

การศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการหล่อทองเหลือง แบบอินเวสเมนต์ด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง A STUDY OF APPROPRIATE PARAMETERS OF BRASS INVESTMENT CASTING BY USING DESIGN OF EXPERIMENT

มนตรี วิมล* ธนากร จันทรศรีชา และสิริเดช กุญหิรัญบวร
Montri Wimol*, Tanakorn Jantarasricha, and Siridech Kunhirunbawon

Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University

*corresponding author e-mail: montri.m@psru.ac.th

(Received: 23 April 2018; Revised: 25 October 2018; Accepted: 27 October 2018)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการหล่อทองเหลืองแบบอินเวสเมนต์ โดยผู้วิจัยใช้วิธีการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม โดยใช้การทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2 ระดับ ซึ่งประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ระยะเวลาอบแบบหล่ออุณหภูมิแบบหล่อและอุณหภูมิเทโลหะหลอมเหลว ผลการศึกษาพบว่าทุกปัจจัยมีผลกระทบต่อชิ้นงานหล่ออย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการหล่อทองเหลืองแบบอินเวสเมนต์คือ ระยะเวลาในการอบแบบหล่อ 3 ชั่วโมง อุณหภูมิแบบหล่อ 300 องศาเซลเซียส และระดับอุณหภูมิในการเทโลหะ 800 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมหล่อผลิตภัณฑ์เครื่องทองเหลือง

คำสำคัญ: ทองเหลือง การหล่อแบบอินเวสเมนต์ การออกแบบการทดลอง

Abstract

This research aims at studying appropriate parameters of brass investment casting using Design of Experiment (DOE). Two-level factorial design comprising curing time, mold temperature and pouring temperature was used as a research tool. It was found that all studied parameters significantly (95% confidential level) affected brass investment casting. The optimized parameter were 3 hours of curing time, 300°C of mold temperature and 800°C of pouring temperature. Therefore, the results could be useful for use in casting industry.

Keywords: brass, investment casting, design of experiment

บทนำ

ในอุตสาหกรรมผลิตเครื่องทองเหลือง กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ที่สำคัญและนิยมใช้กันเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ กรรมวิธีการหล่อโลหะด้วยกระบวนการหล่อแบบขึ้นหุ้มหรือการหล่อแบบอินเวสเมนต์

