รายงานการวิจัย

การศึกษาอิทธิพลของโลหะแผ่นผสมในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก

The Influence of the Alloy Sheet Metal on Hydrodynamic Deep Drawing Process

ผศ.มนตรี น่วมจิตร์ หัวหน้าโครงการ

นายพันธุ์พงษ์ คงพันธุ์ ผู้ร่วมวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

งบประมาณประจำปี พ.ศ. 2556

รายงานการวิจัย

การศึกษาอิทธิพลของโลหะแผ่นผสมในกระบวนการลากขึ้นรูปลึก ด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก

ผศ.มนตรี น่วมจิตร์ หัวหน้าโครงการ

นายพันธุ์พงษ์ คงพันธุ์ ผู้ร่วมวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

งบประมาณประจำปี พ.ศ. 2556

บทคัดย่อ

กระบวนการลากขึ้นรูปลึกเป็นกระบวนการผลิตหนึ่งที่นิยมใช้ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นให้เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ชิ้นส่วนรถยนต์ ชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องใช้ภายในครัวเรือน สำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้ มุ่งศึกษาถึงกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก เพื่อเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่น

การศึกษาวิจัยฉบับนี้ ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกของโลหะนอกกลุ่มเหล็ก 3ชนิดคือ อลูมิเนียม AA1100 ทองแดง C1100 และทองเหลือง C2801 โดยใช้น้ำมันไฮดรอลิก ตามมาตรฐาน TIS 3 (ISO VG 68) แรงดันน้ำมัน 3 ระดับ คือ 2.5, 5.0 และ7.5 Mpa. และแรงกดชิ้นงาน 3 ระดับ คือ 9.42 , 16.62 และ 35.69 N/mm^2 ซึ่งอิทธิพลของตัวแปรเหล่านี้จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงาน ความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน รอยย่นและรอยฉีกขาดของชิ้นงานที่เกิดขึ้นหลังการขึ้นรูป

ผลการทดลองพบว่า แรงดันน้ำมันและแรงกดชิ้นงานเป็นตัวแปรสำคัญและมีผลกระทบต่อกระบวนการลากขึ้นรูป เมื่อเพิ่มแรงดันน้ำมันให้สูงขึ้นทำให้แรงในการลากขึ้นรูปและแรงกดพั้นช์ที่กระทำต่อชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในการขึ้นรูป การลากขึ้นรูปลึกแผ่นอลูมิเนียม AA1100 พบว่าไม่สามารถขึ้นรูปได้ทั้งแบบปกติและกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ส่วนการลากขึ้นรูปทองแดงC1100 การลากขึ้นรูปแบบปกติไม่สามารถขึ้นรูปได้ แต่หลังจากใช้กระบวนการไฮดรอไดนามิกจึงสามารถลากขึ้นรูปได้ การลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ไม่สามารถขึ้นรูปได้ที่แรงกดเหยียบ 35.69 N/mm2 และแรงดันน้ำมัน 7.5MPa เท่านั้น และเมื่อเปรียบเทียบกับการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติ ค่าความเครียดหลักและความเครียดรองของอลูมิเนียม AA1100 จะเพิ่มขึ้นเป็น 24.24 % และ 8.33 % ความเครียดหลักและความเครียดรองของทองแดง C1100 จะเพิ่มขึ้นเป็น 13.74 % และ 7.50 % ความเครียดหลักและความเครียดรองของทองเหลือง C2801 จะเพิ่มขึ้นเป็น 30.04 % และ 13.28 %

คำสำคัญ : การลากขึ้นรูปลึก กระบวนการไฮดอรไดนามิก แรงกดชิ้นงาน ความหนืดเชิงจลศาสตร์

Abstract

Deep drawing process is a type of manufacturing process in sheet metal forming widely used in industrials fabrication such as automotive electronics and households industries. The purpose of this research was to study the deep drawing through the hydrodynamic process in deep drawing to improve the performance of metal sheet deep drawing.

This research examined the influence of that affect the deep drawing with the hydrodynamics of nonferrous metals such as aluminum AA1100 copper C1100 and brass C2801 by using standard hydraulic oil TIS. 3 (ISO VG 68) Oil Pressure 3 levels 2.5, 5.0 and 7.5 Mpa. Levels of liquid pressure of 9.42, 16.62 and 35.69 N/mm2 which the influence of these variables will affect the work piece thickness strain on the work piece. Creases and tears of the work piece after forming.

The experiment results revealed that the influence of drawing force and punch force on the work piece tend to increase when the fluid pressure and load on work price increase. Aluminum sheet AA1100 was unable to Forming both the deep drawing and hydrodynamics deep drawing. Copper C1100. Was unable to drawing. But after using hydrodynamic process Copper C1100 can be drawn up. The drawing sheet brass C2801 Was unable to drawing in condition of pressure 7.5MPa and 35.69 N/mm^2. The strain between deep drawing and hydrodynamic deep drawing of aluminum AA1100 was major and minor strain will increased to 24.24% and 8.33% major and minor strain of copper C1100 will increase to 13.74% and 7.50% and strain of Brass C2801 major and minor strain will increased 30.04% and 13.28%.

Keywords: deep drawing, hydrodynamic process, punch force, blank holder force, kinematics viscosity

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับใช้ในการทดสอบ ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนงบประมาณประจำปี 2556 ในงานวิจัยฉบับนี้ จนสำเร็จไปได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้ สามารถจะนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมได้ เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดกับงานวิจัยฉบับนี้ต่อไป

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและจุดประสงค์	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.5 ข้อจำกัดของการศึกษา	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 แนวความคิด	5
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
2.4 สรุปบท	34

3 วิธีดำเนินการวิจัย 35
3.1 วิธีดำเนินการวิจัย 35
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย 35
3.3 ขั้นตอนการเก็บบันทึกข้อมูลการทดลอง 51
3.4 การเปรียบเทียบสรุปผลการทดลอง 55
4 ผลการวิจัย 56
4.1 ผลการทดลอง 56
4.2 อิทธิพลแรงกดชิ้นงานที่มีผลต่อการลากขึ้นรูป 63
4.3 ชิ้นงานหลังการขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก 66

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ 97
5.1 สรุปการทดลอง 97
5.2 ข้อเสนอแนะทั่วไป 99
5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป 99
รายการอ้างอิง 100
ภาคผนวก 103
ภาคผนวก ก 103
ภาคผนวก ข 127
ภาคผนวก ค 134

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การลากขึ้นรูปถ้วยวงกลมทรงกระบอก	6
2.2	วงกลมหน้าสัมผัสของการลากขึ้นรูปถ้วย	7
2.3	ส่วนย่อยในวงกลมหน้าสัมผัสจากรูปที่ 2.3	7
2.4	ลักษณะความเค้นและปริมาณความเครียดของจุดต่างๆบนผิวสัมผัส	7
2.5	ส่วนของผิวสัมผัสในระหว่างกระบวนการลากขึ้นรูป	8
2.6	เส้นกราฟของความเค้นในการลากขึ้นรูปเมื่อเปรียบเทียบกับการเคลื่อนที่ของพั้นช์	9
2.7	รูปถ้วยทรงกระบอกแบบมีปีก	10
2.8	แรงกดพั้นช์ในการขึ้นรูปถ้วย	12
2.9	Hydrodynamic deep drawing	13
2.10	กระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว	14
2.11	ส่วนต่างของของระบบ Hydrodydamic deep drawing	14
2.12	หลักการทำงานของเครื่องอัดไฮดรอลิกโดยการใช้กฎของปาสคาล	18
2.13	หลักการของความหนืด	21

2.14 แรงดึง (Tensile) 23
2.15 แรงกด (Compression) 23
2.16 แรงเฉือน (Shear) 24
2.17 ความเค้นความเครียดของการดึงวัสดุ 24
2.18 ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) 25
2.19 ความเครียดเฉือน (Shear Strain) 26
2.20 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด 26
2.21 แสดงตารางวงกลมบนโลหะแผ่น 27
2.22 แผนภาพความเครียดตำแหน่งต่างๆ ของถ้วยทรงกระบอก 27
2.23 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ความหนา 0.91 mm 29
3.1 แผ่นโลหะนอกกลุ่มเหล็กทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง 35
3.2 แสดงภาพน้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic oil) เกรด ISO VG 68 36
3.3 แสดงภาพสปริงแรงกด 9.42 , 19.62 และ 35.69 N/mm^2 ตามลำดับ 36
3.4 แสดงภาพเครื่องกัด CNC ชนิด 5 แกน 37
3.5 แสดงภาพเครื่องอัดขึ้นรูปโลหะระบบไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน 37
3.6 แสดงภาพชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก 38
3.7 แสดงภาพชุดชุดต้นกำลังและควบคุมระบบไฮดรอลิกขนาด 30 ลิตร 38

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.8 ชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดึงของโลหะผสม ตามมาตรฐาน ASTM E8 39
3.9 แผนภาพแสดงความเค้น-ความเครียดของวัสดุที่ใช้ในการทดลองทั้ง 3 ชนิด 40
3.10 ชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอกแบบมีปีก 41
3.11 ส่วนประกอบพร้อมรายละเอียดของแม่พิมพ์ 43
3.12 แผงสวิทช์ควบคุมการทำงานของระบบไฮดรอลิก 44
3.13 วงจรการทำงาน และควบคุมระบบไฮดรอลิก 45
3.14 ช่องเติมน้ำมันทั้งสองช่องเพื่อเติมน้ำมันภายในถังและที่ปั๊มโดยตรง 45

3.15 ขั้นตอนของการกัดแผ่นชิ้นงานสำหรับการศึกษาทดลอง 46
3.16 แผ่นชิ้นงานสำหรับการศึกษาทดลอง เมื่อกัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว 46
3.17 แผ่นทดสอบที่สร้างกริดเรียบร้อยแล้ว 47
3.18 อุปกรณ์วัดแรงกดสำหรับต่อพวงเข้ากับเครื่องปั๊มอัด 48
3.19 แม่พิมพ์ซึ่งติดตั้งบนเครื่องปั๊มอัดเรียบร้อยแล้ว 48
3.20 ชุดต้นกำลังและควบคุมระบบไฮดรอลิก 50
3.21 อุปกรณ์วัดแรงดันและอุปกรณ์บันทึกแรงที่ได้จากการขึ้นรูป 50
3.22 ไมโครคาลิปเปอร์สำหรับวัดความหนาชิ้นงาน 51
3.23 ตำแหน่งของการวัดความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้น 52
3.24 การวัดขนาดกริดวงกลมด้วยโปรแกรม Dcal Image Processing 53
3.25 การวัดอัตราความเครียดหลักและอัตราความเครียดรอง 53
3.26 ลักษณะของกริดวงกลมก่อนและที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหลังจากการขึ้นรูป 54
3.27 กริดวงกลมที่ทำการวัดหลังการขึ้นรูปในตำแหน่งก้นถ้วยบริเวณกึงกลางและขอบถ้วย 54
3.28 กริดวงกลมซึ่งทำการวัดในบริเวณที่เกิดการฉีกขาดบนผิวชิ้นงาน 54
3.29 กริดวงกลมซึ่งทำการวัดในบริเวณการฉีกขาดบนผิวชิ้นงาน 55
4.1 แสดงแรงลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA1100 ที่ทำการลากขึ้นรูปแบบปกติ 56
4.2 แสดงแรงลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 ที่ทำการลากขึ้นรูปแบบปกติ 57
4.3 แรงลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C2801 ทำการลากขึ้นรูปแบบปกติกับการลากขึ้นรูป 58
4.4 ,แสดงค่าเฉลี่ยแรงลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม ทองแดง และทองเหลือง 59
4.5 แสดงค่าเฉลี่ยแรงลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม ทองแดง และทองเหลือง 60
4.6 แสดงค่าเฉลี่ยแรงลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม ทองแดง และทองเหลือง 61
4.7 แสดงค่าแรงกดพั้นช์สูงสุด ในการลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA1100 ขึ้นรูปแบบปกติ 63
4.8 แสดงค่าแรงกดพั้นช์สูงสุด ในการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 ขึ้นรูปแบบปกติ 64
4.9 แสดงค่าแรงกดพั้นช์สูงสุด ในการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ขึ้นรูปแบบ 65
4.10 ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 66

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.11 ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 67
4.12 ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 68

4.13 ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 69
4.14 ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 70
4.15 ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 71
4.16 ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 72
4.17 ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 73
4.18 ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 74
4.19 ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 76
4.20 ความหนาของชิ้นงานแผ่นอลูมิเนียม หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 77
4.21 ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นอลูมิเนียม หลังการขึ้นรูปที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 78
4.22 ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นอลูมิเนียม หลังการขึ้นรูปที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 79
4.23 ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นทองแดง หลังการขึ้นรูปที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 80
4.24 ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นทองแดง หลังการขึ้นรูปที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 81
4.25 ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นทองแดง หลังการขึ้นรูปที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 82
4.26 ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นทองเหลือง หลังการขึ้นรูปที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 83
4.27 ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นทองเหลือง หลังการขึ้นรูปที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 84
4.28 ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นทองเหลือง หลังการขึ้นรูปที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 85
4.29 ตำแหน่งการวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริดวงกลม 86
4.30 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 87
4.31 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 88
4.32 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 89
4.33 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 90
4.34 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 91
4.35 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 92
4.36 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 93

4.37 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วย กระบวนการไฮดรอไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 94

4.38 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วย กระบวนการไฮดรอไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 95

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ค่าตัวคูณประกอบของการแตก a_{cr} ของวัสดุต่างๆ 10

2.2 ค่าประกอบของวัสดุ 11

2.3 ค่าการปรับค่า $n = f(\beta_{actual})$ 12

2.4 ระบบ หน่วย และอุณหภูมิที่วัดความหนืดของน้ำมัน 20

3.1 เปรียบเทียบมาตรฐาน และส่วนประกอบทางเคมี 39

3.2 ขนาดที่ต้องการสำหรับการกหนดค่า n แบบ “Plain-Ead” Specimen 40

3.3 สมบัติเชิงกลของวัสดุ 40

3.4 ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ 49

3.5 ตัวแปรในการทดลองสำหรับการขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลวโดยใช้ของเหลว 68 49

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

กระบวนการการขึ้นรูป แบบ Hydroforming คือ กระบวนการขึ้นรูปซึ่งใช้ของเหลวเป็นสื่อความดัน (medium pressure) โดยแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปเกิดจากการปิดกั้นของเหลว ในห้องควบคุมภายในแม่พิมพ์ ดังนั้นลักษณะเด่นของกระบวนการนี้ คือ สามารถขึ้นรูปโลหะมีความสามารถในการขึ้นรูปต่ำ ที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ โดยใช้จำนวนแม่พิมพ์ และขั้นตอนการขึ้นรูปน้อยกว่าการลากขึ้นรูปทั่วๆ ไป [1] การลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก (Hydrodynamic deep drawing , HDD) ซึ่งในหลักการจะใช้น้ำมันหรือของเหลวที่มีความดันสูงเข้ามาช่วยการขึ้นรูปโลหะแผ่น ในขณะที่มีการเคลื่อนตัวของพั้นช์(Punch) กดลงบนชิ้นงานเพื่อขึ้นรูปเข้าสู่ดาย ของเหลวที่มีความดันจะเคลื่อนตัวไหลอยู่ระหว่างพื้นผิวด้านล่างของดายกับแผ่นโลหะ กระบวนการดังกล่าวสามารถเพิ่มค่าของอัตราส่วนขีดจำกัดการลากขึ้นรูป (Limiting drawing ratio , LDR) และเป็นการปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงาน [2]

ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้จะมุ่งศึกษาอิทธิพลของกระบวนการที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น ซึ่งเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก 3 ชนิด ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างตามที่กำหนด การขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยกระบวนการไฮดรอลิก หรือ Sheet hydro forming เป็นกรรมวิธีการผลิตที่มีความสำคัญในปัจจุบันและใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆมากมาย เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์, เครื่องใช้ภายในครัวเรือน, อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนของเครื่องบิน และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

งานศึกษาวิจัยฉบับนี้มุ่งเน้นศึกษาความแตกต่างแรงกด (Blank holder force) และแรงดันของน้ำมันไฮดรอลิก (Internal fluid pressure) ซึ่งตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน [5] น้ำมันไฮดรอลิกที่นำมาใช้ คือ น้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic oil) เกรด 68 จากงานศึกษาวิจัยของ กฤษดา บรรเทาพิษ [6] ในเรื่อง การศึกษาอิทธิพลของของเหลวในการลากขึ้นรูปลึกเหล็กคาร์บอนรีดเย็น SPCC ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ปี 2555 ซึ่งนำเอาน้ำมันไฮดรอลิก เกรด 68, 46 และ 32 นำมาทดลองศึกษาถึงแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปลึกและคุณภาพชิ้นงาน ที่ผ่านกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ในสภาวะของความดันและความหนืดที่แตกต่างกัน พบว่า ความสามารถในการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC โดยการพิจารณาจาก แผ่นภาพขีดจำกันของการขึ้นรูป ของเหลวค่าความหนืด VG 68 ในส่วนของวัสดุที่นั้น ต้องการศึกษาโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีความสามารถในการขึ้นรูปต่ำ (low formability) 3 ชนิด คือ ทองแดง ทองเหลือง และอลูมิเนียม ซึ่งจะทำการลากขึ้นรูปลึกได้ยาก ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองในกระบวนการ Hydrodynamic deep drawing ที่นำมาพิจารณา

ประกอบไปด้วย 1.ความสามารถในการขึ้นรูป (Formability) ของ วัสดุ 3 ชนิด คือ ทองแดง ทองเหลือง และอลูมิเนียม, 2.แรงในการลากขึ้นรูป (Drawing force) 3.แรงกดชิ้นงาน (Blank holder force)และ 4.คุณภาพและความเสียหายของชิ้นงานในสภาวะต่างๆของการลากขึ้นรูป โดยนอกจากชนิดของโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่เป็นตัวแปรหลักในการศึกษาทดลองแล้ว ตัวแปรสำคัญในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยของเหลว Hydrodynamic deep drawing ทีนำมาศึกษาทดลองร่วมด้วยคือ แรงจับยึดแผ่นโลหะ (Blank holder force) และ ความดันของเหลวภายใน (Internal fluid pressure) ซึ่งเป็นที่น่าสนใจว่ากระบวนการการขึ้นรูปของโลหะนอกกลุ่มเหล็กทั้งสามนั้นมีแนวโน้มคล้ายคลึงหรือต่างจากค่าคุณสมบัติของวัสดุทั้ง 3 ชนิด

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 ศึกษาถึงแรงในการลากขึ้นรูปลึก ซึ่งเป็นแรงกระทำต่อชิ้นงานซึ่งเป็นวัสดุ 3 ชนิค คือ ทองแดง เกรด C1100 ทองเหลือง เกรด C2801 และอลูมิเนียม เกรด AA 1100 ที่นำมาขึ้นรูปด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) ในสภาวะที่ใช้แรงกดเหยียบชิ้นงาน และแรงดันที่แตกต่างกัน

1.2.2 เปรียบเทียบคุณภาพของชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว (Hydrodynamic deep drawing) วัสดุ 3 ชนิค คือ ทองแดง เกรด C1100 ทองเหลือง เกรด C2801 และอลูมิเนียม เกรด AA 1100, ในสภาวะของแรงกดชิ้นงานและแรงดันที่แตกต่างกัน และเปรียบเทียบกับกระบวนการลากขึ้นรูปลึกแบบธรรมดา โดยการเปรียบเทียบความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน, รอยย่นที่ปากถ้วย และรอยแตกร้าว

1.2.3 ศึกษาถึงอิทธิพลของแรงกดแผ่นชิ้นงานโลหะ ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว (Hydrodynamic deep drawing) ที่มีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูปของวัสดุ 3 ชนิค คือ ทองแดง เกรด C1100 ทองเหลือง เกรด C2801 และอลูมิเนียม AA 1100, ความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน, รอยย่นที่ปากถ้วย และรอยแตกร้าว

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1.3.1 แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปจะสูงขึ้นเมื่อความดันของของเหลวเพิ่มขึ้นในขณะทำการขึ้นรูป

1.3.2 กระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว จะใช้แรงในการลากขึ้นรูปที่สูงกว่าการลากขึ้นรูปแบบธรรมดา

1.3.3 แรงในการลากขึ้นรูปที่เกิดขึ้นในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของเหลว จะสูงกว่าความดันของของเหลวที่เกิดขึ้นภายในห้องเก็บของเหลว (Liquid Chamber) ในขณะทำการขึ้นรูป

1.3.4 คุณภาพของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการ (Hydrodydamic deep drawing) จะดีกว่าและพบปัญหาน้อยกว่า ชิ้นงานที่ลากขึ้นรูปด้วยวิธีการธรรมดา

1.3.5 โลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีค่าความเค้น ณ จุดคราก สูงจะมีความสามารถในการลากขึ้นรูปโดยวิธีการ ลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของเหลว (Hydrodydamic deep drawing) สูงกว่าโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีค่าความเค้น ณ จุดครากที่ต่ำกว่า ดังนั้น ทองเหลืองจะมีความสามารถในการขึ้นรูป สูงที่สุด รองลงมาจะเป็นทองแดง และอลูมิเนียมมีความสามารถในการขึ้นรูปต่ำสุด

1.3.5 เมื่อทำการลากขึ้นรูปภายใต้สภาวะที่มีความดันของของเหลวเพิ่มขึ้น แรงเสียดทานระหว่างแผ่นโลหะ กับแม่พิมพ์ตัวล่างควรจะลดลง อาจส่งผลทำให้คุณภาพของชิ้นงานดีขึ้นและพบปัญหาน้อยลง เนื่องจากแรงดันจากของเหลวจะต้านทานแรงกดยึดของแผ่นโลหะ ทำให้แผ่นโลหะลอยขึ้นไม่สัมผัสกับแม่พิมพ์โดยตรง

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1.4.1 ศึกษาวัสดุ 3 ชนิด คือ ทองแดง เกรด C1100 ทองเหลือง เกรด C2801 และอลูมิเนียม เกรด AA 1100 ความหนา 0.5 มิลลิเมตร ขนาดชิ้นงานเริ่มต้นเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร ทำการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นเป็นรูปถ้วยทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร แบบมีปีกขนาด 5 มิลลิเมตร ในอัตราส่วนการลากขึ้นรูป (Drawing ratio: DR) เท่ากับ 1.8 []

1.4.2 แม่พิมพ์ทำจากเหล็กเครื่องมือ SKD11 [9] ชุบแข็งและชุบฮาร์ดโครม (Hard chrome) ในชิ้นส่วนที่สัมผัสเกิดการเสียดสีกับอุปกรณ์ป้องกันการรั่วซึมของน้ำมันไฮดรอลิก ทำการศึกษาทดลองการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปลึก ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลวความดันสูง (Hydrodynamic deep drawing) ด้วยการออกแบบแม่พิมพ์ให้สอดคล้องกับกระบวนการดังกล่าว

1.4.3 ทำการทดสอบแรงกดแผ่นชิ้นงาน (Black holder force) โดยการทดสอบเริ่มแรกนั้นใช้ขนาดของแรงกดตามทฤษฎีการคำนวณการลากขึ้นรูปลึก โดยแรงกดออกแบบในใช้แรงจากการกด

ของสปริงแม่พิมพ์ ที่มีค่าคงที่สปริงเท่ากับ 9.42, 19.62, 35.69 n/mm (เหลือง , น้ำเงิน, แดง ; L=125 mm, D = 27 mm) ตามมาตรฐาน JIS B 5012 Coild helical spring for press dies [13]

1.4.4 ศึกษาถึงสภาพโดยทั่วไปของชิ้นงาน โดยพิจารณาถึงปัญหาที่พบในกระบวนการลากขึ้นรูปอันประกอบไปด้วย 1. การฉีกขาด (Tearing) และ 2. รอยย่น (Wrinkling) [14,15]

1.4.5 ศึกษาถึงแรงในการลากขึ้นรูป (Drawing force) ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว (Hydrodynamic deep drawing) โดยใช้ Load cell ในการวัดแรงกดเปรียบเทียบกับแรงในการลากขึ้นรูปที่ได้จากการคำนวณ

1.4.6 ศึกษาถึงความเครียดที่เกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบ เพื่อสร้างแผ่นภาพขีดจำกันของการขึ้นรูป (FLD , Forming limit diagram)

1.4.7 ศึกษาความหนาของชิ้นงานของวัสดุทั้งสามชนิด ที่เปลี่ยนแปลง เปรียบเทียบความหนาที่ก่อนและหลังการขึ้นรูปด้วย

1.5 ข้อจำกัดของการศึกษา

1.5.1 ทองเหลืองความดันภายในของของเหลวที่ใช้ในการทดลองสูงสุดทำได้ที่ 300 bar เนื่องจากชุดต้นกำลังของระบบไฮดรอลิกปกติแล้วทำได้สูงสุด 700 bar เพื่อความปลอดภัยในการทดสอบ

1.5.1 สำหรับตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ในครั้งนี้คือ รูปแบบของการขึ้นรูป ซึ่งในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เลือกใช้รูปแบบของการขึ้นรูปที่ง่าย และมีแหล่งของข้อมูลอ้างอิงที่เกี่ยวข้องกับวัสดุที่นำมาเป็นวัสดุทดสอบ และ Tooling parameter ต่างๆ

1.5.3 การวัดแรงดันที่เกิดขึ้นจริงภายในห้องแม่พิมพ์ไม่สามารถดำเนินการได้ เนื่องมาจากเป็นการศึกษาที่ยังมีข้อมูลในการดำเนินการที่น้อยมาก ประกอบกับอุปกรณ์ที่ทันสมัยมีราคาสูงและจัดหายาก ดังนันในการศึกษาวิจัยจึงอ้างอิงโดยใช้แรงดันควบคุมแทน

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ทราบค่าแรงที่เหมาะสมในการกดชิ้นงานของแผ่นกด (Blank holder force)

1.6.2 ทราบถึงความแข็งแรง ณ จุดคราก ก่อนและหลังการขึ้นรูป ของวัสดุ 3 ชนิดคือ ทองแดง เกรด C1100 ทองเหลือง เกรด C2801 และอลูมิเนียม เกรด AA 1100 ที่นำมาขึ้นรูป และนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อนำไปใช้งานได้

1.6.3 สามารถเปรียบเทียบความสามารถในการขึ้นรูป ของวัสดุ 3 ชนิด คือ ทองแดง เกรด C1100 ทองเหลือง เกรด C2801 และอลูมิเนียม AA 1100 ที่นำมาขึ้นรูปด้วยกระบวนการ (Hydrodynamic Deep Drawing) และนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อนำไปใช้งานได้เหมาะสม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

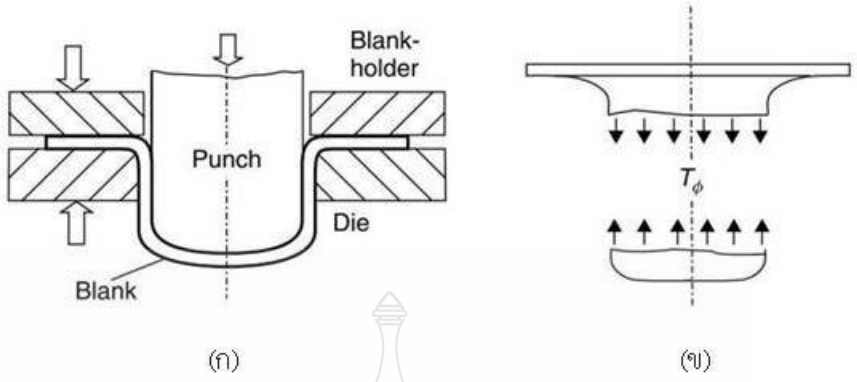
2.1 แนวความคิด

จากการค้นคว้าและทบทวนวรรณกรรมต่างๆ ที่ศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความสามารถในการลากขึ้นรูปลึกโลหะแผ่น และความพยายามในการเพิ่มขีดความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่น โดยการนำเอาของเหลวเข้ามาช่วยในการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก โดยการใช้น้ำมันเข้าไปแทนที่อากาศภายในห้องแม่พิมพ์ พบว่าน้ำมันจะมีความสามารถในการกระจายตัวของแรงได้ดีกว่าอากาศ ในขณะเดียวกันยังทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นอีกด้วย ในขณะที่น้ำมันมีการเคลื่อนที่ (Hydrodynamic) กระบวนการดังกล่าวเป็นการลดแรงเสียดทานระหว่างผิวแผ่นโลหะกับผิวดาย และเพิ่มความสามารถในการไหลตัวของโลหะในขณะทำการขึ้นรูป ในการศึกษาทดลองครั้งนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลต่างๆที่มีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยพิจารณาอิทธิพลของวัสดุซึ่งเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็กซึ่งมีความสามารถในการขึ้นรูปได้น้อยมาก เช่น อลูมิเนียมบริสุทธิ์ มีความสามารถในการขึ้นรูปปานกลาง เช่น ทองแดงบริสุทธิ์ และมีความสามารถในการขึ้นรูปสูง เช่น ทองเหลือง อิทธิพลของแรงดันน้ำมันที่ใช้ในการลากขึ้นรูปโดยเปรียบเทียบระหว่างการลากขึ้นรูปแบบปกติโดยไม่ใช้ของน้ำมัน กับการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก อิทธิพลของแรงกดชิ้นงาน อิทธิพลของแรงในการขึ้นรูปที่เกิดขึ้นในระหว่างการลากขึ้นรูป ซึ่งแรงในการลากขึ้นรูปมีผลสำคัญต่อ การเกิดรอยฉีกขาดที่ผิวของชิ้นงาน ผลจากความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของชิ้นงาน และชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปมีลักษณะของปัญหาที่สำคัญนอกจากรอยฉีกขาดที่ผิวชิ้นงานแล้ว ยังมีรอยย่นที่ปากถ้วยและความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การลากขึ้นรูปลึก (Deep drawing)

กระบวนการลากขึ้นรูปลึกเป็นการขึ้นรูปวัสดุแผ่นเรียบให้มีรูปร่างต่างๆ โดยการใช้แรงกดจากแม่พิมพ์พั้นช์ (Punch) กดลงไปยังแผ่นชิ้นงานผ่านแม่พิมพ์ดาย (Die) โดยที่ความหนาของชิ้นงานยังเท่ากับวัสดุตั้งต้น กระบวนการลากขึ้นรูปลึกมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ดาย พั้นช์ และ ตัวกดแผ่นชิ้นงาน (Blank holder ring) สำหรับกดแผ่นชิ้นงานให้แนบกับแม่พิมพ์ดาย ในขณะทำการขึ้นรูป (Blank holder force) [13,14]



(ก) การลากขึ้นรูปถ้วยวงกลมทรงกระบอก, (ข) การขยายตัวตามแนวการขึ้นรูปและแรง ลากขึ้นรูปโดยเป็นแรงดึงที่เกิดขึ้นบริเวณผนังถ้วย

รูปที่ 2.1 การลากขึ้นรูปลึก (Deep drawing) [13]

1. หน้าสัมผัสในการลากขึ้นรูป

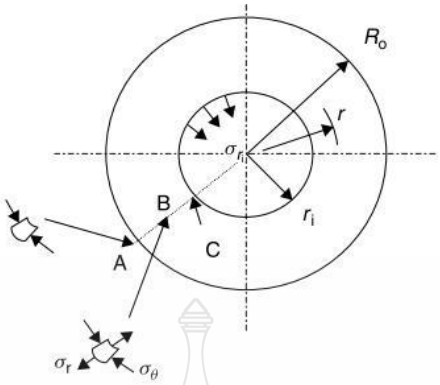
หน้าสัมผัสระหว่างวัสดุแผ่นกับพั้นช์ในขณะทำการลากขึ้นรูป พิจารณาได้ตามรูปที่ 2.2 เมื่อพิจารณาถึงส่วนย่อยตามรูปที่ 2.3 ความเค้นที่เกิดขึ้นกับส่วนย่อยที่รัศมี r ดังที่แสดงในรูปที่ 2.4 สมการอนุพันธ์สำหรับส่วนย่อยนั้นเมื่อไม่คำนึงถึงความเสียดทาน คือ [13]

$$(\sigma_r + d\sigma_r)(t + dt)(r + dr)d\theta = \sigma_r t r d\theta + \sigma_\theta t dr d\theta \tag{2.1}$$

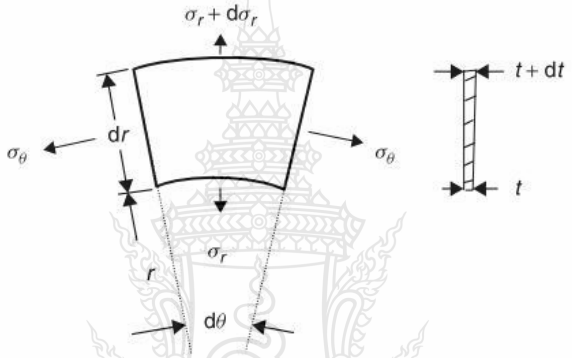
เมื่อยุบรวมสมการแล้วจะได้

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r}{t}\frac{dt}{dr} - \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} = 0 \tag{2.2}$$

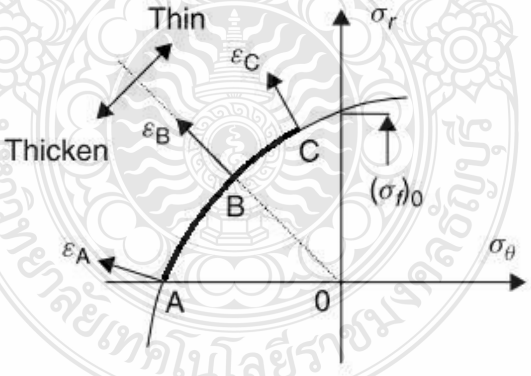
ที่บริเวณขอบของวงกลมจุด A เป็นพื้นผิวอิสระ σ_r = 0 ดังนั้น ความเค้นอัดในแนวแกนที่เกิดขึ้น σ_θ = -σ_f เมื่อ σ_f คือ ความเค้นไหลที่เกิดขึ้นจริง ที่เส้นรัศมีกลาง ที่จุด B รัศมีความเค้นจะอยู่ตรงข้ามกันและมีขนาดเท่ากัน นั้นก็คือ ความเค้นตามแนวเส้นรอบวง (Hoop stress) อยู่บริเวณขอบด้านใน จุด C รัศมีความเค้นมีค่าสูงสุด ลักษณะของการเกิดความเค้น และความสอดคล้องกันปริมาณความเครียด ปรากฏเป็นตำแหน่งของการเกิดความเค้นจุดคราก ฟอนมิสเซส (Von Mises) ในรูปที่ 2.4 บริเวณขอบด้านนอก A วัสดุแผ่นจะมีความหนาเพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ในขณะเดียวกันที่จุด B ความหนาจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงไป บริเวณด้านในขอบ C จะเกิดเป็นแผ่นบาง ทั้งหมดนี้เป็นภาพรวมของการลากขึ้นรูป พื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมดของวัสดุในช่วงต้นจะไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นการกำหนดขนาดของวัสดุแผ่นก่อนการขึ้นรูปเป็นเพียงการประมาณการเท่านั้น



รูปที่ 2.2 วงกลมหน้าสัมผัสของการลากขึ้นรูปถ้วย [13]



รูปที่ 2.3 ส่วนย่อยในวงกลมหน้าสัมผัสจากรูปที่ 2.3 [13]



รูปที่ 2.4 ลักษณะความเค้นและปริมาณความเครียดของจุดต่างๆบนผิวสัมผัส [13]

ความเค้นซึ่งก่อตัวเพิ่มขึ้นขึ้นของผิวสัมผัสในกระบวนการการลากขึ้นรูป หาได้โดยสมการที่ 2.3 และการเปลี่ยนรูปที่ตามมาจะใช้วิธีการความสัมผัสทางคณิตศาสตร์ ซึ่งปัจจุบันได้ล่าสมัยไปแล้ว แต่เราสามารถพิจารณาเพิ่มเติมได้จากสภาวะความเสียหายที่จุดครากของทีคา (Tresca)

$$\sigma_\theta - \sigma_r = -(\sigma_f)_0 \tag{2.3}$$

เมื่อ $(\sigma_f)_0$ คือความเค้นไหลเริ่มต้น และเมื่อความหนาเริ่มต้นเป็นไปอย่างมีรูปแบบ เช่น $t = t_0$ สมการที่ 2.2 สามารถจัดใหม่โดยอินดิเกรดได้ เมื่อกำหนดให้ขอบเขตสภาวะ $\sigma_r = 0$ ที่รัศมีวงนอก R_o และ $\sigma_r = \sigma_{ri}$ ส่วนรัศมีวงใน r_i เป็นการกำหนดขึ้น

$$\sigma_{ri} = -(\sigma_f)_0 \, In \frac{r_i}{R_o}$$

หรือ

$$\sigma_{\theta i} = -\{(\sigma_f)_0 - \sigma_{ri}\} \tag{2.4}$$

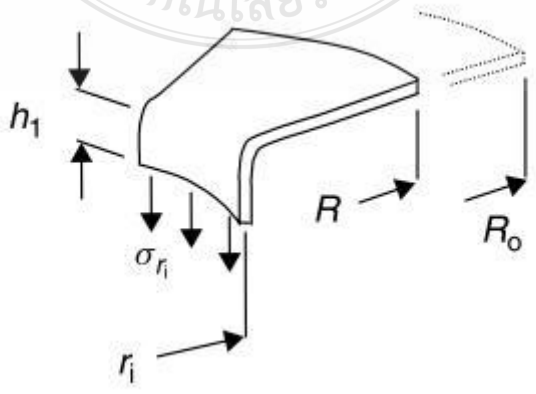
สำหรับวัสดุที่ไม่เกิดความเครียดแข็งตัว รัศมีความเค้นซึ่งให้ไว้โดยสมการที่ 2.4 เป็นตัวหารร่วมที่จุดเริ่มต้น และจะลดลงเมื่อเข้าใกล้รัศมีวงนอก ความเค้นที่พนังของถ้วยวัสดุเกิดขึ้นได้อย่างถาวร เมื่อ $(\sigma_f)_0$ คือ ความเค้นตามสภาวะทีคา ดังนั้น เอา $\sigma_{ri} = (\sigma_f)_0$ เข้าไปแทนที่ในสมการที่ 2.4 ทำให้ทราบถึงความกว้างของแผ่นวัสดุที่จะสามารถนำมาลากขึ้นรูปได้ นั้นก็คือค่าของ “อัตราส่วนขีดจำกัดของการลากขึ้นรูป” (Limiting Drawing Ratio)

$$\frac{R_o}{r_i} = e \approx 2.72 \tag{2.5}$$

2. ผลกระทบของความเครียดแข็งตัว

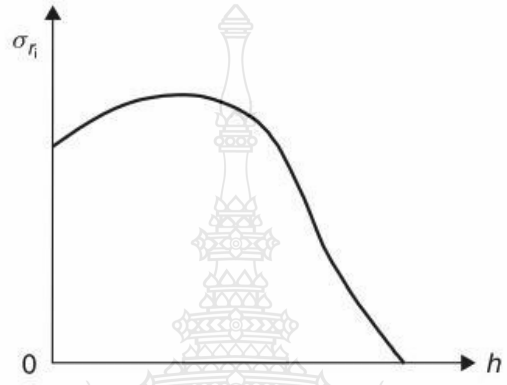
ค่าความเครียดแข็งตัว ความเค้นที่กระทำต่อพื้นผิวสัมผัส อาจเพิ่มสูงขึ้นในระหว่างการลากขึ้นรูป ในขณะที่ถึงแม้ว่ารัศมีวงนอกจะลดลง เมื่อพื้นผิวจะถูกลากขึ้นรูปเข้าไปยังด้านใน รัศมีวงนอก R จะลดลงอย่างรวดเร็วดังแสดงในรูปที่ 2.5 ค่าความเครียดแข็งตัวจากความเค้นไหลจะเพิ่มขึ้น จนกระทั้งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ ถ้าสมมุติให้เป็นค่าความเค้นเฉลี่ย $(\sigma_f)_{av}$ กระทำอยู่บนพื้นผิวทั้งหมด และไม่คำนึงถึงความหนาที่ไม่เสมอกัน จะสามารถเขียนได้เป็นสมการที่ 2.6

$$\sigma_{ri} = (\sigma_f)_{av.} \, In \frac{R}{r_i} \tag{2.6}$$



รูปที่ 2.5 ส่วนของผิวสัมผัสในระหว่างกระบวนการลากขึ้นรูปสภาวะที่ปราศจากแรงเสียดทาน

ความเค้นภายในพนังมีขนาดที่เท่ากันทุกจุด คือ รัศมีความเค้นที่รัศมีวงใน σ_{ri} [13] ดังนั้นการกำหนดค่าตัวแปรทั้งสองที่ตรงข้ามกัน คือ การเพิ่มขึ้นของความเค้นจนกระทั้งวัสดุเกิดการแข็งตัว และการลดลงของความเค้นที่รัศมี R อย่างช้าๆ โดยปกติแล้วความเค้นในขณะการลากขึ้นรุปจะเพิ่มสูงขึ้นในช่วงต้น จนกระทั้งมีค่าสูงสุดและจะลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เส้นกราฟของความเค้นในการลากขึ้นรูปเมื่อเปรียบเทียบกับการเคลื่อนที่ของพั้นช์สำหรับวัสดุที่เกิดความเครียดแข็งตัว [13]

แรงที่ทำให้เกิดรอยแตก[14]

ในการเลือกอัตราส่วนการขึ้นรูปที่มีค่ามากที่สุด คือ $\beta = d_0/d_1$ ค่านี้จะเป็นค่าที่ใช้แรงสูงสุดในการลากขึ้นรูปภายใต้เงื่อนไขที่ไม่เปลี่ยนแปลง ค่าแรงสูงสุดนี้จะถูกส่งผ่านไปที่ผนังของชิ้นงานที่ถูกขึ้นรูป ดังนั้นอัตราส่วนการขึ้นรูปจะต้องไม่มากกว่าค่าสูงสุด ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด β_{max} เป็นค่าเพื่อป้องกันการเกิดรอยแตกที่ก้นชิ้นงานชิ้นงาน ในสมการ 2.7 จะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ทำให้เกิดรอยแตก (Maximum Cracking Strength) σ_{cr} กับค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) S_u ของวัสดุที่แสดงไว้แล้ว

$$\sigma_{cr} = S_u \times a_{cr} \tag{2.7}$$

โดยใช้ค่าความแข็งแรงสูงสุด ที่ทำให้เกิดรอยแตก σ_{cr} ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่กึ่งกลางของความหนา d_m และความหนาชิ้นงาน S_o ในสมการที่ 2.8 เป็นการคำนวณหาแรงที่ทำให้เกิดการแตก F_{cr} ดังนั้น

$$F_{cr} = \pi \times d_m \times S_o \times S_u \times a_{cr} \tag{2.8}$$

ตารางที่ 2.1 ค่าตัวคูณประกอบของการแตก a_{cr} ของวัสดุต่างๆ[14]

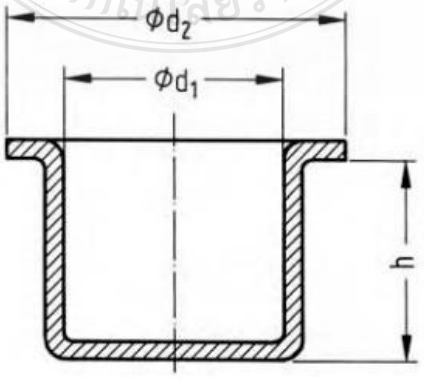
วัสดุ	a_{cr}
Deep-Drawing Steel Sheet, RSt 14 (SAE 1006)	1.05-1.55 ≈ 1.30
Austenite Steel Sheet, X 5 Cr Ni 18 9 (AISI 304)	0.95-1305 ≈ 1.13
Brass, Cu Zn 37 (UNS C27000)	0.92-1.27 ≈ 1.045
Pure Aluminum, Al 99.7 w (AA 1050-O)	0.99-1.22 ≈ 1.105

3. การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการลากขึ้นรูปลึก

สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ ในกระบวนการการลากขึ้นรูปลึกรูปถ้วยทรงกระบอก สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้ [15]

ก. ขนาดแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นสำหรับการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก[14]

$$D = \sqrt{d_2^2 + 4d_1 h} \qquad 2.9$$



รูปที่ 2.7 รูปถ้วยทรงกระบอกแบบมีปีก [16]

ข. ขนาดของมุมดายแม่พิมพ์[15,16]

$$r_M = \frac{0.035}{\sqrt{mm}} \times \left[50mm + (D-d\right] \times \sqrt{s} \qquad (2.10)$$

ค. ระยะช่องว่างแม่พิมพ์พั้นช์กับดาย[15]

$$\omega = s + k \times \sqrt{10s} \quad \text{หรือ} \quad \omega = s \times \sqrt{\frac{D}{d}} \qquad (2.11)$$

โดยที่ k คือ ค่าประกอบของวัสดุ (Material factor) ตารางที่ 2.1 ค่าประกอบของวัสดุ (k)

ตารางที่ 2.2 ค่าประกอบของวัสดุ (Material factor) [15,16]

Material	เหล็ก	วัสดุผสมทดความร้อนสูง	อลูมิเนียม
k in $\sqrt{mm}$	0.07	0.2	0.02

ง. แรงกดแผ่นชิ้นงาน

เป็นแรงที่ใช้กดแผ่นชิ้นงาน โดยการใช้แผ่นกดชิ้นงาน กดที่แผ่นชิ้นงานโดยตรง[14]

- แรงดันของแผ่นกดแผ่นชิ้นงาน (Blank holder pressure)

$$p = \left[\left(\beta_{actual} - 1\right)^2 + \frac{d}{200 \times s} \right] \times \frac{Rm}{400} \qquad (2.12)$$

- พื้นที่ผิวสัมผัสของแผ่นกดชิ้นงาน (Blank holder area) [14]

$$A_{BH} = \left(D^2 - d_e^2\right) \times \frac{\pi}{4} \qquad (2.13)$$

$$d_e = (d+2) \times \omega + (2 \times r_M) \qquad (2.14)$$

- แรงกดแผ่นชิ้นงาน (Blank holder force) [14]

$$F_{BH} = A_{BH} \times p \tag{2.15}$$

4. แรงในการลากขึ้นรูป

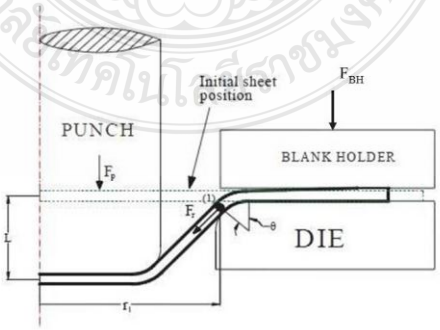
แรงที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการการลากขึ้นรูปลึก ซึ่งแม่พิมพ์ซึ่งเป็นตัวกดหรือพันช์กระทำต่อแผ่นชิ้นงาน ในรูปที่ 2.1 แรงกดพั้นช์ในการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก ของกระบวนการลากขึ้นรูปลึก การคำนวณแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป ตามทฤษฎีการลากขึ้นรูปลึก คำนวณได้ตามสมการที่ 2.16[16]

$$F_{dr} = d \times \pi \times s \times R_m \times n \tag{2.16}$$

n คือ ค่าการปรับค่า (Correction value) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของการขึ้นรูปจริง ตารางที่ 1 ค่าการปรับค่า $n = f(\beta_{actual})$

ตารางที่ 2.3 ค่าการปรับค่า $n = f(\beta_{actual})$ [16]

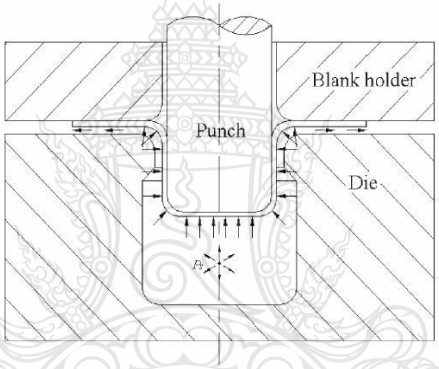
n	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3
$\beta_{actual} = \frac{D}{d}$	1.1	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2



รูปที่ 2.8 แรงกดพั้นช์ในการขึ้นรูปถ้วย [17]

2.2.1.1 การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยของเหลว (Sheet Hydroforming)

การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยของเหลว หรือ Sheet Hydroforming มีลักษณะการขึ้นรูปโลหะแผ่นคล้ายกับการขึ้นรูปโลหะแผ่นทั่วๆไป โดยมีชุดแม่พิมพ์ดาย และชุดแม่พิมพ์พั้นช์ ทำการกดโลหะแผ่นให้เป็นชิ้นงาน ให้มีรูปร่างตามที่กำหนดเพียงแต่ภายในแม่พิมพ์นั้นจะบรรจุไปด้วยน้ำมันหรือของเหลวอื่นๆ ซึ่งเป็นน้ำมันหรือของเหลวความดันสูง (High pressure) ที่จะสามารถกดแผ่นโลหะให้ติดกับพั้นช์ในขณะที่ทำการขึ้นรูป ซึ่งเป็นการลดความฝืดที่เกิดขึ้นในขณะทำการขึ้นรูปด้วยเช่นกัน ของเหลวที่อยู่ภายในชุดแม่พิมพ์จะไหลอยู่ระหว่างผิวด้านล่างของชุดแม่พิมพ์กับแผ่นโลหะ ซึ่งจะทำหน้าที่ในการต้านทานแรงกดของพั้นช์ในขณะทำการขึ้นรูป และสารหล่อลื่นทำหน้าที่ในการลดแรงเสียดทานในขณะปฏิบัติงาน ค่าของขีดจำกัดของอัตราการลากขึ้นรูป (Limit drawing ratio: LDR) ของแผ่นโลหะนั้นจะเพิ่มขึ้น และเป็นการเพิ่มคุณภาพให้กับชิ้นงาน ตามรูปที่ 2.9 แสดงถึงกระบวนการ Sheet Hydroforming ในกรรมวิธีของ Hydrodynamic deep drawing (HDD)

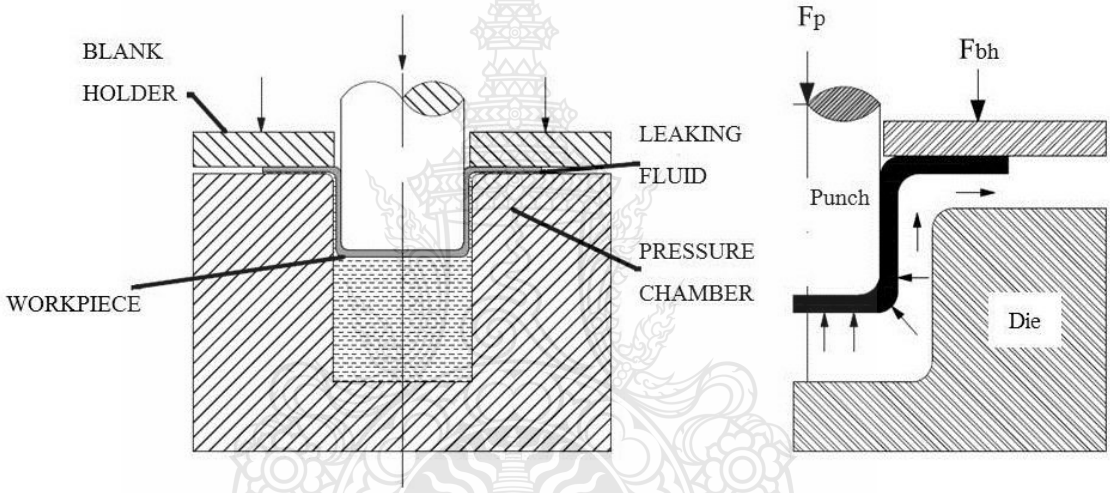


รูปที่ 2.9 Hydrodynamic deep drawing [18]

ของเหลวสามารถนำมาใช้กับ Punch, Die หรือนำเข้ามาช่วยในการพัฒนาความสามารถในการขึ้นรูปของแผ่นโลหะ ในการนำเอาของเหลวเข้ามาช่วยลดความเสียดทานในกระบวนการ Sheet Hydroforming สามารถแยกออกได้เป็นสองกลุ่ม คือ กระบวนการที่แม่พิมพ์เป็นตัวเคลื่อนที่ในการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Active sheet hydroforming) กับ กระบวนการที่แม่พิมพ์อยู่กับที่แต่ของเหลวทำหน้าที่ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นให้มีรูปร่างตามแม่พิมพ์ (Passive sheet hydroforming) วัสดุต่างๆ สามารถนำกระบวนการนี้เข้ามาใช้ได้อย่างมากมาย เช่น เหล็กคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel), เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel), เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High strength steel), อะลูมิเนียมอัลลอย (Aluminum alloy), แม็กนิเซียมอัลลอย (Magnesium alloy) และ ไททาเนียมอัลลอย (Titanium alloy) เป็นต้น หรืออาจกล่าวได้ว่าวัสดุที่ใช้กระบวนการปั๊มขึ้นรูป (Stamping) ได้ ก็จะสามารถใช้กระบวนการ Sheet hydroforming ได้เช่นกัน โดยความแตกต่างอยู่ที่ กระบวนการ Sheet hydroforming ใช้ของเหลวแรงดันสูงอยู่ภายในแม่พิมพ์ประมาณ 30 ถึง 150 MPa แต่การทำงานที่แรงดันสูงถึง 200 MPa ก็มีอยู่เช่นกัน [18]

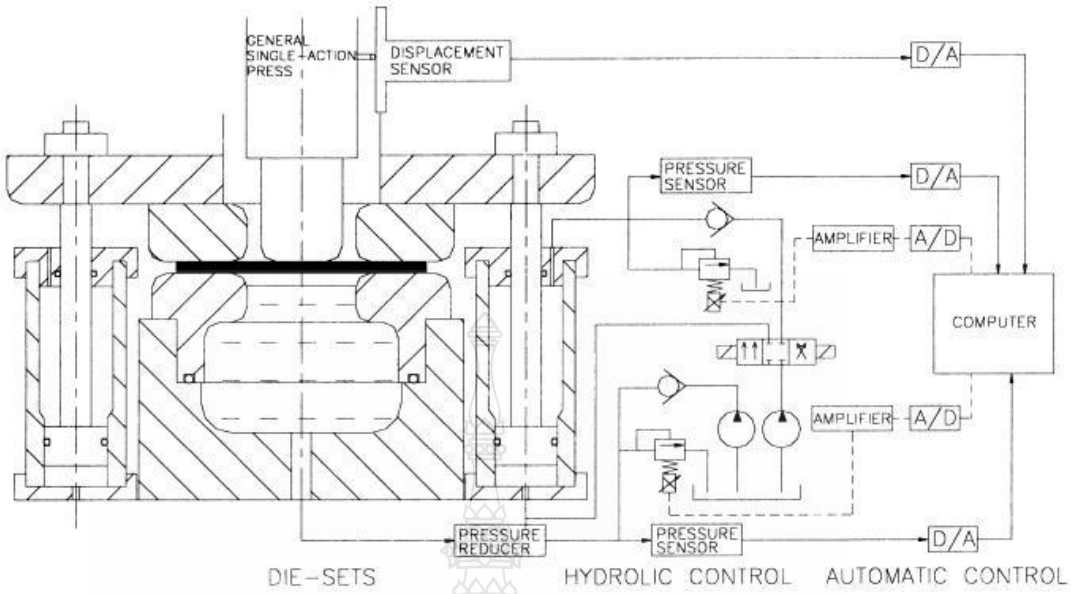
2.2.1.2 การลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลวหรือพลศาสตร์ของไหล

กระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลวนั้น ของเหลวจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยแรงดันและความเร็วตามที่กำหนด และไหลออกจากแม่พิมพ์ด้วยแรงดันและความเร็วสูง การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของแรงดันของเหลวในการไหลออกจากแม่พิมพ์นั้น เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ลงของพั้นช์ในจังหวะของการลากขึ้นรูป สำหรับการควบคุมแรงดันของเหลวภายในระบบสำหรับการลากขึ้นรูปด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ไม่ได้มีความสำคัญมากนัก รวมไปถึงการใช้แผ่นยางก็ไม่มีความจำเป็น ซึ่งเป็นจุดที่แตกต่างไปจากกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยเครื่องจักรกลของเหลว (Hydromechanical deep drawing) และ การลากขึ้นรูปลึกของของเหลว (Hydroforming deep drawing) [19]



รูปที่ 2.10 กระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว [19]

ระบบการทำงานและส่วนประกอบ ของกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว แสดงในรูปที่ 2.11 โดยส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ 1. ชุดแม่พิมพ์สำหรับการลากขึ้นรูปโดยออกแบบสำหรับการรองรับการเคลื่อนที่ของของเหลว (General hydrodynamic deep drawing die sets) และ 2. ชุดระบบไฮดรอลิก (Hydraulic system) ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนของการควบคุมระบบ (Hydraulic control) และ ชุดควบคุมอัตโนมัติ (Automatic control) [2]



รูปที่ 2.11 ส่วนต่างๆของระบบ Hydrodynamic deep drawing [2]

2.2.1.3 แรงกดพั้นช์ที่กระทำต่อวัสดุแผ่นในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว

สำหรับกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ไม่สามารถที่จะพิจารณาแรงในการลากขึ้นรูปเพียงอย่างเดียวได้ เนื่องจากแรงลากขึ้นรูปที่คำนวณตามทฤษฎีการลากขึ้นรูปหรือการวัดค่าแรงจากการทดลองนั้น เป็นแรงกดพั้นช์โดยรวม (Total punch forces ; TPF) เนื่องจากภายในกระบวนการมีแรงดันของเหลวอยู่ภายใน เป็นแรงที่ค่อยต้านการเคลื่อนที่ลงของพั้นช์ นั้นคือแรงที่ทำให้แรงกดพั้นช์ (Sheet drawing forces ; SDF) ที่กระทำต่อวัสดุแผ่นลดลง ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงแรงกดพั้นช์ที่กระทำโดยตรงต่อวัสดุแผ่น ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.17 [20]

$$f_D = f_P - \frac{1}{4}\pi d_P^2 P_S \qquad (2.17)$$

เมื่อ f_D คือ แรงกดพั้นช์ที่กระทำโดยตรงต่อวัสดุแผ่น

f_P คือ แรงกดพั้นช์โดยรวม

d_P คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของพั้นช์

P_S คือ แรงดันของเหลว

2.2.1.4 กลศาสตร์ของไหลเบื้องต้น (Fluid mechanics)

ของไหล คือ สสารที่เปลี่ยนรูปร่างไปเรื่อยๆเมื่อถูกกระทำด้วยแรงเฉือน (Shear force) แรงเฉือนคือแรงที่กระทำในทิศทางที่สัมผัสกับผิวของของไหล และเมื่อแรงถูก หารด้วยพื้นที่ที่มันสัมผัสก็จะเป็นหน่วยแรงเฉือน (Shear stress) สมบัติของของไหลเป็นลักษณะเฉพาะของของไหลขึ้นกับ

พารามิเตอร์ต่างๆ สมบัติพื้นฐานของของไหล คือ ความควบแน่น น้ำหนักจำเพาะ ความหนืดพลวัต ความหนืดจลศาสตร์ โดยทั่วไปแล้วการศึกษาทางด้านกลศาสตร์ของไหล (Fluid mechanic) แบ่งออกเป็นสองแขนงคือ สถิตยศาสตร์ของไหล (Fluid static) และพลศาสตร์ของไหล (Fluid dynamic)[21]

กฎพื้นฐานทางฟิสิกส์

สมการควบคุมที่จะสร้างขึ้นเพื่อศึกษากลศาสตร์ของไหลเชิงทฤษฎีนี้ สร้างขึ้นบนพื้นฐานของกฎต่างๆทางฟิสิกส์ที่ได้รับการยอมรับกันโดยทั่วไปแล้ว กฎเหล่านี้ถือเป็นกฎธรรมชาติ (Natural laws) ที่ต้องบัญญัติขึ้นมาเท่านั้น กล่าวคือไม่สามารถพิสูจน์ขึ้นมาได้ในเชิงคณิตศาสตร์ (แต่สามารถพิสูจน์ได้โดยการทดลองภายใต้เงื่อนไขที่เข้าใจกัน) กฎต่างๆที่สำคัญที่จะใช้เป็นฐานในการศึกษากลศาสตร์ของไหลมีดังนี้ คือ [21,22]

ก. กฎอนุรักษ์มวลของสาร (Conservation of mass) “ในกรณีที่ไม่มีการทำปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยานิวเคลียร์หรือมีผลของทฤษฎีสัมพัทธ์ มวลของสารก้อนหนึ่งย่อมคงที่” หรือกล่าวในเทอมปริมาตรควบคุมของกลศาสตร์ของไหล กล่าวได้ว่า “อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในปริมาตรควบคุม ย่อมเท่ากับอัตราสุทธิของมวลที่ไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุม” อัตราสุทธิของการไหลเข้าหมายถึง อัตราการไหลเข้า ลบด้วย อัตราการไหลออก หากอัตราสุทธิของการไหลเข้ามีค่าเป็นลบหมายความว่า ของไหลมีการไหลออกมากกว่าการไหลเข้านั้นเอง

ข. สมการควบคุมการอนุรักษ์มวล คือ

$$\frac{\partial M_{CV}}{\partial t} = \left[\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}\right] \tag{2.18}$$

เมื่อ M_{CV} คือ อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในปริมาตรควบคุม

m คือ มวลที่ไหลเข้าออกปริมาตรควบคุม

t คือ ณ ช่วงเวลานั้นๆ

ค. กฎอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงเส้น (Conservation of momentum) “โมเมนตัมของมวลก้อนหนึ่งย่อมคงที่อยู่เช่นนั้น (โมเมนตัมของก้อนมวลคือมวลคูณกับความเร็ว, $M\vec{V}$) จนกว่าจะมีแรงจากภายนอกมากระทำ ซึ่งในกรณีนี้อัตราการเปลี่ยนของโมเมนตัมเท่ากับแรงที่มากระทำนั้น” ซึ่งหมายถึงกฎข้อที่สองของนิวตันนั้นเอง ($F = Ma$) หรือกล่าวในเทอมปริมาตรควบคุมของกลศาสตร์ของไหล กล่าวได้ว่า “อัตราการเปลี่ยนโมเมนตัมในปริมาตรควบคุม ย่อมเท่ากับแรงที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม บวกกับอัตราสุทธิของโมเมนตัมที่ไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุม ในครึ่งแรงของบัญญัตินี้ก็

คือกฎข้อที่สองของนิวตันในระบบติดตามมวล เพราะโมเมนตัมของมวลในปริมาตรควบคุมย่อมเปลี่ยนด้วยแรงที่มากระทำต่อปริมาตรควบคุมในขณะเวลานั้น แต่ในระบบอาจมีการไหลเข้าออกของโมเมนตัม ผ่านพื้นที่ผิวด้วย เรียกว่าโมเมนตัมฟลักซ์ ซึ่งโมเมนตัมฟลักซ์นี้ไหลเข้าออกปริมาตรควบคุมพร้อมกับการไหลเข้าออกของมวลนั้นเอง ดังนั้นโมเมนตัมของมวลในปริมาตรควบคุม จึงอาจเปลี่ยนไปได้เพราะปริมาณสุทธิของโมเมนตัมฟลักซ์ ที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุมอีกโสดหนึ่งด้วย

ความจริงกฎข้อนี้จะเป็นความจริงในกรณีของคุณสมบัติอื่นๆด้วยเสมอ กล่าวคือ สามารถกล่าวเป็นกลางๆ สำหรับปริมาณคุณสมบัติ ก. ได้ว่า อัตราการเปลี่ยนของ ก. ในปริมาตรควบคุม จะเกิดขึ้นเนื่องจากมีเหตุบางอย่างกระทำต่อปริมาตรควบคุม (ตามกฎทางฟิสิกส์ในระบบติดตาม) ผนวกกับอัตราไหลเข้าสุทธิของ ก. ซึ่งเกาะมากับมวลที่ไหลผ่านเข้าออกปริมาตรควบคุม

กฎนี้หรือกฎอื่นใดก็ตาม บัญญัติเฉพาะที่เวลาใดๆ เวลาหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นแรงก็คือแรงที่กระทำ ณ เวลานั้นๆ และอัตราการไหลเข้าออกก็คืออัตรา ณ เวลานั้น

หากเปรียบเทียบกับกฎอนุรักษ์มวล ได้หลีกเลี่ยงการใช้คำว่า “เพิ่มขึ้น” ในกรณีของโมเมนตัม เพราะโมเมนตัมเป็นสมบัติเชิงเวคเตอร์ ซึ่งบางครั้งการเพิ่มขึ้น มีความหมายกำกวม เนื่องจากเวคเตอร์มีทั้งขนาดและทิศทาง การเพิ่มขึ้นในทิศทางหนึ่งอาจเป็นการลดลงในอีกทิศทางหนึ่งก็เป็นได้

สมการควบคุมการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงเส้น

$$\frac{\partial\left(M\vec{V}\right)_{CV}}{\partial t}=\vec{F}_{CV}+\left[\dot{m}_{in}\vec{V}_{in}-\dot{m}_{out}\vec{V}_{out}\right] \tag{2.19}$$

เมื่อ $\vec{F}_{CV}$ คือ แรงที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม

$\vec{V}$ คือ เวคเตอร์ความเร็ว

ง. กฎอนุรักษ์โมเนมตัมเชิงมุม (Conservation of angular momentum) “อัตราการเปลี่ยนของโมเมนตัมเชิงมุมของมวลก้อนหนึ่งย่อมเท่ากับแรงบิด (Torque) ที่มากระทำต่อก้อนมวลนั้น” หรือกล่าวในเทอมปริมาตรควบคุมของกลศาสตร์ของไหล กล่าวได้ว่า “อัตราการเปลี่ยนของโมเมนตัมเชิงมุมในปริมาตรควบคุม ย่อมเท่ากับแรงบิดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม บวกกับอัตราสุทธิของโมเมนตัมเชิงมุมที่ไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุม”

สมการควบคุมการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม

$$\frac{\partial\left(M\vec{h}\right)_{CV}}{\partial t}=\vec{T}+\left[\dot{m}_{in}\vec{h}_{in}-\dot{m}_{out}\vec{h}_{out}\right] \tag{2.20}$$

เมื่อ $\vec{T}$ คือ แรงบิด

$\vec{h}$ คือ โมเมนตัมเชิงมุมต่อหน่วยมวล ซึ่งมีคำนิยามคือ $\vec{h} = \vec{r} \times \vec{V}$ โดยที่ $\vec{r}$ คือ เวคเตอร์พิกัด (Position vector)

จ. กฎอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) “อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานของก้อนมวล ย่อมเท่ากับอัตราการถ่ายโอยความร้อนและกำลังงานจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ก้อนมวล” หรือกล่าวในเทอมปริมาตรควบคุมของกลศาสตร์ของไหล กล่าวได้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในปริมาตรควบคุม ย่อมเท่ากับอัตราการถ่ายโอนความร้อน และงานจากสิ่งแวดล้อมเข้าปริมาตรควบคุม ของพลังงาน”

สมการควบคุมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\frac{\partial (Me)_{CV}}{\partial t} = \dot{Q}_{CV} - \dot{W}_{CV} + \left[\dot{m}_{in} e_{in} - \dot{m}_{out} e_{out}\right] \tag{2.21}$$

เมื่อ e คือ พลังงาน

Q_{CV} คือ ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ปริมาตรควบคุม

W_{CV} คือ งานจากสิ่งแวดล้อมที่ไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุม

สถิตยศาสตร์ของไหล (Fluid static)

กฎสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์กลศาสตร์เชิงสถิตยศาสตร์ ก็คือ กฎข้อที่หนึ่งของนิวตัน ที่บัญญัติโดยนัยว่า “วัตถุที่ปราศจากการกระทำของแรงลัพธ์สุทธิจากภายนอกย่อมคงสภาพนิ่งอยู่กับที่ดังเดิม หรือหากเดิมเคลื่อนที่อยู่ก็จะเคลื่อนที่ต่อไปด้วยความเร็วเดิมในทิศทางเดิม”[20]

ก. ค่าความดันที่จุดใดๆ (Pressure at a point) ความดัน หรือแรงดัน คือ “แรงต่อหน่วยพื้นที่ในเนื้อของไหลที่กระทำในแนวตั้งฉากกับพื้นที่ที่พิจารณา” ซึ่งต่างจากแรงเฉือน (Shear force) ที่นิยามว่าเป็น “แรงต่อหน่วยพื้นที่ที่กระทำในแนวขนานกับพื้นที่ที่พิจารณา” ตามกฎของนิวตัน “แรง” ไม่อาจเกิดขึ้นได้ลอยๆ ด้วยตัวของมันเอง ดังนั้นที่ผิวของอุปกรณ์ที่สัมผัสของไหลอยู่ก็เช่นเดียวกัน เช่น ผิวเครื่องบิน รถยนต์ เรือ หรือแม้แต่ผิวหนังของเรา แรงดันก็คือแรงต่อหน่วยพื้นที่ และแรงจะเกิดขึ้นลอยๆไม่ได้ แต่การเกิดแรงต้องขึ้นอยู่กับกฎข้อที่สองของนิวตัน ซึ่งตามกฎดังกล่าวแรงต้องเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมเท่านั้นดังสมการ

$$\vec{F} = \frac{d}{dt}\left(M\vec{V}\right) \tag{2.22}$$

หรือในทางกลับกัน โมเมนตัมเปลี่ยนแปลงได้เพราะมีแรงกระทำเท่านั้น

ข. แรงดันในของไหล แรงดันของของเหลวที่กระทำ ณ ส่วนใดๆ จะมีค่าเท่ากันทุกจุด โดยที่ยังไม่คิดน้ำหนักของของไหล ในความเป็นจริงจะเห็นว่า ความดันอากาศที่ระดับน้ำทะเลจะมีค่ามากกว่าบนภูเขา และความดันของน้ำใต้ท้องทะเลลึกจะสูงกว่าที่ระดับน้ำทะเล ความดันของน้ำทะเลเพิ่มขึ้นตามความลึก ยิ่งลึกมากความดันก็จะยิ่งมาก เป็นเพราะว่าของไหลมีน้ำหนักนั่นเอง จากนิยามของความดันถ้า A เป็นพื้นที่ราบ ความดันจะเท่ากันตลอด

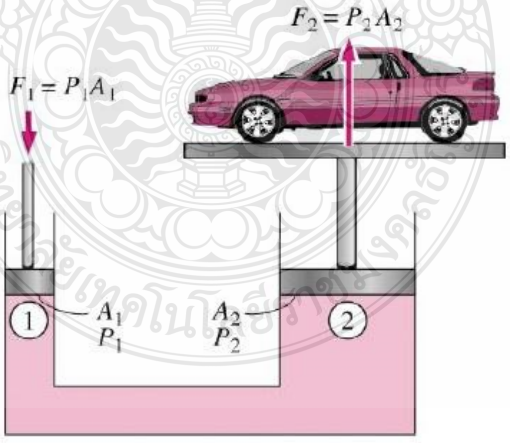
$$P = \frac{F}{A} \tag{2.23}$$

หน่วยมาตรฐานของความดันคือ นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ปาสคาล (Pa)

1 Pa = 1 N/m^2

1 bar ($dyne/cm^2$) = 10^5 Pa

ค. กฎของปาสคาล “เมื่อเพิ่มความดัน ณ ตำแหน่งใดๆ ในของเหลวที่อยู่นิ่งในภาชนะปิด ความดันที่เพิ่มขึ้นจะถูกส่งผ่านไปยังทุกๆจุดในของเหลวนั้น” กฎของปาสคาลใช้ในการอธิบายหลักการทำงานของเครื่องอัดไฮดรอลิก



รูปที่ 2.12 หลักการทำงานของเครื่องอัดไฮดรอลิก โดยการใช้กฎของปาสคาล [6]

$$P_1 = P_2 \tag{2.24}$$

หรือ

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \tag{2.25}$$

ดังนั้น

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1}{A_2} \tag{2.26}$$

พลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics)

การศึกษากฎพื้นฐานเกี่ยวกับการไหลของของไหลสามารถศึกษาการไหล โดยสมมุติฐานของไหลเป็นของในอุดมคติ (Ideal Fluid) ของไหลในอุดมคติ หมายถึง ของไหลที่ถูกสันนิษฐานว่าเป็นของไหลที่ไม่มีความหนืด ดังนั้นการไหลของของไหล แบบนี้ จึงไม่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานระหว่างชั้นของของไหลหรือระหว่างของไหลกับผิวสัมผัส การไหลของของไหลในอุดมคติจะไม่มีเทอมของการไหลวน (Eddy formation) หรือการสูญเสียพลังงานอันเกิดเนื่องจากแรงเสียดทาน สมมุติฐานนี้ สามารถทำให้พิจารณาการเคลื่อนตัวของของไหลเหมือนกับการเคลื่อนตัวของของแข็งบนแผ่นที่ไม่มีแรงต้านทาน ดังนั้นอาจจะพิจารณาแรงต่างๆที่ทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่โดยความเร่งเป็นไปตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน[22]

2.2.2 การควบคุมระบบไฮดรอลิก (Hydraulic system control)

ระบบไฮดรอลิก หมายถึง การไหลของของเหลวทุกชนิดที่ใช้ในระบบเพื่อเป็นตัวกลางการถ่ายทอดกำลังงานของไหลให้เป็นกำลังงานกล ในระบบไฮดรอลิกทั่วไปจะต้องมีอุปกรณ์พื้นฐานในการทำงานดังต่อไปนี้[23]

ก. อุปกรณ์ต้นกำลังไฮดรอลิก ทำหน้าที่เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนปั๊มน้ำมันไฮดรอลิกเพื่อส่งจ่ายให้แก่ระบบไฮดรอลิก ประกอบไปด้วยเครื่องยนต์หรือมอเตอร์ไฟฟ้า

ข. อุปกรณ์เก็บและปรับปรุงคุณภาพน้ำมันไฮดรอลิก ทำหน้าที่เป็นที่พักของน้ำมัน ขจัดสิ่งสกปรก ขจัดฟองอากาศ และระบายความร้อนของน้ำมันไฮดรอลิก ประกอบไปด้วยถังพักน้ำมันไฮดรอลิก ไส้กรองน้ำมันไฮดรอลิก และอุปกรณ์ประกอบอื่นๆที่ใช้กับถังพักน้ำมัน

ค. อุปกรณ์สร้างการไหล ทำหน้าที่สร้างอัตราการไหล ประกอบด้วยปั๊มไฮดรอลิกชนิดต่างๆ

ง. อุปกรณ์ควบคุมการทำงาน หมายถึงวาล์วควบคุมชนิดต่างๆในระบบไฮดรอลิก เช่น วาล์วควบคุมทิศทางการไหลใช้ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของก้านสูบ วาล์วควบคุมอัตราการไหลใช้จำกัดปริมาณน้ำมันที่ไหลเข้าลูกสูบเพื่อควบคุมความเร็วของก้านสูบ วาล์วควบคุมความดันใช้ควบคุมความดันในระบบ

จ. อุปกรณ์การทำงาน ทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังงานของไหลให้เป็นกำลังงานกล เช่น กระบอกสูบไฮดรอลิกหรือมอเตอร์ไฮดรอลิก

ฉ. อุปกรณ์ในระบบท่อทาง ทำหน้าเป็นท่อทางการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกในระบบ ประกอบไปด้วย แป๊ป (Pipe) ท่อ (Tube) สายน้ำมันไฮดรอลิก (Hoses) ข้องอ (Bendling) และข้อต่อชนิดต่างๆ (Fittings)

2.2.3 น้ำมันแร่หรือน้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic oil)

น้ำมันไอดรอลิก ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายทอดแรงอัดไปยังส่วนต่างๆของระบบ หล่อลื่นปั๊มและแบริ่งตลอดจนทำหน้าที่เป็นซีล และช่วยระบายความร้อน น้ำมันไฮดรอลิกที่ดียังจะต้องมีสารป้องกันการเกิดฟอง ป้องกันปฏิกิริยาอ็อคซิเดชั่นป้องกันสนิมและการกัดกร่อน นอกจากนี้ยังต้องสามารถแยกตัวจากน้ำได้ดี ในระบบไฮดรอลิกขนาดใหญ่แบบเก่าอาจใช้น้ำเป็นตัวกลางในการทอดกำลัง แต่น้ำไม่สามารถทำหน้าที่หล่อลื่นได้ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดสนิม น้ำมันไฮดรอลิกในปัจจุบันประกอบด้วย น้ำมันแร่พวกที่มีค่าดัชนีความหนืดสูง (HVI) ผสมด้วยสารเพิ่มคุณภาพเพื่อป้องกันการสึกหรอ ป้องกันปฏิกิริยาอ็อคซิเดชั่นป้องกันสนิม และการกัดกร่อนป้องกันการเกิดฟองและไม่รวมตัวกับน้ำถ้าหากอุปกรณ์ไฮดรอลิก ติดตั้งในบริเวณใกล้กับเปลวไฟ หรือหากเกิดไฟไหม้แล้วจะทำให้เกิดความเสียหายมาก เช่น ในเครื่องบิน หรือในอุตสาหกรรมบางประเภท น้ำมันไฮดรอลิกที่ใช้มักเป็นของเหลวชนิดไม่ติดไฟ ซึ่งอาจเป็นสารสะลายน้ำพวกไกลโคล (Glycol) หรือเป็นพวกสารสังเคราะห์ เช่น คลอริเนทเต็ดฟลูไฮโดรคาร์บอน หรือพวกฟอสเฟตเอสเทอร์ เป็นต้น[23]

หน้าที่หลักของน้ำมันไฮดรอลิกมี 4 ประการ คือ [23]

ก. การส่งผ่านกำลัง (Power transmission) น้ำมันไฮดรอลิกมีหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายทอดกำลังงานจากจุดหนึ่งไปสู่อีกจุกหนึ่งในระบบ เพื่อเปลี่ยนแปลงกำลังงานของไหลให้เป็นกำลังงานกล ซึ่งถ้าจะให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพแล้ว น้ำมันไฮดรอลิกที่ไหลในท่อทางหรือไหลผ่านวาล์ลควบคุมต่างๆจะต้องไหลไปได้อย่างราบรื่น แต่ถ้าเกิดมีความต้านทานการไหลมากๆก็จะทำให้กำลังงานสูญเสียไป และน้ำมันไฮดรอลิกจะต้องไม่ยุบตัวตามความดันในขณะทำงาน เช่น เมื่อปั๊มทำงานดูดอัดเพื่อส่งน้ำมันไปยังท่อทาง วาล์วเลื่อนทำงาน และในขณะที่กระบอกสูบหรือมอเตอร์ไฮดรอลิกกำลังทำงานขับโหลด

ข. การหล่อลื่น (Lubrication) น้ำมันไฮดรอลิกจะทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นและลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของอุปกรณ์ต่างๆในระบบ เช่น ชิ้นส่วนของปั๊ม มอเตอร์ไฮดรอลิก ลูกสูบ กระบอกสูบ แกนวาล์ว และส่วนประกอบต่างๆที่มีการเคลื่อนที่ โดยที่น้ำมันไฮดรอลิกจะมีสภาพเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ กั้นระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่เสียดสีกันทั้งในขณะที่ระบบทำงานและหยุดนิ่ง ฟิล์มน้ำมันไฮดรอลิกจะช่วยในการหล่อลื่นเพื่อลดการเสียดสีของผิวสัมผัส แผ่นฟิล์มของน้ำมันไฮดรอลิกจะต้องมีความหนืดพอเหมาะที่จะแทรกซึมเข้าไปในรูเล็กๆ และรอยต่อของชิ้นส่วน

ภายในอุปกรณ์ และสามารถรับน้ำหนักของวัตถุที่กดทับหรือรับแรงกดอยู่ได้ ซึ่งสมบัติดังกล่าวเรียกว่า ความแข็งแรงของฟิล์ม (Film strength) นอกจากนี้น้ำมันไฮดรอลิกยังควรมีสมบัติในการลื่นไหลได้ดีด้วย กล่าวคือ ในขณะที่น้ำมันไฮดรอลิกเป็นฟิล์มยึดติดกับชิ้นส่วนใดก็สามารถจะลื่นไหลไปกับชิ้นส่วนนั้นๆ และช่วยให้เคลื่อนไปได้อย่างคล่องตัวด้วย สมบัติข้อนี้เรียกว่า ความลื่น (Lubricity)

ค. การซีล (Sealing) น้ำมันไฮดรอลิกจะทำหน้าที่เป็นซีลด้วยเพื่อให้มีการรั่วซึมเกิดขึ้นน้อยที่สุด ภายในชิ้นส่วนของอุปกรณ์ในระบบไฮดรอลิกเมื่อมีความดันเกิดขึ้น การซีลนี้จะขึ้นอยู่กับความหนืดของน้ำมันไฮดรอลิกแต่ละชนิด

ง. การระบายความร้อน (Cooling) การไหลเวียนของน้ำมันไฮดรอลิกในระบบขณะการทำงานจะช่วยถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ต่างๆ อันเนื่องมาจากการสูญเสียกำลังงานในระบบความร้อนนี้ก็จะถูกพาไปโดยน้ำมันและไหลลงสู่ถังพัก แล้วแผ่กระจายความร้อนผ่านผนังของถังพักได้

สมบัติความหนืด (Viscosity) ของน้ำมันไฮดรอลิกและของเหลว [24]

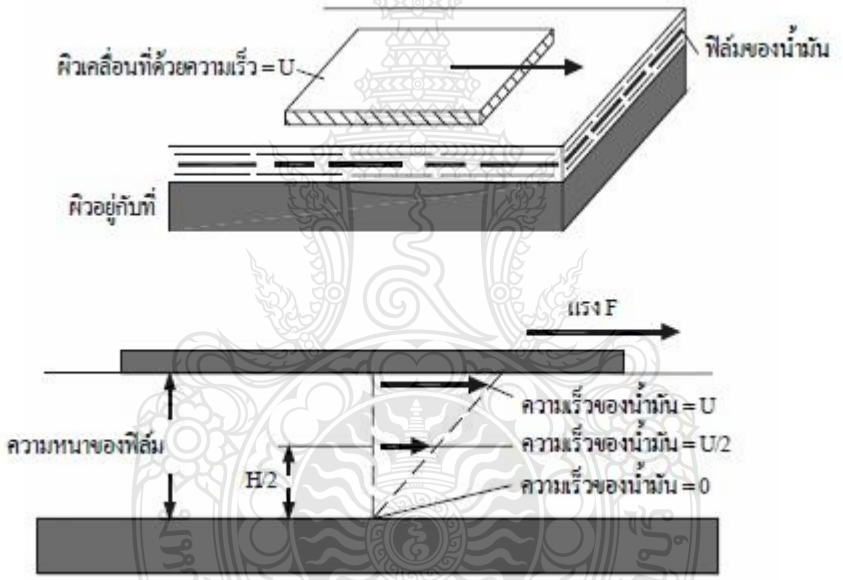
ความหนืดเป็นสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัส ความหนืดคือความข้นของน้ำมันโดยวัดที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง น้ำมันที่มีความหนืดต่ำจะไหลง่าย แต่ฟิล์มหล่อลื่นก็บางมากด้วย สำหรับน้ำมันที่มีความข้นสูงย่อมไหลยาก แต่จะมีฟิล์มหล่อลื่นหนากว่าหรือแข็งกว่าน้ำมันที่มีความข้นต่ำ หน่วยวัดความหนืดมีหลายระบบและอุณหภูมิที่วัดก็ต่างๆกัน ซึ่งอาจสรุปได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ระบบ หน่วย และอุณหภูมิที่วัดความหนืดของน้ำมัน [24]

ประเภทหรือระบบ	หน่วยความหนืด	อุณหภูมิที่ใช้วัด
1. ระบบสากล (เมตริก)	เซนติสโตก (Centistoke; cSt)	40 และ100 องศาเซลเซียส
2. สหรัฐอเมริกา	วินาทีเซย์โบลต์ (Saybolt Universal Seconds; SUS)	100 และ 210 องศาฟาเรนไฮต์
3. สหราชอาณาจักร	เรดวูด No.1 (Redwood Seconds; RW1)	70 ,100, 140,200 องศาฟาเรนไฮต์
4.เยอรมันและประเทศในยุโรป	อิงเลอร์ (Engler Degree; E.)	20 ,50, 100 องศาเซลเซียส

หลักการวัดค่าของความหนืดตามที่แสดงในรูปที่ 2.14 ประกอบด้วยแผ่นวัตถุถูกดึงไปบนฟิล์มของน้ำมันด้วยความเร็วสม่ำเสมอ ฟิล์มของน้ำมันติดอยู่ทั่วผิววัตถุที่เคลื่อนที่และที่อยู่กับที่ ซึ่ง

เมื่อพิจารณาให้น้ำมันประกอบขึ้นด้วยชั้นหลายๆชั้น ชั้นน้ำมันที่ติดอยู่กับผิวที่เคลื่อนที่ก็เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วเดียวกับผิวที่เคลื่อนที่ (U) ส่วนชั้นน้ำมันที่ติดอยู่กับผิวที่อยู่กับที่ก็จะมีความเร็วเป็นศูนย์ ชั้นน้ำมันที่อยู่ระหว่างชั้นบนสุด และล่างสุดก็จะถูกดึงไปด้วยน้ำมันที่อยู่ด้านบนถัดไปให้มีความเร็วส่วนหนึ่งของความเร็ว U ซึ่งความเร็วของแต่ละชั้นของน้ำมันดังกล่าวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะจากผิววัตถุที่อยู่กับที่ แรงที่ต้องใช้ในการดึงให้ผิววัตถุอันบนเคลื่อนที่ไปนี้คือ แรงที่ต้องเอาชนะความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นน้ำมันนั่นเอง และเนื่องจากแรงนี้เป็นผลมาจากความหนืด โดยแรงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนืด ดังนั้นความหนืดก็สามารถหาได้จากการวัดแรงที่ต้องใช้เพื่อเอาชนะความเสียดทานของน้ำมัน ความหนืดที่หาได้ในที่นี้เรียกว่า ความหนืดสัมบรูณ์ (Absolute Viscosity) หรือความหนืดเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Viscosity)



รูปที่ 2.13 หลักการของความหนืด[24]

หน่วยความหนืดเชิงพลศาสตร์ที่นิยมใช้กันคือ หน่วยเป็นพอยส์ (Poise :P) ซึ่งเป็นหน่วยในระบบCGS (Centimetre Gram Second)

1 Poise = 1 Dyne s / cm2 = 1g / cm.s

1 Centipoise (cP) = 1 x 10- 2 Poise (P)

โดยทั่วไปเครื่องมือที่ใช้วัดค่าความหนืด จะไม่สามารถวัดค่าความหนืดเชิงพลศาสตร์ได้โดยตรงดังนั้น จึงได้กำหนดค่าความหนืดที่เรียกว่า ความหนืดเชิงจลศาสตร์ (Kinematic Viscosity) โดยให้ความหนืดเชิงจลศาสตร์ เท่ากับความหนืดเชิงพลศาสตร์ หารด้วยความหนาแน่นของน้ำมันหรือของไหลนั้น ๆ ดังสมการ

$$\upsilon = \eta / \rho \qquad (2.27)$$

เมื่อ

ν = ความหนืดเชิงจลศาสตร์ (สโตก)

η = ความหนืดเชิงพลศาสตร์ (พอยส์)

ρ = ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

หน่วยความหนืดเชิงจลศาสตร์ที่นิยมใช้กันก็คือหน่วย Stoke (St) ซึ่งเป็นหนึ่งในระบบ CGS เช่นเดียวกัน โดย

1 Stoke (St) = 1 mm^2/s

1 Centistoke (cSt) = 1 x 10- 2 Stoke (St)

ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะไม่คงที่ แต่จะแปรผันตามสภาวะการใช้งานโดยเฉพาะอย่างยิ่งจะแปรผันกับอุณหภูมิและความดันในการใช้งาน ในด้านของอุณหภูมิความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำมัน ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นของเหลวจะขยายตัว โมเลกุลของน้ำมันจะเคลื่อนออกห่างกัน ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลลดลง และเป็นผลให้ความหนืดลดลงด้วย

สมบัติทางเคมีของน้ำมันไฮดรอลิก (Chemical properties)[23]

สมบัติทางเคมีของน้ำมันไฮดรอลิก เป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยในการตัดสินคุณภาพและอายุการใช้งาน และสมบัติที่สำคัญที่สุดคือ ความต้านทานการเกิดสนิม (Oxidation resistance) เพราะของเหลวทั่วไปมักจะเกิดสนิมง่ายทำให้อายุการใช้งานสั้นลง

การเกิดสนิมของน้ำมันไฮดรอลิกเป็นปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างน้ำมันกับอากาศ ซึ่งก่อให้เกิดสารใหม่นอกเหนือไปจากส่วนประกอบอื่นๆปะปนอยู่ในน้ำมัน ทำให้น้ำมันมีสีเข้มขึ้นและเหนียวขึ้น นอกจากนี้สารประกอบบางอย่างที่ละลายออกมาอาจมีสมบัติเป็นกรด ซึ่งจะกัดกร่อนชิ้นส่วนที่เป็นโลหะภายในระบบ

สำหรับสารประกอบประเภทยางที่ปะปนอยู่ในน้ำมันนั้น เมื่อได้รับความร้อนก็จับตัวกันเป็นก้อนยางเหนียว ซึ่งอนุภาคของสารนี้จะลอยปะปนหมุนเวียนอยู่ภายในระบบด้วย นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นๆที่เกิดจากสนิมจับตัวกลายเป็นสภาพน้ำมันขี้โล้ เมื่อปะปนกับผงโลหะก็จะทำให้เกิดปัญหาในระบบเช่น ทำให้อุปกรณ์ต่างๆติดขัดจากการอุดตัน การที่น้ำมันในระบบเกิดสนิมมากขึ้นเนื่องมาจากสาเหตุหลายประการคือ

ก. อุณหภูมิ (Temperature) อุณหภูมิที่สูงเกินอัตราที่กำหนดเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ปริมาณของสนิมเพิ่มมากขึ้น โดยปกติอุณหภูมิน้ำมันไฮดรอลิกในระบบทำงานอยู่ประมาณ 135 องศาฟาเรนไฮต์ แต่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอีก 18-20 องศา จำทำให้เกิดสนิมมากขึ้น แล้วอายุการใช้งานของน้ำมันไฮดรอลิกก็จะลดลงครึ่งหนึ่ง และถ้าระบบทำงานที่อุณหภูมิ 200 องศาฟาเรนไฮต์ อายุการใช้

งานจะลดลงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 135 องศาฟาเรนไฮต์ ก็จะเกิดสนิมในน้ำมันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ข. ปริมาณอากาศ ในขณะที่ระบบไฮดรอลิกทำงานจะมีอากาศปะปนอยู่ทั่วไป ซึ่งจะทำให้เกิดสนิมเพราะเมื่อเครื่องจักรหยุดการทำงาน อากาศที่ละลายอยู่ในน้ำมันก็จะแยกตัวออกไปและทำปฏิกิริยากับผิวโลหะ ที่เป็นเช่นนี้เพราะในสภาพความดันบรรยากาศปกติ น้ำมันไฮดรอลิกจะดูดซึมอากาศได้ถึง 140 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรของอากาศทั้งหมด

ค. ปริมาณสิ่งสกปรกและฝุ่นผงที่ปะปนอยู่ในระบบ สิ่งสกปรกต่างๆ เช่น ฝุ่นละออง จารบี น้ำ และพวกเศษโลหะที่เกิดจากการสึกหรอเนื่องจากการทำงาน โดยเฉพาะพวกเศษทองแดงและทองเหลือง สิ่งต่างๆเหล่านี้เป็นเสมือนตัวเร่งที่ทำให้เกิดสนิมและความสกปรกอย่างมาก

2.2.4 สมบัติเชิงกลของโลหะ [25]

ความเค้น (Stress)

ความเค้นหมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดหาค่านี้ เราจึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่า แรงกระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน การหาค่าความเค้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{2.28}$$

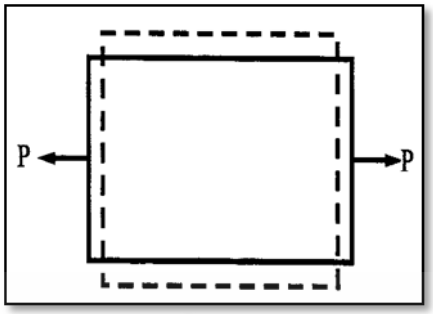
เมื่อ σ คือ ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็นปาสกาล (Pa, 1 Pa = 1N/m^2) หรือ kgf/mm^2

P คือ แรงภายนอกที่มากระทำ มีหน่วยเป็น N หรือ kgf หรือ

A คือ พื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำ : m^2 หรือ mm^2 หรือ

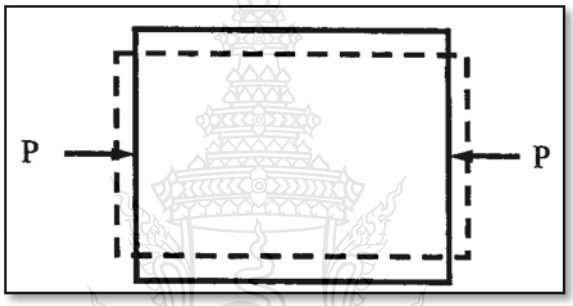
โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำโดยในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดจะมีทั้ง 3 แบบนี้พร้อม ๆ กัน

1. ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน ดังรูปที่ 2.14



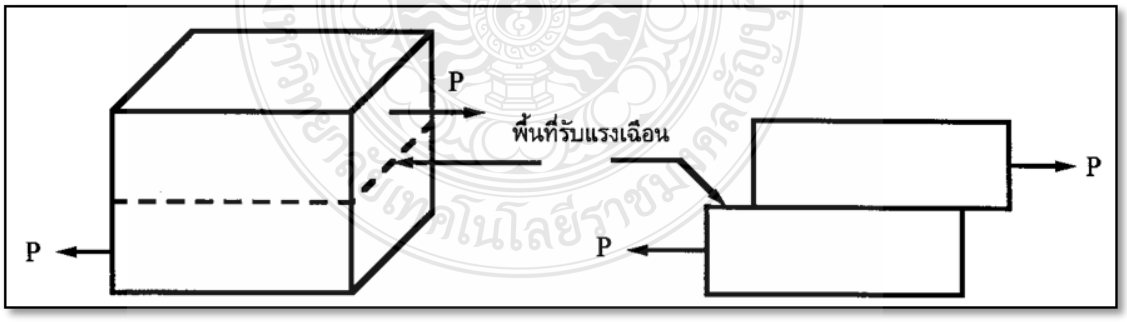
รูปที่ 2.14 แรงดึง (Tensile) [26]

2. ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แรงกด (Compression) [26]

3. ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันดังรูป มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง A ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน ดังรูปที่ 2.16



