



การลดรูพรุนในเงินสีชมพูที่หล่อด้วยวิธีการหล่อแบบประณีต: กรณีศึกษาของบริษัทผลิตเครื่องประดับแห่งหนึ่ง

न्हันวัฒน์ อภิกรมกุล และ กรรณชัย กัลยาศิริ*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: kkkannac@kmitl.ac.th

วันที่รับบทความ: 2 กันยายน 2563; วันที่ทบทวนบทความ: 16 พฤศจิกายน 2563; วันที่ตอบรับบทความ: 25 พฤศจิกายน 2563
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 9 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ: เนื่องจากการผลิตชิ้นงานเครื่องประดับจากเงินสีชมพูด้วยวิธีการหล่อแบบประณีต (Investment Casting) ของบริษัทกรณีศึกษาพบปัญหาคูณภาพชิ้นงานมากที่สุดในรูปแบบของรูพรุนจากการหดตัว (Shrinkage Porosity) ถึง 56% งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการลดข้อบกพร่องดังกล่าวโดยทำการศึกษาตัวแปรในการหล่อที่มีอิทธิพลต่อการเกิดรูพรุน เพื่อหาเงื่อนไขการหล่อที่เหมาะสมของการหล่อเงินสีชมพูด้วยวิธีการหล่อแบบประณีต ซึ่งมีตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิอบเบ้า (Flask Temperature) และอุณหภูมิหล่อ (Casting Temperature) และมีตัวแปรตอบสนองคือ เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุน โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองชนิดแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวน (Full Factorial Design) 3^k และพบว่าการใช้อุณหภูมิอบเบ้า $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ กับอุณหภูมิหล่อ $1030\text{ }^{\circ}\text{C}$ หรือการใช้อุณหภูมิอบเบ้า $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ กับอุณหภูมิหล่อ $1060\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทำให้มีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดรูพรุนน้อยกว่าเงื่อนไขการผลิตอื่น ๆ และเมื่อนำเงื่อนไขดังกล่าวมาใช้ในกระบวนการผลิตจริงทำให้ข้อบกพร่องลดลงจากเดิมโดยเฉลี่ย 29.5%

คำสำคัญ: การหล่อแบบประณีต; รูพรุน; เงินสีชมพู; การออกแบบการทดลอง



Reduction of Porosity in Investment-Casted Pink Silver: A Case Study of A Jewelry Company

Nanthawat Apikamolkul and Kannachai Kanlayasiri*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang

* Corresponding author, E-mail: kkkannac@kmitl.ac.th

Received: 2 September 2020; Revised 16 November 2020; Accepted: 25 November 2020

Online Published: 9 December 2020

Abstract: Shrinkage porosity was a major defect found up to 56% in an investment-casted pink silver of the case study company. This research was aimed to reduce the defect by using experimental designs with full factorial design 3^k strategy to study the influential casting factors and to find the optimal casting conditions. The casting factors included flask temperature and casting temperature while the response variable was the percentage of porosity area. Results showed that using the flask temperature at 600 °C with the casting temperature at 1030 °C or using the flask temperature at 480 °C with the casting temperature at 1060 °C provided the minimum percentage of shrinkage porosities. These optimal casting conditions reduced the percentage of defects by 29.5% on average.