(investment casting) เนื่องจากการหล่อแบบอินเวสเมนต์มีข้อดีหลายอย่างคือ สามารถประยุกต์ใช้กับชิ้นส่วนที่มีรายละเอียดซับซ้อน รวมถึงมีความแม่นยำสูง และผลิตชิ้นส่วนที่มีโพรงภายในแบบได้ง่าย ผิวชิ้นงานมีความละเอียดสูงและสามารถใช้หล่อกับโลหะได้หลายชนิด (Beeley & Smart, 1995) ขั้นตอนการหล่อชิ้นงานทำได้โดยเทโลหะหลอมเหลวลงในแบบหล่อปูนที่ผ่านการให้ความร้อนเพื่อเผาไล่เทียนต้นแบบออก และให้ความร้อนแก่แบบหล่อก่อน (preheat) เทโลหะเพื่อหล่อชิ้นงาน (Beeley, 2001) ซึ่งในการผลิตผลิตภัณฑ์ทองเหลืองส่วนใหญ่จะใช้แรงงานในกระบวนการผลิตเป็นหลัก เนื่องจากต้องใช้ความปราณีตที่มีความละเอียดของมนุษย์ และยังคงแก้ไขปัญหาการผลิต ข้อบกพร่องในชิ้นงานที่เกิดขึ้น เช่น การหล่อไม่เต็มแบบ (misrun) รูพรุนจากการหดตัวของน้ำโลหะ (shrinkage porosity) น้ำโลหะไหลเข้าโพรงแบบไม่สมบูรณ์ เป็นต้น ข้อบกพร่องที่พบบ่อยในการหล่อทองเหลืองได้แก่การหล่อไม่เต็มแบบเป็นข้อบกพร่องประเภทการหล่อที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้การหล่อไม่เสร็จสมบูรณ์ มีลักษณะมีบางส่วนขาดหายไป โดยเฉพาะบริเวณขอบหรือมุมของชิ้นงานหล่อ เมื่อโลหะไม่สามารถไหลตัวเข้าโพรงแบบหล่อได้อย่างสมบูรณ์ และเหลือส่วนที่เข้าไปไม่ถึงไว้ จึงเรียกว่าการหล่อไม่เต็มแบบ (Rajkolhe & Khan, 2014) มีสาเหตุจากคุณสมบัติการไหลตัวของน้ำโลหะไม่ดี อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ หรือแบบหล่ออาจจะมีความหนืดมากเกินไป (Chooprungartm, 1990) ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อชิ้นงานในกระบวนการหล่อแบบอินเวสเมนต์ เช่น อุณหภูมิอบเป่าปูน อุณหภูมิหลอมโลหะ และอุณหภูมิแบบหล่อ เป็นต้น ซึ่งเป็นจุดที่สำคัญที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง (Sanordontri, 2006) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การหล่อไม่เต็มแบบของชิ้นงาน เป็นผลมาจากหลายปัจจัยเห็นได้จากงานวิจัยของ Adrian & Srinath (2003) ศึกษาปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อชิ้นงานในกระบวนการหล่อแบบอินเวสเมนต์ คือ การเปลี่ยนแปลงขนาดของแม่แบบขึ้นผึ้ง จะส่งผลต่อขนาดของแบบแม่พิมพ์ เนื่องจากความร้อนขยายตัวและหดตัวของขึ้นผึ้ง (พลาสติกยืดหยุ่นและการคืบตัว) ซึ่งมีตัวแปรต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิลูกกลิ้ง ความดันในการฉีด อุณหภูมิการฉีด และเวลาในการใช้งาน ขณะที่งานวิจัยของ Jitender et al. (2008) ได้นำโปรแกรมจำลองงานหล่อขึ้นรูปมาปรับใช้ในการเลือกปัจจัย สำหรับกระบวนการการหล่อขึ้นรูป โดยใช้แรงดันสูง โดยเลือกใช้ปัจจัยดังนี้ อุณหภูมิโลหะขาเข้า (inlet melt temperature) อุณหภูมิเริ่มต้นของแม่พิมพ์ (mould initial temperature) พบว่าปัจจัยดังกล่าวส่งผลกระทบต่อเวลาที่ใช้ในการเติมเต็มแม่พิมพ์โลหะ และระยะเวลาในการแข็งตัว อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงานหล่อ จากงานวิจัยของ Zhang et al. (1995) ศึกษาเทคโนโลยีการออกแบบและการกำจัดข้อบกพร่องการหล่อเครื่องประดับโลหะผสมทอง (18K) ด้วยกระบวนการหล่อแบบขึ้นผึ้งหาย พบว่าข้อบกพร่องในงานหล่อสามารถกำจัดได้โดย การควบคุมอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะการอบแบบหล่อปูนด้วยอุณหภูมิอุณหภูมิในการเทโลหะการออกแบบระบบป้อนเติมน้ำโลหะการเตรียมแม่พิมพ์ที่เหมาะสม ซึ่งปัจจัยในช่วงต้นนี้ส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในกระบวนการหล่อ และจากงานวิจัยของ Pinitrattanapan (2013) ศึกษาปัจจัยและอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการหล่อเครื่องประดับทองสุญญากาศแบบขึ้นผึ้งหาย โดยใช้วิธีการของทากูชิในการสร้างสมการจำลอง รวมถึงหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม พบว่า อุณหภูมิหลอมหล่อโลหะ และอุณหภูมิเป่าปูนสำหรับการหล่อ มีผลต่อกระบวนการหล่อเครื่องประดับทองอย่างมีนัยสำคัญ

จากที่กล่าวมาในช่วงต้น เห็นได้ว่าข้อบกพร่องการหล่อไม่เต็มแบบ เป็นผลมาจากการใช้ปัจจัยในกระบวนการหล่อที่แตกต่างกัน และขั้นตอนวิธีการหล่อที่แตกต่างกัน เช่น การหล่อด้วยใช้แรงดันสูง การหล่อด้วยสุญญากาศแบบขึ้นผึ้งหาย เป็นต้น แต่ยังไม่พบการศึกษาปัจจัยในการหล่อทองเหลืองแบบอินเวสเมนต์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการหล่อ

ทองเหลืองแบบอินเวสเมนต์ โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง (design of experiment) เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการกำหนดตัวแปรการหล่อและเป็นแนวในการออกแบบและผลิตผลิตภัณฑ์ทองเหลืองต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษากระบวนการหล่อแบบอินเวสเมนต์