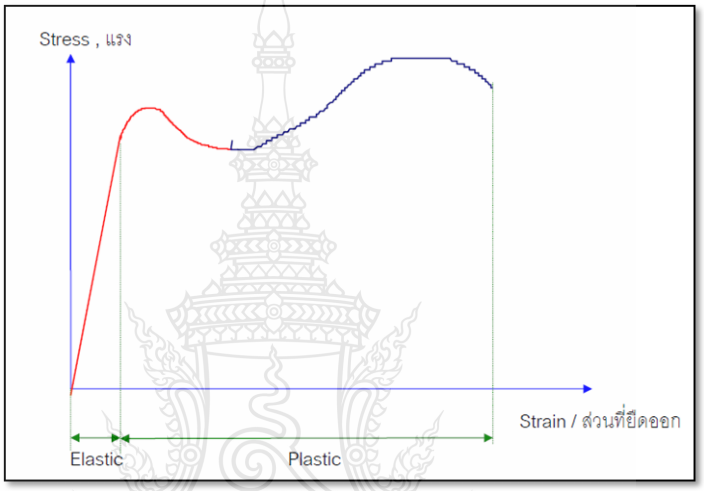
รูปที่ 2.16 แรงเฉือน (Shear) [26]

ความเครียด (Strain)

ความเครียด คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งลักษณะของมันสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

1. การเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ พวกยางยืด, สปริง ถ้าเราดึงมันแล้วปล่อยมันจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

2. การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain)เป็นการเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิม



รูปที่ 2.17 ความเค้นความเครียดของการดึงวัสดุ [26]

วัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากระทำ หรือความเค้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินพิกัดการคืนรูป (Elastic Limit) แล้ว วัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behavior) แต่ถ้าความเค้นเกินกว่าพิกัดการคืนรูปแล้ววัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation) นอกจากความเครียดทั้ง 2 ชนิดนี้แล้ว ยังมีความเครียดอีกประเภทหนึ่งซึ่งพบในวัสดุประเภทโพลีเมอร์ เช่น พลาสติก เรียกว่าความเครียดกึ่งอิลาสติกจะมีลักษณะที่เมื่อปราศจากแรงกระทำวัสดุจะมีการคืนรูป แต่จะไม่กลับไปจนมีลักษณะเหมือนเดิม การคำนวณหาค่าความเครียดมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

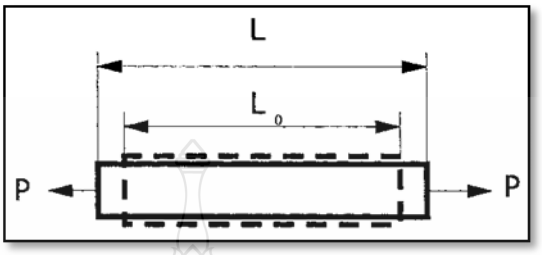
1 แบบเส้นตรง ความเครียดที่วัดได้จะเรียกว่า ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกด ดังรูปที่ 2.18 ค่าของความเครียดจะเท่ากับความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม ดังสมการ

$$e = \frac{\Delta L}{L_o} \tag{2.29}$$

เมื่อ e = ความเครียดเชิงเส้น

ΔL = ความยาวที่เปลี่ยนไป $(L - L_o)$

L_o = ความยาวเดิมของวัสดุที่สนใจ หรือ Gage Length



รูปที่ 2.18 ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) [26]

2 แบบเฉือน เรียกว่า ความเครียดเฉือน (Shear Strain) ใช้กับกรณีที่แรงที่กระทำมีลักษณะเป็นแรงเฉือน (τ) ดังรูปที่ 2.19 ค่าของความเครียดจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่างระนาบ ดังสมการ

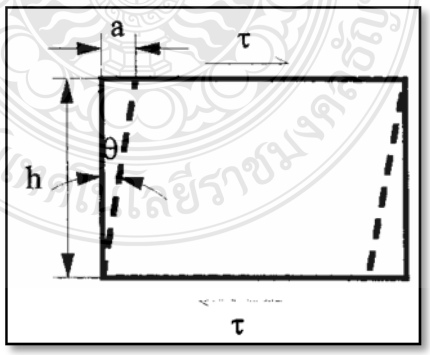
$$\gamma = \frac{a}{h} \tag{2.30}$$

เมื่อ γ = $\tan\theta \approx \theta$ (Radian ในกรณีที่เป็นมุมเล็ก)

a = ระยะที่เคลื่อนที่ไป (Displacement)

h = ระยะห่างระหว่างระนาบ

θ = มุมที่เปลี่ยนไป

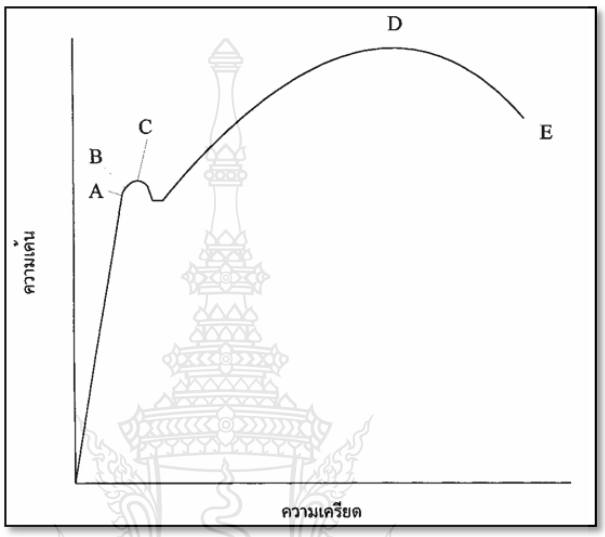


รูปที่ 2.19 ความเครียดเฉือน (Shear Strain) [26]

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship)

ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก

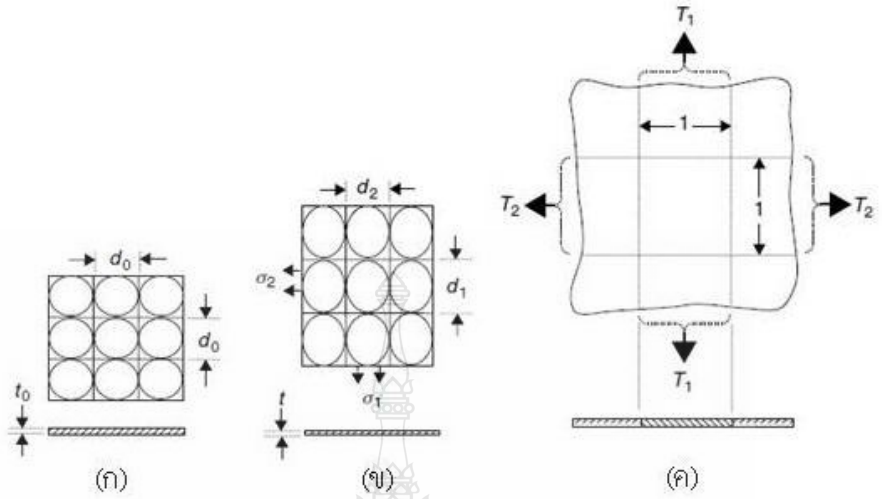
โดยจะพลอตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ดังรูปที่ 2.20 การทดสอบแรงดึง นอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ เหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.20 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point) [26]

2.2.5 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโลหะแผ่น

การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น (Deformation of Sheet in Plane Stress) ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูปบนระนาบความเค้น(Plane stress) พิจารณา (Workhardening) ของวัสดุ ซึ่งเข้ากำลังประยุกต์ใช้ทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูปใน รูปที่ 2.21 ลักษณะที่ยังไม่มีการเปลี่ยนรูปที่ความหนา t_0 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d_o หรือตารางขนาด d_o แสดงในรูปที่ 2.21 (ก) ดังนั้นในระหว่างการเปลี่ยนรูปวงกลมจะเปลี่ยนไปเป็นวงรี แกนของ Major คือ d_1 แนวแกนของ Minor คือ d_2 ถ้าปรับตารางสี่เหลี่ยมให้เข้ากับทิศทางหลักของกริดวงกลม จะกลายเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังรูปที่ 2.21 (ข) ส่วนความหนา คือ t ตามที่กรณีแสดงดังรูปที่ 2.21 (ค) ความเค้นที่ทำให้เปลี่ยนรูปคือ σ_1 และ σ_2 [13][25]

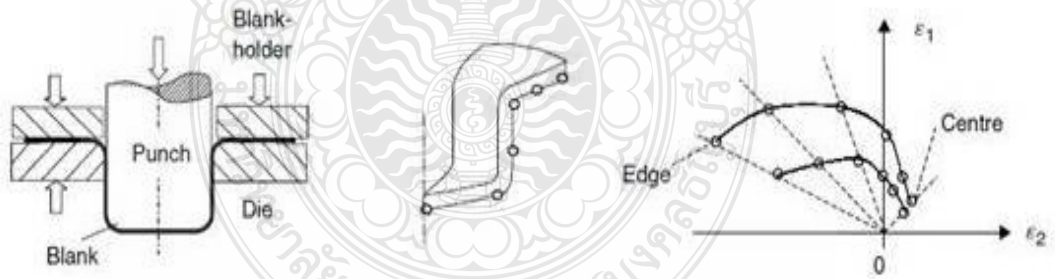


(ก) ขณะที่ยังไม่เปลี่ยนรูปกริดวงกลมที่อยู่ตารางคงสภาพเดิม (ข) เมื่อมีการเปลี่ยนรูปกริดวงกลมจะเปลี่ยนเป็นรูปวงรี ขนาดของแกนหลักคือ d_1 และขนาดแกนรอง คือ d_2 (ค) การดึง ,T, หรือแรงส่งผ่านต่อหน่วยความกว้าง(ก)

รูปที่ 2.21 แสดงตารางวงกลมบนโลหะแผ่น [13]

2.2.6 แผนภาพความเครียด (Strain diagram)

ความเครียดเฉพาะจุดที่เกิดขึ้นในรูปที่ 2.23 สามารถวัดได้จากกริดวงกลมแบบรูปที่ 2.22



(ก) การขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก (ข) ชิ้นส่วนย่อยของถ้วยทรงกระบอกแสดงค่าความเครียดที่วัดได้ (ค) ผลค่าความเครียดที่ได้จากการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก

รูปที่ 2.22 แผนภาพความเครียดตำแหน่งต่างๆ ของถ้วยทรงกระบอก [13]

ค่าความเครียดหลัก (Principal Strains)

ความเครียดหลักที่เกิดขั้นจุดสุดท้ายของกระบวนการ

$$\varepsilon_1 = \ln\frac{d_1}{d_0}; \qquad \varepsilon_2 = \ln\frac{d_2}{d_0}; \qquad \varepsilon_3 = \ln\frac{t}{t_0}; \tag{2.31}$$

อัตราส่วนของความเครียด (Strain ratio)

โดยปกติเส้นแนวความเครียด (Strain Path) ยังคงเป็นสัดส่วนเส้นตรง

$$\beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{\ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right)}{\ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right)} \tag{2.32}$$

ความเครียดหนาและความหนา (Thickness strain and Thickness)

จากสมการ 2.24 ความเครียดหาได้โดยการวัดความหนาหรือหาได้จากความเครียดหลัก (Major strain) ความเครียดรอง (Minor strain) โดยให้พิจารณาวัดการเปลี่ยนรูปที่ปริมาตรคงที่

$$\varepsilon_3 = \ln\frac{t}{t_0} = -(1+\beta)\varepsilon_1 = -(1+\beta)\ln\frac{d_1}{d_0} \tag{2.33}$$

จากสมการ 2.26 ความหนาโดยทั่วไปคือ

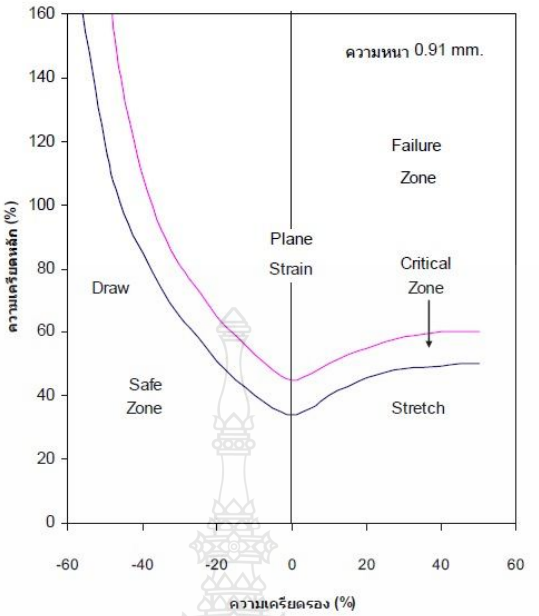
$$t = t_0\exp(\varepsilon_3) = t_0\exp\left[-(1+\beta)\varepsilon_1\right] \tag{2.34}$$

หรืออีกแนวทางหนึ่งที่ปริมาตร $td_1d_2 = t_0d_0^2$ ที่ปริมาตรคงที่

$$t = t_0\frac{d_0^2}{d_1d_2} \tag{2.35}$$

2.2.7 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของโลหะแผ่น

ไดอะแกรมขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Curve : FLC หรือ Forming Limit Diagrams : FLD) ใช้ในการวาดภาพจำลองขีดความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะต่างๆ ซึ่งจะสัมพันธ์กับภาพรวมของความเครียด ผลของมันหากไม่เกิดการแตกหักก็จะเกิดการหดตัวอย่างหนึ่งอย่างใดเสมอ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ในห้องปฏิบัติการทดสอบ [25]



รูปที่ 2.23 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ความหนา 0.91 mm. [25]

สำหรับเครียดในตำแหน่งของการคอดขยาย (Diffuse necking) สามารถคำนวณได้จากสมการของ Hosford, William F.

$$\varepsilon_1^* = \frac{2n\left(1+\rho+\rho^2\right)}{\left(1+\rho\right)\left(2\rho^2-\rho+2\right)} \tag{2.36}$$

โดย $\rho = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$; ซึ่งความเครียดในตำแหน่งขึงตรึง หรือความเครียดจากการดึง 2 ทิศทางเท่ากับ 1

2.2.8 โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-ferrous metal)

โลหะนอกกลุ่มเหล็ก คือ โลหะและโลหะผสมทุกชนิดที่ไม่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ โลหะที่ไม่ใช่เหล็ก ได้แก่ ดีบุก อะลูมิเนียม สังกะสี ตะกั่ว ทองแดง ทองคา เงิน ทองคา ขาว พลวง แมกนีเซียม เป็นต้น

อะลูมิเนียม (Aluminum) อะลูมิเนียมและโลหะผสมของอะลูมิเนียมมีความหนาแน่นต่ำ (2.7 g/cm3) นำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี ทนการกัดกร่อนดีในสภาวะแวดล้อมบางสภาวะรวมทั้งในบรรยากาศ โลหะอะลูมิเนียมง่ายต่อการขึ้นรูปเนื่องจากมีความเหนียวสูง เช่นอะลูมิเนียมฟอยล์ที่ได้จากการรีดอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ เนื่องจากอะลูมิเนียมมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC จึงมีสมบัติเหนียวแม้ที่อุณหภูมิต่ำ อะลูมิเนียมมีจุดหลอมเหลวต่ำ (660 oC, 1220oF) ทำให้ไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ได้สมบัติทางกลของอะลูมิเนียมอาจเพิ่มขึ้นได้โดยการขึ้นรูปเย็นและการเติมธาตุผสม แต่วิธีการดังกล่าวทำให้ สมบัติต้านทานการกัดกร่อนลดลง ธาตุที่นิยมใช้ผสมเป็นหลักคือ ทองแดงแมกนีเซียม ซิลิกอน แมงกานีส และ สังกะสี โลหะผสมที่ไม่สามารถอบชุบได้จะประกอบด้วยเฟสเดียวทำให้การ

เพิ่มความแข็งแรงได้โดยการทำให้เป็นสารละลายของแข็งเท่านั้น สำหรับอะลูมิเนียมผสมอื่นๆ สามารถอบชุบได้ (ชุบแข็งแบบตกตะกอน) เพราะธาตุผสมที่เติมลงไปทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟสที่สอง ซึ่งอาจไม่ใช่สารประกอบอะลูมิเนียมก็ได้ เช่น MgZn2

อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (อนุกรม 1xxx) ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมจะมีความ บริสุทธิ์ของอะลูมิเนียมที่ 99.0 เปอร์เซ็นต์ ถึง 99.9เปอร์เซ็นต์ อะลูมิเนียมในกลุ่มนี้มีความต้านทาน การกัดกร่อนได้ดี สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี และยังสามารถสะท้อนแสงได้ดีจึงนิยมใช้ในการผลิตแผงสะท้อนแสงในไฟหน้ารถยนต์ นอกจากนั้นยังสามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่ายทั้งการตัด เฉือนและขึ้นรูปเย็นด้วยกระบวนการต่างๆ ความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ แต่ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์จะมีข้อเสียคือในด้านของความแข็งแรง และคุณสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่น แต่ก็สามารถปรับปรุงได้โดยการเติมธาตุเจืออื่นเพื่อให้คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป หรือการขึ้นรูปเย็นคือการทำให้แข็งได้ด้วยความเค้น (Strain Hardening)

ทองแดง (Copper) ทองแดงอยู่ในตารางธาตุหมู่ 29 เป็นที่ทราบกันว่ามนุษย์ใช้ประโยชน์จากทองแดงมาไม่น้อยกว่า 10,000 ปี พบหลักฐานว่ามนุษย์สามารถหลอมสกัดทองแดงให้บริสุทธิ์ได้เมื่อประมาณ 5000 ปีก่อนคริสตกาล ซึ่งเป็นช่วงก่อนที่มนุษย์จะรู้จักกับทองคำ โดยมนุษย์รู้จักทองคำเมื่อประมาณ 4000 ปีก่อนคริสตกาล การถลุงทองแดงจากแร่ขั้นแรกคือการแยกแร่ที่ต้องการออกจากสิ่งเจือปนหรือ กากแร่อาจใช้วิธีการลอยตัว โดยนำแร่ที่บดละเอียดแล้วผสมเข้ากับน้ำ น้ำมันและสารซักล้างในถังผสม จากนั้นกวนและผ่านอากาศเข้าไปในของเหลวที่อยู่ในถังผสมตลอดเวลา เพื่อทำให้มีฟองเกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ฟองอากาศ และน้ำมันไปเกาะอยู่กับอนุภาคของแร่และลอยตัวอยู่ด้านบน ส่วนกากแร่จะจมลงอยู่ด้านล่าง เมื่อตักฟองที่ลอยอยู่ด้านบนออกและทำให้แห้ง จะได้ผลแร่ที่มีปริมาณทองแดงเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 15 โดยมวล ขั้นต่อไปนำแร่มาเผาในอากาศ เรียกกระบวนการนี้ว่า การย่างแร่ ไอร์ออน(II)ซัลเฟตบางส่วนจะถูกออกซิไดส์เป็นไอร์ออน(II)ออกไซด์ ดังสมการ

$$2CuFeS2(s) + 3O2(g) \longrightarrow 2CuS(s) + 2FeO(s) + 2SO2(g) \qquad (2.37)$$

กำจัดไอร์ออน(II)ออกไซด์ออกไป โดยนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปเผารวมกับออกไซด์ของซิลิคอนในเตาถลุงอุณหภูมิประมาณ 1100 °C ไอร์ออน(II)ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของซิลิคอนได้กากตะกอนเหลวซึ่งแยกออกมาได้ ดังสมการ

$$FeO(s) + SiO2(s) \longrightarrow FeSiO3(l) \qquad (2.38)$$

ส่วนคอบเปอร์(II) ซัลไฟด์เมื่ออยู่ในที่มีอุณหภูมิสูงจะสลายตัวได้เป็นคอบเปอร์(I)ซัลไฟด์ในสถานะของเหลวซึ่งสามารถแยกออกได้ในขั้นตอนสุดท้ายเมื่อแยกคอปเปอร์(I)ซัลไฟด์ในอากาศ บางส่วนจะเปลี่ยนเป็นคอปเปอร์(I)ออกไซด์ดังสมการ

$$2Cu_2S(s) + 3O_2(g) \longrightarrow 2Cu_2O(s) + 2SO_2(g) \quad (2.38)$$

และคอปเปอร์(I)ออกไซด์กับคอปเปอร์(I)ซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยากันโดยมีซัลไฟด์ไอออนทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ ได้โลหะทองแดงและแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังสมการ

$$2Cu_2O(s) + Cu_2S(s) \longrightarrow 6Cu(l) + SO_2(g) \quad (2.39)$$

ทองแดงที่ถลุงได้ในขั้นนี้ยังมีสิ่งเจือปนจึงต้องนำไปทำให้บริสุทธิ์ก่อน การทำทองแดงให้บริสุทธิ์โดยทั่วไปจะใช้วิธีแยกสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้า ทองแดงสามารถดัดได้ง่าย จึงใช้แพร่หลายในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่นสายลวดทองแดง ท่อน้ำทองแดงลูกบิด และของอื่น ๆ ที่ติดตั้งในบ้าน เครื่องจักรไฟฟ้า โดยเฉพาะมอเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รีเลย์ไฟฟ้า และสวิตช์ไฟฟ้า หลอดสุญญากาศ หลอดรังสีแคโทด (cathode ray tube) และแมกนีตรอนในเตาอบไมโครเวฟ หลอดนำคลื่นไฟฟ้า (Waveguide) สำหรับรังสีไมโครเวฟ

ทองเหลือง (Brass) คือ โลหะผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสี โดยสังกะสีสามารถละลายได้ในทองแดงในรูปของสารละลายของแข็ง (Solid Solution) คุณสมบัติทางด้านความแข็งแรง ความแข็ง ความเหนียว ความต้านทานการกัดกร่อน และมีความสามารถในการขึ้นรูปและคุณสมบัติอื่น ๆ ตลอดจนสีของทองเหลืองเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของสังกะสีที่ผสม ทองเหลืองที่ใช้งานในทางวิศวกรรม จะมีปริมาณสังกะสีไม่เกิน 40% เนื่องจากหากมีสังกะสีมากเกินไปจะทำให้ทองเหลืองมีความเปราะมากขาดความ เหนียว จึงทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปได้ตามความต้องการ ในอุตสาหกรรมผลิตทองเหลืองทั่วๆไป จะแยกมาตรฐานออกไปสองกลุ่ม คือ ประเภทรีดเป็น แท่ง หรือเป็นแผ่น (Wrough Copper Alloys) กับอีกกลุ่มหนึ่งจะเป็นประเภทหล่อ (Cast Copper) ซึ่งทั้งสองกลุ่มจะแยกชั้นคุณภาพ ในการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกล มักจะกล่าวถึงชื่อทองเหลืองที่รู้จักและใช้งานกันอยู่เป็นประจำซึ่งมีอยู่ ไม่มากนัก โดยแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆดังต่อไปนี้

- Admiralty Brass ประกอบด้วย สังกะสี 30% ดีบุก 1% ซึ่งยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา dezincification

- Alpha Brasses (Prince's Metal) ประกอบด้วยสังกะสีน้อยกว่า 35% ทองเหลืองชนิดนี้สามารถตีเป็นแผ่นได้ เหมาะกับการใช้งานอุณภูมิต่ำ

- Low Brass เป็นโลหะผสมของทองแดงกับสังกะสี มีสังกะสี 20% มีสีทองอ่อนๆ สามารถทำให้เป็นเส้นบางๆได้ดีเยี่ยม ใช้ทำท่อส่งน้ำ/แก๊สที่ยืดหยุ่นสูง

แมงกานีสจะให้ผลในการเพิ่มกำลังวัสดุของทองเหลืองได้มาก จึงเรียกทองเหลืองที่มีแมงกานีสผสมอยู่นี้ว่าบรอนซ์แมงกานีส (Manganese Bronze)

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 ในปี 2000 Kang Dachang [4] ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง Astudy on hydrodynamic deep drawing equipment โดยทำการศึกษาวิจัยถึงการทำงานของอุปกรณ์ในกระบวนการ Hydrodynamic deep drawing ซึ่งประกอบไปด้วย 1. ชุดแม่พิมพ์ (Die set), 2. ชุดควบคุมไฮดรอลิก (Hydrolic control) และ 3. ชุดควบคุมการทำงานอัตโนมัติ (Automatic control) โดยการศึกษาวิจัยชิ้นนี้สรุปได้ว่า ชุดแม่พิมพ์ในกระบวนการ HDD เป็นอุปกรณ์มาตรฐานในการอัดขึ้นรูปครั้งเดียว มีความเหมาะสมสำหรับกระบวนขึ้นรูปแบบ HDD ลักษณะของการกดยึดแผ่นโลหะในรายงานฉบับนี้เป็นโครงสร้างและทฤษฎีใหม่ที่มีการออกแบบขึ้น เพื่อให้ประหยัดพลังงานและสามารถใช้งานได้กับเครื่องจักรกลต่างๆ ได้มากมาย แรงดันของของเหลวภายในระบบของการทำงานควบคุมโดยอุปกรณ์ลดแรงดัน (Pressure reducer)ในปี 2000 Kang Dachang ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง Astudy on hydrodynamic deep drawing equipment [4] โดยทำการศึกษาวิจัยถึงการทำงานของอุปกรณ์ในกระบวนการ Hydrodynamic deep drawing ซึ่งประกอบไปด้วย 1. ชุดแม่พิมพ์ (Die set), 2. ชุดควบคุมไฮดรอลิก (Hydrolic control) และ 3. ชุดควบคุมการทำงานอัตโนมัติ (Automatic control) โดยการศึกษาวิจัยชิ้นนี้สรุปได้ว่า ชุดแม่พิมพ์ในกระบวนการ HDD เป็นอุปกรณ์มาตรฐานในการอัดขึ้นรูปครั้งเดียว มีความเหมาะสมสำหรับกระบวนขึ้นรูปแบบ HDD ลักษณะของการกดยึดแผ่นโลหะในรายงานฉบับนี้เป็นโครงสร้างและทฤษฎีใหม่ที่มีการออกแบบขึ้น เพื่อให้ประหยัดพลังงานและสามารถใช้งานได้กับเครื่องจักรกลต่างๆ ได้มากมาย แรงดันของของเหลวภายในระบบของการทำงานควบคุมโดยอุปกรณ์ลดแรงดัน (Pressure reducer)

2.3.2 ในปี 2004 Lihui Lang ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง Study on hydromechanical deep drawing with uniform pressure onto the blank [2] โดยทำทดลองขึ้นรูปอลูมิเนียมผสมเกรด Al16016-T4 โดยใช้กระบวนการ hydromechanical deep drawing (HDD) ทำการขึ้นรูปถ้วยที่มีอัตราส่วนการขึ้นรูปลึก (Drawing ratio) 2.46 และ 3.11 กับ อลูมิเนียมอ่อนเกรด A11050-H0 อัตราส่วนการขึ้นรูปลึก (Drawing ratio) 3.11 ศึกษาวิจัยถึงแรงดันของของเหลวที่กระจายตัวกระทำต่อโลหะแผ่นที่ใช้ในการขึ้นรูป แล้วทำการจำลองการขึ้นรูปโดยการวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนท์เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปจริง โดยการกำหนดตัวแปรของวัสดุและตัวแปรของอุปกรณ์ สรุปได้ว่าอลูมิเนียมอัลลอย ซึ่งมีความแข็ง ขึ้นรูปได้ดีที่สุดที่อัตราส่วนการขึ้นรูป 2.46 และจะเกิดรอยย่นที่อัตราส่วนการขึ้นรูป 2.54 ส่วนอลูมิเนียมอ่อนสามารถขึ้นรูปได้ที่อัตราส่วนการขึ้นรูป 3.11 และได้ผิวงานที่เรียบ ในส่วนของการจำลองการขึ้นรูปด้วย FEM ขอบเขตของสภาวะต่างๆ จำเป็นต้องชัดเจน

สมบัติ Anisotropy ของวัสดุเป็นตัวแปรสำคัญในการจำลองถึงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นโลหะ

2.3.3 ในปี 2004 Lihui Lang ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง Investigation the effect of pre-bulging during hydromechanical deep drawing with uniform pressre onto the blank [5] โดยทำการศึกษาวิจัยถึงผลกระทบจากการพองตัวของโลหะแผ่นในกระบวนการ hydromechanical deep drawing (HDD) โดยเป็นการศึกษาทดลองต่อเนื่อง ซึ่งงานวิจัยของ Lihui Lang ยังใช้อลูมิเนียมเกรด Al16016-T4 และ A11050-H0 ในการศึกษาวิจัย สรุปได้ว่า การพองตัวหรือรอยนูนมีตัวแปร 2 อย่าง คือ ความดันของการพองตัว (Pre-bulging pressure) และ ความสูงของการพองตัว (Pre-bulging pressure) โดยการเพิ่มอัตราส่วนการลากขึ้นรูปจะทำให้เกิดความดันของการพองตัว (Pre-bulging pressure) และ ความสูงของการพองตัว (Pre-bulging pressure) อย่างรวดเร็ว เป็นผลมาจากความแปรปวนของแรงดันของเหลวภายใน สรุปได้ว่า สารหล่อลื่นที่ดีระหว่างแผ่นโลหะกับ Blank holder และแม่พิมพ์ เป็นตัวช่วยอย่างมากในการปรับปรุงอัตราส่วนการลากขึ้นรูปของโลหะแผ่น สำหรับความเสียดทานระหว่างแผ่นโลหะกับ Punch เป็นอีกตัวแปรหนึ่งเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งเป็นลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน แต่จะไม่ส่งผลต่อการขึ้นรูปมากนัก ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานดังกล่าวมีค่าที่ไม่มากนัก

2.3.4 ในปี 2004-2005 Lihui Lang ยังคงทำการศึกษาวิจัยต่อเนื่องโดยในปีนี้ Lihui Lang ศึกษาวิจัยเรื่อง Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure Part I. Experimental observations of the forming process of aluminum alloy และ Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure Part II. Numerical analysis of the drawing mechanism and the process parameters [33] โดยเป็นการศึกษาวิจัยถึงการเตรียมการ, การสังเกต, การวิเคราะห์เชิงตัวเลข และ ตัวแปรในกระบวนการ Hydrodynamic deep drawing โดยใช้วัสดุอลูมิเนียมผสม (Aluminum alloy) เป็นวัสดุในการทดลอง สรุปได้ว่า อลูมิเนียมอัลลอย A16016-T4 สามารถขึ้นรูปได้ดีที่อัตราส่วนการลากขึ้นรูป 2.46 และกระบวนการที่ดีที่สุดของการขึ้นรูปครั้งนี้คือ ระยะห่างระหว่าง Blank holder กับ แม่พิมพ์ คือ 0.98 ถึง 1.035 ของความหนาแผ่นโลหะ ความดันของเหลวภายในอยู่ที่ประมาณ 325 bar

2.3.5 ในปี 2005 Lihui Lang ยังคงทำการศึกษาวิจัยต่อเนื่อง โดยในปีนี้ Lihui Lang ศึกษาวิจัยเรื่อง Investigation into the forming of a complex cup locally constrained by a round die based on innovative hydromechanical deep drawing method [1] โดยทำการทดลองขึ้นรูปอลูมิเนียมผสมเกรด คือ APP211 และ เหล็กอ่อนเกรด DC06 เป็นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมลึกซึ่งมีความโค้งของของมุม ด้วยกระบวนการ Hydeodynamic deep drawing ทำการศึกษาวิเคราะห์ถึง

ความดันของของเหลวบริเวณรอบๆ แม่พิมพ์ที่มีผลกระทบต่อชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป สรุปได้ว่า เหล็กอ่อน (Soft steel) มีอัตราการลากขึ้นรูปสูงสุดที่ 3.53 และ อลูมิเนียมสูงสุดอยู่ที่ 3.44

2.3.6 ในปี พ.ศ. 2547 พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์ และ วารุณี เปรมานนท์ ทำการศึกษาวิจัย เรื่อง การศึกษาอิทธิพลของความสูงดายแลนด์ในกรรมวิธีการลากขึ้นรูปลึก [11] โดยใช้วัสดุทดสอบ 4 ชนิด คือ เหล็กกล้าไร้สนิม (SUS304) เหล็กกล้ารีดเย็น (SPCC) เหล็กกล้าเคลือบสังกะสี (SGCC) และ อลูมิเนียม (A1100) ความหนา 1 mm นำมาทำการทดลองการลากขึ้นรูปลึกเป็นรูปถ้วยกลมขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 44 mm อัตราส่วนการลากขึ้นรูปเท่ากับ 1.8 ส่วนความสูงของดายแลนด์ที่ ทำการศึกษามีขนาด คือ 40, 25, 20, 10 และ 0 mm ความสูงดายแลนด์จะไม่มีอิทธิพลต่อแรงที่ใช้ ในการลากขึ้นรูป ความหนาของชิ้นงาน และความเรียบผิวของชิ้นงาน แต่จะมีอิทธิพลต่อการดีดตัว กลับของชิ้นงาน โดยที่ดายแลนด์ 0 mm จะเกิดการดีดตัวกลับมากที่สุด

2.3.7 ในปี พ.ศ. 2550 คมสันต์ งามขำ ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง ขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้า ไร้สนิมออสเทไนต์ SUS 304 จากการเปลี่ยนความหนา [31] ตลอดจนประยุกต์ใช้แผนภาพขีดจำกัด การขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ผลการขึ้นรูป อ่างล้างภาชนะ ถ้วยทรงกรวย และ เปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลอง และการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับวิธีไฟไนต์เอ ลิเมนต์ วัดค่าความเครียดบริเวณจุดปลอดภัย บริเวณจุดเกิดการคอด บริเวณจุดเสียหาย มาลงจุดบน แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดหลัก (e_1) ความเครียดรอง (e_2) สร้างเส้นโค้งขีดจำกัด การขึ้นรูป (Forming limit curve, FLC) จากนั้นนำแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปไปวิเคราะห์การขึ้น รูป โดยสร้าง กริดวงกลมบนแผ่นแบลงก์ (Blank) ขึ้นรูปแผ่นแบลงก์ วัดค่าความเครียดบนชิ้นงานและ นำมาลงจุดบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป พร้อมกับเปรียบเทียบผลจำลองการขึ้นรูป ด้วยโปรแกรม AUTOFORM 3.26 สรุปได้ว่า แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทไนต์ SUS 304 สร้างได้ตามมาตรฐาน ASTM E 2218-02 และความหนาชิ้นทดสอบเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ขีดจำกัด การขึ้นรูปสูงขึ้นไม่เป็นไปตามสัดส่วนความหนา

2.3.8 ในปี พ.ศ. 2555 ธนสาร อินทรกำธรชัย ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง การขึ้นรูปโลหะแผ่น ด้วยน้ำกับอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ [29] เป็นการนำเสนอวิธีการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ เปนก ระบวนการขึ้นรูปอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับอุตสาหกรรมชิ้นสวนยานยนต์ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถใน การขึ้นรูปโลหะแผ่นการขึ้นรูปโลหะแผนดวยน้ำ พบว่าชิ้นงานได้รับอิทธิผลความแตกต่างกันของ คุณสมบัติตามแนวการรีด ส่งผลให้เส้นผ่าศูนย์กลางที่สั้นที่สุดมีขนาด 285 มม. และเส้นผ่าศูนย์กลางที่ ยาวที่สุดในแนว 45 ของเส้นที่สั้นมีขนาด 289 มม. ในขณะที่ผลการจำ ลองให้เส้นผ่าศูนย์กลางที่สั้น ที่สุดมีขนาด 284.15 มม. และยาวที่สุดมีขนาด 288.5 มม. โดยความสูงของชิ้นงานที่ได้จากการ ทดสอบจริงมีความสูง 107 มม. ส่วนการจำลองมีความสูง 105 มม. และด้วยค่าพารามิเตอร์ที่กำหนด ทั้งผลการทดสอบจริงและผลการจำลองแสดงถึงการเกิดรอยย่นที่ ผนังอย่างชัดเจน

2.3.9 พ.ศ. 2555 กฤษฎา บรรเทาพิษ ทำการศึกษาเรื่อง การศึกษาอิทธิพลของของเหลวในการลากขึ้นรูปลึกเหล็กคาร์บอนรีดเย็น SPCC ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว [5] พบว่า แรงดันของเหลวและแรงกดชิ้นงานเป็นตัวแปรที่สำคัญและมีผลกระทบต่อกระบวนการลากขึ้นรูปมากที่สุด โดยแรงในการลากขึ้นรูปและแรงกดพั้นช์ที่กระทำต่อชิ้นงานมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อแรงดันของเหลวและแรงกดชิ้นงานเพิ่มขึ้น ซึ่งการขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด VG 68 mm2/s แรงดัน 100 bar แรงกดชิ้นงาน 3.9 kN มีแรงกดพั้นช์ที่กระทำต่อชิ้นงานเท่ากับ 56.89 kN การขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด VG 46 mm2/s ที่แรงดัน 100 bar แรงกดชิ้นงาน 3.9 kN มีแรงกดพั้นช์ที่กระทำต่อชิ้นงานเท่ากับ 70.73 kN ในขณะที่การขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด VG 32 mm2/s ที่แรงดัน 100 bar โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 3.9 kN ไม่สามารถทำการขึ้นรูปได้

2.3.10 พ.ศ. 2555 สุริยา น้ำแก้ว ทำการศึกษาเรื่อง อิทธิพลในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก [6] ใช้แรงลากขึ้นรูปและใช้แรงกดพั้นช์สูงสุดมากกว่าการลากขึ้นรูปแบบปกติ โดยในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ไม่สามารถขึ้นรูปได้ในทุกสภาวะการขึ้นรูป ส่วนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 สามารถขึ้นรูปได้ในทุกสภาวะการขึ้นรูป โดยมีการเปลี่ยนแปลงความหนา ค่าเฉลี่ย 3.58 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดหลัก ค่าเฉลี่ย 14.06 เปอร์เซ็นต์ และความเครียดรอง ค่าเฉลี่ย 8.50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าความเครียดเฉลี่ยน้อยกว่าชิ้นงานที่ลากขึ้นรูปแบบปกติ

2.3 สรุปบท

จากการทบทวนวรรณกรรมในขั้นต้นที่กล่าวมานั้นพบว่าการลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก เป็นกระบวนการที่พัฒนาขึ้นสำหรับการเพิ่มขีดความสามารถในการขึ้นรูปโดยเฉพาะโลหะแผ่น และมีการศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวาง แต่ก็ยังมีจุดที่น่าสนใจในการศึกษาวิจัยอีกมากมาย ปัญหาต่างๆที่พบจากวรรณกรรมขั้นต้นที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ได้แก่ ปัญหาการควบคุมสภาวะการทดลองให้มีความเหมาะสมต่อคุณลักษณะเฉพาะของโลหะแผ่นซึ่งเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีความแตกต่างกันทั้ง 3 ชนิด คือ อะลูมิเนียม AA1100 ทองแดง C1100 และ ทองเหลือง C2801 อิทธิพลของแรงดันน้ำมันในกระบวนการที่แตกต่างกัน อิทธิพลของแรงกดชิ้นงานที่มีผลต่อการไหลตัวในวัสดุทั้ง 3 ชนิด อิทธิพลของแรงดันน้ำมันที่มีความแตกต่างกัน โดยทำการศึกษาทดลองเพื่อสรุปถึงผลกระทบของอิทธิพลต่างๆเหล่านี้ ซึ่งจะส่งผลต่อกระบวนการการขึ้นรูปและชิ้นงานที่โลหะแผ่นซึ่งเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็กทั้ง 3 ชนิดที่แตกต่างกัน โดยพิจารณาจากผลกระทบที่มีต่อกระบวนการการขึ้นรูป เช่น แรงลากขึ้นรูปที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการ ผลกระทบที่มีต่อชิ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปลึก เช่น ความเครียดที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงาน ความหนาของชิ้นงานในจุดต่างๆเปรียบเทียบกันระหว่างการลากขึ้นรูปแบบปกติและการลากขึ้นรูปโดยกระบวนการไฮดรอได

นามิกและคุณภาพของชิ้นงานโดยพิจารณาจาก รอยฉีกขาด และรอยย่นที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานของแต่ละวัสดุ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการการเคลื่อนที่ของของเหลวความดันสูง (Hydrodynamic deep drawing) และศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการการลากขึ้นรูปลึกของโลหะผสม 3 ชนิด คือ ทองแดง เกรด C1100 ทองเหลือง เกรด C2801 และ อลูมิเนียม เกรด AA1100 โดยจากการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องนั้น พบว่าปัจจัยหลัก คือ แรงในการลากขึ้นรูป แรงกดแผ่นชิ้นงาน และความดันที่เกิดขึ้นภายในห้องบรรจุของเหลว นั้นมีอิทธิพลต่อการลากขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก โดยพิจารณาจากความหนาของชิ้นทดสอบหลังการขึ้นรูป ความเครียดที่เกิดขึ้นที่ผิวแผ่นทดสอบ และปัญหาที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานหลังการขึ้นรูป คือ รอยย่นที่ปากถ้วยกับรอยฉีกขาด ทั้งหมดนั้นมีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปของแผ่นโลหะซึ่งเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก ทั้ง 3 ชนิดดังกล่าว

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

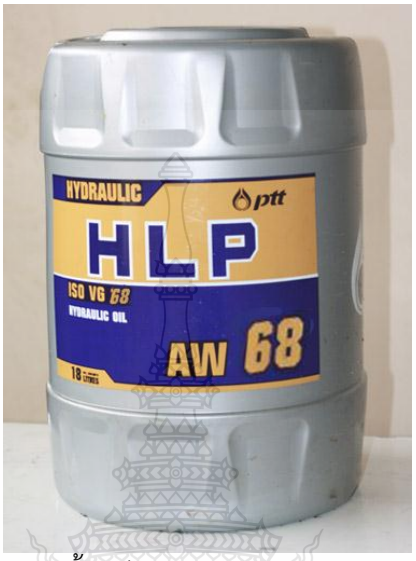
3.2.1 การเตรียมการทดลองวัสดุและอุปกรณ์

3.2.1.1 โลหะนอกกลุ่มเหล็ก จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ ทองแดง เกรด C1100 ความหนา 0.5 มิลลิเมตรทองเหลือง เกรด C2801 ความหนา 0.5 มิลลิเมตร และ อลูมิเนียม เกรด AA 1100 ความหนา 0.5 มิลลิเมตร

(ก) อลูมิเนียม (ข) ทองแดง (ค) ทองเหลือง

รูปที่ 3.1 แผ่นโลหะนอกกลุ่มเหล็กทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1.2 น้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic oil) เกรด ISO VG 68 ความหนืดเชิงจลศาสตร์ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียล เท่ากับ 68.98 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที ตามมาตรฐาน มอก.977-2551



รูปที่ 3.2 แสดงภาพน้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic oil) เกรด ISO VG 68

3.2.1.3 สปริงแม่พิมพ์มาตรฐาน JIS 3 ค่าคงที่สปริง เส้นผ่าศูนย์กลางวงนอก 27 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางวงใน 13.5 มิลลิเมตร และความยาว 125 มิลลิเมตร 3 เกรด ได้แก่ สปริงสีเหลือง ค่าคงที่ของสปริง เท่ากับ 9.42 นิวตันต่อมิลลิเมตรสปริงสีฟ้า ค่าคงที่สปริง เท่ากับ 19.62 นิวตันต่อมิลลิเมตร และ สปริงสีแดง ค่าคงที่สปริง เท่ากับ 35.69 นิวตันต่อมิลลิเมตร

(ก) สปริงแรงกด 9.42 N/mm^2 (ข) สปริงแรงกด 19.62 N/mm^2 (ค) สปริงแรงกด 35.69 N/mm^2

รูปที่ 3.3 แสดงภาพสปริงแรงกด 9.42 , 19.62 และ 35.69 N/mm^2 ตามลำดับ

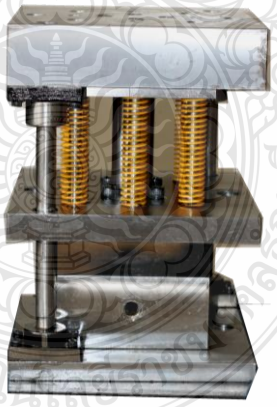
3.2.1.4 เครื่องกัด CNC ชนิด 5 แกน สำหรับทำแผ่นทดสอบ

รูปที่ 3.4 แสดงภาพเครื่องกัด CNC ชนิด 5 แกน

3.2.1.4 เครื่องอัดขึ้นรูปโลหะระบบไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน

รูปที่ 3.5 แสดงภาพเครื่องอัดขึ้นรูปโลหะระบบไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน

3.2.1.5 ชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก รูปถ้วยทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.6 แสดงภาพชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก

3.2.1.6 ชุดต้นกำลังและควบคุมระบบไฮดรอลิกขนาด 30 ลิตร แรงดันสูงสุด 700 บาร์

รูปที่ 3.7 แสดงภาพชุดชุดต้นกำลังและควบคุมระบบไฮดรอลิกขนาด 30 ลิตร

3.2.1.7 สายน้ำมันไฮดรอลิกชนิดรับแรงดัดสูงพร้อมอุปกรณ์ต่อพวง

3.2.1.8 อุปกรณ์วัดแรงชนิดวัดแรงกดพร้อมชุดแปลงสัญญาณ

3.2.1.9 ไมโครคาลิปเปอร์ ชนิดปลายเข็มสำหรับวัดความหนาชิ้นทดสอบหลังการขึ้นรูป

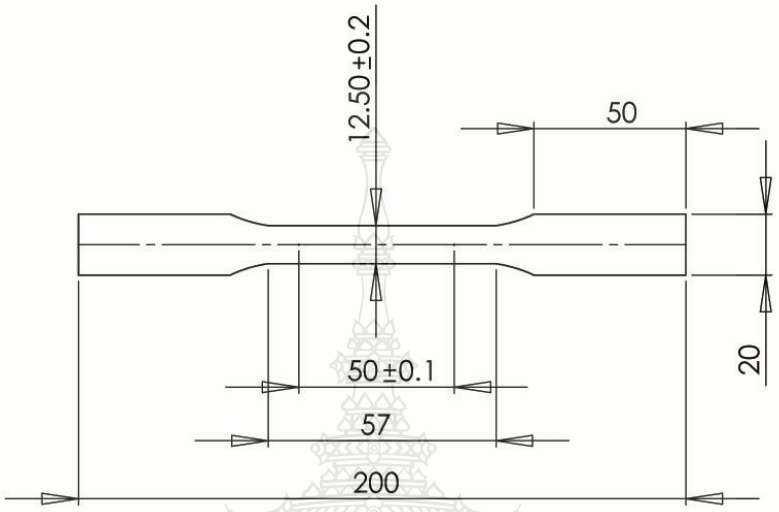
3.2.1.10 อุปกรณ์ที่ใช้สร้างกริด ได้แก่

1. อุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า (Lectroetch power unit)
2. ลูกกลิ้งรีด (Lectroetch roller marker)
3. น้ำยาอิเล็กโทรไลต์ สูตร LNC-2 Electrolyte
4. น้ำยาล้างทำความสะอาดชิ้นงานสูตร 1
5. ผ้าสักหลาดซับน้ำยาอิเล็กโทรไลต์
6. แผ่นกริดวงกลม (Stencils)

3.2.1 ทดสอบหาสมบัติอัตราส่วนความเครียดถาวร (Anisotropy) และสมบัติของโลหะผสม

ตารางที่ 3.1-3.3 สมบัติของโลหะผสมทั้ง 3 ชนิด ตามมาตรฐาน JIS โดยส่วนประกอบทางเคมีของทองแดง C1100 ทองเหลือง C2801 และอลูมิเนียม 1100 ตามมาตรฐาน JIS G 3141:2005

สำหรับสมบัติแอนไอโซทรอปี ทำการทดสอบโดยการเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8 [3-1] ทำการทดสอบแรงดึงตามทิศทางการรีดของโลหะแผ่น 3 ทิศทาง คือ 0 45 และ 90 องศา รูปที่ 3.1 ชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดึงโลหะผสม ตามมาตรฐาน ASTM E8



รูปที่ 3.8 ชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดึงของโลหะผสม ตามมาตรฐาน ASTM E8

ตารางที่ 3.1 สมบัติของอลูมิเนียม เกรด 1100

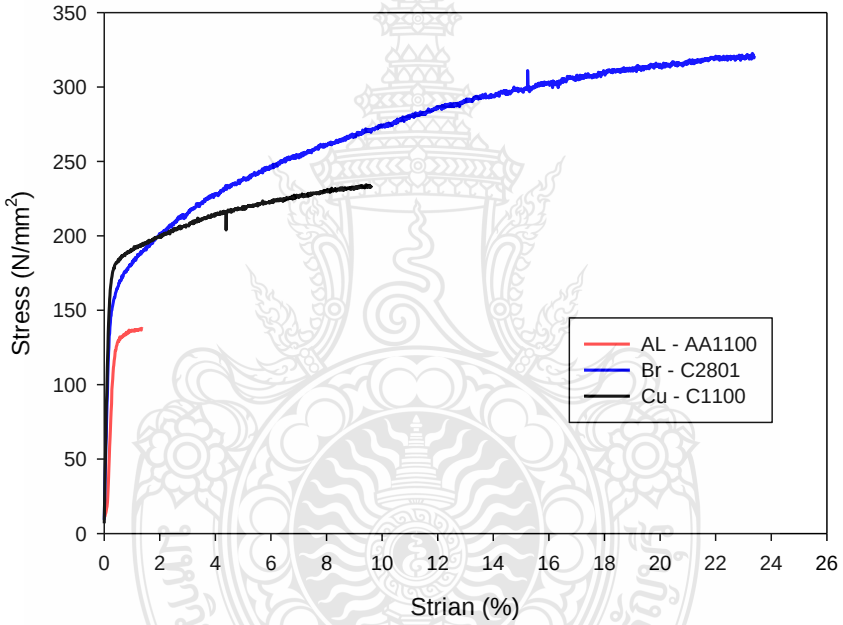
สัญลักษณ์	การใช้งาน	ส่วนประกอบทางเคมี (%)				สัมประสิทธิ์ความต้านทานแรง (K) N/mm^2	n	ความเค้นดึง (N/mm^2)		
Aluminum AA1100	ทั่วไป	Al	Mn	Si+Fe	Zn			R_0	R_{45}	R_{90}
		99.00	0.05	0.90	0.10	120	0.12	0.138	0.134	0.141

ตารางที่ 3.2 สมบัติของทองแดง เกรด C1100

สัญลักษณ์	การใช้งาน	ส่วนประกอบทางเคมี (%)	สัมประสิทธิ์ความต้านทานแรง (K) N/mm^2	n	ความเค้นดึง (N/mm^2)		
Copper C1100	ทั่วไป	Cu			R_0	R_{45}	R_{90}
		99.90	186.3	0.19	0.193	0.189	0.196

ตารางที่ 3.3 สมบัติของทองเหลือง เกรด C2801

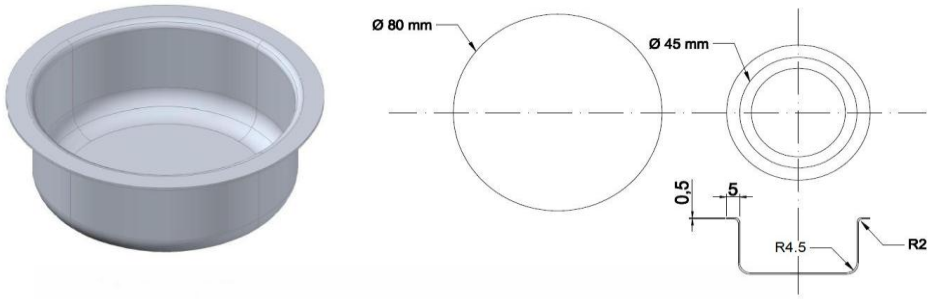
สัญลักษณ์	การใช้งาน	ส่วนประกอบทางเคมี (%)				สัมประสิทธิ์ความต้านทานแรง (K) N/mm^2	n	ความเค้นดึง (N/mm^2)		
Brass C2801	ทั่วไป	Cu	Pb	Fe	Zn			R_0	R_{45}	R_{90}
		59.00	0.01	0.07	39.70	171.5	0.2	0.247	0.242	0.25



รูปที่ 3.9 แผนภาพแสดงความเค้น-ความเครียดของวัสดุที่ใช้ในการทดลองทั้ง 3 ชนิด

3.2.2 ทำการออกแบบแม่พิมพ์การลากลึกรูปลึก ซึ่งสามารถอัดแรงดันน้ำมันเข้าไปยังแม่พิมพ์ได้

ชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอกแบบมีปีก เส้นผ่าศูนย์กลางรวมความหนาแผ่นทดสอบ 45 mm ปีกกว้าง 5 mm อัตราส่วนการขึ้นรูป 1.8 ขึ้นรูปลึก 15 mm



รูปที่ 3.10 ชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอกแบบมีปีก [6]

1. ขนาดแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นคำนวณตามทฤษฎี ในบทที่ 2

$$D = \sqrt{(d_2^2) + (4 \times d_1 \times h)}$$

= 75.7 มิลลิเมตร

กำหนดให้แผนทดสอบเท่ากับ 80 มิลลิเมตร (เพื่อมุมโค้งดายและพั้นช์)

2. มุมดาย คำนวณตามทฤษีในบทที่ 2

$$r_m = \left[\frac{0.035}{\sqrt{mm}}\right]\left[(50 + (D - d)) \times \sqrt{s}\right]$$

= 2.1 องศา

กำหนดให้มุมปากดายเท่ากับ 2 องศา

3. ระยะช่องว่างแม่พิมพ์

$$\omega = s \times \left(\frac{D}{d}\right)$$

= 0.66 มิลลิเมตร

กำหนดให้ระยะช่องว่างแม่พิมพ์เท่ากับ 0.65 มิลลิเมตร

4. มุมพันช์ ขึ้นอยู่กับชิ้นงานตามความต้องการ

กำหนดให้มุมพันช์ r_p = 4.5 องศา

3.2.3 คำนวณขนาดของแรงกดแผ่นทดสอบ

1. แรงดันกดแผ่นโลหะ (Blank holder pressure ,p)

$$p = \left[(\beta_{actual} - 1)^2 + \frac{d}{200 \times s}\right] \times \frac{Rm}{400}$$

R_m สำหรับการคำนวณใช้ค่าสูงสุด = 360 n / mm^2

c สำหรับโลหะผสม = 0.002

แรงดันกดแผ่นโลหะ = 1.04 n / mm^2

2. พื้นที่ของการกดแผ่นโลหะ (Blank holder area , A_{BH})

$$A_{BH} = \left(D^2 - d_e^2\right) \times \frac{\pi}{4}$$

$$d_e = d + (2\omega) + (2 \times r_M)$$

d_e = 50.3 mm

A_{BH} = 3038 mm^2

3. แรงกดยึดแผ่นโลหะ (Blank holder force, F_{BH})

$$F_{BH} = A_{BH} \times P$$

F_{BH} = 3.2 KN

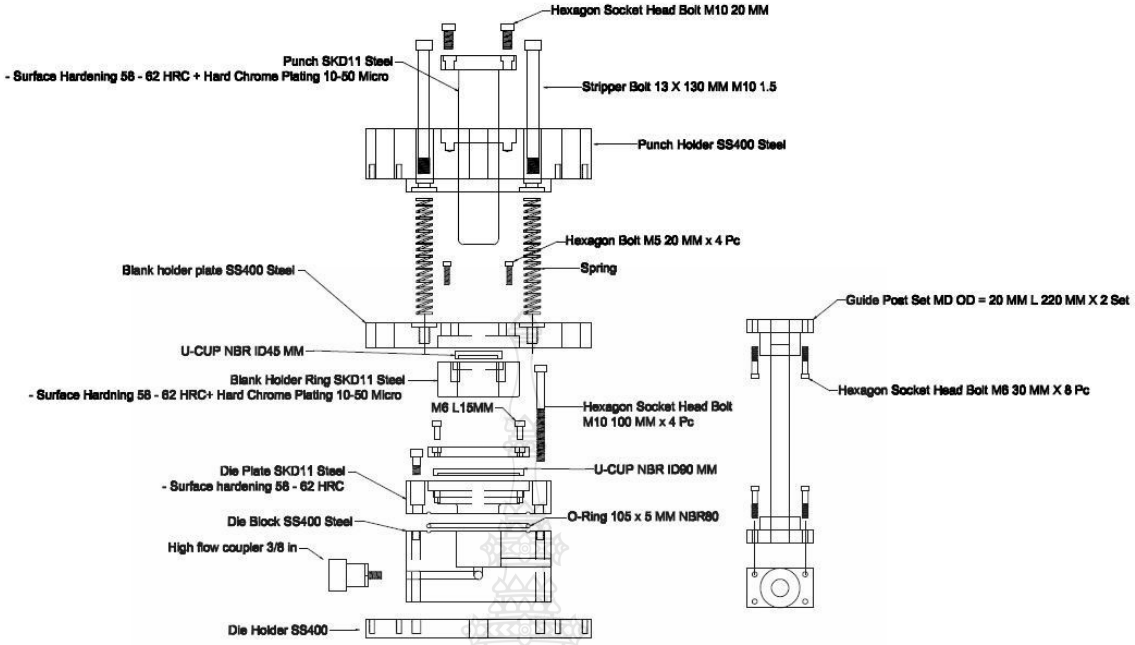
ในการศึกษาทดลอง ใช้สปริงแม่พิมพ์มาตรฐาน JIS สำหรับแรงกดยึดแผ่นทดสอบทั้งหมด 3 ชุด 3 ค่าคงที่สปริง ชุดละ 8 ขดสปริง ดังต่อไปนี้

- สปริงค่าคงที่ 9.42 นิวตันต่อมิลลิเมตร แรงกดรวม 75.36 นิวตันต่อมิลลิเมตร
- สปริงค่าคงที่ 19.62 นิวตันต่อมิลลิเมตร แรงกดรวม 156.96 นิวตันต่อมิลลิเมตร
- สปริงค่าคงที่ 35.69 นิวตันต่อมิลลิเมตร แรงกดรวม 285.2 นิวตันต่อมิลลิเมตร

ออกแบบระยะกดแม่พิมพ์ก่อนการขึ้นรูปที่ระยะ 25 มิลลิเมตร

3.2.4 การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการบรรจุของเหลว

สำหรับแม่พิมพ์ชุดล่าง (Die) จะมีห้องบรรจุของเหลว (Liquid chamber) เจาะรูจากด้านนอกของดาย สำหรับต่อท่อทางเดินของน้ำมันไฮดรอลิก จากชุดต้นกำลังไฮดรอลิก สำหรับชุดแม่พิมพ์ทำการป้องกันการรั่วไหลของของเหลว 3 จุด คือ 1. บริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างแผ่นหน้าดายซึ่งใช้เหล็กชุบ SKD11 ชุบแข็งกับตัวดายซึ่งใช้เหล็ก SS400 โดยใช้ซีลโอริง NBR 2. บริเวณจุดผิวสัมผัสระหว่างแผ่นกดชิ้นงานซึ่งใช้เหล็ก SKD11 ชุบแข็งและชุบ Hare Chrome กับผิวดาย โดยใช้ซีล U-CUP NBR ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน 90 มิลลิเมตร สูง 8 มิลลิเมตร และ 3. บริเวณจุดผิวสัมผัสระหว่างพันช์ซึ่งใช้เหล็ก SKD11 ชุบแข็งและชุบ Hare Chrome กับผิวด้านในของแผ่นกดชิ้นงาน โดยใช้ซีล U-CUP NBR ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน 45 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร รูปที่ 3.5 ส่วนประกอบพร้อมรายละเอียดของแม่พิมพ์



รูปที่ 3.11 ส่วนประกอบพร้อมรายละเอียดของแม่พิมพ์ [5]

3.2.5 การออกแบบชุดต้นกำลัง และระบบควบคุมไฮดรอลิกสำหรับอันแรงดันเข้าแม่พิมพ์

ชุดต้นกำลังและระบบควบคุมไฮดรอลิก ได้รับการออกแบบและสร้างโดยบริษัท ฟร้อน-เทค เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด ขนาดของมอเตอร์ขับปั๊ม 3 แรงม้า ระบบไฟฟ้า 3 เฟต ขับปั๊มน้ำมันไฮดรอลิกแบบลูกสูบ กำลังใช้งานสูงสุด 700 บาร์ อัตราการไหล 0.5 – 1 ลิตร / นาที รูปที่ 3.4 วงจรการทำงานของระบบไฮดรอลิก โดยมีวงจรการทำงานและการควบคุมดังต่อไปนี้

1. ในขณะเครื่องทำงานที่สวิทช์ควบคุมปกติปิด ของเหลวจะไหลจากถังเก็บด้วยแรงดันของปั๊ม ผ่านสวิทช์ควบคุมกลับถังเก็บโดยไม่ผ่านลิ้นควบคุมความดัน ในรูปที่ 3.4 สวิทช์ควบคุมการทำงานของระบบไฮดรอลิก
2. เมื่อเปิดสวิทช์ควบคุมของเหลวจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ผ่านลิ้นควบคุมความดันทั้งสองตัว
3. ทำการปรับค่าความดันเข้าสู่ระบบแม่พิมพ์ หมุนสกรูปรับความดันที่ลิ้นควบคุมความดันทางเข้าแม่พิมพ์ (ตามรูปที่ 3.5 ลิ้นควบคุมความดันตัวล่าง)
4. ทำการปรับค่าความดันควบคุมภายในห้องแม่พิมพ์ โดยหมุนสกรูปรับความดันที่ลิ้นควบคุมความดันทางออกของแม่พิมพ์ (ตามรูปที่ 3.5 ลิ้นควบคุมความดันตัวบน)

5. เมื่อของเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยความดันที่สูงเกินค่าที่ปรับสกรูไว้ ของเหลวจะไหลกลับสู่ถังเก็บ โดยผ่านลิ้นควบคุมความดันทางเข้าแม่พิมพ์ ในขณะเดียวกันเมื่อความดันภายในห้องแม่พิมพ์สูงเกินค่าที่ปรับสกรูไว้ ของเหลวจะไหลกลับถังเก็บโดยผ่านลิ้นควบคุมความดันทางออกของแม่พิมพ์

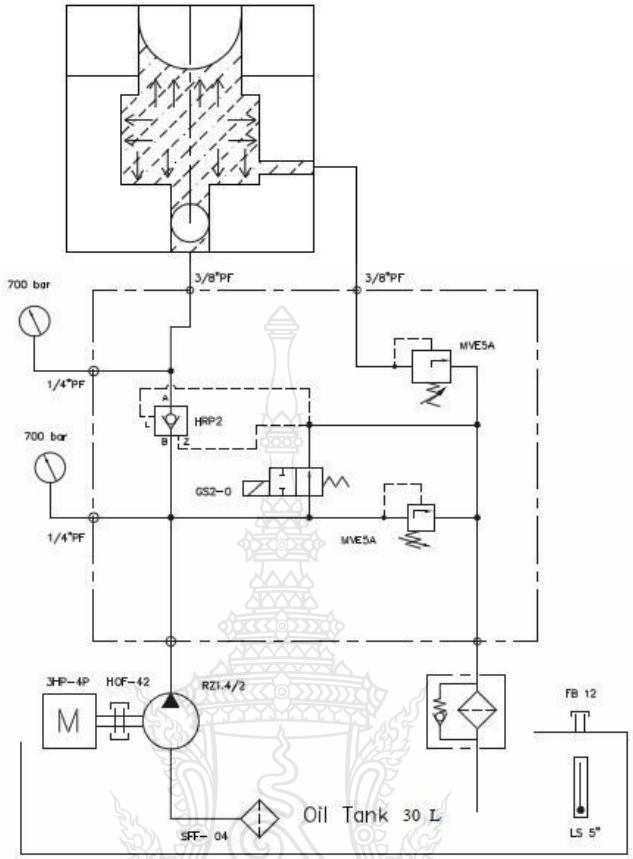
6. บริเวณทางของเหลวไหลเข้าของแม่พิมพ์ใช้อุปกรณ์ป้องกันการไหลย้อนกลับของเหลว (Ball valve)

7. อุปกรณ์วัดแรงดันของเหลว 2 จุด

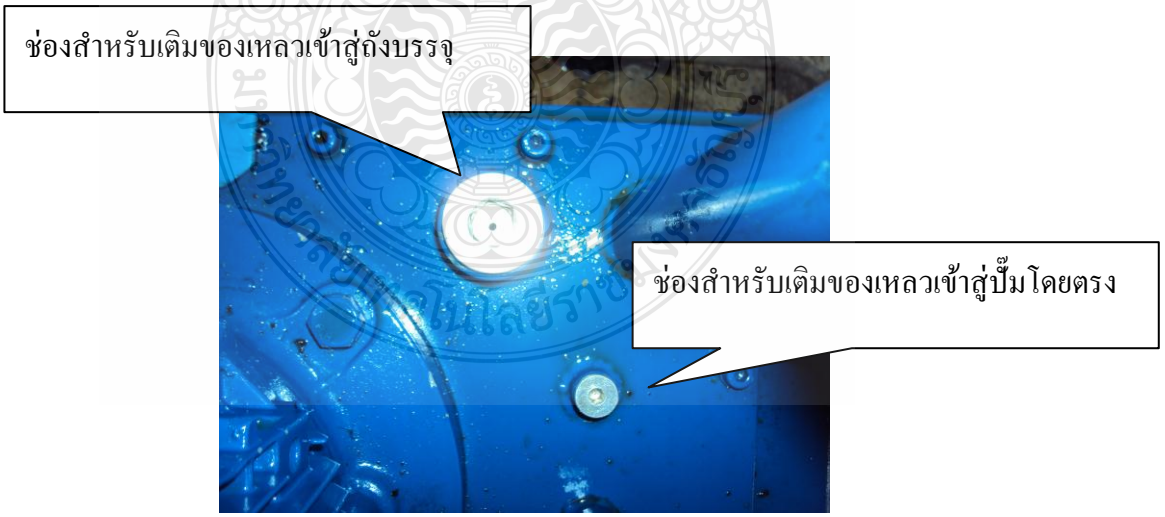
8. ทำการศึกษาทดลองที่ความดันควบคุม 25 บาร์ , 50 บาร์ และ 75 บาร์

9. ทำการเปลี่ยนถ่ายของเหลวเพื่อทำการทดลองโดยใช้น้ำมันแร่ (Hydrolic Oil) ISO VG 68 ;โดยการคลายสกรูด้านล่างของถังเพื่อปล่อยน้ำมันออก เปิดฝาถังด้านหน้าเพื่อทำความสะอาดภายในถัง หลังจากนั้นประกอบฝาถังและสกรูถ่ายของเหลว จากนั้นเติมของเหลวที่ถังโดยเติมผ่านช่องเติมด้านบนถังจนกระทั้งภายในถังเต็ม หลังจากนั้นเติมของเหลวเข้าไปยังปั๊มโดยตรงผ่านทางช่องรูเล็กเพื่อป้องกันอากาศที่ช่องทางเข้าของปั๊ม (Cavitations) ในรูปที่ 3.6 ช่องเติมน้ำมันทั้งสองช่องเพื่อเติมน้ำมันภายในถังและที่ปั๊มโดยตรง

รูปที่ 3.12 แผงสวิทช์ควบคุมการทำงานของระบบไฮดรอลิก



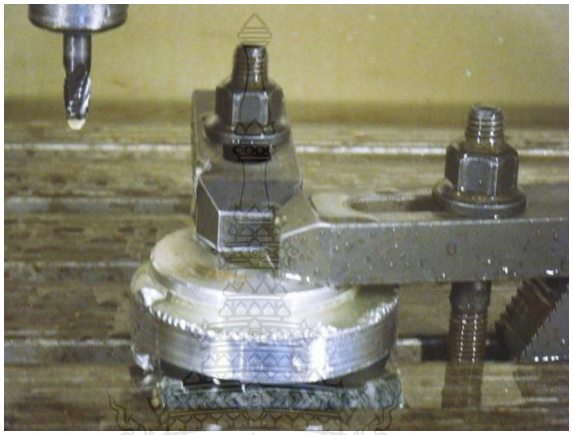
รูปที่ 3.13 วงจรการทำงาน และควบคุมระบบไฮดรอลิก [5]



รูปที่ 3.14 ช่องเติมน้ำมันทั้งสองช่องเพื่อเติมน้ำมันภายในถังและที่ปั๊มโดยตรง

3.2.6 การเตรียมแผ่นชิ้นงานสำหรับการศึกษาทดลอง

เตรียมแผ่นชิ้นงานสำหรับการศึกษาทดลอง รูปวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร โดยการกัด ด้วยเครื่องกัด CNC ชนิด 5 แกน รูปที่ 3.6 ขั้นตอนของการกัดแผ่นชิ้นงานสำหรับการศึกษาทดลองดังใน รูปที่ 3.8 แผ่นชิ้นงานสำหรับการศึกษาทดลอง เมื่อกัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 3.15 ขั้นตอนของการกัดแผ่นชิ้นงานสำหรับการศึกษาทดลอง

(ก) อลูมิเนียม (ข) ทองแดง (ค) ทองเหลือง

รูปที่ 3.16 แผ่นชิ้นงานสำหรับการศึกษาทดลอง เมื่อกัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว

3.27 การสร้างกริดบนแผ่นทดลอง

การสร้างกริดที่แผ่นชิ้นงานเพื่อใช้สำหรับการวัดค่าความเครียดหลัก และความเครียดลอง โดยใช้กรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้า กระบวนการตีกริดวงกลมที่ใช้กรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้าเป็นการชุบเคลือบผิววัสดุทำให้เกิดลายตาราง เพื่อทำการวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวหลังจากที่ชิ้นงานได้ผ่านการขึ้นรูป [8] โดยสร้างกริดวงกลมขนาด 2.5 มิลลิเมตร ที่ใช้กรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้ามีกระบวนการดังต่อไปนี้ คือ

1. จัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการสร้างกริด ดังต่อไปนี้
   - แผ่นเหล็กขนาดพอเหมาะกับโต๊ะปฏิบัติงาน
   - แผ่นลอกลายกริดวงกลม (stencil) ขนาด 10 x 12 นิ้ว
   - น้ำยาล้างทำความสะอาดแผ่นโลหะ
   - น้ำยาอิเล็คโทรไลต์เพื่อใช้ในการกัดแผ่นโลหะซึ่งใช้สำหรับเหล็ก
   - ตัวปรับไฟ (Rectifier) พร้อมด้วยสายต่อ 2 สายที่ประกอบด้วยลูกกลิ้งและสายดิน
   - น้ำยากัดสนิม
2. ใช้แผ่นเหล็กวางบนโต๊ะปฏิบัติงาน สำหรับรองชิ้นงานในการทดลอง เพื่อต่อวงจรไฟฟ้า
3. ประกอบตัวปรับแรงดันและแปลงไฟ โดยใช้สายดินหนีบกับแผ่นเหล็กรองและ อีกสายหนึ่งติดลูกกลิ้ง
4. นำแผ่นโลหะผสมทดสอบ ทั้ง 3 ชนิด ที่ใช้เป็นชิ้นงานในการทดลอง วางบนแผ่นเหล็กรอง โดยที่แผ่นชิ้นงานจะต้องผ่านการแต่งครีบและขอบ พร้อมกับล้างคราบไขมันให้สะอาดแล้วเช็ดให้แห้ง และระวังอย่าให้มีเศษโลหะหรือวัสดุใดๆเพราะจะทำให้ แผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils) เกิดทะลุได้ในขณะใช้ลูกกลิ้งกดขณะขึ้นรูปด้วยไฟฟ้า
5. นำแผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils) วางบนชิ้นงานโดยจัดให้เหมาะสมกับชิ้นงาน
6. นำแผ่นเบาะรองที่จุ่มด้วยน้ำยา อิเล็คโทรไลต์ หมาดๆ เช็ดบนแผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils) ในบริเวณที่จะตีกริดให้ทั่วถึงโดยให้หมาดๆ แล้วจัดแผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils) ให้ตึงอย่าให้ย่น
7. นำแผ่นเบาะรองจุ่มด้วยน้ำยาอิเล็คโทรไลต์และบิดพอให้เปียกๆ วางบนแผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils) อีกทีหนึ่งในกรณีที่แผ่นเบาะรองยังชุ่มด้วยน้ำยาอิเล็คโทรไลต์ก็ยังไม่ต้องจุ่มน้ำยาจนกว่าจะแห้งพอประมาณ
8. เปิดสวิทซ์ที่เครื่องปรับไฟ ปรับตั้งขนาดไฟฟ้าให้เหมาะสม ใช้ลูกกลิ้งกดลงบนแผ่นเบาะรองด้วยน้ำหนักพอประมาณ และเคลื่อนที่ไปอย่างช้าๆเพียงครั้งเดียว ซึ่งสังเกตโดยให้เข็มวัดกระแสไฟฟ้ากระดิกมาที่กึ่งกลางหรือสูงๆของมาตรวัด จะทำให้ กริดวงกลมบนแผ่นโลหะมีความชัดเจนและเส้นมีความคมสวยงาม หลังจากนั้นจึงปิดสวิทซ์ไฟแล้วนำแผ่นเบาะรองและStencils ออกเพื่อดูว่า กริดวงกลมมีความชัดเจนหรือไม่
9. หลังจากตีกริดวงกลมเสร็จแล้ว ให้นำแผ่นทดสอบมาล้างด้วยน้ำยาล้างทำความสะอาดและเช็ดให้แห้งแล้วพ่นน้ำยากัดสนิม เพื่อรอการศึกษาทดลองต่อไป

(ก) (ข) (ค)

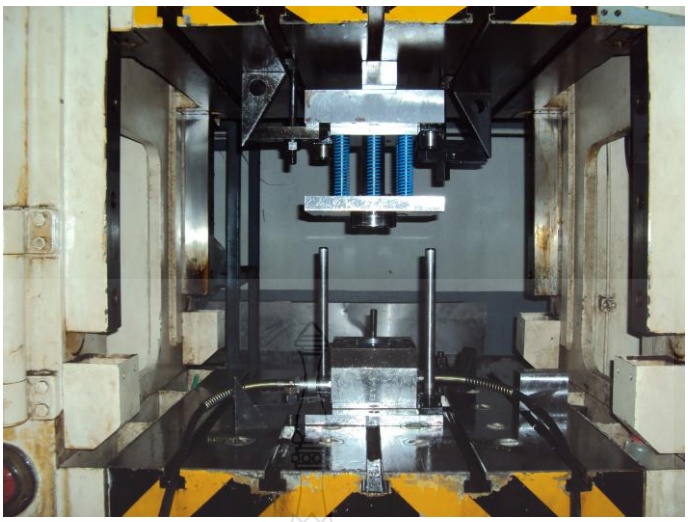
(ก) อลูมิเนียม AA1100 (ข) ทองแดง C1100 (ค) ทองเหลือง C2801

รูปที่ 3.17 แผ่นทดสอบที่สร้างกริดเรียบร้อยแล้ว

3.2.7 ติดตั้งแม่พิมพ์พร้อมอุปกรณ์วัดแรงกดในแนวแกน

1. ติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องปั๊มอัด 80 ตัน และอุปกรณ์วัดแรง รูปที่ 3.18 อุปกรณ์วัดแรงกดสำหรับต่อพวงเข้ากับเครื่องปั๊มอัด และรูปที่ 3.10 แม่พิมพ์ซึ่งติดตั้งบนเครื่องปั๊มอัดเรียบร้อยแล้ว

รูปที่ 3.18 อุปกรณ์วัดแรงกดสำหรับต่อพวงเข้ากับเครื่องปั๊มอัด



รูปที่ 3.19 แม่พิมพ์ซึ่งติดตั้งบนเครื่องปั๊มอัดเรียบร้อยแล้ว

3.2.8 การกำหนดตัวแปรในการทดลอง

ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ ใช้การลากขึ้นรูปลึกรูปถ้วยทรงกระบอก ซึ่งเป็นรูปทรงที่งานต่อการออกแบบแม่พิมพ์ การขึ้นรูป และการจัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์ในการศึกษาทดลอง สำหรับตัวแบบในการศึกษาทดลองได้แก่ การขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว (Fluids pressure) เปรียบเทียบกับการขึ้นรูปแบบธรรมดาโดยไม่ใช้แรงดันของเหลว, ใช้ของเหลวชนิดน้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic oil) เกรด VG 68 และขนาดแรงกดแผ่นทดสอบ (Blank holder force) โดยใช้สปริงที่มีค่าคงที่สปริงแตกต่างกันเป็นตัวกดแผ่นทดสอบ ลำดับขั้นของการทดลองตามตัวแปรที่กำหนดเป็นไปตามตารางที่ 3.4 และ 3.5

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการทดลองสำหรับการขึ้นรูปแบบธรรมดา

ค่าคงที่ของแรงกดสปริง (N/mm^2)	การขึ้นรูปแบบธรรมดา
9.42	ไม่ใช้แรงดันของเหลวเข้าสู่ระบบ
19.62	ไม่ใช้แรงดันของเหลวเข้าสู่ระบบ
35.69	ไม่ใช้แรงดันของเหลวเข้าสู่ระบบ

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการทดลองสำหรับการขึ้นรูปแบบธรรมดาด้วยแรงดันของเหลว โดยใช้น้ำมันไฮดรอลิก เกรด 68

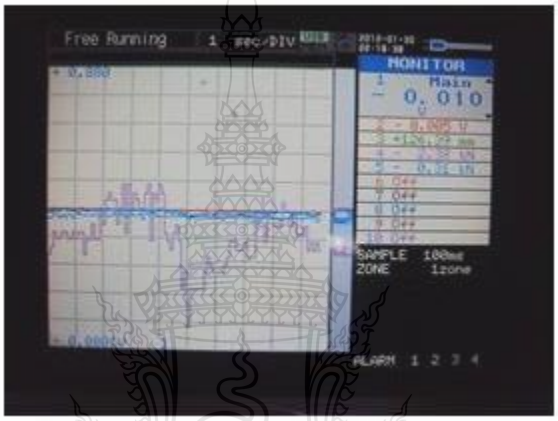
ค่าคงที่ของแรงกดสปริง (N/mm^2)	แรงดันของเหลว โดยใช้น้ำมันไฮดรอลิก (68) ค่าความหนืด 68.98 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที (MPa)		
9.42	2.5	5.0	7.5
19.62	2.5	5.0	7.5
35.69	2.5	5.0	7.5

3.2.7 ชุดต้นกำลังและควบคุมระบบไฮดรอลิกขนาด 30 ลิตร แรงดันสูงสุด 700 บาร์

รูปที่ 3.20 ชุดต้นกำลังและควบคุมระบบไฮดรอลิก

3.2.8 อุปกรณ์วัดแรงชนิดวัดแรงกดพร้อมชุดแปลงสัญญาณ

(ก) อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน (ข) อุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ



(ค) ลักษณะของสัญญาณการวัดแรงกดพันช์

รูปที่ 3.21 อุปกรณ์วัดแรงดันและอุปกรณ์บันทึกแรงที่ได้จากการขึ้นรูป

3.2.9 ไมโครคาลิปเปอร์ชนิดปลายเข็ม สำหรับวัดความหนาชิ้นทดสอบหลังการขึ้นรูป

รูปที่ 3.22 ไมโครคาลิปเปอร์สำหรับวัดความหนาชิ้นงาน

3.3 ขั้นตอนการเก็บบันทึกข้อมูลการทดลอง

3.3.1 การวัดแรงในการลากขึ้นรูป

ในการวัดแรงในการลากขึ้นรูป ที่สภาวะการทดลองต่างๆเปรียบเทียบกัน เพื่อวิเคราะห์ถึงแรงที่กระทำกับแผ่นชิ้นงานในการทดลอง ที่มีต่อชิ้นงานที่ได้หลังจากการขึ้นรูป และประสิทธิภาพของการขึ้นรูปในสภาวะต่างๆ สำหรับการวัดค่าแรงกดในแนวแกนตั้ง ใช้เครื่องมือวัดชนิดวัดแรงกดอัดที่ต่อพวงเข้ากับเครื่องปั๊มอัด ในการวัดค่าจะได้แรงกดพันช์ทั้งหมดที่กดลงบนชิ้นงาน

แรงกดพันช์ที่กระทำต่อแผ่นชิ้นงานคำนวณได้ตามทฤษฎีในบทที่ 2

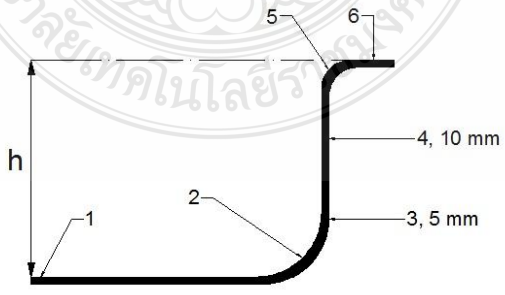
$$F_d = F_P - \left(\frac{\pi}{4} \times d_P^2 \times P \right)$$

3.3.2 ชิ้นงานที่ได้หลังการลากขึ้นรูป

ทำการทดลองโดยการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอกแบบมีปีก เพื่อพิจารณาถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการลากขึ้นรูปลึก ได้แก่ รอยแตกที่พนังของชิ้นงาน และ รอยย่นที่ปากถ้วย ด้วยใช้การตรวจสอบด้วยสายตา

3.3.3 ความหนาของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป

หลังจากการทดลองการขึ้นรูปที่สภาวะตามที่กำหนดแล้ว ทำการผ่าชิ้นงานด้วยเครื่องตัด Wire cut แล้วทำการวัดความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน ในจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานตามทฤษฎีในบทที่ 2 โดยใช้ไมโครคาริปเปอร์วัดความหนาของแผ่นชิ้นงานในการทดสอบ และชิ้นงานหลงการขึ้นรูป รูปที่ 3.11 ไมโครคาริปเปอร์สำหรับวัดความหนาของแผ่นทดสอบก่อนการขึ้นรูป และรูปที่ 3.12 ตำแหน่งของการวัดความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป



รูปที่ 3.23 ตำแหน่งของการวัดความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป [5]

3.3.4 วัดความเครียดที่เกิดขึ้นกับผนังชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

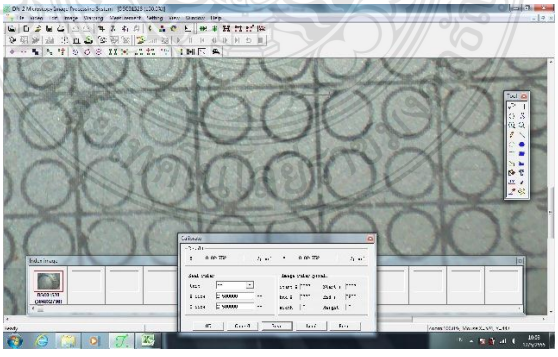
การวัดค่าเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของชิ้นงานตามแนวแกน X และแนวแกน Y จะกระทำโดยการวิเคราะห์กริดวงกลมจากการกัดด้วยกรดเกลือ ซึ่งมีขนาดของกริดวงกลมเท่ากับผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร โดยหลังการขึ้นรูปกริดวงกลมบนแผ่นทดสอบจะเปลี่ยนรูปเป็นวงรี วัดขนาดของวงรีเพื่อกำหนดขนาดโตสุดคือความเครียดหลัก (Major strain) และขนาดต่ำสุดคือความเครียดรอง (Minor strain) ความเครียดทั้งสองนี้จะถูกพล็อตบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป โดยขั้นตอนวัดขนาดกริดจากการเปลี่ยนรูปเป็นวงรี เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลัก(Major strain) และความเครียดรอง (Minor strain) ซึ่งมีวิธีการวัดดังนี้

1. ใช้กล้อง Microscope ที่มีความละเอียดสูง ประกอบร่วมกับคอมพิวเตอร์ปรับโฟกัสตามลักษณะชิ้นทดสอบ ทำการถ่ายภาพขนาดกริดมาตรฐานก่อนทำการขึ้นรูป ที่ระยะโฟกัสเดียวกัน เพื่อทำการกำหนดให้เป็นขนาด อ้างอิงในโปรแกรม สำหรับใช้ในการวัดขนาด วงกลมกริดที่เปลี่ยนไป

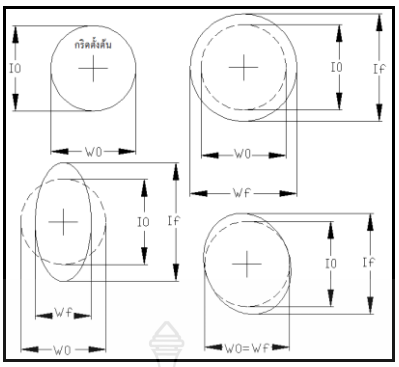
2. ใช้กล้อง Microscope ที่มีความละเอียดสูง ประกอบร่วมกับคอมพิวเตอร์ ปรับโฟกัสตามลักษณะชิ้นทดสอบ โดยให้ขณะที่ถ่ายภาพ พื้นผิวของแผ่นทดสอบที่จะทำการถ่ายภาพจะต้องได้รับการปรับให้ขนานกับหน้ากล้อง Microscope โดยให้ระยะโฟกัสที่ทำการถ่ายภาพกริด นั้นจะต้องเท่ากันในทุกชิ้นงานทดลอง

3. เลือกกริดวงกลมที่เกิดการเปลี่ยนขนาดของวงกลมกริด เป็นวงรีในแต่ละชิ้นการทดสอบแล้ว นำมาสร้างเส้นอ้างอิงในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอน

4. ทำการวัดขนาดกริดด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม Dcal Image Processing วัดขนาดของกริดในแนวตั้งและแนวนอน แล้วนำค่าที่ได้มาทำการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของความเครียดหลักและเปอร์เซ็นต์ของความเครียดหลัก



รูปที่ 3.24 การวัดขนาดกริดวงกลมด้วยโปรแกรม Dcal Image Processing



รูปที่ 3.25 การวัดอัตราความเครียดหลักและอัตราความเครียดรอง [6]

5. อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป เกิดจากการคำนวนหาอัตราส่วนของรูปร่างวงกลมกริดที่เปลี่ยนตามแนวแกน ได้จากสูตรดังต่อไปนี้

ความเครียดหลัก (Major strain) = (ความยาวแกนหลักที่เปลี่ยนไป – ความยาวแกนหลักเดิม)
ความยาวแกนหลักเดิม

ความเครียดรอง (Major strain) = (ความยาวรองหลักที่เปลี่ยนไป – ความยาวแกนรองเดิม)
ความยาวแกนหลักเดิม

โดย I0 = ความยาวแกนหลักเดิม
If = ความยาวแกนหลักที่เปลี่ยนไป
W0 = ความยาวแกนหลักเดิม
Wf = ความยาวรองหลักที่เปลี่ยนไป

6. นำความเครียดหลัก(Major strain)และความเครียดรอง(Minor strain)มาพล็อตกราฟในโปรแกรม Excel

(ก)

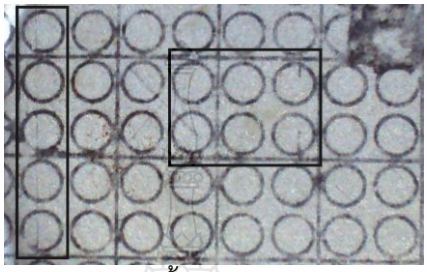
(ข)

(ก) ลักษณะกริดวงกลมก่อนการขึ้นรูป (ข) ลักษณะของกริดวงกลมที่เปลี่ยนแปลงหลังจากการขึ้นรูป

รูปที่ 3.26 ลักษณะของกริดวงกลมก่อนและที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหลังจากการขึ้นรูป

7. ตำแหน่งของการวัดกริด

7.1 ตำแหน่งของการวัดกริด ที่ตำแหน่งของก้นถ้วย

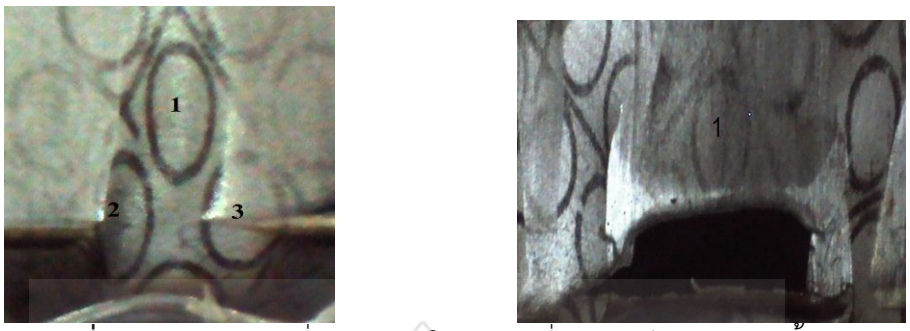


รูปที่ 3.27 กริดวงกลมที่ทำการวัดหลังการขึ้นรูปในตำแหน่งก้นถ้วยบริเวณกึงกลางและขอบถ้วย

7.2 ตำแหน่งของการวัดกริด ที่ตำแหน่งพนังด้านข้าง

รูปที่ 3.28 กริดวงกลมที่ทำการวัดในตำแหน่งพนังถ้วยด้านข้างบริเวณมุมพั้นช์, กึงกลาง และมุมดาย

7.3 ตำแหน่งของการวัดกริด ลักษณะการฉีกขาดที่ผิวชิ้นงาน



รูปที่ 3.28 กริดวงกลมซึ่งทำการวัดในบริเวณที่เกิดการฉีกขาดบนผิวชิ้นงาน

3.4 การเปรียบเทียบผลการทดลอง

3.4.1 เปรียบเทียบแรงกดพั้นช์โดยรวม ที่กระทำต่อชิ้นงานในการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติ กับการลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 2.5, 5 และ 7.5 MPa ตามระยะความลึกของการลากขึ้นรูป

3.4.2 เปรียบเทียบแรงกดชิ้นงาน 9.42 , 19.62 และ 35.69 N/mm^2 ที่กระทำต่อชิ้นงานในการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติ กับการลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 2.5, 5 และ 7.5 MPa ตามระยะความลึกของการลากขึ้นรูป

3.4.3 เปรียบเทียบชิ้นงานหลังการขึ้นรูปโดยการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติ กับการลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ที่แรงดันน้ำมัน 2.5, 5 และ 7.5 MPa และแรงกดชิ้นงาน 9.42 , 19.62 และ 35.69 N/mm^2 ตามระยะความลึกของการลากขึ้นรูป โดยพิจารณาจากปัญหารอยแตกกับ รอยย่นที่ปากถ้วยของชิ้นงาน

3.4.3 เปรียบเทียบความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยพิจารณาถึงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงาน และเปรียบเทียบความเครียดที่เกิดขึ้นกับผิวชิ้นงาน โดยการวัดขนาดของกริดแล้วพลอตลงบน แผ่นภาพขีดจำกัดในการขึ้นรูป เปรียบเทียบผลตังต่อไปนี้

3.4.3.1 เปรียบเทียบความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูประหว่างการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติ กับการลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ที่แรงดันน้ำมัน 2.5, 5 และ 7.5 MPa ด้วยแรงกดชิ้นงาน 9.42 , 19.62 และ 35.69 N/mm^2

3.4.3.2 เปรียบเทียบความเครียดที่ผิวชิ้นงานระหว่างการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติ กับการลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ที่แรงดันน้ำมัน 2.5, 5 และ 7.5 MPa ด้วยแรงกดชิ้นงาน 9.42 , 19.62 และ 35.69 N/mm^2

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

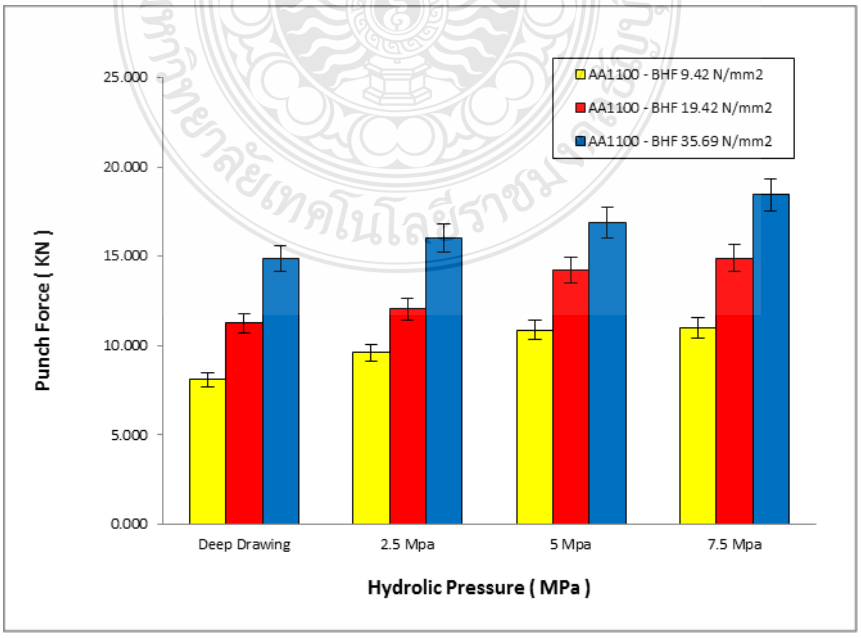
การศึกษาและทดลองในงานวิจัยเรื่อง อิทธิพลในการลากขึ้นรูปลึกโลหะนอกกลุ่มเหล็กด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแรงในการลากขึ้นรูปและแรงกดแผ่นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก 3 ชนิด คือ อลูมิเนียม AA1100 ทองแดง C1100 และทองเหลือง C2801 ด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ ที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงาน สำหรับผลการทดลองนั้นผู้วิจัยขอนำเสนอผลการวิจัยเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

4.1 อิทธิพลของแรงลากขึ้นรูปที่มีผลต่อชิ้นงานในการลากขึ้นรูปโลหะนอกกลุ่มเหล็ก 3ชนิด คือ AA1100 ทองแดง C1100 และทองเหลือง C2801 ด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์

4.2 อิทธิพลของแรงกดชิ้นงานที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์

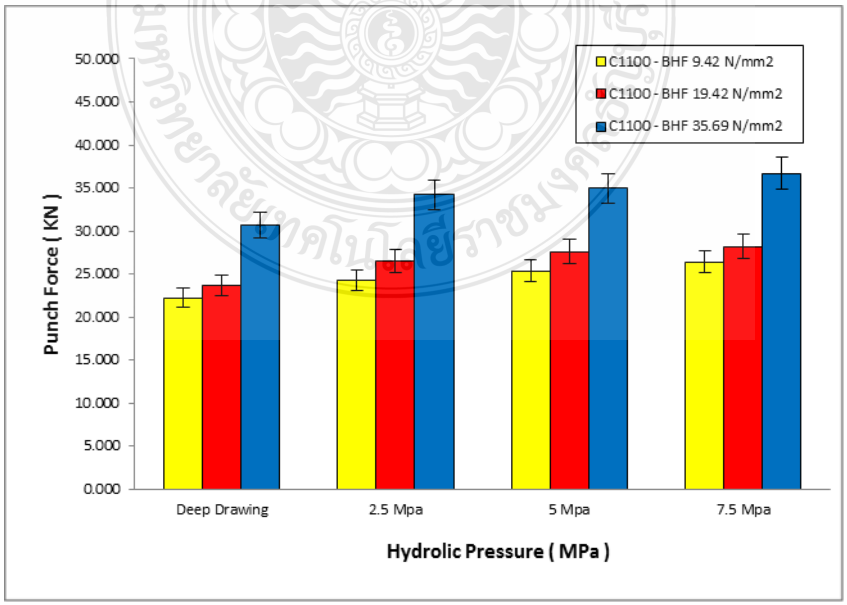
4.3 เปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์

