป คือ ปัจจัยร่วมระหว่าง มุมของทางเดินน้ำโลหะกับค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ และ มุมของทางเดินน้ำโลหะกับระดับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของชิ้นงานที่แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ปัจจัยร่วมระหว่าง ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบกับระดับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของชิ้นงานที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ปัจจัยร่วมระหว่าง ปัจจัยทั้งหมดคือ มุมของทางเดินน้ำโลหะ ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ และระดับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของชิ้นงานที่แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

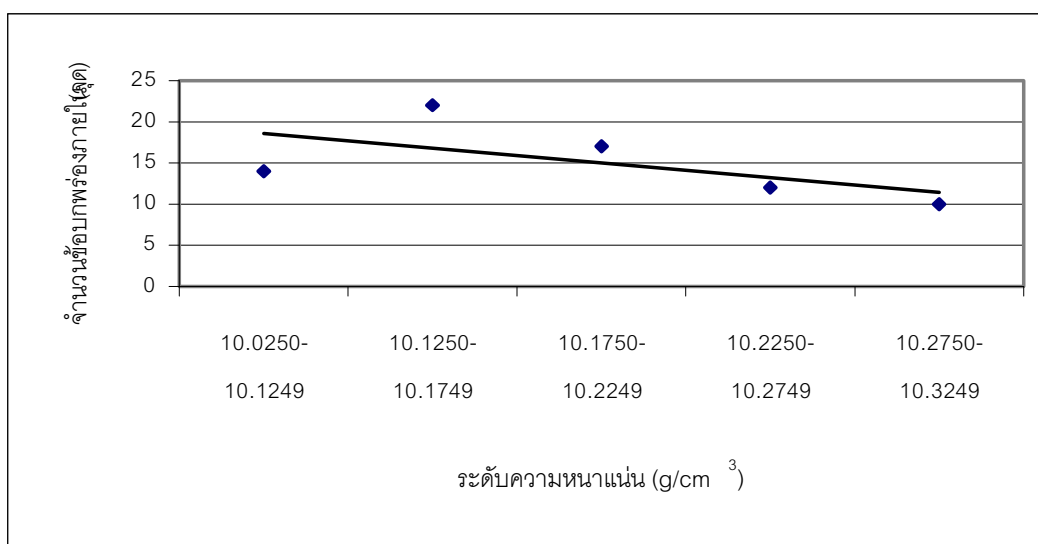
วิเคราะห์ระดับค่าความหนาแน่นของชิ้นงานกับจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายในชิ้นงาน โดยจัดระดับความหนาแน่นออกเป็นระดับต่าง ๆ แล้วหาข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในงาน ดังแสดงตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3-6 : แสดงผลการตรวจสอบระดับค่าความหนาแน่นของชิ้นงานกับจำนวนการเกิด

ข้อบกพร่องภายใน

ระดับค่าความหนาแน่น (g/cm^3)	จำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายใน (จุด)
10.0250-10.1249	14
10.1250-10.1749	22
10.1750-10.2249	17
10.2250-10.2749	12
10.2750-10.3249	10

ผลการตรวจสอบค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากการหล่อทั้งหมดและหาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นดังแสดงในตารางที่ 3-4 แล้วนำผลจากตารางดังกล่าวมาจัดเป็นระดับโดยแบ่งระดับ แล้วนำค่าเฉลี่ยของข้อบกพร่องภายในชิ้นงานที่เกิดขึ้นมาจัดที่ระดับความหนาแน่นต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3-4 และจากรูปที่ 3-10 ที่ระดับค่าความหนาแน่นมากกว่า 10.1250 g/cm^3 ส่งผลต่อจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายในของชิ้นงานลดลง



รูปที่ 3-11 : แสดงระดับค่าความหนาแน่นของชิ้นงานกับจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายใน

จากผลการตรวจสอบจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายในของชิ้นงานทั้งหมด แล้วนำจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายในของชิ้นงานทั้งหมด หาค่าเฉลี่ยของจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายในของชิ้นงาน

โดยพิจารณาที่ระดับมุมของทางเดินน้ำโลหะที่ต่างกันเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายในของชิ้นงานในแต่ละระดับ ดังแสดงตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3-7 : แสดงระดับมุมของทางเดินน้ำโลหะที่ต่างกัน และค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายใน

มุมของทางเดินน้ำโลหะ	ค่าเฉลี่ยจำนวนข้อบกพร่องภายใน (จุด)
25 ⁰	4
45 ⁰	3
65 ⁰	2

ค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายในของชิ้นงานที่ระดับมุมของทางเดินน้ำโลหะที่ต่างกันจะส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องภายในที่แตกต่างกัน ตามตารางที่ 3-7 ค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายในของชิ้นงานที่ระดับมุมของทางเดินน้ำโลหะ เท่ากับ 65⁰ จะตรวจสอบพบข้อบกพร่องภายในน้อยที่สุด

จากผลการตรวจสอบจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายในของชิ้นงานทั้งหมด แล้วนำจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายในของชิ้นงานทั้งหมด หาค่าเฉลี่ยของจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายในของชิ้นงาน โดยพิจารณาที่ระดับค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบที่ต่างกันเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายในของชิ้นงานในแต่ละระดับ ดังแสดงตารางที่ 3-8

ตารางที่ 3-8 : แสดงระดับค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบที่ต่างกัน และค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายใน

ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ	ค่าเฉลี่ยจำนวนข้อบกพร่องภายใน (จุด)
5G	4
10G	3
15G	3

ค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายในของชิ้นงานที่ระดับค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบที่ต่างกันจะส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องภายในที่แตกต่างกัน ตามตารางที่ 3-8 ค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายในของชิ้นงานที่ระดับค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ เท่ากับ 10G และ 15G จะตรวจสอบพบข้อบกพร่องภายในน้อยที่สุด

จากผลการตรวจสอบจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายในของชิ้นงานทั้งหมด แล้วนำจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายในของชิ้นงานทั้งหมด หาค่าเฉลี่ยของจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายในของชิ้นงาน

โดยพิจารณาที่ระดับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ต่างกันเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายในของชิ้นงานในแต่ละระดับ ดังแสดงตารางที่ 3-9

ตารางที่ 3-9 : แสดงระดับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ต่างกันและค่าเฉลี่ยจำนวน การเกิดข้อบกพร่องภายใน

ระดับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง	ค่าเฉลี่ยจำนวนข้อบกพร่องภายใน (จุด)
950 ⁰ C	3
1000 ⁰ C	3
1050 ⁰ C	2

ค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายในของชิ้นงานที่ระดับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ต่างกัน จะส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องภายในที่แตกต่างกัน ตามตารางที่ 3-9 ค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายในของชิ้นงานระดับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเท่ากับ 1050⁰C จะตรวจสอบพบข้อบกพร่องภายในน้อยที่สุด

จากค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายในของชิ้นงานระดับมุมของทางเดินน้ำโลหะ ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ อุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ต่างกัน ตามตารางที่ 3-9 นำพิจารณาเลือกค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายในของชิ้นงานที่ส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องภายในน้อยที่สุด คือที่ระดับมุมของทางเดินน้ำโลหะ เท่ากับ 65⁰ ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ เท่ากับ 10G หรือ 15G และอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เท่ากับ 1050⁰C และถ้าพิจารณาที่ปัจจัยที่ระดับดังกล่าว คือ ที่ระดับมุมของทางเดินน้ำโลหะ เท่ากับ 65⁰ ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ เท่ากับ 10G และอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เท่ากับ 1050⁰C จะส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของความหนาแน่น เท่ากับ 10.3204 g/cm³ และจะไม่พบข้อบกพร่องและ ที่ระดับมุมของทางเดินน้ำโลหะ เท่ากับ 65⁰ ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ เท่ากับ 15G และอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เท่ากับ 1050⁰C จะส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของความหนาแน่น เท่ากับ 10.1892 และจะพบข้อบกพร่องจำนวน 2 จุด ดังนั้นที่ระดับมุมของทางเดินน้ำโลหะ เท่ากับ 65⁰ ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ เท่ากับ 10G และอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เท่ากับ 1050⁰C จึงเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด

3.9.2 ผลการตรวจสอบ วิเคราะห์ปริมาตร และข้อบกพร่องภายนอกชิ้นงาน

ผลการตรวจสอบปริมาตร และข้อบกพร่องภายนอกชิ้นงาน การตรวจสอบปริมาตรของชิ้นงาน หลังการหล่อขึ้นรูป โดยที่วัสดุเป็นทองแข็ง การคิดปริมาตรจะรวมรูปทรงแบบปิด ไม่รวมรูปทรงแบบเปิด ซึ่งค่าที่ได้นั้นจะได้จากชิ้นงานหล่อจำนวน 9 ชิ้น นำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยปริมาตร และตรวจสอบหาจำนวนข้อบกพร่องภายนอกชิ้นงานด้วยสายตา ดังแสดงตารางที่ 3-10

ตารางที่ 3-10 : แสดงผลการตรวจสอบปริมาตรและจำนวนข้อบกพร่องภายนอกของชิ้นงานหลังหล่อขึ้นรูป

หมายเลข ตัวอย่าง	มุม ทางเดิน น้ำโลหะ	ความเร่ง	อุณหภูมิ เทหล่อ (°C)	ค่าเฉลี่ยความ หนาแน่น (g/cm ³)	จำนวนข้อบก พร่องภายใน (จุด)
1	25 ⁰	5G	950	0.7678	1
2	25 ⁰	5G	1000	0.7644	5
3	25 ⁰	5G	1050	0.7456	4
4	25 ⁰	10G	950	0.7578	5
5	25 ⁰	10G	1000	0.7589	5
6	25 ⁰	10G	1050	0.7800	4
7	25 ⁰	15G	950	0.7833	3
8	25 ⁰	15G	1000	0.7678	3
9	25 ⁰	15G	1050	0.7856	4
10	45 ⁰	5G	950	0.7689	5
11	45 ⁰	5G	1000	0.7667	3
12	45 ⁰	5G	1050	0.7544	4
13	45 ⁰	10G	950	0.7500	5
14	45 ⁰	10G	1000	0.7578	4
15	45 ⁰	10G	1050	0.7756	4
16	45 ⁰	15G	950	0.8044	2
17	45 ⁰	15G	1000	0.7667	4
18	45 ⁰	15G	1050	0.7722	3

ตารางที่ 3-10 : แสดงผลการตรวจสอบปริมาตรและจำนวนข้อบกพร่องภายนอกของชิ้นงานหลังหล่อขึ้นรูป (ต่อ)

หมายเลข ตัวอย่าง	มุม ทางเดิน น้ำโลหะ	ความเร่ง	อุณหภูมิ เทหล่อ (°C)	ค่าเฉลี่ยความ หนาแน่น (g/cm ³)	จำนวนข้อบก พร่องภายใน (จุด)
19	65 ⁰	5G	950	0.7622	5
20	65 ⁰	5G	1000	0.7544	4
21	65 ⁰	5G	1050	0.7533	3
22	65 ⁰	10G	950	0.7622	5
23	65 ⁰	10G	1000	0.7622	4
24	65 ⁰	10G	1050	0.7711	5
25	65 ⁰	15G	950	0.7867	5
26	65 ⁰	15G	1000	0.7600	3
27	65 ⁰	15G	1050	0.7656	4

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยปริมาตรของชิ้นงานหลังการหล่อขึ้นรูป ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าปริมาตรของชิ้นงานหลังทำการหล่อขึ้นรูป สามารถจำแนกได้สามประเด็นหลักคือ ศึกษาความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยปริมาตรของชิ้นงานหลังการหล่อขึ้นรูปโดยจำแนกตามอุณหภูมิหลอมก่อนทำการเทขึ้นรูปชิ้นงานกลาง จำแนกตามค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ และจำแนกตามมุมของทางเดินน้ำโลหะ และผลกระทบของปัจจัยปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยปริมาตรของชิ้นงานหลังการหล่อขึ้นรูป ดังแสดง ตารางที่ 3-11

จากตารางที่ 3-11 ปัจจัยต่าง ๆ ในงานหล่อโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ที่ส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยปริมาตรของชิ้นงานหลังการหล่อขึ้นรูป คือ มุมของทางเดินน้ำโลหะส่งผลกระทบต่อปริมาตรของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบระดับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเทขึ้นรูปชิ้นงานกลางส่งผลกระทบต่อปริมาตรของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ปัจจัยร่วมต่าง ๆ ในงานหล่อโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ที่ส่งผลกระทบต่อปริมาตรของชิ้นงานโดยพิจารณาผลกระทบจากค่าเฉลี่ยปริมาตรของชิ้นงานหลังการหล่อขึ้นรูป คือปัจจัยร่วมระหว่าง มุมของทางเดินน้ำโลหะที่ระดับต่างกับค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ มุมของทางเดินน้ำโลหะกับระดับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเทขึ้นรูปชิ้นงานกลางส่งผลกระทบต่อปริมาตรของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ

ตารางที่ 3-11 : แสดงค่าต่าง ๆ ของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยปริมาตรของชิ้นงาน
หลังหล่อขึ้นรูป

Source of Variation	Sum of Squares	.df	Mean Square	F	Sig.
ANGLE	0.0009	2	0.0004	2.1006	0.125
RPM	0.0130	2	0.0065	30.7787	0.000 [*]
TEMP	0.0036	2	0.0018	8.4729	0.000 [*]
ANGLE * RPM	0.0017	4	0.0004	1.9746	0.099
ANGLE * TEMP	0.0006	4	0.0001	0.6761	0.609
RPM * TEMP	0.0151	4	0.0038	17.9756	0.000 [*]
ANGLE * RPM * TEMP	0.0039	8	0.0005	2.3395	0.020 [*]
Error	0.0455	216	0.0002		
Total	142.9909	243			

* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

0.05 และค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบกับระดับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหียงหนีศูนย์กลาง ส่งผลกระทบท่อปริมาตรของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ปัจจัยร่วมระหว่าง ปัจจัยทั้งหมดคือ มุมของทางเดินน้ำโลหะที่ ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ และระดับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหียงหนีศูนย์กลาง ส่งผลกระทบท่อปริมาตรของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

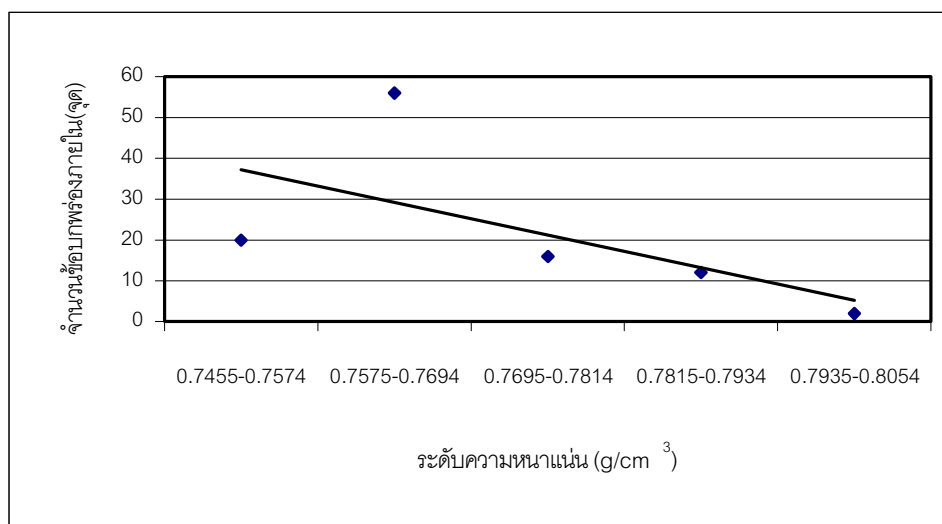
วิเคราะห์ระดับปริมาตรของชิ้นงานกับจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอกชิ้นงานโดยจัดระดับของปริมาตรออกเป็นระดับต่าง ๆ แล้วหาข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในงาน ดังแสดงในตารางที่ 3-12

ตารางที่ 12 : แสดงผลการตรวจสอบระดับค่าปริมาตรของชิ้นงานกับค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิด

ข้อบกพร่องภายนอก

ระดับค่าปริมาตร (cm^3)	ค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอก (จุด)
0.7455-0.7574	20
0.7575-0.7694	56
0.7695-0.7814	16
0.7815-0.7934	12
0.7935-0.8054	2

ผลการตรวจสอบค่าปริมาตรของชิ้นงานที่ได้จากการหล่อทั้งหมดและหาค่าเฉลี่ยของปริมาตรดังแสดงในตารางที่ 3-10 แล้วนำผลจากตารางดังกล่าวมาจัดเป็นระดับโดยแบ่งระดับ แล้วนำค่าเฉลี่ยของข้อบกพร่องภายในชิ้นงานที่เกิดขึ้นมาจัดที่ระดับปริมาตรต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3-12 และจากรูปที่ 3-11 ที่ระดับค่าปริมาตรมากกว่า 0.7575 cm^3 ส่งผลต่อจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายในของชิ้นงานลดลง



รูปที่ 3-12 : แสดงระดับค่าปริมาตรของชิ้นงานกับจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอก

จากผลการตรวจสอบจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอกของชิ้นงานทั้งหมด แล้วนำจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอกของชิ้นงานทั้งหมด หาค่าเฉลี่ยของจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอกของชิ้นงานโดยพิจารณาที่ระดับมุมของทางเดินน้ำโลหะที่ต่างกันเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอกของชิ้นงานในแต่ละระดับ ดังแสดงตารางที่ 3-13

ตารางที่ 3-13 : แสดงระดับมุมของทางเดินน้ำโลหะที่ต่างกัน และค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิด

ข้อบกพร่องภายนอก

มุมของทางเดินน้ำโลหะ	ค่าเฉลี่ยจำนวนข้อบกพร่องภายนอก (จุด)
25 ⁰	4
45 ⁰	4
65 ⁰	5

ค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอกของชิ้นงานที่ระดับมุมของทางเดินน้ำโลหะที่ต่างกัน จะส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องภายนอกที่แตกต่างกัน ตามตารางที่ 3-14 ค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอกของชิ้นงานที่ระดับมุมของทางเดินน้ำโลหะ เท่ากับ 25⁰ และ 45⁰ จะตรวจสอบพบข้อบกพร่องภายในน้อยที่สุด

จากผลการตรวจสอบจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอกของชิ้นงานทั้งหมด แล้วนำจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอกของชิ้นงานทั้งหมด หาค่าเฉลี่ยของจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอกของชิ้นงานโดยพิจารณาที่ระดับความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบที่ต่างกันเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอกของชิ้นงานในแต่ละระดับ ดังแสดงตารางที่ 3-14

ตารางที่ 3-14 : แสดงระดับค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบที่ต่างกัน และค่าเฉลี่ยจำนวน

การเกิดข้อบกพร่องภายนอก

ค่าความเร่ง	ค่าเฉลี่ยจำนวนข้อบกพร่องภายนอก (จุด)
5G	4
10G	5
15G	4

ค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอกของชิ้นงานที่ระดับค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบที่ต่างกันจะส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องภายนอกที่แตกต่างกัน ตามตารางที่ 3-14 ค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอกของชิ้นงานที่ระดับค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ เท่ากับ 5G และ 15G จะตรวจสอบพบข้อบกพร่องภายในน้อยที่สุด

จากผลการตรวจสอบจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอกของชิ้นงานทั้งหมด แล้วนำจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอกของชิ้นงานทั้งหมด หาค่าเฉลี่ยของจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอกของชิ้นงานโดยพิจารณาที่ระดับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ต่างกัน เปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอกของชิ้นงานในแต่ละระดับ ดังแสดง ตารางที่ 3-15

ตารางที่ 3-15 : แสดงระดับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ต่างกันและ
ค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอก

ระดับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยง หนีศูนย์กลาง	ค่าเฉลี่ยจำนวนข้อบกพร่องภายนอก (จุด)
950 ⁰ C	4
1000 ⁰ C	5
1050 ⁰ C	5

ค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอกของชิ้นงานที่ระดับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ต่างกันจะส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องภายนอกที่แตกต่างกัน ตามตารางที่ 3-15 ค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอกของชิ้นงานที่ระดับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เท่ากับ 950⁰C จะตรวจสอบพบข้อบกพร่องภายในน้อยที่สุด

จากค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอกของชิ้นงานระดับมุมของทางเดินน้ำโลหะ ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ อุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ต่างกัน ตามตารางที่ 3-13 ถึงตารางที่ 3-15 นำพิจารณาเลือกค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอกของชิ้นงานที่ส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องภายนอกน้อยที่สุด คือที่ระดับมุมของทางเดินน้ำโลหะ เท่ากับ 25⁰ และ 65⁰ ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ เท่ากับ 5G หรือ 15G และอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เท่ากับ 950⁰C และถ้าพิจารณาที่ปัจจัยที่ระดับดังกล่าว คือ ที่ระดับมุมของทางเดินน้ำโลหะ เท่ากับ 25⁰ ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ เท่ากับ 5G และอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เท่ากับ 950⁰C จะส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของปริมาตร เท่ากับ 0.7678 cm³ และจะพบข้อบกพร่องจำนวน 1 จุด และ ที่ระดับมุมของทางเดินน้ำโลหะ เท่ากับ 25⁰ ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ เท่ากับ 15G และอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เท่ากับ 950⁰C จะส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของปริมาตร เท่ากับ 0.7833 cm³ และจะพบข้อบกพร่องจำนวน 3 จุด ที่ระดับมุมของทางเดินน้ำโลหะ เท่ากับ 45⁰ ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ เท่ากับ 5G และอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เท่ากับ 950⁰C จะส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของปริมาตร เท่ากับ 0.7689 cm³ และจะพบข้อบกพร่องจำนวน 5 จุด ที่ระดับมุมของทางเดินน้ำโลหะ เท่ากับ 45⁰ ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ เท่ากับ 15G และอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เท่ากับ 950⁰C จะส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของปริมาตร เท่ากับ 0.8044 cm³ และจะพบข้อบกพร่องจำนวน 2 จุด ดังนั้นที่ระดับมุมของทางเดินน้ำโลหะ เท่ากับ 25⁰ ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ เท่ากับ 5G และอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เท่ากับ

950 °C จะเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดถ้าพิจารณาจากค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่อง และที่ดับมุมของทางเดินน้ำโลหะ เท่ากับ 25° ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ เท่ากับ 15G และอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เท่ากับ 950 °C จึงเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของปริมาตร

3.9.3 ผลการตรวจสอบ วิเคราะห์ขนาดและการกระจายของเกรน

ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายของเกรน โดยพิจารณาจากค่าความหนาแน่นและค่าปริมาตร ดังแสดงตารางที่ 3-16

ตารางที่ 3-16 : แสดงผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายของเกรนของชิ้นงานหล่อขึ้นรูป

หมายเลข ตัวอย่าง	มุม ทางเดิน น้ำโลหะ	ความเร่ง	อุณหภูมิ เทหล่อ (°C)	ค่าเฉลี่ยความ หนาแน่น (g/cm ³)	ค่าเฉลี่ย ปริมาตร (cm ³)	ค่าเฉลี่ย ขนาดเกรน (μm)	ข้อบกพร่อง	
							ใน	นอก
1	25 ⁰	5G	950	10.1987	0.7678	73.5576	3	1
2	25 ⁰	5G	1000	10.1336	0.7644	58.0908	3	5
3	25 ⁰	5G	1050	10.2551	0.7456	57.7268	5	4
4	25 ⁰	10G	950	10.2164	0.7578	69.8632	3	5
5	25 ⁰	10G	1000	10.2272	0.7589	69.9281	2	5
6	25 ⁰	10G	1050	10.1683	0.7800	55.9775	5	4
7	25 ⁰	15G	950	10.2712	0.7833	76.1131	3	3
8	25 ⁰	15G	1000	10.2891	0.7678	61.0977	5	3
9	25 ⁰	15G	1050	10.3087	0.7856	57.1730	2	4
10	45 ⁰	5G	950	10.2015	0.7689	65.9946	4	5
11	45 ⁰	5G	1000	10.0458	0.7667	53.7907	6	3
12	45 ⁰	5G	1050	10.1491	0.7544	59.6495	1	4
13	45 ⁰	10G	950	10.1367	0.7500	62.0317	4	5
14	45 ⁰	10G	1000	10.2438	0.7578	68.2842	3	4
15	45 ⁰	10G	1050	10.3037	0.7756	60.4546	3	4
16	45 ⁰	15G	950	10.1466	0.8044	77.9864	3	2
17	45 ⁰	15G	1000	10.1738	0.7667	77.5492	1	4
18	45 ⁰	15G	1050	10.1566	0.7722	58.6798	1	3

ตารางที่ 3-16 : แสดงผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายของเกรนของชิ้นงานหล่อขึ้นรูป (ต่อ)

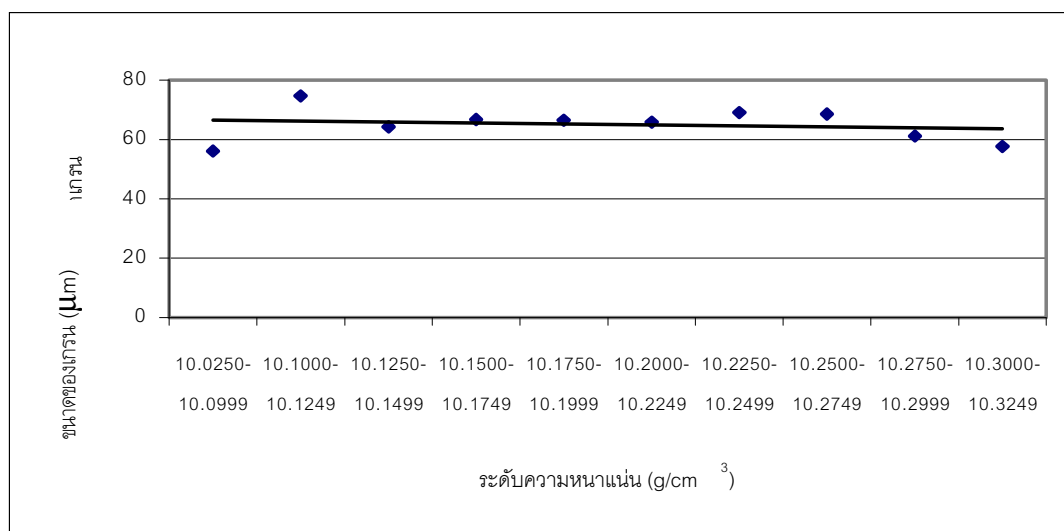
หมายเลข ตัวอย่าง	มุมทาง เดินน้ำ โลหะ	ความเร่ง	อุณหภูมิ เทหล่อ ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าเฉลี่ยความ หนาแน่น (g/cm^3)	ค่าเฉลี่ย ปริมาตร (cm^3)	ค่าเฉลี่ยขนาด เกรน (μm)	ข้อบกพร่อง	
							ใน	นอก
19	65°	5G	950	10.1092	0.7622	74.6291	3	5
20	65°	5G	1000	10.0424	0.7544	58.3030	2	4
21	65°	5G	1050	10.2009	0.7533	61.7988	2	3
22	65°	10G	950	10.1311	0.7622	63.3713	2	5
23	65°	10G	1000	10.1881	0.7622	71.2917	3	4
24	65°	10G	1050	10.3204	0.7711	61.0997	0	5
25	65°	15G	950	10.1619	0.7867	74.6291	2	5
26	65°	15G	1000	10.2694	0.7600	71.7165	2	3
27	65°	15G	1050	10.1892	0.7656	54.4658	2	4

วิเคราะห์ระดับค่าความหนาแน่นของชิ้นงานกับขนาดและการกระจายของเกรนของชิ้นงานโดยจัดระดับของของความหนาแน่นออกเป็นระดับต่าง ๆ แล้วหาข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ดังแสดงตารางที่ 3-17

ตารางที่ 3-17 : แสดงผลการตรวจสอบระดับค่าความหนาแน่นของชิ้นงานกับขนาดและการกระจายของเกรนของชิ้นงาน

ระดับค่าความหนาแน่น (g/cm^3)	ขนาดของเกรน (μm)
10.0250-10.0999	56.0468
10.1000-10.1249	74.6291
10.1250-10.1499	64.2259
10.1500-10.1749	66.7089
10.1750-10.1999	66.4383
10.2000-10.2249	65.8855
10.2250-10.2499	69.1061
10.2500-10.2749	68.5188
10.2750-10.2999	61.0977
10.3000-10.3249	57.5751

จากตารางแสดงระดับค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่ส่งผลต่อขนาดและการกระจายของเกรนของชิ้นงาน ที่ระดับค่าความหนาแน่นของชิ้นงานระดับต่าง ๆ ถ้านำค่าเฉลี่ยความหนาแน่นที่ได้เปรียบเทียบกับขนาดของค่าเฉลี่ยของเกรน จะแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับขนาดของค่าเฉลี่ยของเกรน ที่ระดับค่าความหนาแน่นระหว่าง $10.1250 - 10.2749 \text{ g/cm}^3$ จะมีแนวโน้มของขนาดของเกรนที่ค่อยข้างคงที่ และที่ระดับความหนาแน่นสูงกว่า 10.2479 g/cm^3 จะมีแนวโน้มของขนาดของเกรนที่เล็กลง ดังแสดงในรูปที่ 3-13



รูปที่ 3-13 : แสดงระดับค่าความหนาแน่นของชิ้นงานกับขนาดและการกระจายของเกรนของชิ้นงาน

วิเคราะห์ระดับปริมาตรของชิ้นงานกับขนาดและการกระจายของเกรนของชิ้นงานโดยจัดระดับของปริมาตรออกเป็นระดับต่าง ๆ แล้วหาขนาดและการกระจายของเกรนของชิ้นงานดังแสดงในตารางที่ 3-18

ตารางที่ 3-18 : แสดงผลการตรวจสอบระดับค่าปริมาตรของชิ้นงานกับจำนวนการเกิด

ข้อบกพร่องภายนอก

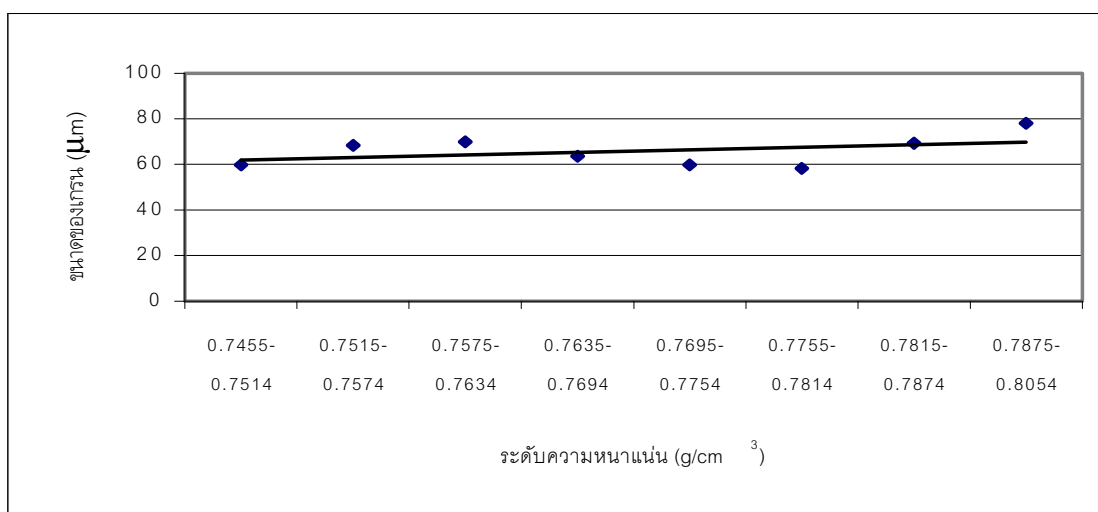
ระดับค่าปริมาตร (cm^3)	ขนาดของเกรน (μm)
0.7455-0.7514	59.8792
0.7515-0.7574	68.2504
0.7575-0.7634	69.8691
0.7635-0.7694	63.5066
0.7695-0.7754	59.8887

ตารางที่ 3-18 : แสดงผลการตรวจสอบระดับค่าปริมาตรของชิ้นงานกับจำนวนการเกิด

ข้อบกพร่องภายนอก (ต่อ)

ระดับค่าปริมาตร (cm^3)	ขนาดของเกรน (μm)
0.7755-0.7814	58.2160
0.7815-0.7874	69.3050
0.7875-0.8054	77.9864

จากตารางแสดงระดับค่าปริมาตรของชิ้นงานที่ส่งผลต่อขนาดและการกระจายของเกรนของชิ้นงาน ที่ระดับค่าปริมาตรของชิ้นงานระดับต่าง ๆ ถ้านำค่าเฉลี่ยปริมาตรที่ได้เปรียบเทียบกับขนาดของค่าเฉลี่ยของเกรน จะแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับขนาดของค่าเฉลี่ยของเกรน ที่ระดับปริมาตรสูงกว่า 0.7814 cm^3 จะมีแนวโน้มของขนาดของเกรนที่เล็กลง ดังแสดงในรูป ที่ 3-13



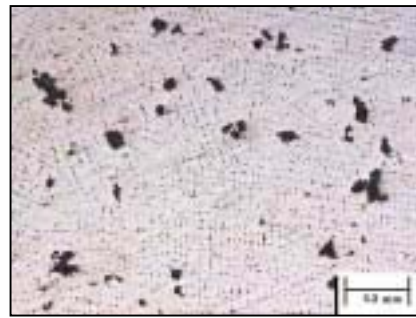
รูปที่ 3-14 : แสดงระดับค่าปริมาตรของชิ้นงานกับขนาดและการกระจายของเกรนของชิ้นงาน

3.9.4 ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในงานหล่อโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

3.9.4.1 ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวลักษณะ โพรงอากาศ

ข้อบกพร่องลักษณะรูเข็ม (Pin Holes) บนผิวเนื่องมาจากโพรงอากาศ

- ลักษณะของข้อบกพร่อง เมื่อขัดเงาที่บริเวณผิวจะพบจุดบกพร่องแบบนี้จำนวนมาก โดยทั่วไปจะพบในลักษณะการกระจายอยู่รอบ ๆ ผิวที่มีรูพรุน



รูปที่ 3-15 : แสดงลักษณะการกระจายของรูพรุนที่รูปที่ 3-16 : แสดงโครงสร้างจุลภาคของการกระจายของรูพรุนจะทำให้เกิดข้อบกพร่องแบบรูเข็ม ที่จะทำให้เกิดข้อบกพร่อง(5x)

จากรูปที่ 3-15 เป็นข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวของชิ้นงานมีลักษณะเป็นรอยโพรงเล็ก ๆ เป็นแนวและรู ข้อบกพร่องแบบนี้จะเกิดขึ้นจากการเกิดโพรงของสิ่งสกปรกหรือสิ่งเจือปน และในบางครั้งจะเกิดขึ้นจากการหดตัว จะเป็นข้อบกพร่องลักษณะของโพรงเนื่องจากการหดตัว ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้ถ้าเรานำชิ้นงานผ่านการขัดเงาจะเห็นความแตกต่างได้ชัดเจนระหว่างระหว่างผิวชิ้นงานที่ไม่เกิดข้อบกพร่องกับข้อบกพร่อง

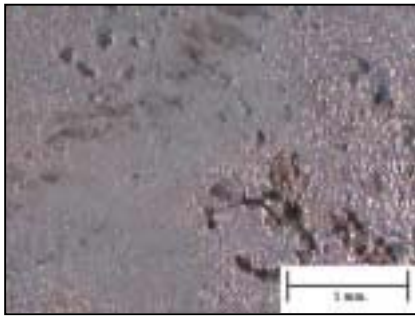
จากรูปที่ 3-16 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโพรง ซึ่งเป็นโพรงแบบผิวปิดซึ่งจะพบโดยทั่วไป 2 ลักษณะคือ โพรงอากาศเล็ก ๆ กลม ๆ และโพรงอากาศที่มีรูปร่างลักษณะไม่กลม ข้อบกพร่องของโครงสร้างจุลภาคของโพรงที่เกิดจากสิ่งแปลกปลอมหรือสิ่งสกปรกเจือปนในวัสดุส่วนมากจะเกิดจากทองแดงออกไซด์

- สาเหตุการเกิดข้อบกพร่อง การเกิดโพรงโดยทั่วไปมักเกิดจากการหดตัว และการฝังในของสิ่งสกปรกหรือสิ่งเจือปน หรือมีอากาศแทรกตัวขณะที่โลหะกำลังแข็งตัว มักจะมีลักษณะกลมหรืออาจมีหนึ่งแต่มีขนาดใหญ่ แต่ถ้าขณะหลอมโลหะวัสดุมีออกไซด์ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะไมโครเซกชัน (Microsections) จะเกิดในลักษณะออกไซด์ฝังใน (Dieter, 1997 : 19)

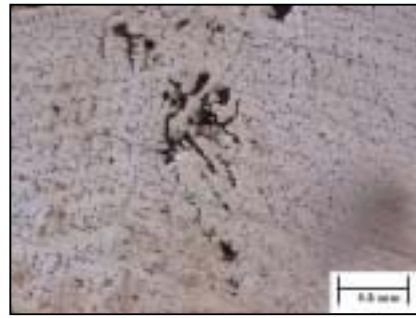
- วิธีแก้ไข โดยควบคุมบรรยากาศที่และวัสดุและเบ้าต้องสะอาดปราศจากออกไซด์ (Dieter, 1997 : 20)

ข้อบกพร่องที่ผิวเป็นรูลักษณะเนสต์ (Nest)

- ลักษณะของข้อบกพร่อง ที่ผิวเป็นรูพรุนลักษณะเนสต์ (Nest) จะเป็นข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเป็นจุด ๆ เป็นกลุ่ม จุดดังกล่าวจะเกิดขึ้นคล้ายรังของผึ้งจะเกิดขึ้นกระจัดกระจายทั่ว ๆ ไปในแต่ละกลุ่ม (Dieter, 1997 : 21)



รูปที่ 3-17 : แสดงข้อบกพร่องเป็นรูพรุน
ลักษณะเนสต์ (Nest) (5X)



รูปที่ 3-18 : แสดงโครงสร้างจุลภาคของ
ข้อบกพร่องเป็นรูพรุนลักษณะเนสต์

จากรูปที่ 3-17 ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นที่ผิวมีลักษณะเป็นรูพรุน และเป็นสีดำจากรูปและในบางครั้งจะมีลักษณะเป็นจุด ๆ สีดำที่บริเวณผิว ข้อบกพร่องแบบนี้เกิดขึ้นจะไม่สามารถขัดผิวให้ผิวมีความเงาที่สมบูรณ์ได้ และถ้าข้อบกพร่องลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้นมากหรือน้อยที่บริเวณผิวนั้นย่อมเป็นตัวที่จะแสดงถึงคุณภาพของผิว

จากรูปที่ 3-18 รูปโครงสร้างจุลภาคของภาพตัดจะมีรูบริเวณผิวเป็นลักษณะแบบเนสต์ของเดนไดรต์ โดยทั่วไปจะพบในรูปร่างที่มีลักษณะหลากหลาย เช่น รูปทรงกลม รูอากาศเล็ก ๆ และรูพรุนของเดนไดรต์ ในความเป็นจริงข้อบกพร่องดังกล่าวเกิดมาจากการหดตัวในบริเวณผิวจนทำให้มีรูพรุนนั่นเอง

- สาเหตุการเกิดข้อบกพร่อง เนื่องจากการหดตัวในบริเวณผิวจนทำให้มีรูพรุน หรือที่ผิวมีลักษณะเป็นเดนไดรติก แต่โอกาสของการเกิดข้อบกพร่องแบบนี้จะเกิดเนื่องมาจากความสะอาดตัวและการฝังในของสิ่งสกปรกหรือสิ่งเจือปน การใช้อุณหภูมิที่ต่ำ และระยะเวลาหลอมที่สั้น (Dieter, 1997 : 21)

- วิธีแก้ไข วัสดุต้องมีความสะอาดหลอมในเบ้าที่มีการป้องกันแก๊ส หรือเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการหล่อเพื่อที่จะช่วยไล่ก๊าซ (ในกรณีหล่อในบรรยากาศที่ควบคุม) (Dieter, 1997 : 22)

ข้อบกพร่องลักษณะการแตกหักของชิ้นงาน เนื่องจากรูพรุนของการหดตัว

- ลักษณะของข้อบกพร่อง การแตกหักของชิ้นงานส่วนมากจะแตกหัก หลังจากการตกแต่งผิว หรือขัดเงาครั้งสุดท้าย ลักษณะของข้อบกพร่องดังกล่าวที่เกิดขึ้นจะทำให้ชิ้นงานรับความเค้นได้ต่ำ มีความเปราะ และจะมีการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ

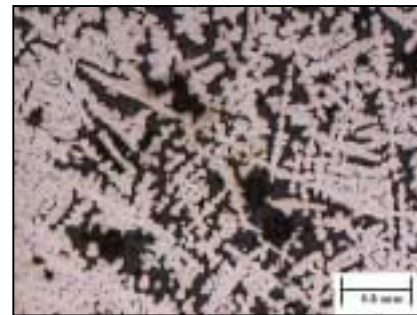
จากรูปที่ 3-19 แสดงข้อบกพร่องลักษณะการแตกหัก ซึ่งเป็นข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในบริเวณแคบ ๆ การแตกจะไม่ทำให้เกิดการเสียรูป หรือขาดหายของรูปร่างชิ้นงาน ถ้าตรวจสอบด้วยสายตาจากรูปที่ 3-20 เป็นโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่จะส่งผลทำให้เกิดข้อบกพร่องแบบแตกหักเพราะโลหะดังกล่าวเกิดการหดตัวจนทำให้เกิดการเป็นรูโดยที่รูที่เกิดจากการหดตัวมักจะมีโครงสร้างแบบเดนไดรต์ โดยทั่วไปมักจะพบตรงบริเวณที่มีความแตกต่างขนาด

- สาเหตุการเกิดข้อบกพร่อง โลหะที่หลอมเกิดการหดตัวขณะแข็งตัว และการหดของปริมาตร เนื่องจากสูญเสียความร้อนหรือเย็นตัวอย่างรวดเร็วเนื่องจากผนังเบ้าหล่อประณีตบาง (Dieter, 1991 : 75)

- การแก้ไข เปลี่ยนการออกแบบโดยการหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนขนาดหน้าตัดอย่างฉับพลัน เปลี่ยนขนาดรูปร่างเข้าชิ้นงานต้องไม่ยาวหรือเล็กเกินไป ใช้อุณหภูมิที่ถูกต้องโดยเฉพาะอุณหภูมิเบ้าให้ผลมากในการเกิดโพรงขณะที่ยุณหภูมิในโลหะมีอิทธิพลมากกับการไหลของโลหะ (Dieter, 1991 : 177)



รูปที่ 3-19 : แสดงข้อบกพร่องลักษณะการแตกหัก
เนื่องจากรูปทรงของการหดตัว



รูปที่ 3-20 : แสดงโครงสร้างจุลภาคที่จะส่งผลให้เกิด
ข้อบกพร่องลักษณะการแตกหัก (5X)

3.9.4.2 ข้อบกพร่องที่มีผลต่อคุณภาพของผิวและเนื่องมาจากแบบหล่อประณีต (Investment)

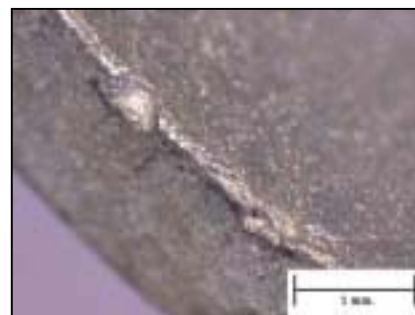
ผิวหยาบลักษณะคล้ายเม็ดทรายและมีครีบก

ข้อบกพร่องลักษณะผิวหยาบคล้ายเม็ดทรายและมีครีบก จะมีผลต่อคุณภาพผิว สาเหตุเนื่องมาจากแบบหล่อประณีต (Investment) ที่มีความแข็งแรงที่ไม่พอ

- ลักษณะของข้อบกพร่อง ข้อบกพร่องจะเกิดขึ้นทั่วไปในบริเวณผิวราบ ๆ จะมีลักษณะผิวที่หยาบคล้ายกับเม็ดทราย หรือในบางครั้งจะพบในลักษณะเป็นครีบก ทำให้ชิ้นงานมีรูปร่างและขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม (รูปที่ 3-21 และ 3-22)



รูปที่ 21 : แสดงข้อบกพร่องลักษณะผิวหยาบ
คล้ายเม็ดทราย



รูปที่ 22 : แสดงข้อบกพร่องลักษณะ
ครีบกที่ขอบ

- สาเหตุการเกิดข้อบกพร่อง เกิดจากการที่โลหะหลอมได้ไหลเข้าไปในรูพรุนของปูน (Investment) ผิวงานหล่อจะมีลักษณะหยาบ ถ้าปูนหล่อแตกเนื่องจากแรงดันน้ำโลหะมากงานหล่อจะเป็นครีบเนื่องจากน้ำโลหะซึมในรอยร้าวของแบบหล่อ ความเสียหายเกิดจากปูนหล่อที่มีแรงยึดตัวต่ำ และใช้แรงอัดของน้ำโลหะมากเกินไประหว่างการหลอมหรือเครื่องหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลางมีความเร็วรอบที่สูงเกินไป (Dieter, 1997 : 28)

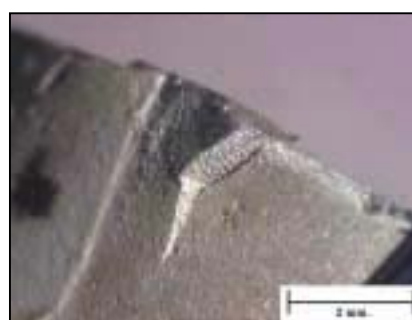
- การแก้ไข ขั้นตอนการผสมปูนพลาสติกควรใช้เวลาไม่เกิน 10 นาที และในช่วงขั้นตอนการผสมไม่ควรเกิน 6 นาที ขั้นตอนการอบเบ้าจะส่งผลต่อความแข็งแรงของเบ้า และจะต้องสามารถติดตามการทำงานของเตาได้ และต้องเพิ่มอุณหภูมิที่เหมาะสมและสม่ำเสมอ (Dieter, 1991 : 29)

ผิวหยาบและมีลักษณะคราบน้ำ (Water Marks)

- ลักษณะของข้อบกพร่อง ข้อบกพร่องนี้จะเป็นร่องรอยบนผิวหน้าของชิ้นงาน ทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานไม่เรียบ รอยคราบน้ำโดยมากจะเกิดขึ้นในแนวดิ่งจากด้านบนลงด้านล่าง และจะปรากฏได้ชัดมากเมื่อน้ำโลหะแทนที่ลงเต็มแบบหล่อ (รูปที่ 3-23 และ 3-24)



รูปที่ 3-23 : แสดงข้อบกพร่องลักษณะคราบน้ำ



รูปที่ 3-24 : แสดงข้อบกพร่องแบบรอยย่นที่ผิว

เนื่องจากการให้ความร้อนขณะอบเบ้าหล่อ

- สาเหตุการเกิดข้อบกพร่อง แนวโน้มการแยกตัวของผงปูนเมื่อมีการผสมกับน้ำ ถ้าหากการผสมถูกทิ้งไว้นานเป็นเวลาค่อนข้างนานก่อนการแข็งตัว การกวนจะป้องกันการแข็งตัว ถ้าการแยกตัวเกิดขึ้นน้ำที่รวมตัวบนผิวซีเมนต์จะปรากฏรอยขึ้นบนผิวชิ้นงาน (Dieter, 1997 : 32)

- การแก้ไข ผงปูนแต่ละรุ่นมีอายุการใช้งานต่างกัน ซึ่งรวมเวลาตั้งแต่ปูนสัมผัสกับน้ำจนถึงจุดแข็งตัวโดยเฉลี่ยใช้เวลา 10 นาที แต่เวลาจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและชนิดของน้ำ เพื่อป้องกันการรอยคราบน้ำ กรรมวิธีผสมปูน (การผสม ไล่ฟองอากาศ ไล่ปูนลงในเบ้า การสั่นสะเทือน) ต้องรีบให้เสร็จภายในเวลากำหนดทั้งหมดก่อนการแข็งตัว (Dieter, 1997 : 33)

รอยย่นที่บริเวณผิว เนื่องจากการให้ความร้อนที่รวดเร็วระหว่างขบวนการให้ความร้อนในการอบเบ้าหล่อ

- ลักษณะของข้อบกพร่อง บริเวณผิวที่ได้จากการหล่อ จะมีรอยย่นหรือลักษณะของข้อบกพร่องที่ลึกลงไป ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเล็ก ๆ และอยู่ผิวด้านบนด้านใดด้านหนึ่งของชิ้นงานเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 3- 24

- สาเหตุการเกิดข้อบกพร่อง การอบที่มีอุณหภูมิที่สูงและมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ทำให้น้ำระเหยออกไม่ทัน ในขณะที่ขี้ผึ้งหลอมเหลว ทำให้ขี้ผึ้งและน้ำเกิดการเดือดขึ้นส่งผลทำให้แบบหล่อประณีตเกิดเป็นโพรง (Dieter, 1997 : 34)

- วิธีแก้ไข ให้ความร้อนในการอบแบบหล่อประณีตอย่างสม่ำเสมอ และจะต้องกระจายทั่วทั้งแบบ หากลดอุณหภูมิจะต้องกระทำอย่างช้า ๆ (Dieter, 1997 : 34)

ผิวหน้าของชิ้นงานมีลักษณะเดนดริติก (Dendritic Surface) เนื่องจากการหดตัว และการทำปฏิกิริยาของแบบหล่อ (Investment)

- ลักษณะของข้อบกพร่อง ผิวหน้าของชิ้นงานจะมีลักษณะรูพรุนเนื่องจากการหดตัวทำให้เกิดเป็นลักษณะของข้อบกพร่องที่บริเวณผิวหน้าแบบเดนดริติก

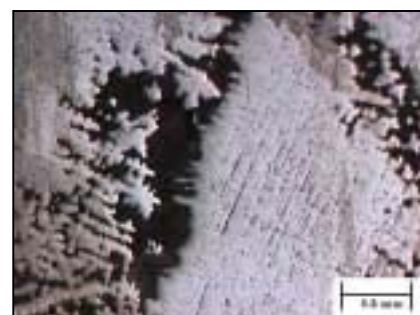
จากรูปที่ 3- 25 ข้อบกพร่องที่ผิวหน้าแบบเดนดริติก เกิดจากการที่มีแก๊สได้ผลึกน้ำโลหะที่หลอมเหลวบางส่วนในโลหะที่กำลังแข็งตัว ทำให้เกิดระยะช่องว่างระหว่างผิวของชิ้นงานและผิวของปูนพลาสเตอร์ หรืออาจกล่าวได้ว่าข้อบกพร่องดังกล่าว เกิดจากการหดตัวอย่างรวดเร็วของน้ำโลหะที่หลอมเหลวเป็นโลหะแข็ง

- สาเหตุการเกิดข้อบกพร่อง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูพรุนเป็นการชำระแบบเดนดริติกที่บริเวณผิว จะเกิดขึ้นเมื่อแก๊สเกิดขึ้นเนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโลหะเหลวกับปูน และแก๊สจะดันน้ำโลหะที่เหลวอยู่ออกไปจากผิวหน้าของโลหะที่แข็งตัวแล้วเป็นบางส่วน (Dieter, 1997 : 35)

- การแก้ไข ใช้โลหะที่สะอาดและถ้าโลหะสะอาดอย่าทำการหล่อโดยใช้บรรยากาศรีดิวซึ่งผสมสังกะสีแต่ไม่ควรเกิน 2 % รักษาอุณหภูมิแบบและอุณหภูมิหลอมอยู่ภายในกำหนด (Dieter, 1997 : 35)



รูปที่ 3-25 : แสดงข้อบกพร่องที่ผิวหน้าแบบเดนดริติก



รูปที่ 3-26 : แสดงโครงสร้างจุลภาคของข้อบกพร่องแบบเดนดริติก (5X)

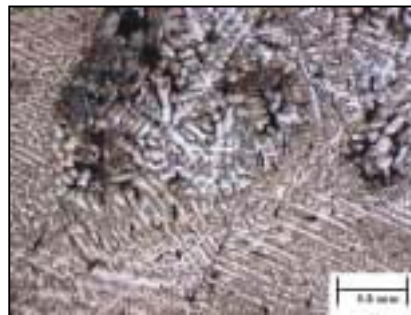
3.9.4.3 ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเนื่องจากสิ่งแปลกปลอมฝังใน (Inclusion) เนื่องจากสิ่งแปลกปลอมจากภายนอก

สิ่งแปลกปลอมฝังใน สามารถแยกได้ 2 ลักษณะ (3-27 และ 3.28)

- สิ่งแปลกปลอมขนาดเล็ก ๆ ที่เป็นโลหะที่ไม่ได้เกิดมาจากส่วนผสม แต่เนื่องมาจากสาเหตุของสิ่งแปลกปลอมเล็ก ๆ ภายนอก เช่น ชิ้นส่วนของปูนทำแบบหล่อ (Investment Particles)
- สิ่งแปลกปลอมที่เกิดจากการฝังในเนื้อของโลหะและอโลหะ ซึ่งเกิดจากส่วนผสม ซึ่งจะมีการแยกตัวของสิ่งแปลกปลอม ข้อบกพร่องนี้จะเข้าไปในลักษณะของสิ่งแปลกปลอมเนื่องมาจากธาตุผสม



รูปที่ 3-27 : แสดงข้อบกพร่องลักษณะรูพรุนและสิ่งแปลกปลอมฝังใน



รูปที่ 3-28 : แสดงโครงสร้างจุลภาคของข้อบกพร่องลักษณะรูพรุนและสิ่งแปลกปลอมฝังใน (5X)

ข้อบกพร่องลักษณะรูพรุนและสิ่งแปลกปลอมฝังในเนื่องมาจากแบบหล่อ

- ลักษณะของข้อบกพร่อง ข้อบกพร่องมีลักษณะรูพรุนและสิ่งแปลกปลอมฝังในเนื้อสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า บริเวณผิวของชิ้นงานหล่อ บางครั้งไม่สามารถมองเห็นหรือพบสิ่งบกพร่องลักษณะนี้จนกว่าจะมีการขัดตกแต่งและขัดเงา ข้อบกพร่องลักษณะดังกล่าวจะกำจัดออกได้ด้วยวิธีการเจียรนัยหรือขัดตกแต่ง อย่างไรก็ตามข้อบกพร่องจะมากหรือน้อยย่อมส่งผลต่อคุณภาพของผิวและการกำจัดขึ้นอยู่กับการผลิต ข้อบกพร่องและสิ่งแปลกปลอมฝังในเนื้อจะพบกระจายอยู่ทั่วไปบนผิว รูพรุนจะมีลักษณะเป็นรูที่ว่างหรืออาจมีสิ่งแปลกปลอมที่เป็นโลหะฝังอยู่เต็มรูพรุน สาเหตุที่ทำให้รูพรุนมีลักษณะรูที่ว่างเนื่องจากสิ่งแปลกปลอมฝังในจะหลุดออกหรือถูกดึงออกด้วยเหตุต่าง ๆ ตามสภาพของผิวที่ผ่านการตกแต่งผิว เช่นการเจียรนัยการขัดเงา รูพรุนทั้งหมดสามารถมองเห็นชัดเจนบริเวณผิว และทำให้ผิวมีลักษณะต่าง ๆ ที่ไม่เหมาะสม และในบางครั้งข้อบกพร่องไม่สามารถมองเห็นได้ชัดเนื่องมาจากข้อบกพร่องดังกล่าวถูกปกปิดด้วยผิว