ขั้นตอนที่ 1 การทำแม่พิมพ์ยาง เริ่มจากนำชิ้นงานต้นแบบมาแบ่งกันตะเข็บด้วยดินน้ำมัน และทำสลักใช้ยี่ตระหว่างแม่พิมพ์ยาง จากนั้นนำยางซิลิโคนที่ผสมด้วยอัตราที่เหมาะสมทำให้ทั่วชิ้นงาน และขอบของแม่พิมพ์ หลังจากยางซิลิโคนแห้งดีแล้วจะได้แม่พิมพ์ยางที่มีลักษณะเหมือนชิ้นงานต้นแบบ

ขั้นตอนที่ 2 การทำแบบหล่อปูนปลาสเตอร์ โดยนำปูนปลาสเตอร์ผสมกับน้ำ อัตราส่วน ปูนปลาสเตอร์ 100 กรัม ต่อน้ำ 38 มิลลิตร แล้วเทหล่อกับแม่พิมพ์ยางสำหรับใช้เป็นแบบหล่อ จากนั้น นำขี้ผึ้ง (wax) มาหลอมในเตาอบที่อุณหภูมิประมาณ 60 ถึง 80 องศาเซลเซียส ทำการเทขี้ผึ้งลงในแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์จนเต็ม ปล่อยให้ขี้ผึ้งแข็งตัวแล้วนำมาติดกับแท่งขี้ผึ้งที่ทำหน้าที่เป็นรูเทและรูล้น นำแบบหล่อปูนปลาสเตอร์ไปอบไล่ขี้ผึ้งจะได้แบบหล่อที่มีลักษณะเหมือนชิ้นงานต้นแบบ และอบให้ความร้อนแบบหล่อก่อน (preheat) เทโลหะหลอมเหลว ดังภาพที่ 1 (Figure 1)



Figure 1 Wax patterns

ขั้นตอนที่ 3 การหลอมและหล่อโลหะ นำอินกอตโลหะทองเหลืองใส่เข้ากราไฟต์ที่บรรจุในเตาหล่อ เมื่ออินกอตหลอมละลายแล้วจะเทโลหะหลอมเหลวลงในแบบหล่อปูนปลาสเตอร์ จากนั้น ปล่อยให้โลหะแข็งตัวภายในแบบหล่อประมาณ 15 นาที จึงนำไปจุ่มน้ำที่อุณหภูมิห้อง ล้างชิ้นงานหล่อให้สะอาด ตัดรูเทและรูล้นออกจากชิ้นงานแล้วนำไปขัดผิวและเจียรไนให้เรียบ ดังภาพที่ 2 (Figure 2)



Figure 2 Example of brass bell casting

2. กำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล ดังภาพที่ 3 (Figure 3) โดยการระดมสมองกับผู้เชี่ยวชาญและผู้มีประสบการณ์ทางด้านการหล่อแบบอินเวสเมนต์ พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องการหล่อไม่เต็มแบบ คือ ระยะเวลาอบแบบหล่อ อุณหภูมิแบบหล่อและอุณหภูมิเทโลหะหลอมเหลว โดยจะนำปัจจัยที่ได้มาใช้ในการออกแบบการทดลอง เพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสม

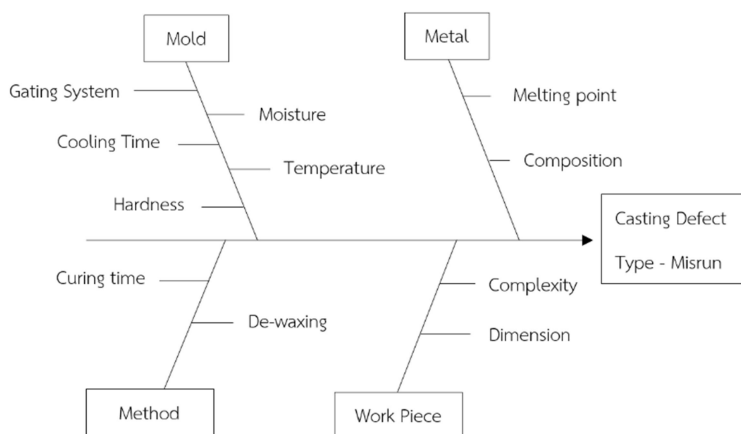


Figure 3 Cause and effect diagram

3. การออกแบบการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial Design) ได้ทำการกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง 3 ปัจจัย คือ ระยะเวลาอบแบบหล่อ อุณหภูมิแบบหล่อ และอุณหภูมิเทโลหะหลอมเหลว แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับของปัจจัยแต่ละตัวจะอยู่ที่ “ต่ำ” และ “สูง” (Chutima, 2002) ดังตารางที่ 1 (Table 1)

