

บทที่ 4

ผลการศึกษาวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการหาปัจจัยที่เหมาะสมในการอัดขึ้นรูปกระดูกเทียมจากผงไฮดรอกซีอะพาไทต์โดยการผสมกับตัวประสานพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป (Press Forming) และนำชิ้นงานไปเผาพูนิก (Sintering) แล้วนำชิ้นงานไปทดสอบค่าการกดอัด ค่าการดัดโค้ง และ ค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน โดยคำนึงที่จะนำชิ้นงานไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทดแทนกระดูกในการรับแรงตรงบริเวณกระดูกต้นคอเพื่อเป็นวัสดุยึดตรึง ดังนั้นชิ้นงานต้องได้มาตรฐานค่าความแข็งแรงที่จะเป็นวัสดุยึดตรึง ที่จะรองรับน้ำหนักหรือแรงกระแทก จึงได้ทำการศึกษาวิจัยหาปัจจัยที่เหมาะสมในการอัดขึ้นรูป โดยได้แบ่งผลการดำเนินงานวิจัยสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ออกเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ ตามการดำเนินงานวิจัย ดังต่อไปนี้

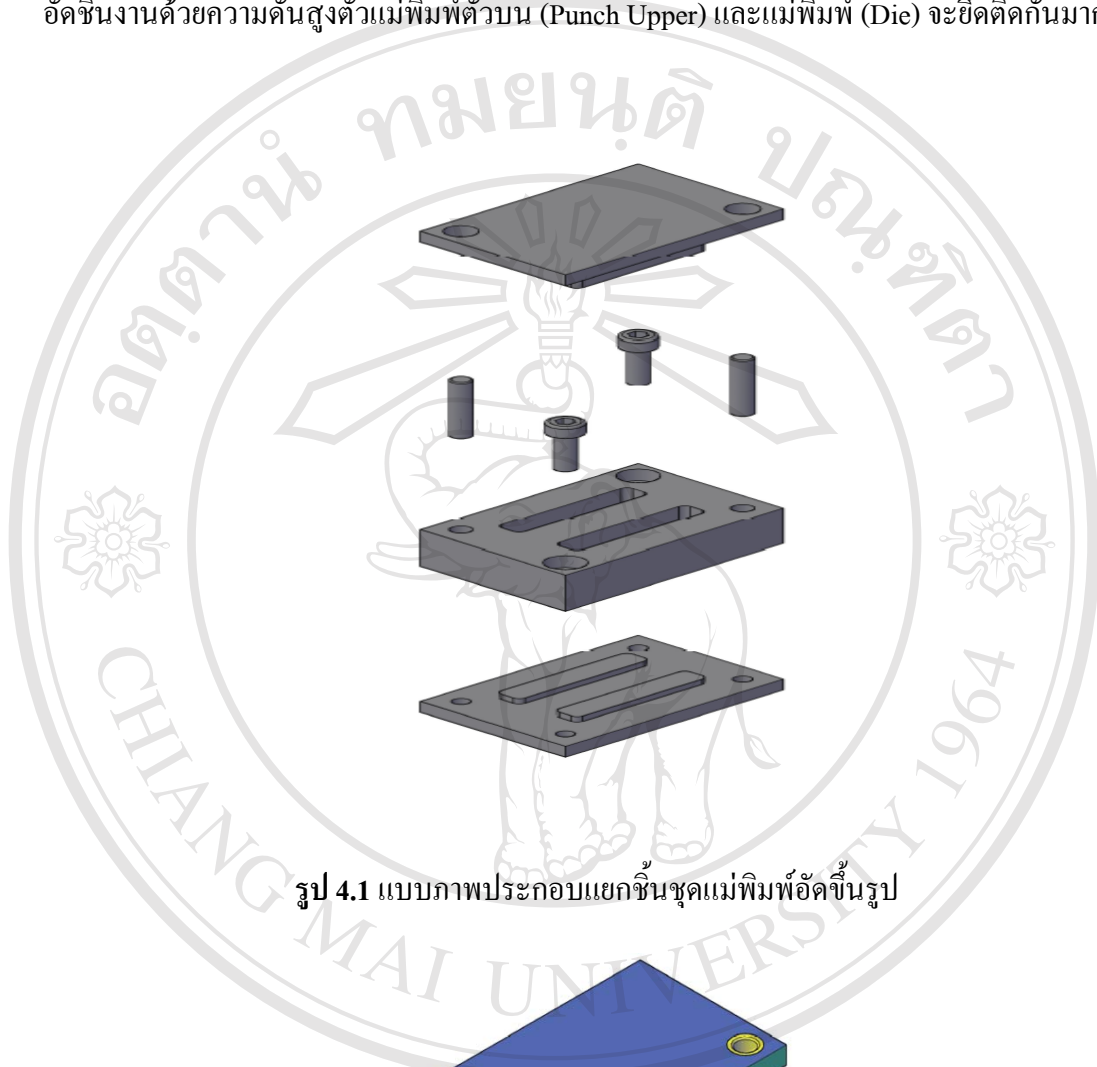
4.1 การออกแบบแม่พิมพ์และเตรียมการทดลอง

4.1.1 ศึกษาารูปแบบของแม่พิมพ์ วัสดุแม่พิมพ์ในการอัดขึ้นรูป

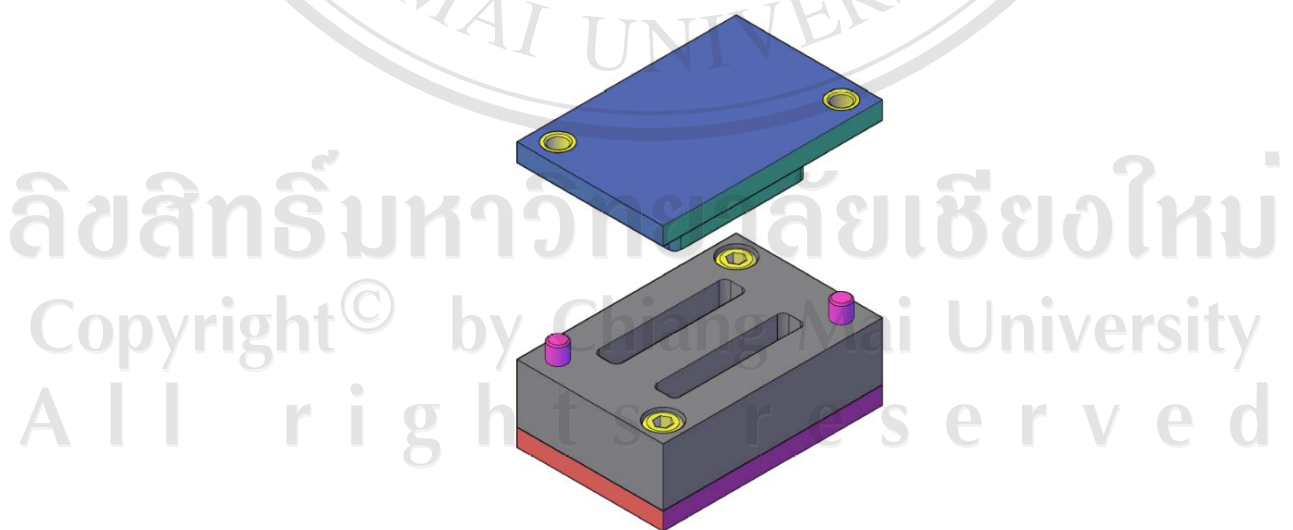
ทำการออกแบบแม่พิมพ์โดยใช้โปรแกรม Auto CAD และโปรแกรม Solid Work ช่วยในการออกแบบชุดแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป ดังแสดงภาพประกอบแยกชิ้นชุดแม่พิมพ์ขึ้นรูป และภาพประกอบชุดแม่พิมพ์ขึ้นรูป ดังรูป 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้คือ

- แม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch Upper) ของตัวกดอัด มีขนาดความกว้างxยาวxสูง เท่ากับ 7.76x44.76x15 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ตามรูป 4.3
- แม่พิมพ์ (Die) ขนาดของช่องที่ทำการอัดขึ้นงาน มีขนาดความกว้างxยาวxสูง เท่ากับ 8x45x20 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ตามรูป 4.4
- แม่พิมพ์ตัวเมีย (Lower Plate) ของตัวกดอัด มีขนาดความกว้างxยาวxสูง เท่ากับ 7.76x44.76x3 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ตามรูป 4.5
- น็อตใช้ในการควบคุมทิศทางไม่ให้เคลื่อนที่และให้ยึดติดกันของแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch Upper) แม่พิมพ์ (Die) และแม่พิมพ์ตัวเมีย (Lower Plate) ขณะทำการอัดขึ้นรูปและให้ง่ายต่อการถอดแม่พิมพ์ออกและแกะชิ้นงานออก ตามรูป 4.6

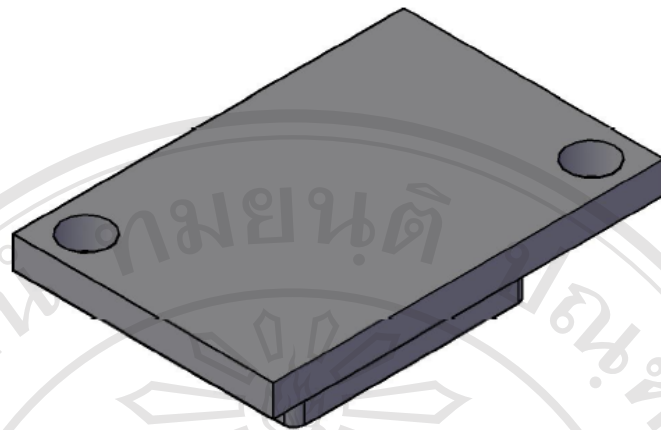
โดยได้ทำการออกแบบสปริงเข้ามาเพิ่มในส่วนของแม่พิมพ์เพื่อให้ช่วยต่อการคลายตัวแม่พิมพ์ตัวบน (Punch Upper) ออกจากแม่พิมพ์ (Die) เพื่อทუნแรงดึงในการถอด เพราะขณะทำการอัดขึ้นงานด้วยความดันสูงตัวแม่พิมพ์ตัวบน (Punch Upper) และแม่พิมพ์ (Die) จะยึดติดกันมาก