รูปที่ 3-29 : แสดงข้อบกพร่องของสิ่งบกพร่องแบบ
ผิวเปิดและปิดบางส่วน (5X)



รูปที่ 3-30 : แสดงข้อบกพร่องของสิ่งบกพร่อง
แบบผิวเปิดและปิดบางส่วน (5X)

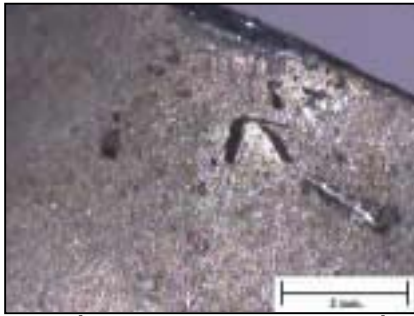
รูปที่ 3-29 และ 3-30 แสดงโครงสร้างจุลภาคของข้อบกพร่องลักษณะรูพรุนและสิ่งแปลกปลอมฝังใน โดยมากจะมีขนาดเล็ก จะมีปริมาตรของข้อบกพร่องภายในผิวและสามารถมองเห็นได้บางส่วนบริเวณผิว

- สาเหตุของการเกิดข้อบกพร่อง จากการไหลของน้ำโลหะที่เข้าไปในแบบซึ่งจะทำให้ส่วนต่าง ๆ ของแบบหล่อเกิดการหักและไม่ติดกับแบบหล่อ ทำให้เกิดเป็นช่องว่างที่แบบ และส่วนที่หักจากแบบหล่อก็ไปรวมกับโลหะที่กำลังเหลวอยู่ และเมื่อแข็งตัวทำให้เศษของแบบหล่อฝังอยู่ที่ชิ้นงาน ซึ่งพอสรุปสาเหตุของที่มาของข้อบกพร่อง คือ แบบหล่อไม่แข็งแรง ซึ่งเกิดจาก ปูนเสื่อมคุณภาพ อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับปูน และการเตรียมดินเทียนที่ไม่ดี เช่น ขอบมีความคม ลักษณะรูปร่างที่แปลกของหุ่นขี้ผึ้ง และทางเดินน้ำโลหะ

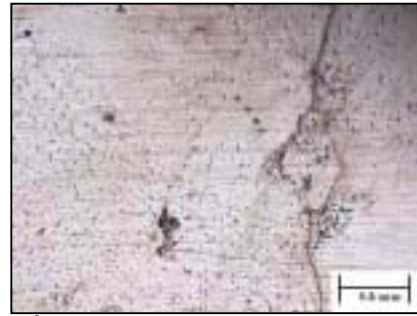
- วิธีแก้ไข

สามารถแก้ไขได้ดังนี้ (Dieter, 1997 : 38)

- ควบคุมเวลาในขั้นตอนผสมปูน
- ต้องมีการควบคุมการออกแบบในการติดตั้งเทียน ความคมของมุมต่าง ๆ รูปร่างของหุ่นขี้ผึ้ง
- ขบวนการหล่อโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางต้องไม่ใช้ความเร็วที่สูงเกินไป
- ข้อบกพร่องที่ผิวลักษณะคล้ายรอยเท้านก (Crows foot) เนื่องจากการฝังตัวของสิ่งแปลกปลอมหรือสารมลทิน (รูปที่ 3-31)
- ลักษณะของข้อบกพร่อง การเกิดข้อบกพร่องชนิดนี้ส่งผลทำให้รูพรุน รูพรุนดังกล่าวจะพบในขั้นตอนสุดท้าย คือการตกแต่งผิว และการขัดเงา



รูปที่ 3-31 : แสดงข้อบกพร่องที่ผิวลักษณะคล้าย รอยเท้านก (Crows foot)



รูปที่ 3-32 : แสดงโครงสร้างจุลภาคของ ข้อบกพร่องที่ผิวลักษณะคล้ายรอยเท้านก

จากรูปที่ 3-32 เป็นภาพโครงสร้างจุลภาคของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการการฝังของสิ่งแปลกปลอมหรือสารมลทิน ลักษณะการฝังนี้จะรูปร่างแบบเยื้องบาง ๆ หรือฝังอยู่ในลักษณะของแผ่นฟิล์มบาง

- สาเหตุการเกิดข้อบกพร่อง ความไม่สะอาดของวัสดุ (Dieter, 1997 : 39)
- การแก้ไข หลอมโลหะในที่ควบคุมบรรยากาศต้องมีการทำความสะอาดวัสดุก่อนหลอม (Dieter, 1997 : 40)

ข้อบกพร่องที่ผิวลักษณะคล้ายดอกกะหล่ำปลี (Cauliflower) เนื่องจากสาเหตุของการเกิดสแลก (Slag) หรือสิ่งสกปรกฝังในเนื้อ

- ลักษณะของข้อบกพร่อง บกพร่องที่ผิวลักษณะคล้ายดอกกะหล่ำปลี (Cauliflower) เนื่องจากสาเหตุมาจากสแลกที่หลอมเหลวหรือ ฟลักซ์ หรือเศษเบ้าหล่อ ได้ฝังตัวในขณะที่โลหะกำลังหลอมเหลวอยู่ สแลกที่บริเวณผิวที่เกิดจากแบบหล่อสามารถกำจัดออกได้โดยการทำทำความสะอาดขึ้นงานหล่อ (Dieter, 1991 : 185) (รูปที่ 3-33 และ 3-34)



รูปที่ 33 : แสดงข้อบกพร่องที่ผิวลักษณะคล้าย ดอกกะหล่ำปลี (Cauliflower) เนื่องจากสาเหตุของการเกิดสแลกและการหดตัว



รูปที่ 34 : แสดงข้อบกพร่องที่ผิวลักษณะคล้าย ดอกกะหล่ำปลี (Cauliflower) เนื่องจากสาเหตุของการเกิดสแลก

- สาเหตุการเกิดข้อบกพร่อง เป้าหลอมไม่สะอาด วัสดุไม่สะอาด ดันเทียนมีความคมแบบหล่อไม่แข็งแรง (Dieter, 1997 : 39)

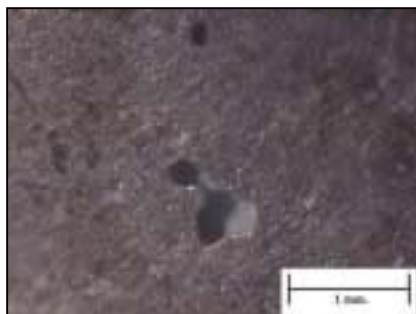
- วิธีแก้ไข ทำความสะอาดวัสดุที่จะหลอม และเป่าออกแบบดันเทียนให้เหมาะสม (Dieter, 1997 : 40)

โพรง เนื่องจากสิ่งแปลกปลอมฝังใน ระหว่างสิ่งแปลกปลอมที่เป็นสแลกผสมกับโพรง

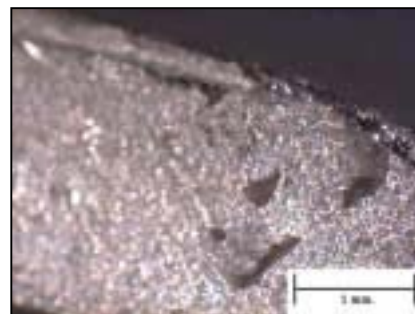
- ลักษณะของข้อบกพร่อง ข้อบกพร่องที่บริเวณผิวขนาดใหญ่ส่วนมากจะพบในลักษณะโพรง และกระจายกระจายอย่างสม่ำเสมอ ข้อบกพร่องแบบโพรงที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งมีรูปร่างต่าง ๆ ที่กระจายกระจายส่วนมากจะเกิดจากขอบของการเกิดข้อบกพร่องแบบเดนดริติก ซึ่งถือว่าเป็นสาเหตุอย่างหนึ่งของการเกิดข้อบกพร่องแบบโพรงได้

- สาเหตุของการเกิดข้อบกพร่อง เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำโลหะกับปูน ความไม่สะอาดของวัสดุ เป้าหลอมไม่สะอาด ดันเทียนมีความคม แบบหล่อไม่แข็งแรง (Dieter, 1997 : 184)

- วิธีแก้ไข ทำความสะอาดวัสดุที่จะหลอมและเป่าออกแบบดันเทียนให้เหมาะสม (Dieter, 1997 : 184)



รูปที่ 3-35 : แสดงข้อบกพร่องแบบโพรง

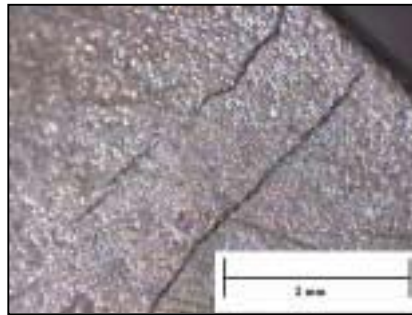
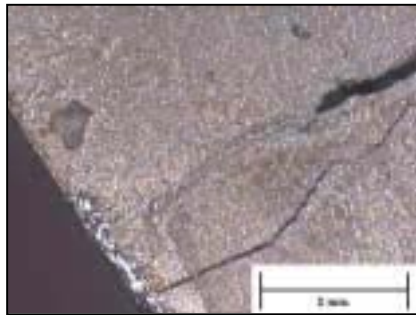


รูปที่ 3-36 : แสดงโพรงเนื่องจากเดนดริติก

3.9.4.4 ข้อบกพร่องที่เกิดเนื่องจากส่วนผสมของธาตุผสม หรือสารมลทิน

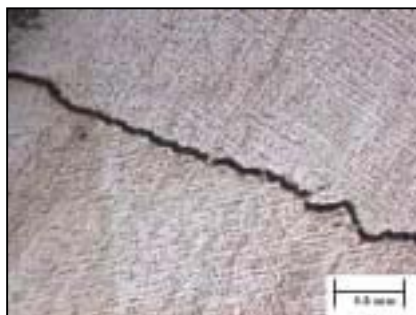
รอยร้าว จากการแยกตัวของธาตุผสมหรือสารมลทิน

ลักษณะของข้อบกพร่อง ชิ้นงานจะแตกระหว่างเอาชิ้นงานออกจากแบบหล่อ หรือหลังจากเอาออกจากแบบหล่อแล้ว เนื่องจากความเค้นและการเปลี่ยนรูป จากการตรวจพบว่าจะมีรอยร้าวในลักษณะเส้นตรง และเป็นเส้นของผิวที่ขรุขระผ่านส่วนต่าง ๆ ของชิ้นงาน เส้นของผิวที่ขรุขระผ่านส่วนต่าง ๆ ของชิ้นงานซึ่งถือได้ว่าเป็นข้อบกพร่องเช่นกัน คือ ถ้าเกิดขึ้นมากและความถี่ในการเกิดสูง ซึ่งผลดังกล่าวจะเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของชิ้นงาน (รูปที่ 3-37 และ 3-38)



รูปที่ 3-37 : แสดงรอยร้าวของชิ้นงานเนื่องจากการแยกตัวของธาตุผสมหรือสารมลทิน

ในชิ้นงานที่มีรอยร้าวจะเกิดขึ้นบริเวณช่องแคบ จนส่งผลทำให้บริเวณเกิดการแตกของชิ้นงานในลักษณะเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 3-38 และการขรุขระของผิวจากการแยกตัวของธาตุผสมหรือสารมลทิน ซึ่งส่งผลต่อรอยที่ผิวที่อยู่ในลักษณะเส้นแสดงในรูปที่ 3-39 ซึ่งการตรวจสอบวิธีนี้สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า รอยร้าวหรือแตกที่เกิดขึ้นในลักษณะที่สม่ำเสมอแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานนั้นมีความเปราะ (Dieter, 1997 : 49)

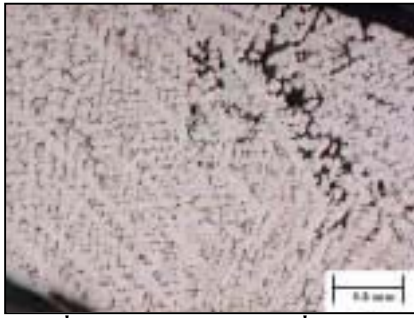


รูปที่ 3-38 : แสดงการแตก เนื่องจากรอยร้าวในลักษณะเส้นตรง

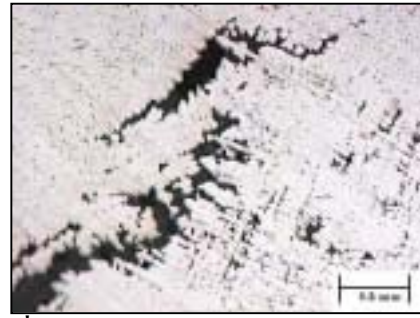


รูปที่ 3-39 : แสดงผิวที่ขรุขระในลักษณะที่เป็นเส้น

ในการตรวจสอบรอยแตกภายในบางครั้งไม่สามารถมองเห็นได้เนื่องจากการแตกลักษณะตามเส้นกั้นของเกรน ซึ่งต้องใช้กำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์ ที่มีกำลังขยายที่สูง ขอบกพร่องที่เกิดตามเส้นกั้นขอบเกรนนี้จะมีลักษณะสีเทาหรือสีหมอง ๆ



รูปที่ 3-40 : ข้อบกพร่องที่เกิดตามเส้นชั้นขอบเกรน



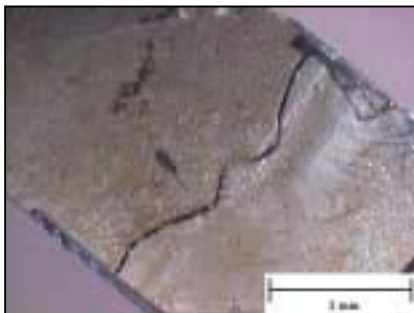
รูปที่ 3-41 : การแยกตัวของธาตุผสมหรือ สารมลทิน

รูปที่ 3-40 และ 3-41 เป็นรูปที่แสดงโครงสร้างจุลภาคซึ่งปรากฏให้เห็นสิ่งที่อยู่ภายในส่วนผสมเงินสเตอร์ลิง 925 ซึ่งจะมี 2 แบบ คือ เข้าไปทำให้เกิดเกรนที่หยาบ และจะทำให้เกิดการแยกตัวของธาตุผสมหรือสารมลทิน (Dieter, 1997: 188-189)

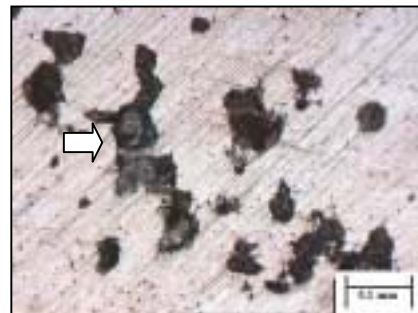
การแตก จากการฝังตัวของสารมลทิน เนื่องจากแบบหล่อประณีต

- ลักษณะของข้อบกพร่อง การแตกของชิ้นงานส่วนใดส่วนหนึ่ง หรือด้านใดด้านหนึ่ง ซึ่งอธิบายถึงการนำงานออกจากเบ้าหล่อ ข้อบกพร่องแบบการแตกเป็นการอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงภายนอก การแตกที่ผิวและแตกที่ส่วนต่าง ๆ ซึ่งจะทำให้เกิดรอยขรุขระ การแตกจะมีผลเนื่องมาจากการเย็นหลังการหล่อ หรือระหว่างการแกะชิ้นงานออกจากเบ้าหล่อ นี้ (Dieter, 1997 : 53-54)

ข้อบกพร่องแบบรอยแข็งเฉพาะจุด (Hard Spots) เนื่องจากสิ่งแปลกปลอมฝังในของเกรนที่หยาบ และความไม่บริสุทธิ์ของวัสดุ (รูปที่ 3-42 และ 3-43)



รูปที่ 3-42 : แสดงการแตกของชิ้นงาน



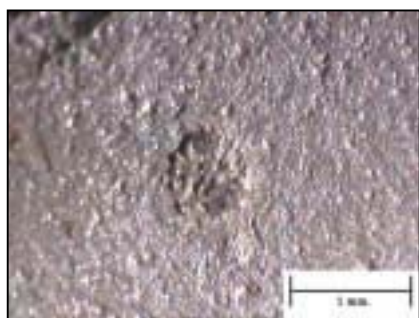
รูปที่ 3-43 : สารมลทินแทรกตัวในชิ้นงาน จากแบบหล่อ

- ลักษณะของข้อบกพร่อง รอยแข็งเป็นจุดบนผิวหน้าชิ้นงานสามารถทำให้หมดได้ ในการตกแต่งผิวหรือขัดเงาของชิ้นงาน การตรวจด้วยสายตาสามารถพบได้เพราะข้อบกพร่องดังกล่าวจะถูกเปิดเผย ในลักษณะสิ่งแปลกปลอมสีน้ำตาลอ่อนจากรูปที่ 3-44 และ 3-45 แสดงลักษณะสิ่งแปลก

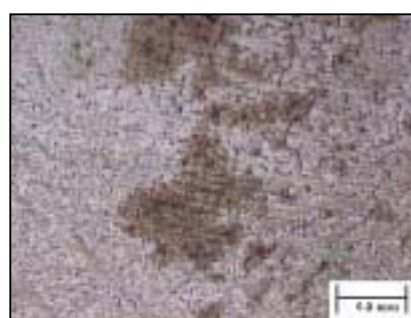
ปลอม ที่มีความแตกต่างกัน บางครั้งอาจจะรวมกับข้อบกพร่องชนิดอื่น เช่น ข้อบกพร่องแบบเนสต์เล็ก ๆ จะส่งผลต่อความแข็งที่ผิวด้วย

- สาเหตุของการเกิดข้อบกพร่อง การเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำโลหะกับปูน ความไม่สะอาดของวัสดุ เบ้าหลอมไม่สะอาด ดันเทียนมีความคม แบบหล่อไม่แข็งแรง (Dieter, 1997 : 55)

- วิธีแก้ไขทำความสะอาดวัสดุที่จะหลอมและเบ้า ออกแบบดันเทียนให้เหมาะสม (Dieter, 1997 : 55)



รูปที่ 3-44 : แสดงลักษณะสิ่งแปลกปลอมฝังใน
ซึ่งส่งผลต่อความแข็งแบบจุด



รูปที่ 3-45 : แสดงโครงสร้างจุลภาคของ
รอยแข็งเฉพาะจุด

3.10 สรุปผลการวิจัยการหล่อเหรียญ

ในการศึกษาข้อบกพร่องในงานหล่อโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง หล่อโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 สามารถสรุปได้ดังนี้

- ชิ้นงานหล่อเกิดข้อบกพร่องบริเวณผิวมีลักษณะของโพรงอากาศ
- ข้อบกพร่องที่มีผลต่อคุณภาพของผิวและเนื่องมาจากแบบหล่อประณีต (Investment)
- ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเนื่องจากสิ่งแปลกปลอมฝังใน (Inclusion) เนื่องจากสิ่งแปลกปลอมภายนอก
- ข้อบกพร่องที่เกิดเนื่องจากส่วนผสมของธาตุผสม หรือสารมลทิน

3.10.1 ปัจจัยต่าง ๆ ในงานหล่อโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ที่ส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการหล่อขึ้นรูป พบว่า

- มุมของทางเดินน้ำโลหะที่ระดับต่างกันส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยความหนาแน่น ของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05
- ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบที่ระดับต่างกันส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05
- ระดับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหรียญหนีศูนย์กลาง ที่แตกต่างกันส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

3.10.2 ปัจจัยร่วมต่าง ๆ ในงานหล่อโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ที่ส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการหล่อขึ้นรูป คือ

- ปัจจัยร่วมระหว่าง มุมของทางเดินน้ำโลหะที่ระดับต่างกันกับค่าความเร่ง ที่มีผลต่อความเร็วรอบที่ระดับต่างกัน ส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

- ปัจจัยร่วมระหว่าง มุมของทางเดินน้ำโลหะที่ระดับต่างกันกับระดับอุณหภูมิหลอมโลหะ ก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่แตกต่างกัน ส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

- ปัจจัยร่วมระหว่าง ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบที่ระดับต่างกันกับระดับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่แตกต่างกัน ส่งค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

- ปัจจัยร่วมระหว่าง ปัจจัยทั้งหมดคือ มุมของทางเดินน้ำโลหะที่ระดับต่างกัน ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบที่ระดับต่างกัน และระดับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่แตกต่างกัน ส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

3.10.3 ปัจจัยต่าง ๆ ในงานหล่อโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ที่ส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยปริมาตรของชิ้นงานหลังการหล่อขึ้นรูป พบว่า

- มุมของทางเดินน้ำโลหะที่ระดับต่างกันส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยปริมาตรของชิ้นงาน ที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

- ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบที่ระดับต่างกันส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยปริมาตรของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

- ระดับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ที่แตกต่างกันส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยปริมาตรของชิ้นงานที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

3.10.4 ปัจจัยร่วมต่าง ๆ ในงานหล่อโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยปริมาตรของชิ้นงานหลังการหล่อขึ้นรูป พบว่า

- ปัจจัยร่วมระหว่าง มุมของทางเดินน้ำโลหะที่ระดับต่างกันกับค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบที่ระดับต่างกัน ส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยปริมาตรของชิ้นงานที่แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

- ปัจจัยร่วมระหว่าง มุมของทางเดินน้ำโลหะที่ระดับต่างกันกับระดับอุณหภูมิหลอมโลหะ ก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่แตกต่างกัน ส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยปริมาตรของชิ้นงานที่แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

- ปัจจัยร่วมระหว่าง ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบที่ระดับต่างกับระดับอุณหภูมิ หลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่แตกต่างกัน ส่งผลกระทบบค่าเฉลี่ยปริมาตรของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

- ปัจจัยร่วมระหว่าง ปัจจัยทั้งหมดคือ มุมของทางเดินน้ำโลหะที่ระดับต่างกับ ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบที่ระดับต่างกับ และระดับอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่แตกต่างกัน ส่งผลกระทบบค่าเฉลี่ยปริมาตรของชิ้นงานที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

3.10.5 จากค่าความหนาแน่นและค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายในของชิ้นงาน พบว่าที่ระดับมุมของทางเดินน้ำโลหะ เท่ากับ 65° ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ เท่ากับ 10G และอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เท่ากับ 1050°C จึงเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด

3.10.6 จากค่าปริมาตรและค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่องภายนอกของชิ้นงาน พบว่าที่ระดับมุมของทางเดินน้ำโลหะ เท่ากับ 25° ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ เท่ากับ 5G และอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เท่ากับ 950°C จะเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดถ้าพิจารณาจากค่าเฉลี่ยจำนวนการเกิดข้อบกพร่อง และที่ระดับมุมของทางเดินน้ำโลหะ เท่ากับ 25° ค่าความเร่งที่มีผลต่อความเร็วรอบ เท่ากับ 15G และอุณหภูมิหลอมโลหะก่อนทำการหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เท่ากับ 950°C จึงเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของปริมาตร

3.10.7 จากการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายของเกรน ขนาดของเกรน โตสุด เท่ากับ $77.9864\ \mu\text{m}$ และขนาดของเกรน เล็กสุดเท่ากับ $53.7907\ \mu\text{m}$

3.11 ข้อเสนอแนะ

ในการทดลองของผู้วิจัยได้ศึกษาการหล่อโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่บรรยากาศเป็นสูญญากาศและใช้แบบหล่อชนิดแบบหล่อประณีต มีข้อเสนอแนะดังนี้

- ควรมีการทดลองการหล่อโลหะด้วยวิธีหล่อดูด
- ควรมีการทดลองการหล่อโลหะด้วยวิธีหล่อเหวี่ยงหนีศูนย์กลางโดยไม่ต้องควบคุมบรรยากาศ
- ควรมีการทดลองเพื่อศึกษาการผสมระหว่างปูนพลาสเตอร์กับน้ำที่อัตราส่วนต่าง ๆ
- ควรมีการทดลองเพื่อศึกษาการอบปูนพลาสเตอร์ด้วยเตาไฟฟ้า และอบด้วยไอน้ำ
- ควรมีการออกแบบแบบหล่อที่มีรูล้น

3.12 บรรณานุกรม

- เทพนรินทร์ ประพันธ์พัฒน์. พื้นฐานงานหล่อ. ปทุมธานี : บริษัทสกายบุ๊ก จำกัด, 2538
- บัณฑิต ใจชื่น. การออกแบบงานหล่อ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2526.
- ไพบูลย์ ชูพึ่งอาตม์. ข้อบกพร่องที่เกิดกับงานหล่อ และการแก้ไข. กรุงเทพมหานคร : สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ, 2533.
- มนัส สติรจินดา. วิศวกรรมหล่อเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- สุรพล อุปลิสสกุล. สถิติการวางแผนการทดลอง. กรุงเทพมหานคร : สหมิตรออฟเซต, 2536.
- หริส สุตะบุตร, เคนยิ จิยิอิวา. หล่อโลหะ. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์การพิมพ์ดวงกมล, 2533.
- Aldo M. Reti. "Understanding Sterling Silver." The Santa Fe Symposium on Jewelry 1997: 339-356.
- C.W. Ammen. Lost wax investment. United states of America : 1972.
- Des Plaines, Analysis of Casting Defects. American Foundrymen 's society training and Research Institute, 1966.
- Des Plaines, Casting Defects Handbook. American Foundrymen 's society training and Research Institute, 1966.
- Dieter Ott. "Defect in Jewelry a New Version of and Old Problem." The Santa Fe Symposium on Jewelry 1991 : 171-197.
- Dieter Ott. "Metallurgical and Chemical Consideration in Jewelry Casting." The Santa Fe Symposium on Jewelry 1987 : 223-244.
- Douglas C. Montgomery. Design and Analysis of Experiment. Third Edition. New York : John Willey and Sons, 1991
- Larry Dimond. "Casting Defects From Model to Finished Product." The Santa Fe Symposium on Jewelry 1987 : 149-201.
- Paul Finelt. "Basic Metallurgy." The Santa Fe Symposium on Jewelry 1987 : 29-55.
- P.R. Beeley. Foundry Technology. Butterworths, London : 1972.
- Richard Atkin. "Trouble Shooting Platinum Casting Defects and Difficulties." The Santa Fe Symposium on Jewelry 1996 : 327-337.

Richard V. Carrano. "Sterling Silver Casting Problem." The Santa Fe Symposium on Jewelry 1990 : 91-128.

Sylvai J. Gerin. Casting metal technogy. American Foundrymen 's socity training and Research Institute, 1972.

Timo J. Santala. "An Overview of Casting Technologies Currently used in Industry and Emerging Technologies." The Santa Fe Symposium on Jewelry 1995 :213-227.

V.E. Vergara, N.V. Salazar. "Centifuged Casting of Copper Alloy Using Ceramic Molds" Journal of Materials Proces

บทที่ 4

การปรับปรุงสมบัติของโลหะเงินสเตอร์ลิงด้วยกรรมวิธีทางความร้อน

จากวิธีการวิจัยที่กำหนด ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ได้ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางเคมี โดยกองเคมี กรมวิทยาศาสตร์บริการ และนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับค่าการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล เช่น ความแข็ง ความต้านแรงดึง ความยืดและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบสภาพหล่อขึ้นรูปและสภาพผ่านกรรมวิธีทางความร้อนต่างๆ เพื่อศึกษาวิเคราะห์หาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนดังที่กล่าวไว้แล้วในวัตถุประสงค์ของการวิจัย กรรมวิธีทางความร้อนที่ดำเนินการศึกษาวิจัยประกอบด้วยการอบเนื้อเดียว การอบเพิ่มความแข็งและการอบอ่อน

4.1 อัตราส่วนผสมทางเคมีของชิ้นทดสอบโลหะเงินสเตอร์ลิง

จากผลการวิเคราะห์ธาตุเจือของโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพหล่อขึ้นรูปดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ได้อัตราส่วนผสมทางเคมีของชิ้นทดสอบสำหรับการศึกษาและวิเคราะห์สมบัติทางกลของโลหะเงินสเตอร์ลิงจากกรรมวิธีทางความร้อนดังต่อไปนี้

1. 0.05% Si 0.75%Zn 5.8%Cu 93.4%Ag
2. 0.09% Si 1.3%Zn 5.9%Cu 92.7%Ag
3. 0.1% Si 1.0%Zn 5.1%Cu 93.8%Ag
4. 0.14% Si 1.6%Zn 4.8%Cu 93.4%Ag

4.2 ผลการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกลโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพหล่อขึ้นรูป

โลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพหล่อขึ้นรูป เป็นโลหะที่อ่อน การทดสอบสมบัติทางกลที่นิยมใช้กันเป็นการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์สโดยเลือกใช้แรงกด 9.81 N(HV1) ซึ่งสามารถทดสอบความแข็งเปรียบเทียบโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพต่างๆ ที่ได้กำหนดในวิธีการวิจัย สำหรับในกรณีของการทดสอบความต้านแรงดึงและความยืด เนื่องจากโลหะเงินสเตอร์ลิงมีความยืดตัวสูง การทดสอบจึงเลือกใช้เครื่องทดสอบความต้านแรงดึงที่ใช้สำหรับทดสอบพลาสติกและโลหะอ่อนที่มีความยืดตัวสูงและสามารถวัดแรงดึงได้สูงสุด 10 kN ผลจากการวิเคราะห์ทดสอบความต้านแรงดึงของโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพหล่อขึ้นรูปที่อัตราส่วนผสมต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-1

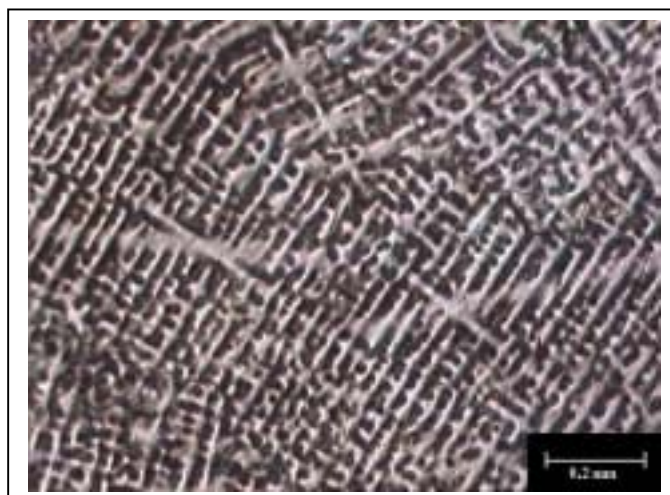
จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพหล่อขึ้นรูป พบว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิงทุกอัตราส่วนผสม มีลักษณะเป็นโครงสร้างเดนไดรต์ ดังแสดงในรูป

ที่ 4-1 ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่แข็งแรงและไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้งาน เนื่องจากภายในแกนเดนไดรต์และช่องว่างระหว่างแกนเดนไดรต์มีส่วนผสมของโลหะเงินสเตอร์ลิงไม่สม่ำเสมอ

ตารางที่ 4-1 : ผลการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกลของโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพหล่อขึ้นรูป

อัตราส่วนผสม	ความแข็ง (HV1)			ความต้านแรงดึง(MPa)			ความยืด(%)		
	ทดสอบ 3 ชิ้น	เฉลี่ย	SD	ทดสอบ 3 ชิ้น	เฉลี่ย	SD	ทดสอบ 3 ชิ้น	เฉลี่ย	SD
0.05%Si 0.75%Zn 5.8%Cu 93.4%Ag	68.1 64.2 64.2	65.5	2.25	214 213 202	210	6.66	39 42 32	38	5.13
0.09% Si 1.3%Zn 5.9%Cu 92.7%Ag	64.2 64.2 60.6	63.0	2.08	208 207 194	203	7.81	53 58 53	55	2.88
0.1% Si 1.0%Zn 5.1%Cu 93.8%Ag	77.2 77.2 72.4	75.6	2.77	209 209 212	210	1.73	48 48 48	48	0
0.14% Si 1.6%Zn 4.8%Cu 93.4%Ag	72.4 77.2 72.4	74	2.77	218 218 214	217	2.31	53 51 52	52	1

หมายเหตุ SD = ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน



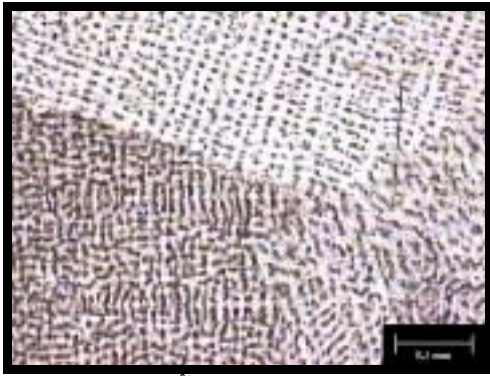
รูปที่ 4-1 : โครงสร้างเดนไดรต์ของขึ้นทดสอบที่ได้จากการหล่อขึ้นรูป

4.3 ผลการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกลโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพอบเนื้อเดียว

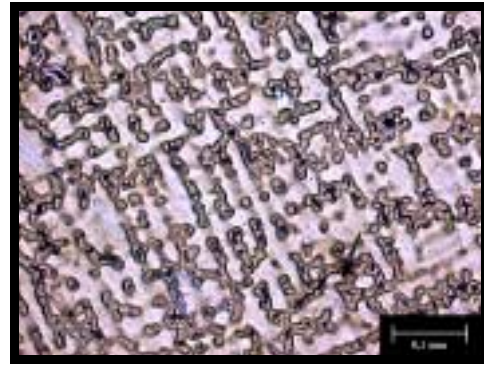
เมื่อนำขึ้นทดสอบที่ได้จากกรรมวิธีการหล่อขึ้นรูปต่างๆ อัตราส่วนผสมดังที่ได้กล่าวแล้วข้างต้นมาผ่านการอบเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 780°C ด้วยระยะเวลา 5, 10 และ 15 นาทีเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของขึ้นทดสอบ ปรากฏว่าโครงสร้างจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยและยังไม่สามารถจัดโครงสร้างเดนไดรต์ที่เกิดขึ้นจากสภาพหล่อขึ้นรูปให้หมดไปได้ ผู้วิจัยจึงขยายระยะเวลาที่ใช้ในการอบเพิ่มขึ้นอีกเป็นเวลา 20, 35, 50, 65, 80 และ 95 นาที เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของขึ้นทดสอบโลหะเงินสเตอร์ลิง ผลจากการศึกษาวิจัยสามารถแบ่งออกได้ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ ดังนี้

4.3.1 0.05%Si 0.75%Zn 5.8%Cu 93.4%Ag หลังจากขึ้นทดสอบผ่านการอบเนื้อเดียวด้วยระยะเวลาต่างๆ ตามสภาวะดังที่ได้กำหนด เมื่อตรวจสอบดูโครงสร้างจุลภาคของขึ้นทดสอบหลังจากกัดด้วยกรด โครงสร้างเดนไดรต์ที่เกิดขึ้นในขึ้นทดสอบสภาพหล่อขึ้นรูปค่อยๆ ถูกจัดให้หมดไปจนไม่ปรากฏให้เห็นและโครงสร้างของโลหะเริ่มเกิดการก่อตัวเป็นเกรนเกิดขึ้น จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 4-2 พบว่าโลหะเงินสเตอร์ลิง 0.05% Si 0.75%Zn 5.8%Cu 93.4%Ag มีการก่อตัวเป็นเกรนที่สมบูรณ์เต็มที่เมื่อระยะเวลาผ่านไปประมาณ 65 นาทีดังแสดงในรูปที่ 4-2 จ) ถ้าหากทำการอบต่อไปอีกเกรนที่ก่อตัวจากการอบจะขยายใหญ่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4-2 ฉ)

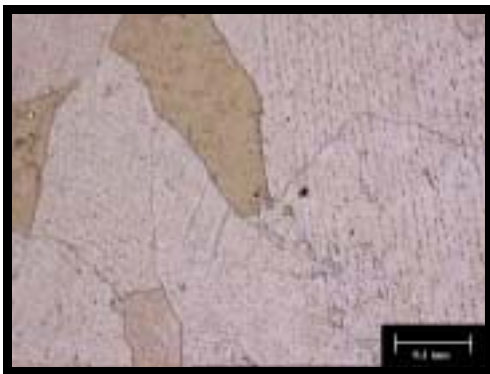
จากการวิเคราะห์ทดสอบค่าความแข็งแรง ความต้านแรงดึงและความยืดของขึ้นทดสอบพบว่าค่าความแข็งแรงและความต้านแรงดึงของขึ้นทดสอบมีค่าลดต่ำลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4-3 และรูปที่ 4-4 เนื่องจากโครงสร้างหรือส่วนผสมของธาตุเจือต่างๆ ละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันในสภาวะสารละลายของแข็งอิมตัวยิ่งยวด และโครงสร้างภายในมีความสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น จากรูปที่ 4-3



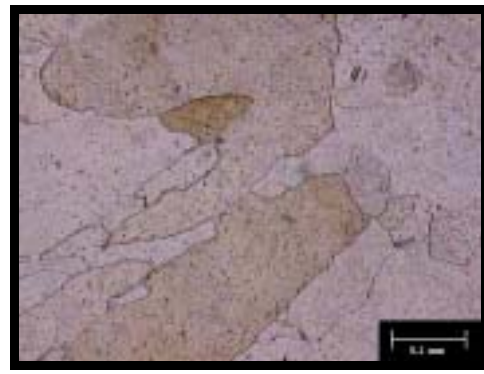
ก) สภาพหล่อขึ้นรูป กำลังขยาย 10x



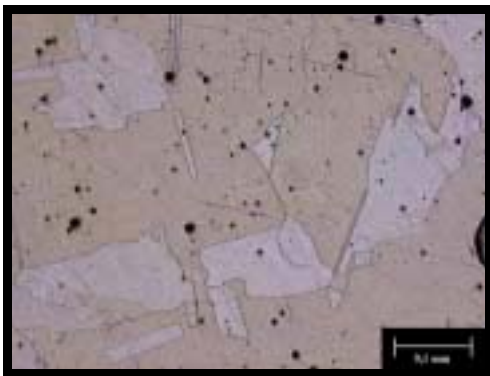
ข) อบที่อุณหภูมิ 780°C เป็นเวลา 15 นาที
กำลังขยาย 10x



ค) อบที่อุณหภูมิ 780°C เป็นเวลา 20 นาที
กำลังขยาย 10x



ง) อบที่อุณหภูมิ 780°C เป็นเวลา 50 นาที
กำลังขยาย 10x



จ) อบที่อุณหภูมิ 780°C เป็นเวลา 65 นาที
กำลังขยาย 10x

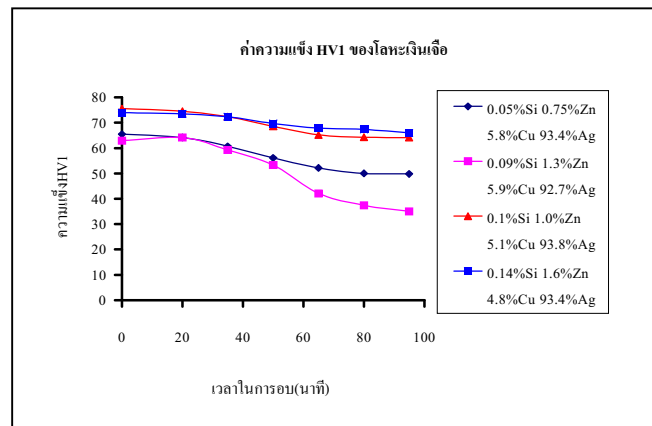


ฉ) อบที่อุณหภูมิ 780°C เป็นเวลา 95 นาที
กำลังขยาย 10x

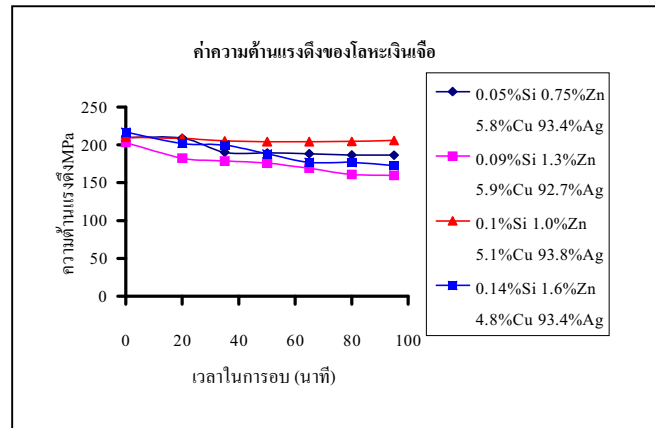
รูปที่ 4-2 : โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิง 0.05%Si 0.75%Zn 5.8%Cu 93.4%Ag
สภาพหล่อขึ้นรูปและอบเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 780°C ด้วยระยะเวลาต่างๆ
ที่กำลังขยาย 10x

ชั้นทดสอบสภาพหล่อขึ้นรูปก่อนนำมาอบเนื้อเดียวมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 65.5 HV และลดลงเหลือประมาณ 52.2 HV เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 65 นาที หลังจากนั้นค่าความแข็งลดลงเพียงเล็กน้อยอยู่ในช่วงประมาณ 49.8-50 HV

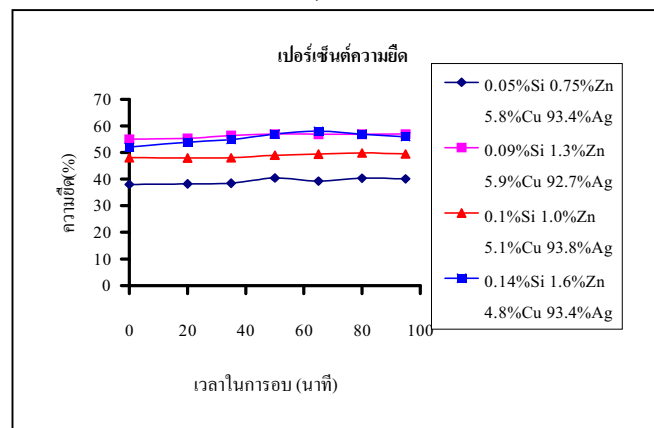
สำหรับในกรณีของค่าความต้านแรงดึงจากรูปที่ 4 ชั้นทดสอบสภาพหล่อขึ้นรูปก่อนนำมาอบเนื้อเดียวมีค่าความต้านแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 210 MPa หลังจากที่ผ่านมาการอบเนื้อเดียวด้วยระยะเวลา 35 นาที ค่าความต้านแรงดึงลดลงเหลือประมาณ 190.22 MPa หลังจากนั้นค่าความต้านแรงดึงเริ่มคงที่ในช่วงประมาณ 186.55-188.49 MPa เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น 65 นาทีเป็นต้นไป แต่ในทางกลับกันค่าความยืดตัวของชั้นทดสอบปรากฏว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยชั้นทดสอบสภาพหล่อขึ้นรูปก่อนนำมาอบเนื้อเดียวมีค่าความยืดตัวเท่ากับ 38 เปอร์เซ็นต์ หลังจากระยะเวลาผ่านไป 50 นาที ค่าความยืดตัวของชั้นทดสอบจะเพิ่มขึ้นเป็น 40.43 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นค่าความยืดตัวเริ่มคงที่อยู่ในช่วงประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 4-5



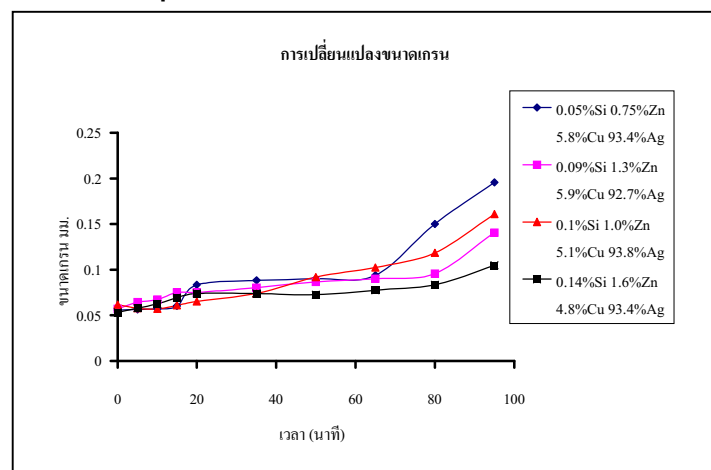
รูปที่ 4-3 : ค่าความแข็งของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการอบเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 780°C ด้วยระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 4-4 : ค่าความต้านแรงดึงของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการอบเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 780°C ด้วยระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 4-5 : ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการอบเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 780°C ด้วยระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 4-6 : การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกรนของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการอบเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 780°C ด้วยระยะเวลาต่างๆ

ตารางที่ 4-2 : การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่อัตราส่วนผสมต่างๆ สภาพ
อบเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 780°C ด้วยระยะเวลาต่างๆ

ส่วนผสม	สมบัติทางกล	เวลาอบที่อุณหภูมิ 780°C (นาทึ)						
		0	20	35	50	65	80	90
5.8% Cu	ความแข็ง (HV1)	65.5	64.2	60.7	56.2	52.2	50.0	49.8
0.75% Zn	ความต้านแรงดึง (MPa)	210.0	208.9	190.2	189.5	188.5	186.7	186.6
0.05% Si	ความยืด (%)	38.0	38.2	38.4	40.4	39.2	40.4	40.1
5.9% Cu	ความแข็ง (HV1)	63.0	64.2	59.5	53.3	42.1	37.4	35.1
1.3% Zn	ความต้านแรงดึง (MPa)	203.0	182.3	178.9	175.8	169.3	161.0	160.0
0.09% Si	ความยืด (%)	55.0	56.3	56.3	56.3	56.9	56.9	55.9
5.1% Cu	ความแข็ง (HV1)	75.7	74.6	72.4	68.6	65.2	64.3	64.3
1.0% Zn	ความต้านแรงดึง (MPa)	210.0	208.6	205.2	205.3	204.6	204.4	204.3
0.1% Si	ความยืด (%)	48.0	47.9	48.0	49.0	49.4	49.8	49.5
4.8% Cu	ความแข็ง (HV1)	74.0	73.5	72.4	69.7	67.9	67.4	66.9
1.6% Zn	ความต้านแรงดึง (MPa)	217.0	201.9	199.9	188.3	177.0	176.9	172.5
0.14% Si	ความยืด (%)	52.0	52.9	54.9	57.0	58.0	56.9	55.9

การตรวจสอบขนาดและการกระจายของเกรนขึ้นทดสอบโลหะเงินสเตอร์ลิง พบว่าเมื่อระยะเวลาในการอบเพิ่มขึ้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจาก 0.056 มม ที่สภาพหล่อขึ้นรูปและเติบโตขยายตัวขึ้นเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.196 มม เมื่อเวลาในการอบผ่านไป 95 นาที่ ดังแสดงในรูปที่ 4-6

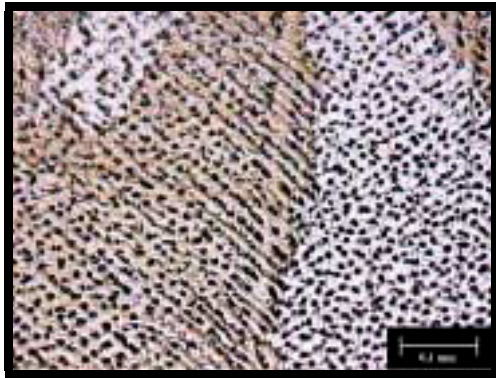
ตารางที่ 4-3 : สรุปการเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนของโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพอบเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 780°C ด้วยระยะเวลาต่างๆ

อัตราส่วนผสม	ขนาดเกรน (มม)									
	เวลาอบ (นาที)									
	0	5	10	15	20	35	50	65	80	95
0.05%Si 0.75%Zn 5.8%Cu 93.4%Ag	0.056	0.083	0.056	0.060	0.083	0.088	0.090	0.093	0.150	0.196
0.09%Si 1.3%Zn 5.9%Cu 92.7%Ag	0.056	0.064	0.067	0.075	0.075	0.080	0.086	0.090	0.096	0.141
0.1%Si 1.0%Zn 5.1%Cu 93.8%Ag	0.061	0.058	0.059	0.061	0.065	0.073	0.091	0.102	0.118	0.161
0.14%Si 1.6%Zn 4.8%Cu 93.4%Ag	0.053	0.058	0.063	0.069	0.074	0.074	0.075	0.078	0.083	0.104

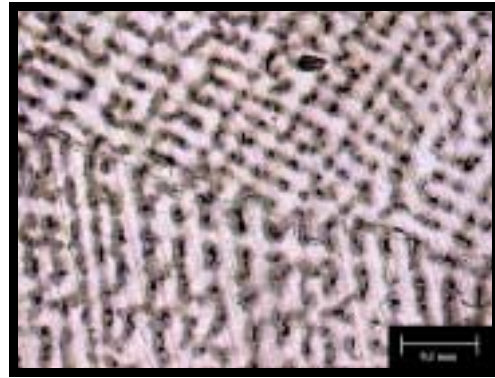
4.3.2 0.09%Si 1.3%Zn 5.9%Cu 92.7% หลังจากขึ้นทดสอบผ่านการอบเนื้อเดียวด้วยระยะเวลาต่างๆ เมื่อตรวจสอบดูโครงสร้างจุลภาคของขึ้นทดสอบหลังจากกัดด้วยกรด โครงสร้างเดนไดรท์ที่เกิดขึ้นในขึ้นทดสอบสภาพหล่อขึ้นรูปค่อยๆ ถูกจัดให้หมดไปจนไม่ปรากฏให้เห็นและโครงสร้างของโลหะเริ่มเกิดการก่อตัวเป็นเกรนเกิดขึ้น จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 4-7 พบว่าโลหะเงิน สเตอร์ลิงมีการก่อตัวเป็นเกรนที่สมบูรณ์เต็มที่เมื่อระยะเวลาผ่านไปประมาณ 65 นาทีดังแสดงในรูปที่ 4-7 จ) ถ้าหากทำการอบต่อไปอีกเกรนที่ก่อตัวจากการอบจะขยายใหญ่ขึ้น ดังแสดงใน รูปที่ 4-7 ฉ)

จากการวิเคราะห์ทดสอบค่าความแข็งแรง ความต้านแรงดึงและความยืดของขึ้นทดสอบพบว่าค่าความแข็งแรงและความต้านแรงดึงของขึ้นทดสอบมีค่าลดต่ำลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4-3 และรูปที่ 4-4 เนื่องจากโครงสร้างหรือส่วนผสมของธาตุเจือต่างๆ ละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันในสถานะสารละลายของแข็งอัมัยงวด และโครงสร้างภายในมีความสม่ำเสมอมากขึ้น จากรูปที่ 4-3 ขึ้นทดสอบสภาพหล่อขึ้นรูปก่อนนำมาอบเนื้อเดียวมีค่าความแข็งแรงเฉลี่ย 63 HV และมีค่าลดลงเหลือ

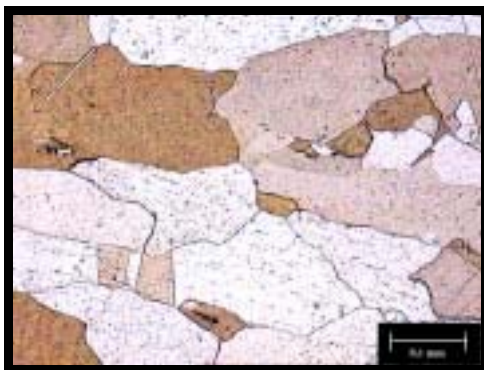
ประมาณ 42.1 HV ที่เวลาอบประมาณ 65 นาที หลังจากนั้นค่าความแข็งลดลงอีกเหลือประมาณ 35.1 HV ที่ระยะเวลาในการอบ 95 นาทีดังแสดงในรูปที่ 4-3



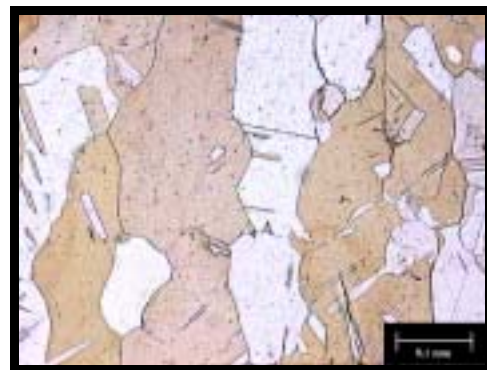
ก) สภาพหล่อขึ้นรูป กำลังขยาย 10 X



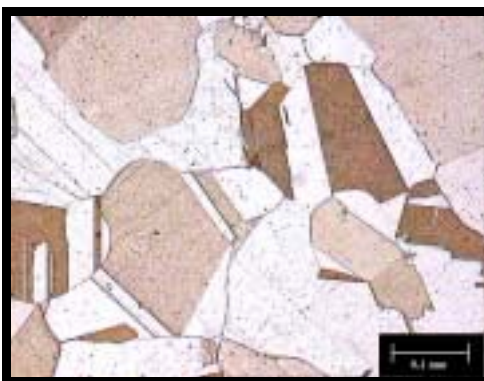
ข) อบที่อุณหภูมิ 780°C เป็นเวลา 10 นาที
กำลังขยาย 10x



ค) อบที่อุณหภูมิ 780°C เป็นเวลา 20 นาที
กำลังขยาย 10x



ง) อบที่อุณหภูมิ 780°C เป็นเวลา 50 นาที
กำลังขยาย 10x



จ) อบที่อุณหภูมิ 780°C เป็นเวลา 65 นาที
กำลังขยาย 10x



ฉ) อบที่อุณหภูมิ 780°C เป็นเวลา 95 นาที
กำลังขยาย 10x

รูปที่ 4-7 : โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิง 0.09%Si 1.3%Zn 5.9%Cu 92.7%Ag
สภาพหล่อขึ้นรูปและอบเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 780°C ด้วยระยะเวลาต่างๆ
ที่กำลังขยาย 10x

สำหรับในกรณีของค่าความต้านแรงดึงจากรูปที่ 4-4 ขึ้นทดสอบสภาพหล่อขึ้นรูปก่อนนำมาอบ เนื้อเดียวมีค่าความต้านแรงดึงเฉลี่ย 203 MPa หลังจากผ่านการอบเนื้อเดียวด้วยระยะเวลา 65 นาที ค่าความต้านแรงดึงลดลงเหลือประมาณ 169.26 MPa หลังจากนั้นค่าความต้านแรงดึงเริ่มคงที่ในช่วงประมาณ 159.99-161.01 MPa แต่ในทางกลับกันค่าความยืดตัวของขึ้นทดสอบปรากฏว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยขึ้นทดสอบสภาพหล่อขึ้นรูปก่อนนำมาอบเนื้อเดียวมีความยืดตัว 55 เปอร์เซ็นต์ หลังจากผ่านการอบเนื้อเดียวด้วยระยะเวลา 35 นาที ค่าความยืดตัวของขึ้นทดสอบเพิ่มขึ้นเป็น 56.33 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มขึ้นสูงสุด 56.93 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลาอบ 65 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4-5 หลังจากนั้นค่าความยืดตัวมีค่าลดลงอยู่เหลือประมาณ 55.91 เปอร์เซ็นต์ที่เวลาอบ 95 นาที ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าสาเหตุที่ความแข็งแรงความต้านแรงดึงลดต่ำลงเนื่องจากการขยายตัวโตขึ้นของเกรน ดังรูปที่ 4-6

