

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ฉ
<b>บทที่ 1</b> <b>บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย	3
<b>บทที่ 2</b> <b>ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1.1 คุณสมบัติของกระดูก	5
2.1.2 วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปกระดูกเทียม	8
2.1.3 เทคนิคที่ใช้ในการขึ้นรูปกระดูกเทียม	11
2.1.4 การออกแบบการทดลอง	16
2.1.5 เทคโนโลยีแม่พิมพ์	20
2.1.6 ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพ	26
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
2.2.1 วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปกระดูกเทียมและวิธีกระบวนการขึ้นรูป	29
2.2.2 การออกแบบการทดลอง	32
<b>บทที่ 3</b> <b>วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>35</b>
3.1 การออกแบบแม่พิมพ์และการเตรียมการทดลอง	36
3.1.1 ศึกษากระบวนการสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกหอย	36

3.1.2	คัดเลือกวัสดุ/รูปแบบแม่พิมพ์และ ศึกษารูปแบบของแม่พิมพ์วัสดุที่ใช้ ทำแม่พิมพ์และทำการสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์	36
3.1.2.1	กระบวนการออกแบบแม่พิมพ์โดยใช้การออกแบบผลิตภัณฑ์	36
3.1.3	ออกแบบแม่พิมพ์เพื่อใช้ในการอัดขึ้นรูปกระดูกเทียม	45
3.1.4	ศึกษาการทำงานของเครื่องอัดขึ้นรูป	45
3.2	การประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสม ของการอัดขึ้นรูป	45
3.2.1	การออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมของการอัดขึ้นรูป	45
3.2.2	วิเคราะห์ผลโดยใช้การทดสอบค่าการกดอัดและค่าการตัดโค้ง ของชิ้นงาน	49
3.2.3	ทดสอบยืนยันผล และ ทดสอบค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน	51
3.2.3.1	วิธีการทดสอบความหนาแน่นโดยรวม และความหนาแน่น ปรากฏ	51
3.2.3.2	วิธีการทดสอบความหนาแน่นจริง	51
3.3	การเตรียมองค์ประกอบในการอัดขึ้นรูปกระดูกเทียมจากผงไฮดรอกซีอะ ปาไทต์	52
3.3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	52
3.3.2	การอัดขึ้นรูป	54
บทที่ 4	ผลการศึกษาวิจัย	56
4.1	การออกแบบแม่พิมพ์และเตรียมการทดลอง	56
4.1.1	ศึกษารูปแบบของแม่พิมพ์ วัสดุแม่พิมพ์ ในการอัดขึ้นรูป	56
4.1.2	ออกแบบและสร้างแม่พิมพ์เพื่อใช้ในการกดอัดขึ้นรูป	60
4.2	ผลการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสม ต่อการขึ้นรูปชิ้นงาน	63
4.2.1	ผลการออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการอัดขึ้นรูป	63
4.2.2	ผลการวิเคราะห์โดยใช้การทดสอบค่าการกดอัด และค่าการตัดโค้งของชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัดขึ้นรูป	64
4.2.2.1	การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์	67
4.2.2.2	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	69

ลิขสิทธิ์ในหนังสือสงวนลิขสิทธิ์ของใหม่  
Copyright © by Chiang Mai University  
All rights reserved

