

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในกระบวนการหล่อเครื่องประดับเงินด้วย
เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ

ปริญญา ทราจารย์วัฒน์

TNI

สารนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต
บัณฑิตวิทยาลัย สาขาวิชาการจัดการระบบการผลิตและโลจิสติกส์แบบสิ้น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ปีการศึกษา 2565

A STUDY OF FACTORS AFFECTING DEFECTS IN SILVER JEWELRY CASTING
PROCESS BY TAGUCHI EXPERIMENTAL DESIGN TECHNIQUE

Parinya Tharajarat

TNI

A Term Paper Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Business Administration Program
in Lean Management System and Logistics Management

Graduate School
Thai-Nichi Institute of Technology
Academic Year 2022

หัวข้อสารนิพนธ์

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในกระบวนการ
หล่อเครื่องประดับเงินด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลอง
แบบทากูชิ

โดย

ปริญญา ทราจารย์วัฒน์

สาขาวิชา

การจัดการระบบการผลิตและโลจิสติกส์แบบลีน

อาจารย์ที่ปรึกษาสารนิพนธ์

รองศาสตราจารย์ ดร.พิชิต สุขเจริญพงษ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้รับสารนิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชิต สุขเจริญพงษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบสารนิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์รังสรรค์ เลิศในสัตย์)

..... กรรมการ

(ดร.ดอน แก้วดก)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาสารนิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชิต สุขเจริญพงษ์)

ปริญญา ทราจารย์วัฒน์ : การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในกระบวนการหล่อเครื่องประดับเงินด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ. อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.พิชิต สุขเจริญพงษ์, 71 หน้า.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยฉบับนี้ คือการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องกระบวนการหล่อเครื่องประดับเงิน และการนำวิธีการออกแบบมาทดลองมาใช้เพื่อลดข้อบกพร่องที่เกิดจากกระบวนการหล่อเงินให้น้อยที่สุด โดยเริ่มศึกษาในกระบวนการผลิตดั้งเดิมเพื่อกำหนดปัจจัยที่จำนำมาศึกษา และเก็บข้อมูลจำนวนของข้อบกพร่องที่เกิดและนำไปเปรียบเทียบกับข้อบกพร่องที่พบภายหลังการดำเนินการปรับปรุง

จากการเก็บข้อมูลสามารถกำหนดปัจจัยที่จะทำศึกษาจำนวน 8 ปัจจัย โดยแบ่งปัจจัยเป็นปัจจัยที่มี 2 ระดับ 1 ปัจจัย และปัจจัยที่มี 3 ระดับ 7 ปัจจัย จึงได้นำการออกแบบการทดลองแบบทากูชิมาใช้ โดยจะได้ตรงตามรูปแบบที่ L18 ($2^1 \times 3^7$) ซึ่งมีการทดลองเพียง 18 การทดลอง เมื่อทำการทดลองทั้ง 18 ครั้ง พบว่าการทดลองที่ดีที่สุดพบข้อบกพร่องเฉลี่ย 7.6 จุดต่อวง ขณะที่พบตำหนิมากที่สุด 27 จุดต่อวง และเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย S/N Ratio ก็จะได้ระดับของแต่ละปัจจัยที่จะส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องน้อยที่สุด และเมื่อทำการทดลองยืนยันผลตามการวิเคราะห์พบว่าตำหนิที่ได้นั้นมีเพียง 3.75 จุดต่อวง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับข้อบกพร่องเฉลี่ยก่อนของการผลิตแบบเดิมที่ 30.48 จุดต่อวง แสดงให้เห็นว่าหากผลิตตามผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ จะสามารถลดการเกิดข้อบกพร่องได้ถึง 87.69% และช่วยลดค่าใช้จ่ายได้การซ่อมงานได้ถึง 960,000 บาทต่อปี หรือลดลง 80%

บัณฑิตวิทยาลัย

สาขาวิชา การจัดการระบบการผลิต

และโลจิสติกส์แบบลิ้น

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

PARINYA THARAJARAWAT : A STUDY OF FACTORS AFFECTING DEFECTS
IN SILVER JEWELRY CASTING PROCESS BY TAGUCHI EXPERIMENTAL
DESIGN TECHNIQUE. ADVISOR : ASSOC.PROF.DR.PICHIT SUKCHAREONPONG,
71 PP.

Objectives of this research is the study of factors that affect the occurrence of defects in the casting process of silver jewelry and the adoption of a design of experiment method to minimize the defects caused by the silver casting process by starting a study in the original production process to determine the factors to be studied and collect the number of defects that occur and lead to compare with the defects found after the improvement.

From the data collection, it was possible to determine 8 factors to be studied by dividing the factors into 2 levels of factors, 1 factor and 3 levels of factors, 7 factors. Therefore, the Taguchi experimental design was adopted. It corresponds to the pattern at L18 ($2^1 \times 3^7$) with only 18 experiments. Across all 18 trials, the best showed an average of 7.6 defects per band, while the most found 27 defects per band. When the S/N ratio was analyzed, the level of each factor that would result in the least defect was obtained, and when the results were confirmed according to the analysis, only 3.75 defects per band were found. Compared to the pre-production average defect of 30.48 points per loop, it shows that if the results of this research were produced, defects could be reduced by 87.69%. And can help reduce the cost of repair work up to 960,000 Baht per year or a reduction of 80%.

Graduate School
Field of Study Lean Management System
and Logistics Management
Academic Year 2022

Student's Signature.....
Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

สารนิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาและอนุเคราะห์จากท่าน รองศาสตราจารย์ ดร.พิชิต สุขเจริญพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาสารนิพนธ์ที่ได้กรุณาเสียเวลาอันมีค่า ให้ความรู้ คำปรึกษาและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในการศึกษามาโดยตลอด รวมถึงการตรวจ แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี จนสารนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์ ในที่สุด ผู้ศึกษาขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์หลักสูตรปริญญาบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต สาขาการจัดการ ระบบการผลิตและโลจิสติกส์แบบสิ้น สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ที่ได้ให้ความรู้และประสบการณ์ อันมีคุณค่าตลอดเวลาที่ศึกษา และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านของสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ที่ได้ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอขอบคุณบริษัทกรณีศึกษา ทั้งท่านผู้บริหาร ทีมงานและพนักงานของบริษัทกรณีศึกษา ที่สนับสนุนในด้านข้อมูลความรู้เฉพาะด้านและข้อแนะนำต่างๆ ตลอดจนความร่วมมือในการปฏิบัติการแก้ไขปัญหาต่างๆ เป็นอย่างดี ผู้ศึกษาขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงจากใจจริง สำหรับการสนับสนุน และความเอื้อเฟื้อต่างๆ ที่มีให้

สุดท้ายนี้ ผู้ศึกษาใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้กำเนิดและครอบครัวทุกคน ที่สนับสนุนและมอบโอกาสทางการศึกษา จนทำให้ผู้ศึกษาทำได้สำเร็จมาจนถึงจุดนี้

ปริญญา ทราจารย์วัฒน์

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
สภาวะความเป็นมา แนวทางเหตุผล ปัญหา.....	1
ที่มาและความสำคัญของปัญหา	2
วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	5
ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย.....	5
ขั้นตอนการศึกษา/การวิจัย และการดำเนินงาน	6
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	7
ระยะเวลาในการดำเนินงาน	7
2 แนวคิด ทฤษฎี งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
คุณสมบัติของโลหะเงิน.....	8
กระบวนการผลิตเครื่องประดับ	10
การจำแนกตำหนิที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อเครื่องประดับ	16
การออกแบบการทดลอง.....	28
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	37
3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	40
วิธีการดำเนินงาน/แนวทางการแก้ปัญหา.....	40
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา.....	45

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิจัยและสรุปผล.....	47
เก็บข้อมูลการผลิตปัจจุบัน.....	47
ผลการดำเนินการทดลองตามการออกแบบการทดลอง	48
การวิเคราะห์ผลการทดลอง	50
ยืนยันผลการทดลอง.....	54
เปรียบเทียบผลการทดลอง ก่อนและหลังปรับปรุง	54
ข้อเสนอแนะสำหรับกระบวนการผลิตเครื่องประดับเงิน.....	56
บรรณานุกรม.....	57
ภาคผนวก.....	60
ภาคผนวก ก. ผลการทดลอง.....	61
ภาคผนวก ข. ผลการทดลองด้วยระดับปัจจัยที่คาดการณ์	69
ประวัติผู้เขียนสารนิพนธ์	71

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1 แผนการดำเนินการวิจัย	7
2 สมบัติของโลหะเงิน.....	9
3 กรณีผลกระทบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของ Full Factorial Design	30
4 ออโรโกนอลอาร์เรย์ชนิด $L_9 3^4$	33
5 ออโรโกนอลอาร์เรย์ชนิด $L_4 2^3$	34
6 ครอสอาร์เรย์ชนิด $L_9 \times L_4$	34
7 ขั้นตอนและการดำเนินงาน	41
8 หัวข้อด้านคุณภาพที่ทำการเก็บข้อมูลและบันทึก	43
9 ระดับของตัวแปรที่กำหนดสำหรับการออกแบบการทดลอง	44
10 ปัจจัยที่ใช้ผลิตในปัจจุบัน	47
11 คำหิที่พบจากการสุ่มเก็บตัวอย่างของผลิตปัจจุบัน.....	47
12 ระดับของปัจจัยที่กำหนดสำหรับการออกแบบการทดลอง	48
13 ลำดับการทดลองตามการออกแบบ Taguchi Method $L_{18} (2^1 \times 3^7)$	49
14 ผลการทดลองทั้ง 18 การทดลอง	50
15 ผลการวิเคราะห์ Response Table for SN Ratios.....	50
16 ผลการวิเคราะห์ Response Table for Means ของ Total Porosity	53
17 ปัจจัยที่เหมาะสมกับการหล่อที่ทำให้เกิดตำหนิน้อยที่สุด	54
18 ข้อมูลการเก็บผลการทดลองตามแนวทางทากูชิ L_{18}	62
19 ภาพตัดขวางของชิ้นงานตัวอย่างจากแต่ละการทดลอง.....	68
20 ข้อมูลการเก็บผลการทดลองการด้วยค่าของปัจจัยที่จะทำให้ Total Porosity มีค่าน้อยที่สุด.....	70

สารบัญรูป

รูป		หน้า
1	มูลค่าการส่งออกสินค้าของประเทศไทย.....	1
2	แผนผังแสดงขั้นตอนกระบวนการผลิตเครื่องประดับ	3
3	รูขนาดเล็กบนผิวเครื่องประดับ.....	4
4	รูลักษณะคล้ายกิ่งไม้บนผิวเครื่องประดับ	4
5	รูลักษณะที่ไม่แน่นอนบนผิวเครื่องประดับ.....	4
6	ผิวเครื่องประดับหยาบ	4
7	ตุ่มแข็ง	5
8	รอยแตก.....	5
9	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	6
10	แร่โลหะเงิน	8
11	กระบวนการผลิตเครื่องประดับ.....	10
12	ลักษณะของรูพรุนจากการหดตัว	16
13	ลักษณะรูพรุนเนื่องจากแก๊ส	18
14	ชิ้นงานที่น้ำโลหะไหลเข้าโพรงแบบไม่สมบูรณ์.....	19
15	ลักษณะของผิวชิ้นงานที่หยาบ	20
16	ลักษณะฟองโลหะบนชิ้นงานหล่อ	22
17	ลักษณะคราบน้ำบนผิวชิ้นงาน	23
18	ชิ้นงานหล่อเปราะ.....	23
19	ชิ้นงานหล่อเป็นครีบ	24
20	ชิ้นงานที่มีผิวหยาบและดำเนื่องจากออกซิไดซ์	25
21	ชิ้นงานหล่อที่มีสิ่งแปลกปลอมปน.....	26
22	ชิ้นงานหล่อที่หัก.....	27
23	ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	40
24	ขั้นตอนการผลิตเครื่องประดับเงิน	42
25	เอกสารสำหรับบันทึกผลการทดลอง	44
26	โปรแกรม Mini Tab	45
27	โปรแกรม Microsoft Excel	45
28	Casting Machine.....	46
29	เครื่องขัดเตรียมผิวตัวอย่าง	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
30	Digital Microscope	46
31	ผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Minitab	49
32	ระดับความสัมพันธ์ของปัจจัยของ Total Porosity	52
33	ผลการคาดการณ์ด้วย Minitab	53
34	การกำหนดค่าของปัจจัย	54
35	จำนวนตำหนีก่อน-หลังปรับปรุง	55
36	ค่าใช้จ่ายในการซ่อมงาน ก่อน-หลังปรับปรุง	55

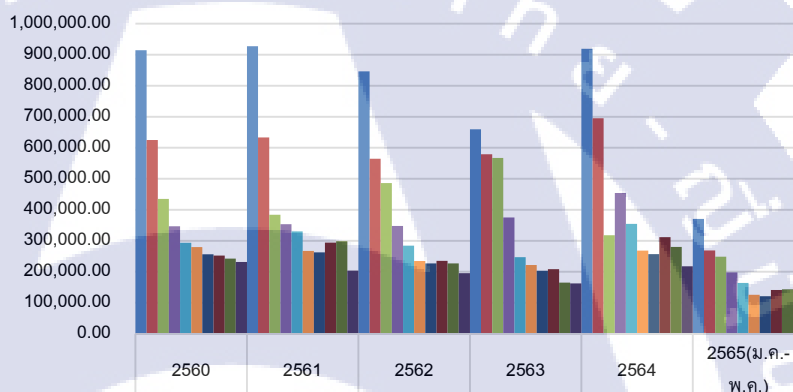
บทที่ 1

บทนำ

สภาวะความเป็นมา แนวทางเหตุผล ปัญหา

อุตสาหกรรมเครื่องประดับถือเป็นอุตสาหกรรมที่มีมูลค่าสูงเป็นอันดับที่สามของการส่งออกสินค้าไปต่างประเทศโดยปี 2564 มีมูลค่าสามแสนหนึ่งหมื่นเจ็ดพันล้านบาท ซึ่งมีมูลค่าลดลงจากปี 2563 ซึ่งมีมูลค่าห้าแสนหกหมื่นเจ็ดพันล้าน โดยมีมูลค่าลดลงสองแสนห้าหมื่นล้าน ซึ่งอาจเป็นผลกระทบจากภาวะโควิด-19 และจากสภาพการแข่งขันทางธุรกิจ

มูลค่าการส่งออกสินค้าของไทย



	2560	2561	2562	2563	2564	2565(ม.ค.-พ.ค.)
รถยนต์ อุปกรณ์และส่วนประกอบ	914,343.87	927,501.26	846,435.16	659,509.97	919,153.18	370,493.74
เครื่องคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์และส่วนประกอบ	624,896.13	633,150.25	564,626.60	579,000.20	694,943.36	268,733.65
อัญมณีและเครื่องประดับ	434,890.66	383,976.66	486,216.02	567,046.03	317,888.61	248,785.29
ผลิตภัณฑ์ยาง	346,897.45	353,442.86	347,649.54	375,387.89	454,219.94	198,228.98
เม็ดพลาสติก	293,551.45	330,156.09	284,263.00	247,316.19	354,731.17	164,213.82
แผงวงจรไฟฟ้า	279,659.07	267,100.98	234,892.15	222,053.38	268,519.79	125,921.15
เครื่องจักรกลและส่วนประกอบของเครื่องจักรกล	256,241.46	262,831.45	227,071.40	203,123.38	257,174.19	121,142.08
เคมีภัณฑ์	252,336.45	294,215.38	235,246.69	208,675.83	311,876.02	141,120.83
น้ำมันสำเร็จรูป	242,352.13	298,921.30	226,962.64	165,145.07	280,355.69	143,487.69
สินค้าอุตสาหกรรมอื่น ๆ	231,862.40	203,569.44	195,769.75	162,549.29	217,649.62	104,802.94

รูปที่ 1 มูลค่าการส่งออกสินค้าของประเทศไทย

ที่มา : กระทรวงพาณิชย์. (2565). มูลค่าส่งออกสินค้าของประเทศไทย. ออนไลน์.

ในสภาวะปัจจุบันที่การแข่งขันทางด้านการผลิตมีสูงในทุกอุตสาหกรรม ซึ่งปัจจัยสำคัญก็คือ การแข่งขันทั้งด้านเวลาในการผลิต ต้นทุนของการผลิต และคุณภาพ ซึ่งหากใครสามารถบริหารจัดการทั้ง 3 สิ่งนี้ได้ก็ถือเป็นผู้ที่มีความสามารถในการแข่งขันที่ได้เปรียบผู้ผลิตรายอื่นเป็นอย่างมาก และเช่นเดียวกันสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับที่ก็มี 3 ปัจจัยนี้เป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการแข่งขันกับผู้ผลิตรายอื่นๆ แต่ปัจจัยทั้ง 3 นี้ไม่ใช่เรื่องง่ายที่จะสามารถควบคุมได้โดยง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตแบบรับจ้างผลิตให้กับแบรนด์สินค้าต่างๆ ในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับของไทยด้วยนั้น ยิ่งเป็นยิ่งที่ยากที่จะสามารถควบคุมปัจจัยทั้ง 3 นี้ให้เป็นไปตามที่ต้องการได้ เพราะลูกค้าจะเป็นผู้กำหนดทั้งสิ้น ซึ่งโดยมากจะมีระยะเวลาในการผลิตที่สั้นมีระยะเวลาเพียงไม่กี่สัปดาห์ ราคาที่จ้างผลิตไม่ได้สูงมากนัก และคุณภาพของเครื่องประดับนั้นถูกตรวจสอบตำหนิในระดับไมโครเมตร ซึ่งหากสินค้าที่ผลิตนั้นมีตำหนิเกิดขึ้นก็ต้องมีการผลิตซ้ำหรือซ่อมแซม ซึ่งจะส่งผลให้ส่งมอบสินค้าล่าช้า ต้นทุนการผลิตที่สูง และคุณภาพของชิ้นงานไม่อยู่ในเกณฑ์ ซึ่งจะส่งผลเสียเป็นอย่างมากกับบริษัทนั้นๆ ดังนั้นการควบคุมคุณภาพจึงถือเป็นเรื่องสำคัญที่สุดของทั้ง 3 ปัจจัยหลักสำหรับการแข่งขันทางธุรกิจ

ที่มาและความสำคัญของปัญหา

กรณีของบริษัทศึกษา XYZ นั้น ได้ดำเนินการผลิตเครื่องประดับในลักษณะการรับจ้างผลิตให้กับลูกค้าแบรนด์ต่างๆ ทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ ซึ่งมีทั้งเครื่องประดับเงิน เครื่องประดับทอง และเครื่องประดับแพลทินัม ซึ่งเครื่องประดับทองและเครื่องประดับแพลทินัมนั้นมักจะมีรูปแบบที่ลักษณะและรูปแบบที่หลากหลาย และจำนวนการผลิตต่อแบบไม่มากนัก ทำให้ไม่สามารถจัดการวางแผนรูปแบบผลิตสำหรับแมสโปรดักชันได้ ต้องอาศัยทักษะ ประสบการณ์และความชำนาญในการผลิตที่เฉพาะตัวของช่างในการปรับแก้ให้เหมาะสมกับการผลิต ซึ่งสินค้าที่ผลิตก็มักพบตำหนิอยู่บ่อยครั้งส่งผลกระทบต่อ ระยะเวลาการผลิต ต้นทุนการผลิต และคุณภาพของสินค้าโดยตรง แต่ในขณะที่สินค้าที่เป็นเครื่องประดับเงินมักมีลักษณะหรือรูปแบบที่เหมือนหรือคล้ายกันและมีปริมาณในการผลิตค่อนข้างมาก ซึ่งสามารถปรับแก้ปัจจัยในการผลิตให้เข้ากับการผลิตรูปแบบแมสโปรดักชันได้ แต่ในการผลิตที่ผ่านมาพบว่า มีตำหนิในสินค้าอยู่ 100% ซึ่งต้องทำการซ่อมแซมหรือทำการผลิตสินค้าซ้ำหลายครั้งจึงจะสามารถส่งสินค้าได้

ปี 2564 บริษัทได้รับผลกระทบจากเศรษฐกิจอย่างมาก เนื่องด้วยลูกค้าหลายรายต่างมีการสั่งซื้อที่น้อยลงและยังได้มีการขอลดค่าจ้างสำหรับการผลิตลงอีก ซึ่งส่งผลให้รายได้ต่อหน่วยการผลิตของบริษัทลดลงตามไปด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องประดับเงินที่มีกำไรต่อหน่วยต่ำอยู่แล้วยิ่งประสบปัญหาหนัก จึงมีความจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องทำการลดต้นทุนการผลิตของเครื่องประดับเงินลง โดยจะต้องลดประมาณของเสียที่เกิดขึ้นในการผลิตเครื่องประดับลงให้ได้ เพื่อที่จะสามารถคงกำไรบางส่วนไว้ และรักษาลูกค้าดั้งเดิมของบริษัทให้คงอยู่ต่อไป

ดังนั้นการแก้ปัญหาในกระบวนการผลิตเครื่องประดับเงินจึง เหมาะสมกับการแก้ปัญหา ด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง (Design Of Experiment, DOE) เนื่องด้วยจำนวนของเครื่องประดับ ที่ผลิตมีจำนวนมาก และรูปแบบไม่หลากหลายและมีลักษณะคล้ายกัน ซึ่งทำให้สามารถใช้ปัจจัยใน การผลิตที่เหมือนกันในการผลิตได้ แต่เนื่องด้วยวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองมีมูลค่าสูง ดังนั้นการนำ กระบวนการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ (Taguchi Method) ที่ใช้เพื่อลดจำนวนการทดลองให้ น้อยลงจะยิ่งช่วยให้การทดลองได้ผลที่น่าเชื่อถือในขณะที่ใช้ต้นทุนในการทดลองไม่สูงมากนัก เมื่อเทียบกับการทดลองแบบ Full Factorial ซึ่งคาดว่าเมื่อทำการทดลองแล้วจะสามารถหาปัจจัยใน การผลิตที่เหมาะสมและให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่จะทำให้กระบวนการผลิต เครื่องประดับเงินมีคุณภาพสูงและลดการเกิดของเสียได้ และจะสามารถช่วยให้บริษัท XYZ สามารถ ลดต้นทุนในการซ่อมงานของกระบวนการผลิตเครื่องประดับเงินได้

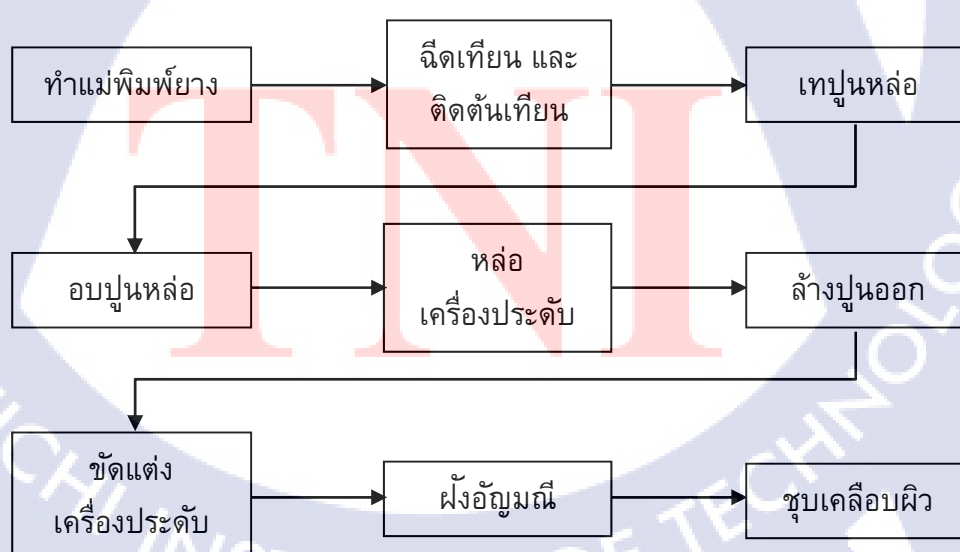
โดยมีข้อมูลทั่วไปของการผลิตเครื่องประดับดังนี้

เครื่องประดับสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มตามชนิดของโลหะที่ใช้ในการผลิต คือ เครื่องประดับแท้ (Fine Jewelry) และเครื่องประดับเทียม (Costume Jewelry)

เครื่องประดับแท้ จะผลิตด้วยโลหะในกลุ่มโลหะมีค่า (Precious Metal Group) หรือที่ พบได้โดยทั่วไปคือ เครื่องประดับเงิน เครื่องประดับทอง และเครื่องประดับแพลทินัม

เครื่องประดับเทียม จะผลิตจากโลหะอื่นๆ ที่ไม่ใช่โลหะในกลุ่มของโลหะมีค่า เช่น เครื่องประดับ ทองเหลือง เครื่องประดับดีบุก เครื่องประดับสำริด หรือเครื่องประดับที่ทำจากเรซินและพลาสติก ก็นับเป็นเครื่องประดับในกลุ่มเครื่องประดับเทียมเช่นกัน

