

อิทธิพลในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนการ  
ไฮดรอดินามิก

INFUENCE OF THE STAINLSS STEEL SHEET IN  
HYDRODYNAMIC DEEP DRAWING PROCESS

สุรียา นำแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

# อิทธิพลในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก

สุรียา นำแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลในการลากขึ้นรูปลึงแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก
ชื่อ - นามสกุล	นาย สุริยา น้าแก้ว
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr-Ing.
ปีการศึกษา	2555

## บทคัดย่อ

กระบวนการลากขึ้นรูปลึงเป็นกระบวนการหนึ่งในกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะแผ่น ที่ถูกใช้ในการผลิตของอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้ มุ่งศึกษาถึงกระบวนการลากขึ้นรูปลึงด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ซึ่งเป็นการนำเอาแรงดันน้ำมันเข้ามาช่วยในการลากขึ้นรูปลึง เพื่อเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่น

การศึกษาวิจัยฉบับนี้ ศึกษากระบวนการลากขึ้นรูปลึงด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก โดยใช้น้ำมันไฮดรอลิกตามมาตรฐาน มอก. 3 ระดับค่าความหนืด คือ  $68 \text{ mm}^2/\text{s}$  ตามค่าความหนืดเชิงจลศาสตร์ ที่อุณหภูมิ  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  ที่แรงดันน้ำมัน 3 ระดับ คือ 5, 10 และ 15 MPa ทำการขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430 ที่แรงกดขึ้นงาน 2 ระดับ คือ 3.9 และ 7.1 kN ศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูป และแรงกดพื้นที่กระทำต่อขึ้นงาน ขึ้นงานหลังการขึ้นรูป การเปลี่ยนแปลงความหนาของขึ้นงาน และความเครียดที่เกิดขึ้นบนขึ้นงาน

ผลการทดลองพบว่า อิทธิพลในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ใช้แรงลากขึ้นรูปและใช้แรงกดพื้นที่สูงสุดมากกว่าการลากขึ้นรูปแบบปกติ โดยในการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ไม่สามารถขึ้นรูปได้ในทุกสภาวะการขึ้นรูป ส่วนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 สามารถขึ้นรูปได้ในทุกสภาวะการขึ้นรูป โดยมีการเปลี่ยนแปลงความหนา ค่าเฉลี่ย 3.58 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดหลัก ค่าเฉลี่ย 14.06 เปอร์เซ็นต์ และความเครียดรอง ค่าเฉลี่ย 8.50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าความเครียดเฉลี่ยน้อยกว่าขึ้นงานที่ลากขึ้นรูปแบบปกติ

**คำสำคัญ:** การลากขึ้นรูปลึง กระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก แรงกดพื้นที่ แรงกดขึ้นงาน ความหนืดเชิงจลศาสตร์

<b>Thesis Title</b>	Influence of The Stainless Steel Sheet Deep Drawing Through Hydrodynamic Process
<b>Name - Surname</b>	Mr. Suriya Namgaew
<b>Program</b>	Manufacturing Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Sirichai Torsakul, Dr.-Ing.
<b>Academic Year</b>	2012

## ABSTRACT

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

This research examined the deep drawing through hydrodynamic process using TISI 3 standard hydraulic oil with  $68 \text{ mm}^2/\text{s}$  viscosity in accordance to the kinematics viscosity at  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  degree and at 3 levels of oil pressure, namely 5, 10 and 15 MPa. The SUS 304 and SUS 430 stainless steel sheets were used in deep drawing with 2 levels of deep drawing force which were 3.9 and 7.1 kN. The influence of factors on deep drawing force, the punch force acted against the work piece, the primary work piece in deep drawing, the changes of work piece thickness and the stress occurred on the work piece had also been examined.

The experiment results revealed that the influence of stainless steel sheet deep drawing through hydrodynamic process with the usage of maximum deep drawing force and punch pressure was higher than the traditional deep drawing. The deep drawing with SUS 430 stainless steel sheet was not feasible in all deep drawing conditions, whereas the deep drawing with SUS 304 stainless steel sheet was feasible in all deep drawing conditions with the changes of the mean thickness of 3.58%, the mean major stain of 14.06% and the mean minor stain of 8.50% which were lower than those found in the traditional deep drawing process.

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

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ดร.ชัยยะ ปราณิตพลกรัง ดร.กฤษชาติ จุลเพ็ญ กรรมการสอบ และ ดร.วิฑูร อุทัยแสงสุข กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ ในการวิจัยจนประสบความสำเร็จ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาหลักที่กรุณาให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และข้อปรับปรุง อย่างมีคุณค่าอนันต์

ท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา อาจารย์ทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุน และแนะนำแนวทางการศึกษา และทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงตามกำหนด

สุริยา น้ำแก้ว



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	4
1.6 ข้อจำกัดของการศึกษา.....	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 แนวความคิด.....	6
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
2.4 สรุปบท.....	42
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	43
3.1 วิธีดำเนินการวิจัย.....	43
3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและการเตรียมการทดลอง.....	43
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	49
3.4 ขั้นตอนการเก็บบันทึกข้อมูลการทดลอง.....	66
3.5 การเปรียบเทียบสรุปผลการทดลอง.....	71

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล .....	72
4.1 อิทธิพลของแรงลากขึ้นรูปที่มีผลต่อชิ้นงานในการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก.....	72
4.2 อิทธิพลแรงกดชิ้นงานที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก.....	75
4.3 ชิ้นงานหลังการขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก .....	79
5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ .....	94
5.1 สรุปการทดลอง .....	94
5.2 ข้อเสนอแนะทั่วไป .....	95
5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป.....	95
รายการอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก.....	100
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลอง.....	101
ภาคผนวก ข ข้อมูลวัสดุในการศึกษาทดลอง.....	115
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	119
ประวัติผู้เขียน.....	135

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ค่าตัวคูณประกอบของการแตก $a_{cr}$ ของวัสดุต่างๆ..... 11
2.2	ค่าประกอบของวัสดุ (Material Factor)..... 12
2.3	ค่าการปรับค่า $n = f(\beta_{actual})$ ..... 13
2.4	ระบบ หน่วย และอุณหภูมิที่วัดความหนืดของน้ำมัน ..... 24
3.1	เปรียบเทียบมาตรฐาน และส่วนประกอบทางเคมี..... 50
3.2	ขนาดสำหรับการกำหนดค่า n แบบ “Plain-End” Specimen..... 50
3.3	สมบัติเชิงกลเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS 304 และ SUS 430 ..... 54
3.4	ชิ้นส่วนแม่พิมพ์..... 58
3.5	ตัวแปรในการทดลองสำหรับการขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว โดยใช้ของเหลว VG 68 .. 65
3.6	ตัวแปรในการทดลองสำหรับการขึ้นรูปแบบธรรมดา..... 66





## สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยรวม .....	4
2.1 การลากขึ้นรูปลึก (Deep drawing) .....	7
2.2 วงกลมหน้าสัมผัสของการลากขึ้นรูปด้วย.....	8
2.3 ส่วนย่อยในวงกลมหน้าสัมผัส .....	8
2.4 ลักษณะความเค้นและปริมาณความเครียดของจุดต่างๆ บนผิวสัมผัส .....	8
2.5 ส่วนของผิวสัมผัสในระหว่างกระบวนการลากขึ้นรูปสภาวะที่ปราศจากแรงเสียดทาน ความเค้นภายในผนังมีขนาดที่เท่ากันทุกจุด คือ รัศมีความเค้นที่รัศมีวงใน $\sigma_{ri}$ .....	10
2.6 เส้นกราฟของความเค้นในการลากขึ้นรูปเมื่อเปรียบเทียบกับ การเคลื่อนที่ของพื้นที่ สำหรับวัสดุที่เกิดความเครียดเชิงตัว .....	10
2.7 รูปถ้วยทรงกระบอกแบบมีปีก .....	12
2.8 แรงกดพื้นที่ในการขึ้นรูปถ้วย .....	14
2.9 Hydrodynamic Deep Drawing .....	14
2.10 กระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว .....	15
2.11 ส่วนต่างๆ ของระบบ Hydrodynamic Deep Drawing .....	16
2.12 หลักการทำงานของเครื่องอัดไฮดรอลิก โดยการใช้กฎของปาสคาล .....	21
2.13 หลักการของความหนืด .....	25
2.14 แรงดึง (Tensile).....	28
2.15 แรงกด (Compression) .....	28
2.16 แรงเฉือน (Shear) .....	29
2.17 ความเค้นความเครียดของการดึงวัสดุ.....	29
2.18 ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain).....	30
2.19 ความเครียดเฉือน (Shear Strain) .....	31
2.20 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point) .....	32
2.21 ตารางวงกลมบนโลหะแผ่น .....	33
2.22 ความเครียดตำแหน่งต่างๆ ของถ้วยทรงกระบอก .....	33
2.23 ขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ความหนา 0.91 mm.....	35
3.1 ชิ้นงานสี่เหลี่ยมขนาด 30 × 30 มิลลิเมตร .....	43

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.2	การจับยึด (Fixture) บนเครื่องกัด CNC..... 44
3.3	การกัดชิ้นงานโดยเครื่องจักร CNC..... 44
3.4	ชิ้นงานทดสอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 mm ความหนา 0.48 mm ..... 44
3.5	น้ำมันไฮดรอลิกตามมาตรฐานเกรด 68..... 45
3.6	เครื่องปั๊มอัดระบบไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน..... 45
3.7	เครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC Automatic Machine) ..... 46
3.8	เครื่องทดสอบแรงดึง..... 46
3.9	ชุดต้นกำลังและควบคุมระบบไฮดรอลิก..... 47
3.10	อุปกรณ์วัดแรงดันและอุปกรณ์บันทึกแรงที่ได้จากการขึ้นรูป..... 47
3.11	ไมโครคาลิปเปอร์สำหรับวัดความหนาชิ้นงาน ..... 48
3.12	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ..... 49
3.13	ขนาดชิ้นทดสอบแรงดึงเหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน ASTM E 646-91 ..... 50
3.14	ลักษณะชิ้นทดสอบหาสมบัติเชิงกล..... 51
3.15	การบันทึกข้อมูลการทดสอบการดึงจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ..... 51
3.16	การหาค่า $r$ โดยการเทียบจากแผนภาพความเครียด..... 52
3.17	แผนภาพการลงจุดความเค้นจริง ความเครียดจริง ความเค้นทางวิศวกรรมและ ความเครียดทางวิศวกรรม ..... 53
3.18	หาค่าสัมประสิทธิ์ความต้านแรงและเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียดใช้แบบ สมการกำลัง (Power Law) ..... 54
3.19	ชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกแบบมีปีก..... 54
3.20	สภาวะของแม่พิมพ์ในการศึกษาทดลอง ซึ่งได้จากการออกแบบคำนวณตามทฤษฎีการ ลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing)..... 56
3.21	ส่วนประกอบพร้อมรายละเอียดของแม่พิมพ์..... 58
3.22	ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ขึ้นรูป..... 59
3.23	แผนสวิทช์ควบคุมการทำงานของระบบไฮดรอลิก..... 60
3.24	วงจรการทำงาน และควบคุมระบบไฮดรอลิก..... 61
3.25	ช่องเติมน้ำมันทั้งสองช่องเพื่อเติมน้ำมันภายในถังและที่ปั๊มโดยตรง..... 61

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.26	กระบวนการกรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้า ..... 63
3.27	แผ่นทดสอบที่สร้างกริดเรียบร้อยแล้ว ..... 63
3.28	แม่พิมพ์ที่ติดตั้งบนเครื่องปั๊มอัดเรียบร้อยแล้ว ..... 64
3.29	การปรับตั้งสวิทช์ควบคุมของเครื่องปั๊ม..... 64
3.30	แม่พิมพ์พร้อมใช้งานติดตั้งบนเครื่องเพรสไฮดรอลิก ..... 65
3.31	ตำแหน่งของการวัดความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป..... 67
3.32	การวัดขนาดกริดวงกลมด้วยโปรแกรม Dcal Image Processing..... 68
3.33	การวัดอัตราความเครียดหลักและอัตราความเครียดรอง..... 68
3.34	ลักษณะของกริดวงกลมก่อนและที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหลังจากการขึ้นรูป..... 69
3.35	กริดวงกลมที่ทำการวัดขนาดหลังการขึ้นรูปในตำแหน่งกึ่งด้วยบริเวณกึ่งกลางและ ขอบด้วย..... 70
3.36	กริดวงกลมที่ทำการวัดในตำแหน่งผนังด้วยด้านข้างบริเวณมุมพื้นที่ กึ่งกลางและ มุมตาย..... 70
3.37	กริดวงกลมซึ่งทำการวัดในบริเวณที่เกิดการฉีกขาดบนผิวชิ้นงาน ..... 71
4.1	แรงลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ขึ้นรูปแบบปกติด้วยกระบวนการ ไฮดรอไดนามิก..... 72
4.2	แรงลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ขึ้นรูปแบบปกติด้วยกระบวนการ ไฮดรอไดนามิก..... 73
4.3	ค่าเฉลี่ยแรงลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430 ในการขึ้น รูปแบบปกติด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ..... 74
4.4	ค่าแรงกดพื้นที่สูงสุด ในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ขึ้นรูปแบบ ปกติด้วยกระบวนการ ไฮดรอไดนามิก..... 76
4.5	ค่าแรงกดพื้นที่สูงสุด ในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ขึ้นรูปแบบ ปกติด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก..... 77
4.6	ค่าแรงกดพื้นที่สูงสุด ในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และSUS 430 ขึ้นรูปแบบปกติด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ..... 78

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.7	ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm <sup>2</sup> ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก..... 79
4.8	ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm <sup>2</sup> ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก..... 80
4.9	ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm <sup>2</sup> ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก..... 81
4.10	ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm <sup>2</sup> ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก..... 82
4.11	ตำแหน่งของการวัดความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป..... 83
4.12	ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 หลังการขึ้นรูปที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm <sup>2</sup> ..... 83
4.13	ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 หลังการขึ้นรูปที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm <sup>2</sup> ..... 84
4.14	ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 หลังการขึ้นรูปที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm <sup>2</sup> ..... 85
4.15	ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 หลังการขึ้นรูปที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm <sup>2</sup> ..... 86
4.16	ค่าความหนาเฉลี่ยของชิ้นงานหลังการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก..... 87
4.17	ตำแหน่งการวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริดวงกลม ..... 88
4.18	แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm <sup>2</sup> ..... 88
4.19	แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm <sup>2</sup> ..... 89
4.20	แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm <sup>2</sup> ..... 90

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.21 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก โดยใช้แรงกดขึ้นงาน $35.69 \text{ N/mm}^2$ .....	91
4.22 เปรียบเทียบความเครียดหลักสูงสุดของกระบวนการขึ้นรูปแบบธรรมดากับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก.....	92
4.23 เปรียบเทียบความเครียดรองสูงสุดของกระบวนการขึ้นรูปแบบธรรมดากับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก.....	93



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการขึ้นรูปโลหะแผ่น หรือ Sheet metal forming (SMF) ให้เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ตามที่ต้องการ กรรมวิธีที่ใช้กันมีหลายวิธี เช่น การบีบอัดเฉือน การบีบขึ้นรูป และการขึ้นรูปลึก เป็นต้น และมีผลิตภัณฑ์บางประเภท ที่นำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมมาทำการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ ด้วยกรรมวิธีการลากขึ้นรูปลึก เช่น เครื่องใช้ภายในครัวเรือน เฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น

ด้วยศักยภาพของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่นำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยทำการขึ้นรูป เพราะว่ามีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับสัดส่วนน้ำหนัก โดยเฉพาะคุณสมบัติการยืดตัว (Elongation) และสมบัติความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อมีแรงกระทำ (work hardening)[1] และด้วยกรรมวิธีการลากขึ้นรูปลึก ในขณะที่ทำการลากขึ้นรูปโลหะ จะเกิดแรงเสียดทานระหว่างแผ่นขึ้นงานและผิวหน้าของดาย (Die) ทำให้วัสดุมีความหนาไม่สม่ำเสมอ

ดังนั้น จากการศึกษาค้นคว้าพัฒนากระบวนการการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยมีการศึกษาวิจัย การลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิก (Hydrodynamic Deep Drawing; HDD) ซึ่งในหลักการจะใช้น้ำมันหรือของเหลวที่มีความดันสูงเข้ามาช่วยการขึ้นรูปโลหะแผ่น ในขณะที่มีการเคลื่อนตัวของพินช์ (Punch) กดลงบนชิ้นงานเพื่อขึ้นรูปเข้าสู่ดาย ของเหลวที่มีความดันจะเคลื่อนตัวไหลอยู่ระหว่างพื้นผิวด้านล่างของดาย กับแผ่นโลหะ กระบวนการดังกล่าวสามารถเพิ่มค่าของอัตราส่วนขีดจำกัดการลากขึ้นรูป (Limiting Drawing Ratio; LDR) และเป็นการปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงาน [2] สิ่งที่เห็นได้อย่างชัดเจนที่สุด ในกระบวนการการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการ Hydrodynamic Deep Drawing ที่ใช้สารหล่อลื่นหรือของเหลวเป็นส่วนสำคัญ แทนการลากขึ้นรูปแบบธรรมดา ก็คือ การลดความฝืด หรือความเสียดทานระหว่าง Blank Holder กับแผ่นโลหะ [3-4]

งานศึกษาวิจัยฉบับนี้มุ่งเน้นศึกษาความแตกต่างแรงกด (Blank Holder Force) และแรงดันของน้ำมันไฮดรอลิก (Internal Fluid Pressure) ซึ่งตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน [5] น้ำมันไฮดรอลิกที่นำมาใช้ คือ น้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic oil) เกรด 68 จากงานศึกษาวิจัยของ กฤษดา บรรเทาพิช [6] ในเรื่อง การศึกษาอิทธิพลของของเหลวในการลากขึ้นรูปลึกเหล็กคาร์บอนรีดเย็น SPCC ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ปี 2555 ซึ่งนำเอา น้ำมันไฮดรอลิก เกรด 68, 46 และ 32 นำมาทดลอง ศึกษาถึงแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปลึกและคุณภาพชิ้นงาน ที่ผ่านกระบวนการลากขึ้นรูปลึก

ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ในสภาวะของความดันและความหนืดที่แตกต่างกัน พบว่าความสามารถในการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC โดยการพิจารณาจาก แผ่นภาพขีดจำกัดของการขึ้นรูปของเหลวค่าความหนืด VG 68 สามารถขึ้นรูปได้ดีที่สุด และการศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงสนใจ การลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนการ Hydrodynamic Deep Drawing เพื่อพิจารณาแรงกด และแรงดันน้ำมันที่เหมาะสมต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาแรงในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนการ Hydrodynamic Deep Drawing

1.2.2 เพื่อศึกษาแรงกดชิ้นงาน และแรงดันของน้ำมันไฮดรอลิก ในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนการ Hydrodynamic Deep Drawing

1.2.3 เพื่อศึกษาคุณภาพชิ้นงาน เทียบการลากขึ้นรูปแบบปกติ

## 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1.3.1 ในกระบวนการลากขึ้นรูปเหล็กด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก จะใช้แรงในการลากขึ้นรูปที่สูงกว่าการลากขึ้นรูปแบบปกติ

1.3.2 ในกระบวนการลากขึ้นรูปเหล็กด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก เมื่อเพิ่มแรงดันน้ำมัน แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปจะสูงขึ้น

1.3.3 แรงในกระบวนการลากขึ้นรูปเหล็กด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกจะสูงกว่าแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นภายในห้องแม่พิมพ์คาย (Liquid Chamber) ในขณะที่ทำการขึ้นรูป

1.3.4 เมื่อทำการลากขึ้นรูปภายใต้สภาวะที่มีความดันของเหลวเพิ่มขึ้น แรงเสียดทานระหว่างแผ่นโลหะกับคายควรจะลดลง อาจส่งผลทำให้คุณภาพของชิ้นงานดีขึ้น และพบปัญหาน้อยลงเนื่องจากแรงดันจากของเหลวจะต้านทานแรงกดยึดของแผ่นโลหะ ทำให้แผ่นโลหะไม่สัมผัสกับผิวคายโดยตรง

1.3.5 ความสามารถในการลากขึ้นรูปของโลหะแผ่นควรเพิ่มขึ้น เมื่อใช้สารหล่อลื่นหรือของเหลวที่มีความหนืดสูงกว่า และทำการขึ้นรูปภายใต้สภาวะของความดันที่มีความเหมาะสม

#### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 วัสดุชิ้นงานแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430 ความหนา 0.48 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเริ่มต้น 80 มิลลิเมตร ทำการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร แบบมีปีกขนาด 5 มิลลิเมตร ในอัตราส่วนการลากขึ้นรูป (Drawing ratio: DR) เท่ากับ 1.8 [7]

1.4.2 แม่พิมพ์ทำจากเหล็กเครื่องมือ SKD11 ชุบแข็งและชุบฮาร์ดโครม (Hard Chrome) ในชิ้นส่วนที่สัมผัสกัน และเกิดการเสียดสีกับอุปกรณ์ป้องกันการรั่วซึมของน้ำมันไฮดรอลิก ทำการศึกษาทดลองการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปลึก ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลวความดันสูง (Hydrodynamic Deep Drawing) ด้วยการออกแบบแม่พิมพ์ให้สอดคล้องกับกระบวนการดังกล่าว

1.4.3 ทำการทดสอบอัดแรงดันน้ำมันเข้าห้อง Fluid chamber ของแม่พิมพ์ ที่แรงดัน 5, 10 และ 15 MPa ตามลำดับ เปรียบเทียบกับการขึ้นรูปปกติ ซึ่งน้ำมันที่ใช้คือ น้ำมันไฮดรอลิก-น้ำมันแร่ (Hydraulic oil) เกรด 68 ความหนืดเชิงจลศาสตร์ เท่ากับ 68.98 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 977-2551 น้ำมันไฮดรอลิก-พื้นฐานน้ำมันแร่ [8] การทดสอบ ISO 3105 [9]

1.4.4 ทำการทดสอบแรงกดแผ่นชิ้นงาน (Black holder force) โดยการทดสอบเริ่มแรกใช้ขนาดของแรงกดตามทฤษฎีการคำนวณการลากขึ้นรูปลึก และแรงจากการกดของสปริงแม่พิมพ์ ที่มีค่าคงที่ตามมาตรฐาน JIS B 5012 Coiled Helical Spring For Press Dies [10]

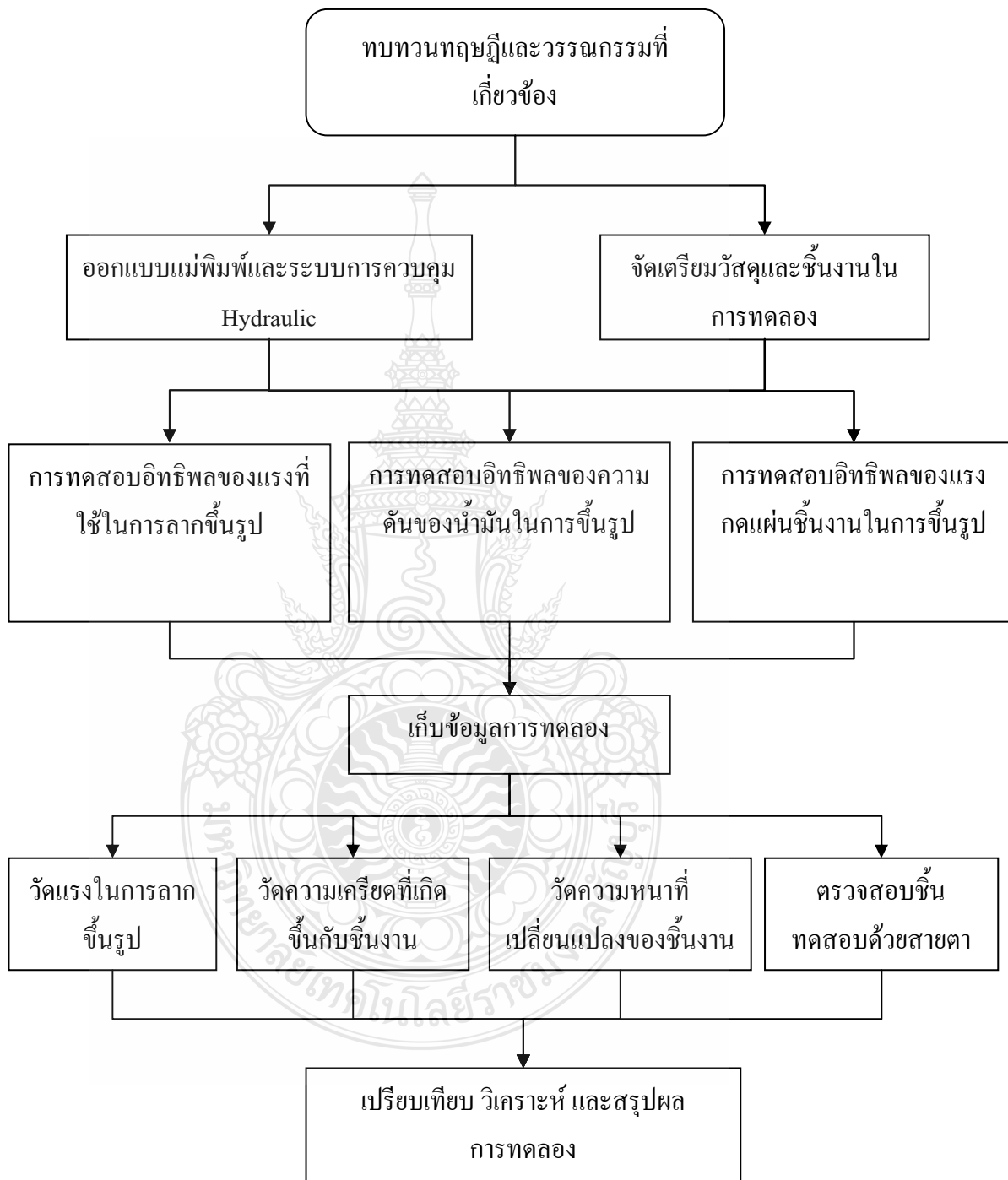
1.4.5 ศึกษาถึงแรงในการลากขึ้นรูป (Drawing Force) ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิก (Hydrodynamic Deep Drawing) โดยใช้ Load Cell ในการวัดแรงกดเปรียบเทียบกับแรงในการลากขึ้นรูปที่ได้จากการคำนวณ

1.4.6 ศึกษาถึงความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นทดสอบ

1.4.7 ศึกษาถึงสภาพโดยทั่วไปของชิ้นงาน โดยพิจารณาถึงปัญหาที่พบในกระบวนการลากขึ้นรูปอันประกอบไปด้วย 1. การฉีกขาด (Tearing) และ 2. รอยย่น (Wrinkling) [11-12]



## 1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย



ภาพที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยรวม

## 1.6 ข้อจำกัดของการศึกษา

1.6.1 สำหรับตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ในครั้งนี้คือ รูปแบบของการขึ้นรูป ซึ่งในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เลือกใช้รูปแบบของการขึ้นรูปที่ง่าย และมีแหล่งของข้อมูลอ้างอิงที่เกี่ยวข้องกับวัสดุที่นำมาเป็นวัสดุทดสอบและตัวแปรต่างๆ ของเครื่องมือ (Tooling Parameter) ต่างๆ

1.6.2 ความดันภายในของน้ำมันที่ใช้ในการทดลองสูงสุดที่ 15 MPa

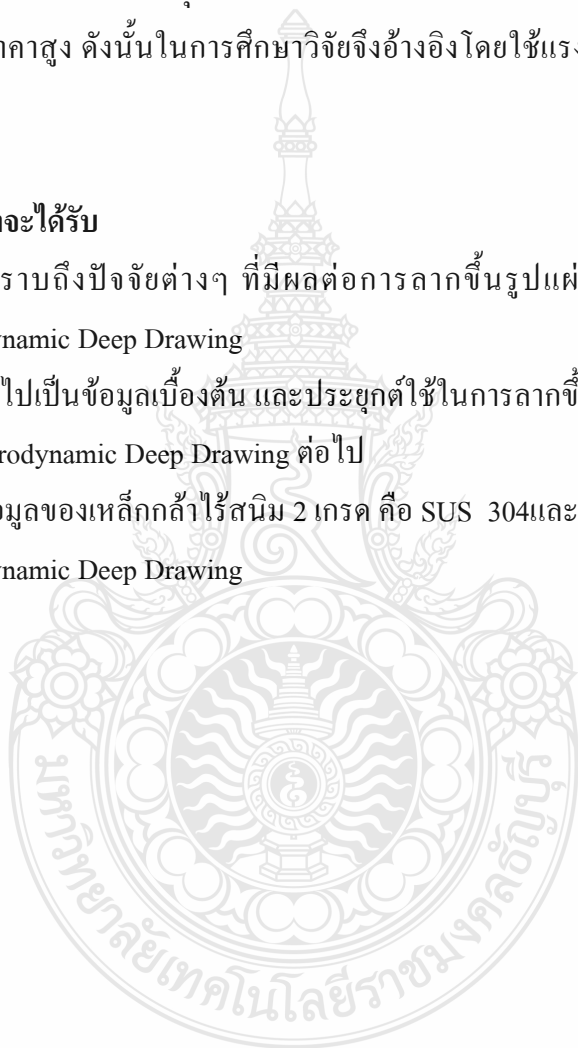
1.6.3 การศึกษาจะใช้แรงดันควบคุมภายในเท่านั้น เนื่องจากเป็นการศึกษาเริ่มต้นประกอบกับอุปกรณ์ที่ทันสมัยมีราคาสูง ดังนั้นในการศึกษาวิจัยจึงอ้างอิงโดยใช้แรงดันควบคุมในการทดลองเท่านั้น

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 สามารถทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ด้วยกระบวนการ Hydrodynamic Deep Drawing

1.7.2 สามารถนำไปเป็นข้อมูลเบื้องต้น และประยุกต์ใช้ในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ด้วยกระบวนการ Hydrodynamic Deep Drawing ต่อไป

1.7.3 ได้ทราบข้อมูลของเหล็กกล้าไร้สนิม 2 เกรด คือ SUS 304 และ SUS 430 ที่ขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการ Hydrodynamic Deep Drawing



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

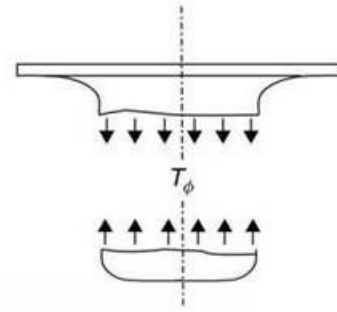
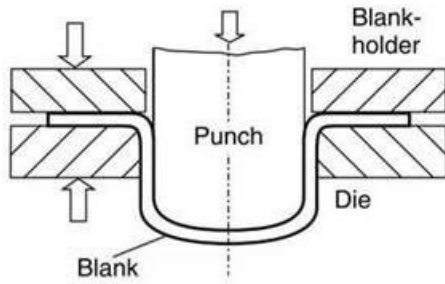
#### 2.1 แนวความคิด

จากการค้นคว้าและทบทวนวรรณกรรมต่างๆ ที่ศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถในการลากขึ้นรูปลึงโลหะแผ่น และความพยายามในการเพิ่มขีดความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่น โดยการนำเอาของเหลวเข้ามาช่วยในการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก โดยใช้น้ำมันเข้าไปแทนที่อากาศภายในห้องแม่พิมพ์ ซึ่งน้ำมันจะมีความสามารถในการกระจายตัวของแรงได้ดีกว่าอากาศ ในขณะที่เดียวกันยังทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นในขณะที่น้ำมันมีการเคลื่อนที่ (Hydrodynamic) กระบวนการดังกล่าวเป็นการลดแรงเสียดทานระหว่างผิวแผ่นโลหะกับผิวดาย และเพิ่มความสามารถในการไหลตัวของโลหะในขณะที่ทำการขึ้นรูป และในการศึกษาทดลองครั้งนี้เป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ระหว่างการลากขึ้นรูปปกติ กับการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก โดยพิจารณาถึงแรงกดชิ้นงาน แรงในการขึ้นรูปที่เกิดขึ้น ในระหว่างการลากขึ้นรูป ซึ่งแรงในการลากขึ้นรูปมีผลสำคัญต่อการเกิดรอยฉีกขาดที่ผิวของชิ้นงาน ผลจากความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของชิ้นงาน และชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปมีลักษณะของปัญหาที่สำคัญนอกจากรอยฉีกขาดที่ผิวชิ้นงานแล้ว ยังมีรอยย่นที่ปากถ้วยและความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน

#### 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.2.1 การลากขึ้นรูปลึง (Deep Drawing)

กระบวนการลากขึ้นรูปลึงเป็นการขึ้นรูปวัสดุแผ่นเรียบให้มีรูปร่างต่างๆ โดยการใส่แรงกดจากแม่พิมพ์พUNCH (Punch) กดลงไปยังแผ่นชิ้นงานผ่านแม่พิมพ์ดาย (Die) โดยที่ความหนาของชิ้นงานยังเท่ากับวัสดุตั้งต้น กระบวนการลากขึ้นรูปลึงมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ดาย พUNCH และ ตัวกดแผ่นชิ้นงาน (Blank Holder Ring) สำหรับกดแผ่นชิ้นงานให้แนบกับแม่พิมพ์ดาย ในขณะที่ทำการขึ้นรูป (Blank Holder Force) [13-14]



(ก) การลากขึ้นรูปด้วยวงกลมทรงกระบอก (ข) การขยายตัวตามแนวการขึ้นรูปและแรง ลากขึ้นรูป โดยเป็นแรงดึงที่เกิดขึ้นบริเวณผนังถ้วย

ภาพที่ 2.1 การลากขึ้นรูปลึก (Deep drawing) [13]

### 1) หน้าสัมผัสในการลากขึ้นรูป

หน้าสัมผัสระหว่างวัสดุแผ่นกับพื้นที่ในขณะทำการลากขึ้นรูป พิจารณาได้ตามภาพที่ 2.2 เมื่อพิจารณาถึงส่วนย่อยตามภาพที่ 2.3 ความเค้นที่เกิดขึ้นกับส่วนย่อยที่รัศมี  $r$  ดังที่แสดงในภาพที่ 2.4 สมการอนุพันธ์สำหรับส่วนย่อยนั้นเมื่อไม่คำนึงถึงความเสียดทาน คือ [13]

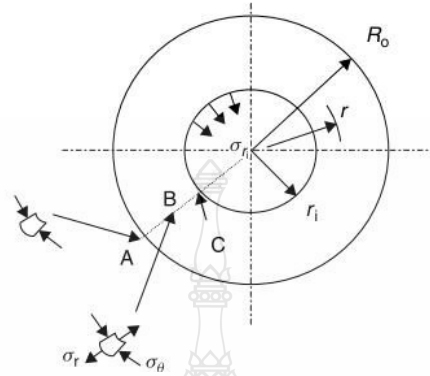
$$(\sigma_r + d\sigma_r)(t + dt)(r + dr)d\theta = \sigma_r t r d\theta + \sigma_\theta t dr d\theta \quad (2.1)$$

เมื่อยุบรวมสมการแล้วจะได้

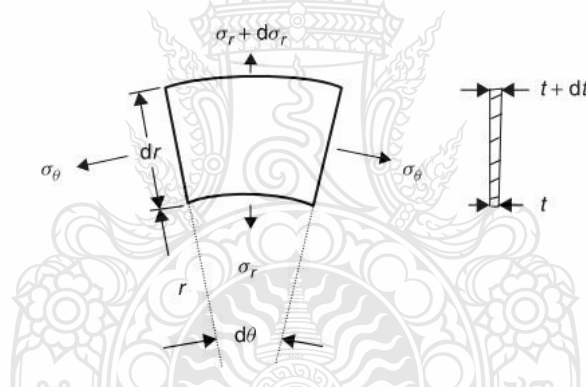
$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r}{t} \frac{dt}{dr} - \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} = 0 \quad (2.2)$$

ที่บริเวณขอบของวงกลมจุด A เป็นพื้นผิวอิสระ  $\sigma_r = 0$  ดังนั้น ความเค้นอัดในแนวแกนที่เกิดขึ้น  $\sigma_\theta = \sigma_f$  เมื่อ  $\sigma_f$  คือ ความเค้นไหลที่เกิดขึ้นจริง ที่เส้นรัศมีกลาง ที่จุด B รัศมีมีความเค้นจะอยู่ตรงข้ามกันและมีขนาดเท่ากัน นั่นก็คือ ความเค้นตามแนวเส้นรอบวง (Hoop Stress) อยู่บริเวณขอบด้านใน จุด C รัศมีมีความเค้นมีค่าสูงสุด ลักษณะของการเกิดความเค้น และความสอดคล้องกันปริมาณความเครียด ปรากฏเป็นตำแหน่งของการเกิดความเค้นจุดครากฟอนมิสเซส (Von Mises) ในภาพที่ 2.4 บริเวณขอบด้านนอก A วัสดุแผ่นจะมีความหนาเพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ในขณะที่เดียวกันที่จุด B ความหนาจะไม่มีเปลี่ยนแปลงไป บริเวณด้านในขอบ C จะเกิดเป็นแผ่นบาง

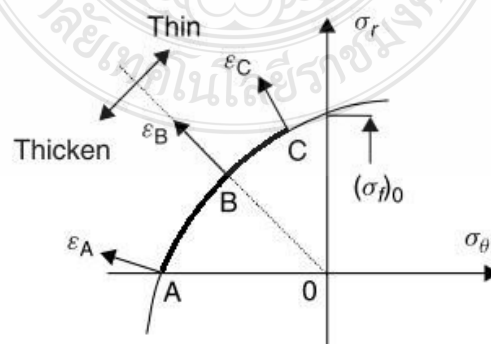
ทั้งหมดนี้เป็นภาพรวมของการลากขึ้นรูป พื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมดของวัสดุในช่วงต้นจะไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นการกำหนดขนาดของวัสดุแผ่นก่อนการขึ้นรูปเป็นเพียงการประมาณการเท่านั้น



ภาพที่ 2.2 วงกลมหน้าสัมผัสของการลากขึ้นรูปด้วย [13]



ภาพที่ 2.3 ส่วนย่อยในวงกลมหน้าสัมผัส [13]



ภาพที่ 2.4 ลักษณะความเค้นและปริมาณความเครียดของจุดต่างๆ บนผิวสัมผัส [13]

ความเค้นซึ่งก่อตัวเพิ่มขึ้นของผิวสัมผัสในกระบวนการการลากขึ้นรูป หาได้โดยสมการที่ 2.3 และการเปลี่ยนรูปที่ตามมาจะใช้วิธีการความสัมผัสทางคณิตศาสตร์ ซึ่งปัจจุบันได้ล้ำสมัยไปแล้ว แต่เราสามารถพิจารณาเพิ่มเติมได้จากสภาวะความเสียหายที่จุดครากของทีคา (Tresca)

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

เมื่อ  $(\sigma_f)_0$  คือความเค้นไหลเริ่มต้น และเมื่อความหนาเริ่มต้นเป็นไปอย่างมีรูปแบบ เช่น  $t = t_0$  สมการที่ 2.2 สามารถจัดใหม่โดยอินทิเกรตได้ เมื่อกำหนดให้ขอบเขตสภาวะ  $\sigma_r = 0$  ที่รัศมีวงนอก  $R_0$  และ  $\sigma_r = \sigma_{ri}$  ส่วนรัศมีวงใน  $r_i$  เป็นการกำหนดขึ้น

$$\sigma_{ri} = -(\sigma_f)_0 \ln \frac{r_i}{R_0}$$

หรือ

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

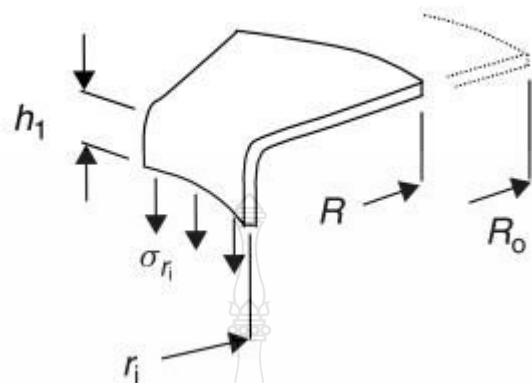
สำหรับวัสดุที่ไม่เกิดความเครียดแข็งตัว รัศมีความเค้นซึ่งให้ไว้โดยสมการที่ 2.4 เป็นตัวหารร่วมที่จุดเริ่มต้น และจะลดลงเมื่อเข้าใกล้รัศมีวงนอก ความเค้นที่ผนังของถ้วยวัสดุเกิดขึ้นได้อย่างถาวร เมื่อ  $(\sigma_f)_0$  คือความเค้นตามสภาวะทีคา ดังนั้น เอา  $\sigma_{ri} = (\sigma_f)_0$  เข้าไปแทนที่ในสมการที่ 2.4 ทำให้ทราบถึงความกว้างของแผ่นวัสดุที่จะสามารถนำมาลากขึ้นรูปได้ นั่นก็คือค่าของ "อัตราส่วนจำกัดของการลากขึ้นรูป" (Limiting Drawing Ratio)

$$\frac{R_0}{r_i} = e \approx 2.72 \quad (2.5)$$

## 2) ผลกระทบของความเครียดแข็งตัว

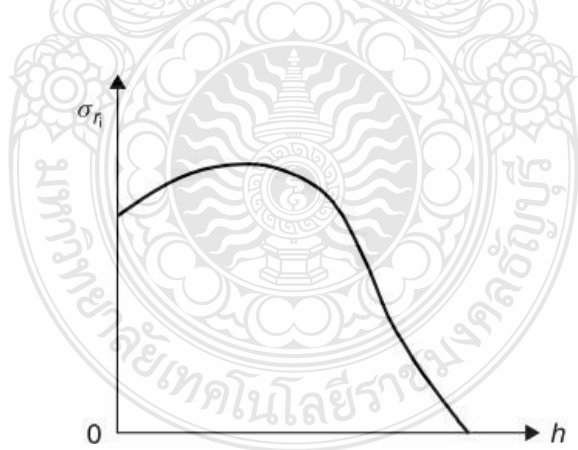
ค่าความเครียดแข็งตัว ความเค้นที่กระทำต่อพื้นผิวสัมผัส อาจเพิ่มสูงขึ้นในระหว่างการลากขึ้นรูป ในขณะที่ถึงแม้ว่ารัศมีวงนอกจะลดลง เมื่อพื้นผิวจะถูกลากขึ้นรูปเข้าไปยังด้านใน รัศมีวงนอก  $R$  จะลดลงอย่างรวดเร็วดังแสดงในภาพที่ 2.5 ค่าความเครียดแข็งตัวจากความเค้นไหลจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้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

$$\sigma_{ri} = (\sigma_f)_{av} \ln \frac{R}{r_i} \quad (2.6)$$



ภาพที่ 2.5 ส่วนของผิวสัมผัสในระหว่างกระบวนการลากขึ้นรูปสถานะที่ปราศจากแรงเสียดทาน ความเค้นภายในผนังมีขนาดที่เท่ากันทุกจุด คือ รัศมีความเค้นที่รัศมีวงใน  $\sigma_{ri}$  [13]

ดังนั้นการกำหนดค่าตัวแปรทั้งสองที่ตรงข้ามกัน คือ การเพิ่มขึ้นของความเค้นจนกระทั่งวัสดุเกิดการแข็งตัว และการลดลงของความเค้นที่รัศมี R อย่างช้าๆ โดยปกติแล้วความเค้นในขณะการลากขึ้นรูปจะเพิ่มสูงขึ้นในช่วงต้น จนกระทั่งมีค่าสูงสุดและจะลดลงดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 เส้นกราฟของความเค้นในการลากขึ้นรูปเมื่อเปรียบเทียบกับเคลื่อนที่ของพื้นที่สำหรับวัสดุที่เกิดความเครียดแข็งตัว [13]

แรงที่ทำให้เกิดรอยแตก [14] ในการเลือกอัตราส่วนการขึ้นรูปที่มีค่ามากที่สุด คือ  $\beta = d_0/d_1$  ค่านี้จะเป็นค่าที่ใช้แรงสูงสุด ในการลากขึ้นรูปภายใต้เงื่อนไขที่ไม่เปลี่ยนแปลง ค่าแรงสูงสุดนี้จะถูกส่งผ่านไปที่ผนังของชิ้นงานที่ถูกขึ้นรูป ดังนั้นอัตราส่วนการขึ้นรูปจะต้องไม่มากกว่าค่าสูงสุด ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด  $\beta_{max}$  เป็นค่าเพื่อป้องกันการเกิดรอยแตกที่กั้นชิ้นงานชิ้นงาน ในสมการ 2.7 จะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ทำให้เกิดรอยแตก (Maximum Cracking Strength)  $\sigma_{cr}$  กับค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength)  $S_u$  ของวัสดุที่แสดงไว้แล้ว

$$\sigma_{cr} = S_u \times a_{cr} \quad (2.7)$$

โดยใช้ค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ทำให้เกิดรอยแตก  $\sigma_{cr}$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่กึ่งกลางของความหนา  $d_m$  และความหนาชิ้นงาน  $S_o$  ในสมการที่ 2.8 เป็นการคำนวณหาแรงที่ทำให้เกิดการแตก  $F_{cr}$  ดังนี้

$$F_{cr} = \pi \times d_m \times S_o \times S_u \times a_{cr} \quad (2.8)$$

ตารางที่ 2.1 ค่าตัวคูณประกอบของการแตก  $a_{cr}$  ของวัสดุต่างๆ [14]

วัสดุ	$a_{cr}$
Deep-Drawing Steel Sheet, RSt 14 (SAE 1006)	1.05-1.55 $\approx$ 1.30
Austenite Steel Sheet, X 5 Cr Ni 18 9 (AISI 304)	0.95-1.305 $\approx$ 1.13
Drass, Cu Zn 37 (UNS C27000)	0.92-1.27 $\approx$ 1.045
Pure Aluminum, Al 99.7 w (AA 1050-O)	0.99-1.22 $\approx$ 1.105

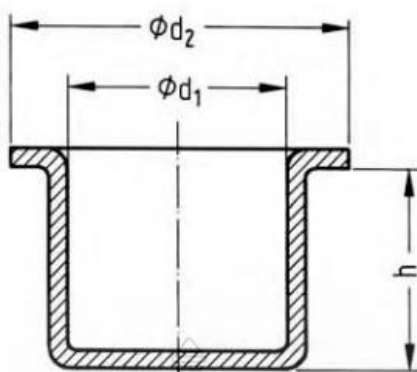
### 3) การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการลากขึ้นรูปลึก

สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ ในกระบวนการการลากขึ้นรูปลึกรูปถ้วยทรงกระบอกสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้ [15]

#### 1. ขนาดแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นสำหรับการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก [14]

$$D = \sqrt{d_2^2 + 4d_1h} \quad (2.9)$$





ภาพที่ 2.7 รูปถ้วยทรงกระบอกแบบมีปีก [16]

2. ขนาดของมุมคายแม่พิมพ์ [15-16]

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

3. ระยะช่องว่างแม่พิมพ์พื้นที่กับคาย [15]

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

โดยที่  $k$  คือ ค่าประกอบของวัสดุ (Material Factor) ตารางที่ 2.1 ค่าประกอบของวัสดุ ( $k$ )

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

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

4. แรงกดแผ่นชิ้นงาน เป็นแรงที่ใช้กดแผ่นชิ้นงาน โดยการใช้แผ่นกดชิ้นงาน กดที่แผ่นชิ้นงานโดยตรง [14]

1. แรงดันของแผ่นกดแผ่นขึ้นงาน (Blank Holder Pressure)

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

2. พื้นที่ผิวสัมผัสของแผ่นกดขึ้นงาน (Blank Holder Area) [14]

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

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

3. แรงกดแผ่นขึ้นงาน (Blank Holder Force) [14]

$$F_{BH} = A_{BH} \times p \quad (2.15)$$

4) แรงในการลากขึ้นรูป

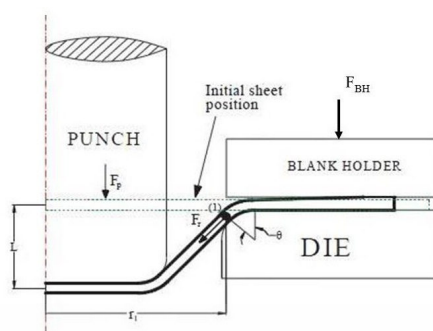
แรงที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการการลากขึ้นรูปลึก ซึ่งแม่พิมพ์ซึ่งเป็นตัวกดหรือพันธั้กระทำต่อแผ่นขึ้นงานในภาพที่ 2.1 แรงกดพื้นที่ในการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอก ของกระบวนการลากขึ้นรูปลึก การคำนวณแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป ตามทฤษฎีการลากขึ้นรูปลึก คำนวณได้ตามสมการที่ 2.16 [16]

$$F_{dr} = d \times \pi \times s \times R_m \times n \quad (2.16)$$

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

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

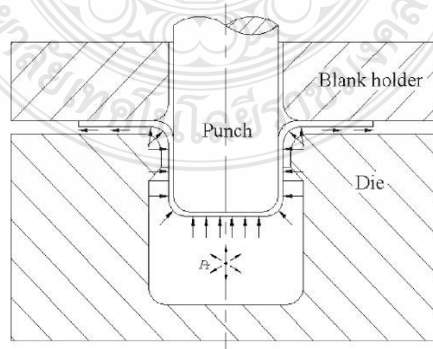
$n$	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3
$\beta_{actual} = \frac{D}{d}$	1.1	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2



ภาพที่ 2.8 แรงกดพื้นฐานในการขึ้นรูปถ้วย [17]

### 2.2.2 การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยของเหลว (Sheet Hydroforming)

การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยของเหลว หรือ Sheet Hydroforming มีลักษณะการขึ้นรูปโลหะแผ่นคล้ายกับการขึ้นรูปโลหะแผ่นทั่วไป โดยมีชุดแม่พิมพ์ค้ำ และชุดแม่พิมพ์พันซ์ ทำการกดโลหะแผ่นให้เป็นชิ้นงาน ให้มีรูปร่างตามที่กำหนดเพียงแต่ภายในแม่พิมพ์นั้นจะบรรจุไปด้วยน้ำมันหรือของเหลวอื่นๆ ซึ่งเป็นน้ำมันหรือของเหลวความดันสูง (High Pressure) ที่จะสามารถกดแผ่นโลหะให้ติดกับพันซ์ในขณะที่ทำการขึ้นรูป ซึ่งเป็นการลดความผิดที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการขึ้นรูปด้วยเช่นกัน ของเหลวที่อยู่ภายในชุดแม่พิมพ์จะไหลอยู่ระหว่างผิวด้านล่างของชุดแม่พิมพ์กับแผ่นโลหะ ซึ่งจะทำหน้าที่ในการต้านทานแรงกดของพันซ์ในขณะที่ทำการขึ้นรูป และสารหล่อลื่นทำหน้าที่ในการลดแรงเสียดทานในขณะที่ปฏิบัติงาน ค่าของขีดจำกัดของอัตราการลากขึ้นรูป (Limit Drawing Ratio: LDR) ของแผ่นโลหะนั้นจะเพิ่มขึ้น และเป็นการเพิ่มคุณภาพให้กับชิ้นงาน ตามภาพที่ 2.9 แสดงถึงกระบวนการ Sheet Hydroforming ในกรรมวิธีของ Hydrodynamic Deep Drawing (HDD)

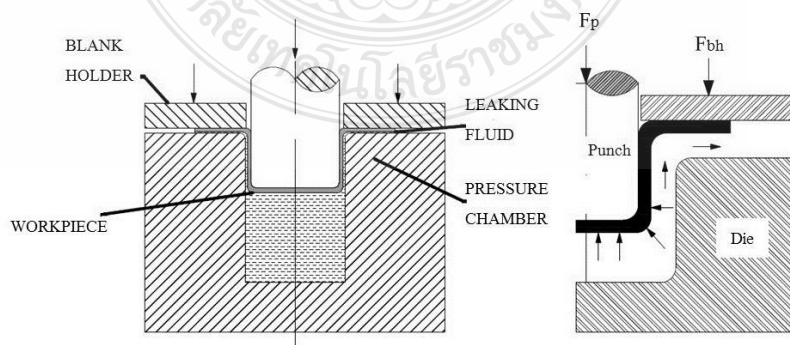


ภาพที่ 2.9 Hydrodynamic Deep Drawing [18]

ของเหลวสามารถนำมาใช้กับ Punch, Die หรือนำเข้ามาช่วยในการพัฒนาความสามารถในการขึ้นรูปของแผ่นโลหะ ในการนำเอาของเหลวเข้ามาช่วยลดความเสียหายในกระบวนการ 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) แมกนีเซียมอัลลอย (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]

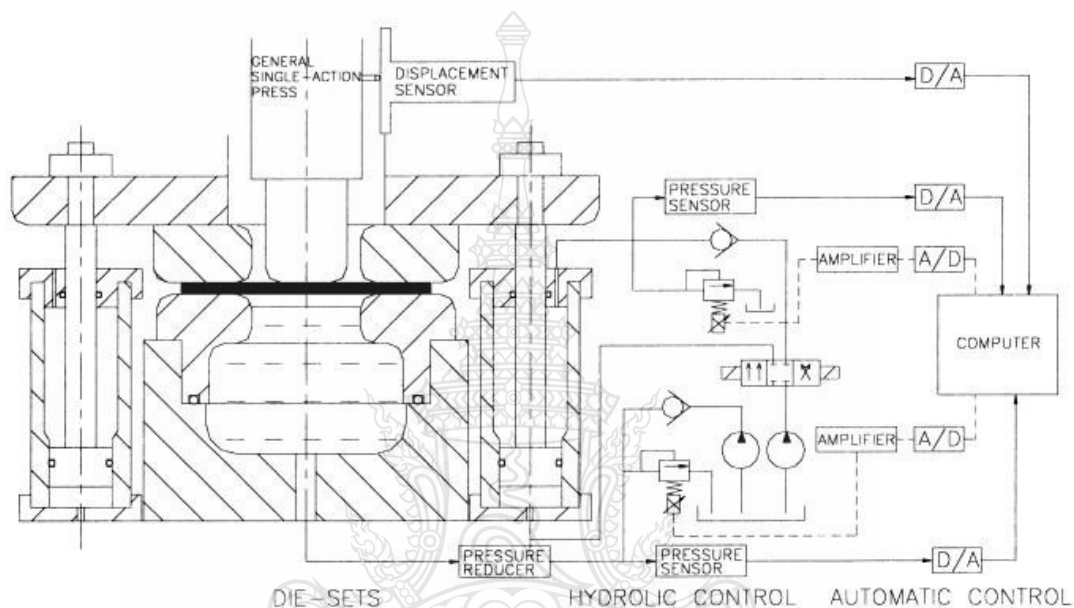
### 2.2.3 การลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลวหรือพลศาสตร์ของไหล

กระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว นั้น ของเหลวจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยแรงดันและความเร็วตามที่กำหนด และไหลออกจากแม่พิมพ์ด้วยแรงดันและความเร็วสูง การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของแรงดันของเหลวในการไหลออกจากแม่พิมพ์นั้น เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ลงของพื้นชั้นในจังหวะของการลากขึ้นรูป สำหรับการควบคุมแรงดันของเหลวภายในระบบ สำหรับการลากขึ้นรูปด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ไม่ได้มีความสำคัญมากนัก รวมไปถึงการใช้แผ่นยางก็ไม่มี ความจำเป็น ซึ่งเป็นจุดที่แตกต่างไปจากกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยเครื่องจักรกลของเหลว (Hydromechanical Deep Drawing) และ การลากขึ้นรูปลึกของของเหลว (Hydroforming Deep Drawing) [19]



ภาพที่ 2.10 กระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว [19]

ระบบการทำงานและส่วนประกอบ ของกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว แสดงในภาพที่ 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]



ภาพที่ 2.11 ส่วนต่างๆ ของระบบ Hydrodynamic Deep Drawing [2]

2.2.4 แรงกดพื้นที่กระทำต่อวัสดุแผ่น ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว

สำหรับกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ไม่สามารถที่จะพิจารณาแรงในการลากขึ้นรูปเพียงอย่างเดียวได้ เนื่องจากแรงลากขึ้นรูปที่คำนวณตามทฤษฎีการลากขึ้นรูปหรือการวัดค่าแรงจากการทดลองนั้น เป็นแรงกดพื้นที่โดยรวม (Total Punch Forces; TPF) เนื่องจากภายในกระบวนการมีแรงดันของเหลวอยู่ภายใน เป็นแรงที่คอยต้านการเคลื่อนที่ลงของพื้นที่ นั่นคือแรงที่ทำให้แรงกดพื้นที่ (Sheet Drawing Forces; SDF) ที่กระทำต่อวัสดุแผ่นลดลง ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงแรงกดพื้นที่ที่กระทำโดยตรงต่อวัสดุแผ่น ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.17 [20]

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

เมื่อ $f_D$	คือ แรงกดพื้นที่กระทำโดยตรงต่อวัสดุแผ่น
$f_P$	คือ แรงกดพื้นที่โดยรวม
$d_p$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่
$P_S$	คือ แรงดันของเหลว

### 2.2.5 กลศาสตร์ของไหลเบื้องต้น (Fluid mechanics)

ของไหล คือ สสารที่เปลี่ยนรูปร่างไปเรื่อยๆเมื่อถูกกระทำด้วยแรงเฉือน (Shear Force) แรงเฉือนคือแรงที่กระทำในทิศทางที่สัมผัสกับผิวของของไหล และเมื่อแรงถูกกระทำด้วยพื้นที่ที่มันสัมผัส ก็จะเป็นหน่วยแรงเฉือน (Shear Stress) สมบัติของของไหลเป็นลักษณะเฉพาะของของไหลขึ้นกับพารามิเตอร์ต่างๆ สมบัติพื้นฐานของของไหล คือ ความควบแน่น น้ำหนักจำเพาะ ความหนืดพลวัต ความหนืดจลศาสตร์ โดยทั่วไปแล้วการศึกษาทางด้านกลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics) แบ่งออกเป็นสองแขนงคือ สถิตยศาสตร์ของไหล (Fluid Static) และพลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamic) [21]

กฎพื้นฐานทางฟิสิกส์ สมการควบคุมที่จะสร้างขึ้นเพื่อศึกษากลศาสตร์ของไหลเชิงทฤษฎีนี้สร้างขึ้นบนพื้นฐานของกฎต่างๆทางฟิสิกส์ที่ได้รับการยอมรับกันโดยทั่วไปแล้ว กฎเหล่านี้ถือเป็นกฎธรรมชาติ (Natural Laws) ที่ต้องบัญญัติขึ้นมาเท่านั้น กล่าวคือไม่สามารถพิสูจน์ขึ้นมาได้ในเชิงคณิตศาสตร์ (แต่สามารถพิสูจน์ได้โดยการทดลองภายใต้เงื่อนไขที่เข้าใจกัน) กฎต่างๆ ที่สำคัญที่จะใช้เป็นฐานในการศึกษากลศาสตร์ของไหลมีดังนี้ คือ [21-22]

1) กฎอนุรักษ์มวลของสาร (Conservation of mass) “ในกรณีที่ไม่มีการทำปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยานิวเคลียร์หรือมีผลของทฤษฎีสัมพัทธ์ มวลของสารก้อนหนึ่งย่อมคงที่” หรือกล่าวในทอมปริมาตรควบคุมของกลศาสตร์ของไหล กล่าวได้ว่า “อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในปริมาตรควบคุมย่อมเท่ากับอัตราสุทธิของมวลที่ไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุม” อัตราสุทธิของการไหลเข้าหมายถึง อัตราการไหลเข้า ลบด้วย อัตราการไหลออก หากอัตราสุทธิของการไหลเข้ามีค่าเป็นลบ หมายความว่า ของไหลมีการไหลออกมากกว่าการไหลเข้านั่นเอง

## 2) สมการควบคุมการอนุรักษ์มวล คือ

$$\frac{\partial M_{CV}}{\partial t} = [\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}] \quad (2.18)$$

เมื่อ  $M_{CV}$  คือ อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในปริมาตรควบคุม

$m$  คือ มวลที่ไหลเข้าออกปริมาตรควบคุม

$t$  คือ ณ ช่วงเวลานั้นๆ

3) กฎอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงเส้น (Conservation Of Momentum) “โมเมนตัมของมวลก้อนหนึ่งย่อมคงที่อยู่เช่นนั้น (โมเมนตัมของก้อนมวลคือมวลคูณด้วยความเร็ว;  $M\vec{V}$ ) จนกว่าจะมีแรงจากภายนอกมากระทำ ซึ่งในกรณีนี้อัตราการเปลี่ยนของโมเมนตัมเท่ากับแรงที่มากระทำนั้น” ซึ่งหมายถึงกฎข้อที่สองของนิวตันนั่นเอง ( $F = Ma$ ) หรือกล่าวในเทอมปริมาตรควบคุมของกลศาสตร์ของไหล กล่าวได้ว่า “อัตราการเปลี่ยนโมเมนตัมในปริมาตรควบคุม ย่อมเท่ากับแรงที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม บวกกับอัตราสุทธิของโมเมนตัมที่ไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุม ในครึ่งแรงของบัญญัตินี้ก็คือกฎข้อที่สองของนิวตันในระบบติดตามมวล เพราะ โมเมนตัมของมวลในปริมาตรควบคุมย่อมเปลี่ยนด้วยแรงที่มากระทำต่อปริมาตรควบคุมในขณะเวลานั้น แต่ในระบบอาจมีการไหลเข้าออกของโมเมนตัมผ่านพื้นที่ผิวด้วย เรียกว่าโมเมนตัมฟลักซ์ ซึ่งโมเมนตัมฟลักซ์นี้ไหลเข้าออกปริมาตรควบคุม พร้อมกับการไหลเข้าออกของมวลนั่นเอง ดังนั้น โมเมนตัมของมวลในปริมาตรควบคุม จึงอาจเปลี่ยนไปได้ เพราะปริมาณสุทธิของโมเมนตัมฟลักซ์ ที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุมอีกโสดหนึ่งด้วย

ความจริงกฎข้อนี้จะเป็นความจริงในกรณีของคุณสมบัติอื่นๆด้วยเสมอ กล่าวคือ สามารถกล่าวเป็นกลางๆ สำหรับปริมาณคุณสมบัติกฎอนุรักษ์มวลของสาร ได้ว่า อัตราการเปลี่ยนของกฎอนุรักษ์มวลของสารในปริมาตรควบคุม จะเกิดขึ้นเนื่องจากมีเหตุบางอย่างกระทำต่อปริมาตรควบคุม (ตามกฎทางฟิสิกส์ในระบบติดตาม) ผนวกกับอัตราไหลเข้าสุทธิของกฎอนุรักษ์มวลของสาร ซึ่งเกาะมากับมวลที่ไหลผ่านเข้าออกปริมาตรควบคุม

กฎนี้หรือกฎอื่นใดก็ตาม บัญญัติเฉพาะที่เวลาใดๆ เวลาหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นแรงก็คือแรงที่กระทำ ณ เวลานั้นๆ และอัตราการไหลเข้าออกก็คืออัตรา ณ เวลานั้น

หากเปรียบเทียบกับกฎอนุรักษ์มวล ได้หลีกเลี่ยงการใช้คำว่า “เพิ่มขึ้น” ในกรณีของโมเมนตัม เพราะโมเมนตัมเป็นสมบัติเชิงเวกเตอร์ ซึ่งบางครั้งการเพิ่มขึ้น มีความหมายกำกวม เนื่องจากเวกเตอร์มีทั้งขนาดและทิศทาง การเพิ่มขึ้นในทิศทางหนึ่งอาจเป็นการลดลงในอีกทิศทางหนึ่งก็เป็นได้

สมการควบคุมการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงเส้น

$$\frac{d(M\vec{V})_{CV}}{dt} = \vec{F}_{CV} + [\dot{m}_{in}\vec{V}_{in} - \dot{m}_{out}\vec{V}_{out}] \quad (2.19)$$

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

$\vec{V}$  คือ เวกเตอร์ความเร็ว

4) กฎอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม (Conservation Of Angular Momentum) “อัตราการเปลี่ยนของโมเมนตัมเชิงมุมของมวลก้อนหนึ่งย่อมเท่ากับแรงบิด (Torque) ที่มากระทำต่อก้อนมวลนั้น” หรือกล่าวในเทอมปริมาตรควบคุมของกลศาสตร์ของไหล กล่าวได้ว่า “อัตราการเปลี่ยนของโมเมนตัมเชิงมุมในปริมาตรควบคุม ย่อมเท่ากับแรงบิดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม บวกกับอัตราสุทธิของโมเมนตัมเชิงมุมที่ไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุม”

สมการควบคุมการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม

$$\frac{d(M\vec{h})_{CV}}{dt} = \vec{T} + [\dot{m}_{in}\vec{h}_{in} - \dot{m}_{out}\vec{h}_{out}] \quad (2.20)$$

เมื่อ  $\vec{T}$  คือ แรงบิด

$\vec{h}$  คือ โมเมนตัมเชิงมุมต่อหน่วยมวล ซึ่งมีนิยามคือ  $\vec{h} = \vec{r} \times \vec{V}$  โดยที่  $\vec{r}$  คือ เวกเตอร์พิกัด (Position Vector)

5) กฎอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy) “อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานของก้อนมวล ย่อมเท่ากับอัตราการถ่ายโอนความร้อนและกำลังงานจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ก้อนมวล” หรือกล่าวในเทอมปริมาตรควบคุมของกลศาสตร์ของไหล กล่าวได้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในปริมาตรควบคุม ย่อมเท่ากับอัตราการถ่ายโอนความร้อน และงานจากสิ่งแวดล้อมเข้าปริมาตรควบคุมของพลังงาน”



สมการควบคุมการอนุรักษ์พลังงาน

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

เมื่อ  $e$  คือ พลังงาน

$\dot{Q}_{CV}$  คือ ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ปริมาตรควบคุม

$\dot{W}_{CV}$  คือ งานจากสิ่งแวดล้อมที่ไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุม

สถิตยศาสตร์ของไหล (Fluid Static) กฎสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์กลศาสตร์เชิงสถิตยศาสตร์ ก็คือ กฎข้อที่หนึ่งของนิวตัน ที่บัญญัติโดยนัยว่า “วัตถุที่ปราศจากการกระทำของแรงลัพธ์สุทธิจากภายนอกย่อมคงสภาพนิ่งอยู่กับที่ดั้งเดิม หรือหากเดิมเคลื่อนที่อยู่ก็จะเคลื่อนที่ต่อไปด้วยความเร็วเดิมในทิศทางเดิม” [20]

1) 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 และแรงจะเกิดขึ้นลอยๆ ไม่ได้ แต่การเกิดแรงต้องขึ้นอยู่กับกฎข้อที่สองของนิวตัน ซึ่งตามกฎดังกล่าวแรงต้องเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมเท่านั้นดังสมการ 2.22

$$\vec{F} = \frac{d}{dt}(M\vec{V}) \quad (2.22)$$

หรือในทางกลับกัน โมเมนตัมเปลี่ยนแปลงได้เพราะมีแรงกระทำเท่านั้น

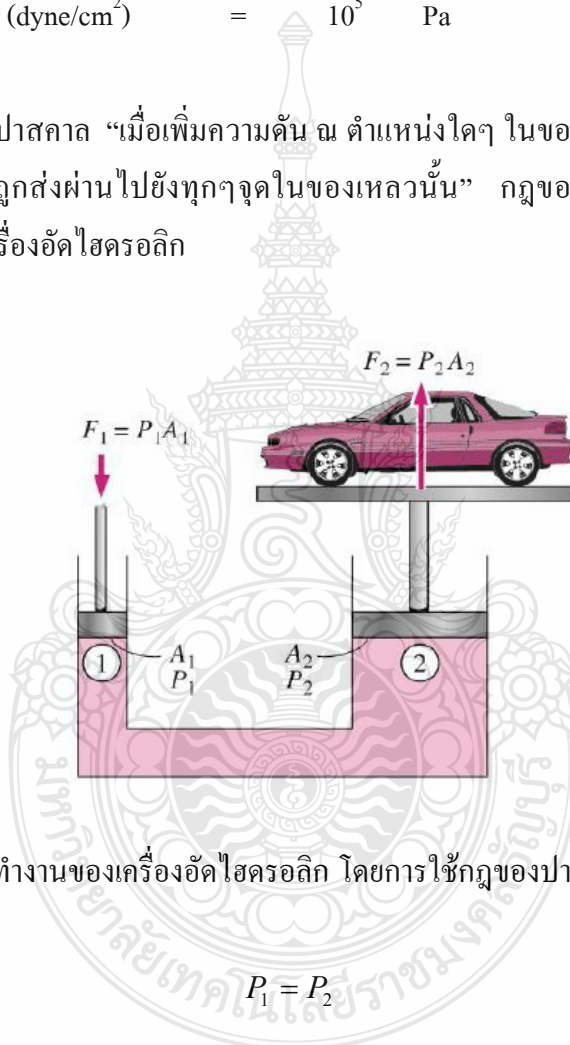
2) แรงดันในของไหล แรงดันของของเหลวที่กระทำ ณ ส่วนใดๆ จะมีค่าเท่ากันทุกจุด โดยที่ยังไม่คิดน้ำหนักของของไหล ในความเป็นจริงจะเห็นว่า ความดันอากาศที่ระดับน้ำทะเลจะมีค่ามากกว่าบนภูเขา และความดันของน้ำใต้ท้องทะเลลึกจะสูงกว่าที่ระดับน้ำทะเล ความดันของน้ำทะเลเพิ่มขึ้นตามความลึก ยิ่งลึกมากความดันก็จะยิ่งมาก เป็นเพราะว่าของไหลมีน้ำหนักนั่นเอง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

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.23)$$

หน่วยมาตรฐานของความดันคือ นิวตันต่อตารางเมตร ( $\text{N/m}^2$ ) เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ปาสคาล (Pa)

$$\begin{aligned} 1 \text{ Pa} &= 1 \text{ N/m}^2 \\ 1 \text{ bar (dyne/cm}^2) &= 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

3) กฎของปาสคาล “เมื่อเพิ่มความดัน ณ ตำแหน่งใดๆ ในของเหลวที่อยู่นิ่งในภาชนะปิด ความดันที่เพิ่มขึ้นจะถูกส่งผ่านไปยังทุกๆ จุดในของเหลวนั้น” กฎของปาสคาลใช้ในการอธิบายหลักการทำงานของเครื่องอัดไฮดรอลิก



ภาพที่ 2.12 หลักการทำงานของเครื่องอัดไฮดรอลิก โดยการใช้กฎของปาสคาล

$$P_1 = P_2 \quad (2.24)$$

หรือ

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad (2.25)$$

ดังนั้น

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1}{A_2} \quad (2.26)$$

พลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics) การศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการไหลของของไหล สามารถศึกษาการไหล โดยสมมุติฐานของไหลเป็นของไหลในอุดมคติ (Ideal Fluid) ของไหลในอุดมคติ หมายถึง ของไหลที่ถูกสันนิษฐานว่าเป็นของไหลที่ไม่มี ความหนืด ดังนั้นการไหลของของไหล แบบนี้ จึงไม่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานระหว่างชั้นของไหลหรือระหว่างของไหลกับผิวสัมผัส การไหลของของไหลในอุดมคติจะไม่มีเทอมของการไหลวน (Eddy Formation) หรือการสูญเสียพลังงานอันเกิดเนื่องจากแรงเสียดทาน สมมุติฐานนี้ สามารถทำให้พิจารณาการเคลื่อนตัวของของไหลเหมือนกับการเคลื่อนตัวของของแข็งบนแผ่นที่ไม่มีแรงต้านทาน ดังนั้นอาจจะพิจารณาแรงต่างๆที่ทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่โดยความเร่งเป็นไปตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน[22]

### 2.2.6 การควบคุมระบบไฮดรอลิก (Hydraulic System Control)

ระบบไฮดรอลิก หมายถึง การไหลของของเหลวทุกชนิดที่ใช้ในระบบเพื่อเป็นตัวกลางการถ่ายเทกำลังงานของไหลให้เป็นการถ่ายเทกำลังงานกล ในระบบไฮดรอลิกทั่วไปจะต้องมีอุปกรณ์พื้นฐานในการทำงานดังต่อไปนี้ [23]

- 1) อุปกรณ์ต้นกำลังไฮดรอลิก ทำหน้าที่เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนปั้มน้ำมันไฮดรอลิก เพื่อส่งจ่ายให้แก่ระบบไฮดรอลิก ประกอบไปด้วยเครื่องยนต์หรือมอเตอร์ไฟฟ้า
- 2) อุปกรณ์เก็บและปรับปรุงคุณภาพน้ำมันไฮดรอลิก ทำหน้าที่เป็นที่พักของน้ำมัน ขจัดสิ่งสกปรก ขจัดฟองอากาศ และระบายความร้อนของน้ำมันไฮดรอลิก ประกอบไปด้วยถังพักน้ำมันไฮดรอลิก ไล์กรองน้ำมันไฮดรอลิก และอุปกรณ์ประกอบอื่นๆที่ใช้กับถังพักน้ำมัน
- 3) อุปกรณ์สร้างการไหล ทำหน้าที่สร้างอัตราการไหล ประกอบด้วยปั้มไฮดรอลิกชนิดต่างๆ
- 4) อุปกรณ์ควบคุมการทำงาน หมายถึงวาล์วควบคุมชนิดต่างๆ ในระบบไฮดรอลิก เช่น วาล์วควบคุมทิศทางไหลใช้ควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ขงก้านสูบ วาล์วควบคุมอัตราการไหลใช้จำกัดปริมาณน้ำมันที่ไหลเข้าลูกสูบเพื่อควบคุมความเร็วของก้านสูบ วาล์วควบคุมความดันใช้ควบคุมความดันในระบบ
- 5) อุปกรณ์การทำงาน ทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังงานของไหลให้เป็นการถ่ายเทกำลังงานกล เช่น กระบอกลูกสูบไฮดรอลิกหรือมอเตอร์ไฮดรอลิก
- 6) อุปกรณ์ในระบบท่อทาง ทำหน้าที่เป็นท่อทางการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกในระบบ ประกอบไปด้วยแป๊ป (Pipe) ท่อ (Tube) สายน้ำมันไฮดรอลิก (Hoses) ข้องอ (Bending) และข้อต่อชนิดต่างๆ (Fittings)

### 2.2.7 น้ำมันแร่หรือน้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic Oil)

น้ำมันไฮดรอลิก ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายทอดแรงอัดไปยังส่วนต่างๆ ของระบบหล่อลื่นปั๊มและแบริ่งตลอดจนทำหน้าที่เป็นซีล และช่วยระบายความร้อน น้ำมันไฮดรอลิกที่ดีจะต้องมีสารป้องกันการเกิดฟอง ป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชัน ป้องกันสนิมและการกัดกร่อน นอกจากนี้ยังต้องสามารถแยกตัวจากน้ำได้ดี ในระบบไฮดรอลิกขนาดใหญ่แบบเก่าอาจใช้น้ำเป็นตัวกลางในการทอดกำลัง แต่น้ำไม่สามารถทำหน้าที่หล่อลื่นได้ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดสนิม น้ำมันไฮดรอลิกในปัจจุบันประกอบด้วย น้ำมันแร่พวกที่มีค่าดัชนีความหนืดสูง (HVI) ผสมด้วยสารเพิ่มคุณภาพเพื่อป้องกันการสึกหรอ ป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชัน ป้องกันสนิม และการกัดกร่อน ป้องกันการเกิดฟองและไม่รวมตัวกับน้ำถ้าหากอุปกรณ์ไฮดรอลิก ติดตั้งในบริเวณใกล้กับเปลวไฟ หรือหากเกิดไฟไหม้แล้วจะทำให้เกิดความเสียหายมาก เช่น ในเครื่องบิน หรือในอุตสาหกรรมบางประเภท น้ำมันไฮดรอลิกที่ใช้มักเป็นของเหลวชนิดไม่ติดไฟ ซึ่งอาจเป็นสารละลายน้ำพวกไกลคอล (Glycol) หรือเป็นพวกสารสังเคราะห์ เช่น คลอรีเนเต็ดฟลูโอไฮโดรคาร์บอน หรือพวกฟอสเฟตเอสเทอร์ เป็นต้น [23]

#### 1) หน้าที่หลักของน้ำมันไฮดรอลิกมี 4 ประการ คือ [23]

1. การส่งผ่านกำลัง (Power Transmission) น้ำมันไฮดรอลิกมีหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายทอดกำลังงานจากจุดหนึ่งไปสู่อีกจุดหนึ่งในระบบ เพื่อเปลี่ยนแปลงกำลังงานของไหลให้เป็นการส่งผ่านกล ซึ่งถ้าจะให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพแล้ว น้ำมันไฮดรอลิกที่ไหลในท่อทางหรือไหลผ่านวาล์วควบคุมต่างๆ จะต้องไหลไปได้อย่างราบรื่น แต่ถ้าเกิดความต้านทานการไหลมากๆ ก็จะทำให้กำลังงานสูญเสียไป และน้ำมันไฮดรอลิกจะต้องไม่ยุบตัวตามความดันในขณะทำงาน เช่น เมื่อปั๊มทำงานดูดอัดเพื่อส่งน้ำมันไปยังท่อทาง วาล์วเลื่อนทำงาน และในขณะที่กระบอกสูบหรือมอเตอร์ไฮดรอลิกกำลังทำงานขับโหลด

2. การหล่อลื่น (Lubrication) น้ำมันไฮดรอลิกจะทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นและลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ เช่น ชิ้นส่วนของปั๊ม มอเตอร์ไฮดรอลิก ลูกสูบ กระบอกสูบ แกนวาล์ว และส่วนประกอบต่างๆ ที่มีการเคลื่อนที่ โดยที่น้ำมันไฮดรอลิกจะมีสภาพเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ กั้นระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่เสียดสีกันทั้งในขณะที่ระบบทำงาน และหยุดนิ่ง ฟิล์มน้ำมันไฮดรอลิกจะช่วยในการหล่อลื่นเพื่อลดการเสียดสีของผิวสัมผัส แผ่นฟิล์มของน้ำมันไฮดรอลิกจะต้องมีความหนืดพอเหมาะที่จะแทรกซึมเข้าไปในรูเล็กๆ และรอยต่อของชิ้นส่วนภายในอุปกรณ์ และสามารถรับน้ำหนักของวัตถุที่กดทับหรือรับแรงกดอยู่ได้ ซึ่งสมบัติดังกล่าวเรียกว่า ความแข็งแรงของฟิล์ม (Film Strength) นอกจากนี้ น้ำมันไฮดรอลิกยังควรมีสมบัติในการสิ้น

ไหลได้ดีด้วย กล่าวคือ ในขณะที่น้ำมันไฮดรอลิกเป็นฟิล์มยึดติดกับชิ้นส่วนใดก็สามารถจะลื่นไหลไปกับชิ้นส่วนนั้นๆ และช่วยให้เคลื่อนไปได้อย่างคล่องตัวด้วย สมบัติข้อนี้เรียกว่า ความลื่น (Lubricity)

3. การซีล (Sealing) น้ำมันไฮดรอลิกจะทำหน้าที่เป็นซีลด้วยเพื่อป้องกันการรั่วซึมเกิดขึ้นน้อยที่สุด ภายในชิ้นส่วนของอุปกรณ์ในระบบไฮดรอลิกเมื่อมีความดันเกิดขึ้น การซีลนี้จะขึ้นอยู่กับความหนืดของน้ำมันไฮดรอลิกแต่ละชนิด

4. การระบายความร้อน (Cooling) การไหลเวียนของน้ำมันไฮดรอลิกในระบบขณะการทำงานจะช่วยถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ต่างๆ อันเนื่องมาจากการสูญเสียกำลังงานในระบบ ความร้อนนี้ก็จะถูกพาไปโดยน้ำมันและไหลลงสู่ถังพัก แล้วแผ่กระจายความร้อนผ่านผนังของถังพักได้

## 2) สมบัติความหนืด (Viscosity) ของน้ำมันไฮดรอลิกและของเหลว [24]

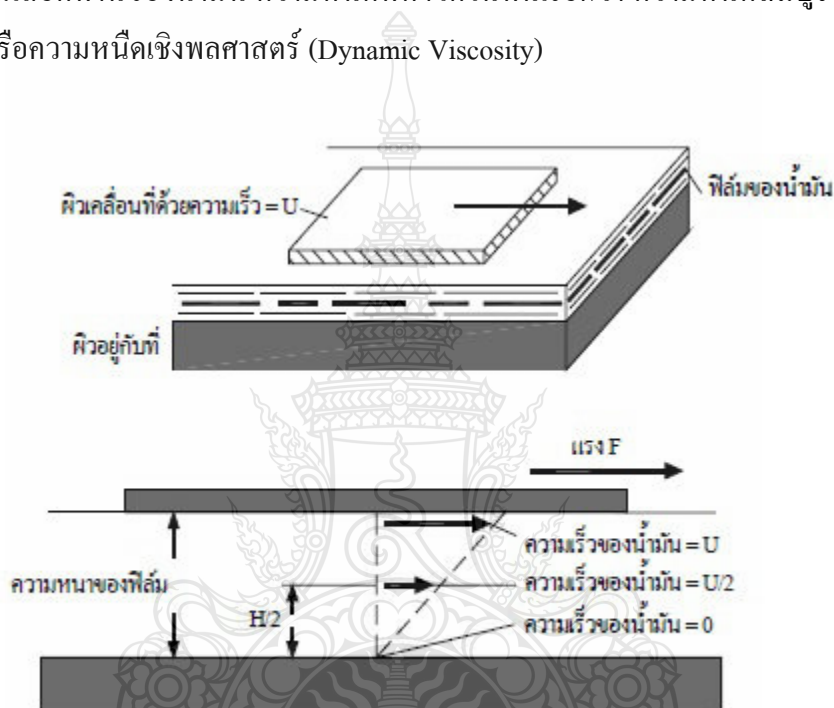
ความหนืดเป็นสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัส ความหนืดคือความข้นของน้ำมัน โดยวัดที่อุณหภูมิใด อุณหภูมิหนึ่ง น้ำมันที่มีความหนืดต่ำจะไหลง่าย แต่ฟิล์มหล่อลื่นก็บางมากด้วย สำหรับน้ำมันที่มีความข้นสูงยอมไหลยาก แต่จะมีฟิล์มหล่อลื่นหนากว่าหรือแข็งกว่าน้ำมันที่มีความข้นต่ำ หน่วยวัดความหนืดมีหลายระบบและอุณหภูมิที่วัดก็ต่างๆ กัน ซึ่งอาจสรุปได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ระบบ หน่วย และอุณหภูมิที่วัดความหนืดของน้ำมัน [24]

ประเภทหรือระบบ	หน่วยความหนืด	อุณหภูมิที่วัด
1. ระบบสากล (เมตริก)	เซนติสโตก (Centistoke; cSt)	40 และ 100 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

หลักการวัดค่าของความหนืดตามที่แสดงในภาพที่ 2.14 ประกอบด้วยแผ่นวัตถุถูกดึงไปบนฟิล์มของน้ำมันด้วยความเร็วสม่ำเสมอ ฟิล์มของน้ำมันติดอยู่ที่ผิววัตถุที่เคลื่อนที่และที่อยู่กับที่ ซึ่งเมื่อพิจารณาให้น้ำมันประกอบขึ้นด้วยชั้นหลายๆ ชั้น ชั้นน้ำมันที่ติดอยู่กับผิวที่เคลื่อนที่ก็เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วเดียวกับผิวที่เคลื่อนที่ (U) ส่วนชั้นน้ำมันที่ติดอยู่กับผิวที่อยู่กับที่ก็จะมีความเร็วเป็นศูนย์

ชั้นน้ำมันที่อยู่ระหว่างชั้นบนสุด และล่างสุดก็จะถูกดึงไปด้วยน้ำมันที่อยู่ด้านบนถัดไปให้มีความเร็ว ส่วนหนึ่งของความเร็ว  $U$  ซึ่งความเร็วของแต่ละชั้นของน้ำมันดังกล่าวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะ จากผิววัตถุที่อยู่กับที่ แรงที่ต้องใช้ในการดึงให้ผิววัตถุอันบนเคลื่อนที่ไปนี้คือ แรงที่ต้องเอาชนะความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นน้ำมันนั่นเอง และเนื่องจากแรงนี้เป็นผลมาจากความหนืด โดยแรงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนืด ดังนั้นความหนืดก็สามารถหาได้จากการวัดแรงที่ต้องใช้เพื่อเอาชนะความเสียดทานของน้ำมัน ความหนืดที่หาได้ในที่นี้เรียกว่า ความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute Viscosity) หรือความหนืดเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Viscosity)



ภาพที่ 2.13 หลักการของความหนืด [24]

หน่วยความหนืดเชิงพลศาสตร์ที่นิยมใช้กันคือ หน่วยเป็นพอยส์ (Poise; P) ซึ่งเป็นหน่วยในระบบ CGS (Centimetre Gram Second)

$$1 \text{ Poise} = 1 \text{ Dyne s} / \text{cm}^2 = 1 \text{ g} / \text{cm.s}$$

$$1 \text{ Centipoise (cP)} = 1 \times 10^{-2} \text{ Poise (P)}$$

โดยทั่วไปเครื่องมือที่ใช้วัดค่าความหนืด จะไม่สามารถวัดค่าความหนืดเชิงพลศาสตร์ได้โดยตรงดังนั้น จึงได้กำหนดค่าความหนืดที่เรียกว่า ความหนืดเชิงจลศาสตร์ (Kinematic Viscosity)

โดยให้ความหนืดเชิงจลศาสตร์ เท่ากับความหนืดเชิงพลศาสตร์หารด้วยความหนาแน่นของน้ำมัน หรือของไหลนั้นๆ ดังสมการ

$$\nu = \eta / \rho \quad (2.27)$$

เมื่อ  $\nu$  = ความหนืดเชิงจลศาสตร์ (สโตก)

$\eta$  = ความหนืดเชิงพลศาสตร์ (พอยส์)

$\rho$  = ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

หน่วยความหนืดเชิงจลศาสตร์ที่นิยมใช้กันก็คือหน่วย Stoke (St) ซึ่งเป็นหนึ่งในระบบ CGS เช่นเดียวกัน โดย

$$1 \text{ Stoke (St)} = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$$

$$1 \text{ Centistoke (cSt)} = 1 \times 10^{-2} \text{ Stoke (St)}$$

ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะไม่คงที่ แต่จะแปรผันตามสภาวะการใช้งานโดยเฉพาะอย่างยิ่งจะแปรผันกับอุณหภูมิและความดันในการใช้งาน ในด้านของอุณหภูมิความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำมัน ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นของเหลวจะขยายตัว โมเลกุลของน้ำมันจะเคลื่อนออกห่างกัน ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลลดลง และเป็นผลให้ความหนืดลดลงด้วย

### 3) สมบัติทางเคมีของน้ำมันไฮดรอลิก (Chemical Properties) [23]

สมบัติทางเคมีของน้ำมันไฮดรอลิก เป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยในการตัดสินใจคุณภาพและอายุการใช้งาน และสมบัติที่สำคัญที่สุดคือ ความต้านทานการเกิดสนิม (Oxidation Resistance) เพราะของเหลวทั่วไปมักจะเกิดสนิมง่ายทำให้อายุการใช้งานสั้นลง

การเกิดสนิมของน้ำมันไฮดรอลิกเป็นปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างน้ำมันกับอากาศ ซึ่งก่อให้เกิดสารใหม่ นอกเหนือไปจากส่วนประกอบอื่นๆ ปะปนอยู่ในน้ำมัน ทำให้น้ำมันมีสีเข้มขึ้นและเหนียวขึ้น นอกจากนี้สารประกอบบางอย่างที่ละลายออกมาจะมีสมบัติเป็นกรด ซึ่งจะกัดกร่อนชิ้นส่วนที่เป็นโลหะภายในระบบ

สำหรับสารประกอบประเภทยางที่ปะปนอยู่ในน้ำมันนั้น เมื่อได้รับความร้อนก็จับตัวกันเป็นก้อนยางเหนียว ซึ่งอนุภาคของสารนี้จะลอยปะปนหมุนเวียนอยู่ในระบบด้วย นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นๆ ที่เกิดจากสนิมจับตัวกลายเป็นสภาพน้ำมันขี้โล้ เมื่อปะปนกับผงโลหะก็จะทำให้

เกิดปัญหาในระบบเช่น ทำให้อุปกรณ์ต่างๆ ติดขัดจากการอุดตัน การที่น้ำมันในระบบเกิดสนิมมากขึ้น เนื่องมาจากสาเหตุหลายประการคือ

1. อุณหภูมิ (Temperature) อุณหภูมิที่สูงเกินอัตราที่กำหนดเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ปริมาณของสนิมเพิ่มมากขึ้น โดยปกติอุณหภูมิน้ำมันไฮดรอลิกในระบบทำงานอยู่ประมาณ 135 องศาฟาเรนไฮต์ แต่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอีก 18-20 องศา จะทำให้เกิดสนิมมากขึ้น แล้วอายุการใช้งานของน้ำมันไฮดรอลิกก็จะลดลงครึ่งหนึ่ง และถ้าระบบทำงานที่อุณหภูมิ 200 องศาฟาเรนไฮต์ อายุการใช้งานจะลดลงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 135 องศาฟาเรนไฮต์ ก็จะเกิดสนิมในน้ำมันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

2. ปริมาณอากาศ ในขณะที่ระบบไฮดรอลิกทำงานจะมีอากาศปะปนอยู่ทั่วไป ซึ่งจะทำให้เกิดสนิมเพราะเมื่อเครื่องจักรหยุดการทำงาน อากาศที่ละลายอยู่ในน้ำมันก็จะแยกตัวออกไปและทำปฏิกิริยากับผิวโลหะ ที่เป็นเช่นนี้เพราะในสภาพความดันบรรยากาศปกติ น้ำมันไฮดรอลิกจะดูดซึมอากาศได้ถึง 140 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรของอากาศทั้งหมด

3. ปริมาณสิ่งสกปรกและฝุ่นผงที่ปะปนอยู่ในระบบ สิ่งสกปรกต่างๆ เช่น ฝุ่นละออง จารบี น้ำ และพวกเศษโลหะที่เกิดจากการสึกหรอ เนื่องจากการทำงาน โดยเฉพาะพวกเศษทองแดง และทองเหลือง สิ่งต่างๆ เหล่านี้เป็นเสมือนตัวเร่งที่ทำให้เกิดสนิมและความสกปรกอย่างมาก

#### 2.2.8 สมบัติเชิงกลของโลหะ [25]

##### 1) ความเค้น (Stress)

ความเค้นหมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดหาค่านี้ เราจึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่า แรงกระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน การหาค่าความเค้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

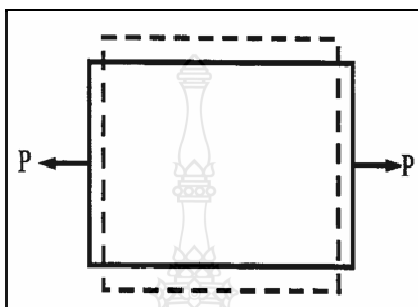
$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.28)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็นปาสกาล (Pa, 1 Pa = 1N/m<sup>2</sup>) หรือ kgf/mm<sup>2</sup>  
 P คือ แรงภายนอกที่มากระทำ มีหน่วยเป็น N หรือ kgf หรือ  
 A คือ พื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำ : m<sup>2</sup> หรือ mm<sup>2</sup> หรือ



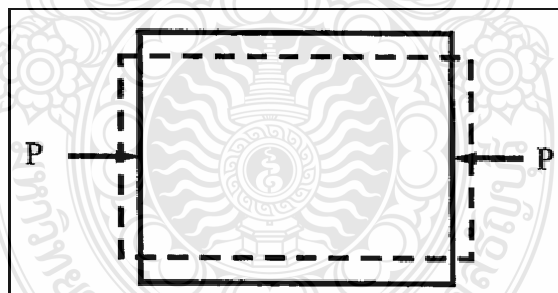
โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำโดยในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดจะมีทั้ง 3 แบบนี้พร้อมๆ กัน

1. ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน ดังภาพที่ 2.14



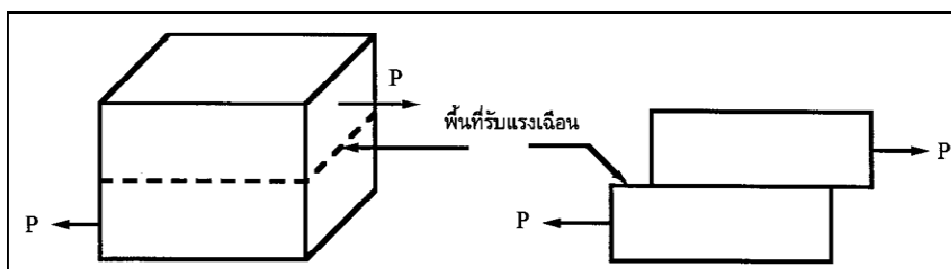
ภาพที่ 2.14 แรงดึง (Tensile) [26]

2. ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 แรงกด (Compression) [26]

3. ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันดังรูป มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หาดด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง A ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน ดังภาพที่ 2.16



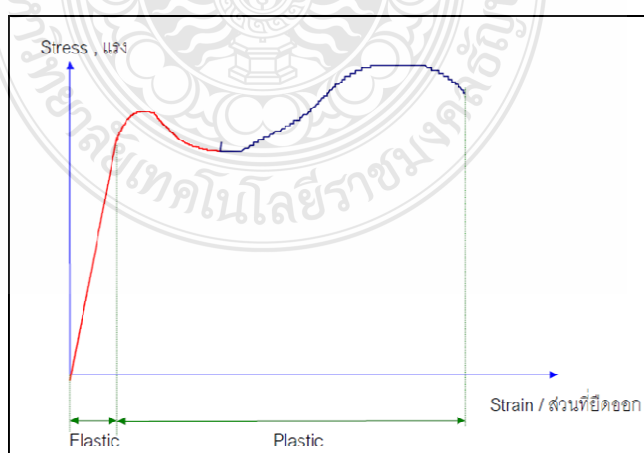
ภาพที่ 2.16 แรงเฉือน (Shear) [26]

## 2) ความเครียด (Strain)

ความเครียด คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งลักษณะของมันสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ

1. การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ พวงยางยืด สปริง ถ้าเราดึงมันแล้วปล่อยมันจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

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



ภาพที่ 2.17 ความเค้นความเครียดของการดึงวัสดุ [26]

วัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมเปลี่ยนรูปร่างทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากระทำ หรือความเค้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินพิกัดการคืนรูป (Elastic Limit) แล้ว วัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behavior) แต่ถ้าความเค้นเกินกว่าพิกัดการคืนรูปแล้ว วัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation) นอกจากความเค้นทั้ง 2 ชนิดนี้แล้ว ยังมีความเค้นอีกประเภทหนึ่งซึ่งพบในวัสดุประเภทโพลีเมอร์ เช่น พลาสติก เรียกว่า ความเค้นกึ่งอิลาสติกจะมีลักษณะที่เมื่อปราศจากแรงกระทำวัสดุจะมีการคืนรูป แต่จะไม่กลับไปจนมีลักษณะเหมือนเดิม การคำนวณหาความเค้นมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ

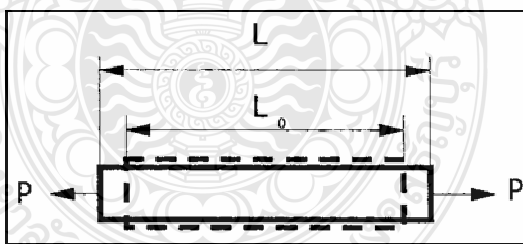
ก. แบบเส้นตรง ความเค้นที่วัดได้จะเรียกว่า ความเค้นเชิงเส้น (Linear Strain) จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกด ดังภาพที่ 2.18 ค่าของความเค้นจะเท่ากับ ความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม ดังสมการ

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.29)$$

เมื่อ  $e$  คือ ความเค้นเชิงเส้น

$\Delta L$  คือ ความยาวที่เปลี่ยนไป ( $L - L_0$ )

$L_0$  คือ ความยาวเดิมของวัสดุที่สนใจ หรือ Gage Length

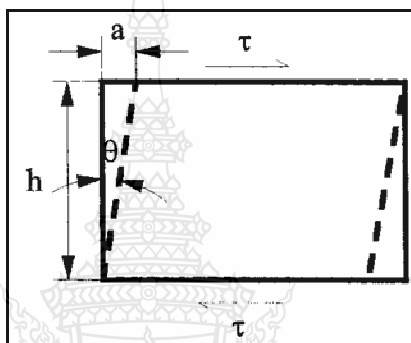


ภาพที่ 2.18 ความเค้นเชิงเส้น (Linear Strain) [26]

ข. แบบเฉือน เรียกว่า ความเค้นเฉือน (Shear Strain) ใช้กับกรณีที่แรงที่กระทำมีลักษณะเป็นแรงเฉือน ( $\tau$ ) ดังภาพที่ 2.19 ค่าของความเค้นจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่างระนาบ ดังสมการที่ 2.30

$$\gamma = \frac{a}{h} \quad (2.30)$$

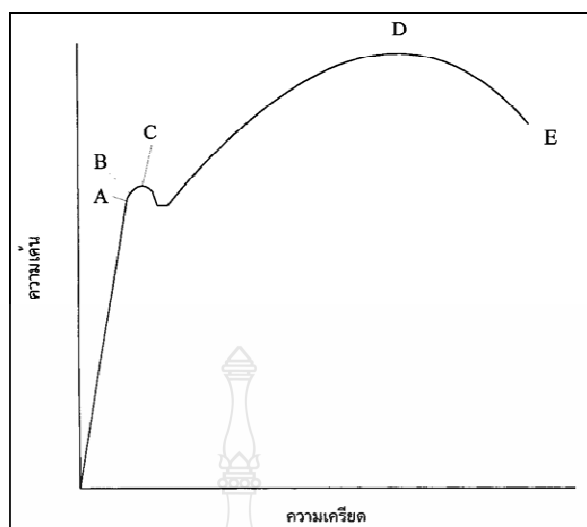
- เมื่อ  $\gamma$  คือ  $\tan \theta \approx \theta$  (Radian ในกรณีที่มุมเล็ก)  
 $a$  คือ ระยะที่เคลื่อนที่ไป (Displacement)  
 $h$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ  
 $\theta$  คือ มุมที่เปลี่ยนไป



ภาพที่ 2.19 ความเครียดเฉือน (Shear Strain) [26]

### 3) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship)

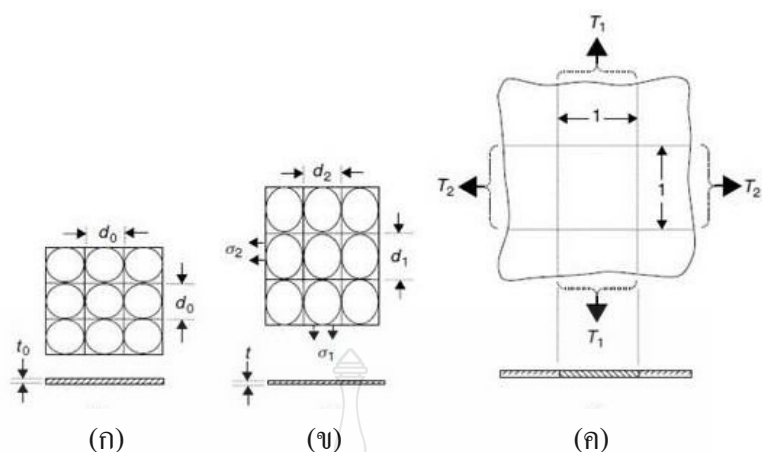
ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพล็อตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ดังภาพที่ 2.20 การทดสอบแรงดึง นอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ เหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย



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

### 2.2.9 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโลหะแผ่น

การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น (Deformation of Sheet in Plane Stress) ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูบบนระนาบความเค้น (Plane Stress) พิจารณา (Work Hardening) ของวัสดุ ซึ่งเข้ากำลังประยุกต์ใช้ทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูปใน ภาพที่ 2.21 ลักษณะที่ยังไม่มีการเปลี่ยนรูปที่ความหนา  $t_0$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d_0$  หรือตารางขนาด  $d_0$  แสดงในภาพที่ 2.21 (ก) ดังนั้นในระหว่างการเปลี่ยนรูปวงกลมจะเปลี่ยนไปเป็นวงรี แกนของ Major คือ  $d_1$  แกนของ Minor คือ  $d_2$  ถ้าปรับตารางสี่เหลี่ยมให้เข้ากับทิศทางหลักของกริดวงกลม จะกลายเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังภาพที่ 2.21 (ข) ส่วนความหนา คือ  $t$  ตามที่กรณีแสดงดังภาพที่ 2.21 (ค) ความเค้นที่ทำให้เปลี่ยนรูปคือ  $\sigma_1$  และ  $\sigma_2$  [13, 25]



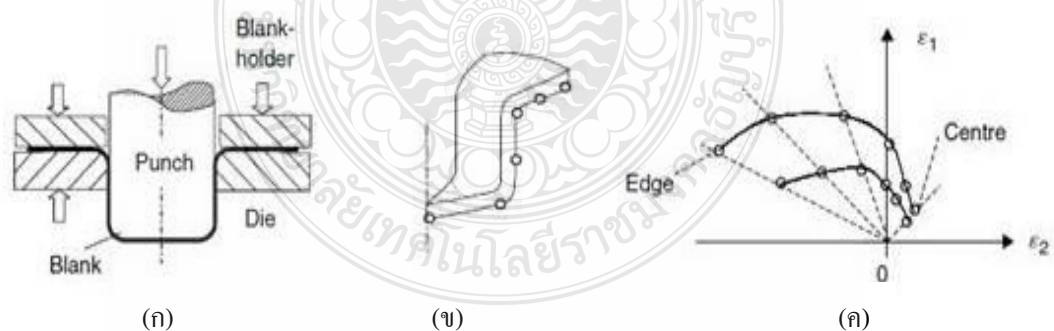
- (ก) ขณะที่ยังไม่เปลี่ยนรูปกริดวงกลมที่อยู่ตารางคงสภาพเดิม  
 (ข) เมื่อมีการเปลี่ยนรูปกริดวงกลมจะเปลี่ยนเป็นรูปวงรี ขนาดของแกนหลักคือ  $d_1$  และขนาดแกนรอง คือ  $d_2$   
 (ค) การดึง T, หรือแรงส่งผ่านต่อหน่วยความกว้าง (ก)

ภาพที่ 2.21 ตารางวงกลมบนโลหะแผ่น [13]

### 2.2.10 แผนภาพความเครียด (Strain Diagram)

ความเครียดเฉพาะจุดที่เกิดขึ้นในภาพที่ 2.23 สามารถวัดได้จากกริดวงกลมแบบภาพที่

2.22



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

ภาพที่ 2.22 ความเครียดตำแหน่งต่างๆ ของถ้วยทรงกระบอก [13]

## 1) ค่าความเครียดหลัก (Principal Strains)

ความเครียดหลักที่เกิดขึ้นจุดสุดท้ายของกระบวนการ

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0}; \quad \varepsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_0}; \quad \varepsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0}; \quad (2.31)$$

## 2) อัตราส่วนของความเครียด (Strain Ratio)

โดยปกติเส้นแนวความเครียด (Strain Path) ยังคงเป็นสัดส่วนเส้นตรง

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

## 3) ความเครียดหนาและความหนา (Thickness strain and Thickness)

จากสมการที่ 2.24 ความเครียดหาได้โดยการวัดความหนาหรือหาได้จากความเครียดหลัก (Major Strain) ความเครียดรอง (Minor Strain) โดยให้พิจารณาว่าการเปลี่ยนรูปที่ปริมาตรคงที่

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

จากสมการที่ 2.26 ความหนาโดยทั่วไปคือ

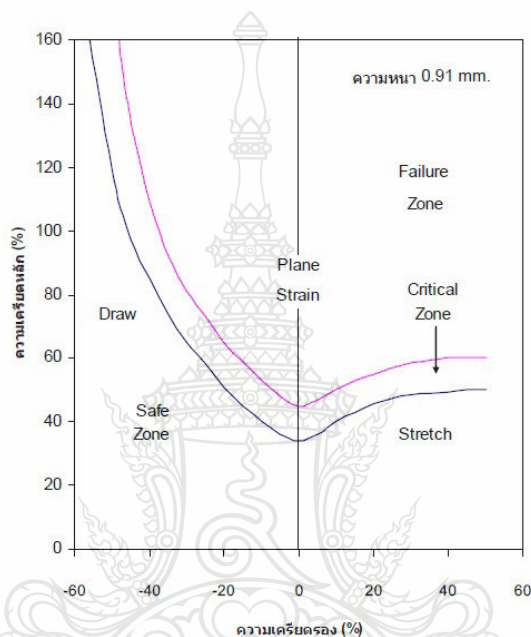
$$t = t_0 \exp(\varepsilon_3) = t_0 \exp[-(1 + \beta)\varepsilon_1] \quad (2.34)$$

หรืออีกแนวทางหนึ่งที่ปริมาตร  $td_1d_2 = t_0d_0^2$  ที่ปริมาตรคงที่

$$t = t_0 \frac{d_0^2}{d_1d_2} \quad (2.35)$$

### 2.2.11 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของโลหะแผ่น

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



ภาพที่ 2.23 ขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ความหนา 0.91 mm [25]

สำหรับเครียดในตำแหน่งของการคอดขยาย (Diffuse Necking) สามารถคำนวณได้จากสมการของ Hosford, William F.

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

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



### 2.2.12 เหล็กกล้าไร้สนิม [27]

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) เป็นอัลลอยของเหล็ก (Iron-Base Alloys) ที่มีคุณสมบัติต้านทานต่อการกัดกร่อนได้สูงกว่าเหล็กทั่วไป จึงทำให้ไม่เป็นสนิม สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากมายในชีวิตประจำวัน เช่น อุปกรณ์ทำครัว อุปกรณ์ทางการแพทย์ และเครื่องเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ

เหล็กกล้าไร้สนิมทำมาจากเหล็ก (Fe) ซึ่งมีส่วนประกอบของธาตุอื่นๆ ในปริมาณเล็กน้อย ได้แก่ คาร์บอน (C) แมงกานีส (Mn) ฟอสฟอรัส (P) และกำมะถัน (S) เนื่องจากเหล็กสามารถถูกกัดกร่อนและเป็นสนิมได้ง่าย จึงนำเหล็กมาผ่านกระบวนการเติมโลหะบางชนิด เช่น โครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ni) หรือวานาเดียม (V) ลงไป ทำให้คุณสมบัติของเหล็กดีขึ้น และไม่เป็นสนิมง่าย โลหะที่มักเติมลงไปมีปริมาณมากเพื่อทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมสามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดีคือ โครเมียม โดยเติมลงไปมีปริมาณร้อยละ 10 ถึง 30 เมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ โครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิมจะเกิดเป็นแผ่นฟิล์มที่บางมากในรูปของโครมิกออกไซด์ ( $Cr_2O_3$ ) ซึ่งเราไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ถ้าแผ่นฟิล์มนี้ถูกขูดขีดหรือทำลาย ก็จะเกิดชั้นบางๆ ของโครมิกออกไซด์ขึ้นมาใหม่อย่างรวดเร็ว ชั้นบางๆ ของฟิล์มนี้จะกั้นไม่ให้น้ำหรืออากาศ ซึมผ่านเข้าไปในเนื้อเหล็ก ซึ่งช่วยในการป้องกันเหล็กจากการเกิดสนิมได้

#### 1) โครงผลึกของเหล็กกล้าไร้สนิม

การที่เหล็กกล้าไร้สนิมมีคุณสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านแรงดึง ความแรงคราก การยืด ความแข็งและความเหนียวที่แตกต่างกันเนื่องจากมีลักษณะของโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน ส่วนสำคัญที่ทำให้มีลักษณะโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันคือ ลักษณะของแลตทิซเฟสทรานซิชัน (Phase Transition) และองค์ประกอบทางเคมีในขบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม จะต้องควบคุมการเติมธาตุต่างๆ และการให้ความร้อน (Heat Treatment) เป็นอย่างดี เพื่อควบคุมให้เหล็กกล้าไร้สนิมที่ผลิตออกมามีโครงสร้างผลึกและเฟสทรานซิชันตามที่ต้องการ เหล็กและอัลลอยของเหล็กมีแลตทิซหลายรูปแบบที่รู้จักกันทั่วไปเป็นแบบ บอดี-เซ็นเตอร์-คิวบิก (Body-Center Cubic) เรียกย่อว่า บีซีซี (bcc) และเฟส-เซ็นเตอร์-คิวบิก (Face-Center-Cubic) เรียกย่อว่า เอฟซีซี (fcc) สำหรับเหล็กที่บริสุทธิ์ แลตทิซแบบ เอฟซีซีจะอยู่ที่อุณหภูมิ 910-1400 องศาเซลเซียส ส่วนแลตทิซแบบ บีซีซี จะอยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 910 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิสูงกว่า 1400 องศาเซลเซียส จนถึงจุดหลอมเหลวที่ 1539 องศาเซลเซียส โลหะที่สำคัญที่ใช้ในการควบคุมให้ได้เฟสทรานซิชัน (Phase Transition) ตามต้องการ คือ โครเมียม และนิกเกิล โดยที่โครเมียมเป็นธาตุที่ทำให้ได้โครงสร้างผลึกแบบเฟอร์ไรต์ และนิกเกิลเป็นธาตุที่ทำให้ได้โครงสร้างผลึกแบบออสติไนต์ [26]

## 2) สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้จะมีปริมาณโครเมียมผสมอยู่ประมาณ 16-25 % โดยน้ำหนัก และมีปริมาณนิกเกิลผสมอยู่ประมาณ 8-20% โดยน้ำหนัก มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Face-Centered Cubic (fcc) ซึ่งเรียกว่าออสเทนไนท์ และจะคงลักษณะโครงสร้างนี้ไว้ในทุกอุณหภูมิ เหล็กกล้าไร้สนิม กลุ่มนี้จะเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถเหนียวนำไปเป็นแม่เหล็กได้ และไม่สามารถทำให้แข็งได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อนเช่นเดียวกับกลุ่มเฟอร์ริติก ตามมาตรฐานของ America Iron and Steel Institute (AISI) ได้กำหนดไว้อยู่ในตระกูล 200 และตระกูล 300 เป็นกลุ่มที่มีความยืดหยุ่นและความเหนียวดีมาก มีความสามารถในการขึ้นรูปได้ดี นอกจากนั้นยังสามารถทำให้แข็งได้ด้วยวิธี Cold Work การที่โครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ จะสามารถคงลักษณะเป็นออสเทนไนท์ได้ตลอดทุกอุณหภูมิ จึงจำเป็นที่ต้องมีธาตุผสมที่สามารถทำให้โครงสร้างออสเทนไนท์เสถียรในเหล็กกล้าไร้สนิมด้วย เช่น นิกเกิล ซึ่งเป็นธาตุหลัก นอกจากนั้นแล้วยังมีคาร์บอนและไนโตรเจนอีกด้วย เนื่องจากเป็นธาตุที่สามารถละลายอยู่ในโครงสร้าง fcc ได้ตามธรรมชาติเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกสามารถแบ่งย่อยได้อีก 2 กลุ่มย่อย ตามลักษณะการผสมระหว่างโครเมียมกับธาตุอื่น คือกลุ่มโลหะผสมโครเมียม-นิกเกิล (Chromium-Nickel Alloys) ได้แก่ เกรด AISI 304 และ AISI 316 และกลุ่มโลหะผสมโครเมียม-แมงกานีส-ไนโตรเจน (Chromium-Manganese-Nitrogen Alloys) ได้แก่ เกรด AISI 201 และ AISI 241 โดยที่กลุ่มหลังนี้จะมีปริมาณนิกเกิลน้อยและจะใช้ปริมาณไนโตรเจนที่สูงเป็นตัวรักษาโครงสร้างเพิ่มความสามารถในการละลายในออสเทนไนท์ และป้องกันไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ และการเพิ่มปริมาณไนโตรเจนยังส่งผลให้เพิ่มความแข็งแรงแก่เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ด้วย ธาตุผสมต่าง ๆ ที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมจะส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น เช่นการผสมโมลิบดีนัมลงในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316 และ AISI 317 เพื่อช่วยต้านทานต่อการเกิดการกัดกร่อนในสภาพที่มีคลอไรด์ หรือในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มที่มีโครเมียมสูง เช่น AISI 309 และ AISI 310 จะใช้ในลักษณะงานในสภาพที่มีการ oxidation และการใช้งานที่ระดับอุณหภูมิสูง ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนิกเกิลสูง เช่น กลุ่ม AISI 20Cb-3 มักจะใช้ในลักษณะงานที่เป็นกรดรุนแรงหรืองานที่ต้องการป้องกันมิให้เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion) เมื่อใช้งานในระดับอุณหภูมิสูง จะมีการผสมไทเทเนียมหรือนิโอเบียม เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่ม AISI 347 และ AISI 321 [27]

สมบัติโดยรวมของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก สามารถสรุปได้ดังนี้ [28]

1. ไม่สามารถเหนียวนำไปเป็นแม่เหล็กได้
2. มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนทั่วไปในระดับดี

3. ไม่สามารถใช้กระบวนการทางความร้อนได้ (ไม่สามารถอบชุบด้วยความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็งหรือความแข็งแรงได้)

4. สามารถทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้ด้วยวิธี Cold Work

5. มีความยึดตัวและความเหนียวดีทั้งอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ (มักเกิดเป็นธาตุที่ช่วยต้าน

สมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำมาก)

6. มีความต้านทานต่อสิ่งดังต่อไปนี้ไม่ดี

ก. Stress Corrosion Cracking

ข. Pitting Corrosion

ค. Crevice Corrosion

3) สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 [28]

เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับใช้งานโดยทั่วไปมีโครเมียมผสมอยู่ 17เปอร์เซ็นต์ สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิปกติจะมีความต้านทานการกัดกร่อนได้ในสภาวะการกัดกร่อนปานกลาง สามารถขึ้นรูปเย็นได้ดีปานกลางมีผิวหน้าที่สวยงามหลังการประกอบชิ้นงานทำให้ลดขั้นตอนการตกแต่งผิวในขั้นตอนสุดท้าย เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 มีความต้านทานการเกิดออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิสูงถึง 850 องศาเซลเซียส และมีโครงสร้างผลึกแบบ Body Center Cubic (bcc) ในสภาพหลังการอบอ่อนแล้วซึ่งเหมือนกับโครงสร้างพื้นฐานของเหล็ก โครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 มีโครงสร้างแบบเฟอร์ไรต์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 870 องศาเซลเซียสจะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นแบบผสม (ออสเทนไนต์กับเฟอร์ไรต์) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 870 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อมีการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วหรือเย็นตัวในอากาศปกติ จะทำให้เกิดโครงสร้างแบบผสมเฟอร์ไรต์กับมาเทนไซต์ได้ ซึ่งอาจทำให้เกิดความเปราะที่อุณหภูมิห้อง ความสามารถในการขึ้นรูปของเหล็กกล้าชนิดนี้จะตอบสนองกระบวนการขึ้นรูปทุกรูปแบบได้เป็นอย่างดี ไม่ว่าจะเป็นการตัดพับการขึ้นรูปขอบ การขึ้นรูปลึกหรือแบบสปริง

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 ในปี 2000 Kang Dachang [4] ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง A study on Hydrodynamic Deep Drawing Equipment โดยทำการศึกษาวิจัยถึงการทำงานของอุปกรณ์ในกระบวนการ Hydrodynamic Deep Drawing ซึ่งประกอบไปด้วย 1. ชุดแม่พิมพ์ (Die Set) 2. ชุดควบคุมไฮดรอลิก (Hydraulic Control) และ 3. ชุดควบคุมการทำงานอัตโนมัติ (Automatic Control) โดยการศึกษาวิจัยชิ้นนี้สรุปได้ว่า ชุดแม่พิมพ์ในกระบวนการ HDD เป็นอุปกรณ์มาตรฐานในการอัดขึ้นรูปครั้งเดียว มีความเหมาะสมสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบ HDD ลักษณะของการกดยึดแผ่นโลหะในรายงานฉบับนี้เป็นโครงสร้างและทฤษฎีใหม่ที่มีการออกแบบขึ้น เพื่อให้ประหยัดพลังงานและสามารถใช้งานได้ด้วยเครื่องจักรกลต่างๆ ได้มากมาย แรงดันของของเหลวภายในระบบของการทำงานควบคุมโดยอุปกรณ์ลดแรงดัน (Pressure Reducer) ในปี 2000 Kang Dachang ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง A study on Hydrodynamic Deep Drawing Equipment [4] โดยทำการศึกษาวิจัยถึงการทำงานของอุปกรณ์ในกระบวนการ Hydrodynamic Deep Drawing ซึ่งประกอบไปด้วย 1. ชุดแม่พิมพ์ (Die Set) 2. ชุดควบคุมไฮดรอลิก (Hydraulic Control) และ 3. ชุดควบคุมการทำงานอัตโนมัติ (Automatic Control) โดยการศึกษาวิจัยชิ้นนี้สรุปได้ว่า ชุดแม่พิมพ์ในกระบวนการ HDD เป็นอุปกรณ์มาตรฐานในการอัดขึ้นรูปครั้งเดียว มีความเหมาะสมสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบ HDD ลักษณะของการกดยึดแผ่นโลหะในรายงานฉบับนี้เป็นโครงสร้างและทฤษฎีใหม่ที่มีการออกแบบขึ้น เพื่อให้ประหยัดพลังงานและสามารถใช้งานได้ด้วยเครื่องจักรกลต่างๆ 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 A116016-T4 โดยใช้กระบวนการ Hydromechanical Deep Drawing (HDD) ทำการขึ้นรูปด้วยที่มีอัตราส่วนการขึ้นรูปลึก (Drawing Ratio) 2.46 และ 3.11 กับ อลูมิเนียมอ่อนเกรด A11050-H0 อัตราส่วนการขึ้นรูปลึก (Drawing Ratio) 3.11 ศึกษาวิจัยถึงแรงดันของของเหลวที่กระจายตัวกระทำต่อ โลหะแผ่นที่ใช้ในการขึ้นรูป แล้วทำการจำลองการขึ้นรูปโดยการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปจริง โดยการกำหนดตัวแปรของวัสดุและตัวแปรของอุปกรณ์ สรุปได้ว่า อลูมิเนียมอัลลอย ซึ่งมีความแข็ง ขึ้นรูปได้ดีที่สุดที่อัตราส่วนการขึ้นรูป 2.46 และจะเกิดรอยย่นที่อัตราส่วนการขึ้นรูป 2.54 ส่วน อลูมิเนียมอ่อนสามารถขึ้นรูปได้ที่อัตราส่วนการขึ้นรูป 3.11 และได้ผิวงานที่เรียบ ในส่วนของการจำลองการขึ้นรูปด้วย FEM ขอบเขตของสภาวะต่างๆ จำเป็นต้องชัดเจน สมบัติ Anisotropy ของวัสดุเป็นตัวแปรสำคัญในการจำลองถึงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่น โลหะ

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 A116016-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 เป็นผลมาจากความแปรปรวนของแรงดันของเหลวภายใน สรุปได้ว่า สารหล่อลื่นที่ดีระหว่างแผ่นโลหะกับ Blank Holder และแม่พิมพ์เป็นตัวช่วยอย่างมากในการปรับปรุงอัตราส่วนการลากขึ้นรูปของโลหะแผ่น สำหรับความเสียหายระหว่างแผ่นโลหะกับ Punch เป็นอีกตัวแปรหนึ่งเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งเป็นลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย แต่จะไม่ส่งผลต่อการขึ้นรูปมากนัก ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายดังกล่าวมีค่าที่ไม่มากนัก

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 การวิเคราะห์เชิงตัวเลขและตัวแปรในกระบวนการ Hydrodynamic Deep Drawing โดยใช้วัสดุอลูมิเนียมผสม (Aluminum Alloy) เป็นวัสดุในการทดลองสรุปได้ว่าอลูมิเนียมอัลลอย A16016-T4 สามารถขึ้นรูปได้ดีที่อัตราส่วนการลากขึ้นรูป 2.46 และกระบวนการที่ดีที่สุดของการขึ้นรูปครั้งนี้คือ ระยะห่างระหว่าง Blank Holder กับแม่พิมพ์ 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 เป็นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมซึ่งมีความโค้งของของมุม ด้วยกระบวนการ Hydeodynamic Deep Drawing ทำการศึกษาวิเคราะห์ถึงความดันของ

ของเหลวบริเวณรอบๆ แม่พิมพ์ที่มีผลกระทบต่อชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป สรุปได้ว่า เหล็กอ่อน (Soft Steel) มีอัตราการลากขึ้นรูปสูงสุดที่ 3.53 และ อลูมิเนียมสูงสุดอยู่ที่ 3.44

2.3.6 ในปี พ.ศ. 2547 พงศ์พันธ์ แก้วตาพิทย์ และวารุณี เปรมานนท์ ทำการศึกษาวิจัยเรื่องการศึกษاثิทธิพลของความสูงคายแลนด์ในกรรมวิธีการลากขึ้นรูปลึก [11] โดยใช้วัสดุทดสอบ 4 ชนิด คือ เหล็กกล้าไร้สนิม (SUS304) เหล็กกล้ารีดเย็น (SPCC) เหล็กกล้าเคลือบสังกะสี (SGCC) และ อลูมิเนียม (A1100) ความหนา 1 mm นำมาทำการทดลองการลากขึ้นรูปลึกเป็นรูปด้วยกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 44 mm อัตราส่วนการลากขึ้นรูปเท่ากับ 1.8 ส่วนความสูงของคายแลนด์ที่ทำการศึกษา มีขนาด คือ 40, 25, 20, 10 และ 0 mm ความสูงคายแลนด์จะไม่มีอิทธิพลต่อแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป ความหนาของชิ้นงาน และความเรียบผิวของชิ้นงาน แต่จะมีอิทธิพลต่อการบิดตัวกลับของชิ้นงาน โดยที่คายแลนด์ 0 mm จะเกิดการบิดตัวกลับมากที่สุด

2.3.7 ในปี พ.ศ. 2550 คมสันต์ งามจำ ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง ชิดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนิต SUS 304 จากการเปลี่ยนความหนา [29] ตลอดจนประยุกต์ใช้แผนภาพชิดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ผลการขึ้นรูป อ่างล้างภาชนะ ด้วยทรงกรวย และเปรียบเทียบแผนภาพชิดจำกัดการขึ้นรูปที่ได้จากการทดลอง และการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ วัดค่าความเครียดบริเวณจุดปลอดภัย บริเวณจุดเกิดการคอด บริเวณจุดเสียหาย มาลงจุดบนแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดหลัก ( $e_1$ ) ความเครียดรอง ( $e_2$ ) สร้างเส้นโค้งชิดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Curve; FLC) จากนั้นนำแผนภาพชิดจำกัดการขึ้นรูปไปวิเคราะห์การขึ้นรูป โดยสร้างกริดวงกลมบนแผ่นแบล็ก (Blank) ขึ้นรูปแผ่นแบล็ก วัดค่าความเครียดบนชิ้นงานและนำมาลงจุดบนแผนภาพชิดจำกัดการขึ้นรูป พร้อมกับเปรียบเทียบผลจำลองการขึ้นรูป ด้วยโปรแกรม AUTOFORM 3.26 สรุปได้ว่า แผนภาพชิดจำกัดการขึ้นรูปสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 สร้างได้ตามมาตรฐาน ASTM E 2218-02 และความหนาขึ้นทดสอบเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ชิดจำกัดการขึ้นรูปสูงขึ้นไม่เป็นไปตามสัดส่วนความหนา

2.3.8 ในปี พ.ศ. 255 ธนสาร อินทรกำจรชัย ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำกับอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ [34] เป็นการนำเสนอวิธีการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำเป็นกระบวนการขึ้นรูปอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่นการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ

## 2.4 สรุปบท

จากการทบทวนวรรณกรรมในขั้นต้นที่กล่าวมานั้นพบว่า การลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก เป็นกระบวนการที่พัฒนาขึ้นสำหรับการเพิ่มขีดความสามารถในการขึ้นรูปโดยเฉพาะโลหะแผ่น และมีการศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวาง แต่ก็ยังมีจุดที่น่าสนใจในการศึกษาวิจัยอีกมากมาย ปัญหาต่างๆที่พบจากรรณกรรมขั้นต้นที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ได้แก่ ปัญหาการควบคุมสถานะการทดลองให้มีความเหมาะสมต่อคุณลักษณะเฉพาะของโลหะแผ่นที่มีความแตกต่างกัน เช่น อะลูมิเนียม เหล็ก หรือ เหล็กกล้าไร้สนิม โดยเฉพาะสถานะของการควบคุมแรงดันน้ำมัน การควบคุมสถานะของแรงกดชิ้นงาน การเลือกใช้แรงดันน้ำมันที่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นในการศึกษาทดลองเพื่อสรุปถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆ เหล่านี้ จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการการขึ้นรูปและชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างไร โดยผลกระทบที่มีต่อกระบวนการการขึ้นรูป เช่น แรงลากขึ้นรูปที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการ และผลกระทบที่มีต่อชิ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปลึก เช่น ความเครียดหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ผิวชิ้นงาน ความหนาที่ลดลงของชิ้นงานและสภาพโดยทั่วไปของชิ้นงาน



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ เป็นการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปลึงแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิก (Hydrodynamic Deep Drawing) เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการการลากขึ้นรูปลึงแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม โดยการศึกษาปัจจัยคือ แรงในการลากขึ้นรูป แรงกดแผ่นชิ้นงาน ความดันที่เกิดขึ้นภายในห้องบรรจุน้ำมัน ความหนาของชิ้นทดสอบหลังการขึ้นรูป ความเครียดที่เกิดขึ้นที่ผิวแผ่นทดสอบ และปัญหาที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานหลังการขึ้นรูป คือ รอยร้าวที่ปากถ้วยกับรอยฉีกขาด ทั้งหมดนี้มีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูป

#### 3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและการเตรียมการทดลอง

3.2.1 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม มาตรฐาน AISI เกรด SUS 304 และ SUS 430 ความหนา 0.48 มิลลิเมตร

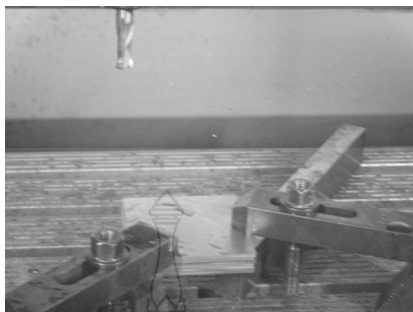
1) ตัดชิ้นงานตามแนวรีดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาด  $90 \times 90$  มิลลิเมตร ด้วยเครื่องตัดโลหะแผ่น (Power Shear) ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ชิ้นงานสี่เหลี่ยมขนาด  $30 \times 30$  มิลลิเมตร



2) เตรียมอุปกรณ์จับยึด (Fixture) และติดตั้งบนเครื่องจักร CNC แล้วยึดให้แน่นดังแสดง  
ในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 การจับยึด (Fixture) บนเครื่องกัด CNC

3) เครื่องกัด CNC เดินกัดชิ้นงานโดยคำสั่งจากโปรแกรมในระบบควบคุมอัตโนมัติจนกัด  
ชิ้นงานสำเร็จดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 การกัดชิ้นงาน โดยเครื่องจักร CNC

4) ทำการลบคมของแผ่นชิ้นงานให้เรียบดังแสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 ชิ้นงานทดสอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 mm ความหนา 0.48 mm

3.2.2 น้ำมันไฮดรอลิก PTT Hydraulic VG 68 ความหนืดเชิงจลศาสตร์ ที่อุณหภูมิ 40 °C โดยเฉลี่ยเท่ากับ 68 mm<sup>2</sup>/s ตามมาตรฐาน มอก. 977-2551



ภาพที่ 3.5 น้ำมันไฮดรอลิกตามมาตรฐาน เกรด 68

3.2.3 สปริงแม่พิมพ์มาตรฐาน JIS 2 ค่าคงที่สปริงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางวงนอก 27 mm เส้นผ่าศูนย์กลางวงใน 13.5 mm และความยาว 125 mm ที่ขนาด 2 ค่าคงที่ ได้แก่

1) ค่าคงที่สปริง เท่ากับ 19.62 N/mm<sup>2</sup>

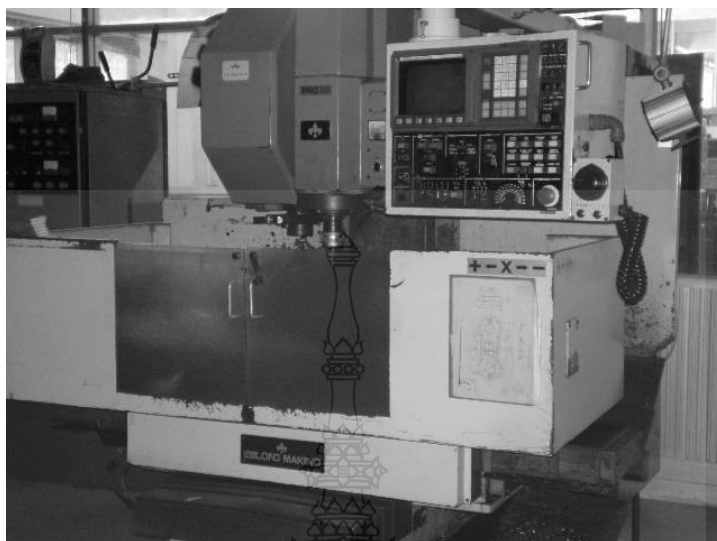
2) ค่าคงที่สปริง เท่ากับ 35.69 N/mm<sup>2</sup>

3.2.4 เครื่องอัดขึ้นรูปโลหะระบบไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน



ภาพที่ 3.6 เครื่องปั๊มอัดระบบไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน

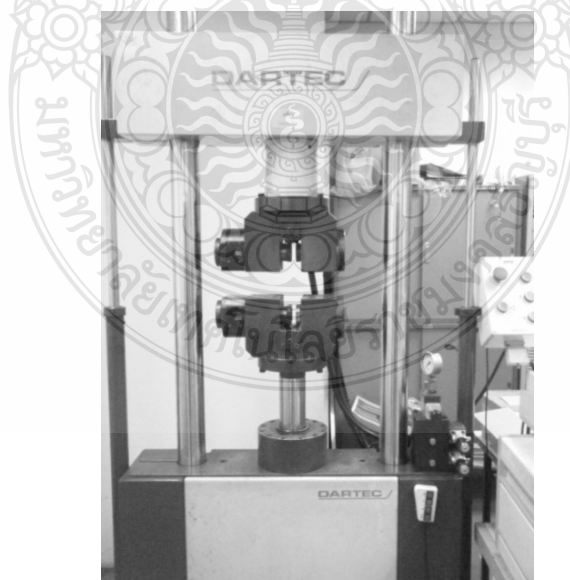
### 3.2.5 เครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC Automatic Machine)



ภาพที่ 3.7 เครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC Automatic Machine)

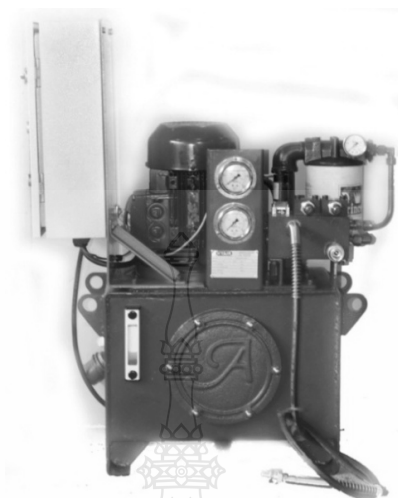
### 3.2.6 ชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปสีก รูปถ้วยทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร

### 3.2.7 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ดังแสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 เครื่องทดสอบแรงดึง

### 3.2.8 ชุดต้นกำลังและควบคุมระบบไฮดรอลิกขนาด 30 ลิตร แรงดันสูงสุด 700 บาร์



ภาพที่ 3.9 ชุดต้นกำลังและควบคุมระบบไฮดรอลิก

### 3.2.9 อุปกรณ์วัดแรงชนิดวัดแรงกดพร้อมชุดแปลงสัญญาณ



ก) อุปกรณ์วัดแรงคั้นน้ำมัน

ข) อุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ



ค) ลักษณะของสัญญาณ  
การวัดแรงกดพื้นที่

ภาพที่ 3.10 อุปกรณ์วัดแรงคั้นและอุปกรณ์บันทึกแรงที่ได้จากการขึ้นรูป

### 3.2.10 ไมโครคาลิปเปอร์ชนิดปลายเข็ม สำหรับวัดความหนาชั้นทดสอบหลังการขึ้นรูป

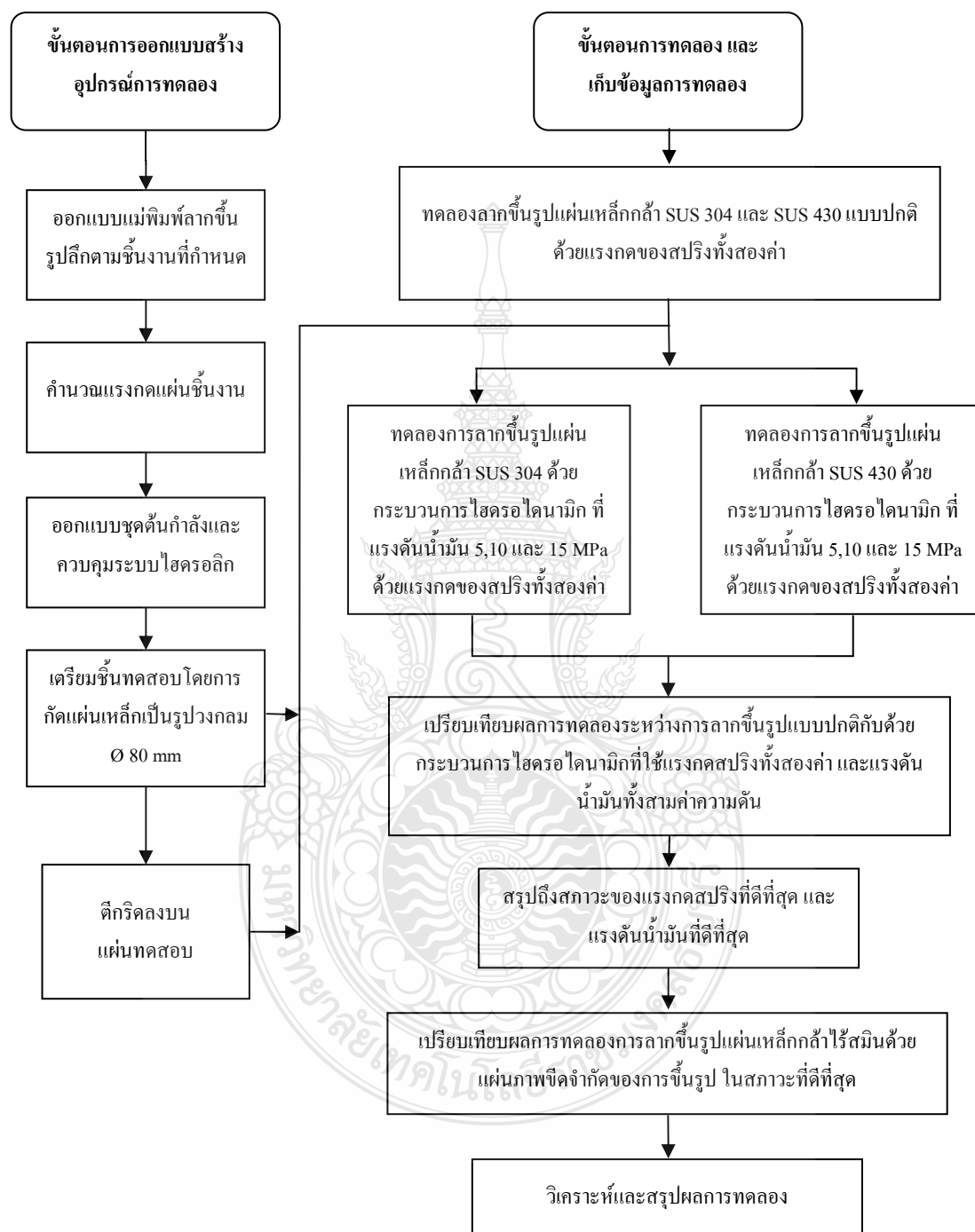


ภาพที่ 3.11 ไมโครคาลิปเปอร์สำหรับวัดความหนาชั้นงาน

### 3.2.11 อุปกรณ์ที่ใช้สร้างกริด

- 1) อุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า (Lectroetch Power Unit )
- 2) ลูกกลิ้งรีด ( Lectroetch Roller Marker )
- 3) น้ำยาอิเล็กโทรไลต์ สูตร LNC-2 Electrolyte
- 4) น้ำยาล้างทำความสะอาดชั้นงานสูตร 1
- 5) ผ้าสักหลาดชุบน้ำยาอิเล็กโทรไลต์
- 6) แผ่นกริดวงกลม ( Stencils )

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

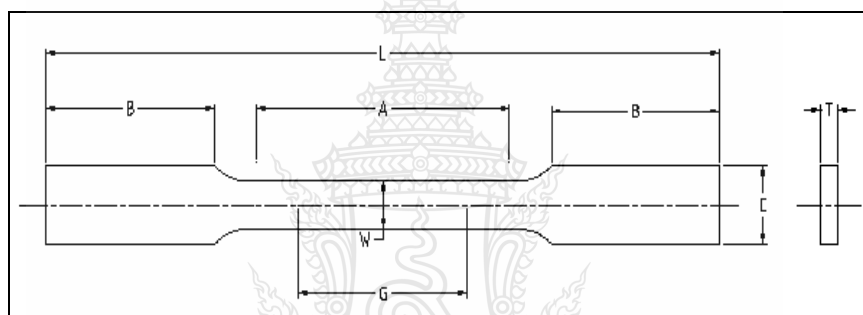


ภาพที่ 3.12 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.3.1 สมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบมาตรฐาน และส่วนประกอบทางเคมี [29]

เกรดของไทเทเนียม	ค่าเปรียบเทียบเท่ากับ			ส่วนประกอบทางเคมี				
	TISI มาตรฐานไทย	JIS มาตรฐานญี่ปุ่น	ASTM มาตรฐานอเมริกัน	คาร์บอน C	โครเมียม Cr	นิกเกิล Ni	ซิลิเนียม Si Max.	แมงกานีส Mn Max.
TNX SC17	SST 430	SUS 430	430	≤0.12	16.0-18.0	-	0.75	1.0
TNX S189	SST 304	SUS 304	304	≤0.8	18.0-20.0	8.0-9.0	0.75	2.0
TNX SC17	SST 304	SUS 304	304	≤0.8	18.0-20.0	8.0-9.0	0.75	2.0
TNX SC17	SST 304	SUS 304	304	≤0.8	18.0-20.0	8.0-9.0	0.75	2.0



ภาพที่ 3.13 ขนาดชิ้นทดสอบแรงดึงเหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน ASTM E 646-91 [29]

ตารางที่ 3.2 ขนาดสำหรับการกำหนดค่า n แบบ “Plain-End” Specimen [29]

รายละเอียด	ขนาด	
	นิ้ว	มิลลิเมตร
G ความยาวเกจ	50.0 ± 0.01	
W ความกว้าง	12.5 ± 0.25	
T ความหนา	ความหนาของชิ้นทดสอบ	
R รัศมีของส่วนโค้งน้อยที่สุด	1/2	13
L ความยาวรวมน้อยที่สุด	8	200
A ความยาวของการลดพื้นที่หน้าตัดน้อยที่สุด	2 1/4	60
B ความยาวของส่วนที่ใช้จับยึดน้อยที่สุด	2	50
C ความกว้างของส่วนที่ใช้จับยึด	3/4	20

ขั้นตอนการคำนวณหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุ [29]

1) ทดสอบหาสมบัติอัตราส่วนความเครียดถาวร  $r$  (Anisotropy) ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 และ SUS 430 ตามวิธีการของ ASTM E517 vol.01.03.(1993)

1. นำเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 และ SUS 430 ความหนา 0.48 mm มาทำการทดสอบหาค่า  $r$  (Anisotropy) ตัดชิ้นทดสอบ (Blanking) ตามแนวทิศทางการรีด (Rolling Direction) จากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ที่นำมาใช้ในการทดสอบ

2. วัดความกว้าง ( $W_0$ ) และความหนา ( $T_0$ ) ของแต่ละชิ้นทดสอบทุกแนวการรีดบันทึกข้อมูล ในช่วงความยืด (Gage Length)



ภาพที่ 3.14 ลักษณะชิ้นทดสอบหาสมบัติเชิงกล

3. นำชิ้นทดสอบที่วัดค่าความกว้างและหนาเสร็จแล้วมาทดสอบการดึงตามแนวแกน

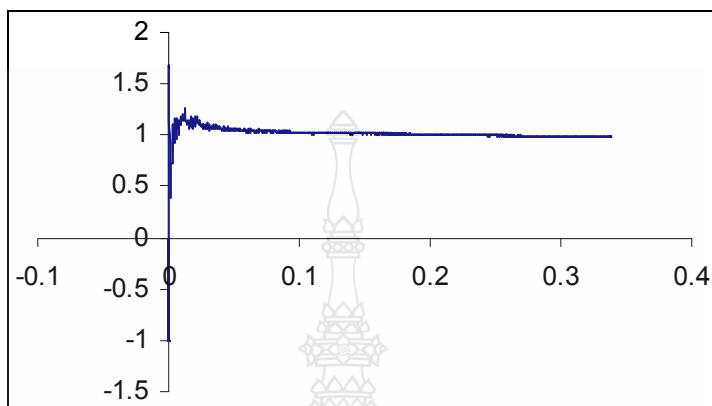
4. วัดความกว้าง ( $W_x$ ) และความหนา ( $T_x$ ) ของชิ้นทดสอบที่ดึงทดสอบแล้วอุปกรณ์ (Extensometer) จะบันทึกการเปลี่ยนแปลงความยาวและพื้นที่หน้าตัด นำข้อมูลที่ได้จากการบันทึกมาคำนวณ

Speed	5 mm/min		Engineering Strain-Stress				True Strain-Stress		r-Value	
Length	50 mm		extenso_L Tensile_MC(MPa)		extenso_L Tensile_MC(MPa)		Strain(Wid Strain(Thick)			
Width	12.5 mm									
Thickness	0.58 mm									
-0.20287	0.026621	-0.00251	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	
-0.20287	0.026621	-0.00087	0	0	0	0	-0.00013	0.000131	-1	
-0.20287	0.026621	-0.00251	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	
-0.23412	0.026621	-0.00087	-0.00063	0	-0.00063	0	-0.00013	0.000756	-0.17296	
-0.20287	0.026621	-0.00251	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!	
-0.20287	0.026621	-0.00087	0	0	0	0	-0.00013	0.000131	-1	
-0.23412	0.026621	-0.00087	-0.00063	0	-0.00063	0	-0.00013	0.000756	-0.17296	
-0.20287	0.026621	-0.00087	0	0	0	0	-0.00013	0.000131	-1	
-0.20287	0.026621	-0.00087	0	0	0	0	-0.00013	0.000131	-1	

ภาพที่ 3.15 การบันทึกข้อมูลการทดสอบการดึงจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์



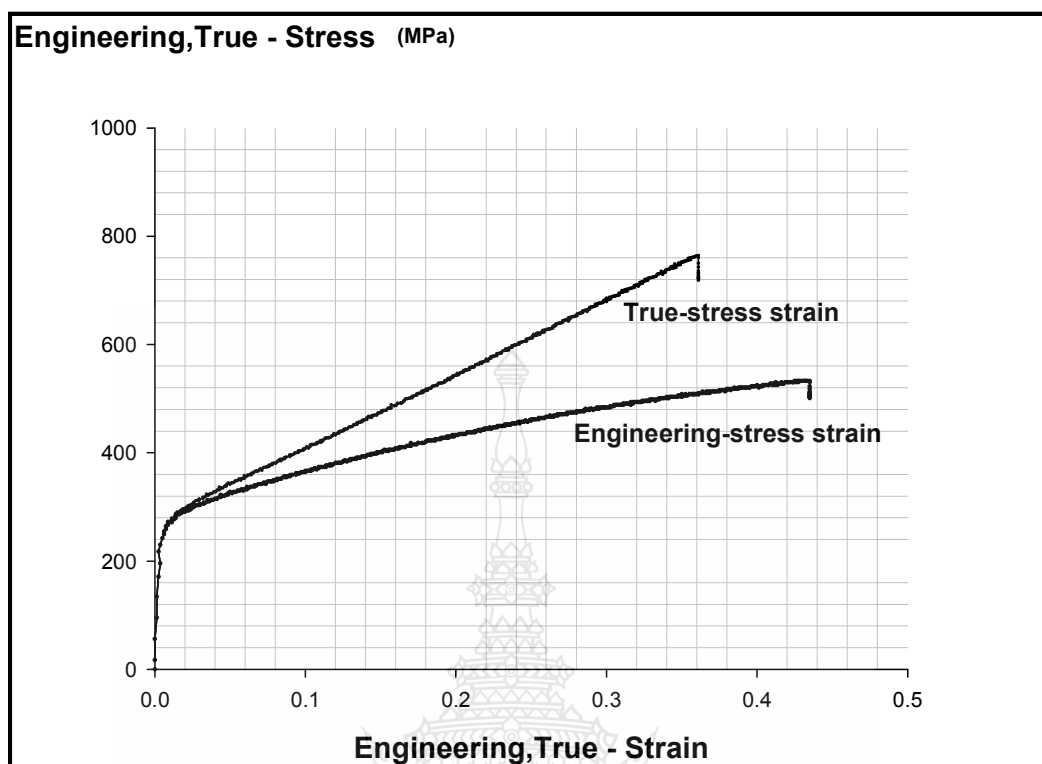
$$\text{อัตราส่วนความเครียดพลาสติก (Anisotropy; } r) = \frac{\ln\left(\frac{W_o}{W_x}\right)}{\ln\left(\frac{T_o}{T_x}\right)}$$



ภาพที่ 3.16 การหาค่า  $r$  โดยการเทียบจากแผนภาพความเครียด

2) ทดสอบหาสมบัติเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain-Hardening Exponent;  $n$ -Values) และสัมประสิทธิ์ความต้านแรง (Strength Coefficient;  $K$ ) ของเหล็กกล้าไร้สนิม ตามวิธีทดสอบ ASTM E 646-91 vol.03.01.(1993)

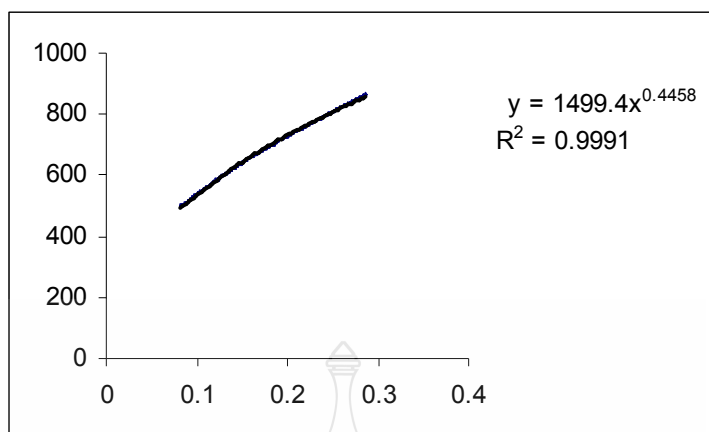
1. วัดความกว้างความหนาของชิ้นทดสอบช่วงระยะยึด (Gage Length) เพื่อหาพื้นที่หน้าตัด
2. จับชิ้นงานทดสอบแรงดึงบันทึกค่าแรงที่กระทำและระยะที่เปลี่ยนแปลงช่วงที่หนึ่ง
3. คำนวณหาความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering Stress;  $S$ ) เท่ากับแรงกระทำช่วงที่หนึ่งต่อขนาดพื้นที่หน้าตัด
4. คำนวณหาความเครียดวิศวกรรม (Engineering Strain;  $\epsilon$ ) เท่ากับระยะที่เปลี่ยนแปลงต่อความยึด
5. คำนวณหาความเค้นจริง (True Stress) =  $S \times (1 + \epsilon)$
6. คำนวณหาความเครียดจริง (True Strain) =  $\ln(1 + \epsilon)$
7. คำนวณหา  $y$  หรือ Log True Stress



ภาพที่ 3.17 แผนภาพการลงจุดความเค้นจริง ความเครียดจริง ความเค้นทางวิศวกรรมและความเครียดทางวิศวกรรม

8. คำนวณหา  $x$  หรือ Log True Strain
9. คำนวณหา  $y^2$
10. คำนวณหา  $x^2$
11. คำนวณหา  $xy$
12. คำนวณค่าจากการบันทึกข้อ 2-11 ทุกเปลี่ยนแปลงระยะยึดในช่วง Gage Length ให้จำนวนครั้งการเปลี่ยนแปลงระยะยึดเป็น  $N$  หาคผลรวมทั้งหมด

$$\sum y, \sum x, \sum y^2, \sum x^2, \sum xy$$

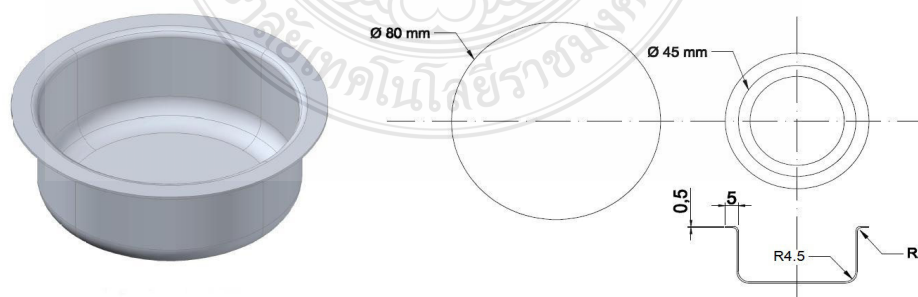


ภาพที่ 3.18 หาค่าสัมประสิทธิ์ความต้านแรงและเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียดใช้แบบสมการกำลัง (Power Law)

ตารางที่ 3.3 สมบัติเชิงกลเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS 304 และ SUS 430

วัสดุหนา 0.48 mm	แรงดึง ที่จุดคราก (N)	สัมประสิทธิ์ ความต้านแรง (K)	n	อัตราส่วนความเครียดพลาสติก (r)			
				$R_0$	$R_{45}$	$R_{90}$	$\bar{R}$
SUS 304	1740	818	0.25	1.258	1.451	1.151	1.288
SUS 430	1922	367	0.18	0.765	0.798	0.589	0.717

3.3.2 ออกแบบแม่พิมพ์พลาสติกรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งสามารถอัดแรงดันน้ำมันเข้าไปยังแม่พิมพ์ได้  
ชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกแบบมีปีก เส้นผ่าศูนย์กลางรวมความหนาแผ่น  
ทดสอบ 45 mm ปีกกว้าง 5 mm อัตราส่วนการขึ้นรูป 1.8 ขึ้นรูปสี่เหลี่ยม 15 mm



ภาพที่ 3.19 ชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกแบบมีปีก

- 1) ขนาดแผ่นขึ้นงานเริ่มต้นคำนวณตามทฤษฎีในบทที่ 2

$$D = \sqrt{(d_2^2) + (4 \times d_1 \times h)} = 75.7 \text{ มิลลิเมตร}$$

กำหนดให้แผ่นทดสอบเท่ากับ 80 มิลลิเมตร (เพื่อมมโค้งคายและพื้นซ์)

- 2) มุมคาย คำนวณตามทฤษฎีในบทที่ 2

$$r_m = \left[ \frac{0.035}{\sqrt{mm}} \right] [(50 + (D - d)) \times \sqrt{s}] = 2.1 \text{ องศา}$$

กำหนดให้มุมปากคายเท่ากับ 2 องศา

- 3) ระยะช่องว่างแม่พิมพ์

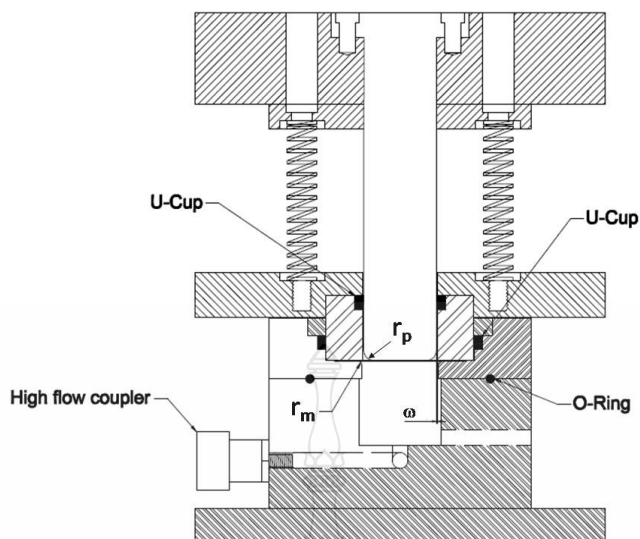
$$\omega = s \times \sqrt{\frac{D}{d}} = 0.66 \text{ มิลลิเมตร}$$

กำหนดให้ระยะช่องว่างแม่พิมพ์เท่ากับ 0.65 มิลลิเมตร

- 4) มุมพื้นซ์

$$r_p = (3 - 5)r_m \text{ หรือตามการออกแบบขึ้นงาน}$$

กำหนดให้มุมพื้นซ์  $r_p = 4.5$  องศา



ภาพที่ 3.20 สภาวะของแม่พิมพ์ในการศึกษาทดลอง ซึ่งได้จากการออกแบบคำนวณตามทฤษฎีการลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing)

### 3.3.3 คำนวณขนาดของแรงกดแผ่นทดสอบ

#### 1) แรงดันกดแผ่นโลหะ (Blank Holder Pressure; $p$ )

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

$$R_m \text{ สำหรับการคำนวณใช้ค่าสูงสุด} = 360 \quad \text{N/mm}^2$$

$$c \text{ สำหรับโลหะประเภทเหล็ก} = 0.002$$

$$\text{แรงดันกดแผ่นโลหะ} = 1.04 \quad \text{N/mm}^2$$

#### 2) พื้นที่ของการกดแผ่นโลหะ (Blank Holder Area; $A_{BH}$ )

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

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

$$d_e = 50.3 \quad \text{mm}$$

$$A_{BH} = 3038 \quad \text{mm}^2$$

3) แรงกดยึดแผ่น โลหะ (Blank Holder Force;  $F_{BH}$ )

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

$$F_{BH} = 3.2 \text{ KN}$$

ในการศึกษาทดลอง ใช้สปริงแม่พิมพ์มาตรฐาน JIS สำหรับแรงกดยึดแผ่นทดสอบ ทั้งหมด 2 ชุด 2 ค่าคงที่สปริง ชุดละ 8 ชุดสปริง ดังต่อไปนี้

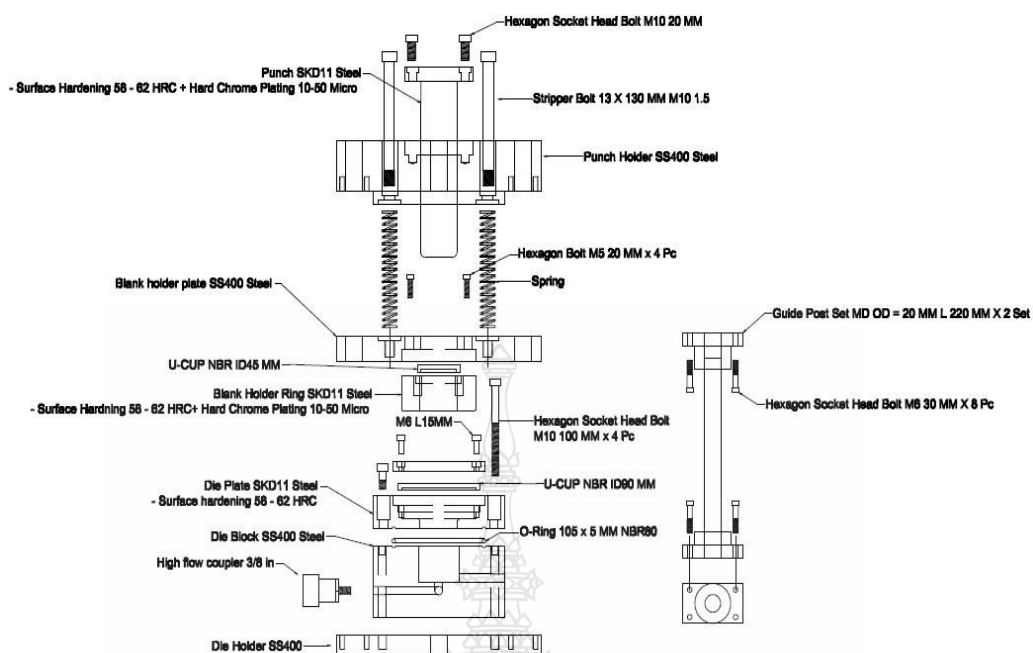
- ค่าคงที่สปริง  $19.62 \text{ N/mm}^2$       แรงกดรวม       $156.96 \text{ N/mm}^2$
- ค่าคงที่สปริง  $35.69 \text{ N/mm}^2$       แรงกดรวม       $285.52 \text{ N/mm}^2$

กำหนดให้ระยะกดแม่พิมพ์ก่อนการขึ้นรูปที่เท่ากับ 25 มิลลิเมตร

### 3.3.4 การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการบรรจุน้ำมัน

สำหรับแม่พิมพ์ชุดล่าง (Die) จะมีห้องบรรจุน้ำมัน (Liquid Chamber) เจาะจากด้านบนของคาน สำหรับต่อท่อทางเดินของน้ำมัน ไฮดรอลิก จากชุดต้นกำลังไฮดรอลิก สำหรับชุดแม่พิมพ์ทำการป้องกันการรั่วไหลของของเหลว 3 จุด คือ

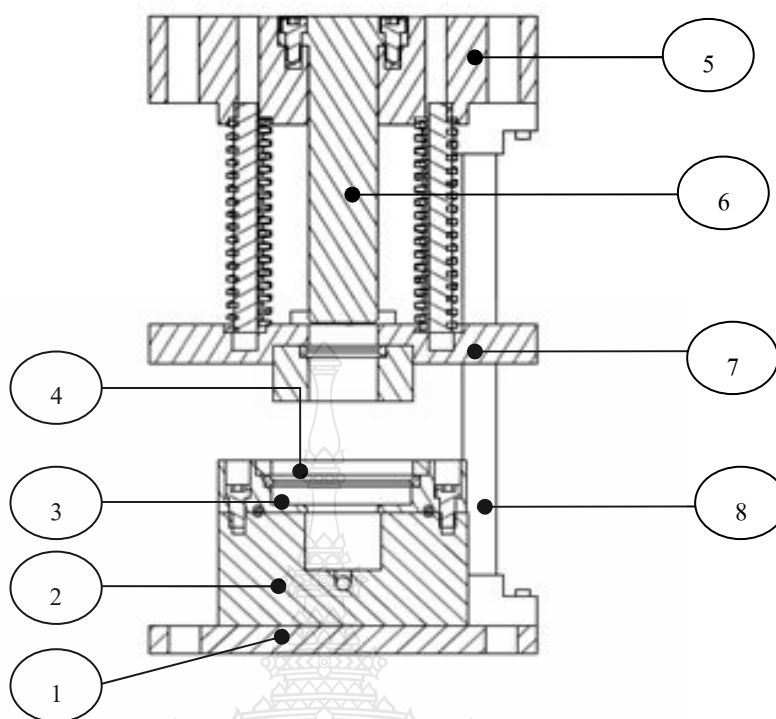
- 1) บริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างแผ่นหน้าคานซึ่งใช้เหล็กชุบ SKD11 ชุบแข็งกับตัวคานซึ่งใช้เหล็ก SS400 โดยใช้ซีลโอริง NBR
- 2) บริเวณจุดผิวสัมผัสระหว่างแผ่นกดชิ้นงานซึ่งใช้เหล็ก SKD11 ชุบแข็งและชุบ Hard Chrome กับผิวคาน โดยใช้ซีล U-CUP NBR ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน 90 มิลลิเมตร สูง 8 มิลลิเมตร
- 3) บริเวณจุดผิวสัมผัสระหว่างพื้นซึ่งใช้เหล็ก SKD11 ชุบแข็งและชุบ Hard Chrome กับผิวด้านในของแผ่นกดชิ้นงาน โดยใช้ซีล U-CUP NBR ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน 45 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร ภาพที่ 3.21 ส่วนประกอบพร้อมรายละเอียดของแม่พิมพ์



ภาพที่ 3.21 ส่วนประกอบพร้อมรายละเอียดของแม่พิมพ์

ตารางที่ 3.4 ชั้นส่วนแม่พิมพ์

ชั้นที่	รายการ	ขนาด	วัสดุ
1	Die Holder	250x250x20	SS400 Steel
2	Die Block	160x160x78	SS400 Steel
3	Die Plate	160x160x36.5	SKD11
4	Die Plate Cover	112x112x10.5	SKD11
5	Punch Plate	250x250x75	SS400 Steel
6	Punch	Ø84x213	SKD11
7	Blank Holder Plate	250x250x27	SS400 Steel
8	Guide Post	Ø20.02x25	



ภาพที่ 3.22 ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ขึ้นรูป

### 3.3.5 การออกแบบชุดต้นกำลัง และระบบควบคุมไฮดรอลิกสำหรับอันแรงดันเข้าแม่พิมพ์

ชุดต้นกำลังและระบบควบคุมไฮดรอลิก ได้รับการออกแบบและสร้างโดยบริษัท ฟร็อนเทค เอ็นจิเนียริง จำกัด ขนาดของมอเตอร์ขับเคลื่อน 3 แรงม้า ระบบไฟฟ้า 3 เฟด ขับปั้มน้ำมันไฮดรอลิก แบบลูกสูบ กำลังใช้งานสูงสุด 700 บาร์ อัตราการไหล 0.5 – 1 ลิตร / นาที ภาพที่ 3.24 วงจรการทำงานของระบบไฮดรอลิก โดยมีวงจรการทำงานและการควบคุมดังต่อไปนี้

1) ในขณะที่เครื่องทำงานที่สวิทช์ควบคุมปกติปิด ของเหลวจะไหลจากถังเก็บด้วยแรงดันของปั้ม ผ่านสวิทช์ควบคุมกลับถึงเก็บโดยไม่ผ่านลิ้นควบคุมความดัน ในภาพที่ 3.23 สวิทช์ควบคุมการทำงานของระบบไฮดรอลิก

2) เมื่อเปิดสวิทช์ควบคุมของเหลวจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ผ่านลิ้นควบคุมความดันทั้งสองตัว

3) ทำการปรับค่าความดันเข้าสู่ระบบแม่พิมพ์ หมุนสกรูปรับความดันที่ลิ้นควบคุมความดันทางเข้าแม่พิมพ์ (ลิ้นควบคุมความดันตัวล่าง)

4) ทำการปรับค่าความดันควบคุมภายในห้องแม่พิมพ์ โดยหมุนสกรูปรับความดันที่ลิ้นควบคุมความดันทางออกของแม่พิมพ์ (ลิ้นควบคุมความดันตัวบน)



5) เมื่อของเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยความดันที่สูงเกินค่าที่ปรับสกรูไว้ ของเหลวจะไหลกลับสู่ถังเก็บ โดยผ่านลิ้นควบคุมความดันทางเข้าแม่พิมพ์ ในขณะเดียวกันเมื่อความดันภายในห้องแม่พิมพ์สูงเกินค่าที่ปรับสกรูไว้ ของเหลวจะไหลกลับถังเก็บโดยผ่านลิ้นควบคุมความดันทางออกของแม่พิมพ์

6) บริเวณทางของเหลวไหลเข้าของแม่พิมพ์ ใช้อุปกรณ์ป้องกันการไหลย้อนกลับของเหลว ( Ball Valve)

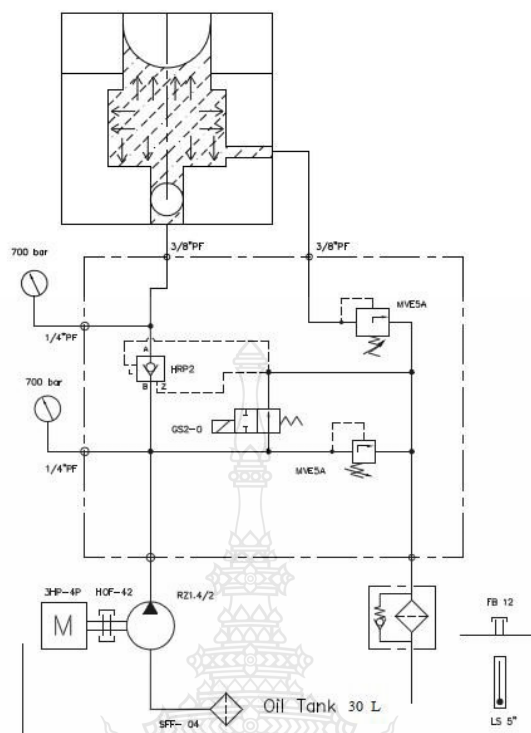
7) อุปกรณ์วัดแรงดันของเหลว 2 จุด

8) ทำการศึกษาดทดลองที่ความดันควบคุม 5, 10 และ 15 MPa

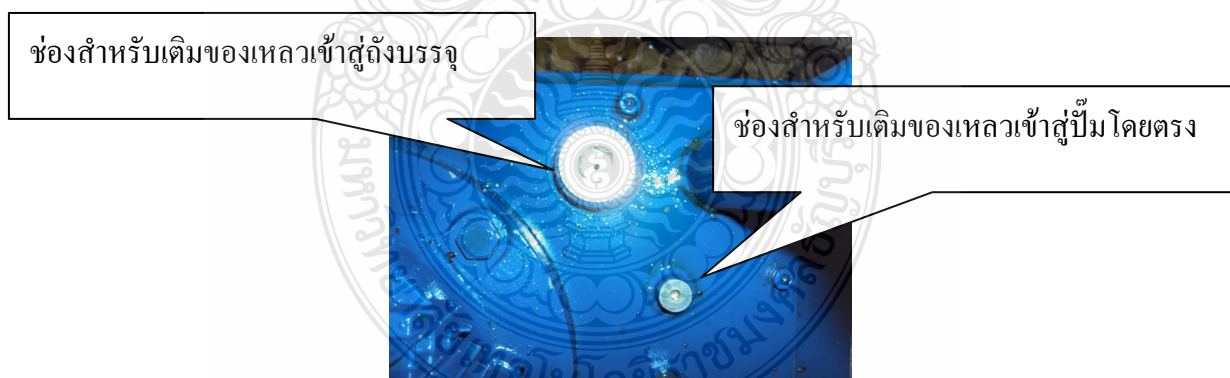
9) ในการเปลี่ยนถ่ายของเหลวเพิ่มทำการทดลองของเหลวที่มีค่าความหนืดต่างๆ โดยคลายสกรูด้านล่างของถังเพื่อปล่อยน้ำมันออก เปิดฝาด้านหน้าเพื่อทำความสะอาดภายในถัง หลังจากนั้นประกอบฝาดังและสกรูถ่ายของเหลว จากนั้นเติมของเหลวที่ถังโดยเติมผ่านช่องเติมด้านบนจนถึงจนกระทั่งภายในถังเต็ม หลังจากนั้นเติมของเหลวเข้าไปยังปั๊มโดยตรงผ่านทางช่องรูเล็ก เพื่อป้องกันอากาศที่ช่องทางเข้าของปั๊ม (Cavitation) ในภาพที่ 3.25 ช่องเติมน้ำมันทั้งสองช่องเพื่อเติมน้ำมันภายในถังและที่ปั๊ม โดยตรง



ภาพที่ 3.23 แผงสวิตช์ควบคุมการทำงานของระบบไฮดรอลิก



ภาพที่ 3.24 วงจรการทำงาน และควบคุมระบบไฮดรอลิก



ภาพที่ 3.25 ช่องเติมน้ำมันทั้งสองช่องเพื่อเติมน้ำมันภายในถังและที่ปั๊ม โดยตรง

### 3.3.6 การสร้างกริดบนแผ่นทดลอง

การสร้างกริดที่แผ่นชิ้นงานเพื่อใช้สำหรับการวัดค่าความเครียดหลัก และความเครียดดลอง โดยใช้กรดเกลือกักด้วยไฟฟ้า กระบวนการตีกริดวงกลมที่ใช้กรดเกลือกักด้วยไฟฟ้าเป็นการชุบเคลือบ

ผิววัสดุทำให้เกิดลายตาราง เพื่อทำการวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวหลังจากที่ชิ้นงานได้ผ่านการขึ้นรูป [25] โดยสร้างกริดวงกลมขนาด 2.5 มิลลิเมตร ที่ใช้กรดเกลือกัดด้วยไฟฟ้ามีกระบวนการดังต่อไปนี้คือ

- 1) จัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการสร้างกริด ดังต่อไปนี้
  - แผ่นเหล็กขนาดพอเหมาะกับโต๊ะปฏิบัติงาน
  - แผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencil) ขนาด  $10 \times 12$  นิ้ว
  - น้ำยาล้างทำความสะอาดแผ่นโลหะ
  - น้ำยาอิเล็กโทรไลต์เพื่อใช้ในการกัดแผ่นโลหะซึ่งใช้สำหรับเหล็ก
  - ตัวปรับไฟ (Rectifier) พร้อมด้วยสายต่อ 2 สายที่ประกอบด้วยลูกกลิ้งและสายดิน
  - น้ำยากัดสนิม
- 2) ใช้แผ่นเหล็กวางบนโต๊ะปฏิบัติงาน สำหรับรองรับชิ้นงานในการทดลอง เพื่อต่อวงจรไฟฟ้า
- 3) ประกอบตัวปรับแรงดันและแปลงไฟ โดยใช้สายดินหนีบกับแผ่นเหล็กรองและ อีกสายหนึ่งติดลูกกลิ้ง
- 4) นำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ที่ใช้เป็นชิ้นงานในการทดลอง วางบนแผ่นเหล็กรอง โดยที่แผ่นชิ้นงานจะต้องผ่านการแต่งครีบและขอบ พร้อมกับล้างกราบไขมันให้สะอาดแล้วเช็ดให้แห้ง และระวังอย่าให้มีเศษโลหะหรือวัสดุใดๆ เพราะจะทำให้ แผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils) เกิดทะลุได้ในขณะใช้ลูกกลิ้งกดขณะขึ้นรูปด้วยไฟฟ้า
- 5) นำแผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils) วางบนชิ้นงานโดยจัดให้เหมาะสมกับชิ้นงาน
- 6) นำแผ่นเบาะรองที่จุ่มด้วยน้ำยาอิเล็กโทรไลต์หมาดๆ เช็ดบนแผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils) ในบริเวณที่จะตีกริดให้ทั่วถึง โดยให้หมาดๆ แล้วจัดแผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils) ให้ตั้งอย่าให้ขยับ
- 7) นำแผ่นเบาะรองจุ่มด้วยน้ำยาอิเล็กโทรไลต์และบิดพอให้เปียกๆ วางบนแผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils) อีกทีหนึ่งในกรณีที่แผ่นเบาะรองยังจุ่มด้วยน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ก็ยังไม่ต้องจุ่มน้ำยาจนกว่าจะแห้งพอสมควร
- 8) เปิดสวิตซ์ที่เครื่องปรับไฟ ปรับตั้งขนาดไฟฟ้าให้เหมาะสม ใช้ลูกกลิ้งกดลงบนแผ่นเบาะรองด้วยน้ำหนักพอประมาณ และเคลื่อนที่ไปอย่างช้าๆ เพียงครั้งเดียว ซึ่งสังเกตโดยให้เข็มวัดกระแสไฟฟ้ากระดิกมาที่กึ่งกลางหรือสูงๆ ของมาตรวัด จะทำให้กริดวงกลมบนแผ่นโลหะมีความ

ชัดเจนและเส้นมีความคมสวยงาม หลังจากนั้นจึงปิดสวิตช์ไฟแล้วนำแผ่นเบาะรองและ Stencils ออกเพื่อดูว่า กริดวงกลมมีความชัดเจนหรือไม่

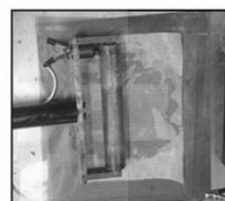
9) หลังจากตีกริดวงกลมเสร็จแล้ว ให้นำแผ่นทดสอบมาล้างด้วยน้ำยาล้างทำความสะอาดและเช็ดให้แห้งแล้วพ่นน้ำยากัดสนิม เพื่อรอการศึกษาทดลองต่อไป



(ก)



(ข)



(ค)

(ก) แผ่น Stencil ขนาด 10 × 12 นิ้ว

(ข) เครื่องปรับแปลงไฟที่ประกอบด้วยตู้กักกิ่งและสายดิน

(ค) ลักษณะการขึ้นรูปกริดวงกลมโดยใช้ตู้กักกิ่งกด

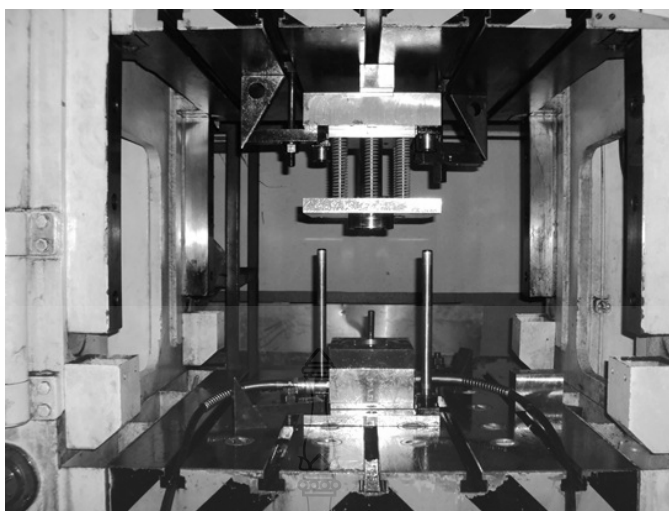
ภาพที่ 3.26 กระบวนการกรัดเกลือกัดด้วยไฟฟ้า



ภาพที่ 3.27 แผ่นทดสอบที่สร้างกริดเรียบร้อยแล้ว

### 3.3.7 ติดตั้งแม่พิมพ์และต้นกำลังไฮดรอลิก

1) ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงสำหรับต่อพ่วงเข้ากับเครื่องปั๊มอัด หลังจากนั้นติดตั้งแม่พิมพ์ที่เครื่องปั๊มอัด 80 ตัน และติดตั้งชุดต้นกำลังไฮดรอลิกโดยใช้สายน้ำมันไฮดรอลิก ชนิดรับแรงดันสูงต่อเข้ากับตัวแม่พิมพ์ผ่าน High Flow Coupler ตามภาพที่ 3.28



ภาพที่ 3.28 แม่พิมพ์ที่ติดตั้งบนเครื่องปั๊มอัดเรียบร้อยแล้ว

- 2) ปรับตั้งสวิทช์ควบคุมตามความลึกของชิ้นงานลากขึ้นรูปดังแสดงในภาพที่3.29



ภาพที่ 3.29 การปรับตั้งสวิทช์ควบคุมของเครื่องปั๊ม

3) แม่พิมพ์พร้อมใช้งานติดตั้งบนเครื่องเพรสไฮดรอลิก ดังแสดงในภาพที่ 3.30



ภาพที่ 3.30 แม่พิมพ์พร้อมใช้งานติดตั้งบนเครื่องเพรสไฮดรอลิก

### 3.3.8 การกำหนดตัวแปรในการทดลอง

ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ ใช้การลากขึ้นรูปลึกรูปถ้วยทรงกระบอก ซึ่งเป็นรูปทรงที่งานต่อการออกแบบแม่พิมพ์ การขึ้นรูป และการจัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์ในการศึกษาทดลอง สำหรับตัวแปรในการศึกษาทดลองได้แก่ การขึ้นรูปโดยใช้แรงดันน้ำมัน (Fluids Pressure) เปรียบเทียบกับการขึ้นรูปแบบปกติ ใช้ของเหลวชนิดน้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic Oil) เกรด 68 และขนาดแรงกดแผ่นทดสอบ (Blank Holder Force) โดยใช้สปริงที่มีค่าคงที่สปริงแตกต่างกันเป็นตัวกด โดยใช้ความเร็วกดของพื้นที่ตลอดการทดลองที่ 2 มิลลิเมตรต่อวินาที

ลำดับขั้นของการทดลองตามตัวแปรที่กำหนด เป็นไปตามตารางที่ 3.5 และ 3.6

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการทดลองสำหรับการขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลวโดยใช้ของเหลว VG 68

ค่าคงที่ของแรงกดสปริง (N/mm <sup>2</sup> )	แรงดันน้ำมัน (MPa)		
19.62	5	10	15
35.69	5	10	15

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรในการทดลองสำหรับการขึ้นรูปแบบธรรมดา

ค่าคงที่ของแรงกด (N/mm <sup>2</sup> )	การขึ้นรูปแบบธรรมดา
19.62	ไม่ใช้แรงดันน้ำมันเข้าสู่ระบบ
35.69	ไม่ใช้แรงดันน้ำมันเข้าสู่ระบบ

### 3.4 ขั้นตอนการเก็บบันทึกข้อมูลการทดลอง

#### 3.4.1 การวัดแรงในการลากขึ้นรูป

ในการวัดแรงในการลากขึ้นรูป ที่สภาวะการทดลองต่างๆ เปรียบเทียบกัน เพื่อวิเคราะห์ถึงแรงที่กระทำกับแผ่นชิ้นงานในการทดลอง ที่มีต่อชิ้นงานที่ได้หลังจากการขึ้นรูป และประสิทธิภาพของการขึ้นรูปในสภาวะต่างๆ สำหรับการวัดค่าแรงกดในแนวแกนตั้ง ใช้เครื่องมือวัดชนิดวัดแรงกดอัดที่ต่อพ่วงเข้ากับเครื่องบีบอัด ในการวัดค่าจะได้แรงกดพื้นที่ทั้งหมดที่กดลงบนชิ้นงาน

แรงกดพื้นที่กระทำต่อแผ่นชิ้นงานคำนวณได้ตามทฤษฎีในบทที่ 2

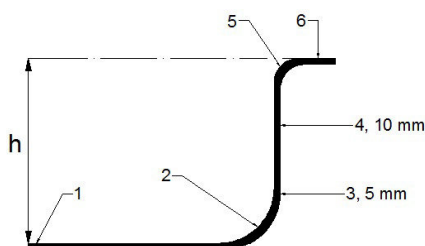
$$F_d = F_p - \left( \frac{\pi}{4} \times d_p^2 \times P \right)$$

#### 3.4.2 ชิ้นงานที่ได้หลังการลากขึ้นรูป

ทำการทดลองโดยการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกแบบมีปีก เพื่อพิจารณาถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการลากขึ้นรูปลึกลงได้แก่ รอยแตกที่ผนังของชิ้นงาน และ รอยย่นที่ปากถ้วย ด้วยใช้การตรวจสอบด้วยสายตา

#### 3.4.3 ความหนาของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป

หลังจากการทดลองการขึ้นรูปที่สภาวะตามที่กำหนด แล้วจึงทำการวัดความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน ในจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงาน โดยใช้ไมโครคาร์ิปเปอร์วัดความหนาของแผ่นชิ้นงานในการทดสอบ และ ชิ้นงานหลังการขึ้น ภาพที่ 3.31 ตำแหน่งของการวัดความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป



ภาพที่ 3.31 ตำแหน่งของการวัดความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป [11]

ในภาพที่ 3.31 ตำแหน่งสำหรับการวัดความหนาที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงาน หลังการลากขึ้นรูป โดย ตำแหน่งที่ 1 คือ บริเวณกึ่งกลางของก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 คือ บริเวณมุมพื้นซ์ ตำแหน่งที่ 3 คือ บริเวณพื้นซ์โน้ต หรือ บริเวณความสูง 5 มิลลิเมตรจากก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 4 คือ บริเวณผนังถ้วย ด้านข้างส่วนบน หรือ บริเวณความสูง 10 มิลลิเมตรจากก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 5 คือ บริเวณมุมคady และ ตำแหน่งที่ 6 คือ บริเวณปีกถ้วย ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป จากการลากขึ้นรูปถูกรูปด้วยทรงกระบอกโดยทั่วไป สอดคล้องกับงานวิจัยของพงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์ และวารุณี เปรमानนท์ ที่ทำการวัดความหนาของชิ้นงานในตำแหน่งกึ่งกลางก้นถ้วย, มุมพื้นซ์ เนื้อส่วนโค้งของมุมพื้นซ์ (Punch Nose) แต่เนื่องจากงานวิจัยดังกล่าวเป็นการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกแบบไม่มีปีก หลังจากเนื้อส่วนโค้งแล้วจึงทำการวัดตามระยะความสูงของถ้วย [10-28]

#### 3.4.4 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

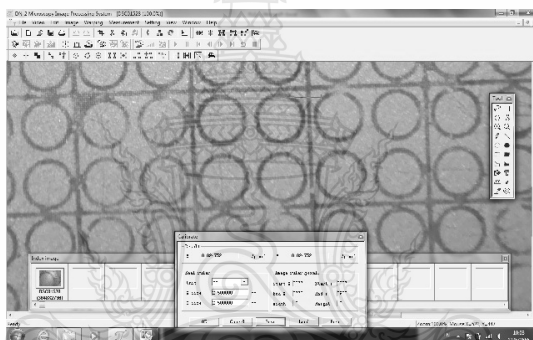
1) ใช้กล้อง Microscope ที่มีความละเอียดสูง ประกอบร่วมกับคอมพิวเตอร์ปรับโฟกัสตามลักษณะชิ้นทดสอบ ทำการถ่ายภาพขนาดกริดมาตรฐานก่อนทำการขึ้นรูป ที่ระยะโฟกัสเดียวกัน ชิ้นงานทดลอง เพื่อทำการกำหนดให้เป็นขนาด อ้างอิงในโปรแกรม สำหรับใช้ในการวัดขนาดวงกลมกริดที่เปลี่ยนไป



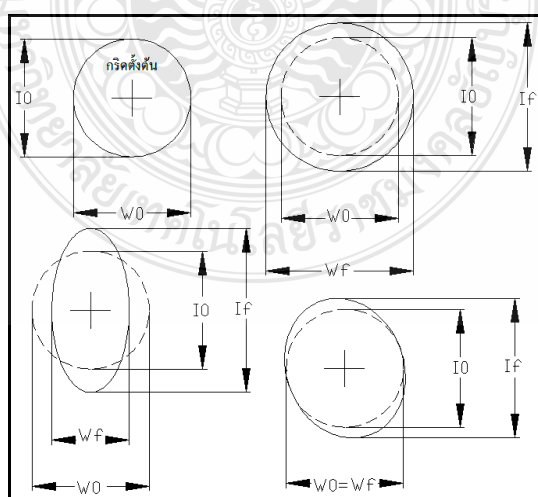
2) ใช้กล้อง Microscope ที่มีความละเอียดสูง ประกอบร่วมกับคอมพิวเตอร์ ปรับโฟกัสตามลักษณะชิ้นทดสอบ โดยให้ขณะที่ถ่ายภาพ พื้นผิวของแผ่นทดสอบที่จะทำการถ่ายภาพจะต้องได้รับการปรับให้ขนานกับหน้ากล้อง Microscope โดยให้ระยะโฟกัสที่ทำการถ่ายภาพกริด นั้นจะต้องเท่ากันในทุกชิ้นงานทดลอง

3) เลือกกริดวงกลมที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของวงกลมกริด เป็นวงรีในแต่ละชิ้นการทดสอบแล้ว นำมาสร้างเส้นอ้างอิงในแนวแกนตั้งและแนวนอน

4) ทำการวัดขนาดกริดด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม Dcal Image Processing ดังที่แสดงในภาพที่ 3.27 การใช้โปรแกรม Dcal Image Processing วัดขนาดกริดในแนวตั้งและแนวนอนแล้วนำค่าที่ได้มาทำการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของความเครียดหลักและเปอร์เซ็นต์ของความเครียดหลัก



ภาพที่ 3.32 การวัดขนาดกริดวงกลมด้วยโปรแกรม Dcal Image Processing



ภาพที่ 3.33 การวัดอัตราความเครียดหลักและอัตราความเครียดตรง [26]

4) อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป เกิดจากการคำนวณหาอัตราส่วนของรูปร่างวงกลมกริดที่เปลี่ยนตามแนวแกน ได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$\text{ความเครียดหลัก (Major Strain)} = \frac{(\text{ความยาวแกนหลักที่เปลี่ยนไป} - \text{ความยาวแกนหลักเดิม})}{\text{ความยาวแกนหลักเดิม}}$$

$$\text{ความเครียดรอง (Minor Strain)} = \frac{(\text{ความยาวรองหลักที่เปลี่ยนไป} - \text{ความยาวแกนรองเดิม})}{\text{ความยาวแกนหลักเดิม}}$$

โดย I0 คือ ความยาวแกนหลักเดิม

If คือ ความยาวแกนหลักที่เปลี่ยนไป

W0 คือ ความยาวแกนหลักเดิม

Wf คือ ความยาวรองหลักที่เปลี่ยนไป

5) นำความเครียดหลัก (Major Strain) และความเครียดรอง (Minor Strain) มาพล็อตกราฟในโปรแกรม Excel



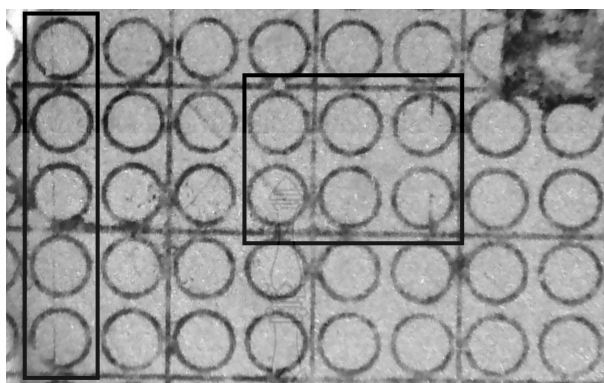
(ก) ลักษณะของกริดวงกลมก่อนการขึ้นรูป

(ข) ลักษณะของกริดวงกลมที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหลังจากการขึ้นรูป

ภาพที่ 3.34 ลักษณะของกริดวงกลมก่อนและที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหลังจากการขึ้นรูป

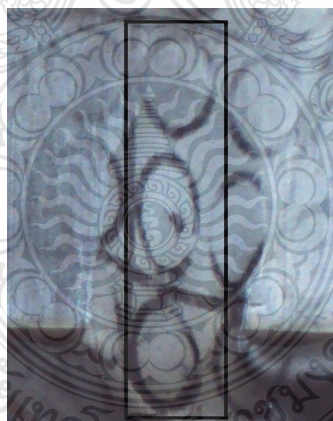
1. ตำแหน่งของการวัดกริด

- ตำแหน่งของกันถ้วย



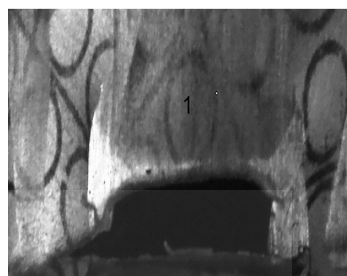
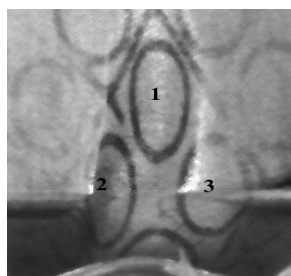
ภาพที่ 3.35 กริดวงกลมที่ทำการวัดขนาดหลังการขึ้นรูปในตำแหน่งกันถ้วยบริเวณกึ่งกลางและขอบถ้วย

- ตำแหน่งผนังด้านข้าง



ภาพที่ 3.36 กริดวงกลมที่ทำการวัดในตำแหน่งผนังถ้วยด้านข้างบริเวณมุมพื้นที่ กึ่งกลางและมุมตาย

- ลักษณะการฉีกขาดที่ผิวชิ้นงาน



ภาพที่ 3.37 กริดวงกลมซึ่งทำการวัดในบริเวณที่เกิดการฉีกขาดบนผิวชิ้นงาน

### 3.5 การเปรียบเทียบสรุปผลการทดลอง

1) เปรียบเทียบแรงกดพื้นซ์โดยรวม ที่กระทำต่อชิ้นงานในการลากขึ้นรูปลึกลับแบบปกติ กับการลากขึ้นรูปลึกลับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 5, 10 และ 15 MPa ตามระยะความลึกของการลากขึ้นรูป

2) เปรียบเทียบแรงกดชิ้นงาน  $19.62$  และ  $35.69 \text{ N/mm}^2$  ที่กระทำต่อชิ้นงานในการลากขึ้นรูปลึกลับแบบปกติ กับการลากขึ้นรูปลึกลับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 5, 10 และ 15 MPa ตามระยะความลึกของการลากขึ้นรูป

3) เปรียบเทียบชิ้นงานหลังการขึ้นรูปโดยการลากขึ้นรูปลึกลับแบบปกติ กับการลากขึ้นรูปลึกลับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ที่แรงดันน้ำมัน 5, 10 และ 15 MPa และแรงกดชิ้นงาน  $19.62$  และ  $35.69 \text{ N/mm}^2$  ตามระยะความลึกของการลากขึ้นรูป โดยพิจารณาจากปัญหารอยแตกกับ รอยย่นที่ปากถ้วยของชิ้นงาน

4) เปรียบเทียบความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยพิจารณาถึงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงาน และเปรียบเทียบความเครียดที่เกิดขึ้นกับผิวชิ้นงาน โดยการวัดขนาดของกริดแล้วพอร์ดลงบน แผ่นภาพซีดจำกัดในการขึ้นรูป เปรียบเทียบผลดังต่อไปนี้

1. เปรียบเทียบความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูประหว่างการลากขึ้นรูปลึกลับแบบปกติ กับการลากขึ้นรูปลึกลับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ที่แรงดันน้ำมัน 5, 10 และ 15 MPa ด้วยแรงกดชิ้นงาน  $19.62$  และ  $35.69 \text{ N/mm}^2$

2. เปรียบเทียบความเครียดที่ผิวชิ้นงานระหว่างการลากขึ้นรูปลึกลับแบบปกติ กับการลากขึ้นรูปลึกลับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ที่แรงดันน้ำมัน 5, 10 และ 15 MPa ด้วยแรงกดชิ้นงาน  $19.62$  และ  $35.69 \text{ N/mm}^2$

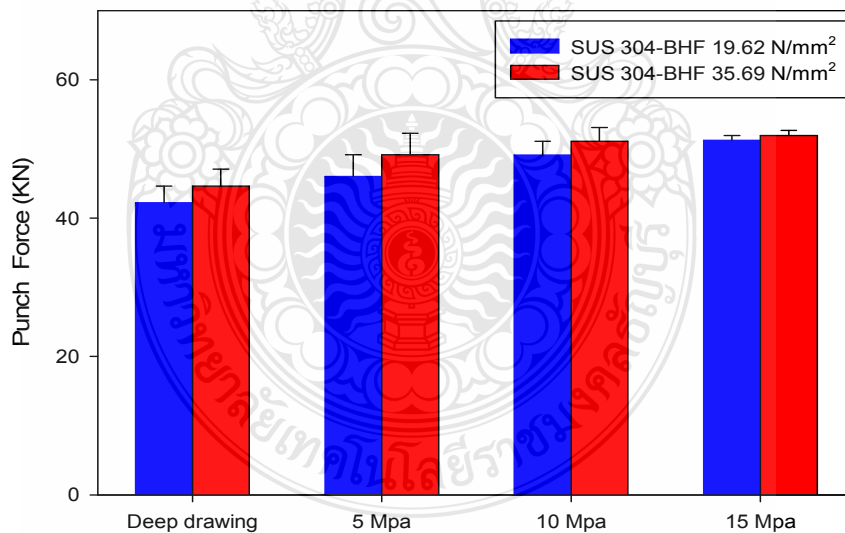
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยเรื่องอิทธิพลในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแรงในการลากขึ้นรูป และแรงกดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนการ Hydrodynamic Deep Drawing ที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงาน สำหรับบทนี้ผู้วิจัยขอเสนอผลการวิจัยดังหัวข้อต่อไปนี้

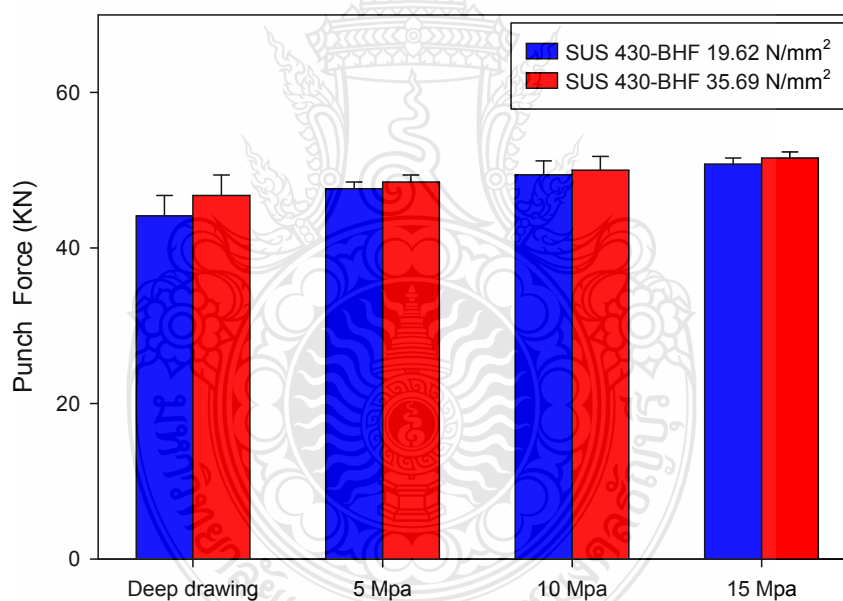
- 1) อิทธิพลของแรงลากขึ้นรูปที่มีผลต่อชิ้นงานในการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก
- 2) อิทธิพลแรงกดชิ้นงานที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก
- 3) เปรียบเทียบชิ้นงานหลังการขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก

#### 4.1 อิทธิพลของแรงลากขึ้นรูปที่มีผลต่อชิ้นงานในการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก



ภาพที่ 4.1 แรงลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก

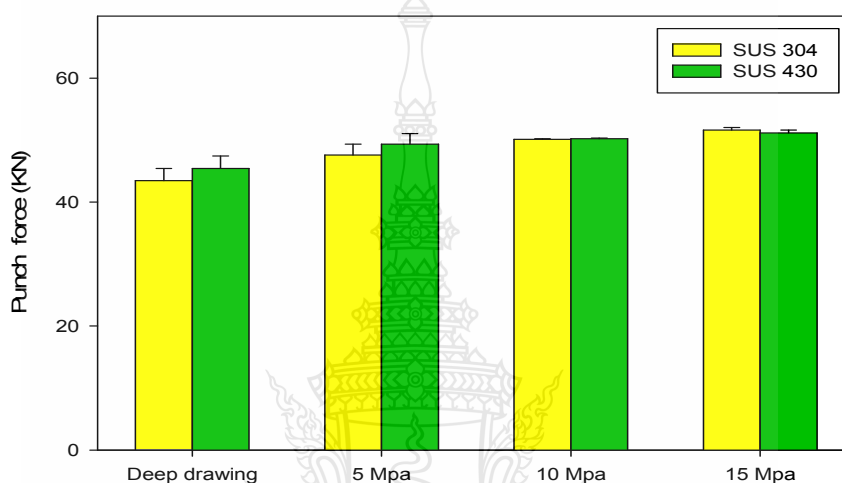
จากภาพที่ 4.1 แสดงแรงลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิก ด้วยแรงกดขึ้นงานที่ แรงกด  $19.62 \text{ N/mm}^2$  และ  $35.69 \text{ N/mm}^2$  ผลการทดลองพบว่า การลากขึ้นรูปแบบปกติ ที่แรงกดขึ้นงาน  $19.62 \text{ N/mm}^2$  มีค่าเฉลี่ย  $42.22 \text{ kN}$  ที่แรงกด  $35.69 \text{ N/mm}^2$  ใช้แรงลากขึ้นรูป มีค่าเฉลี่ย  $44.67 \text{ kN}$  เมื่อทดลองขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิก ด้วยแรงดันน้ำมันเป็น  $5 \text{ MPa}$  แรงลากขึ้นรูปที่แรงกดขึ้นงาน  $19.62 \text{ N/mm}^2$  มีค่าเฉลี่ย  $46.05 \text{ kN}$  ที่แรงกด  $35.69 \text{ N/mm}^2$  มีค่าเฉลี่ย  $49.17 \text{ kN}$  และในการทดลองได้ลองเพิ่มแรงดันน้ำมัน  $10$  และ  $15 \text{ MPa}$  ที่แรงกดขึ้นงาน  $19.62 \text{ N/mm}^2$  มีค่าเฉลี่ย  $49.14$  และ  $51.24 \text{ kN}$  ตามลำดับ และที่แรงกด  $35.69 \text{ N/mm}^2$  มีค่าเฉลี่ย  $51.12$  และ  $52.97 \text{ kN}$  ตามลำดับ สรุปแรงลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 แบบปกติใช้แรงการลากน้อยกว่าการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิก และในการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิก เมื่อเพิ่มแรงดันน้ำมันในการขึ้นรูป ส่งผลให้แรงลากขึ้นรูปมีค่าเพิ่มขึ้น [6] และที่แรงดันน้ำมัน  $15 \text{ MPa}$  ใช้แรงลากขึ้นรูปมีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด



ภาพที่ 4.2 แรงลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิก

จากภาพที่ 4.2 แสดงแรงลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิก ด้วยแรงกดขึ้นงานที่ แรงกด  $19.62 \text{ N/mm}^2$  และ  $35.69 \text{ N/mm}^2$  ผลการทดลองพบว่า การลากขึ้นรูปแบบปกติใช้แรงการลากน้อยที่สุด มีค่าเฉลี่ย  $44.10 \text{ kN}$  ที่แรงกดขึ้นงาน

19.62 N/mm<sup>2</sup> และที่แรงกด 35.69 N/mm<sup>2</sup> ใช้แรงการลากขึ้นรูป ค่าเฉลี่ย 46.75 kN เมื่อทดลองขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ที่แรงดันน้ำมัน 5,10 และ 15 MPa ส่งผลให้แรงการลากขึ้นรูปมีค่าเพิ่มขึ้น ที่แรงกดขึ้นงาน 19.62 N/mm<sup>2</sup> มีค่าเฉลี่ย 49.34, 51.12 และ 50.8 kN ตามลำดับ และที่แรงกด 35.69 N/mm<sup>2</sup> มีค่าเฉลี่ย 49.34, 49.34 และ 51.56 kN ตามลำดับ และที่แรงดันน้ำมัน 15 MPa ใช้แรงการลากขึ้นรูปมีค่าเฉลี่ยสูงสุด



ภาพที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยแรงการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430 ในการขึ้นรูปแบบปกติด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก

จากภาพที่ 4.3 แสดงค่าเฉลี่ยแรงการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430 ในการขึ้นรูปแบบปกติด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa ผลการทดลองพบว่า การลากขึ้นรูปแบบปกติใช้แรงการลากน้อยกว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก โดยในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ใช้แรงการลากขึ้นรูปค่าเฉลี่ย 43.45 kN สำหรับ SUS 430 ใช้แรงการลากขึ้นรูปค่าเฉลี่ย 45.43 kN และในการทดลองขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมันเป็น 10 และ 15 MPa แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ใช้แรงการลากขึ้นรูปมีค่าเฉลี่ย 50.13 และ 50.23 kN ตามลำดับ ส่วนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ใช้แรงการลากขึ้นรูปมีค่าเฉลี่ย 51.61 และ 51.17 kN ตามลำดับ

จากผลการทดลองข้างต้น เป็นการศึกษาอิทธิพลของแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปเล็ก ที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมในการขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ในสถานะของแรงดันน้ำมันและแรงกดขึ้นงานที่แตกต่างกัน การลากขึ้นรูปแบบปกติใช้แรงในการ

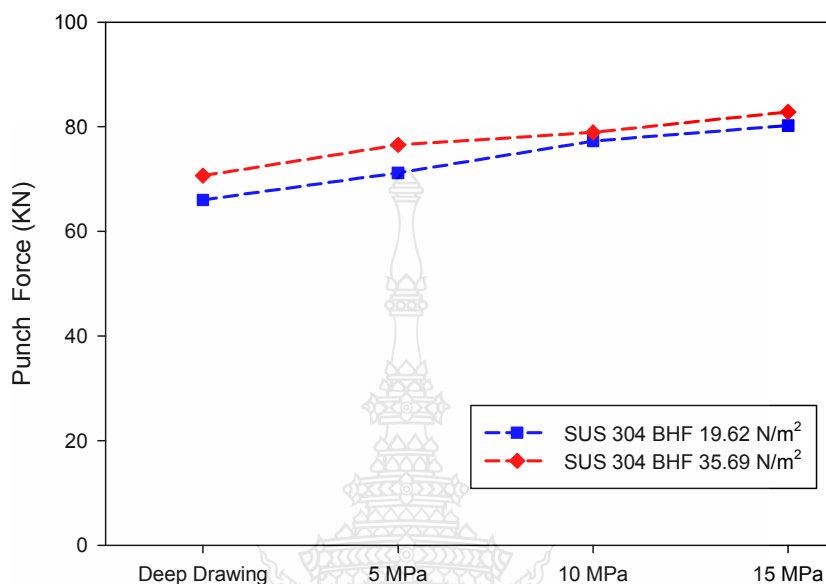
ลากขึ้นรูป มีค่าเฉลี่ย 44.44 kN และการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa ใช้แรงลากขึ้นรูป มีค่าเฉลี่ย 48.48 kN ซึ่งค่าเฉลี่ยแรงในการลากขึ้นรูปมากกว่าการลากขึ้นรูปแบบปกติ วิเคราะห์ผลได้ว่า เป็นเพราะภายในห้องแม่พิมพ์คายของการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก มีน้ำมันบรรจุอยู่ ซึ่งทำหน้าที่รองรับชิ้นงานระหว่างผิวคายกับผิวนอกของชิ้นงาน รองรับแรงกระทำของพื้นที่เคลื่อนที่ลงมาแทนที่ปริมาตรน้ำมันภายในห้องแม่พิมพ์คาย และพื้นที่ภายในห้องแม่พิมพ์คายจะลดลงตามการเคลื่อนที่ของพื้นที่เคลื่อนที่ลงมา ส่งผลแรงดันภายในห้องแม่พิมพ์คายเพิ่มสูงขึ้น และแรงดันภายในแม่พิมพ์คายเป็นแรงที่ต้านการเคลื่อนที่ของพื้นที่ด้วย และในการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมันเป็น 10 และ 15 MPa พบว่า แรงดันน้ำมันที่เพิ่มขึ้นตาม ส่งผลให้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้นด้วย เป็นผลเนื่องจากแรงกดพื้นที่พยายามเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่ของพื้นที่ และทำให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ของพื้นที่เพิ่มขึ้นด้วย [23-24] โดยสภาวะดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lihui Lang [20] ทำการศึกษาอิทธิพลของแรงดันของเหลวภายในแม่พิมพ์ ที่มีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูปอีกด้วย การนำผลศาสตร์ของไหลหรือการเคลื่อนที่ของของเหลว เข้ามาช่วยในกระบวนการลากขึ้นรูปลึก อลูมิเนียมผสมเกรด A16016-T4 และแรงต้านแรงกดพื้นที่จากแรงดันของเหลว นั้น เป็นตัวแปรที่มีส่วนสำคัญต่อชิ้นงานที่ได้หลังจากการขึ้นรูป สำหรับการทดลองขึ้นรูปกับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430 ผลปรากฏว่า การลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ทุกกรณี ใช้แรงในการลากขึ้นรูปมากกว่าแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 สาเหตุเพราะ แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 มีอัตราการต้านแรงการเปลี่ยนรูปร่างมากกว่าแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ดูได้จากตารางผลการทดลองคุณสมบัติทางกลของวัสดุตามตารางที่ 3.3

#### 4.2 อิทธิพลแรงกดชิ้นงานที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก

จากภาพที่ 4.4 แสดงค่าแรงกดพื้นที่สูงสุด ในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ที่แรงกดชิ้นงาน  $19.62 \text{ N/mm}^2$  และ  $35.69 \text{ N/mm}^2$  ในการขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ผลการทดลองพบว่า การขึ้นรูปแบบปกติใช้แรงกดพื้นที่สูงสุด ที่แรงกดชิ้นงาน  $19.62 \text{ N/mm}^2$  มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 66.00 kN และที่แรงกดชิ้นงาน  $35.69 \text{ N/mm}^2$  ใช้แรงกดพื้นที่สูงสุดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 70.64 kN และแรงกดพื้นที่สูงสุดในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ที่แรงดันน้ำมัน 5, 10 และ 15 MPa มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ที่แรงกดชิ้นงาน  $19.62 \text{ N/mm}^2$  ใช้แรงกดพื้นที่สูงสุดเท่ากับ 71.18, 77.24 และ 80.23 kN ตามลำดับ และที่แรงกดชิ้นงาน  $35.69 \text{ N/mm}^2$  ใช้แรงกดพื้นที่

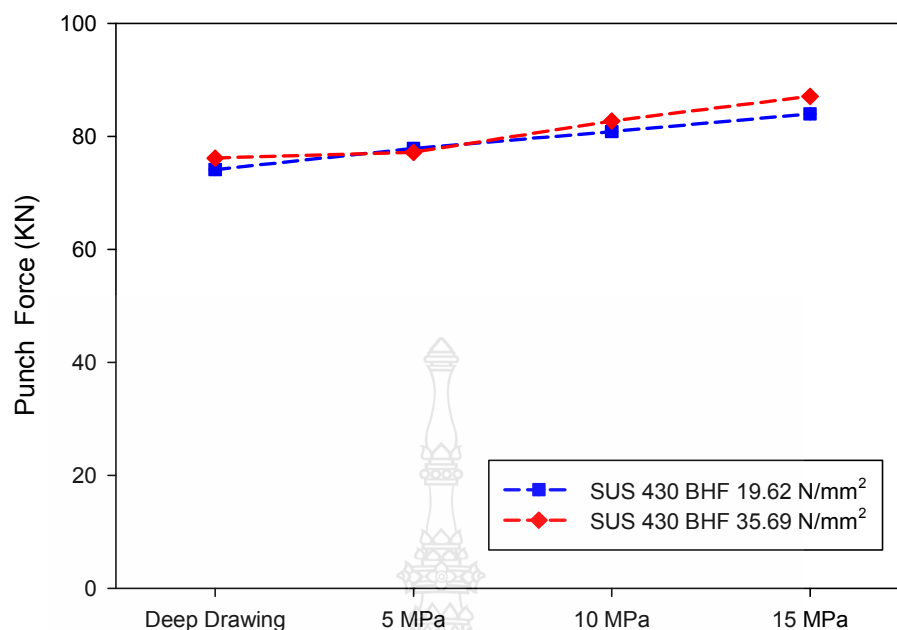


สูงสุด เท่ากับ 76.51, 78.89 และ 82.83 kN ตามลำดับ ซึ่งที่แรงดันน้ำมัน 15 MPa ใช้แรงกดพื้นที่สูงสุด มีค่าสูงที่สุด



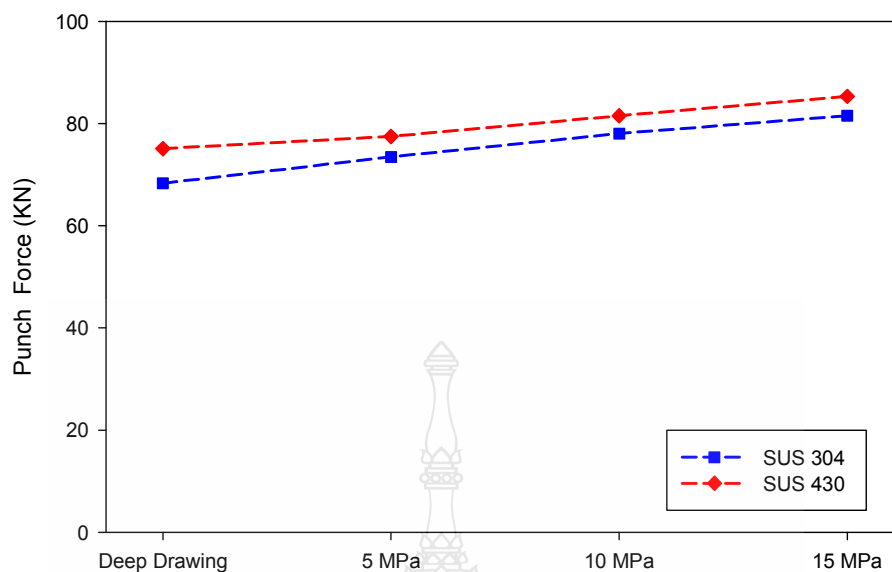
ภาพที่ 4.4 ค่าแรงกดพื้นที่สูงสุด ในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ขึ้นรูปแบบปกติ กับด้วยกระบวนการ ไฮดรอไดนามิก

จากภาพที่ 4.5 แสดงค่าแรงกดพื้นที่สูงสุด ในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm<sup>2</sup> และ 35.69 N/mm<sup>2</sup> ในการขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการ ไฮดรอไดนามิก ผลการทดลองพบว่า การขึ้นรูปแบบปกติใช้แรงกดพื้นที่สูงสุดมีค่าเฉลี่ยน้อยสุด เท่ากับ 74.10 kN ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm<sup>2</sup> และที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm<sup>2</sup> ใช้แรงกดพื้นที่ สูงสุดมีค่าเฉลี่ยน้อยสุด เท่ากับ 76.13 kN และแรงกดพื้นที่สูงสุดในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ ไฮดรอไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 5, 10 และ 15 MPa มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ใช้แรงกดพื้นที่สูงสุด เท่ากับ 77.82, 80.82 และ 83.95 kN ตามลำดับ ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm<sup>2</sup> และที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm<sup>2</sup> ใช้แรงกดพื้นที่สูงสุด เท่ากับ 77.14, 82.72 และ 87.06 kN ตามลำดับ และที่แรงดันน้ำมัน 15 MPa ใช้แรงกดพื้นที่สูงสุด มีค่าสูงสุด



ภาพที่ 4.5 ค่าแรงกดพื้นที่สูงสุด ในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ขึ้นรูปแบบปกติ กับด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิก

จากภาพที่ 4.6 แสดงค่าแรงกดพื้นที่สูงสุด ในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิก พบว่า ในการลากขึ้นรูปแบบปกติ แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430 ใช้แรงกดพื้นที่สูงสุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 68.32 และ 75.11 kN ตามลำดับ และการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิก ที่แรงดันน้ำมัน 5 Mpa มีค่าเฉลี่ยแรงกดพื้นที่สูงสุด เท่ากับ 73.48 และ 77.48 kN ตามลำดับ สังเกตเห็นว่าแรงกดพื้นที่สูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ทั้งการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430 และพบว่าการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ใช้แรงกดพื้นที่สูงสุด มากกว่าแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ทุกกรณี และในการทดลองขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิก ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมันเป็น 10 และ 15 MPa ส่งผลให้แรงกดพื้นที่สูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยการขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ใช้แรงกดพื้นที่สูงสุด มีค่าเฉลี่ย 78.06 และ 81.53 kN ตามลำดับ และ การขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ใช้แรงกดพื้นที่สูงสุดมีค่าเฉลี่ย 81.54 และ 85.32 kN ตามลำดับ



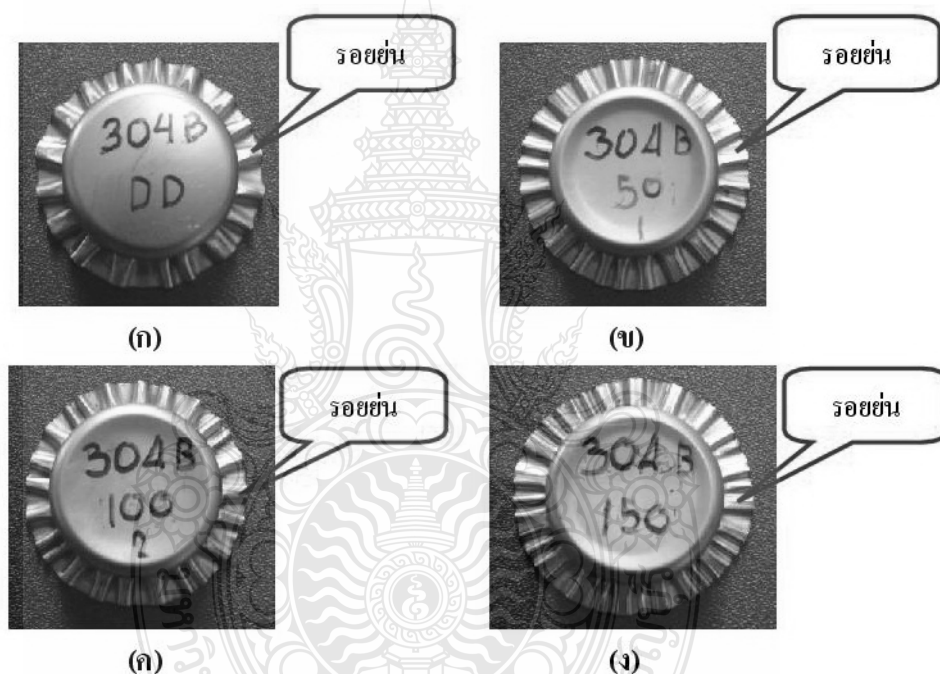
ภาพที่ 4.6 ค่าแรงกดพื้นที่สูงสุด ในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430 ขึ้นรูปแบบปกติด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก

จากผลการทดลองข้างต้น เป็นการศึกษาอิทธิพลของแรงกดขึ้นงานที่มีผลต่อคุณภาพขึ้นงานแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมในการขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ในสภาวะของแรงดันน้ำมันและแรงกดขึ้นงานที่แตกต่างกัน ในการลากขึ้นรูปแรงกดขึ้นงานมีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูป เมื่อเพิ่มแรงกดขึ้นงานเพิ่มขึ้นจาก  $19.62 \text{ N/mm}^2$  เป็น  $35.69 \text{ N/mm}^2$  มีผลทำให้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้น[31,32] ทุกกรณี สาเหตุเกิดจากแรงกดขึ้นงานที่เพิ่มสูงขึ้น[31] ทำให้โลหะเกิดการไหลตัวได้น้อย ส่งผลให้รอยย่นลดลง เป็นเพราะแผ่นขึ้นงานมีอัตราการครอ (Draw) ลดลง และการดึงยึด (Starching) มีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ความเค้นอัตรอบแนวแกนมีค่าลดลง ซึ่งส่งผลให้ไม่เกิดรอยย่น จากการเปรียบเทียบแรงกดพื้นที่ในกระบวนการลากขึ้นรูปปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430 พบว่าแรงในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 สูงกว่าแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ทุกสภาวะของการขึ้นรูป เป็นเพราะความสามารถในการต้านทานแรงในการเปลี่ยนรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 มีค่าสูงกว่าแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ดังตารางที่ 3.3 แต่เมื่อเปรียบเทียบตามสภาวะในกระบวนการขึ้นรูปพบว่าในกรณีของกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกใช้แรงในการขึ้นรูปสูงกว่า กระบวนการขึ้นรูปแบบปกติ เนื่องจากมีแรงดันน้ำมันมาเกี่ยวข้อง ทำให้เกิดแรงต้านขณะที่พื้นที่ลดลงบนขึ้นงาน จึงส่งผลให้แรงในการลากขึ้นรูปสูงเพิ่มตาม

### 4.3 ชิ้นงานหลังการขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก

#### 4.3.1 ชิ้นงานที่ได้หลังการลากขึ้นรูป

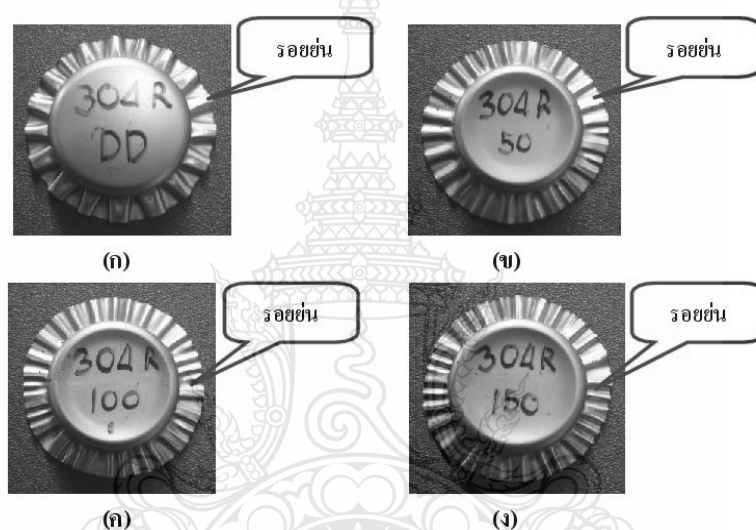
จากภาพที่ 4.7 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ที่แรงกดขึ้นรูป  $19.62 \text{ N/mm}^2$  ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก จะเห็นชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ โดยไม่เกิดการฉีกขาด เกิดรอยย่นที่ปีกชิ้นงาน แต่การขึ้นรูปแบบปกติมีความสูงของรอยย่นมากกว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ที่แรงคั้นน้ำมัน 5 MPa และในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกได้ทดลองเพิ่มแรงคั้นน้ำมัน 10 และ 15 MPa เปรียบเทียบความสูงรอยย่นที่ปากถ้วยชิ้นงาน ไม่มีความแตกต่างกัน



- (ก) การลากขึ้นรูปแบบปกติ
- (ข) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก แรงคั้น 5 MPa
- (ค) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก แรงคั้น 10 MPa
- (ง) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก แรงคั้น 15 MPa

ภาพที่ 4.7 ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ที่แรงกดขึ้นรูป  $19.62 \text{ N/mm}^2$  ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก

ดูจากภาพที่ 4.8 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ที่แรงกดขึ้นงาน  $35.69 \text{ N/mm}^2$  ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิก จะเห็นชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ทุกสภาวะการขึ้นรูป โดยไม่เกิดการฉีกขาด มีรอยย่นที่ปากถ้วยขึ้นงาน การขึ้นรูปแบบปกติมีความสูงของรอยย่นมากกว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิก ที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa และการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิก ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมันเป็น 10 และ 15 MPa เปรียบเทียบความสูงของรอยย่นที่ปากถ้วยขึ้นงาน เห็นรอยย่นเกิดขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบความสูงรอยย่นจากการขึ้นรูปที่แรงดันน้ำมัน 5, 10 และ 15 MPa ความสูงรอยย่นไม่มีความแตกต่างกัน

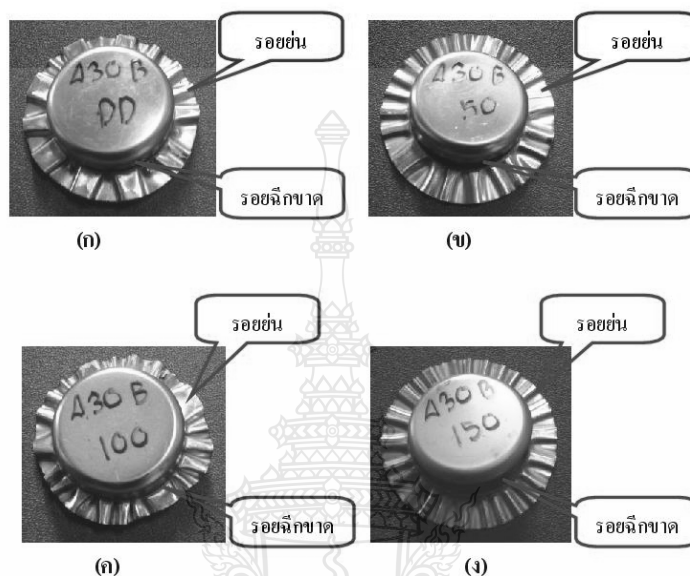


- (ก) การลากขึ้นรูปแบบปกติ
- (ข) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิก แรงดัน 5 Mpa
- (ค) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิก แรงดัน 10 Mpa
- (ง) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิก แรงดัน 15 Mpa

ภาพที่ 4.8 ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ที่แรงกดขึ้นงาน  $35.69 \text{ N/mm}^2$  ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิก

ดูจากภาพที่ 4.9 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ที่แรงกดขึ้นงาน  $19.62 \text{ N/mm}^2$  ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิก จะเห็นชิ้นงานไม่สามารถขึ้นรูปได้ เกิดการฉีกขาดที่บริเวณขอบคาน มีรอยย่นที่ปากถ้วยขึ้นงาน การขึ้นรูปแบบปกติมีความสูง

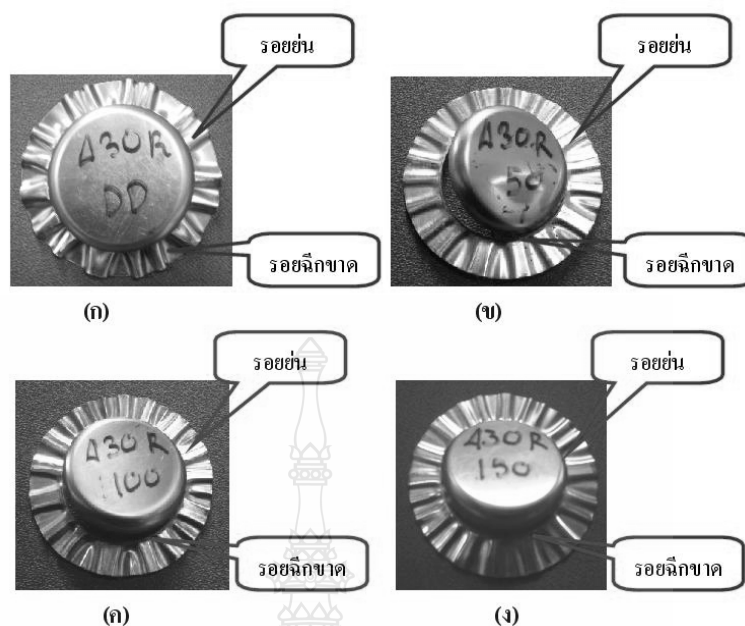
ของรอยร่นมากกว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa และในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมัน 10 และ 15 MPa เปรียบเทียบความสูงรอยร่นที่ปากถ้วยขึ้นงาน ไม่มีความแตกต่างกัน



- (ก) การลากขึ้นรูปแบบปกติ  
 (ข) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 5 MPa  
 (ค) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 10 MPa  
 (ง) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก แรงดัน 15 MPa

ภาพที่ 4.9 ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm<sup>2</sup> ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก

ดูจากภาพที่ 4.10 แสดงชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm<sup>2</sup> ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก จะเห็นชิ้นงานไม่สามารถขึ้นรูปได้ เกิดการฉีกขาดที่บริเวณขอบชาย มีรอยร่นที่ปากถ้วยขึ้นงาน ในการขึ้นรูปแบบปกติมีรอยร่นที่มีความสูงมากกว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa และในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกได้ทดลองเพิ่ม 10 และ 15 MPa เปรียบเทียบความสูงของรอยร่นที่ปากถ้วยขึ้นงาน ไม่มีความแตกต่างกัน



- (ก) การลากขึ้นรูปแบบปกติ
- (ข) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกแรงดัน 5 MPa
- (ค) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกแรงดัน 10 MPa
- (ง) การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกแรงดัน 15 MPa

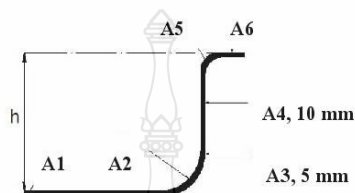
ภาพที่ 4.10 ชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm<sup>2</sup> ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิก

ในการทดลองขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430 ที่แรงกดแผ่นชิ้นงาน 19.62 และ 35.69 N/mm<sup>2</sup> พบว่า แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 มีความสูงของรอยย่นน้อยกว่าแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ซึ่งมีความสอดคล้องกับการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ตามตารางที่ 3.3 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 มีค่า R (R-Value หรือ Plastic Strain Ratio) สูงกว่าแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ทำให้อัตราการหดตัวรอบแนวแกนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 น้อยกว่าแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ส่งผลให้เกิดรอยย่นและความสูงที่น้อยกว่า ส่วนแรงกดชิ้นงานที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงาน พบว่าแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ไม่สามารถขึ้นรูปได้ทุกกรณี เกิดการฉีกขาดที่ขอบพื้นที่และผนังชิ้นงาน เนื่องจากความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างของแผ่น

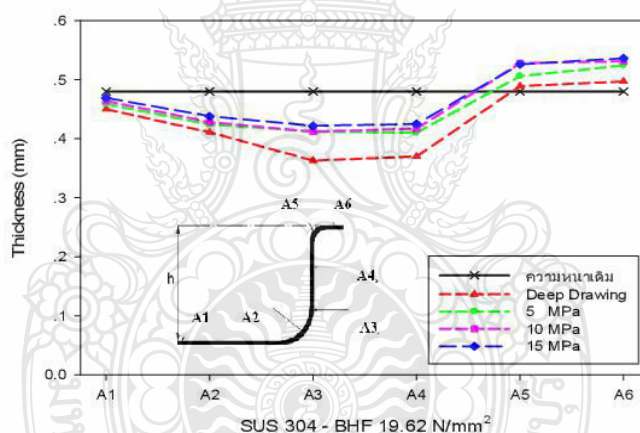
เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ต่ำ ส่วนในการขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 เมื่อเพิ่มแรงกดขึ้นงานสูงขึ้น ขึ้นงานไม่เกิดการฉีกขาด ความสูงของรอยย่นลดลงและน้อยกว่า

#### 4.3.2 แรงดันน้ำมันที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงาน

ชิ้นงานที่ผ่านการลากขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิก จะวัด 6 ตำแหน่ง ดังแสดงในภาพที่ 4.11 แสดงตำแหน่งของการวัดความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ณ ตำแหน่งต่างๆ



ภาพที่ 4.11 ตำแหน่งของการวัดความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป [11]

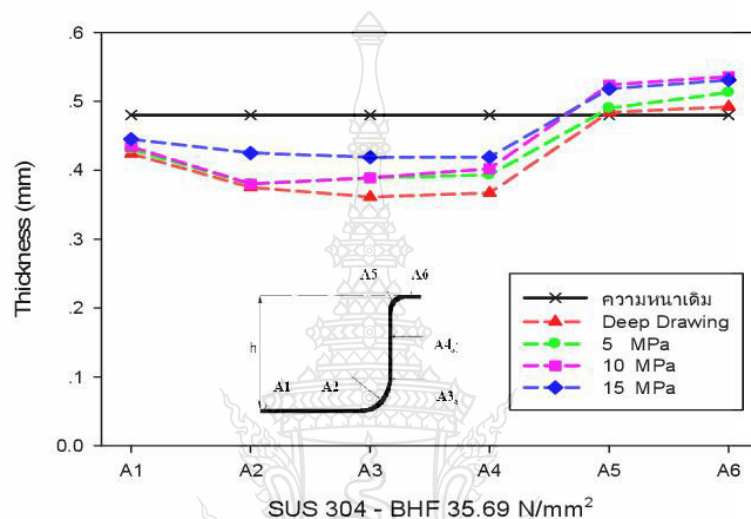


ภาพที่ 4.12 ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 หลังการขึ้นรูปที่แรงกดขึ้นงาน  $19.62 \text{ N/mm}^2$

ดูจากภาพที่ 4.12 แสดงค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 หลังการขึ้นรูป ที่แรงกดขึ้นงาน  $19.62 \text{ N/mm}^2$  ผลการทดลองพบว่า จุดที่ A1, A2, A3 และ A4 เป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยกว่าความหนาเดิม ส่วนที่จุด A5 และ A6 เป็นจุดที่มีความหนามากกว่าความหนาเดิม ในการทดลองลากขึ้นรูปแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.430 มิลลิเมตร และด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิกที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.456 มิลลิเมตร และในการ



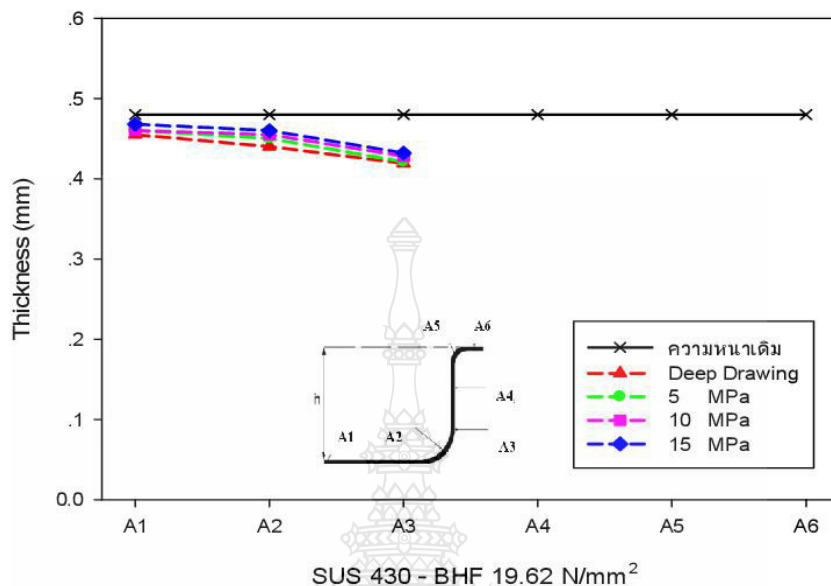
ทดลองการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมัน 10 และ 15 MPa ผลการทดลองพบว่า ที่แรงดันน้ำมัน 10 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.463 มิลลิเมตร ที่แรงดันน้ำมัน 15 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.469 มิลลิเมตร ซึ่งสรุปได้ว่าการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 15 MPa มีการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยที่สุด หรือเมื่อมีการเพิ่มแรงดันน้ำมัน จะทำให้ชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยลง [19]



ภาพที่ 4.13 ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 หลังการขึ้นรูปที่แรงกดชิ้นงาน  $35.69 \text{ N/mm}^2$

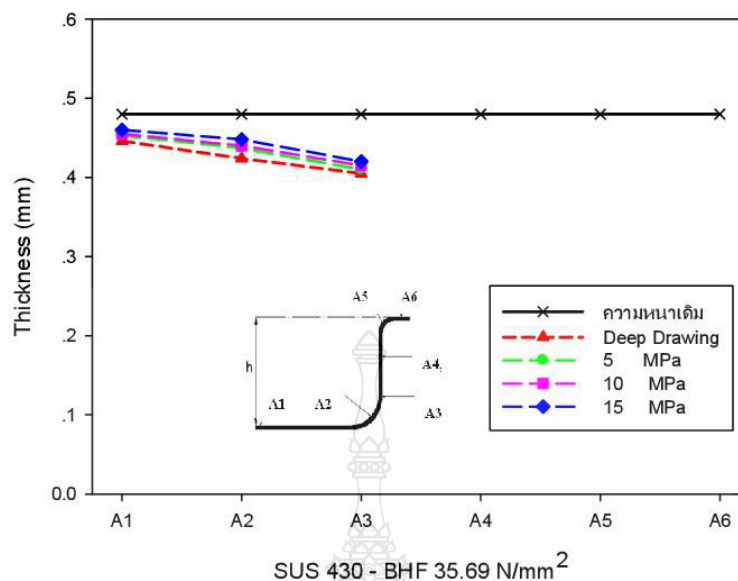
ดูจากภาพที่ 4.13 แสดงค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 หลังการขึ้นรูปที่แรงกดชิ้นงาน  $35.69 \text{ N/mm}^2$  ผลการทดลองพบว่า ที่จุด A2, A3 และ A4 เป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาต่ำกว่าความหนาเดิม ส่วนที่จุด A5 และ A6 เป็นจุดที่มีความหนามากกว่าความหนาเดิม ในการทดลองลากขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก การลากขึ้นรูปแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.417 มิลลิเมตร ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.433 มิลลิเมตร และในการทดลองการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมันเป็น 10 และ 15 MPa ผลการทดลองพบว่า ที่แรงดันน้ำมัน 10 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.444 มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่า ที่แรงดันน้ำมัน 15 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.460 มิลลิเมตร ซึ่งสรุปได้ว่าการลาก

ขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 15 MPa มีการเปลี่ยนแปลงความหนาที่น้อยที่สุด



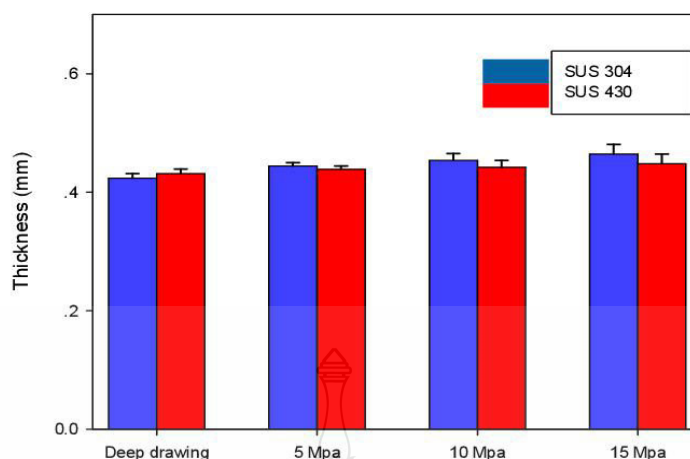
ภาพที่ 4.14 ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 หลังการขึ้นรูปที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm<sup>2</sup>

จากภาพที่ 4.14 แสดงค่าความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm<sup>2</sup> ผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ลากขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ไม่สามารถขึ้นรูปได้ตามกำหนด เกิดการฉีกขาด สามารถวัดความหนาได้ 3 จุด คือ จุดที่ 1 จุดที่ 2 และจุดที่ 3 และในการวัดความหนาการลากขึ้นรูปแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.43 มิลลิเมตร ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.44 มิลลิเมตร และในการทดลองการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมัน 10 และ 15 MPa ผลการทดลองพบว่า ที่แรงดันน้ำมัน 10 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.45 มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่า ที่แรงดันน้ำมัน 15 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.45 มิลลิเมตร ซึ่งสรุปได้ว่าการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 15 MPa มีการเปลี่ยนแปลงความหนาที่น้อยที่สุด



ภาพที่ 4.15 ค่าความหนาของชิ้นงานแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 หลังการขึ้นรูปที่แรงกดชิ้นงาน  $35.69 \text{ N/mm}^2$

จากภาพที่ 4.15 แสดงค่าความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 แรงกดชิ้นงาน  $35.69 \text{ N/mm}^2$  ผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ลากขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ไม่สามารถขึ้นรูปได้ตามกำหนด เกิดการฉีกขาด สามารถวัดความหนาได้ 3 จุด คือ จุดที่ 1 จุดที่ 2 และจุดที่ 3 และในการวัดความหนาการลากขึ้นรูปแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.425 มิลลิเมตร ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ที่แรงดันน้ำมัน 5 Mpa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.433 มิลลิเมตร และในการทดลองการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมัน 10 และ 15 MPa ผลการทดลองพบว่า ที่แรงดันน้ำมัน 10 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.437 มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงความหนามากกว่า ที่แรงดันน้ำมัน 15 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.443 มิลลิเมตร ซึ่งสรุปได้ว่าการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 15 MPa มีการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยที่สุด



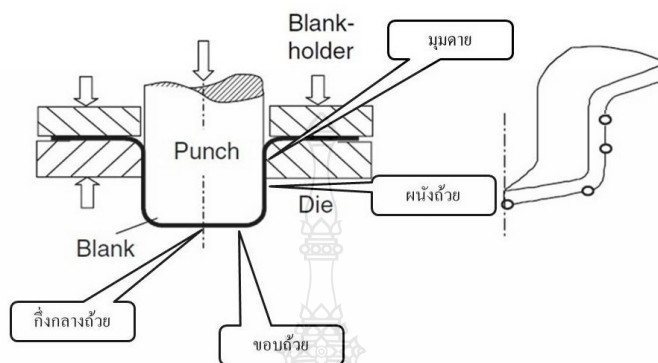
ภาพที่ 4.16 ค่าความหนาเฉลี่ยของชิ้นงานหลังการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก

จากภาพที่ 4.16 แสดงค่าความหนาเฉลี่ยของชิ้นงานหลังการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430 ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ผลการทดลองพบว่า การลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430 แบบปกติ มีค่าเฉลี่ย 0.42 และ 0.43 มิลลิเมตร ตามลำดับ การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 5 MPa มีค่าเฉลี่ย 0.44 และ 0.44 มิลลิเมตร ตามลำดับ สรุปได้ว่าการลากขึ้นรูปแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยความหนาน้อยกว่าการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก และในการทดลองการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ได้ทดลองเพิ่มแรงดันน้ำมันเป็น 10 และ 15 MPa ผลการทดลองพบว่า ที่แรงดันน้ำมัน 10 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.44 และ 0.45 มิลลิเมตร และ ที่แรงดันน้ำมัน 15 MPa มีค่าเฉลี่ยความหนา 0.45 และ 0.46 มิลลิเมตร ซึ่งสรุปได้ว่าการทดลองการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก เมื่อมีการเพิ่มแรงดันน้ำมันที่แรงดันน้ำมัน 15 MPa มีผลให้ความหนาชิ้นงานหลังการมีการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยที่สุด

#### 4.3.3 ความเครียดที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงาน

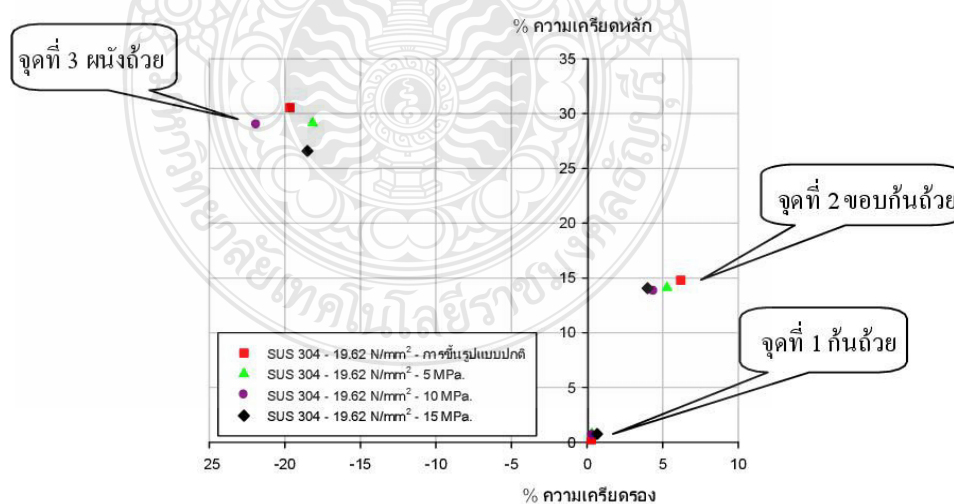
ความเครียดที่ผิวชิ้นงานจากการวัดขนาดกริดวงกลม ในตำแหน่งตามภาพที่ 4.17 แล้วคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริดวงกลมในแต่ละตำแหน่ง แล้วจึงคำนวณหาค่าเฉลี่ยของความเครียดในแต่ละตำแหน่ง จากข้อมูลการทดลองในภาคผนวก ก และผลการทดลองความเครียดสูงสุดที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นงาน คือจุดของผนังด้านข้างจนไปถึงมุมคาย ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองเป็นหลัก และในการทดลองปีกล้วยไม้วัดความหนา เพราะเกิดรอยย่น

ในทุกสภาวะจนไม่สามารถทำการวัดค่าความหนาได้ หลังจากนั้นจึงเขียนแผนภาพความเครียด (Strain Diagram) จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริดวงกลมสำหรับการเปลี่ยนแปลงที่จุดระนาบความเครียด (Plane Strain) และการเปลี่ยนรูปแนวเฉือน (Shear Deformation)



ภาพที่ 4.17 ตำแหน่งการวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริดวงกลม [13]

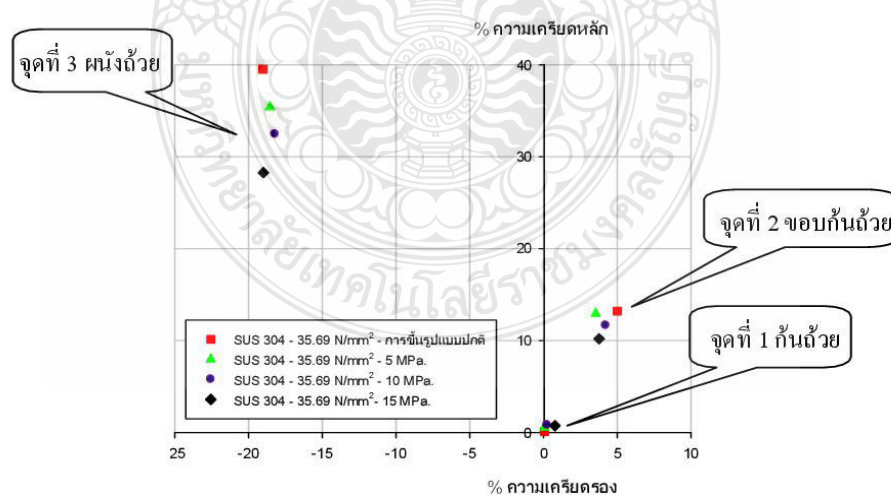
การวิเคราะห์เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ที่แรงดันแตกต่างกันของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ความหนา 0.48 มิลลิเมตร แรงกดแผ่นชิ้นงาน  $19.62 \text{ N/mm}^2$  ผลการทดลองเป็นดังภาพที่ 4.18



ภาพที่ 4.18 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน  $19.62 \text{ N/mm}^2$

ภาพที่ 4.18 แสดงการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลัก และความเครียดรองของชิ้นงานที่ได้จาก ขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุใน แนวแกนหลักและแกนรองของการขึ้นรูปแบบปกติ ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลักที่ 0.24 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 0.28 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลัก เท่ากับ 14.8 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 6.2 เปอร์เซ็นต์ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 30.54 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 19.65 เปอร์เซ็นต์ มีการยืดตัวของกริดวงกลมในแนวแกนหลัก สูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน ส่วนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ ไฮดรอลิกไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 5, 10 และ 15 MPa พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและ แกนรอง ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลัก 0.78, 0.64 และ 0.76 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียด รอง 0.31, 0.34 และ 0.66 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียด หลักเท่ากับ 14.10, 13.8 และ 14.06 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 5.28, 4.39 และ 4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 29.13, 28.98 และ 26.58 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 18.14, 21.88 และ 18.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีการยืดตัวของ กริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน

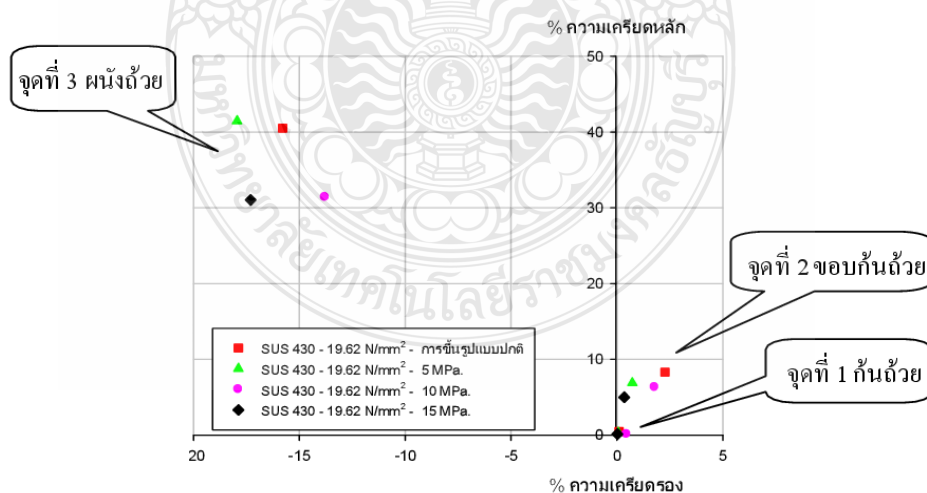
การวิเคราะห์เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานที่ขึ้น รูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ที่แรงดันแตกต่างกัน ของเหล็กกล้าไร้ สนิมเกรด 304 ความหนา 0.48 มิลลิเมตร แรงกดแผ่นชิ้นงาน  $35.69 \text{ N/mm}^2$  ผลการทดลองเป็นดังภาพ ที่ 4.19



ภาพที่ 4.19 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 การขึ้นรูปแบบปกติและ ด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน  $35.69 \text{ N/mm}^2$

ภาพที่ 4.19 แสดงการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลัก และความเครียดรองของชิ้นงานที่ได้จากขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและแกนรองของการขึ้นรูปแบบปกติ ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลักที่ 0.13 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 0.07 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 13.20 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 5 เปอร์เซ็นต์ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 39.51 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 19.01 เปอร์เซ็นต์ มีการยืดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน ส่วนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 5, 10 และ 15 MPa พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและแกนรอง ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลัก 0.56, 0.82 และ 0.74 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 0.76, 0.25 และ 0.77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 3.55, 11.66 และ 10.20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 12.94, 4.22 และ 3.78 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 35.40, 32.45 และ 28.72 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 18.53, 18.19 และ 17.02 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีการยืดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน

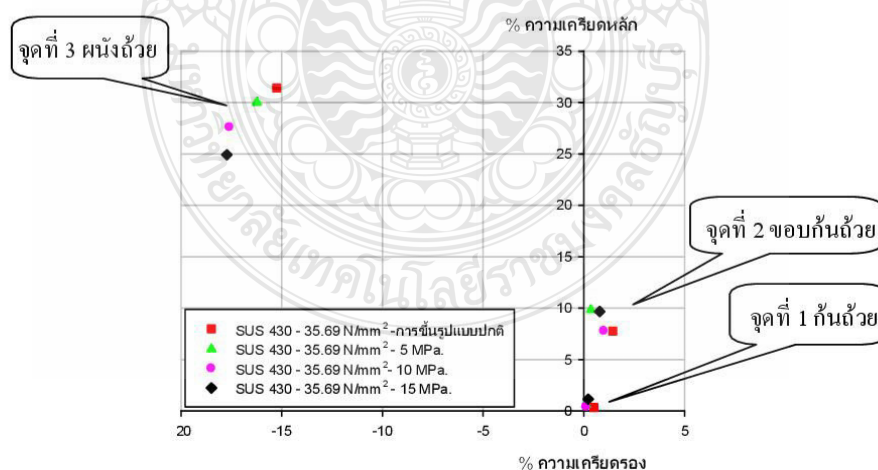
การวิเคราะห์เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ที่แรงดันแตกต่างกันของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 ความหนา 0.48 มิลลิเมตร แรงกดแผ่นชิ้นงาน  $19.62 \text{ N/mm}^2$  ผลการทดลองเป็นดังภาพที่ 4.20



ภาพที่ 4.20 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน  $19.62 \text{ N/mm}^2$

ภาพที่ 4.20 แสดงการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลัก และความเครียดรองของชิ้นงานที่ได้จากขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก พบว่าการยึดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและแกนรองของการขึ้นรูปแบบปกติ ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลักที่ 0.48 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 0.1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 8.32 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 2.27 เปอร์เซ็นต์ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 15.78 เปอร์เซ็นต์ มีการยึดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด ส่วนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 5, 10 และ 15 MPa พบว่าการยึดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและแกนรอง ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลัก 0.33, 0.14 และ 0.14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 0.68, 0.45 และ 0.24 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 6.88, 6.32 และ 5.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 0.73, 1.78 และ 0.35 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 41.44, 31.4 และ 31.04 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 17.94, 13.79 และ 17.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีการยึดตัวออกของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และชิ้นงานเกิดการฉีกขาด

การวิเคราะห์เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรองของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ที่แรงดันแตกต่างกัน ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 ความหนา 0.48 มิลลิเมตร แรงกดแผ่นชิ้นงาน  $35.69 \text{ N/mm}^2$  ผลการทดลองเป็นดังภาพที่ 4.21

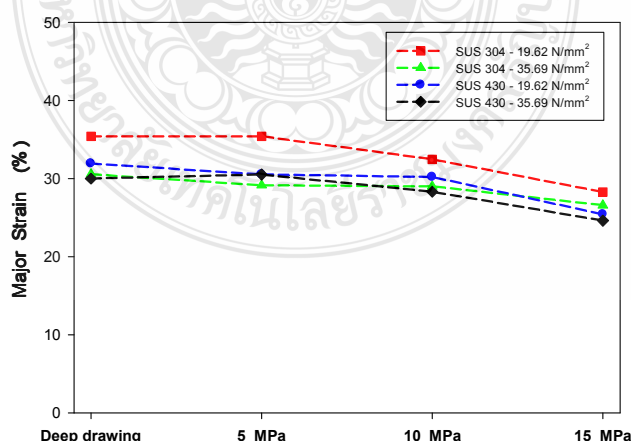


ภาพที่ 4.21 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 การขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก โดยใช้แรงกดชิ้นงาน  $35.69 \text{ N/mm}^2$

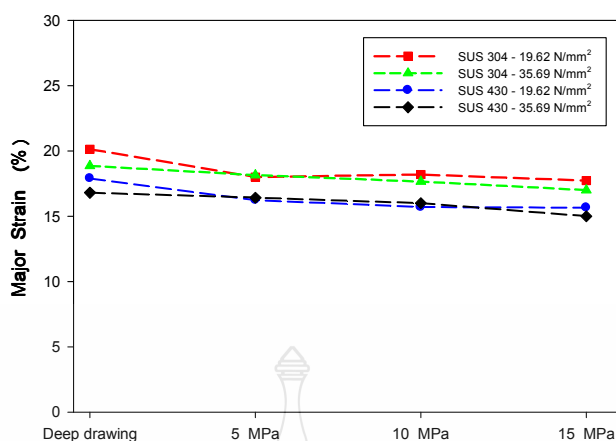


ภาพที่ 4.21 แสดงการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลัก และความเครียดรองของชิ้นงานที่ได้จากขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและแกนรองของการขึ้นรูปแบบปกติ ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลักที่ 0.34 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 0.49 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 7.76 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 1.43 เปอร์เซ็นต์ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 31.42 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดรอง 15.25 เปอร์เซ็นต์ มีการยืดตัวของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน ส่วนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่แรงดันน้ำมัน 5, 10 และ 15 MPa พบว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุในแนวแกนหลักและแกนรอง ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความเครียดหลัก 0.6, 0.39 และ 0.14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 0.1, 0.12 และ 0.21 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นบริเวณก้นถ้วย ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 9.83, 7.76 และ 9.67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 0.3, 0.99 และ 0.78 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความเครียดหลักเท่ากับ 30, 27.58 และ 24.91 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเครียดรอง 16.23, 17.58 และ 17.72 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีการยืดตัวของกริดวงกลมในแนวแกนหลักสูงสุด และพบรอยคอด ซึ่งเป็นบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน

จากผลการทดลองข้างต้น ได้ทำการเปรียบเทียบความเครียดหลักและความเครียดรองสูงสุดของกระบวนการขึ้นรูปแบบธรรมดากับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่แรงดันต่างกันของเหล็กกล้าไร้สนิม แรงกดชิ้นงานต่างกัน ผลการเปรียบเทียบดังภาพที่ 4.22 และ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบความเครียดหลักและความเครียดรองสูงสุดของกระบวนการขึ้นรูปแบบธรรมดากับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกที่แรงดันต่างๆ



ภาพที่ 4.22 เปรียบเทียบความเครียดหลักสูงสุดของกระบวนการขึ้นรูปแบบธรรมดากับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก



ภาพที่ 4.23 เปรียบเทียบความเครียดตรงสูงสุดของกระบวนการขึ้นรูปแบบธรรมดากับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก

จากข้อมูลข้างต้น เป็นการศึกษาถึงความสามารถในการขึ้นรูปของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430 ในการลากขึ้นรูปลึกลับแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก ในสภาวะแรงดันน้ำมันและแรงกดชิ้นงานที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบการขึ้นรูปแบบปกติและด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก สรุปได้ว่า ชิ้นงานที่ทำการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก มีการเปลี่ยนแปลงความหนา ความเครียดหลักและความเครียดรองน้อยกว่าชิ้นงานที่ลากขึ้นรูปแบบปกติ [34] และในการทดลองลากขึ้นรูป แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 เหมาะสมมากกว่าแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 เพราะว่าแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ไม่สามารถขึ้นรูปได้ มีการฉีกขาดเกิดขึ้น ทุกกรณีของการขึ้นรูป เนื่องจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 มีค่า  $n$  (Strain Hardening Exponent) น้อยกว่า SUS 304 ทำให้ไม่สามารถยืดขึ้นรูปได้ และแรงดันน้ำมันมีผลต่อความเครียดบนผิวชิ้นงาน จากผลการทดลองที่มีการเพิ่มแรงดันน้ำมันให้สูงขึ้น แนวโน้มของความเครียดหลักและความเครียดรองมีค่าลดลง สาเหตุจากแรงดันน้ำมันด้านแรงการเคลื่อนที่ของพื้นที่ผิวสัมผัสของปลายพื้นที่ มีการกระจายตัวของแรงพื้นที่อย่างสม่ำเสมอ และในทำนองเดียวกันเมื่อแรงกดชิ้นงานมีค่าต่ำลง จาก 35.69 เป็น 19.62 N/mm<sup>2</sup> ความเครียดที่ผิวชิ้นงานมีค่าน้อยลง สาเหตุเกิดจากแรงกดชิ้นงานไม่เพียงพอสำหรับการขึ้นรูป จึงทำให้เกิดการดรอป (Draw) และการดึงยืดขึ้นรูป (Stretching) ที่ไม่เพียงพอสำหรับการไหลตัวของโลหะ ส่งผลให้ความเค้นอัดรอบแนวแกนมีค่าสูง จึงทำให้เกิดรอยร่นเพิ่มมากกว่าแรงกดชิ้นงานที่ 35.69 N/mm<sup>2</sup> ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าแรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm<sup>2</sup> มีความเหมาะสมในการขึ้นรูปชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ที่สภาวะแรงดันน้ำมัน 15 MPa

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลองสำหรับการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ คือ แรงดันน้ำมัน แรงกด ชีงงาน และซึ่งมีผลต่อกระบวนการการขึ้นรูปด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว โดยทำการศึกษาดัง ผลกระทบต่อ แรงในการลากขึ้นรูปและแรงกดพื้นที่กระทำต่อชีงงาน คุณภาพของชีงงานหลังการ ขึ้นรูป สรุปการทดลองจากผลการศึกษาวิจัยในเรื่องอิทธิพลในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ทำการทดลองโดยการลากขึ้นรูปลึกรูปด้วยทรงกระบอกแบบมีปีก ตัวแปรในการทดลอง คือ แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430 ความหนา 0.48 mm แรงดัน น้ำมันภายในห้องแม่พิมพ์ควบคุมที่ 5, 10 และ 15 Mpa และแรงกดชีงงานสามระดับคือ 19.62 และ 35.69 N/mm<sup>2</sup> ศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อ แรงในการลากขึ้นรูปและแรงกดพื้นที่สูงสุดที่กระทำต่อ ชีงงาน ความหนาของชีงงานหลังการขึ้นรูป และความเครียดที่ผิวชีงงานหลังการขึ้นรูป สามารถ สรุป อิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ได้ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ดังต่อไปนี้

#### 5.1 สรุปการทดลอง

5.1.1 การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ใช้แรงลากขึ้นรูปมากกว่าการลากขึ้น รูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงดันน้ำมันในห้องแม่พิมพ์ตายเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้น ด้วย

5.1.2 การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ใช้แรงกดพื้นที่สูงสุดมากกว่าการลากขึ้น รูปแบบปกติ เมื่อเพิ่มแรงกดชีงงานที่เพิ่มสูงขึ้น แรงกดพื้นที่สูงสุดมีแนวโน้มสูงขึ้นตาม ทำให้โลหะ เกิดการไหลตัวได้น้อย และผลจากการเพิ่มแรงกดชีงงานส่งผลให้รอยยับลดลง

5.1.3 การเปรียบเทียบชีงงานหลังการในการลากขึ้นรูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการ ไฮดรอลิกไดนามิก ชีงงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกมีการเปลี่ยนแปลงความหนา ความเครียดหลัก และความเครียดรองน้อยกว่าชีงงานที่ลากขึ้นรูปแบบปกติ และเมื่อเพิ่มแรงดันน้ำมัน ภายในห้องแม่พิมพ์ตาย ในกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก มีผลต่อความเครียดบนผิวชีงงาน ทำให้ ความหนาชีงงานหลังการมีการขึ้นรูปเปลี่ยนแปลงน้อยลง

5.1.4 การเปรียบเทียบการขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430 ในการลากขึ้น รูปแบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ไม่สามารถขึ้นรูป

ได้มีการศึกษาเกิดขึ้นทุกกรณีของการลากขึ้นรูป แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 สามารถขึ้นรูปได้ทุกกรณีของการลากขึ้นรูป ชิ้นงานไม่มีการบิดงอเกิดขึ้น

ผลการศึกษาวิจัยในเรื่อง อิทธิพลในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนการไฮดรอลิก ใช้แรงลากขึ้นรูปและใช้แรงกดพื้นที่สูงสุดมากกว่าการลากขึ้นรูปแบบปกติ โดยในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ไม่สามารถขึ้นรูปได้ในทุกสภาวะการขึ้นรูป ส่วนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 สามารถขึ้นรูปได้ในทุกสภาวะการขึ้นรูป โดยมีการเปลี่ยนแปลงความหนา ค่าเฉลี่ย 3.58 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดหลัก ค่าเฉลี่ย 14.06 เปอร์เซ็นต์ และความเครียดรอง ค่าเฉลี่ย 8.50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าเฉลี่ยน้อยกว่าชิ้นงานที่ลากขึ้นรูปแบบปกติ

## 5.2 ข้อเสนอแนะทั่วไป

5.2.1 ก่อนการเริ่มปฏิบัติงานทุกครั้งต้องตรวจสอบระดับของของเหลวภายในถังควรวอยู่ในระดับที่เหมาะสม โดยดูจากเกจวัดระดับน้ำมันควรมีน้ำมันอย่างน้อย 1/3 ของเกจวัด (ข้อมูลจากการสอบถามผู้ผลิต)

5.2.2 ในช่วงที่พื้นที่เคลื่อนลงมาตามตำแหน่งเริ่มต้นที่กำหนดไว้ และปล่อยน้ำมันเข้าสู่ภายในแม่พิมพ์คาย ต้องสังเกตว่าพื้นที่สัมผัสกับชิ้นงานหรือไม่ หรือพื้นที่อยู่ตามตำแหน่งเริ่มต้นที่กำหนดไว้หรือไม่ เพราะกรณีที่พื้นที่ไม่อยู่ตามตำแหน่งเริ่มต้นที่กำหนดไว้ จะส่งผลต่อรูปทรง และคุณภาพของชิ้นงาน

5.2.3 การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการทดลอง ควรคำนึงถึงผลกระทบของแรงดันน้ำมันที่เพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป เนื่องจากการปฏิบัติงานภายใต้สภาวะของแรงดันน้ำมันที่สูง ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของพื้นที่ลงไปแทนที่ปริมาตรน้ำมันในแม่พิมพ์คาย

## 5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป

5.3.1 ศึกษาอิทธิพลของความเร็วในการขึ้นรูปที่มีผลต่อกระบวนการการลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการไฮดรอลิก

5.3.2 ศึกษาการกำหนดระดับแรงดันน้ำมันที่ให้ผลดีที่สุดในการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิก

5.3.3 ศึกษาการกำหนดแรงกดชิ้นงานที่ให้ผลดีที่สุดในการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิก

5.3.4 ศึกษาถึงอิทธิพลของกลไกการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำมัน ในระหว่างกระบวนการการลากขึ้นรูปลึงค์ด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก

5.3.5 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรของแม่พิมพ์ เช่น ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ และมุมคาย ที่มีผลต่อกระบวนการการลากขึ้นรูปลึงค์ด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก

5.3.6 ศึกษาการประยุกต์ใช้ระเบียบการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง

5.3.7 ศึกษาความเรียบผิวในระหว่างกระบวนการการลากขึ้นรูปลึงค์แบบปกติกับด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก



## รายการอ้างอิง

- [1] ยูโร อิน็อก (Euro Inox), ความสามารถในการขึ้นรูปของสแตนเลส, 29 เมษายน พ.ศ. 2554
- [2] Kang, D. “A Study on Hydrodynamic Deep Drawing Equipment,” **Journal Materials Processing Technology**, 2000. pp. 21.
- [3] 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. pp. 649.
- [4] 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. pp. 114.
- [5] Ajay, D. and Yadav, A., **Process analysis and design in stamping and sheet hydroforming**. Ph. D. Thesis, Philosophy Engineer, The Ohio State University, 2008. pp.193-196.
- [6] กฤษดา บรรเทาพิษ, การศึกษาอิทธิพลของของเหลวในการลากขึ้นรูปลึกเหล็กคาร์บอนรีดเย็น SPCC ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2555.
- [7] 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.
- [8] มอก.977-2551 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม น้ำมันไฮดรอลิก-พื้นฐานน้ำมันแร่
- [9] International Standard ISO 3105: 1994 Glass Capillary Kinematic Viscometers - Specifications and Operating Instructions
- [10] Standard JIS B 5012: 2008 Cold helical Spring for Press Dies
- [11] พงศ์พันธ์ แก้วตาพิษและวารุณี เปรมานนท์, “การศึกษาอิทธิพลของความสูงคายแลนค์ในกรรมวิธีการลากขึ้นรูปลึก,” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 18, 18-20 ตุลาคม 2547, จังหวัดขอนแก่น, 2547
- [12] ทวีภัทร์ บูรณชิตี และ ทศน์ชัย ผ่องผาย, “การออกแบบการขึ้นรูปขึ้นส่วนขวางยึดเครื่องยนต์โดยการวิเคราะห์การฉีกขาดและรอยร่น,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 17, ฉบับที่ 2, ปี 2550, หน้า 53

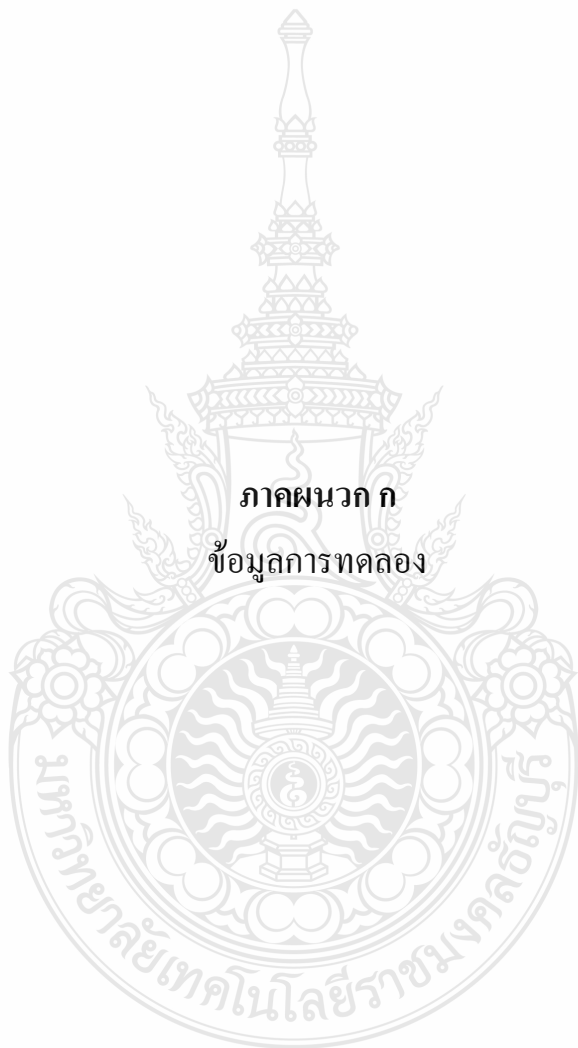
- [13] Marciniak, Z Duncan, J.L. and Hu, S.J., **Mechanics of Sheet Metal Forming**. House Jordan Hill Oxford, Butterworth-Heinemann, Second edition, 2002. pp.30-128.
- [14] อภิชาติ แสนรัชฎากร, “การศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อขบวนการลากขึ้นรูปโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท 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] Tschaetsch, H., **Metal Forming Practise**. Verlag Berlin Heidelberg Germany, Springer, 2006. pp. 142-183.
- [17] 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
- [18] Lang, L.H., “Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming,” **Journal of Materials Processing Technology**, 2004, 151, pp. 165-166.
- [19] Joakim L., **Numerical simulation of tube hydroforming**, Ph.D. Thesis, Civil and environmental engineering, Lulea university of technology, 2004.
- [20] 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.
- [21] Genick Bar-Meir, **Basics of Fluid Mechanics**. GNU Free Documentation License, USA, 2008.
- [22] รศ.ดร.ทวิช จิตรสมบุญ, **กลศาสตร์ของไหล**. สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล, กรุงเทพมหานคร, 2010.
- [23] ขวัญชัย สันทิพย์สมบุญ และ ปานเพชร ชินินทร, **ไฮดรอลิกอุตสาหกรรม**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ซีเอ็ด, หน้า 11-119.
- [24] เชษฐ อุทธิยัง, **การศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการลากขึ้นรูปลึกโดยใช้สารหล่อลื่น**, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2546.
- [25] สวัสดิ์ โสตามุข, **การทำนายความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นส่วนยานยนต์ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป**, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2550.

- [26] ชงชัย เพ็งจันทร์ดี, อิทธิพลของการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดโดยการทำงานด้วยระบบ คอมพิวเตอร์ควบคุมเชิงตัวเลข, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554
- [27] นางกิตติพร เหล่าแสงธรรม และนายดำรงศักดิ์ เหล่าแสงธรรม, “เหล็กกล้าไร้สนิม,” บทความวิทยุกระจายเสียงรายการสาระยามบ่าย ครั้งที่ 72, ประจำเดือน ตุลาคม 2549
- [28] นายมานพ บุตรแวว, การศึกษาพฤติกรรมกรรมการกระดิ่งตัวกลับในการดัดงอรูปตัววีของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548
- [29] คมสันต์ งามขำ, ขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ SUS 304 จากการเปลี่ยนความหนา, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มีนาคม, 2550.
- [30] ไพบุลย์ หาญมนต์, “การศึกษารัศมีคานที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกลมมีปีกของแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น,” การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 46, ปีพ.ศ.2551, หน้า 11-18.
- [31] 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.
- [32] วิเชียร เกื้อนเครือวัลย์ และ สุภเอก ประมูลมาก, “การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานที่มีผลต่องานขึ้นรูปด้วย,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8, 22-23 เมษายน 2553, หน้า 653-658.
- [33] 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.
- [34] ชนสาร อินทรกำจรชัย และ สุวัฒน์ จีระเชียรนาถ, “การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำกับอุตสาหกรรมขึ้นส่วนยานยนต์,” การประชุมวิชาการด้านการพัฒนาการดำเนินงานทางอุตสาหกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 2 (CIOD 2011), 11 – 12 พฤษภาคม 2554, หน้า 1.



ภาคผนวก





ภาคผนวก ก  
ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 แรงในการลากขึ้นรูปแบบปกติ ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304

ระยะกดพื้นขี้เหล็ก		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm <sup>2</sup> /sec					
		ค่าแรงกดที่สปริง=19.62 N/mm <sup>2</sup>			ค่าแรงกดที่สปริง=35.69 N/mm <sup>2</sup>		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	4.08	27.21	5.69	7.42	49.49	6.78
2	2.50	4.24	28.25	40.20	7.71	51.39	41.62
3	3.75	4.39	29.30	65.51	7.99	53.30	70.64
4	5.00	4.55	30.35	45.59	8.28	55.20	49.85
5	6.25	4.71	31.39	40.79	8.57	57.10	43.61
6	7.50	4.87	32.44	42.64	8.85	59.01	45.9
7	8.75	5.02	33.48	41.59	9.14	60.91	45.87
8	10.00	5.18	34.53	40.15	9.42	62.81	43.61
9	11.25	5.34	35.58	41.99	9.71	64.72	43.88
10	12.50	5.49	36.62	44.40	9.99	66.62	46.33
11	13.75	5.65	37.67	44.21	10.28	68.52	45.85
12	15.00	5.81	38.72	44.18	10.56	70.43	44.76
13	16.25	5.96	39.76	44.54	10.85	72.33	46.15
14	17.50	6.12	40.81	44.01	11.14	74.24	46.7
15	18.75	6.28	41.86	47.82	11.42	76.14	48.43

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank; 6.28 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน;  
 $\frac{6.28}{15} \times 100 = 41.86\%$  แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป; 47.82 kN = แรงลากขึ้นรูป;  
 19.62 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่ 2 (เพิ่มขึ้น) และ 35.69 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่  
 2 (สูงสุด)

ตารางที่ ก.2 แรงในการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกแรงดัน 5 MPa ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304

ระยะกดพื้นซึ่กลี		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm <sup>2</sup> /sec แรงดัน 5 MPa					
		ค่าแรงกดที่สปริง=19.62 N/mm <sup>2</sup>			ค่าแรงกดที่สปริง=35.69 N/mm <sup>2</sup>		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	4.08	27.21	7.11	7.42	49.49	11.43
2	2.50	4.24	28.25	25.50	7.71	51.39	31.79
3	3.75	4.39	29.30	71.18	7.99	53.30	76.51
4	5.00	4.55	30.35	49.51	8.28	55.20	50.37
5	6.25	4.71	31.39	43.27	8.57	57.10	44.68
6	7.50	4.87	32.44	44.11	8.85	59.01	46.83
7	8.75	5.02	33.48	45.08	9.14	60.91	47.14
8	10.00	5.18	34.53	44.73	9.42	62.81	47.82
9	11.25	5.34	35.58	44.77	9.71	64.72	48.54
10	12.50	5.49	36.62	48.11	9.99	66.62	50.9
11	13.75	5.65	37.67	49.79	10.28	68.52	52.38
12	15.00	5.81	38.72	52.29	10.56	70.43	54.88
13	16.25	5.96	39.76	54.21	10.85	72.33	56.85
14	17.50	6.12	40.81	55.86	11.14	74.24	58.05
15	18.75	6.28	41.86	55.23	11.42	76.14	59.37

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank; 6.28 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน ;  
 $\frac{6.28}{15} \times 100 = 41.86\%$  แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป; 55.33 kN = แรงลากขึ้นรูป;  
 19.62 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่ 2 (เพิ่มขึ้น) และ 35.69 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่  
 2 (สูงสุด)

ตารางที่ ก.3 แรงในการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิก แรงดัน 10 MPa ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304

ระยะกดพื้นที่ลิ้น		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm <sup>2</sup> /sec แรงดัน 10 MPa					
		ค่าแรงกดที่สปริง=19.62 N/mm <sup>2</sup>			ค่าแรงกดที่สปริง=35.69 N/mm <sup>2</sup>		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	4.08	27.21	6.40	7.42	49.49	7.266
2	2.50	4.24	28.25	27.13	7.71	51.39	29.19
3	3.75	4.39	29.30	79.02	7.99	53.30	78.99
4	5.00	4.55	30.35	49.23	8.28	55.20	49.25
5	6.25	4.71	31.39	42.93	8.57	57.10	44.13
6	7.50	4.87	32.44	44.49	8.85	59.01	47.13
7	8.75	5.02	33.48	46.64	9.14	60.91	48.9
8	10.00	5.18	34.53	48.39	9.42	62.81	51.68
9	11.25	5.34	35.58	50.76	9.71	64.72	53.49
10	12.50	5.49	36.62	52.29	9.99	66.62	54.21
11	13.75	5.65	37.67	54.16	10.28	68.52	55.88
12	15.00	5.81	38.72	56.49	10.56	70.43	58.37
13	16.25	5.96	39.76	59.14	10.85	72.33	60.95
14	17.50	6.12	40.81	58.59	11.14	74.24	62.73
15	18.75	6.28	41.86	61.40	11.42	76.14	64.63

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank; 6.28 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน;  
 $\frac{6.28}{15} \times 100 = 41.86\%$  แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป; 61.40 kN = แรงลากขึ้นรูป;  
 19.62 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่ 2 (เพิ่มขึ้น) และ 35.69 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่  
 2 (สูงสุด)

ตารางที่ ก.4 แรงในการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิก แรงดัน 15 MPa ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304

ระยะกดพื้นที่ลิ		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm <sup>2</sup> /sec แรงดัน 15 MPa					
		ค่าแรงกดที่สปริง=19.62 N/mm <sup>2</sup>			ค่าแรงกดที่สปริง=35.69 N/mm <sup>2</sup>		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	4.08	27.21	2.66	7.42	49.49	9.572
2	2.50	4.24	28.25	27.33	7.71	51.39	31.68
3	3.75	4.39	29.30	81.23	7.99	53.30	82.23
4	5.00	4.55	30.35	49.03	8.28	55.20	50.08
5	6.25	4.71	31.39	45.39	8.57	57.10	47.56
6	7.50	4.87	32.44	42.32	8.85	59.01	46.03
7	8.75	5.02	33.48	45.26	9.14	60.91	48.01
8	10.00	5.18	34.53	50.62	9.42	62.81	50.21
9	11.25	5.34	35.58	53.58	9.71	64.72	52.93
10	12.50	5.49	36.62	56.71	9.99	66.62	54.27
11	13.75	5.65	37.67	59.92	10.28	68.52	56.38
12	15.00	5.81	38.72	61.71	10.56	70.43	58.2
13	16.25	5.96	39.76	62.53	10.85	72.33	60.34
14	17.50	6.12	40.81	64.00	11.14	74.24	64.26
15	18.75	6.28	41.86	66.29	11.42	76.14	67.74

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank; 6.28 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน;  
 $\frac{6.28}{15} \times 100 = 41.86\%$  แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป; 66.29 kN = แรงลากขึ้นรูป;  
 19.62 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่ 2 (เพิ่มขึ้น) และ 35.69 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่  
 2 (สูงสุด)

ตารางที่ ก.5 แรงในการลากขึ้นรูปแบบปกติ ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430

ระยะกดพื้นที่ลิค		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm <sup>2</sup> /sec					
		ค่าแรงกดที่สปริง=19.62 N/mm <sup>2</sup>			ค่าแรงกดที่สปริง=35.69 N/mm <sup>2</sup>		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	4.08	27.21	5.982	7.42	49.49	7.92
2	2.50	4.24	28.25	53.85	7.71	51.39	55.62
3	3.75	4.39	29.30	74.1	7.99	53.30	76.13
4	5.00	4.55	30.35	45.66	8.28	55.20	49.06
5	6.25	4.71	31.39	42.27	8.57	57.10	45.78
6	7.50	4.87	32.44	43.44	8.85	59.01	47.47
7	8.75	5.02	33.48	43.96	9.14	60.91	46.78
8	10.00	5.18	34.53	42.23	9.42	62.81	45.54
9	11.25	5.34	35.58	42.91	9.71	64.72	45.74
10	12.50	5.49	36.62	43.71	9.99	66.62	46.33
11	13.75	5.65	37.67	44.92	10.28	68.52	46.14
12	15.00	5.81	38.72	43.14	10.56	70.43	45.71
13	16.25	5.96	39.76	44.01	10.85	72.33	46.92
14	17.50	6.12	40.81	45.06	11.14	74.24	47.35
15	18.75	6.28	41.86	46.29	11.42	76.14	48.7

ขึ้นรูปลิค 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank ; 6.28 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน ;  
 $\frac{6.28}{15} \times 100 = 41.86\%$  แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป ; 46.29 kN = แรงลากขึ้นรูป ;  
 19.62 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่ 2 (เพิ่มขึ้น) และ 35.69 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่  
 2 (สูงสุด)

ตารางที่ ก.6 แรงในการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิกแรงดัน 5 MPa ของแผ่นเหล็กกล้า  
ไร้สนิม SUS 430

ระยะกดพื้นซ์ลึก		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm <sup>2</sup> /sec แรงดัน 5 MPa					
		ค่าแรงกดที่สปริง=19.62 N/mm <sup>2</sup>			ค่าแรงกดที่สปริง=35.69 N/mm <sup>2</sup>		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	4.08	27.21	10.41	7.42	49.49	10.41
2	2.50	4.24	28.25	43.85	7.71	51.39	43.85
3	3.75	4.39	29.30	77.14	7.99	53.30	77.14
4	5.00	4.55	30.35	47.77	8.28	55.20	47.77
5	6.25	4.71	31.39	47.71	8.57	57.10	47.71
6	7.50	4.87	32.44	49.29	8.85	59.01	49.29
7	8.75	5.02	33.48	49.58	9.14	60.91	49.58
8	10.00	5.18	34.53	51.03	9.42	62.81	51.03
9	11.25	5.34	35.58	52.97	9.71	64.72	52.97
10	12.50	5.49	36.62	52.12	9.99	66.62	52.12
11	13.75	5.65	37.67	50.25	10.28	68.52	50.25
12	15.00	5.81	38.72	51.29	10.56	70.43	51.29
13	16.25	5.96	39.76	51.83	10.85	72.33	51.83
14	17.50	6.12	40.81	52.39	11.14	74.24	52.39
15	18.75	6.28	41.86	52.42	11.42	76.14	52.42

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank; 6.28 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน;  
 $\frac{6.28}{15} \times 100 = 41.86\%$  แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป; 52.42 kN = แรงลากขึ้นรูป;  
 19.62 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่ 2 (เพิ่มขึ้น) และ 35.69 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่  
 2 (สูงสุด)



ตารางที่ ก.7 แรงในการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิก แรงดัน 10 MPa ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430

ระยะกดพื้นที่ลิ้น		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm <sup>2</sup> /sec แรงดัน 10 MPa.					
		ค่าแรงกดที่สปริง=19.62 N/mm <sup>2</sup>			ค่าแรงกดที่สปริง=35.69 N/mm <sup>2</sup>		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	4.08	27.21	9.858	7.42	49.49	8.248
2	2.50	4.24	28.25	32.81	7.71	51.39	30.5
3	3.75	4.39	29.30	80.82	7.99	53.30	80.27
4	5.00	4.55	30.35	48.64	8.28	55.20	51.53
5	6.25	4.71	31.39	47.59	8.57	57.10	47.04
6	7.50	4.87	32.44	51.54	8.85	59.01	50.45
7	8.75	5.02	33.48	51.81	9.14	60.91	50.69
8	10.00	5.18	34.53	50.86	9.42	62.81	50.33
9	11.25	5.34	35.58	51	9.71	64.72	51.2
10	12.50	5.49	36.62	52.44	9.99	66.62	52.6
11	13.75	5.65	37.67	51.32	10.28	68.52	53.08
12	15.00	5.81	38.72	53.05	10.56	70.43	52.75
13	16.25	5.96	39.76	53.65	10.85	72.33	53.89
14	17.50	6.12	40.81	53.06	11.14	74.24	53.25
15	18.75	6.28	41.86	54.39	11.42	76.14	54.26

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank; 6.28 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน ;  
 $\frac{6.28}{15} \times 100 = 41.86\%$  แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป; 54.39 kN = แรงลากขึ้นรูป;  
 19.62 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่ 2 (เพิ่มขึ้น) และ 35.69 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่ 2 (สูงสุด)

ตารางที่ ก.8 แรงในการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิกแรงดัน 15 MPa ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430

ระยะกดพื้นที่ลิ้งค์		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm <sup>2</sup> /sec แรงดัน 15 MPa.					
		ค่าแรงกดที่สปริง=19.62 N/mm <sup>2</sup>			ค่าแรงกดที่สปริง=35.69 N/mm <sup>2</sup>		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	4.08	27.21	10.68	7.42	49.49	9.53
2	2.50	4.24	28.25	30.2	7.71	51.39	30.65
3	3.75	4.39	29.30	83.59	7.99	53.30	87.06
4	5.00	4.55	30.35	51.06	8.28	55.20	50.79
5	6.25	4.71	31.39	44.88	8.57	57.10	45.84
6	7.50	4.87	32.44	45.72	8.85	59.01	46.64
7	8.75	5.02	33.48	47.82	9.14	60.91	48.68
8	10.00	5.18	34.53	51.25	9.42	62.81	51.43
9	11.25	5.34	35.58	53.44	9.71	64.72	53.57
10	12.50	5.49	36.62	53.69	9.99	66.62	53.75
11	13.75	5.65	37.67	56.02	10.28	68.52	56.45
12	15.00	5.81	38.72	56.83	10.56	70.43	58.11
13	16.25	5.96	39.76	57.94	10.85	72.33	59.44
14	17.50	6.12	40.81	58.57	11.14	74.24	59.94
15	18.75	6.28	41.86	59.99	11.42	76.14	61.48

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank; 6.28 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน;  
 $\frac{6.28}{15} \times 100 = 41.86\%$  แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป; 59.99 kN = แรงลากขึ้นรูป;  
 19.62 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่ 2 (เพิ่มขึ้น) และ 35.69 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่  
 2 (สูงสุด)

ตารางที่ ก.9 แรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304

แรงกดแผ่นทดสอบด้วยค่าคงที่สปริง ( $N/mm^2$ )	แรงกดพื้นที่จากการลากขึ้นรูปแบบปกติ (kN)	แรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกที่แรงดัน (MPa)		
		5 MPa	10 MPa	15 MPa
19.62	65.51	71.18	79.02	81.23
35.69	70.64	76.51	78.99	82.23

ตารางที่ ก.10 แรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานในการลากขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304

แรงกดแผ่นทดสอบด้วยค่าคงที่สปริง ( $N/mm^2$ )	แรงกดพื้นที่จากการลากขึ้นรูปแบบปกติ (kN)	แรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกที่แรงดัน (MPa)		
		5 MPa	10 MPa	15 MPa
19.62	74.10	77.14	80.82	83.59
35.69	76.13	77.14	80.27	87.06

ตารางที่ ก.11 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 หลังการขึ้นรูป

ตำแหน่งการวัด	ค่าคงที่สปริง $19.62 N/mm^2$			
	การลากขึ้นรูปแบบปกติ	การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิก		
		5 MPa	10 MPa	15 MPa
1	0.450	0.459	0.464	0.469
2	0.411	0.424	0.428	0.438
3	0.363	0.412	0.412	0.422
4	0.370	0.410	0.417	0.425
5	0.489	0.506	0.528	0.526
6	0.497	0.524	0.531	0.536

ตารางที่ ก.12 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 หลังการขึ้นรูป

ตำแหน่งการวัด	ค่าคงที่สปริง 35.69 N/mm <sup>2</sup>			
	การลากขึ้นรูปแบบปกติ	การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิก		
		5 MPa	10 MPa	15 MPa
1	0.424	0.430	0.434	0.445
2	0.375	0.380	0.380	0.425
3	0.361	0.389	0.389	0.419
4	0.367	0.393	0.402	0.419
5	0.484	0.490	0.524	0.518
6	0.492	0.513	0.536	0.531

ตารางที่ ก.13 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 หลังการขึ้นรูป

ตำแหน่งการวัด	ค่าคงที่สปริง 19.62 N/mm <sup>2</sup>			
	การลากขึ้นรูปแบบปกติ	การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิก		
		5 MPa	10 MPa	15 MPa
1	0.455	0.460	0.460	0.468
2	0.440	0.450	0.455	0.460
3	0.419	0.421	0.428	0.432
4	x	x	x	x
5	x	x	x	x
6	x	x	x	x

หมายเหตุ (x เกิดการฉีกขาด, Fail)

ตารางที่ ก.14 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 หลังการขึ้นรูป

ตำแหน่งการวัด	ค่าคงที่สปริง 35.69 N/mm <sup>2</sup>			
	การลากขึ้นรูปแบบปกติ	การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอไดนามิก		
		5 MPa	10 MPa	15 MPa
1	0.446	0.453	0.455	0.460
2	0.424	0.437	0.440	0.448
3	0.405	0.410	0.415	0.420
4	x	x	x	x
5	x	x	x	x
6	x	x	x	x

หมายเหตุ (x เกิดการฉีกขาด , Fail)

ตารางที่ ก.15 ลักษณะความเครียดขึ้นงานแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ที่แรงกดขึ้นงาน 19.62 N/mm<sup>2</sup>

กระบวนการขึ้นรูป	ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง						
	ความเครียดตรง (%)			ความเครียดหลัก (%)			
	กึ่งกลาง ถ้วย	ขอบถ้วย	ผนังถ้วย	กึ่งกลาง ถ้วย	ขอบถ้วย	ผนังถ้วย	
การลากขึ้นรูปแบบ ปกติ	0.312	5.288	-18.184	0.788	14.104	29.132	
กระบวนการไฮ ดรอได นามิก	5 MPa	0.660	7.512	-18.500	0.768	14.060	26.580
	10 MPa	0.340	4.392	-21.880	0.648	11.136	28.988
	15 MPa	0.028	2.520	-19.656	0.248	7.944	30.548

ตารางที่ ก.16 ลักษณะความเครียดชิ้นงานแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm<sup>2</sup>

กระบวนกรชิ้นรูป		ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง					
		ความเครียดตรง (%)			ความเครียดหลัก (%)		
		กึ่งกลาง ตัว	ขอบตัว	ผนังตัว	กึ่งกลาง ตัว	ขอบตัว	ผนังตัว
การลากชิ้นรูปแบบปกติ		0.256	4.220	-18.196	0.820	11.660	32.456
กระบวน การไฮ ดรอลิค นามิก	5 MPa	0.776	7.408	-18.980	0.748	18.504	28.26
	10 MPa	0.076	3.552	-18.536	0.568	12.948	35.404
	15 MPa	0.072	3.008	-19.012	0.132	8.760	39.516

ตารางที่ ก.17 ลักษณะความเครียดชิ้นงานแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ที่แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm<sup>2</sup>

กระบวนกรชิ้นรูป		ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง					
		ความเครียดตรง (%)			ความเครียดหลัก (%)		
		กึ่งกลาง ตัว	ขอบตัว	ผนังตัว	กึ่งกลาง ตัว	ขอบตัว	ผนังตัว
การลากชิ้นรูปแบบปกติ		0.068	0.732	-17.940	0.336	6.888	41.448
กระบวน การไฮ ดรอลิค นามิก	5 MPa	3.024	4.540	-17.300	0.700	9.968	31.040
	10 MPa	3.456	1.780	-13.792	0.140	6.328	31.400
	15 MPa	3.104	2.276	-15.784	0.484	8.320	40.520

ตารางที่ ก.18 ลักษณะความเครียดชิ้นงานแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ที่แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm<sup>2</sup>

กระบวนการขึ้นรูป		ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง					
		ความเครียดตรง (%)			ความเครียดหลัก (%)		
		กึ่งกลางถ้วย	ขอบถ้วย	ผนังถ้วย	กึ่งกลางถ้วย	ขอบถ้วย	ผนังถ้วย
การลากขึ้นรูปแบบปกติ		0.216	2.780	-17.724	1.148	9.676	24.916
กระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก	5 MPa	3.120	0.992	-17.588	0.392	7.768	27.588
	10 MPa	3.100	3.084	-16.232	0.608	9.832	30.016
	15 MPa	3.496	1.436	-15.256	0.344	7.760	31.420





ภาคผนวก ข

ข้อมูลวัสดุในการศึกษาทดลอง





สถาบันยานยนต์ อุตสาหกรรมพื้ดนามูลนิธิ  
655 นิคมอุตสาหกรรมบางปู ซอย 1 อ.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.คลองหก 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	ผู้รับรอง	
(นายจักรกฤษ รุ่งเรือง) ทีมวิชาการ 10 / 04 / 2555	(นายอุทัย อุณะกุล) ผู้จัดการแผนกทดสอบ 14 / 4 / 55	
ผู้ทดสอบ นายกริธา ศรีลาศักดิ์		sp

รายงานนี้รับรองเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น 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  
F (DTD) – TR – 02 (Rev.01)

ภาพที่ ข.1 ใบรับรองผลการทดสอบสปริงและเหล็ก SPCC ที่ใช้ในการทดลอง



## สถาบันยานยนต์ อุตสาหกรรมพัฒนาคุณิธิ

หมายเลขปฏิบัติการ 5503020940

หน้า 2/3

ผลการทดสอบ

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

ผู้ทดสอบ *[Signature]* 10/04/2555ผู้ทบทวน *[Signature]* 10/04/2555

รายงานนี้รับรองเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น 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

ภาพที่ ข.2 รายงานผลการทดสอบสปริงซึ่งใช้ในการทดลอง



**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

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

Item	Property	Date of Test	Unit	Test Method	Result
1.	Viscosity at 40 °C	27-Apr-2012	mm <sup>2</sup> /s	ASTM D445-09	52.81

**Remark :**

**Reported By :** Mr. Chetwana Rungwanitcha

**Approved By :**

*W.T.*  
 ( Mr. Wichian Tantithumposit )

**Date of Issue :** 27-Apr-2012



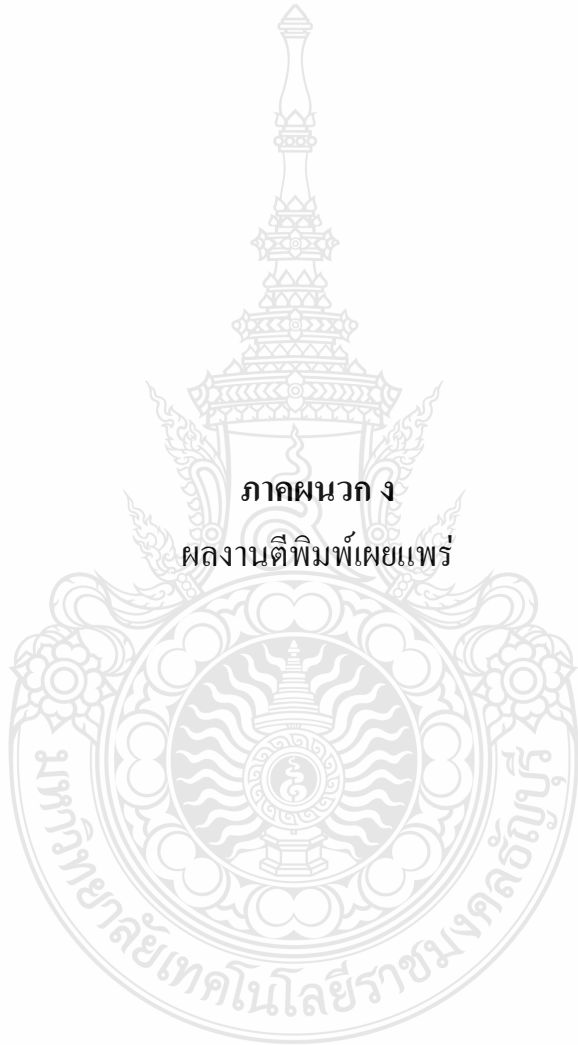
This certificate of analysis is referred to only submitted sample(s). It is your responsibility to use herein results in any purposes.  
 This certificate shall not be reproduced, except in full, and herein results shall not be used for advertising or public relation without the written approval of the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

FR-RTI-SP-023-001

Revision 3 10/05/53

ภาพที่ ข.3 รายงานผลการทดสอบความหนืดของน้ำมันไฮดรอลิก VG 68

ภาคผนวก ง  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



**Industrial Challenges in the ASEAN Economic Community**



# IE Network Conference 2012

การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
ประจำปี 2555

เอกสารรวมบทคัดย่อ  
(Abstract Summary)



17 - 19 ตุลาคม 2555

โรงแรมเมธาวลัย ชะอำ อำเภอลำลูกกา จังหวัดเพชรบุรี



การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555  
17-19 ตุลาคม 2555 วิทยา เพชรบุรี

**คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2555**

**จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**

รองศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา

รองศาสตราจารย์จิรพัฒน์ เงามะเสริญวงศ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดาริชา สุธีวงศ์.

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เนกัสวงค์ โอสถิตศิลป์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ เรียวเดชะ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ชรรมาภรณ์พิลาศ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสถิตเจริญ

อาจารย์สุรพงษ์ ศิริกุลวัฒนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล สุทธิจารุวัฒน์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริง ปรีชานนท์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประเสริฐ อัครประดมพงศ์

อาจารย์ ดร.เนื้ชชา ทวีแสงสกุลไทย

อาจารย์ ดร.ไพโรจน์ ลดาวิจิตรกุล

อาจารย์ภูมิ เหลืองจามิกร

**มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**

อาจารย์ ดร.ปยุตต์ สัจจกมล

อาจารย์ ดร.พัชรี ไตแก้ว ทองรัตน์

อาจารย์ ดร.รมิตา อยู่สุข

อาจารย์ ดร.สุภารัตน์ วงศ์วิระเกียรติ

อาจารย์ ดร.สุวิษภรณ์ วิชกุล

อาจารย์ ดร.ไอลศุภ ตรีรัตน์ตระกูล

**มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน**

อาจารย์อนงค์ ชัยมณี

**มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา**

อาจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง

อาจารย์ ดร.นัฐวิภา จันทร์ศรี

อาจารย์ ดร.เพ็ญสุดา พันธุ์ธำ

อาจารย์นันทวุฒิ ศรีอริยวัฒน์

อาจารย์ ดร.ศิริรัตน์ หมั่นนวมิชกุล

อาจารย์ ดร.สิริวงศ์ กลั่นคำสอน

อาจารย์จักรินทร์ กลั่นเงิน

อาจารย์ประภาพรพรณ เกษราพงศ์

**มหาวิทยาลัยขอนแก่น**

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ สายแก้ว

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพัฒน์ เศรษฐ์สมบูรณ์

อาจารย์ ดร.จุมพล วรสายัณห์

รองศาสตราจารย์ ดร.ศันยพงศ์ เชษฐโชติศักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศัชรินทร์ สุขโต

อาจารย์ ดร.ธนา ราษฎร์ภักดิ์



การประชุมวิชาการข่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555  
17-19 ตุลาคม 2555 ซะอำ เพชรบุรี

#### มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รองศาสตราจารย์ ดร.ชนนาก กฤตวรกาญจน์  
รองศาสตราจารย์ ดร.นิเวศ เจริญใจ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งฉัตร ชมภูอินไหว  
อาจารย์ ดร.วรพจน์ เสรีรัฐ

รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ ไสภแดง  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมกฤต เล็กสกุล  
อาจารย์ ดร.กรกฎ ไบบัวเทศ ทิพย์วางค์

#### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์  
รองศาสตราจารย์ ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์  
รองศาสตราจารย์ ดร.ไชยมพัตรภรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.อาษา ประทีปเสน  
รองศาสตราจารย์วชิระ มีทอง  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทัศน์ พรหมบุญพงศ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์นา อุดมศักดิ์กุล  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เจริญ สุนทรวานิชย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมมุญ เจริญวิไลศิริ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พจมาน เทียววัฒนรัฐติกาล  
อาจารย์ ดร.ช่อแก้ว จตุรานนท์  
อาจารย์ ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข  
อาจารย์ ดร.พิเชษฐ์ ศรีโยธา  
อาจารย์มงคล สันะวัฒน์

อาจารย์ ดร.ไพบูลย์ ช่างทอง  
อาจารย์ ดร.ศุภฤกษ์ บุญเกียรติ  
อาจารย์ ดร.อุษณีย์ คำพูล  
อาจารย์เจษฎา จันทพงษ์โส  
อาจารย์สุจินต์ ธงถาวรสุวรรณ

#### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รองศาสตราจารย์ ดร.อรุณกร เก่งพล  
รองศาสตราจารย์วันชัย แผลมหลักสกุล  
อาจารย์ ดร.กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์  
อาจารย์ ดร.กฤษดา อัครวงแสงกุล  
อาจารย์ ดร.กฤษณ์ พิวพันธ์ศรี  
อาจารย์ ดร.ชยรัช เฝือ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรเดช วุฒิพรพันธ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นราธิป แสงชัย  
อาจารย์ ดร.ชนสาร อินทวกำจรชัย  
อาจารย์ ดร.นันทกฤษณ์ ยอดพิจิต  
อาจารย์ ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์  
อาจารย์สงกรานต์ บางศรีณย์ทิพย์

#### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

อาจารย์ ดร.วิจิตรสวัสดิ์ สุขสวัสดิ์ ณ อยุธยา  
อาจารย์ชนิดา สุนาร์ักษ์  
อาจารย์พัฒนพงษ์ แสงหัตถวิวัฒนา

อาจารย์วรินทร์ เกียรติสกุล  
อาจารย์อรณิชา อนุชิตชาญชัย  
อาจารย์พรเทพ แก้วเชื้อ

#### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทรมณี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชาญ ช่วยพันธ์



การประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555  
17-19 ตุลาคม 2555 ธานี เพชรบุรี

#### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณฐา คุปต์ขเจียร

อาจารย์ ดร.ชัยยะ ปราณีดีพลกรัง

อาจารย์ศุภเอก ประมูลมาก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ ตรีขวันพงษ์

อาจารย์ ดร.ระพี กาญจนะ

#### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พายัพ เชียงใหม่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนวิภา อาวิพันธ์

อาจารย์ ดร.นเรศ อินตริวงศ์

อาจารย์ ดร.บรรเจิด แสงจันทร์พิลา

อาจารย์ ดร.ภาคภูมิ จารุภูมิ

#### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พายัพ เชียงใหม่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนวิภา อาวิพันธ์

อาจารย์ ดร.นเรศ อินตริวงศ์

อาจารย์ ดร.บรรเจิด แสงจันทร์พิลา

อาจารย์ ดร.ภาคภูมิ จารุภูมิ

#### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์เดช เหมือนขาว

อาจารย์ ดร.มาตมะสุโฮมี มะแซ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์

#### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

อาจารย์สัญญา คำจริง

#### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล

อาจารย์ ดร.ปวีร์ ศิริรักษ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยงยุทธ เสริมสร้อยอ้วนพันธ์

อาจารย์ ดร.ปภากร ทิพย์ชาล

อาจารย์ ดร.วีระชัย มโนพิเชษฐ์พัฒนา

#### มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รองศาสตราจารย์ ดร.จิรวัฒน์ ธีระวาฬพุกษ์

รองศาสตราจารย์ ดร.ตรีทศ เหล่าศิริหงษ์ทอง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสมอจิตร์ หอมรสสุคนธ์

รองศาสตราจารย์ ดร.จิรศิริพงศ์ เจริญภักดิ์หารักษ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ





การประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555  
17-19 ตุลาคม 2555 ธานี เพชรบุรี

#### มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยญา พิทักษ์กุล  
อาจารย์ ดร.ณัฐพัชร์ อารีรัชกุลกานต์  
อาจารย์ ดร.สันห์ รัฐวิบูลย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวิชชัย วรรัตน์  
อาจารย์ ดร.สมหญิง งามพรประเสริฐ

#### มหาวิทยาลัยนเรศวร

รองศาสตราจารย์ ดร.ภวิณ สนธิเพิ่มพูน  
อาจารย์ ดร.ขวัญณิศา คำเมือง  
อาจารย์วิรัชชัย เจ้าสกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูพงษ์ พงษ์เจริญ  
อาจารย์ ดร.ภาณุ บุญนารากร  
อาจารย์ศรีสัจจา วิทยศักดิ์

#### มหาวิทยาลัยบูรพา

รองศาสตราจารย์เกษม พิพัฒน์ปัญญาคุณ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จันทร์ทาทา นาควชิระตระกูล  
อาจารย์ ดร.จักรวาล คุณะติลังก  
อาจารย์ ดร.ฤกษ์วิทย์ จันทร์สา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บรรพชาญ ลิลา  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรวัฒน์ สมสิริกาญจนคุณ  
อาจารย์ ดร.กฤษดา ประสพชัยชนะ

#### มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

รองศาสตราจารย์สุคนธ์ อาจฤทธิ์

#### มหาวิทยาลัยรังสิต

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนวรรณ อัครไพบูลย์  
อาจารย์ ดร.พิษณุ มนัสปิติ  
อาจารย์พรศพงษ์ แก่นณรงค์  
อาจารย์สมพร พรหมดวง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพียงจันทร์ จริงจิตร  
อาจารย์ต่อศักดิ์ อุทัยไพฟ้า  
อาจารย์ศัลปชัย วัฒนเสย  
อาจารย์สายสุนีย์ พงษ์พัฒนศึกษา

#### มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา พิศลยบุตร  
อาจารย์ ดร.เลิศเลขา ฐนะชัยพันธ์  
อาจารย์นุกุล อุบลมาน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชณี ภูวพัฒนพันธ์  
อาจารย์นันทวรรณ อาเอี่ยม  
อาจารย์มาลีสา แก้วสุวรรณ



การประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555  
17-19 ตุลาคม 2555 ธานี เพชรบุรี

#### มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รองศาสตราจารย์ธนรัตน์ เตวีวัฒนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์

อาจารย์ ดร.พิลา หวังพานิช

อาจารย์พงษ์เพ็ญ จันทนะ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์มิตรมาณี ศรีวัฒนวงศ์

อาจารย์ ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ

อาจารย์สิริเดชชาตินิยม

#### มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รองศาสตราจารย์ ดร.นิกร ศิริวงศ์ไพศาล

รองศาสตราจารย์สมชาย ชูโณม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชเนศ รัตนวิไล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชชานา สินธวาลัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์เจริญ เจตวิจิตร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิเชษฐ ตระการชัยศิริ

รองศาสตราจารย์วินิตา รัตนมณี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กลางเดือน โพชนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เนกีสพร มิ่งมงคล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาพรณ ไชยประพัทธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุจน์ สังข์พงศ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ยอดดวง พันธุ์นรา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สงวน ตั้งโพธิธรรม

#### มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

รองศาสตราจารย์ ดร.สถาพร อมรสวัสดิ์วัฒนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา กาญจนสุนทร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนะ เยี่ยงกมลสิงห์

อาจารย์ ดร.วิวัฒน์ชัย พุกกานนท์

#### มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

อาจารย์จิตลดา ชิมเจริญ

อาจารย์นิศกร สมสุข

อาจารย์วรลักษณ์ เสถียรรังสฤษฏ์

อาจารย์อรอุมา กอสนาน

#### มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิศร ภูนิคม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชธรา เกรียงกรกฎ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์ ปิณฑะใส

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขอังกณา ติ

อาจารย์ ดร.จริยาภรณ์ อุ่นวงษ์

อาจารย์ ดร.ธารชอุดา พันธุ์นิกุล

อาจารย์โท แสงเทียน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เนลิน เพียรทอง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา เกรียงกรกฎ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ สินธุเขาวน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุริยา ไชยสวัสดิ์

อาจารย์ ดร.สกันท์ โอฬารพิริยกุล

อาจารย์ตะวันฉาย โพธิ์หอม

อาจารย์สุรเจษฎ์ ก้อนจันทร์



การประชุมวิชาการรายงานวิศวะกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555  
17-19 ตุลาคม 2555 ศาลา เพชรบุรี

#### มหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดชา พวงดาวเรือง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุภาภรณ์ สุวรรณรัมย์

#### โรงเรียนนายเรืออากาศ

รองศาสตราจารย์สุทธิ ศรีบุรพา

อาจารย์อมฤต ศรีบุรพา

อาจารย์อวยชัย วิตต์เอื้อ

#### สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยพฤกษ์ อาภาเวท

อาจารย์เจษฎา วงษ์อ่อน

อาจารย์สุนทร มุลทา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประยูร สุรินทร์

อาจารย์พิทักษ์ พันวัน

#### สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

รองศาสตราจารย์ ดร.สกันธ์ คล่องบุญจิต

อาจารย์ ดร.วิภู ศรีสืบสาน

รองศาสตราจารย์ ดร.ฤดี มาสุจันทร์

อาจารย์ ดร.ชุมพล ยวงไย

อาจารย์ ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข

#### มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์จันทร์เพ็ญ อำนวยดนานนท์

อาจารย์ ดร.สิทธิชัย แซ่เหลิม

อาจารย์ ดร.คณศ พลอยคณีย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปฎิพัทธ์ หงษ์สุวรรณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ลีลาธวีวงศ์

อาจารย์ ดร.สุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์

อาจารย์กวีรินทร์ สัยเจริญ

#### มหาวิทยาลัยมหิดล

รองศาสตราจารย์ศุภชัย นาทะพันธ์

อาจารย์ ดร.มงคล เทียนวิบูลย์

อาจารย์ ดร.รณชัย ศิริเวสุนกุล

อาจารย์ศุภชัย ราษฎร์ศิริ

อาจารย์สิทธิพันธ์ ตันทวีรุพห

อาจารย์ ดร.กนกวรรณ กิ่งผดุง

อาจารย์ ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย

อาจารย์ดวงยศ สุมิภักดิ์

อาจารย์ธนา สาตรา



การประชุมวิชาการช่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555  
17-19 ตุลาคม 2555 ซะยา เพชรบุรี

### มหาวิทยาลัยศรีปทุม

รองศาสตราจารย์ ดร.กิติ ชยะกุลศิริ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชรีณี มณีศรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมตะ ทัศนภักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชนภัทร พรหมวัฒน์ภักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัศวีร์ ศรีโหมด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิรัช เจริญสุข

อาจารย์ ดร.เทพฤทธิ์ ทองชุบ

อาจารย์ ดร.วิสิรา เลิศไพฑูรย์พันธ์

อาจารย์จักรพันธ์ กันหา

อาจารย์ธนัญ เรือนคง

อาจารย์อัศวิน วงศ์วิวัฒน์

อาจารย์ธีระ สัตยไพศาล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลธิศ เอี่ยมวรวิมลกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัฒตรา เกษราพงศ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ถาวร อมตภักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัฒนพงศ์ อริยสิทธิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชวลิต มณีศรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ

อาจารย์ ดร.อัคมเดช วานิชชินชัย

อาจารย์ก่อศักดิ์ อาชวากร

อาจารย์ธิน ศรีวรมย์

อาจารย์ธินท์ นฤนาท

อาจารย์วินวิสา ต่วนตระกูลศิลป์





การประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555  
17-19 ตุลาคม 2555 ศาลา เพชรบุรี

การศึกษาสภาวะความเครียดบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ในการลากขึ้นรูปด้วย  
กระบวนการไฮดรอลิก

**A Study of Strain on Deformed stainless steel sheet in Hydrodynamic  
deep drawing process**

สุรียา น้าแก้ว<sup>1</sup>ศิริชัย ต๋อสกุล<sup>2</sup>

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอธัญบุรี

จังหวัดปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 12110

E-mail: Suriya.nam@windowslive.com

Suriya Namgaew<sup>1</sup> Sirichai Torsakul<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology,  
Thanyaburi Pathumthani 12110.

E-mail: Suriya.nam@windowslive.com

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อการศึกษาสภาวะความเครียดบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ในการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิก เพื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการลากขึ้นรูปปกติ งานวิจัยนี้เลือกใช้น้ำมันไฮดรอลิกเกรด 68 ความหนืดเชิงจลศาสตร์ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 68.98 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที ที่แรงดัน 15 MPa และแรงกดชิ้นงาน 3925 N ขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ความหนา 0.48 มม. ขนาดเริ่มต้นเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 มม. เป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 45 มม. แบบมีปีกขนาด 5 มม. การวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ความหนา ความเครียดหลัก และความเครียดตรง ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม แต่ละจุดที่ทำการวัด หลังจากการขึ้นรูป ผลการทดลองพบว่า อัตราการไหลตัวของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม จากการขึ้นรูปทั้งสองกรณี ชิ้นงานปราศจากการฉีกขาด แต่ความหนาของชิ้นงานในกระบวนการลากขึ้นรูปลดลงเฉลี่ย 9.89% มากกว่ากระบวนการไฮดรอลิก ทำให้ค่าความเครียดหลัก และความเครียดตรงลดลงตาม เป็นผลมาจากการสัมผัสระหว่างน้ำมันกับแผ่นชิ้นงาน และแรงดันของน้ำมันในระหว่างการขึ้นรูป และแรงกดจากหัวกดที่ผ่านมายังแผ่นชิ้นงานจะกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ทำให้บริเวณรอบชิ้นงานมีการกระจายตัวของค่าความเครียดที่สม่ำเสมอ เป็นการเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปให้ดีขึ้น โดยที่โอกาสเกิดการฉีกขาดจะต่ำลง จึงสรุปได้ว่ากระบวนการไฮดรอลิกสามารถขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ความหนา 0.48 มม ดีกว่ากระบวนการลากขึ้นรูปค่าหลัก กระบวนการลากขึ้นรูป/การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิก/แรงดันน้ำมันแรงกด

**Abstract**

The objective of this research was to study strain on deformed stainless steel sheet in hydrodynamic deep drawing process in comparison with traditional deep drawing process. In this research, Hydraulic oil grade 68 with kinetic viscosity at 40 degree Celsius, equaling to 68.98 mm<sup>2</sup>/s with compressor at 15 MPa. and 3925 N of blank holder force on work pieces were used in deep drawing process for SUS304 stainless steel sheet with 0.48 millimeter in thickness, diameter starting from 80 mm. in cylindrical shape

with diameters 45 mm. of flank with 5 mm. In this research there were analysis of thickness, major strain and minor strain of stainless steel sheet in each point of measuring after deep drawing process and it was found from the flow rate of stainless steel sheet by deep drawing process in both cases that there were no tear on work pieces. However, the thickness of work pieces in deep drawing process was decreased 9.89% in average more than in Hydrodynamic deep drawing process leading to the consequence of major strain and minor strain decrease. This was caused by the exposing between oil and work pieces and oil pressure during deep drawing process and compression from nozzle to work pieces was well distributed resulting to the area around work pieces to have well distributed strain value. This increased better ability of deep drawing process with lower chance of tear. It is therefore able to conclude that Hydrodynamic deep drawing can be used in deep drawing process for 0.48 thick SUS304 stainless steel sheet better than traditional deep drawing process.

**Keywords:** Deep drawing/Hydrodynamic deep drawing/Internal fluid pressure/Blank holder force

## 1. บทนำ

ปัจจุบันในภาคอุตสาหกรรมได้นำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์มากมาย เช่น อุปกรณ์เครื่องมือการแพทย์ เฟอร์นิเจอร์ และเครื่องใช้ภายในครัวเรือน ด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมมีคุณสมบัติต้านทานต่อการกัดกร่อนได้สูงกว่าเหล็ก จึงทำให้ไม่เป็นสนิม และด้วยกระบวนการลากขึ้นรูป เป็นกระบวนการขึ้นรูปที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยหลักการเคลื่อนตัวของแม่พิมพ์ตัวบน(Punch) กดลงบนแผ่นชิ้นงานสู่แม่พิมพ์ตัวล่าง(Die) เพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน ขณะที่วัสดุเปลี่ยนแปลงรูปร่างวัสดุจะสามารถดูดซับพลังงานความเครียด และเกิดแรงเสียดทาน ระหว่างแผ่นชิ้นงานกับผิวของแม่พิมพ์ตัวล่าง ทำให้วัสดุมีความหนาไม่สม่ำเสมอ

ด้วยการพัฒนาการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยใช้ น้ำมันหรือของเหลว ที่มีแรงดันสูงเข้ามาช่วยในขณะที่แม่พิมพ์ตัวบน เคลื่อนตัวกดลงบนชิ้นงานเข้าสู่แม่พิมพ์ตัวล่าง เพื่อการขึ้นรูป นั่นคือ การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดนามิก (Hydrodynamic deep drawing, HDD) โดยน้ำมันที่มีแรงดันจะเคลื่อนตัวไหลอยู่ระหว่างพื้นผิวด้านล่างของแม่พิมพ์ตัวล่าง กับแผ่นโลหะ สามารถเพิ่มค่าอัตราส่วนขีดจำกัดการลากขึ้นรูป(Limiting drawing ratio, LDR) และเป็นการปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงาน[1] สิ่งที่เห็นได้อย่างชัดเจน ในกระบวนการนี้ คือ การใช้น้ำมันเป็นส่วนสำคัญ แทนการลากขึ้นรูป คือ การลดความผิด หรือความเสียดทานระหว่าง Blank holder กับแผ่นโลหะ [2,3] จากที่ได้กล่าวมานี้ จึงได้จัดทำ

โครงการวิจัยขึ้น เพื่อการศึกษาสภาวะความเครียดบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ในกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดนามิก เพื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการลากขึ้นรูป

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การลากขึ้นรูปลึก (Deep drawing)

ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึก มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ แม่พิมพ์ตัวบน, แม่พิมพ์ตัวล่าง และตัวกดแผ่นชิ้นงาน (blank holder ring)

#### 2.1.1 แรงในการลากขึ้นรูป

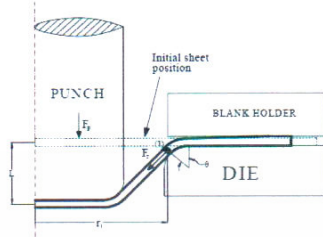
แรงกระทำที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการลากขึ้นรูปลึก ซึ่งเกิดจากพื้นที่กระทำต่อชิ้นงาน ในรูปที่ 1 แรงกดพื้นที่ ในการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกของกระบวนการลากขึ้นรูปลึก และการคำนวณแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปลึก สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 1

$$F_{dr} = d \times \pi \times s \times R_m \times n \quad (1)$$

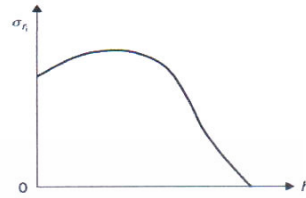
โดย  $n$  คือ ค่าการปรับค่า (correction value) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของการขึ้นรูปจริง ตารางที่ 1 ค่าการปรับค่า  $n = f(\beta_{actual})$ [4]

ตารางที่ 1 ค่าการปรับค่า  $n = f(\beta_{actual})$

$N$	0.2	0.3	0.5	0.7
$\beta_{actual} = \frac{D}{d}$	1.1	1.2	1.4	1.6



รูปที่ 1 แรงกดพื้นที่ในการขึ้นรูปด้วย[5]

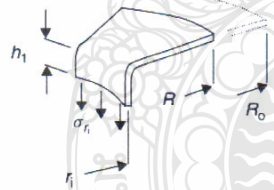


รูปที่ 3 เส้นกราฟของความเค้นในการลากขึ้นรูปเปรียบเทียบกับ การเคลื่อนที่ของพunch[7]

2.1.2 ความเครียดแข็งตัว

ความเค้นที่เกิดขึ้น บนส่วนของพื้นที่หน้าตัดของวัสดุแผ่น จะเพิ่มสูงขึ้นในระหว่างการลากขึ้นรูป ในขณะที่รัศมีวงนอกของวัสดุแผ่นจะลดลง เนื่องจากโลหะแผ่นจะถูกกดลงไปยังด้านในของคาน รัศมีวงนอก R จะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังในรูปที่2 ค่าความเครียดแข็งตัว ซึ่งเกิดจากความเค้นไหลจะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งวัสดุแผ่นไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก ถ้าสมมติให้ค่าความเค้นที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุแผ่น เป็นความเค้นเฉลี่ย  $(\sigma_f)_{av}$  และไม่คำนึงถึงความหนาที่ไม่เสมอกันของวัสดุแผ่น สามารถเขียนเป็นสมการที่ 2 [6]

$$\sigma_r = (\sigma_f)_{av} \ln \frac{R}{r_i} \quad (2)$$

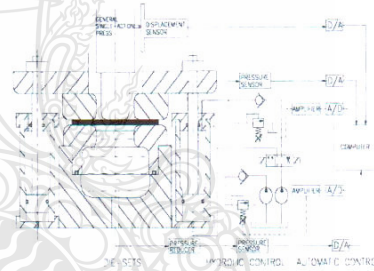


รูปที่ 2 ระหว่างกระบวนการลากขึ้นรูป ในสภาวะที่ปราศจากแรงเสียดทานความเค้นจะมีขนาดที่เท่ากันทุกจุด[7]

ค่าตัวแปรสองตัวแปร คือ การเพิ่มขึ้นของความเค้น จนกระทั่งวัสดุเกิดความเครียดแข็งตัว และการลดลงของรัศมี R สามารถเขียนแผนภาพความสัมพันธ์ได้ตามรูปที่ 3 ซึ่งโดยปกติแล้วความเค้นในขณะการลากขึ้นรูป จะเพิ่มสูงขึ้นในช่วงต้น จนกระทั่งมีค่าสูงสุดและจะลดลง

2.2 การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก (hydrodynamic deep drawing)

การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกไดนามิก ใช้ น้ำมันที่มีแรงดันสูงเข้ามาช่วยในการขึ้นรูปโลหะ ขณะที่แม่พิมพ์ตัวบน เคลื่อนตัวตกลงบนชิ้นงาน แม่พิมพ์ตัวล่าง เพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน ของเหลวที่มีแรงดันเคลื่อนตัวไหลอยู่ระหว่างพื้นผิวด้านล่างของแม่พิมพ์ตัวล่าง กับแผ่นโลหะ



รูปที่ 4 ชุดควบคุมระบบ Hydrodynamic deep drawing [8]

จากรูปที่4 แรงกดพื้นที่กระทำโดยตรงต่อโลหะแผ่น สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$f_D = f_P - \frac{1}{4} \pi d_p^2 P_S \quad (3)$$

แรงกดยึดแผ่นโลหะ (Blank holder force,  $F_{BH}$ )

$$F_{BH} = A_{BH} \times P \quad (4)$$

แม่พิมพ์ทำจากเหล็กเครื่องมือ SKD11 ชูบแข็งและชุบฮาร์ดโครม(Hard chrome) ในชิ้นส่วนที่สัมผัสเกิดการเสียดสีกับอุปกรณ์ป้องกันการรั่วซึมของน้ำมันไฮดรอลิก



**2.3 แรงกดพื้นที่กระทำต่อแผ่นขึ้นทดสอบ**

ในกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลวในสภาวะของแรงสูง ค่าแรงจากสมการที่ 5 [9]

$$f_d = f_p - \frac{1}{4} \pi d_p^2 P_s \tag{5}$$

โดยที่  $P_s$  คือ แรงดันของเหลวภายในห้องแม่พิมพ์  $f_d$  คือแรงในการลากขึ้นรูปที่ทำต่อแผ่นเหล็ก และ  $f_p$  คือแรงกดของพื้นที่ในขณะขึ้นรูป

**2.4 แอนไอโซทรอปีของวัสดุโลหะแผ่น (Anisotropy)**

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \tag{6}$$

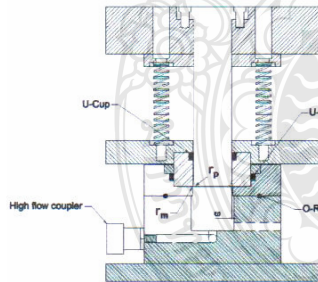
**3. การเตรียมอุปกรณ์การทดลอง**

**3.1 เครื่องปั๊มและแม่พิมพ์การลากขึ้นรูปเหล็ก**

เครื่องปั๊มอัตราระบบไฮดรอลิกขนาด 80ตัน ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรง ชนิดวัดแรงกดพร้อมชุดแปลงสัญญาณชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปเหล็ก วัสดุทำจากเหล็ก SKD11 ชุบแข็ง 58-60 ซึ่งออกแบบให้ใช้สปริง ตามมาตรฐาน JIS B 5012 : 2008 [10] เป็นอุปกรณ์กดแผ่นทดสอบ โดยในการทดลองติดตั้งสปริงแม่พิมพ์ ค่าคงที่สปริง 19.62 นิวตันต่อมิลลิเมตร ติดตั้งทั้งหมด 8 ตัว แรงกดขึ้นทดสอบรวม 156.96 นิวตันต่อมิลลิเมตร

ตารางที่ 2 แม่พิมพ์ในการทดลองลากขึ้นรูปเหล็ก

รัศมีมุมตาย	รัศมีมุมพื้นที่	เส้นผ่าศูนย์กลางพื้นที่	ช่องว่างแม่พิมพ์
2 mm.	4.5 mm.	45 mm.	0.65 mm.

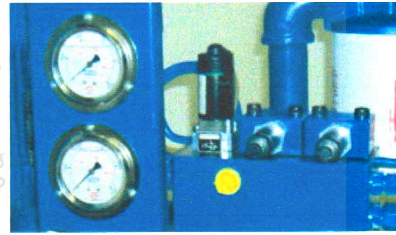


รูปที่ 5 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ในการลากขึ้นรูปเหล็ก

**3.1 ระบบต้นกำลังไฮดรอลิก**

ชุดต้นกำลังและชุดควบคุมระบบไฮดรอลิก แรงดันสูงสุด 700 บาร์ พร้อมชุดควบคุมแรงดันชนิดสกรูหมุน

สำหรับปรับตั้งแรงดัน ใช้ น้ำมันไฮดรอลิกมาตรฐานเกรด 68 ตามมาตรฐาน มอก.977-2551[11] ค่าความหนืดเชิงจลศาสตร์ 61.2-74.8 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที เป็นของเหลวในการศึกษาทดลอง



รูปที่ 6 ชุดปรับความดัน และอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน

ตารางที่ 3 สมบัติของน้ำมันไฮดรอลิกเกรด 68

ISO 3105 Viscosity Grade	Hydraulic oil 68
Viscosity @ 40 °C mm <sup>2</sup> /s	61.2-74.8

**3.2 ชิ้นงานในการทดสอบ**

แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ตามมาตรฐาน ASTM E 2218-02ความหนา 0.48 มม. ขนาดชิ้นงานเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 มม.

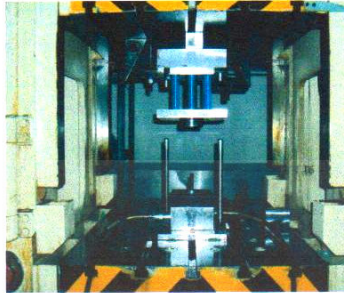
ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304

ความหนา (mm.)	n	K	อัตราส่วนความเครียดพลาสติก (r)			
			R <sub>0</sub>	R <sub>45</sub>	R <sub>90</sub>	$\bar{R}$
0.48	0.381	818	1.258	1.451	1.151	1.288

**4. วิธีการทดลอง**

ติดตั้งชุดแม่พิมพ์บนเครื่องปั๊มอัด 80 ตัน พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์วัดแรง ชนิดวัดแรงกดพร้อมชุดแปลงสัญญาณ หลังจากนั้นติดตั้งชุดควบคุมไฮดรอลิกเข้ากับแม่พิมพ์ โดยใช้สายท่อทางเดินน้ำมันชนิดรับแรงดันสูง ที่ช่องทางเข้าและช่องทางออกของแม่พิมพ์ รูปที่7 การติดตั้งสายไฮดรอลิก ชนิดท่อแรงดันสูงเข้ากับตัวแม่พิมพ์ โดยใช้หัวต่อชนิดแรงดันสูง (high flow coupler)





รูปที่ 7 แม่พิมพ์ซึ่งติดตั้งบนเครื่องปั๊มอัดเรียบร้อยแล้ว

ในการขึ้นรูป แม่พิมพ์ตัวบนเคลื่อนตัวลงประกบแม่พิมพ์ตัวล่าง ระยะกอดก่อนพันซ์สัมผัสชิ้นงานทดสอบ 25 มิลลิเมตร ใช้สปริงแม่พิมพ์ที่มีค่าคงที่ ขนาดความยาว 125 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางวงใน 13.5 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางวงนอก 27 มิลลิเมตร และค่าคงที่สปริงเท่ากับ 19.62 นิวตันต่อมิลลิเมตร จำนวน 8 ตัว แรงกดรวมเท่ากับ 3925 นิวตัน

**4.1 การควบคุมความดันภายในห้องแม่พิมพ์**

การปรับค่าความดันภายในห้องแม่พิมพ์ โดยปรับที่ชุดต้นกำลังไฮดรอลิก พร้อมตัวปรับแรงดันชนิดสกรูหมุน ทำการปรับสกรูควบคุมแรงดันด้านทางเข้า และทางออกของแม่พิมพ์ ซึ่งน้ำมันจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ และไหลออกจากแม่พิมพ์ไหลกลับถึงเก็บตามแรงดันที่ควบคุม 15MPa รูปที่6 ชุดปรับแรงดัน และอุปกรณ์ควบคุมแรงดันน้ำมัน

**4.2 การทดลองลากขึ้นรูปลึก**

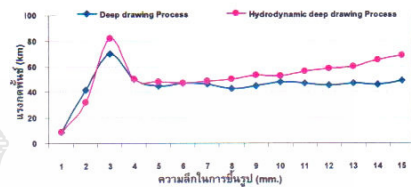
ทำการทดลองลากขึ้นรูปลึก แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 รูปถ้วยทรงกระบอกแบบมีปีก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางทรงกระบอก 45 มิลลิเมตร ความสูงรวม 15 มิลลิเมตร ขนาดความกว้างของปีก 5 มิลลิเมตร โดยทดลองแรงดันน้ำมันที่ 15 MPa เปรียบเทียบกับการลากขึ้นรูปลึก กับการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิก

**5 ผลการทดลอง**

**5.1 แรงกดพื้นที่โดยรวมในการลากขึ้นรูป**

จากการทดลองในรูปที่5 พบว่าการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิก มีแรงดันจากน้ำมันภายในอ่าง

ส่งผลทำให้แรงในการลากขึ้นรูปมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อเทียบกับการลากขึ้นรูปลึก

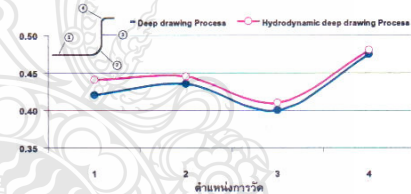


รูปที่8 แรงกดพื้นที่ในการลากขึ้นรูปลึก ตามระยะการเคลื่อนที่ของพื้นที่

จากรูปที่8 พบว่าในการลากขึ้นรูปถึงระยะ 3 mm. ใช้แรงกดพื้นที่สูงที่สุดในการขึ้นรูป และในการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิก ใช้แรงกดพื้นที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับการลากขึ้นรูปลึก เป็นผลมาจากแรงต้านแรงกดพื้นที่จากแรงดันน้ำมัน

**5.2 เปรียบเทียบความหนา**

จากผลการทดลองการขึ้นรูป นำชิ้นงานมาทำการวัดค่าความหนาที่เปลี่ยนไป และมาเปรียบเทียบความหนา ระหว่างการลากขึ้นรูปลึก กับการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิก

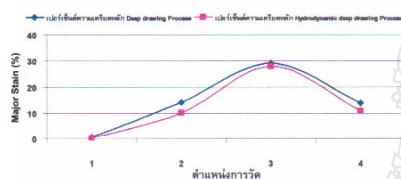


รูปที่9 เปรียบเทียบความหนาชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปลึก กับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิก

จากรูปที่9 แสดงค่าความหนาของชิ้นงาน หลังจากการขึ้นรูปลึกเปรียบเทียบการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิกของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ความหนา 0.48 มม. มีค่าต่างกัน 2.34% และพบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอลิก มีอัตราการลดรูปน้อยกว่ากระบวนการลากขึ้นรูปลึก สาเหตุจากน้ำมันทำหน้าที่รองรับแรงกระทำจากการเคลื่อนที่ของพื้นที่ลงมาแทนที่ปริมาตรน้ำมันในอ่าง ส่งผลให้แรงดันน้ำมันในอ่างเพิ่มขึ้น และแรงดันน้ำมันจะกระทำกับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมตลอด

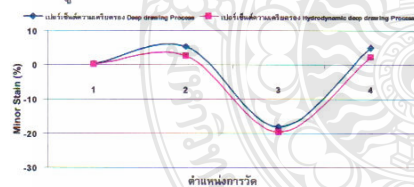
การเคลื่อนที่ของพันธ์ ทำให้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมไปสัมผัสกับพื้นผิวของพันธ์ แรงเสียดทานระหว่างพันธ์กับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมจะส่งผลให้บริเวณที่สัมผัสกันไม่เกิดการยืดตัวออกในขณะขึ้นรูป ทำให้ความสามารถในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกระบวนการลากขึ้นรูปลึก [12]

### 5.3 ค่าความเครียด



รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดหลักจากการลากขึ้นรูปลึกเปรียบเทียบการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิก

จากรูปที่ 10 แสดงค่าความเครียดหลัก (Major Strain) ของชิ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปเปรียบเทียบการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิก พบว่าทุกตำแหน่งมีค่าความเครียดหลัก (Major Strain) เป็นบวกทั้งหมด ซึ่งแสดงการยืดตัวของชิ้นงานในแนวแกนหลัก ตำแหน่งที่ 1, 2 และ 4 มีค่าความเครียดหลัก (Major Strain) อยู่ระหว่าง 0 – 20 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งที่ 3 ค่าความเครียดหลัก (Major Strain) เท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์ มีการยืดตัวของแนวแกนหลักสูงสุด ซึ่งเป็นบริเวณตรงผนังด้านข้างของชิ้นงาน และค่าความเครียดหลัก (Major Strain) ของการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิก ต่ำกว่า การลากขึ้นรูป เฉลี่ย 9.18 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดรองจากการลากขึ้นรูปลึกเปรียบเทียบการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิก

จากรูปที่ 11 แสดงค่าความเครียดรอง (Minor Strain) ของชิ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปเปรียบเทียบการลาก

ขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิก พบว่าตำแหน่งที่ 1, 2 และ 4 มีค่าความเครียดรอง (Minor Strain) เป็นบวก และตำแหน่งที่ 3 มีค่าเป็นลบ จากการเปรียบเทียบพบว่า การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิกกับการลากขึ้นรูปลึก มีค่าความเครียดรอง (Minor Strain) แตกต่างกันเฉลี่ย 7.29 เปอร์เซ็นต์

### 6. สรุปผลการทดลอง

1. การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิก ใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงกว่าการลากขึ้นรูปปกติ
2. การวิเคราะห์ความหนาของชิ้นงาน ของการลากขึ้นรูป เปรียบเทียบกับการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิก แตกต่างกันเฉลี่ย 0.5 เปอร์เซ็นต์
3. ค่าความเครียดบนชิ้นงาน เปรียบเทียบการลากขึ้นรูปปกติกับการลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการไฮดรอดินามิก มีค่าความเครียดกระจายตัวที่ใกล้เคียงกัน

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเครื่องทดสอบวัสดุ จากสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี และขอขอบคุณ ผศ. ดร.ศิริชัย ต่อสกุล ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ในการแนะนำแนวทางการดำเนินงานวิจัย และการสนับสนุนอุปกรณ์การทดสอบ สำหรับงานวิจัยครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

- 1 Kang, D. "A study on hydrodynamic deep drawing equipment," Journal Materials Processing Technology (Electronic), 2000, 101, p 21, Available: ELSEVIER / Science Direct (3 June 2010)
- 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 (Electronic), 2004, 44, p 649, Available: ELSEVIER / Science Direct (3 June 2010)



- 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 Tschachtsch, H., Metal Forming Practise, Verlag Berlin Heidelberg Germany, Springer, 2006, pp. 142-183
- 5 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
- 6 Marciniak, Z.D., J.L. and Hu, S.J., Mechanics of sheet metal forming, House Jordan Hill Oxford, Butterworth-Heinemann, Second edition, 2002, pp108-128
- 7 Marciniak, Z Duncan, J.L. and Hu, S.J., Mechanics of sheet metal forming, House Jordan Hill Oxford, Butterworth-Heinemann, Second edition, 2002, pp108-128
- 8 Kang, D. "A study on hydrodynamic deep drawing equipment," Journal Materials Processing Technology (Electronic), 2000, 101, p 21. Available: ELSEVIER / Science Direct (3 June 2010)
- 9 Lang, L.H., "Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure Part I. Experimental observations of the forming process of aluminum alloy" Journal Materials Processing Technology, Vol.101, 2000, pp 119-131
- 10 JIS B 5012 : 2008 Coild helical spring for press dies
- 11 มอก .977 - 2551 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม น้ำมันไฮดรอลิก-พื้นฐานน้ำมันแร่
- 12 ชนสาร อินทรกำธรชัย, "การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำกับอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์", การประชุมวิชาการด้านการพัฒนาการดำเนินงานทางอุตสาหกรรมแห่งชาติ, ครั้งที่ 2, ปีพ.ศ. 2554, หน้าที่ 3

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล	นายสุริยา น้าแก้ว
วัน เดือน ปีเกิด	6 กันยายน 2519
ที่อยู่	132/2 หมู่ 2 ต.หัวเขา อ.เดิมบางนางบวช จ.สุพรรณบุรี 72120
การศึกษา	
พ.ศ. 2542	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมอุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาเครื่องมือกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ. 2552 – ปัจจุบัน	ตำแหน่ง อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