Keywords: Investment Casting; Porosity; Pink Silver; Design of Experiments



1. บทนำ

อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับนับเป็นอุตสาหกรรมที่สร้างชื่อเสียงให้กับประเทศไทยมาเป็นระยะเวลานาน และได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วเนื่องจากประเทศไทยมีแหล่งวัตถุดิบที่อุดมสมบูรณ์ทำให้อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับกลายเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศไทยเป็นอย่างมาก จากข้อมูลการส่งออกของกระทรวงพาณิชย์พบว่า อัญมณีและเครื่องประดับเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญอันดับที่ 3 คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 4.74 ของสินค้าส่งออกโดยรวมของไทยในปี พ.ศ. 2561 นำรายได้เข้าสู่ประเทศไทยเป็นจำนวน 3.83 แสนล้านบาท [1] อีกทั้งยังเป็นอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดการจ้างแรงงานเป็นจำนวนมาก เนื่องจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมยังต้องใช้ความประณีตความละเอียดอ่อนของมนุษย์ซึ่งเครื่องจักรยังไม่สามารถทดแทนได้ [2] ในปัจจุบันอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับต้องเผชิญกับอุปสรรคทางการค้าและการแข่งขันที่เพิ่มมากขึ้นทั้งในด้านราคาและคุณภาพ เนื่องจากอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นสถานประกอบการขนาดกลางและขนาดเล็ก (SMEs) กระบวนการผลิตยังต้องใช้ทักษะและความชำนาญของผู้ปฏิบัติงานมาก ทำให้อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับส่วนใหญ่ยังขาดประสิทธิภาพในการผลิต [3]

ในปี 2562 ทางบริษัทกรณีศึกษาได้มีการผลิตชิ้นงานโดยใช้เงินสีชมพู (Pink Silver) ในการผลิตชิ้นงานที่มีมากกว่าสิบล้านชิ้น เมื่อคิดจากยอดการส่งผลิตในช่วงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 ถึงเดือน

มิถุนายน พ.ศ. 2562 ซึ่งเงินสีชมพูมีส่วนประกอบ 3 ชนิด คือ เงิน (Ag) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) โดยมีส่วนผสมของเงินเท่ากับ 94.73% ทองแดง 4.02% และสังกะสี 1.25% โดยน้ำหนัก ในการศึกษาี้มุ่งเน้นไปที่กระบวนการหล่อแบบประณีต (Investment Casting) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มักจะส่งผลให้เกิดของเสียในกระบวนการผลิต ซึ่งในการผลิตชิ้นงานโดยใช้เงินสีชมพูมักจะพบความบกพร่องแบบรูพรุนจากการหดตัว (Shrinkage Porosity) เนื่องจากการเทโลหะเหลวลงในเบ้าปูน ในระหว่างที่โลหะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งและเย็นตัวสู่อุณหภูมิห้อง เนื้อโลหะจะเกิดการแข็งตัวและหดตัวส่งผลต่อการหดเซยโลหะเหลวจึงเกิดรูพรุนขึ้นบริเวณผิวชิ้นงานตรงทางเข้าของโลหะเหลวไปยังโพรงแบบ (Mold Cavity) และเมื่อทำการขัดแต่งผิวชิ้นงานจะปรากฏรูพรุนขึ้นมา ส่งผลให้ต้องนำชิ้นงานที่ตรวจพบรูพรุนไปซ่อมแซม ทำให้เกิดการดำเนินงานที่ซ้ำซ้อนและการค้างของงานในกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นการกระทำที่สูญเสียเปล่าและส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ปัจจุบันพบชิ้นงานเสียเนื่องจากปัญหารูพรุนมากที่สุดในชิ้นงานเสียทั้งหมด (134,367 ชิ้น จาก 240,236 ชิ้น) หรือคิดเป็น 56% ของชิ้นงานเสียทั้งหมด

Verran *et. al.* [4] ได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design) ในการลดรูพรุน (Porosity) ในการหล่ออลูมิเนียมผสม Al12Si1.3Cu ที่ผ่านการหล่อฉีด (Die Casting) ทำให้ทราบถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณรูพรุน และได้เงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ทำให้เกิดรูพรุนในปริมาณที่น้อยที่สุด Grosselle *et. al.* [5] ได้ใช้



วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการหล่อฉีดที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานหล่ออลูมิเนียมผสม Al-Si-Cu-Mg ซึ่งทำให้ทราบตัวแปรในการหล่อที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกล Kittur *et. al.* [6] ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลร่วมกับพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology) ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในการหล่อฉีดกับปริมาณรูพรุน ความแข็ง และความหยาบผิวของชิ้นงานอลูมิเนียมผสม ทำให้สามารถทำนายคุณสมบัติของชิ้นงานหล่อได้ Dabade and Bhedasaonkar [7] ได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ (Taguchi Method) เพื่อลดความบกพร่องในการหล่อชิ้นส่วนรถยนต์โดยใช้แม่แบบทราย (Sand Mold) ทำให้ได้เงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับการหล่อ ซึ่งเมื่อนำไปใช้จริงแล้วสามารถลดปริมาณชิ้นงานเสียจาก 10% เหลือ 3.6% Xuedan *et. al.* [8] ได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ เพื่อเลือกหาเงื่อนไขในการหล่อที่ดีที่สุด เพื่อลดความบกพร่องในชิ้นงานหล่อเหล็กกล้า ซึ่งสามารถลดปริมาณความบกพร่องได้จริง Asensio-Lozano *et. al.* [9] ได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Design) ร่วมกับเยทอัลกอริทึม (Yate's algorithm) ในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรและหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการหล่อเหวี่ยงชิ้นงานเหล็กหล่อเพื่อให้ได้สัดส่วนเชิงปริมาตรและรูปร่างของกราฟไฟท์ที่เหมาะสม Zheng and Simard [10] ได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลในการศึกษาตัวแปรในการหล่อแบบฉีดกึ่งแข็ง (Semi-

Solid Die Casting) ของชิ้นงานอลูมิเนียมผสมเกรด AA6061 เพื่อลดรอยแตก (Crack) ในชิ้นงาน ซึ่งสามารถลดรอยแตกที่เกิดขึ้นในชิ้นงานได้ Ali [11] ได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองชนิดแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวน (Full Factorial Design) ในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการหล่อเหวี่ยง (Centrifugal Casting) ที่มีต่อคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานหล่ออลูมิเนียมผสม Al-Si ซึ่งทำให้ทราบตัวแปรในการหล่อที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญและความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านั้นกับคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน Hanizam *et. al.* [12] ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการการหล่อกวน (Stir Casting) ที่มีต่อคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานอลูมิเนียมผสมเกรด A356 โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ และได้เงื่อนไขที่ดีที่สุดของการหล่อที่ทำให้ได้คุณสมบัติทางกลของชิ้นงานดีขึ้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวิธีการออกแบบการทดลองแบบต่างๆสามารถนำมาใช้แก้ปัญหาในงานหล่อวิธีต่างๆได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ทางบริษัทการศึกษาและผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะลดรูพรุนบริเวณผิวชิ้นงานตรงทางเข้าโพรงแบบของโลหะเหลวในการหล่อเงินสีชมพูที่ผ่านการหล่อแบบประณีต โดยทำการศึกษาดัชนีแปรในการหล่อที่มีอิทธิพลต่อการเกิดรูพรุน เพื่อหาเงื่อนไขการหล่อที่เหมาะสมของการหล่อเงินสีชมพูด้วยวิธีการหล่อแบบประณีต ซึ่งตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิอบเบ้า (Flask Temperature) และอุณหภูมิหล่อ (Casting Temperature) และมีตัวแปรตอบสนอง คือ เบอร์เซนต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุน โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองชนิดแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวน (Full Factorial Design) 3^k



2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในกระบวนการผลิตเครื่องประดับส่วนใหญ่ในปัจจุบันจะเป็นการหล่อแบบประณีต โดยก่อนการออกแบบการทดลองทางผู้วิจัยได้ศึกษาปัจจัยที่อาจจะมีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องแบบรูพรุนจากการหดตัว ซึ่งจากการทดลองของทางบริษัทและประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน รวมทั้งการเก็บข้อมูลเชิงสถิติของบริษัทโดยผู้เชี่ยวชาญทางโลหวิทยา คาดว่าปัจจัยที่อาจจะมีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องแบบรูพรุนดังกล่าวในกระบวนการหล่อแบบประณีตมี 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิอบเบ้า และอุณหภูมิหล่อ ซึ่งในการหล่อแบบประณีตจะต้องนำเบ้าปูนที่ภายในเป็นต้นเทียนอบด้วยความร้อน เพื่อละลายเทียนต้นแบบในเบ้าปูนออกให้เป็นโพรง สำหรับรองรับโลหะเหลวเมื่อหล่อชิ้นงาน และให้ความร้อนแก่เบ้าปูนเพื่อให้อุณหภูมิระหว่างเบ้าปูนกับโลหะเหลวไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้อบเบ้าปูนนี้เรียกว่า อุณหภูมิอบเบ้า ส่วนอุณหภูมิหล่อ หมายถึง อุณหภูมิของโลหะเหลวในขณะที่อยู่ในเตาหลอมก่อนที่จะเทโลหะเหลวเข้าสู่เบ้าปูน