วิธีการผลิตเครื่องประดับนั้นมีอยู่หลายวิธีแต่วิธีที่แพร่หลายและเป็นที่ยอมรับมากที่สุด คือกระบวนการหล่อแบบประณีต (Lost Wax Casting) โดยมีกระบวนการผลิต ดังนี้



รูปที่ 2 แผนผังแสดงขั้นตอนกระบวนการผลิตเครื่องประดับ

ซึ่งตำหนิที่มักพบจากกระบวนการผลิตเครื่องประดับสามารถจำแนกได้ดังนี้

1) ตำหนิขนาดเล็กบนผิวเครื่องประดับ



รูปที่ 3 รุขขนาดเล็กบนผิวเครื่องประดับ

2) ตำหนิลักษณะคล้ายกิ่งไม้บนผิวเครื่องประดับ



รูปที่ 4 รุลักษณะคล้ายกิ่งไม้บนผิวเครื่องประดับ

3) ตำหนิลักษณะที่ไม่แน่นอนบนผิวเครื่องประดับ



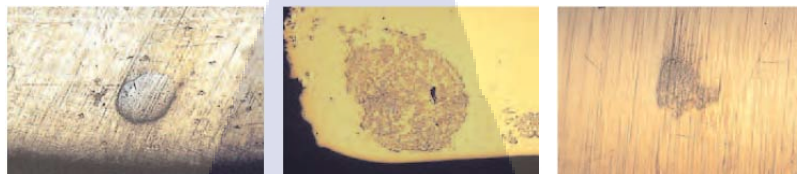
รูปที่ 5 รุลักษณะที่ไม่แน่นอนบนผิวเครื่องประดับ

4) ตำหนิผิวเครื่องประดับหยาบ



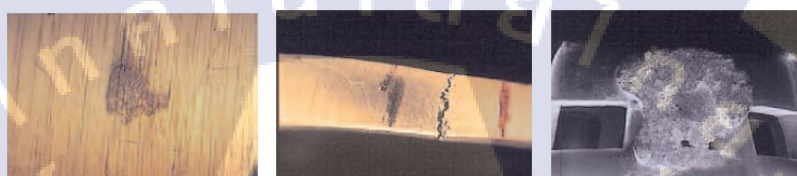
รูปที่ 6 ผิวเครื่องประดับหยาบ

5) ตำหนิตุ่มแข็ง



รูปที่ 7 ตุ่มแข็ง

6) ตำหนิรอยแตก



รูปที่ 8 รอยแตก

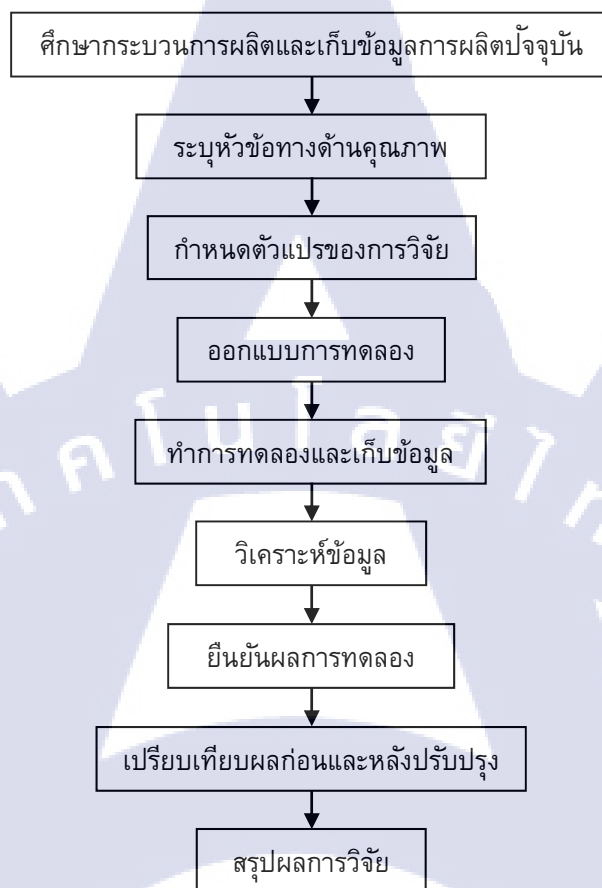
วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดของเสียในกระบวนการผลิตเครื่องประดับเงิน
2. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเครื่องประดับเงินของบริษัท XYZ ด้วยกระบวนการออกแบบการทดลอง (DOE)
3. เพื่อลดเปอร์เซ็นต์การเกิดของเสียที่เกิดจากในกระบวนการผลิตเครื่องประดับเงินของบริษัท XYZ ด้วยกระบวนการออกแบบการทดลอง (DOE)

ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของการผลิตเครื่องประดับเงิน
2. ออกแบบการทดลองระหว่างปัจจัยต่าง ๆ เพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของการผลิตเครื่องประดับเงิน และสามารถบอกได้ว่าปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลให้ได้คุณภาพของเครื่องประดับเงินที่ดีที่สุด
3. เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของการเกิดตำหนิหรือข้อบกพร่องของเครื่องประดับเงินก่อนและหลังการปรับปรุงการผลิตด้วยการออกแบบการทดลอง

ขั้นตอนการศึกษา/การวิจัย และการดำเนินงาน



รูปที่ 9 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถระบุได้ว่ามีปัจจัยและปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลต่อการเกิดของเสียในการผลิตเครื่องประดับเงิน
2. สามารถระบุได้ว่าต้องผลิตเครื่องประดับเงินภายใต้ปัจจัยเช่นใดจึงจะส่งผลให้ของเสียในการผลิตเครื่องประดับเงินน้อยที่สุด
3. สามารถลดการเกิดข้อบกพร่องในเครื่องประดับเงินได้มากกว่า 50%

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้นำหลักทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเครื่องประดับเงินและคุณสมบัติของโลหะเงิน มาใช้เป็นแหล่งอ้างอิงในการกำหนดตัวแปรที่ใช้สำหรับในการออกแบบการทดลอง และได้ใช้ทฤษฎีสำหรับการออกแบบการทดลองเป็นเกณฑ์ในการกำหนดจำนวนและวิธีการทดลองในงานวิจัยนี้ โดยแนวคิดและทฤษฎีหลักที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยนี้ มีดังนี้

1. คุณสมบัติของโลหะเงิน
2. กระบวนการผลิตเครื่องประดับ
3. การจำแนกตำหนิที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อเครื่องประดับ
4. การออกแบบการทดลอง
5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คุณสมบัติของโลหะเงิน

โลหะเงิน (Ag) เป็นโลหะสีขาว วาว อ่อน นุ่มเป็นโลหะอันดับสองรองจากทองคำในด้านความเหนียวที่ดีแม้เป็นแผ่นบางๆ ได้ และมีคุณสมบัติ ผิวขี้ดวาววาม เงินแท้ค่อนข้างมากเกินไป ไม่เหมาะกับการใช้งานประจำวัน โลหะผสมเงินที่นิยมใช้คือ เงินสเตอร์ลิง มีเนื้อเงิน 92.5% และโลหะอื่นๆ อีก 7.5% ซึ่งโดยมากมักเป็นทองแดง โลหะผสมชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้กันมากในการทำเครื่องประดับ สำหรับงานอื่นๆ เช่นเงินบริทาเนีย จะมีโลหะเงิน 95.8% และโลหะอื่นๆ 4.2%



รูปที่ 10 แร่โลหะเงิน

เงินสเตอร์ลิง (Sterling Silver) มีส่วนผสมของเงินบริสุทธิ์ 92.5% และอัลลอยหรือทองแดง 7.5% ทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้น แต่ยังคงมีความอ่อนทำให้สามารถทำงานได้ง่ายจึงเป็นที่นิยมของช่างทำเครื่องประดับและภาชนะเงิน (Silver Ware) คำว่า สเตอร์ลิง มาจากชื่อเอสเตอร์ลิง (Esterling) ซึ่งเป็นชื่อของบริษัท Eastern Germans ที่ได้รับการว่าจ้างจากพระเจ้าเฮนรี่ที่ 2 ของอังกฤษในการผลิตเหรียญกษาปณ์

ในการหลอมโลหะเงินผสมทองแดงต้องกำจัดออกซิเจนที่มีอยู่ให้มีระดับต่ำลงก่อนหล่อ ที่อุณหภูมิ 1,050-1,100 เซลเซียส โดยลดออกซิเจนด้วยฟอสฟอรัส ร้อยละ 0.025 หรือด้วยแคดเมียม ร้อยละ 0.5 หรือมากกว่า หรือด้วยลิเทียม และหลอมภายใต้สภาวะที่ปกคลุมด้วยแกรไฟต์ การอบอ่อนช่วงสั้นๆ ที่อุณหภูมิ 540-650 เซลเซียสและปล่อยให้เย็นตัวในบรรยากาศ หากใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าจะต้องควบคุมบรรยากาศให้ดีเพื่อป้องกันการจับตัวกับออกซิเจน

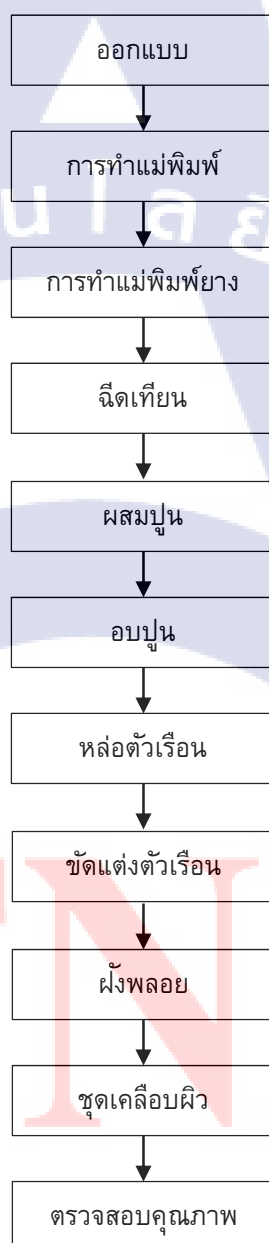
เงินสเตอร์ลิงสามารถบ่มแข็งได้ โดยบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 280 เซลเซียส ในเวลา 2 ชั่วโมง หรืออุณหภูมิ 300 เซลเซียส ในเวลา 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 2 สมบัติของโลหะเงิน

เลขอะตอม	47	
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	2, 8, 18, 18, 1	
น้ำหนักอะตอม	107.868	
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	961	
จุดเดือด ($^{\circ}\text{C}$)	2210	
ความถ่วงจำเพาะ (g/cm^3)	10.5	
รัศมีอะตอม (nm)	0.144	
โครงสร้างผลึก	FCC	ที่ 20 เซลเซียส
ค่าคงที่แลตทิส (nm)	0.408556	ที่ 20 เซลเซียส
ความจุความร้อนในการหลอมละลาย (cal/g)	25	
การนำความร้อน ($\text{cal/cm}^2/\text{cm/s}/^{\circ}\text{C}$)	1	ที่ 0 เซลเซียส
ความแข็ง (HB)	30	
การยืดตัวด้วยแรงดึง (10^6 psi)	11	
โมดูลัสของยัง (E, GPa)	82.7	
บัลค์โมดูลัส (K, GPa)	103.6	
โมดูลัสเฉือน (G, GPa)	30.3	
อัตราส่วนของพัลส์ของ	0.367	
ความเหนียว	3.9	
แรงตึงผิว (ergs/cm^2)	930	

กระบวนการผลิตเครื่องประดับ

กระบวนการผลิตเครื่องประดับเงินแบบหล่อ มีกระบวนการผลิตมากมายหลายขั้นตอน และลำดับในการผลิตแต่ละขั้นตอนจะแตกต่างกันออกไปตามรูปแบบของผลิตภัณฑ์ ซึ่งแต่ละผลิตภัณฑ์ก็มีลักษณะรูปแบบแตกต่างกันไป เช่น ฟังก์พลอย ลงยา แต่สามารถสรุปกระบวนการผลิตหลักๆ แสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 กระบวนการผลิตเครื่องประดับ

1. การออกแบบ

ในการผลิตเครื่องประดับเงิน ขั้นแรกจะต้องทำการออกแบบชิ้นงานก่อน โดยเริ่มรับออเดอร์จากลูกค้า แล้วแจ้งรายละเอียดของข้อมูลต่างๆ เกี่ยวกับชิ้นงานที่ลูกค้าต้องการแก่แผนกออกแบบ แผนกออกแบบจะใช้ข้อมูลที่ได้อามาเพื่อเป็นแนวคิดในการออกแบบชิ้นงาน การออกแบบจะเป็นการวาดรูปชิ้นงาน ซึ่งยังไม่ได้พิจารณาความเป็นไปได้ในการผลิตจริง เมื่อออกแบบเสร็จแล้ว แผนกออกแบบจะส่งแบบให้ลูกค้าพิจารณาว่าใช้ได้หรือไม่ ถ้าใช้ได้ แผนกออกแบบจะส่งให้แผนกทำแม่พิมพ์นำไปพิจารณาทำเป็นรายละเอียดของสเปกหรือข้อมูลรายละเอียดของการผลิต ถ้ามีรายละเอียดบางอย่างที่ไม่อาจผลิตได้จริง จะมีการแก้ไขแบบเพื่อให้มีความเป็นไปได้ที่จะผลิตจริง

2. การทำแบบแม่พิมพ์

การทำแบบแม่พิมพ์เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปแม่พิมพ์ (Pattern) โดยจะแบ่งเป็น 2 วิธี คือ 1) การขึ้นรูปด้วยมือ และ 2) การขึ้นรูปด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งในปัจจุบันมักนิยมใช้วิธีการขึ้นรูปด้วยคอมพิวเตอร์มากกว่าเนื่องจากมีความสะดวก รวดเร็ว และง่ายต่อการแก้ไขมากกว่า

3. การทำแบบพิมพ์ยาง (Rubber Mold Making)

การทำแบบพิมพ์ยางเป็นกรรมวิธีการทำแบบหล่อสำหรับการฉีดหุ่นขี้ผึ้ง (Wax Pattern) ซึ่งจะนำไปใช้เป็นแบบสำหรับการหล่อปูนพลาสเตอร์เพื่อหล่อแบบขี้ผึ้งหายต่อไปวัตถุดิบที่ใช้ได้แก่ ยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ ซึ่งทั้ง 2 ชนิดนี้จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน โดยยางธรรมชาติจะมีความคงทนที่สูงกว่า และมีอายุการใช้งานที่นานกว่า แต่ในขณะที่ยางสังเคราะห์จะมีความยืดหยุ่นที่สูงกว่าและมีความแข็งที่น้อยกว่า ซึ่งจะเหมาะกับการใช้งานในลักษณะที่แตกต่างกัน

3.1 การเตรียมบล็อกยาง ทำได้โดยนำแผ่นยางนอกมาตัดให้มีขนาดเท่ากับบล็อกยาง แล้ววางยางนอกรองด้านล่างของบล็อก 1-2 ชั้น หลังจากนั้นวางแม่พิมพ์เงินลงในบล็อก วางยางที่ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ปิดทับแม่พิมพ์ให้แน่นพอสมควร และมีโพรงช่องว่างน้อยที่สุดแล้วปิดทับด้านบนด้วยแผ่นยางอีกครั้ง

3.2 การอัดบล็อกยาง นำบล็อกยางไปอัดด้วยเตาอัดยาง โดยตั้งอุณหภูมิที่ประมาณ 150-180 องศาเซลเซียส สำหรับยางธรรมชาติ และ 90-120 องศาเซลเซียส สำหรับยางสังเคราะห์ ระยะเวลาที่ใช้ขึ้นกับขนาดของบล็อกพิมพ์ยาง เช่น บล็อกขนาดใหญ่ ขนาดกลาง และขนาดเล็ก ใช้เวลาประมาณ 60 50 และ 45 นาที ตามลำดับ

3.3 การผ่ายาง ทำได้โดยยึดบล็อกยางด้วยปากกาจับแบบหนีบ จากนั้นใช้มีดผ่าตัดกรีตบล็อกยางเพื่อเอาแบบพิมพ์เงินออกมา ขั้นตอนนี้ต้องอาศัยฝีมือและความชำนาญอย่างมาก เนื่องจากในการลงมีดกรีตยางแต่ละครั้งจะมีผลต่อความสนิทของรอยประกบระหว่างบล็อกพิมพ์ยางชั้นบนและชั้นล่าง อีกทั้งต้องกรีตยางภายในบล็อกซึ่งประกอบไปด้วยส่วนของไส้แบบ (Core)

และระบบจ่ายน้ำโลหะ (Gating System) อันได้แก่ รูเข้า (In Gate) รูวิ่ง (Runner) และรูขึ้นด้านข้าง (Side Riser) เช่นเดียวกับการทำแบบหล่องานโลหะทั่วไป

4. การฉีดเทียน (Wax Injection)

นำแบบพิมพ์ยางที่ผ่าเสร็จแล้วมาฉีดขี้ผึ้ง ซึ่งขั้นแรกต้องเตรียมขี้ผึ้งก่อน โดยหลอมละลายขี้ผึ้งในหม้อฉีดเทียนและปรับความดันลมและอุณหภูมิให้เหมาะสม การฉีดเทียนให้ใช้แผ่นเหล็กหนาผิวเรียบประกบทั้งด้านล่างและด้านบนของแบบพิมพ์ยาง เพื่อให้แรงกดกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งแบบพิมพ์ยาง ในการฉีดเทียนให้กดตรงส่วนที่ทำไว้ให้ขี้ผึ้งเหลวไหลผ่านเข้ากับหัวฉีดของหม้อ ฉีดเทียนเสร็จแล้ววางทิ้งไว้ให้แข็งตัว จากนั้นจึงจะฉีดแบบอื่นต่อไป ในระหว่างการฉีดบางครั้งบริเวณหัวฉีดจะมีการอุดตันของขี้ผึ้งที่เกิดการแข็งตัว ดังนั้นก่อนการฉีดครั้งต่อไปจึงต้องใช้ไฟลนตรงบริเวณหัวฉีดให้ร้อนจนขี้ผึ้งส่วนที่แข็งตัวเกิดการหลอมเหลวเสียก่อนจึงค่อยฉีดไม่เช่นนั้นแล้วจะทำให้เกิดปัญหาการฉีดไม่เต็มเนื่องจากการอุดตันขวางทางเดินของขี้ผึ้งที่แข็งตัวนอกจากนี้จะมีการใช้แปรงชุบน้ำพอลิเมอร์ แปรงบริเวณซอกมุมและลวดลายของแบบเพื่อให้เศษขี้ผึ้งที่ติดอยู่ภายในแบบออกไปให้หมด การฉีดขี้ผึ้งครั้งต่อไปจึงจะได้ลวดลายที่สมบูรณ์และเพื่อความสะดวกในการแกะแบบขี้ผึ้ง ก่อนการฉีดครั้งต่อไปจะต้องมีการลงแป้งแล้วใช้ปืนลมเป่าลมลงบนแบบที่ลงแป้งแล้วเพื่อไม่ให้แป้งติดแบบมากเกินไป และยังช่วยให้แบบแห้งอีกด้วย การลงแป้งไม่จำเป็นต้องทำทุกครั้งจากแกะแบบ แต่ก็ควรหมั่นลงแป้งที่แบบพิมพ์ยางบ่อยๆ บางครั้งงานฉีดอาจไม่สมบูรณ์ กล่าวคือฉีดไม่เต็มแบบ ถ้าแบบขี้ผึ้งขาดไปมากก็จะต้องนำแบบขี้ผึ้งที่ได้นั้นไปทำการทิ้ง แต่ถ้าแบบขี้ผึ้งนั้นไม่สมบูรณ์เพียงเล็กน้อยคือส่วนที่สำคัญไม่ขาดหายไปหรือมีขี้ผึ้งส่วนเกินติดออกมาจาก เนื่องจากกรกดแบบอย่างไม่แน่นก็ต้องซ่อมแบบขี้ผึ้งนั้น โดยการใช้มีดดาเทียมเติมเต็มส่วนที่ขาดหายไปในกรณีที่มีขี้ผึ้งส่วนเกินที่บริเวณขอบแบบเทียน หรือมีขี้ผึ้งส่วนเกินมาปิดรายละเอียดของแบบเช่น ร่องจิกไขปลา ก็จะใช้มีดแต่งที่มีปลายแหลมลนไฟจากตะเกียงแอลกอฮอล์ทำการตกแต่งแบบและชุบผิวแบบขี้ผึ้งให้เรียบก่อนนำไปติดต้นเทียน

5. การติดต้นเทียนหรือติดข้อ

ก่อนอื่นจะต้องทำก้านต้นเทียนขึ้นมาก่อนโดยหลอมขี้ผึ้งเทลงในแบบก้านต้นเทียนซึ่งทำจากโลหะอลูมิเนียม รอจนกว่าขี้ผึ้งจะเป็นตัวจึงแกะออกจากแบบซึ่งก้านต้นเทียนจะมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกกลี้ยงยาวประมาณ 6 นิ้ว ต่อจากนั้นจึงทำการติดต้นเทียนโดยใช้หัวแร้งที่มีความร้อนแล้วนำมาแตะปลายก้านแบบขี้ผึ้งจนขี้ผึ้งหลอมจึงนำไปติดบนก้านต้นเทียนโดยให้แบบขี้ผึ้งให้เอียงทำมุมกับก้านต้นเทียน จำนวนแบบขี้ผึ้งที่ติดบนต้นเทียนจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องประดับ

6. การหล่อตัวเรือน (Casting)

การหล่อตัวเรือนเป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปตัวเรือนเครื่องประดับ โดยอาศัยวิธีการหล่อแบบต่างๆ ร่วมกัน ได้แก่ การหล่อแบบซีพิงหาย (Lost-Wax Precision Casting) การหล่อแบบปูนปลาสเตอร์ (Plaster Mold Casting) และการหล่อแบบเหวี่ยง (Centrifuging Casting) วัสดุดิบหลักที่ใช้ ได้แก่ เงิน อัลลอยด์ ปูนปลาสเตอร์ เป็นต้น การหล่อตัวเรือนเครื่องประดับมีขั้นตอนดังนี้

6.1 คำนวณหาน้ำหนักเงินสเตอร์ลิงที่จะใช้ การคำนวณนั้นจำเป็นต้องทราบน้ำหนักจริงของต้นเทียน โดยคำนวณได้จาก

น้ำหนักต้นเทียน = น้ำหนักฐานยางพร้อมต้นเทียน - น้ำหนักฐานยาง

เมื่อทราบน้ำหนักที่แท้จริงของต้นเทียนแล้ว จึงนำมาคูณด้วยความถ่วงจำเพาะของสเตอร์ลิงซิลเวอร์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10.5 และคูณด้วยค่าเผื่อจากปัจจัยอื่นๆ อีก 20% ก็จะได้เป็นน้ำหนักของเงินสเตอร์ลิงที่จะใช้หล่อต้นเทียนนั้น

น้ำหนักของเงินสเตอร์ลิงที่ต้องการ = น้ำหนักต้นเทียน x 10.5 x 1.20

6.2 การหล่อเบ้าปูนปลาสเตอร์ โดยทำการผสมปูนปลาสเตอร์กับน้ำในอัตราส่วนผสมปูน 100 กิโลกรัมต่อน้ำ 40 กรัม โดย 1 เบ้าปูนจะใช้ปูนประมาณ 1,500 กรัมในเครื่องผสมปูนสุญญากาศจะนำต้นเทียนสวมเข้ากับเบ้าแล้ววางในเครื่องสุญญากาศต่อจากนั้นเทปูนปลาสเตอร์ลงในเบ้าเพื่อหล่อปูนทับพร้อมกับดูดอากาศไปด้วย ขั้นตอนนี้ใช้หลักการของการหล่อแบบปูนปลาสเตอร์

6.3 การอบเทียนเพื่อกำจัดซีพิงออกจากเบ้าปูน โดยตั้งอุณหภูมิของเตาหนึ่งประมาณ 150 องศาเซลเซียส นานประมาณ 2 ชั่วโมง ซีพิงจะหลอมละลายไหลออกมา เกิดเป็นโพรงภายในแม่แบบ จึงเรียกการหล่อแบบนี้ว่าการหล่อแบบซีพิงหาย จากนั้นอบปูนที่ 350 องศาเซลเซียส นานประมาณ 2 ชั่วโมง เพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิประมาณ 720 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นรักษาระดับอุณหภูมิไว้ที่ 750 องศาเซลเซียส นานประมาณ 4 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิของเตาอบลงมาอยู่ที่ระดับพอเหมาะกับประเภท ชนิด และขนาดของชิ้นงานที่ต้องการเป็นเวลานานประมาณ 1 ชั่วโมง โดยจะอยู่ที่อุณหภูมิ 550-650 องศาเซลเซียส

