

การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตบราซเคลย์สำหรับการขึ้นรูปโดยการปั้น

A Study of Factors Affecting on Brass Clay Forming Process

by Sculpting

อนวัณน์ จุติลาภการ* ปาริฉัตร จำวงศ์ กุลธิดา แซ่เจีย

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ 7 ถนน รังสิต-นครนายก อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120

Anuwat Jutilarptavorn* Parichat Jamwong Kultida Saejea

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

63 Moo 7 Rangsit-Nakhonnayok Road, Ongkharak, Nakhonnayok 26120, Thailand

*Corresponding author Email: anuwatju@swu.ac.th

(Received: September 15, 2023; Revised: December 22, 2023 ; Accepted: December 25, 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการขึ้นรูปบราซเคลย์โดยการปั้นได้ประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลและใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติในการวิเคราะห์และแปรผลเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการขึ้นรูปบราซเคลย์ ขั้นตอนในการศึกษาเริ่มจากการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องและควบคุมได้ มีอยู่ 4 ปัจจัย ได้แก่ ชนิดตัวประสาน เปอร์เซ็นต์ตัวประสานที่ใช้ในการผสม อุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาขึ้นเตอร์ จากนั้นนำผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลที่ได้มาวิเคราะห์และทำการจัดลำดับเงื่อนไขที่มีความเหมาะสมเพื่อเลือกเงื่อนไขในการขึ้นรูปบราซเคลย์โดยการปั้น จากผลการวิเคราะห์และจัดลำดับเงื่อนไขที่เหมาะสมในการขึ้นรูปบราซเคลย์ พบว่าเงื่อนไขที่มีความเหมาะสมในการขึ้นรูปบราซเคลย์โดยการปั้นคือชนิดตัวประสานคาร์บอกซิล เมทิลเซลลูโลส เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน 1% เผาขึ้นเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งเงื่อนไขดังกล่าวมีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูปร้อยละ 0.7 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปและหลังการอบกำจัดตัวประสานมีความคงรูปของชิ้นงานดี ไม่เกิดการแยกชั้นหรือรอยแตก หลังการเผาขึ้นเตอร์ชิ้นงานมีการผานตัวสมบูรณ์ทั่วทั้งชิ้นงาน ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาขึ้นเตอร์ร้อยละ 17.4 ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 5.31 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าความแข็งวิกเกอร์ 37.73 HV โดยผลจากการทดลองนำเงื่อนไขดังกล่าวไปทำการขึ้นรูปโดยการปั้น พบว่าเนื้อเคลย์มีความยืดหยุ่น สามารถปั้นขึ้นรูปได้ดีและยังสามารถปั้นรูปทรงลักษณะต่างๆ อีกทั้งสามารถใช้เทคนิคการปั๊ม การตัด การรีดและการแปะติดในการขึ้นรูปได้

คำสำคัญ: การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล การขึ้นรูปผงโลหะ เมทัลเคลย์

ABSTRACT

This research aimed to study the factor affecting the brass clay forming process by sculpting and applies with the method of factorial design of experiment and using the statistical program to analyze and transform the result to find the optimal conditions for forming brass clay. The study starts

with learning about controllable factors. The four independent variables were the type of binders, percentage of binders used in mixing, temperature and duration of sintering. The results of physical and mechanical properties obtained were analyzed and sorted the optimal condition to select the most optimal condition for forming the brass clay. It was found that the most optimal condition for forming by sculpting is carboxymethylcellulose 1% sintered at 900 Celsius for 1 hour. This condition has volume shrinkage after forming about 0.76%. The physical characteristics of workpieces after forming and removing the binder have good stability, no separation of layers or cracks. After sintering, the workpiece has completely combined and the volume shrinkage was 17.4%. The density was 5.31 g/cm^3 and the surface hardness was 37.73 HV. The result of applying the aforementioned conditions by sculpting shows that the clay has the flexibility and be able to sculpt to any shape easily. Besides, it can be applied together with stamping, cutting, rolling, patching and forming.

Keyword: Factorial design, powder metallurgy, metal clay.

1. บทนำ

กระบวนการโลหะผง (Powder Metallurgy Process) [1] คือขั้นตอนการนำผงโลหะมาทำให้เกิดประโยชน์ด้วยวิธีทางกลและความร้อน ขั้นตอนหลักของกระบวนการโลหะผงประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ การผสมผงโลหะ การอัดขึ้นรูปผงโลหะและการเผาขึ้นเตอร์ ปัจจุบันอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะผงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในแวดวงอุตสาหกรรมมากมายโดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ และเป็นหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่ได้รับความสนใจและกำลังเติบโตอย่างต่อเนื่องในประเทศไทย เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีขึ้นรูปโลหะที่ประหยัดเวลาและวัตถุดิบแบบใกล้รูปร่างสุดท้าย (Near Net Shape) สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้อย่างมีความเที่ยงตรงสูงช่วยลดต้นทุนการผลิตและราคาต่อชิ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบอื่นๆ อีกทั้งยังเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งวัสดุที่ได้รับคามนิยมในการขึ้นรูปโลหะผงได้แก่ เหล็ก ทองแดง อะลูมิเนียม ดีบุก นิกเกิล ไทเทเนียมและโลหะทนความร้อน เช่น ไนโอเบียม ทังสแตน แทนทาลัม เป็นต้น