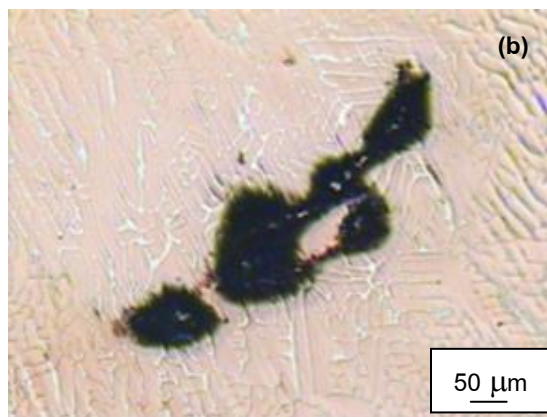
ดังนั้นปัจจัยในการหล่อที่จะทำการศึกษางานวิจัยนี้ คือ อุณหภูมิอบเบ้า และอุณหภูมิหล่อ โดยศึกษาปัจจัยทั้งสองที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ ซึ่งเป็นระดับอุณหภูมิที่เลือกจากประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานของบริษัทในการหล่อเงินสีชมพูในรูปแบบต่างๆ รวมทั้งต้องคำนึงถึงการใช้พื้นที่ในเตาอบเบ้า ที่จะต้องสามารถบรรจุเบ้าของการผลิตชิ้นงานอื่นๆ เข้าไปอบได้พร้อมๆ กัน ในขณะที่การเลือกอุณหภูมิหล่อก็ต้องคำนึงถึงการนำเงินสีชมพูในเตาหลอมนั้นไปใช้หล่อชิ้นงานชนิดอื่นพร้อมๆ กัน เช่นเดียวกัน โดยที่อุณหภูมิหลอมเหลวของเงินสีชมพู

มีค่าประมาณ 930 °C ดังนั้นอุณหภูมิหล่อจึงต้องมีค่ามากกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของเงินสีชมพู สำหรับวิธีการออกแบบการทดลองที่ใช้ คือ การออกแบบการทดลองชนิดแฟกทอเรียลแบบเต็มจำนวน 3^k เมื่อ k คือ จำนวนปัจจัยที่ทำการศึกษา โดยปัจจัย สัญลักษณ์ และระดับของปัจจัย แสดงดังตารางที่ 1 และในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ดังนั้นจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ $3^2 \times 3$ หรือ 27 การทดลอง และเป็นการทดลองแบบสุ่ม (Randomization)

ตารางที่ 1 ปัจจัย สัญลักษณ์ และระดับของปัจจัย

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย (°C)		
อุณหภูมิอบเบ้า (A)	480	540	600
อุณหภูมิหล่อ (B)	1020	1030	1060

ในการตรวจสอบการเกิดรูพรุนจะทำการตรวจสอบบริเวณทางโลหะเหลวเข้าโพรงแบบ เนื่องจากเป็นบริเวณที่พบรูพรุนบ่อยที่สุดในชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 1 (a) โดยทำการตัดชิ้นงานบริเวณดังกล่าวแล้วทำการขัดชิ้นงานตามวิธีการเตรียมชิ้นงานทางโลหวิทยา และนำชิ้นงานไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงสีขาว (Optical Microscope) ที่กำลังขยาย 10 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 1 (b) แล้วทำการวัดพื้นที่ของการเกิดรูพรุนด้วยโปรแกรม ImageJ และคำนวณเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุน (พื้นที่หน้าตัดของรูพรุนทั้งหมดเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานในภาพ) ซึ่งจะใช้เป็นตัวแปรตอบสนอง (Response) ในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการหล่อที่มีต่อการเกิดรูพรุน ชิ้นงานที่ถือว่าเป็นของเสีย คือ ชิ้นงานที่มีพื้นที่รูพรุนใหญ่กว่า $50 \mu\text{m}^2$