6.4 การหล่อแบบสุญญากาศ เทโลหะลงในเบ้าหลอมด้านบนของเครื่องและใส่เบ้าปูนที่อบจนเรียบร้อยแล้วลงในช่องสำหรับเบ้าปูนที่อยู่ด้านล่าง จากนั้นทำการดูดอากาศภายในเบ้าหลอมออกจนหมดและเติมก๊าซเฉื่อยเข้าไปปกคลุม จากนั้นให้จึงให้ความร้อนด้วยระบบเหนี่ยวนำผ่านขดลวดไฟฟ้า (Induction) เมื่อโลหะหลอมจนได้อุณหภูมิที่ต้องการแล้ว จึงทำการหล่อได้ เครื่องหล่อจะทำการยกแท่งกราฟิตที่เบ้าหลอมออกและปล่อยให้โลหะไหลผ่านเบ้าหลอมลงสู่เบ้าปูนที่อยู่ด้านล่าง แล้วพักให้โลหะอยู่ในเบ้าปูนประมาณ 120 วินาที จึงนำเบ้าปูนออกจากเครื่องหล่อได้

6.5 การล้างปูน เพื่อที่จะนำต้นงานออกจากเบ้าปูนโดยการฉีดน้ำแรงดันสูงจากเครื่องปั้มน้ำเข้าทำลายปูนปลาสเตอร์ พร้อมกับทำความสะอาดชิ้นงานไปพร้อมกัน

6.6 การจุ่มกรด เป็นการทำความสะอาดผิวชิ้นงานโดยใช้วิธีการแช่น้ำกรดกำมะถันที่มีความเข้มข้น 35 เปอร์เซ็นต์ นาน 15 นาที ตัวเรือนเครื่องประดับที่ได้จากกรรมวิธีการหล่อข้างต้นจะอยู่ในรูปของต้นงานหล่อที่มีเครื่องประดับวางซ้อนเรียงเป็นชั้นๆ ในลักษณะเช่นเดียวกันกับต้นเทียน การหล่อตัวเรือนถือเป็นหัวใจสำคัญที่สุดในการผลิตเครื่องประดับ เพราะเมื่อหล่อเป็นตัวเรือนแล้ว หากชิ้นงานที่ได้มีความบกพร่องหรือเสียหายมากก็จำเป็นต้องหล่อใหม่ซึ่งจะทำให้เกิดความสูญเสียหลายทาง ไม่ว่าจะเป็นการสูญเสียเนื้อเทียนของหุ่นขี้ผึ้งอันใหม่ การสูญเสียเนื้อวัสดุสำหรับการหล่อ และเสียเวลาไม่ต่ำกว่า 15 ชั่วโมง ในการที่จะทำการหล่อใหม่โดยเฉพาะในช่วงเวลาที่ต้องเร่งงานจะส่งผลให้ผลิตงานไม่ทันตามกำหนดเวลา ดังนั้นผู้ควบคุมงานหล่อจึงควรเป็นช่างที่ชำนาญงานและเป็นผู้ที่ช่างสังเกต สามารถปรับแต่งสภาวะของการหล่อได้อย่างเหมาะสม เนื่องจากคุณรูปของงานหล่ออาจเกิดขึ้นกับหลายๆ อย่าง รวมถึงความเสื่อมสภาพของเครื่องจักรด้วยลักษณะความบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นของชิ้นงาน ได้แก่ มีรูขนาดเล็กๆ ซึ่งเรียกว่าตามดกระจายอยู่ทั่วไปภายในเนื้องาน ชิ้นงานเป็นรูปพรุนหรือเป็นโพรง ตัวเรือนไม่เต็มแบบหรือขาดแหง มีคราบสีน้ำตาลที่บริเวณผิวชิ้นงาน ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการเร่งแก๊สแรงเกินไปในขณะที่เป่าออกซิเจนให้พ่นน้ำโลหะวิ่งเข้าแบบเบ้าปูน

7. การขัดและแต่งตัวเรือน (Filing & Polishing)

การแต่งตัวเรือนเป็นกรรมวิธีที่ทำให้ตัวเรือนมีขนาด รูปร่างและน้ำหนักตามที่ลูกค้ากำหนดและอาจมีการประกอบชิ้นส่วนบางอย่างเข้ากับตัวเรือนด้วยวิธีการเชื่อมน้ำประสาน วัสดุดิบที่ใช้ได้แก่ กระดาษทราย ลวดเงิน เงิน ทองเหลือง น้ำประสานทอง สารส้ม และลูกเจี๋ยรากเพชร ขั้นตอนการแต่งตัวเรือนอาจแตกต่างกันตามชนิดของเครื่องประดับ แต่จะต้องควบคุมน้ำหนักของตัวเรือนให้อยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการ ซึ่งปกติมักยอมให้มีการสูญเสียเนื้อวัสดุของตัวเรือนจากงานแต่งได้ไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด โดยอยู่ในรูปร้อยละของน้ำหนักตัวเรือน เช่น 1.5% เป็นต้น การแต่งตัวเรือนของแหวน มีขั้นตอนดังนี้

7.1 การปรับขนาด (Size) หมายถึง การนำแหวนที่ผ่านการหล่อซึ่งมีการเผื่อขนาดไว้แล้วมาเลื่อยให้มีขนาดตามที่ต้องการ โดยจะใช้อุปกรณ์สำหรับวัดขนาดแหวนที่เรียกว่ากระบอกวัดไซส์ ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกเรียว และมีตัวเลขบอกขนาดที่แตกต่างกันออกไป

7.2 เชื่อมแก๊สตรงบริเวณรอยตัดด้วยน้ำประสาน ซึ่งน้ำประสานจะมีส่วนผสมของวัสดุขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ในการหล่อตัวเรือน โดยที่เครื่องประดับเงินจะใช้เงิน และทองเหลือง 70 และ 30 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

7.3 ใช้ตะไบแต่งชิ้นงานให้เรียบร้อย โดยเฉพาะตรงบริเวณรอบต่อ

7.4 วัดขนาดของแหวนกับกระบอกวัดไซส์ ซึ่งเรียกว่า การเข้าไซส์

7.5 ตีกระดาษทรายด้วยมอเตอร์ทั้งด้านในและด้านนอกของวงแหวน โดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 180 320 และ 400 ตามลำดับ

7.6 ตีกระดาษทรายด้วยมอเตอร์ทางด้านข้างของวงแหวน ซึ่งเรียกว่า การตีสายอ่อน

7.7 ตรวจสอบความเรียบร้อย หากพบสิ่งที่ยกพร่องก็จะทำการแต่งซ่อมใหม่ก่อนนำไปขัดในขั้นตอนถัดไป

7.8 ขั้นตอนดัดลงแปรงยาดีนเพื่อใช้ขัดตามซอก ถ้างานที่เป็นเหลี่ยมให้ใช้ลูกสักหลาดไล่เหลี่ยม แล้วขัดลูกผ้ายาดีน (งานหยาบใช้ยาดีน, งานละเอียดใช้ยาเขียว) ถ้าเป็นแหวนจะหมุนวงในด้วยสาลียาดีน (ยาเขียว) เพื่อให้วงในเกลี้ยง

7.9 การทำเงา จะทำโดยหมุนวงในด้วยสาลี, ยาแดง ถ้ามีซอกจะใช้แปรงใส่ยาแดงเพื่อทำซอกให้เงา

7.10 การปิดเงา ให้ใช้ลูกผ้าใส่ยาแดง

7.11 หลังจากนั้นทำการตรวจสอบ แล้วล้างด้วยอัลตราสอน้ำยา

7.12 ฟันด้วยสตรีมเมอร์ (ฟันไอน้ำ)

7.13 แล้วขัดชุบ ปัดยาแดง (ปัดเก็บ)

8. การฝังพลอย (Stone Setting)

การฝังตัวเรือนเป็นกรรมวิธีของการประกอบอัญมณีและรัตนชาติต่างๆ เข้ากับตัวเรือนของเครื่องประดับ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วงานฝังอาจแบ่งออกเป็น 4 ประเภทตามลักษณะงานได้แก่

8.1 งานหนามเตย มีลักษณะเป็นหนามยื่นขึ้นมาตรงปลายกลมมน ในงานฝังแบบหนามเตยจะมีการฝังอัญมณีลงไประหว่างกลุ่มหนามเตย

8.2 งานจิกไข่ปลา มีลักษณะเป็นเม็ดกลมเล็กๆ คล้ายไข่ปลาหนีออกมาจากตัวเรือนก่อนที่จะทำจิกไข่ปลาจะต้องแกะลายก่อน ซึ่งก็คือการทำให้ร่องหรือรูเรียบบนตัวเรือนมีลักษณะเป็นลายนูนขึ้นมา เพื่อเตรียมสำหรับการฝังพลอยแบบจิกไข่ปลา

8.3 จิกตัด หรือเก็บไข่ปลา มีลักษณะเป็นเม็ดกลมเล็กหน้าหลังเรียบและไม่นูนขึ้น การทำจิกตัดมักจะทำหลังจากการทำจิกไข่ปลาแล้ว ซึ่งเป็นการจิกตัดขอบรอบเม็ดพลอยให้มีลักษณะรูปร่างตามที่ต้องการ เช่น รูปสามเหลี่ยม รูปสี่เหลี่ยม รูปหกเหลี่ยม รูปแปดเหลี่ยมรูปโค้ง และแบบลูกตา เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของเม็ดพลอยด้วย

8.4 งานล๊อค เป็นลักษณะของการฝังอัญมณีลงในช่องว่างที่มีเหลี่ยมมุมเป็นช่องๆ ติดกัน ขอบของช่องว่างนั้นจะมีลักษณะเรียบ ยากแก่การติดยึดฝังอัญมณีมากที่สุดประกอบด้วยการล๊อคกลม ล๊อคคางหมู ล๊อคสี่เหลี่ยม และการล๊อคเหลี่ยมมุมอื่นๆ ระดับความยากง่ายของการฝังเรียงตามลำดับจากง่ายไปยากคือ งานฝังหนามเตย งานจิกไข่ปลา งานกระเปาะหุ้ม และ

งานลีด ซึ่งงานฝังแต่ละแบบจะมีอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำงานที่แตกต่างกัน ส่วนการยึดติดอัดมณีจะใช้วิธีการลนเทียบสีฝังเช่นเดียวกัน

9. การชุบ

การชุบเป็นกรรมวิธีการเคลือบสารปิดทับตัวเรือนเครื่องประดับ ซึ่งอาจชุบด้วยเงินหรือโรเดียม เพื่อเพิ่มความสวยงามและความทนทานของเครื่องประดับ

10. การตรวจสอบคุณภาพ (Inspection)

เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าชิ้นงานที่ผลิตได้มีคุณภาพ จะต้องมีการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานก่อน โดยแบ่งได้ดังนี้

10.1 การตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานระหว่างการผลิต เป็นการตรวจสอบภายหลังการผลิตจากแผนกหนึ่งก่อนที่จะทำการส่งไปอีกแผนกหนึ่ง ซึ่งหากพบว่ามีข้อบกพร่องในระดับที่สามารถนำชิ้นงานไปซ่อมแซมได้ ก็จะนำงานชิ้นนั้นไปซ่อมแซม แต่ถ้าหากพบว่ามีข้อบกพร่องที่ไม่สามารถนำชิ้นงานไปซ่อมแซมได้ ก็จะต้องทำการผลิตชิ้นงานใหม่ โดยปกติจะมีการตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานในระหว่างกระบวนการผลิตทุกขั้นตอน

10.2 การตรวจสอบสรุปชิ้นงานขั้นสุดท้าย เป็นการตรวจสอบชิ้นงานภายหลังการผลิตที่ผ่านกระบวนการผลิตทุกขั้นตอนแล้วตัวอย่างของข้อบกพร่องที่ตรวจพบ เช่น ตัวเรือนเป็นรอยเป็นตามด ผื่น กระเปาะแห่วงก้านหัก เป็นต้น

การจำแนกตำหนิที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อเครื่องประดับ

1. รูพรุนเนื่องจากการหดตัวของโลหะ (Shrinkage Porosities)

ข้อบกพร่องเนื่องจากการหดตัวของน้ำโลหะนั้น เป็นข้อบกพร่องซึ่งพบได้บ่อยในชิ้นงานที่มีการเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดอย่างกะทันหัน, มีเหลี่ยมมุมมากมาย และมีพื้นที่ผิวมาก โดยข้อบกพร่องชนิดนี้มีลักษณะเป็นรูเหลี่ยม มักจะมีโครงสร้างเดนดริติกอยู่ภายใน เกิดขึ้นเนื่องจากการแข็งตัวไม่พร้อมกันของน้ำโลหะในชิ้นงานหล่อ โดยมีสาเหตุของการเกิดดังนี้



รูปที่ 12 ลักษณะของรูพรุนจากการหดตัว

1.1 การติดทางน้ำโลหะที่ไม่ถูกต้อง การแก้ไข ติดทางน้ำโลหะเข้ากับส่วนที่มีปริมาตรมากที่สุดในงานซึ่งเป็นพื้นที่ที่แข็งตัวช้าที่สุด เพื่อให้มีน้ำโลหะเพียงพอกับการหดตัวของโลหะขณะที่แข็งตัว และควรใช้ทางน้ำโลหะแบบหน้าต่างกลม

1.2 ใช้ขนาดทางน้ำโลหะที่ไม่เหมาะสม

การแก้ไข เพิ่มทางน้ำโลหะหรือใช้ทางน้ำโลหะที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ทางน้ำโลหะนั้นถูกออกแบบมาเพื่อป้องกันน้ำโลหะเข้าสู่โพรงแบบ ถ้าทางน้ำโลหะมีขนาดเล็กเกินไปจะส่งผลให้มีการแข็งตัวของน้ำโลหะก่อนที่ชิ้นงานจะได้รับน้ำโลหะที่พอเพียงในการหล่อ

1.3 อุณหภูมิเบ้าสูงเกินไป

การแก้ไข ลดอุณหภูมิเบ้าให้ต่ำลง ถ้าอุณหภูมิเบ้าสูงเกินไปจะทำให้เกิดรูพรุนเนื่องจากการหดตัวของโลหะสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิเบ้าควรจะต่ำสุดเท่าที่จะเป็นไปได้ราบเท่าที่จะสามารถเติมน้ำโลหะเข้าสู่โพรงแบบได้สมบูรณ์ ควรให้ชิ้นงานที่มีปริมาตรและน้ำหนักเท่ากันอยู่บนต้นเทียนเดียวกัน แต่ถ้าจำเป็นต้องติดชิ้นงานที่มีขนาดและน้ำหนักต่างกัน ควรให้ชิ้นงานที่มีปริมาตรมากที่สุดอยู่ใกล้กับทางเข้ารูเทและให้ชิ้นงานที่มีปริมาตรน้อยกว่าอยู่ใกล้ด้านบนของต้นเทียน

1.4 ชิ้นงานหล่ออยู่ใกล้กับรูเทมากเกินไป

การแก้ไข เว้นระยะห่างอย่างน้อย 1 นิ้ว ระหว่างปากรูเทกับแถวแรกของชิ้นงานหล่อ ปากรูเทนั้นจะสัมผัสกับอากาศและเย็นตัวอย่างรวดเร็ว การเย็นตัวนี้จะส่งผลกับชิ้นงานหล่อที่อยู่แถวแรกอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นถ้าแถวแรกของชิ้นงานหล่ออยู่ใกล้กับปากรูเทมากเกินไปจะทำให้มีน้ำโลหะบริเวณทางน้ำโลหะที่ติดกับชิ้นงานแข็งตัวและทำให้เกิดรูพรุนเนื่องจากการหดตัวของโลหะ

2. รูพรุนเนื่องจากแก๊ส (Gas Porosities)

ข้อบกพร่องเนื่องจากแก๊สนี้มีลักษณะคล้ายรูเข็ม (Pin Hole) บนพื้นผิวของงานหล่อ ลักษณะของข้อบกพร่องชนิดนี้จะต่างจากรูพรุนเนื่องจากการหดตัวคือ มีลักษณะเป็นรูพรุนที่มีรูปร่างกลมและเรียบ บางครั้งรูพรุนเนื่องจากแก๊สนี้จะเกิดขึ้นอย่างหนาแน่นบริเวณใต้ผิวของชิ้นงานหล่อซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่จะปรากฏขึ้นต่อเมื่อผ่านกระบวนการขัดแล้วข้อบกพร่องชนิดนี้เกิดขึ้นเนื่องจากสองสาเหตุหลัก คือ การเกิดปฏิกิริยาของปูนหล่อ และสิ่งเจือปนเนื่องมาจากการนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ โดยมีสาเหตุของปัญหา ดังนี้



รูปที่ 13 ลักษณะรูพรุนเนื่องจากแก๊ส

2.1 ให้ความร้อนแกโลหะมากเกินไป

การแก้ไข ลดอุณหภูมิของโลหะระหว่างการหล่อ ถ้าโลหะได้รับความร้อนที่มากเกินไปและเทลงในแม่พิมพ์ซึ่งร้อนเกินไป ซึ่งหมายความว่าจำเป็นต้องใช้เวลานานขึ้นในการแข็งตัว และทำให้ผิวชิ้นงานสัมผัสกับปูนหล่อนานขึ้น การเกิดเหตุการณ์เช่นนี้จะเพิ่มความเสี่ยงของการเกิดแก๊สจากปูนหล่อ การลดอุณหภูมิของโลหะจะทำให้สามารถลดเวลาที่น้ำโลหะสัมผัสกับปูนหล่อได้

2.2 อากาศภายในเตาไม่ถ่ายเท

การแก้ไข เพิ่มการถ่ายเทและการระบายอากาศในเตาอบ ตรวจสอบเตาอบเพื่อให้แน่ใจว่ามีอากาศไหลเข้าและระบายออกอย่างพอเพียง อาจเจาะรูที่ประตูเตาอบ 2-3 รู เพื่อให้แน่ใจว่ามีช่องระบายอากาศเพื่อให้มีการไหลของอากาศอย่างพอเพียง ถ้าสังเกตเห็นรอยวงสีเหลืองบนปูนหล่อหลังจากทำการหลอมเรียบร้อยแล้ว, ได้กลั่นคล้ายไขเน่าเมื่อนำเข้าหล่อไปจุ่มน้ำหลังจากที่อบเสร็จแล้ว หรือปูนหล่อมีสีดำหลังจากที่หล่อเรียบร้อยแล้ว สิ่งเหล่านี้เป็นบ่งบอกว่าได้เกิดปฏิกิริยาของแก๊สกำมะถันในเตาอบ การปรับปรุงการไหลเวียนของอากาศและการเพิ่มเวลาอบจะช่วยกำจัดปัญหาเหล่านี้

2.3 เวลาอบปูนหล่อไม่พอเพียง

การแก้ไข เพิ่มเวลาในการอบปูนที่อุณหภูมิสูงสุดในการอบ อะตอมคาร์บอนที่เหลือจากเทียนอาจจะทำปฏิกิริยากับโลหะในขณะที่ไหลสู่แม่พิมพ์และทำให้เกิดแก๊สขึ้น แก๊สเหล่านี้จะถูกดักไว้ภายใต้พื้นผิวของโลหะที่แข็งตัวแล้วทำให้เกิดรูพรุนเนื่องจากแก๊สขึ้น

2.4 เป้าร้อนเกินไป

การแก้ไข ลดอุณหภูมิเป้าหมาย การเพิ่มอุณหภูมิในสภาวะบรรยากาศที่มีออกซิเจนต่ำภายในเตาอบ เป็นสาเหตุให้แคลเซียมซัลเฟตภายในปูนหล่อเกิดการสลายตัวของผิวปูนหล่อและปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ออกมา เมื่อน้ำโลหะถูกหล่อภายในแม่พิมพ์จะเกิดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ขึ้นและถูกดูดซึมโดยโลหะในขณะที่ยังเหลวอยู่ก่อให้เกิดรูพรุนเนื่องจากแก๊สซัลเฟอร์ การลดอุณหภูมิ

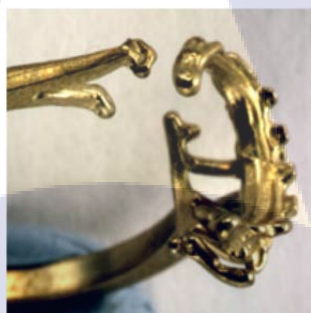
เบ้าจะทำให้โลหะเย็นตัวเร็วขึ้นจึงทำให้ผิวของชิ้นงานกลายเป็นของแข็งและไม่สามารถดูดซับแก๊สได้

2.5 ใช้เศษโลหะจากงานหล่อเก่ามาหลอมใหม่บ่อยเกินไป

การแก้ไข ทำความสะอาดโลหะก่อนนำมาหลอมใหม่ หรือใช้เศษโลหะจากการหล่อเก่าไม่เกิน 50% การใช้เศษโลหะหล่อเก่านั้นมีโอกาสทำให้สิ่งแปลกปลอมต่างๆ เข้าสู่โลหะได้สิ่งแปลกปลอมเหล่านี้ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งมีแก๊สเป็นสารผลิตภัณฑ์ และนำไปสู่รูพรุนเนื่องจากแก๊สในงานหล่อเครื่องประดับ

3. น้ำโลหะไหลเข้าโพรงแบบไม่สมบูรณ์

ข้อบกพร่องเนื่องจากน้ำโลหะไม่สามารถไหลเข้าโพรงแบบได้สมบูรณ์ จะเกิดขึ้นในขณะการหล่อ สาเหตุของการเกิดข้อบกพร่องเนื่องจากน้ำโลหะไหลเข้าโพรงแบบไม่สมบูรณ์มีดังนี้



รูปที่ 14 ชิ้นงานที่น้ำโลหะไหลเข้าโพรงแบบไม่สมบูรณ์

3.1 น้ำโลหะมีอุณหภูมิต่ำเกินไป

การแก้ไข เพิ่มอุณหภูมิน้ำโลหะ ถ้าน้ำโลหะมีอุณหภูมิที่ต่ำเกินไปจะมีความเหลวไม่เพียงพอต่อการไหลเข้าสู่โพรงแบบ น้ำโลหะจะเย็นตัวและแข็งตัวก่อนที่จะสามารถไหลเข้าสู่โพรงแบบได้เต็ม

3.2 อุณหภูมิเบ้าต่ำเกินไป

การแก้ไข เพิ่มอุณหภูมิเบ้า เบ้าปูนหลอมมักจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าโลหะเสมอ อย่างไรก็ตามถ้าอุณหภูมิของเบ้าต่ำเกินไปจะส่งผลให้น้ำโลหะเย็นตัวอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเกิดการถ่ายเทความร้อนจากน้ำโลหะสู่เบ้าซึ่งทำให้น้ำโลหะแข็งตัวก่อนที่จะไหลเต็มโพรงแบบ

3.3 มีความเป็นสุญญากาศไม่พอในขณะหล่อ

การแก้ไข ตรวจสอบรอยรั่วของเครื่องหล่อสุญญากาศ ในการหล่อแบบสุญญากาศนั้น โลหะจะไหลเข้าสู่โพรงแบบเนื่องจากสภาวะสุญญากาศภายในโพรงแบบนั้น ถ้ามีรอยรั่วใดๆ เกิดขึ้นจะส่งผลให้สภาวะสุญญากาศต่ำลง

3.4 ใช้ทางน้ำโลหะที่ไม่เหมาะสม

การแก้ไข ปรับปรุงทางน้ำโลหะ ทางเดินน้ำโลหะที่ดีเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ น้ำโลหะไหลเข้าสู่โพรงแบบได้รวดเร็วและง่ายดายซึ่งส่งผลให้เกิดชิ้นงานหล่อที่สมบูรณ์ ขนาด ทางน้ำโลหะควรเหมาะสมกับขนาดของชิ้นงานที่ต้องการหล่อ ทางน้ำโลหะที่มีหน้าตัดรูปทรง กลมและผิวเรียบเป็นทางเดินน้ำโลหะที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด เนื่องจากน้ำโลหะสามารถไหลได้ อย่างเป็นระเบียบและไม่เกิดการกระเด็นของน้ำโลหะภายในโพรงแบบ ในการหล่อชิ้นงานที่มี ความซับซ้อนอาจจะเพิ่มจำนวนทางน้ำโลหะหรือเพิ่มขนาดของทางน้ำโลหะเพื่อประสิทธิภาพใน การหล่อ

3.5 การอบเข้าหล่อที่ไม่สมบูรณ์

การแก้ไข เพิ่มเวลาในการอบปูนที่อุณหภูมิสูงสุดในการอบ การอบเข้าปูนที่ ไม่สมบูรณ์จะทำให้โพรงแบบเกิดการอุดตันจากคาร์บอนที่เกิดจากการเผาเทียน ซึ่งทำให้น้ำโลหะ ไม่สามารถไหลเข้าสู่โพรงแบบได้

