การศึกษาอุณหภูมิการหล่อต้นแบบแว็กซ์ชนิด EC 500 เพื่อลดของเสีย จากกระบวนการผลิตเครื่องประดับเงิน

study temperature casting wax type prototype EC 500 to reduce waste. Silver production process.

จักรกฤษณ์ ยิ้มแฉ่ง

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ 2560
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

โครงการวิจัย : การศึกษาอุณหภูมิการหล่อต้นแบบแว็กซ์ชนิด EC 500 เพื่อลดของเสีย
จากกระบวนการผลิตเครื่องประดับเงิน

ผู้วิจัย : นายจักรกฤษณ์ ยิ้มแฉ่ง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอุณหภูมิความร้อนที่เหมาะสมสำหรับอบเผาเบ้าปูนหล่อเพื่อเผาขจัดเถ้าต้นแบบแว็กซ์ชนิด EC 500 ออกจากเบ้าปูนหล่อ เป็นการปรับปรุงกระบวนการหล่อเครื่องประดับเพื่อลดของเสียจากกระบวนการผลิตเครื่องประดับเงิน โดยทำการศึกษาอุณหภูมิการอบเบ้าปูน เพื่ออบเผาขจัดแว็กซ์ให้ออกจากเบ้าปูนและเกิดช่องว่างที่สะอาดที่สุด แล้วทดลองนำน้ำโลหะเงินเข้าไปแทนที่เป็นการหล่อตัวเรือนโลหะ ผลจากการศึกษาการอบเบ้าปูนที่ใช้ต้นแบบตัวเรือนวัสดุ EC500 จากการศึกษาพบว่าวัสดุแว็กซ์ EC500 จะหลอมละลายจากของแข็งเป็นของเหลวทั้งหมดจนเป็นเศษขี้เถ้าแว็กซ์โดยใช้อุณหภูมิความร้อนที่ 850 องศาเซลเซียส เพื่อเผาขจัดเศษขี้เถ้าแว็กซ์ซึ่งทำให้โพรงแบบสะอาด เมื่อนำเบ้าปูนไปหล่อด้วยโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 แล้วได้ชิ้นงานที่มีความสมบูรณ์มากที่สุดหลังจากปรับปรุงกระบวนการหล่อเครื่องประดับของเสียลดลง พบว่าชิ้นงานเสีย1 ชิ้น คิดเป็น 1 เปอร์เซ็นต์ มีชิ้นงานดี 99 ชิ้น หรือเท่ากับ 99 เปอร์เซ็นต์

Abstract

This research is a study of the optimum heat temperature for baking sintered castings for burnout removal of EC 500 type ash wax from cast mortar. Improving jewelry casting process to reduce waste from silver jewelry production process. By studying the temperature of the mortar. To burn, remove wax from the mortar and clean the gaps. Then try to bring silver water instead of metal casting. The results of a baked casing study using the EC500 housing prototype from the study showed that the EC500 wax material is melted from all solids to ash wax by heating at 850 ° C to burn. Remove ash wax, which makes the cavity clean. When the casting was casted with 925 sterling silver, the most complete workpiece after the improvement of the waste jewelry casting process was found to be 1 piece, 1 percent, 99 pieces or 99 percent.

คำสำคัญ : แว็กซ์ชนิด EC 500,กระบวนการหล่อ

Keywords: Rapid prototype EC500 , Casting Process

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร รวมถึง อาจารย์ประจำสาขาวิชา เทคโนโลยีแม่พิมพ์เครื่องประดับ ที่ให้การสนับสนุนและอำนวยความสะดวกในการทางานวิจัยครั้งนี้ รวมถึงทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับงานวิจัย ท้ายนี้คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ได้ให้ทุนสนับสนุนจนกระทั่งงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	ง
สารบัญรูป	จ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 นิยามศัพท์เฉพาะ	5
2.2 เครื่องสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็ว Rapid Prototype	5
2.3 ปูนสำหรับหล่อเครื่องประดับ	10
2.4 ทางเดินน้ำโลหะ	18
2.5 โลหะที่นำมาทำตัวเรือนเครื่องประดับ	20
2.6 การหลอมโลหะ	23
2.7 การหล่อระบบสุญญากาศ	24
2.8 ทฤษฎีการทำความสะอาดหลังการหล่อ	26
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานการวิจัย	30
3.1 แผนการดำเนินงาน	30
3.2 ออกแบบการทดลอง	31
3.3 ดำเนินการทดลอง	33
3.4 สรุป	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์	44
4.1 ผลการดำเนินงาน	44
4.2 ผลการทดลองเพื่อหาค่าเฉลี่ยจากชิ้นงานที่ทำการทดสอบ	48
4.3 ทดสอบกราฟอุณหภูมิและเวลาที่ได้จากการวิเคราะห์	49
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	50
5.1 สรุป	50
5.2 ข้อเสนอแนะ	50
5.3 ปัญหาและแนวทางแก้ไข	50
5.4 ข้อเสนอแนะ	50
บรรณานุกรม	51
ภาคผนวก	52
ประวัติผู้วิจัย	54

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะเงิน,ทองแดง,อินเดียม,ฟอสฟอรัสคุณสมบัติต่างๆ	21
2.2 ความหนาแน่นของโลหะเงินหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ	23
3.1 การเตรียมชิ้นงาน โลหะ น้ำหนักปูนและน้ำ ในการอบเบ้าปูนที่อุณหภูมิ 700°C	35
3.2 การเตรียมชิ้นงาน โลหะ น้ำหนักปูนและน้ำ ในการอบเบ้าปูนที่อุณหภูมิ 750°C	36
3.3 การเตรียมชิ้นงาน โลหะ น้ำหนักปูนและน้ำ ในการอบเบ้าปูนที่อุณหภูมิ 800°C	37
3.4 การเตรียมชิ้นงาน โลหะ น้ำหนักปูนและน้ำ ในการอบเบ้าปูนที่อุณหภูมิ 850°C	38
3.5 บันทึกการทดลองอบเบ้าปูนเผาขจัดเศษแว็กซ์ที่อุณหภูมิ 700°C	39
3.6 บันทึกการทดลองอบเบ้าปูนเผาขจัดเศษแว็กซ์ที่อุณหภูมิ 750°C	40
3.7 บันทึกการทดลองอบเบ้าปูนเผาขจัดเศษแว็กซ์ที่อุณหภูมิ 800°C	41
3.8 บันทึกการทดลองอบเบ้าปูนเผาขจัดเศษแว็กซ์ที่อุณหภูมิ 850°C	42
4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ผลจากชิ้นงานจากอุณหภูมิเบ้าปูนที่ 700°C	44
4.2 ตัวอย่างงานเสียที่อุณหภูมิ 700°C	45
4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ผลจากชิ้นงานจากอุณหภูมิเบ้าปูนที่ 750°C	46
4.4 ตัวอย่างงานเสียที่อุณหภูมิ 750°C	46
4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ผลจากชิ้นงานจากอุณหภูมิเบ้าปูนที่ 800°C	47
4.6 ตัวอย่างงานเสียที่อุณหภูมิ 800°C	47
4.7 แสดงผลการวิเคราะห์ผลจากชิ้นงานจากอุณหภูมิเบ้าปูนที่ 850°C	48
4.8 ตัวอย่างงานเสียที่อุณหภูมิ 850°C	48

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการ Stereolithography Apparatus (SLA)	6
รูปที่ 2.2 ชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยวิธี PolyJet	6
รูปที่ 2.3 ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการ Selective Laser Sintering (SLS)	7
รูปที่ 2.4 ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการ Laminated Object Manufacturing (LOM)	8
รูปที่ 2.5 ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการ Fused Deposition Modeling (FDM)	9
รูปที่ 2.6 ชิ้นงานจากเครื่อง RP ที่สามารถนำไป Lost-Wax ได้	10
รูปที่ 2.7 ชิ้นงานจากเครื่อง RP ที่ไม่สามารถนาไป Lost-Wax ได้ แต่นำไปทำแม่พิมพ์ยาง	10
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างปูนสำหรับหล่อตัวเรือนเครื่องประดับที่มีจำหน่ายภายในประเทศ	11
รูปที่ 2.9 แสดงการผสมปูนหล่อ	13
รูปที่ 2.10 แสดงการอบเบ้าปูนหล่อ	13
รูปที่ 2.11 แสดงการจัดเรียงเบ้าปูนหล่อเข้าสู่เตาอบ	15
รูปที่ 2.12 แสดงอุณหภูมิที่ใช้การทำงานของเครื่องอบ	16
รูปที่ 2.13 แสดงอุณหภูมิมาตรฐานกระบอกหล่อ	17
รูปที่ 2.14 แสดงการติดต้นเทียนหล่อ	18
รูปที่ 2.15 แสดงหลักการทำงานของเครื่องหล่อระบบสุญญากาศ	25
รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินการวิจัย	30
รูปที่ 3.2 ทดลองอบเบ้าปูนที่อุณหภูมิ 700 องศา	31
รูปที่ 3.3 ทดลองอบเบ้าปูนที่อุณหภูมิ 750 องศา	31
รูปที่ 3.4 ทดลองอบเบ้าปูนที่อุณหภูมิ 800 องศา	32
รูปที่ 3.5 ทดลองอบเบ้าปูนที่อุณหภูมิ 850 องศา	32
รูปที่ 3.6 ต้นแบบแว๊กซ์ EC500 ที่ได้จากเครื่อง RP	33
รูปที่ 3.7 ปูนหล่อแบบ	33
รูปที่ 3.8 ชิ้นงานที่ติดทางเดินน้ำโลหะและต้นเทียน	33
รูปที่ 3.9 เทปูนลงในเบ้ากระบอก	34
รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบงานดี งานเสีย ด้วยแผนภูมิแท่ง	49
รูปที่ 4.2 กราฟอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการอบเบ้าปูนด้วยแว๊กซ์ EC500	49

บทที่ 1

1.1 ความเป็นมา และและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

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

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น รัฐบาลจึงให้ความสำคัญและให้การสนับสนุนอุตสาหกรรมสาขานี้เป็นพิเศษ เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่ประเทศไทยมีความได้เปรียบและสามารถพัฒนาศักยภาพให้สามารถแข่งขันหรือเป็นผู้นำทางด้านการผลิตและการค้าในการเปิดเสรีทางการค้ากับประเทศคู่ค้าต่างๆ และที่ผ่านมารัฐบาลได้มีนโยบายต่างๆ ที่จะพยายามผลักดันให้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางการผลิตและการค้าสินค้าผลิตภัณฑ์อัญมณีและเครื่องประดับแห่งหนึ่งของโลก โดยมีการจัดทำโครงการแผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรมสำหรับอุตสาหกรรมสาขานี้ ภายใต้การดำเนินการของกรมส่งเสริมอุตสาหกรรม ในช่วงปี 2544-2546 ซึ่งรายละเอียดของโครงการได้มีการส่งเสริมและสนับสนุนให้หน่วยงานต่างๆ ดำเนินการศึกษาวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมสาขานี้ ภายใต้การบริหารโครงการโดยชุดโครงการอัญมณีและเครื่องประดับ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ตัวอย่างโครงการวิจัย อาทิเช่น การศึกษาวิจัยทางด้านการพัฒนาส่วนผสมของโลหะตัวเรือนเครื่องประดับ การศึกษาวิจัยเพื่อผลิตอัลลอยสำหรับผสมกับโลหะมีค่าต่างๆ ทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ การศึกษาวิจัยพัฒนาเทคนิคการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับ การศึกษาวิจัยพัฒนาสร้างเตาเผาพลอย การศึกษาวิจัยพัฒนาเทคนิคการเผาพลอย การศึกษาวิจัยพัฒนาเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการผลิตเครื่องประดับและอื่นๆ อีก ฯลฯ นอกจากโครงการสนับสนุนการพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับดังที่กล่าวข้างต้น ในช่วงปี 2547-2549 รัฐบาลยังมีการจัดทำโครงการกรุงเทพเมืองแฟชั่นเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมสาขานี้ให้มีความเจริญรุดหน้ามากยิ่งขึ้น โดยการสนับสนุนให้หน่วยงานต่างๆ ดำเนินการศึกษาวิจัยและจัดทำโครงการฝึกอบรมถ่ายทอดเทคโนโลยีใหกับผู้ประกอบการและนอกจากนี้รัฐบาลยังได้มอบหมายให้สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) โดยศูนย์เทคโนโลยีวัสดุแห่งชาติ (Mtec) ดำเนินการจัดทำแผนยุทธศาสตร์วัสดุของชาติ ในปี 2548-2557 ขึ้นมาเพื่อส่งเสริมให้มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาทางด้านวัสดุ ซึ่งยุทธศาสตร์วัสดุของชาติ ยุทธศาสตร์ที่ 3 เป็นยุทธศาสตร์ที่เน้นหนักไปทางด้านวัสดุสำหรับอุตสาหกรรมแฟชั่น ที่มุ่งส่งเสริมให้มีการวิจัยพัฒนาวัสดุ และเทคโนโลยีการผลิตสำหรับกลุ่มอุตสาหกรรมในสาขาสิ่งทอ เครื่องหนัง และอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ (ที่มา : แผนยุทธศาสตร์วัสดุของชาติ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (Mtec.)

www.mtec.or.th และความคืบหน้าล่าสุดเมื่อวันที่ 19 มิถุนายน 2552 รัฐบาลโดยการนำของนายอภิสิทธิ์ เวชชาชีวะ นายกรัฐมนตรี ได้มีการประกาศยกเลิกการจัดเก็บภาษีมูลค่าเพิ่ม (VAT) 7% สำหรับวัตถุดิบอัญมณีทุกประเภทที่นำมาผลิตสินค้าสำเร็จรูปเพื่อส่งออก ไม่ว่าจะเป็นเพชร หรือพลอยก้อน ที่ยังไม่เจียระไนรวมถึงโลหะมีค่าอื่นๆ เพื่อสนับสนุนให้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางการค้าและการผลิตผลิตภัณฑ์อัญมณีและเครื่องประดับที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลกและเป็นอุตสาหกรรมที่สามารถช่วยฟื้นฟูเศรษฐกิจของประเทศในภาวะที่กำลังประสบกับปัญหาวิกฤติเศรษฐกิจ (ที่มา: **จากหนังสือพิมพ์ฐานเศรษฐกิจ ฉบับที่ 2438 25 มิ.ย. - 27 มิ.ย. 2552)** จากการศึกษาวิเคราะห์ปัญหา/อุปสรรคในการพัฒนาคุณภาพการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ ที่ได้มีการประชุมร่วมกับผู้ประกอบการอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ ได้ข้อสรุปว่า ปัญหาสำคัญ (Major Problem) เกี่ยวกับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ ได้แก่

1. ปัญหาด้านวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ ซึ่งวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตส่วนใหญ่เป็นวัตถุดิบที่นำเข้าจากต่างประเทศเกือบร้อยเปอร์เซ็นต์ ทั้งในรูปของโลหะมีค่าบริสุทธิ์ โลหะเจือสำเร็จรูปหรือที่เรียกว่าอัลลอยสำหรับผสมกับโลหะมีค่า และโลหะเจือที่ใช้สำหรับการผลิตเครื่องประดับเทียม (อาทิเช่น ทองคำเจือ เงินเจือ แพลทินัมเจือ ทองเหลือง โลหะสีขาว ดีบุก และตะกั่ว เป็นต้น) การศึกษาวิจัยและพัฒนาด้านวัตถุดิบนี้ควรที่จะมีการศึกษาวิจัยเพื่อผลิตอัลลอยขึ้นมาใช้เองภายในประเทศและทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ โดยเริ่มทำการศึกษาวิจัยอิทธิพลของธาตุเจือต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของโลหะมีค่า (สมบัติทางกล ความต้านทานการหมอง การปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนและสมบัติทางด้านการหล่อขึ้นรูป)

2. ปัญหาด้านวัสดุเชื่อมประสาน เนื่องจากในขบวนการผลิตเครื่องประดับจะต้องมีการเชื่อมประสานเพื่อประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของเครื่องประดับเข้าด้วยกันไม่ว่าจะเป็นในส่วนของการเชื่อมกระเปาะสำหรับฝังพลอยเข้ากับตัวเรือนของจี้ ต่างหู หรือแม้แต่ก้านแหวน และนอกจากนี้ยังรวมถึงการเชื่อมประสานเพื่อตกแต่งผิวชิ้นงานสำเร็จโดยการเชื่อมปิดรอยตำหนิหรือตามด และหรือรอยตำหนิจากการหดตัวของชิ้นงานจากขบวนการหล่อขึ้นรูป ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมประสานเหล่านี้จะต้องมีอุณหภูมิหลอมละลายต่ำกว่าวัสดุที่ใช้เป็นตัวเรือนเครื่องประดับ แต่จะต้องมีปริมาณส่วนผสมของโลหะมีค่าผสมอยู่ตามปริมาณที่กำหนด ซึ่งเป็นปริมาณที่ใช้สำหรับการแบ่งชนิดของโลหะมีค่าเจือสำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ และนอกจากนี้สีของวัสดุเชื่อมประสานจะต้องมีสีใกล้เคียงกับวัสดุตัวเรือนให้มากที่สุดเพื่อหลีกเลี่ยงความแตกต่างระหว่างสีของวัสดุตัวเรือนและวัสดุเชื่อมประสาน

3. ปัญหาด้านการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับ เนื่องจากการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคนิคการหล่อตัวเรือนเครื่องประดับ ยังมีผลงานการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาและสร้างองค์ความรู้ค่อนข้างน้อย ไม่สามารถทำการศึกษาวิจัยได้ครอบคลุมสภาพความเป็นจริงที่เกิดขึ้นกับผู้ประกอบการในภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มผู้ประกอบการที่เป็น SMEs. เช่น อัตราส่วนผสมระหว่างก๊าซ LPG และออกซิเจนที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อที่ทำการหล่อด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงที่ให้ความร้อนด้วยหัวเผา (Torch หรือ Burner) แบบสัมผัสบรรยากาศเปิดปกติ ตัวแปรของอุณหภูมิน้ำโลหะและแบบหล่อที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อ

อิทธิพลของบรรยากาศที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อ อิทธิพลของธาตุเจือต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อ และอิทธิพลของขนาดทางเดินน้ำโลหะที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อ เป็นต้น

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

5. ปัญหาทางด้านเครื่องมืออุปกรณ์การผลิตกล่าวคือ ยังขาดแคลนเครื่องมืออุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิต เช่น เครื่องหล่อที่สามารถควบคุมบรรยากาศและอุณหภูมิได้เที่ยงตรง เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างต้นแบบได้รวดเร็ว (Rapid Prototype) เทคโนโลยี CAD/CAM

จากปัญหาของภาคอุตสาหกรรมการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับดังที่ได้กล่าวข้างต้น การศึกษาวิจัยของงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาวิจัยกระบวนการหล่อตัวเรือนวัสดุ EC500 ที่พบของเสียจำนวนมาก โดยใช้อุณหภูมิความร้อนที่สูงกว่าอุณหภูมิความร้อนปกติที่ใช้การแว็กซ์ทั่วไปสำหรับการหล่อตัวเรือนเครื่องประดับเงินสเตอร์ริง การศึกษาอุณหภูมิความร้อนที่เหมาะสมสำหรับกรรมวิธีการหล่อ เป็นการปรับปรุงกระบวนการผลิตเครื่องประดับเพื่อเพิ่มผลผลิต เพื่อสร้างองค์ความรู้และถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับผู้ประกอบการอุตสาหกรรมสาขานี้ และนอกจากนี้การดำเนินการของโครงการวิจัยนี้ยังมีประโยชน์สำหรับการพัฒนาการเรียนการสอนในรูปแบบของการบูรณาการเรียนการสอนร่วมกับการวิจัยในรายวิชาที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ โลหะวิทยาโลหะมีค่า งานหล่อขึ้นรูปและกระบวนการผลิตเครื่องประดับที่ทางมหาวิทยาลัยได้มีการจัดการเรียนการสอนในสาขาวิชาเทคโนโลยีแม่พิมพ์เครื่องประดับ ซึ่งดำเนินการมากว่า 20 ปี ให้สามารถพัฒนาไปสู่ความเป็นศูนย์วิจัยที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะทางทางด้านเทคโนโลยีวัสดุและการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับ เพื่อเป็นศูนย์กลางสำหรับการศึกษาวิจัยพัฒนาองค์ความรู้และถ่ายทอดเทคโนโลยีจากการศึกษาวิจัยทางด้านวัสดุและการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับเผยแพร่สู่ภาคการผลิต ที่สามารถรองรับการพัฒนาอุตสาหกรรมสาขานี้ของประเทศ สอดคล้องกับนโยบายต่างๆ ของรัฐบาลที่ต้องการส่งเสริมให้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางการผลิตและการค้าสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับแห่งหนึ่งของโลก และจากการให้คำปรึกษาของคณะวิจัยในส่วนของห้างหุ้นส่วนจำกัด คลาสซี่ จิวเวลรี่ ที่ดำเนินกิจการออกแบบ ผลิตและส่งออกสินค้าเครื่องประดับเงินทองรูปพรรณ นั้น ปัจจุบันทางบริษัทกำลังประสบปัญหาทางด้านการผลิตเครื่องประดับจากต้นแบบตัวเรือนวัสดุ EC500 โดยปัญหาที่เกิดขึ้นเกิดจากกระบวนการหล่อที่พบของเสียจำนวนมาก ซึ่งทางบริษัทไม่สามารถควบคุมของเสียให้คงที่ได้เนื่องจากวัตถุดิบต้นแบบตัวเรือนวัสดุ EC500 ที่ใช้ในการผลิตมีความแตกต่างจากต้นแบบแว็กซ์ทั่วไป ส่งผลให้สินค้าที่ผลิตออกมาไม่เป็นพอใจ และนอกจากนี้ยังสูญเสียเวลา และแรงงานในการตกแต่งชิ้นงาน คุณสมบัติทางกลไม่เหมาะสมกับการใช้งานส่งผลให้ชิ้นงานเสียหายและไม่คงทนต่อการใช้งาน จากการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาในเบื้องต้นร่วมกับผู้เชี่ยวชาญ สามารถสันนิฐานได้ว่าปัญหาในเรื่องของกระบวนการหล่อที่พบของเสียจำนวนมาก และปัจจัยควบคุมของตัวแปรต่างๆ ของกรรมวิธีการผลิตไม่เหมาะสม ส่งผลทำให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพแตกต่างกัน

ดังนั้น เพื่อหาแนวทางแก้ไขปัญหาต่างๆ เหล่านี้ ทางบริษัทจึงมีความสนใจที่จะขอรับการสนับสนุนผู้เชี่ยวชาญและงบประมาณสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำหรับนำมาใช้ในการดำเนินการศึกษาวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดปัญหาต่างๆ เหล่านี้ในกระบวนการผลิต เพื่อสร้างองค์ความรู้และความเข้าใจสำหรับการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นนี้ และนอกจากนี้ยังเป็นการวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเพื่อการพึ่งพาตนเองอย่างยั่งยืนต่อไปในอนาคต ซึ่งการการดำเนินการศึกษาวิเคราะห์และวิจัยพัฒนานี้เป็นการดำเนินการร่วมกับนักวิชาการในมหาวิทยาลัยของรัฐที่มีความพร้อมของเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ และองค์ความรู้ทางหลักวิชาการที่เชื่อถือได้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1. เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการหล่อต้นแบบแว็กซ์ชนิด EC500

1.2.2. เพื่อลดของเสียในการผลิตเครื่องประดับแว็กซ์ชนิด EC500

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 เพื่อศึกษาอุณหภูมิการหล่อต้นแบบแว็กซ์ชนิด EC500

1.3.2 สร้างชิ้นงานเครื่องประดับเงินจากต้นแบบแว็กซ์ชนิด EC500

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 องค์ความรู้ทางกระบวนการหล่อตัวเรือนเครื่องประดับ จากต้นแบบตัวเรือนวัสดุแว็กซ์ชนิด EC 500

1.4.2 ถ่ายทอดเทคโนโลยีขององค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษาวิจัยไปสู่ภาคอุตสาหกรรมการผลิต

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 นิยามศัพท์เฉพาะ

1. Rapid prototype (RP) หมายถึง เครื่องสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็วเป็นเครื่องสร้างต้นแบบ 3 มิติ โดยจะทาการสร้างชิ้นงานขึ้นมาตามคอมพิวเตอร์ที่ได้ออกแบบไว้ โดยจะทาการสร้างชิ้นงานขึ้นมาทีละชั้น (Layer by Layer) โดยต้องมีการส่งข้อมูลของเครื่องขึ้นรูปวัตถุใน 3 มิติ รวมไปถึงข้อมูลของของเหลว และสารที่จะใช้ขึ้นรูป ตลอดจนกาลังของเครื่องมือและแผ่นรองที่ใช้ในการสร้างชิ้นงาน

2. EC 500หมายถึง น้ายาแว็กซ์เหลวที่ใช้กับ Rapid Prototype Machine มีลักษณะเป็นน้ำสีเหลืองเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของเนื้อแว็กซ์

2.2 เครื่องสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็ว Rapid Prototype

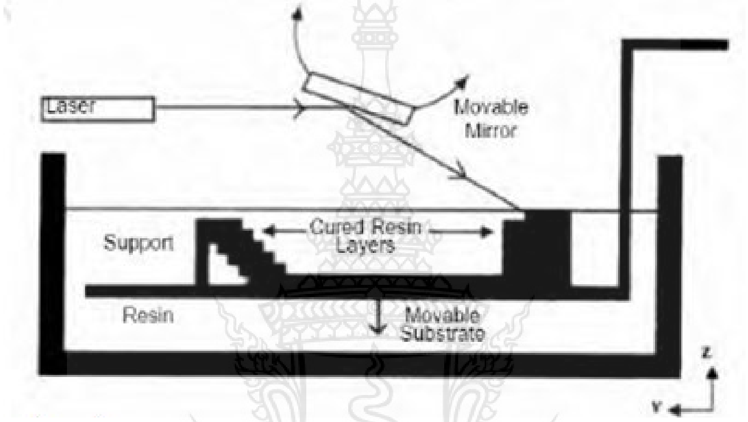
เทคโนโลยีที่เรียกว่า Rapid Prototyping (RP) ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างต้นแบบด้วยความรวดเร็ว โดยกระบวนการนี้ถูกนามาใช้มากขึ้นในอุตสาหกรรมการออกแบบการผลิตเครื่องประดับการแพทย์ สถาปัตยกรรม และงานด้านศิลปะอื่น ๆ อีกด้วย โดยคาว่า “เร็ว” ในที่นี้ หมายถึง การสร้างต้นแบบขึ้นมาโดยตรงจากแบบที่ถูกออกแบบไว้ก่อนแล้วในคอมพิวเตอร์ โดยข้อมูลด้านรูปทรงต่าง ๆ ของ 3D CAD Model จะถูกส่งไปยังเครื่อง Rapid Prototype เพื่อทำการสร้างชิ้นงานต้นแบบขึ้นมาทีละชั้นหลักการทั่วไปของ Rapid Prototyping คล้ายกับการพิมพ์รูปภาพจากคอมพิวเตอร์ออกทางเครื่องพิมพ์ หากแต่สิ่งที่พิมพ์ออกมานี้เป็นชิ้นงาน 3 มิติ ที่มีขนาด รูปทรง เป็นไปตาม CAD Modelในคอมพิวเตอร์ โดยจุดประสงค์หลักของการสร้างต้นแบบด้วย กระบวนการ Rapid Prototyping จะเน้นไปที่การสร้างต้นแบบที่ให้สาระข้อมูลในแง่ของรูปทรงของชิ้นงานทางกายภาพ คือ สามารถจับต้องได้ และในบางกรณีอาจนามาใช้งานจริงได้ หากความแข็งแรงของตัวแบบมีมากเพียงพอ โดยวัสดุของต้นแบบที่ได้จากกระบวนการ RP ทั่วไปมักทาขึ้นมาจากวัสดุที่ง่ายต่อการขึ้นรูป เช่น พลาสติกเป็นต้น

กรรมวิธีและหลักการในการสร้างต้นแบบเร็วนั้น มีอยู่หลากหลายวิธีด้วยกัน โดยแต่ละวิธีจะมีข้อดีข้อเสียและข้อจากัดแตกต่างกันไป ในที่นี้จะแบ่งกระบวนการสร้างต้นแบบเร็ว หรือ Rapid Prototyping Processes ออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ ๆ ด้วยกัน คือ การใช้พอลิเมอร์ชนิดไวแสงในการขึ้นรูปชิ้นงาน (Photopolymerization) การใช้เลเซอร์ หรือกาวในการเชื่อมติดผงวัสดุเข้าด้วยกัน

2.2.1 การใช้พอลิเมอร์ชนิดไวแสงในการขึ้นรูปชิ้นงาน (Photopolymerization)

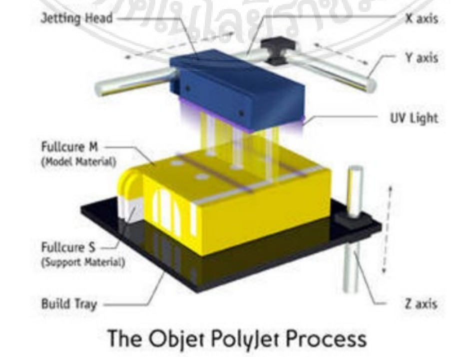
วิธีการนี้ถือเป็นวิธีการสร้างต้นแบบที่นิยมใช้มากเป็นอันดับต้น ๆ และมีเทคนิคที่ได้รับการพัฒนาแตกขยายออกไปเป็นจำนวนมาก และมีความแตกต่างกันไปตามแต่ละบริษัทผู้คิดค้น เพื่อให้มีความเหมาะสมกับงานในแต่ละประเภท โดยขนาดของชิ้นงานและโครงสร้างของตัวแบบสามารถทำได้ในระดับไม่กี่ไม่ครอนไปจนถึงหลายเซนติเมตร ขึ้นอยู่กับขนาด และคุณสมบัติของเครื่อง RP ที่ใช้เทคนิคที่ถือเป็นพื้นฐานดั้งเดิมในการขึ้นรูปชิ้นงานแบบ Photopolymerization นี้ คือ Stereolithography Apparatus (SLA) คิดค้นโดยบริษัท 3D Systems ซึ่งถือว่าเป็นบริษัทแรกที่นำเสนอวิธีการสร้างต้นแบบด้วยการใช้พอลิเมอร์ชนิดไวแสง โดย Chuck Hull ผู้ก่อตั้งบริษัท และเจ้าของสิทธิบัตรวิธีการ SLA นี้ ถือเป็นบิดาแห่งกระบวนการ Stereolithography โดยเครื่อง SLAเครื่องแรกได้ออกสู่ตลาดในช่วงกลางปี พ.ศ.2523 หลักการขึ้นรูปชิ้นงานแบบ Stereolithographyคือ การใช้วัสดุประเภทเรซิ่นที่สามารถแข็งตัวได้ เมื่อถูกฉายด้วยแสงเหนือม่วง หรือ Ultraviolet(UV) ซึ่งมักจะได้จากเลเซอร์ประเภท UV Lasers ที่ให้แสงในช่วงความยาวคลื่นน้อยกว่า 300 นา

โนเมตร โดยชิ้นงานต้นแบบจะถูกสร้างขึ้นทีละชั้น ๆ จากด้านล่างขึ้นด้านบน โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของ Platform ในแนวดิ่ง และการสแกน UV เลเซอร์ในแนวราบ เพื่อให้เรซิ่นชนิดไวแสงเปลี่ยนรูปเป็นของแข็งในตาแหน่งที่ต้องการ ชิ้นงานที่มีส่วนโค้ง หรือมีความซับซ้อนมาก อาจต้องอาศัยการสร้างส่วนรองรับที่เรียกว่า Support ขึ้นมาไปพร้อม ๆ กับการขึ้นรูปตัวชิ้นงานด้วย โดย Support นี้สามารถตัดเอาออกภายหลังได้ ชิ้นงานที่ได้หลังจากทำการฉายแสง UV ซ้ำ ภายหลังจากที่ขึ้นรูปชิ้นงานเสร็จแล้วจะมีความแข็งแรงในระดับหนึ่งดังเช่นพลาสติกทั่วไป ซึ่งนอกจากจะสามารถให้รูปทรงทางกายภาพตรงตามแบบในคอมพิวเตอร์ซึ่งถือเป็นจุดประสงค์หลักของการสร้างต้นแบบแล้วยังจะสามารถใช้ในการทดสอบกลไกการเคลื่อนที่บางอย่างที่ไม่ต้องรับแรงทางกลมาก ๆ ได้ เช่น ส่วนที่เป็นบานพับ จุดหมุนเป็นต้น หรืออาจนาไปใช้งานดังเช่นชิ้นงานพลาสติกจริงได้เลย



รูปที่ 2.1 การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการ Stereolithography Apparatus (SLA)

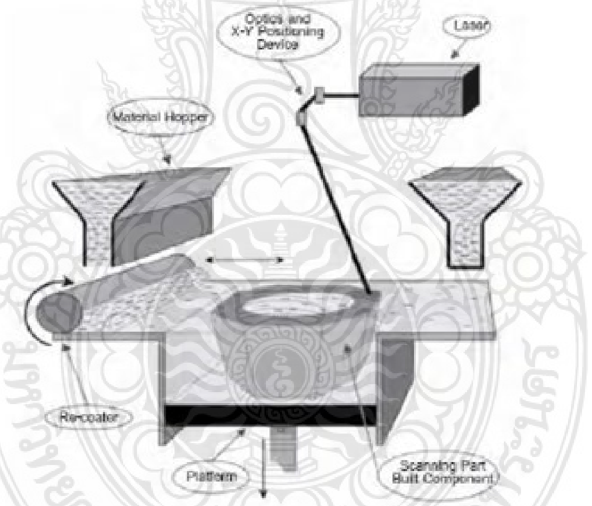
นอกจากนี้ยังมีวิธีการอื่น ๆ ที่ได้รับการพัฒนาต่อมาจากแนวคิดของ SLA ให้มีความแตกต่างและเหมาะกับรูปแบบการขึ้นรูปที่ต่างกันไป เช่น Micro-stereolithography โดยบริษัท MicroTEC เป็นเทคนิคที่เหมาะกับการสร้างต้นแบบที่มีขนาดเล็กมาก ๆ หรือ วิธีการขึ้นรูปแบบ PolyJet พัฒนาดยบริษัท Objet ที่อาศัยการฉีดเรซิ่น ลงบน Platform ด้วยแผงหัวฉีดขนาดเล็กมากกว่า 1,500 หัวไปพร้อม ๆ กับการใช้แสง UV ในการทำให้เรซิ่น แข็งตัวในทันที ทำให้ไม่จำเป็นต้องมีถังขนาดใหญ่ในการบรรจุเรซิ่น และจุ่มชิ้นงานทั้งชิ้นลงไปในอ่างเรซิ่นในระหว่างการขึ้นรูปดังเช่นที่ใช้กับวิธีการแบบ SLA ทั่วไป



รูปที่ 2.2 ชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยวิธี PolyJet

2.2.2 การใช้เลเซอร์หรือกาวในการเชื่อมติดผงวัสดุเข้าด้วยกัน (Sintering / Bonding)

การสร้างต้นแบบด้วยวิธีการนี้จะต่างกับวิธี Photopolymerization ตรงที่ว่าสถานะของวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานจะอยู่ในรูปของวัสดุผง โดยทั่วไปจะนิยมใช้ผงพลาสติก เนื่องจากมีจุดหลอมตัวต่ำ ทำให้ง่ายในการขึ้นรูป ขนาดของผงพลาสติกที่ใช้จะมีขนาดเล็กกว่า 100 ไมครอน ซึ่งผงวัสดุเหล่านี้จะถูกให้ความร้อนด้วยเลเซอร์บนตำแหน่งที่เป็นหน้าตัดของชิ้นงาน ความร้อนที่ได้มากพอที่จะทำให้ผง พลาสติกแต่ละเม็ดในบริเวณที่ถูกฉายด้วยเลเซอร์สามารถยึดเกาะติดกันได้ และ ยังสามารถยึดเกาะกับชั้นที่ขึ้นรูปไปแล้วก่อนหน้าได้อีกด้วยเพื่อให้เกิดเป็นโครงสร้างแข็ง 3 มิติ ตามแบบในคอมพิวเตอร์ โดยตัว Platform จะเลื่อนลงเล็กน้อยเพื่อให้ผงวัสดุชุดใหม่ถูกกวาดเข้ามาทับผิวที่ถูกให้ความร้อนในชั้นก่อนหน้าสำหรับการ Sintering ในชั้นถัดไป โดยกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานแบบนี้จะวนไปเรื่อย ๆ และเมื่อทำการขึ้นรูปจนครบทุกชั้นแล้ว วัสดุผงส่วนเกินที่ไม่ได้ถูกฉายด้วยเลเซอร์ก็จะถูกปัดหรือพ่นออกไปด้วยลม คงเหลือแต่ชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์ตามแบบที่ต้องการ ความเร็วโดยเฉลี่ยในการขึ้นรูปชิ้นงานจะอยู่ที่ประมาณ 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง หรือทุก ๆ 1 ชั่วโมงจะได้ชิ้นงานสูงขึ้น 10 มิลลิเมตร โดยความถูกต้องของชิ้นงานจะอยู่ที่ประมาณ ±0.15 มิลลิเมตร ข้อสังเกตอย่างหนึ่งของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการ Sintering คือ ผิวงานที่ได้ค่อนข้างหยาบ และ ความแข็งแรงของชิ้นงานที่ได้จะต่ำกว่าวิธี Stereolithography ซึ่งจะให้ผิวชิ้นงานที่เรียบและวัสดุเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า เทคนิคที่เป็นที่รู้จักสาหรับการขึ้นรูปแบบนี้ คือ Selective Laser Sintering (SLS) พัฒนาโดยบริษัท 3D Systems และ DTM



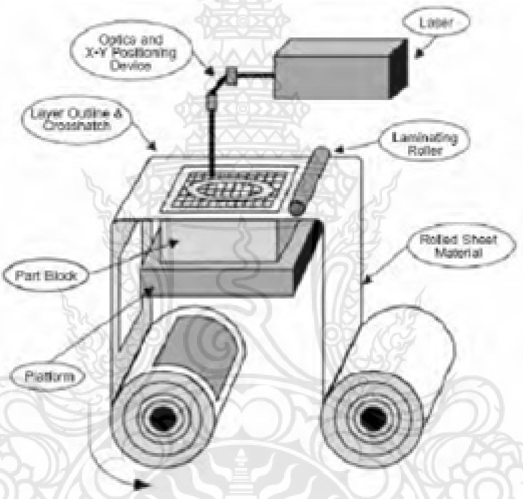
รูปที่ 2.3 ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการ Selective Laser Sintering (SLS)

นอกจากการใช้เลเซอร์ในการให้ความร้อน เพื่อให้วัสดุถูกเชื่อมติดกันแล้ว ยังมีเทคนิคที่ใช้วิธีการพ่นกาว เพื่อให้ผงวัสดุเกาะติดกันเป็นโครงสร้างที่ต้องการ วิธีที่ว่านี้ ถูกพัฒนาขึ้นโดยสถาบันเทคโนโลยี แมส-ซาชูเซตส์ ในชื่อ Three Dimensional Printing (3DP) ต่อมาได้รับการพัฒนา และทำตลาดโดยบริษัท Z Corporation หลักการของ 3D Printing นี้ จะคล้ายคลึงกับการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ Inkjet ทั่วไป กล่าวคือ กาวประสานจะถูกพ่นออกจากหัวฉีดขนาดเล็กลงไปยัง Platformที่มีผงแป้งเกลี่ยเตรียมเอาไว้ การขึ้นรูปก็จะทาไปทีละชั้น เช่นเดียวกับกระบวนการการสร้างต้นแบบเร็วแบบอื่น ๆ แต่ข้อดีของวิธีการนี้คือสามารถที่จะให้สีกับชิ้นงานได้โดยการฉีดพ่นกาวที่ได้รับการผสมสีต่าง ๆ ลงไปดังเช่นการพิมพ์สีด้วยเครื่องพิมพ์ Inkjet ทำให้

เราสามารถสร้างชิ้นงานที่เห็นรูปทรงและสีสันของตัวงานไปได้พร้อม ๆ กันอย่างไรก็ตาม ชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการนี้ค่อนข้างเปราะบางมากกว่าชิ้นงานที่ได้ จากวิธี Stereolithography ดังนั้นชิ้นงานที่ได้จะเหมาะสาหรับการทาขึ้นมาเพื่อเป็น Concept Prototype มากกว่าจะเป็น Functional Prototype

2.2.3 การตัดและติดแผ่นวัสดุทีละชั้น (Layer Laminate Manufacturing)

การขึ้นรูปต้นแบบด้วยวิธีการนี้ ถือได้ว่ามีความง่ายมากที่สุดในแง่ของหลักการ นั่นคือ การตัดแผ่นวัสดุที่มักทาจากกระดาษ โดยที่ด้านหนึ่งถูกเคลือบด้วยกาวที่จะติดเมื่อได้รับความร้อนจากการตัดแผ่น วัสดุจะถูกตัดด้วยเลเซอร์ให้ได้รูปร่างตรงตามพื้นที่หน้าตัดของตัวแบบ ในส่วนนั้น ๆ แผ่นวัสดุแต่ละแผ่นจะซ้อนติดกันเป็นชั้น ๆ จนได้ชิ้นงาน ตามต้องการ เทคนิคการขึ้นรูปเช่นนี้รู้จักกันแพร่หลายในชื่อ Laminated Object Manufacturing (LOM) ซึ่งคิดค้นโดยบริษัทCubic Technologies แผ่นวัสดุที่เตรียมไว้เป็นม้วนจะเคลื่อนที่ผ่าน Platform และถูกตัดตามแบบด้วยเลเซอร์ บริเวณที่ไม่ใช่ส่วนของชิ้นงานจะถูกตัดเป็นตารางเล็ก ๆ เพื่อให้ง่ายต่อการแกะออกเมื่อทำการขึ้นรูปเสร็จสมบูรณ์

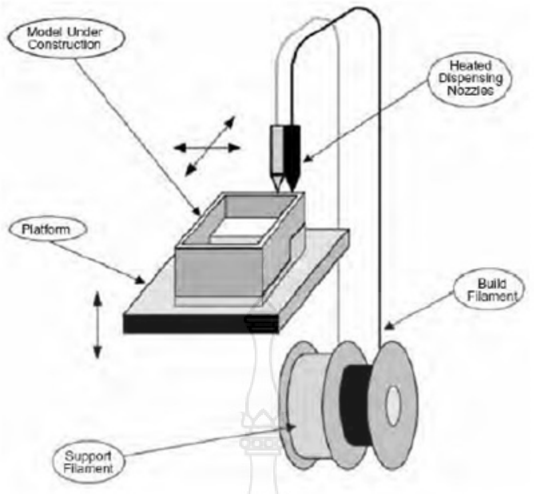


รูปที่ 2.4 ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการ Laminated Object Manufacturing (LOM)

จากแนวคิดการตัดแผ่นวัสดุแล้วซ้อนกันเป็นชั้น ๆ เพื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานก็ยังถูกพัฒนาออกไปเป็นเทคนิคอื่นๆ เช่น การใช้แผ่นโลหะ หรือ พลาสติกแทนการใช้กระดาษ เพื่อสร้างเป็นชิ้นงานตั้งต้นสำหรับใช้ในกระบวนการตัดวัสดุทั่วไป อย่างเช่น กระบวนการ Layer Milling Process (LMP) ที่พัฒนาโดยบริษัท Zimmermann ซึ่ง การเตรียมวัสดุ ตั้งต้นในลักษณะนี้จะช่วยลดเวลาในกระบวนการกัด และลดปริมาณเศษตัดลงไปได้อย่างมาก เช่น การกัดชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นช่องกลวงหรือ ถังขนาดใหญ่ ๆ

2.2.4 การใช้พลาสติกร้อนเรียงตัวขึ้นเป็นชิ้นงาน (Extrusion Processes)

การสร้างต้นแบบอีกวิธีการหนึ่ง คือ การใช้เส้นพลาสติกที่ถูกทาให้ร้อนนามาเรียงเป็นโครงสร้างขึ้นมาเป็นชั้น ๆ โดยส่วนที่เป็นชิ้นงานและส่วนรองรับจะใช้เส้นพลาสติกและรูปแบบการเรียงที่ต่างกัน โดยส่วนที่ทาหน้าที่รองรับนั้นจะช่วยเสริมความมั่นคงของชิ้นงานในระหว่างการขึ้นรูปและจะถูกเอาออกภายหลังจากที่ชิ้นงานได้รับการขึ้นรูปจนเสร็จสมบูรณ์แล้ว เทคนิคหนึ่งที่นิยมใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบนี้ คือ Fused Deposition Modeling (FDM) พัฒนาโดยบริษัท Stratasys



รูปที่ 2.5 ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการ Fused Deposition Modeling (FDM)

อย่างไรก็ตาม ผิวชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยวิธีนี้จะค่อนข้างหยาบ เมื่อเทียบกับวิธี SLAเนื่องจากการขึ้นรูปที่เกิดจากการเรียงตัว และเชื่อมติดกันของเส้นพลาสติกขนาดเล็กเป็นชั้น ๆ สำหรับความแข็งแรงของชิ้นงานที่ได้ก็มีมากน้อยแตกต่างกันไปตามชนิดพลาสติกที่นำมาใช้ โดยพลาสติกที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการนี้ เช่น พลาสติก ชนิด ABS หรือ Polycarbonate เป็นต้นชิ้นงานที่ ได้จึงมีความแข็ง แรงพอสมควร และสามารนำมาใช้ ทดสอบการใช้ งานในลักษณะ Functional Prototype ได้ใกล้เคียงชิ้นงานพลาสติกจริง