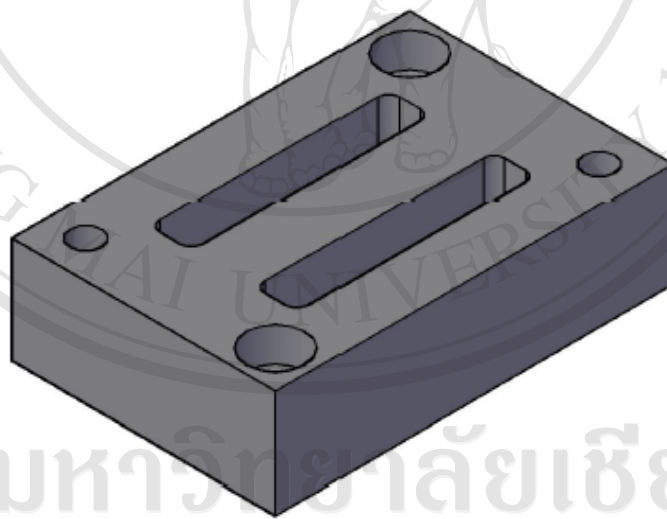
รูป 4.1 แบบภาพประกอบแยกชิ้นชุดแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป



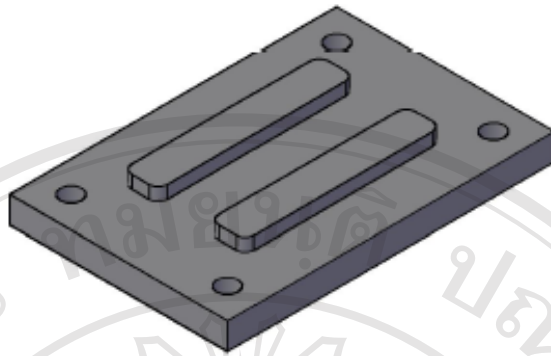
รูป 4.2 แบบภาพประกอบชุดแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป



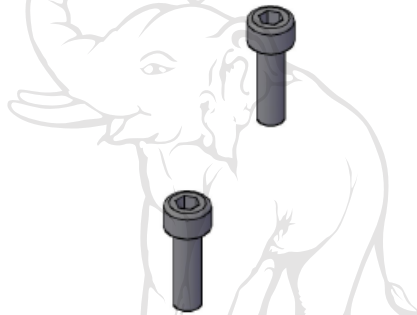
รูป 4.3 แบบแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch Upper)



รูป 4.4 แบบแม่พิมพ์ (Die)



รูป 4.5 แบบแม่พิมพ์ตัวเมีย (Lower Plate)

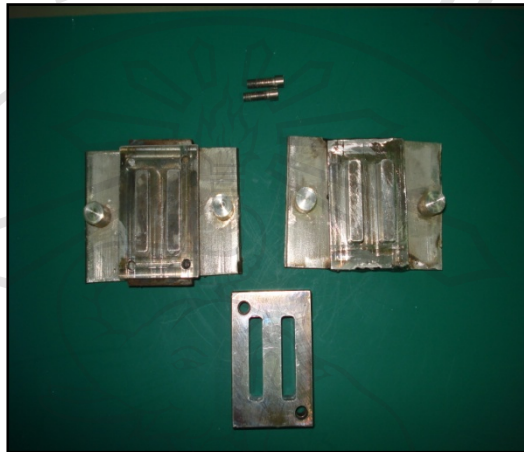


รูป 4.6 แบบน็อต

วัสดุในการจัดทำแม่พิมพ์ในการดำเนินงานวิจัยนี้ เลือกวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์เป็นสแตนเลส 304 ทำการชุบแข็ง ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมือทนต่อแรงกระแทก (Shock Resisting Tool Steels) เป็นเหล็กเครื่องมือ ที่พัฒนาให้มีความเหนียว ความแข็งแรง และความต้านทานการสึกหรอสูง เพื่อใช้สำหรับงานที่ต้องรับแรงกระแทกซ้ำๆ กัน เช่น สิว (Chisel) หัวกด (Punch) และแม่พิมพ์โลหะ (Die) เป็นต้น โดยความเหนียวสูงเป็นผลจากปริมาณคาร์บอนในระดับปานกลาง และทำให้ภายหลังการอบความร้อนที่เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ และมีคาร์ไบด์ละเอียดที่กระจาย กระจาย นอกจากนี้ธาตุแมงกานีส โครเมียม โมลิบดีนัม จะช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง และช่วยให้คงความแข็งไว้ได้ดีในขณะอบคืนตัว (Tempering) ซิลิกอนจะเพิ่มความแข็งให้กับ เฟอไรต์ และช่วยให้คงความแข็งไว้ได้ดีในขณะอบคืนตัวด้วย

4.1.2 ออกแบบและสร้างแม่พิมพ์เพื่อใช้ในการอัดขึ้นรูป

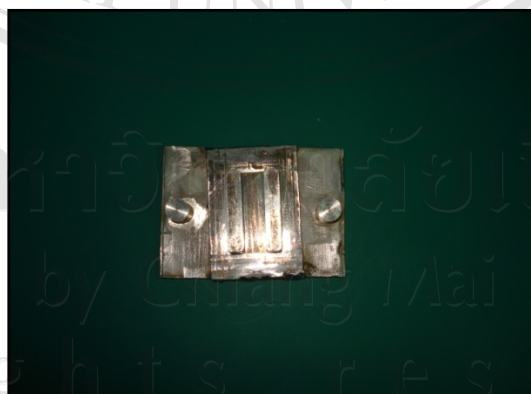
ทำการสร้างชิ้นส่วนต่าง ๆ ของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป ตามที่ได้ทำการออกแบบ โดยใช้เครื่องจักรที่มีความแม่นยำสูงในการสร้างชิ้นส่วนต่าง ๆ ของแม่พิมพ์ ดังแสดงภาพชิ้นส่วนต่าง ๆ ของชุดแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปกระดูกเทียมจากผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ ตามรูป 4.7



รูป 4.7 ชิ้นส่วนต่าง ๆ ของชุดแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปกระดูกเทียมจากผงไฮดรอกซีอะพาไทต์

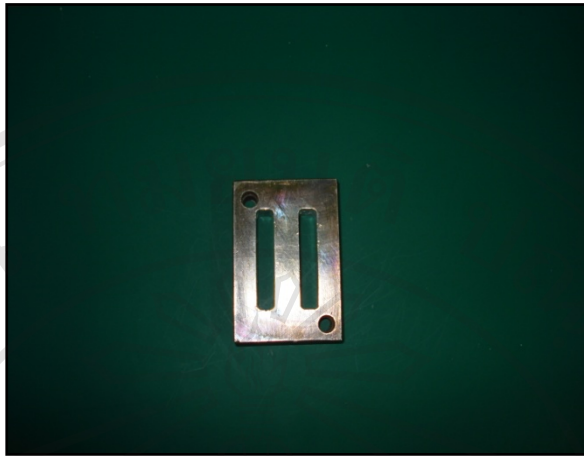
โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้คือ

- แม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch Upper) ของตัวกดอัด
มีขนาดความกว้างxยาวxสูง เท่ากับ 7.76x44.76x15 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ตามรูป 4.8



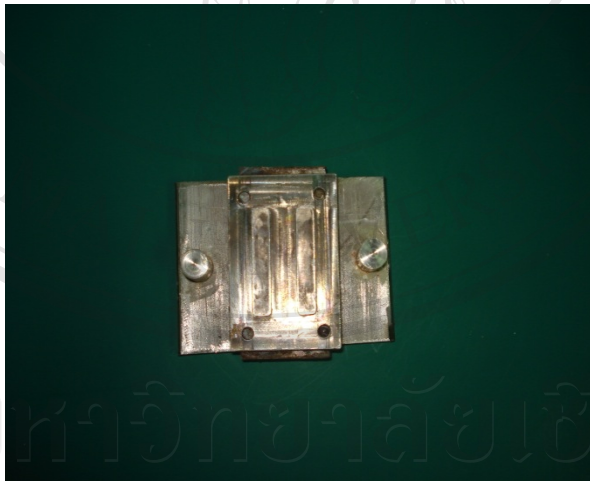
รูป 4.8 แม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch Upper)

- แม่พิมพ์ (Die) ขนาดของช่องที่ทำการอัดขึ้นงาน
มีขนาดความกว้างxยาวxสูง เท่ากับ 8x45x20 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ตามรูป 4.9



รูป 4.9 แม่พิมพ์ (Die)

- แม่พิมพ์ตัวเมีย (Lower Plate) ของตัวกดอัด
มีขนาดความกว้างxยาวxสูง เท่ากับ 7.76x44.76x3 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ตามรูป 4.10



รูป 4.10 แม่พิมพ์ตัวเมีย (Lower Plate)

- ตัวน็อต (Nut)

น็อตใช้ในการควบคุมทิศทางไม่ให้เคลื่อนที่และให้ยึดติดกันของแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch Upper) แม่พิมพ์ (Die) และแม่พิมพ์ตัวเมีย (Lower Plate) ขณะทำการกดอัดขึ้นรูปและเพื่อที่จะจับยึดแม่พิมพ์ให้แน่นและให้ง่ายต่อการถอดแม่พิมพ์ออกและแกะชิ้นงานออกตามรูป 4.11