4. ผิวของชิ้นงานหยาบ



รูปที่ 15 ลักษณะของผิวชิ้นงานที่หยาบ

สาเหตุของการเกิดผิวของชิ้นงานหยาบ มีดังนี้

4.1 ผิวของชิ้นงานต้นแบบหยาบ

การแก้ไข สร้างชิ้นงานต้นแบบและแม่พิมพ์ขึ้นใหม่ ชิ้นงานที่ได้จากการหล่อนั้น ไม่มีทางที่จะดีไปกว่าชิ้นงานต้นแบบ ดังนั้นจึงควรให้ความสนใจในทุกๆรายละเอียดของชิ้นงาน ต้นแบบ การชุบชิ้นงานต้นแบบด้วยโรเดียมสามารถป้องกันการหมองระหว่างการอบแม่พิมพ์ ยางได้

4.2 ผิวชิ้นงานเทียนหยาบ

การแก้ไข ลดแบ่งที่ใช้ระหว่างขั้นตอนการฉีดเทียน การมีแบ่งติดที่แม่พิมพ์ ยางมากเกินไปนั้นจะทำให้ชิ้นงานเทียนที่ได้มีผิวหยาบซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อชิ้นงานหล่อ

4.3 เบ้าร้อนเกินไป

การแก้ไข ลดอุณหภูมิเบ้า ถ้าอุณหภูมิที่โซบเบ้าหล่อสูงเกินกว่า 760 องศาเซลเซียสจะทำให้ปูนหล่อเริ่มแตกตัว ดังนั้นน้ำโลหะจึงสามารถแทรกซึมไปตามรูที่ผิวของผนังโพรงแบบได้

4.4 น้ำโลหะร้อนเกินไป

การแก้ไข ลดอุณหภูมิการหล่อ ถ้าอุณหภูมิของโลหะสูงเกินไปจะส่งผลทำให้เกิดแก๊สซัลเฟอร์ซึ่งแก๊สเหล่านี้จะถูกดักอยู่ภายใต้ผิวโลหะเมื่อขัดชิ้นงานแล้วจะเห็นเป็นลักษณะคล้ายผิวหยาบ

4.5 ทางน้ำโลหะที่ไม่เหมาะสม

การแก้ไข ปรับระบบทางน้ำโลหะ หลีกเลี่ยงการใช้ทางน้ำซึ่งทำให้การไหลของน้ำโลหะไม่ราบเรียบและทางน้ำที่มีความโค้งมาก การไหลแบบปั่นป่วนนั้นจะทำให้เกิดการกัดกร่อนของโพรงแบบซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้งานหล่อที่ได้มีผิวหยาบ ควรให้ความสนใจต่อการติดทางน้ำโลหะกับชิ้นงาน

4.6 ใช้อุณหภูมิสูงเกินไปในการละลายเทียนออกจากโพรงแบบ

การแก้ไข ลดอุณหภูมิในการเผาละลายเทียนลง อุณหภูมิในการเผาเทียนที่สูงเกินไปจะทำให้น้ำเทียนเกิดการเดือด และเกิดการกัดเซาะผนังของปูนที่ยังไม่มีความแข็งแรงมากพอจนทำให้ผิวปูนบริเวณนั้นมีผิวที่ขรุขระไม่เรียบ

4.7 เบ้าปูนไม่ได้ถูกทิ้งให้แข็งตัวดีพอก่อนที่จะอบ

การแก้ไข วางเบ้าปูนทิ้งไว้อย่างน้อย 1 ชั่วโมงก่อนทำการละลายเทียนออกจากโพรงแบบถ้าขั้นตอนละลายเทียนออกจากแม่พิมพ์เร็วเกินไปจะทำให้ผิวงานหล่อเกิดการกัดกร่อนได้

4.8 ใช้อัตราส่วนผสมปูนหล่อกับน้ำไม่เหมาะสม

การแก้ไข ผสมอัตราส่วนปูนและน้ำตามที่ผู้ผลิตระบุไว้ สาเหตุหลักของการเกิดผิวชิ้นงานหยาบคือ อัตราส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำมากเกินไป

4.9 เบ้าปูนได้รับความร้อนเร็วเกินไป

การแก้ไข อบเบ้าปูนโดยทำตามวัฏจักรการอบเบ้าปูน ถ้าให้ความร้อนแก่เบ้าปูนเร็วเกินไป จะทำให้มีเทียนหลงเหลือในโพรงแบบซึ่งจะทำให้เกิดการกัดกร่อนที่ผิวของโพรงแบบจึงทำโพรงแบบมีผิวขรุขระ เทียนที่ใช้ทำส่วนลำต้นของต้นเทียนควรจะมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่าเทียนที่ใช้ทำชิ้นงาน เพื่อป้องกันการเดือดของเทียนซึ่งถูกทำเป็นชิ้นงานหล่อ

5. ปุ่มหรือฟองโลหะบนชิ้นงานหล่อ (Bubble หรือ Nodules)



รูปที่ 16 ลักษณะฟองโลหะบนชิ้นงานหล่อ

สาเหตุของการเกิดปุ่มหรือฟองบนชิ้นงานหล่อ มีดังนี้

5.1 ปูนหล่อไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน

การแก้ไข ทำตามคำแนะนำของผู้ผลิตปูนหล่อในขณะที่ทำการผสมปูนหล่อ

5.2 ปูนหล่อเริ่มแข็งตัวเร็วเกินไป

การแก้ไข ตรวจสอบอุณหภูมิและสภาวะความเป็นกรดของน้ำ เพราะน้ำที่อุณหภูมิสูง หรือมีสภาวะความเป็นกรด จะส่งผลให้ปูนหล่อแข็งตัวเร็วกว่าปกติ และจะทำให้อากาศไม่สามารถหนีออกมาจากปูนหล่อได้ทันในขั้นตอนการดูดอากาศออกจากปูนหล่อ

5.3 เกิดข้อผิดพลาดเนื่องจากการทำงานของปั๊มสุญญากาศ

การแก้ไข ตรวจสอบข้อต่อและฉนิกของปั๊ม ถ้าปั๊มสุญญากาศทำงานผิดพลาดหรือเกิดรอยรั่วจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดอากาศต่ำลง

5.4 เคลื่อนย้ายเบ้าปูนขณะทำการอบ

การแก้ไข เมื่อเริ่มทำการอบเบ้าปูนแล้ว ห้ามทำการเคลื่อนย้ายใดๆ จนกว่าจะเสร็จกระบวนการอบ

6. คราบน้ำ

คราบน้ำเป็นรอยที่เกิดจากความผิดปกติของปูนหล่อ มีลักษณะเป็นรอยยาวจากกันจนถึงปากเบ้าปูน ซึ่งคราบน้ำนี้จะปรากฏอย่างชัดเจนในชิ้นงานที่เป็นแผ่นเรียบ



รูปที่ 17 ลักษณะคราบน้ำมันผิวชิ้นงาน

สาเหตุการเกิดคราบน้ำมันที่ผิวชิ้นงาน

6.1 ไม่ทำตามคำแนะนำของผู้ผลิตในขั้นตอนผสมปูน

การแก้ไข ทำตามขั้นตอนการผสมปูนซึ่งผู้ผลิตแนะนำ ถ้าไม่ใช้เวลาในการผสมปูนที่กำหนดจะทำให้เกิดการแยกชั้นของปูนหล่อซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดคราบน้ำมัน

6.2 ผสมน้ำมากเกินไป

การแก้ไข ใช้อัตราส่วนของน้ำและผงปูนหล่อตามที่ผู้ผลิตแนะนำ

7. ชิ้นงานเปราะ



รูปที่ 18 ชิ้นงานหล่อเปราะ

สาเหตุการเกิดข้อบกพร่องเนื่องจากชิ้นงานเปราะแตกหักง่าย

7.1 ใช้โลหะอัลลอยที่ไม่เหมาะสม

การแก้ไข ใช้โลหะอัลลอยที่มีคุณรูป โลหะคุณรูปต่ำจะมีออกไซด์และซัลไฟด์ ผสมอยู่ซึ่งทำให้ชิ้นงานที่หล่อได้มีความเปราะแตกหักง่าย

7.2 อุณหภูมิของน้ำโลหะต่ำเกินไป

การแก้ไข เพิ่มอุณหภูมิหล่อ ถ้าน้ำโลหะซึ่งเทเข้าสู่โพรงแบบมีอุณหภูมิต่ำเกินไป น้ำโลหะจะเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้เกิดโครงสร้างผลึกเล็กๆ ซึ่งมีความแข็งแรงต่ำจึงทำให้ชิ้นงานหล่อที่แตกหักได้ง่าย

7.3 อุณหภูมิเบ้าต่ำเกินไป

การแก้ไข เพิ่มอุณหภูมิเบ้า ถ้าน้ำโลหะถูกเทเข้าไปในเบ้าปูนที่มีอุณหภูมิต่ำ จะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากโลหะสู่เบ้าปูนทำให้โลหะเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งก่อให้เกิดผลึกเล็กๆ ในชิ้นงานหล่อที่แข็งตัว โครงสร้างโลหะชนิดนี้มีความเปราะบางสูงจึงทำให้แตกร้าวได้ง่าย

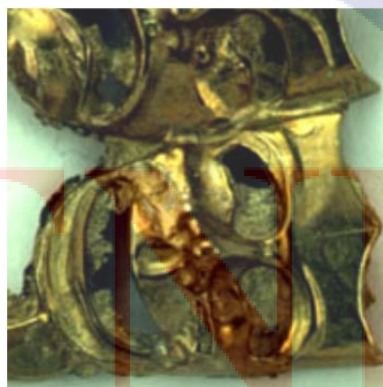
7.4 มีอะตอมคาร์บอนอยู่ในส่วนที่บางของโพรงแบบ

การแก้ไข เพิ่มเวลาในการอบปูนที่อุณหภูมิสูงสุดในการอบ อะตอมคาร์บอนที่อยู่ในโพรงแบบเกิดการเผาไหม้กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ที่ อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส การที่มีสิ่งแปลกปลอมอยู่ในชิ้นงานส่วนที่บางจะทำความแข็งแรงของชิ้นงานบริเวณนั้นต่ำ จึงแตกหักได้ง่าย

7.5 ใช้ปริมาณโลหะเก่าในการหล่อมากเกินไป

การแก้ไข ใช้โลหะเก่าในการหล่อไม่เกิน 50% หรือใช้โลหะที่สะอาดในการหล่อ การนำเศษโลหะหล่อเก่ามาหลอมใหม่อาจทำให้เกิดออกไซด์ของทองแดงในการหลอม

8. ชิ้นงานหล่อเป็นครีป



รูปที่ 19 ชิ้นงานหล่อเป็นครีป

สาเหตุการเกิดข้อบกพร่องเนื่องจากชิ้นงานหล่อเป็นครีป

8.1 ใช้อัตราส่วนผสมปูนหล่อกับน้ำไม่เหมาะสม

การแก้ไข ใช้อัตราส่วนของน้ำและผงปูนหล่อตามที่ผู้ผลิตแนะนำ

8.2 เริ่มอบเบ้าปูนเร็วเกินไป

การแก้ไข ทิ้งเบ้าปูนไว้อย่างน้อย 1 ชั่วโมงหลังจากเทปูนหล่อเข้าสู่เบ้าแล้ว ถ้าเริ่มอบเบ้าปูนเร็วเกินไปน้ำที่ยังอยู่ในเบ้าปูนเดือดและกลายเป็นไอน้ำ ซึ่งจะทำให้เกิดรอยแตกในโพรงแบบเบ้าปูนที่มีขนาดใหญ่จำเป็นต้องใช้เวลาการเซตตัวและอบนานกว่า

8.3 เบ้าปูแห้งสนิทก่อนที่จะทำการอบ

การแก้ไข อย่าปล่อยให้เบ้าปูนแห้งเกินไป ถ้าเบ้าปูนแห้งเกินไปก่อนที่จะทำการอบอาจทำให้เกิดการแตกร้าวที่ผิวของโพรงแบบได้

8.4 ใช้ผงปูนหล่อที่หมดอายุหรือจัดเก็บไม่ถูกต้อง

การแก้ไข ตรวจสอบวันหมดอายุหรือบริเวณที่ใช้เก็บผงปูนหล่อ ผงปูนหล่อจะมีอายุประมาณ 5-6 เดือน ควรตรวจสอบวันหมดอายุและบริเวณที่ใช้เก็บผงปูนหล่ออย่างสม่ำเสมอ โดยเก็บไว้ในบริเวณที่แห้ง, เย็น และควรปิดถุงปูนหล่อทุกครั้งเมื่อไม่ได้ใช้

8.5 เบ้าปูนได้รับความร้อนเร็วเกินไป

การแก้ไข ทำตามคำแนะนำอบเบ้าปูนโดยทำตามวัฏจักรการอบเบ้าปูน ถ้าให้ความร้อนแก่เบ้าปูนเร็วเกินไป น้ำที่ยังอยู่ในเบ้าปูนหล่อจะเดือดกลายเป็นไอซึ่งทำให้ผิวของโพรงแบบหยาบและเกิดรอยแตกได้

9. ผิวของชิ้นงานมีลักษณะหยาบและดำเนื่องจากออกซิไดซ์



รูปที่ 20 ชิ้นงานที่มีผิวหยาบและดำเนื่องจากออกซิไดซ์

สาเหตุการเกิดข้อบกพร่องเนื่องจากผิวหยาบและมีรอยเปื้อนสีดำ

9.1 อุณหภูมิที่ใช้ออบปูนสูงเกินไป

การแก้ไข อุณหภูมิอบไม่ควรเกิน 750 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิของเตาอบสูงเกินไปจะทำให้เกิดการจับตัวกันของยิปซัมและก่อให้เกิดซัลเฟตไดออกไซด์หรือไทรออกไซด์ ซึ่งจะทำให้เกิดรอยเปื้อนสีดำบนชิ้นงานหล่อ

9.2 ความร้อนมากเกินไป

การแก้ไข ทำความสะอาดโลหะที่จะทำการหลอมและใช้อุณหภูมิหลอมที่ถูกต้อง ถ้าให้ความร้อนแก่โลหะมากเกินไปจะทำให้เกิดผิวหยาบสีดำนบริเวณที่ชิ้นงานมีความหนาแน่นได้

10. สิ่งแปลกปลอมในงานหล่อ



รูปที่ 21 ชิ้นงานหล่อที่มีสิ่งแปลกปลอมปน

สาเหตุการเกิดข้อบกพร่องเนื่องจากสิ่งแปลกปลอม

10.1 ทางน้ำโลหะมีเหลี่ยมมุมและลักษณะโค้งเกินไป

การแก้ไข แก้ไขทางน้ำโลหะให้มีมุมต่างๆ มีลักษณะกลมมนและมีความโค้งที่เหมาะสมถ้ามีเหลี่ยมมุมต่างๆ ในทางน้ำโลหะจะเสี่ยงต่อการที่ปูนหล่อแตกหักในขณะที่น้ำโลหะไหลเข้าโพรงแบบ เศษปูนหล่อที่แตกหักจะลอยอยู่ที่ผิวของน้ำโลหะ เมื่อโลหะแข็งตัวแล้วจะเกิดรูที่ผิวเนื่องจากเศษปูนหล่อนี้

10.2 เบ้าหลอมเก่าและไม่มีประสิทธิภาพ

การแก้ไข เปลี่ยนเบ้าหลอม เบ้าหลอมที่นิยมใช้ในการหลอมโลหะจะมีแกรไฟต์มาเกี่ยวข้องด้วย ถ้าผงแกรไฟต์เข้าไปอยู่ในน้ำโลหะจะส่งผลต่อผิวของชิ้นงานหล่อ สามารถสังเกตได้โดยพิจารณาตะกอนสีดำที่ทางน้ำโลหะหลัก

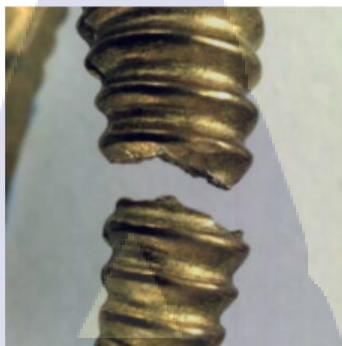
10.3 เกิดออกไซด์ในเบ้าหลอม

การแก้ไข ทำความสะอาดหรือเปลี่ยนเบ้าหลอม โดยออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้อาจเกิดจากกากโลหะหรือสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ

10.4 มีสิ่งแปลกปลอมหรือออกไซด์ในโลหะ

การแก้ไข ทำความสะอาดโลหะก่อนนำมาหลอม

11. ชิ้นงานหัก



รูปที่ 22 ชิ้นงานหล่อที่หัก

สาเหตุการเกิดข้อบกพร่องเนื่องจากชิ้นงานหัก

11.1 นำเข้าจุ่มน้ำเร็วเกินไป

การแก้ไข รอ 15-20 นาที ก่อนนำเข้าปูนไปจุ่มน้ำ รอยแตกหักของชิ้นงาน เนื่องจากการจุ่มน้ำมีลักษณะเป็นรอยหยักและสะอาด เวลาจุ่มน้ำที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ หลอม, อุณหภูมิเบ้า และขนาดของเบ้า

11.2 อุณหภูมิหล่อโลหะต่ำเกินไป

การแก้ไข เพิ่มอุณหภูมิหล่อ ถ้าน้ำโลหะถูกหล่อก่อนที่จะมีอุณหภูมิสูงถึง อุณหภูมิที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการแตกหักของชิ้นงานหล่อเนื่องจากความแข็งแรงทางกลต่ำ และอาจเกิดข้อบกพร่องเนื่องจากน้ำโลหะไหลเข้าไม่เต็มโพรงแบบอีกด้วย

11.3 ทางน้ำโลหะไม่เหมาะสม

การแก้ไข ปรับปรุงระบบการไหลเข้าของน้ำโลหะ ขนาดรูเทและตำแหน่งของ ทางน้ำโลหะมีผลอย่างมากต่อคุณภาพของชิ้นงานหล่อ ถ้าขนาดของทางน้ำโลหะเล็กเกินไปจะทำให้ น้ำโลหะไม่สามารถไหลเข้าสู่โพรงแบบได้สะดวก

11.4 อุณหภูมิเบ้าปูนต่ำเกินไป

การแก้ไข เพิ่มอุณหภูมิเบ้า ถ้าอุณหภูมิเบ้าต่ำเกินไปจะเกิดรอยแตกที่ก้น ของชิ้นงานรอยแตกจะมีลักษณะมีเหลี่ยมมุมคม ผิวรอยหักสะอาด

11.5 ความสกปรกของโลหะผสมการแก้ไข ทำความสะอาดโลหะ ถ้าโลหะผสมสกปรก เนื่องจากมีธาตุอื่นปลอมปนจะทำให้เกิดการแตกหักของชิ้นงานเนื่องจากพันธะเคมี ซึ่งผิวของ รอยแตกหักจะมีสีซีดกว่าส่วนอื่นของชิ้นงาน

การออกแบบการทดลอง

1. การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

การออกแบบเพื่อควบคุมการทดลอง ดำเนินการทดลอง และเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองจากปัจจัยต่างๆ ที่ได้ ทั้งนี้เพื่อต้องการหาข้อสรุปที่มีเหตุผลสนับสนุนกับปัญหาที่ทำการทดลอง โดยผลการทดลองที่ได้จะเป็นประโยชน์ทางการพัฒนาในส่วนต่างๆ ของปัญหาที่ทำการทดลอง เช่น ทางด้านวิศวกรรมก็ต้องใช้ผลการทดลองที่ได้ไปควบคุมตัวแปรและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าหรือผลลัพธ์ที่ทำการศึกษเพื่อพัฒนาระบบหรือส่วนที่เกี่ยวข้องให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยสามารถแบ่งปัจจัยได้เป็น

1.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยที่ได้ในการผลิต

1.2 ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าได้ในการผลิต

สิ่งที่จำเป็นจะต้องนำมาใช้ในการทดลอง การวิเคราะห์การทดลอง และการสรุปผลการทดลองนั้น คือ การใช้วิธีเชิงสถิติเข้ามาช่วยซึ่งเครื่องมือตัวนี้เองจะมีส่วนสำคัญอย่างมากที่จะช่วยแสดงให้เห็นถึงผลการวิเคราะห์ ผลการทดลอง เพื่อช่วยในการตัดสินใจของผู้ทำการทดลองว่าควรจะปรับเปลี่ยนค่าที่เกี่ยวข้องกับการทดลองอย่างไร

แนวทางในการออกแบบการทดลอง มีขั้นตอนในการดำเนินการดังต่อไปนี้

1. ทำความเข้าใจถึงปัญหา ในขั้นตอนนี้ต้องพยายามพัฒนาแนวความคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ เกี่ยวกับการทดลอง และต้องหาข้อมูลจากบุคคลหรือหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ถ้อยแถลงของปัญหาที่มีความชัดเจนจะมีผลอย่างมากต่อความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์และคำตอบสุดท้ายของปัญหานั้นๆ ด้วยเหตุนี้เองการออกแบบการทดลองทุกครั้งควรจะมีการทำงานเป็นทีม

2. เลือกปัจจัยระดับและขอบเขต ผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงระหว่างทำการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงและกำหนดระดับที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง จะต้องพิจารณาด้วยว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ณ จุดที่กำหนดได้อย่างไร และจะวัดผลตอบได้อย่างไร ดังนั้นในกรณีเช่นนี้ผู้ทดลองจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการอย่างมาก ซึ่งความรู้นี้อาจได้มาจากการประสบการณ์ และความรู้จากทางทฤษฎี มีความจำเป็นที่เราจะต้อง ตรวจสอบดูว่า ปัจจัยที่กำหนดขึ้นมาทั้งหมดนี้มีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลองคือการกรองปัจจัย (Screening) เราควรที่จะกำหนดให้ระดับต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อยๆ การเลือกขอบเขตของการทดลองก็มีความสำคัญเช่นกัน ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเราควรที่จะเลือกขอบเขตให้มีความกว้างมากๆ หมายถึงว่าขอบเขตที่ปัจจัยแต่ละ

ตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ ควรมีค่ากว้างๆ และเมื่อเราได้เรียนรู้เพิ่มขึ้นว่าตัวแปรใด ๆ มีความสำคัญ และระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เราอาจจะลดขอบเขตลงมาให้แคบลงได้

3. เลือกตัวแปรผลตอบ ในการเลือกตัวแปรผลตอบ ผู้ทดลองควรจะแน่ใจว่าตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่บ่อยครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (หรือทั้งคู่) ของกระบวนการจะเป็นตัวแปรผลตอบ เป็นไปได้ว่าในการทดลองหนึ่งอาจจะมีผลต่อหลายตัว และมีความจำเป็นอย่างมากที่เราจะต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรผลตอบ และจะวัดผลตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไร ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองจริง

4. เลือกการออกแบบการทดลอง ถ้ากิจกรรมการวางแผนก่อนการทดลองทำได้ อย่างถูกต้อง ขั้นตอนนี้จะขั้นตอนที่ง่ายมาก การเลือกการออกแบบเกี่ยวข้องกับการพิจารณาขนาดของตัวอย่าง การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่า ควรจะใช้วิธีบล็อกหรือใช้การแรนดอมไมเซชันอย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่ ในการเลือกการออกแบบ เราจำเป็นจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่ตลอดเวลา ในการทดลองทางวิศวกรรมศาสตร์ส่วนมาก เราจะทราบตั้งแต่เริ่มต้นแล้วว่าปัจจัยบางตัวจะมีผลต่อผลตอบที่เกิดขึ้น ดังนั้น เราจะหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

5. ทำการทดลอง เมื่อทำการทดลองเราจะต้องติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน ถ้ามีอะไรผิดพลาดที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับวิธีการทดลองในขั้นตอนนี้ จะทำให้การทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้น การวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

6. วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ เราควรจะนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองหรือไม่ ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบไว้เป็นอย่างดี และถ้าทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติคือ ทำให้ผู้ที่ไม่มีอำนาจในการตัดสินใจมีเครื่องมือช่วยที่มีประสิทธิภาพ และถ้าเรานำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรมความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ และสามัญสำนึก จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกมานั้นมี เหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

7. สรุปและข้อเสนอแนะ เมื่อเราได้วิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางของกิจกรรมที่จะเกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้เราจะนำเอาวิธีการทางกราฟเข้ามาช่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเราต้องการนำเสนอผลงานนี้ให้ผู้อื่นฟัง นอกจากนี้แล้วการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation Testing) ควรจะทำการขึ้นเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย

2. การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลใช้ในการออกแบบการทดลอง และมีประโยชน์อย่างมากในกรณีที่ปัจจัยในการทดลองมากกว่า 2 ปัจจัยขึ้นไป โดยจะพิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยที่เป็นไปได้ ในการทดลองทั้งหมด โดยการศึกษาจะศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตามหรือผลตอบ (Response) ตัวเดียวกันเพื่อนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ในแผนภูมิ 4 ลักษณะ (ในกรณีแสดงถึงการวิเคราะห์แบบ 2 ปัจจัย)