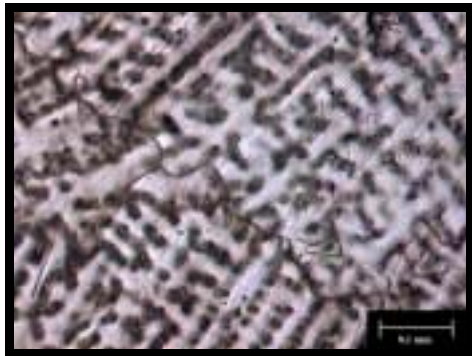
การตรวจสอบขนาดและการกระจายของเกรนขึ้นทดสอบโลหะเงินสเตอร์ลิงเมื่อใช้ระยะเวลาในการอบแตกต่างกัน พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจาก 0.056 มม. ที่สภาพหล่อขึ้นรูปและเติบ โตขึ้นเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.141 มม. เมื่อเวลาในการอบผ่านไป 95 นาที ดังรูปที่ 4-6

4.3.3 0.1%Si 1.0%Zn 5.1%Cu 93.8%Ag หลังจากที่ใช้โลหะเงินสเตอร์ลิงผ่านการอบเนื้อเดียว เมื่อตรวจสอบดูโครงสร้างจุลภาคของขึ้นทดสอบ โครงสร้างเดนไดรท์ที่เกิดขึ้นในขึ้นทดสอบสภาพหล่อขึ้นรูปค่อยๆ ถูกจัดให้หมดไปจนไม่ปรากฏให้เห็นและโครงสร้างของโลหะเริ่มเกิดการก่อตัวเป็นเกรนเกิดขึ้น จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 4-8 พบว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงมีการก่อตัวเป็นเกรนที่สมบูรณ์เต็มที่เมื่อระยะเวลาอบผ่านไปประมาณ 50 นาทีดังแสดงในรูปที่ 4-8 ง) ถ้าหากทำการอบต่อไปอีกเกรนที่ก่อตัวจากการอบก็จะขยายใหญ่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4-8 ฉ)

จากการวิเคราะห์ทดสอบค่าความความแข็งแรง ความต้านแรงดึงและความยืดของขึ้นทดสอบพบว่า ค่าความแข็งแรงและความต้านแรงดึงของขึ้นทดสอบมีค่าลดต่ำลงเมื่อระยะเวลาอบเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4-3 และรูปที่ 4-4 เนื่องจากโครงสร้างหรือส่วนผสมของธาตุเจือต่างๆ ละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันในสภาวะสารละลายของแข็งอิมพัยซ์ และ โครงสร้างภายในมีความสม่ำเสมอมากขึ้น จากรูปที่ 4-3 ขึ้นทดสอบสภาพหล่อขึ้นรูปมีค่าความแข็งแรงเฉลี่ย 75.6 HV และจะลดลงเหลือประมาณ 65.23 HV ที่เวลาอบประมาณ 65 นาที หลังจากนั้นค่าความแข็งแรงลดลงอีกเหลือประมาณ 64.33 HV ที่ระยะเวลาในการอบ 80 นาทีเป็นต้นไปดังแสดงในรูปที่ 4-3

สำหรับในกรณีของค่าความต้านแรงดึงจากรูปที่ 4 ขึ้นทดสอบสภาพหล่อขึ้นรูปมีค่าความต้านแรงดึงเฉลี่ย 210 MPa หลังจากที่ใช้ผ่านการอบเนื้อเดียวด้วยระยะเวลา 50 นาที ค่าความต้านแรงดึงลดลงเหลือประมาณ 204.43 MPa หลังจากนั้นค่าความต้านแรงดึงเริ่มคงที่ในช่วงนี้ แต่ในทางกลับกันค่าความยืดตัวของขึ้นทดสอบปรากฏว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยขึ้นทดสอบสภาพหล่อขึ้นรูปก่อนนำมาอบเนื้อเดียวมีค่าความยืดตัวเท่ากับ 48 เปอร์เซ็นต์ หลังจากที่ใช้ผ่านการอบเนื้อเดียวด้วยระยะเวลา 50 นาที ค่า

ความยืดตัวของชิ้นทดสอบจะเพิ่มขึ้นเป็น 49 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มขึ้นสูงสุด 49.83 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลาอบ 80 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4-5 หลังจากนั้นค่าความยืดตัวจะลดลงอยู่เหลือประมาณ 49.5 เปอร์เซ็นต์ที่เวลาอบ 95 นาที ซึ่งคาดว่าสาเหตุที่ลดต่ำลงเนื่องจากการขยายตัวโตขึ้นของเกรนดัง รูปที่ 4-6



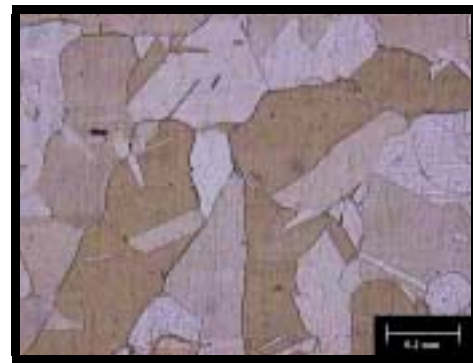
ก) สภาพหล่อขึ้นรูป กำลังขยาย 10x



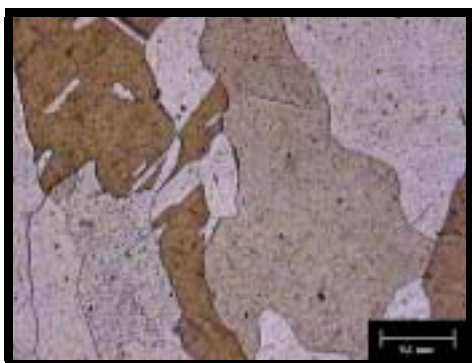
ข) อบที่อุณหภูมิ 780°C เป็นเวลา 15 นาที กำลังขยาย 10x



ค) อบที่อุณหภูมิ 780°C เป็นเวลา 35 นาที กำลังขยาย 10x



ง) อบที่อุณหภูมิ 780°C เป็นเวลา 50 นาที กำลังขยาย 10x



จ) อบที่อุณหภูมิ 780°C เป็นเวลา 65 นาที กำลังขยาย 10x



ฉ) อบที่อุณหภูมิ 780°C เป็นเวลา 95 นาที กำลังขยาย 10x

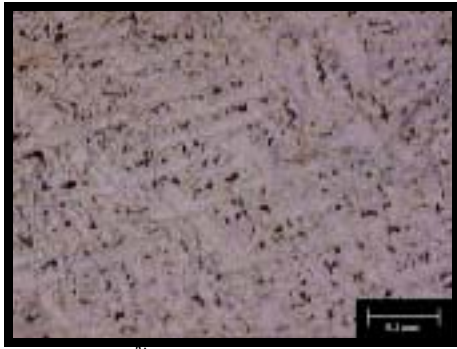
รูปที่ 4-8 : โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิง 0.1%Si 1.0%Zn 5.1%Cu 93.8%Ag
สภาพหล่อขึ้นรูปและอบเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 780°C ด้วยระยะเวลาต่างๆ
ที่กำลังขยาย 10x

การตรวจสอบขนาดและการกระจายของเกรนชั้นทดสอบโลหะเงินสเตอร์ลิงเมื่อใช้ระยะเวลาในการอบที่แตกต่างกัน พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจาก 0.061 มม. ที่สภาพหล่อขึ้นรูปและเติบโตขึ้นเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.161 มม. เมื่อเวลาในการอบผ่านไป 95 นาที ดังรูปที่ 4-6

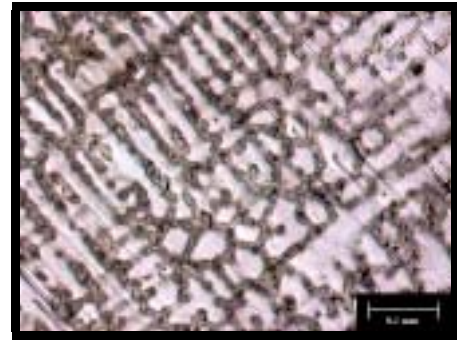
4.3.4 0.14%Si 1.6%Zn 4.8%Cu 93.4%Ag หลังจากที่ใช้โลหะเงินสเตอร์ลิงผ่านการอบเนื้อเดียวเมื่อตรวจสอบดูโครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบ โครงสร้างเดนไดรต์ที่เกิดขึ้นในชั้นทดสอบสภาพหล่อขึ้นรูปจะค่อยๆ ถูกขจัดให้หมดไปจนไม่ปรากฏให้เห็นและโครงสร้างของโลหะเริ่มเกิดการก่อตัวเป็นเกรนเกิดขึ้น จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 4-9 พบว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงมีการก่อตัวเป็นเกรนที่สมบูรณ์เต็มที่เมื่อระยะเวลาผ่านไปประมาณ 65 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4-9 ง) ถ้าหากทำการอบต่อไปอีกเกรนที่ก่อตัวจากการอบจะขยายใหญ่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4-9 จ)

จากการวิเคราะห์ทดสอบค่าความความแข็ง ความต้านแรงดึงและความยืดของชั้นทดสอบพบว่าค่าความแข็งและความต้านแรงดึงของชั้นทดสอบมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาอบเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4-3 และรูปที่ 4-4 เนื่องจากโครงสร้างหรือส่วนผสมของธาตุเจือต่างๆ ละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันในสถานะสารละลายของแข็งอิมตัวยังยวดย และโครงสร้างภายในมีความสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น จากรูปที่ 4-3 ชั้นทดสอบสภาพหล่อขึ้นรูปมีค่าความแข็งเฉลี่ย 74 HV และจะลดลงเหลือประมาณ 66.9 HV ที่เวลาอบประมาณ 65 นาที หลังจากนั้นค่าความแข็งลดลงอีกเหลือประมาณ 66.9-67.4 HV ที่ระยะเวลาในการอบ 80 นาทีเป็นต้นไปดังแสดงในรูปที่ 4-3

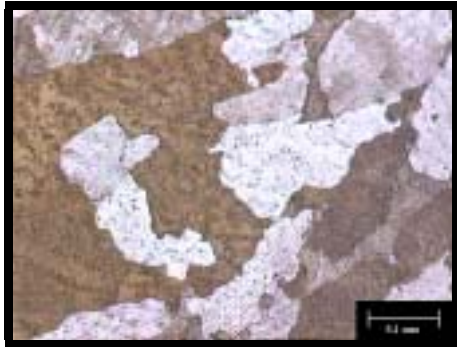
สำหรับในกรณีของค่าความต้านแรงดึงจากรูปที่ 4-4 ชั้นทดสอบสภาพหล่อขึ้นรูปมีค่าความต้านแรงดึงเฉลี่ย 217 MPa หลังจากที่ใช้ผ่านการอบเนื้อเดียวด้วยระยะเวลา 65 นาที ค่าความต้านแรงดึงลดลงเหลือประมาณ 177.05 MPa หลังจากนั้นค่าความต้านแรงดึงลดลงเพียงเล็กน้อยเหลือประมาณ 176.91 MPa หลังจากที่ใช้ผ่านการอบ 80 นาที แต่ถ้าหากทำการอบต่อไปอีกเป็นระยะเวลา 95 นาที ค่าความต้านแรงดึงลดลงเหลือ 172.74 MPa ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการที่เกรนขยายตัวมีขนาดใหญ่ขึ้น ในทางกลับกันค่าความยืดตัวของชั้นทดสอบปรากฏว่ามีค่าเพิ่มขึ้น โดยชั้นทดสอบสภาพหล่อขึ้นรูปก่อนนำมาอบเนื้อเดียวมีค่าความยืดตัวเท่ากับ 52 เปอร์เซ็นต์ หลังจากที่ใช้ผ่านการอบเนื้อเดียวด้วยระยะเวลา 65 นาที ค่าความยืดตัวของชั้นทดสอบจะเพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 58 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นความยืดตัวของชั้นทดสอบจะลดลงเหลือ 56.9 เปอร์เซ็นต์และ 55.91 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลาอบ 80 นาที และ 95 นาทีตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4-5 ซึ่งคาดว่าสาเหตุที่ลดต่ำลงเนื่องจากการขยายตัวโตขึ้นของเกรน ดังรูปที่ 4-6



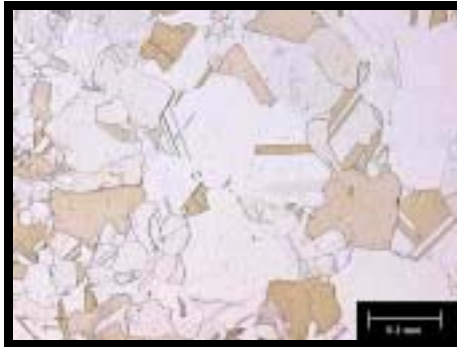
ก) สภาพหล่อขึ้นรูป กำลังขยาย (10x)



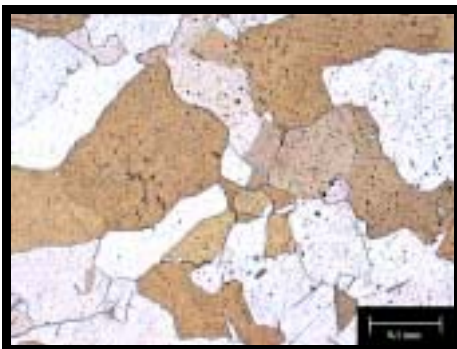
ข) อบที่อุณหภูมิ 780°C เป็นเวลา 15 นาที (10x)



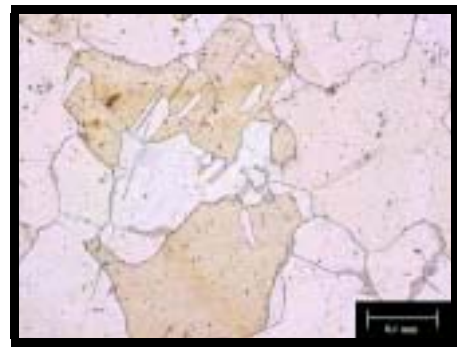
ค) อบที่อุณหภูมิ 780°C เป็นเวลา 35 นาที (10x)



ง) อบที่อุณหภูมิ 780°C เป็นเวลา 65 นาที (10x)



จ) อบที่อุณหภูมิ 780°C เป็นเวลา 80 นาที (10x)



ฉ) อบที่อุณหภูมิ 780°C เป็นเวลา 95 นาที (10x)

รูปที่ 4-9 : โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิง 0.14%Si 1.6%Zn 4.8%Cu 93.4%Ag

สภาพหล่อขึ้นรูปและอบเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 780°C ด้วยระยะเวลาต่างๆ
ที่กำลังขยาย 10x

การตรวจสอบขนาดและการกระจายของเกรนของชิ้นทดสอบโลหะเงินสเตอร์ลิงเมื่อใช้ระยะเวลาในการอบที่แตกต่างกัน พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจาก 0.052 มม. ที่สภาพหล่อขึ้นรูปและเคบ โดขึ้นเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.104 มม. เมื่อเวลาในการอบผ่านไป 95 นาที ดังรูปที่ 4-6

จากการผลการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพอบเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 780°C ด้วยระยะเวลาที่ต่างๆ พบว่าเมื่อระยะเวลาในการอบเนื้อเดียวเพิ่มขึ้น โครงสร้างเดนไดรต์และความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างภายในชิ้นทดสอบที่เกิดจากการหล่อขึ้นรูปค่อยๆ

ถูกจัดให้หมดไป เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและส่วนผสมของธาตุเจือต่างๆ ละลายเข้าด้วยกันในลักษณะสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (Super Saturate Solid Solution) นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4-3 รูปที่ 4-4 รูปที่ 4-5 รูปที่ 4-6 ตารางที่ 4-2 และตารางที่ 4-3 และจากการศึกษาวิเคราะห์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถสรุปเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบเนื้อเดียวของชิ้นทดสอบที่อัตราส่วนผสมต่างๆ เพื่อที่จะนำค่าที่ได้ไปใช้สำหรับการอบเพิ่มความแข็งแรงได้ต่อไป

1. 0.05% Si 0.75%Zn 5.8%Cu 93.4%Ag เวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบเนื้อเดียว 65 นาที
2. 0.09% Si 1.3%Zn 5.9%Cu 92.7%Ag เวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบเนื้อเดียว 65 นาที
3. 0.1% Si 1.0%Zn 5.1%Cu 93.8%Ag เวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบเนื้อเดียว 50 นาที
4. 0.14% Si 1.6%Zn 4.8%Cu 93.4%Ag เวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบเนื้อเดียว 65 นาที

4.4 ผลการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกลโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพอบเพิ่มความแข็งแรง

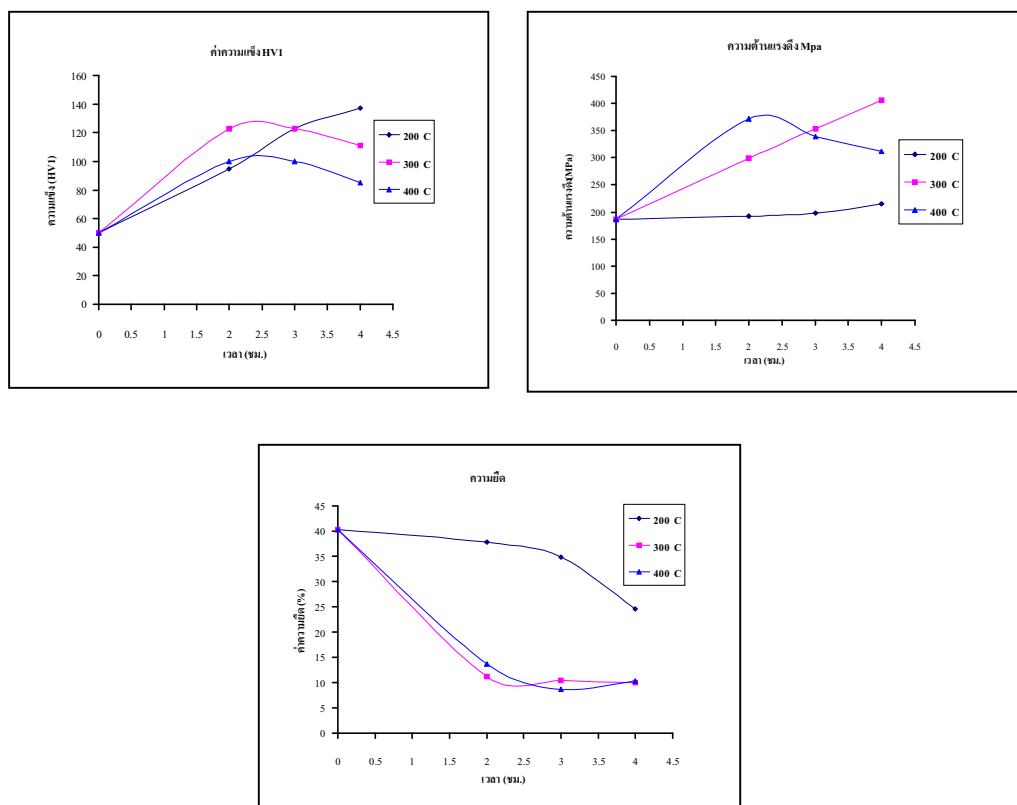
ชิ้นทดสอบ โลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการอบเนื้อเดียวด้วยอุณหภูมิ 780°C และระยะเวลาดังที่ได้สรุปจากขั้นตอนการศึกษาและวิเคราะห์สมบัติทางกลของโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพอบเนื้อเดียวจะถูกนำมาอบซ้ำอีกครั้งเพื่อศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกลสภาพอบเพิ่มความแข็งแรงด้วยอุณหภูมิ 200, 300 และ 400°C ด้วยระยะเวลา 2, 3 และ 4 ชั่วโมง หลังจากที่ยืนยันทดสอบผ่านการอบเพิ่มความแข็งแรงแล้ว จะถูกนำไปทดสอบเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล และ โครงสร้างจุลภาคซึ่งผลของการศึกษาสามารถแบ่งออกได้ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ ดังต่อไปนี้

4.4.1 0.05% Si 0.75%Zn 5.8%Cu 93.4%Ag ผลจากการวิเคราะห์ทดสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4-10 ซึ่งประกอบด้วยค่าความแข็งแรง ความต้านแรงดึงและความยืด

หลังจากโลหะเงินสเตอร์ลิงผ่านการอบเนื้อเดียว โครงสร้างภายในของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีธาตุเจือต่างๆ จะละลายเข้าด้วยกันในสถานะสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดและเมื่อนำมาผ่านการอบซ้ำอีกครั้ง ด้วยกรรมวิธีอบเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ที่กำหนดตามวิธีการวิจัย จากผลการทดลองพบว่า โลหะเงินสเตอร์ลิงมีค่าความแข็งแรง และความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่ความยืดกลับลดต่ำลง ทั้งนี้ถ้าสังเกตจากกราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติดังรูปที่ 4-10 และสามารถสรุปให้เห็นถึงลำดับขั้นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนดังตารางที่ 4-4

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลง พบว่าอุณหภูมิอบที่ 300°C เวลา 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 11 ง) โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิงเริ่มแสดงให้เห็นถึงลักษณะการก่อตัวของจุดตำหนิเกิดขึ้น ซึ่งในช่วงแรกผู้วิจัยตั้งสมมุติฐานว่าน่าจะเกิดจากออกไซด์ของโลหะเงินสเตอร์ลิง แต่เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชิ้นทดสอบอื่นๆ ที่ใช้เวลาในการอบมากกว่าก็พบว่ามีลักษณะเช่น

เดียวกันและยังทวีความเข้มของจุดดำหิมามากขึ้นและขยายขนาดใหญ่ขึ้น และในทำนองเดียวกัน โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบกลุ่มที่ใช้อุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 400°C ก็มีลักษณะคล้ายๆกันและขนาดจุดดำหิมที่กล่าวถึงนี้ก็มีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อย้อนกลับไปที่พิจารณาสมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลงดังตารางที่ 4-4 ยิ่งทำให้เกิดความมั่นใจยิ่งขึ้นว่า ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากอนุภาคการตกตะกอนของทองแดงที่ละลายอยู่ในสารละลายของแข็งโลหะเงินอิ่มตัวยิ่งยวดตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้แล้ว เมื่อพิจารณาจากขนาดและปริมาณของอนุภาคการตกตะกอนของทองแดงที่เกิดขึ้นพบว่า ถ้าหากเลือกใช้อุณหภูมิสูงและเวลานานเกินไปจะมีผลทำให้อนุภาคการตกตะกอนของทองแดงขยายรวมตัวกับอนุภาคที่อยู่ข้างเคียงเกิดการแยกเฟสเป็นเกรนใหม่เกิดขึ้นและส่งผลทำให้สมบัติทางกลลดลงกว่าค่าที่ควรจะเป็น ดังนั้นในการพิจารณาเลือกใช้อุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบเพิ่มความแข็งแรงให้พิจารณาจากกราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลดังรูปที่ 4-10 ประกอบกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคดังปรากฏในรูปที่ 4-11



รูปที่ 4-10 : กราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของโลหะเงินสเตอร์ลิง 0.05%Si 0.75%Zn 5.8%Cu 93.4%Ag ที่ผ่านการอบเพิ่มความแข็งแรงหลังจากผ่านการอบเนื้อเดียว

ตารางที่ 4-4 : สมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลงของโลหะเงินสเตอร์ลิง 0.05% Si 0.75%Zn 5.8%Cu 93.4%Ag สภาพอบเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

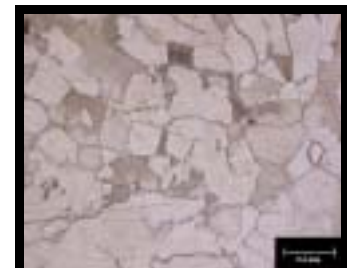
เวลาอบ (ชม.)	ความแข็ง (HV1) อุณหภูมิอบ (°C)			ความต้านแรงดึง (MPa) อุณหภูมิอบ (°C)			ความยืด (%) อุณหภูมิอบ (°C)		
	200	300	400	200	300	400	200	300	400
0	49.8	49.8	49.8	186.5	486.5	186.5	40.3	40.3	40.3
2	94.6	122.7	99.7	192.4	299.1	371.2	37.8	11.2	13.7
3	122.7	122.7	99.7	198.5	352.6	339.6	34.8	10.5	8.7
4	137.0	111.2	84.9	215.0	405.5	312.0	24.5	10.0	10.3



ก) อบที่ 200°C 2 ชั่วโมง (5x)



ข) อบที่ 200°C 3 ชั่วโมง (5x)



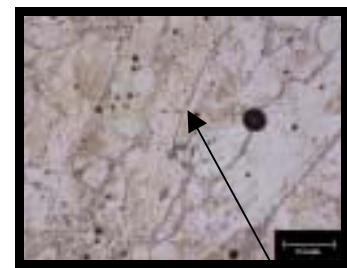
ค) อบที่ 200°C 4 ชั่วโมง (5x)



ง) อบที่ 300°C 2 ชั่วโมง (5x)



จ) อบที่ 300°C 3 ชั่วโมง (5x)



ฉ) อบที่ 300°C 4 ชั่วโมง (5x)



ช) อบที่ 400°C 2 ชั่วโมง (5x)



ซ) อบที่ 400°C 3 ชั่วโมง (5x)

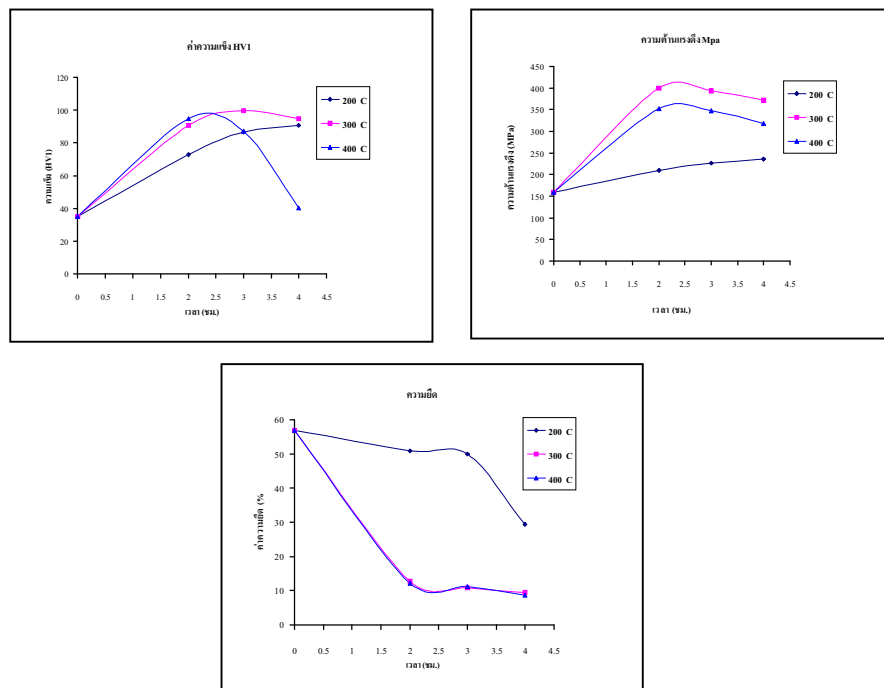


ณ) อบที่ 400°C 4 ชั่วโมง (5x)

รูปที่ 4-11 : แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิง 0.05%Si 0.75%Zn 5.8%Cu 93.4%Ag ที่เปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านการอบเพิ่มความแข็งด้วยอุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

สำหรับโลหะเงินสเตอร์ลิง 0.05%Si 0.75%Zn 5.8%Cu 93.4%Ag จากการวิเคราะห์สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงดังที่ได้กล่าวแล้วข้างต้นสามารถสรุปอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 300°C ด้วยระยะเวลาในการอบ 3 ชั่วโมง เนื่องจากช่วงดังกล่าวเป็นช่วงที่โลหะมีค่าความแข็งและความต้านแรงดึงขึ้นสูงและใช้เวลาอบน้อยที่สุด

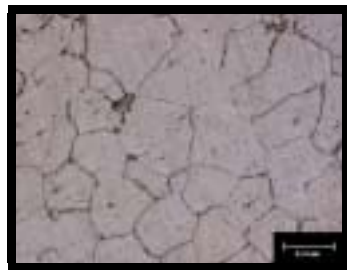
2. 0.09%Si 1.3%Z 5.9%Cu 92.7%Ag ผลจากการวิเคราะห์ทดสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4-12 ซึ่งประกอบด้วยค่าความแข็ง ความต้านแรงดึงและความยืด



รูปที่ 4-12 : กราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของโลหะเงินสเตอร์ลิง 0.09%Si 1.3%Zn 5.9%Cu 92.7%Ag ที่ผ่านการอบเพิ่มความแข็งหลังจากผ่านการอบเนื้อเดียว

ตารางที่ 4-5 : สมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลงของโลหะเงินสเตอร์ลิง 0.09%Si 1.3%Zn 5.9%Cu 92.7%Ag สภาพอบเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

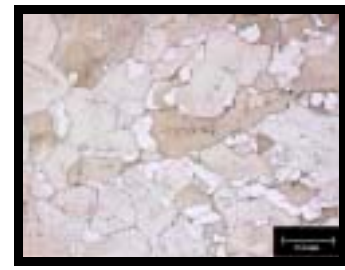
เวลาอบ (ชม.)	ความแข็ง (HV1) อุณหภูมิอบ (°C)			ความต้านแรงดึง (Mpa) อุณหภูมิอบ (°C)			ความยืด (%) อุณหภูมิอบ (°C)		
	200	300	400	200	300	400	200	300	400
0	35.1	35.1	35.1	159.7	159.7	159.7	56.9	56.9	56.9
2	73.0	90.5	94.6	209.4	399.6	351.7	51.0	12.8	12.2
3	86.5	99.7	87.0	227.3	393.3	347.0	50.0	10.8	11.2
4	90.5	94.6	40.2	235.1	372.3	318.1	29.3	9.5	8.7



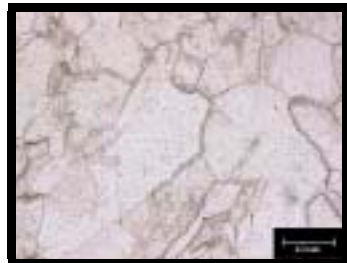
ก) อบที่ 200°C 2 ชั่วโมง (5x)



ข) อบที่ 200°C 3 ชั่วโมง (5x)



ค) อบที่ 200°C 4 ชั่วโมง (5x)



ง) อบที่ 300°C 2 ชั่วโมง (5x)



จ) อบที่ 300°C 3 ชั่วโมง (5x)



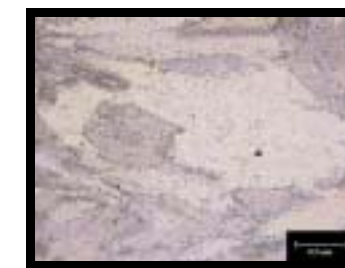
ฉ) อบที่ 300°C 4 ชั่วโมง (5x)



ช) อบที่ 400°C 2 ชั่วโมง (5x)



ซ) อบที่ 400°C 3 ชั่วโมง (5x)



ณ) อบที่ 400°C 4 ชั่วโมง (5x)

รูปที่ 4-13 : โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิง 0.09%Si 1.3%Zn 5.9%Cu 92.7%Ag ที่เปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านการอบเพิ่มความแข็งด้วยอุณหภูมิและระยะเวลาดังกล่าว

โลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพสารละลายของแข็งอิมิตัวยิ่งยวด เมื่อผ่านการอบซ้ำอีกครั้งด้วยอุณหภูมิและเวลาที่กำหนดตามวิธีการวิจัย พบว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงมีค่าความแข็ง และความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่ความยืดกลับลดลง ทั้งนี้ถ้าสังเกตจากกราฟที่เปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4-12 สามารถสรุปให้เห็นถึงลำดับขั้นการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลได้ชัดเจนยิ่งขึ้นดังตารางที่ 4-5 และนอกจากนี้โครงสร้างจุลภาคยังเกิดการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในอบ

เมื่อพิจารณาจากกราฟความแข็งที่เปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4-12 พบว่า ค่าความแข็งและความต้านแรงดึงเริ่มของขึ้นทดสอบสภาพสารละลายของแข็งอิมิตัวยิ่งยวดมีค่าเท่ากับ 35.1 HV และ 159.7 MPa เมื่อทำการอบด้วยอุณหภูมิ 200°C ค่าความแข็งและความต้านแรงดึงของขึ้นทดสอบจะเพิ่มขึ้นเป็น 73.0, 86.5, 90.5 HV และ 209.4, 227.3, 235.1 MPa ด้วยระยะเวลาเพิ่มขึ้น 2 3 และ 4 ชั่วโมง แสดงว่าเวลาที่ใช้ในการอบเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความแข็งและความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันค่าความยืดกลับลดลง ผลจากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสันนิฐานได้ว่าการตกตะกอนของทองแดงที่ละลายอยู่ในสารละลายของแข็งโลหะเงินอิมิตัวยิ่งยวด และจากการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลง พบว่าอุณหภูมิอบที่ 300°C เวลา 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4-13 ง) การขยายตัวของอนุภาคการตกตะกอนเริ่มขยายตัวเพิ่มขนาดใหญ่ขึ้นอย่างชัดเจน และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างจุลภาคควบคู่กับการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งพบว่าช่วงอุณหภูมิ 300°C เวลา 3 ชั่วโมง เป็นช่วงที่โครงสร้างจุลภาคเกิดการตกตะกอนเพิ่มขึ้นจากช่วง 2 ชั่วโมงและค่าความแข็งของขึ้นทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด หลังจากนั้นอนุภาคการตกตะกอนที่เกิดขึ้นขยายตัวรวมกับอนุภาคข้างเคียงมีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งเริ่มลดลง และนอกจากนี้ที่อุณหภูมิ 300°C ค่าความต้านแรงดึงมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงระหว่าง 2-3 ชั่วโมง หลังจากนั้นมียาลดต่ำลง และนอกจากนี้ข้อที่น่าสังเกตจากกราฟการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของขึ้นทดสอบคือที่ช่วงอุณหภูมิ 400°C เวลา 4 ชั่วโมง ค่าความแข็งที่ได้ลดต่ำลงผิดปกติ จากการวิเคราะห์ถึงขั้นตอนและวิธีการดำเนินการทดลองที่ผ่านมาสรุปได้ว่าน่าจะมีสาเหตุมาจากความบกพร่องของขึ้นทดสอบจากระบวนการหล่อขึ้นรูป

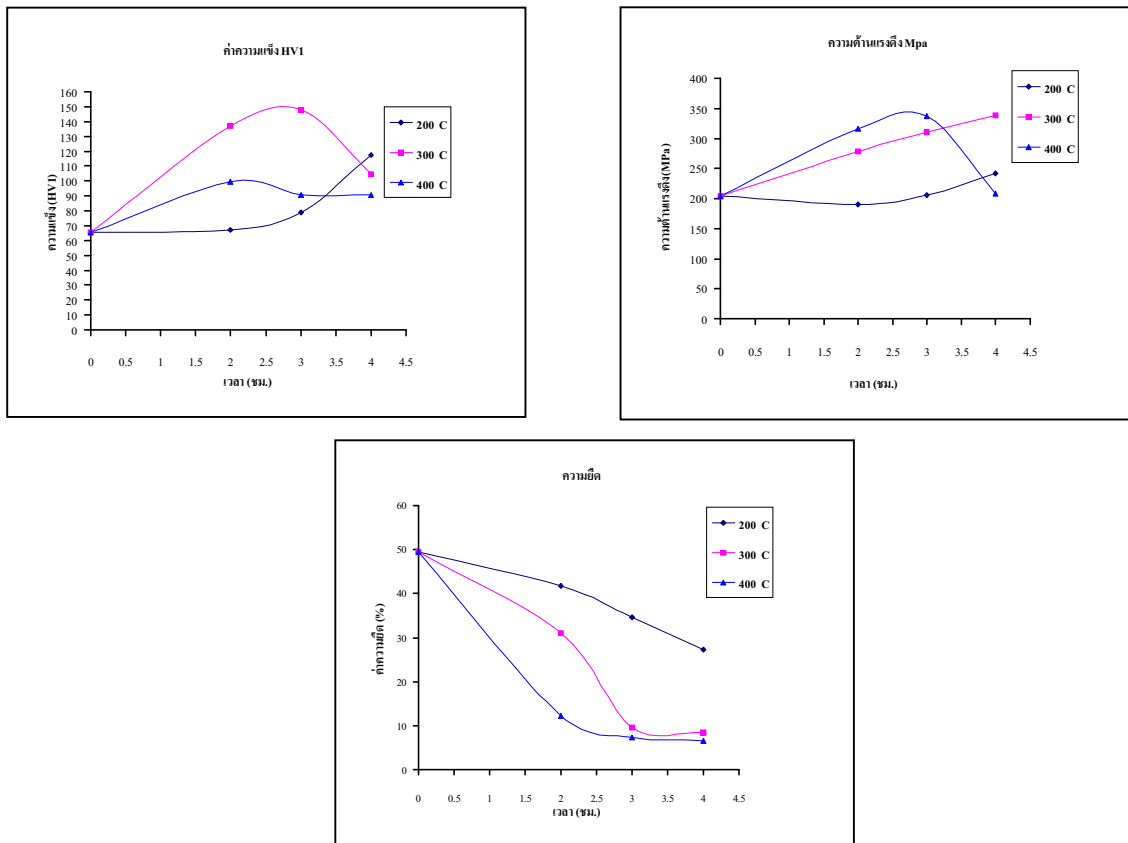
จากการศึกษาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลและ โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิง 0.09%Si 1.3%Zn 5.9%Cu 92.7%Ag สภาพอบเพิ่มความแข็งพบว่าอุณหภูมิและช่วงเวลาที่เหมาะสำหรับการอบเพิ่มความแข็งอยู่ในช่วง 300°C เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง

4.4.3 0.1%Si 1.0%Zn 5.1%Cu 93.8%Ag ผลจากการวิเคราะห์ทดสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของขึ้นทดสอบสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4-14 ซึ่งประกอบด้วยค่าความแข็ง ความต้านแรงดึงและความยืด

โลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพสารละลายของแข็งอิมิตัวยิ่งยวด เมื่อผ่านการอบซ้ำอีกครั้งด้วยอุณหภูมิและเวลาที่กำหนดตามวิธีการวิจัย พบว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงมีค่าความแข็ง และความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่ความยืดกลับลดลง ทั้งนี้ถ้าสังเกตจากกราฟที่เปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4-14 สามารถสรุปให้เห็นถึงลำดับ

ขั้นการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลได้ชัดเจนยิ่งขึ้นดังตารางที่ 4-6 และนอกจากนี้โครงสร้างจุลภาคยังเกิดการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในอบ

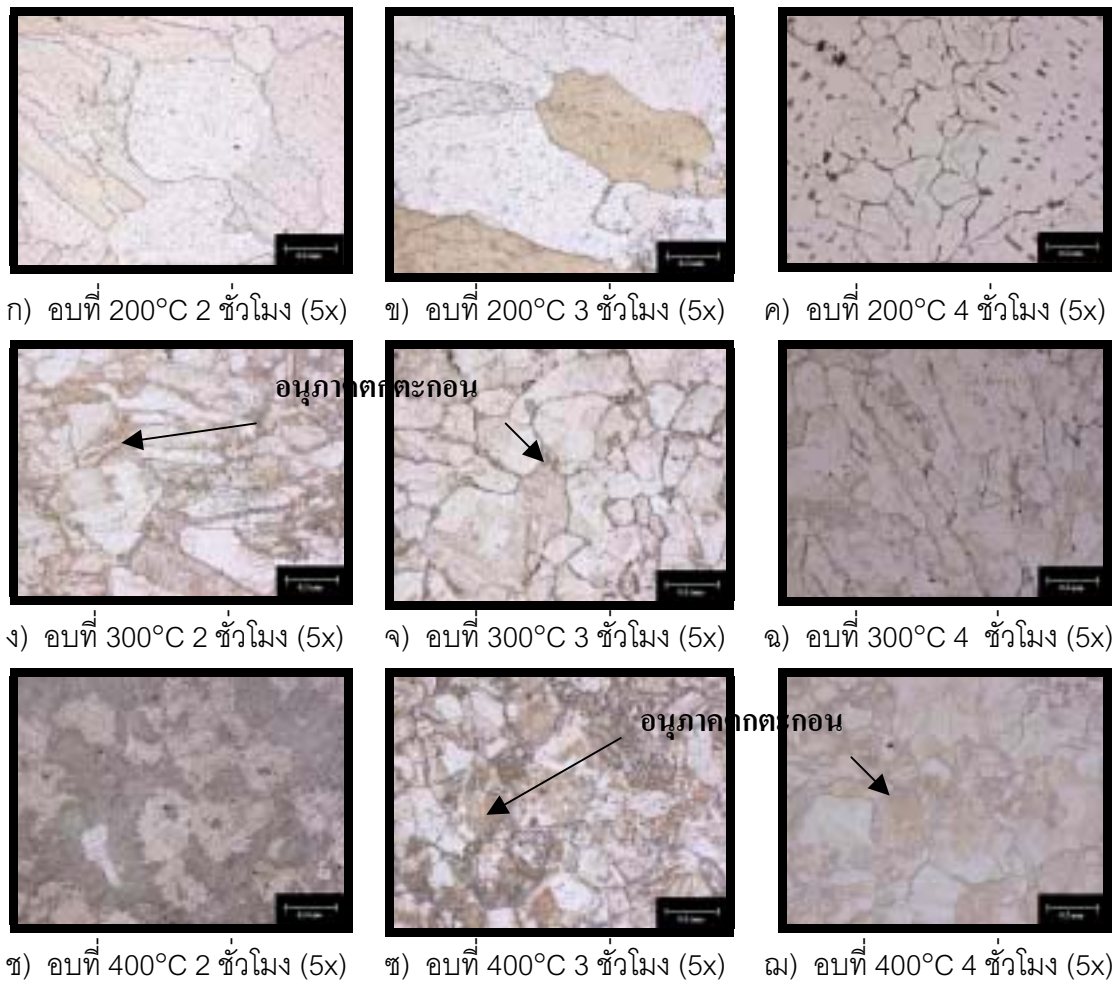
เมื่อพิจารณาจากกราฟความแข็งแรงรูปที่ 4-14 พบว่า ค่าความแข็งแรงและความต้านแรงดึงเริ่มต้นของชิ้นทดสอบสภาพสารละลายของแข็งอิมิตัวยิ่งยวดมีค่าเท่ากับ 65.2 HV และ 204.4 MPa เมื่อทำการอบด้วยอุณหภูมิ 200°C ค่าความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นเป็น 66.9, 79.1 และ 117.5 HV เมื่อเวลาในการอบผ่านไป 2, 3 และ 4 ชั่วโมง สำหรับความต้านแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ได้จากการอบที่เวลา 2 ชั่วโมงจะมีค่าลดลงต่ำกว่าค่าเริ่มต้นเหลือประมาณ 190.7 MPa หลังจากนั้นก็มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 205.7 MPa และ 242.5 MPa ด้วยระยะเวลาเพิ่มขึ้น 3 และ 4 ชั่วโมง สาเหตุที่ค่าความต้านแรงดึงลดต่ำลงอาจมีสาเหตุมาจากสิ่งบกพร่องของกระบวนการหล่อขึ้นรูป แต่ถ้ามองภาพรวมโดยทั่วไปพบว่าเวลาที่ใช้ในการอบเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงและความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น และในทางกลับกันค่าความยืดลดลง ผลจากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสันนิษฐานได้ว่าการตกตะกอนของทองแดงที่ละลายอยู่ในสารละลายของแข็งโลหะเงินอิมิตัวยิ่งยวด และจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลง พบว่าอุณหภูมิอบที่ 300°C เวลา 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4-15 ง) การขยายตัวของอนุภาคการตกตะกอนเริ่มขยายตัวออกให้เห็นได้ชัดเจนมากขึ้น แต่เมื่อย้อนกลับไปตรวจสอบดูที่อุณหภูมิ 200°C เวลา 2 ชั่วโมงดังแสดงในรูปที่ 4-15 ค) พบว่าชิ้นทดสอบนี้มีความไม่สมบูรณ์และไม่สามารถทำการวิเคราะห์การตกตะกอนได้ และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคควบคู่กับการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงพบว่าช่วงอุณหภูมิ 300°C เวลา 3 ชั่วโมง เป็นช่วงที่โครงสร้างจุลภาคเกิดการตกตะกอนใกล้เคียงกับช่วง 2 ชั่วโมงและค่าความแข็งแรงของชิ้นทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด หลังจากนั้นอนุภาคการตกตะกอนที่เกิดขึ้นขยายตัวรวมกับอนุภาคข้างเคียงมีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเริ่มลดลง และจากการศึกษาวิเคราะห์ความต้านแรงดึงพบว่าที่อุณหภูมิ 400°C เวลา 3 ชั่วโมงให้ค่าความต้านแรงดึงสูงใกล้เคียงกับที่อุณหภูมิ 300°C เวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นก็มีค่าลดต่ำลง



รูปที่ 4-14 : กราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของโลหะเงินสเตอร์ลิง 0.1%Si 1.0%Zn 5.1%Cu 93.8%Ag ที่ผ่านการอบเพิ่มความแข็งหลังจากผ่านการอบเนื้อเดียว

ตารางที่ 4-6 : สมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลงของโลหะเงินสเตอร์ลิง 0.1%Si 1.0%Zn 5.1%Cu 93.8%Ag สภาพอบเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

เวลาอบ (ชม.)	ความแข็ง (HV1) อุณหภูมิอบ (°C)			ความต้านแรงดึง (Mpa) อุณหภูมิอบ (°C)			ความยืด (%) อุณหภูมิอบ (°C)		
	200	300	400	200	300	400	200	300	400
0	65.2	65.2	65.2	204.4	204.4	204.4	49.4	49.4	49.4
2	66.9	13.0	99.7	190.7	278.7	316.0	41.8	31.0	12.2
3	79.1	147.7	90.5	205.9	311.1	336.7	34.7	9.5	7.3
4	117.5	104.9	90.53	242.2	337.8	208.2	27.30	8.50	6.50

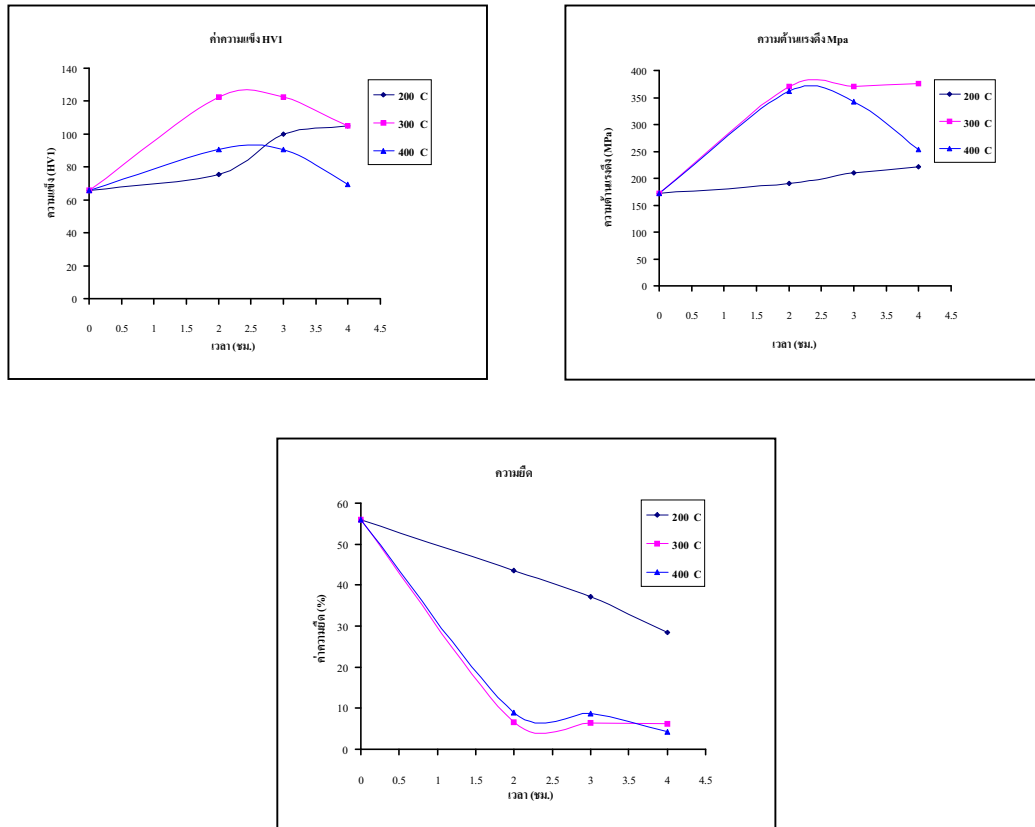


รูปที่ 4-15 : แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิง 0.1%Si 1.0%Zn 5.1%Cu 93.8%Ag ที่เปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านการอบเพิ่มความแข็งด้วยอุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

จากการศึกษาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิง 0.1%Si 1.0%Zn 5.1%Cu 93.8%Ag สภาพอบเพิ่มความแข็งพบว่าอุณหภูมิและช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบเพิ่มความแข็งอยู่ในช่วง 300°C เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง

4.4.4 0.14%Si 1.6%Zn 4.8%Cu 93.4%Ag ผลจากการวิเคราะห์ทดสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4-16 ซึ่งประกอบด้วยค่าความแข็ง ความต้านแรงดึงและความยืด

โลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพสารละลายของแข็งอิมตัวยังยวดย เมื่อผ่านการอบซ้ำอีกครั้งด้วยอุณหภูมิและเวลาที่กำหนดตามวิธีการวิจัย พบว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงมีค่าความแข็ง และความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้นแต่ความยืดกลับลดลง ทั้งนี้ถ้าสังเกตจากกราฟที่เปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4-16 สามารถสรุปให้เห็นถึงลำดับขั้นการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลได้ชัดเจนยิ่งขึ้นดังตารางที่ 4-7 และนอกจากนี้โครงสร้างจุลภาคยังเกิดการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการอบ



รูปที่ 4-16 : กราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของโลหะเงินสเตอร์ลิง 0.14%Si 1.6%Zn 4.8%Cu 93.4%Ag ที่ผ่านการอบเพิ่มความแข็งหลังจากผ่านการอบเนื้อเดียว

ตารางที่ 4-7 : สมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลงของโลหะเงินสเตอร์ลิง 0.14%Si 1.6%Zn 4.8%Cu 93.4%Ag สภาวะอบเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

เวลาอบ (ชม.)	ความแข็ง HV1 อุณหภูมิอบ (°C)			ความต้านแรงดึง MPa อุณหภูมิอบ (°C)			ความยืด % อุณหภูมิอบ (°C)		
	200	300	400	200	300	400	200	300	400
0	66.0	66.0	66.0	172.5	172.5	172.5	55.9	55.9	55.9
2	75.7	122.7	90.5	189.6	370.6	362.6	43.5	6.5	9.0
3	99.7	122.7	90.5	210.3	370.3	342.4	37.2	6.3	8.7
4	104.9	104.9	69.7	220.7	375.6	253.1	28.5	6.2	4.3



รูปที่ 4-17 : โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิง 0.14%Si 1.6%Zn 4.8%Cu 93.4%Ag

ที่เปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านการอบเพิ่มความแข็งด้วยอุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งและความต้านแรงดึงของชิ้นทดสอบดังรูปที่ 4-16 ปรากฏว่าอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบเพิ่มความแข็งอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 300°C ระยะเวลาในการอบ 2-3 ชั่วโมง (พิจารณาตามกราฟ) ซึ่งรายละเอียดของค่าความแข็ง ความต้านแรงดึงและความยืดที่ได้จากการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4-7 สำหรับในส่วนของการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบปรากฏว่าอนุภาคของการตกตะกอนสามารถเห็นได้ชัดเจนตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ 300°C เวลา 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4-17 หลังจากทีอุณหภูมิและเวลาในการอบเพิ่มขึ้นอนุภาคการตกตะกอนจะขยายตัวรวมกับอนุภาคข้างเคียงแยกเฟสออกมาเป็นเกรนใหม่เกิดขึ้น

จากการศึกษาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิง 0.14%Si 1.6%Zn 4.8%Cu 93.4%Ag สภาพอบเพิ่มความแข็งแรงพบว่าอุณหภูมิและช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบเพิ่มความแข็งแรงอยู่ในช่วง 300°C เวลาประมาณ 2-3 ชั่วโมง

จากข้อมูลผลการศึกษาวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงสมบัติทางกล ค่าความแข็งแรง ความต้านแรงดึง ความยืดและโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นทดสอบจากการอบเพิ่มความแข็งแรง ทั้งนี้ความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ เกิดจากการอนุภาคการตกตะกอนของเฟสทองแดง (Copper Precipitate Phase) ภายในสารละลายของแข็งของโลหะเงินอิมิตัวที่ยึดตามทฤษฎีที่กล่าวไว้ และผลจากการศึกษาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของโลหะเงินสเตอร์ลิงจากกรรมวิธีอบเพิ่มความแข็งแรง สามารถสรุปอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับโลหะเงินสเตอร์ลิงแต่ละส่วนผสมได้ดังนี้

1. 0.05%Si 0.75%Zn 5.8%Cu 93.4%Ag อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง
2. 0.09%Si 1.3%Zn 5.9%Cu 92.7%Ag อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง
3. 0.1%Si 1.0%Zn 5.1%Cu 93.8%Ag อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาประมาณ 2-3 ชั่วโมง
4. 0.14%Si 1.6%Zn 4.8%Cu 93.4%Ag อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาประมาณ 2-3 ชั่วโมง

4.5 ผลการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกลโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพแปรรูปเย็น

ชิ้นทดสอบโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ได้จากการหล่อขึ้นรูปถูกนำไปแปรรูปเย็นด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปเป็นเส้นลวดดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ซึ่งในที่นี่จะเป็นการศึกษาวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบที่มีลักษณะเป็นเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงแปรรูปเย็น 95.6%RA. ที่ผ่านและไม่ผ่านการอบเนื้อเดียวก่อนดึงขึ้นรูปเป็นเส้นลวด ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกลแสดงไว้ในตารางที่ 4-8 ดังนี้

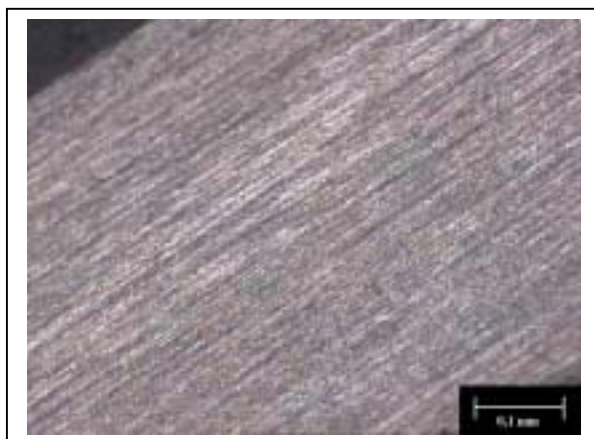
ตารางที่ 4-8 : สมบัติทางกลของชิ้นทดสอบโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการดัดขึ้นรูปเป็นเส้นลวด 95.6%RA. ที่ผ่านและไม่ผ่านการอบเนื้อเดียวก่อนดัดขึ้นรูปเป็นเส้นลวด

อัตราส่วนผสม	สมบัติทางกล	ผ่านการอบเนื้อเดียว					ไม่ผ่านการอบเนื้อเดียว				
		ชิ้นทดสอบที่			เฉลี่ย	SD	ชิ้นทดสอบที่			เฉลี่ย	SD
		1	2	3			1	2	3		
0.05%Si 0.75%Zn 5.8%Cu 93.4%Ag	ความแข็ง (HV1)	129	157	129	138	16.2	153	168	162	161	7.55
	ความต้านแรงดึง (MPa)	594	601	622	606	14.5	657	621	598	625	29.7
	ความยืด (%)	5.9	5.7	5.8	5.8	0.1	-	1.5	1.5	1.5	-
0.09%Si 1.3%Zn 5.9%Cu 92.7%Ag	ความแข็ง (HV1)	185	190	190	188	2.88	140	153	140	144	7.51
	ความต้านแรงดึง (MPa)	634	588	679	633	45.5	590	599	625	605	18.2
	ความยืด (%)	7.1	4.8	8.0	6.6	1.7	-	1.0	-	1.0	-
0.1%Si 1.0%Zn 5.1%Cu 93.8%Ag	ความแข็ง (HV1)	126	126	155	135	16.7	153	153	153	153	-
	ความต้านแรงดึง (MPa)	648	614	587	616	30.5	439	474	569	494	67.3
	ความยืด (%)	7.0	7.4	4.6	6.3	1.5	2.0	1.5	1.5	1.6	0.3
0.14%Si 1.6%Zn 4.8%Cu 93.4%Ag	ความแข็ง (HV1)	165	169	159	164	5.03	185	168	168	174	9.81
	ความต้านแรงดึง (MPa)	695	622	646	654	37.2	548	546	-	547	1.41
	ความยืด (%)	8.8	9.2	7.3	8.4	1.0	1.0	1.0	-	1.0	-

SD = ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

หลังจากที่ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกลของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงพบว่าเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ไม่ผ่านการอบเนื้อเดียวก่อนดัดขึ้นรูปเส้นลวดมีค่าความแข็งสูงกว่าเส้นลวดที่ผ่านการอบเนื้อเดียวก่อนดัดขึ้นรูป สำหรับในกรณีของความต้านแรงดึงและความยืดพบว่าเส้นลวดที่ผ่านการอบเนื้อเดียวก่อนการดัดขึ้นรูปมีค่าสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการอบเนื้อเดียวมีโครงสร้างและส่วนผสมทางเคมีของธาตุเจือต่างๆ สม่่าเสมอกว่า

จากการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการแปรรูปเย็น พบว่าเส้นลวดมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคเป็นเกรนยาวหรือที่เรียกว่าอีลองเกชันเกรน (Elongation Grain) ซึ่งลักษณะของเกรนดังกล่าวนี้เกิดขึ้นจากกระบวนการแปรรูปเย็นด้วยการดึงขึ้นรูปเส้นลวด



รูปที่ 4-18 : โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพแปรรูปเย็นดึงขึ้นรูปเส้นลวด 5.6%RA.