รูป 4.11 น็อต (Nut)

เครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นส่วนของแม่พิมพ์มีดังนี้คือ

1. เครื่องกัด CNC (Computer Numerical Control) 5 Axis รุ่น VF-2 ยี่ห้อ HASS
2. เครื่องเจียรในราบ รุ่น MPS-350AHD ยี่ห้อ TAFUYUAN

โดยชุดของแม่พิมพ์ทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องกัด CNC (Computer Numerical Control) 5 Axis ซึ่งได้ทำการออกแบบชิ้นงานเบื้องต้นจากโปรแกรมออกแบบ Auto CAD และใช้ดอกกัดหัวบอล (End Mill Ball Nose) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ทำการกัดชิ้นงานด้วยความเร็วรอบ (Spindle Speed) 12,000 รอบต่อนาที อัตราการป้อนกัด (Feed) มีความเร็ว 100 เมตรต่อนาที และการป้อนกัดลึกด้วยความลึก 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ

โดยได้กำหนดเป้าหมายและขอบเขตของขั้นตอนการศึกษาวิจัย ดังที่กล่าวอธิบายไว้แล้วในบทที่ 3 หลังจากนั้นได้ดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนดังกล่าวจนครบทุกกระบวนการ ซึ่งผลการศึกษาการสร้างแบบจำลองและการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยของกระบวนการอัดขึ้นรูป ซึ่งใช้ข้อมูลจากผลการทดลองจากเทคนิคการออกแบบการทดลองเป็นดังนี้

4.2 ผลการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปชิ้นงาน

4.2.1 ผลการออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการอัดขึ้นรูป

ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดปัจจัย ระดับ ขอบเขตและสัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับกระบวนการอัดขึ้นรูป ดังตาราง 4.1

รูป ดังตาราง 4.1

ตาราง 4.1 แสดงค่าของระดับของปัจจัยและสัญลักษณ์ สำหรับการอัดขึ้นรูป

ปัจจัย/หน่วย	ระดับการตั้งค่า		สัญลักษณ์
	ต่ำ (-)	สูง(+)	
1)อัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA (กรัม)	0.2	0.6	PVA
2)ความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป(ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	75	220	Pressure
3)ระยะเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป(วินาที)	20	40	Time

ผลการวิจัยในขั้นตอนนี้ได้มาจาก การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย ซึ่งทำได้โดยใช้หลักการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology : RSM) ด้วยการออกแบบการทดลอง แบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) โดยในการออกแบบการทดลองนี้

จากตาราง 4.1 เป็นตารางที่แสดงถึงการกำหนดค่าของปัจจัย ระดับ ขอบเขตและสัญลักษณ์ซึ่งมีปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ 3 ปัจจัย โดยกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อค่าการกดอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) และค่าการคดโค้ง (เซนติเมตร) คือ อัตราส่วนผสมของตัวประสาน (PVA) ความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป (Pressure) และ ระยะเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป (Time) และโดยกำหนดให้มี 2 ระดับ ตามการออกแบบการทดลอง จากตารางจะเห็นว่า การอัดขึ้นรูปชิ้นงานตามการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) จะมีการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 20 การทดลอง โดยทำการทดลองซ้ำ 1 ครั้ง รวมทั้งหมด 40 การทดลอง โดยได้ผลการทดลองดังตาราง 4.2 และนำชิ้นงานไปเผาฟืนที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัดค่าการกดอัดของชิ้นงานและค่าการคดโค้งของชิ้นงาน และนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบไปวิเคราะห์สมการถดถอยของพื้นผิวผลตอบ ในกรณีที่ค่าของปัจจัยเป็นจุดทศนิยมจะทำปัดค่าให้เป็นจำนวนเต็มเพื่อให้เหมาะสมกับการตั้งค่าระดับของปัจจัยที่เครื่องอัดขึ้นรูปในการทดลองแต่ละครั้ง

ตาราง 4.2 แสดงผลการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Central Composite Design (CCD)

ลำดับการ ทดลอง	ระดับของแต่ละปัจจัย		ระดับปัจจัยที่ทำการศึกษา		
	X1	X2	อัตราส่วนผสม PVA (กรัม)	ความดันการอัด (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	เวลา (วินาที)
1	1	1	0.4	270	30
2	1	1	0.4	148	30
3	1	1	0.4	148	30
4	0	1	0.7	148	30
5	-1	1	0.4	148	47
6	-1	1	0.4	145	14
7	-1	1	0.4	26	30
8	0	1	0.1	148	30
9	0	1	0.6	75	40
10	1	1	0.6	220	20
11	1	1	0.4	148	30
12	-1	1	0.2	75	20
13	1	1	0.2	75	40
14	0	1	0.4	148	30
15	-1	1	0.6	75	20
16	0	1	0.4	148	30
17	1	1	0.2	220	40
18	0	1	0.4	148	30
19	-1	1	0.2	220	20
20	0	1	0.6	220	40

4.2.2 ผลการวิเคราะห์โดยใช้การทดสอบค่าการกดอัดและค่าการตัดโค้งของชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป

ค่าผลตอบ (Response) ที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ของปัจจัยที่จะทำการศึกษา คือ ค่าการกดอัด (Compression) และค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน (Bending) สามารถสรุปผลการทดลองตามตาราง 4.3

ตาราง 4.3 ผลการทดลองส่วนประสมกลาง (CCD) ในแต่ละเงื่อนไขในการทดลอง

ลำดับการทดลองมาตรฐาน	ค่าระดับปัจจัย			ผลตอบ	
	อัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA (กรัม)	ความดันที่ใช้ในการอัด (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	เวลาที่ใช้ในการอัด (วินาที)	ค่าการกดอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	ค่าการดัดโค้ง (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
1	0.4	270	30	72.24	42.54
2	0.4	148	30	70.87	40.44
3	0.4	148	30	70.01	40.65
4	0.7	148	30	71.32	41.23
5	0.4	148	47	68.72	39.34
6	0.4	145	14	69.02	39.58
7	0.4	26	30	66.44	35.28
8	0.1	148	30	66.43	36.44
9	0.6	75	40	68.76	38.23
10	0.6	220	20	73.54	43.87
11	0.4	148	30	70.11	40.38
12	0.2	75	20	64.44	35.63
13	0.2	75	40	63.67	34.45
14	0.4	148	30	70.11	40.78
15	0.6	75	20	68.13	38.11
16	0.4	148	30	71.29	41.21
17	0.2	220	40	69.87	40.33
18	0.4	148	30	70.33	40.19

ตาราง 4.3 ผลการทดลองส่วนประสมกลาง (CCD) ในแต่ละเงื่อนไขในการทดลอง (ต่อ)

ลำดับการทดลองมาตรฐาน	ค่าระดับปัจจัย			ผลตอบ	
	อัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA (กรัม)	ความดันที่ใช้ในการอัด (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	เวลาที่ใช้ในการอัด (วินาที)	ค่าการกดอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	ค่าการตัดโค้ง (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
19	0.2	220	20	70.83	41.56
20	0.6	220	20	72.63	42.88
21	0.4	270	30	71.73	42.12
22	0.4	148	30	71.97	40.10
23	0.4	148	30	70.35	41.11
24	0.7	148	30	71.77	41.55
25	0.4	148	47	68.74	39.88
26	0.4	145	14	69.77	40.12
27	0.4	30	30	64.88	35.72
28	0.1	148	30	67.11	36.78
29	0.6	75	40	68.23	38.56
30	0.6	220	20	73.17	42.56
31	0.4	148	30	70.13	39.55
32	0.2	75	20	65.34	35.05
33	0.2	75	40	64.34	34.67
34	0.6	75	20	70.66	41.21
35	0.2	220	40	68.67	38.74
36	0.4	148	30	71.63	41.77
37	0.2	220	40	69.42	39.82
38	0.4	148	30	72.31	40.78
39	0.2	220	20	71.11	41.61
40	0.6	220	40	72.98	42.94

4.2.2.1 การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients)

ในการวิจัยนี้ผลการทดลองที่ได้จากการวัดค่าผลตอบ ได้นำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของผลตอบของค่าการกดอัดของชิ้นงาน (Compression) และค่าความดัดโค้งของชิ้นงาน (Bending) เพื่อตรวจสอบแหล่งผันแปรของแบบจำลองในทอมต่าง ๆ ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการกดอัดของชิ้นงานและค่าดัดโค้งของชิ้นงาน แสดงตามตาราง 4.4 และตาราง 4.6

ตาราง 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของค่าการกดอัดของชิ้นงาน

Term	Coefficients	SE Coefficients	T	P
Constant	70.7558	0.1798	393.472	0.000
PVA	1.6574	0.1255	13.208	0.000
PRESSURE	2.4690	0.1205	20.431	0.000
TIME	-0.2751	0.1212	-2.270	0.031
PVA*PVA	-0.5715	0.1384	-4.130	0.000
PRESSURE*PRESSURE	-0.8001	0.1177	-6.797	0.000
TIME*TIME	-0.4989	0.1198	-4.164	0.000
PVA*PRESSURE	-0.3071	0.1569	-1.958	0.060
PVA*TIME	0.2194	0.1569	1.399	0.172
PRESSURE*TIME	-0.1388	0.1568	-0.885	0.383

S = 0.627428	R-Sq = 95.73%	R-Sq (adj.) = 94.45%
--------------	---------------	----------------------

ตาราง 4.5 ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance) ของค่าการกักอัดของชิ้นงาน