2.1 แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสมบูรณ์ (Full Factorial Design) หมายถึงวิธีการทดลองที่ผู้ทำการทดลองจะต้องทำการทดลองให้ครบทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าของทุกปัจจัย และจะต้องวิเคราะห์ผลกระทบต่ตัวแปรตอบสนองทุกกรณี ดังตัวอย่างตามตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3 กรณีผลกระทบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของ Full Factorial Design

Main Effects	2-Way Interaction	3-Way Interaction
A	AB	ABC
B	AC	
C	BC	

- 2-Level Full Factorial Design หมายถึงเมื่อใช้ Full Factorial โดยแต่ละปัจจัยเปลี่ยนแปลงได้ 2 ระดับ เราจะต้องทำการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 2^k โดยที่ k คือ จำนวนปัจจัย หรือ Main effect

- 3-Level Full Factorial Design หมายถึงเมื่อใช้ Full Factorial โดยแต่ละปัจจัยเปลี่ยนแปลงได้ 3 ระดับ เราจะต้องทำการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 3^k

การใช้รหัส (Coded)

เป็นการปรับเปลี่ยนหน่วยสเกล ของแต่ละปัจจัยให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน (Standardize) เพื่อให้ง่ายในการออกแบบและวิเคราะห์ เพราะหากใส่ค่าจริงแล้ว จะเสียเวลา และยุ่งยากในการเขียนโดยเฉพาะ Interaction อย่างมาก โดยกำหนดให้ -1 แทนกรณีที่ตั้งค่าปัจจัยนั้นเป็น Low และให้ 1 แทนกรณีที่ตั้งค่าปัจจัยนั้นเป็น High ในกรณีที่ผู้ทำการทดลองออกแบบโดยใช้ 3-Level และจะต้องใช้ Code แทน ก็จะใช้ 0 แทนค่าตรงกลางของแต่ละปัจจัย แต่ผู้ออกแบบจะต้องเข้าใจรหัสนี้ของทุกๆ ปัจจัยว่าหมายถึงค่าเท่าไร เพราะการใช้รหัส จะใช้ในช่วงขั้นตอนการออกแบบและการวิเคราะห์เท่านั้น เมื่อทำการทดลองจะต้องแปลงรหัสให้เป็นค่าจริง และเมื่อต้องการเขียน Model ที่ได้จากการทดลอง จะต้องแปลงรหัสนี้กลับเป็นค่าจริง ๆ ด้วยเช่นกัน

ข้อดีของ Full Factorial Design

1. ไม่มีการเกิด Alias
2. สามารถวิเคราะห์ Main Factor และ Interaction ได้ทั้งหมด

ข้อด้อยของ Full Factorial Design

1. ต้องทำการทดลองให้ครบทุก Run ทำให้ต้องสิ้นเปลืองทรัพยากรมากใช้เวลานาน
2. เมื่อจำนวน Run มากๆ อาจจะประสบปัญหาในการป้องกันความคลาดเคลื่อนของการปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยใดๆ ได้

2.2 แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Design) หมายถึงวิธีที่ผู้ทำการทดลองไม่ต้องทำการทดลองให้ครบทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าของทุกปัจจัยเนื่องจากจะมีจำนวน Run มากจนเกินไปจนไม่สามารถดำเนินการได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดบางประการแน่นอนว่าความแม่นยำของผลก็ไม่เท่ากับ Full Factorial ในเชิงทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติถึงเราจะสามารถดำเนินการทดลองด้วยวิธี Full Factorial แต่อาจจะได้ผลที่แย่กว่า Fractional Factorial ก็ได้ เนื่องจากยิ่งมาก Factor ยิ่งมาก Run เราก็ยิ่งควบคุมการทดลองได้ยาก ความผิดพลาดก็ยิ่งเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงไม่มีประโยชน์ที่เราจะคงยืนยันใช้การทดลองแบบ Full Factorial เมื่อเรามี Factor หลายตัว

นักสถิติประยุกต์ในยุคแรกๆ ได้ค้นพบว่าในความเป็นจริงเมื่อเราดำเนินการทดลองจะมีเพียงบาง Main Effects และบาง Interaction เท่านั้นที่มีความสำคัญ ยิ่งลำดับของ Interaction สูงขึ้นก็ยิ่งมีโอกาสจะมีนัยสำคัญน้อยลง จึงได้นำเอาหลักการนี้ไปใช้ประโยชน์เพื่อลดขนาดของการทดลองลง

3. แบบการทดลองทาคุชิ (Taguchi Design)

การออกแบบการทดลองแบบทาคุชิ (Taguchi DOE) คือเทคนิคที่ใช้ออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการและผลิตภัณฑ์ในงานวิศวกรรมคุณภาพ ซึ่งเทคนิคที่ใช้ควบคุมคุณภาพของระบบวิศวกรรมคุณภาพ มี 2 แบบ คือการควบคุม คุณภาพเฉพาะการออกแบบการทดลอง (Offline Quality Control) เป็นการควบคุมคุณภาพของกิจกรรมทั้งหมดที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการวางแผน, การออกแบบ และการพัฒนาผลิตภัณฑ์โดยรวมถึงขั้นตอนการออกแบบระบบ (System Design), การออกแบบพารามิเตอร์ (Parameter Design) และการออกแบบช่วงที่กระบวนการยอมรับได้ (Tolerance Design) ซึ่งเป็นรูปแบบของเทคนิคทาคุชิในทางกลับกันการควบคุมรูปที่ขึ้นกับขั้นตอนการออกแบบ (Online Quality Control) เป็นการควบคุมคุณภาพของกิจกรรมทั้งหมดที่เกิดขึ้น ในขั้นตอนการผลิตรวมถึงกระบวนการวัดเพื่อ ตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์การนำไปปรับค่าเพื่อแก้ไขใหม่การพยากรณ์ความต้องการของลูกค้า และนำไปแก้ไขให้ถูกต้อง รูปแบบการออกแบบการทดลองแบบทาคุชิ ประกอบด้วย

- 1) การออกแบบการทดลองของระบบ (System Design) เพื่อหาค่าผลตอบที่ต้องการ
- 2) การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของปัจจัย (Parameter Design) ที่ทำให้ค่าผลตอบที่ได้เข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากที่สุดลดความผันแปรของกระบวนการ
- 3) การออกแบบการทดลองเพื่อหาช่วงของค่าปัจจัยหลัก (Tolerance Design) ที่ทำให้ผลตอบมีค่าที่กระบวนการมีความผันแปรที่ยอมรับได้

เป้าหมายของการออกแบบการทดลองแบบทากูชิในกระบวนการผลิต

- 1) เพื่อให้ได้ค่า y ที่ดีที่สุด (Optimal) แบ่งเป็น
 - ค่ายิ่งมากยิ่งดี (Larger-the-Better) เช่น ความทนแรงดึงและอายุการใช้งาน
 - ค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller-the-Better) เช่น เวลาในการทำปฏิกิริยา และจำนวนของเสีย
- 2) y คือ คุณสมบัติทางคุณรูปของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการควบคุม แบ่งเป็น
 - ลักษณะที่วัดค่าได้ (Measurable Characteristics) หรือค่าผันแปร (Variable Value) เช่น ความยาวความหนาและเวลา
 - ลักษณะที่วัดค่าไม่ได้ (Attribute Characteristics) เช่น เกณฑ์ในการแบ่งระดับความสามารถคือดีมากดีและพอใช้ เกรด คือ A B และ C

ประโยชน์ของการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ

- 1) การออกแบบการทดลองในส่วนผลิตภัณฑ์
 - ง่ายต่อการนำไปผลิต
 - ความเชื่อมั่น (Reliability) ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น หรืออายุการใช้งานนานขึ้น
 - ต้นทุน (Costs) การผลิตลดลง
 - ลดเวลาในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์
- 2) การออกแบบการทดลองในส่วนกระบวนการ
 - เพื่อให้กระบวนการสามารถทำงานได้อย่างมั่นคง ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่หลากหลาย
 - การเพิ่มผลการผลิตที่ได้ (Yields) จากกระบวนการ
 - ลดเวลาที่ใช้ในการพัฒนาขั้นตอนของกระบวนการ
 - ลดต้นทุนการผลิต
 - ลดความผันแปร (Variation) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ทำให้ได้ค่าที่เข้าใกล้ค่าเป้าหมาย (Target) มากที่สุด

3.1 ออโธโกนอลอาร์เรย์ (Orthogonal Arrays)

การใช้ออโธโกนอลอาร์เรย์ (“Orthogonal Arrays” or “OA’s”) เป็นเทคนิคหลักที่สำคัญของกลวิธีทางสถิติ OA’s เป็นตารางมาตรฐานที่มีจำนวนครั้งของการทดลองน้อยครั้ง ใช้กำหนดวิธีปฏิบัติและรูปแบบการทดลองของปัจจัยที่ควบคุมได้และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ โดยเมื่อกำหนดสำหรับปัจจัยที่ควบคุมได้จะเรียกว่า อินเนอร์อาร์เรย์ (Inner Array) เมื่อกำหนดสำหรับปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้จะเรียกว่า เอาท์เทอร์อาร์เรย์ (Outer Array) และเมื่อผนวกอาร์เรย์ทั้งสองเข้าด้วยกันเป็นแผนการทดลองเรียกว่า ครอสอาร์เรย์ (Cross Array)

ตัวอย่างเช่น ในการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่มีปัจจัย 5 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ จะมีจำนวนการทดลองมากถึง $3^5 = 243$ การทดลอง แต่หากใช้ OA’s ในกลวิธีของทางสถิติ จะใช้ OA’s ชนิด $L^{27}(3^5)$ ซึ่งจำนวนการทดลองจะลดลงเหลือเพียง 27 ครั้ง เท่านั้น ตารางที่ 4 แสดงตัวอย่างออโธโกนอลอาร์เรย์แบบ $L_9 3^4$ ซึ่งความหมายว่า เป็นแบบแผนการทดลองที่จำนวนการทดลอง 9 ครั้ง และรองรับจำนวนปัจจัยได้สูงสุด 4 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับสังเกตว่า ทางสถิติจะใช้ตัวเลข -1, 0, 1 แทนระดับ ต่ำ กลาง และสูง ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ออโธโกนอลอาร์เรย์ชนิด $L_9 3^4$

Run	Parameter			
	A	B	C	D
1	-1	-1	-1	-1
2	-1	0	0	0
3	-1	+1	+1	+1
4	0	-1	0	+1
5	0	0	+1	-1
6	0	+1	-1	0
7	+1	-1	+1	0
8	+1	0	-1	+1
9	+1	+1	0	-1

ตารางที่ 5 แสดงตัวอย่างออโธโกนอลอาร์เรย์แบบ $L_4 2^3$ ซึ่งมีความหมายว่า เป็นแบบแผนการทดลองที่มีจำนวนการทดลอง 4 ครั้ง และรองรับจำนวนปัจจัยได้สูงสุด 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ

ตารางที่ 5 ออโคโนมอลอาร์เรย์ชนิด $L_4 2^3$

Run	Parameter		
	A	B	C
1	-1	-1	-1
2	-1	+1	+1
3	+1	-1	+1
4	+1	+1	-1

ตารางที่ 6 แสดงการผนวก (Crossing) ที่เกิดจากอินเนอร์อาร์เรย์ชนิด L_9 และ เออร์เทอร์อาร์เรย์ชนิด L_4 เกิดครอสส์อาร์เรย์ที่มีจำนวนการทดลอง $9 \times 4 = 36$ การทดลอง

ตารางที่ 6 ครอสส์อาร์เรย์ชนิด $L_9 \times L_4$

Cross Array $L_9 \times L_4$					Outer Array				
					m	-1	1	1	-1
					n	-1	1	-1	1
Inner Array					o	-1	-1	1	1
Run	A	B	C	D					
1	-1	-1	-1	-1		y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{14}
2	-1	0	0	0		y_{21}	y_{22}	y_{23}	y_{24}
3	-1	1	1	1		y_{31}	y_{32}	y_{33}	y_{34}
4	0	-1	0	1		y_{41}	y_{42}	y_{43}	y_{44}
5	0	0	1	-1		y_{51}	y_{52}	y_{53}	y_{54}
6	0	1	-1	0		y_{61}	y_{62}	y_{63}	y_{64}
7	1	-1	1	0		y_{71}	y_{72}	y_{73}	y_{74}
8	1	0	-1	1		y_{81}	y_{82}	y_{83}	y_{84}
9	1	1	0	-1		y_{91}	y_{92}	y_{93}	y_{94}

การจะใช้ออโคโนมอลอาร์เรย์แบบเดี่ยวหรือจะใช้ครอสส์อาร์เรย์นั้นขึ้นอยู่กับ การกำหนดขอบเขตของการทดลอง หากพิจารณาเฉพาะปัจจัยที่ศึกษาโดยไม่สนใจปัจจัยรบกวน จะใช้ออโคโนมอลอาร์เรย์แบบเดี่ยวที่เหมาะสมกับจำนวนปัจจัย แต่ถ้าสนใจปัจจัยรบกวนด้วยจะเป็นการออกแบบการทดลองของทากูชิที่สมบูรณ์ (Complete Taguchi Experimental Design) ซึ่งจะใช้ครอสส์อาร์เรย์ในการทดลอง

3.2 อัตราส่วนซิกนอลต่อนอยส์ (Signal to Noise Ratio, S/N)

อัตราส่วนสัญญาณไปยังสิ่งรบกวน (Signal-to-Noise Ratio ; S/N) เป็นเครื่องมือวัดประสิทธิภาพของกระบวนการร่วมกัน ระหว่างค่าเฉลี่ยกับค่าผันแปร (Single Performance Measure) จึงได้ค่าที่เหมาะสมโดยลดความผันแปรของกระบวนการ ซึ่งความสัมพันธ์ของสมการอัตราส่วนสัญญาณไปยังสิ่งรบกวนนั้น เลขเศษหรือสัญญาณของอัตราส่วนคือความสามารถของกระบวนการในการสร้างผลิตภัณฑ์ที่ดีหรือความสามารถของผลิตภัณฑ์เพื่อการดำเนินการได้อย่างถูกต้อง ตัวส่วนคือ ผลรวมของผลกระทบของปัจจัยแทรกซ้อนที่มีต่อกระบวนการ หรือผลิตภัณฑ์ การกำหนดระดับปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ทำให้สามารถผลิตคุณลักษณะด้านการทำงานที่ดีที่สุด (High Level) ในกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์และสามารถลดอิทธิพลที่ไม่สามารถควบคุมได้ให้เหลือน้อยที่สุด (Lowest Noise) ดังนั้นเป้าหมายในการดำเนินการทดลองออกแบบพารามิเตอร์ (Parameter Design) คือการปรับปรุงสมรรถนะของกระบวนการและผลิตภัณฑ์ให้สามารถทำงานได้อย่างดีในสิ่งแวดล้อมที่หลากหลายการวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณไปยังสิ่งรบกวนเป็นการวิเคราะห์เพื่อศึกษาว่าคุณรูป ผลิตภัณฑ์มีความมั่นคงต่อปัจจัยรบกวน (Noise) ได้ดีเพียงใด ซึ่งการกำหนดว่าจะให้ปัจจัยใดมีค่าเท่าใดต้องมุ่งเน้นให้อัตราส่วนสัญญาณไปยังสิ่งรบกวนค่ามากที่สุดเพราะยังมีค่ามากแสดงว่ายิ่งเข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่ทำให้กระบวนการเกิดความมั่นคง ซึ่งมี 3 กรณีดังนี้

- 1) กรณีที่ต้องการค่าน้อยเป็นค่าที่ดีกว่า (Smaller-the-Better)

$$S/N_S = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]$$

- 2) กรณีที่ต้องการค่ามากเป็นค่าที่ดีกว่า (Larger-the-Better)

$$S/N_L = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right]$$

- 3) กรณีที่ต้องการค่าตามความต้องการเป็นค่าที่ดีที่สุด (Target-the-Best)

$$S/N_T = -10 \log \left[\frac{\bar{y}^2}{S^2} \right]$$

3.3 ขั้นตอนการทดลองด้วยวิธีของทากูชิ

การออกแบบพารามิเตอร์ของทากูชิหรือการออกแบบการทดลองแบบทากูชิเป็นเทคนิคที่ต้องการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการและผลิตภัณฑ์ให้มากที่สุดและลดต้นทุนให้ต่ำที่สุดซึ่งเป็นหลักการหาค่าที่ดีที่สุดของปัจจัยที่ส่งผลต่อความผันแปรของความสามารถกระบวนการ

1) ทำความเข้าใจถึงปัญหา (Problem Recognition and Formulation) ขั้นตอนนี้ต้องพยายามทำความเข้าใจว่าอะไรที่เป็นปัญหาและวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2) เลือกผลตอบของปัญหา (Select Quality Characteristic) ผู้ทดลองควรแน่ใจว่าตัวแปรนี้ จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่มีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องกำหนดให้ได้ว่าอะไร คือตัวแปรตอบและจะวัดตัวแปรเหล่านั้นอย่างไรก่อนที่จะเริ่มการทดลองจริง

3) เลือกการออกแบบการทดลอง (Select Design or Process Parameters) เลือกให้ เหมาะสมกับจำนวนปัจจัยควบคุมทั้งหมดที่คิดว่าส่งผลต่อค่าคุณลักษณะที่เลือกไว้

4) ทำการแบ่งประเภทปัจจัย (Classify Design Parameters into Control, Noise and Signal Factors) ทำการแบ่งปัจจัยตามลักษณะว่าปัจจัยไหนเป็นปัจจัยควบคุม ปัจจัยรบกวน และปัจจัยผลตอบสนอง

5) กำหนดระดับของปัจจัยควบคุม (Determine Levels of Design or Process Parameters) เลือกตามวัตถุประสงค์และความเหมาะสมของการทดลอง นิยมทำการทดลองที่ 2-3 ระดับ ถ้าการทดลองมีปัจจัยควบคุมจำนวนมากและมีข้อจำกัดของเวลาและทรัพยากรควรใช้ 2 ระดับ แต่ถ้ามีจำนวนปัจจัยควบคุมน้อย หรือจำนวนมากแต่ไม่มีข้อจำกัดของเวลาและทรัพยากรควรใช้ 3 ระดับ

6) กำหนดคู่ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกัน (Identify Interactions) ผู้ทดลองต้องกำหนดคู่ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกันและมีผลต่อตัวแปรผลตอบสนอง เพราะเทคนิคทากูชิจะไม่สามารถหาค่าคู่ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกันได้ครบทุกตัวดังนั้นต้องพิจารณาให้รอบคอบ

7) เลือกคอลัมน์ของการจัดเรียงแบบออร์ทोगอนอล (Choose Appropriate Orthogonal Array; OA) การเลือกการจัดเรียงแบบออร์ทोगอนอลเป็นตารางกำหนดค่าระดับการทดลองที่มีแนวนอนเป็นจำนวนครั้งที่ทำการทดลองและแนวตั้งเป็นตัวแปรที่จะกำหนดให้โดยก่อนเลือกการจัดเรียงแบบออร์ทोगอนอลต้องใช้ควบคู่กับกราฟเส้นตรง (Linear Graphs) และตารางแสดงอันตรกิริยา (Interaction Tables) มาประกอบด้วยเพื่อทำความเข้าใจกับการออกแบบที่มีการจัดเรียงแบบออร์ทोगอนอล การกำหนดว่าปัจจัยอยู่ในคอลัมน์ใดในตาราง OA ต้องใช้ Linear Graphs ประกอบและการเลือก OA ยังขึ้นกับค่าวัดจำนวนข้อมูลที่สามารถผันแปรได้ อย่างอิสระเมื่อกำหนดค่าที่ต้องการ (Degrees of Freedom : df) ระหว่างปัจจัยควบคุมกับปัจจัยที่มี ผลกระทบต่อกันและผลตอบของการทดลองตลอดจนวัตถุประสงค์ในการทดลองที่มีข้อจำกัดของ เวลาและทรัพยากร

8) ทำการทดลอง (Conduct Experiments) ทำการทดลองตามแผนที่กำหนดจากตารางการจัดเรียงแบบออร์ทोगอนอล

9) วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยหลักการทางสถิติ (Perform Statistical Analysis) ใช้วิธีการทางสถิติในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อดูว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองและช่วยให้การตัดสินใจมีประสิทธิภาพ

10) ทำการทดลองซ้ำและสรุปผลการทดลอง (Perform a Confirmatory Experiment and Implement Results) หลังจากวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองแล้วจะต้องหาข้อสรุปและข้อเสนอแนะของผลการทดลองที่เกิดขึ้น เพื่อนำเสนอผลงานให้หน่วยงานหรือผู้เกี่ยวข้องรับทราบนอกจากนี้ควรทำการทดลองเพื่อตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้น

ดังนั้นการออกแบบการทดลองจึงอาจนำมาใช้ทั้งการพัฒนากระบวนการที่มีปัญหา เพื่อให้กระบวนการนั้นมีสมรรถนะดีขึ้น หรือทำให้เกิดความมั่นคง (Robust or Insensitive) ต่อแหล่งความผันแปรที่อยู่ภายนอกวิธีการควบคุมกระบวนการทางสถิติ และการออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือสองชนิดที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการปรับปรุง และหาค่าที่ดีที่สุดของกระบวนการ ดังเช่น ถ้ากระบวนการอยู่ในการควบคุมทางสถิติแต่ความสามารถของกระบวนการยังไม่ดีนักจึงต้องมีการปรับปรุงกระบวนการ เพื่อลดความผันแปรให้น้อยลงดังนั้นการออกแบบการทดลองจึงทำให้ความสามารถของกรรมวิธีการผลิต ความมั่นคงของระบบ และความเชื่อมั่นเพิ่มขึ้นตลอดจนเวลาในการผลิตและต้นทุนลดลง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การศึกษาปัจจัยในกระบวนการผลิตด้วย DOE

มนตรี วิมล; และคณะ (2562) ได้ศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการหล่อทองเหลืองแบบอินเวสเมนต์ โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม (Design of Experiment : DOE) โดยใช้การทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2 ระดับ ซึ่งประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ระยะเวลาอบแบบหล่ออุณหภูมิแบบหล่อและอุณหภูมิเทโลหะหลอมเหลว ผลการศึกษาพบว่าทุกปัจจัยมีผลกระทบต่อชิ้นงานหล่ออย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการหล่อทองเหลืองแบบอินเวสเมนต์คือ ระยะเวลาในการอบแบบหล่อ 3 ชั่วโมง อุณหภูมิแบบหล่อ 300 องศาเซลเซียส และระดับอุณหภูมิในการเทโลหะ 800 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมการผลิตภัณฑ์เครื่องทองเหลือง

นนทวัฒน์ อภิกรมกุล; และกรรณชัย กัลป์ยาศิริ (2565) ได้ทำการศึกษาเพื่อที่จะลดตำหนิรูพรุนแบบหดตัว (Shrinkage Porosity) ที่เกิดในเงินสีชมพู โดยได้ทำการศึกษาอุณหภูมิอบเผา และอุณหภูมิหล่อ โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวน และแบ่งระดับของปัจจัยเป็น 3 ระดับ และจะทำซ้ำการทดลองละ 3 ครั้ง ซึ่งเท่ากับ $3^2 \times 3$ เท่ากับ 27 การทดลอง และได้นำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธี Anova ซึ่งจากผลการวิเคราะห์จะพบว่าปัจจัยเพียงแค่อุณหภูมิอบเผาหรืออุณหภูมิหล่อ เพียงอย่างเดียวนั้นไม่ส่งผลต่อตำหนิรูพรุนแบบหดตัว แต่ทั้ง 2 ปัจจัยร่วมกันต่างหากที่ส่งผลต่อตำหนิรูพรุนแบบหดตัว และเมื่อนำไปวิเคราะห์

ด้วยกราฟอันตรกิริยา (Interaction Plots) นั้นจะพบว่าจะได้ปัจจัยที่เหมาะสมที่ส่งผลให้เกิดตำหนิ รุปรุนแบบหดตัว 3 คู่ คือ อุณหภูมิอบเบ้า 540 เซลเซียส กับอุณหภูมิหล่อ 1,020 เซลเซียส แต่เนื่องจากอุณหภูมิหล่อ 1,020 นั้นมีความเสี่ยงที่จะเกิด Missrun ปัจจัยนี้จึงไม่ถูกนำไปพิจารณา ใช้งาน จึงเหลือปัจจัยที่เหมาะสมเพียง 2 คู่เท่านั้นคือ อุณหภูมิอบเบ้า 480 เซลเซียสกับอุณหภูมิหล่อ 1,060 เซลเซียส และอุณหภูมิอบเบ้า 600 เซลเซียสกับอุณหภูมิหล่อ 1,030 เซลเซียส และเมื่อนำปัจจัยนี้ไปใช้ผลิตงานจริงพบว่าสามารถลดของเสียได้จากที่เคยเกิด 56% เหลือเพียง 25%