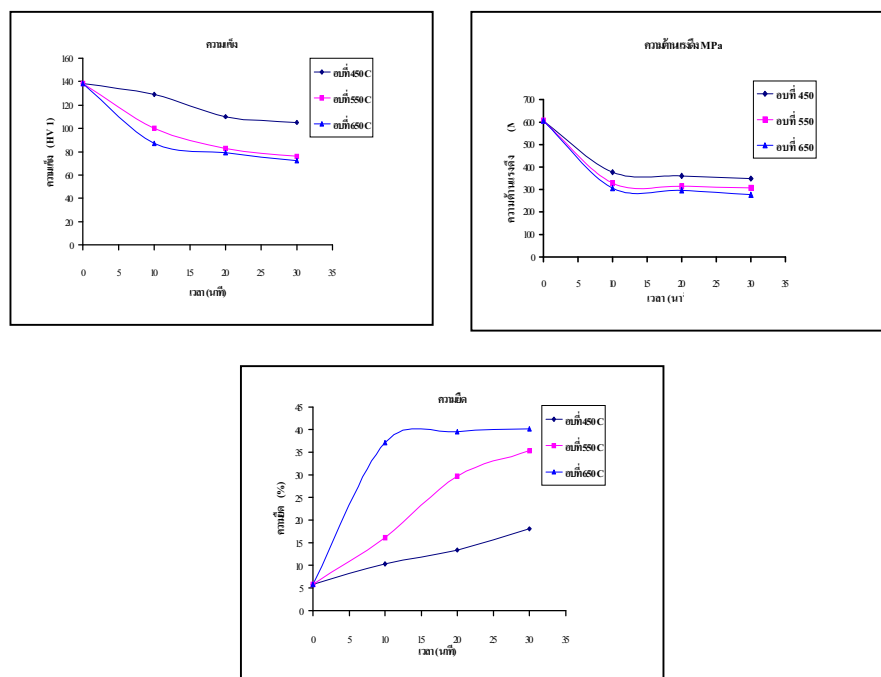
4.6 ผลการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกลโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพอบอ่อน

4.6.1 ชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบเนื้อเดียวก่อนดึงขึ้นรูปเป็นเส้นลวด ชิ้นทดสอบสภาพหลังจากผ่านการอบเนื้อเดียวและผ่านการดึงผ่านดายเป็นเส้นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม ความยาว 250 มม หรือที่ผ่านการแปรรูปเย็น 95.6%RA ของชิ้นทดสอบโลหะเงินสเตอร์ลิงที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ดังที่ได้กล่าวข้างต้น จากการนำเส้นลวดที่ผ่านการดึงผ่านดายนี้นำไปทำการทดลองอบอ่อนที่อุณหภูมิ 450°C, 550°C และ 650°C ด้วยระยะเวลาในการอบ 10, 20 และ 30 นาที เพื่อศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคที่สภาพอบอ่อน พบว่าสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลงดังต่อไปนี้

4.5.1.1 0.05%Si 0.75%Zn 5.8%Cu 93.4%Ag ผลจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4-19 ซึ่งประกอบด้วยค่าความแข็ง ความต้านแรงดึงและความยืด

เส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการอบเนื้อเดียวก่อนแปรรูปเย็น 95.6%RA. สภาพหลังจากผ่านการอบอ่อนด้วยอุณหภูมิและเวลาที่กำหนดตามวิธีการวิจัย พบว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงมีค่าความแข็ง และความต้านแรงดึงลดลง แต่ความยืดมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ถ้าสังเกตจากกราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล ดังแสดงในรูปที่ 4-19 และสามารถสรุปให้เห็นถึงลำดับขั้นการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลให้เห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ดังตารางที่ 4-9 นอกจากนี้โครงสร้างจุลภาคยังเกิดการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในอบด้วยเช่นกัน

เมื่อทำการศึกษาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นลวดพบว่า เมื่อโลหะได้รับความร้อนเนื้อโลหะเริ่มคลายความเครียดที่เกิดขึ้นภายในจากการแปรรูปเย็น ซึ่งมีผลทำให้ค่าความแข็ง ความต้านแรงดึงลดลงและมีผลทำให้เส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสามารถยืดตัวได้เพิ่มขึ้น จากกราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงรูปที่ 4-19 แสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิ 650°C เวลาอบ 30 นาที เส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงมีค่าความแข็ง ความต้านแรงดึงต่ำที่สุดและมีค่าความยืดสูงสุด เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของเส้นโลหะเงินสเตอร์ลิงประกอบการวิเคราะห์พบว่า โครงสร้างจุลภาคที่มีลักษณะเป็นเกรนยาวหรือที่เรียกว่าอีลองเกชันเกรน (Elongation Grain) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแปรรูปเย็นด้วยการดึงขึ้นรูปเส้นลวดจะค่อยๆ ถูกจัดออก เริ่มเกิดการก่อผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 650°C เวลาอบ 30 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4-20



รูปที่ 4-19 : กราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพผ่านการอบเนื้อเดียวและผ่านการดึงเป็นเส้นลวด 0.05%Si 0.75%Zn 5.8%Cu 93.4%Ag หลังจากผ่านการอบอ่อน

ตารางที่ 4-9 : สมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลงของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพผ่านการอบเนื้อเดียว และผ่านการดึงเป็นเส้นลวด 0.05%Si 0.75%Zn 5.8%Cu 93.4%Ag หลังจากผ่านการอบอ่อนด้วยอุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

เวลาอบ (นาท)	ความแข็ง (HV1) อุณหภูมิอบ (°C)			ความต้านแรงดึง (Mpa) อุณหภูมิอบ (°C)			ความยืด (%) อุณหภูมิอบ (°C)		
	450	550	650	450	550	650	450	550	650
0	138.3	138.3	138.3	606.0	606.0	606.0	5.8	5.8	5.8
10	129.0	100.0	87.0	377.3	329.0	306.8	10.4	16.1	37.0
20	110.0	83.0	79.0	360.8	314.8	297.0	13.4	29.7	39.5
30	105.0	76.0	72.4	349.6	307.9	277.0	18.0	35.4	40.2



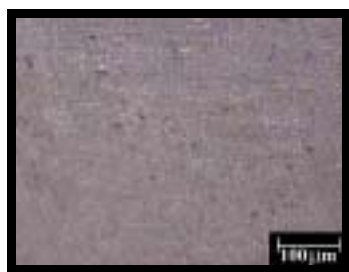
ก) อบที่ 450°C 10 นาที (10x)



ข) อบที่ 450°C 20 นาที (10x)



ค) อบที่ 450°C 30 นาที (10x)



ง) อบที่ 550°C 10 นาที (10x)



จ) อบที่ 550°C 20 นาที (10x)



ฉ) อบที่ 550°C 30 นาที (10x)



ช) อบที่ 650°C 10 นาที (10x)



ซ) อบที่ 650°C 20 นาที (10x)

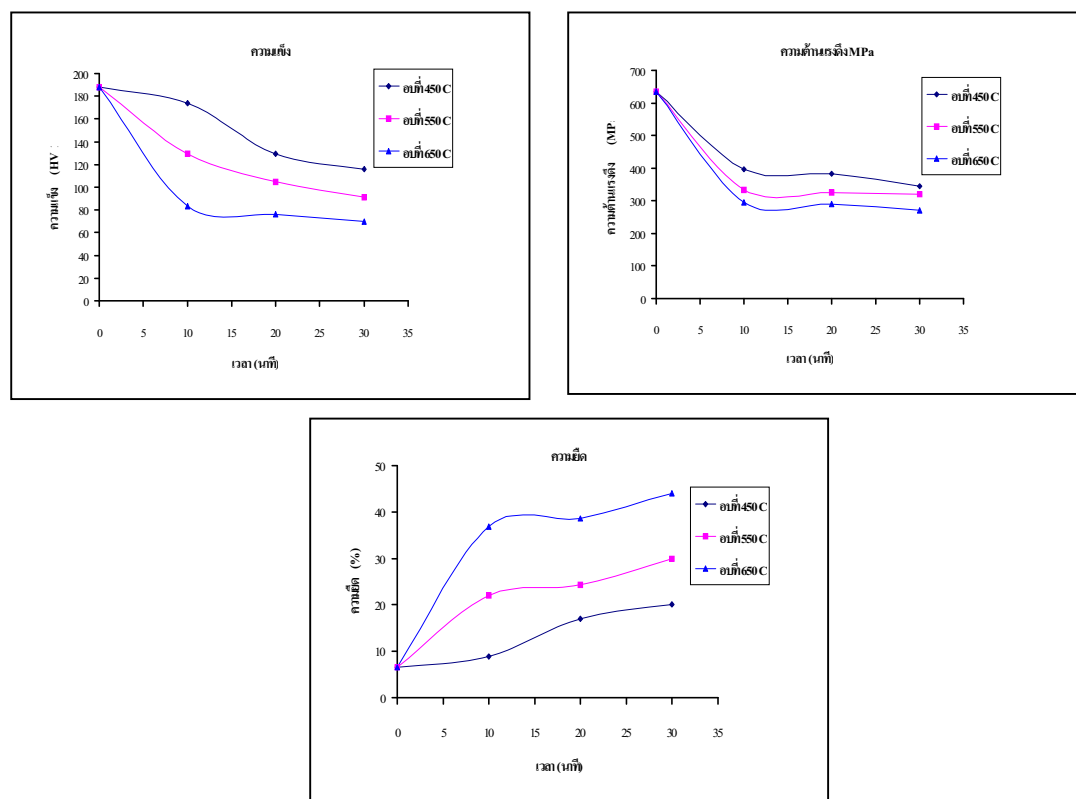


ฌ) อบที่ 650°C 30 นาที (10x)

รูปที่ 4-20 : โครงสร้างจุลภาคของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพผ่านการอบเนื้อเดียวและผ่านการดึงเป็นเส้นลวด 0.05%Si 0.75%Zn 5.8%Cu 93.4%Ag หลังจากผ่านการอบอ่อน

4.6.1.2 0.09%Si 1.3%Zn 5.9%Cu 92.7%Ag ผลจากการวิเคราะห์ทดสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 21 ซึ่งประกอบด้วยค่าความแข็ง ความต้านแรงดึง และความยืด

เส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการอบเนื้อเดียวก่อนแปรรูปเย็น 95.6%RA. สภาพหลังจากผ่านการอบอ่อนด้วยอุณหภูมิและเวลาที่กำหนดตามวิธีการวิจัย พบว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงมีค่าความแข็งและความต้านแรงดึงลดลง แต่ความยืดมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ถ้าสังเกตจากกราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล ดังแสดงในรูปที่ 4-21 และสามารถสรุปให้เห็นถึงลำดับขั้นการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลให้เห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นดังตารางที่ 4-10 นอกจากนี้โครงสร้างจุลภาคยังเกิดการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในอบด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4-21 : กราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิง
สภาพผ่านการอบเนื้อเดียวและผ่านการดึงเป็นเส้นลวด 0.09%Si 1.3%Zn
5.9%Cu 92.7%Ag หลังจากผ่านการอบอ่อน

ตารางที่ 4-10 : สมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลงของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิง สภาพผ่านการอบเนื้อเดียวและการดิ่งเป็นเส้นลวด 0.09%Si 1.3%Zn 5.9%Cu 92.7%Ag หลังจากผ่านการอบอ่อนด้วยอุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

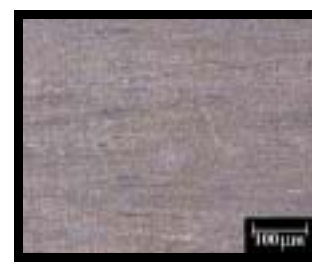
เวลาอบ (นาที)	ความแข็ง (HV1) อุณหภูมิอบ (°C)			ความต้านแรงดึง (Mpa) อุณหภูมิอบ (°C)			ความยืด (%) อุณหภูมิอบ (°C)		
	450	550	650	450	550	650	450	550	650
0	188.3	188.3	188.3	633.7	633.7	633.7	6.6	6.6	6.6
10	174.0	129.0	83.0	397.8	332.5	295.8	6.6	22.0	36.9
20	129.0	105.0	76.0	382.1	325.2	291.0	8.9	24.3	38.5
30	116.0	91.0	70.0	345.6	320.2	270.5	17.0	29.9	43.9



ก) อบที่ 450°C 10 นาที (10x)



ข) อบที่ 450°C 20 นาที (10x)



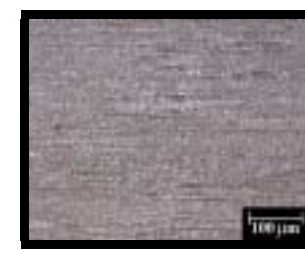
ค) อบที่ 450°C 30 นาที (10x)



ง) อบที่ 550°C 10 นาที (10x)



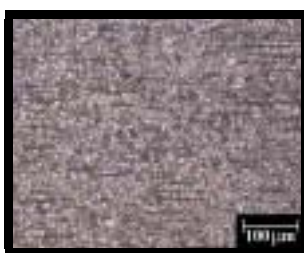
จ) อบที่ 550°C 20 นาที (10x)



ฉ) อบที่ 550°C 30 นาที (10x)



ช) อบที่ 650°C 10 นาที (10x)



ซ) อบที่ 650°C 20 นาที (10x)



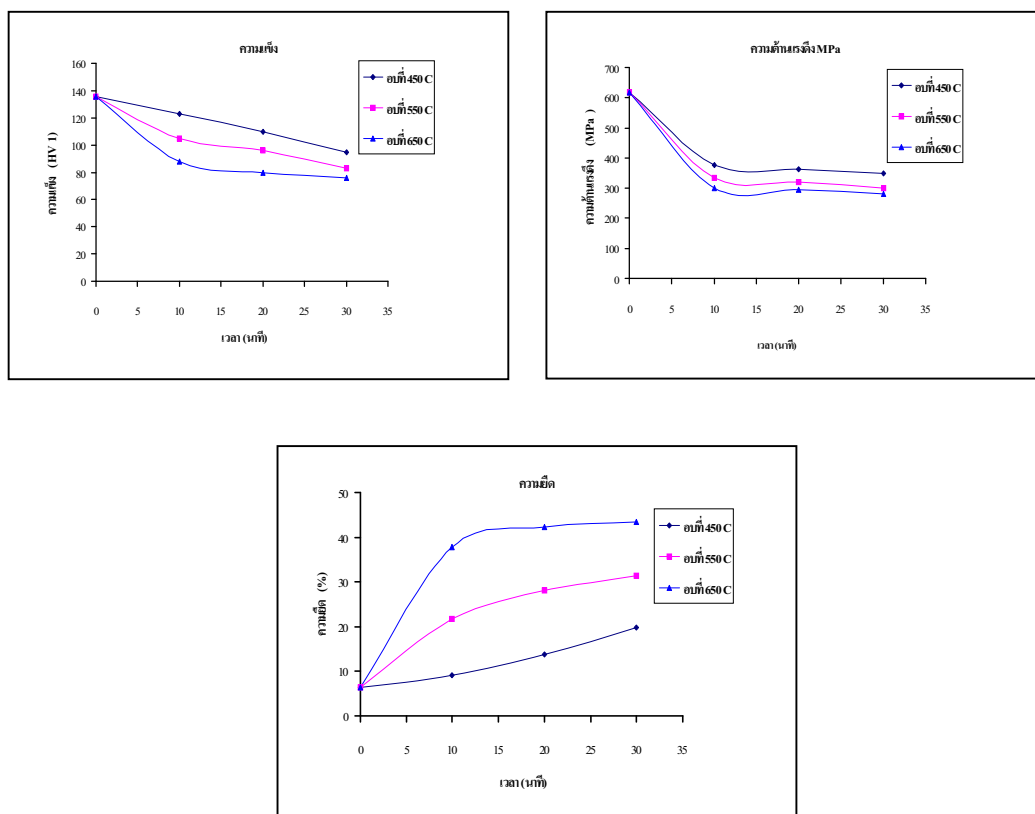
ฌ) อบที่ 650°C 30 นาที (10x)

รูปที่ 4-22 : โครงสร้างจุลภาคของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพผ่านการอบเนื้อเดียวและ

ผ่านการดิ่งเป็นเส้นลวด 0.09%Si 1.3%Zn 5.9%Cu 92.7%Ag หลังจากผ่านการอบอ่อน

เมื่อทำการศึกษาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นลวดพบว่า เมื่อโลหะได้รับความร้อนเนื้อโลหะเริ่มคลายความเครียดที่เกิดขึ้นภายในจากการแปรรูปเย็น ซึ่งมีผลทำให้ค่าความแข็งแรง ความต้านแรงดึงลดลงและมีผลทำให้เส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสามารถยืดตัวได้เพิ่มขึ้น จากกราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงดังรูปที่ 4-21 แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 650°C เวลาอบ 30 นาที เส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงมีค่าความแข็งแรง ความต้านแรงดึงต่ำที่สุดและมีค่าความยืดสูงสุด เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงประกอบการวิเคราะห์ พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่มีลักษณะเป็นเกรนยาวหรือที่เรียกว่าอีลองเกชันเกรน (Elongation Grain) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแปรรูปเย็นด้วยการดึงขึ้นรูปเส้นลวดจะค่อยๆ ถูกขจัดออกเริ่มเกิดการก่อผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 650°C เวลาอบ 20 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4-22

4.6.1.3 0.1%Si 1.0%Zn 5.1%Cu 93.8%Ag ผลจากการวิเคราะห์ทดสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4-23 ซึ่งประกอบด้วยค่าความแข็งแรง ความต้านแรงดึงและความยืด



รูปที่ 4-23 : กราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพผ่านการอบเนื้อเดียวและผ่านการดึงเป็นเส้นลวด 0.1%Si 1.0%Zn 5.1%Cu 93.8%Ag หลังจากผ่านการอบอ่อน

ตารางที่ 4-11 : สมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลงของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิง สภาพผ่านการอบเนื้อเดียวและผ่านการดึงเป็นเส้นลวด 0.1%Si 1.0%Zn 5.1%Cu 93.8%Ag หลังจากผ่านการอบอ่อนด้วยอุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

เวลาอบ (นาท)	ความแข็ง (HV1) อุณหภูมิอบ (°C)			ความต้านแรงดึง (Mpa) อุณหภูมิอบ (°C)			ความยืด (%) อุณหภูมิอบ (°C)		
	450	550	650	450	550	650	450	550	650
0	135.7	135.7	135.7	616.9	616.9	616.9	6.3	6.3	6.3
10	123.0	105.0	88.0	377.8	334.4	301.7	9.0	21.7	37.8
20	110.0	96.0	80.0	363.4	321.4	295.0	13.7	28.0	42.3
30	95.0	83.0	76.0	348.0	301.4	281.2	19.7	31.5	43.4



ก) อบที่ 450°C 10 นาที (10x)



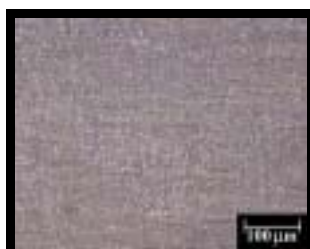
ข) อบที่ 450°C 20 นาที (10x)



ค) อบที่ 450°C 30 นาที (10x)



ง) อบที่ 550°C 10 นาที (10x)



จ) อบที่ 550°C 20 นาที (10x)



ฉ) อบที่ 550°C 30 นาที (10x)



ช) อบที่ 650°C 10 นาที (10x)



ซ) อบที่ 650°C 20 นาที (10x)



ฅ) อบที่ 650°C 30 นาที (10x)

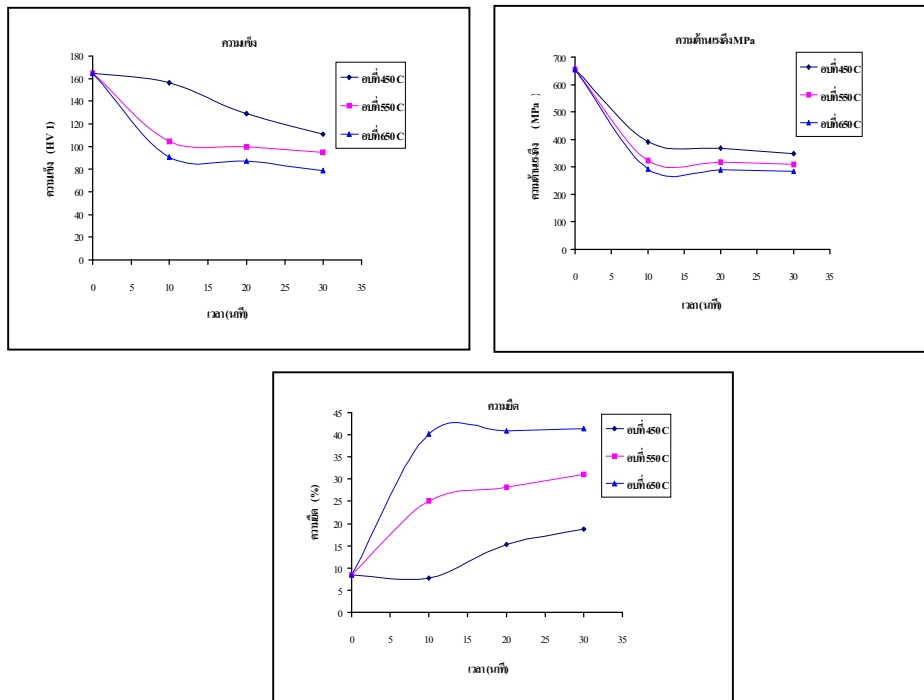
รูปที่ 4-24 : โครงสร้างจุลภาคของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพผ่านการอบเนื้อเดียวและผ่านการดึงเป็นเส้นลวด 0.1%Si 1.0%Zn 5.1%Cu 93.8%Ag หลังจากผ่านการอบอ่อน

เส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการอบเนื้อเดียวก่อนแปรรูปเย็น 95.6%RA. สภาพหลังจากผ่านการอบอ่อนด้วยอุณหภูมิและเวลาที่กำหนดตามวิธีการวิจัย พบว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงมีค่าความแข็ง และความต้านแรงดึงลดลง แต่ความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ถ้าสังเกตจากกราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล ดังแสดงในรูปที่ 4-23 และสามารถสรุปให้เห็นถึงลำดับขั้นการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลให้เห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ดังตารางที่ 4-11 นอกจากนี้โครงสร้างจุลภาคยังเกิดการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในอบด้วยเช่นกัน

เมื่อทำการศึกษาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นลวดพบว่า เมื่อโลหะได้รับความร้อนเนื้อโลหะเริ่มคลายความเครียดที่เกิดขึ้นภายในจากการแปรรูปเย็น ซึ่งมีผลทำให้ค่าความแข็ง ความต้านแรงดึงลดลงและมีผลทำให้เส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสามารถยืดตัวได้เพิ่มขึ้น จากกราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงดังรูปที่ 4-23 แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 650°C เวลาอบ 30 นาที เส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงมีค่าความแข็ง ความต้านแรงดึงต่ำที่สุดและมีค่าความยืดหยุ่นสูง เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของเส้นโลหะเงินสเตอร์ลิงประกอบการวิเคราะห์ พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่มีลักษณะเป็นเกรนยาวหรือที่เรียกว่าอิลองเกรนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแปรรูปเย็นด้วยการดึงขึ้นรูปเส้นลวดจะค่อยๆ ถูกจัดออกเริ่มเกิดการก่อผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 650°C เวลาอบ 20 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4-24

4.6.1.4 0.14%Si 1.6%Zn 4.8%Cu 93.4%Ag ผลจากการวิเคราะห์ทดสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4-25 ซึ่งประกอบด้วยค่าความแข็ง ความต้านแรงดึงและความยืด

เส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการอบเนื้อเดียวก่อนแปรรูปเย็น 95.6%RA. สภาพหลังจากผ่านการอบอ่อนด้วยอุณหภูมิและเวลาที่กำหนดตามวิธีการวิจัย พบว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงมีค่าความแข็ง และความต้านแรงดึงลดลง แต่ความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ถ้าสังเกตจากกราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล ดังแสดงในรูปที่ 4-25 และสามารถสรุปให้เห็นถึงลำดับขั้นการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลให้เห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นดังตารางที่ 4-12 นอกจากนี้โครงสร้างจุลภาคยังเกิดการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในอบด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4-25 : กราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพผ่านการอบเนื้อเดียวและผ่านการดึงเป็นเส้นลวด 0.14%Si 1.6%Zn 4.8%Cu 93.4%Ag หลังจากผ่านการอบอ่อน

ตารางที่ 4-12 : สมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลงของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพผ่านการอบเนื้อเดียวและผ่านการดึงเป็นเส้นลวด 0.14%Si 1.6%Zn 4.8%Cu 93.4%Ag หลังจากผ่านการอบอ่อนด้วยอุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

เวลาอบ (นาท)	ความแข็ง (HV1) อุณหภูมิอบ (°C)			ความต้านแรงดึง (Mpa) อุณหภูมิอบ (°C)			ความยืด (%) อุณหภูมิอบ (°C)		
	450	550	650	450	550	650	450	550	650
0	164.3	164.3	164.3	654.7	654.7	654.7	8.4	8.4	8.4
10	156.0	105.0	91.0	389.6	324.0	292.3	7.7	25.2	10.3
20	129.0	100.0	87.0	368.2	318.3	288.2	15.2	28.2	40.3
30	111.0	95.0	79.0	347.8	309.7	283.0	18.7	31.1	41.4



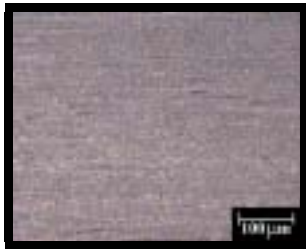
ก) อบที่ 450°C 10 นาที (10x)



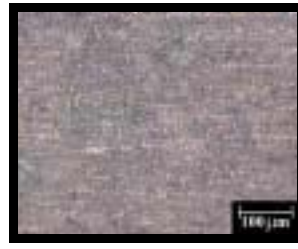
ข) อบที่ 450°C 20 นาที (10x)



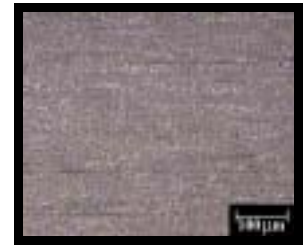
ค) อบที่ 450°C 30 นาที (10x)



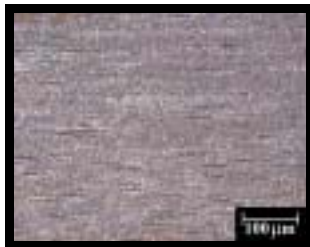
ง) อบที่ 550°C 10 นาที (10x)



จ) อบที่ 550°C 20 นาที (10x)



ฉ) อบที่ 550°C 30 นาที (10x)



ช) อบที่ 650°C 10 นาที (10x)



ซ) อบที่ 650°C 20 นาที (10x)



ฌ) อบที่ 650°C 30 นาที (10x)

รูปที่ 4-26 : โครงสร้างจุลภาคของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพผ่านการอบเนื้อเดียวและ

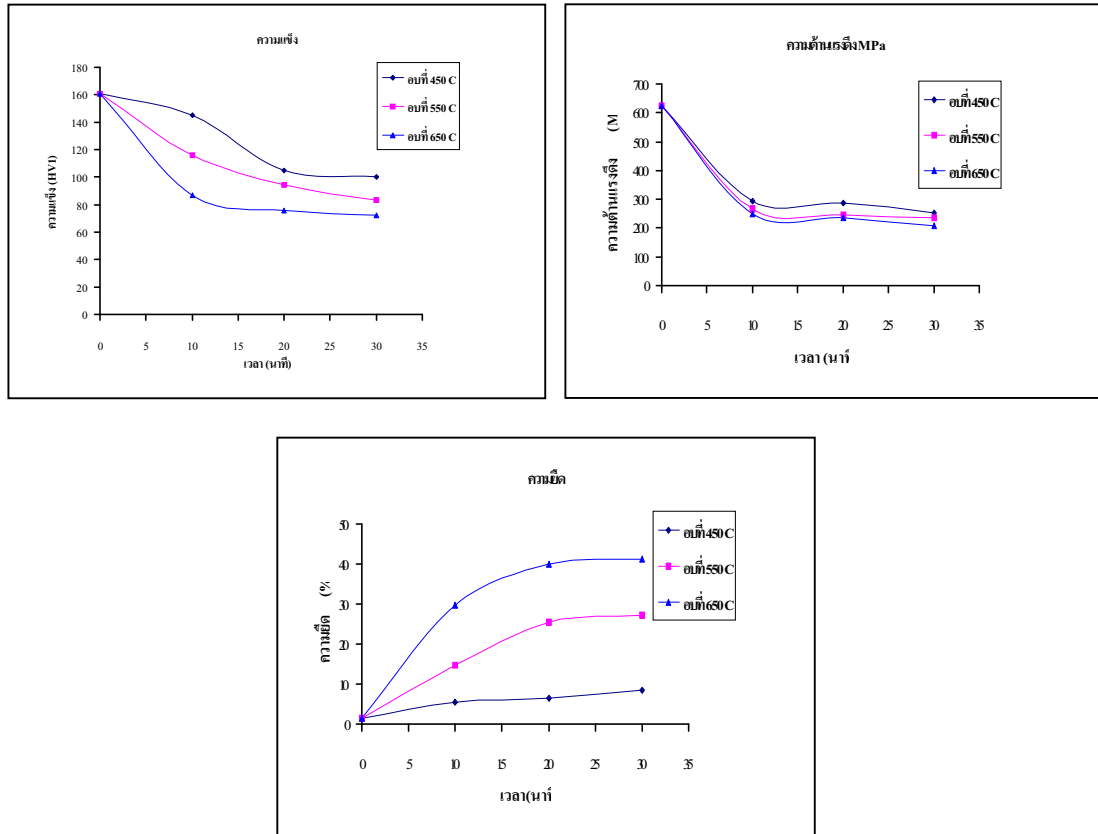
ผ่านการดึงเป็นเส้นลวด 0.14%Si 1.6%Zn 4.8%Cu 93.4%Ag หลังจากผ่านการอบอ่อน

เมื่อทำการศึกษาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นลวดพบว่า เมื่อโลหะได้รับความร้อนเนื้อโลหะเริ่มคลายความเครียดที่เกิดขึ้นภายในจากการแปรรูปเย็น ซึ่งมีผลทำให้ค่าความแข็ง ความต้านแรงดึงลดต่ำลงและมีผลทำให้เส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสามารถยืดตัวได้เพิ่มขึ้น จากกราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงดังรูปที่ 4-25 แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 650°C เวลาอบ 30 นาที เส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงมีค่าความแข็ง ความต้านแรงดึงต่ำที่สุดและมีค่าความยืดสูงสุด เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของเส้นโลหะเงินสเตอร์ลิงประกอบการวิเคราะห์ พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่มีลักษณะปั่นเกรนยาวหรือที่เรียกว่าอีลองเกรนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแปรรูปเย็นด้วยการดึงขึ้นรูปเส้นลวดจะค่อยๆ ถูกขจัดออกเริ่มเกิดการก่อผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 650°C เวลาอบ 20 นาที ดังแสดงในรูป ที่ 4-26

4.6.2 ชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านการอบเนื้อเดียวก่อนดึงขึ้นรูป ชิ้นทดสอบสภาพหล่อขึ้นรูปที่ทำการดึงผ่านคายเป็นเส้นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม ความยาว 250 มม หรือที่ผ่านการแปรรูปขึ้น 95.6%RA ของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ดังที่กล่าวทางต้น จากการนำชิ้นทดสอบที่ผ่านการดึงผ่านคาส์เหล่านี้ไปทำการทดลองอบอ่อนที่อุณหภูมิ 450°C, 550°C และ 650°C ด้วยระยะเวลาในการอบ 10, 20 และ 30 นาที พบว่าสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลงดังต่อไปนี้

4.6.2.1 0.05%Si 0.75%Zn 5.8%Cu 93.4%Ag เส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพหล่อขึ้นรูป ไม่ผ่านการอบเนื้อเดียวก่อนแปรรูปขึ้น 95.6%RA. สภาพหลังจากผ่านการอบอ่อนด้วยอุณหภูมิและเวลาที่กำหนดตามวิธีการวิจัย พบว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงมีค่าความแข็ง และความต้านแรงดึงลดลง แต่ความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ถ้าสังเกตจากกราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล ดังแสดงในรูปที่ 4-27 และสามารถสรุปให้เห็นถึงลำดับขั้นการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลให้เห็นได้ชัดยิ่งขึ้น ดังตารางที่ 4-13 นอกจากนี้ โครงสร้างจุลภาคยังเกิดการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในอบด้วยเช่นกัน

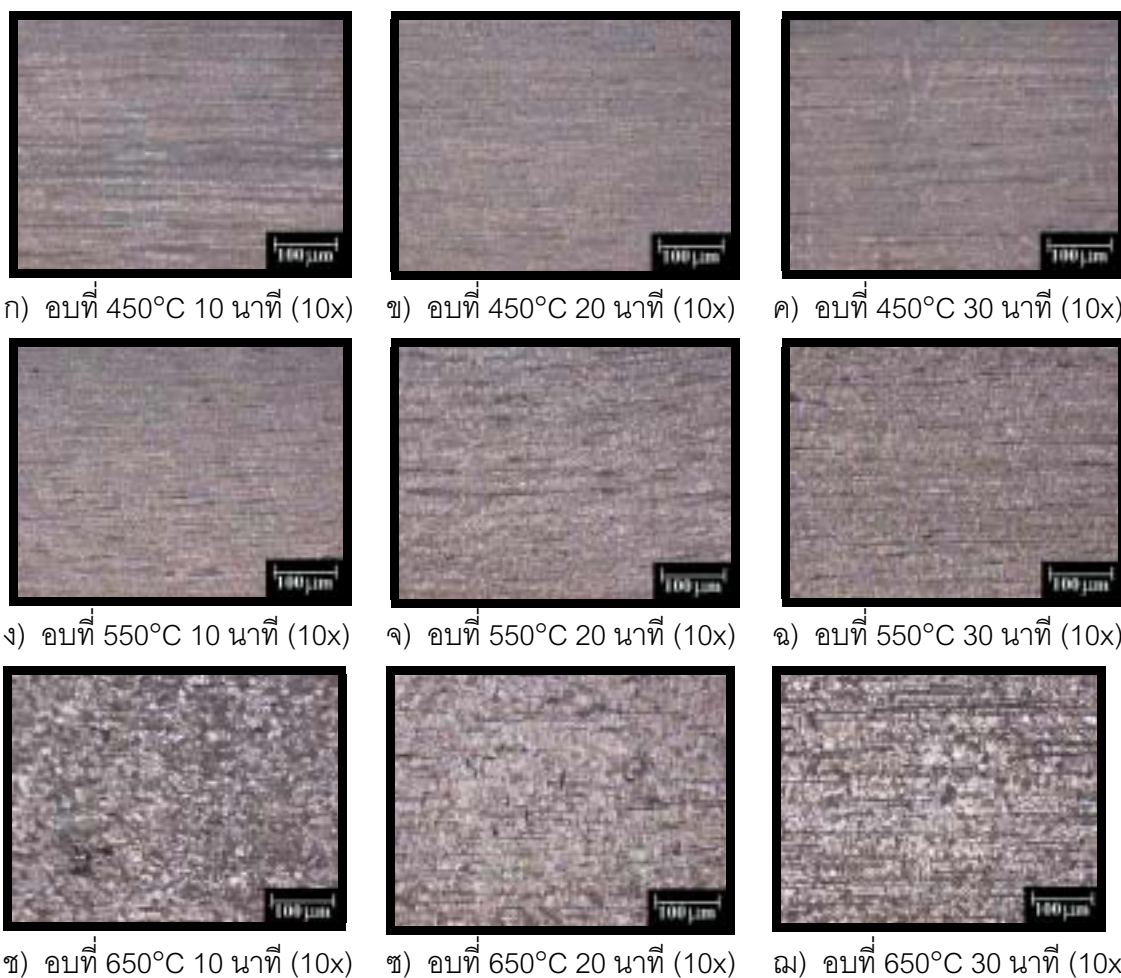
เมื่อทำการศึกษาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นลวดพบว่าเมื่อโลหะได้รับความร้อนเนื้อโลหะเริ่มคลายความเครียดที่เกิดขึ้นภายในจากการแปรรูปขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ค่าความแข็ง ความต้านแรงดึงลดต่ำลงและมีผลทำให้เส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสามารถยืดตัวได้เพิ่มขึ้น จากกราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงดังรูปที่ 4-27 แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 650°C เวลาอบ 30 นาที เส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงมีค่าความแข็ง ความต้านแรงดึงต่ำที่สุดและมีค่าความยืดหยุ่นสูงสุด เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของเส้นโลหะเงินสเตอร์ลิงประกอบการวิเคราะห์ พบว่า โครงสร้างจุลภาคที่มีลักษณะปั่นเกรนยาวหรือที่เรียกว่าอีลองเกชันเกรนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแปรรูปขึ้นด้วยการดึงขึ้นรูปเส้นลวดจะค่อยๆ ถูกขจัดออกเริ่มเกิดการก่อผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 650°C เวลาอบ 10 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4-28



รูปที่ 4-27 : กราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพหล่อขึ้นรูป
ที่ผ่านการดึงเป็นเส้นลวด 0.05%Si 0.75%Zn 5.8%Cu 93.4%Ag หลังจากผ่านการอบอ่อน

ตารางที่ 4-13 : สมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลงของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพหล่อขึ้นรูปที่ผ่าน
การดึงเป็นเส้นลวด 0.05%Si 0.75%Zn 5.8%Cu 93.4%Ag หลังจากผ่าน
การอบอ่อน ด้วยอุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

เวลาอบ (นาที)	ความแข็ง (HV1) อุณหภูมิอบ (°C)			ความต้านแรงดึง (MPa) อุณหภูมิอบ (°C)			ความยืด (%) อุณหภูมิอบ (°C)		
	450	550	650	450	550	650	450	550	650
0	161.0	161.0	161.0	625.0	625.0	625.0	1.5	1.5	1.5
10	145.0	116.0	87.0	295.0	265.0	249.0	5.6	14.6	29.8
20	105.0	94.60	76.0	286.0	246.0	236.0	6.6	25.4	39.9
30	100.0	83.1	72.4	251.0	236.0	209.0	8.4	27.3	41.2



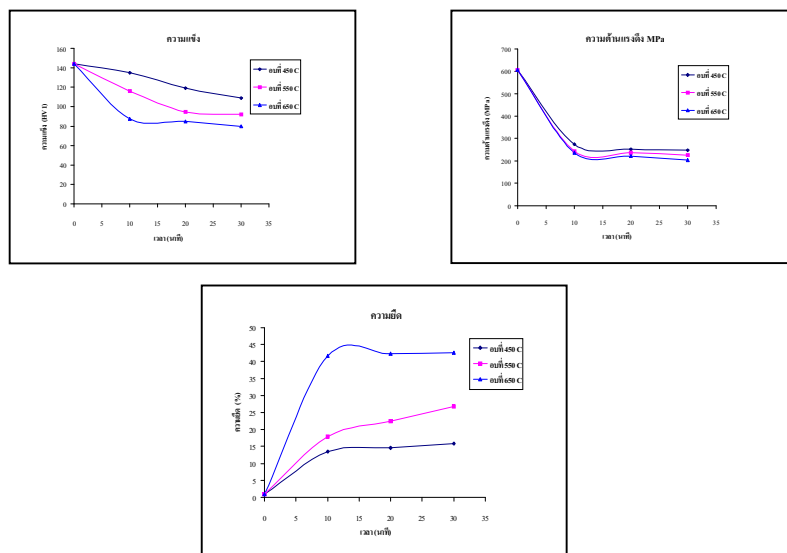
รูปที่ 4-28 : โครงสร้างจุลภาคของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพหล่อขึ้นรูปที่ผ่านการดึง

เป็นเส้นลวด 0.05%Si 0.75%Zn 5.8%Cu 93.4%Ag หลังจากผ่านการอบอ่อน

4.6.2.2 0.09%Si 1.3%Zn 5.9%Cu 92.7%Ag เส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพหล่อขึ้นรูปที่ไม่ผ่านการอบเนื้อเดียวก่อนแปรรูปเป็น 95.6%RA. สภาพหลังจากผ่านการอบอ่อนด้วยอุณหภูมิและเวลาที่กำหนดตามวิธีการวิจัย พบว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงมีค่าความแข็ง และความต้านแรงดึงลดลง แต่ความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ถ้าสังเกตจากกราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล ดังแสดงในรูปที่ 4-29 และสามารถสรุปให้เห็นถึงลำดับขั้นการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลให้เห็นได้ชัดยิ่งขึ้นดังตารางที่ 4-14 นอกจากนี้โครงสร้างจุลภาคยังเกิดการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในอบด้วยเช่นกัน

เมื่อทำการศึกษาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นลวดพบว่าเมื่อโลหะได้รับความร้อนเนื้อโลหะเริ่มคลายความเครียดที่เกิดขึ้นภายในจากการแปรรูปขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ค่าความแข็ง ความต้านแรงดึงลดต่ำลงและมีผลทำให้เส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสามารถยืดตัวได้เพิ่มขึ้น จากกราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงรูปที่ 4-29 แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ

650°C เวลาอบ 30 นาที เส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงมีค่าความแข็ง ความต้านแรงดึงต่ำที่สุดและมีค่าความยืดสูงสุด เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของเส้นโลหะเงินสเตอร์ลิงประกอบการวิเคราะห์ พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่มีลักษณะเป็นเกรนยาวหรือที่เรียกว่าอีลองเกชันเกรนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแปรรูปเย็นด้วยการดึงขึ้นรูปเส้นลวดจะค่อยๆ ถูกกำจัดออกเริ่มเกิดการก่อผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 650°C เวลาอบ 10 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4-30



รูปที่ 4-29 : กราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพหล่อขึ้นรูปที่ผ่านการดึงเป็นเส้นลวด 0.09%Si 1.3%Zn 5.9%Cu 92.7%Ag หลังจากผ่านการอบอ่อน

ตารางที่ 4-14 : สมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลงของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพหล่อขึ้นรูปที่ผ่านการดึงเป็นเส้นลวด 0.09%Si 1.3%Zn 5.9%Cu 92.7%Ag หลังจากผ่านการอบอ่อนด้วยอุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

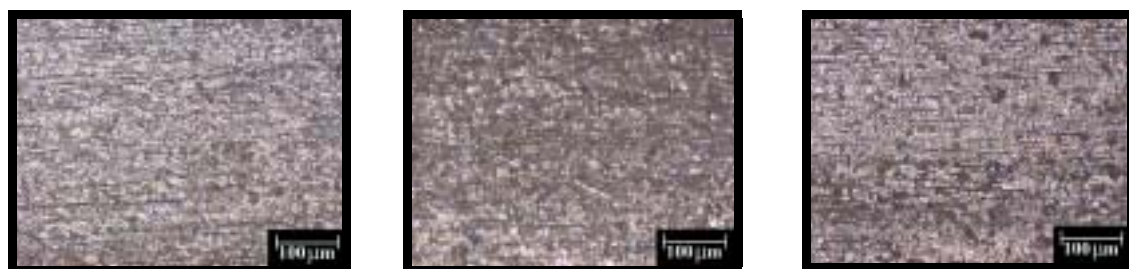
เวลาอบ (นาที)	ความแข็ง (HV1) อุณหภูมิอบ (°C)			ความต้านแรงดึง (MPa) อุณหภูมิอบ (°C)			ความยืด (%) อุณหภูมิอบ (°C)		
	450	550	650	450	550	650	450	550	650
0	144.0	144.0	144.0	605.0	605.0	605.0	1.0	1.0	1.0
10	135.0	116.0	87.2	275.0	243.0	236.0	13.5	17.9	41.6
20	119.0	94.0	84.9	252.0	236.0	221.0	14.6	22.5	42.3
30	109.0	92.0	79.8	249.0	226.0	203.0	15.9	26.8	42.7



ก) อบที่ 450°C 10 นาที (10x) ข) อบที่ 450°C 20 นาที (10x) ค) อบที่ 450°C 30 นาที (10x)



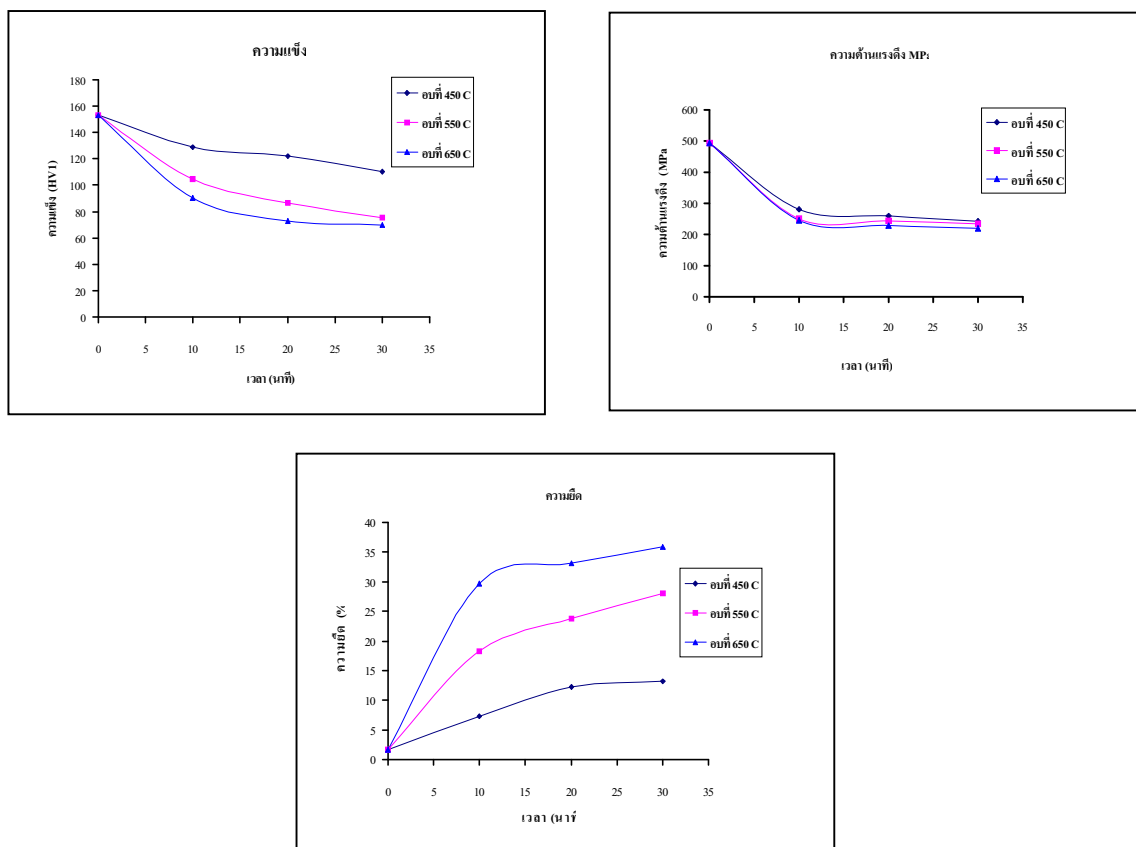
ง) อบที่ 550°C 10 นาที (10x) จ) อบที่ 550°C 20 นาที (10x) ฉ) อบที่ 550°C 30 นาที (10x)



ช) อบที่ 650°C 10 นาที (10x) ซ) อบที่ 650°C 20 นาที (10x) ฅ) อบที่ 650°C 30 นาที (10x)

รูปที่ 4-30 : โครงสร้างจุลภาคของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพหล่อขึ้นรูปที่ผ่านการดิ่งเป็น
เส้นลวด 0.09%Si 1.3%Zn 5.9%Cu 92.7%Ag หลังจากผ่านการอบอ่อน

4.6.2.3 0.1%Si 1.0%Zn 5.1%Cu 93.8%Agเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพหล่อขึ้นรูปที่ไม่ผ่านการอบเนื้อเดียวก่อนแปรรูปเย็น 95.6%RA. สภาพหลังจากผ่านการอบอ่อนด้วยอุณหภูมิและเวลาที่กำหนดตามวิธีการวิจัยพบว่า โลหะเงินสเตอร์ลิงมีค่าความแข็ง และความต้านแรงดึงลดลง แต่ความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ถ้าสังเกตจากกราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล ดังแสดงในรูปที่ 4-31 และสามารถสรุปให้เห็นถึงลำดับขั้นการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลให้เห็นได้ชัดยิ่งขึ้น ดังตารางที่ 4-15 นอกจากนี้โครงสร้างจุลภาคยังเกิดการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในอบด้วยเช่นกัน

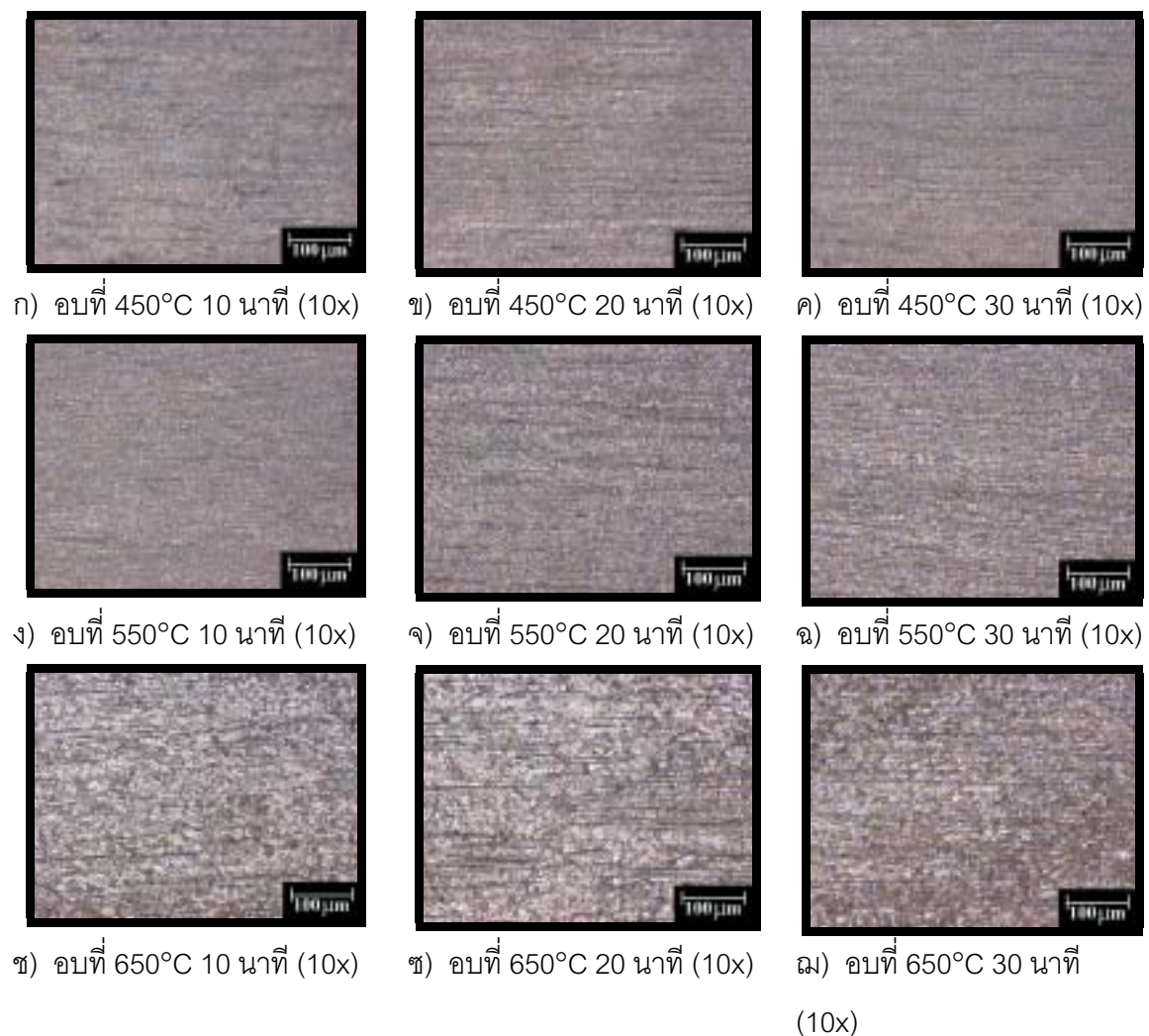


รูปที่ 4-31 : กราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพหล่อขึ้นรูปที่ผ่านการดิ่งเป็นเส้นลวด 0.1%Si 1.0%Zn 5.1%Cu 93.8%Ag หลังจากผ่านการอบอ่อน