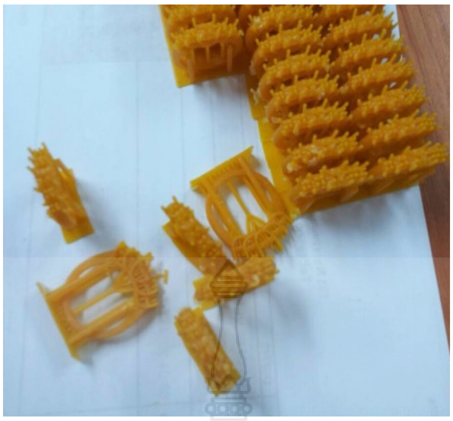
นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาการสร้างต้นแบบเร็วในลักษณะเดียวกันนี้โดยอาศัยเทคโนโลยี Inkjet เข้ามาร่วมด้วย นั่นคือ การหลอมพลาสติกและพ่นออกมาเป็นหยดพลาสติกหลอมเหลวขนาดเล็ก ๆ ให้เกาะตัวกันทีละชั้นไปจนเกิดโครงสร้างที่ต้องการ เทคนิคนี้เรียกว่า Multijet Modeling (MJM) ค้นโดยบริษัท 3D Systems ซึ่งมีหลักการคล้ายกับวิธี PolyJet ของ Objet แต่ต่างกันที่ลักษณะการทำให้พลาสติกแข็งตัวเกิดเป็นโครงสร้างของชิ้นงาน

2.2.5 Rapid Prototy ในงานอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับ

การสร้างต้นแบบด้วยกระบวนการนี้ยังสามารถใช้ขี้ผึ้ง หรือ Wax เป็นวัสดุในการขึ้นรูปได้อีกด้วย ซึ่งมีผลดีในแง่ของความสามารถในการนำกลับเอามาใช้ใหม่ และนอกจากการสร้างชิ้นงานขึ้นมาเพื่อใช้เป็นต้นแบบในลักษณะ Conceptual Prototype แล้ว ชิ้นงาน Wax ที่ได้ยังจะสามารถนำไปใช้ในเป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการหล่อโลหะ ที่ต้องการรายละเอียดของชิ้นงานมาก (PrecisionCasting)อย่างกระบวนการLost-Waxซึ่งนิยมมากในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับซึ่งให้ความละเอียดของผิวชิ้นงานได้ค่อนข่างดีซึ่งปัจจุบันนิยมทากันอย่างแพร่หลาย 2 แบบด้วยกัน

แบบที่ 1 ชิ้นงานที่สามารถนาไป Lost-Wax แล้วสามารถนาไปหล่อตัวเรือนได้เลย ต้นแบบตัวเรือนที่ได้จากเครื่อง RP ด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติสามารถ Lost-Wax ได้โดยตรงโดยกระบวนการอบเบ้าปูน ขึ้นอยู่กับแต่ละบริษัทผู้ผลิตเครื่องจักรที่จะผลิตวัตถุดิบ

แบบที่ 2 ชิ้นงานที่ไม่สามารถนำไป Lost-Wax ได้ แต่นำไปทาแม่พิมพ์ยางได้ มีคุณสมบัติที่แข็ง



รูปที่ 2.6 ชิ้นงานจากเครื่อง RP ที่สามารถนำไป Lost-Wax ได้

รูปที่ 2.7 ชิ้นงานจากเครื่อง RP ที่ไม่สามารถนาไป Lost-Wax ได้ แต่นำไปทำแม่พิมพ์ยาง

2.3 ปูนสำหรับหล่อเครื่องประดับ

การหล่องานเครื่องประดับนิยมใช้วิธีการหล่อแบบอินเวสเมนต์ (Investment Casting) หรือเรียกอีกชื่อว่าการหล่อแบบประณีตงานหล่อ ประเภทนี้จะได้ผิวชิ้นงานที่ มีความละเอียดสูงเมื่อเปรียบเทียบกับงานหล่อประเภทอื่น การศึกษาสมบัติของปูนจึงมีความสาคัญกับการหล่ออย่างยิ่ง คือปูนควรจะทนทานต่ออุณหภูมิของโลหะในระหว่างการหล่อ เนื้อปูนที่ละเอียดจะทำให้ผิวงานดีจากการหล่อ การควบคุมการเติบโตของผลึกในปูนเพื่อให้ได้ผิวเนื้อปูนที่ดีเหมาะสมสำหรับเป็นแม่พิมพ์ปูนที่ สวยงามการควบคุมอุณหภูมิ ของปูนในระหว่างการหล่อเพื่อให้น้ำโลหะไหลเข้าแบบได้อย่างเหมาะสม และการเลือกชนิดปูนที่ไม่ทำปฏิกิริยากับโลหะระหว่างการหล่อเป็นต้น ปูนที่ใช้ในงานหล่อเครื่องประดับ แบ่งได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ แยกตามประเภทวัสดุของปูนคือ ปูนยิปซัมบอนด์ (Gypsum bonded Investment) ปูนฟอสเฟตบอนด์ (Phosphate bonded Investment) และปูนแบบอลูมินา- แมกนีเซียม (Alumina-maganesia Investment)

1 ปูนยิปซัมบอนด์ (Gypsum Bonded Investment)

ปูนยิปซัมบอนด์เหมาะสาหรับงานหล่อโลหะ เงิน ทอง หรือทองเหลือง โดยส่วนใหญ่งานหล่อ

เครื่องประดับจะนิยมใช้ปูนหล่อประเภทนี้ เนื่องจากมีราคาและคุณสมบัติเหมาะสำหรับการหล่อโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวไม่เกิน 1200 องศาเซลเซียส ส่วนผสมของปูนยิปซัมบอนด์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ วัสดุทนไฟซึ่งประกอบด้วยซิลิกา คริสโตบาลไลต์ (Critoballite) เป็นต้น และกลุ่มวัสดุที่มีสมบัติเป็นตัวยึด (binder) คือ ผงยิปซัม ที่มีชื่อทางเคมีว่า แคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต (Calcium sulfate hemihydrate) และส่วนผสมอื่น ๆ เพิ่มตามแต่ละสูตรของการผลิต

2 ปูนฟอสเฟตบอนด์ (Phosphate bonded Investment)

ปูนฟอสเฟตบอนด์เหมาะสาหรับงานหล่องานโลหะที่ต้องใช้อุณหภูมิสูง เช่น แพลตินัม สเตนเลสสตีล และทนทานต่อการหล่อโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวสูงกว่า 1200 องศาเซลเซียสส่วนผสมของปูนฟอสเฟตบอนด์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือวัสดุทนไฟซึ่งประกอบด้วยซิลิกา และกลุ่ม วัสดุที่เป็นธาตุยึดคือเกลืออสเฟต หรือ ออกไซด์ ของกรดฟอสฟอริค โดยทั่วไป ใช้โมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต แมกนีเซียมออกไซด์ และส่วนผสมอื่น ๆ เพิ่มเติมตามแต่ละสูตรของการผลิตปูนฟอสเฟต

3 ปูนอะลูมินา-แมกนีเซียม (Alumina-maganesia Investment)

ปูนฟอสเฟตบอนด์จะทนต่ออุณหภูมิสูงเช่น งานหล่อไททาเนียม แต่ระหว่างการหล่อด้วยพิมพ์ปูนฟอสเฟตบอนด์อาจมีก๊าซเกิดขึ้น ทาให้ปูนฟอสเฟตบอนด์จึงไม่เหมาะสมสาหรับงานไททาเนียม เพราะโลหะไททาเนียมไวต่อการทาปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นออกไซด์ ด้วยเหตุนี้จึงมีการนาปูนอะลูมินา-แมกนีเซียมซึ่งเป็นปูนที่ค่อนข้างเสถียรจากพันธะของอะลูมินาและแมกนีเซียม มาใช้หล่อ ไททาเนียม นอกจากนี้ยัง สามารถนาไปหล่ อ โลหะประเภทอื่ น ๆ ได้ เช่นนิกเกิล โคบอลต์โครเมียม เป็นต้นส่วนผสมของปูนอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม ประกอบไปด้วยวัสดุทนไฟจากปูนของอะลูมินากับแมกนีเซียมซึ่งมีสารที่เป็นตัวยึดหลายชนิดสารหลักที่ผสมกันได้แก่ แมกนีเซียมอะซิเตต(Magnesium acetate) ปูนเซอร์คอเนีย (Zirconia cement) ปูนแมกนีเซียม (Magaesia cement) ซิลิกาเจลหรือวุ้นซิลิกา (Colloidal sillcate) เอธิลซิลิเกต (Ethyl sillcate)

รูปที่ 2.8 ตัวอย่างปูนสำหรับหล่อตัวเรือนเครื่องประดับที่มีจำหน่ายภายในประเทศ

2.3.1 การทำแม่พิมพ์ปูนหล่อ

หลังจากการเตรียมต้นเทียนเสร็จเรียบร้อย ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการทำแม่พิมพ์ปูนหล่อ ซึ่งเป็นแม่พิมพ์สุดท้ายที่จะนำไปหล่อโลหะ และเป็นขั้นตอนที่ต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษ หากเกิดเหตุผิดพลาดขึ้นจะไม่สามารถแก้ไขได้ และที่สำคัญผู้ปฏิบัติอาจไม่ทราบว่าอาจมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ซึ่งเป็นการสูญเสียแรงงาน ค่าใช้จ่ายและเวลาในการผลิต ทั้งนี้เนื่องจากเทปูนหล่อแบบหุ้มต้นเทียนแล้ว ผู้ปฏิบัติไม่อาจทราบว่าแม่พิมพ์นั้นมีสภาพเป็นอย่างไร เช่น ตัวแบบเทียนอาจหลุดออกจากต้นเทียน หรือตัวแบบเทียนอาจถูกปูนหล่อซึ่งมีน้ำหนักมากบีบให้เสียรูปทรง ดังนั้นการ

หล่อเครื่องประดับจึงต้องการความประณีต ความสวยงาม และลวดลายละเอียดของพื้นผิว แม่พิมพ์ปูนหล่อจะต้องถ่ายทอดลักษณะพิเศษดังกล่าวจากต้นแบบ ไปสู่ชิ้นงานหล่อ ด้วยเหตุนี้การหล่อเครื่องประดับจึงมีผู้ผลิตวัสดุอุปกรณ์และขั้นตอนการทำแม่พิมพ์ปูนขึ้นมาใช้เฉพาะสำหรับการหล่อตัวเรือนเครื่องประดับ

ปูนหล่อ เป็นปูนชนิดที่ผลิตขึ้นมาเพื่อใช้ในการทำแม่พิมพ์โดยเฉพาะ มีลักษณะพิเศษ คือ ทนความร้อนสูง ผิวละเอียด มีความแข็งแรงมาก แต่สามารถทุบทำลายได้ง่าย ซึ่งเป็นลักษณะของแม่พิมพ์ที่ดี ในปัจจุบันมีผู้ผลิตจำนวนมากได้ผลิตปูนหล่อแบบออกจำหน่าย มีข้อดีข้อเสียในการใช้งานแตกต่างกันไป

สูตรการหาอัตราส่วนของปูนหล่อ

ปริมาตรของกระบอกหล่อ (V)×1.2 + (20 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักปูนหล่อทั้งหมด)

ปริมาตร (CC) = 1.2 CC / กรัม

20 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักปูนหล่อทั้งหมด = การเผื่อสำหรับความสูญเสียของส่วนผสมที่เกิดจากการดูดอากาศออกจากเนื้อปูนและส่วนที่ติดกับภาชนะ

สูตรการหาอัตราส่วนผสมของน้ำ

ปริมาณน้ำ = 37-40 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักปูนหล่อ

หมายเหตุ ปริมาณน้ำขึ้นอยู่กับประเภทของปูนหล่อ

ขั้นตอนการผสมปูนหล่อแบบ

- คำนวณน้ำหนักของปูนหล่อแบบตามสูตร และหาอัตราส่วนน้ำตาม
- เทน้ำสะอาดลงในชามอ่างยางสำหรับผสมค่อยๆ เทปูนลงในน้ำสะอาด และใช้พาย พลาสติกคนผสมให้ทั่วกัน ข้อควรระวังคือ ห้ามเทน้ำลงในปูนขนะผสม เนื่องจากปูนหล่อมีลักษณะเป็นผงละเอียดแห้งสนิท เมื่อเทน้ำลงไปบริเวณหนึ่งของปูนหล่อแบบ ปูนจะซึมซับน้ำไว้อย่างรวดเร็วทำให้ส่วนอื่นๆ ของปูนที่ไม่ได้รับน้ำจะทำการผสมได้ยาก และส่วนผสมมักจะเสียหา เนื่องจากน้ำไม่สามารถกระจายไปผสมกับปูนทั้งหมด
- นำส่วนผสมเข้ากวนในเครื่องผสมปูนหล่อใช้เวลา 1-1.30 นาที
- นำส่วนผสมเข้าเครื่องดูดอากาศออกจากภายในเนื้อปูนหล่อ พร้อมทั้งมีการสั่นใช้เวลาประมาณ 1-2 นาที
- นำส่วนผสมเทลงในกระบอกที่มีต้นเทียนติดตั้งอยู่ภายใน และประกอบกับฐานยางเรียบร้อยแล้ว เทส่วนผสมของปูนลงในกระบอกโดยเทลงทางด้านข้างของกระบอก หากเทลงตรงกลางบนต้นเทียนโดยตรง ปูนหล่ออาจทำให้ต้นเทียนเสียหายได้
- กระบอกที่เทปูนหล่อแล้วเข้าเครื่องดูดอากาศใช้เวลาประมาณ 3-5 นาที
- เติมส่วนผสมของปูนหล่อให้เต็ม เนื่องจากดูดอากาศออกจากเนื้อปูนทำให้ส่วนผสมของปูนหล่อบางส่วนกระเด็นออกจากกระบอกหล่อ จึงต้องเติมให้เต็ม
- เมื่อมีการเทปูนหล่อแบบลงในกระบอกเรียบร้อยแล้วให้นำกระบอกหล่อไปตั้งผึ่งไว้ในที่ร่มเมื่อปูนหล่อเริ่มแห้งให้ตกแต่งปูนหล่อแบบให้เรียบร้อยเสมอขอบกระบอกหล่อ ในการผสมปูนหล่อแบบตามขั้นตอนดังกล่าวมีความสำคัญมากต้องรีบดำเนินการให้เสร็จสิ้นภายในระยะเวลาประมาณ 10-20 นาที เพราะปูนหล่อแบบจะแห้งและแข็งตัวเร็ว การดูดอากาศออกจากเนื้อปูนหล่อจะกระทำได้ยาก ดังรูปที่ 2.29

รูปที่ 2.9 แสดงการผสมปูนหล่อ

ข้อควรระวังในการผสมปูนหล่อ

- อุปกรณ์ที่ใช้ในการผสมปูนหล่อ ควรเลือกอุปกรณ์ที่ทำจากวัสดุที่ไม่มีเศษหรือเสี้ยนที่จะหลุดเข้าไปผสมกับส่วนผสมของปูน
- การลัดหรือการข้ามขั้นตอน อาจทำให้เกิดความเสียหายต่องานหล่อได้ เช่น การดูดฟองอากาศน้อยเกิดไปเป็นต้น
- ในขณะดูดอากาศออกจะต้องมีการสั่นสะเทือนตลอดเวลา เพื่อให้อากาศที่แทรกตัวอยู่ลึกๆ ถูกกระตุ้นให้ลอยขึ้นมาที่ผิวหน้าของส่วนผสมและถูกดูดออกไป

2.3.2 การอบเผาแม่พิมพ์ปูนหล่อ

การอบเผาแม่พิมพ์ปูนหล่อ เป็นขั้นตอนที่อาจเรียกว่าเป็นการเตรียมแม่พิมพ์สำหรับการหล่อโลหะเพื่อปรับอุณหภูมิของเนื้อปูนหล่อให้เหมาะสมกับน้ำโลหะ ดังรูปที่ 2.10

รูปที่ 2.10 แสดงการอบเบ้าปูนหล่อ

ในการหล่อตัวเรือนเครื่องประดับ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้มีความเหมาะสมเพื่อรองรับการฉีดน้ำโลหะเข้าไปในโพรงแบบ ความผิดพลาดในการควบคุมอุณหภูมิจะก่อให้เกิดรูพรุน ขึ้นบนชิ้นงานได้ง่าย หรือเกิดผลอื่นๆ ทำให้การหล่อไม่สำเร็จ เช่น ถ้าอุณหภูมิของแม่พิมพ์ต่ำเกินไป น้ำโลหะที่ฉีดเข้าสู่โพรงแบบจะแข็งตัวก่อนที่จะแทรกไปตามรายละเอียดของแบบทำให้การหล่อไม่สมบูรณ์ หรือที่เรียกว่าหล่อไม่เต็ม ขณะเดียวกันถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้น้ำโลหะที่ฉีดเข้าไปอยู่ในสภาพของเหลวนานกว่าปกติ จะส่งผลให้เกิดรูพรุนขึ้นบนผิวชิ้นงานได้

จุดประสงค์ในการอบแม่พิมพ์ปูนหล่อ

1) เพื่อกำจัดตัวแบบเทียน และส่วนของเทียน ทั้งหมดออกจากแม่พิมพ์ปูนหล่อทำให้แม่ พิมพ์ปูนหล่อเกิดเป็นโพรงแบบขึ้นภายใน พร้อมทางเดินน้ำโลหะ

2) เพื่อเตรียมอุณหภูมิของกระบอกหล่อให้เหมาะสมกับอุณหภูมิในการหล่อโลหะทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิในขณะทำการหล่อโลหะ การอบเผาแม่พิมพ์ปูนหล่อ เพื่อขจัดกำจัดเทียน นี้มักจะใช้ระบบไอน้ำในการละลายเทียน ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 100 ℃ เทียนประมาณ 90 % ในกระบอกหล่อจะหลอมละลายและไหลออกทางปากแม่พิมพ์ปูนหล่อ ซึ่งเกิดจากส่วนโค้งนูนของฐานยาง เมื่อกำจัดเทียนจำนวนมากออกแล้วจึงนำแม่พิมพ์เข้าอบในเตาอบต่อไป

แหล่งกำเนิดความร้อน ความร้อนที่ใช้ในการอบมาจากขดลวดไฟฟ้าภายในเครื่องความร้อนนี้นำมาใช้ในการอบสูงสุดถึงประมาณ 1200 ℃

2.3.3 ความสมดุลของอุณหภูมิ

1) ชิ้นงานบาง เป็นชิ้นงานที่มีโพรงแคบและเล็ก ช่องทางน้ำโลหะจะแทรกเข้าไปได้เต็มโพรงแบบ ดังนั้นน้ำโลหะจะต้องมีลักษณะหลอมเหลว และต้องเย็นตัวช้าเพื่อให้มีเวลาเพียงพอที่น้ำโลหะแทรกตัวเข้าไปในที่แคบๆ ได้ทั่วถึง น้ำโลหะจึงต้องมีอุณหภูมิสูง ดังนั้นแม่พิมพ์จึงต้องมีอุณหภูมิสูงตามไปด้วย

2) ชิ้นงานหนา เป็นชิ้นงานที่มีโพรงแบบโตกว่า น้ำโลหะจะแทรกตัวเข้าไปได้เร็ว อุณหภูมิของน้ำโลหะจึงมีอุณหภูมิต่ำได้ การเตรียมแม่พิมพ์จึงสามารถใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและบางกว่า

3) อุณหภูมิหล่อของโลหะแต่ละชนิดข้างต้น เป็นอุณหภูมิโดยประมาณเนื่องจากโลหะผสมแต่ละชนิด จะมีสัดส่วนการผสมที่แตกต่างกันตามความต้องการของผู้ผลิต

4) ในการอบเผาแม่พิมพ์ ควรคงที่อุณหภูมิหล่อไว้อย่างน้อย ½ ชั่วโมง ก่อนทำการหล่อเพื่อให้สัดส่วนต่างๆ ของแม่พิมพ์มีความร้อนใกล้เคียงกันมากที่สุด

5) อุณหภูมิของแม่พิมพ์ จะขึ้นกับขนาดของแม่พิมพ์และรายละเอียดของแบบว่ามีขนาดและรายละเอียดซับซ้อนเพียงใด โดยชิ้นงานจะต้องการอุณหภูมิสูงกว่าชิ้นงานใหญ่

6) ในการหล่อโลหะ ถ้าพบว่าน้ำโลหะเข้าสู่โพรงแบบไม่ทั่วถึง โดยเฉพาะในส่วนที่มีความละเอียดมาก ๆ ให้เพิ่มอุณหภูมิของแม่พิมพ์ก่อน การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำโลหะต้องกระทำด้วยความระมัดระวัง

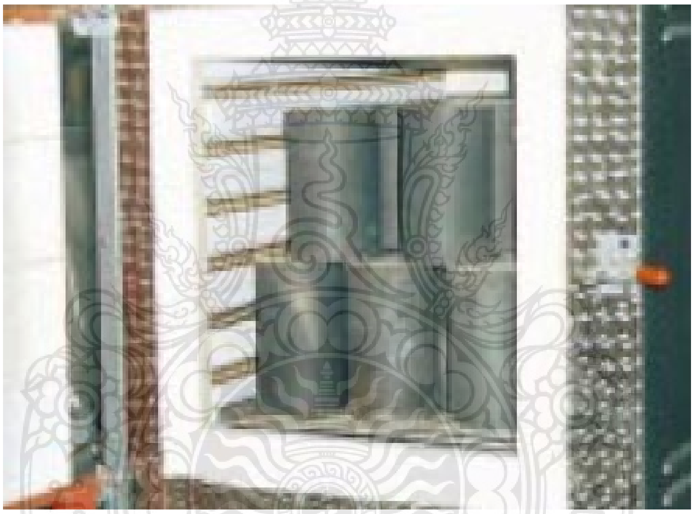
7) ในการอบเผาแม่พิมพ์ ไม่มีเครื่องมืออุปกรณ์ควบคุมที่ดีพอ ให้สังเกตที่บริเวณปากทาง เข้า – ออก ของน้ำโลหะแม่พิมพ์ ถ้าบริเวณนั้นมีจุดสีน้ำตาลเข้มและมีเปลวไฟพุ่งออกมาจากภายในโพรงแบบ แสดงว่าเทียนภายในถูกเผาไหม้ไม่หมด แต่ถ้าบริเวณปากทางเข้าและออกของน้ำโลหะของแม่พิมพ์มีสีขาวนวล แสดงว่าเทียนภายในถูกเผาไหม้โดยสมบูรณ์