เมทัลเคลย์ [2-5] คือ วัสดุที่เกิดจากการผสมผงโลหะที่มีอนุภาคขนาดเล็ก ตัวประสานอินทรีย์ (Organic Binder) และน้ำ ทำให้มีลักษณะคล้ายดินเหนียว สามารถปั้นขึ้นรูปได้ด้วยมือและอุปกรณ์เป็นอย่างดี โดยไม่ต้องใช้เครื่องจักรหรือเครื่องหล่อโลหะ หลังจากได้รูปทรงที่ต้องการแล้วจึงปล่อยให้แห้ง จากนั้นนำไปให้ความร้อนในเตาอบเพื่อให้ตัวประสานระเหยออกจากชิ้นงาน อนุภาคขนาดเล็กของโลหะจะเชื่อมติดกันกลายเป็นโลหะ (Bulk Metal) โดยสมบูรณ์ ทำให้ได้ชิ้นงานโลหะตามที่ขึ้นรูป เมทัลเคลย์จึงเป็นวิธีการขึ้นรูปโลหะประเภทหนึ่งที่เหมาะสมกับชิ้นงานที่มีรูปแบบหลากหลาย เช่น เครื่องประดับ เครื่องเรือน อาวุธ พะพุทธรูป เป็นต้น ซิลเวอร์เคลย์ (Silver Clay) ก็เป็นอีกวัสดุชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับเพื่อลดปัญหาและข้อจำกัดที่เกิดจากการขึ้นรูปโดยวิธีการอื่นๆ เช่น การหล่อ ด้วยสมบัติของวัสดุของการขึ้นรูปเครื่องประดับได้ง่าย และสามารถปรับเปลี่ยนแก้ไขรูปทรงได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการขึ้นรูปหลายขั้นตอน จึงทำให้สามารถสร้างสรรค์ผลงานที่มีความซับซ้อนได้หลากหลายในเวลาทีลดลง การศึกษาและวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตซิล

เวอร์เคลย์ที่ใช้ในงานผลิตเครื่องประดับมีหลากหลายงานวิจัย [7-10]

แต่ข้อจำกัดของซิลเวอร์เคลย์ด้านราคาต้นทุนที่แพงทำให้ไม่มีการใช้อย่างแพร่หลายและไม่เหมาะกับงานเครื่องประดับราคาถูก งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะใช้ผงโลหะทองเหลือง มาแทนผงโลหะเงิน ซึ่งเรียกว่า บราชเคลย์ (Brass Clay) วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิต บราชเคลย์ และเงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิตบราชเคลย์สำหรับการขึ้นรูปโดยการปั่น

2. วิธีการดำเนินการทดลอง

2.1 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตบราชเคลย์และเงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิตบราชเคลย์สำหรับการขึ้นรูปโดยการปั่น วัสดุที่ใช้คือผงทองเหลืองที่มีส่วนผสมทองแดง 80 เปอร์เซ็นต์และสังกะสี 20 เปอร์เซ็นต์ เกรด FBro 62 ที่มีขนาดน้อยกว่า 53 ไมครอนและตัวประสานคาร์บอกซิลเมทิลเซลลูโลส (Carboxyl Methyl Cellulose) และพอลิเอททิลีนไกลคอล (Polyethylene Glycol) 30 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับแป้ง (Flour) 70 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นงานที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ความหนา 10 มิลลิเมตร

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองเป็นแบบแฟกทอเรียล [6] ซึ่งเป็นการทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น โดยงานวิจัยนี้มีตัวแปรการทดสอบ 2 ประเภท ได้แก่ ตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ตัวแปรอิสระประกอบด้วย 4 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ชนิดตัวประสาน มี 2 ชนิด เปอร์เซ็นต์ตัวประสานมี 3 ระดับ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์มี 2 ระดับ ระยะเวลาในการเผาซินเตอร์มี 3 ระดับ รายละเอียดดังตารางที่ 1 ใช้วิธีวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ตัวแปรตามในโครงการนี้คือ เปอร์เซ็นต์การหด

ตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูป เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์ ค่าความหนาแน่น ค่าปริมาตรรูพรุนเปิด และค่าความแข็งแรงวิกเกอร์ของชิ้นงานบราชเคลย์ โดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับโครงการ คณะผู้วิจัยได้ทำการทดลองทั้งสิ้น 72 การทดลอง

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย (Factors)	ระดับ (Level)
ชนิดตัวประสาน	CMC
	PEG + Flour
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1%
	2%
	3%
อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	800
	900
ระยะเวลาในการเผาซินเตอร์ (ชั่วโมง)	1
	2
	3

2.2 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ

คณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองโดยการเลือกชิ้นงานลักษณะรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ความหนา 10 มิลลิเมตร โดยควบคุมขนาดของชิ้นงานด้วยการอัดลงแบบได้ชิ้นงานดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ

2.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

1. ทดลองผสมบราซเคย์ตามอัตราส่วนที่กำหนด โดยกำหนดให้ใช้ผงทองเหลืองเงื่อนไขละ 10 กรัมอย่างละ 2 ชิ้นงาน (ดังตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 อัตราส่วนที่ใช้ในการผสมบราซเคย์

เปอร์เซ็นต์ตัว ประสาน	ตัวประสาน	น้ำหนักตัว ประสาน (g)
1%	CMC	0.10
	PEG + Flour	0.10
2%	CMC	0.20
	PEG + Flour	0.20
3%	CMC	0.31
	PEG + Flour	0.31

2. หลังปล่อยชิ้นงานให้แห้ง ทำการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป
3. ทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูปโดยคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์การหดตัวได้จากสมการ (1)

$$\text{Volume of Shrinkage} = \left(\frac{V_1 - V_2}{V_1} \right) \times 100 \quad (1)$$

โดยที่

 V_1 = ปริมาตรของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป (cm^3) V_2 = ปริมาตรของชิ้นงานบราซเคย์ (cm^3)

4. อบกำจัดตัวประสานที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที
5. ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังอบกำจัดตัวประสาน
6. เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสและ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมงและ 3 ชั่วโมง
7. ทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์

8. ทดสอบความหนาแน่นแบบมวลรวม อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C373 โดยการนำชิ้นงานไปแช่ในน้ำ 24 ชั่วโมง นำชิ้นงานอิมมersion ไปชั่งน้ำหนักในอากาศและในน้ำ จากนั้นนำชิ้นงานอิมมersion ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมงและทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานอบแห้งคำนวณจากสมการ (2)

$$\text{Density} = \frac{W_3}{W_2 - W_1} \times \rho_{\text{water}} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (2)$$

โดยที่

 W_1 = น้ำหนักของชิ้นงานอิมมersion ชั่งในน้ำ (g) W_2 = น้ำหนักของชิ้นงานอิมมersion ชั่งในอากาศ (g) W_3 = น้ำหนักของชิ้นงานหลังอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (g) ρ_{water} = ความหนาแน่นของน้ำมีค่าเท่ากับ 1 g/cm^3

9. ทดสอบปริมาตรรูพรุนเปิด คำนวณได้จากสมการ (3)

$$\text{Volume open pores} = \frac{W_1 - W_2}{\rho_{\text{water}}} \quad (\text{cm}^3) \quad (3)$$

โดยที่

 W_1 = น้ำหนักของชิ้นงานอิมมersion ชั่งในอากาศ (g) W_2 = น้ำหนักของชิ้นงานหลังอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (g) ρ_{water} = ความหนาแน่นของน้ำมีค่าเท่ากับ 1 g/cm^3

10. ทดสอบการผสานตัวสมบูรณ์โดยใช้เทคนิคการเลื่อยชิ้นงานตามแนวยาว

11. ทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ คำนวณได้จากสมการ (4)

$$HV = \frac{1.854P}{d^2} \quad (\text{kgf/mm}^2) \quad (4)$$

โดยที่

HV = ค่าความแข็งแรงแบบ Vickers (kgf/mm^2)

P = แรงกด (kgf)

d = เส้นทแยงมุมของ d_1 และ d_2 เฉลี่ย (mm.)

12. ตรวจสอบรูปทรงโดยใช้กล้องจุลทรรศน์

3. ผลการดำเนินการทดลอง

3.1 ผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป พบว่า CMC ทุกเปอร์เซ็นต์ตัวประสาน มีความคงตัวของชิ้นงาน ความเป็นเนื้อเดียวกันและมีความสามารถในการขึ้นรูป และพบว่า PEG + Flour ทุกเปอร์เซ็นต์ตัวประสาน มีความคงตัวของชิ้นงาน ความเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ไม่มีความสามารถในการขึ้นรูป เนื่องจากมีความร่วนเกินไปที่จะนำไปขึ้นรูป

3.2 ผลการทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูป

หลังจากชิ้นงานแห้งแล้ว นำชิ้นงานมาวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงโดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์เพื่อคำนวณปริมาตรของชิ้นงานและนำมาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูป (ดังตารางที่ 3)

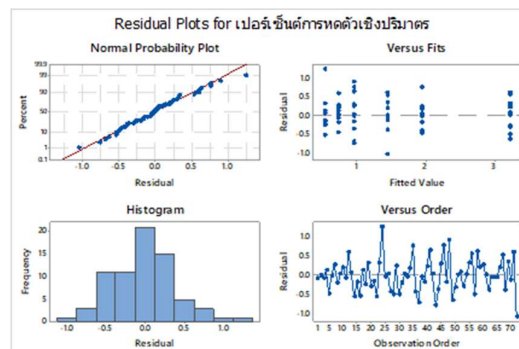
ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูปชิ้นงาน

ชนิดตัวประสาน	ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูป (%)		
	1%	2%	3%
CMC	0.76	1.88	3.25
PEG+Flour	0.51	1.02	1.42

3.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยใช้ Residual Plots สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูป (ดังรูปที่ 2) สรุปได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติ มีการกระจายอย่าง

สม่ำเสมอแสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระ และข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



รูปที่ 2 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

3.2.2 การวิเคราะห์ความสามารถในการอธิบายความเหมาะสมของแบบจำลอง

พิจารณาจากค่า Adjust R Square มีค่าเท่ากับ 0.81 หมายความว่าตัวแปรอิสระ (ชนิดตัวประสานและเปอร์เซ็นต์ของตัวประสาน) สามารถอธิบายความผันแปรหรือการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม (เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูป) ได้ร้อยละ 81.85 แสดงว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมในการอธิบายข้อมูล (ดังรูปที่ 3)

3.2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูปที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 พบว่าค่า P-Value ของเทอมกำลังสองมีค่า เท่ากับ 0.75 และเทอมอันตรกิริยามีค่าเท่ากับ 0.00 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองอันตรกิริยาในการทำนายเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูป (ดังรูปที่ 3) ซึ่งจากค่า P-Value ของปัจจัยชนิดตัวประสาน และเปอร์เซ็นต์ตัวประสาน มีค่าเท่ากับ 0.00 น้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด แสดงให้เห็นว่าปัจจัยทั้งสองต่างส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูป (ดังรูปที่ 4)

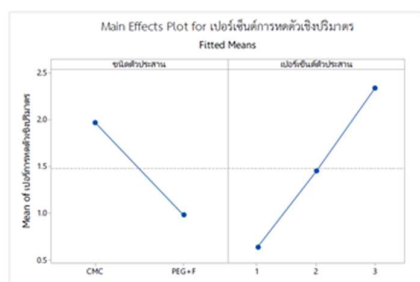
Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	4	59.5088	14.8772	81.06	0.000
Linear	2	51.9794	25.9897	141.61	0.000
ชนิดตัวประสาน	1	17.3792	17.3792	94.70	0.000
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	34.6002	34.6002	188.53	0.000
Square	1	0.0188	0.0188	0.10	0.750
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน*เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	0.0188	0.0188	0.10	0.750
2-Way Interaction	1	7.5106	7.5106	40.92	0.000
ชนิดตัวประสาน*เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	7.5106	7.5106	40.92	0.000
Error	67	12.2963	0.1835		
Lack-of-Fit	1	0.1333	0.1333	0.72	0.398
Pure Error	66	12.1630	0.1843		
Total	71	71.8051			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.428401	82.88%	81.85%	80.26%

รูปที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูป



รูปที่ 4 กราฟแสดงผลกระทบหลักที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูปในแต่ละปัจจัย

4.2.4 การหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด

จากการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมโดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer พบว่าค่าปัจจัยที่เหมาะสมมี 5 อันดับเรียงจากค่าเปอร์เซ็นต์หดตัวเชิงปริมาตรน้อยไปมาก โดยปัจจัยที่มีความเหมาะสมมากที่สุดในการขึ้นรูปคือ ชนิดตัวประสาน PEG + Flour เปอร์เซ็นต์ตัวประสานที่ใช้ในการผสม 1% ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูปเท่ากับ 0.509 โดยมีความพึงพอใจรวมเท่ากับ 0.867 (ดังรูปที่ 5)

4.3 ผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังอบกึ่งน้ำและตัวประสาน

จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการอบกึ่งน้ำและกึ่งตัวประสานพบว่า CMC ทุกเปอร์เซ็นต์ตัวประสาน มีความคงตัวของชิ้นงาน และมี

ความเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ PEG + Flour ทุกเปอร์เซ็นต์ตัวประสาน มีความเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ไม่มีความคงตัวของชิ้นงาน เนื่องจากชิ้นงานหลังการอบกึ่งน้ำและกึ่งตัวประสาน มีความเปราะสูง จึงแตกได้ง่าย และชิ้นงานยังมีความร่วนซุย จึงต้องใช้ความระมัดระวังในสัมผัสชิ้นงานเป็นอย่างมาก

Response Optimization: เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตร

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตร	Minimum		0	3.83404	1	1

Solutions

Solution	ชนิดตัวประสาน	เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตร Fit	Composite Desirability
1	2	1	0.50971	0.867058
2	1	1	0.76203	0.801247
3	2	2	1.02020	0.733911
4	2	3	1.41662	0.630515
5	1	2	1.88111	0.509366

รูปที่ 5 ลำดับค่าปัจจัยที่เหมาะสมพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูป

4.4 ผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์

หลังจากเผาซินเตอร์ตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่กำหนด นำชิ้นงานมาวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงโดยใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ในการวัดเพื่อคำนวณปริมาตรของชิ้นงานและนำมาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์ (ดังรูปที่ 6)

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 พบว่าค่า P-Value ของเทอมกำลังสองมีค่าเท่ากับ 0.107 และเทอมอันตรกิริยามีค่าเท่ากับ 0.00 ซึ่งมีความน้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองอันตรกิริยาในการทำนายเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์ (ดังรูปที่ 7) ซึ่งจากค่า P-Value พบว่าปัจจัยระหว่างชนิดตัวประสานและเปอร์เซ็นต์ตัวประสาน ปัจจัยระหว่างชนิดตัวประสานและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ ปัจจัยระหว่างชนิดตัวประสานและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาซิน

เตอร์ ปัจจัยระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการเผา
ซินเตอร์ มีค่าเท่ากับ 0.00 น้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่
กำหนด แสดงให้เห็นว่าปัจจัยร่วมทั้งสี่ความสัมพันธ์ต่าง
ส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผา
ซินเตอร์

4.3 ผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของ ชิ้นงานหลังอบกึ่งน้ำและตัวประสาน

จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลัง
การอบไล่ไอน้ำและกึ่งน้ำตัวประสานพบว่า CMC ทุก
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน มีความคงตัวของชิ้นงาน และม
ีความเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ PEG + Flour ทุกเปอร์เซ็นต์ตัว
ประสาน มีความเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ไม่มีความคงตัวของ
ชิ้นงาน เนื่องจากชิ้นงานหลังการอบไล่ไอน้ำและกึ่งน้ำตัว
ประสาน มีความเปราะสูง จึงแตกได้ง่าย และชิ้นงานยังม
ีความร่วนซุย จึงต้องใช้ความระมัดระวังในสัมผัสชิ้นงาน
เป็นอย่างมาก

4.4 ผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตร หลังการเผาซินเตอร์

หลังจากเผาซินเตอร์ตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่
กำหนด นำชิ้นงานมาวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและ
ความสูงโดยใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ในการวัดเพื่อคำนวณ
ปริมาตรของชิ้นงานและนำมาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การหดตัว
เชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์ (ดังรูปที่ 6)

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของเปอร์เซ็นต์การ
หดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์ที่ระดับนัยสำคัญ
ทางสถิติ 0.05 พบว่าค่า P-Value ของเทอมกำลังสองมีค่า
เท่ากับ 0.107 และเทอมอันตรกิริยามีค่าเท่ากับ 0.00 ซึ่ง
มีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด ดังนั้นจึง
สามารถใช้แบบจำลองอันตรกิริยาในการทำนาย
เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์ (ดัง
รูปที่ 7) ซึ่งจากค่า P-Value พบว่าปัจจัยระหว่างชนิดตัว
ประสานและเปอร์เซ็นต์ตัวประสาน ปัจจัยระหว่างชนิดตัว
ประสานและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ ปัจจัย
ระหว่างชนิดตัวประสานและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาซิน
เตอร์ ปัจจัยระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการเผา

ซินเตอร์ มีค่าเท่ากับ 0.00 น้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่
กำหนด แสดงให้เห็นว่าปัจจัยร่วมทั้งสี่ความสัมพันธ์ต่าง
ส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผา
ซินเตอร์

อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	ชนิดตัว ประสาน	เปอร์เซ็นต์ ตัวประสาน	ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์ (%)		
			ระยะเวลา 1 ชั่วโมง	ระยะเวลา 2 ชั่วโมง	ระยะเวลา 3 ชั่วโมง
800 องศาเซลเซียส	CMC	1%	1.69	2.93	3.67
		2%	3.55	4.30	5.53
		3%	4.73	5.51	6.96
	PEG + Flour	1%	1.69	2.33	3.03
		2%	2.07	2.84	3.81
		3%	2.86	3.39	4.00
900 องศาเซลเซียส	CMC	1%	17.40	23.24	24.85
		2%	18.42	24.35	27.73
		3%	20.08	25.96	28.72
	PEG + Flour	1%	4.69	15.85	23.24
		2%	4.03	13.54	19.35
		3%	3.33	10.66	17.55

รูปที่ 6 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการ
เผาซินเตอร์

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	12	5847.90	487.33	287.31	0.000
Linear	4	4983.30	1245.83	734.51	0.000
ชนิดตัวประสาน	1	688.89	688.89	406.15	0.000
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	6.95	6.95	4.10	0.047
อุณหภูมิ	1	3701.02	3701.02	2182.02	0.000
ระยะเวลา	1	586.44	586.44	345.75	0.000
Square	2	7.88	3.94	2.32	0.107
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน*เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	0.01	0.01	0.01	0.932
ระยะเวลา*ระยะเวลา	1	7.87	7.87	4.64	0.035
2-Way Interaction	6	856.72	142.79	84.18	0.000
ชนิดตัวประสาน*เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	61.75	61.75	36.40	0.000
ชนิดตัวประสาน*อุณหภูมิ	1	407.60	407.60	240.31	0.000
ชนิดตัวประสาน*ระยะเวลา	1	35.84	35.84	21.13	0.000
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน*อุณหภูมิ	1	19.00	19.00	11.20	0.001
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน*ระยะเวลา	1	1.19	1.19	0.70	0.406
อุณหภูมิ*ระยะเวลา	1	331.35	331.35	195.35	0.000
Error	59	100.07	1.70		
Lack-of-Fit	23	96.04	4.18	37.30	0.000
Pure Error	36	4.03	0.11		
Total	71	5947.98			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.30236	98.32%	97.98%	97.35%

รูปที่ 7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของเปอร์เซ็นต์การ
หดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์

จากการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมโดยใช้ฟังก์ชัน
Response Optimizer พบว่าค่าปัจจัยที่เหมาะสมมี 5
อันดับเรียงจากค่าเปอร์เซ็นต์หดตัวเชิงปริมาตรน้อยไป
มาก โดยค่าที่มีความเหมาะสมมากที่สุดในการขึ้นรูป คือ
ชนิดตัวประสานที่ 2 หรือ PEG + Flour เปอร์เซ็นต์ตัว
ประสาน 1% เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตร หลังการเผาซินเตอร์เท่ากับ 1.68 โดยมีค่าความพึงพอใจรวมเท่ากับ 0.993 (ดังรูปที่ 8)

Response Optimization: เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตร

Parameters						
Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตร	Minimum		1.50443	29.0867	1	1

Solutions

Solution	ชนิดตัว ประสาน	เปอร์เซ็นต์ ตัวประสาน	เปอร์เซ็นต์ การหดตัว เชิงปริมาตร Fit	Composite Desirability
1	2	1	1.68912	0.993304
2	1	1	1.69498	0.993091
3	2	2	2.06721	0.979596
4	2	1	2.33048	0.970051
5	2	2	2.84230	0.951495

รูปที่ 8 ลำดับค่าปัจจัยที่เหมาะสมพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์

4.5 ผลการทดสอบความหนาแน่น

หลังจากทำการทดสอบการหดตัวหลังการเผาซินเตอร์แล้ว นำชิ้นงานไปแช่น้ำ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานที่อมน้ำไปชั่งน้ำหนักในอากาศและชั่งในน้ำ นำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงนำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนักในอากาศ นำค่าที่ได้มาคำนวณค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน (ดังรูปที่ 9)

อุณหภูมิในการเผา ซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	ชนิดตัวประสาน	เปอร์เซ็นต์ ตัวประสาน	ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของชิ้นงาน (g/cm^3)		
			ระยะเวลา 1 ชั่วโมง	ระยะเวลา 2 ชั่วโมง	ระยะเวลา 3 ชั่วโมง
800 องศาเซลเซียส	CMC	1%	4.40	4.24	4.36
		2%	4.32	4.29	4.72
		3%	4.11	4.26	4.15
	PEG + Flour	1%	4.44	4.53	4.71
		2%	4.28	4.56	4.58
		3%	4.14	4.38	4.45
900 องศาเซลเซียส	CMC	1%	5.31	5.92	6.10
		2%	5.39	5.82	5.89
		3%	5.18	5.37	5.78
	PEG + Flour	1%	4.75	5.37	5.82
		2%	4.55	5.22	5.57
		3%	4.37	4.56	4.72

รูปที่ 9 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของชิ้นงาน

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความหนาแน่นที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 พบว่าค่า P-Value ของเทอมกำลังสองมีค่า เท่ากับ 0.132 และเทอม

อันตรกิริยามีค่าเท่ากับ 0.00 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองอันตรกิริยาในการทำนายค่าความหนาแน่นได้ (ดังรูปที่ 10) เมื่อพิจารณาปัจจัยระหว่างชนิดตัวประสานและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ที่มีค่า P-Value เท่ากับ 0.00 ปัจจัยระหว่างเปอร์เซ็นต์ตัวประสานและอุณหภูมิใช้ในการเผาซินเตอร์ที่มีค่า P-Value เท่ากับ 0.007 และปัจจัยระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ที่มีค่า P-Value เท่ากับ 0.00 ซึ่งน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยรวมทั้งสามความสัมพันธ์นี้มีผลต่อค่าความหนาแน่น

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	12	25.8120	2.1510	45.93	0.000
Linear	4	21.5307	5.3827	114.95	0.000
ชนิดตัวประสาน	1	1.2813	1.2813	27.36	0.000
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	1.6834	1.6834	35.95	0.000
อุณหภูมิ	1	15.9255	15.9255	340.09	0.000
ระยะเวลา	1	2.6406	2.6406	56.39	0.000
Square	2	0.1967	0.0983	2.10	0.132
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน*เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	0.1885	0.1885	4.03	0.049
ระยะเวลา*ระยะเวลา	1	0.0082	0.0082	0.17	0.678
2-Way Interaction	6	4.0846	0.6808	14.54	0.000
ชนิดตัวประสาน*เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	0.1921	0.1921	4.10	0.047
ชนิดตัวประสาน*อุณหภูมิ	1	2.5925	2.5925	55.36	0.000
ชนิดตัวประสาน*ระยะเวลา	1	0.0837	0.0837	1.79	0.186
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน*อุณหภูมิ	1	0.3695	0.3695	7.89	0.007
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน*ระยะเวลา	1	0.0798	0.0798	1.70	0.197
อุณหภูมิ*ระยะเวลา	1	0.7671	0.7671	16.38	0.000
Error	59	2.7628	0.0468		
Lack-of-Fit	23	0.9098	0.0396	0.77	0.744
Pure Error	36	1.8530	0.0515		
Total	71	28.5748			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.216396	90.33%	88.36%	85.39%

รูปที่ 10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความหนาแน่น

จากการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมโดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer พบว่าค่าปัจจัยที่เหมาะสมมี 5 อันดับเรียงจากค่าความหนาแน่นมากไปน้อย โดยค่าที่มีความเหมาะสมมากที่สุด คือ ชนิดตัวประสานที่ 1 หรือ CMC เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน 1% เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ค่าความหนาแน่นเท่ากับ $6.10 g/cm^3$ โดยมีค่าความพึงพอใจรวมเท่ากับ 0.873 (ดังรูปที่ 11)

Response Optimization: ความหนาแน่น

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
ความหนาแน่น	Maximum	3.88375	6.42		1	1