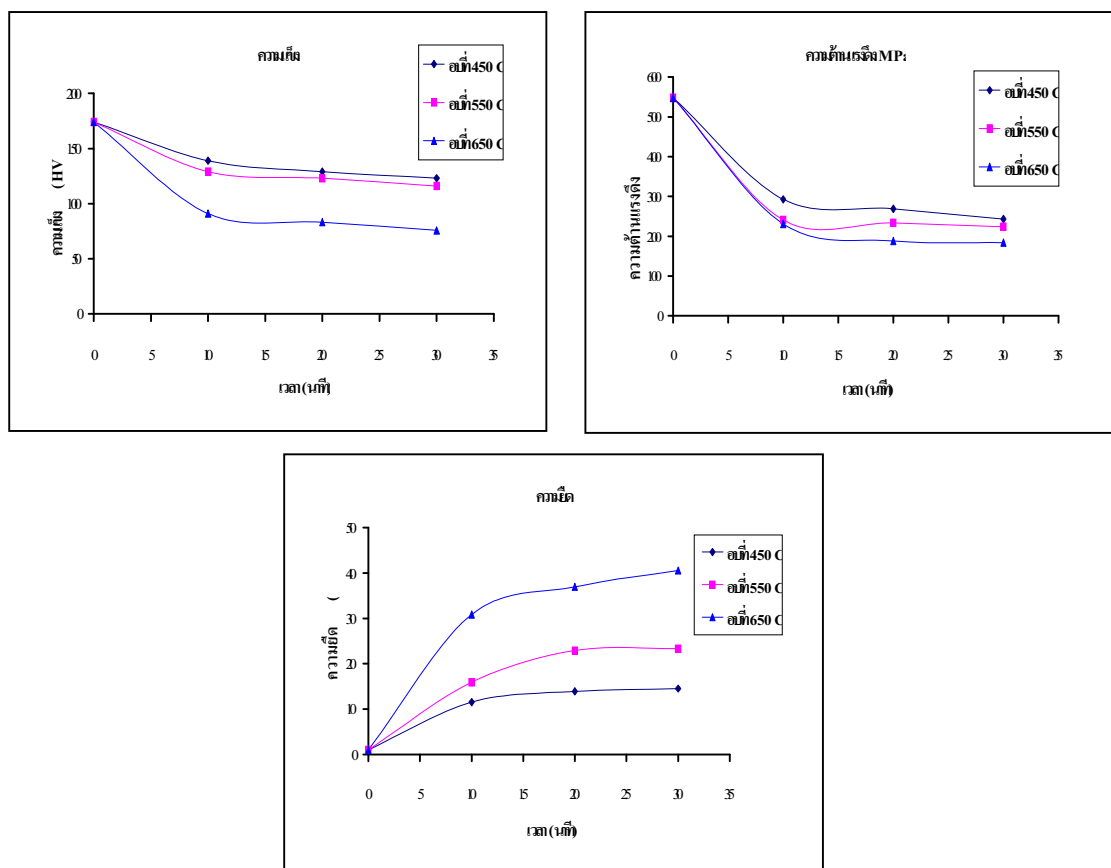
ตารางที่ 4-15 : สมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลงของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพหล่อขึ้นรูปที่ผ่านการดิ่งเป็นเส้นลวด 0.1%Si 1.0%Zn 5.1%Cu 93.8%Ag หลังจากผ่านการอบอ่อนด้วยอุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

เวลาอบ (นาที)	ความแข็ง (HV1) อุณหภูมิอบ (°C)			ความต้านแรงดึง (MPa) อุณหภูมิอบ (°C)			ความยืด (%) อุณหภูมิอบ (°C)		
	450	550	650	450	550	650	450	550	650
0	153.0	153.0	153.0	494.0	494.0	494.0	1.6	1.6	1.6
10	129.0	104.9	90.5	281.0	251.0	246.0	7.3	18.2	19.6
20	122.0	86.5	73.0	260.0	244.0	229.0	12.3	23.8	33.0
30	110.0	75.4	70.0	243.0	235.0	220.0	13.2	18.0	35.9

เมื่อทำการศึกษาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นลวดพบว่าเมื่อโลหะได้รับความร้อนเนื้อโลหะเริ่มคลายความเครียดที่เกิดขึ้นภายในจากการแปรรูปเย็น ซึ่งมีผลทำให้ค่าความแข็ง ความต้านแรงดึงลดลงและมีผลทำให้เส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสามารถยืดตัวได้เพิ่มขึ้น จากกราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงรูปที่ 4-31 แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 650°C เวลาอบ 30 นาที เส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงมีค่าความแข็ง ความต้านแรงดึงต่ำที่สุดและมีค่าความยืดสูงสุด เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของเส้นโลหะเงินสเตอร์ลิงประกอบการวิเคราะห์ พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่มีลักษณะเป็นเกรนยาวหรือที่เรียกว่าอีลองเกชันเกรนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแปรรูปเย็นด้วยการดึงขึ้นรูปเส้นลวดจะค่อยๆ ถูกจัดออกเริ่มเกิดการก่อผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 650°C เวลาอบ 10 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4-32



รูปที่ 4-32 : โครงสร้างจุลภาคของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพหล่อขึ้นรูปที่ผ่านการดึงเป็นเส้นลวด 0.1%Si 1.0%Zn 5.1%Cu 93.8%Ag หลังจากผ่านการอบอ่อน 2.4 0.14%Si 1.6%Zn 4.8%Cu 93.4%Ag



รูปที่ 4-33 : กราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพหล่อขึ้นรูปที่ผ่านการดึงเป็นเส้นลวด 0.14%Si 1.6%Zn 4.8%Cu 93.4%Ag หลังจากผ่านการอบอ่อน

ตารางที่ 4-16 : สมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลงของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพหล่อขึ้นรูปที่ผ่านการดึงเป็นเส้นลวด 0.14%Si 1.6%Zn 4.8%Cu 93.4%Ag หลังจากผ่านการอบอ่อนด้วยอุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

เวลาอบ (นาที)	ความแข็ง (HV1) อุณหภูมิอบ (°C)			ความต้านแรงดึง (MPa) อุณหภูมิอบ (°C)			ความยืด (%) อุณหภูมิอบ (°C)		
	450	550	650	450	550	650	450	550	650
0	174.0	174.0	174.0	548.0	548.0	548.0	1.0	1.0	1.0
10	139.0	129.0	91.0	293.0	241.0	231.0	11.5	15.9	30.8
20	129.0	123.0	83.1	269.0	234.0	188.0	13.9	22.9	37.0
30	123.0	116.0	75.7	243.0	224.0	184.0	14.5	23.3	40.6



รูปที่ 4-34 : โครงสร้างจุลภาคของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพหล่อขึ้นรูปที่ผ่านการดึงเป็นเส้นลวด 0.14%Si 1.6%Zn 4.8%Cu 93.4%Ag หลังจากผ่านการอบอ่อน

เส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพหล่อขึ้นรูปที่ไม่ผ่านการอบเนื้อเดียวก่อนแปรรูปเย็น 95.6%RA. สภาพหลังจากผ่านการอบอ่อนด้วยอุณหภูมิและเวลาที่กำหนดตามวิธีการวิจัย พบว่าโลหะเงินสเตอร์ลิงมีค่าความแข็ง และความต้านแรงดึงลดลง แต่ความยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ถ้าสังเกตจากกราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล ดังแสดงในรูปที่ 4-33 และสามารถสรุปให้เห็นถึงลำดับขั้นการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลให้เห็นได้ชัดยิ่งขึ้น ดังตารางที่ 4-16 นอกจากนี้โครงสร้างจุลภาคยังเกิดการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในอบด้วยเช่นกัน

เมื่อทำการศึกษาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นลวดพบว่า เมื่อโลหะได้รับความร้อนเนื้อโลหะเริ่มคลายความเครียดที่เกิดขึ้นภายในจากการแปรรูปเย็น ซึ่งมีผลทำให้ค่าความแข็ง ความต้านแรงดึงลดต่ำลงและมีผลทำให้เส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงสามารถยืดตัวได้เพิ่มขึ้น จากกราฟการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงรูปที่ 4-33 แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 650°C

เวลาอบ 30 นาที เส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงมีค่าความแข็ง ความต้านแรงดึงต่ำที่สุดและมีค่าความยืดสูงสุด เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของเส้นโลหะเงินสเตอร์ลิงประกอบการวิเคราะห์ พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่มีลักษณะเป็นเกรนยาวหรือที่เรียกว่าอิลองเกชั่นเกรนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแปรรูปเย็นด้วยการดึงขึ้นรูปเส้นลวดจะค่อยๆ ถูกขจัดออกเริ่มเกิดการก่อผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 650°C เวลาอบ 10 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4-34

จากการทดลอง พบว่าอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนของชิ้นทดสอบที่อัตราส่วนผสมต่างๆ เมื่อกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนเท่ากันชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบเนื้อเดียวก่อนทำการแปรรูปเย็น จะใช้เวลาสำหรับการอบอ่อนมากกว่าชิ้นทดสอบสภาพหล่อขึ้นรูปที่ทำการแปรรูปเย็น ผู้วิจัยสันนิษฐานว่า ชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบเนื้อเดียวจะมีโครงสร้างจุลภาคก่อนการรีดสม่ำเสมอกว่าชิ้นทดสอบสภาพหล่อขึ้นรูป เนื่องจากจะได้เกรนที่มีขนาดใหญ่กว่า และเมื่อผ่านการแปรรูปเย็นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างน้อยกว่าทำให้ใช้ระยะเวลาสำหรับการก่อผลึกใหม่ (Recrystallization) มากกว่า

ผลการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกลโลหะเงินสเตอร์ลิงสภาพอบอ่อนพบว่า การอบอ่อนสามารถคลายความเครียดที่เกิดขึ้นภายในโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการแปรรูปเย็น ทำให้เนื้อโลหะมีค่าความแข็ง ความต้านแรงดึงลดลงและมีความยืดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โลหะเงินสเตอร์ลิงกลับมามีความเหนียวดั้งเดิมและสามารถที่จะนำไปผ่านการแปรรูปทางกลต่อไปได้อีก ผลจากการศึกษาวิเคราะห์ดังกล่าวข้างต้นสามารถใช้เป็นข้อมูลสำหรับเลือกใช้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบอ่อนโลหะเงินสเตอร์ลิงที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ได้อย่างถูกต้อง

4.7 สรุปผลการวิจัย

ตามวัตถุประสงค์ ขั้นตอน วิธีการวิจัยและผลการวิจัยที่ได้กล่าวกล่าวถึงข้างต้น สามารถสรุปผลการวิจัยที่ได้ดำเนินการดังต่อไปนี้

4.7.1 เมื่อกำหนดอุณหภูมิสำหรับการอบเนื้อเดียวคงที่ 780°C เวลาที่ใช้สำหรับการอบเนื้อเดียวที่ได้จากการประมาณการทดลองในช่วงเวลาต่างๆ สามารถแสดงให้เห็นภาพการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล ความแข็ง ความต้านแรงดึง ความยืดและขนาดเกรนในแต่ละช่วงเวลาได้อย่างชัดเจน เวลาที่ใช้ในการอบเพิ่มขึ้น โครงสร้างเดนไดรต์ที่เกิดขึ้นจากสภาพหล่อขึ้นรูปค่อยๆ ถูกขจัดออกไปทำให้โครงสร้างจุลภาคเกิดการเปลี่ยนแปลงมีความสม่ำเสมอมากขึ้น และเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบผ่านไปจนถึงช่วงระยะเวลาที่เหมาะสมโครงสร้างเดนไดรต์สามารถถูกขจัดออกได้หมดสามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค ซึ่งเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบเนื้อเดียวของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่อัตราส่วนผสมต่างๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

0.05%Si 0.75%Zn 5.8%Cu 93.4%Ag เวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบเนื้อเดียว 65 นาที

0.09%Si 1.3%Zn 5.9%Cu 92.7%Ag เวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบเนื้อเดียว 65 นาที

0.1%Si 1.0%Zn 5.1%Cu 93.8%Ag เวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบเนื้อเดียว 50 นาที

0.14%Si 1.6%Zn 4.8%Cu 93.4%Ag เวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบเนื้อเดียว 65 นาที

เวลาที่ได้จากการวิจัยของโลหะเงินสเตอร์ลิงแต่ละอัตราส่วนผสมดังกล่าวนี้ สามารถจัดโครงสร้างเดนไดรต์ให้หมดไปได้และโครงสร้างที่ไม่สม่ำเสมอของโลหะเงินสเตอร์ลิงจากสภาพหล่อขึ้นรูปก็จะมีค่าสม่ำเสมอตลอดโครงสร้าง อุณหภูมิที่ใช้สำหรับการอบเนื้อเดียวนี้นี้ ถ้าหากทำการอบนานเกินไปมีผลทำให้สมบัติทางกลลดลง เนื่อง Twin Grain ที่เกิดขึ้นในช่วงของการอบด้วยระยะเวลาที่พอเหมาะเกิดการเติบโตขยายตัวมากขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบเพิ่มมากขึ้นและส่งผลให้ขนาดเกรนเฉลี่ยมีขนาดใหญ่ขึ้น

ข้อสังเกตที่ได้จากการวิจัยพบว่า เวลาที่ได้จากการวิจัยอบเนื้อเดียวนี้นี้มีค่าเท่ากันเกือบทุกอัตราส่วนผสมด้วยระยะเวลาในการอบ 65 นาที ยกเว้น 0.1%Si 1.0%Zn 5.1%Cu 93.8%Ag ที่ใช้เวลาเพียง 50 นาที จากผลการวิจัยสันนิษฐานได้ว่าเวลาที่แตกต่างกันนี้อาจเกิดจากความเบี่ยงเบนของผลการทดลองและการที่ผลการวิจัยออกมาเป็นเวลาเท่ากันเกิดจากการที่อัตราส่วนผสมของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ใช้ในการทดลองมีความแตกต่างกันไม่มากนัก ทั้งนี้สังเกตได้จากปริมาณของโลหะเงินบริสุทธิ์ และปริมาณของทองแดง ซึ่งทองแดงเป็นส่วนผสมหลักที่สำคัญและมีผลต่อสมบัติทางกลของโลหะเงินมากที่สุด ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบเนื้อเดียวโลหะเงินสเตอร์ลิงทุกอัตราส่วนผสมควรมีค่าเท่ากับ 65 นาที

4.7.2 การอบเพิ่มความแข็งแรงมีผลทำให้ค่าความแข็งแรง ความต้านทานแรงดึงและความยืดของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการอบเนื้อเดียวหรือที่เรียกว่า Solution Heat Treatment มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอนุภาครากตะกอนของทองแดงภายในบริเวณเกรนของโลหะเงินไปขัดขวางแนวการเคลื่อนที่ของอะตอมโลหะเงิน การอบเพิ่มความแข็งแรง ถ้าหากทำการอบด้วยอุณหภูมิสูงและใช้เวลานานเกินไปมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงและค่าความต้านทานแรงดึงลดลงจากค่าสูงสุดที่ควรจะเป็นเนื่องจากอนุภาครากตะกอนขยายตัวรวมกับอนุภาคข้างเคียงขยายตัวใหญ่ขึ้นและแยกเฟสออกมาเป็นเกรนใหม่ ทั้งนี้สามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิง ดังที่ได้แสดงไว้แล้วในผลการวิจัยบทที่ 4 และจากการวิจัยนี้ สามารถสรุปอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบเพิ่มความแข็งแรงโลหะเงินสเตอร์ลิงที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ได้ดังนี้

0.05%Si 0.75%Zn 5.8%Cu 93.4%Ag อุณหภูมิ 300°C ระยะเวลาประมาณเวลา 3 ชั่วโมง

0.09%Si 1.3%Zn 5.9%Cu 92.7%Ag อุณหภูมิ 300°C ระยะเวลาประมาณเวลา 3 ชั่วโมง

0.1%Si 1.0%Zn 5.1%Cu 93.8%Ag อุณหภูมิ 300°C ระยะเวลาประมาณเวลา 2-3 ชั่วโมง

0.14%Si 1.6%Zn 4.8%Cu 93.4%Ag อุณหภูมิ 300°C ระยะเวลาประมาณเวลา 2-3 ชั่วโมง

ข้อสังเกตที่ได้จากการวิจัยพบว่า เวลาที่ได้จากการวิจัยอบเพิ่มความแข็งแรงมีค่าใกล้เคียงเกือบทุกอัตราส่วนผสม จากผลการวิจัยสันนิษฐานได้ว่าเกิดจากการที่อัตราส่วนผสมของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ใช้ในการทดลองมีความแตกต่างกันไม่มากนัก ทั้งนี้สังเกตได้จากปริมาณของโลหะเงินบริสุทธิ์และ

ปริมาณของทองแดง ซึ่งทองแดงเป็นส่วนผสมหลักที่สำคัญและมีผลต่อสมบัติทางกลและการเกิดอนุภาคการตกตะกอนของโลหะเงินมากที่สุด ดังนั้นอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบเพิ่มความแข็งแรงโลหะเงินสเตอร์ลิงทุกอัตราส่วนผสมควรอบที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

4.7.3 โลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปเส้นลวดแปรรูปเย็น 95.6%RA. เมื่อนำมาทำการอบอ่อนมีผลทำให้ค่าความแข็งแรง ความต้านแรงดึงลดต่ำลงและค่าความยืดเพิ่มขึ้น เนื่องจากโลหะเงินสเตอร์ลิงมีการคลายความเครียดภายในที่เกิดขึ้นจากกระบวนการดึงขึ้นรูปและมีการตกผลึกใหม่เกิดขึ้น

จากการวิจัยเปรียบเทียบการอบอ่อนเส้นลวดโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านกระบวนการหล่อขึ้นรูปและอบเนื้อเดียวก่อนดึงขึ้นรูปเส้นลวดกับเส้นลวดที่ไม่ผ่านกระบวนการอบเนื้อเดียวก่อนดึงขึ้นรูปเส้นลวดทุกๆ อัตราส่วนผสม โดยกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อน 650°C เท่ากันพบว่า เส้นลวดที่ไม่ผ่านกระบวนการอบเนื้อเดียวจะใช้เวลาสำหรับเริ่มมีการตกผลึกใหม่ด้วยระยะเวลาในการอบ 10 นาที ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคดังที่ได้แสดงไว้แล้วในผลการวิจัย สำหรับเส้นลวดที่ผ่านกระบวนการอบเนื้อเดียวก่อนดึงขึ้นรูปใช้เวลาสำหรับเริ่มมีการตกผลึกใหม่ด้วยระยะเวลาในการอบ 30 นาที เนื่องจากเส้นลวดที่ไม่ผ่านกระบวนการอบเนื้อเดียวเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในจากกระบวนการดึงขึ้นรูปเป็นเส้นลวดมากกว่าเส้นที่ผ่านการอบเนื้อเดียว ทั้งนี้สังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นหลังจากการผ่านการอบอ่อน การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่ผ่านการอบอ่อนเป็นจริงตามทฤษฎีที่ได้ไว้ ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบอ่อนควรใช้เวลาประมาณ 10 นาที สำหรับเส้นลวดที่ไม่ผ่านการอบเนื้อเดียวก่อนดึงขึ้นรูปเส้นลวด และเวลา 30 นาทีสำหรับเส้นลวดที่ผ่านการอบเนื้อเดียวก่อนดึงขึ้นรูป

4.8 ข้อเสนอแนะ

4.8.1 จากการผลการทดลองที่กล่าวข้างต้นระยะเวลาที่ใช้สำหรับการอบเนื้อเดียวเป็นระยะเวลาที่ได้จากการทดลองแบ่งออกเป็นหลายช่วง เนื่องจากไม่สามารถคำนวณหาระยะเวลาสำหรับการอบเนื้อเดียวที่เหมาะสมได้

4.8.2 ระยะเวลาที่ใช้สำหรับการอบเนื้อเดียวอาจมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่กำหนดนี้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความควบคุมตัวแปรต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ส่วนผสมของโลหะเงินสเตอร์ลิง
- อุณหภูมิที่ใช้ในการอบเนื้อเดียว
- การเตรียมตัวอย่างชิ้นทดสอบ ซึ่งประกอบไปด้วยอุณหภูมินำโลหะก่อนเหยียงเข้าโพรงแบบ อุณหภูมิของแบบปูนหล่อ ระยะเวลาการปล่อยให้โลหะเย็นตัวก่อนจุ่มน้ำเพื่อล้างปูนทำแบบหล่อ
- การควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ

- เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกล

4.8.3 ระยะเวลาที่ใช้สำหรับการอบเพิ่มความแข็งแรงอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่กำหนดขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการควบคุมคุณภาพการอบเนื้อเดียวและการเลือกใช้อุณหภูมิสำหรับการอบเพิ่มความแข็งแรง

4.8.4 การอบอ่อน ถ้าหากทำการอบอ่อนตามอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองด้วยระยะเวลานานเกินกว่ากำหนดอาจมีผลทำให้โลหะเงินสเตอร์ลิงมีสมบัติทางกลลดลงต่ำกว่าที่ควรจะเป็น เนื่องจากอาจได้เกรนหยาบเกิดขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม. มอก. 21-2515 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเครื่องเงิน. กรุงเทพมหานคร : กระทรวงอุตสาหกรรม, 2515.
2. Dave Schneller. The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. Santa Fe, New Mexico, 1995.
3. ศูนย์วิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, เอกสารสัมมนาทางวิชาการ. คุณสมบัติของโลหะมีค่าสำหรับอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541
4. Allison Butts. Silver Economics, Metallurgy and Use. D. Van Nostrand Company, Inc., 1967.
5. Gven Beck. Edelmetall -Taschenbuch. Degussa AG, Frankfurt Huething, 1995.
6. Mark F. Grimwade. "Basic Metallurgy for Goldsmiths : Working and Annealing". Journal Gold Technology. Issue No.2. (June 1990) : P 17 – 20
7. Dave Schneller. The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. Santa Fe, New Maxisco, 1987.
8. Askeland, Donal R. The Science and Engineering of Materials., Third S.I. Edition, Chappman & Hall, 1996.
9. Eric A Brandes. Smithells Metal Reference Book. 6 th England : Butterworth & Co (Pulishers) Ltd. 1983.
10. ASM Handbook Committee. Metals Handbook . 8th Edition. The American Society for Metals, 1973.
11. Japanese Standard Association. JIS Handbook 1995 Ferrous Material & Metallurgy I. Minato-ku Tokyo, 107 JAPAN, 1995.

บทที่ 5

ความต้านทานความหมองของโลหะเงินสเตอร์ลิง (Tarnish Resistance of Sterling Silver)

5.1 ความต้านทานการหมองของโลหะเงินสเตอร์ลิง

5.1.1 สถานะของปัญหา

เครื่องประดับที่ทำจากโลหะเงินสเตอร์ลิงได้รับความนิยมมาก เป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญ ทั้งนี้เนื่องจาก เป็นเครื่องประดับที่สวยงาม และราคาถูก เมื่อเทียบกับเครื่องประดับที่ทำจากทอง แต่ปัญหาที่มักเกิดกับเครื่องประดับที่ทำจากเงิน คือ ความหมอง ความหมองของเงินนี้ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เมื่อโลหะเงินสัมผัสกับบรรยากาศที่มีซัลเฟอร์ จะทำให้เงินหมองลง ซึ่งปริมาณซัลเฟอร์ยิ่งมาก เงินยิ่งหมองได้เร็ว นอกจากนี้เหงื่อของผู้สวมใส่กับผลต่อความหมองของโลหะเงินสเตอร์ลิงด้วย

ดังนั้น การวิจัยนี้จะทำการศึกษาความหมองของโลหะเงินสเตอร์ลิง โดยใช้สารเคมีและเทคนิคเคมีไฟฟ้า เพื่อศึกษาความต้านทานความหมองของโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีธาตุต่างๆ ทั้งนี้เพื่อหาชนิดและปริมาณธาตุเจือที่ควรใช้เพื่อให้โลหะเงินสเตอร์ลิงที่มีความต้านทานการหมองดี

5.1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาถึงผลของธาตุเจือ กระบวนการที่กระทำกับโลหะ ที่มีผลต่อความต้านทานการหมองและความต้านทานการกัดกร่อน และเพื่อเป็นแนวทางในการทดสอบความหมองของเครื่องประดับเงินสเตอร์ลิง

5.1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ขึ้นทดสอบที่ใช้เป็นโลหะเงินสเตอร์ลิงที่มี ทองแดง, สังกะสีและซิลิกอนเป็นธาตุเจือและโลหะเงินสเตอร์ลิงสำเร็จรูป
2. ศึกษาความต้านทานการหมองของขึ้นทดสอบในข้อ 1 โดยใช้สารละลายโซเดียมซัลไฟด์และเหงื่อเทียม
3. ศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนของขึ้นทดสอบในข้อ 1 โดยเทคนิคเคมีไฟฟ้า

5.1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. หล่อขึ้นทดสอบที่มีธาตุเจือต่างๆ จำนวน 23 ส่วนผสม
2. อบขึ้นทดสอบหล่อ บางส่วนไปอบเป็นเนื้อเดียวกัน

3. แปรรูปเย็นโดยการกดอัดขึ้นทดสอบบางส่วน ให้ความหนาของชั้นทดสอบเป็น 30%, 50% และ 70% ของความหนาเดิม
4. เตรียมผิวชั้นทดสอบ
5. ทดสอบความต้านทานการหมองโดยสารเคมี ถ่ายภาพชั้นทดสอบทั้งก่อนและหลังการทดสอบ
6. ทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของชั้นทดสอบ
7. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

5.1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

ทราบถึงชนิดและปริมาณของธาตุเงินที่ทำให้โลหะเงินสเตอร์ลิงมีความต้านทานการหมองดี และเป็นแนวทางในการทดสอบความต้านทานการหมองของโลหะเงินสเตอร์ลิง

5.2 การกัดกร่อน

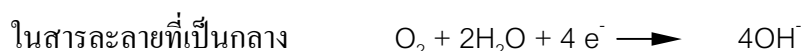
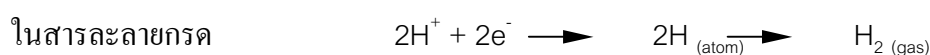
การกัดกร่อน (Corrosion) คือ การที่โลหะทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา ซึ่งต้องสูญเสียเนื้อโลหะไปด้วย ยกตัวอย่าง เช่น สนิมเหล็ก

ความหมอง (Tarnishing) คือ การที่โลหะทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมแล้วเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาแล้วติดอยู่ที่ผิว ทำให้ผิวโลหะมีสีเปลี่ยนไป เช่น ผิวของเงินที่หมองลง การกัดกร่อนจึงครอบคลุมกว้างกว่า และผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อนอาจจะหลุดร่วงไปหรือติดแน่นกับโลหะก็ได้ แต่ความหมองจะเกิดมีฟิล์มที่ผิวโลหะ

เมื่อโลหะเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อน ทำให้โลหะเปลี่ยนสภาพจากโลหะไปเป็นสารประกอบ เช่น โลหะ M เกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อน (หรือเรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน) โลหะ M นี้เป็น อาโนด (Anode)



ปฏิกิริยาออกซิเดชันมีอิเล็กตรอนเกิดขึ้น ดังนั้น ต้องมีอีกปฏิกิริยาหนึ่งที่จะนำเอาอิเล็กตรอนนี้ไปใช้ ปฏิกิริยาที่ใช้อิเล็กตรอน เรียกว่า ปฏิกิริยารีดักชัน โลหะที่มีปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นที่ผิวเรียกว่า เป็น คาโทด (Cathode) ปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นอยู่กับ pH ของสารละลาย เช่น

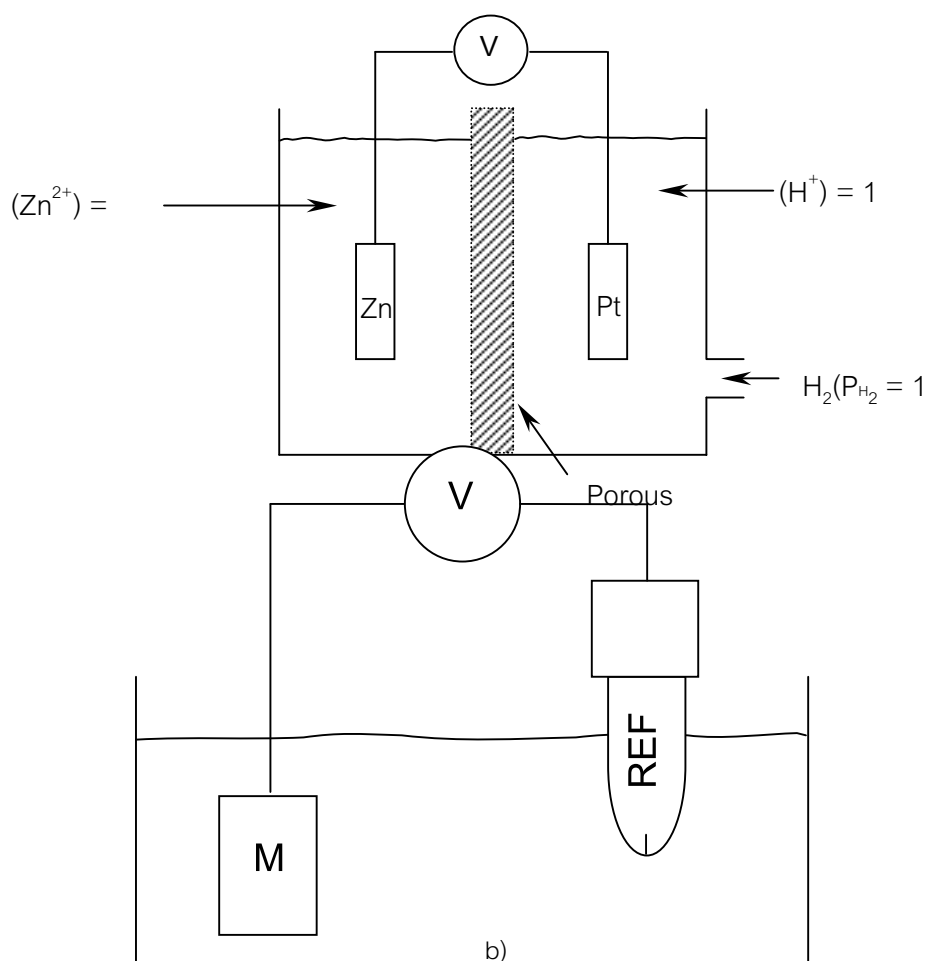


ปฏิกิริยาการกัดกร่อน มีปฏิกิริยาที่ให้และรับอิเล็กตรอน หมายความว่า มีอิเล็กตรอนไหลระหว่าง อาโนด และคาโทด หรืออีกนัยหนึ่งคือมีกระแสไฟฟ้าไหลนั่นเอง การกัดกร่อนจึงจัดว่าเป็น

ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ทำให้สามารถศึกษาพฤติกรรมของโลหะที่เกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนได้ โดยศึกษาจากค่าศักย์ไฟฟ้า, กระแส, ความเป็นกรด, ต่าง เป็นต้น

5.2.1 การกัดกร่อนของโลหะ

เมื่อโลหะและโลหะผสมอยู่ในน้ำหรือสารละลาย สามารถวัดศักย์ไฟฟ้าของโลหะ หรือโลหะผสมในสารละลายได้ ดังรูปที่ 5-1



รูปที่ 5-1 : a) การวัดศักย์ไฟฟ้าของสังกะสี (โลหะบริสุทธิ์) เมื่อวัดเทียบกับไฮโดรเจนอิเล็กโทรด
 b) การวัดศักย์ของโลหะผสมเทียบกับขั้วอ้างอิง

5.2.2 โลหะบริสุทธิ์

โลหะบริสุทธิ์ M จุ่มในสารละลายที่มีไอออนบวกของ M (M^{z+}) ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ (Molar) ที่อุณหภูมิ 25°C. สามารถวัดศักย์ไฟฟ้าเทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐาน (ไฮโดรเจนอิเล็กโทรด) ได้เป็นค่า

ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของโลหะ (E^0 - Standard electrode potential หรือ Electromotive force) มีหน่วยเป็น โวลต์ โลหะบริสุทธิ์แต่ละชนิด มีค่า E^0 เฉพาะ หากนำค่า E^0 ของโลหะบริสุทธิ์ มาเรียงจากมากไปน้อย จะได้ตารางที่ 5-1 หากโลหะมีค่า E^0 มาก (เป็นบวกมาก) โลหะจะเกิดปฏิกิริยาให้อิเล็กตรอนได้ยาก หรือเกิดจากการกัดกร่อนได้ยาก แต่ถ้าโลหะมีค่า E^0 ต่ำ (ติดลบมาก) โลหะจะเกิดปฏิกิริยาให้อิเล็กตรอนได้ง่าย หรือเกิดการกัดกร่อนได้ง่าย

ตารางที่ 5-1 : ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของโลหะบริสุทธิ์

ปฏิกิริยา	E^0 (volt)
$\text{Au}^+ + e^- = \text{Au}$	+1.68
$\text{Pt}^{2+} + 2e^- = \text{Pt}$	-1.20
$\text{Hg}^{2+} + 2e^- = \text{Hg}$	-0.85
$\text{Ag}^+ + e^- = \text{Ag}$	+0.80
$\text{Cu}^{2+} + 2e^- = \text{Cu}$	+0.34
$2\text{H}^+ + 2e^- = \text{H}_2$	0.00
$\text{Pb}^{2+} + 2e^- = \text{Pb}$	-0.13
$\text{Sn}^{2+} + 2e^- = \text{Sn}$	-0.14
$\text{Ni}^{2+} + 2e^- = \text{Ni}$	-0.25
$\text{Cd}^{2+} + 2e^- = \text{Cd}$	-0.40
$\text{Fe}^{2+} + 2e^- = \text{Fe}$	-0.44
$\text{Cr}^{3+} + 3e^- = \text{Cr}$	-0.71
$\text{Zn}^{2+} + 2e^- = \text{Zn}$	-0.76
$\text{Al}^{3+} + 3e^- = \text{Al}$	-1.67
$\text{Mg}^{2+} + 2e^- = \text{Mg}$	-2.34
$\text{Na}^+ + e^- = \text{Na}$	-2.71
$\text{Ca}^{2+} + 2e^- = \text{Ca}$	-2.87
$\text{K}^+ + e^- = \text{K}$	-2.92

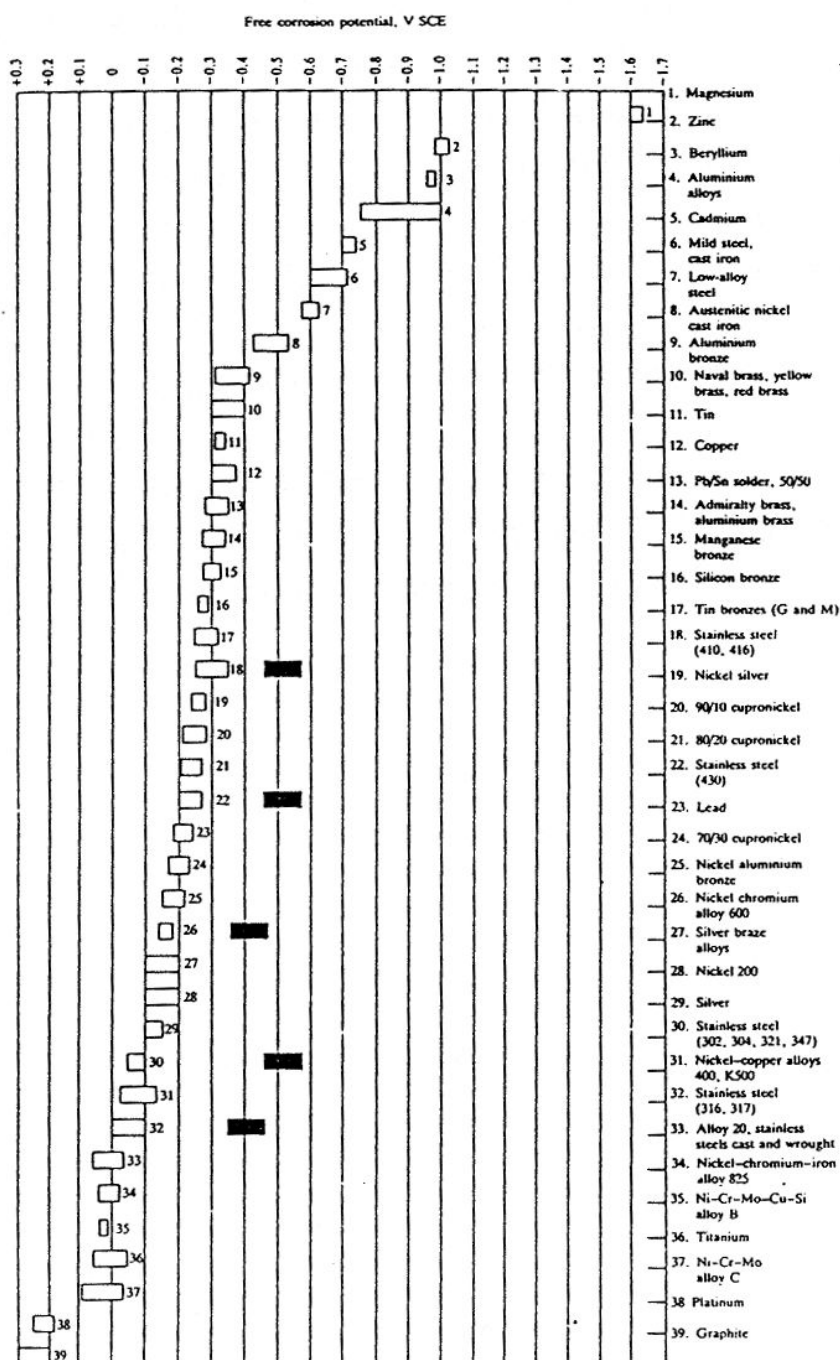
จากตารางพบว่าทองคำมีค่า E^0 สูงที่สุด $E^0_{\text{Au}} = +1.4980 \text{ V}$ และเหล็กมีค่า $E^0 = -0.440 \text{ V}$ ดังนั้นเมื่อวางเหล็กกล้าไว้ในอากาศ เหล็กเกิดสนิม แต่ทองคำไม่เกิดปฏิกิริยาแต่อย่างใด

5.2.3 โลหะผสม

โลหะผสมนั้นประกอบด้วย โลหะหลัก และธาตุเจือต่างๆ และเมื่อโลหะผสมอยู่ในน้ำหรือสารละลายใดๆ ก็สามารถวัดศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้เช่นกัน โดยวัดเทียบกับขั้วอ้างอิง (Reference electrode) ดังในรูปที่ 5-1 ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้นี้ เรียกว่าศักย์ไฟฟ้ากักร่อน (E_{corr} – Open circuit

potential หรือ Rest potential) และในทำนองเดียวกัน หากโลหะผสมมีค่า E_{corr} มาก (เป็นบวกมาก) โลหะผสมนี้จะเกิดปฏิกิริยาได้ยาก และถ้ามีค่า E_{corr} ต่ำ (ติดลบมาก) โลหะผสมถูกกัดกร่อนได้ง่าย ค่า E_{corr} ของโลหะผสมเมื่อนำมาเรียงกันตามลำดับจากมากไปน้อย จะได้เป็นตารางกัลวานิก (Galvanic series) ดังในตารางที่ 5-2

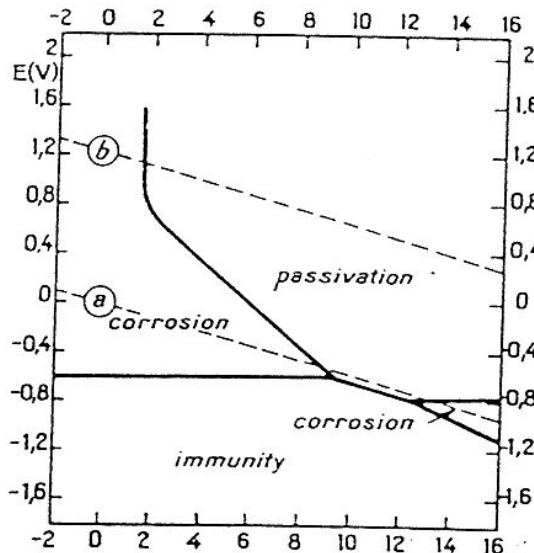
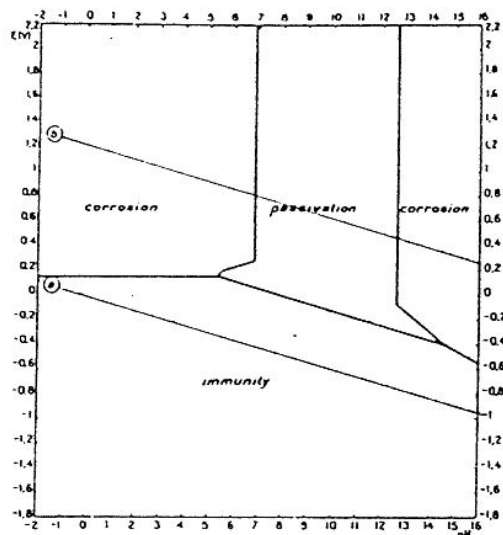
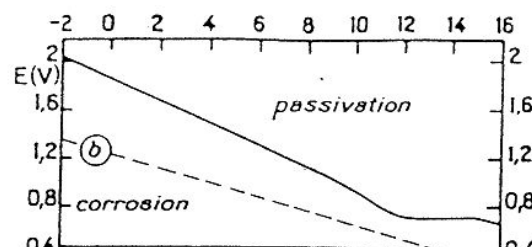
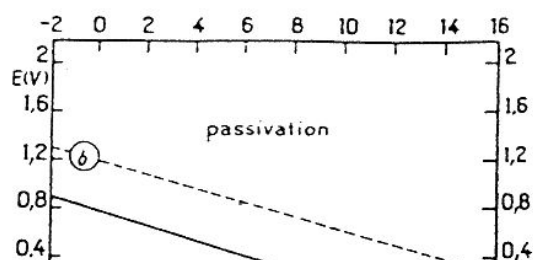
ตารางที่ 5-2 : ตารางกัลวานิกของโลหะผสม



5.2.4 โลหะที่มีฟิล์ม

โลหะหรือโลหะผสมบางชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อมเกิดเป็นฟิล์มคุณภาพดีที่ติดแน่นกับผิวโลหะ และฟิล์มนี้ปกป้องโลหะที่อยู่ภายในได้ ทำให้ปฏิกิริยาหยุดหรือช้าลงได้ เช่น เหล็กเมื่อวางไว้ในอากาศเกิดสนิม (ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้เอง) เนื่องจากเหล็กมีค่า E^0 ต่ำ ($E_{Fe}^0 = -0.440$ V) สนิมเหล็กนั้นมีรูพรุน ไม่ติดแน่น ทำให้น้ำและอากาศซึมเข้าไปทำปฏิกิริยาต่อไปได้ แต่อะลูมิเนียมมีค่า E^0 ต่ำ ($E_{Al}^0 = -1.662$ V) ซึ่งต่ำกว่าค่า E^0 ของเหล็ก หมายความว่าเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่า แต่เมื่อวางอะลูมิเนียมไว้ในบรรยากาศ จะไม่เกิดการกัดกร่อน ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่ออะลูมิเนียมเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศแล้วเกิดผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเป็นฟิล์มติดแน่นที่ผิวอะลูมิเนียม ฟิล์มนี้เป็นฟิล์มคุณภาพดี การที่จะทราบว่าโลหะมีฟิล์มหรือไม่ อาจดูได้จากแผนภูมิ ซึ่งให้ข้อมูลความสัมพันธ์พฤติกรรมของโลหะเมื่อศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป และสารละลายที่โลหะนั้นอยู่ (แผนภูมินี้เรียกว่า Pourbaix diagram หรือ E-pH diagram) ดังรูปที่ 5-3 แสดงถึงแผนภูมิ E-pH ของ โรเดียม เงิน ทองแดงและเหล็ก

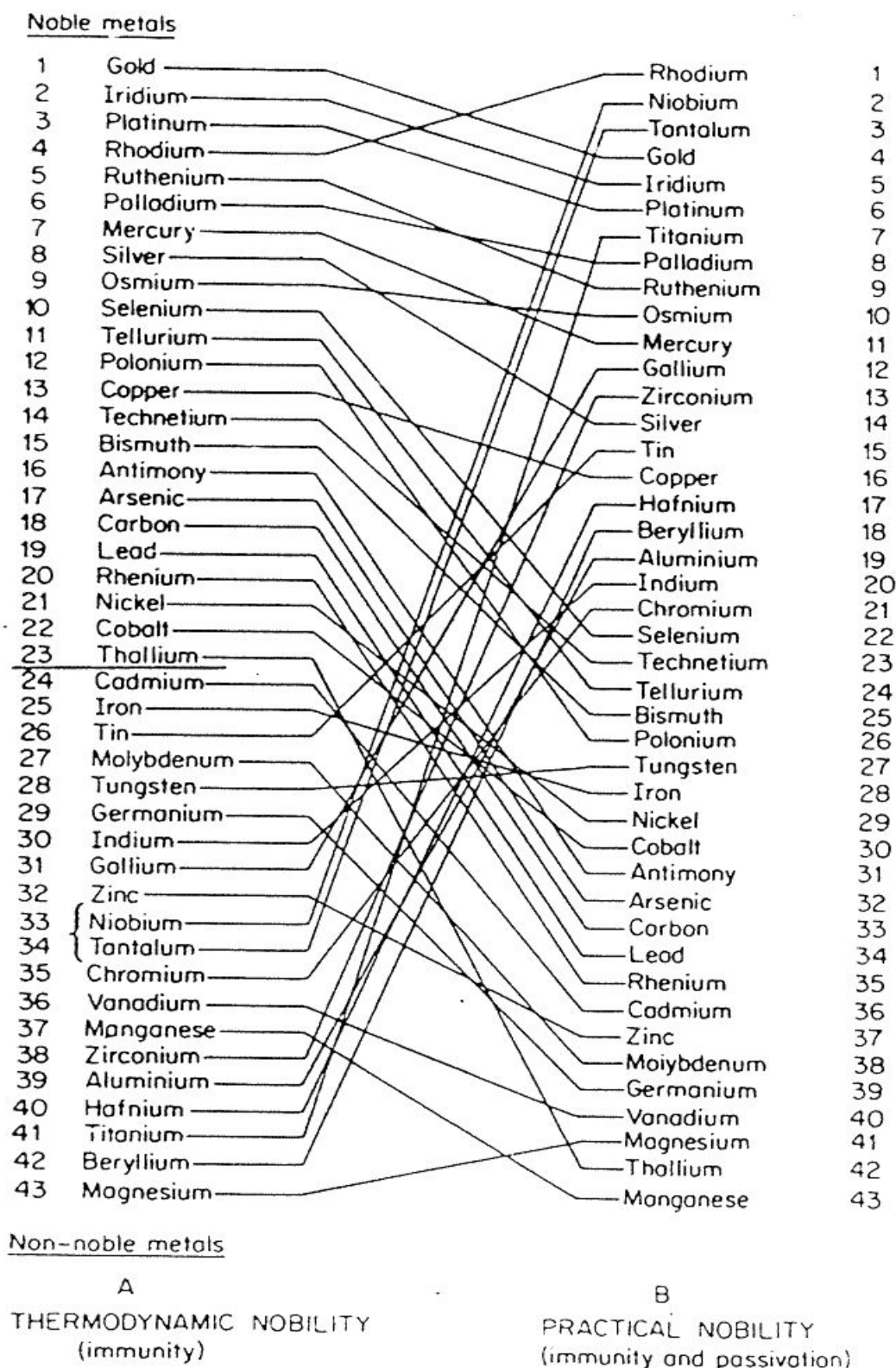
จากที่กล่าวมาแล้วเมื่อโลหะมีค่า E^0 ต่ำ เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย แต่เมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้วเกิดฟิล์มที่ผิวโลหะที่เกิดฟิล์มได้ เช่น อะลูมิเนียม โครเมียม และเหล็กกล้าไร้สนิม ทำให้โลหะชนิดเดียวกัน จะมีฟิล์มมีค่า E^0 สูงขึ้นได้ ดังแสดงในตารางที่ 5-2 ทำให้ค่า E^0 ทางทฤษฎีและทางปฏิบัติต่างกันไปบ้าง ดังแสดงในรูปที่ 5-3



c) ทองแดง

d) เหล็ก

รูปที่ 5-2 : แผนภูมิ E-pH ของโรเดียม, เงิน, ทองแดง และเหล็ก



Classification of metals and metalloids in order of nobility

รูปที่ 5- 3 : ลำดับของโลหะในทางทฤษฎี และปฏิบัติ

5.2.5 กราฟโพลาไรเซชัน (Polarization Curve)

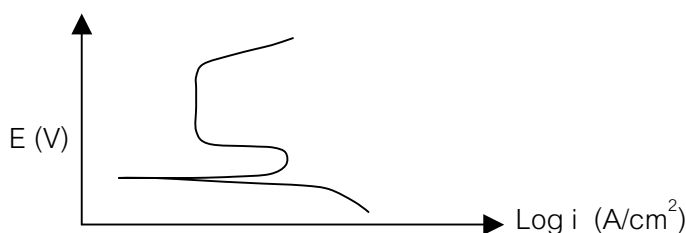
โลหะมีฟิล์มเกิดขึ้นที่ผิวหรือไม่นั้นอาจมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า หรือกล้องจุลทรรศน์ แต่สามารถทราบได้จากพฤติกรรมทางเคมีไฟฟ้าของโลหะ

เนื่องจากปฏิกิริยาการกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ดังนั้นการศึกษาการกัดกร่อนสามารถทำได้โดยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งมีหลักการคือ เมื่อโลหะอยู่ในสภาวะแวดล้อมหนึ่งๆ สามารถวัดศักย์ไฟฟ้าได้ ศักย์ไฟฟ้านี้เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (E_{corr}) ในขณะที่ผิวโลหะเกิดทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ให้อิเล็กตรอน) และปฏิกิริยารีดักชัน (รับอิเล็กตรอน) เท่ากัน หรือปฏิกิริยาอยู่ในสภาวะสมดุล ดังนั้นกระแสจะเป็น ศูนย์ เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าแก่โลหะเปรียบเหมือนโลหะอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่กัดกร่อนรุนแรงขึ้น ทำให้โลหะถูกกัดกร่อนมากขึ้น ดังนั้นปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดมากกว่าปฏิกิริยารีดักชัน จึงทำให้วัดศักย์ไฟฟ้าได้

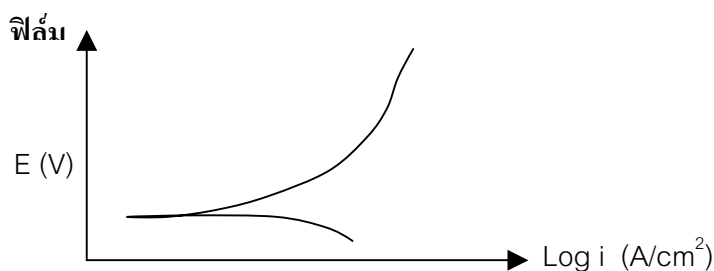
จากหลักการดังกล่าวเมื่อโลหะได้รับศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาและมีกระแสเกิดขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่อันทดสอบ และความหนาแน่นกระแสที่เกิดขึ้นนั้นเรียกว่า กราฟโพลาไรเซชัน

กราฟโพลาไรเซชันของโลหะที่สามารถเกิดฟิล์มปกป้องที่ผิวได้ เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นในช่วงศักย์ไฟฟ้าหนึ่ง การกัดกร่อนหรือกระแสไฟ ไม่ได้เพิ่มขึ้น แต่ถ้าศักย์สูงขึ้นมากเกินไป ฟิล์มก็ไม่สามารถทนต่อไปได้อีกทำให้เกิดฟิล์มแตก การกัดกร่อนเกิดมากขึ้น กระแสไฟจะสูงขึ้นมากดังรูปที่ 5-4

กราฟโพลาไรเซชันของโลหะที่ไม่สามารถเกิดฟิล์มปกป้องที่ผิวได้ เมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นการกัดกร่อนมากขึ้นหรือกระแสสูงขึ้นดังรูปที่ 5-5



รูปที่ 5-4: กราฟโพลาไรเซชันของโลหะที่มีฟิล์ม



รูปที่ 5-5: กราฟโพลาไรเซชันของโลหะที่ไม่มีฟิล์ม

5.3 โลหะเงิน

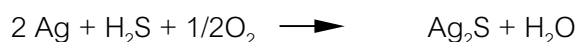
เงินจัดเป็นโลหะมีตระกูล มีค่า $E^0 = 0.799V$ ซึ่งจัดว่ามีค่าสูงเป็นรอง ทองคำ และแพลตตินัม (โลหะที่ใช้ทำเครื่องประดับ) เท่านั้น และถ้าทำปฏิกิริยากับกรดเกลือ (HCl) ได้ เงินคลอไรด์ เป็นฟิล์มที่ผิว ศักย์ไฟฟ้าจะสูงขึ้นใกล้เคียงกับทองคำและแพลตตินัม แต่ในกรณีนี้มักไม่เกิดกับกับเงินที่ทำเครื่องประดับ

5.3.1 การกัดกร่อนในบรรยากาศ

โลหะเงินเมื่ออยู่ในบรรยากาศ มักถูกออกซิเดชัน โดยออกซิเจนในอากาศที่มีความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ หรือบางกรณีอาจมีธาตุอื่นปนอยู่ด้วย โดยปกติแล้วเงินมักไม่เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน ยกเว้นในบรรยากาศที่มีไอสารเคมีอยู่ สารเคมีที่มักก่อปัญหาทำให้ผิวโลหะเงินดำลง คือ สารประกอบของซัลเฟอร์ ซึ่งมักเป็น H_2S สารประกอบซัลเฟอร์ในบรรยากาศมาจาก เผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีซัลเฟอร์อยู่ เช่น ในบรรยากาศใกล้โรงงานอุตสาหกรรม และเมืองใหญ่ที่มีการจราจรคับคั่ง ในบรรยากาศที่มี H_2S 600 ppm จะทำให้เงินสเตอร์ลิงหมองได้

5.3.2 ปฏิกิริยาที่ทำให้ผิวเงินหมอง และสารประกอบที่เกิดเป็นฟิล์มที่ผิวเงิน

เงินอยู่ในบรรยากาศ H_2S แล้วหมองลง เพราะเกิดปฏิกิริยา



ในบรรยากาศนอกจากจะมี H_2S แล้วอาจมีออกซิเจน และสารเคมีอื่นๆ อยู่ด้วย ทำให้เกิด ฟิล์มที่ผิวเงิน นอกจากจะมี Ag_2S แล้วยังพบ Ag_2O , $AgCl$, Ag_2SO_4

โดยในตารางที่ 5-3 แสดงถึงบรรยากาศที่สร้างขึ้นเพื่อให้เกิดฟิล์มที่ผิวเงิน แล้ววิเคราะห์สารประกอบของฟิล์มนั้น

ตารางที่ 5-3 : ฟิล์มที่เกิดบนผิวเงินในบรรยากาศต่างๆ

บรรยากาศ	ส่วนผสมของฟิล์ม
H_2S	Ag_2S
$H_2S + SO_2$	98% Ag_2S + 2% Ag_2O
$H_2S + Cl_2$	90% Ag_2S + 10% $AgCl$
$H_2S + Cl_2 + SO_2 + NO_2$	40% Ag_2S + 50% $AgCl$ + 10% Ag_2SO_4

ฟิล์มของเงินที่อยู่ในบรรยากาศในอาคาร มักเป็น Ag_2S แต่ฟิล์มของเงินที่เกิดในบรรยากาศนอกอาคาร จะประกอบด้วย Ag_2S (เป็นส่วนใหญ่) และมี AgCl และ Ag_2SO_4 บ้าง

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการหมอง

1. บรรยากาศ
2. ความชื้นสัมพัทธ์
3. อุณหภูมิ
4. ปัจจัยทางโลหะวิทยา
 - ส่วนผสมของโลหะ
 - อัตราการแปรรูปเย็น
 - คุณภาพของผิว

5.3.2.1 บรรยากาศ

สารประกอบซัลเฟอร์ที่สำคัญที่ทำให้เงินหมองได้ดีที่สุด คือ H_2S และมีแหล่งที่มา ดังนี้

- การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่มีซัลเฟอร์
- อาหาร เช่น ไข่แดง หัวหอม มัสตาร์ด
- สี และกาว
- ยางที่เติมซัลเฟอร์ (Vulcanized rubber)
- อนุภาคฝุ่น ถ่าน เครื่องสำอาง และผ้า

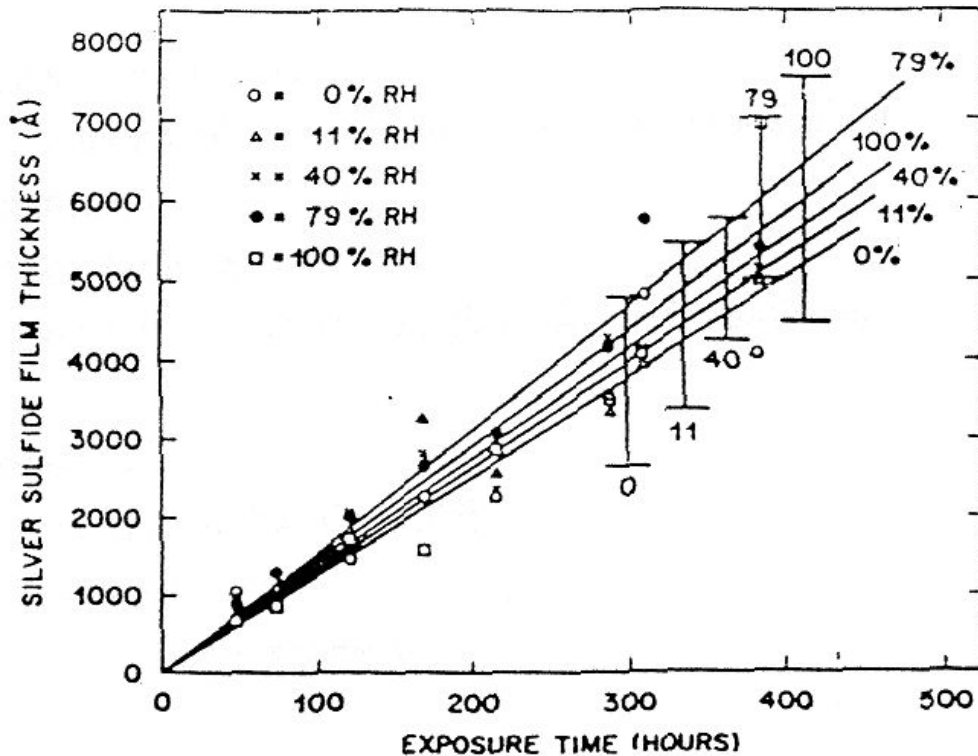
นอกจากนี้สารประกอบที่มีซัลเฟอร์แล้ว อาจมีสารเคมีชนิดอื่นที่ทำให้เงินมีผิวหมองลง เช่น Cl_2 , HCl และ Nitrogen oxide หรือแม้แต่อนุภาคฝุ่นที่เนื่องต่อการเกิดปฏิกิริยาที่อาจทำให้ผิวเงินหมองลงได้ เพราะอนุภาคเหล่านี้ดูดน้ำเอาไว้และระเหยได้ช้า

5.3.2.2 ความชื้นสัมพัทธ์

เงินจะไม่หมองหากอยู่ในบรรยากาศที่แห้ง ปราศจากความชื้น แต่ในบรรยากาศที่มีความชื้นสูง น้ำหรือความชื้นจะปกคลุมผิวโลหะ โดยที่ปริมาณน้ำที่อยู่ผิวโลหะ (Adsorbed) นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ หากในบรรยากาศที่มีสารประกอบที่ทำให้เงินหมองอยู่ด้วย สารประกอบเหล่านี้จะละลายในน้ำที่ผิวเงิน ทำให้เงินมีฟิล์มดำเกิดขึ้นที่ผิว และฟิล์มนี้อาจจะละลายในน้ำอีก ซึ่งทำให้น้ำมีฤทธิ์กัดกร่อนต่อไป ผลการวิจัยระบุว่า

ในบรรยากาศที่มีความชื้นสูง เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น ไม่มีผลมากเท่ากับปริมาณซัลเฟอร์ที่อยู่ในบรรยากาศ หรือปริมาณซัลเฟอร์ในบรรยากาศมีผลต่อความหนาของฟิล์มซัลไฟด์ของเงินมากกว่าความชื้น ดังแสดงในรูปที่ 5-6

ถ้าในบรรยากาศ มีสารประกอบซัลเฟอร์ หรือสารประกอบอื่นที่ทำให้เงินหมองลงได้ ในปริมาณน้อย (เช่น H_2S 0.01 ppm) ความชื้นสัมพัทธ์มีผลต่อความหมองของเงิน เงินจะหมองเร็วเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น



รูปที่ 5-7 : फिल्मซัลไฟด์ ที่เกิดบนผิวเงินในบรรยากาศที่มีไอซัลเฟอร์ที่ 50°ซ

5.3.2.3 อุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดความหมองเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอัตราการเกิดความหมองที่เพิ่มขึ้นนี้ยังขึ้นอยู่กับปริมาณสารประกอบที่ทำให้เงินหมองด้วย โดยมีผลการวิจัยระบุว่า

- ปริมาณ H_2S ในบรรยากาศมาก อุณหภูมิมีผลต่อการเกิดฟิล์มที่ผิว เช่น

ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการเพิ่มความหนาของฟิล์มที่เกิดขึ้น 0.5 Å / ชม.