รูปที่ 1 ตัวอย่างชิ้นงานที่พบข้อบกพร่องแบบรูพรุน (a) รูพรุนบริเวณทางเข้าโพรงแบบของโลหะเหลว (b) ภาพขยายของรูพรุน

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

อุณหภูมิอบเบ้า อุณหภูมิหล่อ และเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุนที่ได้จาก 27 การทดลอง ตามการออกแบบการทดลองชนิดแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวน 3^k จะถูกนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) เพื่อหาปัจจัยในการหล่อที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเกิดรูพรุนในชิ้นงาน

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวนโดยใช้ ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 85.13% และมีค่า R^2 (adj) เท่ากับ 78.52% ซึ่งแสดงว่า ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ ANOVA นี้สามารถอธิบายความผันแปรของตัวแปรตอบสนองได้ดี และจากการวิเคราะห์พบว่า มีปัจจัยหลัก (Main Effect) คือ อุณหภูมิอบเบ้า (A) มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุน ($p\text{-value} < 0.05$)

ถึงแม้ว่าอุณหภูมิหล่อ (B) ไม่ได้มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญโดยตรงต่อเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุน ($p\text{-value} > 0.05$) แต่เนื่องจากอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างปัจจัยหลักทั้งสอง ($A*B$) มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุน ($p\text{-value} < 0.05$) ดังนั้นจึงยังต้องพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิหล่อไปพร้อมกับอิทธิพลของอุณหภูมิอบเบ้า

รูปที่ 2 (a) แสดงการพล็อตของส่วนเหลือ (Residual) ของเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุน เพื่อตรวจสอบสมมติฐานของ ANOVA คือ ส่วนเหลือมีการกระจายตัวแบบปกติ ส่วนเหลือไม่มีรูปแบบกับค่าประมาณ (Fitted Value) และส่วนเหลือมีความเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งจากการตรวจสอบสมมติฐานถึงแม้ว่าฮิสโตแกรม (Histogram) ของส่วนเหลือจะไม่แสดงการกระจายตัวแบบปกติอย่างชัดเจน เนื่องจากจำนวนข้อมูลมีค่อนข้างน้อยเพียง 27 ข้อมูล แต่เมื่อวิเคราะห์ด้วยกราฟความน่าจะเป็นปกติ

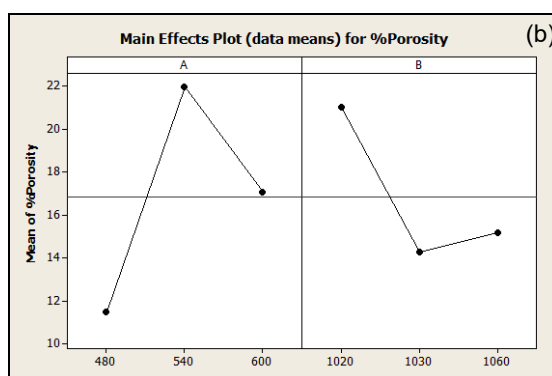
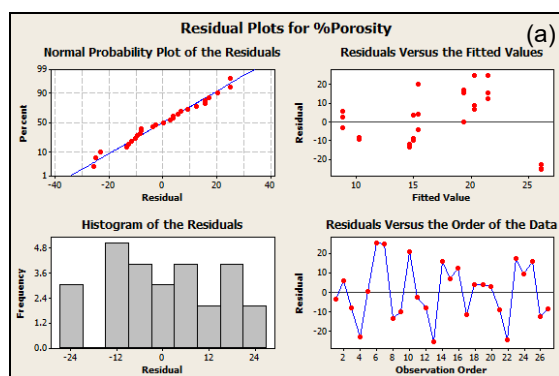