Source	DF	Seq. SS	Adj. SS	Adj. MS	F	P
Regression	9	264.907	264.907	29.4341	74.77	0.000
Linear	3	233.493	234.826	78.2753	198.84	0.000
Square	3	28.826	28.823	9.6076	24.41	0.000
Interaction	3	2.587	2.587	0.8625	2.19	0.110
Residual Error	30	11.810	11.810	0.3937		
Lack-of-Fit	6	2.832	2.832	0.4719	1.26	0.312
Pure Error	24	8.978	8.978	0.3741		
Total	39	276.717				

ตาราง 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของค่าการตัดโค้งของชิ้นงาน

Term	Coefficients	SE Coefficients	T	P
Constant	40.6356	0.1600	253.392	0.000
PVA	1.4852	0.1117	13.299	0.000
PRESSURE	2.4026	0.1072	22.415	0.000
TIME	-0.2294	0.1078	-2.128	0.042
PVA*PVA	-0.6339	0.1231	-5.148	0.000
PRESSURE*PRESSURE	-0.5754	0.1047	-5.494	0.000
TIME*TIME	-0.2403	0.1066	-2.254	0.032
PVA*PRESSURE	-0.3064	0.1396	-2.195	0.036
PVA*TIME	0.2444	0.1396	1.751	0.090
PRESSURE*TIME	-0.1286	0.1396	-0.922	0.364

S = 0.558350	R-Sq = 96.13%	R-Sq (adj.) = 94.97%
--------------	---------------	----------------------

ตาราง 4.7 ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance) ของค่าการตัดโค้งของชิ้นงาน

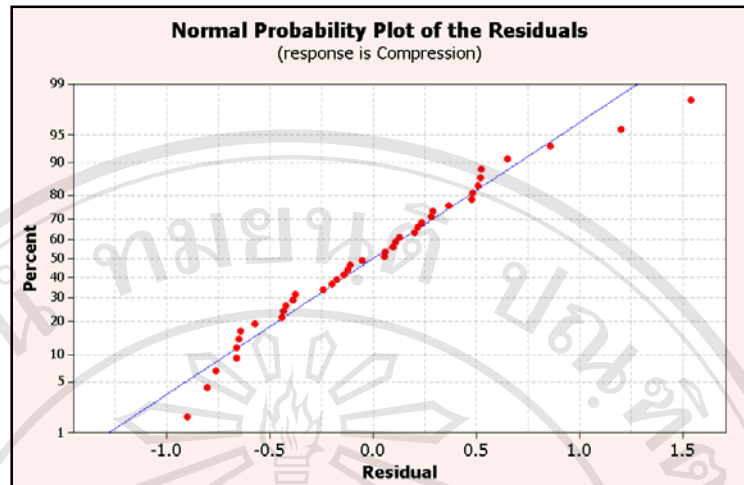
Source	DF	Seq. SS	Adj. SS	Adj. MS	F	P
Regression	9	232.375	232.375	25.8194	82.82	0.000
Linear	3	211.864	213.028	71.0092	227.77	0.000
Square	3	17.788	17.798	5.9328	19.03	0.000
Interaction	3	2.723	2.723	0.9076	2.91	0.051
Residual Error	30	9.353	9.353	0.3118		
Lack-of-Fit	6	3.471	3.471	0.5785	2.36	0.062
Pure Error	24	5.882	5.882	0.2451		
Total	39	241.727				

จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ตามตาราง 4.4 และตาราง 4.6 พบว่าค่าสัดส่วนของปัจจัยทุกค่า มีค่า P-Value น้อยกว่าค่าของ Alpha ซึ่งส่งผลกระทบต่อการใช้รูปแบบที่มีนัยสำคัญ ผลสรุปของแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับค่าผลตอบแต่ละตัว สามารถสรุปได้ตามตาราง 4.8

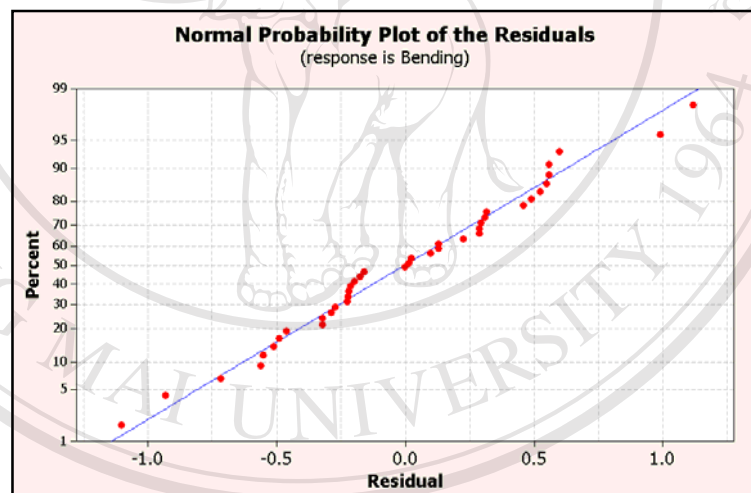
ตาราง 4.8 ผลสรุปของแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบแต่ละตัว

ผลตอบ	รูปแบบของแบบจำลองการถดถอย
ค่าการกดยัดของชิ้นงาน	Quadratic Model
ค่าการตัดโค้งของชิ้นงาน	Quadratic Model

4.2.2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)
 ทำการตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และตรวจสอบค่าความถูกต้องของสมมุติฐานที่สร้างขึ้น ความเพียงพอของแบบจำลองสามารถตรวจสอบโดยการนำส่วนตกค้างของข้อมูลมาพล็อตกราฟน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง (Normal Probability Plot of the Residuals) ดังรูป 4.12 และ 4.13 จากกราฟพบว่าข้อมูลส่วนตกค้างของผลตอบมีการกระจายตัวแบบปกติ จุดของส่วนตกค้างบนกราฟเรียงตัวกันมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง

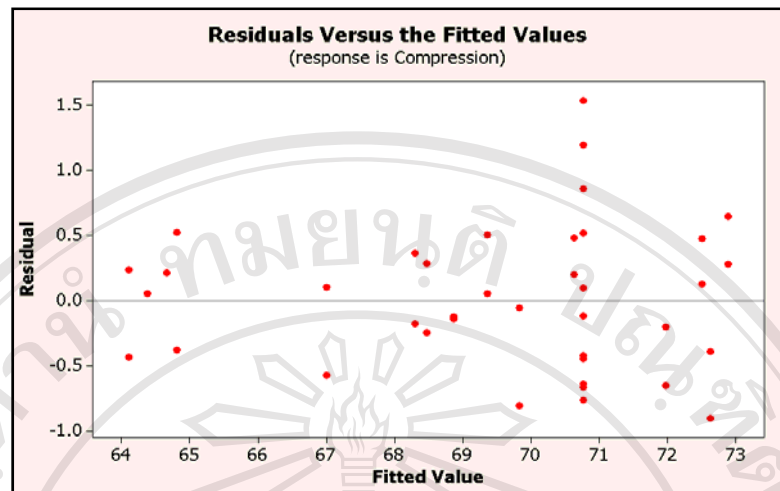


รูป 4.12 กราฟแสดงความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างในการหาค่าที่เหมาะสมของค่าการกดอัดของชิ้นงาน

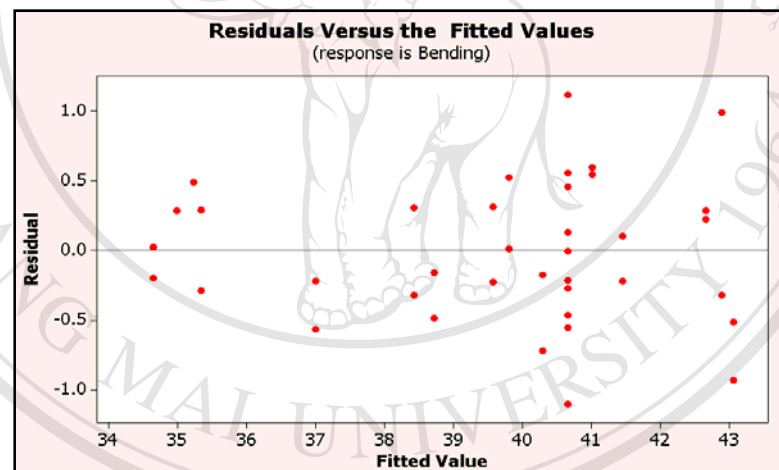


รูป 4.13 กราฟแสดงความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างในการหาค่าที่เหมาะสมของค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน

จากกราฟแสดงการพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย (Plots of Residuals Versus Fitted Values) จากกราฟพบว่า การกระจายตัวของส่วนตกค้างมีลักษณะที่ต่างกัน ส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบอิสระไม่ขึ้นอยู่กับค่าที่ถูกทำนาย ตามรูป 4.14 และ 4.15

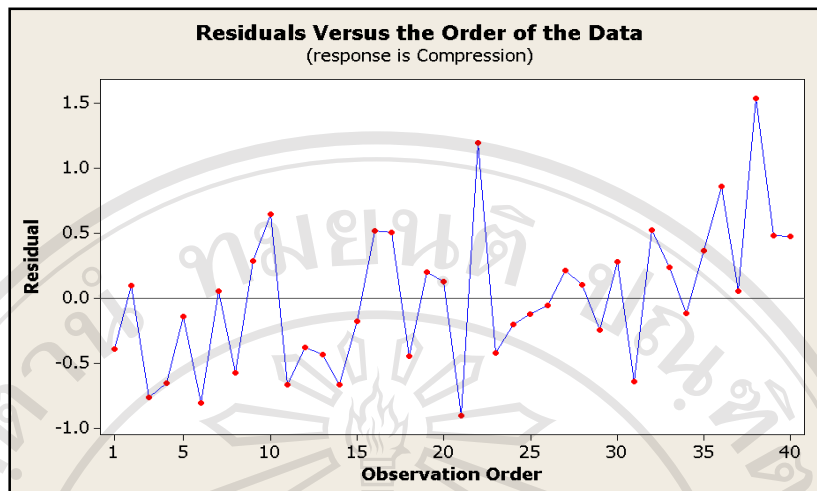


รูป 4.14 การพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย ในการหาค่าที่เหมาะสมของค่าการกดอัดของชิ้นงาน