8) แก๊สหรือควันที่ระเหยออกมา ในขณะอบเผาแม่พิมพ์เป็นแก๊สพิษ ควรหาทางป้องกันและหลีกเลี่ยงการสูดดม

2.3.4 การใช้เครื่องอบเผาแม่พิมพ์ปูนหล่อ

1) การเปิด – ปิดเครื่อง เตาอบเผาแม่พิมพ์มี 2 ชนิด คือเตาไฟฟ้าและเตาที่ใช้แก๊สเป็นเชื้อ เพลิง ส่วนประกอบที่สำคัญ คือห้องอบเผาซึ่งมีหลายขนาดตามความต้องการของผู้ใช้ ภายในห้องเผานี้จะมีปล่องสำหรับระบายควันออกจากห้อง ซึ่งมีการต่อปล่องนี้ออกจากห้องปฏิบัติงาน เพราะควันที่ออกจากเตาอบเผาจะเป็นควันพิษ นอกจากนี้ยังมีชุดควบคุมอุณหภูมิของเตา ซึ่งมีทั้งชนิดที่ควบคุมด้วยมือ และชนิดควบคุมอัตโนมัติ เตาอบเผาแม่พิมพ์นี้จะมีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 1200 ℃ ในการใช้งานจะต้องคำนึงถึงส่วนของอุณหภูมิและเวลาในการอบการควบคุมอุณหภูมิและเวลาจะต้องกระทำไปพร้อมกัน

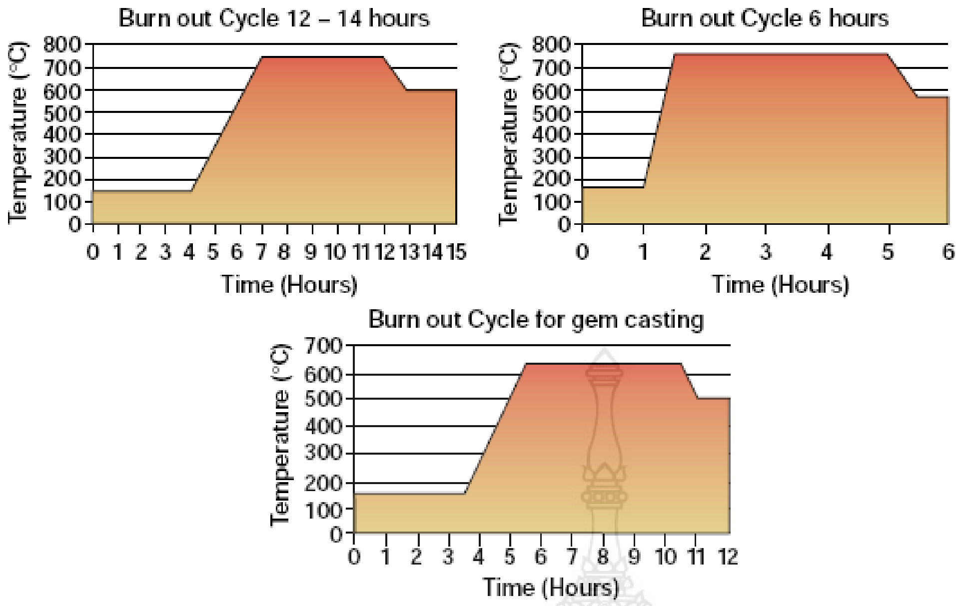
2) การตั้งอุณหภูมิในการอบ อุณหภูมิหล่อโลหะจะต้องมีความสมดุลกับอุณหภูมิของแม่พิมพ์ปูนหล่อ เนื่องจากในการหล่อโลหะแม่พิมพ์ซึ่งจะทำหน้าที่รองรับน้ำโลหะควรมีอุณหภูมิที่ไม่แตกต่างกันมากนัก มิฉะนั้นแม่พิมพ์จะแตกเสียหายได้ อนึ่งโลหะแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิหลอมละลายแตกต่างกัน ดังนั้นอุณหภูมิหล่อหรืออุณหภูมิของแม่พิมพ์ จึงต้องมีความแตกต่างกันตามชนิดของโลหะด้วย อาจสรุปได้ดังนี้คือ SILVER มีอุณหภูมิหล่อประมาณ 426 – 454 ℃



รูปที่ 2.11 แสดงการจัดเรียงเบ้าปูนหล่อเข้าสู่เตาอบ

3) การตั้งเวลาในการอบ ในการอบเผาแม่พิมพ์ มีสูตรการอบเผาหลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเทคนิคผู้ปฏิบัติสรุปหลักการอบเผาอย่างกว้างๆ ได้ดังนี้

- เพิ่มอุณหภูมิขึ้นอย่างช้าๆ
- ในบางอุณหภูมิที่สำคัญๆ หรือในกรณีที่มีกรอบเผาไม่เหมือนกันให้คงอุณหภูมินั้นไว้ เพื่อให้ความร้อนกระจายอย่างทั่วถึง
- ระยะเวลาที่ใช้ขึ้นกับขนาดของแม่พิมพ์ ปริมาณแม่พิมพ์และประสิทธิภาพของเตาอบเผาแม่พิมพ์



รูปที่ 2.12 แสดงอุณหภูมิที่ใช้การทำงานของเครื่องอบ

การอบแม่พิมพ์ปูนหล่อ จากแผนภูมิที่ 2.12 ในการกำหนดอุณหภูมิและระยะเวลาแต่ละช่วงนั้นต้องตระหนักถึงอุณหภูมิหล่อและปฏิกิริยาต่างๆ สรุปได้ดังนี้

1) ทฤษฎีการอบเผาแม่พิมพ์ ในการอบเผาแม่พิมพ์ จะมีปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้น ซึ่งพอสรุปได้ดังต่อไปนี้

- ในการอบเอาแม่พิมพ์ ควรเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอย่างช้าๆ ในระยะแรกจนถึงประมาณ 200 ℃ เนื่องจากในแม่พิมพ์ มีน้ำเป็นส่วนประกอบ เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 100 ℃ น้ำจะกลายสภาพเป็นไอน้ำ และแทรกตัวออกตามช่องว่างของเนื้อปูนหล่อ หากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ไอน้ำจะขยายตัว โดยมีอัตราการขยายตัวเร็วกว่าปูนหล่อ การขยายตัวอย่างรวดเร็วนี้เอง ทำให้เกิดแรงดันภายในปูนหล่อ ลวดลายต่าง ๆ ของแม่พิมพ์จะเกิดความเสียหายและร้ายแรงที่สุดถึงขั้นทำให้แม่พิมพ์แตกร้าวได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากน้ำในแม่พิมพ์ส่วนผสมของสารเคมีจากปูนหล่อ มิใช่อยู่ในรูปของน้ำบริสุทธิ์ ดังนั้นจุดที่น้ำจะกลายเป็นไอ อาจต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 200 ℃ ทีเดียว

- ในกรณีที่ไม่มีการนึ่งเทียน ก่อน แต่นำแม่พิมพ์เข้าอบเผาในเตาอบโดยตรงนั้น ไม่ควรนำแม่พิมพ์เข้าอบในขณะที่เตาอบเย็น แต่ควรนำเข้าในขณะที่ภายในเตามีอุณหภูมิประมาณ 150 ℃ นั่นคือควรทำการอุ่นเตาอบก่อนนำแม่พิมพ์เข้าไปอบเผาเนื่องจากในขณะที่เตาเย็น เมื่อเริ่มต้นให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิประมาณ 80 ℃ เทียนจะเริ่มละลายกลายเป็นของเหลว ส่วนหนึ่งจะเริ่มไหลออกมาทางปากทางเข้า แต่ยังมีอีกส่วนหนึ่งที่ยังคงอยู่ภายในโพรงแบบ ขณะเดียวกันปูนจะเริ่มขยายตัวทำให้รูพรุนหรือช่องว่างของเนื้อปูนหล่อโตขึ้น ปูนหล่อจะทำตัวเป็นฟองน้ำดูดซับเทียน ที่มีลักษณะเป็นของเหลวเข้าไปในเนื้อปูนหล่อ และกำจัดออกให้หมดได้ยากแต่ถ้านำแม่พิมพ์เข้าเตาอบในขณะที่เตามีอุณหภูมิประมาณ 150 ℃ เทียน จะละลายเป็นของเหลวอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้น้ำจะกลายเป็นไอน้ำ และขยายตัวดันให้เทียน ไหลออกจากแม่พิมพ์ได้เร็วขึ้นอีกด้วย

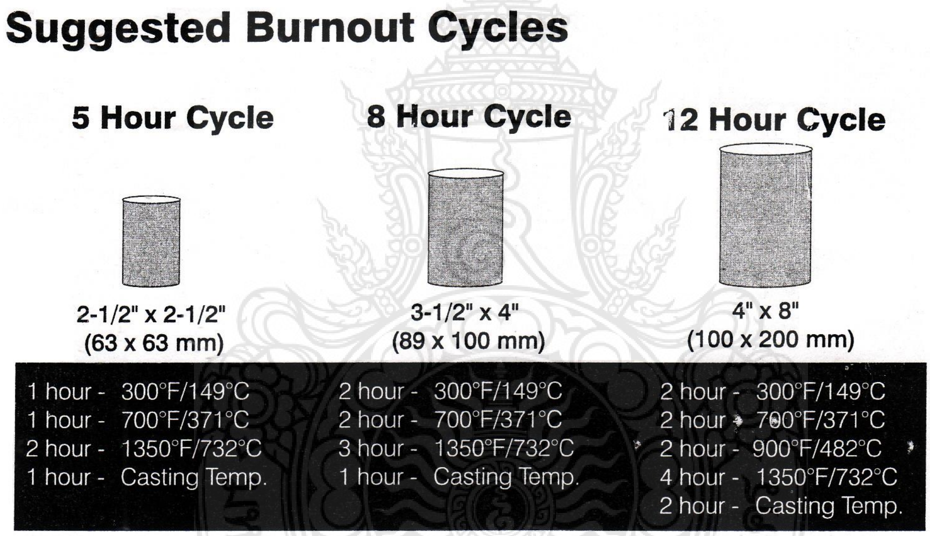
- ในการอบเผาแม่พิมพ์ หลังจากเทียนส่วนใหญ่ไหลออกจากทางเข้าและออกของน้ำโลหะ จะมีเทียนอีกส่วนหนึ่งที่ถูกเผาจนกลายเป็นขี้เถ้า ซึ่งสามารถกำจัดออกจนหมด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มถึงประมาณ 700 ℃ โดยในการเผาไหม้ขี้เถ้า ซึ่งมีสถานะเป็นคาร์บอนจะทำปฏิกิริยาออกซิเจน (0) ในอากาศ ทำให้ได้แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ ซึ่งเป็นแก๊สพิษ

- ในการอบเผา เตาจะมีอุณหภูมิเพิ่มเร็วกว่าอุณหภูมิของกระบอกหล่อ โดยเฉพาะภายในโพรงแบบ ซึ่งยังมีส่วนผสมของน้ำอยู่ในเนื้อปูนหล่อ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกระบอกหล่อกับภายในโพรงแบบ อาจแตกต่างกันถึง 50 ℃ ดังนั้นก่อนการหล่อจึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิไว้ที่อุณหภูมิหล่ออย่างน้อย ½ ชั่วโมง ก่อนหล่อโลหะ

- ถ้าแม่พิมพ์ถูกเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 800 ℃ ยิปซัมซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของปูนหล่อ จะแตกตัวออกเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ซึ่งมีฤทธิ์ในการกัดสีผิวโลหะที่หล่อ

2) วิธีการใช้อุณหภูมิในการอบแม่พิมพ์ขึ้นอยู่กับขนาดและปริมาณของแม่พิมพ์

3) วิธีการคำนวณเชิงวิชาการ แนวทางการคำนวณคำนึงถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการหล่อจะต้องมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ใช้อบเบ้าปูนหล่อ



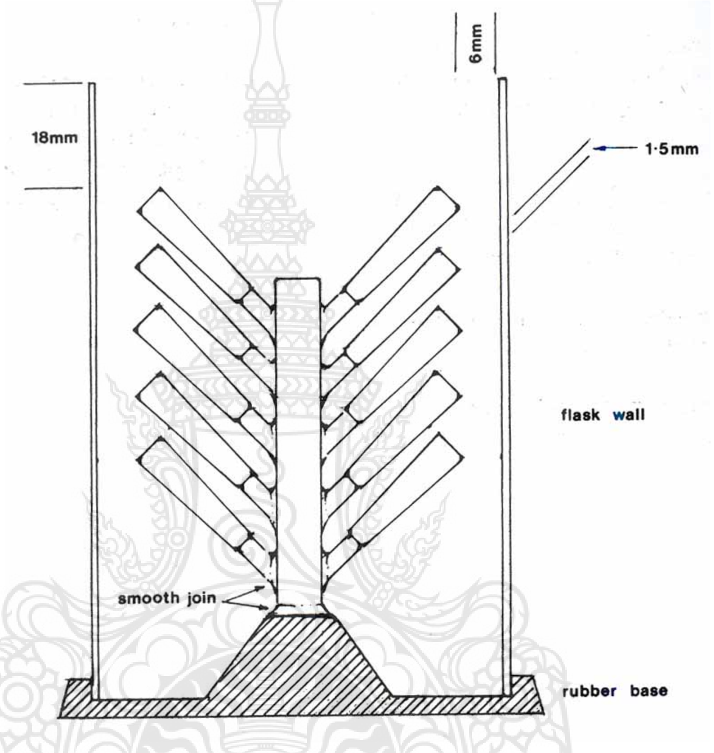
รูปที่ 2.13 แสดงอุณหภูมิมาตรฐานกระบอกหล่อ

ข้อควรระวังในการใช้เตาอบแม่พิมพ์อีกประการหนึ่ง คือ ควรเพิ่มอุณหภูมิของเตาอย่างช้า ๆ เพื่อป้องกันไม่ให้แม่พิมพ์เกิดความเครียดและแตกร้าวได้ง่าย การใช้เครื่องกำจัดเทียน จะเป็นการยืดอายุการใช้งานของเตาอีกวิธีหนึ่ง เพราะจะไม่มีคราบเทียนไปเกาะติดอยู่ตามส่วนต่างๆ ของเตามากเกินไป การใช้เตาอบเผาเบ้าในขณะที่กำลังอบเผาแม่พิมพ์ ไม่ควรเปิดประตูเตาโดยไม่จำเป็น เพราะอาจเกิดอันตรายจากคลื่นความร้อนจำนวนมากจะพุ่งออกมาจากเตา และทำให้เตาต้องใช้พลังงานอีกมากในการปรับอุณหภูมิให้เท่ากับตอนก่อนที่จะเปิดเตา แต่หากมีความจำเป็นที่ต้องเปิดเตา ผู้ปฏิบัติควรหลบอยู่ด้านข้างประตูเตา นอกจากนี้เตาทั่วไปจะมีช่องสำหรับมองเข้าไปภายในเตาอยู่แล้ว โดยไม่ต้องเปิดเตาโดยตรง

2.4 ทางเดินน้ำโลหะ

การจำแนกการติดทางเดินน้ำโลหะ ทางเดินน้ำโลหะในงานเครื่องประดับแบ่งออกเป็น 4 ประเภทหลัก ดังนี้

1) ลักษณะทางเดินน้ำโลหะแบบกลม เหมาะสำหรับใช้เป็นทางเดินน้ำโลหะกับงานที่มีขนาดเล็ก เรียบไม่ซับซ้อน เนื่องจากรูปร่างเป็นทรงกลมทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ช้ากว่า รูปแบบเหลี่ยมแบน ทำให้น้ำโลหะไหลเข้าชิ้นงานก่อนการแข็งตัวของก้านโลหะ ใช้กับชิ้นงานทั่วไป ตัวอย่าง โลหะตระกูล Yellow Gold, White Gold, Nikel, Silver



รูปที่ 2.14 แสดงการติดต้นแว็กซ์

2) ลักษณะทางเดินน้ำโลหะแบบช่วงปลายบานออก เหมาะสำหรับชิ้นงานที่มีรูปแบบใหญ่ และหน้ากว้าง ซึ่งช่วงปลายบานออก จะส่งผลให้น้ำโลหะไหลได้เร็วขึ้น ทำให้ส่วนหน้ากว้างหรือใหญ่แบบสมบูรณ์ ตัวอย่างโลหะตระกูล Platinum, White Nikel, White Gold, Palladium ไม่เป็นผลดีกับโลหะตระกูล Yellow Gold, Silver

3) ลักษณะทางเดินน้ำโลหะแบบ 3 ทาง เหมาะสำหรับงานที่มีสวดวายและลักษณะซับซ้อน และงานที่มีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดอย่างฉับพลัน เนื่องจากบริเวณของชิ้นงานที่มีขนาดไม่เท่ากัน ทำให้การเย็นตัวของน้ำโลหะไม่พร้อมกัน ถ้าน้ำโลหะไหลผ่านบริเวณที่มีขนาดเล็กน้ำโลหะจะเกิดการแข็งตัวได้รวดเร็ว ทำให้น้ำโลหะไม่สามารถไหลไปยังส่วนอื่นๆ ได้ ทำให้งานไม่เต็ม ตัวอย่างโลหะตระกูล Yellow Gold, White Gold ส่วนตระกูลอื่นไม่นิยม

4) ลักษณะก้านทางเดินน้ำโลหะแบบบอล ก้านชนิดนี้ทำขึ้นเพื่อใช้งานในงานโลหะประเภท Silver 95% เท่านั้น ด้วยสาเหตุเปอร์เซ็นต์สูงของเนื้อ Silver ทำให้ช่วยลดการหดตัวได้ดี ทำให้งานที่ใช้โลหะ Silver 95% ไม่พบปัญหาด่างแดง ไม่ด่างหมองคล้ำ ทำหน้าที่สะสมน้ำโลหะเพื่อส่งเข้าชิ้นงานก่อนงานเย็น ลดปัญหาผื่นแดง

2.4.1 การติดต้นเทียน

การติดต้นเทียน คือ การนำตัวแบบเทียน มารวมกันให้เป็นกลุ่มอย่างมีระเบียบโดยนำไปติดกับที่ต้นเทียน เพื่อสามารถหล่อชิ้นงานได้ครั้งละจำนวนมาก เป็นการหล่อระบบอุตสาหกรรมลักษณะการติดต้นเทียนแบ่งออกเป็นหลายลักษณะ ขึ้นอยู่กับรูปแบบของงานที่จะนำมาติด ถ้างานมีชิ้นใหญ่ก็จะติดแบบสลับฟันปลา หรือ เรียงกันเป็นแถวในแนวตั้ง ถ้างานชิ้นเล็กก็จะติดเป็นเกรียว หรือเป็นชั้นๆในแนวนอนทั้งนี้การติดต้นเทียนไม่ว่าจะเป็นแบบไหนทางเดินน้ำโลหะจะต้องทำมุม 30-60 องศาเซลเซียส กับต้นเทียน เพื่อให้น้ำโลหะจากการหล่อสามารถเข้าไปในส่วนที่อยู่ลึกที่สุดของต้นเทียนได้สะดวกเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดต้นเทียนประกอบ ด้วยฐานยางติดต้นเทียน ที่จับฐานยางติดต้นเทียนที่สามารถเอียงและหมุนไปเป็นมุมต่างๆ ได้เพื่อความสะดวกสบายในการติดต้นเทียน

1) ฐานยาง เป็นฐานสำหรับใช้ติดหรือประกอบด้วยตัวแบบเทียน การเลือกใช้ฐานยางควรเลือกให้ฐานยางที่มีขนาดสวมเข้ากับกระบอกหล่อได้อย่างพอดี

2) กระบอกหล่อ จะเป็นกรอบในการกำหนดความกว้างและความสูงของกลุ่มเทียน โดยให้ส่วนสูงที่สุดของกลุ่มเทียนจะต้องมีระยะห่างจากขอบด้านบนของกระบอกหล่อไม่น้อยกว่า 1/2 นิ้ว และตัวแบบเทียนต้องห่างจากผนังกระบอกไม่น้อยกว่า 1/4 นิ้ว เพื่อป้องกันไม่ให้ผนังของแม่พิมพ์ปูนหล่อบางเกินไป

3) หัวแร้งไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับละลายเทียนให้ร้อนและติดตัวแบบเทียน

2.4.2 การคำนวณหาน้ำหนักของโลหะ

1) ความถ่วงจำเพาะของวัตถุ ความถ่วงจำเพาะ คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัตถุต่อน้ำหนักของน้ำในปริมาตรที่เท่ากัน ความถ่วงจำเพาะไม่มีหน่วย แต่เป็นการเปรียบเทียบน้ำหนัก จากกฎของอาร์คิมีดีสที่ว่า “วัตถุใด ๆ เมื่ออยู่ในน้ำ วัตถุนั้นจะสูญเสียน้ำหนักไปเท่ากับน้ำหนักของน้ำในปริมาตรที่วัตถุนั้นเข้าไปแทนที่”

การหาน้ำหนักโลหะ = (น้ำหนักต้นเทียน × ถ.พ)+((น้ำหนักของเทียน×ถ.พ)×20)
$$\overline{\quad 100 \quad}$$

2) การคำนวณหาปริมาณน้ำโลหะ ในทางปฏิบัติสามารถคำนวณน้ำหนักโลหะที่ต้องการใช้ โดยไม่ยุ่งยากมากนัก เนื่องจากได้มีการคำนวณ ค่าความถ่วงจำเพาะของโลหะชนิดต่าง ๆ ไว้แล้วจึงเพียงแต่นำน้ำหนักของต้นเทียนมาคูณและบวกด้วยส่วนเพิ่มเติมปัจจัยอื่นนี้ จะต้องบวกเพิ่มเข้าไปในน้ำหนักของโลหะที่คำนวณได้ส่วนเพิ่มเหล่านี้คือส่วนเพิ่มบริเวณปากทางเข้าของโลหะ ในการหล่อปูนทำแม่พิมพ์ปูนหล่อเมื่อปูนเริ่มจับตัวแข็งดีแล้ว จะนำเอาฐานยางออกจากแม่พิมพ์ปูน ซึ่งจะเห็นปากทางเข้าของน้ำโลหะ ที่มีลักษณะเป็นกลุ่มขนาดใหญ่ มีรูปร่างตามแบบฐานยางที่นำออกไป ส่วนของกลุ่มนี้จะไม่มีสัดส่วนในการคำนวณข้างต้น สำหรับการเพิ่มน้ำหนัก โลหะส่วนนี้จะบวกเพิ่มจำนวน 20 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักที่คำนวณได้

ขั้นตอนการปฏิบัติ

1) ก่อนทำการติดต้นเทียนให้ชั่งน้ำหนักของฐานยาง และเขียนน้ำหนักของฐานยางไว้ให้วชัดเจน

