

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ .....	1
1.2 จุดประสงค์ของโครงการ .....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ .....	2
1.4 ตัวแปรที่ศึกษาของการขึ้นรูปลึก.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 นิยามศัพท์สำคัญ.....	4
2.2 ทฤษฎีที่สำคัญของการขึ้นรูปลึก .....	5
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
3 วิธีการดำเนินงาน .....	36
3.1 แผนการดำเนินโครงการ .....	36
3.2 วัสดุที่นำมาใช้ในการทดลองการขึ้นรูปลึก .....	37
3.3 การออกแบบคานและฟันซ์ .....	41
3.4 กำหนดตัวแปรทดสอบ .....	42
3.5 สารหล่อลื่น(Lubricant) ใช้ทดสอบ .....	45
3.6 ครอว์บีคชนิดเดี่ยว (Draw Bead Single) .....	45
3.7 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล.....	46

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล .....	49
4.1 ผลการทดสอบด้วยชนิดรูปร่างของแผ่นเปล่า .....	49
4.2 ผลการทดสอบด้วยแรงกดชิ้นงาน .....	56
4.3 ผลการทดสอบด้วยชนิดรอร์วีด .....	72
4.4 การวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรการขึ้นรูปจากโปรแกรมทางสถิติMinitab.....	74
5 สรุปผลการทดลอง.....	78
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	78
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	81
บรรณานุกรม .....	82
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก การคำนวณ .....	84
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลอง.....	94
ภาคผนวก ค การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM.....	102
ประวัติผู้เขียน.....	106

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	17
2.2	20
2.3	29
2.4	29
2.5	32
3.1	39
3.2	40
4.1	49
4.2	57
4.3	58
4.4	60
4.5	63
4.6	66
4.7	68
4.8	71
4.9	72
4.10	75

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การแบ่งประเภทกลุ่มของการขึ้นรูป .....	5
2.2 การขึ้นรูปลึกด้วยทรงกระบอก .....	6
2.3 ชิ้นงานขึ้นรูปทรงกระบอกสี่เหลี่ยม .....	6
2.4 ตัวอย่างของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบไม่สมมาตรและพื้นที่เกิดความบกพร่อง.....	7
2.5 ขั้นตอนในกระบวนการขึ้นรูปลึกละเอียด .....	7
2.6 การตัดงอที่จุดเริ่มต้นของขบวนการ .....	8
2.7 ลักษณะอาการเริ่มต้นของการลากขึ้นรูปโดยการทำให้ตรง .....	9
2.8 แรงที่ใช้เพื่อเอาชนะความเสียดทาน .....	10
2.9 การบีบหรืออัดตัวของโลหะระหว่างการลากขึ้นรูป.....	11
2.10 ลักษณะของแรงต่างๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปลึกละเอียด.....	11
2.11 สภาวะความเค้นที่เกิดระหว่างกระบวนการลากขึ้นรูปลึกละเอียด .....	11
2.12 ขั้นตอนสุดท้ายของการลากขึ้นรูป.....	12
2.13 ผลที่เกิดขึ้นจากแรงดึงที่ผนังของถ้วย .....	13
2.14 การยืดขึ้นรูปถ้วยกันโค้ง ณ จุดเริ่มต้นของการลากขึ้นรูป.....	14
2.15 ค่าแรงดันของแผ่นจับยึดชิ้นงานที่ต้องการในการลากขึ้นรูปครั้งแรก.....	16
2.16 ตัวอย่างการเกิดความเสียหายบนชิ้นงานขึ้นรูปลึกละเอียด .....	18
2.17 การกระจายความเครียดสำหรับผลของค่า $n$ ที่แตกต่างกันในบริเวณวิกฤต .....	24
2.18 การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นและช่วงพลาสติก.....	26
2.19 ผลการทดสอบกับความกว้างโลหะแผ่นขนาดต่างๆ.....	27
2.20 กราฟของการดึงของวัสดุ.....	27
2.21 แบบชนิดของ Bead ปลายมน โค้ง.....	30
2.22 แบบชนิดของ Bead สี่เหลี่ยม .....	30
2.23 แบบสามเหลี่ยมและแบบไม่ไหลตัว .....	31
3.1 ไคอะกรมวิธีดำเนินโครงการวิจัย .....	37
3.2 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile test) .....	38
3.3 ชิ้นงานทดสอบส่วนผสมทางเคมี.....	39