Table 1 The design level of the experimental factors

Factor	Low	High
Curing time (Hour)	2	3
Mold temperature (Celsius)	200	300
Pouring temperature (Celsius)	800	950

ค่าตอบสนองของการทดลอง คือ น้ำหนักชิ้นงานหล่อที่ได้จากกระบวนการหล่อสาเหตุที่วัดจากค่าน้ำหนักชิ้นงานหล่อ เนื่องจากเป็นค่าที่ทำให้ทราบว่าชิ้นงานหล่อที่ผ่านกระบวนการหล่อเต็มแบบหรือไม่ ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นกระดิ่งทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 73 มิลลิเมตร สูง 70 มิลลิเมตร วัสดุดิบที่ใช้ทดลองเป็นโลหะผสมสังกะสี 15% และเพื่อความน่าเชื่อถือของการทดลอง ผู้วิจัยได้จัดลำดับการทดลองเป็นการจัดลำดับแบบสุ่ม รวมถึงจะทดลองซ้ำ 4 ครั้ง รวมเป็นการทดลองทั้งสิ้น 32 การทดลอง ดังตารางที่ 2 (Table 2)

Table 2 Experimental design

Run Order	Curing time (Hour)	Mold temperature (Celsius)	Pouring temperature (Celsius)
1	2	200	800
2	2	200	950
3	2	300	800
4	2	300	950
5	3	200	800
6	3	200	950
7	3	300	800
8	3	300	950

ผลการวิจัย

1. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

Montgomery (2013) ได้กล่าวไว้ว่า ก่อนการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลควรตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วย 3 หัวข้อหลักดังต่อไปนี้

1.1 การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (normal distributed) ของส่วนตกค้าง (residual) จากภาพที่ 4 (Figure 4) พบว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง และมีค่า p -value เท่ากับ 0.692 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่านัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$) จึงทำให้ประมาณได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

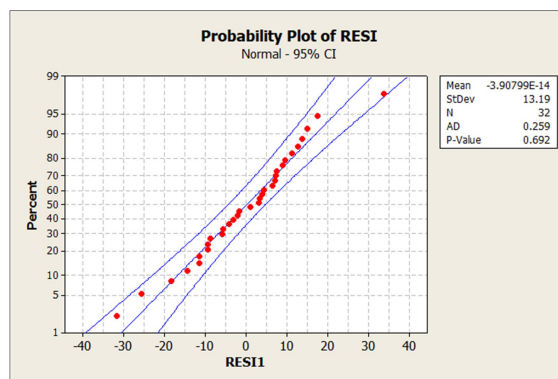


Figure 4 Normal probability plot of residuals

1.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระ (independent) ของค่าส่วนตกค้าง จากภาพที่ 5 (Figure 5) เมื่อพิจารณาการกระจายของข้อมูลบนแผนภูมิ พบว่าการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงว่าส่วนค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

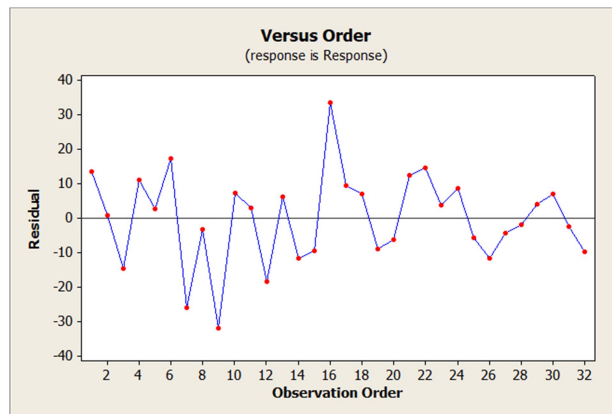


Figure 5 Residuals versus order of data

1.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (variance stability) จากภาพที่ 6 (Figure 6) เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง เทียบกับ fitted value พบว่าความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้าง มีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่งและไม่มีการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้ม จึงประมาณได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