2) ติดต้นเทียนตามหลักการ

3) ชั่งน้ำหนักต้นเทียนที่ติดตั้งบนฐานยาง นำน้ำหนักของฐานยางที่บันทึกไว้มาหักลบออก บันทึกไว้

4) คำนวณค่าความถ่วงจำเพาะของโลหะที่จะใช้หรือ เปิดหาจากตารางสำเร็จ

5) คำนวณโลหะที่ต้องการใช้ = ถ.พ. ของโลหะ X น้ำหนักของต้นเทียน

6) เผื่อน้ำหนักโลหะ 20% = (ถ.พ. ของโลหะ X น้ำหนักของต้นเทียน) X 20/100

7) น้ำหนักโลหะทั้งสิ้น = (ถ.พ. ของโลหะ X น้ำหนักของต้นเทียน)+((ถ.พ. ของโลหะ X น้ำ หนักของต้นเทียน) X 20/100)

ข้อแนะนำในการติดต้นเทียน

- ตัวแบบเทียนจะต้องติดแน่นไม่หลุดง่าย ทั้งการติดต้นเทียนแบบแนวเดียวกัน และการติดต้นเทียนแบบสลับกัน หากติดตัวแบบไม่แน่นเมื่อนำไปเทปูนหล่อแบบและดูดฟองอากาศออกจากเนื้อปูนตัวแบบเทียนอาจหลุดออกจากฐานที่ติดได้

- การติดต้นเทียนที่ถี่เกินไปอาจทำให้ผนังปูนแตกร้าวถ้าผนังบางเกินไปโดยเฉพาะความหนาของปูนที่ยอดต้นเทียนควรให้หนามากกว่า 1/2 นิ้ว เพราะแรงดันของน้ำโลหะที่วิ่งไปตามลำต้นเทียนจะชนผนังส่วนนี้ให้แตกร้าวได้

- ก่อนทำการติดต้นเทียน ให้ตกแต่งตัวแบบเทียนให้เรียบร้อยก่อนโดยยึดหลักว่าการตกแต่งเทียนกระทำได้ง่ายกว่าการตกแต่งชิ้นงานโลหะ

- ตัวแบบแวกซ์ทุกตัวที่ติดต้นเทียนจะต้องไม่สัมผัสกัน แต่ต้องอยู่ใกล้เคียงกันที่สุดเพื่อให้มีจำนวนการติดตัวแบบเทียนได้มากที่สุด

2.5 โลหะที่นำมาทำตัวเรือนเครื่องประดับ

คุณสมบัติของโลหะสำหรับการหล่อเครื่องประดับ ในการหล่อเครื่องประดับมักใช้วัสดุจำพวกโลหะซึ่งมีทั้งโลหะที่ไม่ไม่ค่า เช่น ทองแดง ทองเหลือง และโลหะมีค่า เช่น ทองคำ เงิน การจะเลือกโลหะใดมาทำเครื่องประดับจะต้องพิจารณาจากคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

1) ความวาว โลหะที่นำมาใช้ในการทำตัวเรือนเครื่องประดับจะต้องมีความวาวสูง เมื่อผ่านการขัดแล้วทั้งนี้ความวาวหมายถึง การที่ผิวโลหะสามารถสะท้อนแสงได้มากจนมีลักษณะเหมือนกระจกถือว่าโลหะนั้นวาวมาก โลหะเงินเป็นโลหะที่มีความวาวสูง เมื่อผ่านการขัด โดยต้องขัดอย่างถูกวิธี เนื่องจากโลหะเงินมีความแข็งต่ำและเกิดรอยขีดข่วนได้ง่าย เช่นเดียวกับทองคำ ส่วนแพลทินัมต้องใช้เวลานานในการขัด จึงจะมีความวาวเท่ากับโลหะเงิน เนื่องจากมีเนื้อโลหะที่หนาแน่นและแข็งแรง ทองแดงและทองเหลืองเป็นโลหะที่หมองได้เร็ว เพราะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ ดังนั้น เมื่อทำการขัดจนวาวแล้วต้องเคลือบด้วยแล็คเกอร์ เพื่อปกป้องผิวโลหะ

2) ความสามารดัดโค้งและแผ่ให้เป็นแผ่นบาง ความสามารถดัดโค้งและแผ่ให้เป็นแผ่นบาง คือ การที่โลหะยอมให้มีการดัดโค้งไปมา บีบ รีดจนเป็นแผ่นบาง ๆ บิดเป็นเกลียว ดึงเป็นเส้นลวด ตลอดจนขึ้นรูปได้โดยไม่มีการแตกหักหรือร้าวในเนื้อของโลหะ ทองคำเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติข้อนี้มากที่สุด เพราะทองคำบริสุทธิ์ 1 ออนซ์ สามารถดึงเป็นเส้นลวดได้ยาวถึง 35 ไมล์ โลหะเงินบริสุทธิ์มีคุณสมบัตินี้เช่นเดียวกัน แต่น้อยกว่าทองคำ เพราะมีเนื้ออ่อนไม่สามารถทนต่อการสึกหรอ เงินสเตอร์ริง (Stering Silver) คือเงินผสมโลหะอื่น ๆ ด้วยจะมีคุณสมบัติในการดัดโค้งและแผ่เป็นแผ่นบางได้น้อยกว่าโลหะเงินบริสุทธิ์ แต่แข็งแรงกว่าจึงมีผู้นำไปทำเครื่องประดับและภาชนะเครื่องเงินต่าง ๆ ส่วนทองแดงบริสุทธิ์มีคุณสมบัติในการดัดโค้ง บิดงอ และตีแผ่เป็นแผ่นได้ดีเช่นกัน แต่ทองแดงมีความแข็งมากกว่าโลหะเงิน เพื่อจะป้องกันการแตกร้าวของโลหะในระหว่างการผลิต เช่น ทองเหลือง ก่อนนำมาทำเครื่องประดับควรตรวจสอบว่าต้องการ การ anneal มากน้อยเพียงใดเพราะทองเหลืองเป็นโลหะผสมที่มีโลหะอื่นปนอยู่เป็นจำนวนมาก

3) ปฏิกิริยาทางเคมี โลหะโดยทั่วไปเป็นส่วนประกอบทางเคมีของธาตุต่าง ๆ และเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ จะทำให้หมองหรือเกิดสนิม (Oxides) ซึ่งสามารถทำความสะอาดหรือขจัดสนิมในโลหะนั้น ๆ ได้ โดยการล้างในสารละลายกรดบรรยากาศ โลหะบางชนิดจะไม่ทำปฏิกิริยาเคมีในบรรยากาศปกติ เช่น ทองคำ จะไม่หมองและไม่เป็นสนิมในบรรยากาศปกติไม่ละลายในกรดต่าง ๆ ยกเว้นกรดกัดทอง (aquaregia) ซึ่งประกอบด้วย กรดไนตริก (Nitric Acid) 1 ส่วนผสมกับกรดเมอเรียติก (Muriatic Acid) 3 ส่วน โลหะเงินและทองแดงจะเปลี่ยนเป็นสีดำ เมื่ออยู่ร่วมกับกำมะถันหรือสารประกอบของมัน และจะเกิดสนิม (Oxide)

อย่างรวดเร็วเมื่อได้รับความร้อน แต่สามารถทำความสะอาดได้ โดยใช้กรดกำมะถันเจือจาง แพลทินัมเป็นโลหะที่ไม่มีสนิม ทองคำผสมก็เกิดสนิมยาก แต่เมื่อใช้งานไปเป็นเวลานาน ๆ จะหมองและดำ สามารถทำความสะอาดได้โดยสารละลายของโพแทสเซียมซัลไฟต์ที่ร้อนพอประมาณ

4) การนำไฟฟ้า โลหะเกือบทุกชนิดจะเป็นตัวนำไฟฟ้าหรือสื่อไฟฟ้าได้ เงินเป็นโลหะที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีที่สุด และในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องปรับได้นำหลักการนี้ไปใช้ในการเคลือบผิวเครื่องประดับด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ทำการเคลือบผิวเครื่องประดับที่ทำจากโลหะไม่มีค่าให้มีผิวเป็นโลหะมีค่า เช่น เคลือบทองเหลือง ดีบุก นิกเกิล ด้วยเงินหรือทองคำ

2.5.1 โลหะเงิน

เงิน (Silver)เงินเป็นโลหะสีขาว มีสมบัติการนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดีในธรรมชาติอาจรวมอยู่ในแร่อื่นๆหรืออยู่อิสระ เงินใช้ประโยชน์ในการทำเหรียญ เครื่องประดับ ภาชนะบนโต๊ะอาหาร และอุตสาหกรรมการถ่ายรูป โลหะเงินจัดเป็นโลหะที่มีค่าและมีความขาวมากที่สุด เนื่องจากเนื้อเงินแท้100% จะมีความอ่อนนุ่มมากและง่ายต่อการโดนทำลาย ดังนั้นในการทำเครื่องประดับ จึงจำเป็นต้องมีการผสมด้วยวัสดุอย่างอื่น เพื่อให้สามารถขึ้นรูป และมีความแข็งขึ้น ซึ่งจะทำให้สามารถนำมาทำเป็นเครื่องประดับได้ โดยส่วนใหญ่อีก7.5% ที่เหลือมักจะใช้ทองแดงมาผสม แต่อาจจะมีบางแห่งที่ใช้วัสดุอย่างอื่นมาผสมแทน แต่ที่ใช้กันมานานจะเป็นทองแดง เนื่องจากราคาไม่แพง และหาได้ง่าย มีอยู่มากมาย ดังนั้นนักออกแบบส่วนมากจะเลือกใช้ทองแดงมาผสมกับเงิน 100 % ที่เรียกกันว่า เงินสเตอร์ริง (Sterling Silver)

คุณสมบัติทางกายภาพ_(Physical Property)

ลักษณะโดยทั่วไปของโลหะเงิน เป็น โลหะสีขาวมันวาว อ่อนนิ่ม ก้อนโลหะเงินสามารถตีแผ่หรือรีดเป็นแผ่นบางๆ ได้บางถึง 0.00025 มม

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะเงิน, ทองแดง,อินเดียม,ฟอสฟอรัส คุณสมบัติต่าง ๆ

	เงิน(Ag)	ทองแดง(Cu)	อินเดียม(In)	ฟอสฟอรัส(P)
เลขอะตอม	47	29	49	15
การจัดเรียง อิเล็กตรอน	2,8,18,18,1	2,8,18,1	2,8,18,18,3	2,8,5
น้ำหนักอะตอม	107.868	63.54	114.82	30.974
จุดหลอมเหลว (°C)	960.8	1083	156.81	44.3
จุดเดือด (°C)	2210	2593	2080	280.7
ความหนาแน่น (g/cm3)	10.5	8.92	7.31	1.82
รัศมีอะตอม (nm)	0.144	0.128	0.167	0.110
โครงสร้างผลึก	fcc	fcc	tetragonal	triclinic
ความจุความร้อนจำเพาะ (cal/g.°C)	0.0559	0.092	0.0548	0.1833
ความร้อนในการหลอมละลาย (cal/g)	25	50.6	-	-
การนำความร้อน (cal/cm2/cm/s/°C)	1	0.941	-	-
ความแข็ง (HB)	30	37	-	-

คุณสมบัติของโลหะสำหรับการหล่อเครื่องประดับ ในการหล่อเครื่องประดับมักใช้วัสดุจำพวกโลหะซึ่งมีทั้งโลหะที่ไม่ไม่ค่า เช่น ทองแดง ทองเหลือง และโลหะมีค่า เช่น ทองคำ เงิน การจะเลือกโลหะใดมาทำเครื่องประดับจะต้องพิจารณาจากคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

1) ความวาว โลหะที่นำมาใช้ในการทำตัวเรือนเครื่องประดับจะต้องมีความวาวสูง เมื่อผ่านการขัดแล้วทั้งนี้ความวาวหมายถึง การที่ผิวโลหะสามารถสะท้อนแสงได้มากจนมีลักษณะเหมือนกระจกถือว่าโลหะนั้นวาวมาก โลหะเงินเป็นโลหะที่มีความวาวสูง เมื่อผ่านการขัด โดยต้องขัดอย่างถูกวิธี เนื่องจากโลหะเงินมีความแข็งต่ำและเกิดรอยขีด

ข่วนได้ง่าย เช่นเดียวกับทองคำ ส่วนแพลทินัมต้องใช้เวลานานในการขัด จึงจะมีความวาวเท่ากับโลหะเงิน เนื่องจากมีเนื้อโลหะที่หนาแน่นและแข็งแรง ทองแดงและทองเหลืองเป็นโลหะที่หมองได้เร็ว เพราะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ ดังนั้น เมื่อทำการขัดจนวาวแล้วต้องเคลือบด้วยแล็คเกอร์ เพื่อปกป้องผิวโลหะ

2) ความสามารดัดโค้งและแผ่ให้เป็นแผ่นบาง ความสามารถดัดโค้งและแผ่ให้เป็นแผ่นบาง คือ การที่โลหะยอมให้มีการดัดโค้งไปมา บีบ รีดจนเป็นแผ่นบาง ๆ บิดเป็นเกลียว ดึงเป็นเส้นลวด ตลอดจนขึ้นรูปได้โดยไม่มีการแตกหักหรือร้าวในเนื้อของโลหะ ทองคำเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติข้อนี้มากที่สุด เพราะทองคำบริสุทธิ์ 1 ออนซ์ สามารถดึงเป็นเส้นลวดได้ยาวถึง 35 ไมล์ โลหะเงินบริสุทธิ์มีคุณสมบัตินี้เช่นเดียวกัน แต่น้อยกว่าทองคำ เพราะมีเนื้ออ่อนไม่สามารถทนต่อการสึกหรอ เงินสเตอร์ริง (Stering Silver) คือเงินผสมโลหะอื่น ๆ ด้วยจะมีคุณสมบัติในการดัดโค้งและแผ่เป็นแผ่นบางได้น้อยกว่าโลหะเงินบริสุทธิ์ แต่แข็งแรงกว่าจึงมีผู้นำไปทำเครื่องประดับและภาชนะเครื่องเงินต่าง ๆ ส่วนทองแดงบริสุทธิ์มีคุณสมบัติในการดัดโค้ง บิดงอ และตีแผ่เป็นแผ่นได้ดีเช่นกัน แต่ทองแดงมีความแข็งมากกว่าโลหะเงิน เพื่อจะป้องกันการแตกร้าวของโลหะในระหว่างการผลิต เช่น ทองเหลือง ก่อนนำมาทำเครื่องประดับควรตรวจสอบว่าต้องการ การ anneal มากน้อยเพียงใด เพราะทองเหลืองเป็นโลหะผสมที่มีโลหะอื่นปนอยู่เป็นจำนวนมาก

3) ปฏิกิริยาทางเคมี โลหะโดยทั่วไปเป็นส่วนประกอบทางเคมีของธาตุต่าง ๆ และเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ จะทำให้หมองหรือเกิดสนิม (Oxides) ซึ่งสามารถทำความสะอาดหรือขจัดสนิมในโลหะนั้น ๆ ได้โดยการล้างในสารละลายกรดบรรยากาศ โลหะบางชนิดจะไม่ทำปฏิกิริยาเคมีในบรรยากาศปกติ เช่น ทองคำ จะไม่หมองและไม่เป็นสนิมในบรรยากาศปกติไม่ละลายในกรดต่าง ๆ ยกเว้นกรดกัดทอง (aquaregia) ซึ่งประกอบด้วย กรดไนตริก (Nitric Acid) 1 ส่วนผสมกับกรดเมอเรียติก (Muriatic Acid) 3 ส่วน โลหะเงินและทองแดงจะเปลี่ยนเป็นสีดำเมื่ออยู่ร่วมกับกำมะถันหรือสารประกอบของมัน และจะเกิดสนิม (Oxide) อย่างรวดเร็วเมื่อได้รับความร้อน แต่สามารถทำความสะอาดได้ โดยใช้กรดกำมะถันเจือจาง แพลทินัมเป็นโลหะที่ไม่มีสนิม ทองคำผสมก็เกิดสนิมยาก แต่เมื่อใช้งานไปเป็นเวลานาน ๆ จะหมองและดำ สามารถทำความสะอาดได้โดยสารละลายของโพแทสเซียมซัลไฟต์ที่ร้อนพอประมาณ

4) การนำไฟฟ้า โลหะเกือบทุกชนิดจะเป็นตัวนำไฟฟ้าหรือสื่อไฟฟ้าได้ เงินเป็นโลหะที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีที่สุด และในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องปรับได้นำหลักการนี้ไปใช้ในการเคลือบผิวเครื่องประดับด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ทำการเคลือบผิวเครื่องประดับที่ทำจากโลหะไม่มีค่าให้มีผิวเป็นโลหะมีค่า เช่น เคลือบทองเหลือง ดีบุก นิกเกิลด้วยเงินหรือทองคำ

ความหนาแน่น (Density)

โลหะเงินบริสุทธิ์มีความหนาแน่นเท่ากับ 10.49 g/cc ที่ อุณหภูมิ 20°C ค่าความหนาแน่นของโลหะเงินยังขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต การขึ้นรูปและการขึ้น รูปในลักษณะต่างๆ อาทิเช่น การหล่อขึ้นรูป การรีด การดัดและการกดลากขึ้นรูป นอกจากนี้ค่าความ หนาแน่นยังขึ้นอยู่กับกรรมวิธีทางความร้อนต่างๆ ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติ เช่น การอบเป็น เนื้อเดียว การอบอ่อน และการอบเพิ่มความแข็ง ค่าความหนาแน่นของโลหะเงินที่เปลี่ยนแปลงตาม อุณหภูมิสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความหนาแน่นของโลหะเงินหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความหนาแน่น (g/cm_3)
960	9.30
976	9.285
1000	9.259
1043	9.210
1070	9.188
1092	9.200
1094	9.170
1145	9.150
1195	9.100
1250	9.050
1302	9.000

2.6 การหลอมโลหะ

คือการทำให้โลหะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวแล้วเทลงในแม่พิมพ์ ปล่อยให้โลหะเย็นตัวและคืนสภาพเป็นของแข็งอีกครั้ง สำหรับการหลอมโลหะให้กลายเป็นของเหลวนั้นจะใช้ความร้อนจากแหล่งพลังงานต่าง ๆ พอสรุปได้ดังนี้

1) การหลอมโลหะโดยใช้เปลวเพลิงโดยตรง เป็นวิธีดั้งเดิมที่ยังใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เพราะมีค่าใช้จ่ายน้อย เป็นการใช้เปลวไฟที่ได้จากแก๊สเชื้อเพลิงหลอมโลหะให้ละลายโดยตรง แก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้ได้แก่แก๊สอะเซทิลิน แก๊สโพรเพน เป็นต้น โดยใช้ร่วมกับแก๊สออกซิเจน เพื่อช่วยให้เกิดการเผาไหม้ โดยมีหัวผ่านแก๊สเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการปรับหรือบังคับเปลวไฟให้มีปริมาณความร้อนตามต้องการ การหลอมด้วยวิธีนี้ผู้หลอมจะต้องมีความชำนาญในการดูผิวหน้าของโลหะว่าใช้ได้หรือไม่ เพราะไม่มีเครื่องมือวัดหรือควบคุมอุณหภูมิในการหลอม ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิในการหลอมละลายของโลหะจะมีหลายระดับ คือ อุณหภูมิหลอมละลาย (Melting Point) เป็นอุณหภูมิที่น้ำโลหะจะไหลได้ดี อุณหภูมิเดือด (Boiling Poing) เป็นอุณหภูมิที่น้ำโลหะเริ่มดึงอากาศรอบ ๆ เข้ามารวมตัวทำให้เกิดปฏิกิริยา Oxidation น้ำโลหะจะเดือด ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดรูพรุนในชิ้นงานหล่อดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้หลอมโลหะต้องหลอมให้ถึงจุดไหลของโลหะ แล้วจึงเริ่มเทลงบนแบบพิมพ์ตามกรรมวิธีการหล่อ ในทางปฏิบัติจะดูผิวหน้าของโลหะที่หลอมละลายให้ในเหมือนผิวหน้าของกระจกเงา จึงจะถือว่าเป็นอุณหภูมิที่ใช้ได้

ข้อควรจำแนกประการหนึ่งในการหลอมโลหะต้องเผาหรือให้ความร้อนแก่เบ้าหลอมให้เพียงพอก่อนที่จะทำการหลอมโลหะเพื่อให้เบ้าหลอมมีการขยายตัวให้เพียงพอเพราะ อุณหภูมิในการหลอมโลหะจะสูงมาก ตัวเบ้าหลอมขยายตัวไม่ทันจะเกิดการแตกร้าวจะทำให้สูญเสียเบ้าหลอมและโลหะมีค่าที่หลอมด้วย

การหลอมโลหะจากเปลวไฟโดยตรงในเครื่องหล่อตัวเรือนด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และชุดเชื้อเพลิงสำหรับหลอมโลหะ การหลอมโลหะโดยใช้เตาหลอมเป็นกรรมวิธีการหลอมโลหะ โดยใช้เตาหลอมใช้

เตาหลอมโลหะที่อาจใช้พลังงานจากไฟฟ้า หรือแก๊ส เป็นการให้ความร้อนหรือเพิ่มอุณหภูมิภายในเตาหลอม ความร้อนจะค่อย ๆ แพร่เข้าไปถึงโลหะที่อยู่ในเบ้าหลอมหรือ Crucible จนโลหะนั้นละลายเนื่องจากการหลอมลักษณะนี้ไม่ใช่เป็นการให้ความร้อนกับโลหะโดยตรง จึงต้องใช้เวลาหลอมโลหะมากกว่าวิธีอื่น ๆ วิธีนี้จึงไม่เป็นที่นิยมใช้

2) การหลอมโลหะโดยใช้การเหนี่ยวนำ เป็นการหลอมโลหะโดยใช้การเหนี่ยวนำจากแม่เหล็กไฟฟ้า วิธีนี้โลหะจะถูกให้อยู่ในเบ้าหลอมซึ่งถูกล้อมไว้ด้วยขดลวดตัวนำไฟฟ้าเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดตัวนำ จะทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนสูงมาก สามารละลายหรือหลอมโลหะได้ภายในระยะเวลาสั้น ๆ นอกจากนี้ยังมีการนำระบบแก๊สเฉื่อยมาใช้ในการหลอมโลหะลักษณะนี้ เพื่อใช้คลุมผิวหน้าของโลหะขณะหลอมละลายเพื่อป้องกันการเกิด Oxidation ของน้ำโลหะอีกด้วยการหลอมโลหะแบบนี้ได้รับความนิยมจากผู้ผลิตเครื่องประดับที่มีคุณภาพสูงอย่างมากในปัจจุบัน