4.2.2.3 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินค้า		
ของค่าการกดอัดของชิ้นงานและค่าการตัดโค้งของชิ้นงาน	74	
4.2.2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน	75	
4.2.2.5 สร้างสมการทำนาย	77	
4.2.2.6 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการกดอัดของ		
ชิ้นงานและค่าการตัดโค้งของชิ้นงาน	78	
4.2.2.7 สร้างพื้นผิวผลตอบ	82	
4.2.3 ผลการทดสอบยืนยัน	85	
4.2.4 ทดสอบค่าความหนาแน่น	86	
บทที่ 5	สรุปและอภิปรายผลการวิจัย	89
5.1	สรุปผลการวิจัย	89
5.2	ข้อเสนอแนะ	90
บรรณานุกรม		92
ภาคผนวก		95
ภาคผนวก ก	ปัจจัยค่าการทดลองการอัดขึ้นรูป และผลลัพธ์ค่าการกดอัดของ	
	ชิ้นงานและการตัดโค้งของชิ้นงานที่ได้จากการวัดค่าด้วยเครื่อง	
	Universal Testing Machine และปัจจัยค่าที่เหมาะสมในการอัด	
	ขึ้นรูป และผลลัพธ์ค่าความหนาแน่น โดยรวม ค่าความหนาแน่น	
	ปรากฏ และค่าความหนาแน่นจริง	96
ภาคผนวก ข	แบบแม่พิมพ์ออกแบบด้วยโปรแกรม AutoCAD	102
ภาคผนวก ค	รหัสโปรแกรม NC – Coding ในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ด้วยเครื่องกัด	
	CNC (Computer Numerical Control)	106
ภาคผนวก ง	ผลลัพธ์ค่าความสึกหรอของแม่พิมพ์หลังจากทำการทดลอง	
	กดอัดขึ้นรูปชิ้นงานทุก ๆ 5 การทดลองที่ได้จากการวัดค่า	
	ด้วยเครื่องมือวัดละเอียด	110
ประวัติผู้เขียน		112

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 รูปแบบการอัดขึ้นรูปทิศทางเดียวแบบต่างๆ	13
3.1 วัสดุและรูปแบบของแม่พิมพ์ที่ทำการสร้างแม่พิมพ์	40
3.2 แนวความคิด Concept Combination แบบ A	42
3.3 แนวความคิด Concept Combination แบบ B	42
3.4 แนวความคิด Concept Combination แบบ C	42
3.5 สัญลักษณ์ในการให้ความสำคัญ (Concept Screening) ของแต่ละแบบ	43
3.6 การให้น้ำหนักความสำคัญของแต่ละ Criteria เลือกที่จะไปพัฒนา	44
3.7 ปัจจัย ระดับขอบเขต และสัญลักษณ์สำหรับการอัดขึ้นรูป	46
3.8 รูปแบบและลำดับขั้นการออกแบบการทดลองในการทดลอง	48
4.1 แสดงค่าของระดับของปัจจัย และสัญลักษณ์ สำหรับการอัดขึ้นรูป	63
4.2 แสดงผลการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Central Composite Design (CCD)	64
4.3 ผลการทดลองส่วนประสมกลาง (CCD) ในแต่ละเงื่อนไขในการทดลอง	65
4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของค่าการกดอัดของชิ้นงาน	67
4.5 ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance) ของค่าการกดอัดของชิ้นงาน	68
4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของค่าการตัดโค้งของชิ้นงาน	68
4.7 ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance) ของค่าการตัดโค้งของชิ้นงาน	69
4.8 ผลสรุปของแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบแต่ละตัว	69
4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) ของค่าการกดอัดของชิ้นงาน	76
4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) ของค่าการตัดโค้งของชิ้นงาน	76
4.11 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการกดอัดของชิ้นงาน	78
4.12 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการตัดโค้งของชิ้นงาน	79
4.13 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการกดอัดของชิ้นงานและค่าความ การตัดโค้งของชิ้นงาน	81
4.14 แสดงผลการทดสอบยืนยันผลในการกดอัดขึ้นรูปชิ้นงานตามค่าสถานะที่เหมาะสม	85
4.15 แสดงค่าความหนาแน่นโดยรวมของชิ้นงาน	86
4.16 แสดงค่าความหนาแน่นปรากฏของชิ้นงาน	87
4.17 แสดงค่าความหนาแน่นจริงของชิ้นงาน	88

4.18	ค่าปริมาตรรูปทรงเปิด ปริมาตรรูปทรงปิด และปริมาตรรูปทรงรวม	88
5.1	ค่าปัจจัยที่เหมาะสมในการอัดขึ้นรูปได้ค่าผลลัพธ์ของชิ้นงานจากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพ	90
5.2	การทดสอบคุณสมบัติความแข็งแรงของกระดูกด้วยการทดสอบแบบต่างๆ	91



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved

## สารบัญภาพ

รูป	หน้า
1.1 ชิ้นงานไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่มีขนาดรูพรุนเล็ก	2
2.1 แสดงองค์ประกอบของกระดูก	6
2.2 โครงสร้างของกระดูก	6
2.3 การอัดแบบทิศทางเดียว	11
2.4 การอัดแบบกดครั้งเดียว (Single Action )	12
2.5 การอัดแบบกดสองครั้ง (Double Action)	12
2.6 แสดงพฤติกรรมการขึ้นเตอร้แบบสถานะของแข็งต่างๆ ไปในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผา	15
2.7 โครงสร้างจุลภาคที่เกิดจากการขึ้นเตอร้แบบสถานะของแข็ง	16
2.8 ขั้นตอนวิธีการของวิธีการพื้นผิวผลตอบและวิธีการพื้นผิวผลตอบแบบต่างๆ	19
2.9 แสดงลำดับขั้นตอนการสร้างแม่พิมพ์	23
2.10 ลักษณะของแรงที่เกิดจากการทดสอบการกดอัด	27
2.11 การทดสอบการดัดโค้งของวัสดุ (Bending)	28
3.1 ภาพรวมของกรอบงานวิจัย	35
3.2 ภาพรวมหลักการเลือกวัสดุและรูปแบบแม่พิมพ์	41
3.3 เครื่อง Universal Testing Machine สำหรับวิเคราะห์ค่าการกดอัดและค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน	41
3.4 วิธีการทดสอบการกดอัดของชิ้นงาน	50
3.5 วิธีการทดสอบการดัดโค้งของชิ้นงาน	51
3.6 เครื่องกดอัดขึ้นรูปไฮดรอลิกเพลส (Hydraulic Press)	52
3.7 ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ได้จากการสังเคราะห์จากเปลือกหอย	52
3.8 สารพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol: PVA)	53
3.9 ชุดแม่พิมพ์สำหรับการอัดขึ้นรูป (Press Forming Mould)	53
3.10 ขั้นตอนการเตรียมผงในการขึ้นรูปกระดูกเทียม	54
3.11 ขั้นตอนการอัดขึ้นรูป	55
4.1 แบบภาพประกอบแยกชิ้นชุดแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป	57
4.2 แบบภาพประกอบชุดแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป	57

4.3	แบบแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch Upper)	58
4.4	แบบแม่พิมพ์ (Die)	58
4.5	แบบแม่พิมพ์ตัวเมีย (Lower Plate)	59
4.6	แบบน็อต	59
4.7	ชิ้นส่วนต่าง ๆ ของชุดแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปกระดูกเทียมจากผงไฮดรอกซีอะพาไทต์	60
4.8	แม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch Upper)	60
4.9	แม่พิมพ์ (Die)	61
4.10	แม่พิมพ์ตัวเมีย (Lower Plate)	61
4.11	น็อต (Nut)	62
4.12	กราฟแสดงความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกล้า้งในการหาค่าที่เหมาะสมของค่าการกดอัดของชิ้นงาน	70
4.13	กราฟแสดงความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกล้า้งในการหาค่าที่เหมาะสมของค่าการตัด โคน้่งของชิ้นงาน	70
4.14	การพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกล้า้งกับค่าที่ถูกทำนาย ในการหาค่าที่เหมาะสมของค่าการกดอัดของชิ้นงาน	71
4.15	การพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกล้า้งกับค่าที่ถูกทำนาย ในการหาค่าที่เหมาะสมของค่าการตัด โคน้่งของชิ้นงาน	71
4.16	การพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกล้า้งกับลำดับการทดลองของค่าการกดอัดของชิ้นงาน	72
4.17	การพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกล้า้งกับลำดับการทดลองของค่าตัด โคน้่งของชิ้นงาน	72
4.18	กราฟแสดงการวิเคราะห์ส่วนตกล้า้งของข้อมูลผลตอบด้านค่าการกดอัดของชิ้นงาน	73
4.19	กราฟแสดงการวิเคราะห์ส่วนตกล้า้งของข้อมูลผลตอบด้านค่าการตัด โคน้่งของชิ้นงาน	73
4.20	กราฟแสดงจุดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย	82
4.21	กราฟโครงร่างระหว่างอัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA ที่ใช้ในการอัดและความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป	82
4.22	พื้นผิวผลตอบระหว่างอัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA ที่ใช้ในการอัดและความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป	83
4.23	กราฟโครงร่างระหว่างอัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA ที่ใช้ในการอัดและความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป	83
4.24	พื้นผิวผลตอบระหว่างอัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA ที่ใช้ในการอัดและความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป	83



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved