

สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ  
 บทคัดย่อภาษาไทย  
 บทคัดย่อภาษาอังกฤษ  
 สารบัญตาราง  
 สารบัญภาพ

หน้า

ก  
 ง  
 จ  
 ฉ  
 ฎ

บทที่ 1	บทนำ	1
	1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
	1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา	4
บทที่ 2	ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
	2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
	2.1.1 วัสดุทดแทนกระดูก	5
	2.1.2 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์	6
	2.1.3 คุณสมบัติไฮดรอกซีอะพาไทต์-พอลิเมอร์คอมโพสิต	7
	2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกล และความพรุน	8
	2.1.5 เทคนิคการออกแบบการทดลอง	9
	2.1.6 เทคนิคพีซีหลายพื้นผิวผลตอบ	10
	2.2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	11
	2.2.1 กระบวนการหล่อขึ้นรูป (Precision Molding and Casting Processes)	11
	2.2.2 คุณสมบัติเชิงกล	12
	2.2.2.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)	12
	2.2.2.2 การทดสอบแรงอัด (Compression Testing)	13

	2.2.3 คุณสมบัติเชิงกายภาพ	14
	2.2.3.1 ความพรุน (Porosity)	14
	2.2.4 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)	15
	2.2.4.1 การคัดเลือกและการกลั่นกรองปัจจัย (Factor Identification and Screening)	17
	2.2.4.2 การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization)	17
	2.2.4.3 วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology; RSM)	17
	2.2.5 ฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic)	24
บทที่ 3	วิธีการดำเนินการวิจัย	28
	3.1 การเตรียมการทดลองและการออกแบบแม่พิมพ์	30
	3.1.1 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว	30
	3.1.2 การทดสอบเฟสของไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบน ของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction, XRD)	30
	3.1.3 การออกแบบและการทำแม่พิมพ์	31
	3.1.3.1 แม่พิมพ์สำหรับการทดสอบแรงดึง (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics)	31
	3.1.3.2 แม่พิมพ์สำหรับการทดสอบแรงอัด (Standard Specification for Acrylic Bone Cement)	32
	3.2 การออกแบบการทดลองและการเตรียมชิ้นงาน	33
	3.2.1 การออกแบบการทดลอง	33
	3.2.2 การขึ้นรูปชิ้นงาน	36
	3.3 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล กายภาพ และการวิเคราะห์ผล	37
	3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล กายภาพ	37
	3.3.1.1 การทดสอบแรงดึง (Tension Test)	37
	3.3.1.2 การทดสอบแรงอัด (Compression Test)	38
	3.3.1.3 การทดสอบความพรุน (Porosity)	39
	3.3.2 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ และการทดสอบยืนยันผล	39
	3.4 การหาความพึงพอใจโดยรวมด้วยเทคนิคฟัซซีหลายพื้นผิวผลตอบ	41
	3.5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	42

บทที่ 4	ผลการศึกษาวิจัย	43
4.1	ผลการทดสอบเฟสของไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัวด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction, XRD)	44
4.2	ผลการทดลองจากการใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง	44
4.2.1	ผลการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของกระดูกเทียมด้วยเทคนิคการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture Design)	45
4.2.1.1	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)	47
4.2.1.2	การตรวจสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of Determination)	51
4.2.1.3	การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance)	53
4.2.1.4	การสร้างสมการทำนาย	56
4.2.1.5	การหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบ	57
4.2.2	ผลการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการขึ้นรูปกระดูกเทียมด้วยเทคนิคการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design)	60
4.2.2.1	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)	61
4.2.2.2	การตรวจสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of Determination)	66
4.2.2.3	การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance)	68
4.2.2.4	การสร้างสมการทำนาย	71
4.2.2.5	การหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบ	72
4.2.2.6	การทดลองเพื่อยืนยันผล	75
4.3	การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยเทคนิคพีชชีหลายพื้นผิวผลตอบ	76
4.3.1	การหาความพึงพอใจโดยรวมด้วยเทคนิคพีชชีหลายพื้นผิวผลตอบ	76
4.3.2	การหาสถานะที่เหมาะสมด้วยเทคนิคพีชชีหลายพื้นผิวผลตอบ	81
4.3.3	การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสำคัญของผลตอบกับค่าผลตอบและค่าความพึงพอใจโดยรวมด้วยเทคนิคพีชชีหลายพื้นผิวผลตอบ	85

บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย	89
	5.1 สรุปผลงานวิจัย	89
	5.2 ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะงานวิจัย	90
	5.3 การนำผลวิจัยไปใช้ให้เกิดประโยชน์	91
บรรณานุกรม		92
ภาคผนวก		97
	ภาคผนวก ก การออกแบบและการทำแม่พิมพ์สำหรับการทดสอบแรงดึง และการทดสอบแรงอัด	98
	ภาคผนวก ข ตารางผลข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture Design)	100
	ภาคผนวก ค ตารางผลข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design:CCD) และผลข้อมูลจากการทดลองยืนยันผล	106
	ภาคผนวก ง ตารางผลข้อมูลที่ได้จากเทคนิคฟัซซี่หลายพื้นผิวผลตอบ (Fuzzy Multi Response Surface Technique)	114
	ประวัติผู้เขียน	126

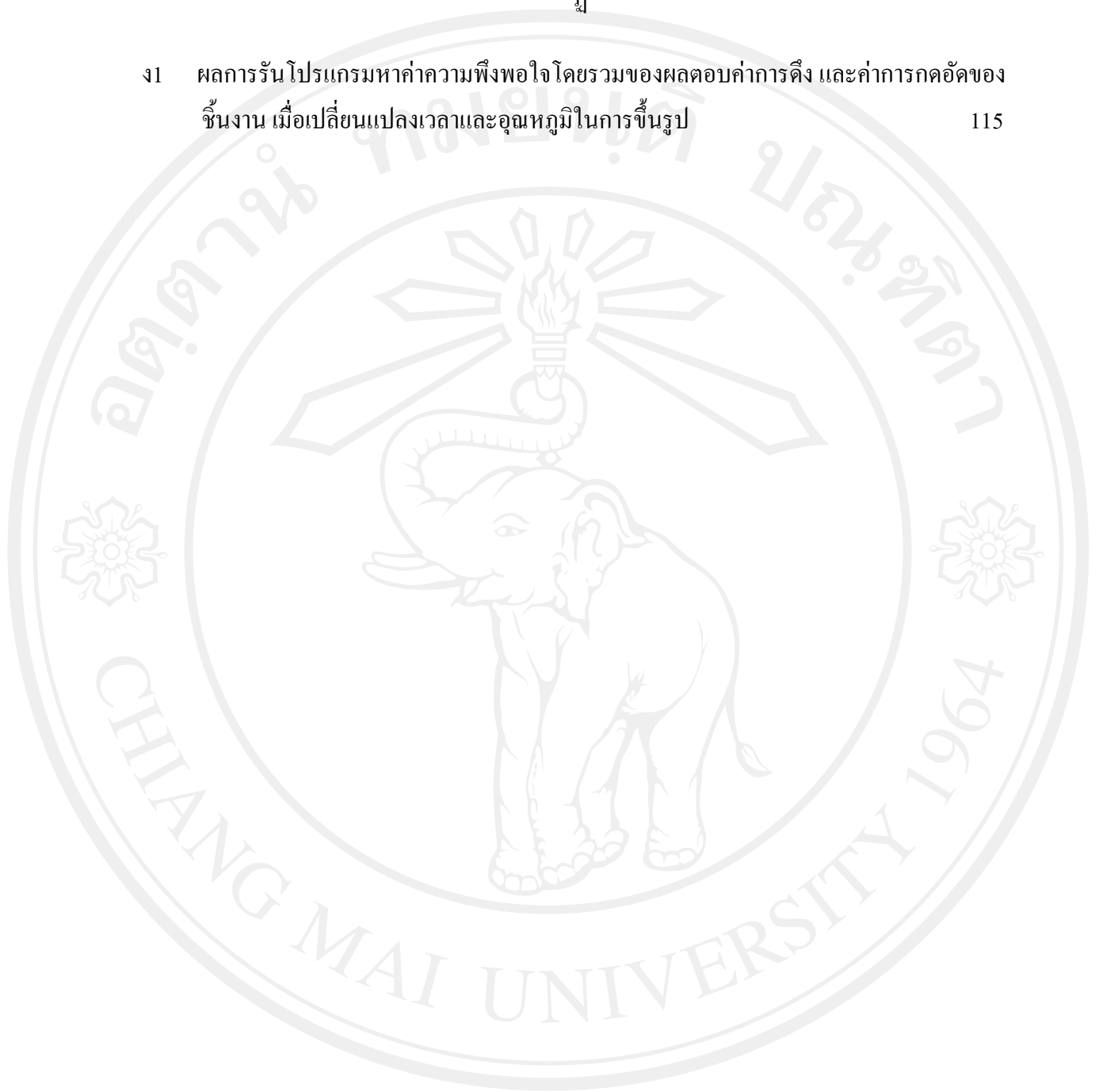
สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 การเก็บข้อมูลของ Central Composite Design สำหรับ 3 Factors ที่ค่า Alpha = 1	20
3.1 แสดงขนาดของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D638-10 ชนิด (Type IV)	31
3.2 แสดงปัจจัย ระดับขอบเขตของปัจจัย และสัญลักษณ์สำหรับการทดลอง	33
3.3 แสดงการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม	35
3.4 แสดงการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง เพื่อหาระยะเวลาและอุณหภูมิในการขึ้นรูป (Polymerization) ที่เหมาะสม	36
4.1 แสดงปัจจัย ระดับขอบเขตของปัจจัย และสัญลักษณ์สำหรับการทดลอง	45
4.2 ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม	46
4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของค่าการดึงของชิ้นงาน	52
4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของค่าการกดอัดของชิ้นงาน	52
4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของเปอร์เซ็นต์ความพูนปรากฏของชิ้นงาน	53
4.6 ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance) ของค่าการดึงของชิ้นงาน	54
4.7 ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance) ของค่าการกดอัดของชิ้นงาน	55
4.8 ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance) ของเปอร์เซ็นต์ความพูนปรากฏของชิ้นงาน	55
4.9 แสดงค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีต่อค่าการดึงของชิ้นงาน และค่าการกดอัดของชิ้นงาน	58
4.10 ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง	61
4.11 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของค่าการดึงของชิ้นงาน	67
4.12 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของค่าการกดอัดของชิ้นงาน	67
4.13 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของเปอร์เซ็นต์ความพูนปรากฏของชิ้นงาน	68
4.14 ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance) ของค่าการดึงของชิ้นงาน	69
4.15 ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance) ของค่าการกดอัดของชิ้นงาน	70

4.16	ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance) ของเปอร์เซ็นต์ความพรุน ปรากฏของชิ้นงาน	71
4.17	แสดงค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีต่อค่าการดึงของชิ้นงาน และค่าการกดอัด ของชิ้นงาน	73
4.18	แสดงผลการทดสอบยืนยันผลในการขึ้นรูปชิ้นงานตามค่าสภาวะที่เหมาะสม	75
4.19	การทดสอบระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าการดึง และค่าการกดอัด จากการทดลองยืนยันผล กับค่าเป้าหมายที่ได้จากสมการทำนาย	76
4.20	ผลการรันโปรแกรมหาค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบค่าการดึง และค่าการกดอัด ของชิ้นงาน เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิในการขึ้นรูปคงที่ 100 องศาเซลเซียส	76
4.21	ผลการรันโปรแกรมหาค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบค่าการดึง และค่าการกดอัด ของชิ้นงาน เมื่อกำหนดให้เวลาในการขึ้นรูปคงที่ 20 นาที	80
4.22	ผลการรันโปรแกรมหาค่าการดึง ค่าการกดอัดของชิ้นงาน และค่าความพึงพอใจโดยรวม เมื่อกำหนดให้เวลาในการขึ้นรูปคงที่ 20 นาที	82
4.23	ผลการรันโปรแกรมความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสำคัญของผลตอบกับค่าผลตอบการดึง การกดอัดของชิ้นงาน และค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ	86
5.1	เปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของกระดูกมนุษย์ชนิดเนื้อแน่นกับ ชิ้นงานขึ้นรูปที่ได้จากการทดลอง	90
ข1	ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม ของค่าการดึงของชิ้นงาน ที่ได้จากการวัดค่าด้วยเครื่อง Universal Testing	101
ข2	ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม ของค่าการกดอัด ของชิ้นงานที่ได้จากการวัดค่าด้วยเครื่อง Universal Testing	102
ข3	ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม ของเปอร์เซ็นต์ความพรุน ปรากฏของชิ้นงานที่ได้จากการหาค่าด้วยเครื่อง Mettler Toledo Density Kit	103
ค1	ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง ของค่าการดึง ของชิ้นงานที่ได้จากการวัดค่าด้วยเครื่อง Universal Testing	107
ค2	ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง ของค่าการกดอัด ของชิ้นงานที่ได้จากการวัดค่าด้วยเครื่อง Universal Testing	108
ค3	ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง ของเปอร์เซ็นต์ ความพรุนปรากฏของชิ้นงานที่ได้จากการหาค่าด้วยเครื่อง Mettler Toledo Density Kit	109
ค4	แสดงผลการทดสอบยืนยันผลในการขึ้นรูปชิ้นงานตามค่าสภาวะที่เหมาะสม	113



ง1 ผลการรันโปรแกรมหาค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบค่าการตั้ง และค่าการกดอัดของ  
ชิ้นงาน เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาและอุณหภูมิในการขึ้นรูป



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved

## สารบัญภาพ

รูป	หน้า
2.1 แสดงค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสของวัสดุสำหรับนำมาใช้เป็นวัสดุร่วมในการใช้งานด้านการแพทย์	6
2.2 แสดงวิธีการขึ้นรูปแบบหล่อ	11
2.3 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึง	12
2.4 การทดสอบแรงอัด	14
2.5 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ	19
2.6 Central Composite Design สำหรับ 3 Factors	21
2.7 ช่องว่างที่ถูกจำกัดของปัจจัยของส่วนผสมที่มี (a) $p = 2$ ส่วนประกอบ (b) $p = 3$ ส่วนประกอบ	21
2.8 การออกแบบโครงตาข่ายซิมเพล็กซ์สำหรับ $p = 3$ และ $p = 4$ ส่วนประกอบ	22
2.9 การออกแบบซิมเพล็กซ์เซ็นทรอยด์ที่มี (a) $p = 3$ ส่วนประกอบ (b) $p = 4$ ส่วนประกอบ	23
2.10 การกำหนดค่าความเป็นสมาชิกของเซตฟuzzyและเซตแบบฟuzzy	25
3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิจัย	29
3.2 (a) กระจกแก้วที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (b) กระจกแก้วที่ผ่านการลดขนาดและร้อนผ่านตะแกรง	30
3.3 แม่พิมพ์สำเร็จที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง CNC	32
3.4 แม่พิมพ์สำเร็จที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง CNC	32
3.5 ชิ้นงานสำเร็จที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการเทหล่อ	37
3.6 ทดสอบแรงดึงชิ้นงานด้วย Universal Tester	38
3.7 ทดสอบแรงกดอัดชิ้นงานด้วย Universal Tester	38
3.8 Mettler Toledo Density Kit สำหรับหาความพรุน	39
3.9 แสดงขั้นตอนการทำงานของฟuzzy	41
3.10 ขั้นตอนการเตรียมผงในการขึ้นรูปกระดูกเทียม	41
3.11 ขั้นตอนการอัดขึ้นรูป	31



4.1	ผลการทดสอบเฟสของไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	44
4.2	กราฟแสดงความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างของผลตอบค่าการดึงของชิ้นงาน	47
4.3	กราฟแสดงความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างของผลตอบค่าการกดอัดของชิ้นงาน	48
4.4	กราฟแสดงความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างของผลตอบเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน	48
4.5	กราฟแสดงส่วนตกค้างกับค่าทำนายของผลตอบค่าการดึงของชิ้นงาน	49
4.6	กราฟแสดงส่วนตกค้างกับค่าทำนายของผลตอบค่าการกดอัดของชิ้นงาน	49
4.7	กราฟแสดงส่วนตกค้างกับค่าทำนายของผลตอบเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน	50
4.8	กราฟแสดงส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองของค่าการดึงของชิ้นงาน	50
4.9	กราฟแสดงส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองของค่าการกดอัดของชิ้นงาน	51
4.10	กราฟแสดงส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองของเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน	51
4.11	แสดงการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย	59
4.12	กราฟแสดงความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างของผลตอบค่าการดึงของชิ้นงาน	62
4.13	กราฟแสดงความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างของผลตอบค่าการกดอัดของชิ้นงาน	62
4.14	กราฟแสดงความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างของผลตอบของเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน	63
4.15	กราฟแสดงส่วนตกค้างกับค่าทำนายของผลตอบค่าการดึงของชิ้นงาน	63
4.16	กราฟแสดงส่วนตกค้างกับค่าทำนายของผลตอบค่าการกดอัดของชิ้นงาน	64
4.17	กราฟแสดงส่วนตกค้างกับค่าทำนายของผลตอบของเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน	64
4.18	กราฟแสดงส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองของค่าการดึงของชิ้นงาน	65
4.19	กราฟแสดงส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองของค่าการกดอัดของชิ้นงาน	65
4.20	กราฟแสดงส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองของเปอร์เซ็นต์ความพรุนปรากฏของชิ้นงาน	66
4.21	แสดงการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย	74
4.22	แสดงค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาและอุณหภูมิในการขึ้นรูป	77

4.23	แสดงค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ เมื่ออุณหภูมิในการขึ้นรูปคงที่ 100 องศาเซลเซียส	79
4.24	แสดงค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ เมื่อเวลาในการขึ้นรูปคงที่ 20 นาที	81
4.25	ผลของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อค่าการดึง และค่าการกดอัดกดอัด เมื่อเวลาในการขึ้นรูปคงที่ 20 นาที	85
4.26	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสำคัญของผลตอบ กับผลตอบค่าการดึง และค่าการกดอัดของชิ้นงาน	87
4.27	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสำคัญของผลตอบ กับค่าความพึงพอใจโดยรวม ของผลตอบ	88
ก1	แม่พิมพ์ที่ใช้สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อการทดสอบแรงดึง ออกแบบด้วยโปรแกรม Solid Work	99
ก2	แม่พิมพ์ที่ใช้สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อการทดสอบแรงอัด ออกแบบด้วยโปรแกรม Solid Work	99