

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ณ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 จุดประสงค์ของโครงการ	3
1.3 ขอบเขตโครงการ	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง/ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 แนวความคิด	5
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	42
บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน	45
3.1 แผนการดำเนินงาน	45
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน	45
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน	66
4.1 ผลการทดสอบ	66
4.2 วิเคราะห์การทดลอง	90
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	96
5.1 สรุปผลการทดลอง	96
5.2 ข้อเสนอแนะ	98

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	100
ภาคผนวก ก	102
ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางเคมี	103
ภาคผนวก ข	109
ภาพรวม โครงสร้างจุลภาคของทองเหลืองก่อนขึ้นรูปที่กำลังขยาย 500 เท่า	110
ภาคผนวก ค	111
ภาพรวม โครงสร้างจุลภาคของทองเหลืองหลังขึ้นรูปที่กำลังขยาย 500 เท่า	112
ภาคผนวก ง	139
ผลการทดลองวัดขนาดเกรนก่อนการขึ้นรูปที่กำลังขยาย 500 เท่า	140
ภาคผนวก จ	143
ผลการทดลองวัดขนาดเกรนหลังการขึ้นรูปที่กำลังขยาย 500 เท่า	144
ภาคผนวก ฉ	171
ข้อมูลการทดลอง	172
ภาคผนวก ช	183
การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ (IE Network Conference 2013)	

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณลักษณะทั่วไป (General Characteristics) ของเหล็ก JIS SKD 11 หรือเหล็ก DIN 1.2379	14
2.2	เรซินที่ใช้ในการเทหุ้มยึดชิ้นทดสอบที่สำคัญ	35
2.3	อัตราส่วนผสมของกรดที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM [10]	39
2.4	การกำหนดขนาดความโตของเม็ดเกรนตาม ASTM และจำนวนเม็ดเกรนต่อ mm^2	41
3.1	องค์ประกอบทางเคมีของแผ่นทองเหลืองที่ใช้ในการทดสอบ	46
3.2	คุณสมบัติทางกลของแผ่นทองเหลืองที่ใช้ในการทดสอบ	47
3.3	ตารางการใช้ปัจจัยการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา	51
3.4	ตารางการใช้ปัจจัยการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา	52
3.5	ตารางการใช้ปัจจัยการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา	52
4.1	ผลการทดสอบการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา	69
4.2	ผลการทดสอบการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา	70
4.3	ผลการทดสอบการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา	71
4.4	ผลการทดสอบวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยใช้แผ่นไมล่าที่มุม 30 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)	72
4.5	ผลการทดสอบวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป จุดที่ 2 โดยใช้โปรแกรมที่มุม 30 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)	73
4.6	ผลการทดสอบวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยใช้แผ่นไมล่าที่มุม 40 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)	76
4.7	ผลการทดสอบวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป จุดที่ 2 โดยใช้โปรแกรมที่มุม 40 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)	77

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.8	ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยใช้แผ่นไม้อัดที่มุ่ม 50 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)	80
4.9	ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป จุดที่ 2 โดยใช้โปรแกรม ที่มุ่ม 50 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)	81
4.10	ผลการทดลองวัดขนาดของเกรนในสภาพจำหน่าย ก่อนการขึ้นรูป	83
4.11	ผลการทดลองวัดขนาดของเกรนหลังการขึ้นรูป ที่มุ่ม 30 องศา	85
4.12	ผลการทดลองวัดขนาดของเกรนหลังการขึ้นรูป ที่มุ่ม 40 องศา	86
4.13	ผลการทดลองวัดขนาดของเกรนหลังการขึ้นรูป ที่มุ่ม 50 องศา	88
ฉ.1	ผลการทดลองการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุ่ม 30 องศา	172
ฉ.2	ผลการทดลองการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุ่ม 40 องศา	174
ฉ.3	ผลการทดลองการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุ่ม 50 องศา	173
ฉ.4	ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยใช้แผ่นไม้อัดที่มุ่ม 30 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)	174
ฉ.5	ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป จุดที่ 2 โดยใช้โปรแกรมที่มุ่ม 30 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)	175
ฉ.6	ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยใช้แผ่นไม้อัดที่มุ่ม 40 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)	176
ฉ.7	ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป จุดที่ 2 โดยใช้โปรแกรมที่มุ่ม 40 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)	177
ฉ.8	ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยใช้แผ่นไม้อัดที่มุ่ม 50 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)	178
ฉ.9	ผลการทดลองวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป จุดที่ 2 โดยใช้โปรแกรม ที่มุ่ม 50 องศา (อัตราความเครียดหลัก %)	179