(Normal Probability Plot) พบว่าส่วนเหลือมีการกระจายตัวแบบปกติ เนื่องจากจุดส่วนใหญ่อยู่บนแนวเส้นตรงของกราฟ นอกจากนี้ส่วนเหลือไม่มีรูปแบบกับค่าประมาณ โดยพบว่าส่วนเหลือมีการกระจายแบบสุ่มรอบ ๆ ค่าเฉลี่ยศูนย์และไม่มีรูปแบบ และส่วนเหลือมีความเป็นอิสระต่อกัน โดยตรวจสอบจากกราฟลำดับของค่าสังเกต (Observation Order) พบว่าส่วนเหลือเกิดแบบสุ่มรอบ ๆ ค่าเฉลี่ยศูนย์ ดังนั้นเมื่อไม่พบ

การละเมิดสมมติฐานของ ANOVA การวิเคราะห์นี้จึงมีความเชื่อถือได้ ในรูปที่ 2(b) แสดงกราฟปัจจัยหลัก (Main Effects Plot) ของเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุน ซึ่งในกรณีนี้จำเป็นต้องพิจารณาร่วมกับกราฟอันตรกิริยา (Interaction Plots) ของปัจจัยหลักทั้งสอง เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักทั้งสอง ($A*B$) มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุนดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

ตารางที่ 2 ตาราง ANOVA ของผลการทดลอง

Source	DF	Adj. SS	Adj. MS	F	p-value
A	2	495.49	247.74	4.77	0.022
B	2	239.11	119.55	2.30	0.129
A*B	4	4612.44	1153.11	22.22	<0.001
Error	18	933.93	51.88		
Total	26	6280.96			



รูปที่ 2 (a) การพล็อตส่วนเหลือเพื่อตรวจสอบสมมติฐาน ANOVA
(b) กราฟปัจจัยหลักของเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุน



จากกราฟอันตรกิริยา (Interaction Plots) ในรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่า ถ้าใช้อุณหภูมิอบเบ้าที่ 480 °C กับอุณหภูมิหล่อที่ 1060 °C หรือ ใช้อุณหภูมิอบเบ้าที่ 540 °C กับอุณหภูมิหล่อที่ 1020 °C หรือ ใช้อุณหภูมิอบเบ้าที่ 600 °C กับอุณหภูมิหล่อที่ 1030 °C จะให้เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุนต่ำ อย่างไรก็ตามในการวิจัยครั้งนี้ ชิ้นงานที่ทำการผลิตเป็นชิ้นงานที่มีรายละเอียดมาก หากใช้อุณหภูมิหล่อที่ 1020 °C จะทำให้ชิ้นงานโลหะเหลวเกิดการแข็งตัวก่อนที่จะไหลเข้าไปเต็มโพรงแบบ เนื่องจากอุณหภูมิหลอมเหลวของเงินสีชมพูมีค่าประมาณ 930 °C การใช้อุณหภูมิหล่อที่ 1020 °C จึงเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวเพียง 90 °C ซึ่งอาจไม่เพียงพอที่จะชดเชยกับการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นระหว่างการไหลของโลหะเหลว ทำให้โลหะเหลวเกิดการแข็งตัวขึ้นมาก่อนที่จะบรรจุได้เต็มโพรงแบบ ประกอบกับช่องปล่อยโลหะเหลว (Sprue) ไม่สามารถปล่อยโลหะเหลวเข้าไปในโพรงแบบได้ในระหว่างที่ชิ้นงานกำลังแข็งตัว ทำให้เกิดเป็นความบกพร่องแบบชิ้นงานไม่เต็ม (Misrun) ซึ่งทำให้ชิ้นงานนั้นเป็นชิ้นงานเสียโดยทันทีและไม่สามารถซ่อมแซมได้ จึงทำให้การใช้อุณหภูมิอบเบ้าที่ 540 °C ร่วมกับอุณหภูมิหล่อที่ 1020 °C ไม่สามารถใช้ในการผลิตชิ้นงานได้จริง ถึงแม้ว่าจะเป็นเงื่อนไขการหล่อที่สามารถลดรูพรุนเนื่องจากการหดตัวบริเวณทางเข้าโพรงแบบได้ดีก็ตาม ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงใช้ได้เฉพาะอุณหภูมิอบเบ้าที่ 480 °C กับอุณหภูมิหล่อที่ 1060 °C หรืออุณหภูมิอบเบ้าที่ 600 °C กับอุณหภูมิหล่อที่ 1030 °C

นอกจากนี้ รูพรุนเนื่องจากการหดตัวอาจจะเกิดขึ้นเนื่องมาจากมีชิ้นงานจำนวนมากที่ติดอยู่กับช่องปล่อย

โลหะเหลว ทำให้ชิ้นงานแต่ละชิ้นวางตัวใกล้กันมากเกินไป ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนออกจากชิ้นงานเกิดขึ้นได้ช้า ซึ่งจะทำให้มีโอกาสเกิดรูพรุนเนื่องจากการหดตัวได้มากขึ้น ในกรณีของบริษัทกรณีศึกษาจะพบว่า รูพรุนที่เกิดขึ้นมีตำแหน่งการเกิดที่ซ้ำๆ กัน ดังนั้นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดรูพรุนเนื่องจากการหดตัว คือ ปริมาณของโลหะเหลวที่ไหลเข้าโพรงแบบมีไม่เพียงพอ [13]



รูปที่ 3 กราฟอันตรกิริยาระหว่าง (A) อุณหภูมิอบเบ้า และ (B) อุณหภูมิหล่อ

บริษัทกรณีศึกษาได้ทำการยืนยันผลการทดลองด้วยการนำอุณหภูมิอบเบ้า และอุณหภูมิหล่อที่ทำให้เกิดเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุนน้อยที่สุดมาใช้ในการผลิตจริงเป็นระยะเวลา 2 เดือน โดยใช้อุณหภูมิอบเบ้าที่ 480 °C กับอุณหภูมิหล่อที่ 1060 °C หรืออุณหภูมิอบเบ้าที่ 600 °C กับอุณหภูมิหล่อที่ 1030 °C ซึ่งจากผลผลิตด้วยเงื่อนไขดังกล่าวพบว่า สามารถลดของเสียได้จริง โดยของเสียลดลงจาก 56% ในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2562 เหลือ 25% และ 28% ในเดือนกันยายน และตุลาคม ตามลำดับ โดยทั่วไปแล้วการแก้ปัญหาข้อบกพร่องในงานหล่อเป็นการแก้ปัญหาที่



ทำได้ยากและต้องใช้ประสบการณ์เป็นอย่างมาก แต่งานวิจัยจากกรณีศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การใช้วิธีการออกแบบการทดลองสามารถแก้ปัญหาข้อบกพร่องในงานหล่อได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องทำการปรับเปลี่ยนการออกแบบช่องปล่อยโลหะเหลวของบริษัทกรณีศึกษา

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าผลการวิจัยนี้สามารถนำไปลดของเสียที่เกิดขึ้นได้ค่อนข้างมาก แต่เปอร์เซ็นต์การเกิดของเสียก็ยังอยู่ในเกณฑ์สูง เนื่องจากผู้วิจัยไม่ได้ทำการหาเงื่อนไขในการหล่อด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Techniques) เพราะมีข้อจำกัดของทางบริษัทกรณีศึกษาในการปรับตั้งอุณหภูมิเตาอบและเตาหลอมที่ไม่สามารถปรับตั้งได้อย่างอิสระตามที่ผู้วิจัยต้องการ ดังนั้นถ้าสามารถทำการปรับตั้งอุณหภูมิเตาอบและเตาหลอมได้อย่างอิสระควรมีการหาเงื่อนไขในการหล่อด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด และคาดว่าจะได้เงื่อนไขในการหล่อที่สามารถลดปริมาณของเสียได้มากกว่านี้

4. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

เนื่องจากการผลิตชิ้นงานเครื่องประดับจากเงินสีชมพูของบริษัทกรณีศึกษาพบปัญหาการเกิดรูพรุนของชิ้นงานจากการหล่อแบบประณีตบริเวณทางเข้าของโลหะเหลว จากการศึกษาพบว่า

1. อุณหภูมิอบเบ้าและอัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิอบเบ้ากับอุณหภูมิหล่อมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเกิดรูพรุนบริเวณทางเข้าของโลหะเหลวของชิ้นงาน
2. อุณหภูมิอบเบ้าที่ 480 °C กับอุณหภูมิหล่อที่ 1060 °C หรือ อุณหภูมิอบเบ้าที่ 600 °C กับอุณหภูมิ

หล่อที่ 1030 °C เป็นเงื่อนไขการหล่อที่เหมาะสมของการหล่อเงินสีชมพูด้วยวิธีประณีต เพื่อลดการเกิดรูพรุน

3. หลังจากได้นำอุณหภูมิอบเบ้าที่ 480 °C กับอุณหภูมิหล่อที่ 1060 °C หรือ อุณหภูมิอบเบ้าที่ 600 °C กับอุณหภูมิหล่อที่ 1030 °C มาใช้ในการผลิตจริงสามารถลดของเสียลงจากเดิมได้โดยเฉลี่ย 29.5 %

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับตรวจสอบปริมาณรูพรุนในงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] <http://www2.ops3.moc.go.th/> (Accessed on 28 September 2020)
- [2] W. Mingvanich, Strategies to Increase Competitiveness in the Gem and Jewelry Industry, Department of Export Promotion, Ministry of Commerce, 2003. (in Thai).
- [3] S. Yamkate, Export Problems with Gems and Jewelry of Thailand's Gem and Jewelry Export Business, Independent Study, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand. 2012. (in Thai).
- [4] G.O. Verran, R.P.K. Mendes, and L.V.O.D. Valentina, DOE Applied to Optimization of Aluminum Alloy Die Castings, Journal of Materials Processing Technology, 2008, 200 (1–3), 120–125.



- [5] F. Grosselle, G. Timelli, and F. Bonollo, DOE Applied to Microstructural and Mechanical Properties of Al-Si-Cu-Mg Casting Alloys for Automotive Applications, *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(15), 3536–3545.
- [6] J.K. Kittur, T.V. Herwadkar, and M.B. Parappagoudar, Modeling and Analysis of the Pressure Die Casting Using Response Surface Methodology, *AIP Conference Proceedings*, 2010, 1298, 735–741.
- [7] U.A. Dabade and R.C. Bhedasgaonkar, Casting Defect Analysis Using Design of Experiments (DoE) and Computer Aided Casting Simulation Technique, *Procedia CIRP*, 2013, 7, 616–621.
- [8] G. Xuedan, L. Dunming, Z. Jianxin, and S. Xu, DOE Applied to Optimization of Steel Casting, *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 251, 360–365.
- [9] J. Asensio-Lozano, J.F. Álvarez-Antolín, A. González-Pociño, and B. del Río-López, Optimization of Graphite Morphology in Mottled Nihard Cast Irons Inoculated with FeB and Manufactured by Centrifugal Casting, *Metals*, 2018, 8(5), 293.
- [10] C.Q. Zheng and A. Simard, Optimization of Casting Parameters on an Improved AA6061 Aluminum Alloy for Semi-Solid Die Casting, *SAE Technical Papers*, 2010, 2010-01-0225, 1-12.
- [11] S.M. Ali, The Effect of Reinforced SiC on the Mechanical Properties of the Fabricated Hypoeutectic Al-Si Alloy by Centrifugal Casting, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2019, 22(4), 1125–1135.
- [12] H. Hanizam, M. S. Salleh, M. Z. Omar, and A. B. Sulong, Optimisation of Mechanical Stir Casting Parameters for Fabrication of Carbon Nanotubes-Aluminium Alloy Composite Through Taguchi Method, *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(2), 2223–2231.
- [13] M.P. Groover, *Groover's Principles of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*, Global edition, John Wiley & Sons, Singapore, 2017.