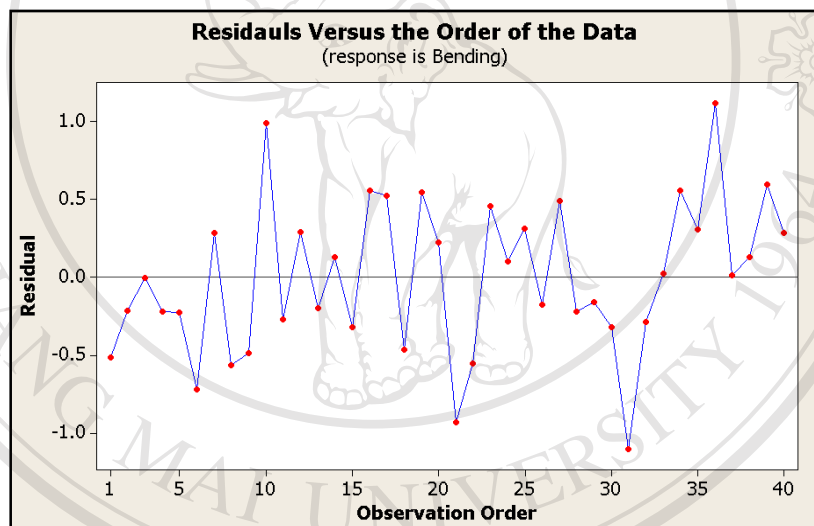


รูป 4.15 การพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย ในการหาค่าที่เหมาะสมของค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน

จากกราฟแสดงการพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง (Plots of Residuals Versus the Observation Order of the Data) จากกราฟพบว่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวของจุดเป็นอิสระไม่ขึ้นอยู่กัปลำดับการทดลอง ตามรูป 4.16

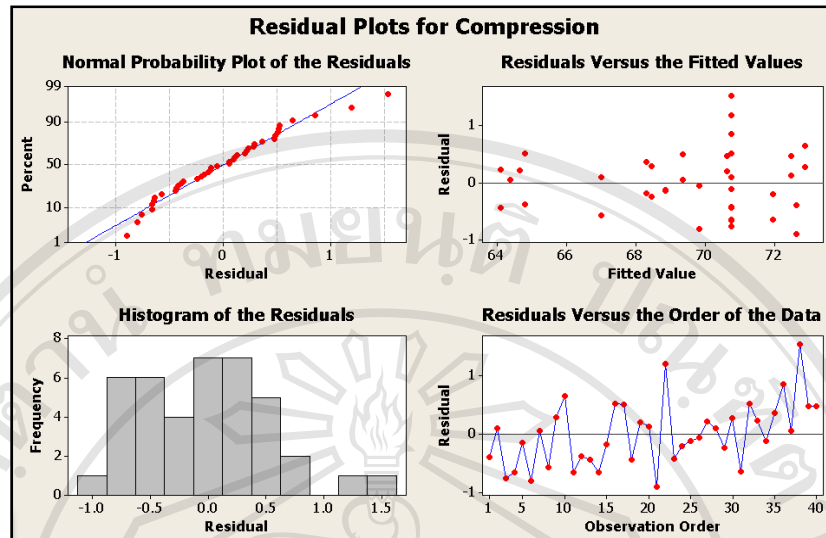


รูป 4.16 การพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองของค่าการกดอัดของชิ้นงาน

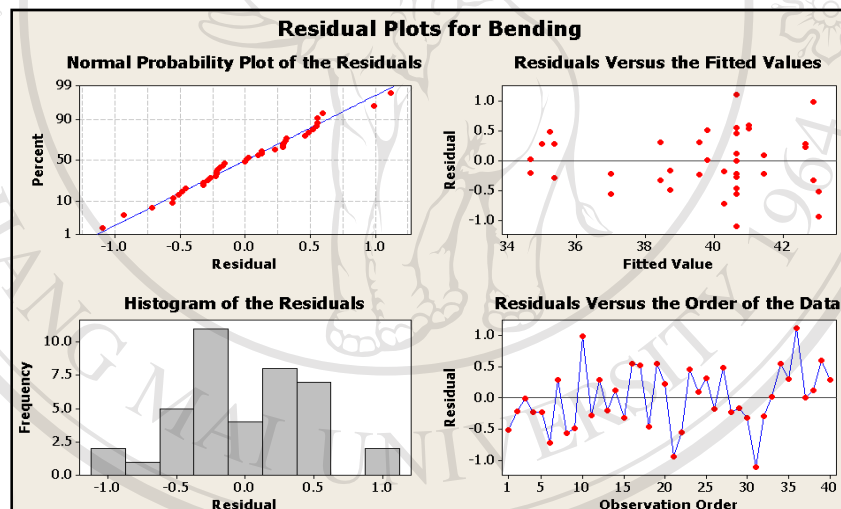


รูป 4.17 การพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองของค่าดัดโค้งของชิ้นงาน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 จากกราฟแสดงการพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง (Plots of Residuals Versus the Observation Order of the Data) จากกราฟพบว่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวของจุดเป็นอิสระไม่ขึ้นอยู่กับลำดับการทดลอง ตามรูป 4.17
 All rights reserved



รูป 4.18 กราฟแสดงการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของข้อมูลผลตอบด้านค่าการกดอัดของชิ้นงาน



รูป 4.19 กราฟแสดงการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของข้อมูลผลตอบด้านค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน

จากกราฟวิเคราะห์ส่วนตกค้างของข้อมูลผลตอบของค่าการกดอัดของชิ้นงาน และค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน พบว่าข้อมูลดังกล่าวตั้งอยู่บนสมมติฐานหลัก 3 ประการดังนี้

- 1) ข้อมูลส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติและค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ (Normality Assumption)

จากรูป 4.18 และ 4.19 ในส่วนของกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง (Normal Probability Plot of the Residuals) พบว่าผลที่ได้จากการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างทั้งสองผลตอบมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ไม่มีจุดใด ๆ ออกนอกเส้นตรงอย่าง

ชัดเจน จึงสรุปได้ว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างของข้อมูลผลตอบค่าการกดอัดของชิ้นงานและค่าการตัดโค้งของชิ้นงาน มีแนวโน้มของการกระจายตัวเป็นแบบปกติ

ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาจากรูป 4.18 และ 4.19 ในส่วนของกราฟฮิสโตแกรมของส่วนตกค้าง (Histogram of the Residuals) พบว่ามีการกระจายตัวของส่วนตกค้างในทุกช่วงของกราฟฮิสโตแกรม จึงสรุปได้ว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างของข้อมูลผลตอบค่าการกดอัดของชิ้นงานและค่าการตัดโค้งของชิ้นงาน มีแนวโน้มการกระจายตัวแบบปกติ

2) ส่วนตกค้างมีความแปรปรวนคงที่ (Constant Variance Assumption) ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับของปัจจัยหรือขึ้นอยู่กับค่าพยากรณ์ของผลตอบ

จากรูป 4.18 และ 4.19 ในส่วนของกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย (Residuals Versus the Fitted Values) ของข้อมูลผลตอบค่าการกดอัดของชิ้นงานและค่าการตัดโค้งของชิ้นงาน พบว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างทั้งสองผลตอบไม่มีแนวโน้มอย่างชัดเจน สามารถสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบอิสระไม่ขึ้นอยู่กับค่าที่ถูกทำนาย

3) ส่วนตกค้างต้องมีการกระจายตัวอิสระ (Independence Assumption) ไม่แปรผันตามปัจจัยหรือลำดับการทดลอง

จากรูป 4.18 และ 4.19 ในส่วนของกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง (Plot of Residuals Versus the Observation Order of the Data) ของข้อมูลผลตอบค่าการกดอัดของชิ้นงานและค่าการตัดโค้งของชิ้นงาน พบว่าจุดที่พล็อตไม่มีแนวโน้มใด ๆ จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างทั้งสองผลตอบมีลักษณะการกระจายตัวแบบอิสระไม่ขึ้นอยู่กับลำดับการทดลอง กล่าวคือ

จากผลการทดสอบสมมติฐานทั้ง 3 ข้อของส่วนตกค้างของข้อมูลสามารถสรุปได้ว่าผลตอบ มีส่วนตกค้างของข้อมูลผลตอบค่าการกดอัดชิ้นงานและค่าการตัดโค้งของชิ้นงาน (Residuals) มีการกระจายตัวแบบปกติและค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ มีความแปรปรวนคงที่ และมีการกระจายตัวอิสระ

4.2.2.3 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square) ของค่าการกดอัดของชิ้นงานและค่าตัดโค้งของชิ้นงาน

ทำการตรวจสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ โดยการพิจารณาจากค่าของ R^2 ที่ได้จากโปรแกรมว่ามีค่าใกล้เคียงกับ 100 % หรือไม่ ถ้ามีค่าตั้งแต่ 90 – 100% แสดงว่าแบบจำลองมีความพอเพียงในการฟิตข้อมูลและเป็นแบบจำลองที่ดี รวมถึงสามารถนำไปสร้างสมการทำนายเพื่อหาผลตอบของค่าการกดอัดของชิ้นงานได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมมากที่สุด ตามตาราง 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square) ค่า $R-Sq$ มีค่าเท่ากับ 95.73 เปอร์เซนต์ ถือว่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพึงพอใจ ซึ่งอาจได้ค่าที่ทำนายผลแตกต่าง