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ฉ.10	อัตราความเครียด (%)	180
ฉ.11	อัตราความเครียด (%)	181
ฉ.12	อัตราความเครียด (%)	182

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด	2
2.1	ลักษณะการทำงานของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด	6
2.2	กระบวนการกดขึ้นรูป	7
2.3	กระบวนการขึ้นรูปด้วยแสงเลเซอร์	7
2.4	กระบวนการขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยการปั้นขึ้นรูป	8
2.5	กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่อง	9
2.6	กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด	10
2.7	กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบมีทูลเคลื่อนที่รองรับ	10
2.8	กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด (แม่พิมพ์เฉพาะส่วน)	11
2.9	กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุดแบบแม่พิมพ์เต็ม	12
2.10	แนวคิดพื้นฐานในการดึงขึ้นรูปลึก	15
2.11	กลไกการดึงขึ้นรูปลึก	16
2.12	การดึงขึ้นรูป และการดึงขึ้นรูปซ้ำ เมื่อค่า $r > 50\%$	17
2.13	แรงที่เกิดขึ้นระหว่างการงอขึ้นรูป	18
2.14	ความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ของการงอ	19
2.15	ตำแหน่งของเส้นแกนกลาง	20
2.16	การไหลของโลหะและการบิดงอ	21
2.17	การทดสอบการดึง	22
2.18	แรงดึง (Tensile)	23
2.19	แรงกด (Compression)	24
2.20	แรงเฉือน (Shear)	24
2.21	ความเค้นความเครียดของการดึงวัสดุ	25
2.22	ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain)	26
2.23	ความเครียดเฉือน (Shear Strain)	27
2.24	เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)	28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.25	ลักษณะตารางวงกลมกรีดบน โลหะแผ่น	29
2.26	การวัดอัตรา เบอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและอัตราเบอร์เซ็นต์ความเครียดรอง โดยค่าที่ได้จากการ คำนวณจะถูกนำเสนอในรูปแบบของแผนภาพขีดจำกัด การขึ้นรูป	30
2.27	ตัวอย่างแผนภาพแสดงขีดจำกัดการขึ้นรูป	31
2.28	การเปลี่ยนแปลงของกริดวงกลม	31
2.29	ขนาดขึ้นทดสอบ โครงสร้างจุลภาค	34
2.30	การเทรซินหุ้มขึ้นทดสอบ	34
2.31	การจัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายสองเบอร์สุดท้าย	35
2.32	การใส่สารขัดบนผ้าสักหลาด	36
2.33	หลักการฉายแสงและการมองในกล้องจุลทรรศน์	37
2.34	แสดงลำแสงที่ฉายในกล้องจุลทรรศน์ตามหลักรูปที่	37
2.35	การกัดตำแหน่งขอบเม็ดเกรน	38
2.36	กรดกัดตำแหน่งผิวหน้าเม็ดเกรน	38
2.37	การหาขนาดความโตเม็ดเกรน	40
2.38	การหาขนาดความโตเม็ดเกรนตามเบอร์ของ	42
3.1	ชิ้นงานแผ่นทองเหลือง	46
3.2	อุปกรณ์สำหรับจับยึดแผ่น โลหะ	48
3.3	อุปกรณ์สำหรับจับยึดแผ่น โลหะ	48
3.4	แผ่นทองเหลืองที่ผ่านการ ตีกริดวงกลมที่ใช้กรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้า	49
3.5	กระบวนการกรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้า	50
3.6	แสดงมุม , เส้นทางการเดิน และ ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป	51
3.7	เครื่องกัด CNC แนวตั้งแบบ 3 แกน รุ่น ARROW 500	53
3.8	บริเวณทำการวัดความเครียดชิ้นงานทั้งหมด	53
3.9	กล้องถ่ายภาพความละเอียดสูง	54
3.10	โปรแกรมสำหรับใช้ในการวัดขนาด	54
3.11	รูปการกำหนดขนาดอ้างอิงของกริดมาตรฐาน	55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.12	รูปการสร้างเส้นอ้างอิงในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอน	55
3.13	การวัดอัตรา เปอร์เซ็นต์ความเครียดและอัตรา เปอร์เซ็นต์ความเครียดรอง	56
3.14	แผ่นไมล่า(Myla tape or Strain Tape) วัดความเครียด	57
3.15	รูปตำแหน่งการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา	58
3.16	รูปตำแหน่งการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา	58
3.17	รูปตำแหน่งการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา	58
3.18	กระบวนการตัดผ้าชิ้นงาน	59
3.19	รูปตำแหน่งการวัดขนาดเกรนตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา	59
3.20	รูปตำแหน่งการวัดขนาดเกรนตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา	59
3.21	รูปตำแหน่งการวัดขนาดเกรนตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา	60
3.22	กระบวนการเตรียมชิ้นงานหล่อซิลิโคน	60
3.23	กระบวนการเตรียมชิ้นงานหล่อเรซิน	61
3.24	เครื่องขัดที่ใช้ในการขัดผิว	61
3.25	รูปกรด $H_2O + HCL + FeCl_2$	62
3.26	กล้อง Microscope ZEISS รุ่น AXIOVERT 200M MAT	62
3.27	ภาพโปรแกรมที่ใช้วัดขนาดเกรน	63
3.28	รูปการเลือกใช้โปรแกรมวัดขนาด	63
3.29	รูปการเลือกภาพถ่ายเพื่อวัดขนาด	64
3.30	รูปการเลือกจุดตัดที่ขอบเกรนเพื่อวัดขนาด	64
3.31	รูปการทำ Report และบันทึกข้อมูล	65
3.32	รูปแบบฟอร์มอมข้อมูล	65
4.1	รูปลักษณะการขึ้นรูปเพื่อความเครียดผิวที่ มุม 30,40 และ 50 องศา	67
4.2	รูปลักษณะของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานก่อนลากขึ้นรูปและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ้วยที่ลากขึ้นรูปแล้ว	67
4.3	รูปตำแหน่งการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา	69
4.4	กราฟแสดงความหนาตามตำแหน่งที่กำหนดด้วยการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา	69
4.5	รูปตำแหน่งการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.6	กราฟแสดงความหนาตามตำแหน่งที่กำหนดด้วยการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา	71
4.7	รูปตำแหน่งการวัดความหนาตามภาคตัดขวางของการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา	71
4.8	กราฟแสดงความหนาตามตำแหน่งที่กำหนดด้วยการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา	72
4.9	รูปบริเวณการวัดขนาดของกริดวงกลมที่เปลี่ยนแปลงในการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา	74
4.10	กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลค่าความเครียดหลักของการใช้แผ่น ไม้ล่าและโปรแกรมที่มุม 30 องศา (จุดที่ 2)	75
4.11	กราฟอัตราความเครียดในกระบวนการขึ้นรูปที่มุม 30 องศา	76
4.12	รูปบริเวณการวัดขนาดของกริดวงกลมที่เปลี่ยนแปลงในการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา	78
4.13	กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลค่าความเครียดหลักของการใช้แผ่น ไม้ล่าและโปรแกรมที่มุม 40 องศา (จุดที่ 2)	78
4.14	กราฟอัตราความเครียดในกระบวนการขึ้นรูปที่มุม 40 องศา	79
4.15	รูปบริเวณการวัดขนาดของกริดวงกลมที่เปลี่ยนแปลงในการขึ้นรูปที่มุม 50 องศา	81
4.16	กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลค่าความเครียดหลักของการใช้แผ่น ไม้ล่าและโปรแกรมที่มุม 50 องศา (จุดที่ 2)	82
4.17	กราฟอัตราความเครียดในกระบวนการขึ้นรูปที่ มุม 50 องศา	83
4.18	รูปกราฟขนาดเกรนแผ่นทองเหลืองก่อนการขึ้นรูป	84
4.19	รูปกราฟขนาดเกรนแผ่นทองเหลืองหลังการขึ้นรูป ที่มุม 30 องศา	85
4.20	รูปการเปรียบเทียบ โครงสร้างทองเหลือง ที่มุม 30 องศา กำลังขยาย 500X	86
4.21	รูปกราฟขนาดเกรนแผ่นทองเหลืองหลังการขึ้นรูป ที่มุม 40 องศา	87
4.22	รูปการเปรียบเทียบ โครงสร้างทองเหลือง ที่มุม 40 องศา กำลังขยาย 500X	88
4.23	รูปกราฟขนาดเกรนแผ่นทองเหลืองหลังการขึ้นรูป ที่มุม 50 องศา	89
4.24	รูปการเปรียบเทียบ โครงสร้างทองเหลือง ที่มุม 50 องศา กำลังขยาย 500X	89
4.25	อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นจากปัจจัย ต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป จุดที่ 1	91
4.26	อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นจากปัจจัย ต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป จุดที่ 2	91