ที่อุณหภูมิ 50°ซ อัตราการเพิ่มความหนาของฟิล์มที่เกิดขึ้น 13.3 Å / ชม.

- ปริมาณ H_2S น้อย (1 ppm) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 85% ในช่วงอุณหภูมิ 30-55 °ซ พบว่าอุณหภูมิไม่มีผลต่ออัตราการเพิ่มความหนา ทั้งนี้เนื่องจาก ก๊าซ H_2S ละลายในน้ำได้น้อยลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้น้ำที่สัมผัสกับเงิน มีฤทธิ์กัดกร่อนน้อย เช่น SO_2 ละลายในน้ำที่ 65 °ซ ได้เพียง 0.36 เท่าของการละลายที่ 25 °ซ

ของซัลเฟอร์ให้กลายเป็น ซัลเฟอร์ได้ออกไซด์ สารประกอบดังกล่าวเป็นเกลือของทองแดง (Copper acetate หรือ Copper-chlorophyll) ปริมาณของสารประกอบพวกนี้ควรมีอย่างน้อย 2% ในกระดาษ

5.3.3.2 การทำผิว

การทำผิวนั้นมีหลักการดังนี้

- จะต้องไม่ทำให้ผิวเงินเปลี่ยนแปลง
- ทำได้ง่าย
- กำจัดออกจากผิวได้สะดวกเมื่อต้องการ
- มีราคาไม่แพง
- ทนทานเพียงพอจนถึงมือลูกค้า

การทำผิวนั้นทำได้โดยการเคลือบฟิล์มที่สามารถปกป้องผิวโลหะเงินได้ ผิวเคลือบนี้อาจจะเป็น โลหะ หรือ ออกไซด์ หรือสารประกอบอินทรีย์ก็ได้

5.3.3.3 การเคลือบผิวเงินด้วยโลหะ (Metallic coatings)

การเคลือบต้องใช้การชุบด้วยไฟฟ้า อาจเป็น

- เคลือบด้วย Rh
- เคลือบด้วย Ir, Pt หรือ Pd
- เคลือบด้วย Ni
- เคลือบด้วย โลหะเงินเจือที่มี Cd, Sb, Sn หรือ Pd

การเคลือบในกลุ่มนี้มีราคาค่อนข้างสูง

5.3.3.4 การเคลือบด้วยออกไซด์ (Oxide coating)

ออกไซด์ที่ใช้เคลือบคือ BeO , Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO , TiO_2 เป็นฟิล์มที่ต่อเนื่องและใส การเคลือบมีราคาแพง และยุ่งยาก

5.3.4 การทดสอบความหมองของโลหะเงิน

การทดสอบ มี 2 ประเภท

- การทดสอบในบรรยากาศจริง

ต้องใช้เวลานาน และผลการทดสอบไม่ค่อยแน่นอน เพราะสารเคมีที่ทำให้โลหะเงินหมองมลสาร และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ไม่แน่นอน เปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ซึ่งปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อความหมองของเงิน

- การทดลองในห้องปฏิบัติการ

ทำได้เร็วกว่า เพราะสามารถเร่งให้เกิดปฏิกิริยาได้ และควบคุมปริมาณสารเคมี และปัจจัยอื่นๆ ได้ การทดสอบในห้องปฏิบัติการสามารถทำได้ 2 วิธี

- การทดสอบด้วยสารเคมี
- การทดสอบด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

5.3.4.1 การทดสอบด้วยสารเคมี

- Sodium sulfide test ใช้สารละลายของ Na_2S ที่ความเข้มข้น 0.5%, 0.2% หรือสารละลายอื่นแล้วจุ่มชิ้นงานเงินในสารละลายตามเวลาที่กำหนด เช่น 1 นาที, 2 นาที เป็นต้น
- สารละลายเหงื่อเทียม การทดสอบจะวางชิ้นงานเงินในบรรยากาศที่มีเหงื่อเทียมในภาชนะปิด เป็นเวลา 10-15 วัน ที่อุณหภูมิห้อง

5.3.4.2 การทดสอบด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

เทคนิคที่ใช้ในการทดลอง

1. หาค่าศักย์ไฟฟ้ากัฏกร่อน E_{corr}

ซึ่งเป็นค่าศักย์ที่บอกถึงความยากง่ายที่โลหะจะทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม

2. Potentiodynamic technique

การทดสอบทำโดยเพิ่มศักย์ไฟฟ้าแก่ชิ้นทดสอบ แล้ววัดกระแสที่เกิดขึ้น โดยอาจเพิ่มศักย์ไฟฟ้าครั้งละ 5 mV/วินาที แล้ววัดกระแสที่เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าครบ 1 วินาทีแล้ว เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าจนถึงศักย์ไฟฟ้าที่กำหนด จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง ศักย์ไฟฟ้าและกระแส ซึ่งเรียกว่า กราฟโพลาริเซชัน

5.4 การทดลอง แบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ ได้ดังนี้

5.4.1 ชิ้นทดสอบ

แบ่งออกได้เป็น 5 ประเภท โดยมีส่วนผสมดังตารางที่ 5-4

- เงินสเตอร์ลิงสำเร็จรูป 925, 935
- Ag-Cu ชิ้นทดสอบมี 3 %Cu, 4.5 %Cu และ 6 %Cu
- Ag-Cu-Zn ประกอบด้วยชิ้นทดสอบ S1-S5
- Ag-Cu-Si ประกอบด้วยชิ้นทดสอบ S6-S10
- Ag-Cu-Zn-Si ประกอบด้วยชิ้นทดสอบ S11-S14 และ 5Si, 9Si, 1Si และ 14 Si

ตารางที่ 5-4 : ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นทดสอบ*

กลุ่ม	ชิ้นทดสอบ	ส่วนผสมทางเคมี (%)			
		Ag	Cu	Zn	Si
เงินสเตอร์ลิงสำเร็จรูป	925	96.40	3.2	-	0.40
	935	95.30	3.5	0.60	0.60
Ag-Cu	3 %Cu	97.00	3.0	-	-
	4.5 %Cu	95.50	4.5	-	-
	6 %Cu	94.00	6.0	-	-
Ag-Cu-Zn	S1	94.50	5.0	0.50	-
	S2	94.00	5.0	1.00	-
	S3	93.50	5.0	1.50	-
	S4	93.00	5.0	2.00	-
	S5	92.50	5.0	2.50	-
Ag-Cu-Si	S6	94.90	5.0	-	0.10
	S7	94.85	5.0	-	0.15
	S8	94.80	5.0	-	0.20
	S9	94.70	5.0	-	0.30
	S10	94.60	5.0	-	0.40
Ag-Cu-5Zn-Si	S11	93.90	5.0	1.00	0.10
	S12	93.85	5.0	1.00	0.15
	S13	93.80	5.0	1.00	0.20
	S14	93.75	5.0	1.00	0.25
	5Si	93.40	5.8	0.75	0.05
	9Si	92.70	5.9	1.30	0.09
	1Si	93.80	5.1	1.00	0.10
	14Si	93.40	4.8	1.60	0.14

* ส่วนผสมทางเคมีในตารางนี้เป็นส่วนผสมที่หลอม ส่วนผสมที่มีอยู่จริงได้ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี และเครื่อง ICP แล้ว แต่ผลการวิเคราะห์ยังไม่น่าเชื่อถือ

5.4.2 การเตรียมผิวชิ้นทดสอบ

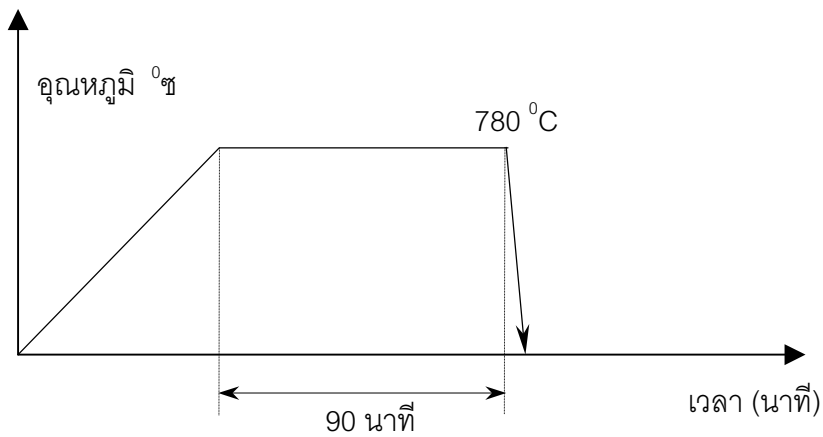
หล่อชิ้นทดสอบที่มีส่วนผสมดังตารางที่ 5-4 โดยแต่ละชิ้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร ส่วนผสมละ 9 ชิ้น แบ่งชิ้นทดสอบ เป็น 3 ส่วน

1. ชิ้นทดสอบหล่อธรรมดา
2. ชิ้นทดสอบหล่อ นำไปแปรรูปเย็น โดยการกดอัดให้ความหนาลดลง จากขนาดเดิม 30%, 50%

และ 70%

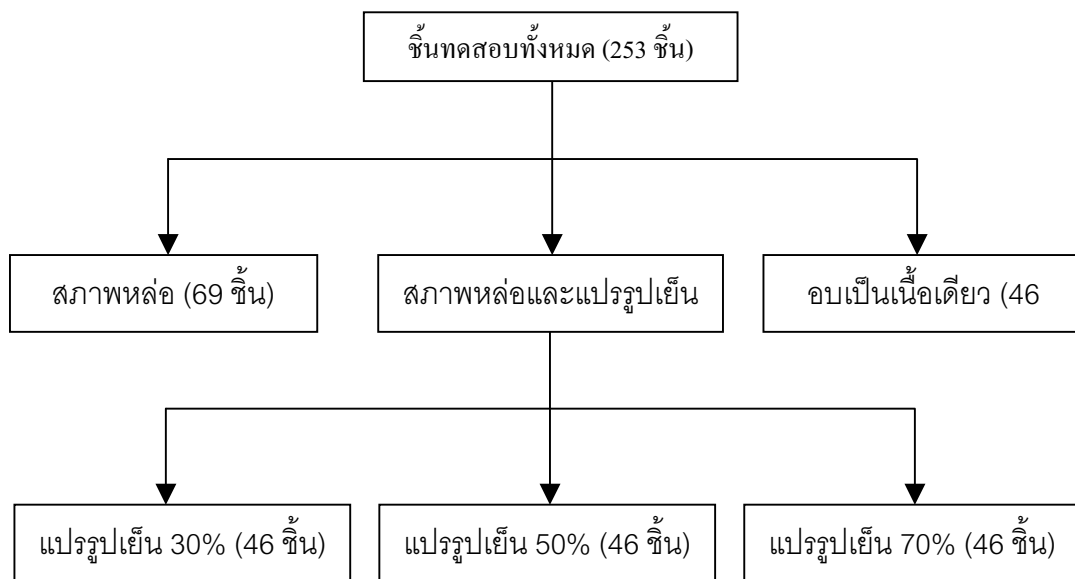
3. ชิ้นทดสอบหล่อ นำไปอบเป็นเนื้อเดียวกัน การอบเป็นไปตามรูปที่ 5-8
 - เปิดเตาจนความร้อนถึงอุณหภูมิ 780 °ซ แล้วนำชิ้นทดสอบเข้าเตาอบทันที
 - เปิดกาซไนโตรเจนให้ไหลผ่านเตาด้วยอัตรา 10 ลิตร/นาที
 - คงอุณหภูมิไว้ที่ 780 °ซ เป็นเวลานาน 90 นาที

- จุ่มขึ้นทดสอบในน้ำทันที



รูปที่ 5-8 : การอบเป็นเนื้อเดียวกันของเงินสเตอร์ลิง

ขึ้นทดสอบทั้งหมด และกระบวนการที่กระทำกับขึ้นทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5-9

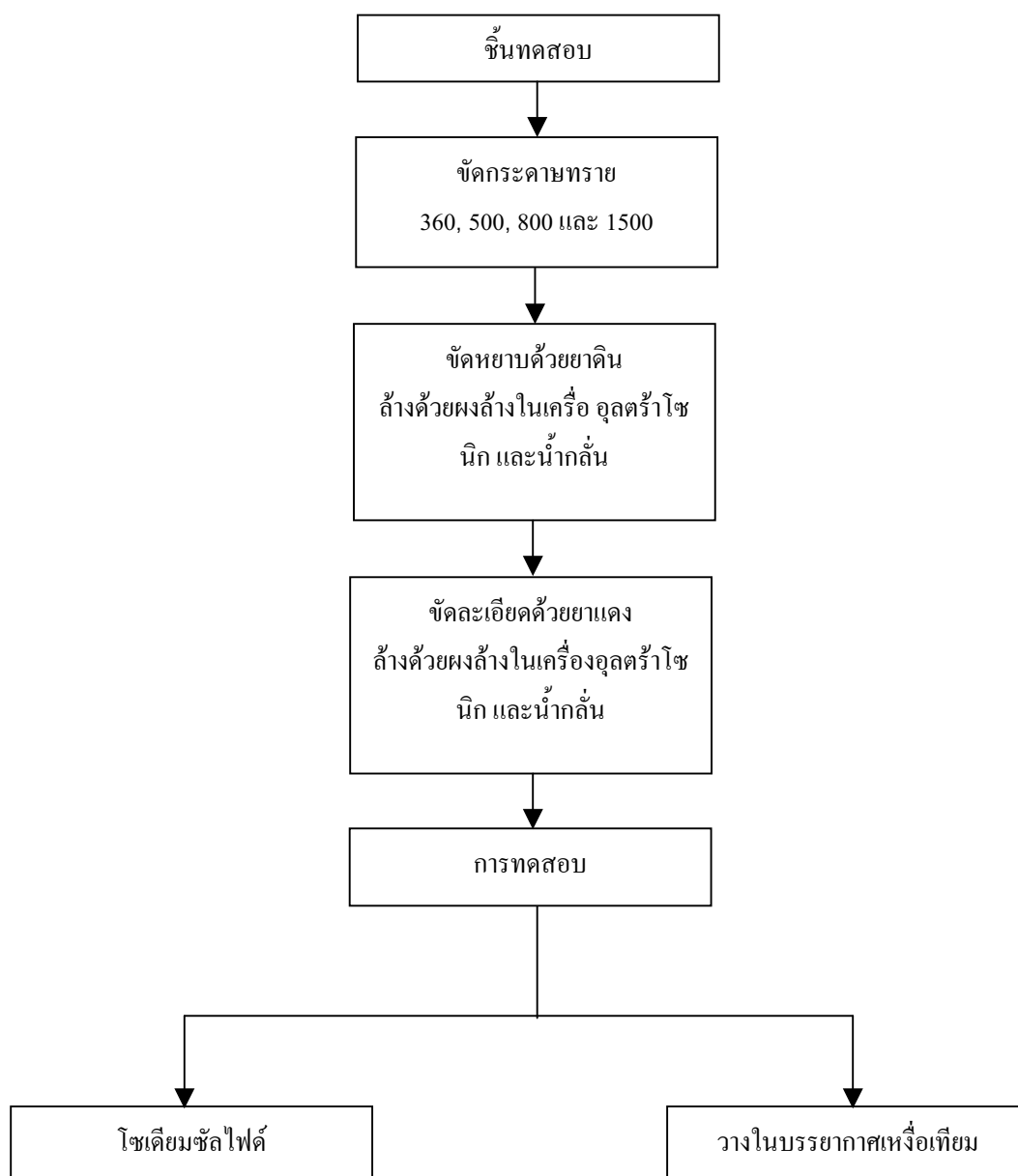


รูปที่ 5-9 : จำนวนขึ้นทดสอบทั้งหมดและกระบวนการที่กระทำกับขึ้นทดสอบ

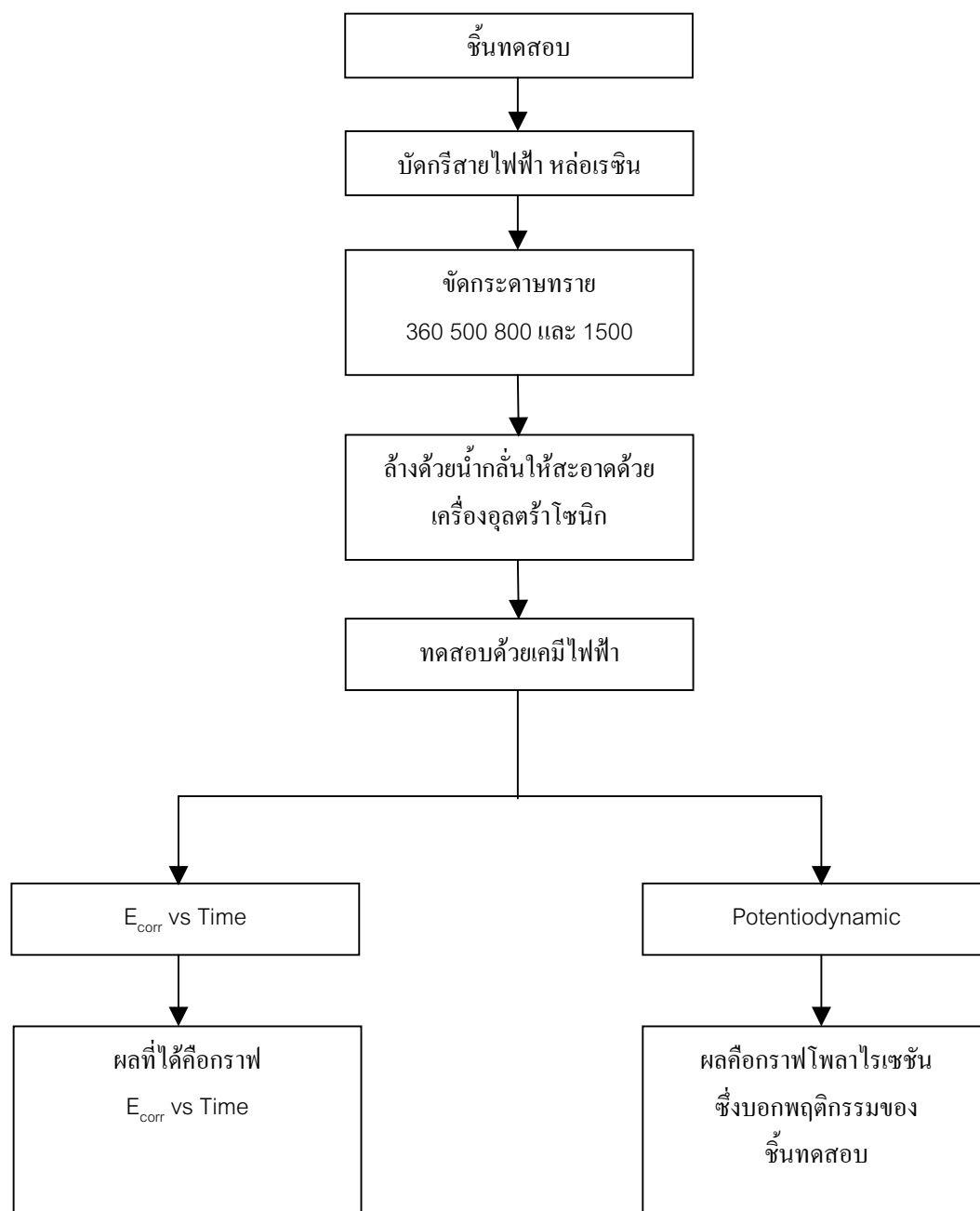
การเตรียมผิวขึ้นทดสอบ ขึ้นอยู่กับวิธีทดสอบดังนี้

- การเตรียมผิวขึ้นทดสอบ เพื่อทดสอบด้วยสารเคมี
 - จัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 360 500 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ
 - ล้างด้วยน้ำกลั่นให้สะอาดแล้วทำให้แห้ง
 - ขัดยาเดินด้วยล้อยาขัด ล้างในผงล้างในเครื่องอัลตราโซนิกแล้วทำให้แห้ง

- จัดยาแดงด้วยล้อยละเอียด ล้างในผงล้างในเครื่องอัลตราโซนิกแล้วทำให้แห้ง
 - การเตรียมผิวชิ้นทดสอบ เพื่อทดสอบด้วยเคมีไฟฟ้า
 - บัดกรีสายไฟ ติดกับชิ้นทดสอบ
 - หล่อเรซิน ให้ด้านที่ต้องการทดสอบไหลออกมา ดังรูปที่ 5-9
 - จัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 360 500 800 1000 และ 1500 ตามลำดับ
 - ล้างด้วยน้ำกลั่นให้สะอาดในเครื่องอัลตราโซนิกแล้วทำให้แห้ง
- ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นทดสอบเพื่อทดสอบด้วยสารเคมีและด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าดังแสดง
ในรูปที่ 5-10 และ 5-11



รูปที่ 5-10 : ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นทดสอบเพื่อทดสอบด้วยสารเคมี



รูปที่ 5-11 : ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นทดสอบเพื่อทดสอบด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

5.4.3 วิธีทดสอบ

การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- การทดสอบความหมองด้วยสารเคมี
- การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

5.4.3.1 การทดสอบความหมองด้วยสารเคมี โดยวิธี

- สารละลายที่มีซัลเฟอร์ (Polysulfide test)

สารละลาย	-	สารละลายโซเดียมซัลไฟด์อิ่มตัว
วิธีทดสอบ	-	จุ่มชิ้นทดสอบในสารละลาย
อุณหภูมิ	-	ห้อง
เวลา	-	1 นาที
		ล้างให้สะอาดแล้วทำให้แห้ง
ตรวจสอบ	-	ผิวชิ้นทดสอบด้วยสายตาและด้วยกล้องกำลังขยายต่ำ (Stereomicroscope)
	-	ถ่ายรูป

- สารละลายเหงื่อเทียม

สารละลายเหงื่อเทียมที่ใช้มีส่วนผสมดังนี้

Sodium Chloride	20.0 g/l
Ammonium Chloride	17.5 g/l
Urea or Carbamide	5.0 g/l
Acetic Acid	2.5 g/l
Lactic Acid	15 g/l
Pyruvic Acid	2.5 g/l
Butyric Acid	5.0 g/l

ปรับ pH ด้วย Sodium hydroxide pH = 4.5

สารละลาย	-	เหงื่อเทียม
วิธีทดสอบ	-	วางชิ้นทดสอบในบรรยากาศที่มีเหงื่อเทียม โดยใส่ชิ้นทดสอบในภาชนะปิดที่มีสำลีชุ่มเหงื่อเทียม
อุณหภูมิ	-	ห้อง
เวลา	-	10 วัน
ตรวจสอบ	-	ผิวชิ้นทดสอบ ด้วยสายตา
	-	ถ่ายรูป

5.4.3.2 การทดสอบด้วยเคมีไฟฟ้า

สารละลายที่ใช้ทดสอบ	-	0.01 M NaCl
ขั้วอ้างอิงที่ใช้	-	Ag/AgCl
อุณหภูมิ	-	ห้อง

เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าที่ใช้

- เทคนิค E_{corr} vs Time

เวลาที่ใช้ในการทดสอบ - 15 นาที

- เทคนิค Potentiodynamic

Scan rate - 100 mV/min

ศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น - ต่ำกว่าศักย์ที่ E_{corr} 100 mV

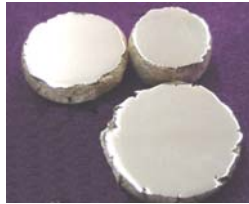
ศักย์ไฟฟ้าสูงสุด - 600 mV

5.5 ผลการทดลอง

5.5.1. ผลการทดสอบความหมองด้วยสารเคมี

ขึ้นทดสอบทั้งสภาพหล่อ กดอัด และอบชุบ ที่ผ่านการขัดมันและทดสอบด้วยโซเดียมซัลไฟด์ และเหงื่อเทียมแล้ว ผิวขึ้นทดสอบหมองลง ซึ่งภาพถ่ายขึ้นทดสอบทั้งหมด ทั้งก่อนและหลัง การทดสอบจำนวน ภาพได้ถูกจัดเก็บไว้ในแผ่นคอมแพคดิส จากสภาพความหมองเกิดขึ้น แก่ชิ้นงานนั้น สามารถจัดแบ่งออกเป็นสเกลความหมอง เป็น 5 ระดับ โดยให้ ระดับที่ 1 คือ สภาพผิวที่ผ่านการขัดมันด้วยกระดาษทราย ยาคินและยาแดง ส่วนระดับที่ 5 คือสภาพผิวที่มีความหมองมากที่สุดที่พบ ระดับความหมองทั้ง 5 ระดับ แสดงไว้ในรูปที่ 5-12

ระดับ 1



ระดับ 2



ระดับ 3



ระดับ 4

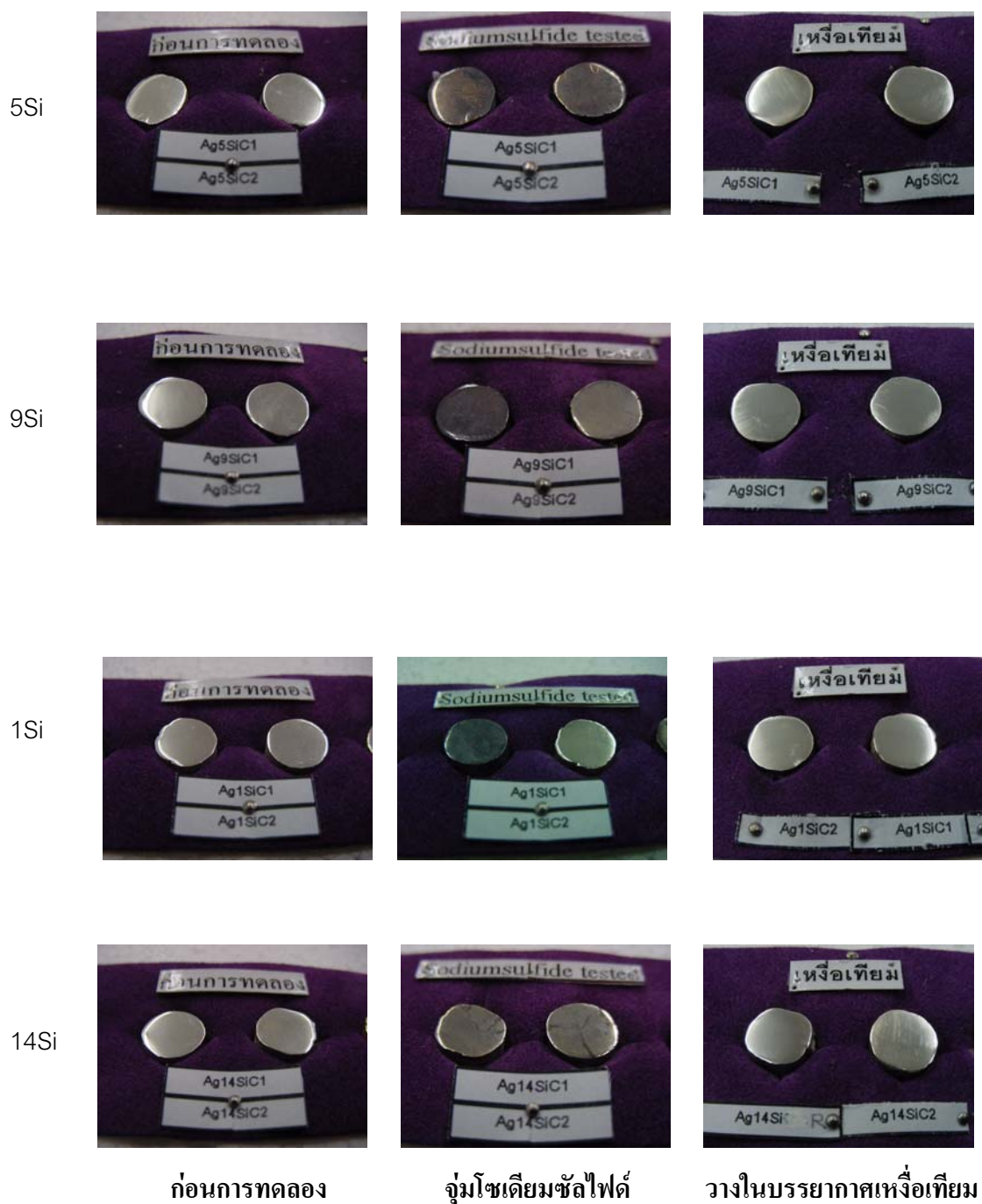


ระดับ 5

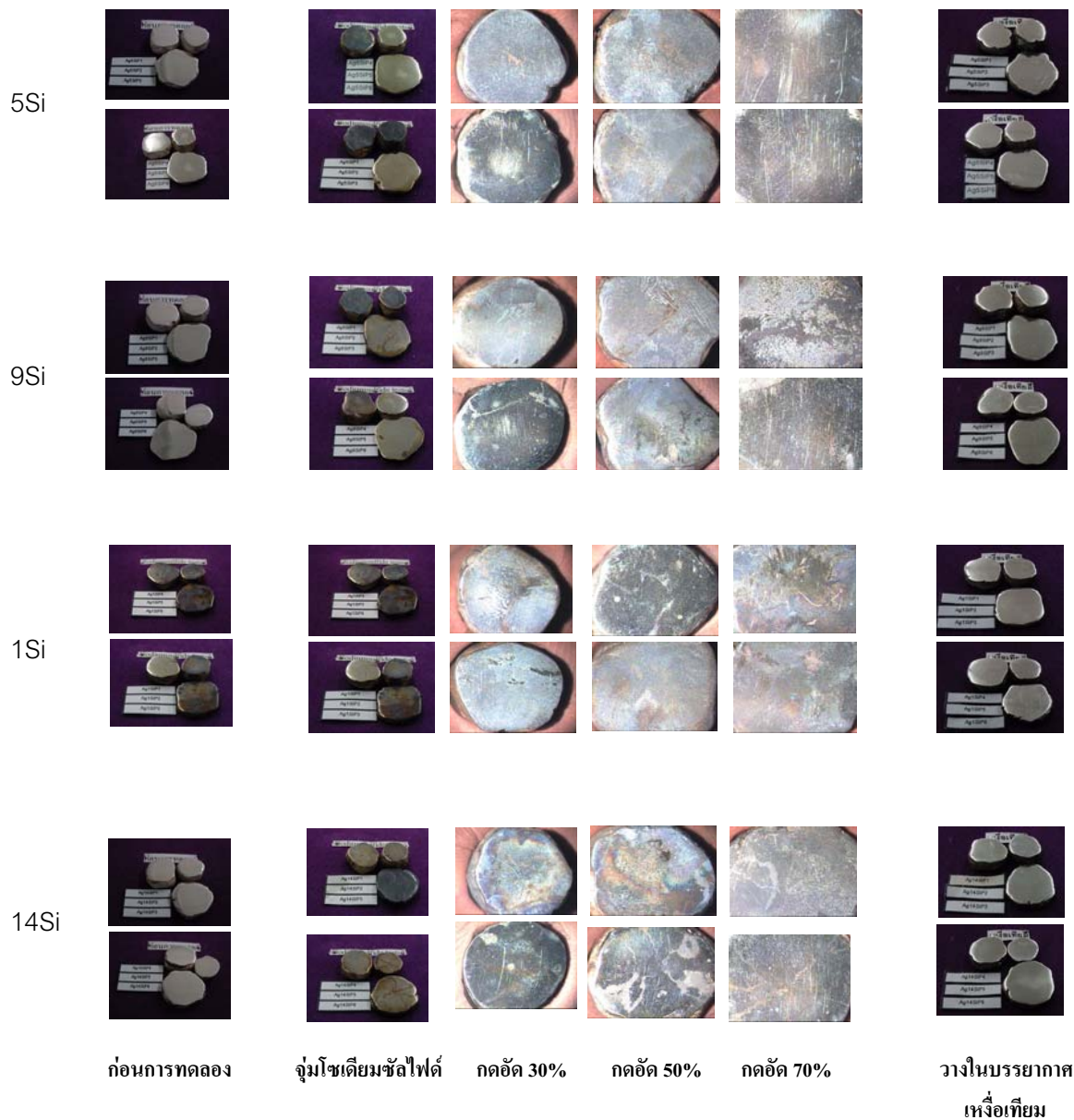


รูปที่ 5-12 : ระดับความหมองที่เกิดขึ้นแก่ชิ้นทดสอบ

รูปผลการทดสอบการหมองด้วยโซเดียมซัลไฟด์ และเหงื่อเทียมของชิ้นทดสอบ 5Si, 9Si, 1Si และ 14Si แสดงไว้ในรูปที่ 5-13 ถึง 5-15



รูปที่ 5-13 : สภาพผิวชิ้นทดสอบ 5Si, 9Si, 1Si และ 14Si ที่ผ่านการหล่อ
ทั้งก่อนและหลังการทดสอบด้วยโซเดียมซัลไฟด์และเหงื่อเทียม



ทดสอบด้วยโซเดียมซัลไฟด์

รูปที่ 5-14 : สภาพผิวชิ้นทดสอบ 5Si, 9Si, 1Si และ 14Si ที่ผ่านการกัดอัด 30% 50% 70%
ทั้งก่อนและหลังการทดสอบด้วยโซเดียมซัลไฟด์และแห้งเทียม



รูปที่ 5-15 : สภาพผิวชิ้นทดสอบ 5Si, 9Si, 1Si และ 14Si ที่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวกัน
ทั้งก่อนและหลังการทดสอบด้วยโซเดียมซัลไฟด์และเหนือเทียน

ผลการทดสอบความหยาบของชิ้นงานทดสอบโลหะเงินสเตอร์ลิงทั้งหมด จัดระดับตามสเกล
ดังรูปที่ 5-12 แล้วได้ผลดังตารางที่ 5-5

ตารางที่ 5-5 : ผลการทดสอบด้วยสารเคมี แสดงระดับความหมองตามรูปที่ 5-12

ธาตุเจ้าหลัก	ชั้นทดสอบ	หล่อ		กดอัด		อบชุบ	
		Na ₂ S	เหงื่อเทียม	Na ₂ S	เหงื่อเทียม	Na ₂ S	เหงื่อเทียม
เงินสเตอร์ลิง	925	5	2	4	2	5	2
	935	5	2	4	2	5	2
Ag-Cu	3Cu	3	2	4	2	3	3
	4.5Cu	3	2	4	2	4	2
	6Cu	3	2	4	2	4	2
Ag-Cu-Zn	S1	4	2	4	2	4	2
	S2	4	2	4	2	4	2
	S3	4	2	4	2	4	2
	S4	4	2	4	2	4	2
	S5	4	2	4	2	4	2
Ag-Cu-Si	S6	4	2	4	2	4	2
	S7	4	2	4	2	4	2
	S8	4	2	4	2	4	2
	S9	4	2	4	2	4	2
	S10	4	2	3	2	4	2
Ag-Cu-Zn-Si	S11	5	2	4	2	5	2
	S12	5	2	4	2	5	2
	S13	5	2	4	2	5	2
	S14	5	2	4	2	5	2
	5Si	4	2	4	2	4	2
	9Si	4	2	4	2	4	2
	1Si	4	2	4	2	4	2
	14Si	4	2	4	2	4	2

5.5.2 ผลการทดสอบด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

การทดสอบทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิค E_{corr} vs Time และ Potentiodynamic ได้กราฟ โพลาริเซชัน ซึ่งทำให้ทราบค่า E_{corr} และพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบ

การทดสอบด้วยวิธีนี้ได้กราฟโพลาริเซชัน ซึ่งจัดเก็บกราฟโพลาริเซชันของชิ้นทดสอบทุกชิ้นไว้ในแผ่นคอมแพคดิส

เนื่องจากพฤติกรรมการกัดกร่อนนั้น สัมพันธ์กับส่วนผสมทางเคมี ซึ่งส่วนผสมของโลหะเงินสเตอร์ลิง แบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม ได้ดังนี้

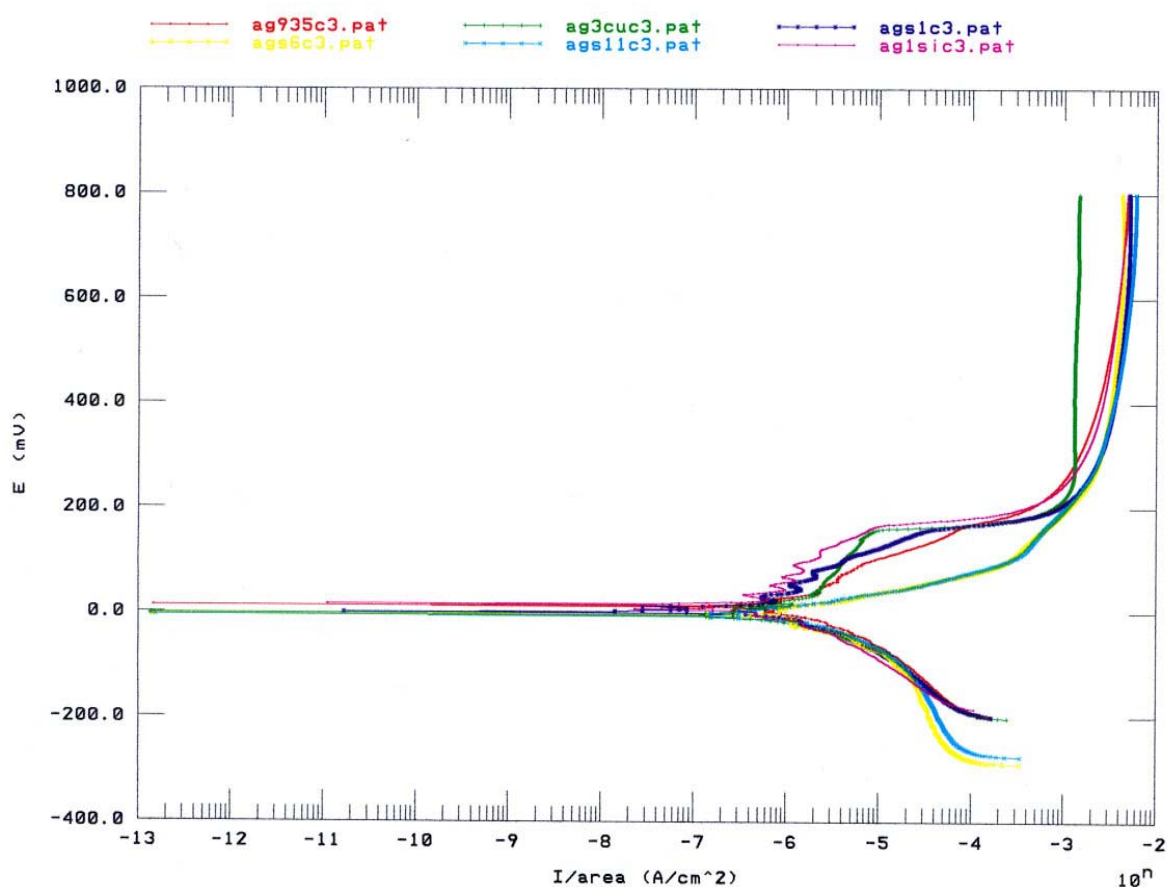
1. โลหะเงินสเตอร์ลิงสำเร็จรูป คือ ชิ้นทดสอบ 925, 935
2. Ag-Cu คือ ชิ้นทดสอบ 3Cu 4.5Cu 6Cu
3. Ag-Cu-Zn คือ ชิ้นทดสอบ S1-S5
4. Ag-Cu-Si คือ ชิ้นทดสอบ S6-S10
5. Ag-Cu-Zn-Si คือ ชิ้นทดสอบ S11-S14, 5Si 9Si 1Si และ 14Si

จากกราฟ โพลาริเซชัน ของชิ้นทดสอบที่ได้ สามารถเปรียบเทียบได้ 3 ลักษณะ คือ

- เปรียบเทียบชิ้นทดสอบระหว่างกลุ่มซึ่งมีธาตุเจือต่างกัน
- เปรียบเทียบชิ้นทดสอบในกลุ่มเดียวกัน มีธาตุเจือเหมือนกันแต่ปริมาณที่เติมต่างกัน
- เปรียบเทียบกระบวนการที่กระทำกับชิ้นทดสอบที่มีส่วนผสมเดียวกัน กระบวนการที่กระทำกับชิ้นทดสอบ คือ หล่อ, อบชุบและกัดอัด 30%, 50% และ 70% ของความหนาเดิม

5.5.2.1 เปรียบเทียบชิ้นทดสอบระหว่างกลุ่ม

กราฟ โพลาริเซชัน ของชิ้นทดสอบ 1 จากแต่ละกลุ่ม นำมาซ้อนทับกันได้ ซึ่งรูปที่ 5-16 เป็นตัวอย่างของการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่ม



รูปที่ 5-16 : กราฟ โพลาริเซชัน ของชั้นทดสอบสภาพหล่อของ

- 935 (เงินสเตอร์ลิงสำเร็จรูป)
- 3Cu (Ag-Cu)
- S1 (Ag-Cu-Zn)
- S6 (Ag-Cu-Si)
- S11 (Ag-Cu-Zn-Si)
- 1Si (Ag-Cu-Zn-Si)

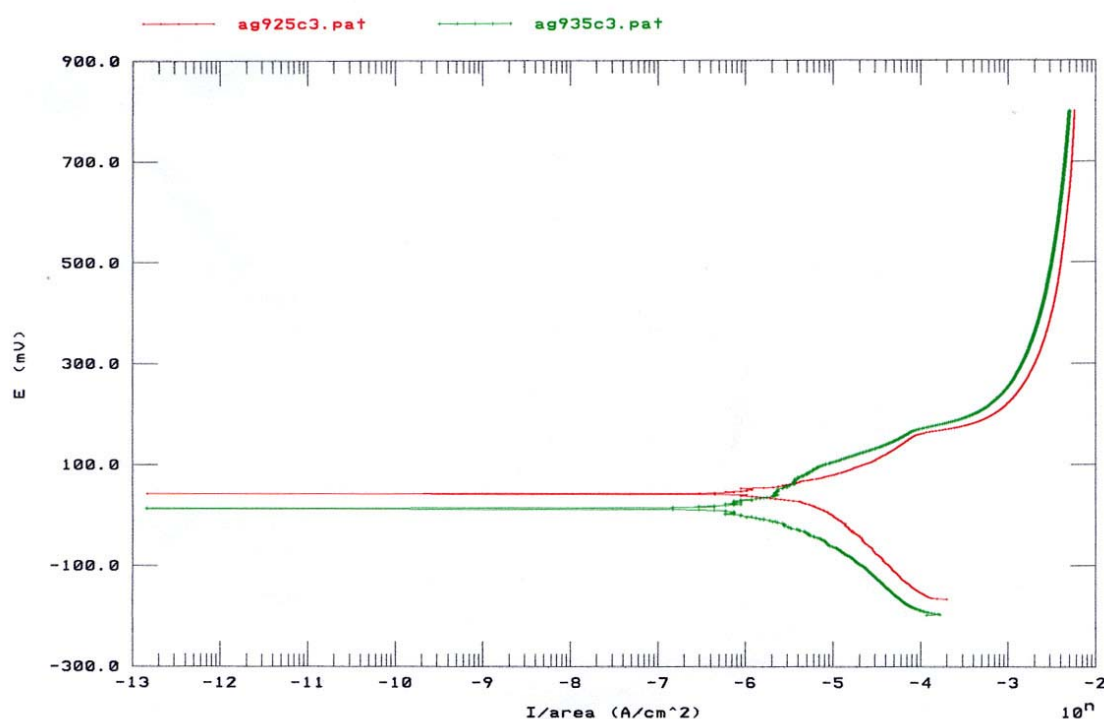
รูปที่ 5-16 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่ม โดยเลือกกราฟของชั้นทดสอบในแต่ละกลุ่มมา 1 กราฟ ซึ่งชั้นทดสอบนี้อยู่ในสภาพหล่อ ส่วนในสภาพอบชุบและสภาพกดอัดแสดงไว้ในแผ่นคอมแพคดิส

5.5.2.2 เปรียบเทียบชั้นทดสอบในกลุ่มเดียวกัน

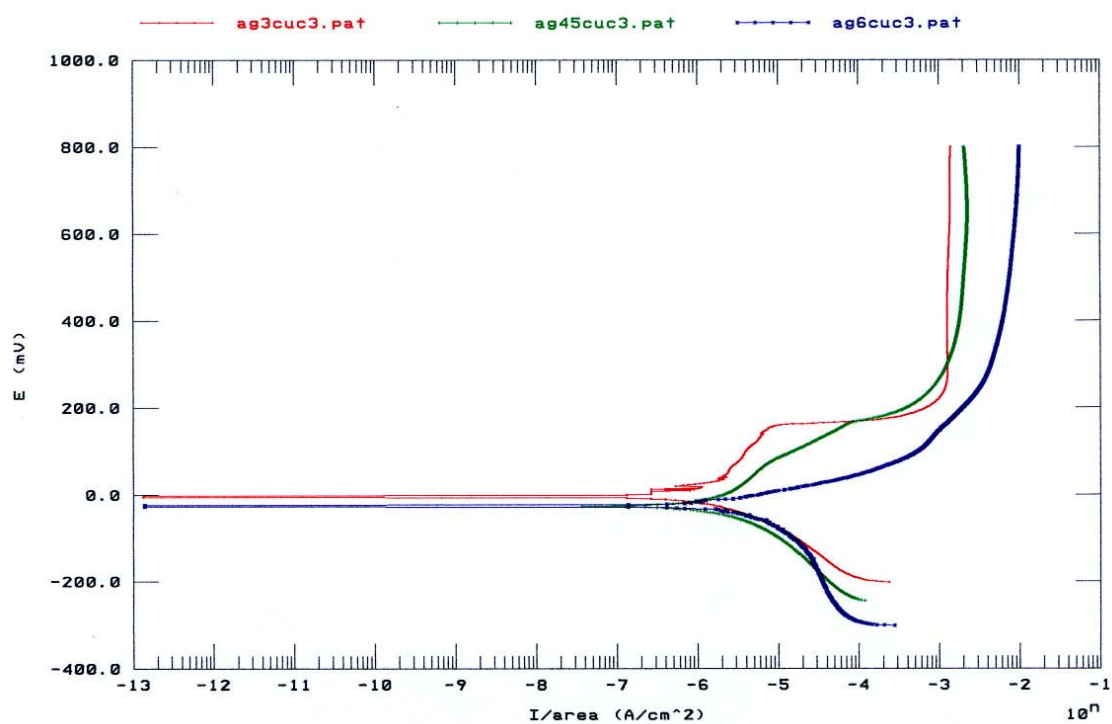
กราฟ โพลาริเซชัน ของชั้นทดสอบสภาพหล่อ นำมาซ้อนทับกันเพื่อเปรียบเทียบดังนี้

- โลหะเงินสเตอร์ลิงสำเร็จรูป คือ 925 และ 935 ในรูปที่ 5-17
- Ag-Cu คือ ชั้นทดสอบ 3Cu 4.5Cu และ 6Cu ในรูปที่ 5-18
- Ag-Cu-Zn คือ ชั้นทดสอบ S1 - S5 ในรูปที่ 5-19
- Ag-Cu-Si คือ ชั้นทดสอบ S6 – S10 ในรูปที่ 5-20
- Ag-Cu-Zn-Si คือ ชั้นทดสอบ S11 – S14 และ 5Si, 9Si, 1Si, 14Si ในรูปที่ 5-21
ในรูปที่ 5-22

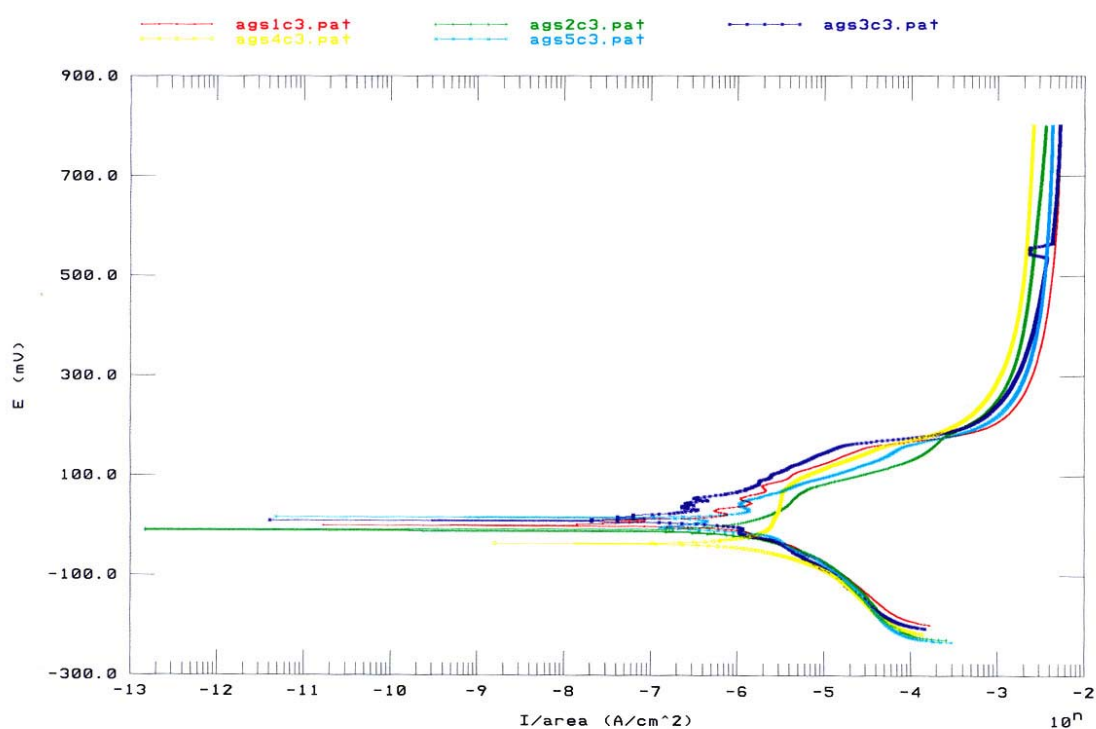
รูปที่ 5-17 ถึง 5-22 เป็นตัวอย่างการเปรียบเทียบในกลุ่มเดียวกัน เฉพาะสภาพหล่อเท่านั้น ส่วนกราฟ โพลาริเซชัน ของชั้นทดสอบอื่น อยู่ในแผ่นคอมแพคดิส