3) จุดหลอมละลายของโลหะ หมายถึง ระดับอุณหภูมิที่ทำให้โลหะเปลี่ยนสถานะจากของ แข็งเป็นของเหลว โดยทั่วไปที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มักอยู่ในรูปของโลหะผสม คือ มีโลหะอื่นปะปนอยู่ในส่วนสัดที่แตกต่างกัน เพื่อให้มีคุณสมบัติตามความต้องการใช้งาน ในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับก็เช่นเดียวกัน โลหะที่นำมาใช้มักมีการผสมโลหะอื่น ๆ ลงไปด้วย เพื่อให้มีคุณสมบัติตามต้องการ เช่น ทองคำและเงิน โดยโลหะที่นำไปผสมมักมีอุณหภูมิหลอมละลายต่ำกว่าโลหะตั้งต้น โลหะผสมที่ได้จึงนำวิธีการบัดกรีมาใช้ เพื่อให้มีการหลอมละลายเฉพาะบางจุดเท่านั้น (ไม่หลอมละลายทั้งชิ้นงาน)

4) การนำความร้อน คือความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุ จากจุดใดจุดหนึ่งไปสู่อีกจุดหนึ่งได้รวดเร็วเพียงใด เช่น โลหะเงินมีการนำความร้อนได้ดี นั่นคือเมื่อให้ความร้อนแก่โลหะเงินที่จุดหนึ่ง โลหะเงินสามารถนำความร้อนนั้นไปถึงอีกจุดหนึ่งบนชิ้นงานเดียวกันได้อย่างรวดเร็ว ในขณะเดียวกันไม้จะนำความร้อนได้ช้ามาก เมื่อเทียบกับโลหะเงิน ทองแดง ซึ่งเป็นโลหะที่มีการนำความร้อนที่ดี ในการบัดกรีและอบอ่อนจะต้องให้ความร้อนที่เพียงพอและสม่ำเสมอ ทั้งชิ้นงานจึงจะได้ผลที่ดีในชิ้นงานขนาดใหญ่ การบัดกรีเป็นจุดมักทำได้ไม่ดีนักเพราะความร้อนจะถูกกระจายไปในส่วนอื่น ๆ ของชิ้นงานอย่างรวดเร็ว แต่สำหรับแพลทินัม เป็นโลหะที่มีคุณสมบัติในการนำความร้อนไม่ดีนัก จึงบัดกรีเป็นจุดได้ดี โดยไม่ต้องแกะพลอยออกจากตัวเรือน ในกรณีที่เป็นตัวเรือนที่สำเร็จแล้ว เพราะเพชรพลอยเหล่านั้นจะไม่ได้รับความร้อนจากการบัดกรี การศึกษาคุณสมบัติในการหลอมละลายของโลหะจึงมีประโยชน์อย่างมากในงานหล่อโลหะทองคำ เงิน และแพลทินัม เป็นโลหะซึ่งใช้ในการหล่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ทองแดงไม่สามาถนำมาหล่อได้ เนื่องจากมีผิวหน้าที่แข็งเกินไป

2.7 การหล่อระบบสุญญากาศ

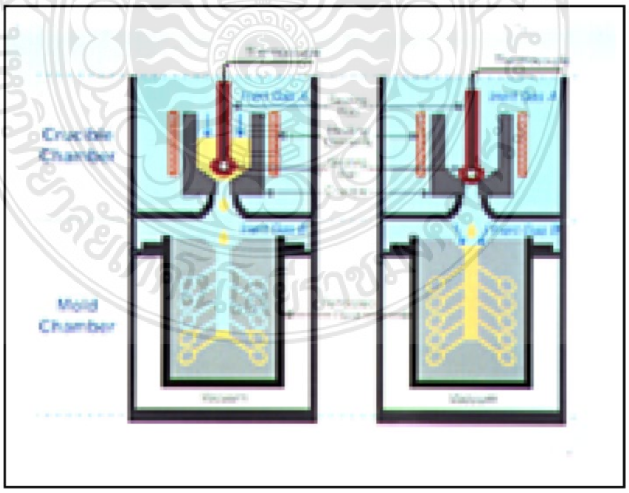
1) ความสำคัญของระบบสุญญากาศ การหล่อเครื่องประดับโดยใช้ระบบสุญญากาศ การนำระบบสุญญากาศมาใช้ในการหล่อโลหะนี้ เป็นวิธีที่พัฒนามาจากการใช้แรงโน้มถ่วงของโลหะช่วยในการหล่อโลหะซึ่งเป็นกรรมวิธีเก่าแก่ โดยการเทน้ำโลหะลงในโพรงแบบโดยตรง แรงดึงดูดของโลกจะดึงให้น้ำโลหะไหลลงไปในโพรงแบบ ซึ่งเหมาะกับชิ้นงานขนาดใหญ่ไม่มีลวดลายซับซ้อนมากนัก แต่ไม่เหมาะกับชิ้นงานเครื่องประดับที่มีขนาดเล็ก และมีลวดลายละเอียดซับซ้อนเพราะน้ำโลหะที่ไหลลงสู่โพรงแบบด้วยแรงดึงดูดของโลกจะไม่สามารถไหลแทรกไปตามลวดลายที่ละเอียดเล็ก ๆ ได้ดี การหล่อโลหะลักษณะนี้จึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่ดีมากวิธีหนึ่ง

2) การเกิดความร้อน การเกิดความร้อนโดยใช้การเหนี่ยวนำ เป็นการหลอมโลหะโดยใช้การเหนี่ยวนำจากแม่เหล็กไฟฟ้า วิธีนี้โลหะจะถูกใส่อยู่ในเบ้าหลอมซึ่งถูกล้อมไว้ด้วยขดลวดตัวนำไฟฟ้าเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดตัวนำ จะทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นสูงมาก สามารถละลายหรือหลอมโลหะได้ภายในระยะเวลาสั้น ๆ นอกจากนี้ยังมีการนำระบบแก๊สเฉื่อยมาใช้ในการหลอมโลหะลักษณะนี้ เพื่อใช้

คลุมผิวหน้าของโลหะขณะหลอมละลายเพื่อป้องกันการเกิด Oxidation ของน้ำโลหะอีกด้วยการหลอมโลหะแบบนี้ได้รับความนิยมจากผู้ผลิตเครื่องประดับที่มีคุณภาพสูงอย่างมากในปัจจุบัน

3) อิทธิพลของสุญญากาศ ระบบสุญญากาศเป็นการประยุกต์นำระบบสุญญากาศเข้ามาช่วยในการหล่อลักษณะนี้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นโดยการดูดอากาศที่อยู่ภายในโพรงแบบออกจนภายในมีสภาพเกือบเป็นสุญญากาศ หรือมีแรงดันอากาศโพรงแบบเกือบเป็นศูนย์ ในขณะที่บรรยากาศภายนอกโพรงแบบยังมีแรงดันเป็นปกติคือ 14.7 ปอนด์/ตารางนิ้ว ดังนั้นเมื่อเทน้ำโลหะเข้าไปในโพรงแบบ น้ำโลหะจะไหลไปตามรายละเอียดเล็ก ๆ ได้ดี เนื่องจากภายในโพรงแบบไม่มีแรงดันอากาศต้านการไหลของน้ำโลหะ ทำให้น้ำโลหะไหลลงไปในโพรงแบบด้วยแรงดึงดูดของโลกและแรงดันจากบรรยากาศภายนอก ที่มีมากกว่าภายในโพรงแบบอิทธิพลจากสิ่งเหมาะนี้มีผลต่อขั้นตอนการหล่อเช่นเดียวกัน

4) ลักษณะการทำงานของเครื่องหล่อระบบสุญญากาศ ส่วนประกอบที่สำคัญเครื่องหล่อโลหะชนิดนี้มี 2 ลักษณะ คือเครื่องหล่อโลหะด้วยสุญญากาศแบบง่าย ๆ กับเครื่องที่มีการประยุกต์ นำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการหล่อมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น สำหรับเครื่องที่ผลิตขึ้นแบบง่าย ๆ จะประกอบด้วยถังสุญญากาศที่มีช่องสำหรับวางแม่พิมพ์และมีช่องดูดอากาศซึ่งจะต่อกับเครื่องปั๊มอากาศออกจากเครื่อง อุปกรณ์พิเศษอีกชนิดหนึ่งของการหล่อแบบนี้คือกระบอกหล่อ มีลักษณะเป็นกระบอกกลมตรง มีปีกที่บริเวณปากกระบอก ตัวกระบอกจะถูกเจาะให้เป็นรูไว้ตลอดลำตัวของกระบอก การทำงานของเครื่องจะเริ่มด้วยการนำแม่พิมพ์วางลงช่องว่างแม่พิมพ์จากนั้นจะทำการดูดอากาศออกจากห้องจนเป็นสุญญากาศ อากาศภายในห้องรวมทั้งอากาศภายในโพรงแบบจะถูกดูดออกเกือบหมด อากาศภายในโพรงแบบจะถูกดูดออกผ่านผนังของมีพิมพ์ซึ่งเป็นปูนหล่อ ขณะเดียวกันจะทำการหลอมโลหะให้ละลายเป็นของเหลว แล้วนำมาเทลงในแม่พิมพ์น้ำโลหะจะไหลลงในแม่พิมพ์ด้วยแรงดึงดูดของโลหะน้ำหนักของโลหะ และแรงดันบรรยากาศจากภายนอกทำให้น้ำโลหะเข้าสู่โพรงแบบโดยสมบูรณ์ การหล่อวิธีนี้ค่อนข้างสะอาดไม่มีเศษวัสดุตกค้างมากนัก แต่มีปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องคือ ทางเดินน้ำโลหะต้องมีขนาดโตกว่าการหล่อแบบใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และเครื่องดูดหรือปั๊มอากาศต้องมีกำลังแรงมาก จึงจะสามารถดูดอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังเหมาะกับชิ้นงานที่ไม่บางมาก เช่น ชิ้นงานที่มีหนามเตยมาก ๆ หรือที่มีชิ้นส่วนความบางน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร เนื่องจากแรงผลักน้ำโลหะเข้าสู่โพรงแบบด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจะทำได้ดีกว่า



รูปที่ 2.15 แสดงหลักการทำงานของเครื่องหล่อระบบสุญญากาศ

ปัญหาที่เกิดจากกระบวนการหล่อแบบเปิด

การเกิดรูพรุนในงานหล่อ เกิดจากการที่แก็สหรือเศษวัสดุขนาดเล็กเข้าไปรวมตัวกับโลหะ ทำให้เกิดรูพรุนหรือเศษวัสดุปรากฏที่ผิวของชิ้นงาน ซึ่งมีทั้งผิวด้านบนที่สามารถมองเห็นได้โดยตรง และส่วนที่ลึกลงไปจากผิวหน้าของชิ้นงาน ซึ่งจะมองเห็นได้ เมื่อทำการขัดชิ้นงานแล้ว สาเหตุการเกิดรูพรุนนี้ พอสรุปได้ดังนี้

1) ความสมบูรณ์ของทางเดินน้ำโลหะ เช่น การไม่มีขอบเหลี่ยม มุมที่จะถูกกระแทกจากน้ำโลหะแล้วทำให้แตกเป็นเศษวัสดุเล็ก ๆ หรือเกิดการหมุนวน จนเกิดแก๊สพุ่งเข้าไปในโพรงแบบซึ่งจะไปรวมตัวกับน้ำโลหะได้

2) การอบเผาแบบแม่พิมพ์ไม่สมบูรณ์ ซึ่งอาจเกิดจากอุณหภูมิไม่สูงพอที่จะกำจัดเทียนได้ทั้งหมด อันเนื่องมาจากประสิทธิภาพของเตาอบเผาแบบแม่พิมพ์ไม่ดีพอ หรือการกำหนดเวลาในการเผาไม่ถูกต้อง

3) การให้ความร้อนแม่พิมพ์เร็วเกินไป อาจทำให้ไอน้ำที่เกิดขึ้นในโพรงแบบขยายตัวไปทำลายลวด ลายที่ละเอียดในโพรงแบบจนแตกออกเป็นเศษวัสดุเล็กๆ และถูกหล่อรวมเข้ากับเนื้อโลหะ

4) การใช้กรดบอริกมากเกินไปในการหลอมโลหะก่อนที่จะทำการหล่อ ซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับโลหะ ทำให้เกิดจุดสีน้ำตาลขึ้นที่ผิวงานหล่อ แต่สามารถทำความสะอาดได้ด้วยแรงดันไอน้ำ

5) การหลอมโลหะจนมีอุณหภูมิสูงเกินไป จะทำให้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศที่เรียกว่า เกิด Oxidation และโลหะน้ำ จะทำการปฏิกิริยากับอากาศจนเกิดฟอง เมื่อฉีดเข้าไปในโพรงแบบแก๊สต่าง ๆ ที่เข้าไปค้างจะทำให้ผิวของงานเป็นรูพรุน

6) การไม่ใช้กรดบอริกเลย จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Oxidation ได้เร็วและง่ายขึ้น เพราะกรดบอริก จะช่วยป้องกันการเกิด Oxidation ได้ดี ขณะที่อุณหภูมิของน้ำโลหะไม่สูงเกินไป

7) ถ้าส่วนผสมของโลหะที่ใช้หล่อไม่ถูกต้อง หรือนำโลหะที่ไม่รู้ส่วนผสมที่แท้จริงมาใช้ จะทำให้การกำหนดอุณหภูมิหล่อหรือปัจจัยต่าง ๆ ในการหล่อไม่ถูกต้อง นอกจากนี้การใช้โลหะเก่ามาผสมไม่ควรใช้มากกว่า 50% โลหะเก่า หมายถึง โลหะที่เคยทำการหล่อหรือเคยหลอมมาแล้ว โลหะเหล่านั้นจะมีส่วนผสมไม่แน่นอน เนื่องจากการหล่อหรือหลอมแต่ละครั้งจะมีโลหะบางส่วนสูญเสียไปในกระบวนการ นอกจากนี้ในขณะที่หลอมโลหะ การใช้วัสดุต่าง ๆ เป็นตัวกวนน้ำโลหะจะทำให้เศษวัสดุเหล่านั้นปะปนลงไปในเนื้อโลหะที่หลอมควรใช้แท่งคาร์บอนเป็นตัวกวนน้ำโลหะ เพราะจะไม่มีผลกับน้ำโลหะ

แนวทางสำหรับป้องกันและแก้ไขการเกิดพรุน

1) เลือกใช้อุณหภูมิในการหล่อที่ต่ำที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาที่เกิดจากการ Oxidation

2) ในกรณีที่หล่อแล้ว น้ำโลหะที่เข้าไปไม่เต็มโพรงแบบ เนื่องจากอุณหภูมิไม่เพียงพอ ให้เพิ่มอุณหภูมิของแม่พิมพ์ก่อน การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำโลหะเป็นสิ่งที่ไม่ควรกระทำ เพราะจะมีผลกระทบอื่น ๆ ตามมาอีกมาก

3) การเพิ่มความเร็วของเครื่องหล่อโลหะ โดยอาศัยแรงเหวี่ยงจะช่วยให้การเข้าสู่โพรงแบบของโลหะน้ำเป็นไปได้ดีขึ้น

4) อย่าหล่อด้วยความรีบร้อน หรือลัดขั้นตอน

5) ตรวจตรามิให้เกิดฟองอากาศ ในตัวแบบเทียน ซึ่งจะก่อให้เกิดความเสียหายแก่งานหล่อได้

2.8 ทฤษฎีการทำความสะอาดหลังการหล่อ

การทำความสะอาดชิ้นงานหล่อ หลังจากทำการหล่อชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว ผู้ปฏิบัติจะนำแม่พิมพ์ออกจากเครื่องหล่อและตั้งรอให้โลหะแข็งตัวและเย็นตัวลง โดยมีข้อแนะนำว่าถ้าเป็นการหล่อทองคำสีขาวหรือทองคำขาว ควรตั้งแม่พิมพ์ทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที และถ้าเป็นทองคำสีเหลือง หรือโลหะเงินควรตั้งทิ้งไว้จนโลหะที่มีสีแดงจากการหลอมกลายเป็นสีดำ จากนั้นจึงนำแม่พิมพ์ไปฉีดด้วยน้ำเพื่อทำลายปูนหล่อแบบออกจาก

กระบอกหล่อ ปูนหล่อแบบจะแตกออกในทันทีที่ฉีดน้ำ เนื่องจากความร้อนและคุณสมบัติของปูนหล่อแบบ ในปัจจุบันผู้ผลิตมักใช้น้ำที่มีความดันสูงในการฉีดทำลายปูนหล่อ ซึ่งสามารถกำจัดปูนหล่อที่ติดอยู่ในชิ้นงานได้ไม่ยากนัก ข้อควรระวังประการหนึ่งคือ ควรมีสถานที่สำหรับฉีดน้ำยาทำลายปูนหล่อโดยเฉพาะ โดยมีตะแกรงสำหรับเก็บกักเศษปูนไว้มิให้ไหลไปอุดทางเดินของการระบายน้ำหลังจากการฉีดน้ำทำลายปูนหล่อแล้วจะได้ชิ้นงานที่มีลักษณะเหมือนต้นเทียน แต่เป็นต้นขี้ผึ้งที่ทำลายโลหะที่หล่อเข้าไปในแม่พิมพ์ชิ้นงานที่ได้จะมีสีน้ำตาลดำเนื่องจากความร้อนในการหล่อโลหะ ผู้ผลิตจะนำชิ้นงานนี้ไปแช่ในสารละลายจำพวกกรด เพื่อทำความสะอาดผิวของชิ้นงาน กรดและเครื่องมือที่ใช้ในการทำความสะอาดชิ้นงานมีดังนี้

1) การใช้กรดกัดแก้ว (ไฮโรฟูออริคแอซิค) การใช้กรดชนิดนี้มีอันตรายอย่างยิ่ง ผู้ใช้ต้องระมัดระวังอย่างมากในการใช้ เนื่องจากเป็นกรดที่มีปฏิกิริยารุนแรงในการกัดผิวโลหะ ส่วนมากมักใช้กับงานทองคำและทองคำขาว ในการใช้งานงานกรดกัดแก้วทั่วไปแล้วช่างที่ชำนาญงานหล่อจะนิยมใช้ในการกัดล้างเนื้อของปูนที่ติดกับต้นชิ้นงานที่ฉีดล้างออกไหม้หมด เนื้อปูนที่ค้างอยู่จะถูกกัดกร่อนหลุดล่วงมาเอง สำหรับเวลาที่ใช้ในการจุ่มล้างปูนจะใช้อยู่ในช่วงตั้งแต่ 20 – 30 นาที เท่านั้นถ้ามากกว่านี้ชิ้นงานอาจเกิดรอยดำได้อุณหภูมิของน้ำจนร้อนอยู่ตลอดเวลาเนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการหล่อและฉีดล้างปูนยังคงมีความร้อนแฝงอยู่การควบคุมอุณหภูมิควรไม่ให้เกิน 50 องศาเซลเซียส พื้นที่ของภาชนะที่จะนำมาใช้กับกรดกัดแก้วต้องเป็นภาชนะที่ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีและไม่ควรใช้ภาชนะที่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับกรดเป็นอันขาดในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนมากจะใช้พลาสติกขนาดใหญ่ที่มีฝาปิดมิดชิดทั้งนี้เพื่อป้องกันการระเหยและกลิ่นของกรดกัดแก้ว

2) การใช้กรดกำมะถันเจือจาง คือใช้กรดกรดกำมะถัน 2 ส่วน ผสมกับน้ำ 10 ส่วน โดยอาจผสมโซเดียมไดโครเมตลงไปเล็กน้อย การจุ่มชิ้นงานในกรดที่ร้อนจะให้ผลดีกว่าจุ่มล้างในอุณหภูมิปกติ และเมื่อชิ้นงานผ่านกระบวนการล้างด้วยกรดแล้วจะต้องจุ่มล้างในน้ำสะอาดทันที ในการใช้งานกรดกำมะถัน ทั่วไปแล้วช่างที่ชำนาญงานหล่อจะนิยมใช้ในการกัดล้างผิวเนื้อที่ติดอยู่กับต้นชิ้นงานที่ สำหรับเวลาที่ใช้ในการจุ่มล้างปูนจะใช้อยู่ในช่วง 2 นาที เท่านั้นถ้ามากกว่านี้ชิ้นงานอาจเกิดรอยดำได้อุณหภูมิของน้ำจนร้อนอยู่ตลอดเวลาเนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการหล่อและฉีดล้างปูนยังคงมีความร้อนแฝงอยู่การควบคุมอุณหภูมิควรไม่ให้เกิน 50 องศาเซลเซียส พื้นที่ของภาชนะที่จะนำมาใช้กับกรดกำมะถัน ต้องเป็นภาชนะที่ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีและไม่ควรใช้ภาชนะที่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับกรดเป็นอันขาด ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนมากจะใช้พลาสติกขนาดใหญ่ที่มีฝาปิดมิดชิดทั้งนี้เพื่อป้องกันการะเหยและกลิ่นของกรดกำมะถัน

การผสมกรดกำมะถัน โดยทั่วไปต้องระมัดระวังเป็นอย่างมากในการผสมต้องตวงอัตราส่วนให้ถูกต้องการเทผสมจะต้องใส่น้ำลงภาชนะเป็นอันดับแรกแล้วตามด้วยกรดกำมะถัน ใช้ไม้หรือพลาสติกคนให้เข้ากัน การใช้งานจนน้ำยาหมดอายุให้ดูที่สีของกรดกำมะถัน สังเกตว่าสีดำข้นแล้วจึงเปลี่ยนน้ำยาใหม่ได้

นอกจากนี้การกัดผิวชิ้นงานยังสามารถใช้ การใช้กรด Muriatic Acid หรือ กรดเกลือ (กรดไฮดรอคลอริค, HCL) เป็นกรดที่มีปฏิกิริยารุนแรงกว่าชนิดแรก มีอัตราส่วนผสมของกรด 50 ส่วนต่อน้ำสะอาด 50 ส่วน และสามารถใช้งานได้ดีในสภาพที่ให้ความร้อนเช่นเดียวกับชนิดแรกและมีข้อควรระวังเช่นเดียวกันการทำผิวสำเร็จก่อนฝังการขัดเป็นการปรับผิวชิ้นงานให้เรียบร้อยและเกิดความสวยงามการขัดเป็นกรรมวิธีเกือบจะเป็นขั้นตอนสุดท้ายในกระบวนการผลิตเป็นการตกแต่งชิ้นงานให้เรียบร้อยก่อนจะนำไปชุบหรือทำขั้นตอนอื่นๆ ต่อไป

ขั้นตอนในการขัดผิวชิ้นงาน

1) ทำความสะอาดชิ้นงานให้สะอาดก่อนจะนำมาทำการขัดเพราะในการจัดทำต้นแบบเครื่องประดับที่มีคราบเขม่าหรือคราบสกปรกอื่น ๆ ที่อาจจะทำให้การขัดไม่ได้ประสิทธิภาพเท่าที่ควร ซึ่งการทำความสะอาดเบื้องต้นก่อนที่จะทำการขัดทำได้ดังนี้ ใช้ผงซักฟอก และแปรงขัดชิ้นงานให้สะอาด หรือจะทำความสะอาดด้วยการต้มโดยใส่สารทำความสะอาดชิ้นงานเป็นต้น

2) ทำการขัดเบื้องต้นโดยใช้ตะไบหรือกระดาษทรายในการขัด เพื่อปรับผิวชิ้นงานให้เรียบร้อย และสวยงามมากยิ่งขึ้นซึ่งในการขัดในขั้นต้นนี้จะยังมีร่องรอยอยู่เล็กน้อยต้องใช้เครื่องจักรช่วยในการขัดในขั้นต่อไป

3) การขัดให้ชิ้นงานเป็นเงา ซึ่งเป็นการขัดชิ้นงานในขั้นตอนสุดท้ายโดยทั่วไปแล้วจะขัดโดยใช้เครื่องขัดเงาล้อผ้าขัด โดยมียาขัดจนชิ้นงานเป็นเงา ซึ่งในการเลือกเครื่องที่ใช้ในการขัดก็ควรดูลักษณะและประเภทของชิ้นงานตามความเหมาะสมด้วย

ประโยชน์ในการขัดผิวชิ้นงาน

1) ทำให้ชิ้นงานมีความสวยงามและเงามากที่สุด

2) ชิ้นงานมีคุณค่ามากขึ้น

3) เป็นการปรับผิวก่อนที่จะนำไปชุบ

4) ทำให้ผิวงานเรียบไม่ขรุขระ

5) สามารถที่จะตกแต่งส่วนที่ไม่สวยงามหรือให้ได้ขนาดตามต้องการให้ดีขึ้นในขั้นตอนการขัดได้

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมนึก วัฒนศรียกุลและคณะ (2544) ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกล, กรรมวิธีทางความร้อน, ความต้านทานการหมองและการหล่อขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับด้วยวิธีการหล่อโลหะเงิน + ทองแดง + สังกะสี + ซิลิกอน ด้วยเทคนิคการหล่อในเตาหล่อเหวี่ยงแบบสุญญากาศ โดยกำหนดส่วนผสมของโลหะเงินเจือดังนี้ คือ 93.5%Ag+4.5%Cu+1.6%Zn+0.1%Si ซึ่งมีการแปรผัน มุมทางเดินน้ำโลหะ, ความเร่ง (ความเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยง) และอุณหภูมิเทหล่อ พบว่า ค่าที่มีแนวโน้มให้สิ่งบกพร่องภายในชิ้นงานน้อยที่สุด คือ มุมรูเท 65° ความเร่ง 10G และอุณหภูมิเทหล่อ 1050°C จากผลการวิจัยที่ผ่านมา คณะผู้วิจัยมีข้อสังเกตว่าในโครงการดังกล่าวไม่สามารถทำการศึกษาปริมาณของธาตุเจือรอง (Zn, Si) ที่มีผลต่อคุณภาพงานหล่อ ซึ่งตรงกับข้อสงสัยของผู้ประกอบการ SMEs ที่ทำการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับด้วยเครื่องหล่อเหวี่ยงที่ให้ความร้อนด้วยหัวเผา ที่ต้องมีการเติมสังกะสี หรือทองเหลืองเข้าไปในโลหะเงินเพื่อทำหน้าที่เป็นธาตุ Deoxidized หรือไล่แก๊สในน้ำโลหะ

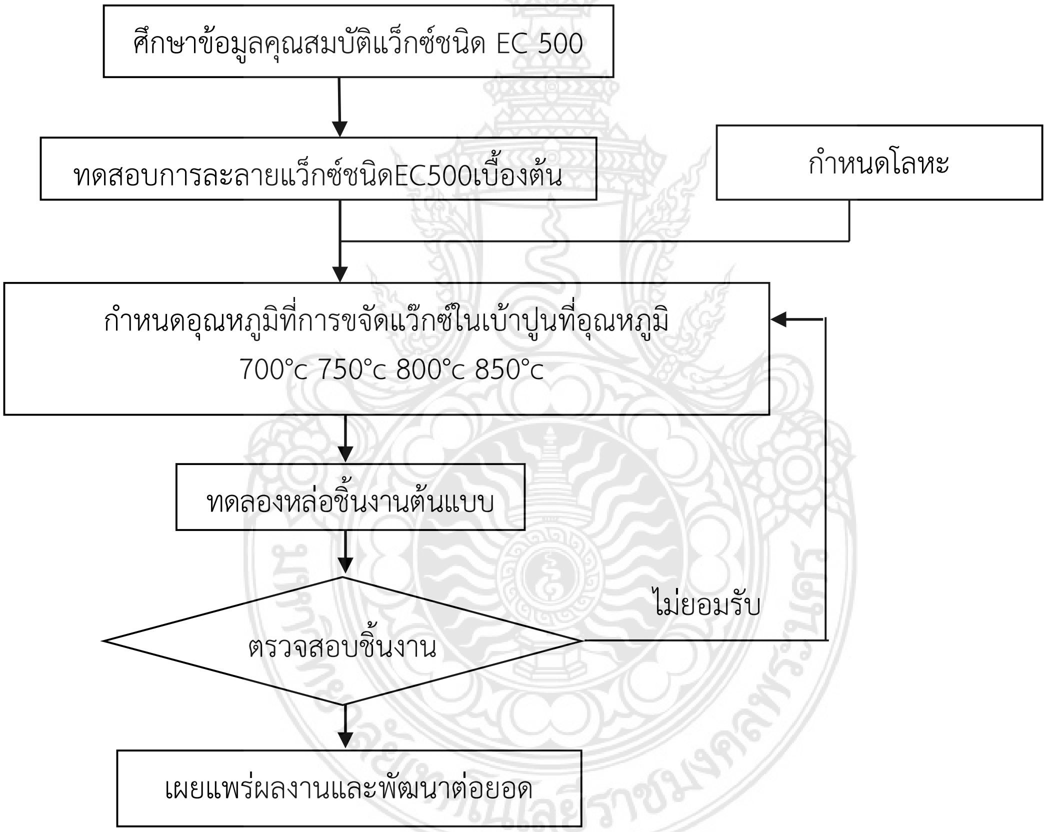
เพ็ญศรี ได้วิจัยเพื่อพัฒนากระบวนการหล่อในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ ปัญหา การผลิตส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการผลิตเป็นหลัก ปัญหาบุคลากร ปัญหาเครื่องจักร/อุปกรณ์ และปัญหาวัตถุดิบเป็นปัญหาอันดับรองลงมาตามลาดับ โดยปัญหากระบวนการผลิตที่เป็นปัญหาหลัก คือการทำแม่พิมพ์หล่อและการหล่อโลหะ กรณีการฉีดเทียนและติดต้น การทำต้นแบบและแม่พิมพ์ยางเป็นปัญหาลำดับรองลงมาตามลาดับ สำหรับข้อบกพร่องในชิ้นงานการผลิตที่พบมาก เป็นข้อบกพร่องที่พบในชิ้นงานหล่อ มีถึง 12 ลักษณะ ข้อบกพร่องที่พบในชิ้นงานเทียน 6 ลักษณะ และข้อบกพร่องที่พบในชิ้นงานต้นแบบและแม่พิมพ์ยาง 2 ลักษณะ โดยข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในแต่ละลักษณะ อาจเกิดจากสาเหตุหลากหลายกรณี รวมทั้งได้จัดทำตัวอย่างกรณีศึกษาสำหรับข้อบกพร่องในชิ้นงานการผลิตลักษณะต่าง ๆ รวม 25 กรณีศึกษา

ปริศนา บุญศักดิ์และนายวิเชียร มหาวัน(2558) ได้ทำการศึกษาผลจากการศึกษาการอบเบ้าปูนที่ใช้ต้นแบบตัวเรือนวัสดุ wic100a เมื่อนามาเปรียบเทียบกับกราฟการอบเบ้าปูนที่มีต้นแบบตัวเรือนเป็นแว็กซ์เขียวทั่วไป จากการศึกษาพบว่าวัสดุแว็กซ์เขียวเมื่อได้รับความร้อนจะเริ่ มหลอมละลายที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จนหลอมละลายจากก้อนเป็นของเหลวทั้งหมดที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถใช้อุณหภูมิและเวลาที่กาหนดไว้จากมาตรฐานทั่วไปนามาใช้ในการอบเบ้าปูนเพื่อกาจัดแว็กซ์ได้ โดยใช้อุณหภูมิสูงสุดเพื่อเผาไล่เศษขี้เถ้าแว็กซ์ที่ 750 องศาเซลเซียส แต่แว็กซ์ wic100a ไม่หลอมละลายในช่วงอุณหภูมิต่าว่า 270 องศาเซลเซียส แต่จะเกิดการเผาไหม้แทนโดยใช้อุณหภูมิเผาให้ตั่งแต่ 270-450 องศาเซลเซียส ในสภาวะปกติ 350-500 องศาเซลเซียสในเมื่ออยู่ในเบ้าปูน และต้องใช้อุณหภูมิในการเผาไล่ขี้เถ้าแว็กซ์ถึง 850 องศาเซลเซียส เพื่อเผาไล่เศษขี้เถ้าแว็กซ์ จึงจะสามารถทำให้โพรงแบบสะอาด เมื่อนำเบ้าปูนไปหล่อด้วยโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 แล้วได้ชิ้นงานที่มีความสมบูรณ์ดี

บทที่ 3
วิธีการดำเนิน

3.1 แผนการดำเนินงาน

การวิจั ยนี้เป็นการศึกษาการศึกษาอุณหภูมิการหล่อต้นแบบแว็กซ์ชนิด EC 500 เพื่อลดของเสียจากกระบวนการผลิตเครื่องประดับเงินความสมบูรณ์ของชิ้นงานตัวเรือนโลหะ ส่วนหนึ่งมาจากกระบวนการอบเบ้าปูนเพื่อขจัดแว็กซ์ให้ออกจากเบ้าปูนทำให้เกิดโพรงแบบที่สะอาดปราศจากเศษขี้เถ้าของแว็กซ์ โพรงแบบมีความแข็งแรง ไม่มีร่องรอยการแตกร้าว หรือรอยกะเทาะต่าง ๆ การอบเบ้าปูนเพื่อให้ครบกระบวนการและสมบูรณ์ ที่เหมาะสมกับแว็กซ์ชนิด EC 500

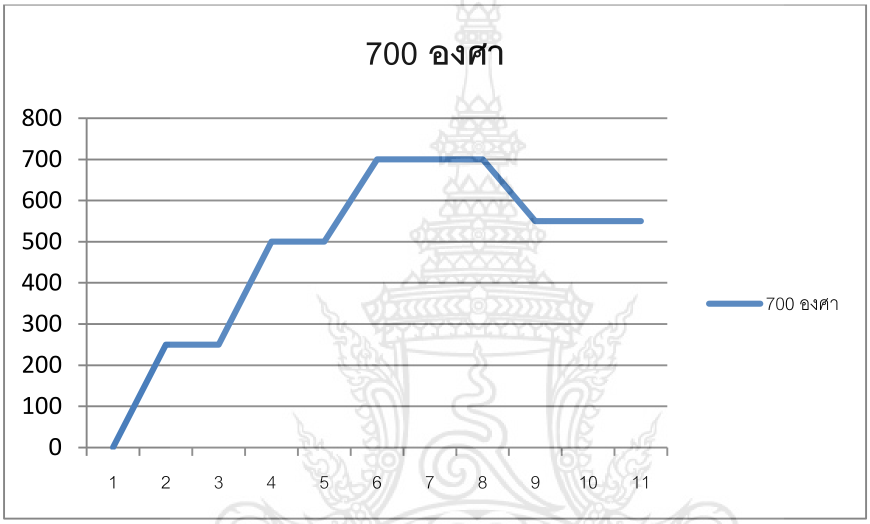


รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินการวิจัย

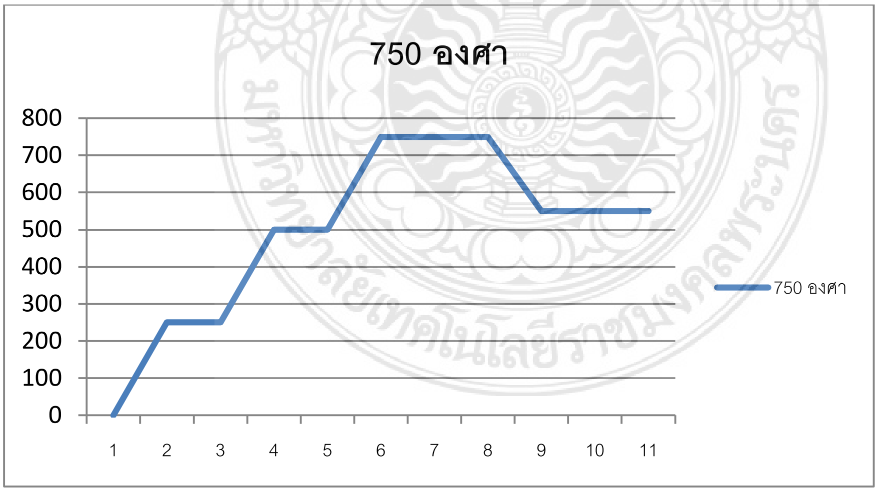
3.2 **ออกแบบการทดลอง**

ในการออกแบบการทดลองหาอุณหภูมิอบเบ้าปูนเพื่อหล่อเงิน 925 โดยใช้แว็กซ์ EC 500 เป็นต้นแบบในการหล่อชิ้นงาน เนื่องจากปกติใช้อุณหภูมิอบเบ้าตั้งแต่เริ่มจนถึงก่อนหล่อใช้เวลา 10-12 ชั่วโมง เนื่องจากทางบริษัท GessweinSiam ได้ให้ข้อมูลเบื้องต้นเพื่อเป็นกรณีศึกษากระบวนการอบเบ้าปูนโดยใช้ต้นแบบแว็กซ์ EC 500 นั้นมีจุดหลอมเหลวที่ 250-500°C เพื่อลดระยะเวลาจึงได้ตั้งสมมุติฐานโดย ใช้เวลาในการขจัดแว็กซ์ 2 ชั่วโมงได้ทำการกำหนดอุณหภูมิ

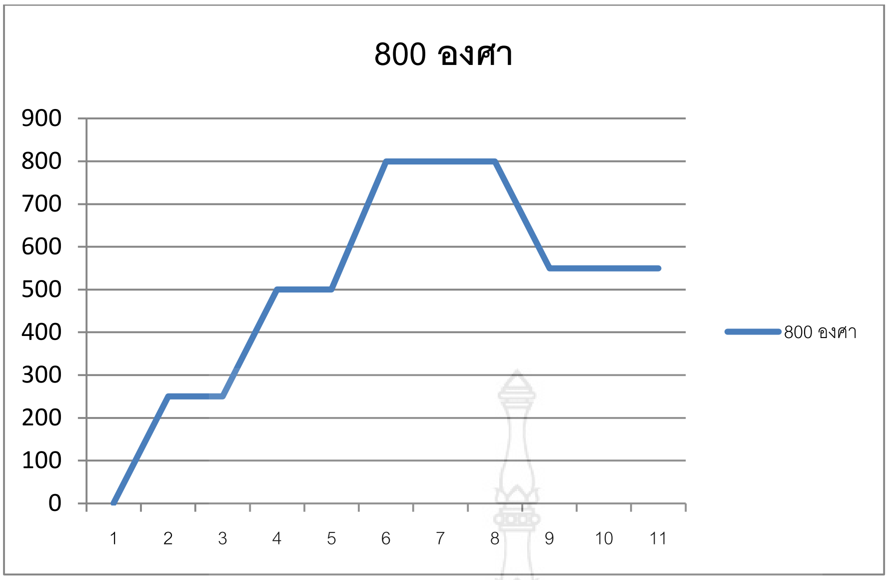
กำหนดจำนวนการทดลองในการออกแบบการทดลองอุณหภูมิการอบเบ้าปูนแบ่งเป็น 4 ระดับ ที่ 700°C 750°C 800°C และ850°C ซึ่งในแต่ละช่วงอุณหภูมิ จะทดลองทั้งหมด 5 ครั้ง ครั้งละ5 เบ้า จำนวน 5ชิ้นต่อเบ้า รวมจะได้ 25 ชิ้นต่อช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลอง ใช้อุณหภูมิหล่อเงินสเตอร์ริง 550°C ดังรูปที่ 3.2-3.5



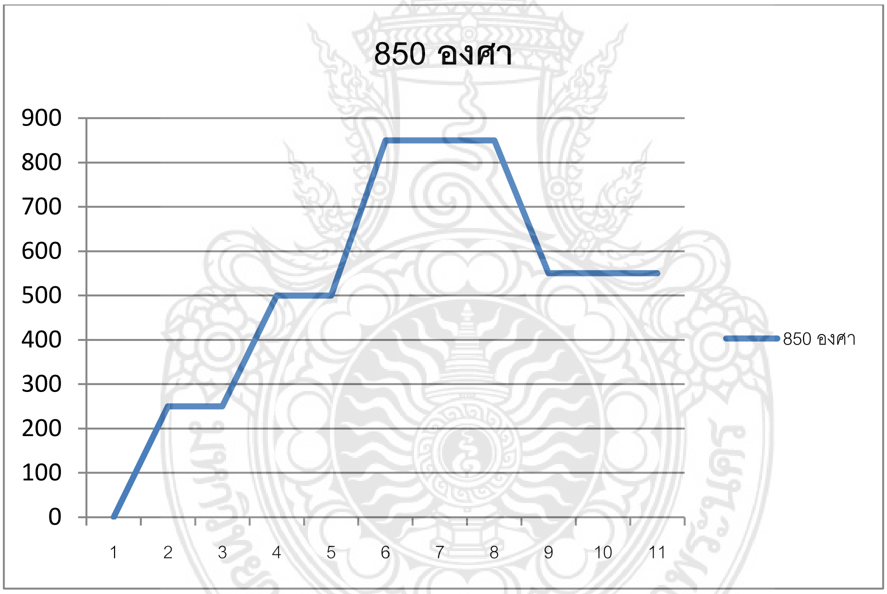
รูปที่ 3.2 การออกแบบการทดลองอบเบ้าปูนที่อุณหภูมิ 700 องศา



รูปที่ 3.3 การออกแบบการทดลองอบเบ้าปูนที่อุณหภูมิ 750 องศา



รูปที่ 3.4 การออกแบบการทดลองอบเบ้าปูนที่อุณหภูมิ 800 องศา



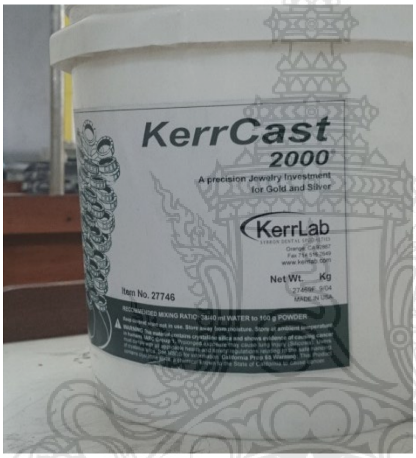
รูปที่ 3.5 การออกแบบการทดลองอบเบ้าปูนที่อุณหภูมิ 850 องศา

3.3 ดำเนินการทดลอง

1. จัดหาชิ้นงานต้นแบบเพื่อทำการทดลอง

รูปที่ 3.6 ต้นแบบแว๊กซ์ EC500 ที่ได้จากเครื่อง RP

2.ปูนหล่อแบบ (KerrCats) เป็นปูนประเภทปูนยิปซัมบอนด์เหมาะสำหรับงานหล่อโลหะ เงิน หรือทองเหลือง มีส่วนผสมคือวัสดุทนไฟซึ่งประกอบด้วยซิลิกา คริสโตบาลไลต์ (Critoballite) วัสดุที่มีสมบัติเป็นตัวยึด (binder) คือ ผงยิปซัม ที่มีชื่อทางเคมีว่า แคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต (Calcium sulfate hemihydrate) และมีแร่ควอตซ์ (Quartz14808-60-7 0) เป็นส่วนประกอบเพิ่มเติม



รูปที่ 3.7 ปูนหล่อแบบ

3.นำชิ้นงานที่แว็กซ์ติดเข้ากับทางเดินน้ำโลหะและต้นเทียนประกอบรวมกับฐานยาง

รูปที่ 3.8 ชิ้นงานที่ติดทางเดินน้ำโลหะและต้นเทียน

4. นำต้นแบบที่ได้ทำการประกอบรวมกับฐานยางแล้วนั้น ใส่กระบอกเหล็กเพื่อทำการเทปูนพร้อมทั้งทำการดูดอากาศออกจากปูนโดยใช้เครื่องดูดสุญญากาศ

รูปที่ 3.9 เทปูนลงในเบ้ากระบอก

5. นำเบ้าปูนเข้าเตาอบเบ้าต้องอุณหภูมิตามสมมุติฐาน
6. ทำการหล่อเครื่องประดับด้วยเครื่องหล่อดูดสุญญากาศ

3.3.1 ขั้นตอนการแตรียมชิ้นงานตามช่วงเวลาที่กำหนดและเกณฑ์การประเมินชิ้นงาน

ตรวจชิ้นงานโดยพิจารณาจาก รูปทรงโดยรวมของชิ้นงานมีชิ้นส่วนสมบูรณ์ตามต้นแบบหรือไม่ ผิวของชิ้นงานที่หล่อมาแล้วนั้นสามารถที่จะนำเข้ากระบวนการต่อไปได้หรือไม่ โดยแบ่งเกณฑ์การตัดสินออกเป็นชิ้นงานดี และชิ้นงานเสียโดยชิ้นงานเสียมีเกณฑ์ดังนี้คือ ชิ้นงานไม่เต็ม,ชิ้นงานมีตามดและชิ้นงานมีครีบโลหะนอกเหนือจากเกณฑ์ให้ถือเป็นงานดี

เกณฑ์การประเมิณ

1. ชิ้นงานไม่เต็ม
2. ชิ้นงานมีตามด
3. ชิ้นงานมีครีบโลหะ

ตารางที่ 3.1 การเตรียมชิ้นงาน โลหะ น้ำหนักปูนและน้ำ ในการอบเบ้าปูนที่อุณหภูมิ 700°C

ชิ้นงาน		น้ำหนักแว็กซ์	น้ำหนักโลหะ+20%	น้ำหนักปูน	น้ำหนักน้ำ
แหวน	เบ้าที่1	4.1 g	44.62 g	500 g	200 cc
	เบ้าที่2	3.8 g	38.76 g	500 g	200 cc
	เบ้าที่3	4.1 g	41.82 g	500 g	200 cc
	เบ้าที่4	4.2 g	42.84 g	500 g	200 cc
	เบ้าที่5	4.1 g	41.82 g	500 g	200 cc

ตารางที่ 3.2 การเตรียมชิ้นงาน โลหะ น้ำหนักปูนและน้ำ ในการอบเบ้าปูนที่อุณหภูมิ 750°C

ชิ้นงาน			น้ำหนักแว็กซ์	น้ำหนักโลหะ+20%	น้ำหนักปูน	น้ำหนักน้ำ
แหวน	เบ้าที่1		3.9 g	41.43 g	500 g	200 cc
	เบ้าที่2		3.8 g	38.76 g	500 g	200 cc
	เบ้าที่3		3.9 g	41.43 g	500 g	200 cc
	เบ้าที่4		3.8 g	38.76 g	500 g	200 cc
	เบ้าที่5		4.1 g	44.62 g	500 g	200 cc

ตารางที่ 3.3 การเตรียมชิ้นงาน โลหะ น้ำหนักปูนและน้ำ ในการอบเบ้าปูนที่อุณหภูมิ 800°C

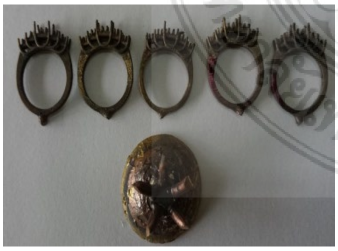
ชิ้นงาน		น้ำหนักแว็กซ์	น้ำหนักโลหะ+20%	น้ำหนักปูน	น้ำหนักน้ำ
แหวน	เบ้าที่1	3.9 g	41.43 g	500 g	200 cc
	เบ้าที่2	3.8 g	40.37 g	500 g	200 cc
	เบ้าที่3	3.7 g	39.31 g	500 g	200 cc
	เบ้าที่4	3.8 g	38.76 g	500 g	200 cc
	เบ้าที่5	3.7 g	39.31 g	500 g	200 cc

ตารางที่ 3.4 การเตรียมชิ้นงาน โลหะ น้ำหนักปูนและน้ำ ในการอบเบ้าปูนที่อุณหภูมิ 850°C

ชิ้นงาน			น้ำหนักแว็กซ์	น้ำหนัก โลหะ+20%	น้ำหนัก ปูน	น้ำหนัก น้ำ
แหวน	เบ้าที่1		3.7 g	39.31 g	500 g	200 cc
	เบ้าที่2		3.8 g	38.76 g	500 g	200 cc
	เบ้าที่3		3.7 g	39.31 g	500 g	200 cc
	เบ้าที่4		4.1 g	44.62 g	500 g	200 cc
	เบ้าที่5		3.8 g	38.76 g	500 g	200 cc

3.3.2 การบันทึกผลการตรวจสอบชิ้นงานหลังการทดลอง

ตาราง 3.5 บันทึกการทดลองอบเบ้าปูนเผาขจัดเศษแว็กซ์ที่อุณหภูมิ 700°C

เบ้าชิ้น	ชิ้นงานไม่เต็ม	มีตามด	มีครีบโลหะ
	10	8	0
	9	9	0
	8	10	0
	7	11	0
	6	12	0

ตาราง 3.6 บันทึกการทดลองอบเบ้าปูนเผาขจัดเศษแว็กซ์ที่อุณหภูมิ 750°C

เบ้า	ชิ้นงานไม่เต็ม	มีตามด	มีครีบโลหะ
	12	2	0
	12	3	0
	13	1	0
	10	4	0
	10	3	0

ตาราง 3.7 บันทึกการทดลองอบเบ้าปูนเผาขจัดเศษแว็กซ์ที่อุณหภูมิ 800°C

เบ้า	ชิ้นงานไม่เต็ม	มีตามด	มีครีบโลหะ
	5	2	0
	5	1	0
	7	2	0
	6	1	0
	10	1	0

ตาราง 3.8 บันทึกการทดลองอบเบ้าปูนเผาขจัดเศษแว็กซ์ที่อุณหภูมิ 850°C

เบ้า	ชิ้นงานไม่เต็ม	มีตามด	มีครีบโลหะ
	0	0	0
	0	0	0
	0	0	0
	0	0	0
	1	0	0

3.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้จะเน้นเรื่องของวิธีการทดลองและผลการดำเนินการทดลอง โดยทำการทดลองการใช้แว็กซ์ EC 500 เป็นต้นแบบในการหล่อเพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบเบ้าปูนและหล่อโลหะเงินโดยแบ่งช่วงอุณหภูมิในการทดลองออกเป็น 4 ช่วง โดยการวิเคราะห์ผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิอบเบ้าปูนที่ 700°C และ 750°C พบว่าชิ้นงานมีจุดของเสียมากที่สุดโดยชิ้นงานส่วนใหญ่นั้นจะมีตามด และชิ้นงานไม่สมบูรณ์ ในช่วงอุณหภูมิที่ 800°C และ 850°C พบว่าชิ้นงานมีความสมบูรณ์มากที่สุดโดยมีปัญหาที่ชิ้นงานของเสียเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานมีลักษณะที่ค่อนข้างเล็กและมีหนามเตยเยอะ จึงทำให้ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมนั้นมีช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้นจากอุณหภูมิอบเบ้าหล่อแว็กซ์ปกติ

เมื่อได้ทำการทดลองตามประเด็นการทดลองทั้ง 4 ช่วงอุณหภูมิ จึงได้ข้อมูลของการทดลองตามตารางที่แสดงไว้ทั้ง 4 การทดลอง

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์

4.1 ผลการดำเนินงาน

ในการศึกษานี้ ผู้วิจัย ได้มุ่งทำการศึกษาทดลองหาอุณหภูมิการหลอมละลายของวัสดุแว็กซ์ EC 500 ในเบ้าปูน หลังการอบเผาขจัดแว๊กซ์ของ EC 500 ทดลองช่วงเผาไล่เศษแว็กซ์ (Burn) ที่อุณหภูมิ 700℃ ถึง 850℃ เพื่อศึกษาวิเคราะห์ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในช่วงการอบเบ้าปูนเพื่อหล่อต้นแบบตัวเรือนโลหะเงิน 925 ผลการทดลองได้ดังนี้

4.1.1 ผลการทดลองช่วงเผาไล่เศษแว็กซ์จากอุณหภูมิเบ้าปูนที่ 700°C

ตารางที่ 4.1แสดงผลการวิเคราะห์ผลจากชิ้นงานจากอุณหภูมิเบ้าปูนที่ 700℃

อุณหภูมิ	เบ้าที่	จำนวนชิ้นงาน	งานดี	งานเสีย
700°	เบ้าที่ 1	20	2	18
	เบ้าที่ 2	20	2	18
	เบ้าที่ 3	20	2	18
	เบ้าที่ 4	20	2	18
	เบ้าที่ 5	20	2	18
เปอร์เซ็นต์ของชิ้นงาน			10%	90%

ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างงานเสียที่อุณหภูมิ 700℃

	- สาเหตุ งานชิ้นนี้เกิดจากตามดที่ผิวงานมากมีรูพรุนที่บริเวณผิวงาน สาเหตุเกิดจากความร้อนของน้ำโลหะขณะเทลงแบบสัมผัสกับความชื้นของแบบหล่อทำให้เกิดก๊าซขึ้น อุณหภูมิของน้ำโลหะสูงเกิน หรือกำจัดก๊าซในน้ำโลหะไม่หมด รูระบายไม่เหมาะสม
	- สาเหตุ งานชิ้นนี้เกิดจากการ อุณหภูมิในเบ้าปูนต่ำเกิดไปจึงทำให้น้ำโลหะเข้าไปไม่เต็มเกิดรอยแหว่งที่ชิ้นงาน หรือเกิดจากทางเดินน้ำโลหะไม่ดี

4.1.2 ผลการทดลองช่วงเผาไล่เศษแว็กซ์จากอุณหภูมิเบ้าปูนที่ 750℃

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ผลจากชิ้นงานที่หล่อจากอุณหภูมิเบ้าปูนที่ 750℃

อุณหภูมิ	เบ้าที่	จำนวนชิ้นงาน	งานดี	งานเสีย
750°	เบ้าที่ 1	20	8	12
	เบ้าที่ 2	20	5	15
	เบ้าที่ 3	20	6	14
	เบ้าที่ 4	20	6	14
	เบ้าที่ 5	20	7	13
เปอร์เซ็นต์ของชิ้นงาน			32%	68%

ตารางที่ 4.4 ตัวอย่างงานเสียที่อุณหภูมิ 750°C

	- สาเหตุ งานชิ้นนี้เกิดจากการ อุณหภูมิในเบ้าปูนต่ำเกิดไปจึงทำให้น้ำโลหะเข้าไปไม่เต็ม เกิดรอยแหว่งที่ชิ้นงาน หรือเกิดจากทางเดินน้ำโลหะไม่ดี
	- สาเหตุ งานชิ้นนี้เกิดจากตามดที่ผิวงานมากมีรูพรุนที่บริเวณผิวงาน สาเหตุเกิดจากความร้อนของน้ำโลหะขณะเทลงแบบสัมผัสกับความชื้นของแบบหล่อทำให้เกิดก๊าซขึ้น อุณหภูมิของน้ำโลหะสูงเกิน หรือกำจัดก๊าซในน้ำโลหะไม่หมด รูระบายไม่เหมาะสม

4.1.3 ผลการทดลองช่วงเผาไล่เศษแว็กซ์จากอุณหภูมิเบ้าปูนที่ 800°C

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ผลจากชิ้นงานที่หล่อจากอุณหภูมิเบ้าปูนที่ 800°C

อุณหภูมิ	เบ้าที่	จำนวนชิ้นงาน	งานดี	งานเสีย
800°	เบ้าที่ 1	20	13	7
	เบ้าที่ 2	20	14	6
	เบ้าที่ 3	20	11	9
	เบ้าที่ 4	20	13	7
	เบ้าที่ 5	20	9	11
เปอร์เซ็นต์ของชิ้นงาน			60%	40%

ตารางที่ 4.6 ตัวอย่างงานเสียที่อุณหภูมิ 800℃

	- สาเหตุ งานชิ้นนี้เกิดจากตามดที่ผิวงานมากมีรูพรุนที่บริเวณผิวงาน สาเหตุเกิดจากความร้อนของน้ำโลหะขณะเทลงแบบสัมผัสกับความชื้นของแบบหล่อทำให้เกิดก๊าซขึ้น อุณหภูมิของน้ำโลหะสูงเกิน หรือกำจัดก๊าซในน้ำโลหะไม่หมด รูระบายไม่เหมาะสม
	- สาเหตุ งานชิ้นนี้เกิดจากการ อุณหภูมิในเบ้าปูนต่ำเกิดไปจึงทำให้น้ำโลหะเข้าไปไม่เต็ม เกิดรอยแหว่งที่ชิ้นงาน หรือเกิดจากทางเดินน้ำโลหะไม่ดี

4.1.4 ผลการทดลองช่วงเผาไล่เศษแว็กซ์จากอุณหภูมิเบ้าปูนที่ 850°C

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการวิเคราะห์ผลจากชิ้นงานที่หล่อจากอุณหภูมิเบ้าปูนที่ 850℃

อุณหภูมิ	เบ้าที่	จำนวนชิ้นงาน	งานดี	งานเสีย
850°	เบ้าที่ 1	20	20	0
	เบ้าที่ 2	20	20	0
	เบ้าที่ 3	20	20	0
	เบ้าที่ 4	20	20	0
	เบ้าที่ 5	20	19	1
เปอร์เซ็นต์ของชิ้นงาน			99%	1%

ตางรางที่ 4.8 ตัวอย่างงานเสียที่อุณหภูมิ 850℃

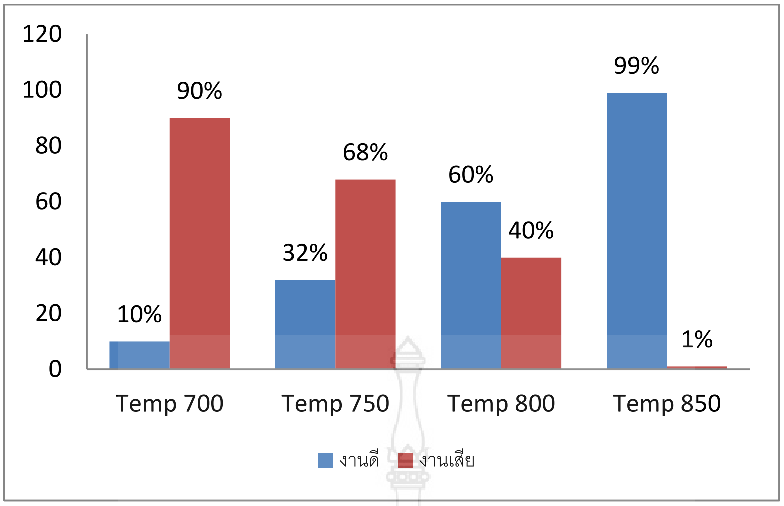
	- สาเหตุ งานชิ้นนี้เกิดจากการ อุณหภูมิในเบ้าปูนต่ำเกิดไปจึงทำให้น้ำโลหะเข้าไปไม่เต็ม เกิดรอยแหว่งที่ชิ้นงาน หรือเกิดจากทางเดินน้ำโลหะไม่ดี

4.2 ผลการทดลองเพื่อหาค่าเฉลี่ยจากชิ้นงานที่ทำการทดสอบ

จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่ใช้อบเบ้าปูนที่มีจากแว็กซ์ EC 500 เป็นต้นแบบนั้นมีผลทำให้ชิ้นงานที่ออกมามีความสมบูรณ์มากหรือน้อย โดยใช้เกณฑ์การประเมินลักษณะของชิ้นงาน

อุณหภูมิ 700˚C ชิ้นงานดี 10% ชิ้นงานเสีย 90%
อุณหภูมิ 750˚C ชิ้นงานดี 32% ชิ้นงานเสีย 68%
อุณหภูมิ 800˚C ชิ้นงานดี 60% ชิ้นงานเสีย 40%
อุณหภูมิ 850˚C ชิ้นงานดี 99% ชิ้นงานเสีย 1%

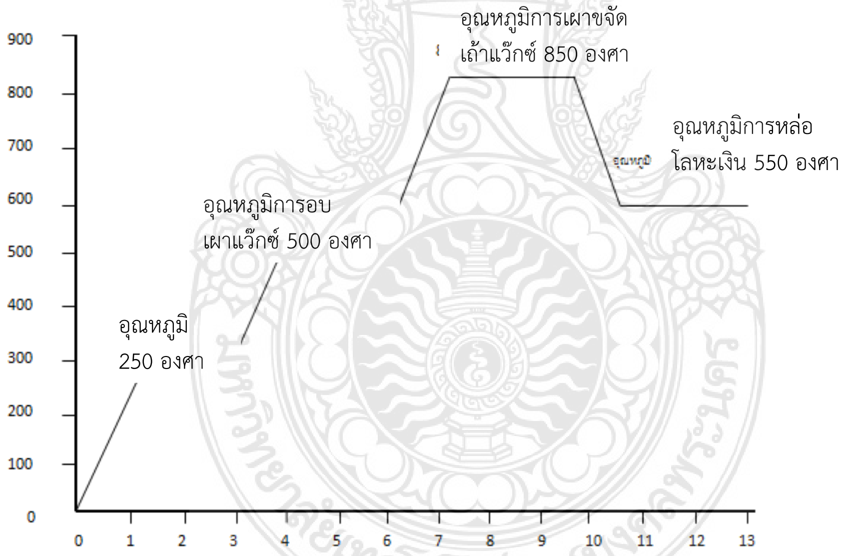
จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่ใช้อบเบ้าปูนที่มีจากแว็กซ์ EC 500 เป็นต้นแบบนั้นมีผลทำให้ชิ้นงานที่ออกมามีความสมบูรณ์มากหรือน้อยโดยใช้เกณฑ์การประเมินลักษณะของชิ้นงานทั้งหมด 100 ชิ้น



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบงานดี งานเสีย ด้วยแผนภูมิแท่ง

4.3 การออกแบบกราฟอุณหภูมิและเวลาที่ได้จากการวิเคราะห์

กราฟอุณหภูมิและเวลาในการอบเบ้าปูนวัสดุต้นแบบเป็น Ec500



รูปที่ 4.2 กราฟอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการอบเบ้าปูนด้วยแว๊กซ์ EC500

ผลของการทดลองเพื่อหาค่าเฉลี่ยจากการตรวจสอบคุณภาพผิวและผลเชิงคุณภาพเพื่อหาค่าของเสียจากการตรวจสอบคุณภาพผิว ให้ผลจากการทดลองมีความสัมพันธ์กันเบ้าปูนสะอาดที่สุดไม่มีเศษขี้เถ้าของเนื้อแว็กซ์หลงเหลืออยู่คือ จากการทดลองการอบเบ้าปูนหล่อที่อุณหภูมิ 850˚C พบว่ามีชิ้นงานดี 99 ชิ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 99% ชิ้นงานเสีย1 ชิ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 1%

บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาอุณหภูมิการหล่อแว็กซ์ EC500 ทดลองหาอุณหภูมิการเผาขจัดเศษเถ้าแว็กซ์ ในเบ้าปูนผู้วิจัยได้ทำทดลองและวิเคราะห์เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่กาหนดไว้

5.1 สรุปผล

1. แก้ปัญหาของเสียจากการหล่อแว๊กซ์ชนิด EC500 จากปัญหาการหล่อไม่สมบูรณ์เกิดจากการนำกราฟอุณหภูมิและเวลาการอบเบ้าปูนของแว็กซ์ทั่วไป นำไปใช้ในการอบเบ้าปูนที่มีต้นแบบเป็นวัสดุแว็กซ์ชนิด EC500 ซึ่งใช้อุณหภูมิไม่ถูกต้องทำให้มีการตกค้างของขี้เถ้าของแว็กซ์ยังหลงเหลืออยู่ในโพรงแบบ ทำให้ชิ้นงานมีผิวทีไม่สะอาด เป็นต้นเหตุของรูพรุน
2. แว็กซ์ EC500 สามารถขจัดออกที่อุณหภูมิ800- 850 องศาเซลเซียส
3. ความสมบูรณ์ของชิ้นงานตัวเรือนโลหะเงินสเตอร์ลิงค์ 925 หลังจากใช้อุณหภูมิจากการทดลองนำไปอบเบ้าปูนแล้วนำเบ้าปูนไปหล่อตัวเรือนชิ้นงานจะสมบูรณ์มากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในกระบวนการอบเบ้าปูนที่ใช้ต้นแบบจากวัสดุแว็กซ์ EC500 ต้องใช้อุณหภูมิสูงเพื่อเผาขจัดเศษเถ้าแว็กซ์ที่หลงเหลือในโพรงแบบ ดังนั้นควรเลือกปูนที่สามารถทนความร้อนได้สูง
2. ควรมีการศึกษาทดลองเพิ่มเติม โดยการเปรียบเทียบลักษณะรูปแบบของชิ้นงานต้นแบบแว็กซ์เฉพาะส่วน เช่น หนามเตย ผิว ของตัวเรือน
3. ควรมีการออกแบบทางเดินน้ำโลหะให้ง่ายต่อการไหลเข้าโพรงแบบ
4. ควรเลือกปูนหล่อแบบชนิดที่ทนความร้อนสูงในการหล่อเช่น ปูนหล่อแบบโลหะแพลเลเดียมหรือแพทตินั้มแทน

5.3 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

1. ชิ้นงานไม่เต็มเนื่องจากลักษณะชิ้นงานและอุณหภูมิหล่อไม่สัมพันธ์กันจึงต้องเพิ่มอุณหภูมิ สังเกตจากในช่วงที่อุณหภูมิสูงขึ้นชิ้นงานมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น
2. รูพรุนในเนื้อโลหะและผิวงานเกิดจากก๊าซออกซิเจนภายในเนื้อโลหะถูกปล่อยออกมาในขณะที่เย็นตัว ดังนั้นควรกำจัดก๊าซออกซิเจน

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากในการทดลอง ผลทดสอบที่ออกมานั้น ช่วงเวลาการเพิ่มอุณหภูมิต้องมีความสัมพันธ์กัน เพื่อป้องกันการแตกของปูน
2. เนื่องจากความปลอดภัยในการปฏิบัติงานเป็นเรื่องที่สำคัญ ควรเห็นความสำคัญของการสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันความปลอดภัยทุกครั้ง

บรรณานุกรม

1.กิตตินาถ วรรณิสสร, และคุณยุต เอี่ยมสะอาด. **การสร้างเครื่องต้นแบบเพื่อขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบ รวดเร็วด้วยเทคโนโลยีการขึ้นรูปทีละชั้น**. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่ง ประเทศไทย ประจำปี 2552.

2.คุณยุต เอี่ยมสอาด. "**การพัฒนาโปรแกรมสำหรับเครื่องสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็ว ภาคคำนวณ**"วิศวกรรมสาร มก. 69(2552),13-23.

3.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร. **เทคโนโลยีและวัสดุที่เหมาะสมสำหรับอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ.**เอกสารประกอบการบรรยาย 19 กรกฎาคม 2553.

4.Steve Upcraft, and Richard Fletcher. "The rapid prototyping technologies" AssemblyAutomation. Volume 23 Number4:2003, University Boulevard, Nottingham.pp.318–330.

ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

แว๊กซ์ EC500 ชนิดเหลว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

<u>หัวหน้าโครงการวิจัย</u>

1. ชื่อ – นามสกุล นายจักรกฤษณ์ ยิ้มแฉ่ง
Mr. Jakklit Yimchang

2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน xxxxxxxxxxxxxx

3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

4. หน่วยงานที่ติดต่อได้พร้อมโทรศัพท์และโทรสาร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะวิศวกรรมศาสตร์
โทร. 0-2913-2424 ต่อ 4187 , E-Mail : jky_1942@hotmail.com

5. ประวัติการศึกษา วศ.ม.วิศวกรรมการจัดการอุตสาหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
คอ.บ. อุตสาหการ-เครื่องมือกล
สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างวุฒิการศึกษา)
- งานหล่อเครื่องประดับ
- งานหล่อเครื่องประดับชั้นสูง
- งานแม่พิมพ์ยาง
- งานทำต้นแบบแว๊กซ์

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิชาภายในประเทศ โดยระบุสถานะในการทำวิจัย

1 ผู้อำนวยการวิจัย : ไม่มี
2 หัวหน้าโครงการวิจัย : ไม่มี
3 งานวิจัยที่ทำแล้วเสร็จ :

1. การสร้างและหาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน เรื่อง งานหล่อเครื่องประดับ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 2550
2. การวิจัยและพัฒนาการหล่ออลูมิเนียมเพื่อผลิตตัวเรือนเครื่องประดับด้วยการหล่อระบบเหวี่ยง สนับสนุนงานวิจัยงบประมาณรายจ่าย 2557.
3. การวิจัยและพัฒนาโลหะเงินเจือสีชมพูเพื่อผลิตตัวเรือนเครื่องประดับด้วยการหล่อระบบเหวี่ยง สนับสนุนงานวิจัยงบประมาณรายจ่าย 2558.