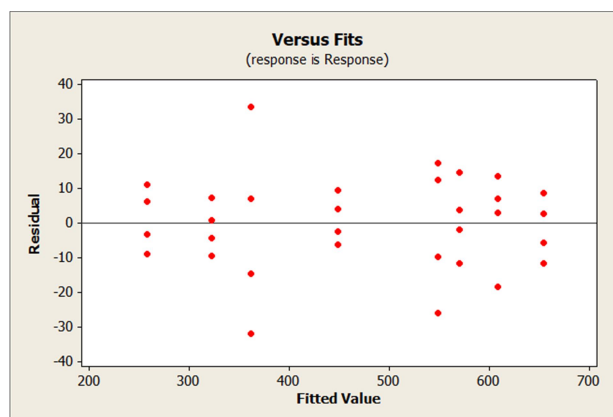


Figure 6 Residuals versus the fitted value

จากการตรวจสอบภาพที่ 1-3 (Figure 1-3) พบว่ารูปแบบของค่าส่วนตกค้าง ที่ได้จากข้อมูลในการทดลองเป็นไปตามหลักการการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองทุกประการ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลดังกล่าวมีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ สามารถนำไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนในขั้นต่อไปได้

2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากผลวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปดังตารางที่ 3 (Table 3) เป็นการเปรียบเทียบค่า p -value กับค่านัยสำคัญของการทดลอง โดยที่ค่า p -value ของแต่ละปัจจัยจะต้องมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญ จึงถือว่าปัจจัยที่กำหนดขึ้นมีผลต่อค่าน้ำหนักของชิ้นงานหล่อ (response) อย่างมีนัยสำคัญ ผลจากการเปรียบเทียบพบว่าค่า p -value ระยะเวลาอบแบบหล่อ อุณหภูมิแบบหล่อ และอุณหภูมิเท

โลหะหลอมเหลวนั้นมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าทุกปัจจัยล้วนส่งผลต่อค่าน้ำหนักของชิ้นงานหล่อ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลกระทบร่วมตั้งแต่ 2 ปัจจัย พบว่าผลกระทบร่วมนั้นส่งผลต่อค่าน้ำหนักของชิ้นงานหล่ออย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

Table 3 The analysis of variance

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		47140	2.596	181.61	0.000
Curing time	248.19	124.09	2.596	47.81	0.000
Mold temperature	93.69	46.85	2.596	18.05	0.000
Pouring temperature	55.12	27.56	2.596	10.62	0.000
Curing time*	21.71	-10.85	2.596	-4.18	0.000
Mold temperature					
Curing time*	-21.12	-10.56	2.596	-4.07	0.000
Pouring temperature					
Mold temperature*	11.63	5.82	2.596	2.24	0.034
Pouring temperature					

Remark S = 14.6836, R-Sq = 98.53%, R-Sq(adj) = 98.89%

*p-value < 0.05

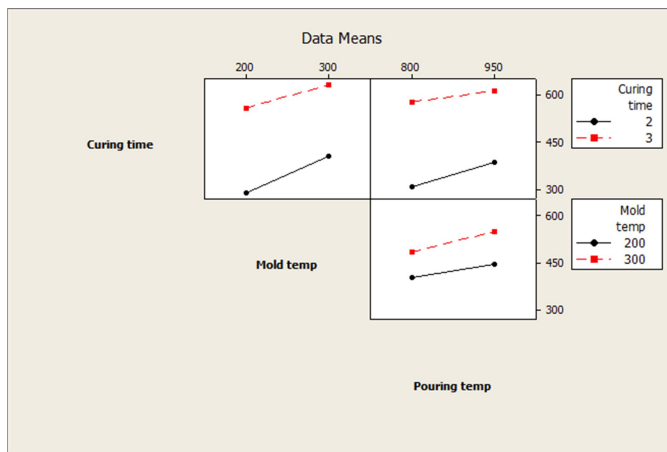


Figure 7 Interaction plot for response

จากภาพที่ 7 (Figure 7) เมื่อพิจารณาผลกระทบร่วมระหว่างระยะเวลาอบแบบหล่อกับอุณหภูมิแบบหล่อ ผลการวิเคราะห์พบว่า ถ้าใช้ระยะเวลาอบ 2 ชั่วโมง และอุณหภูมิแบบหล่อที่ 200 องศาเซลเซียสจะให้ค่าน้ำหนักของชิ้นงานหล่อต่ำกว่าที่กำหนด ควรเลือกใช้ระยะเวลาอบ 3 ชั่วโมง และอุณหภูมิแบบหล่อที่ 300 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาผลกระทบร่วมระหว่างระยะเวลาอบแบบหล่อกับอุณหภูมิเทโลหะหลอมเหลวจะมีผลเหมือนกับผลกระทบร่วมระหว่างระยะเวลาอบแบบหล่อกับอุณหภูมิแบบหล่อ