Solutions

Solution	ชนิดตัว ประสาน	เปอร์เซ็นต์ ตัวประสาน	อุณหภูมิ	ระยะ เวลา	ความหนาแน่น Fit	Composite Desirability
1	1	1	900	3	6.10000	0.873829
2	1	1	900	2	5.91500	0.800887
3	1	2	900	3	5.89000	0.791030
4	2	1	900	3	5.81826	0.762745
5	1	2	900	2	5.81500	0.761459

รูปที่ 11 ลำดับค่าปัจจัยที่เหมาะสมพิจารณาจาก
ค่าความหนาแน่น

4.6 ผลการทดสอบปริมาตรรูพรุนเปิด

หลังจากการเผาซินเตอร์ นำค่าน้ำหนักชิ้นงานอิมน้ำ
ที่ชั่งในอากาศและค่าน้ำหนักชิ้นงานหลังการอบแห้งนำ
ค่าที่ได้มาคำนวณค่าปริมาตรรูพรุนเปิด (ดังรูปที่ 12)

อุณหภูมิที่ใช้ในการ เผาซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	ชนิดตัว ประสาน	เปอร์เซ็นต์ ตัวประสาน	ค่าเฉลี่ยปริมาตรรูพรุนเปิด (cm ³)		
			ระยะเวลา 1 ชั่วโมง	ระยะเวลา 2 ชั่วโมง	ระยะเวลา 3 ชั่วโมง
800 องศาเซลเซียส	CMC	1%	0.73	0.68	0.70
		2%	0.71	0.70	0.60
		3%	0.64	0.68	0.65
	PEG + Flour	1%	9.37	8.64	7.86
		2%	10.17	9.61	8.43
		3%	11.19	9.54	8.91
900 องศาเซลเซียส	CMC	1%	0.50	0.33	0.30
		2%	0.44	0.26	0.30
		3%	0.41	0.32	0.29
	PEG + Flour	1%	8.67	6.50	5.05
		2%	9.86	6.92	5.82
		3%	10.28	9.32	8.55

รูปที่ 12 ค่าเฉลี่ยปริมาตรรูพรุนเปิดของชิ้นงาน

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าปริมาตรรู
พรุนเปิดที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 พบว่าค่า P-
Value ของเทอมกำลังสองมีค่าเท่ากับ 0.492 เทอมอันตร
กิริยามีค่าเท่ากับ 0.00 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญทาง
สถิติที่กำหนด ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองอันตรกิริยา
ในการทำนายค่าปริมาตรรูพรุนเปิดได้ (ดังรูปที่ 13) เมื่อ
พิจารณาปัจจัยระหว่างชนิดตัวประสานและเปอร์เซ็นต์ตัว
ประสาน ปัจจัยระหว่างชนิดตัวประสานและอุณหภูมิที่ใช้
ในการเผาซินเตอร์ ปัจจัยระหว่างชนิดตัวประสานและ
ระยะเวลาที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ที่มีค่า P-Value เท่ากับ
0.00 ซึ่งน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงให้เห็นว่า

ปัจจัยร่วมทั้งสามความสัมพันธ์นี้มีผลต่อค่าปริมาตรรูพรุน
เปิด

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	12	1258.46	104.87	303.47	0.000
Linear	4	1220.59	305.15	883.02	0.000
ชนิดตัวประสาน	1	1175.91	1175.91	3402.80	0.000
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	10.93	10.93	31.64	0.000
อุณหภูมิ	1	13.72	13.72	39.71	0.000
ระยะเวลา	1	20.02	20.02	57.94	0.000
Square	2	0.50	0.25	0.72	0.492
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน*เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	0.18	0.18	0.51	0.476
ระยะเวลา*ระยะเวลา	1	0.32	0.32	0.92	0.341
2-Way interaction	6	37.38	6.23	18.03	0.000
ชนิดตัวประสาน*เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	11.86	11.86	34.31	0.000
ชนิดตัวประสาน*อุณหภูมิ	1	5.33	5.33	15.43	0.000
ชนิดตัวประสาน*ระยะเวลา	1	17.09	17.09	49.45	0.000
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน*อุณหภูมิ	1	1.45	1.45	4.20	0.045
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน*ระยะเวลา	1	0.19	0.19	0.54	0.464
อุณหภูมิ*ระยะเวลา	1	1.46	1.46	4.23	0.044
Error	59	20.39	0.35		
Lack-of-Fit	23	8.18	0.36	1.05	0.440
Pure Error	36	12.21	0.34		
Total	71	1278.85			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.587853	98.41%	98.08%	97.60%

รูปที่ 13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า
ปริมาตรรูพรุนเปิด

จากการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมโดยใช้ฟังก์ชัน
Response Optimizer พบว่าค่าปัจจัยที่เหมาะสมมี 5
อันดับเรียงจากค่าปริมาตรรูพรุนน้อยไปมาก โดยค่าที่มี
ความเหมาะสมมากที่สุด คือ ชนิดตัวประสานที่ 1 หรือ
CMC เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน 2% เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ
900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ค่าปริมาตรรูพรุน
เปิดเท่ากับ 0.255 โดยมีค่าความพึงพอใจรวมเท่ากับ
0.993 (ดังรูปที่ 14)

Response Optimization: ปริมาตรรูพรุนเปิด

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
ปริมาตรรูพรุนเปิด	Minimum		0.18	12.4156	1	1

Solutions

Solution	ชนิดตัว ประสาน	เปอร์เซ็นต์ ตัวประสาน	อุณหภูมิ	ระยะ เวลา	ปริมาตร รูพรุนเปิด	
					Fit	Composite Desirability
1	1	2	900	2	0.255	0.993870
2	1	3	900	3	0.290	0.991010
3	1	2	900	3	0.295	0.990601
4	1	1	900	3	0.300	0.990193
5	1	3	900	2	0.320	0.988558

รูปที่ 14 ลำดับค่าปัจจัยที่เหมาะสมพิจารณาจากค่า
ปริมาตรรูพรุนเปิด

4.7 ผลการทดสอบการผสมตัวสมบูรณ์

ในการทดสอบส่วนนี้จะเป็นการทดสอบความเป็นเนื้อโลหะของชิ้นงาน โดยการตัดตามยาวชิ้นงานหลังการเผาซินเตอร์ในแต่ละเงื่อนไข พบว่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสไม่เหมาะสมในการเผาซินเตอร์เพราะไม่มีเงื่อนไขใดผสมตัวกันสมบูรณ์ (ดังรูปที่ 15 และรูปที่ 17) ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ตัวประสาน CMC ทุกเงื่อนไขมีการผสมตัวกันสมบูรณ์เป็นโลหะทองเหลืองทั้งชิ้นงาน (ดังรูปที่ 16) แต่ตัวประสาน PEG + Flour มีเพียง 2 เงื่อนไขที่เป็นผสมตัวกันสมบูรณ์ คือ PEG + Flour 1% เผาซินเตอร์ 3 ชั่วโมง และ PEG + Flour 2% เผาซินเตอร์ 3 ชั่วโมง ในเงื่อนไขอื่นนั้น พบว่า ผสมตัวกันไม่สมบูรณ์เป็นโลหะทองเหลืองไม่ทั่วชิ้นงาน (ดังรูปที่ 18)

เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	1%	2%	3%
1 ชั่วโมง			
2 ชั่วโมง			
3 ชั่วโมง			

รูปที่ 15 ภาพตัดชิ้นงานตัวประสาน CMC หลังการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส	1%	2%	3%
1 ชั่วโมง			
2 ชั่วโมง			
3 ชั่วโมง			

รูปที่ 16 ภาพตัดชิ้นงานตัวประสาน CMC หลังการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	1%	2%	3%
1 ชั่วโมง			
2 ชั่วโมง			
3 ชั่วโมง			

รูปที่ 17 ภาพตัดชิ้นงานตัวประสาน PEG + Flour หลังการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส	1%	2%	3%
1 ชั่วโมง			
2 ชั่วโมง			
3 ชั่วโมง			

รูปที่ 18 ภาพตัดชิ้นงานตัวประสาน PEG + Flour หลังการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

4.8 ผลการทดสอบความแข็งวิกเกอร์

นำชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบการผสมตัวสมบูรณ์ และมีคุณสมบัติความเป็นโลหะเท่านั้น มาทำการทดสอบค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ ซึ่งพบว่ามีเพียงชิ้นงานบราซเคลย์ที่ผสมกับตัวประสาน CMC เท่านั้นที่มีการผสมตัวสมบูรณ์และมีเนื้อชิ้นงานเป็นโลหะทองเหลือง จึงทำการหาค่าความแข็งบริเวณผิวของชิ้นงานและได้ค่าความแข็งวิกเกอร์ (ดังรูปที่ 19)

ค่าเฉลี่ยความแข็งที่อุณหภูมิการเผา 900 องศาเซลเซียส (HV)				
ชนิดตัวประสาน	ระยะเวลาในการเผาซินเตอร์ (ชั่วโมง)	เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน (%)		
		1%	2%	3%
CMC	1	37.73	36.92	38.99
	2	38.51	38.09	39.65
	3	39.69	39.12	40.86

รูปที่ 19 ค่าเฉลี่ยความแข็งวิกเกอร์ของชิ้นงาน

เนื่องจากชิ้นงานบราซเคลย์ที่ผสมกับตัวประสาน PEG + Flour มีการผสมตัวสมบูรณ์และมีเนื้อชิ้นงานเป็นโลหะทองเหลือง เพียงแค่ 4 ชิ้นงานจากทั้งหมด 36 ชิ้น จึงไม่ได้ทำการวัดค่าความแข็งจากชิ้นงานบราซเคลย์ที่ผสมกับตัวประสาน PEG + Flour

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 พบว่าค่า P-Value ของเทอมแบบเชิงเส้น มีค่าเท่ากับ 0.00 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า นัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองเชิงเส้นในการทำนายค่าความแข็งได้ (ดังรูปที่ 20) ซึ่งจากค่า P-Value ของปัจจัยของเปอร์เซ็นต์ตัวประสานมีค่าเท่ากับ 0.008 และปัจจัยของระยะเวลาที่ใช้ในการเผาขึ้นเตอร์ มีค่าเท่ากับ 0.00 น้อยกว่าค่า นัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด แสดงให้เห็นว่าปัจจัยทั้งสองส่งผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงาน

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	22.1873	4.4375	10.44	0.000
Linear	2	16.4044	8.2022	19.30	0.000
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	4.2841	4.2841	10.08	0.008
ระยะเวลา	1	12.1203	12.1203	28.51	0.000
Square	2	5.7788	2.8894	6.80	0.011
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน*เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	5.7041	5.7041	13.42	0.003
ระยะเวลา*ระยะเวลา	1	0.0747	0.0747	0.18	0.682
2-Way interaction	1	0.0041	0.0041	0.01	0.924
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน*ระยะเวลา	1	0.0041	0.0041	0.01	0.924
Error	12	5.1010	0.4251		
Lack-of-Fit	3	0.1392	0.0464	0.08	0.967
Pure Error	9	4.9618	0.5513		
Total	17	27.2883			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.651987	81.31%	73.52%	58.89%

รูปที่ 20 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็ง

จากการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมโดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer พบว่าค่าปัจจัยที่เหมาะสมมี 5 อันดับเรียงจากค่าความแข็งมากไปน้อย โดยค่าที่มีความเหมาะสมมากที่สุด คือ ชนิดตัวประสานที่ 1 หรือ CMC เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน 3% เผาขึ้นเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ค่าความแข็งเท่ากับ 40.88 โดยมีค่าความพึงพอใจรวมเท่ากับ 0.951 (ดังรูปที่ 21)

Response Optimization: ค่าความแข็ง

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
ค่าความแข็ง	Maximum	36.46	41.11		1	1

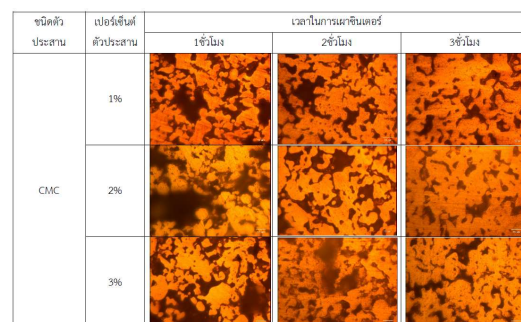
Solutions

Solution	เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	ระยะเวลา	ค่าความแข็ง Fit	Composite Desirability
1	3	3	40.8839	0.951374
2	3	2	39.7422	0.705854
3	1	3	39.6889	0.694385
4	2	3	39.0922	0.566069
5	3	1	38.8739	0.519116