ปาพณี ปาลกะวงศ์ ณ อยุธยา (2561) ได้ทำการศึกษาการลดของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติกของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment : DOE) โดยศึกษาในกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์แห่งหนึ่ง ซึ่งมีของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติกจำนวนมาก จึงได้ปรับปรุงกระบวนการฉีดพลาสติกเพื่อลดของเสีย ซึ่งพบปัญหาของเสียที่เกิดขึ้นบ่อย 4 ปัญหาหลัก โดยปัญหาของเสียที่พบมากที่สุด คือ ปัญหาชิ้นงานฉีดไม่เต็ม จึงนำมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุที่เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องเบื้องต้นของการเกิดของเสีย และได้นำหลักการ 4M เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาและหาสาเหตุ พบว่าเกิดจากการปรับตั้งค่าของเครื่องฉีดพลาสติก ซึ่งมีทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ 1. อุณหภูมิในการอุ่นเม็ด 2. อุณหภูมิในการฉีดพลาสติก 3. อุณหภูมิแม่พิมพ์ 4. แรงดันในการฉีด โดยแบ่งระดับของปัจจัยเป็น 2 ระดับ และใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบ 2k Full Factorial Design เพื่อหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อของการเกิดของเสีย โดยมีการทดลองทั้งหมด 48 การทดลอง จากนั้นทำการวิเคราะห์ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้หลักการ Response Optimization ในการหาค่าของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์คืออุณหภูมิในการอุ่นเม็ดพลาสติก 120 เซลเซียส, อุณหภูมิในการฉีดพลาสติก 275 เซลเซียส, อุณหภูมิแม่พิมพ์ 84 เซลเซียส และแรงดันในการฉีด 34 MPa ซึ่งเมื่อนำพารามิเตอร์นี้มาใช้ปรับตั้งค่าเครื่องฉีดพลาสติกในกระบวนการสามารถลดของเสียได้ถึง 88.05%

2. การศึกษาปัจจัยในกระบวนการผลิตด้วย Taguchi Method

เคชาว คามโบว์ (Keshav Kamboj. 2017) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของแก้วซ์ที่ใช้สำหรับการหล่อแบบปราณีต ที่มีส่วนผสมของ พาราฟินแก้วซ์, คานัวร์แก้วซ์, ไมโครคริสตัลลีนแก้วซ์ และซีฟี่ ในอัตราส่วนที่ต่างกัน จำนวน 15 ตัวอย่าง โดยจะศึกษาคุณสมบัติทางด้านการหดตัวเชิงเส้น การหดตัวเชิงปริมาตร และความเรียบของผิวหลังการขึ้นรูปจากกระบวนการฉีด โดยพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการฉีดนั้นมีปัจจัยอยู่ 4 ปัจจัยคือ อุณหภูมิการฉีด, อุณหภูมิแม่พิมพ์, แรงในการฉีด และการพักแม่พิมพ์ก่อนแกะแก้วซ์ โดยปัจจัยที่ 4 ปัจจัยนี้ แบ่งเป็นอย่างละ 3 ระดับ หรือมีจำนวนการทดลองทั้งหมด $3^4 = 81$ การทดลอง แต่ในงานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองแบบ Taguchi Method จึงเหลือการทดลองเพียง $L_9 = 9$ การทดลอง โดยก่อนที่จะเลือกสูตรที่จะใช้สำหรับการทดลองด้วยการฉีดขึ้นรูปได้ทำการวัดค่าการหดเชิงเส้นและการหดเชิง

ปริมาณของทั้ง 15 สูตร พบว่าเร็กซ์สูตรที่ 13 มีการหดตัวน้อยที่สุด จากนั้นจึงใช้เร็กซ์สูตรที่ 13 ไปทดลองฉีดตามพารามิเตอร์ที่กำหนดจาก Taguchi Method พบว่าการทดลองที่ 7 นั้นทำให้ได้ค่าความเรียบของผิวเร็กซ์หลังฉีดมากที่สุดที่ 0.85 Rm (μm)

ทาริก; และคณะ (Tariq; et al. 2021) ได้ทำการศึกษาเพื่อลดของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตแบบ HPDC โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ taguchi method ช่วยในการทดลอง โดยได้เลือกศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตทั้งสิ้น 6 ปัจจัย ได้แก่ แรงดันในการฉีด, อุณหภูมิโลหะ, เวลาในการเย็นตัวของแม่พิมพ์, อุณหภูมิแม่พิมพ์, ความเร็วในการฉีดช่วงที่ 1 และความเร็วในการฉีดช่วงที่ 2 โดยทุกปัจจัยแบ่งได้ 3 ระดับ ซึ่งมีจำนวนการทดลองทั้งหมด $3^6 = 729$ แต่ได้เลือกใช้การทดลองแบบ L_{27} ตามหลักของ Taguchi Method ซึ่งมีการทดลองทั้งหมด 27 และนำผลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ด้วยค่า Mean และ S/N Ratio ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์เมื่อนำไปผลิตตามปัจจัยดังกล่าว สามารถลดการเกิดของเสียลงได้ 61%

3. การศึกษาปัจจัยที่ก่อให้เกิดตำหนิในเครื่องประดับ

พิทชยา พนมวรรณ; และสมเกียรติ ตั้งจิตสัทเจริญ (Phitchaya Phanomwan; and Somkiat. Tangjitsitcharoen. 2017) ได้ศึกษาถึงวิธีการที่จะลดการเกิดตำหนิในกำไลประดับพลอยที่เกิดจากกระบวนการผลิตเครื่องประดับ ซึ่งพบว่ากำไลนั้นมีการไม่ผ่านเกณฑ์คุณรูปมากกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องประดับชนิดอื่นๆ เช่นแหวน หรือต่างหู หรือจี้ โดยลักษณะของตำหนิที่พบบนนั้น โดยการใช้การแจกแจงในรูปของการฟฟาเรโต้ พบว่า ตำหนิที่พบบมากที่สุด 5 อันดับคือ 1) พลอยหลุด 2) ครีบก/ตะเข็บ 3) ล้างปูนหล่อไม่หมด 4) รอยกระแทกที่ผิว และ 5) เครื่องประดับเสียรูป และได้แก้ปัญหาที่พบทั้ง 5 นั้นไปวิเคราะห์ถึงสาเหตุและนำไปวิเคราะห์ด้วย FMEA อีกครั้ง พร้อมทั้งวิธีการดำเนินการแก้ไข โดยพบว่าปัญหาที่เกิดขึ้นนั้นหากสามารถดำเนินการตามวิธีการแก้ไขที่นำเสนอไปแล้วนั้นจะสามารถลดการเกิดปัญหาลงได้ถึง 48.89%

จิตรลดา พิศาลสังข์คุณ; และคณะ (2560) ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแบบหล่อที่ส่งผลต่อตำหนิที่เกิดของโลหะผสมสีขาวที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อขึ้นฝั่งหาย โดยได้ควบคุมอุณหภูมิการหลอมของโลหะผสมสีขาวไว้ที่ 990 เซลเซียส และปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของแบบหล่อที่ทำจากปูนปลาสเตอร์สำหรับหล่อเครื่องประดับที่ 400, 550 และ 630 เซลเซียส ซึ่งผลที่ศึกษาคือการหดตัวและรูพรุนจากการหดตัว และผลที่ได้คือการใช้อุณหภูมิแบบหล่อที่ 400 เซลเซียสให้ผลการหดตัวที่ต่ำที่สุด และมีรูพรุนจากการหดตัวที่ต่ำสุดด้วยเช่นกัน โดยมีพื้นที่การเกิดรูพรุนคิดเป็น 0.41% เมื่อเทียบกับพื้นที่ทั้งหมดของชิ้นงาน ในขณะที่อุณหภูมิของแบบหล่อที่สูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดรูพรุนเพิ่มสูงขึ้นเป็นลำดับ

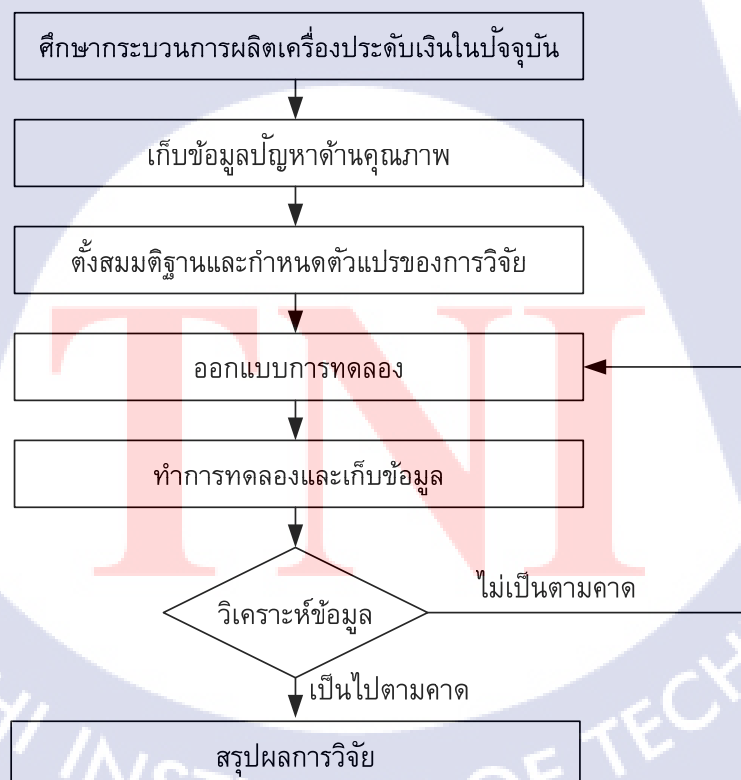
บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพการผลิตเครื่องประดับเงินกรณีศึกษาบริษัท XYZ โดยมุ่งเน้นที่การศึกษาด้วยการออกแบบการทดลอง แบบทากูชิเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ และระดับของปัจจัยในกระบวนการเป็นสำคัญ และสามารถนำผลจากการทดลองระบุเป็นข้อแนะนำในการผลิตเครื่องประดับเงินเพื่อให้มีคุณภาพที่ดีต่อไปได้ โดยมีวิธีการในการดำเนินการวิจัยดังนี้

วิธีการดำเนินงาน/แนวทางการแก้ปัญหา

วิธีการศึกษาที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยของกระบวนการหล่อเครื่องประดับเงินของบริษัท XYZ นั้นเป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง โดยเป็นการวิจัยที่ใช้ข้อมูลจากการทดลอง การวิจัยประเภทนี้ต้องอาศัยความรู้เกี่ยวกับเรื่อง การออกแบบการทดลอง ซึ่งเป็นวิธีต่างๆ ที่ใช้ในการวางแผนการทดลอง เพื่อให้การทดลองกระบวนการหล่อเครื่องประดับเงินเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 23



รูปที่ 23 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ขั้นตอนในการดำเนินงาน

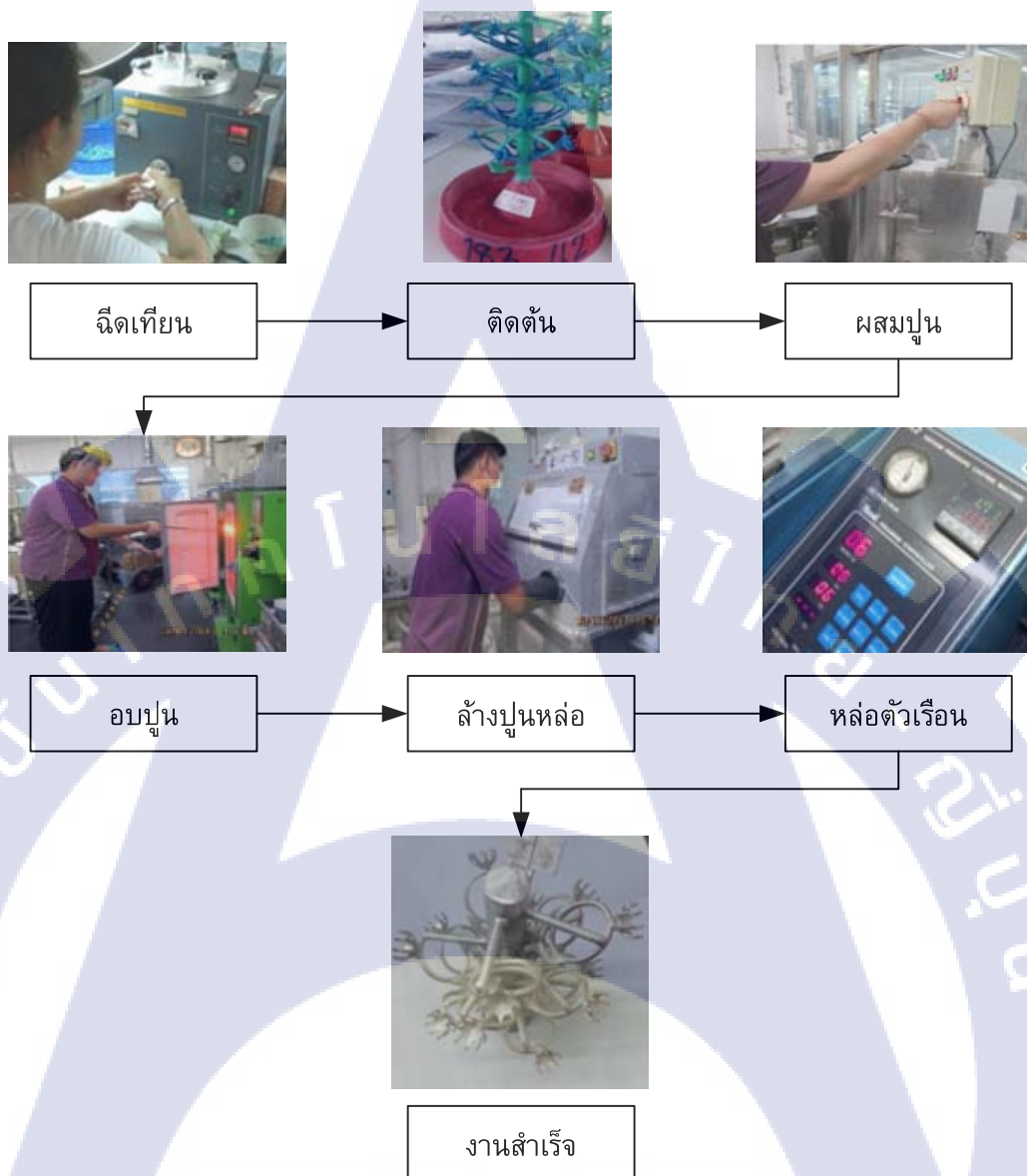
ขั้นตอนการดำเนินงานดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ขั้นตอนและการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	รายละเอียด
1. ศึกษากระบวนการผลิตและเก็บข้อมูลการผลิตปัจจุบัน	- เก็บข้อมูลปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตในปัจจุบัน - เก็บข้อมูลตำหนิที่พบจากการผลิต
2. ระบุหัวข้อทางด้านคุณภาพ	- ระบุหัวข้อทางด้านคุณภาพเพื่อใช้สำหรับการบันทึกข้อมูลการทดลอง
3. กำหนดตัวแปรของการวิจัย	- นำข้อมูลปัญหาที่พบจากกระบวนการผลิตในปัจจุบัน มาระบุความน่าจะเป็นของปัจจัยต่างๆ ที่เป็นสาเหตุของปัญหาด้านคุณภาพ
4. ออกแบบการทดลอง	- นำตัวแปรจากการตั้งสมมติฐานมาออกแบบการทดลองด้วย Taguchi Method
5. ทำการทดลองและเก็บข้อมูล	- ทำการทดลองตามที่ได้ผลการออกแบบไว้ - บันทึกข้อมูลของผลการทดลองโดยระบุจำนวนตำหนิที่พบในเครื่องประดับแต่ละชิ้น
6. วิเคราะห์ข้อมูล	- วิเคราะห์ผลที่ได้ว่าแต่ละการทดลองที่ตัวแปรแตกต่างกันมีผลเป็นเช่นไร แบบใดให้ผลที่ดีที่สุด และแบบไหนให้ผลที่แย่ที่สุด
7. ยืนยันผลการทดลอง	- ทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลด้วยปัจจัยการผลิตที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง
8. เปรียบเทียบผลก่อนและหลังปรับปรุง	- เปรียบเทียบตำหนิก่อนและหลังปรับปรุง
9. สรุปผลการวิจัย	- สรุปผลการทดลองและขอเสนอแนะสำหรับกระบวนการผลิตเครื่องประดับเงิน

2. เก็บข้อมูลการผลิตปัจจุบัน

เพื่อให้ทราบถึงข้อมูลปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการผลิตเครื่องประดับเงินปัจจุบันนั้น จำเป็นต้องทราบขั้นตอนการผลิตเบื้องต้นก่อน โดยสามารถเขียนเป็นแผนผังขั้นตอนได้ดังรูปที่ 24 และเมื่อทราบถึงขั้นตอนการทำงานแล้วจึงจะสามารถกำหนดปัจจัยต่างๆ ในการผลิตได้ และจะทำการสุ่มตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง (ตัวอย่างละ 15 ชิ้น) เพื่อเป็นตัวแทนของตำหนิที่มีในปัจจุบัน



รูปที่ 24 ขั้นตอนการผลิตเครื่องประดับเงิน

3. ระบุหัวข้อทางด้านคุณภาพ

การระบุหัวข้อทางด้านคุณภาพนั้นมาจากข้อมูลที่ได้จากการค้นคว้าและข้อมูลที่ได้จากข้อมูลที่ได้พบจริงในกระบวนการผลิตภายในบริษัท XYZ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะเน้นเฉพาะปัญหาทางด้านคุณภาพที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อเท่านั้น ซึ่งสามารถระบุได้ดังนี้

ตารางที่ 8 หัวข้อด้านคุณภาพที่ทำการเก็บข้อมูลและบันทึก

1.	Misrun	หล่อไม่สมบูรณ์
2.	Fin/Flash	ครีป
3.	Rough Surface	ผิวหยาบ
4.	Crack	รอยแตกร้าว
5.	Hard Spot	ตุ่มแข็ง
6.	Gas Porosity	รูจากฟองอากาศ
7.	Shrinkage Porosity	รูจากการหดตัว

4. กำหนดตัวแปรของการวิจัย

จากการสำรวจกระบวนการผลิตเครื่องประดับเงินของบริษัท XYZ นั้น สามารถกำหนดปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของการผลิตด้วยการหล่อได้ 8 ปัจจัย ดังนี้

- 1) รูปแบบการอบปูน (Burning Step)
 - 2) ขนาดก้านทางน้ำ (Sprue Diameter)
 - 3) อุณหภูมิหล่อโลหะ (Casting Temperature ($^{\circ}\text{C}$))
 - 4) อุณหภูมิอบเบ้าปูน (Flask Temperature ($^{\circ}\text{C}$))
 - 5) % วัสดุดิบโลหะใหม่ (%New Material)
 - 6) ปริมาณน้ำ (Water (%))
 - 7) เวลาในการพักเบ้าปูน (Bench Time (Hour))
 - 8) ขนาดทางเดินน้ำโลหะหลัก (Main Sprue Diameter (mm.))
- และได้กำหนดตัวแปรที่ต้องควบคุมไว้ 4 ปัจจัย ดังนี้

- 1) ยี่ห้อของปูนหล่อ (Casting Investment)
- 2) ความยาวของก้านทางน้ำ (Sprue Length (mm.))
- 3) จำนวนชิ้นงานที่หล่อ/ต้น (Number of Pcs/Tree)
- 4) เครื่องหล่อที่ใช้ (Casting Machine)

5. ออกแบบการทดลอง

จากตัวแปรข้างต้น ทั้ง 8 ตัวแปรสามารถกำหนดระดับของตัวแปรได้ 2 ระดับ 1 ตัวแปร และ 3 ระดับ 7 ตัวแปร โดยสามารถกำหนดระดับของตัวแปรทั้ง 8 ตาม Orthogonal Array L18 ($2^1 3^7$) ตามมาตรฐานของ Taguchi Method ได้ตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ระดับของตัวแปรที่กำหนดสำหรับการออกแบบการทดลอง

ปัจจัย (Factor)	ระดับ (Level)		
	1	2	3
A. รูปแบบการอบปูน (Burning Step)	ปัจจุบัน	ผู้ผลิตปูน	
B. ขนาดก้านทางน้ำ (Sprue Diameter (mm.))	2.6	3.0	U Shape 2.6
C. อุณหภูมิหล่อโลหะ (Casting Temperature ($^{\circ}\text{C}$))	915	970	1,030
D. อุณหภูมิอบเบ้าปูน (Flask Temperature ($^{\circ}\text{C}$))	550	600	650
E. วัสดุดิบโลหะใหม่ (New Material (%))	40	50	60
F. ปริมาณน้ำ (Water (%))	36	38	40
G. เวลาในการพักเบ้าปูน (Bench Time (Hour))	1	1.5	2
H. ขนาดทางเดินน้ำโลหะ (Main Sprue Diameter (mm.))	6	7	8

6. ทำการทดลองและเก็บข้อมูล

การทดลองนี้จะทำการหล่อตามแบบการทดลองของ Taguchi ที่ได้กำหนดไว้ จำนวน 18 การทดลอง โดยจะทำการหล่อทดลองวันละ 1 การทดลอง ซึ่งจะใช้เวลาในการทดลองทั้งหมด 18 วัน ภายใต้ตัวแปรที่ควบคุม 4 ดังนี้

- 1) ยี่ห้อของปูนหล่อ (Casting Investment) : ปูนหล่อยี่ห้อ C
- 2) ความยาวของก้านทางน้ำ (Sprue Length (mm.)) : 10 mm.
- 3) จำนวนชิ้นงานที่หล่อ/ต้น (Number of Pcs/Tree) : 16 ชิ้น ต่อต้น
- 4) เครื่องหล่อที่ใช้ (Casting Machine) : เครื่องหล่อยี่ห้อ Yasui

หลังจากที่ได้ชิ้นงานลองมาแล้ว จำนวน 16 ชิ้น ในแต่ละการทดลอง จะเก็บชิ้นงานไว้ 1 เพื่อเป็นตัวแทนของชิ้นงานในการทดลองนั้นๆ ในขณะที่ชิ้นงานอีก 15 ชิ้น จะนำไปผ่าชิ้นงานเพื่อดูตำหนิภายในและอื่นๆ ไปตรวจเพื่อวิเคราะห์จำนวนตำหนิที่พบและบันทึกลงในเอกสารตามรูปที่ 25

RunOrder	Sample	Burning Step	Sprue diameter	Casting Temp	Flask Temp	% new material	Water ratio	Benchtime	Main sprue diameter	misrun	fin/flash Severity level	Rough surface Severity level	Crack	Hard spot	Gas Porosity	Shrinkage Porosity	Porosity Summary	Total Porosity	Cross-section
1	1	2	2	2	3	1	2	1	3										
	1.1																		
	1.2																		
	1.3																		
	1.4																		
	1.5																		
	1.6																		
	1.7																		
	1.8																		
	1.9																		
	1.10																		
	1.11																		
	1.12																		
	1.13																		
	1.14																		
	1.15																		

รูปที่ 25 เอกสารสำหรับบันทึกผลการทดลอง

7. วิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำไปใช้วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab ภายใต้วิธีของ Taguchi Method L_{18} โดยพิจารณาค่า Mean และ Signal to Noise Ratio เป็นสำคัญ

8. ยืนยันผลการทดลอง

เมื่อได้ปัจจัยที่ดีที่สุดแล้วจะทำการทดลองซ้ำอีก 3 การทดลอง เพื่อยืนยันผลการทดลองว่าได้ผลตามที่วิเคราะห์ไว้หรือไม่ โดยวัดจากจำนวนตำหนิที่พบในเครื่องประดับเป็นสำคัญ

9. เปรียบเทียบผลก่อนและหลังปรับปรุง

เปรียบเทียบจำนวนของตำหนิที่พบในปัจจุบันกับตำหนิที่พบหลังจากผลิตด้วยปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ของการออกแบบแล้ว โดยเทียบให้เห็นความแตกต่างทางด้าน จำนวนและเปอร์เซ็นต์ที่เปลี่ยนแปลงไปว่ามากขึ้นหรือน้อยลงเพียงใด

10. สรุปผลการวิจัย

เมื่อได้ผลการวิเคราะห์ของการทดลองแล้ว จะนำมาสรุประดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเป็นแนวทางให้กับทางบริษัท XYZ นำไปใช้ในการผลิตเครื่องประดับเงินต่อไป

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

1) Minitab Version 21 ใช้สำหรับออกแบบการทดลอง และวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 26 โปรแกรม Mini Tab

2) Microsoft Excel ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลและวิเคราะห์ผลในเชิงแผนภูมิเส้น



รูปที่ 27 โปรแกรม Microsoft Excel

3) เครื่องหล่อเย็น Yasui รุ่น KT18 สำหรับการหล่อเครื่องประดับเงิน



รูปที่ 28 Casting Machine

4) เครื่องขัด LAM PLAN รุ่น SMARTLAM® 2.0 สำหรับขัดผิวตัวอย่างก่อนการตรวจนับตำหนิ