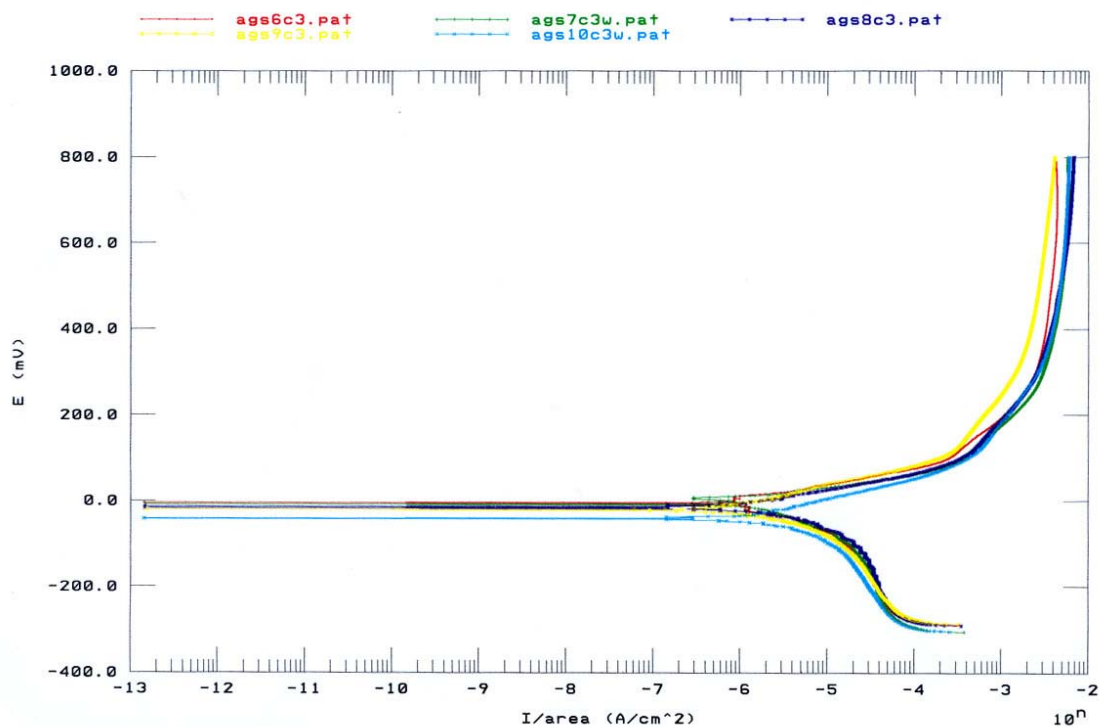
รูปที่ 5-17 : กราฟ โพลาริเซชัน ของ 925 และ 935 สภาพหล่อ



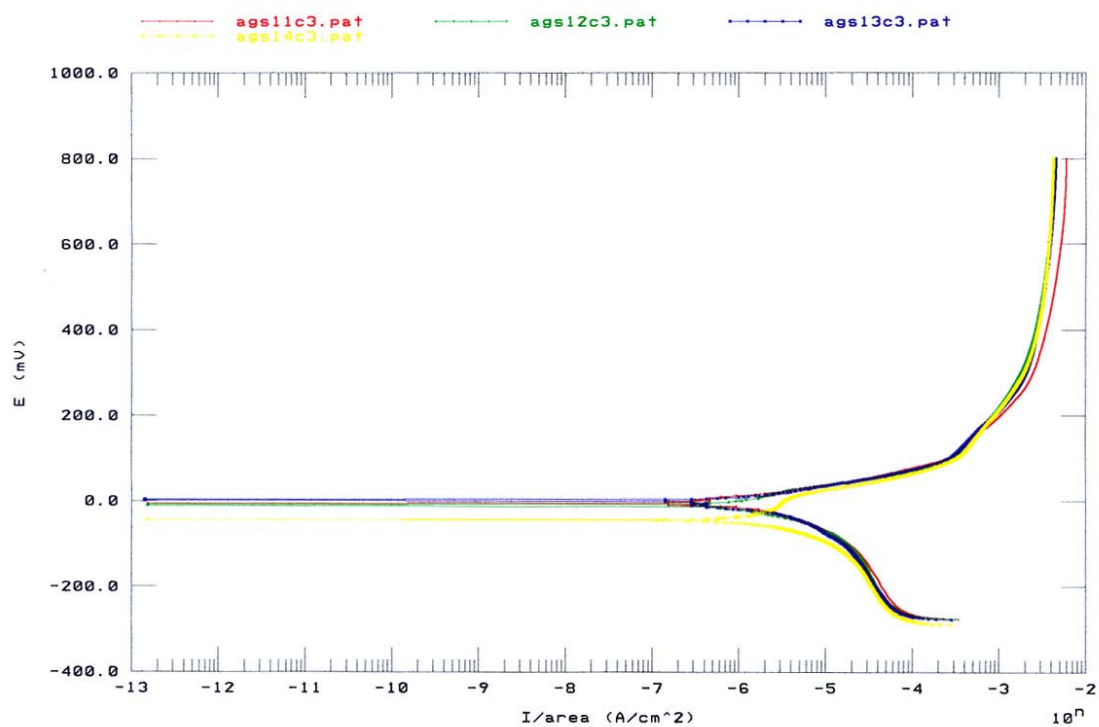
รูปที่ 5-18 : กราฟ โพลาริเซชัน ของ 3Cu, 45Cu, 6Cu สภาพหล่อ



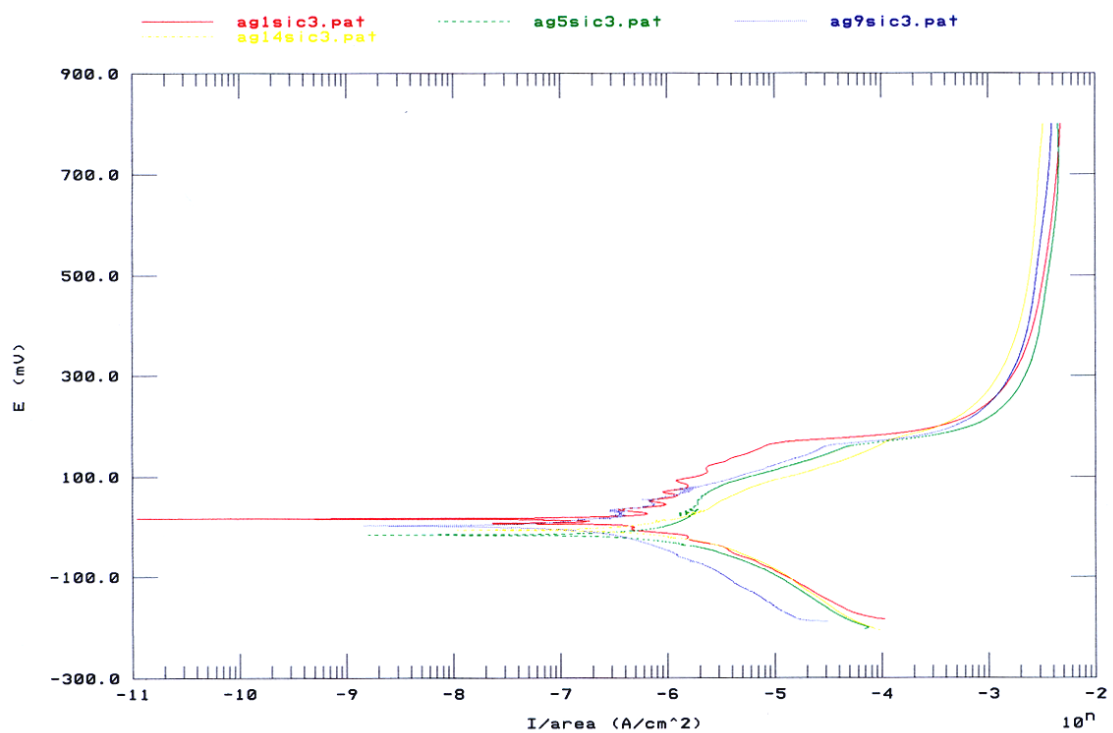
รูปที่ 5-19 : กราฟ โพลาริเซชัน ของ S1 - S5



รูปที่ 5-20 : กราฟ โพลาริเซชัน ของ S6 – S10 สภาพหล่อ



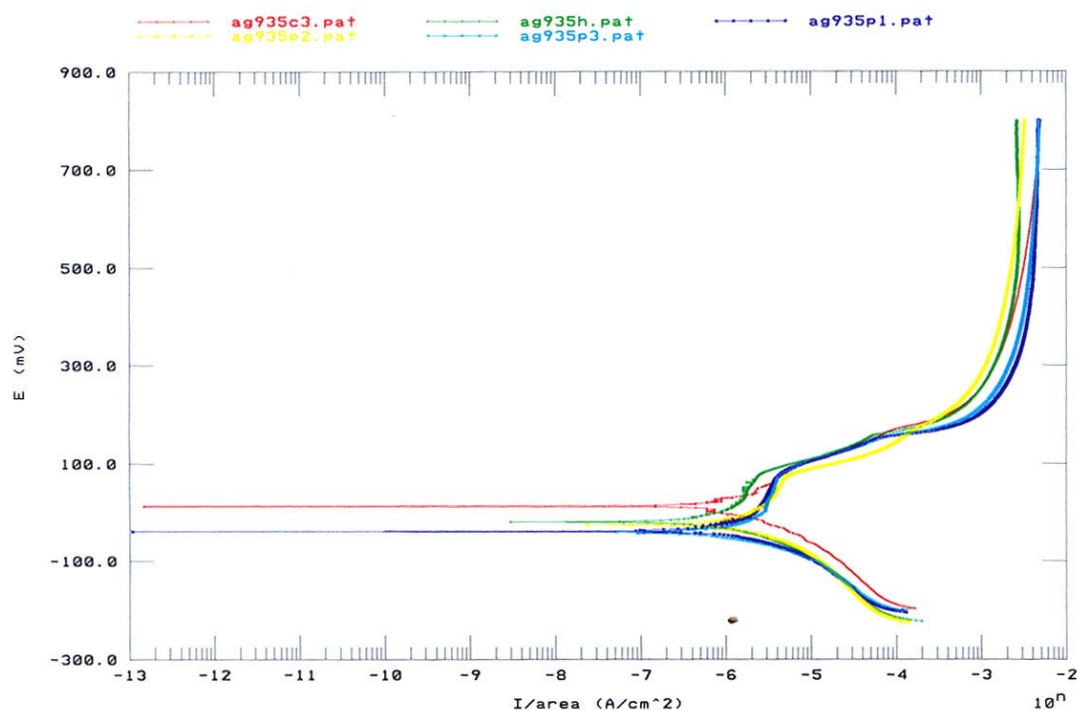
รูปที่ 5-21 : กราฟ โพลาริเซชัน ของ S11 - S14 สภาพหล่อ



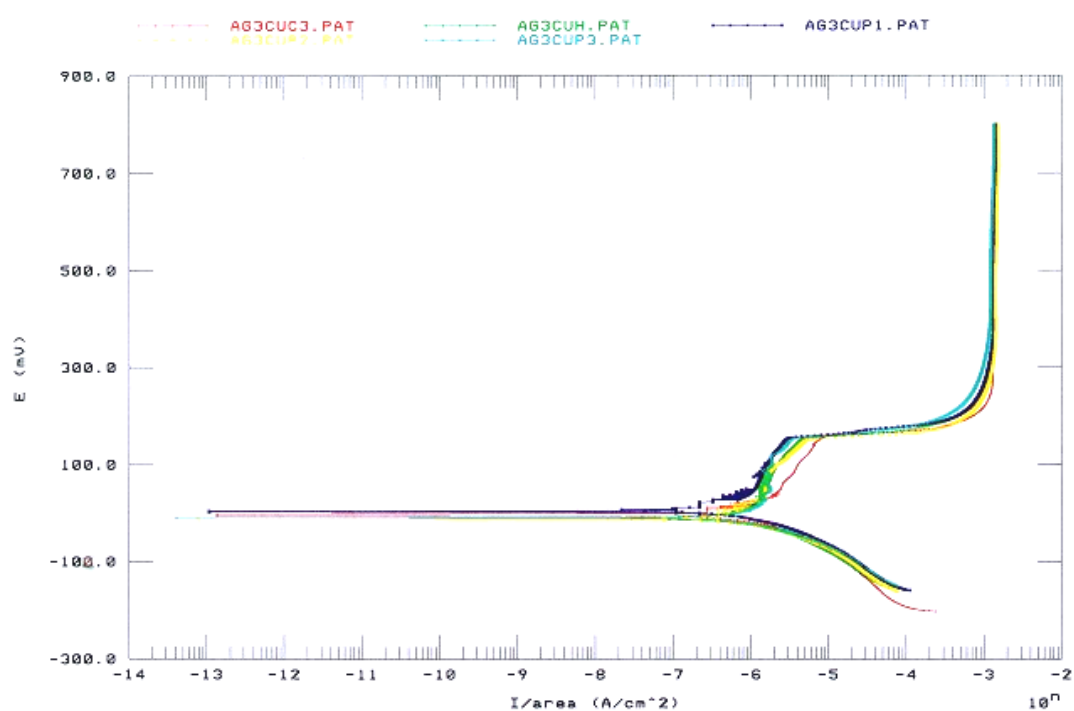
รูปที่ 5-22 : กราฟ โพลาริเซชัน ของ 5Si, 9Si, 1Si และ 14Si สภาพหล่อ

5.5.3 เปรียบเทียบขั้นตอนทดสอบที่ผ่านกระบวนการที่กระทำต่างกัน

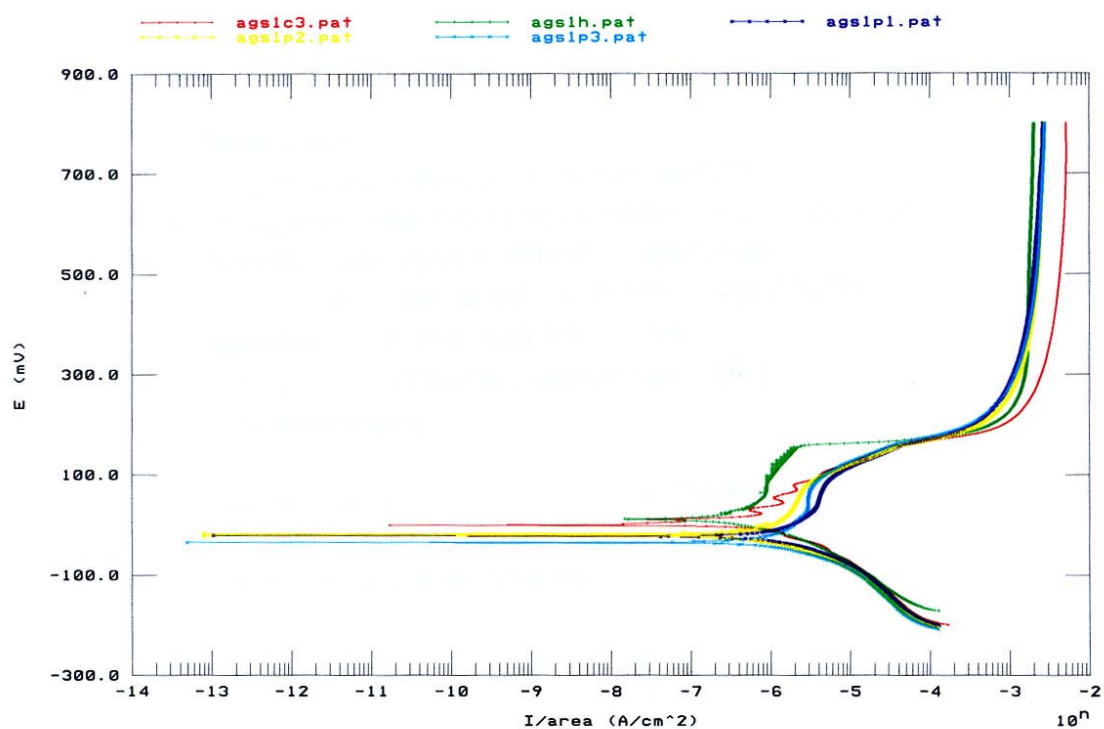
กราฟ โพลาริเซชัน ของขั้นตอนที่มีส่วนผสมเหมือนกันที่ผ่านกระบวนการที่กระทำกับขั้นตอนทดสอบต่างกัน นำมาเปรียบเทียบกัน ดังรูปที่ 5-23 ถึง 5-28



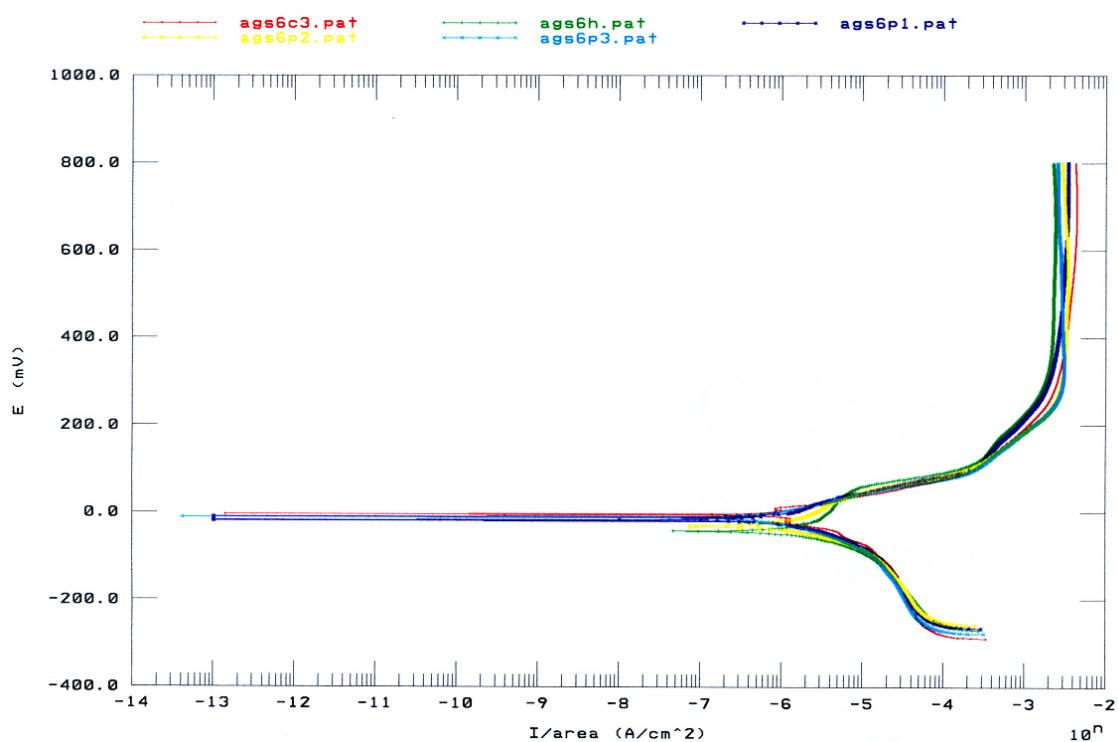
รูปที่ 5-23 : กราฟ โพลาริเซชัน ของ 935 ในสภาพหล่อ, อบชุบ, กัด 30%, 50% และ 70%



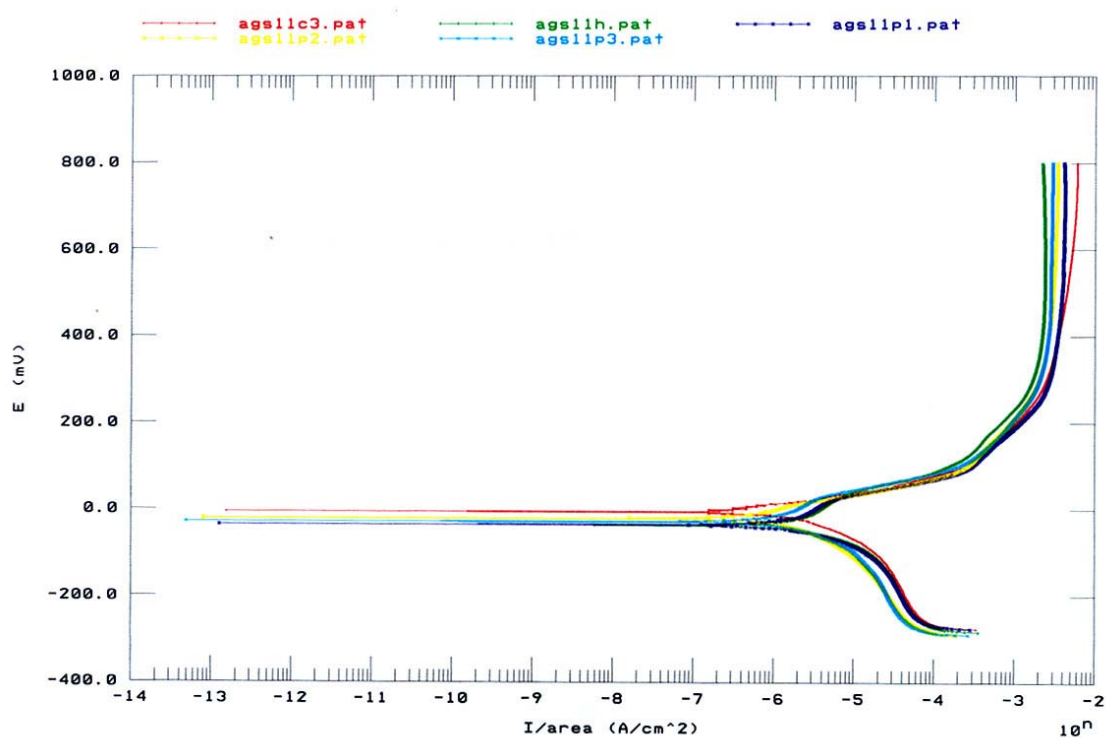
รูปที่ 5-24 : กราฟ โพลาริเซชัน ของ 3Cu ในสภาพหล่อ, อบชุบ, กัด 30%, 50% และ 70%



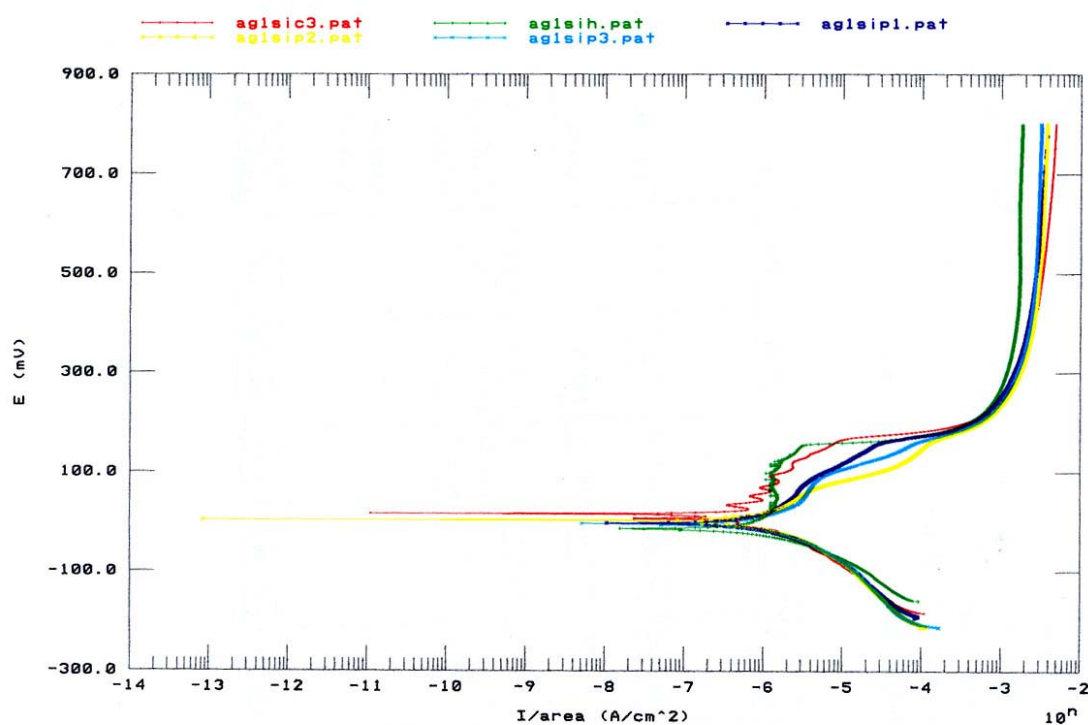
รูปที่ 5-25 : กราฟ โพลาริเซชัน ของ S1 ในสภาพหล่อ, อบชุบ, กดอัด 30%, 50% และ 70%



รูปที่ 5-26 : กราฟ โพลาริเซชัน ของ S6 ในสภาพหล่อ, อบชุบ, กดอัด 30%, 50% และ 70%

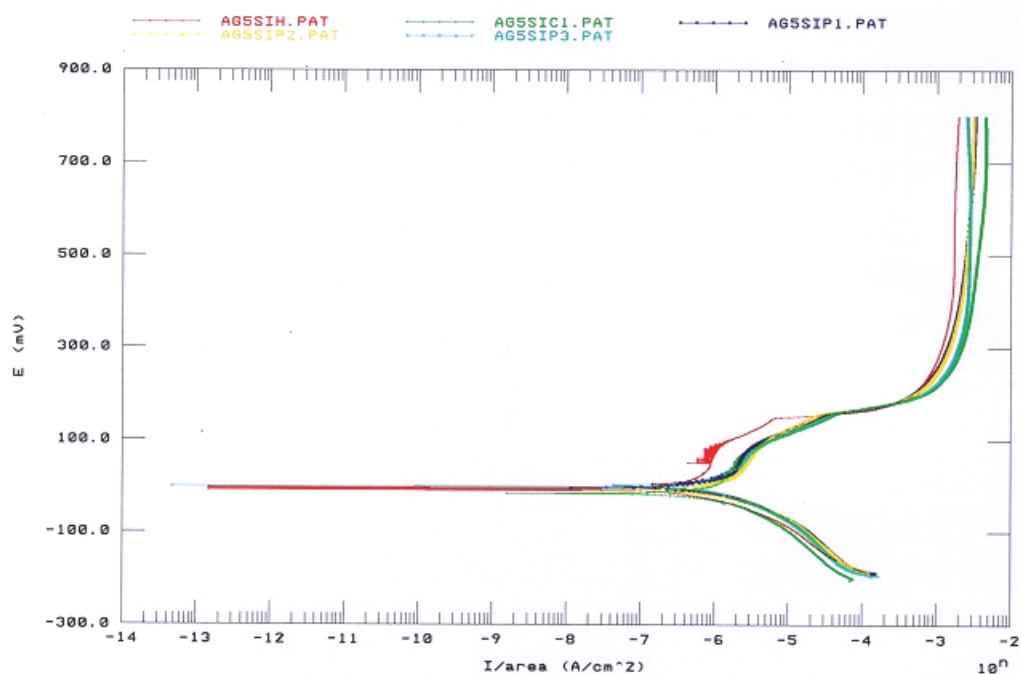


รูปที่ 5-27 : กราฟโพลาริเซชัน ของ S11 ในสภาพหล่อ, อบชุบ, กดอัด 30%, 50% และ 70%

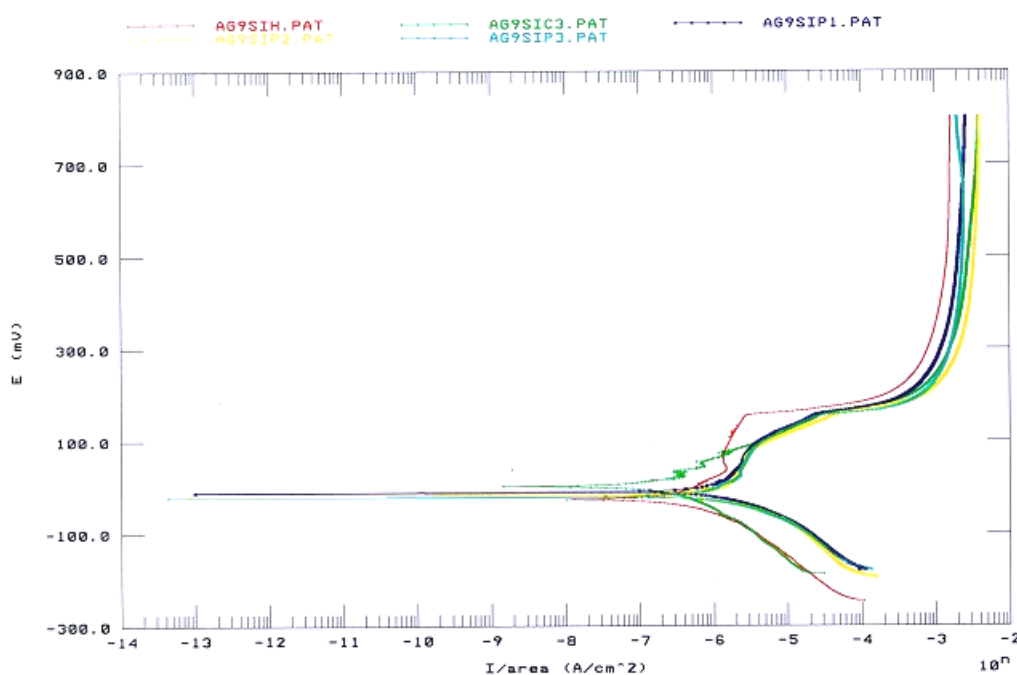


รูปที่ 5-28 : กราฟโพลาริเซชัน ของ 1Si ในสภาพหล่อ, อบชุบ, กดอัด 30%, 50% และ 70%

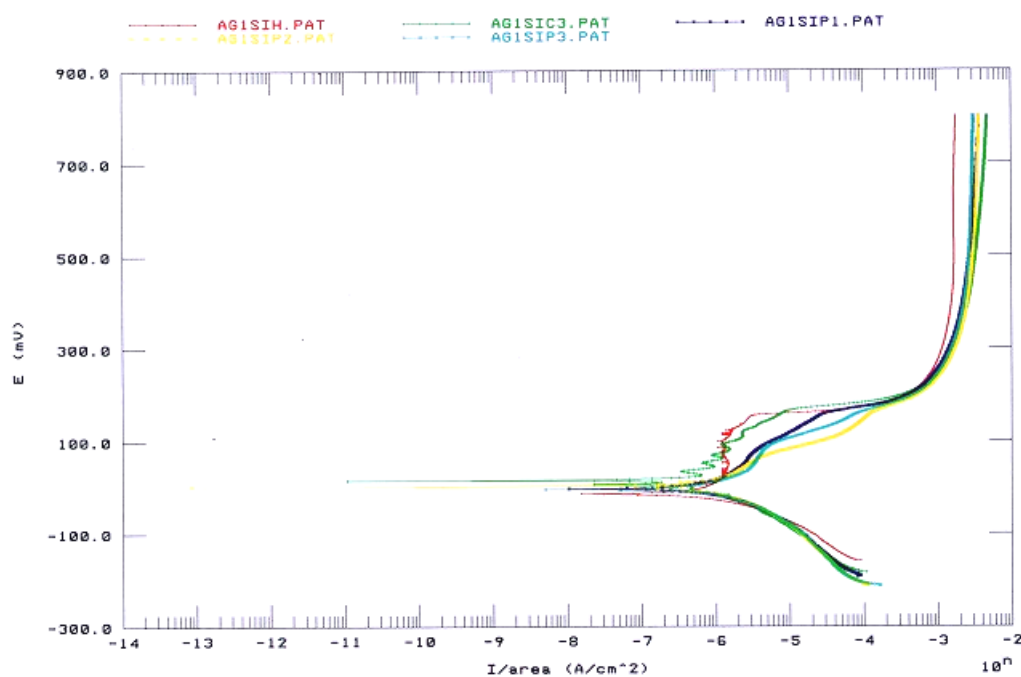
เนื่องจากชั้นทดสอบ 5Si 9Si 1Si และ 14Si เป็นชั้นทดสอบที่หลอมหล่อขึ้นเอง และเป็นชั้นทดสอบที่สนใจการโครงการนี้ จึงแสดงกราฟโพลาไรเซชันของชั้นทดสอบ ที่ผ่านมากระบวนการกระทำที่ต่างกันไว้ในรูป 5-29 ถึง 5-36



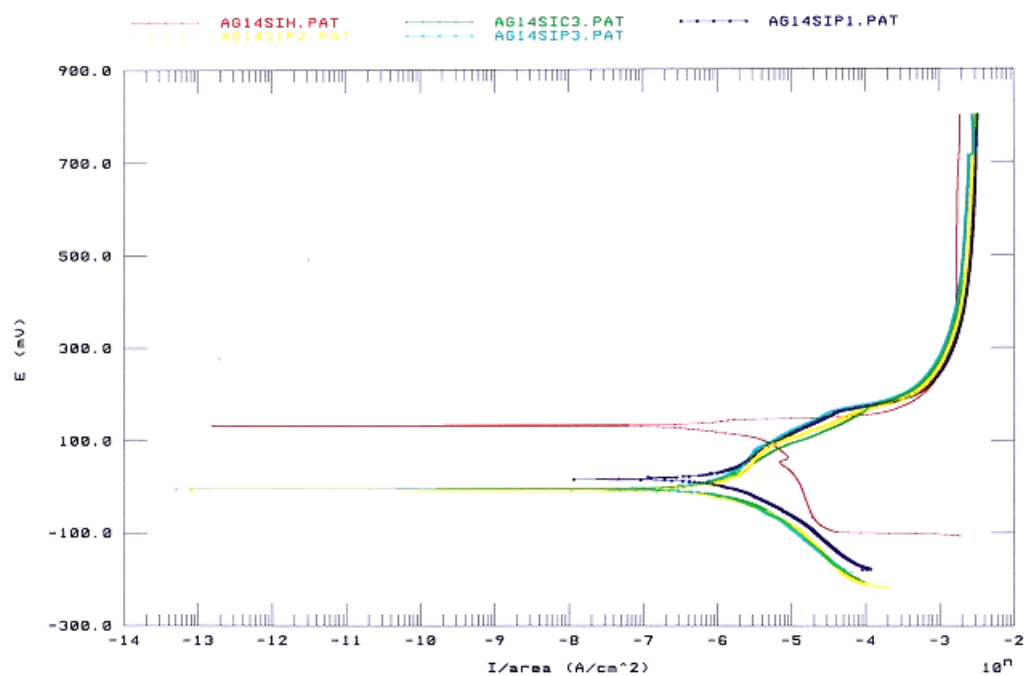
รูปที่ 5-29 : กราฟโพลาไรเซชัน ของ 5Si ที่ผ่านการหล่อ, อบชุบ, กดอัด 30%, 50% และ 70%



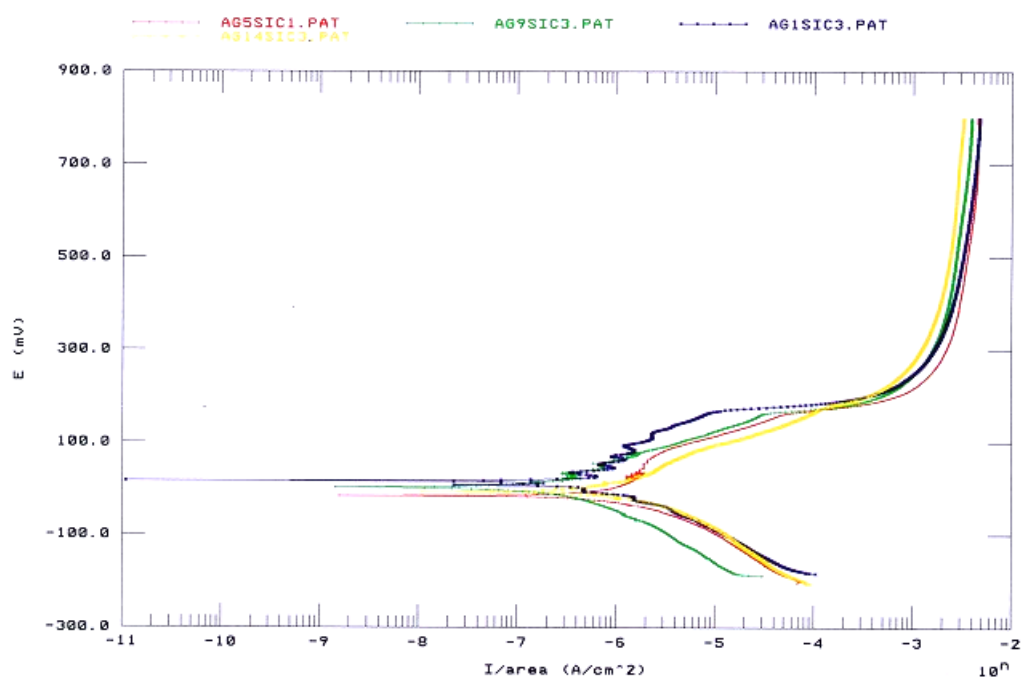
รูปที่ 5-30 : กราฟโพลาไรเซชัน ของ 9Si ที่ผ่านการหล่อ, อบชุบ, กดอัด 30%, 50% และ 70%



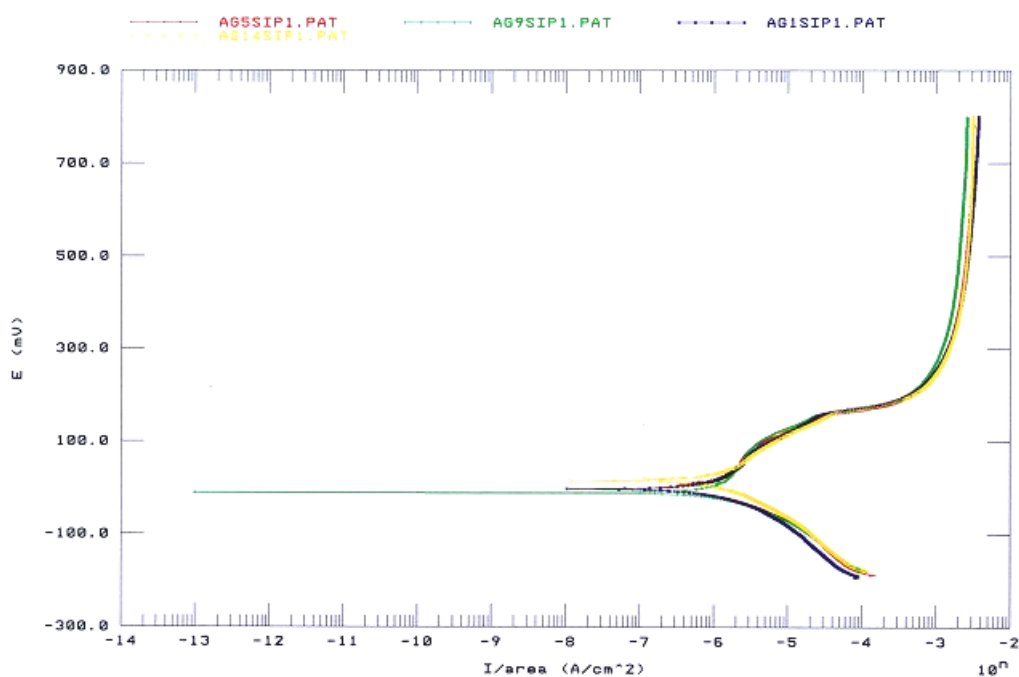
รูปที่ 5-31 : กราฟโพลาริเซชัน ของ 1Si ที่ผ่านการหล่อ, อบชุบ, กดอัด 30%, 50% และ 70%



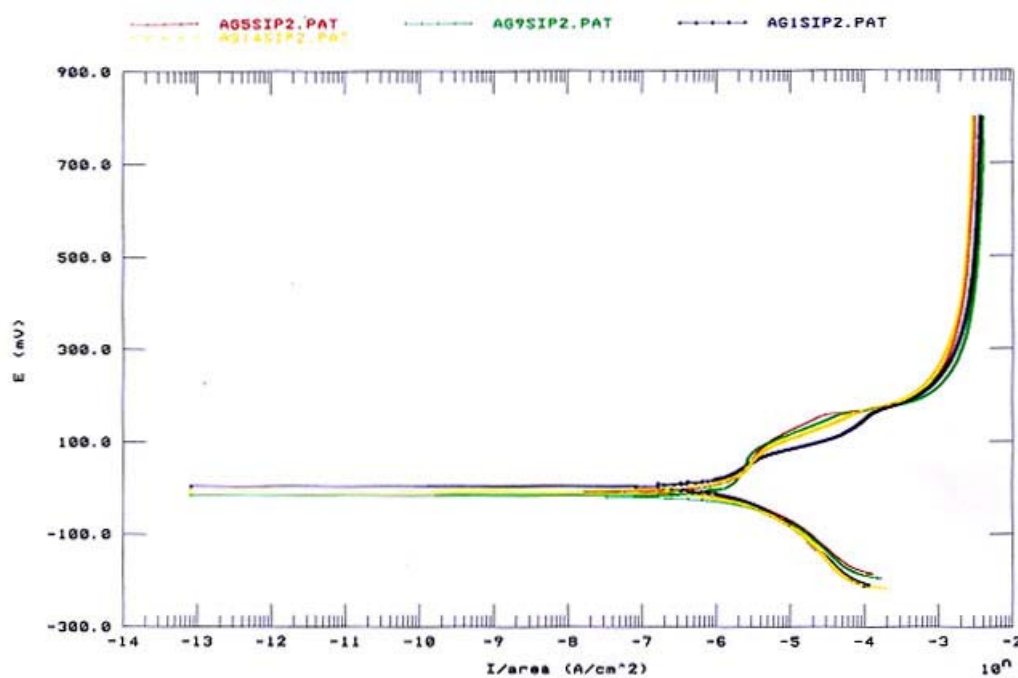
รูปที่ 5-32 : กราฟโพลาริเซชัน ของ 14Si ที่ผ่านการหล่อ, อบชุบ, กดอัด 30%, 50% และ 70%



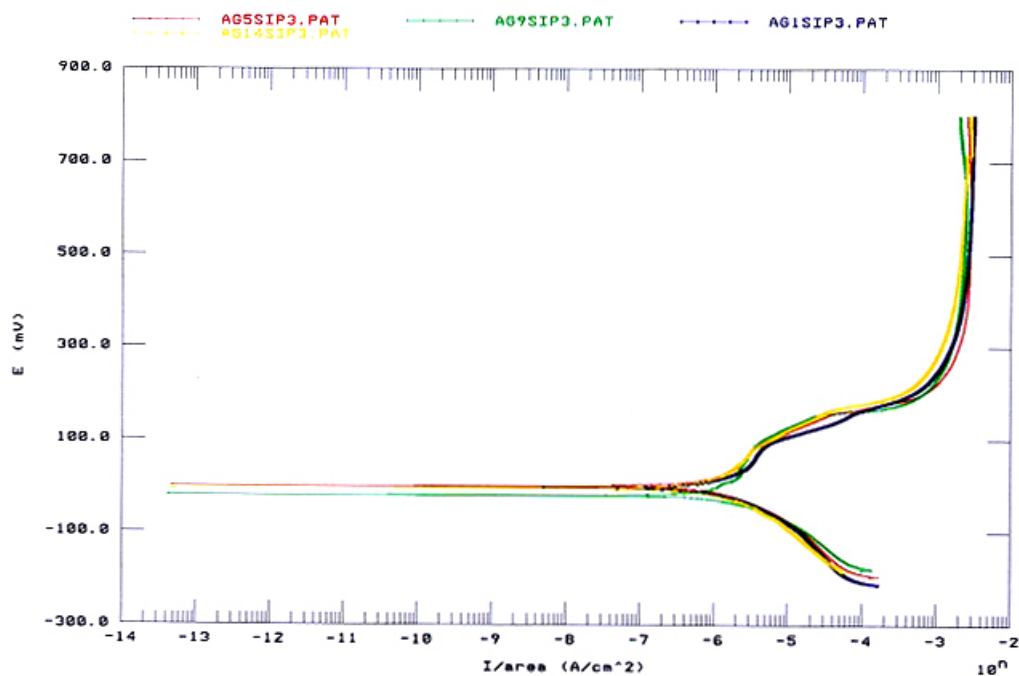
รูปที่ 5-33 : กราฟโพลาไรเซชัน ของชิ้นทดสอบ 5Si 9Si 1Si และ 14Si ที่ผ่านการหล่อ



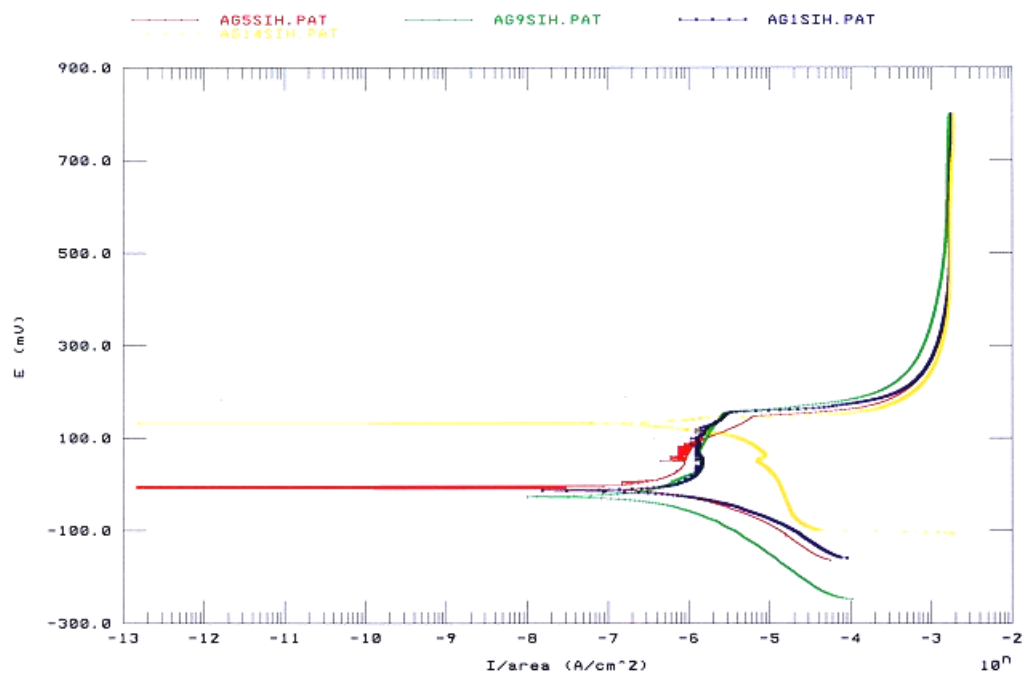
รูปที่ 5-34 : กราฟโพลาไรเซชัน ของชิ้นทดสอบ 5Si 9Si 1Si และ 14Si ที่ผ่านการกดอัด 30%



รูปที่ 5-35 : กราฟโพลาริเซชัน ของขั้นตอนทดสอบ 5Si 9Si 1Si และ 14Si ที่ผ่านการลดอัด 50%



รูปที่ 5-36 : กราฟโพลาริเซชัน ของขั้นตอนทดสอบ 5Si 9Si 1Si และ 14Si ที่ผ่านการลดอัด 70%



รูปที่ 5-36 : กราฟโพลาริเซชัน ของชิ้นทดสอบ 5Si 9Si 1Si และ 14Si ที่ผ่านการกัด 70%

จากกราฟ โพลาริเซชัน ของชั้นทดสอบทุกชั้นสามารถหาค่า E_{corr} และ ศักย์ไฟฟ้าที่ฟิล์มแตกได้ (ในกรณีที่มีฟิล์ม) ดังตารางที่ 5- 6

ตารางที่ 5-6 : ค่า E_{corr} และ ศักย์ไฟฟ้าที่ฟิล์มแตกของชั้นทดสอบ

หน่วยเป็น (mV)

ชั้น ทดสอบ	หล่อ		อบชุบ		กดอัด						หมายเหตุ
	E _{corr}	E _{break}	E _{corr}	E _{break}	30%		50%		70%		
					E _{corr}	E _{break}	E _{corr}	E _{break}	E _{corr}	E _{break}	
925	41.27	-	-17.3	-	21.75	148.6	24.19	-	14.43	-	
935	14.43	-	-17.3	-	-41.69	82.64	-24.61	70.54	-41.69	75.42	
3Cu	-0.2	163.3	-10.0	156.0	2.23	155.9	-9	148.6	-12.41	151.1	
4.5Cu	-	-	-5.1	175.4	-0.2	146.2	-7.529	148.6	2.23	153.5	
6Cu	29.49. -24.65	-	-24.6	165.7	7.11	153.5	9.97	155.9	-17.29	153.5	
S1	-2.1	165.7	-12.0	160.8	-22.2	94.94	-19.73	83	-31.93	82.74	
S2	12.0	158.4	-2.1	155.9	-17.29	-	-7.53	-	-29.49	65.66	
S3	9.6	165.7	14.4	163.3	-12.41	68.1	-14.85	112	-27.05	104.7	
S4	-30.8	163.3	5.0	161.3	-29.49	68.1	-24.61	99.82	-9.97	-	
S5	19.3	160.8	-29.5	158.4	-5.089	65.66	7.11	-	14.43	-	
S6	-4.7	-	-44.6	-	-16.09	-	-27.47	-	-13.24	-	
S7	-4.7	-	-18.9	-	-7.54	-	-14.85	-	-24.63	-	
S8	-16.1	-	-24.6	-	-30.32	-	-30.32	-	-30.32	-	
S9	-18.9	-	-24.6	-	-16.09	-	-39.52	-	-30.32	-	
S10	16.8	175.4	-44.6	-	-53.09	-	-57.78	-	-38.86	-	
S11	-7.6	-	-38.8	-	-36.01	-	-24.63	-	-30.32	-	
S12	-7.6	-	-36.0	-	-30.32	-	-21.78	-	-24.63	-	
S13	3.8	-	-36.0	-	-24.63	-	-24.63	-	-30.32	-	
S14	-41.7	-	-30.3	-	-24.63	-	-24.63	-	-27.47	-	
5Si	-17.29	10.73	-5.1	-	-5.09	53.47	-5.08	-	-2.65	-	
9Si	-0.2	-	-27.1	-	-14.85	68.1	-14.85	-	-22.17	90.06	
1Si	9.55	168.1	-14.9	-	-2.649	-	2.23	-	-2.65	-	
14Si	-7.53	-	-31.5	-	14.43	-	-7.53	-	-7.53	-	

5.6 สรุปผลการทดสอบและวิจารณ์

5.6.1 สรุปผลการทดสอบด้วยสารเคมี

การทดสอบด้วยสารเคมีนี้เป็นการทดสอบที่รุนแรง เมื่อเทียบกับสภาพการใช้งานจริง

- สารละลายอิมัลชันของโซเดียมซัลไฟด์

เนื่องจากเป็นสารละลายที่รุนแรงที่สุดที่ใช้ในการทดสอบโลหะเงินสเตอร์ลิง ดังนั้นเมื่อจุ่มชิ้นสอบในสารละลายนี้แล้ว ผิวชิ้นทดสอบหมองลงอย่างมาก เมื่อพิจารณา

กลุ่มชิ้นทดสอบ พบว่า

ชิ้นทดสอบ 935, 935 และ S11-S14 (กลุ่ม Ag-Cu-Zn-Si) มีความหมองระดับ 5 ทั้งในสภาพหล่อและสภาพอบชุบ แต่ในสภาพกดอัดมีความหมองระดับ 4

ชิ้นทดสอบ 3Cu, 45Cu และ 6Cu (กลุ่ม Ag-Cu) ในสภาพหล่อมีความหมองระดับ 3 ซึ่งน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับชิ้นทดสอบอื่นๆ แต่กระบวนการอบและกดอัด ทำให้ความหมองเพิ่มขึ้นเป็นระดับ 4

ส่วนชิ้นทดสอบที่เหลือ S1-S5, S6-S10, 5Si, 9Si, 1Si และ 14Si ทั้งสภาพหล่อ, อบชุบและกดอัด มีความหมองระดับ 4 ทั้งหมด

ในกลุ่ม Ag-Cu-Zn-Si และกลุ่ม 5Si 9Si 1Si 14Si มี 0.05-0.14%Si และ 92.7-93.8 %Ag มีความหมองน้อยกว่า S11-S14 ซึ่งมี 0.1-0.25%Si และ 93.75-93.9%Ag

กระบวนการที่กระทำกับชิ้นทดสอบ

ชิ้นทดสอบอบชุบมีความหมองสม่ำเสมอตลอดผิว

ชิ้นทดสอบที่กดอัด ในชิ้นทดสอบเดียวกัน บริเวณขอบชิ้นงานมีความหมองมากกว่าส่วนอื่น ทั้งนี้เนื่องจาก อัตราการแปรรูปมากกว่าบริเวณกลางชิ้นงาน

ชิ้นทดสอบหล่อ มีความหมองไม่สม่ำเสมอตลอดผิว ซึ่งขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการหล่อด้วย

ชิ้นทดสอบในกลุ่มเดียวกัน เมื่อปริมาณธาตุเจือต่างกัน ไม่มีความแตกต่างกันเมื่อทดสอบด้วยโซเดียมซัลไฟด์

- **เหงื่อเทียม**

เมื่อทดสอบโดยให้ชิ้นทดสอบอยู่ในบรรยากาศของเหงื่อเทียม 10 วัน ชิ้นทดสอบมีความหมองไปเล็กน้อยเท่านั้น โดยความหมองอยู่ที่ระดับ 2 ทุกชิ้น

ชิ้นทดสอบทุกชิ้นมีความต้านทานหมองในบรรยากาศของเหงื่อเทียมใกล้เคียงกัน คือ มีความหมองระดับ 2 ทุกชิ้น แต่สำหรับในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ พบว่า ปริมาณเงินยิ่งมาก ยิ่งมีความต้านทานความหมองดี ในกลุ่ม Ag-Cu มีความต้านทานความหมองดี เพราะมีปริมาณเงินอยู่มาก และปริมาณ Si มากขึ้นเกินค่าหนึ่งแล้วไม่ทำให้ความต้านทานความหมองสูงขึ้น

การกดอัด (แปรรูปเย็น) มีผลต่อความต้านทานความหมองน้อย

5.6.2 สรุปผลการทดสอบด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

การพิจารณาผลการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน สามารถแบ่งเป็น 3 ลักษณะคือ

5.6.2.1 ผลของส่วนผสมทางเคมีหรือชนิดของธาตุเจือ

จากกราฟ โพลาริเซชัน ของชิ้นทดสอบที่มีธาตุเจือต่างกัน 5 กลุ่ม สามารถแบ่งออกเป็น 2 พวก คือ

- ชิ้นทดสอบที่มีฟิล์ม

ในกลุ่มนี้คือ Ag-Cu และ Ag-Cu-Zn ชิ้นทดสอบมีฟิล์มปกป้องและฟิล์มแตกที่ประมาณ 160 -175 mV ($E_{Ag/AgCl} = 0.222 \text{ V SHE}$)

ชิ้นทดสอบในกลุ่ม Ag-Cu มีธาตุเจือชนิดเดียวคือ ทองแดง ซึ่งเป็นธาตุที่มีฟิล์มปกป้อง ฟิล์มมีคุณภาพดีพอควร เพราะ ขณะมีฟิล์ม มีกระแสกัดกร่อนน้อยมาก (ความหนาแน่นกระแสขณะมีฟิล์ม $= 10^{-5} \text{ A/cm}^2$) แต่ฟิล์มแตกที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม ฟิล์มที่เกิดขึ้นสามารถปกปิดผิวชิ้นทดสอบได้พอควร นอกจากนี้พบว่าเมื่อ ปริมาณทองแดงมากขึ้น ค่า E_{corr} ต่ำลง

ค่า E_{corr} ยิ่งต่ำยิ่งทำให้ชิ้นทดสอบถูกกัดกร่อนได้ง่าย

ชิ้นทดสอบในกลุ่ม Ag-Cu-Zn มีผลคล้ายกับชิ้นทดสอบในกลุ่ม Ag-Cu

ชิ้นทดสอบมีธาตุผสมอยู่ 3 ธาตุ คือ เงิน ทองแดง และ สังกะสี โดยที่

เงิน มีค่า $E^0 = +0.799 \text{ V SHE} = +0.577 \text{ V Ag/AgCl}$

ทองแดง มีค่า $E^0 = +0.342 \text{ V SHE} = +0.120 \text{ V Ag/AgCl}$

สังกะสี มีค่า $E^0 = -0.762 \text{ V SHE} = -0.984 \text{ V Ag/AgCl}$

จากค่า E^0 สังกะสีมีค่า E^0 ต่ำที่สุด ดังนั้นสังกะสีมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายที่สุด ต่อมาคือ ทองแดง ดังนั้นในชิ้นทดสอบที่มีสังกะสี ควรค่า E_{corr} ต่ำกว่าชิ้นทดสอบที่ไม่มีสังกะสีแต่ผลของการทดสอบไม่เป็นเช่นนั้น โดยที่ชิ้นทดสอบทั้ง 2 กลุ่ม มีค่า E_{corr} ไม่ต่างกัน เพราะสังกะสีมีในชิ้นทดสอบมีปริมาณน้อย รวมทั้งสังกะสีไม่สามารถสร้างฟิล์มได้ จึงไม่มีผลต่อกราฟ โพลาริเซชัน

- ชิ้นทดสอบที่ไม่มีฟิล์ม

ชิ้นทดสอบในกลุ่ม Ag-Cu-Si ค่า E_{corr} มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณซิลิกอนมากขึ้น

ชิ้นทดสอบในกลุ่ม Ag-Cu-Zn-Si ค่า E_{corr} ก่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับ ชิ้นทดสอบในกลุ่มอื่น

ในกลุ่มนี้มีธาตุซิลิกอนอยู่ด้วย ซึ่งปกติซิลิกอนจะไม่เกิดปฏิกิริยา (Immunity) เมื่อศักย์ต่ำกว่า -1.2 V SHE หรือ -1.4 V Ag/AgCl ซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำมาก สภาพแวดล้อมที่ชิ้นทดสอบต้องสัมผัส มักมีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกว่านี้ ทำให้ชิ้นทดสอบที่มีซิลิกอนมีค่า E_{corr} ต่ำ และเมื่อปริมาณซิลิกอนมากขึ้น E_{corr} มีแนวโน้มลดลง

5.6.2.2 ผลของปริมาณธาตุเงิน

เมื่อพิจารณาชั้นทดสอบในกลุ่มเดียวกัน คือมีธาตุเงินเหมือนกัน แต่ปริมาณต่างกัน พบว่า ปริมาณธาตุเงินที่มีอยู่ในชั้นทดสอบไม่ทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนแตกต่างกัน หรือ ไม่มีผลต่อ E_{corr} และกราฟ โพลาริเซชัน ของชั้นทดสอบ

5.6.2.3 ผลของกระบวนการที่กระทำกับชั้นทดสอบ

ชั้นทดสอบที่ไม่มีฟิล์ม

การแปรรูปขึ้นโดยการอัดและการอบชุบ ไม่ทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนของชั้นทดสอบเปลี่ยนแปลงหรือไม่มีผลต่อ E_{corr} และกราฟ โพลาริเซชัน

ชั้นทดสอบที่มีฟิล์ม

- อบชุบ ทำให้เห็นฟิล์มชัดขึ้น
- กดอัดมาก ทำให้พฤติกรรมการสร้างฟิล์มไม่ชัดเจน
- การอบชุบและกดอัด ไม่มีผลต่อ E_{corr}

5.6.3 สรุปผลการทดสอบด้วยสารเคมีและเคมีไฟฟ้า

ชั้นทดสอบเงินสเตอร์ลิง ที่มีทองแดงเป็นธาตุเงินอย่างเดียวย สามารถสร้างฟิล์มได้ และหมองน้อยที่สุด ซึ่งผลการทดสอบด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าและสารเคมีสอดคล้องกัน

เมื่อในชั้นทดสอบมี ทองแดง, สังกะสีและซิลิกอน ถ้าปริมาณธาตุทั้ง 2 ไม่มากนัก ชั้นทดสอบยังสร้างฟิล์มได้ ซึ่งเป็นผลมาจากทองแดง แต่ถ้ามีปริมาณมากขึ้น ทำให้ชั้นทดสอบหมองลงมาก และไม่ปรากฏว่ามีฟิล์มเมื่อทดสอบด้วยเคมีไฟฟ้า

การแปรรูปขึ้นโดยการกดอัด ในการทดสอบด้วยเคมีไฟฟ้าไม่มีผลแตกต่างจากชิ้นงานหล่อ แต่จากการทดสอบโดยใช้สารเคมี พบว่า ในชั้นทดสอบที่แปรรูปขึ้น บริเวณขอบชิ้นงานจะหมองกว่าบริเวณกลางชั้นทดสอบ ทั้งนี้เพราะว่า บริเวณขอบมีการเสีรูปมากกว่าบริเวณกลางชั้นทดสอบ

การอบชุบ ในการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเคมีไฟฟ้าไม่มีความแตกต่างจากชิ้นงานหล่อ แต่จากการทดสอบโดยใช้สารเคมีพบว่า ความสม่ำเสมอของชิ้นงานดีกว่าชิ้นงานหล่อเมื่อผิวหมองลง จะหมองอย่างสม่ำเสมอกว่าชิ้นงานหล่อ

Reference

1. Gueter Beck, "Edelmetall-Taschenbuch", Degussa AG, Huethig-Verlag Heidelberg, 1995
2. L. Gal-or, "Tarnishing and Corrosion of Silver and Gold Alloys", The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology, 1990
3. Allison Butta, "Silver Economics, Metallurgy and its use", D. Van Nostrand Com. Inc. Princeton, New Jersey, 1967
4. Christoph. J. Raub, "The Influence of Small addition to Jewelry Alloys", The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology, 1987
5. Kenneth R. Tretheway, "Corrosion for Students of Science and Engineering", Longman Scientific & Technology, 1998
6. Denny A. Jones, "Principles and Prevention of Corrosion", Macmillan International Publishing Group, Singapore, 1992
7. Marcel Pourbaix, "Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions", NACE International, Houston, Texas, 1974
8. H. Kim and J. H. Payer, "Tarnish Process of Silver in 100ppb H₂S Containing Environments", The Journal of Corrosion Science and Engineering, Submitted 11 March 1999, currently being reviewed.