รูปที่ 21 ลำดับค่าปัจจัยที่เหมาะสมพิจารณาจากค่าความแข็ง

4.9 ผลการตรวจสอบรูปพรุนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์

การตรวจสอบรูปพรุน ได้ทำการตรวจสอบจากชิ้นงานบราซเคลย์ที่ผ่านการวัดความแข็งมาแล้ว มาทำการกัดกระดาดทรายและผ้าสักหลาด แล้วนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์ ภาพโครงสร้างแสดงรูปพรุนจากกล้องจุลทรรศน์ มีความสอดคล้องกับค่าปริมาตรรูปพรุน และค่าความหนาแน่น พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเผาขึ้นเตอร์มากขึ้น ปริมาตรรูปพรุนเปิดมีจำนวนน้อยลงทุกเปอร์เซ็นต์ตัวประสาน



รูปที่ 22 ภาพโครงสร้างแสดงรูปพรุนที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์

4.11 การเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมในการขึ้นรูป

จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติและผลการทดลองการขึ้นรูป โดยใช้ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมในการขึ้นรูปในแต่ละเกณฑ์การพิจารณา (ดังรูปที่ 23)

เกณฑ์การพิจารณา	เงื่อนไขที่เหมาะสม
การผสมผสานตัวผสม	CMC 1% เมาซินเดอร์ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง
เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูป	PEG + Flour 1%
ลักษณะทางกายภาพหลังการขึ้นรูป และหลังการอบกำจัดตัวประสาน	CMC 1%
เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาขึ้นรูป	CMC 1% เมาซินเดอร์ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
ความหนาแน่น	CMC 1% เมาซินเดอร์ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
ความแข็ง	CMC 3% เมาซินเดอร์ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

รูปที่ 23 เงื่อนไขที่เหมาะสมในการขึ้นรูปในแต่ละเกณฑ์
การพิจารณา

จากเงื่อนไขที่เหมาะสมในการขึ้นรูปในแต่ละเกณฑ์ การพิจารณา สามารถสรุปได้ว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการขึ้นรูปโดยการปั้น คือ ชนิดตัวประสาน CMC 1% เมาซินเดอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะนำเงื่อนไขนี้มาทำการทดลองขึ้นรูปโดยการปั้นเป็นชิ้นงานตัวอย่าง ตัวอย่างชิ้นงานบราซเคลย์ (ดังรูปที่ 24)



รูปที่ 24 ตัวอย่างชิ้นงานบราซเคลย์ที่ขึ้นรูปโดยการปั้น

4. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตบราซเคลย์สำหรับการขึ้นรูปโดยการปั้นเป็นการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของบราซเคลย์

ได้แก่ เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูป ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปและหลังการอบกำจัดตัวประสาน เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาขึ้นรูป ค่าความหนาแน่น ค่าปริมาตรรูพรุนเปิด การผสมผสานตัวผสม ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์และการตรวจสอบรูพรุนของชิ้นงาน ได้เงื่อนไขที่มีความเหมาะสมในการขึ้นรูปบราซเคลย์โดยการปั้น คือ ชนิดตัวประสาน CMC 1% เมาซินเดอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีค่าการหดตัวเชิง

ปริมาตรหลังการขึ้นรูปร้อยละ 0.76 ลักษณะทางกายภาพหลังการขึ้นรูปและหลังอบกำจัดตัวประสานมีความคงรูปของชิ้นงานดี หลังการเผาขึ้นรูปมีการผสมผสานตัวผสมบูรณ์ทั่วทั้งชิ้นงาน มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาขึ้นรูปร้อยละ 17.4 ค่าความหนาแน่นน้อยที่สุดคือ 5.31 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความแข็งวิกเกอร์ 37.73 สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัวได้โดยสามารถใช้เทคนิคการปั๊ม การตัด การรีดและการปะติดได้
ข้อเสนอแนะงานวิจัยที่ดำเนินการต่อไปคือการเพิ่มขนาดของผงโลหะทองเหลืองมากกว่า 1 ขนาดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการประสานตัวของสารเผาขึ้นรูป และเลือกใช้ตัวประสานอินทรีย์อื่นๆที่เพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปโดยการปั้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Boonmee, *Powder Metallurgy Handbook*. Pathum Thani: Thailand Powder Metallurgy Association, 2020.
- [2] M. Nelson. (2022). How to add silver accents to bronze and copper metal clay [Online]. Available: <https://www.riogrande.com/knowledge-hub/videos/silver-accent-vid/>
- [3] P. Thongnophkun. (2012). Silver jewelry forming from nano-silver clay [Online]. Available: https://www.chanthaburi.buu.ac.th/~gjr/File_InformationCenter/90.pdf
- [4] Metal Adventures. (2006). Your guide to fastfire bronzclay [Online]. Available: [https://www.seattlefindings.com/assets/images/Product Instructions PDF/Fastfire-BronzClayGuide.pdf](https://www.seattlefindings.com/assets/images/Product%20Instructions%20PDF/Fastfire-BronzClayGuide.pdf)
- [5] R. Medal. (2011). Clearing the air on carbon firing [Online]. Available:

<http://www.tgmetalarts.com>

- [6] P. Chutima, *Engineering Design of Experiment*. Bangkok: Chulalongkorn University Press, 2002.
- [7] P. Thongnopkun, S. Tanyapirom and T. Chanduang. (2012). Innovation for fabrication of complex shape silver jewelry from nano-silver clay [Online]. Available: <http://dspace.lib.buu.ac.th/xmlui/handle/1234567890/384>
- [8] S. Supansomboon, C. Tangmansugarit, N. Khaocharee and A. Munpakdee, “Effect of binder on the physical properties of silver clay for jewelry”, *SWU Sci. J.*, vol.26, no.1, pp. 131-147, 2010.
- [9] T. On-in, S. Janjirawittaya and A. Munpakdee. (2015). The influence of solder joins on the physical and mechanical properties of copper clay [Online]. Available: http://science.swu.ac.th/Portals/22/SciEvent/Students/2_3_Jun_58_Present/posters/9_jew/9_jew_20.jpg
- [10] A. Bunchavimonchet, “Effects of binder composition on metal injection molding,” M.S. thesis, Dept. Metallurgical Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2001.