รูปที่ 29 เครื่องขัดเตรียมผิวตัวอย่าง

5) Digital Microscope Motic PA53MET สำหรับถ่ายรูปและตรวจนับตำหนิ



รูปที่ 30 Digital Microscope

บทที่ 4

ผลการวิจัยและสรุปผล

จากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของการผลิตเครื่องประดับเงินของบริษัท XYZ นั้น ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง และนำมาวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ โดยใช้หลักการทางสถิติมาให้นิเคราะห์ด้วย เพื่อให้ได้ทราบถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่ศึกษา ซึ่งแสดงผลการทดลองที่ได้ดังนี้

1. เก็บข้อมูลการผลิตปัจจุบัน
2. ผลการดำเนินการทดลองตามการออกแบบการทดลอง
3. การวิเคราะห์ผลการทดลอง
4. ยืนยันผลการทดลอง
5. เปรียบเทียบผลการทดลอง ก่อนและหลังปรับปรุง
6. ข้อเสนอแนะสำหรับกระบวนการผลิตเครื่องประดับเงิน

เก็บข้อมูลการผลิตปัจจุบัน

จากการสำรวจเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับการผลิตเครื่องประดับเงินในปัจจุบันนั้นทำให้ทราบว่าปัจจุบันทางบริษัทใช้ปัจจัยในการผลิตเครื่องประดับเงิน ดังนี้

ตารางที่ 10 ปัจจัยที่ใช้ผลิตในปัจจุบัน

รูปแบบการอบปูน	ขนาดก้านทางน้ำ	อุณหภูมิหล่อโลหะ	อุณหภูมิอบเบ้าปูน	%วัตถุดิบโลหะใหม่	ปริมาณน้ำ	เวลาในการพักเบ้าปูน	ขนาดทางเดินน้ำโลหะหลัก
ปัจจุบัน	U shape 2.6 mm	1030 องศาเซลเซียส	650 องศาเซลเซียส	50%	38%	2 ชั่วโมง	6 mm

โดยจากการสุ่มเก็บข้อมูลจำนวน 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 15 วง ดำเนินที่พบ ดังนี้

ตารางที่ 11 ดำเนินที่พบจากการสุ่มเก็บตัวอย่างของผลิตปัจจุบัน

Flask	Misrun	Fin/Flash	Rough Surface	Crack	Hard Spot	Gas Porosity	Shrinkage Porosity	Total Porosity
1	0	0	0	0	0	118	330	448
2	0	0	0	0	0	113	336	449
3	0	0	0	0	0	117	348	465

ซึ่งตำหนิที่พบมีเพียง 2 ชนิดคือ ตำหนิจากจากแก๊สและตำหนิจากการหดตัว โดยมีตำหนิเฉลี่ยจาก 45 ตัวอย่าง 30.26 จุดต่อวง ใช้ระยะเวลาในการซ่อมเฉลี่ย 40 นาทีต่อวง

ผลการดำเนินการทดลองตามการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองในงานวิจัยนี้ได้ใช้ Taguchi Method ในการออกแบบการทดลอง เนื่องจากมีความเหมาะสมกับปัจจัยที่สนใจที่จะศึกษา และสามารถลดจำนวนการทดลองได้เป็นจำนวนมาก โดยปัจจัยที่สนใจในการศึกษานี้มีทั้งหมด 8 ปัจจัยโดยแบ่งเป็นระดับได้ดังนี้

ตารางที่ 12 ระดับของปัจจัยที่กำหนดสำหรับการออกแบบการทดลอง

ปัจจัย (Factor)	ระดับ (Level)		
	1	2	3
A. รูปแบบการอบปูน (Burning Step)	ปัจจุบัน	ผู้ผลิตปูน	
B. ขนาดก้านทางน้ำ (Sprue Diameter (mm.))	2.6	3.0	U Shape 2.6
C. อุณหภูมิหล่อโลหะ (Casting Temperature (°C))	915	970	1,030
D. อุณหภูมิอบเบ้าปูน (Flask Temperature (°C))	550	600	650
E. วัสดุดิบโลหะใหม่ (New Material (%))	40	50	60
F. ปริมาณน้ำ (Water (%))	36	38	40
G. เวลาในการพักเบ้าปูน (Bench Time (Hour))	1	1.5	2
H. ขนาดทางเดินน้ำโลหะ (Main Sprue Diameter (mm.))	6	7	8

ซึ่งจากประสบการณ์และองค์ความรู้ที่มีในอดีต บริษัทพบว่ายิ่งปรับลดระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตลง ปัญหา Porosity ที่เกิดขึ้นยังมีแนวโน้มลดลงตามไปด้วย จึงกำหนดระดับอุณหภูมิหล่อโลหะและอุณหภูมิอบเบ้าปูน ตามตารางที่ 12

จากตารางที่ 12 จะสามารถเขียนสมการจำนวนการทดลองได้เป็น $(2^1 \times 3^7)$ หรือมีจำนวนการทดลองแบบ Full Factorial = 4,374 การทดลอง แต่ถ้าใช้หลักการทดลองแบบ Taguchi Method จะตรงการทดลองแบบ L18 ซึ่งทำการทดลองเพียง 18 การทดลองเท่านั้น

Taguchi Design

Design Summary

Taguchi Array L18($2^1 3^7$)

Factors: 8

Runs: 18

Columns of L18($2^1 3^7$) array: 1 2 3 4 5 6 7 8

รูปที่ 31 ผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Minitab

ลำดับการทดลองทั้ง 18 การทดลองสามารถแจกแจงได้ตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ลำดับการทดลองตามการออกแบบ Taguchi Method L18 ($2^1 \times 3^7$)

การทดลอง	ปัจจัย							
	รูปแบบการอบปูน (A)	ขนาดก้อนทางน้ำ (B)	อุณหภูมิหล่อโลหะ (C)	อุณหภูมิอบเบ้าปูน (D)	%วัตถุดิบโลหะใหม่ (E)	ปริมาณน้ำใช้ผสมปูน (F)	เวลาพักเบ้าปูน (G)	ขนาดทางน้ำโลหะหลัก (H)
1	2	2	2	3	1	2	1	3
2	2	1	2	1	1	3	3	2
3	1	2	2	2	3	3	1	1
4	2	2	1	2	3	1	3	2
5	1	1	3	3	3	3	3	3
6	2	3	3	2	1	2	3	1
7	2	3	1	3	2	3	1	2
8	2	3	2	1	3	1	2	3
9	1	2	3	3	1	1	2	2
10	1	2	1	1	2	2	3	3
11	1	3	1	2	1	3	2	3
12	1	3	3	1	3	2	1	2
13	1	1	1	1	1	1	1	1
14	1	1	2	2	2	2	2	2
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	1	3	2	3	2	1	3	1
17	2	1	1	3	3	2	2	1
18	2	1	3	2	2	1	1	3

ซึ่งผลการทดลองตามตารางที่ 13 นั้นแสดงไว้ดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ผลการทดลองทั้ง 18 การทดลอง

การทดลอง	Misrun	Fin/Flash	Rough surface	Crack	Hard Spot	Gas Porosity	Shrinkage Porosity	Total Porosity
1	0	0	0	0	0	2.267	8.067	10.333
2	0	0	0	0	0	2.133	12.400	14.533
3	0	0	0	0	0	1.733	8.067	9.800
4	0	0	0	0	0	0.933	6.667	7.600
5	0	0	0	0	0	1.267	13.867	15.133
6	0	0	0	0	0	0.667	23.267	23.933
7	0	0	0	0	0	1.133	16.000	17.133
8	0	0	0	0	0	0.533	17.200	17.733
9	0	0	0	0	0	0.867	19.467	20.333
10	0	0	0	0	0	1.133	24.867	26.000
11	0	0	0	0	0	0.933	26.067	27.000
12	0	0	0	0	0	0.533	13.133	13.667
13	0	0	0	0	0	0.400	25.400	25.800
14	0	0	0	0	0	0.933	14.400	15.333
15	0	0	0	0	0	1.067	19.200	20.267
16	0	0	0	0	0	0.667	19.067	19.733
17	0	0	0	0	0	1.000	20.733	21.733
18	0	0	0	0	0	1.067	15.867	16.933

จากผลการทดลองทั้ง 18 ทดลอง จะพบว่าผลการทดลองที่ 4 นั้นจะได้เครื่องประดับเงินที่คุณภาพดีที่สุด โดยมีตำหนิที่พบเฉลี่ย 7.6 จุดต่อวง ขณะที่การทดลองที่ 11 จะพบตำหนิมากที่สุด 27 จุดต่อวง

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในข้างต้น เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าการตอบสนองต่อ Signal to Noise Ratio โดยแยกผลการวิเคราะห์เป็น 3 คือ 1. Gas Porosity 2. Shrinkage Porosity และ 3. Total Porosity จะได้ผลดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์ Response Table for SN Ratios

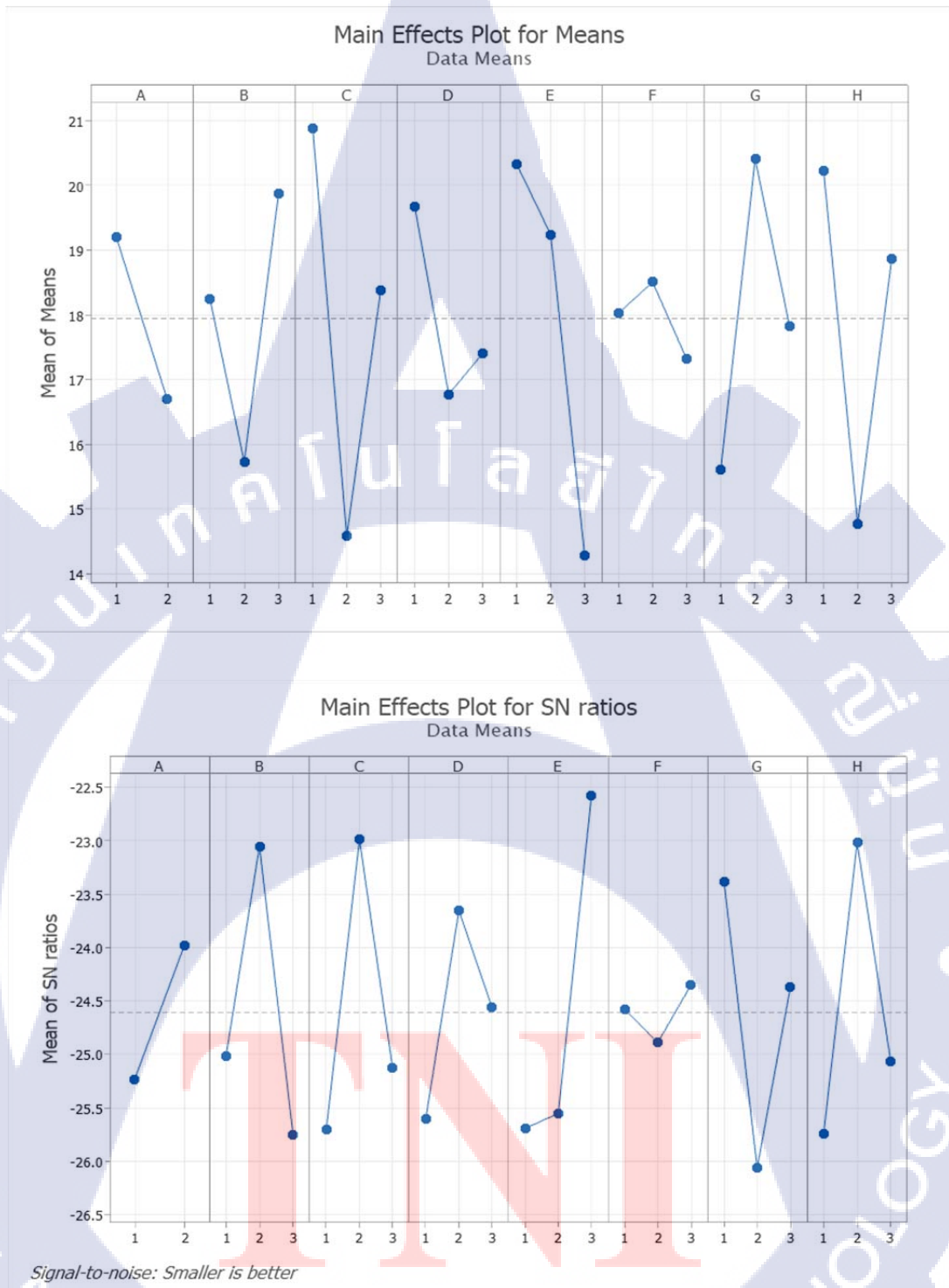
	Level	A	B	C	D	E	F	G	H
Gas Porosity	1	1.27379	-0.10616	1.16384	1.77499	-0.06101	3.03705	-0.01905	1.61071
	2	-0.70179	-1.94848	-1.48091	-0.00310	0.13761	0.23103	1.22349	0.03886
	3		2.91264	1.17507	-0.91389	0.78140	-2.41009	-0.34644	-0.79157
	Delta	1.97558	4.86112	2.65598	2.68889	0.84242	5.44714	1.56993	2.40228
	Rank	6	2	4	3	8	1	7	5

ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์ Response Table for SN Ratios (ต่อ)

	Level	A	B	C	D	E	F	G	H
Shrinkage Porosity	1	-24.69	-24.39	-25.20	-25.10	-24.92	-24.11	-22.47	-25.20
	2	-23.18	-22.02	-21.94	-22.91	-25.07	-24.21	-25.66	-22.29
	3		-25.40	-24.67	-23.80	-21.81	-23.49	-23.67	-24.32
	Delta	1.51	3.39	3.27	2.20	3.26	0.72	3.19	2.90
	Rank	7	1	2	6	3	8	4	5
Total Porosity	1	-25.23	-25.02	-25.70	-25.60	-25.69	-24.58	-23.38	-25.74
	2	-23.98	-23.05	-22.99	-23.66	-25.55	-24.89	-26.06	-23.02
	3		-25.75	-25.13	-24.56	-22.58	-24.35	-24.37	-25.06
	Delta	1.25	2.69	2.71	1.94	3.11	0.54	2.68	2.71
	Rank	7	4	3	6	1	8	5	2

จากตารางที่ 15 เมื่อแยกพิจารณาจะเห็นว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือค่าความผันแปร (Variance) ของ Gas Porosity มากที่สุดคือ F (ปริมาณน้ำใช้ผสมปูน) ในขณะที่ Shrinkage Porosity คือ B (ขนาดของทางน้ำ) ซึ่งจะเห็นว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความผันแปรของตัวแปรแต่ละชนิดนั้นมีความแตกต่างกัน เนื่องจาก Gas Porosity และ Shrinkage Porosity นั้นมีสาเหตุการเกิดที่ต่างกัน แต่ตัวแปรทั้ง 2 ชนิดต่างใช้กระบวนการในการซ่อมแบบเดียวกัน จึงสามารถพิจารณาร่วมกันโดยยึดผลของการวิเคราะห์ Total Porosity เป็นสำคัญ เพื่อจุดประสงค์ในการหาระดับปัจจัยที่ทำให้เกิดจำนวนตำหนิในเครื่องประดับที่น้อยที่สุด ซึ่งจะทำให้ใช้เวลาในการซ่อมน้อยที่สุดด้วยเช่นกัน

เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ Response Table for SN Ratios ของ Total Porosity ด้วยหลักการ One-half Rule of Thumb พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือค่าความผันแปรของ Total Porosity (เรียงลำดับตาม Rank ของ Delta) ประกอบด้วย E (วัตถุดิบโลหะใหม่), H (ขนาดทางน้ำโลหะหลัก), C (อุณหภูมิหล่อโลหะ), B (ขนาดก้านทางน้ำ), G (เวลาพักเบ้าปูน), D (อุณหภูมิอบเบ้าปูน) และ A (รูปแบบการอบปูน) ส่วน F (ปริมาณน้ำใช้ผสมปูน) ไม่มีผลต่อ Variance ของ Total Porosity



รูปที่ 32 ระดับความสัณพันธ์ของปัจจัยของ Total Porosity

ตารางที่ 16 ผลการวิเคราะห์ Response Table for Means ของ Total Porosity

	Level	A	B	C	D	E	F	G	H
Total Porosity	1	19.20	18.24	20.88	19.67	20.32	18.02	15.61	20.21
	2	16.69	15.72	14.58	16.77	19.23	18.50	20.40	14.77
	3		19.87	18.38	17.40	14.28	17.31	17.82	18.86
	Delta	2.51	4.14	6.30	2.90	6.04	1.19	4.79	5.44
	Rank	7	5	1	6	2	8	4	3

จากตารางที่ 16 จากผลการวิเคราะห์ Response Table for Means ด้วยหลักการ One-Half Rule of Thumb พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยหรือค่า Mean ของ Total Porosity (เรียงลำดับตาม Rank ของ Delta) ประกอบด้วย C (อุณหภูมิหล่อโลหะ), E (วัตถุดิบโลหะใหม่), H (ขนาดทางน้ำโลหะหลัก), G (เวลาพักเบ้าปูน), B (ขนาดก้านทางน้ำ), D (อุณหภูมิอบเบ้าปูน) และ A (รูปแบบการอบปูน) ส่วน F (ปริมาณน้ำใช้ผสมปูน) ไม่มีผลต่อ Mean ของ Total Porosity

เนื่องจากปัจจัยที่มีผลต่อ Variance ทุกปัจจัยมีผลต่อ Mean ของ Total Porosity การกำหนดค่าของปัจจัยที่จะทำให้ Total Porosity มีค่าน้อยที่สุด จึงพิจารณาจาก SN Ratios เท่านั้น ทั้งนี้ให้พิจารณาจากกราฟของ SN Ratios ได้ผลดังนี้

A กำหนดให้เป็น Level 2

B กำหนดให้เป็น Level 2

C กำหนดให้เป็น Level 2

D กำหนดให้เป็น Level 2

E กำหนดให้เป็น Level 3

F กำหนดให้เป็น Level ใดก็ได้ที่ประหยัดและสะดวกแก่การทำงาน

G กำหนดให้เป็น Level 1

H กำหนดให้เป็น Level 2

จากการวิเคราะห์ด้วยคำสั่ง Stat > DOE > Taguchi > Predict Taguchi Results... ได้ผลดังแสดง คือ ค่าเฉลี่ยของ Total Porosity = 0.744444

Prediction

S/N Ratio

Mean

-15.0310

0.744444

รูปที่ 33 ผลการคาดการณ์ด้วย Minitab

Settings

A	B	C	D	E	G	H
2	2	2	2	3	1	2

รูปที่ 34 การกำหนดค่าของปัจจัย

ตารางที่ 17 ปัจจัยที่เหมาะสมกับการหล่อที่ทำให้เกิดตำหนิน้อยที่สุด

ปัจจัย	รูปแบบการอบปูน (A)	ขนาดกันทางน้ำ (B)	อุณหภูมิหล่อโลหะ (C)	อุณหภูมิอบเบ้าปูน (D)	%วัตถุดิบโลหะใหม่ (E)	ปริมาณน้ำใช้ผสมปูน (F)	เวลาพักเบ้าปูน (G)	ขนาดทางน้ำโลหะหลัก (H)
Total Porosity	ผู้ผลิตปูน	3.0 mm.	970 องศาเซลเซียส	600 องศาเซลเซียส	60%	แบบใดก็ได้	1 ชั่วโมง	7 mm.

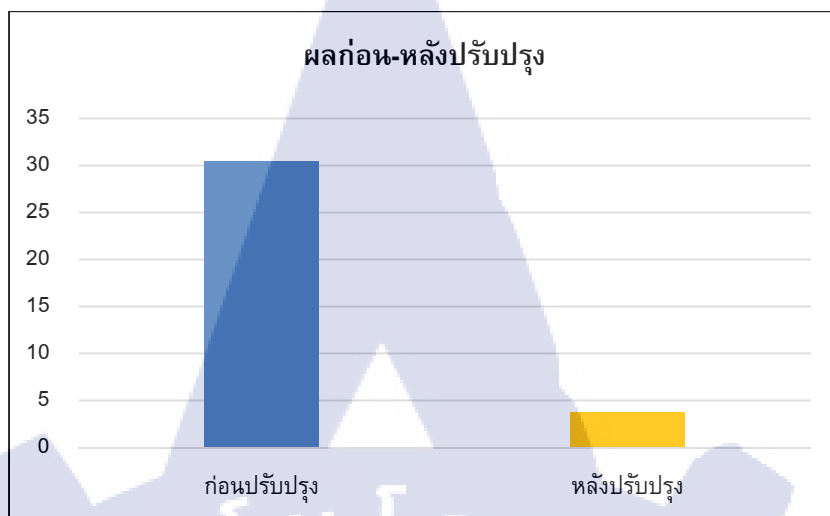
ยืนยันผลการทดลอง

เมื่อได้ปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลองก่อนหน้านี้แล้ว จึงได้ทำการทดลองหล่อเพื่อยืนยันผลจำนวน 3 ครั้ง โดยใช้ปัจจัยที่สรุปจากการทดลองก่อนหน้านี้ โดยมีผลการทดลองตามที่ได้แสดงอยู่ในภาคผนวก ข

ผลจากการหล่อทดลอง 3 ครั้ง พบว่าการหล่อครั้งที่ 1 จำนวนตำหนิจาก เฉลี่ย 3.40 จุดต่อวง, การหล่อครั้งที่ 2 จำนวนตำหนิจาก เฉลี่ย 4.20 จุดต่อวง และการหล่อครั้งที่ 3 จำนวนตำหนิจากเฉลี่ย 3.66 จุดต่อวง หรือค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 ครั้ง อยู่ที่ 3.75 จุดต่อวง

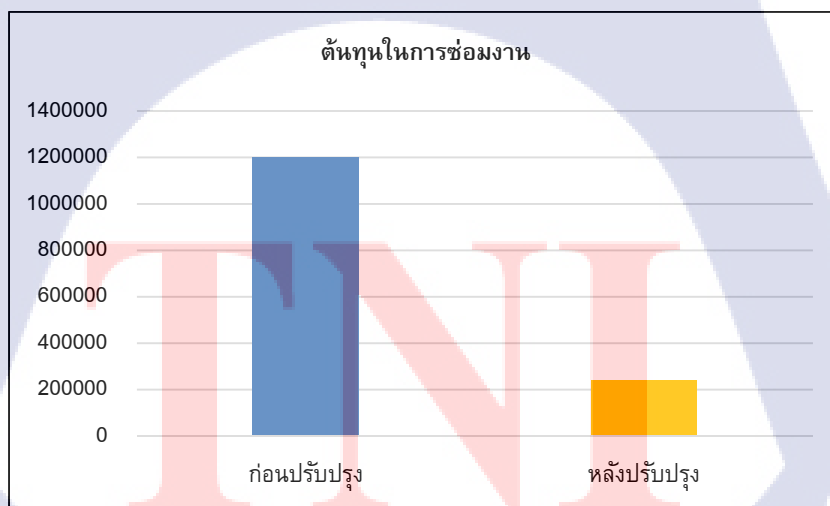
เปรียบเทียบผลการทดลอง ก่อนและหลังปรับปรุง

จากการเก็บข้อมูลเบื้องต้นก่อนเริ่มการทดลอง พบว่าตำหนิเฉลี่ยที่พบต่อวงคือ 30.48 จุด และเมื่อทำมาเทียบกับการผลิตด้วยกระบวนการตามปัจจัยที่ได้จากการทดลองจะมีตำหนิอยู่ที่ 3.75 จุดต่อวง หรือลดลง 87.69%



รูปที่ 35 จำนวนตำหนิก่อน-หลังปรับปรุง

หรือหากเทียบเป็นมูลค่าที่สามารถลดเวลาการซ่อมงาน ซึ่งก่อนปรับปรุงใช้เวลา 40 นาทีต่อวง ลดเหลือ 8 นาทีต่อวง โดยค่าแรงของพนักงานบริษัท XYZ เฉลี่ยอยู่ที่ 2 บาทต่อนาที และประมาณการจากยอดการผลิตเครื่องประดับเงิน 15,000 วงต่อปี ก็จะสามารถลดค่าใช้จ่ายได้ถึง 960,000 บาทต่อปี หรือลดค่าใช้จ่ายจากเดิมลงได้ถึง 80%