เมื่อพิจารณาผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิแบบหล่อกับอุณหภูมิเทโลหะ ผลการวิเคราะห์พบว่า ถ้าใช้อุณหภูมิแบบหล่อที่ 300 องศาเซลเซียส ควรใช้อุณหภูมิเทโลหะที่ 800 องศาเซลเซียส ถ้าต้องการให้น้ำหนักของชิ้นงานหล่อใกล้เคียงค่ากำหนดมากที่สุด ซึ่งสามารถเขียนสมการทำนาย (Regression) ของค่าน้ำหนักชิ้นงานหล่อ (Y) ในรูปของปัจจัยต่าง ๆ ดังสมการที่ 1

$$Y = -1252.190 + 603.148 (Ct) + 0.665006 (Mt) + 0.683721 (Pt) - 0.434162 (Ct * Mt) - 0.281625 (Ct * Pt) + 0.00155125 (Mt * Pt) \dots \dots \dots (1)$$

3. การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย

การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการหล่อทองเหลืองแบบอินเวสเมนต์ ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ response optimizer พบว่าถ้าต้องการให้น้ำหนักชิ้นงานหล่อใกล้เคียง 610 กรัม เนื่องจากเป็นค่าน้ำหนักของชิ้นงานต้นแบบที่ใช้ทดลอง จะต้องกำหนดปัจจัยในกระบวนการหล่อ โดยใช้ระยะเวลาอบแบบหล่อ 3 ชั่วโมง อุณหภูมิแบบหล่อ 300 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเทโลหะ 800 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นระดับปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการหล่อทองเหลืองแบบอินเวสเมนต์ ดังภาพที่ 8 (Figure 8)

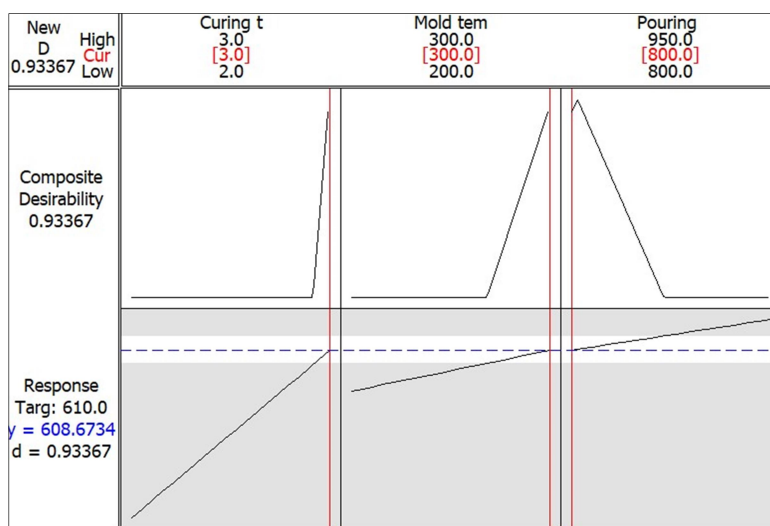


Figure 8 Optimization plots of factors

อภิปรายผล

จากการศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการหล่อทองเหลืองแบบอินเวสเมนต์ โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับปัจจัยที่นำมาออกแบบการทดลอง ประกอบด้วยระยะเวลาอบแบบหล่ออุณหภูมิแบบหล่อและอุณหภูมิเทโลหะ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang et al. (1995) ที่ศึกษาเทคโนโลยีการออกแบบและการกำจัดข้อบกพร่องการหล่อเครื่องประดับโลหะด้วยกระบวนการหล่อแบบซีพิงหยาบ พบว่า การควบคุมอุณหภูมิการอบแบบปูนที่เหมาะสม การเตรียมแบบหล่อ และการควบคุมอุณหภูมิเทโลหะสามารถช่วยลดข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ จากนั้นนำ

ผลการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลจากการวิเคราะห์พบว่าทุกปัจจัยส่งผลต่อกระบวนการหล่ออย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jitender et al. (2008) ที่ได้นำโปรแกรมจำลองงานหล่อขึ้นรูปมาปรับใช้ในการเลือกปัจจัยสำหรับกระบวนการการหล่อขึ้นรูปพบว่าค่าปัจจัยอุณหภูมิโลหะเข้าและอุณหภูมิเริ่มต้นของแม่พิมพ์ส่งผลกระทบต่อเวลาที่ใช้ในการเติมเต็มแม่พิมพ์โลหะ และระยะเวลาในการแข็งตัว และงานวิจัยของ Pinitrattanapan (2013) ศึกษาปัจจัยและอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการหล่อเครื่องประดับทองสุญญากาศแบบขึ้นฝั่งหาย โดยใช้วิธีการของทาคุชิ (Taguchi et al, 2005) ในการสร้างสมการจำลอง รวมถึงหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม พบว่าอุณหภูมิหลอมหล่อโลหะและอุณหภูมิเข้าปูนสำหรับการหล่อ มีผลต่อกระบวนการหล่อเครื่องประดับทองอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลการทดลองหาสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมพบว่า การใช้ระยะเวลาอบแบบหล่อ 3 ชั่วโมง อุณหภูมิแบบหล่อ 300 องศาเซลเซียส และเทโลหะเหลวที่ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองดังกล่าวนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการผลิตเครื่องทองเหลืองที่มีขนาดและน้ำหนักไม่มากได้ อย่างไรก็ตามหากต้องการนำปัจจัยดังกล่าวไปประกอบใช้กับผลิตภัณฑ์โลหะอื่น ๆ ควรศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของโลหะชนิดนั้น

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการหล่อทองเหลืองแบบอินเวสเมนต์พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการหล่อ คือ ระยะเวลาอบแบบหล่ออุณหภูมิแบบหล่อและอุณหภูมิเทโลหะ และเมื่อนำ response optimizer มาหาค่าสภาวะปัจจัยที่เหมาะสม พบว่าการกำหนดระยะเวลาอบแบบหล่อ 3 ชั่วโมง อุณหภูมิแบบหล่อ 300 องศาเซลเซียส และเทโลหะที่ 800 องศาเซลเซียสเป็นค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการหล่อแบบอินเวสเมนต์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยมหาวิทยาลักราชภัฏพิบูลสงครามที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการผลิต คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่ได้ให้ความสนับสนุนสถานที่สำหรับดำเนินการวิจัย ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Adrian S, Srinath V. Material Properties for Predicting Wax Pattern Dimensions in Investment Casting, *Journal of Materials Science and Engineering*. 2003; 362: 125-134.
- Beeley PR. *Foundry Technology*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.
- Beeley PR, Smart RF. *Investment Casting*. The University Press Cambridge, 1995.
- Choopungartm P. *Atlas of Defects in Casting*. Bangkok: Metal-Working and Machinery Industries Development Institute, 1990.
- Chutima P. *Design of Experiment*. Bangkok: Chulalongkorn University, 2002.
- Jitender K, Amir M Paul X. An intelligent system for predicting hpdc process variables in interactive environment, *Journal of Materials Processing Technology*. 2008; 203: 72-79.
- Pinitrattanapan O. *The Quality Control of Gold Jewelry Casting Process Design of Experiment Approach*. Master degree thesis of engineer (Engineering Management). Silpakorn University, 2013.

- Pisansungkakoon C. Effect of mold temperature on defects for white alloy in lost wax casting process, *KMUTT Research and Development Journal*, 2017; 1: 91-99.
- Montgomery DC. *Design and Analysis of Experiments*, 8th ed. Singapore: John Wiley & Sons, 2013.
- Rajkolhe R, Khan JG. Defect, causes and their remedies in casting process. *International Journal of Research in Advent Technology*, 2014; 2(3): 375-383.
- Sanordontri P. *The Jewelry Casting Development by Design and Experiment Analysis a Case Study the Jewelry Factory*. Master degree thesis of Engineer (Industrial Engineering). King Mongkuts University of Technology North Bangkok, 2006.
- Taguchi G, Chowdhury S, Wu Y. et al. *quality engineering handbook*. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2005.
- Zhang XJ, Tong KK, Chan R. et al. Goal Jewellerycasting technology design and defects elimination. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995; 48: 603-609.