บทคัดย่อ

โลหะเงินเงิน (Silver Alloys) เป็นโลหะที่นิยมใช้ทำตัวเรือนเครื่องประดับมากชนิดหนึ่ง ซึ่งประเทศไทยมีการส่งออกเป็นจำนวนมากในแต่ละปี แต่ความรู้พื้นฐานด้านโลหะเงินเงินยังไม่ค่อยแพร่หลาย ซึ่งทำให้การพัฒนาโลหะเงินเงินสำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับเป็นไปได้ช้า ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของสารเงินเงิน (Alloying Elements) สำคัญที่ผสมในโลหะเงินเงิน ได้แก่ ทองแดง สังกะสี และซิลิกอน โดยกำหนดปริมาณทองแดงประมาณ 5% สังกะสีระหว่าง 0.5 ถึง 2.5% และซิลิกอน 0.1 ถึง 0.4% ในการศึกษาได้ศึกษาถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ คุณสมบัติทางกล การหล่อ กรรมวิธีทางความร้อน และความต้านการหมอง ซึ่งผลของการศึกษาพบว่า ถ้าปริมาณสังกะสีเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การยึดตัวลดลงถ้าปริมาณซิลิกอนเพิ่มขึ้นค่าความต้านแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยึดตัวมีแนวโน้มลดลง และพบว่าไม่ควรผสมซิลิกอนเกินกว่า 0.2% เพราะทำให้เปราะมาก ในการศึกษาคุณสมบัติด้านการหล่อเหวี่ยงในเตาเหวี่ยงแบบสุญญากาศด้วยเงินเงิน 4.8% Cu 1.6% Zn และ 0.1% Si ซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีคุณสมบัติทางกลในเกณฑ์ดีพบว่า มุมเท 65° ความเร่ง 10 G และอุณหภูมิเทหล่อ 1050°C มีสิ่งบกพร่องภายในน้อยที่สุด ด้านกรรมวิธีทางความร้อนได้ศึกษาจากโลหะเงินเงิน 4 ตัวอย่าง คือ 1) 5.8% Cu 0.75% Zn 0.05% Si 2) 5.9% Cu 1.3% Zn 0.09% Si 3) 5.1% Cu 1.0% Zn 0.1% Si และ 4) 4.8% Cu 1.6% Zn 0.14% Si พบว่าถ้าใช้อุณหภูมิอบเป็นเนื้อเดียวที่ 780°C เวลาอบที่เหมาะสมที่สุดคือ 65 นาที การอบเพิ่มความแข็งแรงหลังจากอบเป็นเนื้อเดียวและชุบน้ำ พบว่าอุณหภูมิและเวลาอบที่เหมาะสมที่สุดคือ 300°C 2 ถึง 3 ชม. การศึกษาด้านความต้านการหมองพบว่าสังกะสีและซิลิกอนรวมถึงการขึ้นรูปเย็นมีผลลบ ในขณะที่การอบเป็นเนื้อเดียวกันหลังหล่อมีผลดีอย่างชัดเจน

Abstract

Jewelry setting made of silver alloys is one of the major exported goods of Thailand. Knowledge of silver alloys is very limited and the consequence is the slow development of these alloys. The purpose of this research is to study the effect of alloying elements that are Cu, Zn and Si on mechanical properties, casting, heat treatment and tarnish resistance of the alloys. The ranges of these alloying elements added are 5%Cu, 0.5-2.5%Zn and 0.1-0.4%Si. It is found that the strength of silver alloys slightly increases and elongation decreases with increasing Zn content. Si has the same effect as Zn but the alloys become brittle when Si content exceeds 0.2%. The centrifugal vacuum casted alloy containing 4.8%Cu, 1.6%Zn and 0.1%Si yield good mechanical properties. This alloy is used to study casting defects. The conditions of casting which yield the least number of defects is 65° pouring angle, 10G acceleration and 1050°C casting temperature. Heat treatment is studied by using 4 different alloys that are 1) 5.80%Cu, 0.75%Zn, 0.05%Si 2) 5.90%Cu, 1.30%Zn, 0.09%Si 3) 5.10%Cu, 1.00%Zn, 0.10%Si and 4) 4.80%Cu, 1.60%Zn, 0.14%Si. It is found that the suitable time for homogenizing at 780°C then water quenching is 65 minutes. Aging condition is 300°C for 2-3 hours. For tarnish resistance of silver alloys Zn, Si and cold working lower tarnish resistance but homogenizing has beneficial effect.

การศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของโลหะเงินเพื่อการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ

สมนึก วัฒนศรียกด ตีรพร ดาวพิเศษ วชิร ฉายสุวรรณ สุรัตน์ วรรณศรี และเดช เหมือนขาว

1. บทนำ

ประเทศไทยมีการส่งออกเครื่องประดับเป็นจำนวนมากในแต่ละปี ตัวเรือนเครื่องประดับทำจากโลหะมีค่า เช่น ทองคำ ทองคำขาว และโลหะเงิน เป็นต้น ซึ่งโลหะเหล่านี้มักไม่ใช่โลหะบริสุทธิ์ แต่อยู่ในรูปโลหะเจือ (Alloys) โลหะเงินนับว่าเป็นโลหะมีค่าที่มีราคาต่ำที่สุด จึงเป็นที่นิยมผลิตเครื่องประดับชนิดที่มีราคาไม่สูง ซึ่งกลับมีความต้องการของตลาดเป็นจำนวนมาก การผลิตตัวเรือนเครื่องประดับด้วยโลหะเงินเจือ ส่วนใหญ่ใช้ทองแดงเป็นสารเจือเพียงอย่างเดียวเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกล ยังไม่มีการศึกษาถึงผลกระทบในการผสมสารเพิ่มเติม เช่น สังกะสี และซิลิกอน ซึ่งเป็นสารไดออกไซด์ซึ่งจะมีผลดีต่อการหล่อหลอมและการผลิตในขั้นตอนต่าง ๆ

โครงการนี้เป็นการศึกษาเพื่อนำไปสู่การพัฒนาโลหะเงินเพื่อการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ โดยการ
ใช้สารเจือ ทองแดง สังกะสี และซิลิกอน เพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ได้แก่ คุณสมบัติทางกล การหล่อ กรรม
วิธีทางความร้อน และการต้านทานการหมอง ซึ่งความรู้พื้นฐานเหล่านี้ไม่ค่อยเป็นที่แพร่หลายโดยทั่วไป ทำให้เมื่อเกิด
ปัญหาด้านการผลิต จะไม่สามารถแก้ปัญหาได้อย่างทันที ส่งผลในด้านการควบคุมคุณภาพ และการพัฒนาโลหะเงิน
เจือให้ได้คุณสมบัติตามความต้องการของตลาด

2. วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา

โลหะเงินเงาที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ สารเงาที่ใช้ประกอบด้วย ทองแดง ประมาณ 5% สังกะสี ระหว่าง 0.5% ถึง 2.5% และซิลิกอน ระหว่าง 0.1% ถึง 0.4% โดยทำการศึกษาด้านความต้านแรงดึง ความแข็ง ความเหนียว ความสามารถในการขึ้นรูปเย็น ตัวแปรที่เหมาะสมในการหล่อในเตาหล่อเหวี่ยงแบบสุญญากาศ การปรับปรุงคุณสมบัติโดยกรรมวิธีทางความร้อน การรวบรวมโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินเงา ส่วนผสมต่าง ๆ ในสภาพหล่อ สภาพขึ้นรูปเย็น และสภาพผ่านกรรมวิธีทางความร้อน รวมไปถึงการศึกษาและการกำหนดวิธีในการวัดความต้านทานการหมองของโลหะเงินเงา

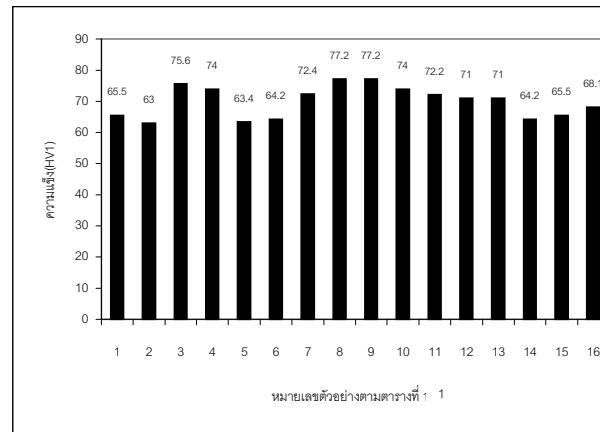
3. ผลการศึกษา

3.1 การศึกษาด้านคุณสมบัติทางกล

ในการศึกษาในทดลองผสมสารเจือทั้ง 3 ได้แก่ Cu Zn และ Si ในสัดส่วนต่างๆ รวมทั้งสิ้น 16 สูตร ตามตารางที่ 1

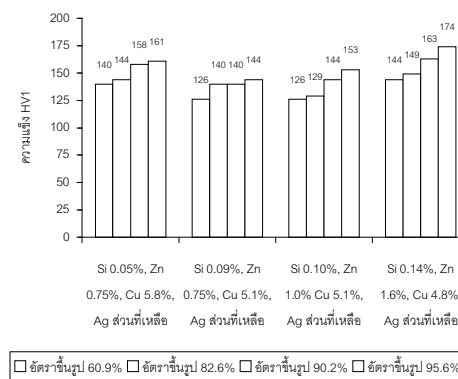
ตารางที่ 1 : ส่วนผสมของสารเจือของตัวอย่างเงินเจือ

ตัวอย่างที่	Cu (%)	Zn (%)	Si (%)	ตัวอย่างที่	Cu (%)	Zn (%)	Si (%)
1	5.8	0.75	0.05	9	3.1	1.70	0.21
2	5.9	1.30	0.09	10	4.4	0.83	0.23
3	5.1	1.0	0.10	11	5.2	1.60	0.23
4	4.8	1.6	0.14	12	5.7	0.79	0.24
5	5.2	1.16	0.15	13	4.5	1.30	0.27
6	3.9	2.10	0.19	14	4.1	1.20	0.28
7	5.8	0.85	0.20	15	3.3	1.70	0.28
8	4.6	1.10	0.20	16	4.4	2.0	0.31



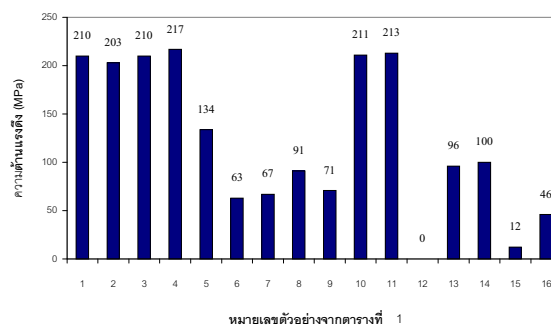
รูปที่ 1 : เปรียบเทียบค่าความแข็งของโลหะเงินเจือตามตัวอย่างในตารางที่ 1 สภาพหลังหล่อ

ในรูปที่ 1 แสดงถึงค่าความแข็งของโลหะเงินเจือสภาพหลังหล่อ ซึ่งมีความแข็งระหว่าง 63 ถึง 77.2 HV1 ในรูปที่ 2 แสดงค่าความแข็งของโลหะเงินเจือ 4 สูตรผสม ที่การขึ้นรูปเย็นสัดส่วนระหว่าง 60.9% ถึง 95.6% ซึ่งจะพบว่ามีความแข็งเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของการขึ้นรูป

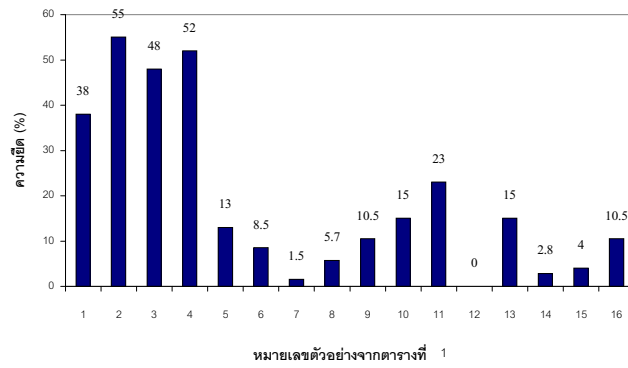


รูปที่ 2 : เปรียบเทียบค่าความแข็งของโลหะเงินเจือหลังการขึ้นรูปเย็นที่อัตราขึ้นรูปต่าง ๆ

ในรูปที่ 3 และ 4 เป็นค่าความต้านแรงดึงและความยืดของโลหะเงินเจือทั้ง 16 สูตร ในสภาพหลังการหล่อ ซึ่งจะพบว่าตัวอย่างที่ 1 ถึง 4 เป็นสูตรซึ่งให้ค่าความต้านแรงดึงและความยืดสูงกว่าสูตรอื่น ๆ ซึ่งจากผลนี้ทำให้สามารถกำหนดส่วนผสมของทองแดง สังกะสี และซิลิกอน ในช่วงที่เหมาะสมในการศึกษาขั้นต่อไปได้

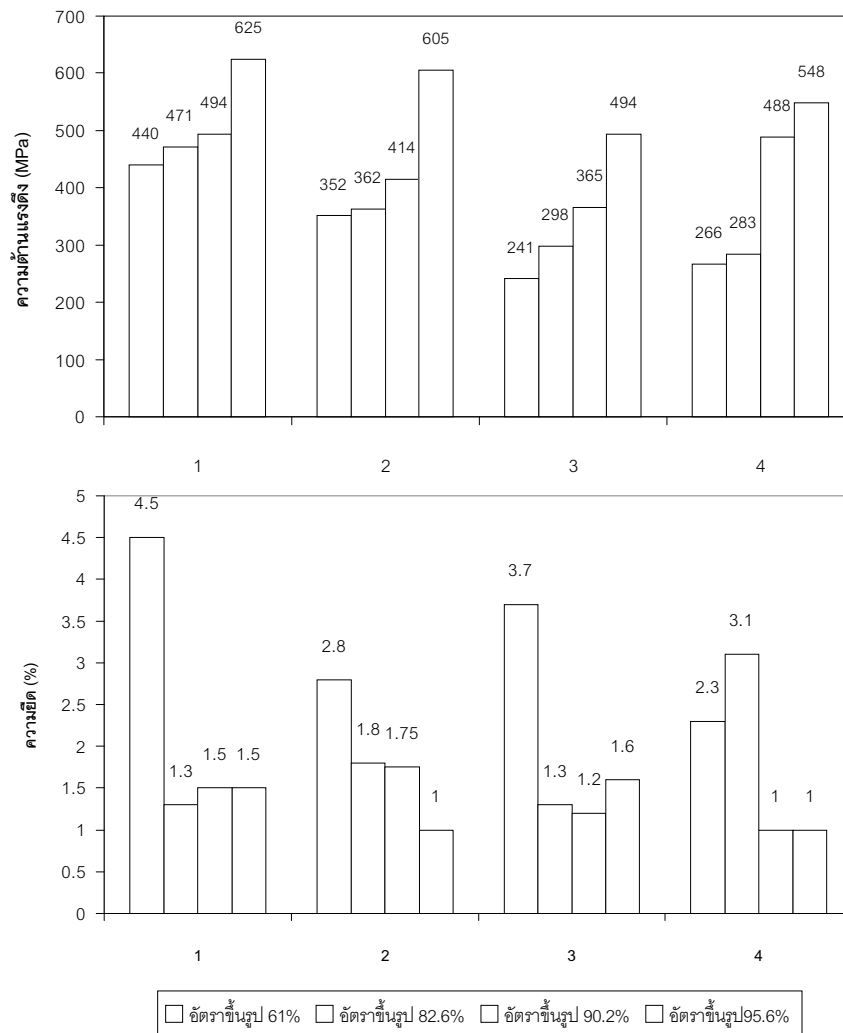


รูปที่ 3 : เปรียบเทียบค่าความต้านแรงดึงของโลหะเงินเจือสภาพหลังหล่อ



รูปที่ 4 : เปรียบเทียบความยืดของโลหะเงินเจือสภาพหลังหล่อ

ในรูปที่ 5 แสดงผลของค่าความต้านแรงดึงและความยืดของโลหะเงินเจือ 4 สูตรแรก ซึ่งผ่านการขึ้นรูปที่อัตราการขึ้นรูปต่าง ๆ



กลุ่มที่ 1 Si 0.05% Zn 0.75% Cu 5.8% Ag ส่วนที่เหลือ

กลุ่มที่ 2 Si 0.09% Zn 1.30% Cu 5.9% Ag ส่วนที่เหลือ

กลุ่มที่ 3 Si 0.10% Zn 1.0% Cu 5.1% Ag ส่วนที่เหลือ

กลุ่มที่ 4 Si 0.14% Zn 1.6 % Cu 4.8% Ag ส่วนที่เหลือ

รูปที่ 5 : เปรียบเทียบค่าความต้านแรงดึงและความยืดของโลหะเงินเจือที่อัตราการขึ้นรูปต่าง ๆ

3.2 การศึกษาด้านการหล่อ

เตาหล่อที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นเตาหล่อหัวยิงแบบสุญญากาศ โดยได้พิจารณาเลือกสูตรผสมที่ให้คุณสมบัติทางกลในเกณฑ์ดีคือ 4.8% Cu 1.6% Zn และ 0.10% Si ขึ้นทดสอบถูกออกแบบให้เป็นวงแหวนขนาด OD 20.5 x ID 17.5 x 7.7 mm ดัดบนคันเทียบขนาด ϕ 10 mm ทางเข้า ϕ 3 mm ในการศึกษาได้ทำการแปรผันมุมรูปที่ 25° 45° และ 65° ความเร่งที่ 5G 10G และ 15G และอุณหภูมิเทหล่อที่ 950°C 1000°C และ 1050°C ทำให้มีตัวอย่างทดลองจำนวน 27 ตัวอย่าง ซึ่งผลการทดลองได้ทำการวัดความหนาแน่น ปริมาตร ขนาดเกรน สิ่งบกพร่องที่พบทั้งภายในและภายนอก ดังรายละเอียดทั้ง 27 ตัวอย่าง ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 : แสดงจำนวนสิ่งบกพร่องที่ตัวแปรต่างๆ ในการหล่อ

หมายเลข ตัวอย่าง	มุม ทางเดิน น้ำโลหะ	ความเร่ง	อุณหภูมิ (°C)	ค่าเฉลี่ย ความหนาแน่น (g/cm ³)	ค่าเฉลี่ย ปริมาตร (Cm ³)	ค่าเฉลี่ย ขนาดเกรน (μ m)
1	25°	5G	950	10.1987	0.7678	73.5576
2	25°	5G	1000	10.1336	0.7644	58.0908
3	25°	5G	1050	10.2551	0.7456	57.7268
4	25°	10G	950	10.2164	0.7578	69.8632
5	25°	10G	1000	10.2272	0.7589	69.9281
6	25°	10G	1050	10.1683	0.7800	55.9775
7	25°	15G	950	10.2712	0.7833	76.1131
8	25°	15G	1000	10.2891	0.7678	61.0977
9	25°	15G	1050	10.3087	0.7856	57.1730
10	45°	5G	950	10.2015	0.7689	65.9946
11	45°	5G	1000	10.0458	0.7667	53.7907
12	45°	5G	1050	10.1491	0.7544	59.6495
13	45°	10G	950	10.1367	0.7500	62.0317
14	45°	10G	1000	10.2438	0.7578	68.2842
15	45°	10G	1050	10.3037	0.7756	60.4546
16	45°	15G	950	10.1466	0.8044	77.9864
17	45°	15G	1000	10.1738	0.7667	77.5492
18	45°	15G	1050	10.1566	0.7722	58.6798
19	65°	5G	950	10.1092	0.7622	74.6291
20	65°	5G	1000	10.0424	0.7544	58.3030
21	65°	5G	1050	10.2009	0.7533	61.7988
22	65°	10G	950	10.1311	0.7622	63.3713
23	65°	10G	1000	10.1881	0.7622	71.2917
24	65°	10G	1050	10.3204	0.7711	61.0997
25	65°	15G	950	10.1619	0.7867	74.6291
26	65°	15G	1000	10.2694	0.7600	71.7165
27	65°	15G	1050	10.1892	0.7656	54.4658

จากการพิจารณาผลในตารางที่ 2 สามารถสรุปได้ว่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดในการหล่อในเตาหล่อเหวี่ยงแบบสุญญากาศ คือ นมรุต 65° ความเร็ว 10G และอุณหภูมิหล่อ 1050°C

3.3 การศึกษาด้านกรรมวิธีทางความร้อน

กรรมวิธีทางความร้อนเป็นวิธีการที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะได้หลายด้าน เช่น การปรับให้โลหะมีโครงสร้างหรือส่วนผสมที่สม่ำเสมอหลังการหล่อ การปรับให้มีคุณสมบัติทางกลเพิ่มขึ้น และการทำให้โลหะอ่อนลงหรือเหนียวขึ้นจากการขึ้นรูปเย็น ซึ่งการจะให้ได้ผลลัพธ์ออกมาอย่างไรขึ้นกับการกำหนดอุณหภูมิ เวลาอุณหภูมิ และการเย็นตัว ซึ่งการศึกษานี้จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดตัวแปรอย่างเหมาะสม ในการศึกษาได้เลือกโลหะเงินเจือที่มีคุณสมบัติทางกลในเกณฑ์ดี 4 ตัวอย่าง คือตัวอย่างหมายเลข 1 ถึง 4 ตามตารางที่ 1

3.3.1 การอบให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Solution Annealing)

การอบให้เป็นเนื้อเดียวกันมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอของโครงสร้างและส่วนผสมหลังการหล่อ ซึ่งสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค นอกจากนั้นการอบให้เป็นเนื้อเดียวกันมีผลต่อคุณสมบัติทางกล คือ ความแข็งและความต้านแรงดึงจะลดลง ในขณะที่ความยืดจะเพิ่มขึ้น ในตารางที่ 3 แสดงผลคุณสมบัติทางกลและขนาดเกรนที่เวลาอบต่าง ๆ

จากผลของการวัดในตารางที่ 3 ถ้าพิจารณาด้านความเหนียว และขนาดเกรนที่ยังไม่ขยายใหญ่มาก สามารถระบุได้ว่าถ้าอบที่ 780°C เวลาอบที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 50 ถึง 65 นาที

ตารางที่ 3 : การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลและขนาดเกรนของโลหะเงินเจือที่เวลาอบต่าง ๆ

ส่วนผสม	คุณสมบัติ	เวลาอบที่อุณหภูมิ 780°C (นาที)						
		0	20	35	50	65	80	90
5.8% Cu 0.75% Zn 0.05% Si	ความแข็ง (HV1)	65.5	64.2	60.7	56.2	52.2	50.0	49.8
	ความต้านแรงดึง (MPa)	210.0	208.9	190.2	189.5	188.5	186.7	186.6
	ความยืด (%)	8.0	8.2	8.4	40.4	39.2	40.4	40.1
	ขนาดเกรน (mm)	0.056	0.083	0.088	0.090	0.093	0.150	0.196
5.9% Cu 1.3% Zn 0.09% Si	ความแข็ง (HV1)	63.0	64.2	59.5	53.3	42.1	37.4	35.1
	ความต้านแรงดึง (MPa)	203.0	182.3	178.9	175.8	169.3	161.0	160.0
	ความยืด (%)	5.0	56.3	56.3	56.3	56.9	56.9	55.9
	ขนาดเกรน (mm)	0.056	0.075	0.080	0.086	0.090	0.096	0.141
5.1% Cu 1.0% Zn 0.1% Si	ความแข็ง (HV1)	75.7	74.6	72.4	68.6	65.2	64.3	64.3
	ความต้านแรงดึง (MPa)	210.0	208.6	205.2	205.3	204.6	204.4	204.3
	ความยืด (%)	48.0	47.9	48.0	49.0	49.4	49.8	49.5
	ขนาดเกรน (mm)	0.061	0.065	0.073	0.091	0.102	0.118	0.161
4.8% Cu 1.6% Zn 0.14% Si	ความแข็ง (HV1)	74.0	73.5	72.4	69.7	67.9	67.4	66.9
	ความต้านแรงดึง (MPa)	217.0	201.9	199.9	188.3	177.0	176.9	172.5
	ความยืด (%)	52.0	52.9	54.9	57.0	58.0	56.9	55.9
	ขนาดเกรน (mm)	0.053	0.074	0.074	0.075	0.078	0.083	0.104

3.3.2 การอบเพิ่มความแข็ง (Precipitation Hardening)

หลังจากที่โลหะเงินเจือถูกอบให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 780°C เป็นเวลา 65 นาที และทำให้เย็นตัวเร็ว โดยการชุบน้ำ การนำกลับมาอบใหม่ที่อุณหภูมิต่ำ จะทำให้เกิดการตกผลึก (Precipitation) ของผลึกผสมทองแดงตามขอบเกรน ส่งผลให้ความแข็งเพิ่มขึ้น ตัวแปรที่สำคัญ คือ อุณหภูมิ และเวลาในการอบ ในการศึกษาได้กำหนดอุณหภูมิอบที่ 200°C 300°C และ 400°C ที่เวลาอบ 2 3 และ 4 ชม. ตามลำดับ โดยทำการทดสอบกับโลหะเงินเจือทั้ง 4 สูตร และได้ผลของคุณสมบัติทางกลตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 : คุณสมบัติทางกลของโลหะเงินเจือในการอบเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิและเวลาอบต่างๆ

ส่วนผสม	เวลาอบ (ชม.)	ความแข็ง (HV1) อุณหภูมิอบ ($^{\circ}\text{C}$)			ความต้านแรงดึง (MPa) อุณหภูมิอบ ($^{\circ}\text{C}$)			ความยืด (%) อุณหภูมิอบ ($^{\circ}\text{C}$)		
		200	300	400	200	300	400	200	300	400
5.8% Cu 0.75% Zn 0.05% Si	0	49.8	49.8	49.8	186.5	486.5	186.5	40.3	40.3	40.3
	2	94.6	122.7	99.7	192.4	299.1	371.2	37.8	11.2	13.7
	3	122.7	122.7	99.7	198.5	352.6	339.6	34.8	10.5	8.7
	4	137.0	111.2	84.9	215.0	405.5	312.0	24.5	10.0	10.3
5.9% Cu 1.3% Zn 0.09% Si	0	35.1	35.1	35.1	159.7	159.7	159.7	56.9	56.9	56.9
	2	73.0	90.5	94.6	209.4	399.6	351.7	51.0	12.8	12.2
	3	86.5	99.7	87.0	227.3	393.3	347.0	50.0	10.8	11.2
	4	90.5	94.6	40.2	235.1	372.3	318.1	29.3	9.5	8.7
5.1% Cu 1.0% Zn 0.1% Si	0	65.2	65.2	65.2	204.4	204.4	204.4	49.4	49.4	49.4
	2	66.9	13.0	99.7	190.7	278.7	316.0	41.8	31.0	12.2
	3	79.1	147.7	90.5	205.9	311.1	336.7	34.7	9.5	7.3
	4	17.50	104.9	90.53	242.2	337.8	208.2	27.30	8.50	6.50
4.8% Cu 1.6% Zn 0.14% Si	0	66.0	66.0	66.0	172.5	172.5	172.5	55.9	55.9	55.9
	2	75.7	122.7	90.5	189.6	370.6	362.6	43.5	6.5	9.0
	3	99.7	122.7	90.5	210.3	370.3	342.4	37.2	6.3	8.7
	4	104.9	104.9	69.7	220.7	375.6	253.1	28.5	6.2	4.3

จากผลของการอบตามตารางที่ 4 พอสรุปได้ว่าการอบตกผลึกช่วงอุณหภูมิ 300°C เวลา 2 ถึง 3 ชม. เหมาะสมกับโลหะเงินเจือทั้ง 4 ตัวอย่าง โดยการพิจารณาคุณสมบัติทางกลที่วัดได้

3.3.3 การอบเพิ่มความเหนียว

หลังจากการขึ้นรูปเย็นจะส่งผลให้ความเหนียวของโลหะลดลง ซึ่งทำให้การขึ้นรูปต้องถูกจำกัดลง ในกรณีที่มีความต้องการขึ้นรูปเย็นเพิ่มขึ้น ก็จำเป็นต้องทำการอบเพื่อให้เกิดการคืนรูปผลึก (Recrystallisation) ส่งผลให้สามารถขึ้นรูปเย็นต่อได้ตัวแปรในการอบคือ อุณหภูมิและเวลา โดยที่ถ้าเลือกใช้อุณหภูมิสูง และเวลานานก็จะส่งผลให้ความแข็งแรงลดลงมากในขณะที่ความยืดเพิ่มขึ้น ในการทดสอบได้ทำการขึ้นรูปตัวอย่างโลหะเงินเจือทั้ง 4 ตัวอย่าง ที่อัตราการขึ้นรูป 95.6% และทำการอบที่ 450°C และ 650°C ที่เวลาอบ 10 20 และ 30 นาที ตามลำดับ ดังแสดงผลการทดสอบในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 : คุณสมบัติทางกลของโลหะเงินเจือที่ถูกขึ้นรูปเย็นที่อัตราการขึ้นรูป 95.6% ที่ผ่านการอบคืนรูปผลึกที่อุณหภูมิและเวลาอบต่าง ๆ

ส่วนผสม	เวลาอบ (ชม.)	ความแข็ง (HV1) อุณหภูมิอบ (°C)			ความต้านแรงดึง (MPa) อุณหภูมิอบ (°C)			ความยืด (%) อุณหภูมิอบ (°C)		
		450	550	650	450	550	650	450	550	650
5.8% Cu 0.75% Zn 0.05% Si	0	138.3	138.3	138.3	606.0	606.0	606.0	5.8	5.8	5.8
	10	129.0	100.0	87.0	377.3	329.0	306.8	10.4	16.1	37.0
	20	110.0	83.0	79.0	360.8	314.8	297.0	13.4	29.7	39.5
	30	105.0	76.0	72.4	349.6	307.9	277.0	18.0	35.4	40.2
5.9% Cu 1.3% Zn 0.09% Si	0	188.3	188.3	188.3	633.7	633.7	633.7	6.6	6.6	6.6
	10	174.0	129.0	83.0	397.8	332.5	295.8	6.6	22.0	36.9
	20	129.0	105.0	76.0	382.1	325.2	291.0	8.9	24.3	38.5
	30	116.0	91.0	70.0	345.6	320.2	270.5	17.0	29.9	43.9
5.1% Cu 1.0% Zn 0.1% Si	0	135.7	135.7	135.7	616.9	616.9	616.9	6.3	6.3	6.3
	10	123.0	105.0	88.0	377.8	334.4	301.7	9.0	21.7	37.8
	20	110.0	96.0	80.0	363.4	321.4	295.0	13.7	28.0	42.3
	30	95.0	83.0	76.0	348.0	301.4	281.2	19.7	31.5	43.4

3.4 การศึกษาด้านความต้านการหมอง

โลหะเงินเจือเมื่อสัมผัสกับบรรยากาศที่มีกำมะถัน จะส่งผลให้ผิวมีลักษณะหมองความเงามันลดลง ในการศึกษานี้ต้องการศึกษาถึงคุณสมบัติด้านการต้านทานการหมองของโลหะเงินเจือที่ส่วนผสมต่าง ๆ รวมไปถึงสถานะภาพจากการถูกขึ้นรูป และผ่านกรรมวิธีทางความร้อน วิธีการวัดนั้นยังไม่มีกำหนดเป็นมาตรฐาน จึงได้กำหนดไว้ 2 รูปแบบ คือการใช้สารเคมีและเทคนิคเคมีไฟฟ้า โดยใช้ตัวอย่างเงินเจือตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 : ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นทดสอบโลหะเงินเจือ

กลุ่ม	ชิ้นทดสอบ	ส่วนผสมทางเคมี (%) *			
		Ag	Cu	Zn	Si
เงินสเตอร์ลิง สำเร็จรูป	925	96.40	3.2	-	0.40
	935	95.30	3.5	0.60	0.60
Ag-Cu	3 %Cu	97.00	3.0	-	-
	4.5 %Cu	95.50	4.5	-	-
	6 %Cu	94.00	6.0	-	-
Ag-Cu-Zn	S1	94.50	5.0	0.50	-
	S2	94.00	5.0	1.00	-
	S3	93.50	5.0	1.50	-
	S4	93.00	5.0	2.00	-
	S5	92.50	5.0	2.50	-
Ag-Cu-Si	S6	94.90	5.0	-	0.10
	S7	94.85	5.0	-	0.15
	S8	94.80	5.0	-	0.20
	S9	94.70	5.0	-	0.30
	S10	94.60	5.0	-	0.40
Ag-Cu-5Zn-Si	S11	93.90	5.0	1.00	0.10
	S12	93.85	5.0	1.00	0.15
	S13	93.80	5.0	1.00	0.20
	S14	93.75	5.0	1.00	0.25
	5Si	93.40	5.8	0.75	0.05
	9Si	92.70	5.9	1.30	0.09
	1Si	93.80	5.1	1.00	0.10
	14Si	93.40	4.8	1.60	0.14

* ส่วนผสมทางเคมีในตารางนี้เป็นส่วนผสมที่หลอม ส่วนผสมที่มีอยู่จริงได้ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี และเครื่อง ICP แล้ว แต่ผลการวิเคราะห์ยังไม่น่าเชื่อถือ

3.4.1 การทดสอบด้วยสารเคมี

สารเคมีที่ใช้ได้แก่ Sodium Sulfide (Na_2S) และเหงื่อเทียม โดยกรณีของ Na_2S ชิ้นทดสอบจะถูกจุ่มลงในสารละลาย 1 นาที หรือ 2 นาที ในขณะที่กรณีสารละลายเหงื่อเทียม ใช้วิธีวางชิ้นทดสอบในบรรยากาศที่มีเหงื่อเทียมในสถานะปิด 10-15 วัน ที่อุณหภูมิห้อง การประเมินผลใช้การดูด้วยสายตา โดยการแบ่งระดับความหมองเป็น 5 ระดับ ระดับที่ 1 ไม่มีการหมอง และระดับที่ 5 หมองมากที่สุด ผลของการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 7

ระดับ 1



ระดับ 2



ระดับ 3



ระดับ 4



ระดับ 5



รูปที่ 6 : การแบ่งระดับการหมองของเงินทดสอบ

ตารางที่ 7 : ผลการทดสอบความหมองโลหะเงินเจือด้วยสารเคมีแสดงระดับความหมองตามรูปที่ 6

ธาตุเงินหลัก	ชิ้นทดสอบ	หล่อ		กดอัด		อบชุบ	
		Na ₂ S	เหงื่อเทียม	Na ₂ S	เหงื่อเทียม	Na ₂ S	เหงื่อเทียม
เงินสเตอร์ลิง	925	5	2	4	2	5	2
	935	5	2	4	2	5	2
Ag-Cu	3Cu	3	2	4	2	3	3
	4.5Cu	3	2	4	2	4	2
	6Cu	3	2	4	2	4	2
Ag-Cu-Zn	S1	4	2	4	2	4	2
	S2	4	2	4	2	4	2
	S3	4	2	4	2	4	2
	S4	4	2	4	2	4	2
	S5	4	2	4	2	4	2
Ag-Cu-Si	S6	4	2	4	2	4	2
	S7	4	2	4	2	4	2
	S8	4	2	4	2	4	2
	S9	4	2	4	2	4	2
	S10	4	2	3	2	4	2
Ag-Cu-Zn-Si	S11	5	2	4	2	5	2
	S12	5	2	4	2	5	2
	S13	5	2	4	2	5	2
	S14	5	2	4	2	5	2
	5Si	4	2	4	2	4	2
	9Si	4	2	4	2	4	2
	1Si	4	2	4	2	4	2
	14Si	4	2	4	2	4	2

จากผลการทดสอบ พบว่าการใช้เหงื่อเทียมทดสอบมีการทำปฏิกิริยาช้าเกินไป ในขณะที่ Na_2S ก็เกิดปฏิกิริยาที่ค่อนข้างรุนแรง ซึ่งควรมีการกำหนดรูปแบบใหม่ แต่จากผลการทดสอบเห็นแนวโน้มว่า การผสมสังกะสีและซิลิกอนส่งผลในทางลบ อย่างไรก็ตามก็ควรมีการปรับปรุงวิธีการทดสอบใหม่

3.4.2 การทดสอบด้วยเคมีไฟฟ้า

การทดสอบทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิค E_{Corr} vs Time และ Potentiodynamic ได้กราฟโพลาริเซชัน ซึ่งทำให้ได้ค่า E_{Corr} และพฤติกรรมการกัดกร่อนของชั้นทดสอบ

ตารางที่ 8 : ค่า E_{Corr} และศักย์ไฟฟ้าที่ฟิล์มแตกของโลหะเงินเจือ ส่วนผสมต่างๆ สภาพหล่อ อบชุบ และ กัด

หน่วยเป็น (mV)

ชั้นทดสอบ	หล่อ		อบชุบ		กัด					
	E_{corr}	E_{break}	E_{corr}	E_{break}	30%		50%		70%	
					E_{corr}	E_{break}	E_{corr}	E_{break}	E_{corr}	E_{break}
925	41.27	-	-17.3	-	21.75	148.6	24.19	-	14.43	-
935	14.43	-	-17.3	-	-41.69	82.64	-24.61	70.54	-41.69	75.42
3Cu	-0.2	163.3	-10.0	156.0	2.23	155.9	-9	148.6	-12.41	151.1
4.5Cu	-29.49	-	-5.1	175.4	-0.2	146.2	-7.529	148.6	2.23	153.5
6Cu	-24.65	-	-24.6	165.7	7.11	153.5	9.97	155.9	-17.29	153.5
S1	-2.1	165.7	-12.0	160.8	-22.2	94.94	-19.73	83	-31.93	82.74
S2	12.0	158.4	-2.1	155.9	-17.29	-	-7.53	-	-29.49	65.66
S3	9.6	165.7	14.4	163.3	-12.41	68.1	-14.85	112	-27.05	104.7
S4	-30.8	163.3	5.0	161.3	-29.49	68.1	-24.61	99.82	-9.97	-
S5	19.3	160.8	-29.5	158.4	-5.089	65.66	7.11	-	14.43	-
S6	-4.7	-	-44.6	-	-16.09	-	-27.47	-	-13.24	-
S7	-4.7	-	-18.9	-	-7.54	-	-14.85	-	-24.63	-
S8	-16.1	-	-24.6	-	-30.32	-	-30.32	-	-30.32	-
S9	-18.9	-	-24.6	-	-16.09	-	-39.52	-	-30.32	-
S10	16.8	175.4	-44.6	-	-53.09	-	-57.78	-	-38.86	-
S11	-7.6	-	-38.8	-	-36.01	-	-24.63	-	-30.32	-
S12	-7.6	-	-36.0	-	-30.32	-	-21.78	-	-24.63	-
S13	3.8	-	-36.0	-	-24.63	-	-24.63	-	-30.32	-
S14	-41.7	-	-30.3	-	-24.63	-	-24.63	-	-27.47	-
5Si	-17.29	10.73	-5.1	-	-5.09	53.47	-5.08	-	-2.65	-
9Si	-0.2	-	-27.1	-	-14.85	68.1	-14.85	-	-22.17	90.06
1Si	9.55	168.1	-14.9	-	-2.649	-	2.23	-	-2.65	-
14Si	-7.53	-	-31.5	-	14.43	-	-7.53	-	-7.53	-

จากผลการทดสอบเคมีไฟฟ้าในตารางที่ 8 พบว่าชั้นทดสอบโลหะเงินเจือที่มีทองแดงเป็นธาตุเจืออย่างเดียวสามารถสร้างฟิล์มได้และหมองน้อยที่สุด ซึ่งผลการทดสอบด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าและสารเคมีสอดคล้องกัน

ในกรณีที่ขึ้นทดสอบมี ทองแดง, สังกะสีและซิลิกอน ถ้าปริมาณธาตุทั้ง 2 ไม่มากนัก ขึ้นทดสอบยังสร้างฟิล์มได้ ซึ่งเป็นผลมาจากทองแดง แต่ถ้ามีปริมาณมากขึ้น ทำให้ขึ้นทดสอบหมองลงมาก และไม่ปรากฏว่ามีฟิล์มเมื่อทดสอบด้วยเคมีไฟฟ้า

การแปรรูปขึ้น โดยการกดอัด ในการทดสอบด้วยเคมีไฟฟ้าไม่มีผลแตกต่างจากชิ้นงานหล่อ แต่จากการทดสอบโดยใช้สารเคมี พบว่า ในชิ้นทดสอบที่แปรรูปขึ้น บริเวณขอบชิ้นงานจะหมองกว่าบริเวณกลางชิ้นทดสอบ ทั้งนี้เพราะว่า บริเวณขอบมีการเสีรุมมากกว่าบริเวณกลางชิ้นทดสอบ

การอบชุบ ในการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเคมีไฟฟ้าไม่มีความแตกต่างจากชิ้นงานหล่อ แต่จากการทดสอบโดยใช้สารเคมีพบว่า ความสม่ำเสมอของชิ้นงานดีกว่าชิ้นงานหล่อเมื่อผิวหมองลง จะหมองอย่างสม่ำเสมอกว่าชิ้นงานหล่อ

4. สรุป

จากการศึกษาในโครงการนี้ทำให้ได้ทราบอิทธิพลของสารเจือทองแดง สังกะสี และซิลิกอน ต่อคุณสมบัติทางกล การหล่อ กรรมวิธีทางความร้อน และการต้านทานการหมอง ในการวิจัยมีการบันทึกผลการทดลองเป็นภาพถ่าย เช่น สิ่งบกพร่องภายนอก และภายใน โครงสร้างจุลภาคจากการอบที่เงื่อนไขต่าง ๆ รวมถึงสภาพผิวของโลหะเงินจากการทดสอบการหมองโดยมีภาพถ่ายทั้งสิ้นประมาณ 1300 รูป ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ได้ถูกรวบรวมไว้ใน CD – ROM อย่างมีระบบ ง่ายในการค้นหา นอกจากนี้ยังได้รวบรวมเนื้อหาทางเทคนิคที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาด้วยตนเองหรือใช้ในการเรียนการสอน ในหัวข้อเกี่ยวกับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับด้วยโลหะเงินเจือ ได้แก่เรื่อง โลหะวิทยาเบื้องต้นสำหรับเงินสเตอร์ลิง การทดสอบคุณสมบัติทางกล เทคนิคการหล่อเหวี่ยง การเตรียมงานหล่อ การอบอ่อนและเพิ่มความแข็ง การทดสอบความแข็งและโครงสร้างจุลภาค และการทดสอบการหมอง ทุกหัวข้อถูกจัดทำเป็น Power Point ด้วยข้อความสั้น ๆ พร้อมภาพถ่ายจากการปฏิบัติงานจริงง่ายในการทำ ความเข้าใจ

ท้ายนี้ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนโครงการนี้

บรรณานุกรม

1. Green, T; The Gold Companion. London, Rosen Dale Pres, 1991
2. Diego Pinton, Jewellery Technology, Edizioni Gold – Milano, 1999
3. ผ.ศ.สมนึก วัฒนศรีกุล, โลหะวิทยา, ศูนย์ผลิตตำราเรียน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2538
4. เทพนรินทร์ ประพันธ์พัฒน์. พื้นฐานงานหล่อ. ปทุมธานี : บริษัทสกายบุ๊ก จำกัด, 2538
5. บัณฑิต ใจชื่น. การออกแบบงานหล่อ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 2526.
6. ไพบูลย์ ชูพิงอาคม. ข้อบกพร่องที่เกิดกับงานหล่อ และการแก้ไข. กรุงเทพมหานคร : สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ, 2533.
7. มนัส สติรจินดา. วิศวกรรมหล่อเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
8. สุรพล อุปดิศสกุล. สถิติการวางแผนการทดลอง. กรุงเทพมหานคร : สหมิตรออฟเซต, 2536.
9. หริส สุตะบุตร, เคนยิ จิยิวิวา. หล่อโลหะ. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์การพิมพ์ดวงกมล, 2533.

10. Aldo M. Reti. "Understanding Sterling Silver." The Santa Fe Symposium on Jewelry 1997: 339-356.
11. C.W. Ammen. Lost wax investment. United states of America : 1972.
12. Des Plaines, Analysis of Casting Defects. American Foundrymen 's society training and Research Institute, 1966.
13. Des Plaines, Casting Defects Handbook. American Foundrymen 's society training and Research Institute, 1966.
14. Dieter Ott. "Defect in Jewelry a New Version of and Old Problem." The Santa Fe Symposium on Jewelry 1991 : 171-197.
15. Dieter Ott. "Metallurgical and Chemical Consideration in Jewelry Casting." The Santa Fe Symposium on Jewelry 1987 : 223-244.
16. Douglas C. Montgomery. Design and Analysis of Experiment. Third Edition. New York : John Willey and Sons, 1991
17. Larry Dimond. "Casting Defects From Model to Finished Product." The Santa Fe Symposium on Jewelry 1987 : 149-201.
18. Paul Finelt. "Basic Metallurgy." The Santa Fe Symposium on Jewelry 1987 : 29-55.
19. P.R. Beeley. Foundry Technology. Butterworths, London : 1972.
20. Richard Atkin. "Trouble Shooting Platinum Casting Defects and Difficulties." The Santa Fe Symposium on Jewelry 1996 : 327-337.
21. Richard V. Carrano. "Sterling Silver Casting Problem." The Santa Fe Symposium on Jewelry 1990 : 91-128.
22. Sylvai J. Gerin. Casting metal technogy. American Foundrymen 's society training and Research Institute, 1972.
23. Timo J. Santala. "An Overview of Casting Technologies Currently used in Industry and Emerging Technologies." The Santa Fe Symposium on Jewelry 1995 :213-227.
24. V.E. Vergara, N.V. Salazar. "Centifuged Casting of Copper Alloy Using Ceramic Molds" Journal of Materials Proces
25. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม. มอก. 21-2515 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเครื่องเงิน. กรุงเทพมหานคร : กระทรวงอุตสาหกรรม, 2515.
26. Dave Schneller. The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. Santa Fe, New Mexico, 1995.
27. ศูนย์วิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, เอกสารสัมมนาทางวิชาการ. คุณสมบัติของโลหะมีค่าสำหรับอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2541
28. Mark F. Grimwade. "Basic Metallurgy for Goldsmiths : Working and Annealing".

- Journal Gold Technology. Issue No.2. (June 1990) : P 17 – 20
- 29.Dave Schneller. The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology.
Santa Fe, New Maxico, 1987.
- 30.Askeland, Donal R. The Science and Engineering of Materials., Third S.I. Edition,
Chappman & Hall, 1996.
- 31.Eric A Brandes. Smithells Metal Reference Book. 6 th England : Butterworth & Co
(Pulishers) Ltd. 1983.
32. ASM Handbook Committee. Metals Handbook . 8th Edition. The American Society for
Metals, 1973.
- 33.Japanese Standard Association. JIS Handbook 1995 Ferrous
Material & Metallurgy I. Minato-ku Tokyo, 107 JAPAN, 1995.
- 34.Gueter Beck, “Edelmetall-Tashenbuch”, Degussa AG, Huethig-Verlag Heidelberg,
1995
- 35.L. Gal-or, “Tarnishing and Corrosion of Silver and Gold Alloys”, The Santa Fe
Symposium on Jewelry Manufacturing Technology, 1990
- 36.Allison Butta, “Silver Economics, Metallurgy and its use”, D. Van Nostrand Com. Inc.
Princeton, New Jersey, 1967
- 37.Christoph. J. Raub, “The Influence of Small addition to Jewelry Alloys”, The Santa Fe
Symposium on Jewelry Manufacturing Technology, 1987
- 38.Kenneth R. Tretheway, “Corrosion for Students of Science and Engineering”,
Longman Scientific & Technology, 1998
- 39.Denny A. Jones, “Principles and Prevention of Corrosion”, Macmillan International
Publishing Group, Singapore, 1992
- 40.Marcel Pourbaix, “Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions”, NACE
International, Houston, Texas, 1974
- 41.H. Kim and J. H. Payer, “Tarnish Process of Silver in 100ppb H₂S Containing
Environments”, The Journal of Corrosion Science and Engineering,
Submitted 11 March 1999, currently being reviewed.