รูปที่ 36 ค่าใช้จ่ายในการซ่อมงาน ก่อน-หลังปรับปรุง

ข้อเสนอแนะสำหรับกระบวนการผลิตเครื่องประดับเงิน

จากการทดลองจะเห็นว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพในการผลิตเครื่องประดับเงินนั้นมีจำนวนค่อนข้างมาก ซึ่งในงานวิจัยนี้ที่ทำการทดลองเพียง 8 ปัจจัยก็ยังส่งผลต่อคุณภาพของเครื่องประดับเงินเกือบทั้งสิ้น ซึ่งหากทำการทดลองแบบ Full Factorial ก็จะมีจำนวนการทดลองมากถึง 4,374 การทดลอง หากใช้เทคนิคดังกล่าวจะนับเป็นการสิ้นเปลืองทั้งเวลาและทรัพยากรเป็นอย่างมาก การนำการออกแบบการทดลองแบบ Taguchi Method มาใช้นั้นสามารถช่วยลดระยะเวลาและทรัพยากรในการทดลองได้เป็นอย่างมาก แม้ผลที่ออกมาจะไม่ได้ทำให้ตำหนิที่พบเป็นศูนย์ แต่ก็สามารถลดตำหนิลงจากเดิมได้มากกว่า 80% ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพียงครั้งเดียวจึงอาจทำให้ผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง หากผู้ที่ต้องการนำไปต่อยอดหรือศึกษาเพิ่มเติมอาจเพิ่มจำนวนครั้งในการทดลองเป็น 3 ครั้งต่อการทดลองเพื่อให้ผลการทดลองที่ได้มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้น

ในการทดลองสุดท้ายแม้จะเป็นปัจจัยที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลอง ก็ยังพบตำหนิและข้อบกพร่องอยู่บ้าง ซึ่งอาจทำการลดตำหนิหรือข้อบกพร่องจำนวนนี้ได้โดย ลดจำนวนปัจจัยลงและเลือกเฉพาะปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิด Porosity สูงๆ เพื่อทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ค่าระดับปัจจัยที่ดีที่สุดต่อไป แต่อาจจะต้องพิจารณาควบคู่ไปกับต้นทุนที่ใช้ในการทดลองกับค่าใช้จ่ายในการซ่อมงานที่จะสามารถประหยัดได้เพิ่มขึ้น ว่าเมื่อทำการทดลองสำเร็จแล้วอย่างใดจะมีความคุ้มค่ามากกว่ากัน

กรณีที่ทางบริษัท XYZ จะนำปัจจัยการหล่อเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้จริงต้องเน้นย้ำให้ทางพนักงานดำเนินการตามข้อกำหนดและควบคุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องอย่างเคร่งครัด เพื่อไม่ให้สภาพปัจจัยแวดล้อมต่างๆ มีความผิดแปลกไปจากในการทดลองนี้ซึ่งอาจจะส่งผลให้คุณภาพของเครื่องประดับเงินที่ได้นั้นมีความแตกต่างไปจากผลการศึกษาในครั้งนี้

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

บรรณานุกรม

TNI

บรรณานุกรม

- กระทรวงพาณิชย์. (2565). **มูลค่าส่งออกสินค้าของไทย**. สืบค้นเมื่อ 7 กรกฎาคม 2565, จาก <https://tradereport.moc.go.th/DashBoard/Default.aspx>.
- จิตรลดา พิศาลสังคุณ; และคณะ. (2560). อิทธิพลของอุณหภูมิแบบหล่อต่อข้อบกพร่องของโลหะสีขาวในกระบวนการหล่อขึ้นฝั่งหาย. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจร**. 1(5) : 91-101.
- ฉลอง สีแก้วสีว. (2562ก). **Fractional Factorial Designs**. สืบค้นเมื่อ 7 กรกฎาคม 2565, จาก http://www.geocities.ws/chalong_sri/Fract_DOE.htm.
- (2562ข). **Full Factorial Design**. สืบค้นเมื่อ 7 กรกฎาคม 2565, จาก http://www.geocities.ws/chalong_sri/Full_DOE.htm.
- เดช เหมือนขาว. (2544). **สิ่งบกพร่องที่เกิดจากการหล่อ**. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- นันท์วัฒน์ อภิกมลกุล; และกรรณชัย กัลป์ยาศิริ. (2565). การลดรูปพูนในเงินสีชมพูที่หล่อด้วยวิธีการหล่อแบบประณีต : กรณีศึกษาของบริษัทผลิตเครื่องประดับแห่งหนึ่ง. **วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม**. 16(3) : 80-89.
- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา; และพงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. (2552). **การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง**. กรุงเทพฯ : บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.
- ปาณิกา เสนาदनตรี. (2549). **การพัฒนาประสิทธิภาพงานหล่อเครื่องประดับด้วยการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง**. สารนิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมอุตสาหการ). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ปาพจน์ ปาลกะวงศ์ ณ อยุธยา. (2561). **การออกแบบการทดลองเพื่อลดของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติกของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์**. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมอุตสาหการ). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- มนตรี วิมล; และคณะ. (2562). การศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการหล่อทองเหลืองแบบอินเวสเมนต์ด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง. **Dutch Journal of Educational Research**. 20(1) : 39-48.
- ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2541). **คุณสมบัติของโลหะมีค่าสำหรับอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ**. กรุงเทพฯ : กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม.
- สุภชัย ประเสริฐสกุล. (2546). **เทคโนโลยีการหล่อโลหะ**. อุบลราชธานี : ไซน์แอนด์เอ็นจิเนียริง.

Dieter Ott. (2001). **Handbook on Casting and Other Defects**. London : World Gold Council.

Keshav Kamboj. (2017). Optimization of Process Parameters of Wax Pattern in the Investment Casting Process by Using Different form of Waxes. **Journal of Advanced Review on Scientific Research**. 3(8) : 10-14.

Phitchaya Phanomwan; and Somkiat. Tangjitsitharoen. (2017). Reduction of Defects in Jewelry Manufacturing. **Materials Science and Engineering**. 215(3) : 1-5.

Tariq; et al. (2021). Minimizing the Casting Defects in High-Pressure Die Casting Using Taguchi Analysis. **Scientia Iranica**. 29(1) : 53-69.

William Fowlkes; and Clyde Creveling. (1995). **Engineering Methods for Robust Product Design Using Taguchi Methods in Technology and Product Development**. Canada : Wesley Publishing Company.



TNI

ภาคผนวก

TNI

ภาคผนวก ก.

ผลการทดลอง

TNI

ตารางที่ 18 ข้อมูลการเก็บผลการทดลองตามแนวทางทฤษฎี L18

RunOrder	Sample	Misrun	Fin/ Flash	Rough Surface	Crack	Hard Spot	Gas Porosity	Shrinkage Porosity	Total Porosity
1	1.1	0	0	0	0	0	1	12	155
	1.2	0	0	0	0	0	5	12	
	1.3	0	0	0	0	0	1	7	
	1.4	0	0	0	0	0	1	6	
	1.5	0	0	0	0	0	0	9	
	1.6	0	0	0	0	0	2	10	
	1.7	0	0	0	0	0	2	13	
	1.8	0	0	0	0	0	4	4	
	1.9	0	0	0	0	0	0	2	
	1.10	0	0	0	0	0	2	4	
	1.11	0	0	0	0	0	8	12	
	1.12	0	0	0	0	0	1	16	
	1.13	0	0	0	0	0	3	8	
	1.14	0	0	0	0	0	2	4	
	1.15	0	0	0	0	0	2	2	
2	2.1	0	0	0	0	0	3	3	218
	2.2	0	0	0	0	0	1	4	
	2.3	0	0	0	0	0	8	11	
	2.4	0	0	0	0	0	0	20	
	2.5	0	0	0	0	0	2	10	
	2.6	0	0	0	0	0	5	11	
	2.7	0	0	0	0	0	2	12	
	2.8	0	0	0	0	0	2	11	
	2.9	0	0	0	0	0	2	19	
	2.10	0	0	0	0	0	1	13	
	2.11	0	0	0	0	0	0	16	
	2.12	0	0	0	0	0	2	1	
	2.13	0	0	0	0	0	2	20	
	2.14	0	0	0	0	0	1	21	
	2.15	0	0	0	0	0	1	14	
3	3.1	0	0	0	0	0	0	7	147
	3.2	0	0	0	0	0	1	3	
	3.3	0	0	0	0	0	2	12	
	3.4	0	0	0	0	0	1	5	
	3.5	0	0	0	0	0	1	2	
	3.6	0	0	0	0	0	0	9	
	3.7	0	0	0	0	0	2	7	
	3.8	0	0	0	0	0	0	12	
	3.9	0	0	0	0	0	3	4	
	3.10	0	0	0	0	0	6	2	
	3.11	0	0	0	0	0	2	13	
	3.12	0	0	0	0	0	1	6	
	3.13	0	0	0	0	0	2	10	
	3.14	0	0	0	0	0	2	19	
	3.15	0	0	0	0	0	3	10	

ตารางที่ 18 ข้อมูลการเก็บผลการทดลองตามแนวทางทฤษฎี L18 (ต่อ)

RunOrder	Sample	Misrun	Fin/ Flash	Rough Surface	Crack	Hard Spot	Gas Porosity	Shrinkage Porosity	Total Porosity
4	4.1	0	0	0	0	0	1	2	114
	4.2	0	0	0	0	0	1	8	
	4.3	0	0	0	0	0	0	8	
	4.4	0	0	0	0	0	1	9	
	4.5	0	0	0	0	0	3	10	
	4.6	0	0	0	0	0	2	4	
	4.7	0	0	0	0	0	1	7	
	4.8	0	0	0	0	0	1	4	
	4.9	0	0	0	0	0	0	5	
	4.10	0	0	0	0	0	1	8	
	4.11	0	0	0	0	0	1	8	
	4.12	0	0	0	0	0	0	9	
	4.13	0	0	0	0	0	0	5	
	4.14	0	0	0	0	0	1	8	
	4.15	0	0	0	0	0	1	5	
5	5.1	0	0	0	0	0	2	23	227
	5.2	0	0	0	0	0	2	22	
	5.3	0	0	0	0	0	2	22	
	5.4	0	0	0	0	0	1	12	
	5.5	0	0	0	0	0	1	7	
	5.6	0	0	0	0	0	6	9	
	5.7	0	0	0	0	0	1	13	
	5.8	0	0	0	0	0	0	18	
	5.9	0	0	0	0	0	1	9	
	5.10	0	0	0	0	0	1	23	
	5.11	0	0	0	0	0	0	9	
	5.12	0	0	0	0	0	0	20	
	5.13	0	0	0	0	0	0	6	
	5.14	0	0	0	0	0	1	8	
	5.15	0	0	0	0	0	1	7	
6	6.1	0	0	0	0	0	1	26	359
	6.2	0	0	0	0	0	0	20	
	6.3	0	0	0	0	0	0	37	
	6.4	0	0	0	0	0	1	24	
	6.5	0	0	0	0	0	2	18	
	6.6	0	0	0	0	0	0	26	
	6.7	0	0	0	0	0	1	26	
	6.8	0	0	0	0	0	1	38	
	6.9	0	0	0	0	0	1	16	
	6.10	0	0	0	0	0	0	22	
	6.11	0	0	0	0	0	0	13	
	6.12	0	0	0	0	0	1	15	
	6.13	0	0	0	0	0	2	17	
	6.14	0	0	0	0	0	0	28	
	6.15	0	0	0	0	0	0	23	

ตารางที่ 18 ข้อมูลการเก็บผลการทดลองตามแนวทางทฤษฎี L18 (ต่อ)

RunOrder	Sample	Misrun	Fin/ Flash	Rough Surface	Crack	Hard Spot	Gas Porosity	Shrinkage Porosity	Total Porosity
7	7.1	0	0	0	0	0	1	19	257
	7.2	0	0	0	0	0	1	14	
	7.3	0	0	0	0	0	0	9	
	7.4	0	0	0	0	0	2	12	
	7.5	0	0	0	0	0	3	13	
	7.6	0	0	0	0	0	1	17	
	7.7	0	0	0	0	0	2	17	
	7.8	0	0	0	0	0	2	16	
	7.9	0	0	0	0	0	1	9	
	7.10	0	0	0	0	0	0	20	
	7.11	0	0	0	0	0	0	14	
	7.12	0	0	0	0	0	2	27	
	7.13	0	0	0	0	0	1	17	
	7.14	0	0	0	0	0	1	18	
	7.15	0	0	0	0	0	0	18	
8	8.1	0	0	0	0	0	-	27	266
	8.2	0	0	0	0	0	-	24	
	8.3	0	0	0	0	0	-	23	
	8.4	0	0	0	0	0	1	7	
	8.5	0	0	0	0	0	2	20	
	8.6	0	0	0	0	0	2	15	
	8.7	0	0	0	0	0	-	20	
	8.8	0	0	0	0	0	-	8	
	8.9	0	0	0	0	0	1	23	
	8.10	0	0	0	0	0	1	17	
	8.11	0	0	0	0	0	-	26	
	8.12	0	0	0	0	0	-	13	
	8.13	0	0	0	0	0	-	10	
	8.14	0	0	0	0	0	1	10	
	8.15	0	0	0	0	0	-	15	
9	9.1	0	0	0	0	0	2	20	305
	9.2	0	0	0	0	0	1	6	
	9.3	0	0	0	0	0	-	19	
	9.4	0	0	0	0	0	-	20	
	9.5	0	0	0	0	0	1	22	
	9.6	0	0	0	0	0	1	23	
	9.7	0	0	0	0	0	1	15	
	9.8	0	0	0	0	0	1	21	
	9.9	0	0	0	0	0	2	20	
	9.10	0	0	0	0	0	-	9	
	9.11	0	0	0	0	0	-	17	
	9.12	0	0	0	0	0	1	33	
	9.13	0	0	0	0	0	1	37	
	9.14	0	0	0	0	0	-	26	
	9.15	0	0	0	0	0	2	4	

ตารางที่ 18 ข้อมูลการเก็บผลการทดลองตามแนวทางทฤษฎี L18 (ต่อ)

RunOrder	Sample	Misrun	Fin/ Flash	Rough Surface	Crack	Hard Spot	Gas Porosity	Shrinkage Porosity	Total Porosity
10	10.1	0	0	0	0	0	2	50	390
	10.2	0	0	0	0	0	1	19	
	10.3	0	0	0	0	0	1	21	
	10.4	0	0	0	0	0	-	16	
	10.5	0	0	0	0	0	2	20	
	10.6	0	0	0	0	0	1	22	
	10.7	0	0	0	0	0	-	27	
	10.8	0	0	0	0	0	4	33	
	10.9	0	0	0	0	0	-	28	
	10.10	0	0	0	0	0	1	13	
	10.11	0	0	0	0	0	-	27	
	10.12	0	0	0	0	0	1	19	
	10.13	0	0	0	0	0	2	24	
	10.14	0	0	0	0	0	2	29	
	10.15	0	0	0	0	0	-	25	
11	11.1	0	0	0	0	0	1	17	405
	11.2	0	0	0	0	0	2	18	
	11.3	0	0	0	0	0	1	15	
	11.4	0	0	0	0	0	3	22	
	11.5	0	0	0	0	0	-	24	
	11.6	0	0	0	0	0	3	31	
	11.7	0	0	0	0	0	1	25	
	11.8	0	0	0	0	0	1	23	
	11.9	0	0	0	0	0	-	32	
	11.10	0	0	0	0	0	-	27	
	11.11	0	0	0	0	0	1	12	
	11.12	0	0	0	0	0	-	26	
	11.13	0	0	0	0	0	-	33	
	11.14	0	0	0	0	0	1	29	
	11.15	0	0	0	0	0	-	57	
12	12.1	0	0	0	0	0	-	18	205
	12.2	0	0	0	0	0	1	8	
	12.3	0	0	0	0	0	1	13	
	12.4	0	0	0	0	0	-	9	
	12.5	0	0	0	0	0	-	10	
	12.6	0	0	0	0	0	1	16	
	12.7	0	0	0	0	0	-	13	
	12.8	0	0	0	0	0	-	19	
	12.9	0	0	0	0	0	2	13	
	12.10	0	0	0	0	0	-	14	
	12.11	0	0	0	0	0	-	5	
	12.12	0	0	0	0	0	3	15	
	12.13	0	0	0	0	0	-	9	
	12.14	0	0	0	0	0	-	24	
	12.15	0	0	0	0	0	-	11	

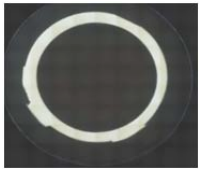
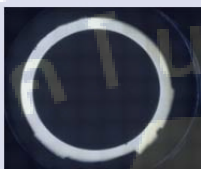
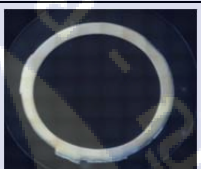
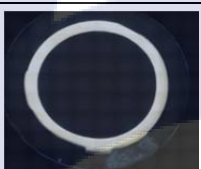
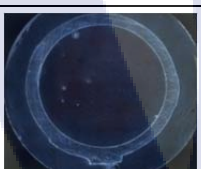
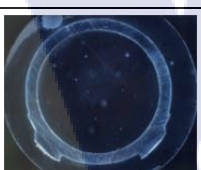
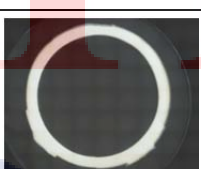
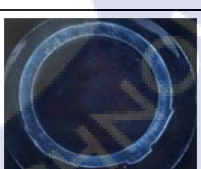
ตารางที่ 18 ข้อมูลการเก็บผลการทดลองตามแนวทางทฤษฎี L18 (ต่อ)

RunOrder	Sample	Misrun	Fin/ Flash	Rough Surface	Crack	Hard Spot	Gas Porosity	Shrinkage Porosity	Total Porosity
13	13.1	0	0	0	0	0	-	23	387
	13.2	0	0	0	0	0	1	32	
	13.3	0	0	0	0	0	-	18	
	13.4	0	0	0	0	0	1	35	
	13.5	0	0	0	0	0	-	30	
	13.6	0	0	0	0	0	-	28	
	13.7	0	0	0	0	0	-	26	
	13.8	0	0	0	0	0	-	31	
	13.9	0	0	0	0	0	-	16	
	13.10	0	0	0	0	0	1	33	
	13.11	0	0	0	0	0	-	23	
	13.12	0	0	0	0	0	1	28	
	13.13	0	0	0	0	0	-	26	
	13.14	0	0	0	0	0	2	17	
	13.15	0	0	0	0	0	-	15	
14	14.1	0	0	0	0	0	-	8	230
	14.2	0	0	0	0	0	-	11	
	14.3	0	0	0	0	0	-	16	
	14.4	0	0	0	0	0	1	12	
	14.5	0	0	0	0	0	-	15	
	14.6	0	0	0	0	0	2	27	
	14.7	0	0	0	0	0	2	18	
	14.8	0	0	0	0	0	3	16	
	14.9	0	0	0	0	0	-	16	
	14.10	0	0	0	0	0	-	17	
	14.11	0	0	0	0	0	2	8	
	14.12	0	0	0	0	0	1	18	
	14.13	0	0	0	0	0	1	13	
	14.14	0	0	0	0	0	2	11	
	14.15	0	0	0	0	0	-	10	
15	15.1	0	0	0	0	0	-	29	304
	15.2	0	0	0	0	0	2	17	
	15.3	0	0	0	0	0	-	18	
	15.4	0	0	0	0	0	-	14	
	15.5	0	0	0	0	0	-	20	
	15.6	0	0	0	0	0	2	22	
	15.7	0	0	0	0	0	2	30	
	15.8	0	0	0	0	0	1	19	
	15.9	0	0	0	0	0	-	16	
	15.10	0	0	0	0	0	-	23	
	15.11	0	0	0	0	0	1	11	
	15.12	0	0	0	0	0	1	14	
	15.13	0	0	0	0	0	-	18	
	15.14	0	0	0	0	0	1	17	
	15.15	0	0	0	0	0	6	20	

ตารางที่ 18 ข้อมูลการเก็บผลการทดลองตามแนวทางทฤษฎี L18 (ต่อ)

RunOrder	Sample	Misrun	Fin/ Flash	Rough Surface	Crack	Hard Spot	Gas Porosity	Shrinkage Porosity	Total Porosity
16	16.1	0	0	0	0	0	-	22	296
	16.2	0	0	0	0	0	1	18	
	16.3	0	0	0	0	0	1	17	
	16.4	0	0	0	0	0	1	19	
	16.5	0	0	0	0	0	1	14	
	16.6	0	0	0	0	0	-	10	
	16.7	0	0	0	0	0	-	24	
	16.8	0	0	0	0	0	-	22	
	16.9	0	0	0	0	0	-	14	
	16.10	0	0	0	0	0	-	16	
	16.11	0	0	0	0	0	3	24	
	16.12	0	0	0	0	0	-	23	
	16.13	0	0	0	0	0	1	10	
	16.14	0	0	0	0	0	1	34	
	16.15	0	0	0	0	0	1	19	
17	17.1	0	0	0	0	0	2	23	326
	17.2	0	0	0	0	0	2	21	
	17.3	0	0	0	0	0	-	26	
	17.4	0	0	0	0	0	1	21	
	17.5	0	0	0	0	0	2	19	
	17.6	0	0	0	0	0	2	31	
	17.7	0	0	0	0	0	-	17	
	17.8	0	0	0	0	0	-	14	
	17.9	0	0	0	0	0	-	18	
	17.10	0	0	0	0	0	-	22	
	17.11	0	0	0	0	0	-	15	
	17.12	0	0	0	0	0	1	18	
	17.13	0	0	0	0	0	1	27	
	17.14	0	0	0	0	0	1	21	
	17.15	0	0	0	0	0	3	18	
18	18.1	0	0	0	0	0	1	15	254
	18.2	0	0	0	0	0	-	17	
	18.3	0	0	0	0	0	-	18	
	18.4	0	0	0	0	0	2	19	
	18.5	0	0	0	0	0	1	18	
	18.6	0	0	0	0	0	3	25	
	18.7	0	0	0	0	0	-	12	
	18.8	0	0	0	0	0	-	26	
	18.9	0	0	0	0	0	2	13	
	18.10	0	0	0	0	0	2	13	
	18.11	0	0	0	0	0	-	15	
	18.12	0	0	0	0	0	-	16	
	18.13	0	0	0	0	0	2	18	
	18.14	0	0	0	0	0	1	7	
	18.15	0	0	0	0	0	2	6	

ตารางที่ 19 ภาพตัดขวางของชิ้นงานตัวอย่างจากแต่ละการทดลอง

ตัวอย่างที่	ภาพตัดขวาง	ตัวอย่างที่	ภาพตัดขวาง
1		10	
2		11	
3		12	
4		13	
5		14	
6		15	
7		16	
8		17	
9		18	

ภาคผนวก ข.

ผลการทดลองด้วยระดับปัจจัยที่คาดการณ์

TNI

ตารางที่ 20 ข้อมูลการเก็บผลการทดลองการด้วยค่าของปัจจัยที่จะทำให้ Total Porosity มีค่าน้อยที่สุด

RunOrder	Sample	Misrun	Fin/ Flash	Rough Surface	Crack	Hard Spot	Gas Porosity	Shrinkage Porosity	Total Porosity
1	1.1	0	0	0	0	0	1	3	51
	1.2	0	0	0	0	0	0	2	
	1.3	0	0	0	0	0	1	2	
	1.4	0	0	0	0	0	1	3	
	1.5	0	0	0	0	0	2	1	
	1.6	0	0	0	0	0	0	4	
	1.7	0	0	0	0	0	2	2	
	1.8	0	0	0	0	0	1	2	
	1.9	0	0	0	0	0	1	3	
	1.10	0	0	0	0	0	2	1	
	1.11	0	0	0	0	0	0	5	
	1.12	0	0	0	0	0	1	2	
	1.13	0	0	0	0	0	1	2	
	1.14	0	0	0	0	0	2	2	
	1.15	0	0	0	0	0	0	2	
2	2.1	0	0	0	0	0	3	1	63
	2.2	0	0	0	0	0	1	4	
	2.3	0	0	0	0	0	3	2	
	2.4	0	0	0	0	0	0	2	
	2.5	0	0	0	0	0	1	5	
	2.6	0	0	0	0	0	2	1	
	2.7	0	0	0	0	0	2	2	
	2.8	0	0	0	0	0	2	1	
	2.9	0	0	0	0	0	2	3	
	2.10	0	0	0	0	0	1	7	
	2.11	0	0	0	0	0	0	2	
	2.12	0	0	0	0	0	0	4	
	2.13	0	0	0	0	0	1	4	
	2.14	0	0	0	0	0	1	3	
	2.15	0	0	0	0	0	1	2	
3	3.1	0	0	0	0	0	1	3	55
	3.2	0	0	0	0	0	0	2	
	3.3	0	0	0	0	0	2	2	
	3.4	0	0	0	0	0	1	4	
	3.5	0	0	0	0	0	0	3	
	3.6	0	0	0	0	0	1	2	
	3.7	0	0	0	0	0	2	2	
	3.8	0	0	0	0	0	0	3	
	3.9	0	0	0	0	0	0	3	
	3.10	0	0	0	0	0	2	2	
	3.11	0	0	0	0	0	2	1	
	3.12	0	0	0	0	0	1	3	
	3.13	0	0	0	0	0	1	3	
	3.14	0	0	0	0	0	2	4	
	3.15	0	0	0	0	0	1	2	