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.27	อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นจากปัจจัย ต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป จุดที่ 3	92
4.28	กราฟอัตราความเครียดเทียบเท่าที่เกิดขึ้นจากปัจจัย ต่างๆในการขึ้นรูป จุดที่ 2	93
4.29	กราฟอัตราการยืดตัวของเกรนที่เกิดขึ้นจากปัจจัย ต่างๆในการขึ้นรูป	95
ก.1	ผลการทดลองคุณสมบัติทางกลและทางเคมีของแผ่นทองเหลืองที่นำมาทำการทดลอง	108
ข.1	ภาพเกรนทองเหลืองก่อนขึ้นรูป ที่มุม 30 องศา	110
ข.2	ภาพเกรนทองเหลืองก่อนขึ้นรูป ที่มุม 40 องศา	110
ข.3	ภาพเกรนทองเหลืองก่อนขึ้นรูป ที่มุม 50 องศา	110
ค.1	ภาพรวมโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่าหลังการขึ้นรูป ที่มุม 30 องศา	120
ค.2	ภาพรวมโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่าหลังการขึ้นรูป ที่มุม 40 องศา	129
ค.3	ภาพรวมโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่าหลังการขึ้นรูป ที่มุม 50 องศา	138
ง.1	ผลการทดลองวัดขนาดเกรนก่อนการขึ้นรูปที่กำลังขยาย 500 เท่า ที่มุม 30 องศา	140
ง.2	ผลการทดลองวัดขนาดเกรนก่อนการขึ้นรูปที่กำลังขยาย 500 เท่า ที่มุม 40 องศา	141
ง.3	ผลการทดลองวัดขนาดเกรนก่อนการขึ้นรูปที่กำลังขยาย 500 เท่า ที่มุม 50 องศา	142
จ.1	ผลการทดลองวัดขนาดเกรนหลังการขึ้นรูปที่กำลังขยาย 500 เท่า ที่มุม 30 องศา	152
จ.2	ผลการทดลองวัดขนาดเกรนหลังการขึ้นรูปที่กำลังขยาย 500 เท่า ที่มุม 40 องศา	161
จ.3	ผลการทดลองวัดขนาดเกรนหลังการขึ้นรูปที่กำลังขยาย 500 เท่า ที่มุม 50 องศา	170

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

σ	ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็นปาสกาล (Pa, 1 Pa = 1N/m ²) หรือ kgf/mm ²
P	แรงภายนอกที่มากระทำ มีหน่วยเป็น N หรือ kgf หรือ
A	พื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำ : m ² หรือ mm ² หรือ
AISI	American Iron and Steel Institute
AS	Austrian Standards
ASM	American Society for Metals
ASTM	American Society of Testing Materials
e	ความเครียดเชิงเส้น
ΔL	ความยาวที่เปลี่ยนไป ($L - L_0$)
L_0	ความยาวเดิมของวัสดุที่สนใจ หรือ Gage Length
γ	$\tan \theta \approx \theta$ (Radian ในกรณีที่เป็นมุมเล็ก)
a	ระยะที่เคลื่อนที่ไป (Displacement)
h	ระยะห่างระหว่างระนาบ
θ	มุมที่เปลี่ยนไป
l ₀	ความยาวแกนหลักเดิม
l _f	ความยาวแกนหลักที่เปลี่ยนไป
w ₀	ความยาวแกนหลักเดิม
w _f	ความยาวรองหลักที่เปลี่ยนไป
n	จำนวนของเม็ดเกรน
V	กำลังขยาย (เท่า)
mm ²	ตารางมิลลิเมตร
σ_y	ความเค้นจุดคราก
ϵ_y	ความเครียดที่ตำแหน่งของจุดคราก