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.4	ออกแบบขนาดและรูปร่างของชิ้นงานในรูปทรงไม่สมมาตรซึ่งได้ค่าความเครียดที่แตกต่างกัน ..... 41
3.5	แผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้า..... 42
3.6	แผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้าบากมุม ..... 43
3.7	แผ่นตัดเปล่าคำนวณ โดยการประมาณค่า..... 43
3.8	การขึ้นรูปชิ้นงานในขณะเกิดการเปลี่ยนรูป..... 44
3.9	ประกอบคายและพันชั้นบนแทนเครื่องปั๊มไฮดรอลิกในการขึ้นรูปชิ้นงาน ..... 45
3.10	แผ่นกดชิ้นงานที่ไม่ใช้ดรอว์บีด ..... 46
3.11	ดรอว์บีดชนิดส่วน โคงค์ครึ่งวงกลม (Insert in Blank Holder)..... 46
3.12	อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Mini Data Logger) ..... 47
3.13	อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน (Pressure Transducer)..... 47
3.14	จุดที่ใช้ในการตรวจสอบวัดความหนาบนชิ้นงาน ..... 47
3.15	อุปกรณ์วัดความหนาผิวชิ้นงาน ..... 48
4.1	แผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้า..... 50
4.2	ชิ้นงานสำเร็จจากการขึ้นรูปของแผ่นเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อวิเคราะห์ผล..... 50
4.3	แรงกดขึ้นรูปของแผ่นเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้า..... 51
4.4	แผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมชนิดบากมุม ..... 51
4.5	ชิ้นงานสำเร็จจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมชนิดบากมุมทั้งสี่ด้านเพื่อวิเคราะห์ผล 52
4.6	แรงกดขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมชนิดบากมุม..... 52
4.7	แผ่นตัดเปล่าคำนวณ โดยการประมาณค่า..... 53
4.8	ชิ้นงานสำเร็จจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าคำนวณ โดยการประมาณค่าเพื่อวิเคราะห์ผล.. 53
4.9	แรงกดขึ้นรูปของแผ่นเปล่าคำนวณ โดยการประมาณค่า..... 54
4.10	การเปรียบเทียบแรงกดขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าทั้ง 3 ชนิด ..... 55
4.11	การเปรียบเทียบความหนาของผนังชิ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่าที่แรงกดชิ้นงาน ( Blank Holder Force ) เท่ากับ 49.69 kN ..... 56
4.12	การเปรียบเทียบแรงกดที่ชิ้นงานที่ 20%,40%,60%และ 80%ของแผ่นตัดเปล่าสี่เหลี่ยมผืนผ้า..... 57

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.13 การเปรียบเทียบความหนาของผนังชิ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่า .....	59
4.14 การเปรียบเทียบแรงกดที่ชิ้นงานที่ 20%,40%,60%และ 80%ของแผ่นตัดเปล่า .....	60
4.15 การเปรียบเทียบความหนาของผนังชิ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่า .....	61
4.16 การเปรียบเทียบแรงกดที่ชิ้นงานที่ 20%,40%,60%และ 80%ของแผ่นตัด.....	62
4.17 การเปรียบเทียบความหนาของผนังชิ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่า .....	64
4.18 รูปร่างและตำแหน่งของดรอว์บีดที่ใช้ในการทดสอบ.....	65
4.19 การเปรียบเทียบแรงกดที่ชิ้นงานที่ 20%,40%,60%และ 80%ของแผ่นตัดเปล่า .....	65
4.20 การเปรียบเทียบความหนาของผนังชิ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่า .....	67
4.21 การเปรียบเทียบแรงกดที่ชิ้นงานที่ 20%,40%,60%และ 80%ของแผ่นตัดเปล่า .....	68
4.22 การเปรียบเทียบความหนาของผนังชิ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่า .....	69
4.23 การเปรียบเทียบแรงกดที่ชิ้นงานที่ 20%,40%,60%และ 80%ของแผ่นตัดเปล่า .....	70
4.24 การเปรียบเทียบความหนาของผนังชิ้นงานจากการขึ้นรูปของแผ่นตัดเปล่า .....	72
4.25 อิทธิพลของดรอว์บีดที่ปัจจัยทดสอบ แรงกดชิ้นงาน 40% ของแผ่นตัดเปล่า.....	73
4.26 อิทธิพลของดรอว์บีดที่ปัจจัยทดสอบ ความหนาของผนังชิ้นงานแผ่นตัดเปล่าจากการคำนวณ	74
4.27 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่ได้จาก โปรแกรม Minitab .....	75
4.28 กราฟข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าเฉลี่ยความหนาของผนังชิ้นงาน .....	76
4.29 ผลการวิเคราะห์ความแม่นยำของ Interaction Plot ที่มีผลต่อความหนาของผนังชิ้นงาน	76

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$A_{BH}$	พื้นที่สัมผัสของแผ่นจับยึดชิ้นงาน
$BHF$	แรงกดของแผ่นกดงาน (Blank holder force)
$\beta$	อัตราส่วนการขึ้นรูป
$\beta_n$	อัตราส่วนขึ้นรูปโดยจำนวนครั้ง
$C$	ค่าคงที่
$\{d\}$	ฟังก์ชันการกระจัด (m)
$d_0$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นชิ้นงาน
$d_1$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่
$F_{BH}$	แรงกดยึดแผ่นชิ้นงาน
$F_d$	แรงขึ้นรูป(N)
$\{F\}$	แรงทั้งหมดที่กระทำต่อเอลิเมนต์ (kN)
$[K]$	สทิฟเนสเมทริกซ์
$Lt$	ความยาวรอบรูปทั้งหมด (mm)
$m$	ความไวของอัตราความเครียด
$n$	เลขชี้กำลังทำให้แข็งของความเครียด
$P_{BH}$	แรงกดดันที่ใช้กับแผ่นจับยึดชิ้นงานต่ำที่สุด
$r$	อัตราส่วนความเครียดพลาสติก
$\Delta r$	แอนไอโซทรอปีระนาบ
$r_m$	แอนไอโซทรอปีตั้งฉาก
$r_0$	แอนไอโซทรอปีตามแนวทิศทางการรีด
$r_{45}$	แอนไอโซทรอปีทำมุม 45 องศา กับแนวทิศทางการรีด
$r_{90}$	แอนไอโซทรอปีทำมุม 90 องศา กับแนวทิศทางการรีด
$S_0$	ความหนาของวัสดุ (mm)
$S_u$	ความเค้นสูงสุด (N/mm <sup>2</sup> )
$S_y$	ความเค้นจุดคราก (N/mm <sup>2</sup> )