จากค่าที่ยืนยันผล ซึ่งวิธีการคำนวณค่า R^2 ของการทดลองครั้งนี้มีค่า = 95.73 เปอร์เซ็นต์ และหลัง R^2 ได้รับการปรับค่าแล้วมีค่า = 94.45 เปอร์เซ็นต์ และค่าสมการทำนายเพื่อหาค่าผลตอบแทนของการคัดกรองของชิ้นงานได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมมากที่สุด ตามตาราง 4.6 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square) ค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 96.13 เปอร์เซ็นต์ ถือว่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพึงพอใจ ซึ่งอาจได้ค่าที่ทำนายผลแตกต่างจากค่าที่ยืนยันผล ซึ่งวิธีการคำนวณค่า R^2 ของการทดลองครั้งนี้มีค่า = 96.13 เปอร์เซ็นต์ และหลัง R^2 ได้รับการปรับค่าแล้วมีค่า = 94.97 เปอร์เซ็นต์ ค่าสมการทำนายค่า R^2 ของค่าการกวดอัดของชิ้นงาน โดยที่ค่า R^2 ที่คำนวณได้จากโปรแกรมหาได้จาก

$$R^2 = \frac{SS_{\text{Model}}}{SS_{\text{Total}}} = \frac{264.907}{276.717} = 0.9573 \approx 95.73\% \quad (4.1)$$

และค่า Adjusted R^2 หาได้จาก

$$\text{Adjusted } R^2 = 1 - \frac{SS_E/df_E}{SS_{\text{Total}}/df_{\text{Total}}} = 1 - \frac{11.810/30}{276.717/39} = 0.9445 \approx 94.45\% \quad (4.2)$$

ค่าสมการทำนายค่า R^2 ของค่าการคัดกรองของชิ้นงาน

โดยที่ค่า R^2 ที่คำนวณได้จากโปรแกรมหาได้จาก

$$R^2 = \frac{SS_{\text{Model}}}{SS_{\text{Total}}} = \frac{232.375}{241.727} = 0.9613 \approx 96.13\% \quad (4.3)$$

และค่า Adjusted R^2 หาได้จาก

$$\text{Adjusted } R^2 = 1 - \frac{SS_E/df_E}{SS_{\text{Total}}/df_{\text{Total}}} = 1 - \frac{9.353/30}{241.727/39} = 0.9497 \approx 94.97\% \quad (4.4)$$

4.2.2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

วิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อตรวจสอบความเพียงพอของตัวแปรที่มีผลต่อค่าการกวดอัดของชิ้นงานและค่าคัดกรองของชิ้นงาน แสดงตามตาราง 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ

ตาราง 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของค่าการกดอัดของชิ้นงาน

Term	Coefficients	SE Coefficients	T	P
Constant	70.7558	0.1798	393.472	0.000
PVA	1.6574	0.1255	13.208	0.000
PRESSURE	2.4690	0.1205	20.431	0.000
TIME	-0.2751	0.1212	-2.270	0.031
PVA*PVA	-0.5715	0.1384	-4.130	0.000
PRESSURE*PRESSURE	-0.8001	0.1177	-6.797	0.000
TIME*TIME	-0.4989	0.1198	-4.164	0.000
PVA*PRESSURE	-0.3071	0.1569	-1.958	0.060
PVA*TIME	0.2194	0.1569	1.399	0.172
PRESSURE*TIME	-0.1388	0.1568	-0.885	0.383

ตาราง 4.10 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน

Term	Coefficients	SE Coefficients	T	P
Constant	40.6356	0.1600	253.392	0.000
PVA	1.4852	0.1117	13.299	0.000
PRESSURE	2.4026	0.1072	22.415	0.000
TIME	-0.2294	0.1078	-2.128	0.042
PVA*PVA	-0.6339	0.1231	-5.148	0.000
PRESSURE*PRESSURE	-0.5754	0.1047	-5.494	0.000
TIME*TIME	-0.2403	0.1066	-2.254	0.032
PVA*PRESSURE	-0.3064	0.1396	-2.195	0.036
PVA*TIME	0.2444	0.1396	1.751	0.090
PRESSURE*TIME	-0.1286	0.1396	-0.922	0.364

โปรแกรมจะคำนวณค่า P-Value มาให้สำหรับเปรียบเทียบกับค่า Alpha ที่กำหนด ในการทดลองผู้วิจัยกำหนดค่าระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ เมื่อพิจารณาค่า P-Value ของผลกำลังสอง (Square Term) น้อยกว่า 0.05 และอันตรกิริยา (Interaction Term) ซึ่งมีค่ามากกว่า จึงทำการแยกคิด เพื่อที่จะใช้สมการแบบจำลองกำลังสองสำหรับการทำนายของค่าการกดอัดของชิ้นงานค่าระดับนัยสำคัญ (Alpha) = 0.05 แสดงว่ามีส่วนโค้งเกิดขึ้นที่พื้นผิวผลตอบ จึงสามารถใช้สมการ Second-Order Model สำหรับทำนายค่าการกดอัดของชิ้นงานได้

โปรแกรมจะคำนวณค่า P-Value มาให้สำหรับเปรียบเทียบกับค่า Alpha ที่กำหนด ในการทดลองผู้วิจัยกำหนดค่าระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ เมื่อพิจารณาค่า P-Value ของผลกำลังสอง (Square Term) น้อยกว่า 0.05 และอันตรกิริยา (Interaction Term) ซึ่งมีค่ามากกว่า แต่มีเทอมอันตรกิริยาบางตัวมีค่า P-Value ต่ำกว่าระดับ α คือ เทอม PVA*Pressure จึงนำเทอมอันตรกิริยานี้ มีนัยสำคัญต่อสมการแบบจำลองของค่าการดัดโค้ง จึงทำการแยกคิดเพื่อที่จะใช้สมการแบบจำลองกำลังสองสำหรับการทำนายของค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน ค่าระดับนัยสำคัญ (Alpha) = 0.05 แสดงว่ามีส่วนโค้งเกิดขึ้นที่พื้นผิวผลตอบ จึงสามารถใช้สมการ Second-Order Model สำหรับทำนายค่าความดัดโค้งของชิ้นงานได้

4.2.2.5 สร้างสมการทำนาย

สร้างสมการทำนาย โดยการนำค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของปัจจัยในเทอมต่างๆ ไปทำการเขียนสมการทำนายค่าจำนวนเม็ดโลหะ โดยใช้ข้อมูลที่คำนวณมาจากโปรแกรมเมื่อตัวแปรเข้ารหัส (Coded Units) เพื่อนำสมการทำนายที่ได้ไปใช้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยต่อไป

1) ตัวอย่างสมการทำนายค่าการกดอัดของชิ้นงานและค่าการดัดโค้งของชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง CCD (Central Composite Design) เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ ของเทอมต่างๆ ทุกเทอมที่มีผลต่อค่าความเรียบผิวของชิ้นงานและค่าความโค้งของชิ้นงานที่ได้ ไปทำการเขียนสมการทำนาย ซึ่งจะได้สมการทำนายตามสมการ 4.5 และ สมการ 4.6 สมการทำนายค่าการกดอัดของชิ้นงาน คือ Compression และสมการทำนายค่าการดัดโค้งของชิ้นงานคือ Bending

$$\begin{aligned} \text{Compression} &= 53.1630 + 19.7022 (\text{PVA}) + 0.0788266 (\text{Pressure}) + 0.272686 (\text{Time}) \\ &\quad -14.2740 (\text{PVA}^2) -1.52147 \text{E}^{-4} (\text{Pressure}^2) -5.00189 \text{E}^{-3} (\text{Time}^2) \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned}
 \text{Bending} &= 25.1286 + 23.2103 (\text{PVA}) + 0.0738694 (\text{Pressure}) + 0.122051 (\text{Time}) \\
 &\quad - 15.8340(\text{PVA}^2) - 1.09411\text{E}^{-4}(\text{Pressure}^2) - 2.41535\text{E}^{-3}(\text{Time}^2) \\
 &\quad - 0.0211343(\text{PVA} * \text{Pressure})
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

4.2.2.6 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการกดอัดของชิ้นงานและค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน

เมื่อได้สมการทำนายค่าการกดอัดของชิ้นงานและค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน จากนั้นนำสมการที่ได้ไปทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย โดยขั้นตอนนี้จะต้องมีการกำหนดขอบเขตของผลตอบ ได้แก่ ค่าในระดับต่ำสุด (Lower) ค่าเป้าหมาย (Target) และค่าในระดับสูงสุด (Upper) รวมถึงการกำหนดน้ำหนักผลตอบ (Weight) และค่าความสำคัญของผลตอบ (Importance) โดยค่าทั้งสองนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 - 1 ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำหนักและความสำคัญของผลตอบเท่ากับ 1 เนื่องจากผู้วิจัยต้องการเน้นให้ผลตอบเข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากที่สุด และในขณะเดียวกันผลตอบที่ได้จะต้องอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดด้วยอีกทั้งตัวแปรผลตอบ 2 ตัว ที่ใช้ในการวิจัยนี้ก็มีค่าความสำคัญเท่ากันด้วย เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้ว จะได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการกดอัดของชิ้นงานและค่าการดัดโค้งของชิ้นงานดังนี้

1) ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการกดอัดของชิ้นงาน

เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimization ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการกดอัดของชิ้นงาน ที่ทำการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดขึ้นรูป แสดงตามตาราง 4.11

ตาราง 4.11 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการกดอัดของชิ้นงาน

Response Optimization :				
Parameters				
	Goal	Lower	Weight	Importance
Compression	Maximum	63.67	1	1
Global Solution				
PVA	=	0.560606		
Pressure	=	265.071		

ตาราง 4.11 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการกดอัดของชิ้นงาน (ต่อ)

Time = 26

Predicted Responses

Compression = 73.2547, Desirability = 0.971091

Composite Desirability = 0.963846

จากตาราง 4.11 ผู้วิจัยเลือกกำหนดค่าเป้าหมายของผลตอบ (Goal) เป็นค่าที่สูงที่สุด (Maximum) โดยค่าระดับสูงของผลตอบ (Upper) มีค่าเท่ากับ 73.54 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าเป้าหมายที่ต้องการ (Target) มีค่าเท่ากับ 73.54 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าระดับต่ำของผลตอบ (Lower) มีค่าเท่ากับ 63.67 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากการทดสอบการอัดขึ้นรูปชิ้นงานในการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (CCD) ได้ค่าการกดอัดของชิ้นงานสูงสุดมีค่าเท่ากับ 73.54 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรและค่าต่ำสุดเท่ากับ 63.67 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จึงกำหนดค่า Maximum เท่ากับ 73.54 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เพื่อให้ได้ค่าการกดอัดของชิ้นงานที่ดีที่สุด ซึ่งค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าการกดอัดของชิ้นงานจากการคำนวณของโปรแกรมสำหรับชุดการทดลองนี้ คือ อัตราส่วนตัวประสาน PVA เท่ากับ 0.560606 กรัม ความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเท่ากับ 265.071 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และค่าระยะเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป เท่ากับ 26.00 วินาที

2) ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน

เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimization ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน รายละเอียดแสดงตามตาราง 4.12

ตาราง 4.12 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน

Response Optimization :

Parameters

	Goal	Lower	Weight	Importance
Bending	Maximum	34.45	1	1

ตาราง 4.12 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน (ต่อ)

Global Solution	
PVA	= 0.560606
Pressure	= 265.071
TIME	= 26
Predicted Responses	
Bending	= 43.4617, Desirability = 0.956654
Composite Desirability = 0.963846	

จากตาราง 4.12 ผู้วิจัยเลือกกำหนดค่าเป้าหมายของผลตอบ (Goal) เป็นค่าที่สูงที่สุด (Maximum) โดยค่าระดับสูงของผลตอบ (Upper) มีค่าเท่ากับ 73.54 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าเป้าหมายที่ต้องการ (Target) มีค่าเท่ากับ 73.54 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าระดับต่ำของผลตอบ (Lower) มีค่าเท่ากับ 34.45 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากการทดสอบการอัดขึ้นรูปชิ้นงานในการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (CCD) ได้ค่าการดัดโค้งของชิ้นงานสูงสุดมีค่าเท่ากับ 43.87 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรและค่าต่ำสุดเท่ากับ 34.45 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จึงกำหนดค่า Maximum เท่ากับ 43.87 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เพื่อให้ได้ค่าการดัดโค้งของชิ้นงานที่ดีที่สุด ซึ่งค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าการดัดโค้งของชิ้นงานจากการคำนวณของโปรแกรมสำหรับชุดการทดลองนี้ คือ อัตราส่วนตัวประสาน PVA เท่ากับ 0.560606 กรัม ความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเท่ากับ 265.071 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และค่าระยะเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเท่ากับ 26.00 วินาที

3) ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการดัดโค้งของชิ้นงานและค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน

เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer จะได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการดัดโค้งของชิ้นงานและค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน ที่ได้จากการอัดขึ้นรูป ดังตาราง 4.13 และตาราง 4.14 ตามลำดับ

ตาราง 4.13 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการกดอัดของชิ้นงานและค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน

Response Optimization :					
Parameters					
	Goal	Lower	Upper	Weight	Importance
Compression	Maximum	63.67	0.00	1	1
Bending	Maximum	34.45	0.00	1	1
Global Solution					
PVA	=	0.560606			
Pressure	=	265.071			
Time	=	26			
Predicted Responses					
Compression	=	73.2547 , Desirability = 0.971091			
Bending	=	43.4617 , Desirability = 0.956654 Composite Desirability = 0.963846			

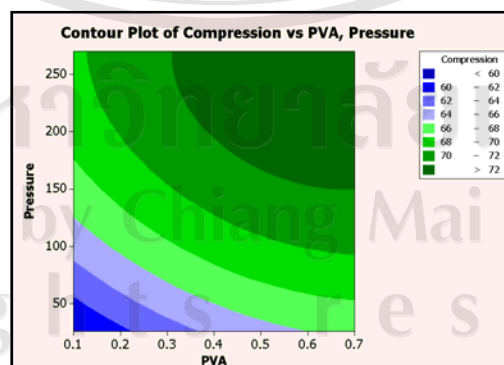
เรากำหนดให้ความสำคัญของตัวแปรผลตอบ ทั้งด้านค่าการกดอัดของชิ้นงาน และการดัดโค้งของชิ้นงาน มีความสำคัญเท่ากัน ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยและผลตอบของค่าการกดอัดของชิ้นงานและค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน จะมีค่าเท่าใด ซึ่งค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าการกดอัดของชิ้นงานและค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน ด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป จากการคำนวณของโปรแกรมสำหรับชุดการทดลองนี้ คือ อัตราส่วนตัวประสาน PVA เท่ากับ 0.560606 กรัม ความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเท่ากับ 265.071 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และค่าระยะเวลาที่ใช้ในการอัดชิ้นงาน เท่ากับ 26.00 วินาที โดยมีค่าทำนายของค่าการกดอัดของชิ้นงานและค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน (Predicted Responses) มีค่าดังต่อไปนี้ Compression มีค่าเท่ากับ 73.2547 และค่า Bending มีค่าเท่ากับ 43.4617 ที่ค่าความพึงพอใจโดยรวม (Composite Desirability) เท่ากับ 0.963846 โดยที่ Compression คือ ค่าการกดอัดของชิ้นงาน และ Bending คือค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน ตามรูป 4.20

Optimal D 0.96385	High Cur Low	PVA 0.70 [0.5606] 0.10	Pressure 270.0 [265.0707] 26.0	Time 47.0 [26.0] 14.0
Composite Desirability 0.96385				
Compress Maximum $y = 73.2547$ $d = 0.97109$				
Bending Maximum $y = 43.4617$ $d = 0.95665$				

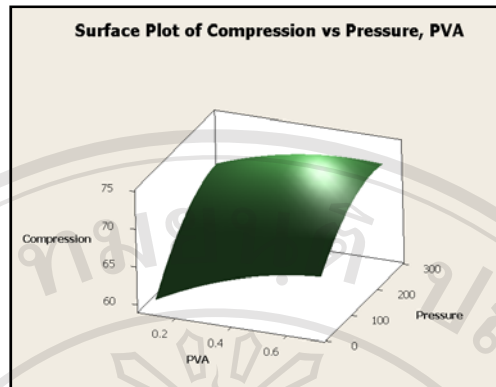
รูป 4.20 กราฟแสดงจุดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย

4.2.2.7 สร้างพื้นผิวผลตอบ (Response Surface)

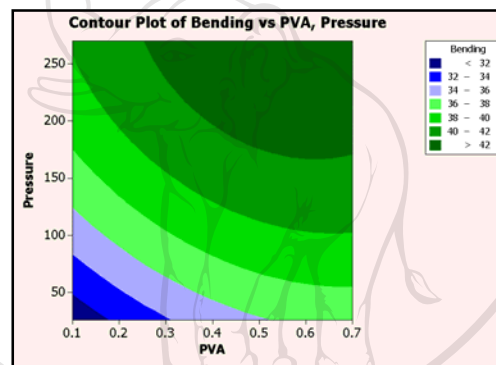
จากการตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อใช้ในการทำนายค่าการกดอัดของชิ้นงาน ในขั้นตอนต่อไปสร้างพื้นผิวผลตอบของค่าการกดอัดของชิ้นงาน เทียบกับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองคือ อัตราส่วนตัวประสาน PVA หน่วยคือ กรัม ความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป หน่วยคือ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และค่าระยะเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นงาน หน่วยคือ วินาที ซึ่งเป็นกราฟโครงร่างที่แสดงค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมเทียบกับค่าผลตอบที่ดีที่สุด เพื่อจะได้ค่าการกดอัดชิ้นงานที่ดีที่สุด



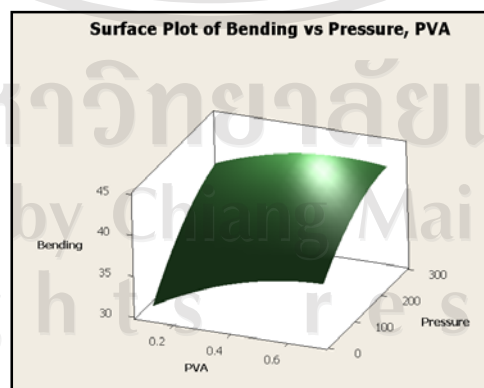
รูป 4.21 กราฟโครงร่างระหว่างอัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA ที่ใช้ในการอัด และความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปของค่าการกดอัดของชิ้นงาน (Compression)



รูป 4.22 พื้นผิวผลตอบระหว่างอัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA ที่ใช้ในการอัด และความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปของค่าการกดอัดของชิ้นงาน (Compression)



รูป 4.23 กราฟโครงร่างระหว่างอัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA ที่ใช้ในการอัด และความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปของค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน (Bending)



รูป 4.24 พื้นผิวผลตอบระหว่างอัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA ที่ใช้ในการอัด และความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปของค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน (Bending)