4.1 อิทธิพลของแรงลากขึ้นรูปที่มีผลต่อชิ้นงานในการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์



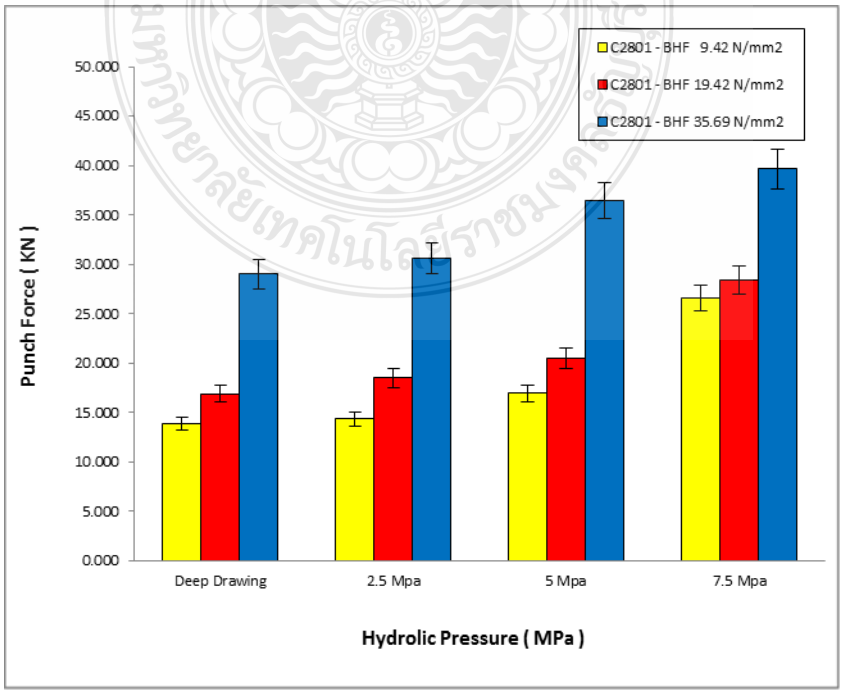
รูปที่ 4.1 แสดงแรงลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA1100 ที่ทำการลากขึ้นรูปแบบปกติกับการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa 5 MPa และ 7.5 MPa

จากรูปที่ 4.1 พบว่าแรงในการลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA1100 เมื่อใช้แรงในการกดชิ้นงานที่ 9.42 , 19.62 และ 35.69 N/mm^2 การลากขึ้นรูปแบบปกตินั้นใช้แรงในการลากขึ้นรูปชิ้นงานเฉลี่ยอยู่ที่ 8.092 kN ,11.255 kN และ 14.875 kN ส่วนการลากขึ้นรูปแบบไฮดรอไดนามิกส์นั้น เมื่อใช้แรงในการกดชิ้นงานที่ 9.42 , 19.62 และ 35.69 N/mm^2 ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa จะใช้แรงในการลากขึ้นรูปเฉลี่ยอยู่ที่ 9.603 kN 12.043 kN และ 16.043 kN ที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa จะใช้แรงในการลากขึ้นรูปเฉลี่ยอยู่ที่ 10.880 kN 14.225kN และ 16.892 kN ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa จะใช้แรงในการลากขึ้นรูปเฉลี่ย 10.987 kN , 14.892 kN และ 18.437 kN ดังนั้น18.437 kN จึงเป็นแรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด ของแผ่นอลูมิเนียม AA1100 ในสภาวะแรงกดชิ้นงานที่ 35.69 N/mm^2 และแรงในการลากขึ้นรูปแบบปกติ 8.092 kN เป็นลากขึ้นรูปชิ้นงานที่น้อยที่สุด จากการทดลองพบว่าแรงในการลากขึ้นรูปแบบปกติจะน้อยกว่าการลากขึ้นรูปแบบไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa และเมื่อเพิ่มแรงดันน้ำมันขึ้นเป็น 5.0 MPa แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้นจากที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa และเมื่อเพิ่มแรงดันน้ำมันขึ้นเป็น 7.5 MPa แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้นจากที่แรงดันน้ำมัน 5.0 MPa ในทุกสภาวะแรงกดเหยียบของสปริง และยังพบว่าเมื่อเพิ่มแรงกดเหยียบสปริง จาก 9.42 N/mm^2 เป็น 19.62 N/mm^2 แรงในการลากขึ้นรูปเฉลี่ยในทุกสภาวะจะเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 32.69 % เมื่อเพิ่มแรงกดเหยียบสปริง จาก 19.62 N/mm^2 เป็น 35.69 N/mm^2 แรงในการลากขึ้นรูปเฉลี่ยในทุกสภาวะจะเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 68.48 %



รูปที่ 4.2 แสดงแรงลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 ทำการลากขึ้นรูปแบบปกติกับการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa 5 MPa และ 7.5 MPa

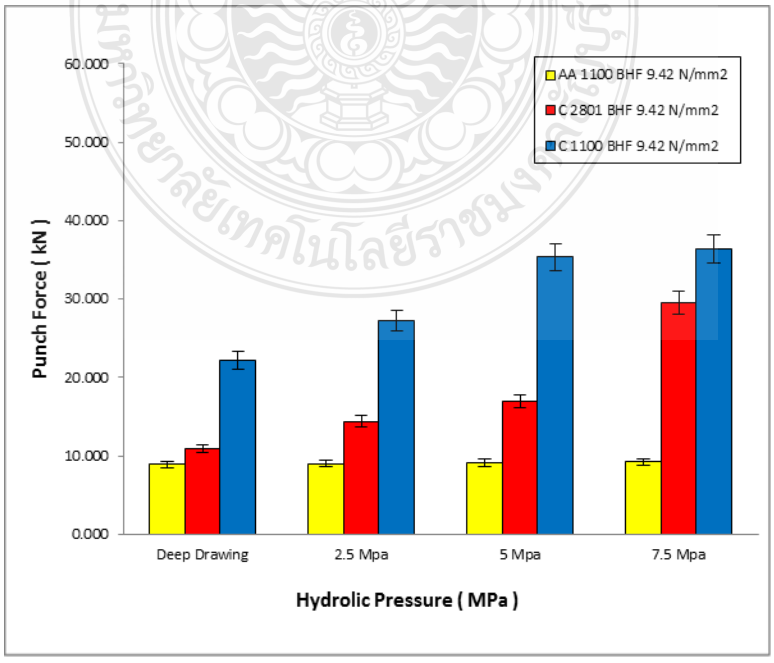
จากรูปที่ 4.2 พบว่าแรงในการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 พบว่าเมื่อเพิ่มแรงกดเหยียบสปริง จาก 9.42 N/mm^2 เป็น 19.62 N/mm^2 แรงในการลากขึ้นรูปเฉลี่ยในทุกสภาวะจะเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 7.89 % เมื่อเพิ่มแรงกดเหยียบสปริง จาก 19.62 N/mm^2 เป็น 35.69 N/mm^2 แรงในการลากขึ้นรูปเฉลี่ยในทุกสภาวะจะเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 39.11 % ในการลากขึ้นรูปแบบปกตินั้นใช้แรงในการลากขึ้นรูปชิ้นงานเฉลี่ยอยู่ที่ 37.280 kN ,37.990 kN และ 42.910 kN เมื่อใช้แรงในการกดชิ้นงานที่ 9.42 , 19.62 และ 35.69 N/mm^{2}ส่วนการลากขึ้นรูปแบบไฮดรอไดนามิกส์นั้นใช้แรงในการลากขึ้นรูปเฉลี่ยอยู่ที่ 32.440 kN 36.910 kN และ 39.280 kN เมื่อใช้แรงในการกดชิ้นงานที่ 9.42 , 19.62 และ 35.69 N/mm^2 ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa ใช้แรงในการลากขึ้นรูปเฉลี่ยอยู่ที่ 37.060 kN 40.640 kN และ 43.490 kN เมื่อใช้แรงในการกดชิ้นงานที่ 9.42 , 19.62 และ 35.69 N/mm^2 ที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa และใช้แรงในการลากขึ้นรูปเฉลี่ย 39.140 kN , 41.320 kN และ 43.490 kN เมื่อใช้แรงในการกดชิ้นงานที่ 39. , 19.62 และ 35.69 N/mm^2 ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa ดังนั้น 45.490 kN จึงเป็นแรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด ของแผ่นทองแดง C1100 ซึ่งแรงลากขึ้นรูปของทองแดงนั้นมีแนวโน้มเหมือนกับอลูมิเนียมคือ เมื่อเพิ่มแรงดันน้ำมันเข้าไปในระบบ แรงลากขึ้นรูปชิ้นงานจะเพิ่มมากขึ้นตามแรงดันน้ำมันที่เพิ่มเข้าไปในระบบคือที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa จะใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด รองลงมาคือ 5.0 MPa และ 2.5 MPa ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 แสดงแรงลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C2801 ทำการลากขึ้นรูปแบบปกติกับการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa 5 MPa และ 7.5 MPa

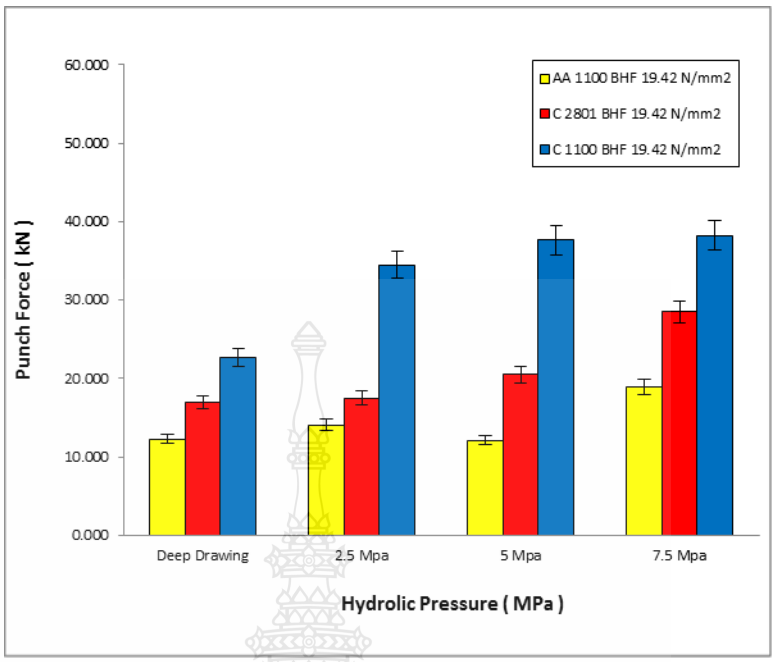
จากรูปที่ 4.3 พบว่าแรงในการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 การลากขึ้นรูปแบบปกตินั้นใช้แรงในการลากขึ้นรูปชิ้นงานเฉลี่ยอยู่ที่ 13.874 kN ,16.916 kN และ 29.014 kN เมื่อใช้แรงในการกดชิ้นงานที่ 9.42 , 19.62 และ 35.69 N/mm^{2}ส่วนการลากขึ้นรูปแบบไฮดรอไดนามิกส์นั้นใช้แรงในการลากขึ้นรูปเฉลี่ยอยู่ที่ 14.391 kN 18.501 kN และ 30.598 kN เมื่อใช้แรงในการกดชิ้นงานที่ 9.42 , 19.62 และ 35.69 N/mm^2 ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa ในการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มแรงกดเหยียบสปริง จาก 9.42 N/mm^2 เป็น 19.62 N/mm^2 แรงในการลากขึ้นรูปเฉลี่ยในทุกสภาวะจะเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 19.63 % เมื่อเพิ่มแรงกดเหยียบสปริง จาก 19.62 N/mm^2 เป็น 35.69 N/mm^2 แรงในการลากขึ้นรูปเฉลี่ยในทุกสภาวะจะเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 96.5 % ดังนั้นที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa แรงในการลากขึ้นรูปจะเฉลี่ยอยู่ที่ 16.936 kN 20.486 kN และ 36.443 kN และใช้แรงในการลากขึ้นรูปเฉลี่ย 26.597 kN , 28.481 kN และ 39.648 kN เมื่อใช้แรงในการกดชิ้นงานที่ 9.42 , 19.62 และ 35.69 N/mm^2 ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa ดังนั้น 39.648 kN จึงเป็นแรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด ของแผ่นทองเหลือง C2801

4.1.1 เปรียบเทียบแรงลากขึ้นรูปของโลหะนอกกลุ่มเหล็กทั้ง 3 ชนิด



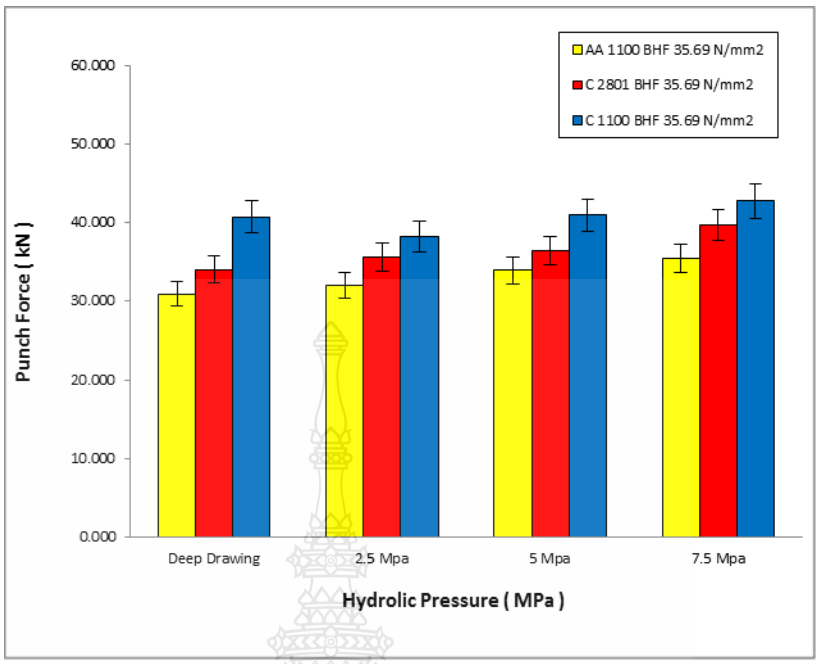
รูปที่ 4.4 แสดงค่าเฉลี่ยแรงลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA1100 ทองแดง C1100 และทองเหลือง C2801ในการขึ้นรูปแบบปกติเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2

จากรูปที่ 4.4 แสดงแรงลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA1100 ทองแดง C1100 และทองเหลือง C2801 ในการขึ้นรูปแบบปกติเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 ผลจากการทดลองพบว่า การลากขึ้นรูปแบบปกติใช้แรงการลากน้อยกว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ในการลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA1100 ใช้แรงลากขึ้นรูปมีค่าเฉลี่ย 8.892 kN แผ่นทองแดง C1100 มีค่าเฉลี่ย 22.196 kN และแผ่นทองเหลือง C2801 มีค่าเฉลี่ย 10.874 kN ในการทดลองขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมันเป็น 2.5 MPa , 5.0 MPa และ 7.5 MPa. โดยแผ่นอลูมิเนียม AA1100ใช้แรงลากขึ้นรูป มีค่าเฉลี่ย 8.990 , 9.089 และ 9.187 kN ตามลำดับ แผ่นทองแดง C1100 ใช้แรงลากขึ้นรูป มีค่าเฉลี่ย 27.218 , 35.331 และ 36.426 kN ตามลำดับ โดยที่แผ่นทองแดง C1100 นั้นในการลากขึ้นรูปแบบปกติแม้จะมีแรงลากขึ้นรูปที่น้อยกว่าแรงลากขึ้นรูปในกระบวนการ ไฮดรอไดนามิกแต่ก็ไม่สามารถขึ้นรูปได้เนื่องจากชิ้นงานเกิดการฉีกขาด ส่วนวัสดุแผ่นทองเหลือง C2801 ใช้แรงลากขึ้นรูป มีค่าเฉลี่ย 14.391 , 16.936และ 29.597 kN ตามลำดับ แรงในการลากขึ้นรูปของทองเหลืองในกระบวนการไฮดรอไดนามิก แม้แรงในการลากขึ้นรูปจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดันน้ำมัน และแรงกดเหยียบสปริงแต่ทองเหลืองยังสามารถขึ้นรูปได้ในทุกสภาวะ



รูปที่ 4.5 แสดงค่าเฉลี่ยแรงลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA1100 ทองแดง C1100 และทองเหลือง C2801ในการขึ้นรูปแบบปกติเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2

จากรูปที่ 4.5 แสดงแรงลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA1100 ทองแดง C1100 และทองเหลือง C2801 ในการขึ้นรูปแบบปกติเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 ผลจากการทดลองพบว่า การลากขึ้นรูปแบบปกติใช้แรงการลากน้อยกว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ และในการลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA1100ใช้แรงลากขึ้นรูป มีค่าเฉลี่ย 12.255 kN แผ่นทองแดง C1100 มีค่าเฉลี่ย 22.646 kN และแผ่นทองเหลือง C2801 มีค่าเฉลี่ย 16.916 kN ซึ่งจากผลการทดลอง แผ่นอลูมิเนียม AA1100ใช้แรงลากขึ้นรูปน้อยกว่า แผ่นทองแดง C1100 และแผ่นทองเหลือง C2801 และแผ่นทองแดง C1100 ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด และในการทดลองขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมันเป็น 2.5 MPa , 5 MPa และ 7.5 MPa. ส่งผลให้แรงลากขึ้นรูปมีค่าเพิ่มขึ้นตาม โดยแผ่นอลูมิเนียม AA1100ใช้แรงลากขึ้นรูป มีค่าเฉลี่ย 14.043 , 12.125 และ 18.892 kN ตามลำดับ แผ่นทองแดง C1100 ใช้แรงลากขึ้นรูป มีค่าเฉลี่ย 34.459 , 37.614 และ 38.219 kN ตามลำดับ และแผ่นทองเหลือง C2801 ใช้แรงลากขึ้นรูป มีค่าเฉลี่ย 17.501 , 20.486 และ 28.481 kN ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 แสดงค่าเฉลี่ยแรงลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA1100 ทองแดง C1100 และทองเหลือง C2801 ในการขึ้นรูปแบบปกติเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2

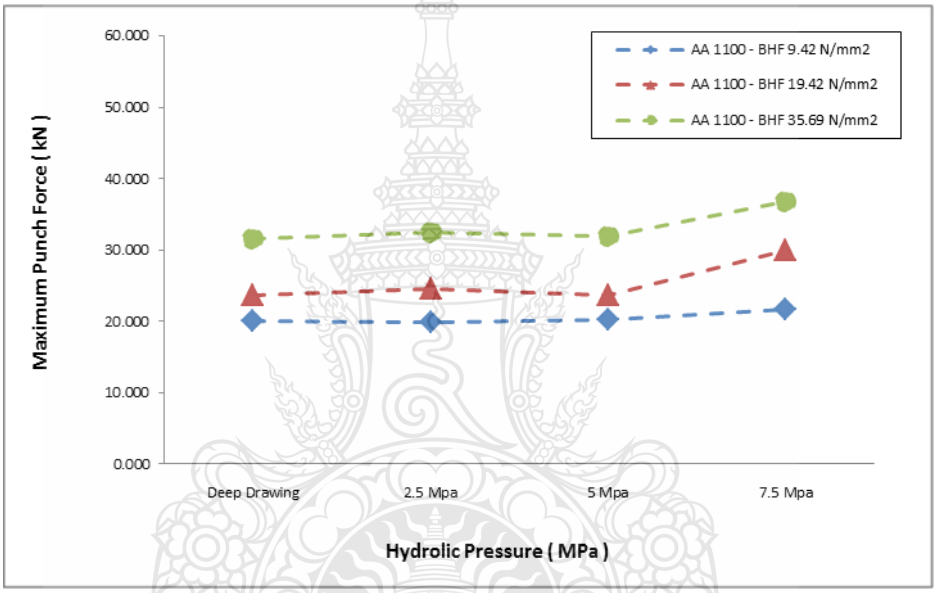
จากรูปที่ 4.6 แสดงแรงลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA1100 ทองแดง C1100 และทองเหลือง C2801 ในการขึ้นรูปแบบปกติเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 ผลจากการทดลองพบว่า ในการลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA1100ใช้แรงลากขึ้นรูป มีค่าเฉลี่ย 30.875 kN ผลของแรงในการลากขึ้นรูปอลูมิเนียมนั้นพบว่าแรงดันน้ำมันและแรงกดเหยียบที่เพิ่มขึ้นทำให้แรงการลากขึ้นรูปเพิ่มมากขึ้น แต่แผ่นชิ้นงานของอลูมิเนียม AA1100 ยังมีรอยฉีกขาดในทุกสภาวะ แผ่นทองแดง C1100 มีค่าแรงในการลากขึ้นรูปเฉลี่ย 40.678 kN และแผ่นทองเหลือง C2801 มีค่าแรงในการลากขึ้นรูปเฉลี่ย 34.014 kN ซึ่งจากผลการทดลอง แผ่นอลูมิเนียม AA1100ใช้แรงลากขึ้นรูปน้อยกว่า แผ่นทองแดง C1100 และแผ่นทองเหลือง C2801 และแผ่นทองแดง C1100 ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุด และในการทดลองขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมันเป็น 2.5 MPa , 5 MPa และ 7.5 MPa. ส่งผลให้แรงลากขึ้นรูปมีค่าเพิ่มขึ้นตาม โดยแผ่นอลูมิเนียม AA1100ใช้แรงลากขึ้นรูป มีค่าเฉลี่ย 32.043 , 33.892 และ 35.437 kN ตามลำดับ แผ่นทองแดง C1100 ใช้แรงลากขึ้นรูป มีค่าเฉลี่ย 38.196 , 40.974 และ 42.710kN ตามลำดับ และแผ่นทองเหลือง C2801 ใช้แรงลากขึ้นรูป มีค่าเฉลี่ย 30.598 , 36.443 และ 39.648 kN ตามลำดับ

การศึกษาอิทธิพลของแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปลึกที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานแผ่นโลหะนอกกลุ่มเหล็กในการขึ้นรูปแบบปกติและการขึ้นด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ในสภาวะของแรงดันน้ำมันและแรงกดชิ้นงานที่แตกต่างกัน พบว่า

แผ่นอลูมิเนียม AA1100 นั้นเมื่อเพิ่มแรงดันน้ำมันเข้าไปในระบบ 2.5 MPa จะทำให้ต้องใช้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 11.7 % เมื่อแรงดันน้ำมันเพิ่มเป็น 5.0 MPa จะทำให้ต้องใช้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 24.8 % และเมื่อแรงดันน้ำมันเพิ่มเป็น 7.5 MPa จะทำให้ต้องใช้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 30.67 % แผ่นทองแดง C1100 เมื่อเพิ่มแรงดันน้ำมันเข้าไปในระบบ 2.5 MPa จะทำให้ต้องใช้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 10.81 % เมื่อแรงดันน้ำมันเพิ่มเป็น 5.0 MPa จะทำให้ต้องใช้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 14.96 % และเมื่อแรงดันน้ำมันเพิ่มเป็น 7.5 MPa จะทำให้ต้องใช้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 19.33 % แผ่นทองเหลือง C2801 เมื่อเพิ่มแรงดันน้ำมันเข้าไปในระบบ 2.5 MPa จะทำให้ต้องใช้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 6.18 % เมื่อแรงดันน้ำมันเพิ่มเป็น 5.0 MPa จะทำให้ต้องใช้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 22.19 % และเมื่อแรงดันน้ำมันเพิ่มเป็น 7.5 MPa จะทำให้ต้องใช้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 65.57 %

จากการทดลองพบว่าวัสดุทองแดง C1100 ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงที่สุดในทุกสภาวะ รองลงมาคือทองเหลือง C/2801 และอลูมิเนียม AA1100 ใช้แรงในการลากขึ้นรูปน้อยที่สุด ในการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก พบว่าแรงดันน้ำมันที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้นด้วย เป็นผลเนื่องมาจากแรงกดพั้นช์ พยายามเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่ของพั้นช์ และทำให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ของพั้นช์เพิ่มขึ้นด้วย [6] โดยสภาวะดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lihui Lang [4] ทำการศึกษาอิทธิพลของแรงดันของเหลวภายในแม่พิมพ์ ที่มีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูปลึก ด้วยการนำพลศาสตร์ของไหล หรือการเคลื่อนที่ของของเหลว เข้ามาช่วยในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกอลูมิเนียมผสมเกรด A16016-T4 และแรงต้านแรงกดพั้นช์จากแรงดันของเหลวนั้น เป็นตัวแปรที่มีส่วนสำคัญต่อชิ้นงานที่ได้หลังจากการขึ้นรูป

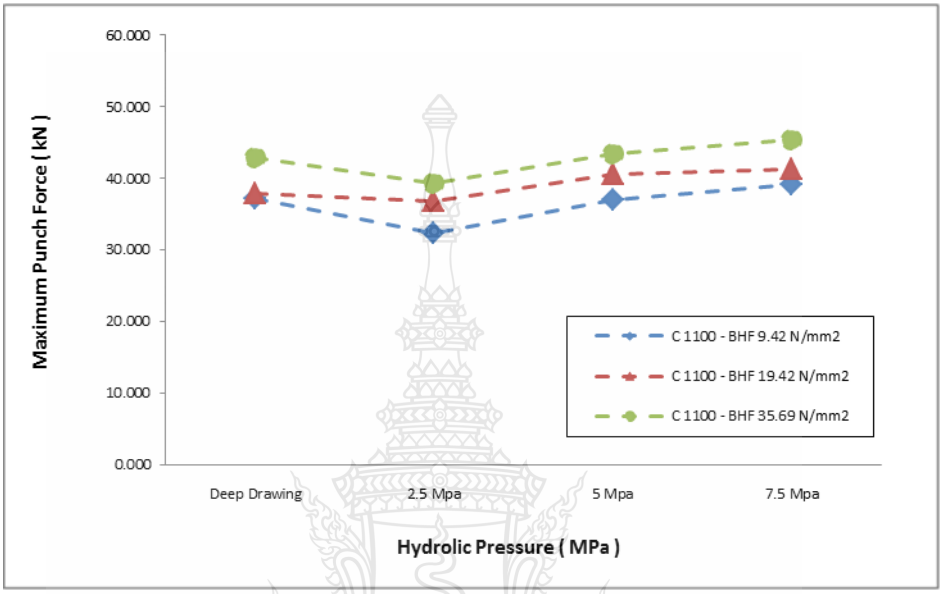
4.2 อิทธิพลแรงกดชิ้นงานที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์



รูปที่ 4.7 แสดงค่าแรงกดพั้นช์สูงสุด ในการลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA1100 ขึ้นรูปแบบปกติเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมันต่างๆ

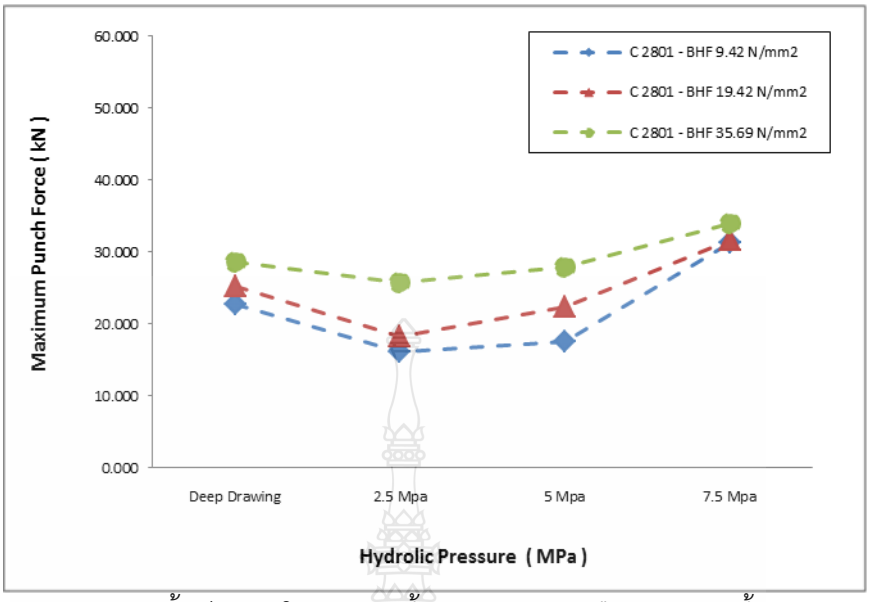
จากรูปที่ 4.7 แสดงค่าแรงกดพั้นช์สูงสุด ในการลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 19.62 N/mm^2 และ 35.69 N/mm^2 ในการขึ้นรูปแบบปกติเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่ ผลการทดลองพบว่า การขึ้นรูปแบบปกติใช้แรงกดพั้นช์สูงสุดมีค่าเฉลี่ยน้อยสุด เท่ากับ 19.980 kN ส่วนในการขึ้นรูปแบบไฮดรอไดนามิกส์ ใช้แรงกดพันช์สูงสุดมีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด 23.720 kN ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 และที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 ใช้แรงกดพั้นช์สูงสุดมีค่าเฉลี่ยน้อยสุด เท่ากับ 31.730 kN และแรงกดพั้นช์สูงสุดในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 5 , 10 และ 15 MPa มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 ใช้แรงกดพั้นช์สูงสุด เท่ากับ 19.900 kN , 24.535 kN และ 32.535 kN ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 ใช้แรงกดพั้นช์สูงสุด เท่ากับ 20.300 kN , 23.750 kN และ

31.980kN ตามลำดับ และ ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 ใช้แรงกดพั้นช์สูงสุด เท่ากับ 21.700 kN , 29.980 kN และ36.73 kN ตามลำดับ ซึ่งที่แรงดันน้ำมัน 15 MPa ใช้แรงกดพั้นช์สูงสุด มีค่าสูงที่สุด



รูปที่ 4.8 แสดงค่าแรงกดพั้นช์สูงสุด ในการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 ขึ้นรูปแบบปกติเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมันต่างๆ

จากรูปที่ 4.8 แสดงค่าแรงกดพั้นช์สูงสุด ในการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 19.62 N/mm^2 และ 35.69 N/mm^2 ในการขึ้นรูปแบบปกติเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่ ผลการทดลองพบว่า การขึ้นรูปแบบปกติใช้แรงกดพั้นช์สูงสุดมีค่าเฉลี่ยน้อยสุด เท่ากับ 37.280 kN ส่วนในการขึ้นรูปแบบไฮดรอไดนามิกส์ ใช้แรงกดพันช์สูงสุดมีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด 42.91 kN ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 และที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 ใช้แรงกดพั้นช์สูงสุดมีค่าเฉลี่ยน้อยสุด เท่ากับ 39.280 kN และแรงกดพั้นช์สูงสุดในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 5 , 10 และ 15 MPa มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 ใช้แรงกดพั้นช์สูงสุด เท่ากับ 32.440 kN , 36.910 kN และ 39.280 kN ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 ใช้แรงกดพั้นช์สูงสุด เท่ากับ 37.060 kN , 40.640 kN และ 43.490 kN ตามลำดับ และ ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 ใช้แรงกดพั้นช์สูงสุด เท่ากับ 39.140 kN , 41.320 kN และ 45.490 kN ตามลำดับ ซึ่งที่แรงดันน้ำมัน 15 MPa ใช้แรงกดพั้นช์สูงสุด มีค่าสูงที่สุด



รูปที่ 4.9 แสดงค่าแรงกดพั้นช์สูงสุด ในการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ขึ้นรูปแบบ ปกติเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมันต่างๆ

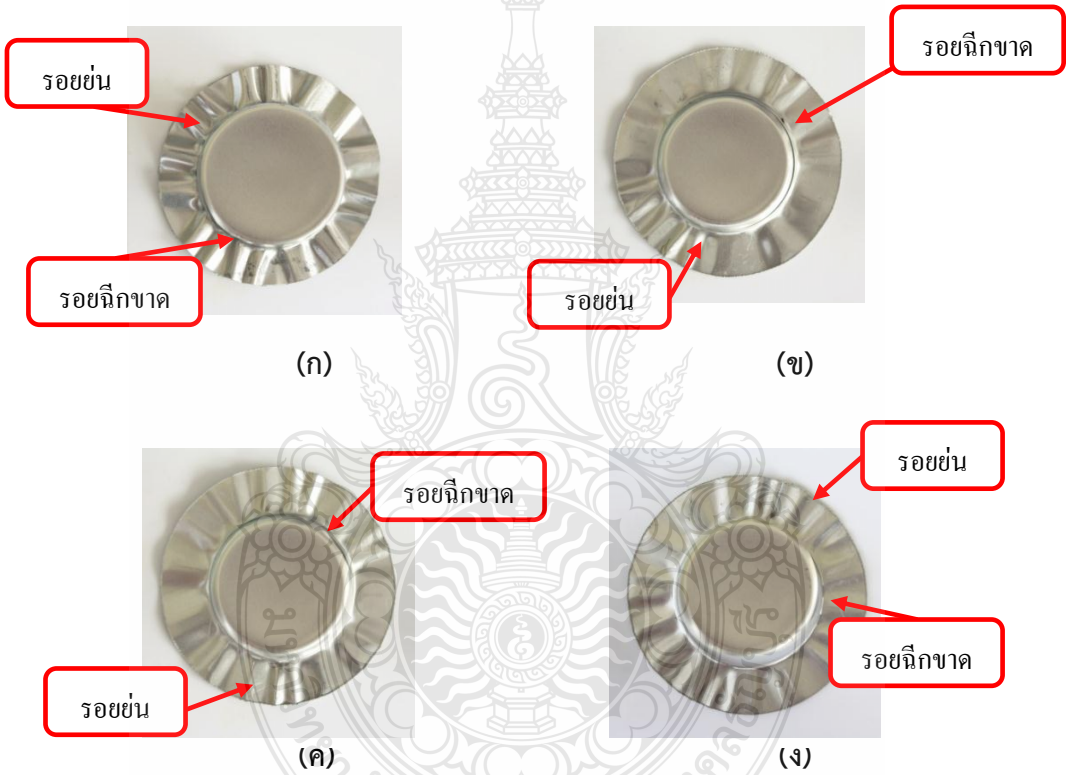
จากรูปที่ 4.9 แสดงค่าแรงกดพั้นช์สูงสุด ในการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 19.62 N/mm^2 และ 35.69 N/mm^2 ในการขึ้นรูปแบบปกติเทียบกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่ ผลการทดลองพบว่า การขึ้นรูปแบบปกติใช้แรงกดพั้นช์สูงสุดมีค่าเฉลี่ยน้อยสุด เท่ากับ 22.810 kN ส่วนในการขึ้นรูปแบบไฮดรอไดนามิกส์ ใช้แรงกดพันช์สูงสุดมีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด 16.160 kN ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 และที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 ใช้แรงกดพั้นช์สูงสุดมีค่าเฉลี่ยน้อยสุด เท่ากับ 31.360 kN และแรงกดพั้นช์สูงสุดในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 5 , 10 และ 15 MPa มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 ใช้แรงกดพั้นช์สูงสุด เท่ากับ 16.160 kN , 18.313 kN และ 25.760 kN ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 ใช้แรงกดพั้นช์สูงสุด เท่ากับ 17.580 kN , 22.350 kN และ 27.960 kN ตามลำดับ และ ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 ใช้แรงกดพั้นช์สูงสุด เท่ากับ 31.360 kN , 31.733 kN และ 33.980 kN ตามลำดับ ซึ่งที่แรงดันน้ำมัน 15 MPa ใช้แรงกดพั้นช์สูงสุด มีค่าสูงที่สุด

จากผลการทดลองของแรงกดแผ่นชิ้นงาน 9.42 , 19.62 และ 35.69 N/mm^2 ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่มีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูป วิเคราะห์ผลได้ว่า เมื่อเพิ่มแรงกดชิ้นงานเพิ่มขึ้น มีผลทำให้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้นทุกกรณี สาเหตุเกิดจากแรงกดชิ้นงานที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้โลหะเกิดการไหลตัวได้น้อยจึงส่งให้แรงในการลากขึ้นรูปสูงเพิ่มตาม และผลจากที่เพิ่มแรงกดชิ้นงานจาก 19.62 N/mm^2 เป็น 19.62 N/mm^2 และเพิ่มเป็น 35.69 N/mm^2 ตามลำดับ ส่งผลให้รอยย่นลดลงเป็นเพราะที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 เป็นค่าที่เพียงพอสำหรับการขึ้นรูป

4.3 ชิ้นงานหลังการขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์

4.3.1 ชิ้นงานที่ได้หลังการลากขึ้นรูป

4.3.1.1 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก

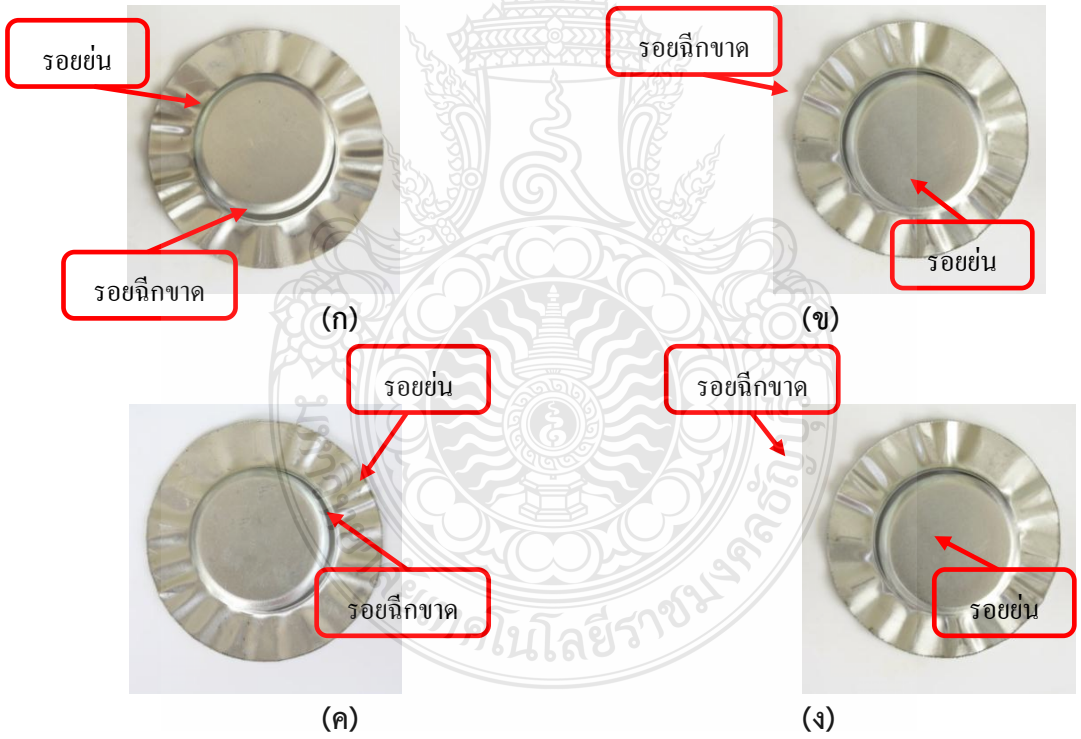


(ก) การลากขึ้นรูปแบบปกติ (ข) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 2.5 MPa (ค) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 5 MPa และ (ง) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 7.5 MPa

รูปที่ 4.10 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก

จากรูปที่ 4.10 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก จะเห็นว่าชิ้นงานทั้งหมดไม่สามารถขึ้นรูปได้ เกิดการฉีกขาดของชิ้นงานทั้งหมดที่บริเวณขอบดายและผนัง ในการขึ้นรูปชิ้นงานแบบปกติความสูงของรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานจะมีความลึกกว่ากระบวนการไฮดรอไดนามิก ส่วนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa 5 MPa และ 7.5 MPa พบว่าความสูงของรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานไม่มีความแตกต่างกัน

4.3.1.2 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก

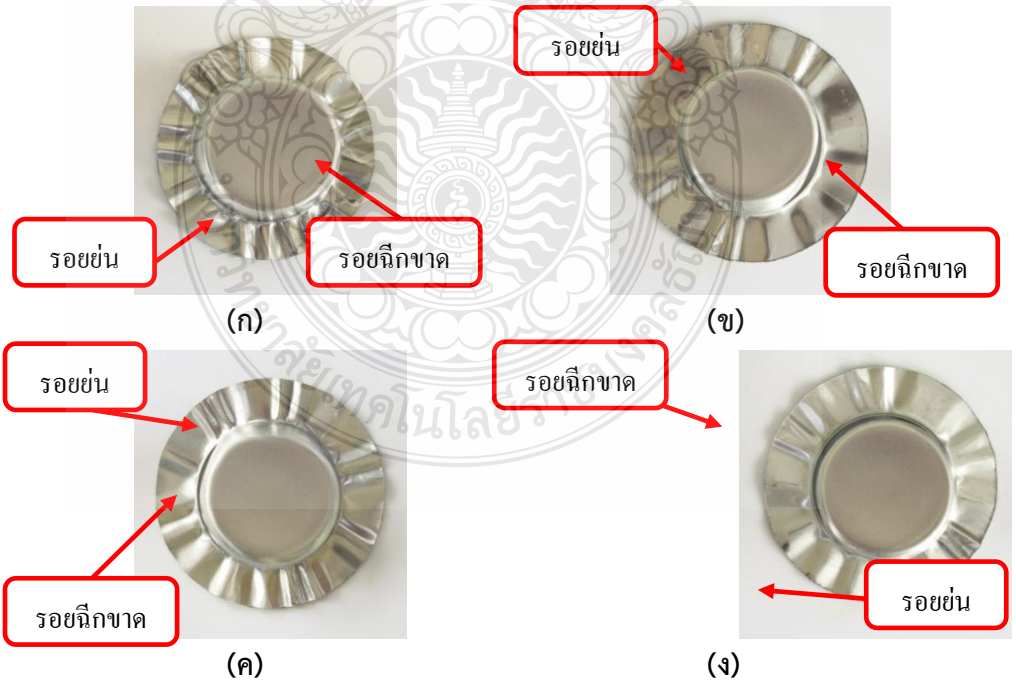


(ก) การลากขึ้นรูปแบบปกติ (ข) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 2.5 MPa (ค) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 5 MPa และ (ง) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 7.5 MPa

รูปที่ 4.11 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก

จากรูปที่ 4.11 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก จะเห็นว่าชิ้นงานทั้งหมดไม่สามารถขึ้นรูปได้ เช่นเดียวกับที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 เกิดการฉีกขาดของชิ้นงานทั้งหมดที่บริเวณขอบดายและผนัง ในการขึ้นรูปชิ้นงานแบบปกติความสูงของรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานจะมีความลึกกว่ากระบวนการไฮดรอไดนามิก ส่วนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa 5 MPa และ 7.5 MPa พบว่า ความสูงของรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานไม่มีความแตกต่างกัน

4.3.1.3 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก

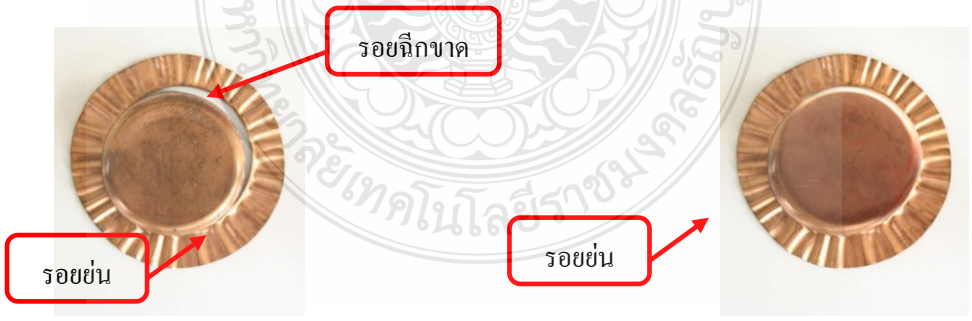


(ก) การลากขึ้นรูปแบบปกติ (ข) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 2.5 MPa (ค) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 5 MPa และ (ง) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 7.5 MPa

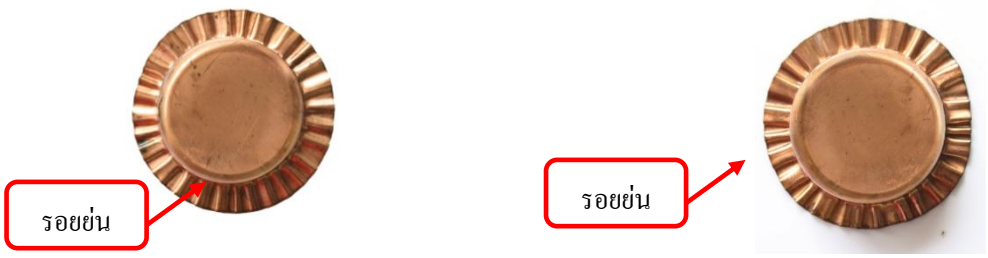
รูปที่ 4.12 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก

จากรูปที่ 4.12 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก จะเห็นว่าชิ้นงานทั้งหมดไม่สามารถขึ้นรูปได้ เช่นเดียวกับที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 และ 19.62 N/mm^2 เกิดการฉีกขาดของชิ้นงานทั้งหมดที่บริเวณขอบดายและผนัง ในการขึ้นรูปชิ้นงานแบบปกติความสูงของรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานจะมีความลึกกว่ากระบวนการไฮดรอไดนามิก ส่วนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa 5 MPa และ 7.5 MPa พบว่า ความสูงของรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานไม่มีความแตกต่างกัน

4.3.1.4 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก



(ก) **(ข)**



(ค) **(ง)**

(ก) การลากขึ้นรูปแบบปกติ (ข) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 2.5 MPa (ค) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 5 MPa และ (ง) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 7.5 MPa

รูปที่ 4.13 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก

จากรูปที่ 4.13 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกจะเห็นได้ว่าชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ที่กระบวนการลากขึ้นรูปแบบปกติเนื่องจากมีรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย และเมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 2.5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงลดลงจากการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และเมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 7.5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และ 5 MPa

4.3.1.5 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก

(ก) **(ข)**

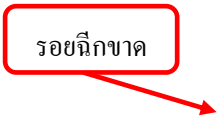
(ค) (ง)

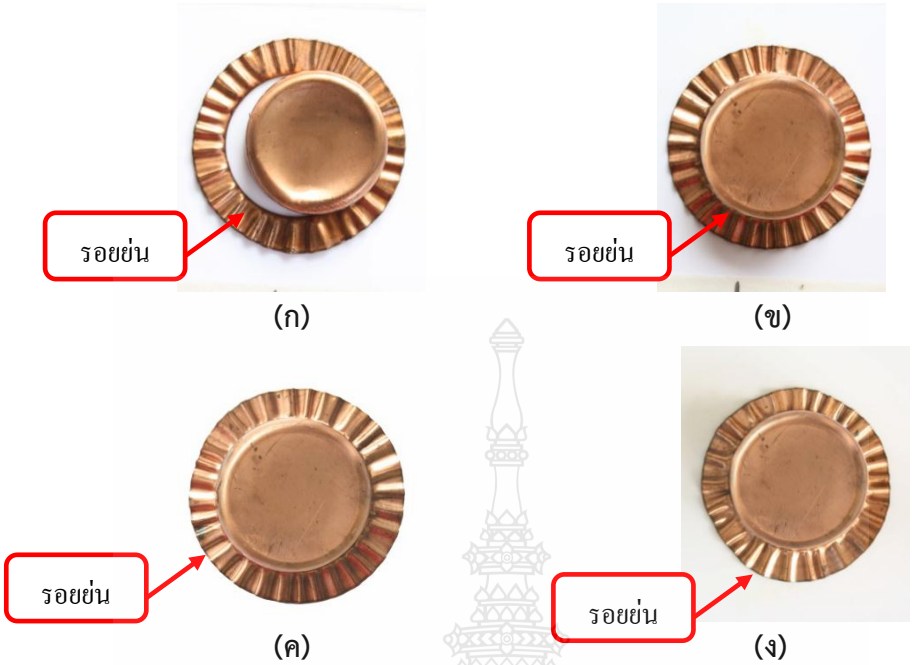
(ก) การลากขึ้นรูปแบบปกติ (ข) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 2.5 MPa (ค) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 5 MPa และ (ง) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 7.5 MPa

รูปที่ 4.14 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก

จากรูปที่ 4.14 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกจะเห็นได้ว่าชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ที่กระบวนการลากขึ้นรูปแบบปกติเนื่องจากมีรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย รอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีลักษณะค่อนข้างสูง แต่เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 2.5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงลดลงจากการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และเมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 7.5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และ 5 MPa

4.3.1.6 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก



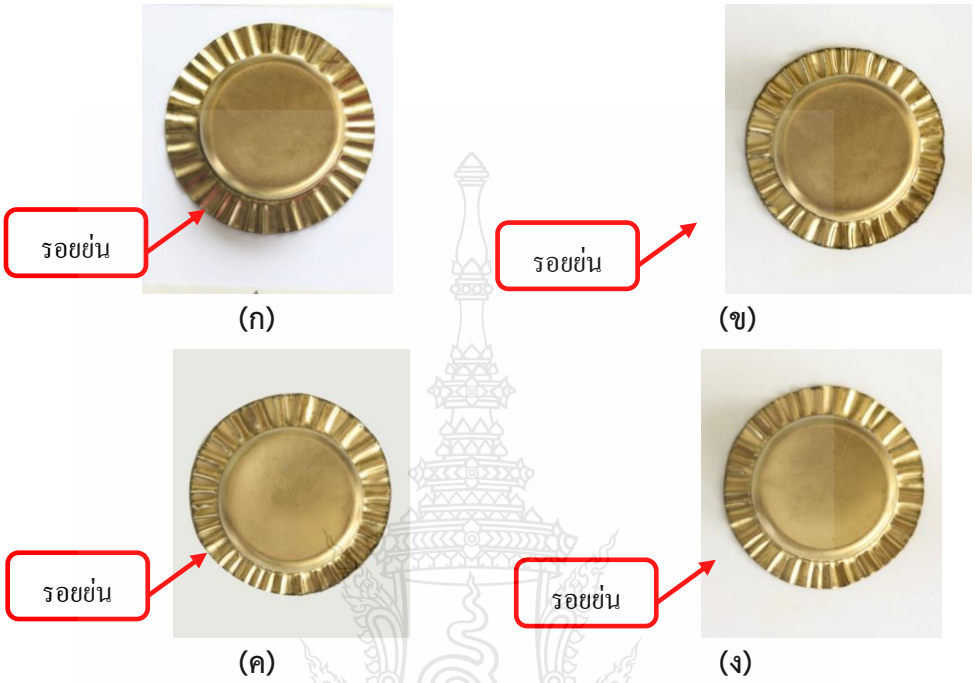


(ก) การลากขึ้นรูปแบบปกติ (ข) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 2.5 MPa (ค) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 5 MPa และ (ง) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 7.5 MPa

รูปที่ 4.15 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก

จากรูปที่ 4.15 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกจะเห็นได้ว่าชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ที่กระบวนการลากขึ้นรูปแบบปกติเนื่องจากมีรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย รอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีลักษณะค่อนข้างสูง แต่เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 2.5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงลดลงจากการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และเมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 7.5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และ 5 MPa

4.3.1.7 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก

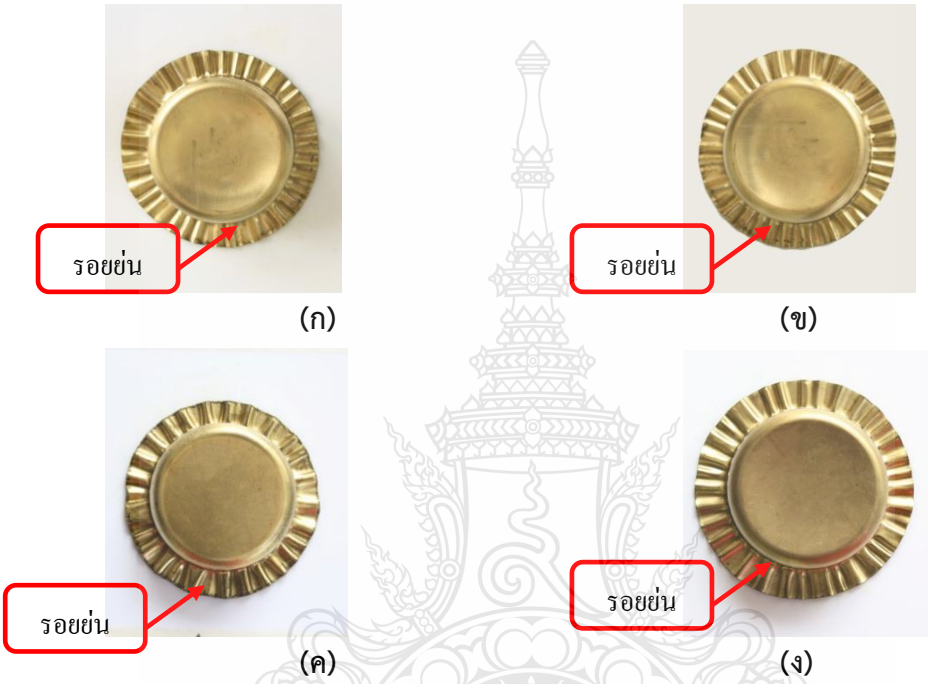


(ก) การลากขึ้นรูปแบบปกติ (ข) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 2.5 MPa (ค) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 5 MPa และ (ง) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 7.5 MPa

รูปที่ 4.16 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก

จากรูปที่ 4.16 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกจะเห็นได้ว่าชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ที่กระบวนการลากขึ้นรูปแบบปกติเนื่องจากมีรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย รอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีลักษณะค่อนข้างสูง แต่เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 2.5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงลดลงจากการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และเมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 7.5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และ 5 MPa

4.3.1.8 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก



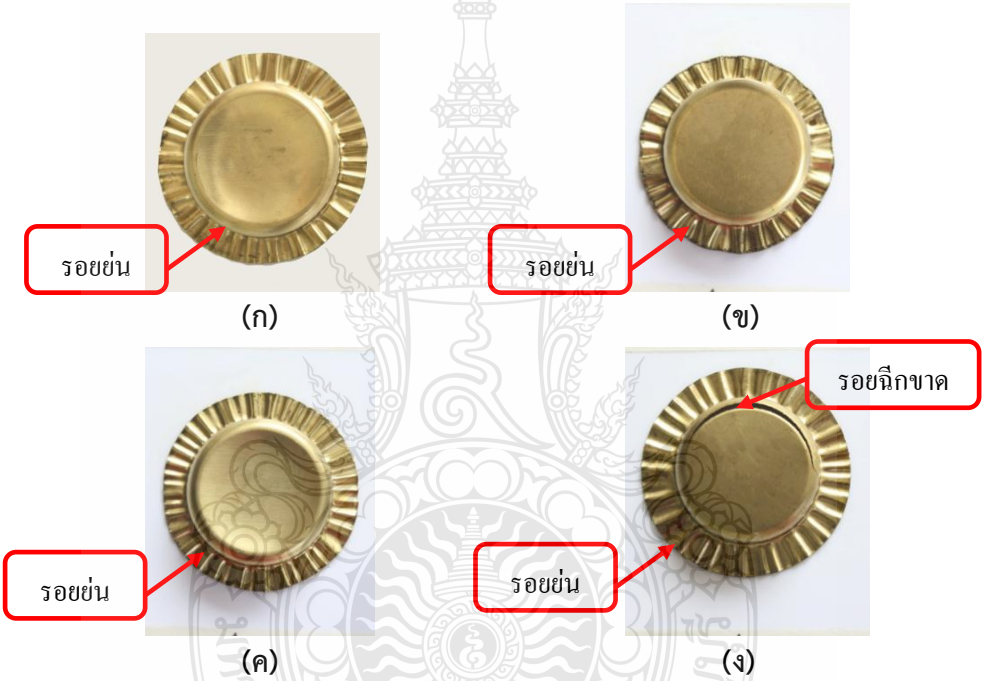
(ก) การลากขึ้นรูปแบบปกติ (ข) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 2.5 MPa (ค) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 5 MPa และ (ง) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 7.5 MPa

รูปที่ 4.17 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก

จากรูปที่ 4.17 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกจะเห็นได้ว่าชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ที่กระบวนการลากขึ้นรูปแบบปกติแต่จะพบว่ามีรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีลักษณะค่อนข้างสูง และเมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 2.5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงลดลงจากการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และเมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 7.5 MPa พบว่า

สามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และ 5 MPa

4.3.1.9 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก



รูปที่ 4.18 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก

จากรูปที่ 4.18 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกจะเห็นได้ว่าชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ที่กระบวนการลากขึ้นรูปแบบปกติแต่จะพบว่ามีรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีลักษณะค่อนข้างสูง และเมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 2.5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงลดลงจากการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และเมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 7.5 MPa พบว่าไม่

สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากมีรอยขาดที่บริเวณขอบพันช์ ส่วนรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานมีความสูงไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และ 5 MPa

จากการทดลองพบว่าชิ้นงานอลูมิเนียม AA1100 ที่ความหนา 0.5 มิลลิเมตร แรงกดเหยียบชิ้นงานที่ 9.42 N/mm^2 นั้นไม่สามารถลากขึ้นรูปได้ทั้งกระบวนการปกติ เนื่องจากชิ้นงานเกิดรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย รอยย่นของชิ้นงานค่อนข้างน้อย เนื่องจากชิ้นงานขาดก่อน เมื่อเพิ่มแรงดันเป็น 2.5 MPa พบว่ายังไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ เกิดรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย รอยย่นของชิ้นงานน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa และ 7.5 MPa ก็ยังไม่สามารถขึ้นรูปได้เนื่องจากเกิดการฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย ส่วนรอยย่นนั้นน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ แต่ไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa เมื่อเพิ่มแรงกดเหยียบชิ้นงานเป็น 19.62 N/mm^2 ก็ยังไม่สามารถลากขึ้นรูปได้ทั้งกระบวนการปกติ เนื่องจากชิ้นงานเกิดรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย รอยย่นของชิ้นงานค่อนข้างน้อย เนื่องจากชิ้นงานขาดก่อน เมื่อเพิ่มแรงดันเป็น 2.5 MPa พบว่ายังไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ เกิดรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย รอยย่นของชิ้นงานน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa และ 7.5 MPa ก็ยังไม่สามารถขึ้นรูปได้เนื่องจากเกิดการฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย ส่วนรอยย่นนั้นน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ แต่ไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และเมื่อเพิ่มแรงกดเหยียบชิ้นงานเป็น 35.69 N/mm^2 ก็ยังไม่สามารถลากขึ้นรูปได้ทั้งกระบวนการปกติ เนื่องจากชิ้นงานเกิดรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย รอยย่นของชิ้นงานค่อนข้างน้อย เนื่องจากชิ้นงานขาดก่อน เมื่อเพิ่มแรงดันเป็น 2.5 MPa พบว่ายังไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ เกิดรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย รอยย่นของชิ้นงานน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa และ 7.5 MPa ก็ยังไม่สามารถขึ้นรูปได้เนื่องจากเกิดการฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย ส่วนรอยย่นนั้นน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ แต่ไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa ซึ่งสอดคล้องกับค่า R (r-value หรือ Plastic Strain Ratio) ในตารางที่ 3.1

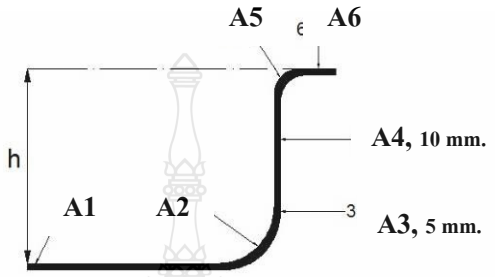
ชิ้นงานทองแดง C1100 ที่ความหนา 0.5 มิลลิเมตร แรงกดเหยียบชิ้นงานที่ 9.42 N/mm^2 นั้นไม่สามารถลากขึ้นรูปได้ทั้งกระบวนการปกติ เนื่องจากชิ้นงานเกิดรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย รอยย่นของชิ้นงานค่อนข้างน้อย เนื่องจากชิ้นงานขาดก่อน เมื่อเพิ่มแรงดันเป็น 2.5 MPa พบว่ายังไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ ไม่เกิดรอยฉีกขาด รอยย่นของชิ้นงานน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa และ 7.5 MPa สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้โดยไม่เกิดการฉีกขาด แต่รอยย่นที่เกิดขึ้นนั้นน้อยกว่าชิ้นงานทองแดงที่ลากขึ้นรูปขึ้นรูปที่แรงดัน 2.5 MPa เมื่อเพิ่มแรงกดเหยียบชิ้นงานเป็น 19.62 N/mm^2 ก็ยังไม่สามารถลากขึ้นรูปได้ที่กระบวนการปกติ เนื่องจากชิ้นงานเกิดรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย รอยย่นของชิ้นงานค่อนข้างน้อย เนื่องจากชิ้นงานขาดก่อน เมื่อเพิ่มแรงดันเป็น 2.5

MPa พบว่ายังไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ เกิดรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย รอยย่นของชิ้นงานน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa และ 7.5 MPa ก็ยังไม่สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากเกิดการฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย ส่วนรอยย่นนั้นน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ แต่ไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และเมื่อเพิ่มแรงกดเหยียบชิ้นงานเป็น 35.69 N/mm^2 ก็ยังไม่สามารถลากขึ้นรูปได้ทั้งกระบวนการปกติ เนื่องจากชิ้นงานเกิดรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย รอยย่นของชิ้นงานค่อนข้างน้อย เนื่องจากชิ้นงานขาดก่อน เมื่อเพิ่มแรงดันเป็น 2.5 MPa พบว่ายังไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ เกิดรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย รอยย่นของชิ้นงานน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa และ 7.5 MPa ก็ยังไม่สามารถขึ้นรูปได้เนื่องจากเกิดการฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย ส่วนรอยย่นนั้นน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ แต่ไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa ซึ่งสอดคล้องกับค่า R (r-value หรือ Plastic Strain Ratio) ในตารางที่ 3.2

ชิ้นงานทองเหลือง C2801 ที่ความหนา 0.5 มิลลิเมตร แรงกดเหยียบชิ้นงานที่ 9.42 N/mm^2 นั้นไม่สามารถลากขึ้นรูปได้ทั้งกระบวนการปกติ เนื่องจากชิ้นงานเกิดรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย รอยย่นของชิ้นงานค่อนข้างน้อย เนื่องจากชิ้นงานขาดก่อน เมื่อเพิ่มแรงดันเป็น 2.5 MPa พบว่ายังไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ ไม่เกิดรอยฉีกขาด รอยย่นของชิ้นงานน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa และ 7.5 MPa สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้โดยไม่เกิดการฉีกขาด แต่รอยย่นที่เกิดขึ้นนั้นน้อยกว่าชิ้นงานทองแดงที่ลากขึ้นรูปขึ้นรูปที่แรงดัน 2.5 MPa เมื่อเพิ่มแรงกดเหยียบชิ้นงานเป็น 19.62 N/mm^2 ก็ยังไม่สามารถลากขึ้นรูปได้ที่กระบวนการปกติ เนื่องจากชิ้นงานเกิดรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย รอยย่นของชิ้นงานค่อนข้างน้อย เนื่องจากชิ้นงานขาดก่อน เมื่อเพิ่มแรงดันเป็น 2.5 MPa พบว่ายังไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ เกิดรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย รอยย่นของชิ้นงานน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa และ 7.5 MPa ก็ยังไม่สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากเกิดการฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย ส่วนรอยย่นนั้นน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ แต่ไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa และเมื่อเพิ่มแรงกดเหยียบชิ้นงานเป็น 35.69 N/mm^2 ก็ยังไม่สามารถลากขึ้นรูปได้ทั้งกระบวนการปกติ เนื่องจากชิ้นงานเกิดรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย รอยย่นของชิ้นงานค่อนข้างน้อย เนื่องจากชิ้นงานขาดก่อน เมื่อเพิ่มแรงดันเป็น 2.5 MPa พบว่ายังไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ เกิดรอยฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย รอยย่นของชิ้นงานน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 5 MPa และ 7.5 MPa ก็ยังไม่สามารถขึ้นรูปได้เนื่องจากเกิดการฉีกขาดที่บริเวณขอบดาย ส่วนรอยย่นนั้นน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ แต่ไม่แตกต่างจากที่แรงดัน 2.5 MPa ซึ่งสอดคล้องกับค่า R (r-value หรือ Plastic Strain Ratio) ในตารางที่ 3.3

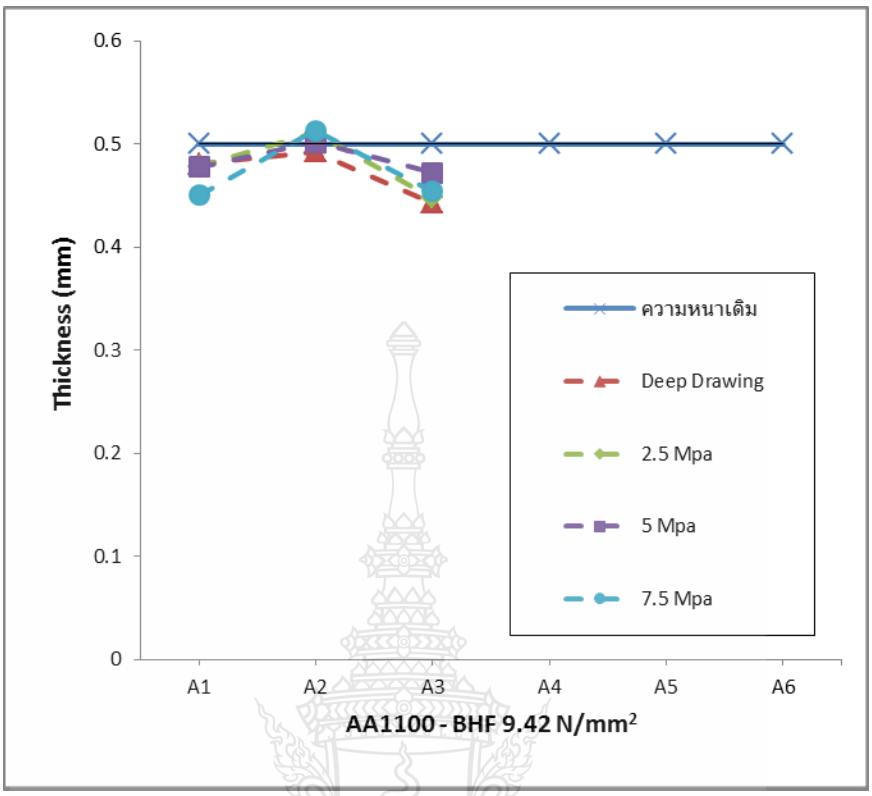
4.3.2 การวัดความหนาของชิ้นงาน

การวัดความหนาชิ้นงานที่ผ่านการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติและการลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์จะทำการวัดความหนาของชิ้นงานทั้งหมด 6 ตำแหน่ง ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.19 แสดงตำแหน่งของการวัดความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ณ ตำแหน่งต่างๆ



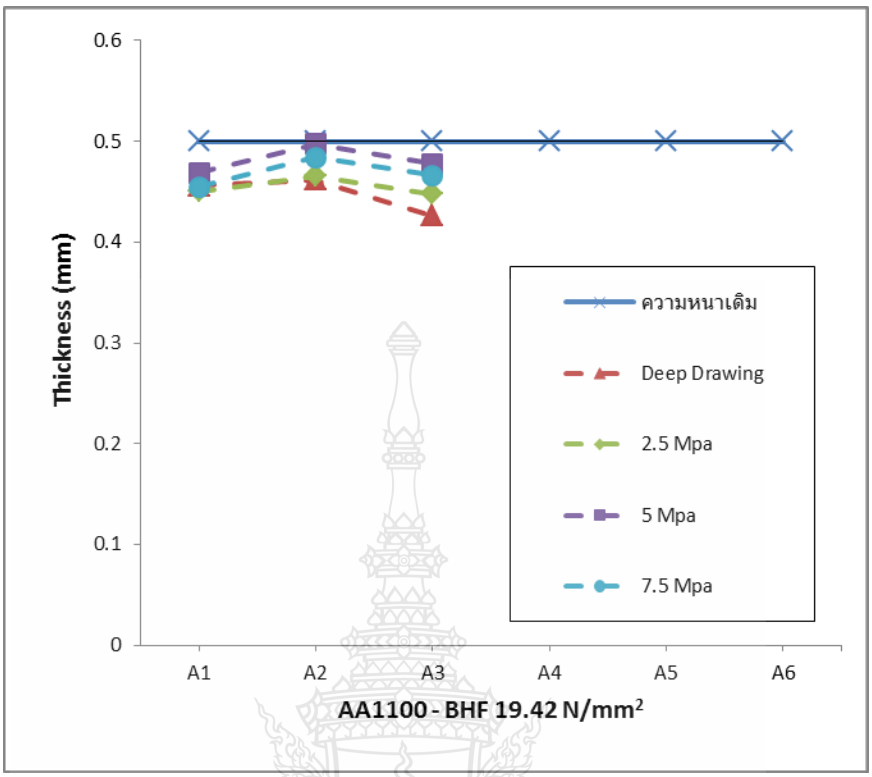
รูปที่ 4.19 แสดงตำแหน่งของการวัดความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป [5]

จากรูปที่ 4.19 แสดงค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นอลูมิเนียม AA1100หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 ผลการทดลองพบว่า ผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ลากขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ไม่สามารถขึ้นรูปได้ตามกำหนด เกิดการฉีกขาด สามารถวัดความหนาได้ 3 จุด คือ ที่จุด A1 , A2 , A3 เป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาต่ำกว่าความหนาเดิม ในการทดลองลากขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ การลากขึ้นรูปแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.462 มิลลิเมตร ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความหนามากว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 Mpa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.479 มิลลิเมตร และในการทดลองการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมัน 5 และ 7.5 MPa. ผลการทดลองพบว่า ที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa. มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.480มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่า ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa. มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.484 มิลลิเมตร ซึ่งสรุปได้ว่าการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa. มีการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยที่สุด



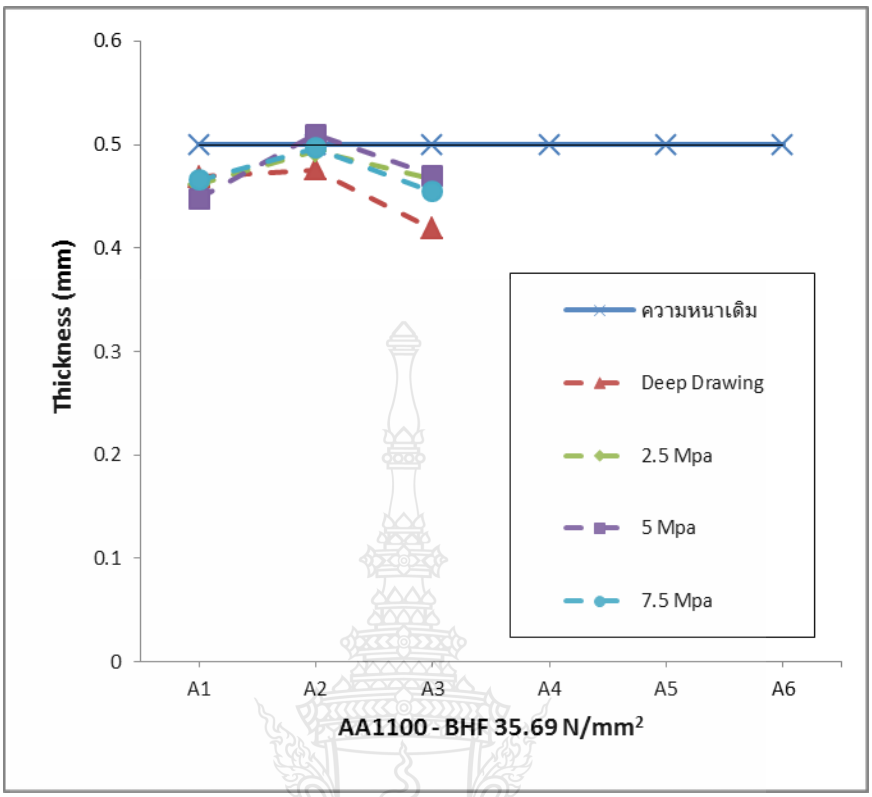
รูปที่ 4.20 ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นอลูมิเนียม AA1100 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2

จากรูปที่ 4.20 แสดงค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นอลูมิเนียม AA1100หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 ผลการทดลองพบว่า ผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ลากขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ไม่สามารถขึ้นรูปได้ตามกำหนด เกิดการฉีกขาด สามารถวัดความหนาได้ 3 จุด คือ ที่จุด A1 , A2 , A3 ในการทดลองลากขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ การลากขึ้นรูปแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.448 มิลลิเมตร ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความหนามากว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 Mpa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.455 มิลลิเมตร และในการทดลองการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมัน 5 และ 7.5 MPa. ผลการทดลองพบว่า ที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa. มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.469 มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่า ที่แรงดันน้ำมัน 15 MPa. มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.481 มิลลิเมตร ซึ่งสรุปได้ว่าการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa. มีการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยที่สุด



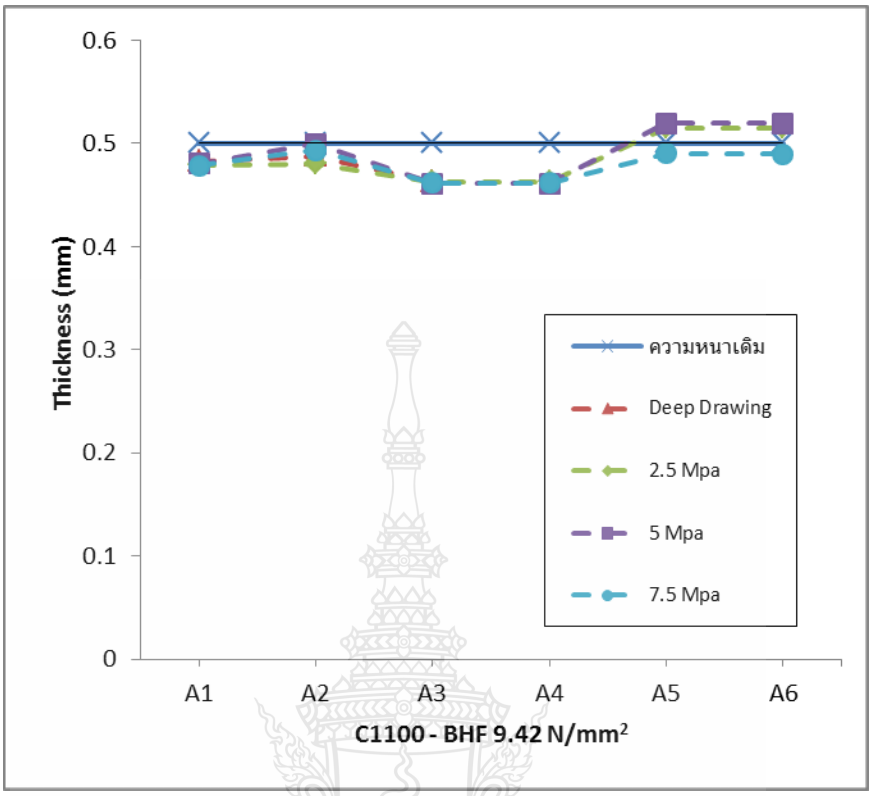
รูปที่ 4.21 ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นอลูมิเนียม AA1100 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2

จากรูปที่ 4.21 แสดงค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นอลูมิเนียม AA1100หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 ผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ลากขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ไม่สามารถขึ้นรูปได้ตามกำหนด เกิดการฉีกขาด สามารถวัดความหนาได้ 3 จุด คือ ที่จุด A1 , A2 , A3 ในการทดลองลากขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ การลากขึ้นรูปแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.448 มิลลิเมตร ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความหนามากว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 Mpa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.455 มิลลิเมตร และในการทดลองการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมัน 5 และ 7.5 MPa. ผลการทดลองพบว่า ที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa. มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.469 มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่า ที่แรงดันน้ำมัน 15 MPa. มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.481 มิลลิเมตร ซึ่งสรุปได้ว่าการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa. มีการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยที่สุด



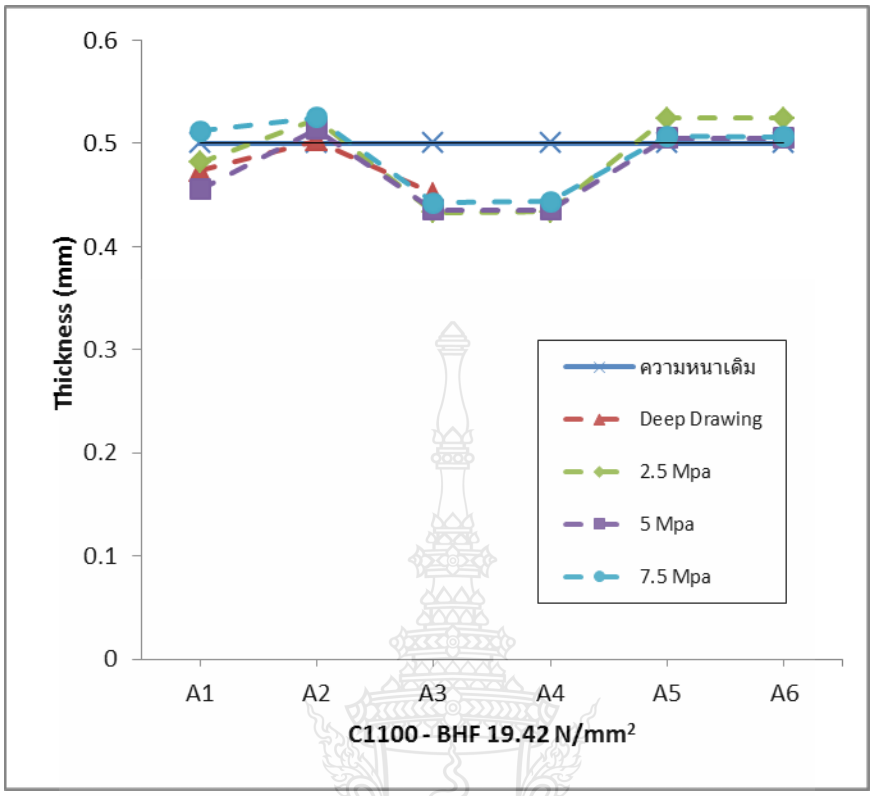
รูปที่ 4.22 ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นอลูมิเนียม AA1100 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2

จากรูปที่ 4.22 แสดงค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นอลูมิเนียม AA1100หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 ผลการทดลองพบว่า ที่จุดA2, A3 และ A4 เป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาต่ำกว่าความหนาเดิม ส่วนที่จุด A5 และ A6 เป็นจุดที่มีความหนามากกว่าความหนาเดิม ในการทดลองลากขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ การลากขึ้นรูปแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.455 มิลลิเมตร ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความหนามากว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 Mpa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.464 มิลลิเมตร และในการทดลองการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมัน 5 และ 7.5 MPa. ผลการทดลองพบว่า ที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa. มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.467 มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่า ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa. มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.482 มิลลิเมตร ซึ่งสรุปได้ว่าการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa. มีการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยที่สุด



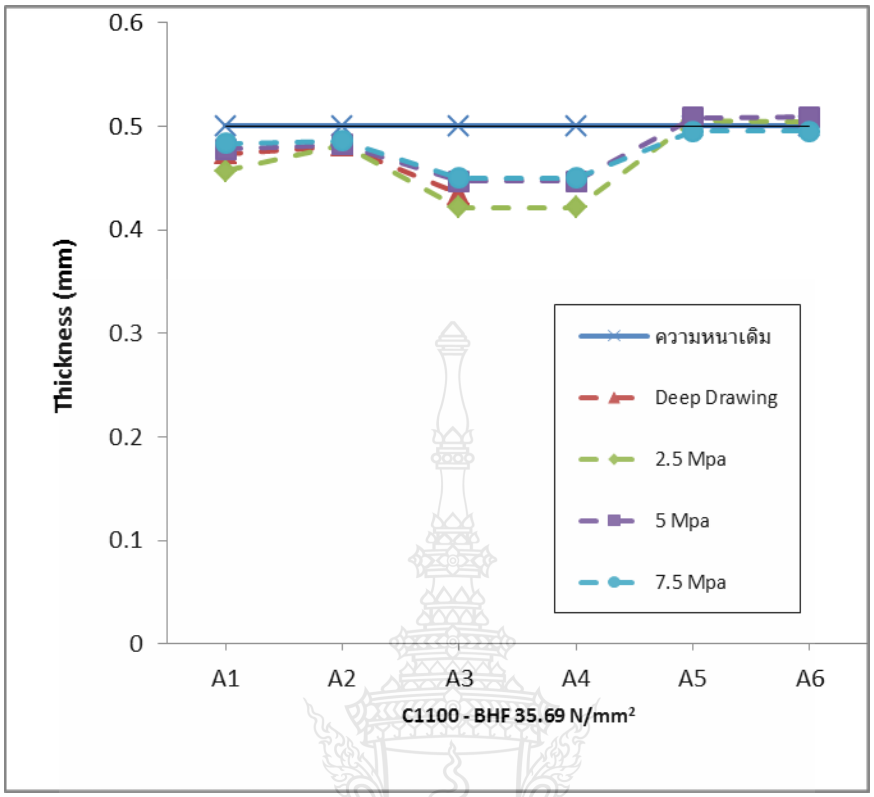
รูปที่ 4.23 ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นทองแดง C1100 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2

จากรูปที่ 4.23 แสดงค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นทองแดง C1100 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 ผลการทดลองพบว่า ที่จุดA2, A3 และ A4 เป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาต่ำกว่าความหนาเดิม ส่วนที่จุด A5 และ A6 เป็นจุดที่มีความหนามากกว่าความหนาเดิม ในการทดลองลากขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ การลากขึ้นรูปแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.458 มิลลิเมตร ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความหนามากว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 Mpa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.474 มิลลิเมตร และในการทดลองการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมัน 5 และ 7.5 MPa. ผลการทดลองพบว่า ที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa. มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.480 มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่า ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa. มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.493 มิลลิเมตร ซึ่งสรุปได้ว่าการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa. มีการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยที่สุด



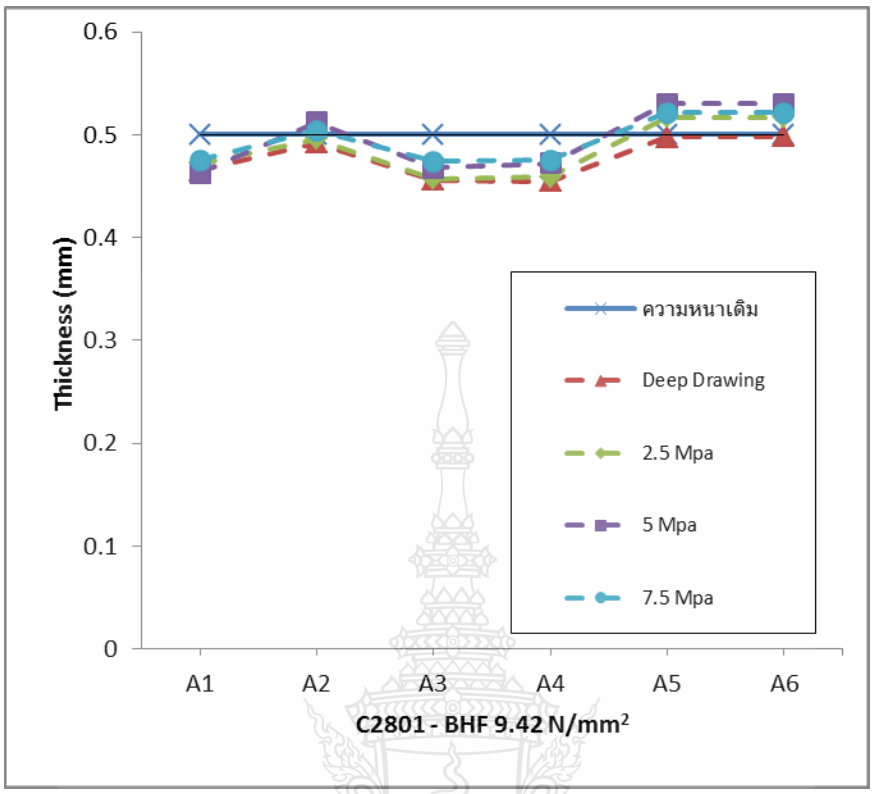
รูปที่ 4.24 ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นทองแดง C1100 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2

จากรูปที่ 4.24 แสดงค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นทองแดง C1100 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 ผลการทดลองพบว่า ที่จุดA2, A3 และ A4 เป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาต่ำกว่าความหนาเดิม ส่วนที่จุด A5 และ A6 เป็นจุดที่มีความหนามากกว่าความหนาเดิม ในการทดลองลากขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ การลากขึ้นรูปแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.454 มิลลิเมตร ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความหนามากว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 Mpa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.475 มิลลิเมตร และในการทดลองการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมัน 5 และ 7.5 MPa. ผลการทดลองพบว่า ที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa. มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.485 มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่า ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa. มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.490 มิลลิเมตร ซึ่งสรุปได้ว่าการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa. มีการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยที่สุด



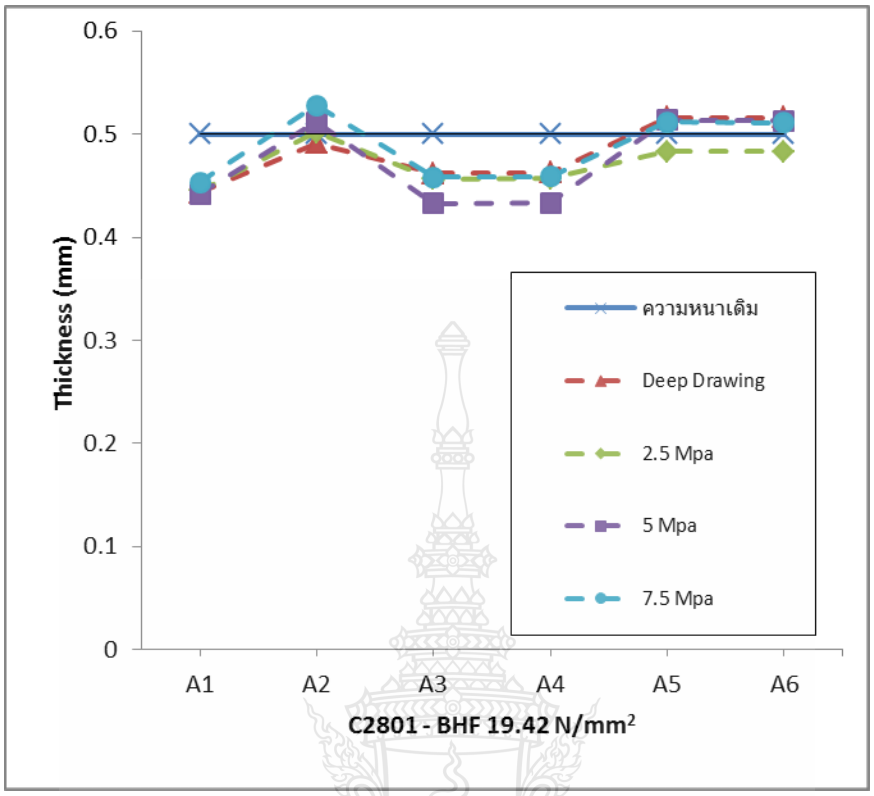
รูปที่ 4.25 ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นทองแดง C1100 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2

จากรูปที่ 4.25 แสดงค่าความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป แผ่นทองแดง C1100 แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 ผลการทดลองพบว่า ในการวัดความหนาการลากขึ้นรูปแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.456 มิลลิเมตร ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 Mpa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.465 มิลลิเมตร และในการทดลองการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมัน 5 และ 7.5 MPa ผลการทดลองพบว่า ที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.478 มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่า ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.487มิลลิเมตร ซึ่งสรุปได้ว่าการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa มีการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยที่สุด



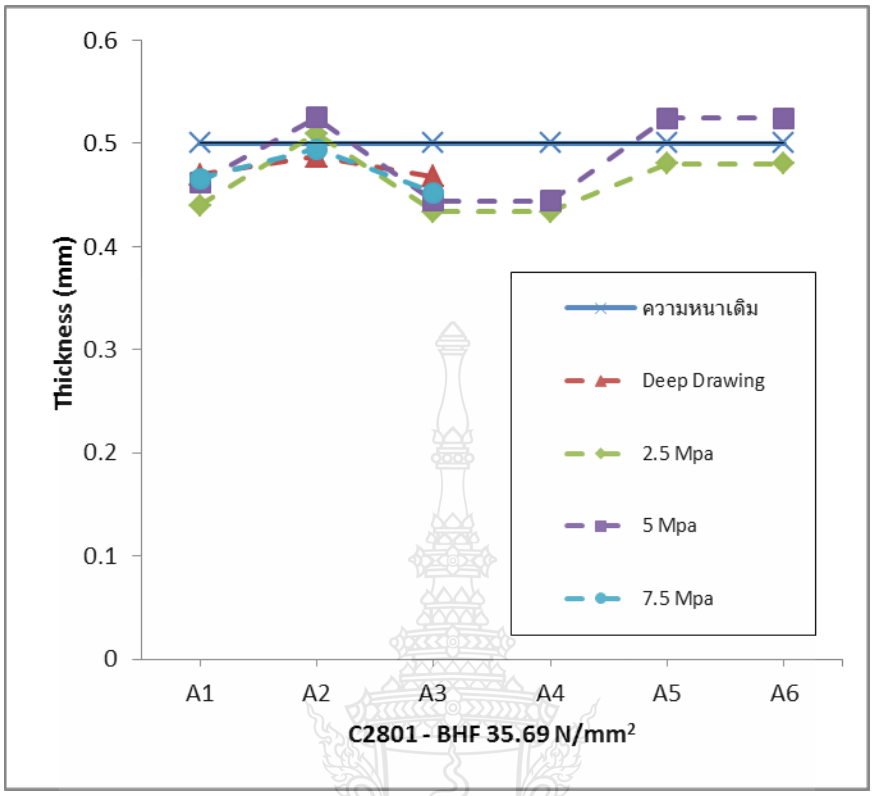
รูปที่ 4.26 ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นทองเหลือง C2801 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2

จากรูปที่ 4.26 แสดงค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นทองเหลือง C2801 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 ผลการทดลองพบว่า ที่จุดA2, A3 และ A4 เป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาต่ำกว่าความหนาเดิม ส่วนที่จุด A5 และ A6 เป็นจุดที่มีความหนามากกว่าความหนาเดิม ในการทดลองลากขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ การลากขึ้นรูปแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.457 มิลลิเมตร ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความหนามากว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 Mpa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.470 มิลลิเมตร และในการทดลองการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมัน 5 และ 7.5 MPa. ผลการทดลองพบว่า ที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa. มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.486 มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่า ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa. มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.492 มิลลิเมตร ซึ่งสรุปได้ว่าการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa. มีการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยที่สุด



รูปที่ 4.27 ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นทองเหลือง C2801 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2

จากรูปที่ 4.12 แสดงค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นทองเหลือง C2801 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 ผลการทดลองพบว่า ที่จุดA2, A3 และ A4 เป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาต่ำกว่าความหนาเดิม ส่วนที่จุด A5 และ A6 เป็นจุดที่มีความหนามากกว่าความหนาเดิม ในการทดลองลากขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ การลากขึ้นรูปแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.462 มิลลิเมตร ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความหนามากว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 Mpa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.471มิลลิเมตร และในการทดลองการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมัน 5 และ 7.5 MPa. ผลการทดลองพบว่า ที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa. มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.474 มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่า ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa. มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.487มิลลิเมตร ซึ่งสรุปได้ว่าการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa. มีการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยที่สุด

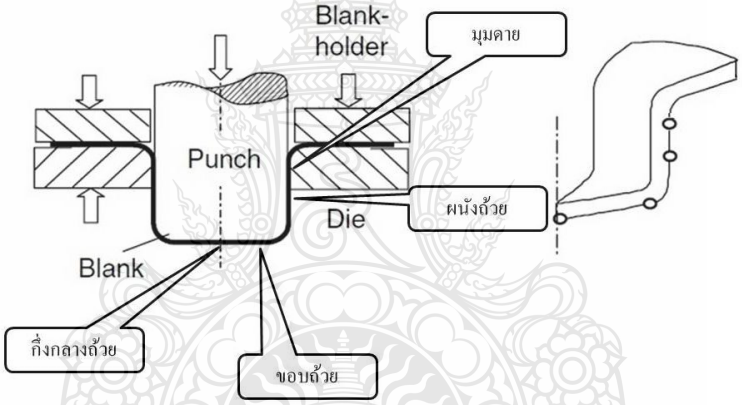


รูปที่ 4.28 ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นทองเหลือง C2801 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2

จากรูปที่ 4.28 แสดงค่าความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป แผ่นทองเหลือง C2801 แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 ผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ลากขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ไม่สามารถขึ้นรูปได้ตามกำหนด เกิดการฉีกขาด สามารถวัดความหนาได้ 3 จุด คือ จุดที่ 1 , จุดที่ 2 และจุดที่ 3 และในการวัดความหนาการลากขึ้นรูปแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.475 มิลลิเมตร ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความหนามากว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 Mpa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.480 มิลลิเมตร และในการทดลองการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมัน 10 และ 15 MPa ผลการทดลองพบว่า ที่แรงดันน้ำมัน 10 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.488 มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่าที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.491 มิลลิเมตร ซึ่งสรุปได้ว่าการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa มีการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยที่สุด

4.3.3 ความเครียดที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงาน

ความเครียดที่ผิวชิ้นงานจากการวัดขนาดกริดวงกลม ในตำแหน่งตามรูปที่ 4.21 แล้วคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริดวงกลมในแต่ละตำแหน่ง แล้วจึงคำนวณหาค่าเฉลี่ยของความเครียดในแต่ละตำแหน่ง จากข้อมูลการทดลองในภาคผนวก ก และผลการทดลองความเครียดสูงสุดที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นงาน คือจุดของผนังด้านข้างจนไปถึงมุมดาย ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองเป็นหลัก และในการทดลองปีกถ้วยไม่ทการวัดความหนา แพราะเกิดรอยย่นในทุกสภาวะจนไม่สามารถทำการวัดค่าความหนาได้ หลังจากนั้นจึงเขียนแผ่นภาพความเครียด (Strain diagram) จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริดวงกลมสำหรับการเปลี่ยนแปลงที่จุดระนาบความเครียด (Plane strain) และการเปลี่ยนรูปแนวเฉือน (Shear deformation)

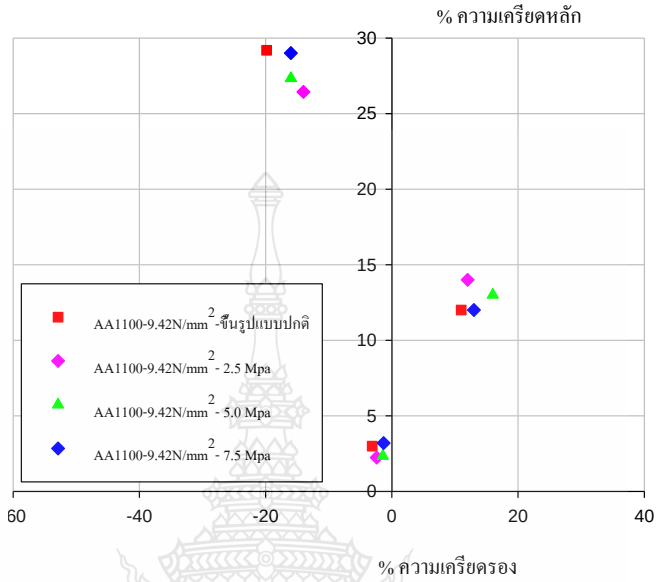


รูปที่ 4.29 ตำแหน่งการวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริดวงกลม [11]

การวิเคราะห์เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ที่แรงดันแตกต่างกัน ของแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 ความหนา 0.50 มิลลิเมตร แรงกดแผ่นชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.31

รูปที่ 4.30 แสดงการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลัก และความเครียดรองของชิ้นงานที่ได้จากขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและแกนรองของการขึ้นรูปแบบปกติ ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลักที่ 0.29896 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง -3.1192 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 11.8 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 10.62 เปอร์เซ็นต์ และตำแหน่งที่ 3 มีค่า

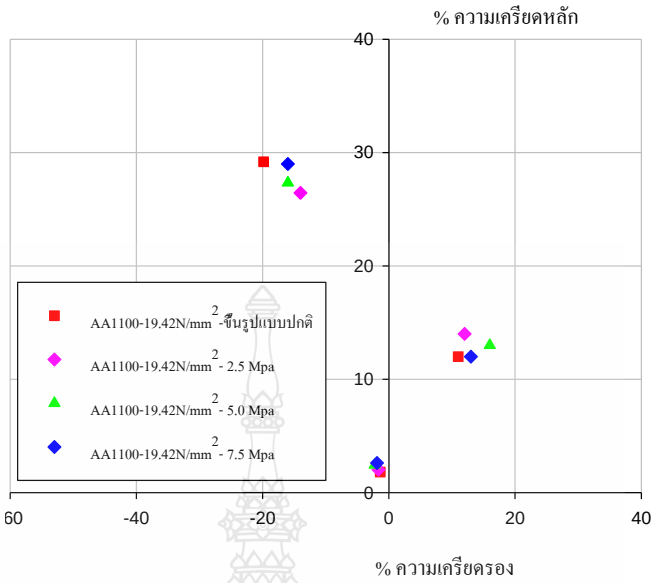
ความเครียดหลักเท่ากับ 29.194 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง -19.845 เปอร์เซ็นต์ มีการยืดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน



รูปที่ 4.30 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2

ส่วนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 2.5,5 และ 7.5 MPa พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและแกนรอง ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลัก 2.2376 , 13.944 และ 26.443 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 2.394 ,11.934 และ 13.66 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 14.10 ,13.8 และ 14.06 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 1.43 ,16.39 และ 4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 3.19, 11.98 และ 29.68 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง -1.29 ,12.88 และ 15.68 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีการยืดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน

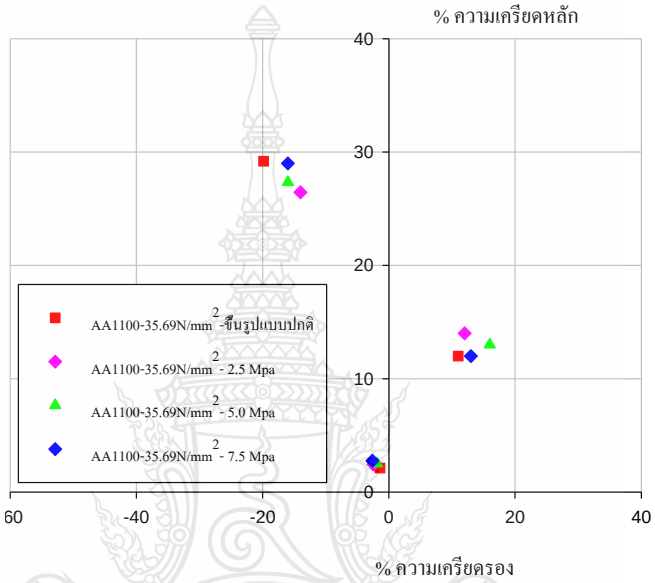
การวิเคราะห์เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ที่แรงดันแตกต่างกัน ของแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 ความหนา 0.50 มิลลิเมตร แรงกดแผ่นชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.31 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2

จากรูปที่ 4.31 แสดงการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลัก และความเครียดรองของชิ้นงานที่ได้จากขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและแกนรองของการขึ้นรูปแบบปกติ ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลักที่ 2.211 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง -1.665 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 13.8 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 12.2 เปอร์เซ็นต์ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 29.194 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง -19.845 เปอร์เซ็นต์ มีการยืดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน ส่วนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 2.5,5 และ 7.5 MPa พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและแกนรอง ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลัก 2.227 , 2.239 และ 2.161 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง -1.649 ,-1.635 และ -1.88 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 14.10 ,13.8 และ 12.06 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 12.28 ,15.39 และ 12.64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 26.13, 27.98 และ 29.58 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 14.14 ,16.88 และ 16.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีการยืดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน

การวิเคราะห์เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ที่แรงดันแตกต่างกัน ของแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 ความหนา 0.50 มิลลิเมตร แรงกดแผ่นชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.33

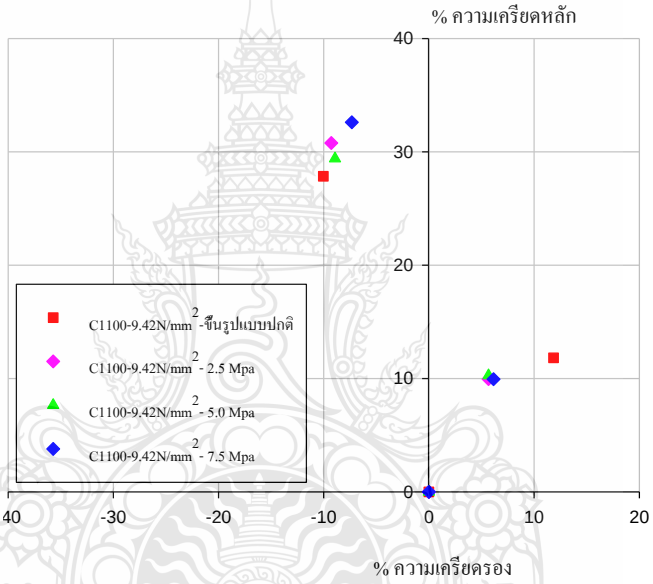


รูปที่ 4.32 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2

จากรูปที่ 4.32 แสดงการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลัก และความเครียดรองของชิ้นงานที่ได้จากขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและแกนรองของการขึ้นรูปแบบปกติ ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลักที่ 2.218 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง -1.411 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 12.18 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 11.2 เปอร์เซ็นต์ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ29.194 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง -19.845 เปอร์เซ็นต์ มีการยืดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน ส่วนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 2.5,5 และ 7.5 MPa พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและแกนรอง ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลัก 2.344 , 2.253 และ 2.476 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 14.531 ,13.334 และ 12.668 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 14.10 ,13.8 และ 14.06 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 5.28 ,4.39 และ 4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และตำแหน่งที่ 3 มีค่า

ความเครียดหลักเท่ากับ 29.13, 28.98 และ 26.58 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 18.14 ,21.88 และ 18.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีการยืดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน

การวิเคราะห์เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ที่แรงดันแตกต่างกัน ของแผ่นทองแดง C1100 ความหนา 0.50 มิลลิเมตร แรงกดแผ่นชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.33

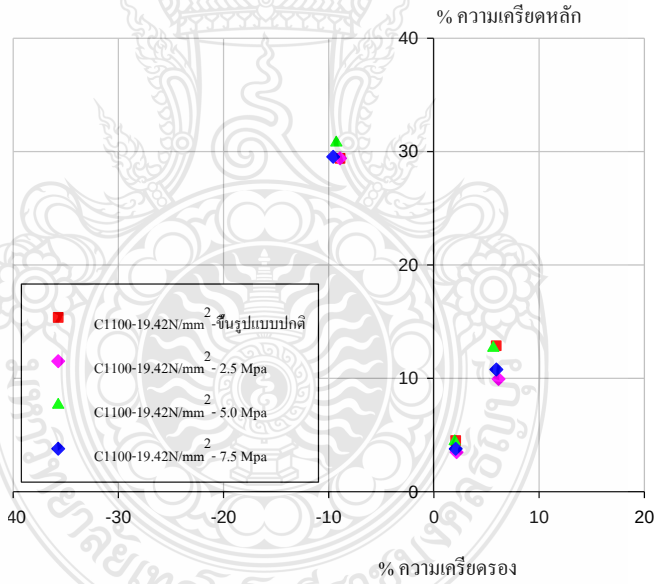


รูปที่ 4.33 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2

รูปที่ 4.33 แสดงการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลัก และความเครียดรองของชิ้นงานที่ได้จากขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและแกนรองของการขึ้นรูปแบบปกติ ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลักที่ 3.439 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 2.747 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 9.826 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 7.852 เปอร์เซ็นต์ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 27.842 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง -10.039 เปอร์เซ็นต์ มีการยืดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน ส่วนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 2.5,5 และ 7.5 MPa พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุใน

แนวแกนหลักและแกนรอง ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลัก 3.483 , 3.595 และ 3.478เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 1.985 ,1.985 และ 2.150 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 9.953 ,10.276 และ 9.936 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 5.672 ,6.577 และ 6.143 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 30.786, 29.408 และ 32.608 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง -9.284 ,-8.933 และ -7.033 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีการยืดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน

การวิเคราะห์เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ที่แรงดันแตกต่างกัน ของแผ่นทองแดง C1100 ความหนา 0.50 มิลลิเมตร แรงกดแผ่นชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.35

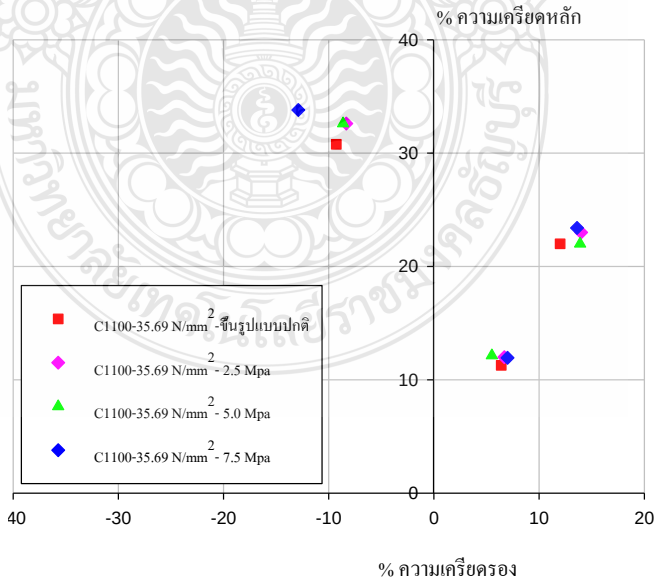


รูปที่ 4.34 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2

รูปที่ 4.34 แสดงการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลัก และความเครียดรองของชิ้นงานที่ได้จากขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและแกนรองของการขึ้นรูปแบบปกติ ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลักที่ 4.508 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 2.072 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียด

หลักเท่ากับ 12.879 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 5.921 เปอร์เซ็นต์ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 29.408 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง -8.933 เปอร์เซ็นต์ มีการยืดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน ส่วนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 2.5,5 และ 7.5 MPa พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและแกนรอง ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลัก 3.478 , 4.436 และ 3.772 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 2.150 ,1.975 และ 2.077 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 9.936 ,12.673 และ 10.778 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 6.143 ,5.646 และ 5.934 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 29.048, 30.786 และ 29.543 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง -8.933 ,-9.284 และ -9.575 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีการยืดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน

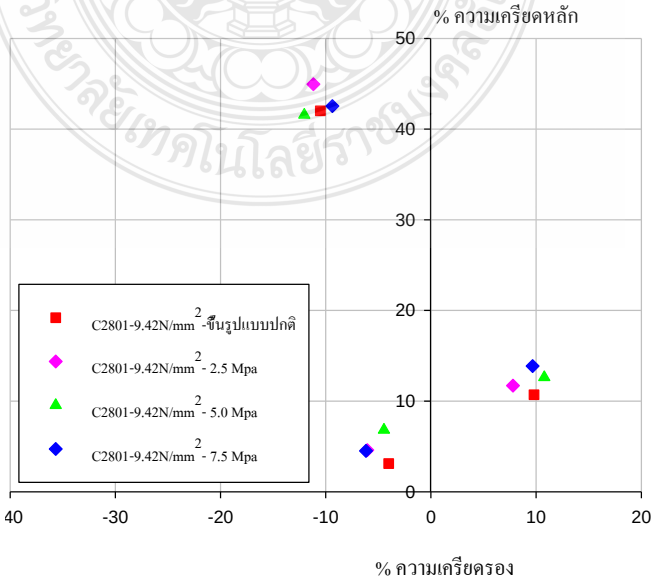
การวิเคราะห์เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ที่แรงดันแตกต่างกัน ของแผ่นทองแดง C1100 ความหนา 0.50 มิลลิเมตร แรงกดแผ่นชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.35 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2

รูปที่ 4.35 แสดงการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลัก และความเครียดรองของชิ้นงานที่ได้จากขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและแกนรองของการขึ้นรูปแบบปกติ ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลักที่ 11.272 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 6.401 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 21.987 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 11.812 เปอร์เซ็นต์ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 30.786 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง -9.285 เปอร์เซ็นต์ มีการยืดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน ส่วนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 25,5 และ 7.5 MPa พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและแกนรอง ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลัก 11.997 , 12.140 และ 11.935 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 6.689 ,5.510 และ 7.001 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 23.10 ,21.8 และ 33.66 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 14.28 ,13.939 และ 13.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 30.786, 32.608 และ 33.809 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง -8.33 ,-8.603 และ -12.884 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีการยืดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน

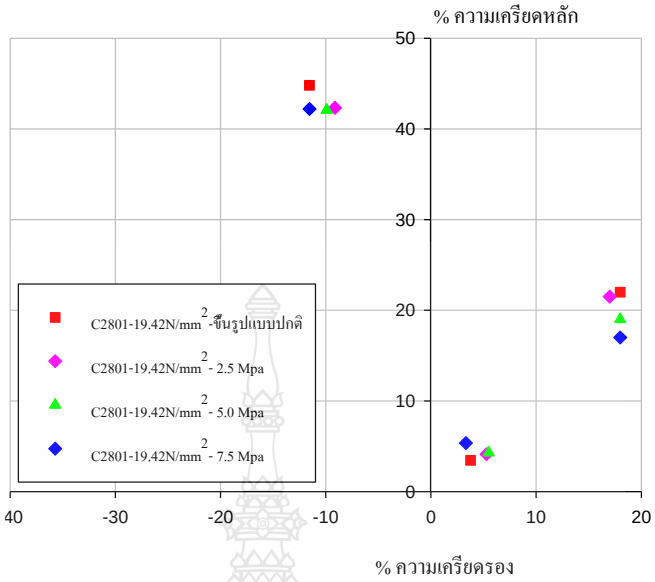
การวิเคราะห์เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ที่แรงดันแตกต่างกัน ของแผ่นทองเหลือง C2801 ความหนา 0.50 มิลลิเมตร แรงกดแผ่นชิ้นงาน 9.42 N/mm^2 ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.36 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2

รูปที่ 4.36 แสดงการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลัก และความเครียดรองของชิ้นงานที่ได้จากขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและแกนรองของการขึ้นรูปแบบปกติ ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลักที่ 3.1056 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง -4.076 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 10.76 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 9.8 เปอร์เซ็นต์ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 42.02 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง -10.52 เปอร์เซ็นต์ มีการยืดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน ส่วนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 2.5,5 และ 7.5 MPa พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและแกนรอง ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลัก 4.5976 , 6.83 และ 4.502 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง -6.0448 ,-4.46 และ -6.17 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 11.7 ,12.6 และ 13.86 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 7.8 ,10.78 และ 9.69 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 44.9, 241.56 และ 42.58 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง -10.51,12.03 และ 9.36 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีการยืดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน

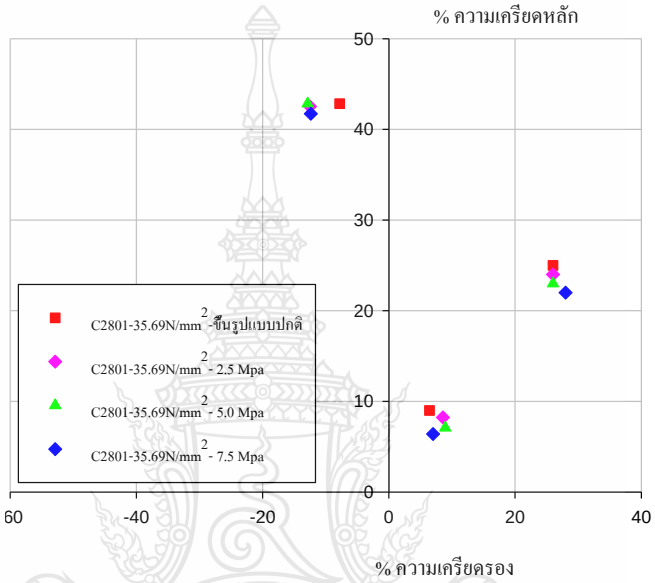
การวิเคราะห์เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ที่แรงดันแตกต่างกัน ของแผ่นทองเหลือง C2801 ความหนา 0.50 มิลลิเมตร แรงกดแผ่นชิ้นงาน 19.62 N/mm^2 ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.37 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2

รูปที่ 4.37 แสดงการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลัก และความเครียดรองของชิ้นงานที่ได้จากขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและแกนรองของการขึ้นรูปแบบปกติ ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลักที่ 3.448 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 4.124 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 22.08 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 18.18 เปอร์เซ็นต์ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 44.8 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง -10.51 เปอร์เซ็นต์ มีการยืดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน ส่วนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 2.5,5 และ 7.5 MPa พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและแกนรอง ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลัก 4.124 , 4.3 และ 5.34 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 5.28 ,5.5 และ 3.33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 21.15 ,18.8 และ 17.06 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 17.28 ,18.09 และ 18.14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 42.32, 42.088 และ 41.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง -9.12 ,-9.9 และ -11.53 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีการยืดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน

การวิเคราะห์เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ที่แรงดันแตกต่างกัน ของแผ่นทองเหลือง C2801 ความหนา 0.50 มิลลิเมตร แรงกดแผ่นชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.38 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2

รูปที่ 4.38 แสดงการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลัก และความเครียดรองของชิ้นงานที่ได้จากขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและแกนรองของการขึ้นรูปแบบปกติ ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลักที่ 8.998 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 6.44 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 25.08 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 26.02 เปอร์เซ็นต์ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 42.884 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง -7.72 เปอร์เซ็นต์ มีการยืดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน ส่วนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 2.5,5 และ 7.5 MPa พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและแกนรอง ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลัก 8.234 , 7.092 และ 6.04 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 8.575, 8.932 และ 7.03 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 24.10 ,23.8 และ 22.06 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ความเครียดรอง 25.88 ,26.09 และ 28.04 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 42.54, 42.54 และ 41.72 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง -12.49 ,-12.87 และ -12.85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีการยืดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุดและพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน

จากผลการทดลองข้างต้น ได้ทำการเปรียบเทียบความเครียดหลักและความเครียดรองสูงสุดของกระบวนการขึ้นรูปแบบธรรมดากับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่แรงดันต่างกันของแผ่นโลหะนอกกลุ่มเหล็กทั้ง 3 ชนิด และแรงกดชิ้นงานที่ต่างกัน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยเรื่องอิทธิพลในการลากขึ้นรูปลึกโลหะนอกกลุ่มเหล็กด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ สามารถสรุปผลการทดลองสำหรับการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลในการขึ้นรูป คือ แรงลากขึ้นรูป แรงกดชิ้นงาน และแรงดันน้ำมันในห้องแม่พิมพ์ดายซึ่งมีผลต่อกระบวนการการขึ้นรูปด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว โดยทำการศึกษาถึงผลกระทบต่อ แรงในการลากขึ้นรูปและแรงกดพั้นช์ที่กระทำต่อชิ้นงาน คุณภาพของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป และความเครียดที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงาน สามารถสรุปผลตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปการทดลอง

สรุปการทดลองจากผลการศึกษาวิจัยในเรื่อง อิทธิพลในการลากขึ้นรูปลึกโลหะนอกกลุ่มเหล็กด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ โดยทำการทดลองโดยการลากขึ้นรูปลึก โลหะนอกกลุ่มเหล็ก 3 ชนิด ได้แก่ อลูมิเนียม AA1100 ทองเหลือง C2801 และทองแดง C 1100 ที่ความหนา 0.5 mm ลากขึ้นรูปลึกเป็นรูปถ้วยทรงกระบอกแบบมีปีก แรงดันน้ำมันภายในห้องแม่พิมพ์ควบคุมที่ 2.5 , 5.0 และ 7.5 Mpa. และแรงกดชิ้นงานสามระดับคือ 9.42, 19.62 และ 35.69 N/mm^2 ทำการศึกษาถึงผล กระทบที่มีต่อ แรงในการลากขึ้นรูปและแรงกดพั้นช์สูงสุดที่กระทำต่อชิ้นงาน ความหนาของชิ้นงาน หลังการขึ้นรูป และความเครียดที่ผิวของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป สามารถสรุป อิทธิพลของตัวแปรต่างๆได้ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 อิทธิพลของแรงลากขึ้นรูป พบว่าแรงลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ นั้นใช้แรงลากขึ้นรูปมากกว่าการลากขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันน้ำมันในห้องแม่พิมพ์ดายเพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้นด้วยเพื่อที่จะเอาชนะแรงดันน้ำมันในห้องดายแต่แรงลากขึ้นรูปที่เพิ่มมากขึ้นนั้นกลับส่งผลให้วัสดุทองแดง C1100 ที่ไม่สามารถลากขึ้นรูปแบบปกติได้สามารถขึ้นรูปได้

5.1.2 อิทธิพลของแรงกดพันช์ แรงกดพันช์สูงสุดของการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกมีแรงกดพันช์สูงสุดมากกว่าการลากขึ้นรูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงกดชิ้นงานที่เพิ่มสูงขึ้น แรง

กดพั้นช์สูงสุดมีแนวโน้มสูงขึ้นตาม ทำให้โลหะเกิดการไหลตัวได้น้อย และผลจากการเพิ่มแรงกดชิ้นงานส่งผลให้รอยย่นลดลง สังเกตได้จากทองแดง C1100 ที่ไม่สามารถขึ้นรูปได้ในสภาวะปกติ แต่สามารถขึ้นรูปได้ในสภาวะของไฮดรอไดนอมิกส์วัสดุอลูมิเนียม AA1100 แรงกดพันช์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานมีรอยฉีกขาดที่ขอบพันช์ ส่วนทองเหลือง C2801 แรงกดพันช์ที่แรงดันน้ำมัน 7.5 MPa แรงกดเหยียบชิ้นงานที่ 35.69 N/mm^2,มีแรงเหยียบชิ้นงานมากเกินไปจนส่งผลทำให้ชิ้นงานมีรอยฉีกขาด

5.1.3 การเปรียบเทียบชิ้นงานหลังการในการลากขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์มีการเปลี่ยนแปลงความหนา ความเครียดหลัก และความเครียดรองน้อยกว่าชิ้นงานที่ลากขึ้นรูปแบบปกติ และเมื่อเพิ่มแรงดันน้ำมันภายในห้องแม่พิมพ์ดาย ในกระบวนการไฮดรอไดนามิก มีผลต่อความเครียดบนผิวชิ้นงาน ทำให้ความหนาชิ้นงานหลังการมีการขึ้นรูปเปลี่ยนแปลงน้อยลง

5.1.4 การเปรียบเทียบการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์ ของแผ่นโลหะนอกกลุ่มเหล็กทั้ง 3 ชนิดพบว่า

5.1.4.1 อลูมิเนียม AA1100 ความหนา 0.5 mm ไม่สามารถขึ้นรูปได้ในสภาวะการขึ้นรูปลึกปกติ (0 Mpa) ที่สภาวะแรงดันน้ำมันภายในห้องแม่พิมพ์ควบคุมที่ 2.5 Mpa. ที่มีแรงกดชิ้นงาน 9.42 , 19.62 และ 35.69 N/mm^2 สภาวะแรงดันน้ำมันภายในห้องแม่พิมพ์ควบคุมที่ 5 Mpa. ที่มีแรงกดชิ้นงาน 9.42 ,19.62 และ 35.69 N/mm^2 และสภาวะแรงดันน้ำมันภายในห้องแม่พิมพ์ควบคุมที่ 7.5 Mpa. ที่มีแรงกดชิ้นงาน 9.42 , 19.62 และ 35.69 N/mm^{2}พบว่าชิ้นงานทั้งหมดฉีกขาด

5.1.4.2 ทองแดง C1100 ความหนา 0.5 มม ไม่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปแบบปกติที่แรงกดเหยียบชิ้นงานที่ 9.42 ,19.62 และ 35.69 N/mm^{2}ได้ แต่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่ในสภาวะที่กำหนดแรงกดเหยียบชิ้นงานที่ 9.42 N/mm2 ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa 5 MPa และ 7.5 MPa สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่ในสภาวะที่กำหนดแรงกดเหยียบชิ้นงานที่ 19.62 N/mm2 ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa 5 MPa และ 7.5 MPa และ สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่ในสภาวะที่กำหนดแรงกดเหยียบชิ้นงานที่ 35.69 N/mm^2 ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa 5 MPa และ 7.5 MPa โดยที่รอยย่นของชิ้นงานไม่แตกต่างกัน

5.1.4.3 ทองเหลือง C2801 ที่ความหนา 0.5 มม.สามารถขึ้นรูปได้ในสภาวะ การลากขึ้นรูปลึกปกติ (Deep Drawing) และ. สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่ในสภาวะที่กำหนดแรงกดเหยียบชิ้นงานที่ 9.42 N/mm2 ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa 5 MPa และ 7.5 MPa สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่ในสภาวะที่กำหนดแรงกดเหยียบชิ้นงานที่ 19.62 N/mm2 ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa 5 MPa และ 7.5 MPa และ สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่ในสภาวะที่กำหนดแรงกดเหยียบชิ้นงานที่ 35.69 N/mm^2 ที่แรงดันน้ำมัน 2.5 MPa 5 MPa โดยที่รอยย่นของชิ้นงานไม่แตกต่างกัน แต่ไม่สามารถขึ้นรูปที่สภาวะแรงกดเหยียบชิ้นงาน 35.69 N/mm^2 และแรงดันน้ำมันภายในห้องแม่พิมพ์ควบคุมที่ 7.5 Mpa เนื่องจากในสภาวะนี้ชิ้นงานมีรอยฉีกขาดเกิดขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะทั่วไป

5.2.1 ก่อนการเริ่มปฏิบัติงานทุกครั้งต้องตรวจสอบระดับของของเหลวภายในถังควรอยู่ในระดับที่เหมาะสม โดยดูจากเกจวัดระดับน้ำมันควรมีน้ำมันอย่างน้อย 1/3 ของเกจวัด (ข้อมูลจากการสอบถามผู้ผลิต)

5.2.2 ในช่วงที่พั้นช์เคลื่อนลงมากดชิ้นงานตามตำแหน่งเริ่มต้นที่กำหนดไว้ และปล่อยน้ำมันเข้าสู่ภายในแม่พมิพ์ดาย ต้องสังเกตว่าพั้นช์สัมผัสกับชิ้นงานหรือไม่ หรือพั้นช์อยู่ตามตำแหน่งเริ่มต้นที่กำหนดไว้หรือไม่ เพราะกรณีที่พั้นช์ไม่อยู่ตามตำแหน่งเริ่มต้นที่กำหนดไว้ จะส่งผลต่อรูปทรงและคุณภาพของชิ้นงาน

5.2.3 การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการทดลอง ควรคำนึงถึงผลกระทบของแรงดันน้ำมันที่เพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป เนื่องจากเป็นการปฏิบัติงานภายใต้สภาวะของแรงดันน้ำมันที่สูง ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของพั้นช์ลงไปแทนที่ปริมาตรน้ำมันในแม่พิมพ์ดาย

5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป

5.3.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปอลูมิเนียม AA1100 ที่ความหนา 0.5 mm ด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปลึกแบบไฮดรอไดนามิกส์

5.3.2 ศึกษาอิทธิพลของความเร็วในการขึ้นรูปที่มีผลต่อกระบวนการการลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์

5.3.3 ศึกษาการกำหนดระดับแรงดันน้ำมันที่ให้ผลดีที่สุดในการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์

5.3.4 ศึกษาการกำหนดแรงกดชิ้นงานที่ให้ผลดีที่สุดในการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์

5.3.5 ศึกษาถึงอิทธิพลของกลไกการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำมัน ในระหว่างกระบวนการการลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์

5.3.6 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรของแม่พิมพ์ เช่น ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ และมุมดาย ที่มีผลต่อกระบวนการการลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกส์

5.3.7 ศึกษาการประยุกต์ใช้ระเบียบการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง

รายการอ้างอิง

[1] Kang, D. “A study on hydrodynamic deep drawing equipment,” **Journal Materials Processing Technology**, 2000, 101, p 21

[2] Lang, L.H., “Investigation into the effect of pre-bulging during hydromechanical deep drawing with uniform pressure onto the blank,” **International Journal of Machine Tools & Manufacture Design, Research and Application**, 2004, 44, p 649

[3] Emmens, W.C.,”Some Frictional Aspects of Aluminium in Deep Drawing,” **International Congress on Tribology of Manufacturing Processes (ICTMP)**, 19-23 October 1997, Gifu Japan, 1997, p 114

[4] Ajay, D. and Yadav, A., **Process analysis and design in stamping and sheet hydroforming,** Ph. D. Thesis, Philosophy Engineer, The Ohio State University, 2008, pp193-196

[5] กฤษดา บรรเทาพิษ, “การศึกษาอิทธิพลของของเหลวในการลากขึ้นรูปลึกเหล็กคาร์บอนรีดเย็น SPCC ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว” ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี,2555

[6] มอก.977-2551 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม น้ำมันไฮดรอลิก-พื้นฐานน้ำมันแร่

[7] International standard ISO 3105 : 1994 Glass capillary kinematic viscometers – Specifications and operating instructions

[8] สุริยา น้ำแก้ว, “อิทธิพลในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก” ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี,2555

[9] Buranathiti, T., Cao, J., Xia, Z.C., Chen, W., “Probabilistic Design in a Sheet Metal Stamping Process under Failure Analysis,” **NUMISHEET 2005**, Detroit, MI, August 15-19, 2005, pp. 867-872

[10] Standard JIS B 5012 : 2008 Coild helical spring for press dies บทที่ 2

[11] Tschaetsch, H., **Metal Forming Practise,** Verlag Berlin Heidelberg Germany, Springer, 2006, pp. 142-183

[12] Gharib H., “Optimization of the blank holder force in cup drawing”, **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, Vol. 18, 2006, pp 291 – 294

[13] Marciniak, Z Duncan, J.L. and Hu, S.J., **Mechanics of sheet metal forming**, House Jordan Hill Oxford, Butterworth-Heinemann, Second edition, 2002, pp.30-128

[14] อภิชาต แสนรัษฎากร, “การศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อขบวนการลากขึ้นรูปโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์”, ปริญญานิพนธ์มหาบัญฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2549

[15] Kurt Lange, **Handbook of metal forming**, McGraw-Hill The United States of America, McGraw-Hill, 1985, pp. 20.1-20.69

[16] Lang, L.H., “Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydoforming,” **Journal of Materials Processing Technology**, 2004, 151, pp 165-166

[17] Joakim L., **“Numerical simulation of tube hydroforming”**, Ph. D. Thesis, Civil and environmental engineering, Lulea university of technology, 2004, pp 9-11

[18] Lihui L., “Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure Part I. Experimental observations of the forming process of aluminum alloy, **Journal of Materials Processing Technology**, 2004, 148, pp 119-131

[19] Genick Bar–Meir, Basics of Fluid Mechanics, GNU Free Documentation License, USA, 2008

[20] รศ.ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์, “กลศาสตร์ของไหล”, สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล, กรุงเทพมหานคร, 2010

[21] ขวัญชัย สินทิพย์สมบูรณ์ และ ปานเพชร ชินินทร, “ไฮดรอลิกอุตสาหกรรม”, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์ซีเอ็ด, กรุงเทพมหานคร, หน้าที่ 11-119

[22] เชษฐ อุทธิยัง, **“การศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการลากขึ้นรูปลึกโดยใช้สารหล่อลื่น”**, ปริญญานิพนธ์มหาบัญฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2546

[23] สวัสดิ์ โสดามุข, **การทำนายความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป**, ปริญญานิพนธ์มหาบัณฑิต, วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2550

[24] ธงชัย เพ็งจันทร์ดี, **อิทธิพลของการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดโดยการทำงานด้วยระบบ คอมพิวเตอร์ควบคุมเชิงตัวเลข**, ปริญญานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554

[25] ไพบูลย์ หาญมนต์, **การศึกษารัศมีดายที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปชิ้นงานถ้วยกลมมีปีกของแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น**, การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ครั้งที่ 46, ปีพ.ศ.2551, หน้าที่ 11-18

[26] Hyunok K., Evaluation of stamping lubricants in forming advanced high strength steels (AHSS) using deep drawing and ironing tests, Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209, pp 4122-4144

[27] วิเชียร เถื่อนเครือวัลย์ และ ศุภเอก ประมูลมาก, "**การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานที่ที่มีผลต่องานขึ้นรูปถ้วย**", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8, 22-23 เมษายน 2553, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา, หน้าที่ 653-658

[28] Huiting W., Lin G., Minghe C., "Hydrodynamic deep drawing process assisted by radial pressure with inward flowing liquid", International Journal of Mechanical Sciences, 2011, 53, pp 793-799

[29] ธนสาร อินทรกำธรชัย และ สุวัฒน์ จีรเธียรนาถ, "การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำกับอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์", **การประชุมวิชาการด้านการพัฒนาการดำเนินงานทางอุตสาหกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 2 (CIOD 2011)**, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 11 – 12 พฤษภาคม 2554, หน้าที่ 1

[30] S.H. Zhang , M.R. Jensen , J. Danckert , K.B. Nielsen , D.C. Kang , L.H. Lang "Analysis of the hydromechanical deep drawing of cylindrical cups" **Journal of Materials Processing Technology 103** (2000) 367-373

ภาคผนวก ก
ข้อมูลการทดลอง

ข้อมูลการทดลองตามลำดับขั้นตอนการทดลองของตารางที่ 3.2

ตารางที่ ก.1 แรงในการลากขึ้นรูปแบบปกติ ของแผ่นอลูมิเนียม AA 1100

ระยะกดพั้นช์ลึก		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm^2/sec								
		ค่าแรงคงที่สปริง=9.42 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=19.62 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=35.69 N/mm		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	1.96	13.06	0.911	4.08	27.21	2.092	7.42	49.49	4.022
2	2.50	2.03	13.56	7.765	4.24	28.25	11.499	7.71	51.39	13.164
3	3.75	2.11	14.07	7.857	4.39	29.30	11.734	7.99	53.30	13.414
4	5.00	2.19	14.57	8.335	4.55	30.35	11.499	8.28	55.20	14.022
5	6.25	2.26	15.07	9.949	4.71	31.39	10.784	8.57	57.10	14.507
6	7.50	2.34	15.57	8.239	4.87	32.44	11.499	8.85	59.01	14.877
7	8.75	2.41	16.08	7.955	5.02	33.48	11.024	9.14	60.91	15.129
8	10.00	2.49	16.58	8.713	5.18	34.53	10.784	9.42	62.81	15.614
9	11.25	2.56	17.08	7.479	5.34	35.58	11.499	9.71	64.72	15.627
10	12.50	2.64	17.58	6.907	5.49	36.62	11.259	9.99	66.62	15.522
11	13.75	2.71	18.09	7.477	5.65	37.67	11.499	10.28	68.52	15.654
12	15.00	2.79	18.59	7.857	5.81	38.72	12.214	10.56	70.43	16.377
13	16.25	2.86	19.09	7.763	5.96	39.76	11.499	10.85	72.33	16.507
14	17.50	2.94	19.59	8.523	6.12	40.81	11.734	11.14	74.24	16.287
15	18.75	3.01	20.10	11.659	6.28	41.86	12.214	11.42	76.14	16.417

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 3.01 kN = แรงเหยียบชิ้นงาน ; $\frac{3.01}{15}\times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบชิ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 11.569 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด) ; 19.62 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 2; 12.214 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด) และ 35.69 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 3; 16.417 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด)

ตารางที่ ก.2 แรงในการลากขึ้นด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 2.5 MPa ของแผ่นอลูมิเนียม AA 1100

ระยะกดพั้นช์ลึก		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm^2/sec								
		ค่าแรงคงที่สปริง=9.42 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=19.62 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=35.69 N/mm		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	1.96	13.06	1.860	4.08	27.21	2.190	7.42	49.49	2.862
2	2.50	2.03	13.56	9.290	4.24	28.25	10.332	7.71	51.39	15.716
3	3.75	2.11	14.07	9.290	4.39	29.30	10.582	7.99	53.30	15.808
4	5.00	2.19	14.57	8.810	4.55	30.35	11.190	8.28	55.20	16.286
5	6.25	2.26	15.07	9.770	4.71	31.39	11.675	8.57	57.10	17.900
6	7.50	2.34	15.57	9.770	4.87	32.44	12.045	8.85	59.01	16.190
7	8.75	2.41	16.08	8.340	5.02	33.48	12.297	9.14	60.91	15.906
8	10.00	2.49	16.58	13.090	5.18	34.53	12.782	9.42	62.81	16.664
9	11.25	2.56	17.08	8.340	5.34	35.58	12.795	9.71	64.72	15.430
10	12.50	2.64	17.58	6.910	5.49	36.62	12.690	9.99	66.62	14.858
11	13.75	2.71	18.09	8.810	5.65	37.67	12.822	10.28	68.52	15.428
12	15.00	2.79	18.59	10.240	5.81	38.72	13.545	10.56	70.43	15.808
13	16.25	2.86	19.09	10.240	5.96	39.76	13.675	10.85	72.33	15.714
14	17.50	2.94	19.59	10.240	6.12	40.81	13.455	11.14	74.24	16.474
15	18.75	3.01	20.10	13.090	6.28	41.86	13.585	11.42	76.14	19.610

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 3.01 kN = แรงเหยียบชิ้นงาน ; $\frac{3.01}{15}\times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบชิ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 13.090 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด) ; 19.62 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ; 13.585 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด) และ 35.69 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 3 ; 19.610 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด)

ตารางที่ ก.3 แรงในการลากขึ้นด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 5 MPa ของแผ่นอลูมิเนียม AA 1100

ระยะกดพั้นช์ลึก		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm^2/sec								
		ค่าแรงคงที่สปริง=9.42 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=19.62 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=35.69 N/mm		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	1.96	13.06	1.645	4.08	27.21	1.043	7.42	49.49	2.657
2	2.50	2.03	13.56	11.645	4.24	28.25	13.897	7.71	51.39	17.657
3	3.75	2.11	14.07	11.165	4.39	29.30	13.989	7.99	53.30	17.177
4	5.00	2.19	14.57	11.645	4.55	30.35	14.467	8.28	55.20	17.657
5	6.25	2.26	15.07	11.165	4.71	31.39	16.081	8.57	57.10	17.177
6	7.50	2.34	15.57	10.215	4.87	32.44	14.371	8.85	59.01	16.227
7	8.75	2.41	16.08	11.165	5.02	33.48	14.087	9.14	60.91	17.177
8	10.00	2.49	16.58	10.685	5.18	34.53	14.845	9.42	62.81	16.697
9	11.25	2.56	17.08	10.215	5.34	35.58	13.611	9.71	64.72	16.227
10	12.50	2.64	17.58	9.735	5.49	36.62	13.039	9.99	66.62	15.747
11	13.75	2.71	18.09	10.685	5.65	37.67	13.609	10.28	68.52	16.697
12	15.00	2.79	18.59	11.645	5.81	38.72	13.989	10.56	70.43	17.657
13	16.25	2.86	19.09	10.685	5.96	39.76	13.895	10.85	72.33	16.697
14	17.50	2.94	19.59	10.215	6.12	40.81	14.655	11.14	74.24	16.227

15	18.75	3.01	20.10	11.685	6.28	41.86	14.655	11.42	76.14	16.697

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 3.01 kN = แรงเหยียบชิ้นงาน ; $\frac{3.01}{15}\times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบชิ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 11.685 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด) ; 19.62 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ; 14.655 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด) และ 35.69 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 3 ; 16.697 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด)

ตารางที่ ก.4 แรงในการลากขึ้นด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 7.5 MPa ของแผ่นอลูมิเนียม AA 1100

ระยะกดพั้นช์ลึก		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm^2/sec								
		ค่าแรงคงที่สปริง=9.42 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=19.62 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=35.69 N/mm		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	1.96	13.06	2.635	4.08	27.21	3.786	7.42	49.49	2.750
2	2.50	2.03	13.56	11.115	4.24	28.25	14.316	7.71	51.39	17.660
3	3.75	2.11	14.07	10.635	4.39	29.30	15.266	7.99	53.30	13.860
4	5.00	2.19	14.57	11.115	4.55	30.35	15.266	8.28	55.20	20.040
5	6.25	2.26	15.07	11.115	4.71	31.39	14.786	8.57	57.10	7.680
6	7.50	2.34	15.57	11.115	4.87	32.44	15.266	8.85	59.01	13.860
7	8.75	2.41	16.08	11.115	5.02	33.48	15.746	9.14	60.91	41.890
8	10.00	2.49	16.58	11.115	5.18	34.53	15.746	9.42	62.81	17.190
9	11.25	2.56	17.08	11.115	5.34	35.58	15.266	9.71	64.72	22.410
10	12.50	2.64	17.58	11.115	5.49	36.62	15.266	9.99	66.62	19.560
11	13.75	2.71	18.09	11.115	5.65	37.67	15.746	10.28	68.52	19.090
12	15.00	2.79	18.59	10.155	5.81	38.72	16.216	10.56	70.43	19.560
13	16.25	2.86	19.09	11.115	5.96	39.76	16.216	10.85	72.33	18.140
14	17.50	2.94	19.59	11.115	6.12	40.81	15.746	11.14	74.24	19.560

15	18.75	3.01	20.10	11.115	6.28	41.86	15.746	11.42	76.14	19.560

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 3.01 kN = แรงเหยียบชิ้นงาน ; $\frac{3.01}{15}\times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบชิ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 11.115kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด) ; 19.62 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ; 15.746 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด) และ 35.69 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 3 ; 19.560 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด)

ตารางที่ ก.5 แรงในการลากขึ้นรูปแบบปกติ ของแผ่นทองแดง C 1100

ระยะกดพั้นช์ลึก		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm^2/sec								
		ค่าแรงคงที่สปริง=9.42 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=19.62 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=35.69 N/mm		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	1.96	13.06	0.794	4.08	27.21	5.472	7.42	49.49	8.626
2	2.50	2.03	13.56	22.194	4.24	28.25	26.474	7.71	51.39	26.726
3	3.75	2.11	14.07	24.094	4.39	29.30	24.259	7.99	53.30	29.096
4	5.00	2.19	14.57	23.144	4.55	30.35	25.269	8.28	55.20	29.096
5	6.25	2.26	15.07	21.724	4.71	31.39	25.982	8.57	57.10	26.726
6	7.50	2.34	15.57	23.624	4.87	32.44	21.764	8.85	59.01	27.196
7	8.75	2.41	16.08	22.194	5.02	33.48	21.764	9.14	60.91	30.996
8	10.00	2.49	16.58	23.144	5.18	34.53	22.952	9.42	62.81	34.326
9	11.25	2.56	17.08	23.624	5.34	35.58	23.544	9.71	64.72	34.326
10	12.50	2.64	17.58	23.144	5.49	36.62	22.952	9.99	66.62	26.726
11	13.75	2.71	18.09	23.624	5.65	37.67	24.734	10.28	68.52	30.046
12	15.00	2.79	18.59	23.624	5.81	38.72	25.327	10.56	70.43	29.096
13	16.25	2.86	19.09	23.144	5.96	39.76	26.277	10.85	72.33	34.806
14	17.50	2.94	19.59	22.194	6.12	40.81	25.684	11.14	74.24	35.756

15	18.75	3.01	20.10	22.674	6.28	41.86	22.237	11.42	76.14	37.176

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 3.01 kN = แรงเหยียบชิ้นงาน ; $\frac{3.01}{15}\times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบชิ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 22.674 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด) ; 19.62 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ; 22.237 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด) และ 35.69 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 3 ; 37.176 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด)

ตารางที่ ก.6 แรงในการลากขึ้นด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 2.5 MPa ของแผ่นทองแดง C 1100

ระยะกดพั้นช์ลึก		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm^2/sec								
		ค่าแรงคงที่สปริง=9.42 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=19.62 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=35.69 N/mm		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	1.96	13.06	6.044	4.08	27.21	4.617	7.42	49.49	2.794
2	2.50	2.03	13.56	27.046	4.24	28.25	21.307	7.71	51.39	34.194
3	3.75	2.11	14.07	24.831	4.39	29.30	21.787	7.99	53.30	36.094
4	5.00	2.19	14.57	25.841	4.55	30.35	22.737	8.28	55.20	35.144
5	6.25	2.26	15.07	26.554	4.71	31.39	23.207	8.57	57.10	33.724
6	7.50	2.34	15.57	22.336	4.87	32.44	24.157	8.85	59.01	35.624
7	8.75	2.41	16.08	22.336	5.02	33.48	24.157	9.14	60.91	34.194
8	10.00	2.49	16.58	23.524	5.18	34.53	26.537	9.42	62.81	35.144
9	11.25	2.56	17.08	24.116	5.34	35.58	26.537	9.71	64.72	35.624
10	12.50	2.64	17.58	23.524	5.49	36.62	28.907	9.99	66.62	35.144
11	13.75	2.71	18.09	25.306	5.65	37.67	28.907	10.28	68.52	35.624
12	15.00	2.79	18.59	25.899	5.81	38.72	27.957	10.56	70.43	35.624
13	16.25	2.86	19.09	26.849	5.96	39.76	27.487	10.85	72.33	35.144

14	17.50	2.94	19.59	26.256	6.12	40.81	28.907	11.14	74.24	34.194
15	18.75	3.01	20.10	22.809	6.28	41.86	29.688	11.42	76.14	34.674

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 3.01 kN = แรงเหยียบชิ้นงาน ; $\frac{3.01}{15}\times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบชิ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 22.809 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้) ; 19.62 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ; 29.688 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้)และ 35.69 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 3 ; 34.674 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้)

ตารางที่ ก.7 แรงในการลากขึ้นด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 5 MPa ของแผ่นทองแดง C 1100

ระยะกดพั้นช์ลึก		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm^2/sec								
		ค่าแรงคงที่สปริง=9.42 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=19.62 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=35.69 N/mm		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	1.96	13.06	3.585	4.08	27.21	5.566	7.42	49.49	5.740
2	2.50	2.03	13.56	25.015	4.24	28.25	25.516	7.71	51.39	35.740
3	3.75	2.11	14.07	25.015	4.39	29.30	28.886	7.99	53.30	35.260
4	5.00	2.19	14.57	24.535	4.55	30.35	25.556	8.28	55.20	35.740
5	6.25	2.26	15.07	25.495	4.71	31.39	21.756	8.57	57.10	35.260
6	7.50	2.34	15.57	25.495	4.87	32.44	26.036	8.85	59.01	34.310
7	8.75	2.41	16.08	24.065	5.02	33.48	28.886	9.14	60.91	35.260
8	10.00	2.49	16.58	28.815	5.18	34.53	26.986	9.42	62.81	34.780
9	11.25	2.56	17.08	24.065	5.34	35.58	29.356	9.71	64.72	34.310
10	12.50	2.64	17.58	22.635	5.49	36.62	25.556	9.99	66.62	33.830
11	13.75	2.71	18.09	24.535	5.65	37.67	30.786	10.28	68.52	34.780
12	15.00	2.79	18.59	25.965	5.81	38.72	29.356	10.56	70.43	35.740
13	16.25	2.86	19.09	25.965	5.96	39.76	29.356	10.85	72.33	34.780

14	17.50	2.94	19.59	25.965	6.12	40.81	31.256	11.14	74.24	34.310
15	18.75	3.01	20.10	28.815	6.28	41.86	29.356	11.42	76.14	34.780

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 3.01 kN = แรงเหยียบชิ้นงาน ; $\frac{3.01}{15}\times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบชิ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 28.815 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้) ; 19.62 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ; 29.356 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้)และ 35.69 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 3 ; 34.780 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้)

ตารางที่ ก.8 แรงในการลากขึ้นด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 7.5 MPa ของแผ่นทองแดง C 1100

ระยะกดพั้นช์ลึก		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm^2/sec								
		ค่าแรงคงที่สปริง=9.42 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=19.62 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=35.69 N/mm		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	1.96	13.06	3.572	4.08	27.21	5.221	7.42	49.49	3.528
2	2.50	2.03	13.56	24.714	4.24	28.25	60.951	7.71	51.39	36.382
3	3.75	2.11	14.07	24.964	4.39	29.30	34.341	7.99	53.30	36.474
4	5.00	2.19	14.57	25.572	4.55	30.35	22.931	8.28	55.20	36.952
5	6.25	2.26	15.07	26.057	4.71	31.39	21.981	8.57	57.10	38.566
6	7.50	2.34	15.57	26.427	4.87	32.44	26.731	8.85	59.01	36.856
7	8.75	2.41	16.08	26.679	5.02	33.48	21.981	9.14	60.91	36.572
8	10.00	2.49	16.58	27.164	5.18	34.53	25.311	9.42	62.81	37.330
9	11.25	2.56	17.08	27.177	5.34	35.58	24.831	9.71	64.72	36.096
10	12.50	2.64	17.58	27.072	5.49	36.62	27.211	9.99	66.62	35.524
11	13.75	2.71	18.09	27.204	5.65	37.67	26.261	10.28	68.52	36.094
12	15.00	2.79	18.59	27.927	5.81	38.72	30.541	10.56	70.43	36.474
13	16.25	2.86	19.09	28.057	5.96	39.76	17.541	10.85	72.33	36.380

14	17.50	2.94	19.59	27.837	6.12	40.81	27.211	11.14	74.24	37.140
15	18.75	3.01	20.10	27.967	6.28	41.86	30.541	11.42	76.14	40.276

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 3.01 kN = แรงเหยียบชิ้นงาน ; $\frac{3.01}{15}\times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบชิ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 27.967 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้) ; 19.62 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ; 30.541 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้)และ 35.69 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 3 ; 40.276 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้)

ตารางที่ ก.9 แรงในการลากขึ้นรูปแบบปกติ ของแผ่นทองเหลือง C 2801

ระยะกดพั้นช์ลึก		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm^2/sec								
		ค่าแรงคงที่สปริง=9.42 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=19.62 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=35.69 N/mm		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	1.96	13.06	0.288	4.08	27.21	3.203	7.42	49.49	2.480
2	2.50	2.03	13.56	7.792	4.24	28.25	17.165	7.71	51.39	31.040
3	3.75	2.11	14.07	15.392	4.39	29.30	16.688	7.99	53.30	22.480
4	5.00	2.19	14.57	15.872	4.55	30.35	16.450	8.28	55.20	22.010
5	6.25	2.26	15.07	15.392	4.71	31.39	16.808	8.57	57.10	22.010
6	7.50	2.34	15.57	15.872	4.87	32.44	16.808	8.85	59.01	22.010
7	8.75	2.41	16.08	14.442	5.02	33.48	17.163	9.14	60.91	30.560
8	10.00	2.49	16.58	15.392	5.18	34.53	17.640	9.42	62.81	22.480
9	11.25	2.56	17.08	15.872	5.34	35.58	17.993	9.71	64.72	23.910
10	12.50	2.64	17.58	15.392	5.49	36.62	17.163	9.99	66.62	27.710
11	13.75	2.71	18.09	16.822	5.65	37.67	17.165	10.28	68.52	37.210
12	15.00	2.79	18.59	15.872	5.81	38.72	17.758	10.56	70.43	38.640
13	16.25	2.86	19.09	14.922	5.96	39.76	17.283	10.85	72.33	38.640
14	17.50	2.94	19.59	14.442	6.12	40.81	17.640	11.14	74.24	39.590

15	18.75	3.01	20.10	14.922	6.28	41.86	16.808	11.42	76.14	34.360

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 3.01 kN = แรงเหยียบชิ้นงาน ; $\frac{3.01}{15}\times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบชิ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 14.922 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้) ; 19.62 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ; 16.808 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้)และ 35.69 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 3 ; 34.360 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้)

ตารางที่ ก.10 แรงในการลากขึ้นด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 2.5 MPa ของแผ่นทองเหลือง C 2801

ระยะกดพั้นช์ลึก		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm^2/sec								
		ค่าแรงคงที่สปริง=9.42 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=19.62 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=35.69 N/mm		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	1.96	13.06	2.929	4.08	27.21	4.126	7.42	49.49	3.745
2	2.50	2.03	13.56	13.119	4.24	28.25	17.656	7.71	51.39	28.887
3	3.75	2.11	14.07	12.649	4.39	29.30	17.656	7.99	53.30	29.137
4	5.00	2.19	14.57	13.119	4.55	30.35	19.556	8.28	55.20	29.745
5	6.25	2.26	15.07	13.119	4.71	31.39	20.036	8.57	57.10	30.230
6	7.50	2.34	15.57	12.649	4.87	32.44	20.036	8.85	59.01	30.600
7	8.75	2.41	16.08	13.119	5.02	33.48	20.036	9.14	60.91	30.852
8	10.00	2.49	16.58	13.599	5.18	34.53	19.556	9.42	62.81	31.337
9	11.25	2.56	17.08	15.499	5.34	35.58	19.556	9.71	64.72	31.350
10	12.50	2.64	17.58	15.029	5.49	36.62	19.076	9.99	66.62	31.245
11	13.75	2.71	18.09	15.029	5.65	37.67	20.036	10.28	68.52	31.377
12	15.00	2.79	18.59	15.029	5.81	38.72	18.606	10.56	70.43	32.100
13	16.25	2.86	19.09	15.979	5.96	39.76	17.176	10.85	72.33	32.230

14	17.50	2.94	19.59	15.499	6.12	40.81	16.226	11.14	74.24	32.010
15	18.75	3.01	20.10	15.499	6.28	41.86	17.176	11.42	76.14	32.140

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 3.01 kN = แรงเหยียบชิ้นงาน ; $\frac{3.01}{15}\times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบชิ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 15.499 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้) ; 19.62 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ; 17.176 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้)และ 35.69 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 3 ; 32.140 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้)

ตารางที่ ก.11 แรงในการลากขึ้นด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 5 MPa ของแผ่นทองเหลือง C 2801

ระยะกดพั้นช์ลึก		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm^2/sec								
		ค่าแรงคงที่สปริง=9.42 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=19.62 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=35.69 N/mm		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	1.96	13.06	3.772	4.08	27.21	0.814	7.42	49.49	4.739
2	2.50	2.03	13.56	19.774	4.24	28.25	22.674	7.71	51.39	35.649
3	3.75	2.11	14.07	17.559	4.39	29.30	21.244	7.99	53.30	31.849
4	5.00	2.19	14.57	18.569	4.55	30.35	20.764	8.28	55.20	38.029
5	6.25	2.26	15.07	19.282	4.71	31.39	17.914	8.57	57.10	25.669
6	7.50	2.34	15.57	15.064	4.87	32.44	21.724	8.85	59.01	31.849
7	8.75	2.41	16.08	15.064	5.02	33.48	17.444	9.14	60.91	59.879
8	10.00	2.49	16.58	16.252	5.18	34.53	20.764	9.42	62.81	35.179
9	11.25	2.56	17.08	16.844	5.34	35.58	21.244	9.71	64.72	40.399
10	12.50	2.64	17.58	16.252	5.49	36.62	18.394	9.99	66.62	37.549
11	13.75	2.71	18.09	18.034	5.65	37.67	20.764	10.28	68.52	37.079
12	15.00	2.79	18.59	18.627	5.81	38.72	21.244	10.56	70.43	37.549
13	16.25	2.86	19.09	19.577	5.96	39.76	21.244	10.85	72.33	36.129

14	17.50	2.94	19.59	18.984	6.12	40.81	19.814	11.14	74.24	37.549
15	18.75	3.01	20.10	15.537	6.28	41.86	21.244	11.42	76.14	37.549

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 3.01 kN = แรงเหยียบชิ้นงาน ; $\frac{3.01}{15}\times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบชิ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 15.537 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้) ; 19.62 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ; 21.244 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้)และ 35.69 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 3 ; 37.549 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้)

ตารางที่ ก.12 แรงในการลากขึ้นด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 7.5 MPa ของแผ่นทองเหลือง C 2801

ระยะกดพั้นช์ลึก		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm^2/sec								
		ค่าแรงคงที่สปริง=9.42 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=19.62 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=35.69 N/mm		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	1.96	13.06	0.523	4.08	27.21	0.515	7.42	49.49	3.532
2	2.50	2.03	13.56	27.047	4.24	28.25	29.407	7.71	51.39	39.350
3	3.75	2.11	14.07	26.570	4.39	29.30	29.524	7.99	53.30	43.150
4	5.00	2.19	14.57	26.332	4.55	30.35	29.522	8.28	55.20	42.200
5	6.25	2.26	15.07	26.690	4.71	31.39	27.742	8.57	57.10	42.200
6	7.50	2.34	15.57	26.690	4.87	32.44	30.597	8.85	59.01	41.250
7	8.75	2.41	16.08	27.045	5.02	33.48	28.812	9.14	60.91	42.670
8	10.00	2.49	16.58	27.522	5.18	34.53	29.762	9.42	62.81	43.620
9	11.25	2.56	17.08	27.875	5.34	35.58	29.762	9.71	64.72	43.150
10	12.50	2.64	17.58	27.045	5.49	36.62	29.049	9.99	66.62	45.530
11	13.75	2.71	18.09	27.047	5.65	37.67	29.879	10.28	68.52	46.950
12	15.00	2.79	18.59	27.640	5.81	38.72	29.762	10.56	70.43	49.330
13	16.25	2.86	19.09	27.165	5.96	39.76	29.522	10.85	72.33	35.550

14	17.50	2.94	19.59	27.522	6.12	40.81	28.334	11.14	74.24	45.530
15	18.75	3.01	20.10	26.690	6.28	41.86	29.167	11.42	76.14	43.620

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 3.01 kN = แรงเหยียบชิ้นงาน ; $\frac{3.01}{15}\times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบชิ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 26.690 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้) ; 19.62 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ; 29.167 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้)และ 35.69 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 3 ; 43.620 kN = แรงลากขึ้นรูป (ชิ้นงานไม่สามารถขึ้นรูปได้ เกิดรอยฉีกขาด เนื่องจากแรงดันน้ำมันที่สูงเกินไป)

ตารางที่ ก.13 แรงกดพันช์ที่กระทำต่อชิ้นงานในการลากขึ้นรูปอลูมิเนียม AA1100

แรงกดแผ่นชิ้นงานด้วยค่าคงที่สปริง (N/mm2)	แรงกดพั้นช์จากการลากขึ้นรูปแบบปกติ (kN)	แรงกดพั้นช์ที่กระทำต่อชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ที่แรงดัน (MPa)		
		2.5 MPa	5.0 MPa	7.5 MPa
9.42	8.092	9.603	10.880	10.987
19.62	11.255	12.043	14.225	14.892
35.69	14.875	16.043	16.892	18.437

ตารางที่ ก.14 แรงกดพันช์ที่กระทำต่อชิ้นงานในการลากขึ้นรูปแผ่นทองแดง C1100

แรงกดแผ่นชิ้นงานด้วยค่าคงที่สปริง (N/mm^2)	แรงกดพั้นช์จากการลากขึ้นรูปแบบปกติ (kN)	แรงกดพั้นช์ที่กระทำต่อชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ที่แรงดัน (MPa)		
		2.5 MPa	5.0 MPa	7.5 MPa
9.42	22.196	24.218	25.331	26.426
19.62	23.646	26.459	27.614	28.219
35.69	30.688	34.196	34.974	36.710

ตารางที่ ก.15 แรงกดพันช์ที่กระทำต่อชิ้นงานในการลากขึ้นรูปแผ่นทองเหลือง C2801

แรงกดแผ่นชิ้นงานด้วยค่าคงที่สปริง (N/mm^2)	แรงกดพั้นช์จากการลากขึ้นรูปแบบปกติ (kN)	แรงกดพั้นช์ที่กระทำต่อชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ที่แรงดัน (MPa)		
		2.5 MPa	5.0 MPa	7.5 MPa
9.42	13.874	14.391	16.936	26.597
19.62	16.916	18.501	20.486	28.481
35.69	29.014	30.598	36.443	39.648

ตารางที่ ก.16 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงของแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 หลังการขึ้นรูปที่ค่าคงที่สปริง 9.42 N/mm^2

ตำแหน่งการวัด	ค่าคงที่สปริง 9.42 N/mm^2			
	การลากขึ้นรูปแบบปกติ	การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก		
		2.5 MPa	5.0 MPa	7.5 MPa
1	0.481	0.479	0.478	0.451
2	0.493	0.511	0.502	0.513
3	0.443	0.448	0.472	0.455
4	x	x	x	x
5	x	x	x	x
6	x	x	x	x

หมายเหตุ (x คือ ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด , Fail)

ตารางที่ ก.17 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงของแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 หลังการขึ้นรูปที่ค่าคงที่สปริง 19.62 N/mm^2

ตำแหน่งการวัด	ค่าคงที่สปริง 19.62 N/mm^2			
	การลากขึ้นรูปแบบปกติ	การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก		
		2.5 MPa	5.0 MPa	7.5 MPa
1	0.456	0.450	0.469	0.455
2	0.462	0.466	0.498	0.484
3	0.426	0.448	0.478	0.467
4	x	x	x	x
5	x	x	x	x
6	x	x	x	x

หมายเหตุ (x คือ ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด , Fail)

ตารางที่ ก.18 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงของแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 หลังการขึ้นรูปที่ค่าคงที่สปริง 35.69 N/mm^2

ตำแหน่งการวัด	ค่าคงที่สปริง 35.69 N/mm^2			
	การลากขึ้นรูปแบบปกติ	การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก		
		2.5 MPa	5.0 MPa	7.5 MPa
1	0.469	0.462	0.448	0.466
2	0.476	0.494	0.510	0.497
3	0.419	0.467	0.471	0.455
4	x	x	x	x
5	x	x	x	x
6	x	x	x	x

หมายเหตุ (x คือ ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด , Fail)

ตารางที่ ก.19 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงของแผ่นทองแดง C 1100 หลังการขึ้นรูปที่ค่าคงที่สปริง 9.42 N/mm^2

ตำแหน่งการวัด	ค่าคงที่สปริง 9.42 N/mm^2			
	การลากขึ้นรูปแบบปกติ	การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก		
		2.5 MPa	5.0 MPa	7.5 MPa
1	0.483	0.479	0.480	0.478
2	0.488	0.480	0.500	0.493
3	0.463	0.463	0.461	0.462
4	x	0.463	0.461	0.462
5	x	0.515	0.520	0.490
6	x	0.515	0.520	0.490

หมายเหตุ (x คือ ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด , Fail)

ตารางที่ ก.20 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงของแผ่นทองแดง C 1100 หลังการขึ้นรูปที่ค่าคงที่สปริง 19.62 N/mm^2

ตำแหน่งการวัด	ค่าคงที่สปริง 19.62 N/mm^2			
	การลากขึ้นรูปแบบปกติ	การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก		
		2.5 MPa	5.0 MPa	7.5 MPa
1	0.474	0.481	0.456	0.512
2	0.503	0.524	0.514	0.525
3	0.451	0.433	0.435	0.443
4	x	0.434	0.436	0.444
5	x	0.524	0.505	0.507
6	x	0.524	0.505	0.506

หมายเหตุ (x คือ ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด , Fail)

ตารางที่ ก.21 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงของแผ่นทองแดง C 1100 หลังการขึ้นรูปที่ค่าคงที่สปริง 35.69 N/mm^2

ตำแหน่งการวัด	ค่าคงที่สปริง 35.69 N/mm^2			
	การลากขึ้นรูปแบบปกติ	การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก		
		2.5 MPa	5.0 MPa	7.5 MPa
1	0.474	0.457	0.478	0.484
2	0.481	0.482	0.482	0.486
3	0.435	0.421	0.447	0.450
4	x	0.421	0.447	0.450
5	x	0.505	0.508	0.495
6	x	0.504	0.509	0.495

หมายเหตุ (x คือ ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด , Fail)

ตารางที่ ก.22 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงของแผ่นทองเหลือง C2801 หลังการขึ้นรูปที่ค่าคงที่สปริง 9.42 N/mm^2

ตำแหน่งการวัด	ค่าคงที่สปริง 9.42 N/mm^2			
	การลากขึ้นรูปแบบปกติ	การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก		
		2.5 MPa	5.0 MPa	7.5 MPa
1	0.465	0.472	0.463	0.475
2	0.492	0.496	0.512	0.504
3	0.456	0.457	0.468	0.474
4	0.455	0.459	0.472	0.475
5	0.498	0.517	0.530	0.522
6	0.498	0.517	0.530	0.521

ตารางที่ ก.23 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงของแผ่นทองเหลือง C2801 หลังการขึ้นรูปที่ค่าคงที่สปริง 19.62 N/mm^2

ตำแหน่งการวัด	ค่าคงที่สปริง 19.62 N/mm^2			
	การลากขึ้นรูปแบบปกติ	การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก		
		2.5 MPa	5.0 MPa	7.5 MPa
1	0.443	0.445	0.442	0.453
2	0.491	0.502	0.512	0.528
3	0.462	0.457	0.433	0.458
4	0.463	0.457	0.434	0.459
5	0.516	0.483	0.514	0.512
6	0.516	0.483	0.513	0.511

ตารางที่ ก.24 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงของแผ่นทองเหลือง C2801 หลังการขึ้นรูปที่ค่าคงที่สปริง 35.69 N/mm^2

ตำแหน่งการวัด	ค่าคงที่สปริง 35.69 N/mm^2			
	การลากขึ้นรูปแบบปกติ	การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก		
		2.5 MPa	5.0 MPa	7.5 MPa
1	0.470	0.440	0.463	0.466
2	0.487	0.509	0.525	0.495
3	0.468	0.434	0.444	0.453
4	0.457	0.434	0.444	x
5	0.483	0.480	0.525	x
6	0.483	0.480	0.525	x

หมายเหตุ (x คือ ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด , Fail)

ตารางที่ ก.25 ลักษณะความเครียดของชิ้นงานแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2

กระบวนการขึ้นรูป		ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง					
		ความเครียดรอง (%)			ความเครียดหลัก (%)		
		กึ่งกลางถ้วย	ขอบถ้วย	ผนังถ้วย	กึ่งกลางถ้วย	ขอบถ้วย	ผนังถ้วย
การลากขึ้นรูปแบบปกติ		2.990	12.000	29.194	-3.119	11.000	-19.845
กระบวนการ HDD	2.5 MPa	2.238	14.000	26.443	-2.394	12.000	-14.000
	5.0 MPa	2.340	13.000	27.334	-1.430	16.000	-16.000
	7.5 MPa	3.196	12.000	29.003	-1.294	13.000	-16.000

ตารางที่ ก.26 ลักษณะความเครียดของชิ้นงานแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2

กระบวนการขึ้นรูป		ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง					
		ความเครียดรอง (%)			ความเครียดหลัก (%)		
		กึ่งกลางถ้วย	ขอบถ้วย	ผนังถ้วย	กึ่งกลางถ้วย	ขอบถ้วย	ผนังถ้วย
การลากขึ้นรูปแบบปกติ		2.211	12.000	29.194	-1.665	11.000	-19.845
กระบวนการ HDD	2.5 MPa	2.227	14.000	26.443	-1.649	12.000	-14.000
	5.0 MPa	2.239	13.000	27.334	-1.635	16.000	-16.000
	7.5 MPa	2.161	12.000	29.003	-1.880	13.000	-16.000

ตารางที่ ก.27 ลักษณะความเครียดของชิ้นงานแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2

กระบวนการขึ้นรูป		ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง					
		ความเครียดรอง (%)			ความเครียดหลัก (%)		
		กึ่งกลางถ้วย	ขอบถ้วย	ผนังถ้วย	กึ่งกลางถ้วย	ขอบถ้วย	ผนังถ้วย
การลากขึ้นรูปแบบปกติ		2.218	12.000	29.194	-1.411	11.000	-19.845
กระบวนการ HDD	2.5 MPa	2.344	14.000	26.443	-1.500	12.000	-14.000
	5.0 MPa	2.253	13.000	27.334	-1.397	16.000	-16.000
	7.5 MPa	2.476	12.000	29.003	-1.608	13.000	-16.000

ตารางที่ ก.28 ลักษณะความเครียดของชิ้นงานแผ่นทองแดง C1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2

กระบวนการขึ้นรูป		ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง					
		ความเครียดรอง (%)			ความเครียดหลัก (%)		
		กึ่งกลางถ้วย	ขอบถ้วย	ผนังถ้วย	กึ่งกลางถ้วย	ขอบถ้วย	ผนังถ้วย
การลากขึ้นรูปแบบปกติ		3.439	9.826	27.842	2.747	7.850	-10.039
กระบวนการ HDD	2.5 MPa	3.483	9.953	30.786	1.985	5.672	-9.284
	5.0 MPa	3.595	10.273	29.408	1.985	5.672	-8.933
	7.5 MPa	3.478	9.936	32.608	2.150	6.143	-7.333

ตารางที่ ก.29 ลักษณะความเครียดของชิ้นงานแผ่นทองแดง C1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2

กระบวนการขึ้นรูป		ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง					
		ความเครียดรอง (%)			ความเครียดหลัก (%)		
		กึ่งกลางถ้วย	ขอบถ้วย	ผนังถ้วย	กึ่งกลางถ้วย	ขอบถ้วย	ผนังถ้วย
การลากขึ้นรูปแบบปกติ		4.508	12.879	29.408	2.072	5.921	-8.933
กระบวนการ HDD	2.5 MPa	3.478	9.936	29.408	2.150	6.143	-8.933
	5.0 MPa	4.436	12.673	30.786	1.976	5.646	-9.284
	7.5 MPa	3.772	10.778	29.543	2.077	5.934	-9.575

ตารางที่ ก.30 ลักษณะความเครียดของชิ้นงานแผ่นทองแดง C1100 ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2

กระบวนการขึ้นรูป		ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง					
		ความเครียดรอง (%)			ความเครียดหลัก (%)		
		กึ่งกลางถ้วย	ขอบถ้วย	ผนังถ้วย	กึ่งกลางถ้วย	ขอบถ้วย	ผนังถ้วย
การลากขึ้นรูปแบบปกติ		11.278	22.000	30.786	6.401	12.000	-9.284
กระบวนการ HDD	2.5 MPa	11.997	23.000	32.608	6.689	14.000	-8.333
	5.0 MPa	12.140	22.000	32.608	5.510	13.900	-8.633
	7.5 MPa	11.935	23.400	33.809	7.001	13.600	-12.884

ตารางที่ ก.31 ลักษณะความเครียดของชิ้นงานแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm^2

กระบวนการขึ้นรูป		ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง					
		ความเครียดรอง (%)			ความเครียดหลัก (%)		
		กึ่งกลางถ้วย	ขอบถ้วย	ผนังถ้วย	กึ่งกลางถ้วย	ขอบถ้วย	ผนังถ้วย
การลากขึ้นรูปแบบปกติ		3.1056	10.7000	42.0168	-4.0176	9.8000	-10.5168
กระบวนการ HDD	2.5 MPa	4.5976	11.7000	44.9584	-6.0448	7.8000	-11.1696
	5.0 MPa	6.8288	12.6200	41.5640	-4.4696	10.7800	-12.0320
	7.5 MPa	4.5024	13.8670	42.5400	-6.1720	9.6690	-9.3640

ตารางที่ ก.32 ลักษณะความเครียดของชิ้นงานแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm^2

กระบวนการขึ้นรูป		ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง					
		ความเครียดรอง (%)			ความเครียดหลัก (%)		
		กึ่งกลางถ้วย	ขอบถ้วย	ผนังถ้วย	กึ่งกลางถ้วย	ขอบถ้วย	ผนังถ้วย
การลากขึ้นรูปแบบปกติ		3.4448	22.0000	44.8080	3.7680	18.0000	-11.5520
กระบวนการ HDD	2.5 MPa	4.1240	21.5000	42.3280	5.2880	17.0000	-9.1280
	5.0 MPa	4.3000	19.0000	42.0880	5.5000	18.0000	-9.9024
	7.5 MPa	5.3496	17.0000	42.2040	3.3312	18.0000	-11.5320

ตารางที่ ก.33 ลักษณะความเครียดของชิ้นงานแผ่นทองเหลือง C2801 ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm^2

กระบวนการขึ้นรูป		ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง					
		ความเครียดรอง (%)			ความเครียดหลัก (%)		
		กึ่งกลางถ้วย	ขอบถ้วย	ผนังถ้วย	กึ่งกลางถ้วย	ขอบถ้วย	ผนังถ้วย
การลากขึ้นรูปแบบปกติ		8.998	25.000	42.844	6.444	26.000	-7.792
กระบวนการ HDD	2.5 MPa	8.234	24.000	42.524	8.575	26.000	-12.492
	5.0 MPa	7.092	23.000	42.844	8.932	26.000	-12.872
	7.5 MPa	6.400	22.000	41.724	7.000	28.000	-12.352

ภาคผนวก ข
ข้อมูลวัสดุในการศึกษาทดลอง

สถาบันยานยนต์ อุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิ
655 นิคมอุตสาหกรรมบางปู ซอย 1 ถ.สุขุมวิท ต.บางปูใหม่ อ.เมือง
จ.สมุทรปราการ 10280 โทรศัพท์ 0-2324-0710-9 โทรสาร 0-2323-9598

รายงานผลการทดสอบ หน้า 1/3

หมายเลขปฏิบัติการ	5503020940
ชื่อที่อยู่ของผู้ขอรับบริการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ต.ลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
รายละเอียดตัวอย่าง	- เหล็กแผ่น SPCC จำนวน 1 ตัวอย่าง - สปริงแม่พิมพ์ (สีแดง, สีฟ้า, สีเหลือง) จำนวน 3 ตัวอย่าง
หมายเลขตัวอย่าง	-
ลักษณะและสภาพตัวอย่าง	สภาพเรียบร้อย
วันเดือนปีที่รับตัวอย่าง	30 มีนาคม 2555
วันเดือนปีที่ทดสอบ	4 ถึง 5 เมษายน 2555
วิธีทดสอบ	- ทดสอบค่าคงที่ของสปริง ด้วยเครื่อง Auto Graph (AG-IS100 kN) - ทดสอบส่วนประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง Optical Emission Spectrometer
ผลการทดสอบ	ผลการทดสอบมีรายละเอียดดังปรากฏในหน้าถัดไป

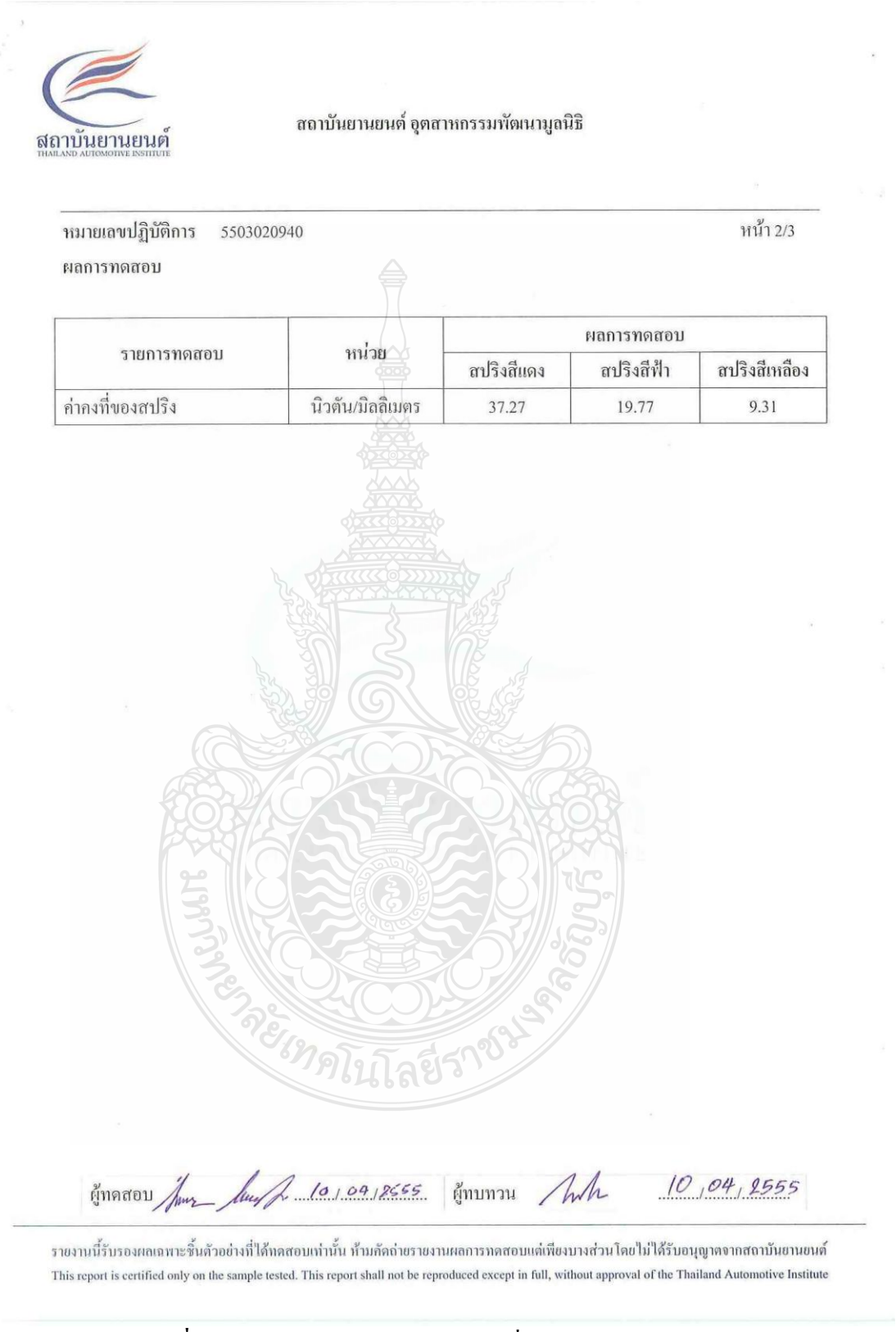
ผู้ทบทวน (นายจักรกฤษ รุ่งเรือง) ทีมวิชาการ 10/04/2555

ผู้รับรอง (นายอุทัย อุนะกุล) ผู้จัดการแผนกทดสอบ 18/4/55

ผู้ทดสอบ นายกรีธา ศรีลาศักดิ์ sp

รายงานนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น ห้ามลอกถ่ายรายงานผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันยานยนต์
This report is certified only on the sample tested. This report shall not be reproduced except in full, without approval of the Thailand Automotive Institute
F (DTD) – TR – 02 (Rev.01)

รูปที่ ข.01 ใบรับรองผลการทดสอบสปริงและเหล็ก SPCC ที่ใช้ในการทดลอง



สถาบันยานยนต์
THAILAND AUTOMOTIVE INSTITUTE

สถาบันยานยนต์ อุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิ

หมายเลขปฏิบัติการ 5503020940 หน้า 2/3

ผลการทดสอบ

รายการทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ		
		สปริงสีแดง	สปริงสีฟ้า	สปริงสีเหลือง
ค่าคงที่ของสปริง	นิวตัน/มิลลิเมตร	37.27	19.77	9.31

ผู้ทดสอบ 10/04/2555 ผู้ทบทวน 10/04/2555

รายงานนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น ห้ามคัดถ่ายรายงานผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันยานยนต์
This report is certified only on the sample tested. This report shall not be reproduced except in full, without approval of the Thailand Automotive Institute

รูปที่ ข.02 รายงานผลการทดสอบสปริงซึ่งใช้ในการทดลอง

สถาบันยานยนต์
THAILAND AUTOMOTIVE INSTITUTE

สถาบันยานยนต์ อุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิ

หมายเลขปฏิบัติการ 5503020940 หน้า 3/3

ผลการทดสอบ

ส่วนประกอบทางเคมี

รายการทดสอบ		หน่วย	ผลการทดสอบ			
			#1	#2	#3	Uncertainty (95 %,k=2)
ส่วนประกอบทางเคมี	คาร์บอน	ร้อยละโดยน้ำหนัก	0.0449			
	ซิลิกอน		<0.0700			
	แมงกานีส		0.2534			
	ฟอสฟอรัส		0.0196			
	กำมะถัน		0.0078			
	ทองแดง		0.0041			
	นิเกิล		0.0871			
	โครเมี่ยม		0.0220			
	วานาเดียม		<0.0040			
	อลูมิเนียม		0.0217			
	โมลิปดินัม		0.0027			
	ทิทาเนียม		0.0002			
	นิเกิล + โครเมี่ยม		-			

ผู้ทดสอบ ..... 10/04/2555 ผู้ทบทวน 10/04/2555

รายงานนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น ห้ามคัดถ่ายรายงานผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันยานยนต์
This report is certified only on the sample tested. This report shall not be reproduced except in full, without approval of the Thailand Automotive Institute

รูปที่ ข.03 รายงานผลการทดสอบส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กแผ่น SPCC ซึ่งใช้ในการทดลอง

Petroleum Products and Alternative Fuels Research Department
PTT Research and Technology Institute
PTT Public Company Limited

71 Moo 2 Phahonyothin Rd., Wangnoi, Ayutthaya 13170 Tel. 0-2537-3000 Ext. 8183, Fax. 0-2537-3000 Ext. 8146

CERTIFICATE OF ANALYSIS

Company/Customer's Name : นายกฤษดา บรรเทาพิษ
Address : 53/86 หมู่ 1 ต.รังสิต อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

Certificate Number	COA-FLD-12-0016	**Page Number**	1 of 1
Test Request ID	EXT-12-0013	**Sample Received Date**	25-Apr-2012
Sample ID	FLD-LB-12-0500	**Sample Condition**	Excellent
Sample Name	VG 32	**Operator's Name**	PS

Item	Property	Date of Test	Unit	Test Method	Result
1.	Viscosity at 40 oC	27-Apr-2012	mm2/s	ASTM D445-09	34.43

Remark :

Reported By : Mr. Chetwana Rungwanitcha

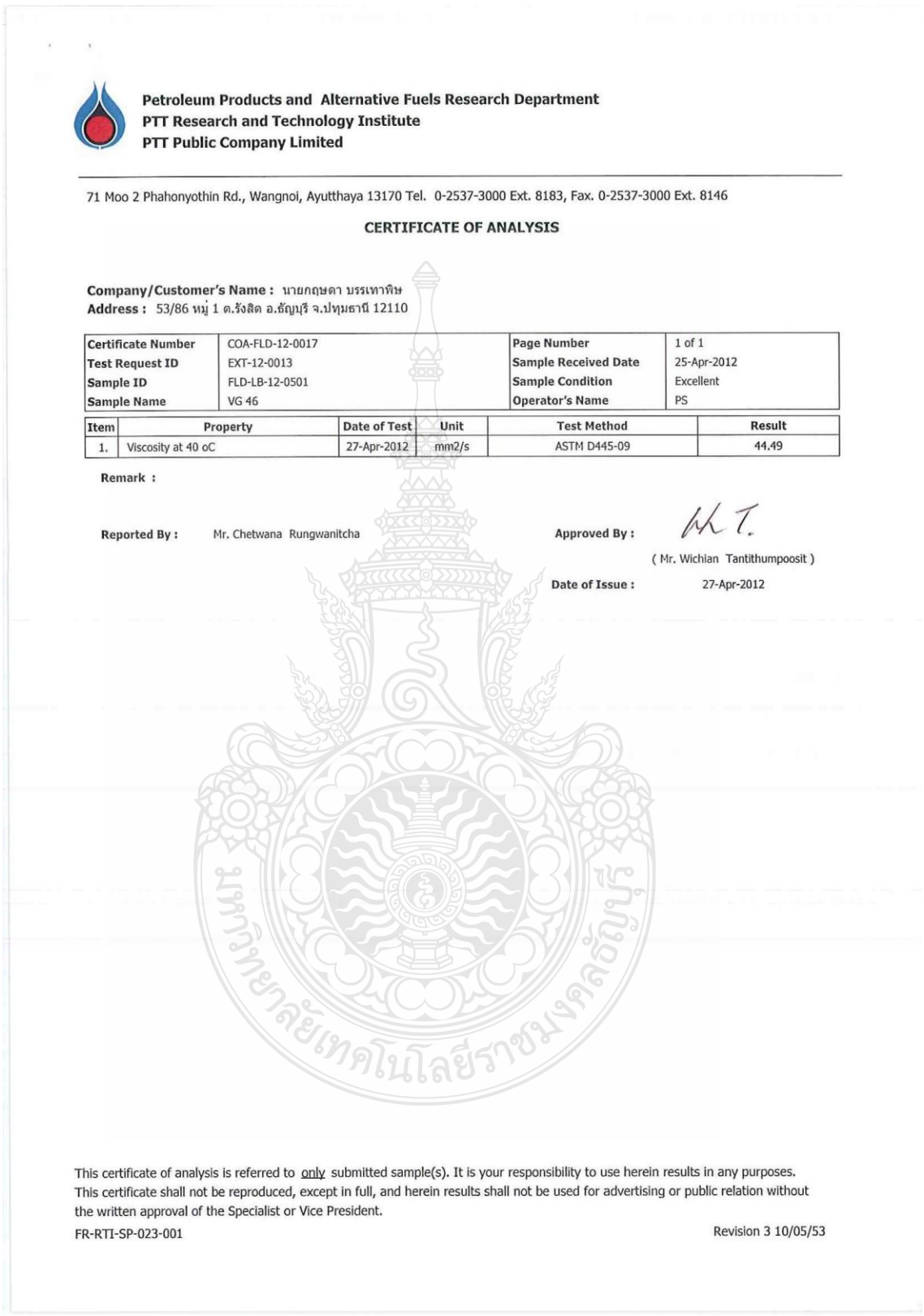
Approved By : (Mr. Wichian Tantithumpoosit)

Date of Issue : 27-Apr-2012

This certificate of analysis is referred to only submitted sample(s). It is your responsibility to use herein results in any purposes. This certificate shall not be reproduced, except in full, and herein results shall not be used for advertising or public relation without the written approval of the Specialist or Vice President.

FR-RTI-SP-023-001 Revision 3 10/05/53

รูปที่ ข.04 รายงานผลการทดสอบความหนืดของน้ำมันไฮดรอลิก VG 32



Petroleum Products and Alternative Fuels Research Department
PTT Research and Technology Institute
PTT Public Company Limited

71 Moo 2 Phahonyothin Rd., Wangnoi, Ayutthaya 13170 Tel. 0-2537-3000 Ext. 8183, Fax. 0-2537-3000 Ext. 8146

CERTIFICATE OF ANALYSIS

Company/Customer's Name : นายกฤษดา บรรเทาพิษ
Address : 53/86 หมู่ 1 ต.รังสิต อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

Certificate Number	COA-FLD-12-0017	**Page Number**	1 of 1
Test Request ID	EXT-12-0013	**Sample Received Date**	25-Apr-2012
Sample ID	FLD-LB-12-0501	**Sample Condition**	Excellent
Sample Name	VG 46	**Operator's Name**	PS

Item	Property	Date of Test	Unit	Test Method	Result
1.	Viscosity at 40 oC	27-Apr-2012	mm2/s	ASTM D445-09	44.49

Remark :

Reported By : Mr. Chetwana Rungwanitcha

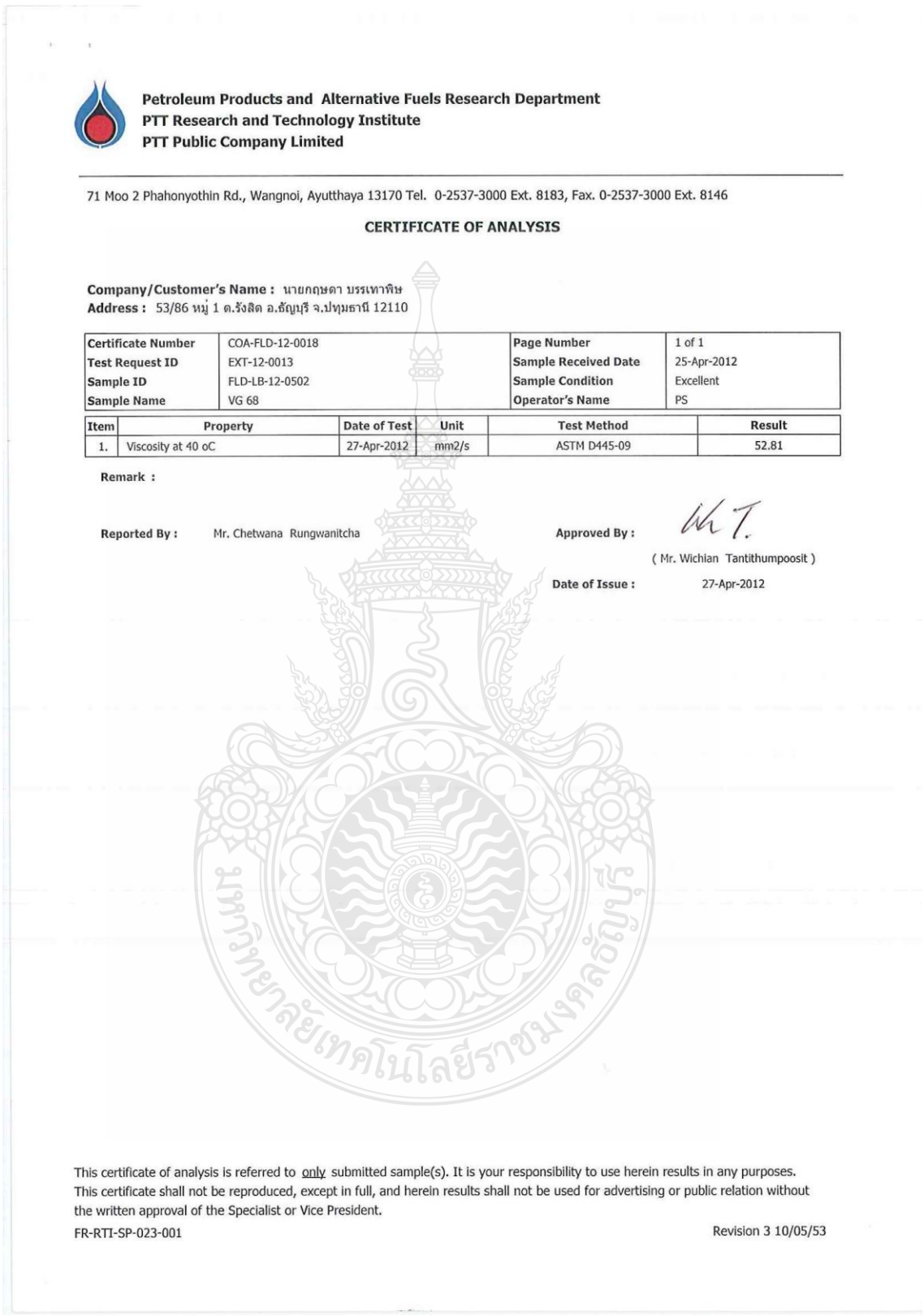
Approved By : M T.
(Mr. Wichian Tantithumpoosit)

Date of Issue : 27-Apr-2012

This certificate of analysis is referred to only submitted sample(s). It is your responsibility to use herein results in any purposes. This certificate shall not be reproduced, except in full, and herein results shall not be used for advertising or public relation without the written approval of the Specialist or Vice President.

FR-RTI-SP-023-001 Revision 3 10/05/53

รูปที่ ข.05 รายงานผลการทดสอบความหนืดของน้ำมันไฮดรอลิก VG 46



Petroleum Products and Alternative Fuels Research Department
PTT Research and Technology Institute
PTT Public Company Limited

71 Moo 2 Phahonyothin Rd., Wangnoi, Ayutthaya 13170 Tel. 0-2537-3000 Ext. 8183, Fax. 0-2537-3000 Ext. 8146

CERTIFICATE OF ANALYSIS

Company/Customer's Name : นายกฤษดา บรรเทาพิษ
Address : 53/86 หมู่ 1 ต.รังสิต อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

Certificate Number	COA-FLD-12-0018	**Page Number**	1 of 1
Test Request ID	EXT-12-0013	**Sample Received Date**	25-Apr-2012
Sample ID	FLD-LB-12-0502	**Sample Condition**	Excellent
Sample Name	VG 68	**Operator's Name**	PS

Item	Property	Date of Test	Unit	Test Method	Result
1.	Viscosity at 40 oC	27-Apr-2012	mm2/s	ASTM D445-09	52.81

Remark :

Reported By : Mr. Chetwana Rungwanitcha

Approved By : W.T.
(Mr. Wichian Tantithumpoosit)

Date of Issue : 27-Apr-2012

This certificate of analysis is referred to only submitted sample(s). It is your responsibility to use herein results in any purposes. This certificate shall not be reproduced, except in full, and herein results shall not be used for advertising or public relation without the written approval of the Specialist or Vice President.

FR-RTI-SP-023-001 Revision 3 10/05/53

รูปที่ ข.06 รายงานผลการทดสอบความหนืดของน้ำมันไฮดรอลิก VG 68

ภาคผนวก ค
การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

บทคัดย่อ
Abstract
การประชุมวิชาการแห่งชาติ ครั้งที่ 10
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
The 10th KU-KPS Conference
6 - 7 ธันวาคม 2556
ตามรอยพระยุคลบาท
เกษตรศาสตร์กำแพงแสน
TCPA
ACIT
TAHPER
ไทย
SMAT