จากรูปที่ 4.21 กราฟโครงร่างระหว่างอัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA ที่ใช้ในการอัดและความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเป็นกราฟแสดงลักษณะให้ผลตอบแทนสูงสุด (ต้องการกดอัดของชิ้นงานที่มีค่ามากที่สุด) โดยเวลาคงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป จะเห็นว่าค่าผลตอบแทนที่ให้ค่าจำนวนค่าการกดอัดของชิ้นงานที่มากที่สุด อัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปประมาณ 0.56 กรัม และความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป 265 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

จากรูปที่ 4.22 แสดงโครงร่างพื้นผิวผลตอบแทนระหว่างอัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA ที่ใช้ในการอัดและความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเป็นกราฟแสดงลักษณะให้ผลตอบแทนสูงสุด (ต้องการกดอัดของชิ้นงานที่มีค่ามากที่สุด) โดยเวลาคงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป จะเห็นว่าค่าผลตอบแทนที่ให้ค่าจำนวนค่าการกดอัดของชิ้นงานที่มากที่สุด อัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป ประมาณ 0.56 กรัม และความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป 265 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

จากรูปที่ 4.23 กราฟโครงร่างระหว่างอัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA ที่ใช้ในการอัดและความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเป็นกราฟแสดงลักษณะให้ผลตอบแทนสูงสุด (ต้องการกดอัดของชิ้นงานที่มีค่ามากที่สุด) โดยเวลาคงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป จะเห็นว่าค่าผลตอบแทนที่ให้ค่าจำนวนค่าการกดอัดของชิ้นงานที่มากที่สุด อัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป ประมาณ 0.56 กรัม และความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป 265 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

จากรูปที่ 4.24 แสดงโครงร่างพื้นผิวผลตอบแทนระหว่างอัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA ที่ใช้ในการอัดและความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเป็นกราฟแสดงลักษณะให้ผลตอบแทนสูงสุด (ต้องการคัดโค้งของชิ้นงานที่มีค่ามากที่สุด) โดยเวลาคงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป จะเห็นว่าค่าผลตอบแทนที่ให้ค่าจำนวนค่าการคัดโค้งของชิ้นงานที่มากที่สุด อัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป ประมาณ 0.56 กรัม และความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป 265 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

4.2.3 ผลการทดสอบยืนยัน

การทดสอบยืนยัน ทำโดยการอัดขึ้นรูปชิ้นงานตามสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการหาโดยการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ RSM ด้วยเทคนิคแบบส่วนประสมกลาง CCD (Central Composite Design) แล้วทำการทดสอบยืนยันผลการทดสอบ 10 ชิ้นงานทดสอบ โดยปรับค่าอัตราส่วนตัวประสาน PVA เท่ากับ 0.56 กรัม ความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเท่ากับ 265 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และค่าระยะเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นงาน เท่ากับ 26 วินาที และนำไปวัดค่าการกดอัดของชิ้นงานและค่าการคดโค้งของชิ้นงาน ดังแสดงค่าตามตาราง 4.14

ตาราง 4.14 แสดงผลการทดสอบยืนยันผลในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานตามค่าสภาวะที่เหมาะสม

ลำดับการทดลอง	อัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA (กรัม)	ความดันที่ใช้ในการอัด (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	เวลา (วินาที)	ผลการทดสอบ	
				ค่าการกดอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	ค่าคดโค้ง (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
1	0.56	265	26	73.54	43.87
2	0.56	265	26	73.49	43.73
3	0.56	265	26	73.51	43.32
4	0.56	265	26	72.98	42.83
5	0.56	265	26	72.77	43.11
6	0.56	265	26	72.83	43.92
7	0.56	265	26	73.14	42.41
8	0.56	265	26	72.10	42.25
9	0.56	265	26	72.28	43.17
10	0.56	265	26	73.13	42.61

จากการทดลองเพื่อยืนยันผลพบว่าการปรับค่าระดับของปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูล และนำค่าระดับของปัจจัยทำการเชื่อมชิ้นงานทดลองยืนยันผล ชิ้นงานจำนวน 10 ชิ้นโดยตั้งค่าระดับปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย คือ อัตราส่วนตัวประสาน PVA เท่ากับ 0.56 กรัม ความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเท่ากับ 265 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และค่าระยะเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นงาน เท่ากับ 26 วินาที โดย

มีค่าทำนายของค่าการกดอัดของชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 72.98 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าการตัดโค้งของชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 43.12 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ผลจากการทดลองทำซ้ำ 10 ครั้ง ทำให้ได้ค่าการกดอัดของชิ้นงานมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 72.977 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าการตัดโค้งของชิ้นงานเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 43.12 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จะเห็นว่าค่ามีความแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งหมายความว่า การทดลองในครั้งนี้ได้ผลตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ในการออกแบบการทดลอง

4.2.4 ทดสอบค่าความหนาแน่น

เป็นการทดลองเพื่อหาความหนาแน่นของชิ้นงานและปริมาตรรูพรุนของชิ้นงานโดยการทดสอบความหนาแน่นจะประกอบไปด้วยกัน 3 วิธี คือ การทดสอบความหนาแน่นโดยรวม การทดสอบความหนาแน่นปรากฏ ทดสอบความหนาแน่นจริง โดยการนำค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากการอัดขึ้นรูปโดยมีเงื่อนไขสภาวะที่ อัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA เท่ากับ 0.56 กรัม ความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเท่ากับ 265 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเท่ากับ 26 วินาที โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ชิ้นต่อหนึ่งการทดสอบแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อหาค่าความหนาแน่นของแต่ละการทดสอบ

1) ความหนาแน่นโดยรวม (Bulk Density: BD) เป็นค่าความหนาแน่นของเนื้อสารซึ่งนอกจากเนื้อสารแล้ว ในชิ้นงานยังประกอบไปด้วยรูพรุนเปิด รูพรุนปิด ดังแสดงในตาราง 4.15

ตาราง 4.15 แสดงค่าความหนาแน่นโดยรวมของชิ้นงาน

ความหนาแน่นโดยรวม	ค่าความหนาแน่นโดยรวม (g/cm ³)
BD ₁	1.68
BD ₂	1.68
BD ₃	1.69
BD ₄	1.67
BD ₅	1.68
BD ₆	1.68
BD ₇	1.67
BD ₈	1.68
BD ₉	1.68

ตาราง 4.15 แสดงค่าความหนาแน่นโดยรวมของชิ้นงาน (ต่อ)

BD ₁₀	1.68
ความหนาแน่นโดยรวมเฉลี่ย = $1.68 \pm 0.005 \text{ g/cm}^3$	

2) ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density: AD) เป็นค่าความหนาแน่นของสารซึ่งประกอบไปด้วยเนื้อสารและรูพรุนปิด เท่านั้น ซึ่งค่าที่คำนวณได้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นจริงก็จะประมาณค่ารูพรุนปิดได้ ดังแสดงในตาราง 4.16

ตาราง 4.16 แสดงค่าความหนาแน่นปรากฏของชิ้นงาน

ความหนาแน่นปรากฏ	ค่าความหนาแน่นปรากฏ (g/cm ³)
AD ₁	2.31
AD ₂	2.30
AD ₃	2.30
AD ₄	2.30
AD ₅	2.31
AD ₆	2.31
AD ₇	2.30
AD ₈	2.30
AD ₉	2.30
AD ₁₀	2.30
ความหนาแน่นปรากฏเฉลี่ย = $2.30 \pm 0.005 \text{ g/cm}^3$	

3) ความหนาแน่นจริง (True Density: TD) เป็นค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของสารซึ่งประกอบไปด้วยเนื้อสารเท่านั้น ไม่รวมรูพรุนเปิดและรูพรุนปิด ดังแสดงในตาราง 4.17

ตาราง 4.17 แสดงค่าความหนาแน่นจริงของชิ้นงาน

ความหนาแน่นจริง	ค่าความหนาแน่นจริง (g/cm ³)
TD ₁	2.63
TD ₂	2.64
TD ₃	2.64
TD ₄	2.63
TD ₅	2.63
TD ₆	2.64
TD ₇	2.64
TD ₈	2.63
TD ₉	2.63
TD ₁₀	2.63
ความหนาแน่นจริงเฉลี่ย = 2.63 ± 0.005 g/cm ³	

ปริมาตรรูพรุนของชิ้นงานซึ่งชิ้นงานจะมีรูพรุนเปิดและรูพรุนปิดในชิ้นงานซึ่งมีผลต่อความหนาแน่นส่งผลทำให้ค่าการกดอัดและค่าการดัดโค้งชิ้นงานด้วย ดังนั้นจึงต้องทราบปริมาตรรูพรุนเปิดและปริมาตรรูพรุนปิดโดยการนำค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากการอัดขึ้นรูปโดยมีเงื่อนไขสถานะที่อัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA เท่ากับ 0.56 กรัม ความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเท่ากับ 265 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเท่ากับ 26 วินาที ทำให้ทราบค่าปริมาตรรูพรุนเปิดของชิ้นงาน ปริมาตรรูพรุนปิดของชิ้นงาน และปริมาตรรูพรุนของชิ้นงานดังแสดงในตาราง 4.18

ตาราง 4.18 ค่าปริมาตรรูพรุนเปิด ปริมาตรรูพรุนปิด และปริมาตรรูพรุนรวม

ปริมาตรรูพรุนเปิด (g/cm ³)	ปริมาตรรูพรุนปิด (g/cm ³)	ปริมาตรรูพรุนรวม (g/cm ³)
0.62 หรือ (65.26%)	0.33 หรือ (34.74%)	0.95 หรือ (100%)



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved