



## รายงานการวิจัย

การศึกษาอิทธิพลของชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น  
ด้วยกระบวนการ Hydrodynamic  
Investigation on Effect of the Stainless Steel Sheet Metal  
Forming on Hydrodynamic Deep Drawing Process

ผศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล  
นายจنگกล สุภารัตน์

หัวหน้าโครงการ  
ผู้ร่วมวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลฉะบuri  
งบประมาณประจำปี พ.ศ. 2557



## รายงานการวิจัย

การศึกษาอิทธิพลของชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น  
ด้วยกระบวนการ Hydrodynamic

ผศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล  
นายจنگกล สุภารัตน์

หัวหน้าโครงการ  
ผู้ร่วมวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
งบประมาณประจำปี พ.ศ. 2557

## บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิก (Hydrodynamic Deep Drawing) โดยใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 2 เกรดคือ SUS 304 และ SUS 430 ทำการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นเป็นรูปถ้วยทรงกระบอกไม่มีปีก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร ในอัตราส่วนการลากขึ้นรูป เท่ากับ 1.8 โดยมีตัวแปรคือแรงดันน้ำมัน 3 ค่า คือ 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa และขึ้นรูปแบบลากขึ้นรูป และมีแรงกดเหยียบ 2 ค่าคือ แรงกดเหยียบสูงสุด 6.28 KN และแรงกดเหยียบสูงสุด 11.46 KN ผลการทดลองพบว่า เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 ไม่มีการฉีกขาดหลังการขึ้นรูป แต่ SUS 430 เกิดการฉีกขาดหลังการขึ้นรูปทุกชิ้น สอดคล้องกับการทดสอบแรงดึงโดยค่าอัตราการยืดตัวของ SUS 304 มีค่ามากกว่า SUS 430 และแรงกดเหยียบที่ 11.46 KN มีรอยยุบน้อยกว่า เนื่องจากแรงกดเหยียบมากกว่า และความหนา ที่ 15 MPa ความหนาเปลี่ยนแปลงสูงที่สุด เพราะแรงดันสูงทำให้กระจายความเค้นได้ดีกว่าทำให้ความหนาเปลี่ยนแปลงมาก

**คำหลัก** กระบวนการไฮโดรไดนามิก, เหล็กกล้าไร้สนิม, แรงกดเหยียบ, การลากขึ้นรูป

## Abstract

This research aims to study the influences of stainless steel in metal plate drawing through the hydrodynamic deep drawing process. SUS 304 and SUS 430 stainless steel plates were used in metal plate drawing to form cylinder shapes with 45 millimeters diameters in the drawing ratio of 1.8. The variables are three values of oil pressure, which are 5 MPa, 10 MPa, and 15 MPa. There were two values of the blanking force, in which the lowest was 6.28 KN and the highest was 11.46 KN. Experiment results have discovered that the SUS 304 stainless steel did not tear off after the drawing, but the SUS 430 stainless steel had tore off after the drawing of every piece. This correlated to the tensile testing, in which the extension rate of the SUS 304 stainless steel was higher than that of SUS 430 stainless steel. The 11.46 KN blanking force had less wrinkles because with the higher blanking force, the thickness was changed to 15 MPa. The thickness has changed because high pressure caused the stress distribution to be better, thus the thickness has been significantly changed.

**Keywords:** Hydrodynamic process, Stainless steel, Blanking force, Deep drawing

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาคีวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับใช้ในการทดสอบ ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนงบประมาณประจำปี 2557 ในงานวิจัยฉบับนี้ จนสำเร็จไปได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้ สามารถจะนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมได้ เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดกับงานวิจัยฉบับนี้ต่อไป

คณะผู้วิจัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขต	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ความสามารถในการขึ้นรูป	4
2.2 การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปแบบใช้แรงดันของเหลว	9
2.3 เหล็กกล้าไร้สนิม	14
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	18
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ดำเนินการวิจัย	18
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	22
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์	33
4.1 ผลการทดลองแรงในการลากขึ้นรูป (Drawing Force)	33
4.2 ผลการทดลองความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปแบบ Hydrodynamic Deep Drawing	35
4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	40
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	48
5.1 สรุปผล	48
5.2 ข้อเสนอแนะ	48

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	49
ภาคผนวก ก	50
ข้อมูลการทดลอง	51
ภาคผนวก ข	63
การคำนวณอัตราส่วนความเครียด	64
ภาคผนวก ค	66
แบบแม่พิมพ์	67
การเผยแพร่ผลงานงานวิจัย	78
การประชุมวิชาการเครือข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม (IE Network 2014)	

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 และ	16
3.1	ตารางค่าสมบัติเชิงกลของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม	24
3.2	ตารางแสดงชิ้นส่วนต่าง ๆ ของแม่พิมพ์	26
4.1	ตารางแสดงผลเฉลี่ยความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 คำนิจสปริง 2.00 kgf/mm. (สปริงฟ้า)	36
4.2	ตารางแสดงผลเฉลี่ยความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 คำนิจสปริง 3.65 kgf/mm. (สปริงแดง)	37
4.3	ตารางแสดงผลเฉลี่ยความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 คำนิจสปริง 2.00 kgf/mm. (สปริงฟ้า)	38
4.4	ตารางแสดงผลเฉลี่ยความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 คำนิจสปริง 3.65 kgf/mm. (สปริงแดง)	39
ก.1	ตารางความหนาหลังการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 แรงกดเหยียบ 6278 N	51
ก.2	ตารางความหนาหลังการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 แรงกดเหยียบ 11458 N	52
ก.3	ตารางความหนาหลังการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 430 แรงกดเหยียบ 6278 N	53
ก.4	ตารางความหนาหลังการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 430 แรงกดเหยียบ 11458 N	54
ก.5	ตารางแรงในการลากขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 แรงกดเหยียบ 6278 N	55
ก.6	ตารางแรงในการลากขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 แรงกดเหยียบ 11458 N	57
ก.7	ตารางแรงในการลากขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 แรงกดเหยียบ 6278 N	59
ก.8	ตารางแรงในการลากขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 แรงกดเหยียบ 11458 N	61

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข.1	ตารางค่าสมบัติเชิงกลของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม	65

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก	5
2.2	เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น – ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก	6
2.3	ตัวอย่างลักษณะของชิ้นทดสอบแรงดึงแบบแผ่น	8
2.4	Hydrodynamic deep drawing (HDD)	10
2.5	ขั้นตอนการทำงานของ Hydrodynamic deep drawing	11
2.6	แสดงส่วนประกอบของแม่พิมพ์ในระบบการขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว	12
2.7	ส่วนต่างของของระบบ Hydrodynamic deep drawing	14
3.1	เครื่องเพรสไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน	18
3.2	เครื่องทดสอบแรงดึง	19
3.3	แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปถ้วยลึก	19
3.4	ชุดต้นกำลังไฮดรอลิก (Hydraulic)	20
3.5	เครื่องมือที่ใช้วัดและบันทึกผลแรงในการขึ้นรูป	20
3.6	น้ำมัน PTT Hydraulic Oil AW 68	21
3.7	เครื่องวัดความหนาชิ้นงาน Outside Micrometer	21
3.8	แผนภาพการดำเนินการวิจัยการศึกษาชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิม ในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing)	22
3.9	ลักษณะชิ้นทดสอบหาสมบัติเชิงกล	23
3.10	ลักษณะชิ้นทดสอบหลังดึงตามแนวแกน	23
3.11	แผนภาพการยึดตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304	24
3.12	แผนภาพการยึดตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 430	25
3.13	ชิ้นงานทดลอง	25
3.14	แสดงการขึ้นส่วนแม่พิมพ์ขึ้นรูป	26
3.15	แสดงการประกอบแม่พิมพ์ชุดบน	27
3.16	แสดงแม่พิมพ์ติดตั้งบนเครื่องเพรส	27
3.17	ชุดต้นกำลังไฮดรอลิก (Hydraulic)	28
3.18	การปรับตั้งสวิทช์กำหนดระยะ (Limit switch) ของเครื่องปั๊ม	28

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.19	แสดงแม่พิมพ์ขณะอยู่ในระยะที่กำหนด	29
3.20	สปริงที่ใช้ในการทดลอง	29
3.21	แสดงวงจรเครื่องต้นกำลังไฮดรอลิก (Hydraulic) แรงดันสูงสุด 70 MPa	30
3.22	น้ำมันไฮดรอลิก PTT ความหนืด 68	31
3.23	เครื่องมือที่ใช้วัดและบันทึกผลแรงในการขึ้นรูป	31
3.24	แสดงจุดตรวจความหนาที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงาน	32
3.25	เครื่องวัดความหนาชิ้นงาน Outside Micrometer	32
4.1	แสดงแรงในการลากขึ้นรูปต่อความลึกในการลากขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ค่านิยสปริง 2.00 kgf/mm.	33
4.2	แสดงแรงในการลากขึ้นรูปต่อความลึกในการลากขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ค่านิยสปริง 3.65 kgf/mm.	34
4.3	แสดงแรงในการลากขึ้นรูปต่อความลึกในการลากขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ค่านิยสปริง 2.00 kgf/mm.	34
4.4	แสดงแรงในการลากขึ้นรูปต่อความลึกในการลากขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ค่านิยสปริง 3.65 kgf/mm.	35
4.5	กราฟแสดงผลความหนาหลังการขึ้นรูปในแต่ละจุดการวัดของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ค่านิยสปริง 2.00 kgf/mm. (สปริงฟ้า)	36
4.6	กราฟแสดงผลความหนาหลังการขึ้นรูปในแต่ละจุดการวัดของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ค่านิยสปริง 3.65 kgf/mm. (สปริงแดง)	37
4.7	กราฟแสดงผลความหนาหลังการขึ้นรูปในแต่ละจุดการวัดของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ค่านิยสปริง 2.00 kgf/mm. (สปริงฟ้า)	38
4.8	กราฟแสดงผลความหนาหลังการขึ้นรูปในแต่ละจุดการวัดของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ค่านิยสปริง 3.65 kgf/mm. (สปริงแดง)	39

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9	แสดงแรงในการลากขึ้นรูปต่อความลึกในการลากขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ค่านิยสปริง 2.00 kgf/mm. 40
4.10	แสดงแรงในการลากขึ้นรูปต่อความลึกในการลากขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ค่านิยสปริง 3.65 kgf/mm. 41
4.11	แสดงแรงในการลากขึ้นรูปต่อความลึกในการลากขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ค่านิยสปริง 2.00 kgf/mm. 41
4.12	แสดงแรงในการลากขึ้นรูปต่อความลึกในการลากขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ค่านิยสปริง 3.65 kgf/mm. 42
4.13	แสดงตัวอย่างผนังขึ้นงานหลังการขึ้นรูปจากแรงกดเหยียบสูงสุดของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 42
4.14	แสดงตัวอย่างผนังขึ้นงานหลังการขึ้นรูปจากแรงกดเหยียบสูงสุดของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 430 43
4.15	แสดงความหนาหลังการขึ้นรูปที่แรงดัน 0 MPa 44
4.16	แสดงความหนาหลังการขึ้นรูปที่แรงดัน 5 MPa 44
4.17	แสดงความหนาหลังการขึ้นรูปที่แรงดัน 10 MPa 45
4.18	แสดงความหนาหลังการขึ้นรูปที่แรงดัน 15 MPa 45
4.19	แสดงตัวอย่างขึ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 หลังการขึ้นรูป 46
4.20	แสดงตัวอย่างขึ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 หลังการขึ้นรูป 47

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันการขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยกระบวนการไฮโดรไดนามิก (Hydrodynamic) หรือ Sheet Hydroforming เป็นกรรมวิธีการผลิตที่มีความสำคัญในปัจจุบันและใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ มากมาย เช่น เครื่องใช้ภายในครัวเรือน, อุตสาหกรรมยานยนต์, อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนของเครื่องบินและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุอีกชนิดหนึ่ง ที่นิยมนำมาแปรรูปใช้งานในงานอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก ทั้งในอุตสาหกรรมยานยนต์ เครื่องครัว เพราะคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนของวัสดุที่นำมาผสม แต่ทำให้การขึ้นรูปนั้นทำได้ยากขึ้นด้วยเนื่องจากคุณสมบัติร่วมของแต่ละวัสดุ

เนื่องจากปัจจุบันตลาดมีการแข่งขันสูง ผู้ผลิตจึงจำเป็นต้องผลิตผลิตภัณฑ์ให้ได้ตามที่ผู้บริโภคต้องการ โดยคำนึงที่คุณภาพ และความสวยงามเป็นหลัก การสร้างเครื่องขึ้นรูปแบบ ไฮโดรไดนามิก (Hydrodynamic) เป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการผลิตที่มีจำนวนน้อยแต่มุ่งเน้นความต้องการของผู้บริโภค สามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ ซึ่งอุตสาหกรรมยานยนต์ส่วนใหญ่ได้นำไปใช้ขึ้นรูปชิ้นส่วนต่างๆของรถยนต์ ที่ปัจจุบันเน้นการใช้เหล็กแผ่นทนแรงดึงสูง (High strength steel sheet) โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดน้ำหนักรวมของรถยนต์ให้เบาลง เพื่อเป็นการประหยัดเชื้อเพลิง และลดมลภาวะเพิ่มประสิทธิภาพในด้านต่างๆ รวมทั้งได้ผิวงานที่เรียบเนียนกว่าและมีความสม่ำเสมอของชิ้นงาน ลดของเสียที่เกิดในการผลิตได้ในระดับหนึ่ง

ในกระบวนการการขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) จะใช้น้ำมันหรือของเหลวที่มีความดันสูงเข้ามาช่วยในการขึ้นรูปโลหะแผ่น ในขณะที่มีการเคลื่อนตัวของแม่พิมพ์ด้านบน (Upper Die) กดลงบนชิ้นงานเพื่อขึ้นรูปสู่แม่พิมพ์ด้านล่าง (Lower Die) ในส่วนของวัสดุที่ต้องการศึกษาคือโลหะแผ่นที่มีความสามารถในการขึ้นลากรูปต่ำ (Low formability) เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมการที่กลุ่มได้นำเหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน JIS มาทดสอบ 2 เกรด ได้แก่ เกรด SUS 304 และ เกรด SUS 430 เนื่องจากแต่ละเกรดเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดออสเทนนิติก และ เกรดเฟอร์ริติก ตามลำดับ เนื่องมาจากมีการตั้งคำถามเกี่ยวกับการวิจัยว่า ถ้าเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมไม่เหมือนกันอิทธิพลที่เกิดขึ้นจากการทดลองจะมีความแตกต่างกันอย่างไรบ้าง เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปด้วยวิธีการลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองในกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) จะนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการลากขึ้นรูป (Deep Drawing) แบบเก่าว่าการขึ้นรูปแบบใดเหมาะสมกับชิ้นงานมากกว่ากัน โดยจะมุ่งเน้นที่ความสามารถในการลากขึ้นรูป (Formability) โดยที่จะพิจารณาลักษณะของชิ้นงานเป็นสำคัญว่าการขึ้นรูปแบบใดมีความเหมาะสมมากที่สุดและสามารถนำโครงการนี้มาเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายในการผลิตชิ้นงานว่าการลากขึ้นรูปแบบใดมีจุดคุ้มทุนต่ำกว่ากัน โดยพิจารณาของเสียที่ได้จากการลากขึ้นรูป โดยงานวิจัยที่ได้จะทำให้เกิดการพัฒนารูปแบบอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะในประเทศไทยต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกที่มีผลต่อกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) ของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 และ SUS 430

1.2.2 เพื่อศึกษาความหนาที่เปลี่ยนแปลงจากการไหลตัวของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 และ SUS 430

1.2.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของแรงกดเหยียบที่มีผลต่อชิ้นงานในการลากขึ้นรูป

## 1.3 ขอบเขต

1.3.1 วัสดุที่นำมาใช้ในการศึกษาทดลองใช้วัสดุ 2 ชนิดคือเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 และ 430 ความหนาเริ่มต้น 0.48 มิลลิเมตร ขนาดชิ้นงานเริ่มต้นเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร ทำการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นเป็นรูปถ้วยทรงกระบอกไม่มีปีก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร ในอัตราส่วนการลากขึ้นรูป (Drawing ratio, DR) เท่ากับ 1.8 แม่พิมพ์ทำจากเหล็กเครื่องมือ SKD 11 ทำการศึกษาทดลองการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) ด้วยการออกแบบแม่พิมพ์ให้สอดคล้องกับกระบวนการดังกล่าว

1.3.2 ศึกษาแรงดันของน้ำมันไฮดรอลิกในการลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) โดยควบคุมแรงดันของน้ำมันไฮดรอลิก 3 ระดับคือ 5 MPa 10 MPa และ 15 MPa

1.3.3 ศึกษาแรงกดจากสปริง 2 ชนิด 2 ระดับ

1) ค่านิจสปริง 2.00 kgf/mm. (สปริงสีฟ้า)

- แรงกดเหยียบก่อนการลากขึ้นรูป 3.92 kN (ระยะยุบสปริง 25 มิลลิเมตร)
- แรงกดเหยียบสูงสุด 6.28 kN (ระยะยุบสปริง 40 มิลลิเมตร)

2) ค่านิจสปริง 3.65 kgf/mm. (สปริงสีแดง)

- แรงกดเหยียบก่อนการลากขึ้นรูป 7.16 kN (ระยะยุบสปริง 25 มิลลิเมตร)
- แรงกดเหยียบสูงสุด 11.46 kN (ระยะยุบสปริง 40 มิลลิเมตร)

1.3.4 ทำการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความลึก 15 มิลลิเมตร โดยใช้ความเร็วในการลากขึ้นรูป 10 มิลลิเมตรต่อวินาที

1.3.5 มีการวิเคราะห์ผลการทดลองดังนี้

- 1) แรงในการลากขึ้นรูป
- 2) รอยย่นที่มากจากอิทธิพลของแรงกดเหยียบของสปริง
- 3) ความหนาของชิ้นงานในแต่ละจุดหลังการลากขึ้นรูป
- 4) ความเสียหายของชิ้นงานหลังการลากขึ้นรูป

#### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 สามารถทราบถึงอิทธิพลจากแรงดันที่เกิดขึ้นในการลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) ของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 และ SUS 430

1.4.2 สามารถทราบถึงความหนาที่เปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดจากการไหลตัวของเหล็กกล้าไร้สนิม

1.4.3 สามารถทราบแรงกดเหี่ยยบที่เหมาะสมกับเหล็กกล้าไร้สนิมในการลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing)

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไป

### 2.1 ความสามารถในการขึ้นรูป

#### 2.1.1 การยืดสม่ำเสมอ (Uniform elongation)

การยืดรวมของแผ่นขึ้นทดสอบแรงดึงประกอบด้วย 2 ส่วนคือการยืดสม่ำเสมอและหลังการยืดสม่ำเสมอ สำหรับวัสดุที่เป็นไปตามความสัมพันธ์ของกฎกำลัง ( $\sigma = K\epsilon^n$ ) การยืดสม่ำเสมอ (วัดในความเครียดจริง) เป็นค่าที่เหมาะสมต่อเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด ( $n$ ) ภายหลังจากการยืดสม่ำเสมอเกิดขึ้นมีผลกระทบกับพฤติกรรมการทำให้แข็งด้วยความเครียดและความไวของอัตราความเครียดทั้งสองชนิดของโลหะต่อความเค้นที่เกิดขึ้น เมื่อเกิดการคอดความเครียดและอัตราส่วนความเครียดภายในรอยคอดจะมีค่ามากกว่าบริเวณภายนอก เมื่อการทำให้แข็งด้วยความเครียดมีค่ามากขึ้นวัสดุจะถึงจุดต้านทานแรงได้น้อยลงทำให้พื้นที่หน้าตัดด้านความหนาลดลง ซึ่งเป็นต้นเหตุของการเปลี่ยนรูปบริเวณด้านนอกของรอยคอด [1]

#### 2.1.2 การยืดที่จุดคราก (Yield point elongation)

เป็นส่วนหนึ่งของการยืดรวมซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการครากแบบไม่ต่อเนื่องที่ความเค้นคราก ตามด้วยการก่อรูปของรอยร้าวที่พื้นผิวซึ่งรู้จักกันว่าเส้นลีดเดอร์หรือริ้วคราก ซึ่งเป็นการแสดงข้อผิดพลาดในวิธีใช้หลายอย่างของโลหะแผ่นการยืดที่จุดครากระหว่างการทดสอบแรงดึงที่ไม่ปรากฏให้เห็น จะแสดงให้เห็นเส้นลีดเดอร์ที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป การยืดที่จุดครากส่วนใหญ่จะต้องมีเศษแทรกในธาตุเจือ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคาร์บอนหรือไนโตรเจน ด้วยเหตุนี้เหล็กที่มีสารแทรกต่ำจะไม่แสดงออก การยืดที่จุดครากสามารถระงับได้โดยการอบคืนตัวรอบๆแผ่นโลหะขณะทำการบด เว้นเสียแต่ไนโตรเจนมีส่วนผสมของธาตุอื่น (ปกติอะลูมิเนียม) เหล็กกล้าจะมีความแข็งขึ้นหลังจากมีการเก็บไว้นานๆ (ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและตัวแปรอื่น ๆ ในการเก็บ) เหล็กกล้าที่มีการเปลี่ยนตามอายุสามารถใช้ในการขึ้นรูปได้ดีที่สุด [1]

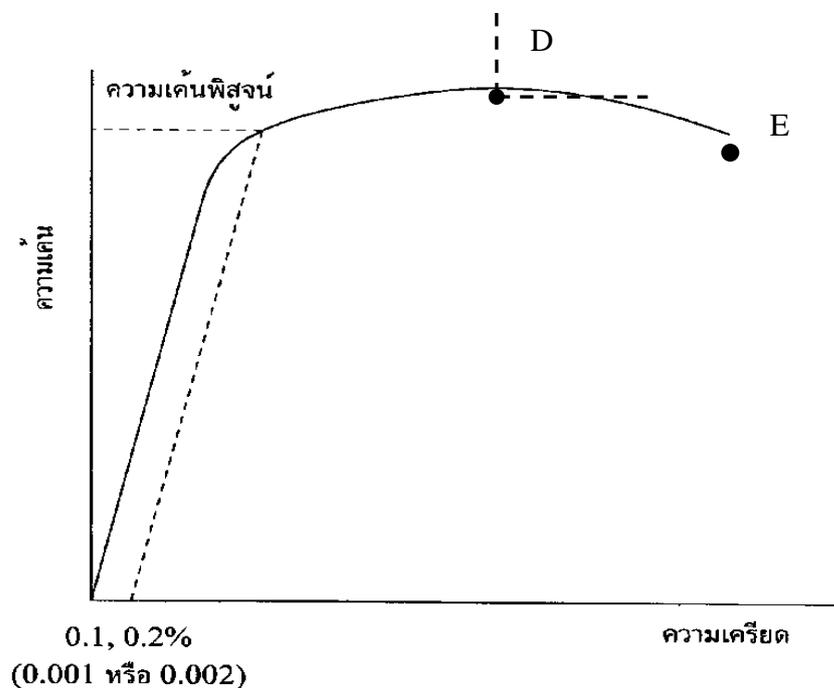
#### 2.1.3 อัตราส่วนความเครียดพลาสติก (Plastic strain ratio)

ค่า  $r$  มีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนความเครียดจริงในแนวความกว้าง ( $\epsilon_w$ ) ต่อความเครียดจริงในแนวความหนา ( $\epsilon_t$ ) ของความเครียดช่วงพลาสติกในโลหะแผ่นบริเวณการยืดสม่ำเสมอของการทดสอบการดึง เกี่ยวข้องกับความสามารถในการดรอว์ เป็นการวัดความสามารถของวัสดุต่อการต้านทานการลดความหนา (Thinning) ในการดรอว์วัสดุบริเวณริมขอบขึ้นงานจะเกิดการยืดในทิศทางเดียว (แนวรัศมี) เกิดการกดในทิศทางตั้งฉาก (แนวเส้นรอบวง) ค่า  $r$  สูงแสดงว่าวัสดุมีสมบัติการดรอว์ได้ดี ดังสมการที่ 2.1

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln(w/w_0)}{\ln(t/t_0)} \quad (2.1)$$

- $r$  = อัตราส่วนความเครียดพลาสติก  
 $\epsilon_w$  = ความเครียดจริงในแนวความกว้าง  
 $\epsilon_t$  = ความเครียดจริงในแนวความหนา  
 $w$  = ความกว้างชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลง (mm)  
 $w_0$  = ความกว้างชิ้นงานเดิม (mm)  
 $t$  = ความหนาชิ้นงาน (mm)  
 $t_0$  = ความหนาชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลง (mm)

วัสดุหลายชนิดเช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่เราก็มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10 - 0.20% ของความยาวกำหนดเดิม (Original Gage Length) แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ดังรูปที่ 2.1 ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) หรือความเค้น 0.1 หรือ 0.2% offset ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก



ในแนวตั้งฉากของแผ่นเหล็ก ค่า  $r$  ที่เปลี่ยนแปลงค่าไปตามทิศทางของแผ่นวัสดุในการดรอว์ขึ้นรูป ถ้วยทรงกระบอก ค่าที่เปลี่ยนแปลงนี้จะทำให้ผนังของถ้วยสูงไม่เท่ากัน เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เราเรียกว่า รอยดิ่ง (Earring) ดังนั้นโดยทั่วไปจึงมักวัดค่า  $r$  เฉลี่ยหรือแอนไอโซทรอปี้ตั้งฉากเฉลี่ย  $r_m$  (Normal anisotropy) และแอนไอโซทรอปี้ระนาบ ค่า  $\Delta r$  (Planar anisotropy) สมบัติของ  $r_m$  มีนิยามว่า

$$r_m = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} r_m &= \text{แอนไอโซทรอปี้ตั้งฉาก} \\ r_0 &= \text{แอนไอโซทรอปี้ตามแนวทิศทางการรีด} \\ r_{45} &= \text{แอนไอโซทรอปี้ทำมุม 45 องศา กับแนวทิศทางการรีด} \\ r_{90} &= \text{แอนไอโซทรอปี้ทำมุม 90 องศา กับแนวทิศทางการรีด} \end{aligned}$$

เมื่อตัวห้อยที่อ้างถึงคือมุมระหว่างแกนขึ้นทดสอบการดึงกับทิศทางการรีดแผ่นวัสดุ เหล็กรีดร้อนและรีดเย็นอบคืนตัวอุณหภูมิสูงคือไอโซทรอปิกทั่วไป ( $r_m = 1.0$ ) เหล็กกล้าผิวบริสุทธิ์ (รีมส์สตีล) ปกติมี  $r_m$  เท่ากับ 1.2 แต่อาจจะมีค่าสูงขึ้นในกรณีพิเศษเช่นผลิตภัณฑ์ที่มีแมงกานีส และซิลเฟอร์ผสมอยู่ต่ำๆ เหล็กกล้าเนื้อแน่น (อะลูมิเนียมคิลล์สตีล) จะมีแอนไอโซทรอปิก  $r_m$  เท่ากับ 1.6 หรือค่าอาจจะสูงกว่า (สูงถึง 2.5) ซึ่งได้มาโดยควบคุมส่วนประกอบและขบวนการผลิต ชีดจำกัดค่าสูงสำหรับเหล็กกล้าเชิงพาณิชย์ประมาณ 3.0 ถึงแม้ว่าค่าใกล้เคียง 3.0 จะได้ไม่นานๆ ครั้ง เหล็กกล้า Interstitial free Steel จะมี  $r_m$  ประมาณ 2.0 ค่า  $r_m$  ใช้ทำนายความสามารถในการ ดรอว์ขึ้นรูปโลหะแอนไอโซทรอปี้ในระนาบ ค่า  $\Delta r$  มีนิยามว่า

$$\Delta r = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{2} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \Delta r &= \text{แอนไอโซทรอปี้ในระนาบ} \\ r_0 &= \text{แอนไอโซทรอปี้ตามแนวทิศทางการรีด} \\ r_{45} &= \text{แอนไอโซทรอปี้ทำมุม 45 องศา กับแนวทิศทางการรีด} \\ r_{90} &= \text{แอนไอโซทรอปี้ทำมุม 90 องศา กับแนวทิศทางการรีด} \end{aligned}$$

แอนไอโซทรอปี้ในระนาบเป็นการวัดความเปลี่ยนแปลงของ  $r$  ด้วยทิศทางในแผ่น ระนาบของจำนวนจุดสูงๆหรือรอยดิ่ง ซึ่งจะพัฒนาบนขอบของการดีปดรอว์ถ้วยทรงกระบอกหรือ ขึ้นส่วนต่างๆ จุดสูงๆในทิศทางการรีดตามเกรนและขวางเกรน แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ แผ่น เหล็กกล้าคุณภาพการดรอว์และแผ่นเหล็กกล้าเนื้อแน่น  $\Delta r$  จะเป็นบวก สำหรับเหล็กความแข็งแรงสูง

และเหล็กกล้าเจือต่ำ  $\Delta r$  เป็นลบจะเกิดเป็นรอยดิ่งที่ 45 องศากับทิศทางการรีด ค่า  $\Delta r$  เข้าใกล้ศูนย์มีการใช้มากที่สุดเพราะว่ามีแนวโน้มจะเกิดรอยดิ่งน้อยที่สุดเมื่อโลหะถูกดรอว์เข้าไปในถ้วยทรงกระบอก  $r_m$  เป็นค่าที่กำหนดความลึกเฉลี่ย(ความสูงของผนัง)ของการดรอว์ลึกที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้  $\Delta r$  เป็นค่าที่กำหนดขอบเขตของรอยดิ่ง วัสดุที่มีค่า  $r_m$  สูงและค่า  $\Delta r$  ต่ำ ในขณะเดียวกันทำให้มีความสามารถการดรอว์ที่เหมาะสมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำรีดร้อนมีค่า  $r_m$  ในช่วง 0.8 ถึง 1.0 เหล็กกล้าผิวบริสุทธิ์รีดเย็น (Cold-rolled rimmed steel) มีค่าในช่วง 1.0 ถึง 1.4 เหล็กกล้าเนื้อแน่นรีดเย็นกำจัดออกซิเจน (Cold-rolled aluminum-killed steel, deoxidized) มีค่าในช่วง 1.4 ถึง 2.0 เหล็กกล้า (Interstitial free Steel) มีค่าในช่วง 1.8 ถึง 2.5 และอะลูมิเนียมเจือมีค่าในช่วง 0.6 ถึง 0.8 ค่า  $r_m$  สูงสุดในทางทฤษฎีสำหรับเหล็กกล้าเฟอร์ไรต์ (Ferritic steel) คือ 3.0 ในการทดสอบแรงดึงของแผ่นโลหะลักษณะของการเตรียมวัสดุดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างลักษณะของชิ้นทดสอบแรงดึงแบบแผ่น

#### 2.1.4 เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain Hardening Exponent)

$n$  คือความชันของเส้นโค้งความเค้นจริงและความเครียดจริงเมื่อมีการพล็อตบนค่าลอการิทึม เป็นการกำหนดโดยขึ้นอยู่กับความเค้นไหล (Flow stress) บริเวณจุดครากบนระดับความเครียด ในวัสดุค่า  $n$  มีค่าสูงความเค้นไหลจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากความเครียด ซึ่งควรระวังการกระจายความเครียดที่เพิ่มขึ้นในบริเวณความเครียดและความเค้นไหลที่ต่ำกว่า ค่า  $n$  ที่สูงจะเป็นตัวชี้วัดความสามารถในการดัดขึ้นรูปได้ดี ส่วนของเส้นโค้งที่อยู่ถัดไปจากเส้นตรงสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีความหมายตามสมมุติฐานของสมการ

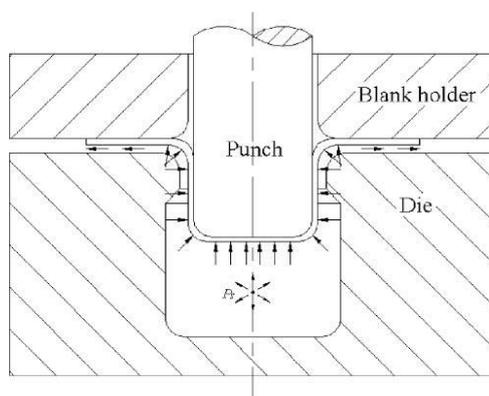
$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2.4)$$

$\sigma$	= ความเค้น
$K$	= แมทริกซ์ความแข็งเกร็งรวม
$\epsilon$	= ความเครียดจริง
$n$	= เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีค่า  $n$  โดยทั่วไปประมาณ 0.22 ใช้สำหรับขึ้นรูปชิ้นส่วนที่ยุ่ยากซับซ้อน ค่าที่สูงกว่า (ขึ้นไปถึง 0.26) จะระบุถึงความสามารถในการดึงยึดขึ้นรูปได้ดีเหล็กกล้าผิวบริสุทธิ์โดยทั่วไปค่า  $n$  เปรียบเทียบกับเหล็กกล้าเนื้อแน่นมีการรีดที่ดีกว่าหลังการประกันอายุ และมีค่าน้อยกว่า บางครั้งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีขบวนการผลิตไม่เพียงพอสำหรับความสามารถในการขึ้นรูป โดยเฉพาะเกรดรีดร้อนจะมีค่า  $n$  ต่ำ เท่ากับ 0.10 แต่เกรดที่มีความสามารถในการขึ้นรูปได้ดีจะมีค่า  $n$  มากกว่า 0.14 [1]

## 2.2 การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปแบบใช้แรงดันของเหลว

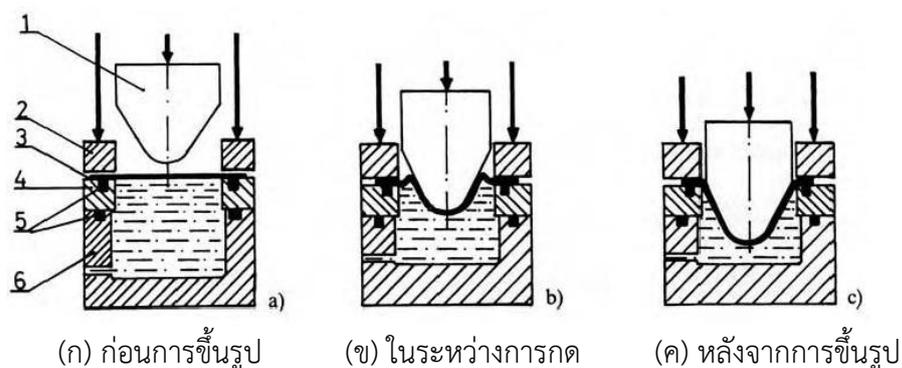
การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปแบบใช้แรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) เป็นลักษณะของการขึ้นรูปโลหะแผ่นคล้ายกับการขึ้นรูปโลหะแผ่นทั่วไป โดยมีชุดแม่พิมพ์ตัวล่าง (Lower Die) และชุดแม่พิมพ์ตัวบน (Upper Die) ทำการกดโลหะแผ่นให้เป็นชิ้นงานให้มีรูปร่างตามที่กำหนดเพียงแต่ภายในแม่พิมพ์นั้นจะบรรจุไปด้วยน้ำมันหรือของเหลวอื่นๆ ซึ่งเป็นน้ำมันหรือของเหลวความดันสูง (High pressure) ที่จะสามารถกดแผ่นโลหะให้ติดกับ ชุดแม่พิมพ์ตัวบน (Upper Die) ในขณะที่ทำการขึ้นรูป ซึ่งเป็นการลดความผิดที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการขึ้นรูปด้วยเช่นกัน ของเหลวที่อยู่ภายในชุดแม่พิมพ์จะไหลอยู่ระหว่างผิวด้านล่างของชุดแม่พิมพ์กับแผ่นโลหะ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นชั้นของสารหล่อทำหน้าที่ในการลดแรงเสียดทานในขณะที่ปฏิบัติงาน ค่าของขีดจำกัดของอัตราการลากขึ้นรูป (Limit drawing ratio: LDR) ของแผ่นโลหะนั้นจะเพิ่มขึ้น และเป็นการเพิ่มคุณภาพให้กับชิ้นงาน ตามรูปที่ 2.20 แสดงถึง กระบวนการ การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปแบบใช้แรงดันของเหลวในกรรมวิธีของ Hydrodynamic deep drawing (HDD) [2]



รูปที่ 2.4 Hydrodynamic deep drawing (HDD) [2]

ของเหลวสามารถนำมาใช้กับชุดแม่พิมพ์ตัวบน (Upper Die), ชุดแม่พิมพ์ตัวล่าง (Lower Die) หรือนำเข้ามาช่วยในการพัฒนาความสามารถในการขึ้นรูปของแผ่นโลหะ ในการนำเอาของเหลวเข้ามาช่วยลดความเสียหายในกระบวนการขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลวสามารถแยกออกได้เป็นสองกลุ่ม คือ กระบวนการที่แม่พิมพ์เป็นตัวเคลื่อนที่ในการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Active sheet hydroforming) กับ กระบวนการที่แม่พิมพ์อยู่กับที่แต่ของเหลวทำหน้าที่ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นให้มีรูปร่างตามแม่พิมพ์ (Passive sheet hydroforming) วัสดุต่างๆ สามารถนำกระบวนการนี้เข้ามาใช้ได้อย่างมากมาย เช่น เหล็กคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel), เหล็กกล้าโรสนิม (Stainless steel), เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High strength steel), อลูมิเนียมอัลลอย (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

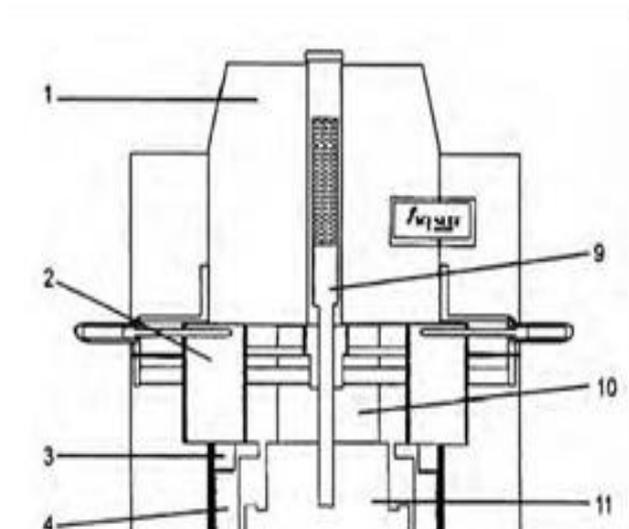
### 2.2.1 กระบวนการทำงานของการลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการ Hydrodynamic deep drawing ดังรูปที่ 2.5



ส่วนประกอบของการทำงาน คือ

- 1) แม่พิมพ์ตัวบน (Punch) เป็นตัวกดแผ่นโลหะ
- 2) แผ่นกดยึดแผ่นโลหะ (Blank holder)
- 3) แผ่นโลหะ (Blank)
- 4) แหวน (Drawing ring)
- 5) ซีลกันรั่ว (Seal)
- 6) ห้องบรรจุของเหลว (Water chamber)

รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการทำงานของ Hydrodynamic deep drawing [3]



1. Upper beam
2. Blank holder bar
3. Blank holder cylinder
4. Blank holder
5. Blank holder ring

6. Table
7. Table-closing cylinder
8. Lower beam
9. Ram cylinder
10. Ram bar
11. Ram
12. Punch
13. Blank
14. Column
15. Water chamber

รูปที่ 2.6 แสดงส่วนประกอบของแม่พิมพ์ในระบบการขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว

แรงในการลากขึ้นรูป (Drawing force) สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$F_{dr} = 1.5 \cdot R_m \cdot d \cdot \pi \left[ s + \frac{A_p \cdot p}{10} \right] \quad (2.5)$$

$R_m$	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )
$d$	Punch diameter (mm)
$s$	Sheet thickness (mm)
$A_p$	Punch cross-section (cm <sup>2</sup> )
$p$	Pressure in the chamber (daN/cm <sup>2</sup> )

แรงกดยึดแผ่นโลหะด้วยวิธีของ Siebel (Blank holder force: Siebel's method)

A) Blank holder pressure  $p$

$$P_{BH} = c \times R_m \times [2(\beta_{actual} - 1) + 0.5\left(\frac{D_o}{100} \times S\right)] \quad (2.6)$$

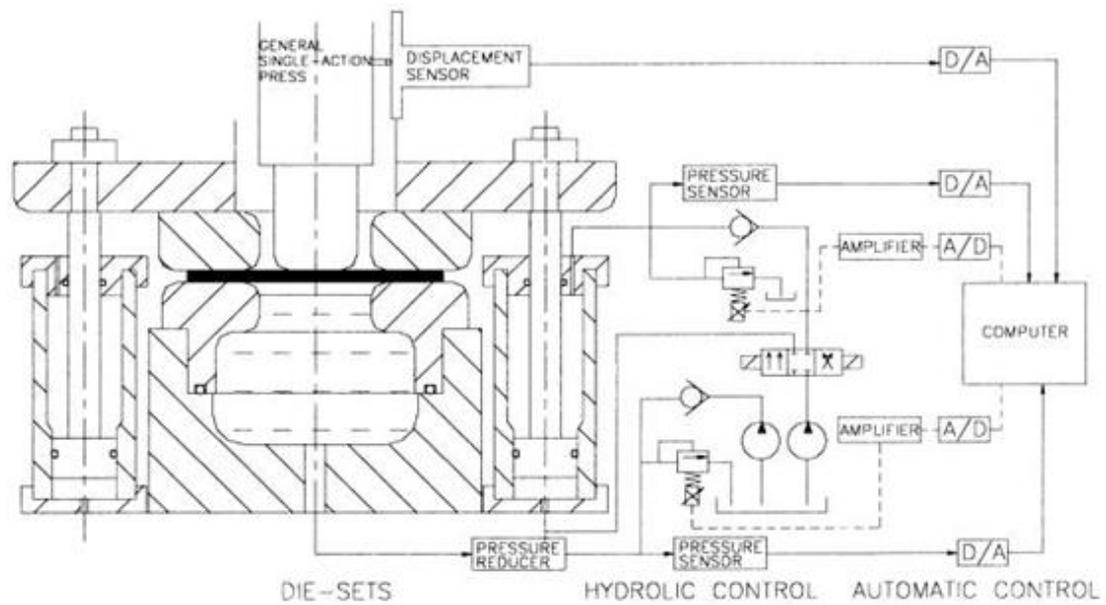
B) Blank holder force

$$F_{BH} = A_{BH} \cdot p \quad (2.7)$$

$F_{BH}$	Blank holder force (N)
$p$	Blank holder pressure (N/mm <sup>2</sup> )
$R_m$	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )
$D$	Diameter of the blank (mm)
$D_o$	Punch diameter (mm)
$s$	Sheet thickness (mm)
$A_{BH}$	Effective blank holder area (mm <sup>2</sup> )
$\beta_{actual}$	Actual draw ratio
$c$	Coefficient (Steel sheets $c = 0.002 - 0.003$ )

### 2.2.2 Hydrodynamic deep drawing system

การทำงานของและส่วนประกอบของระบบ Hydrodynamic deep drawing แสดงในรูปที่ 2.7 โดยส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ 1.General hydrodynamic deep drawing die sets และ 2.Hydraulic system ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนของ Hydraulic control และ Automatic control



รูปที่ 2.7 ส่วนต่างของของระบบ Hydrodynamic deep drawing [1]

### 2.3 เหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิม หรือ สแตนเลส นั้น ในทางโลหกรรมถือว่าเป็นโลหะผสมเหล็ก ที่มีโครเมียมอย่างน้อยที่สุด 10.5% เนื่องจากโลหะผสมดังกล่าวไม่เป็นสนิมที่มีสาเหตุจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง ออกซิเจนในอากาศกับโครเมียมในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม เกิดเป็นฟิล์มบางๆเคลือบผิวไว้ ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดความเสียหายให้กับตัวเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม ได้เป็นอย่างดี ป้องกันการกัดกร่อนและไม่ซำรุดหรือสึกกร่อนง่ายอย่างโลหะทั่วไป สำหรับในสหรัฐอเมริกาและในหลายประเทศ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการบิน นิยมเรียกโลหะนี้ว่า Corrosion resistant steel เมื่อไม่ได้ระบุชัดว่าเป็นโลหะผสมชนิดใด และคุณภาพระดับใด แต่ในท้องตลาดเราสามารถพบเห็น เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 18-8 มากที่สุด ซึ่งเป็นการระบุถึง ธาตุที่เจือลงในเนื้อเหล็กคือ โครเมียมและนิกเกิล ตามลำดับ เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้จัดเป็น Commercial Grade คือมีใช้ทั่วไปหาซื้อได้ง่าย มักใช้ทำเครื่องใช้ทั่วไป ซึ่งเราสามารถจำแนกประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิมได้จากเลขรหัสที่กำหนดขึ้นตามมาตรฐาน AISI เช่น 304 304L 316 316L เป็นต้น ซึ่งส่วนผสมจะเป็นตัวกำหนดเกรดของเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งมีความต้องการในการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป เหล็กกล้าไร้สนิม กับการเกิดสนิม ปกติเหล็กกล้าไร้สนิมจะไม่เป็นสนิมเพราะที่ผิวของมันจะมีฟิล์มโครเมียมออกไซด์ บางๆเคลือบผิวอยู่นั่นเองมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง Cr ในเหล็กกล้าไร้สนิมกับ ออกซิเจนในอากาศ การทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นสนิมคือการถูกทำลายฟิล์มโครเมียมออกไซด์ ที่เคลือบผิวออกไปในสภาวะที่เหล็กกล้าไร้สนิมสามารถเกิดสนิมได้ ก่อนที่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์จะก่อตัวขึ้นมาอีกครั้งเช่น ถ้าเหล็กกล้าไร้สนิมถูกทำให้เกิดรอยขีดข่วน แล้วบริเวณรายนั้นมีความชื้น ซึ่งสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยากับธาตุเหล็กก่อนที่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์จะก่อตัวขึ้นมา ก็จะเป็นสาเหตุให้เกิดสนิมขึ้นได้ [4]

### 2.3.1 กลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic)

เหล็กกล้าไร้สนิมตระกูล 300 เป็นเกรดที่ใช้งานแพร่หลายมากที่สุดถึง 70% มีคุณสมบัติที่แม่เหล็กดูดไม่ติด (non – magnetic) มีส่วนผสมของโครเมียม 16% คาร์บอนอย่างมากที่สุด 0.15% มีส่วนผสมของธาตุนิกเกิล 8% เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติในการประกอบ (Fabrication) และเพิ่มความต้านทาน การกัดกร่อน เกรดที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายและนิยมเรียก 18/10 คือการที่มีส่วนผสมของโครเมียม 18% และนิกเกิล 10% มีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนดีเยี่ยม ใช้งานประกอบและขึ้นรูป ที่เกี่ยวข้องกับความสะดวกและสุขอนามัยได้ดีเลิศ สะดวกในงานสร้าง ประกอบหรือขึ้นรูปทั่วไป ได้ดีมาก ความแข็งแรงสูงสุดและมความยืดตัวสูง แม่เหล็กดูดไม่ติด สามารถใช้งานเย็นจัดและร้อนจัด ที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่านี้ [4]

### 2.3.2 กลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic)

เป็นกลุ่มที่แม่เหล็กดูดติด (Magnetic) มีธาตุคาร์บอนผสมปริมาณที่ต่ำ และมีโครเมียมเป็นธาตุผสมหลักที่สำคัญอาจอยู่ระหว่าง 10.5%-27% และมีนิกเกิลเป็นส่วนผสมอยู่น้อยมากหรือไม่ มีเลย มีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนปานกลางถึงดี ต้านทานการกัดกร่อนแบบเป็นจุดและแบบมุมอับในซอกแคบ ๆ ได้ดีและมีความต้านทานการกัดกร่อนใต้แรงเค้นดีกว่าเกรดออสเทนนิติก มีข้อจำกัดในการเชื่อมและการขึ้นรูปมากกว่าเกรดออสเทนนิติก มีความต้านทานการเกิดออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิสูงถึง 850 องศาเซลเซียส ไม่สามารถชุบแข็งได้ [4]

### 2.3.3 กลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic)

แม่เหล็กดูดติด (Magnetic) มีส่วนผสมของโครเมียม 12-14% และมีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ปานกลาง มีโมลิบดีนัมเป็นส่วนผสมอยู่ประมาณ 0.2-1% ไม่มีนิกเกิล เหล็กกล้าไร้สนิมตระกูลนี้สามารถปรับความแข็งแรงได้โดยการให้ความร้อนแล้วทำให้เย็น ตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) และอบคืนตัว (Tempering) สามารถลดความแข็งแรงได้ คล้ายกับเหล็กกล้าคาร์บอน และพบการใช้งานที่สำคัญในการผลิตเครื่องตัด, อุตสาหกรรมเครื่องบินและงานวิศวกรรมทั่วไป [4]

### 2.3.4 กลุ่มดูเพล็กซ์ (Duplex)

มีโครงสร้างผสมระหว่าง โครงสร้างเฟอร์ริติก และออสเทนนิติก มีโครเมียมเป็นธาตุผสมอยู่ระหว่าง 19-28% และโมลิบดีนัมสูงกว่า 5% และมีนิกเกิลน้อยกว่าตระกูลออสเทนนิติก พบว่ามีการใช้งานมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในบรรยากาศแวดล้อมของคลอไรด์ [4]

### 2.3.5 กลุ่มเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกผลึก (Precipitation hardening)

เกรดที่เป็นที่รู้จักในตระกูลนี้ คือ 17-4H ซึ่งมีส่วนผสมของโครเมียม 17% และนิกเกิล 4% สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้โดยกลไกเพิ่มความแข็งแรงจากการตกผลึก (Precipitation hardening mechanism) โดยสามารถเพิ่มความแข็งแรงสูงมาก มีค่าความเค้นพิสูจน์ (Proof stress) อยู่ระหว่าง 1,000 ถึง 1,500 เมก้าปาสคาล (MPa) ขึ้นอยู่กับชนิดและกรรมวิธีปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน (Heat treatment) [4]

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS 304 และ SUS 430 [4]

	SUS 304	SUS 430
--	---------	---------

องค์ประกอบทางเคมี	(Austenitic)	(Ferritic)	
คาร์บอน	0.08	0.12	
แมงกานีส	2	1	
ฟอสฟอรัส	0.045	0.04	
กำมะถัน	0.03	0.03	
ซิลิคอน	1	1	
โครเมียม	18.00 - 20.00	16.00 - 18.00	
นิกเกิล	8.00 - 10.50		
<b>ความต้านแรงดึง</b>			
	KSI	84	75
	Mpa	579	517
<b>ความแข็ง (Rockwell)</b>			
		B80	B85

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พนา แชมสวัสดิ์ ได้ศึกษาการแก้ปัญหาการย่นในงานขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกที่ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุโลหะแผ่น SUS 304 หนา 1.0 mm. รูปถ้วยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm. สูง 80 mm. โดยวิธีการทดลอง ในการศึกษาทำให้ทราบว่าแรงกดขึ้นงาน (BHF) ต้องมีขนาดที่เหมาะสมไม่มากเกินไปและไม่น้อยเกินไปจึงจะทำให้ลดปัญหาการย่นที่เกิดขึ้นได้ [5]

D.Banabic, E.Dannmann. ได้ศึกษาถึงตัวแปรเสริม ( $a$ ) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างเกณฑ์การประเมินความเค้นหนึ่งแนวแกน ( $\sigma_u$ ) ต่อเกณฑ์การประเมินความเค้นสองแนวแกน ( $\sigma_b$ ) ใช้สร้างกราฟด้านขวาของ FLD แบบใหม่ โดยใช้หลักทฤษฎีการวิเคราะห์ Swift และ Maciniak-Kuczynski จากการศึกษาพบว่าผลกระทบของเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป FLC ด้านขวามีตำแหน่งสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่าตัวแปรเสริม ( $a$ ) และจากทฤษฎีของ Swift และ ทฤษฎีของ Marciniak-Kuczynski จะได้เส้นขีดจำกัดความเครียดแตกต่างกัน

S.Tiratharanat ได้ศึกษาการสร้าง FLD สำหรับใช้ในงานขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คุณสมบัติที่จำลองการขึ้นรูปเป็นโลหะแผ่น SPCC หนา 1.0 mm. และการสร้างเส้น FLC นั้น ใช้วิธีการจำลองการขึ้นรูปถ้วยรูปโดมมีรัศมีโค้งตัดขอบต่างกันค่าความเครียดแตกต่างกันตามรัศมีโค้ง และศึกษาผลแรงทบของความเสียหาย ที่มีต่อความเครียดเพราะว่าการจำลองให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายน้อย ทำให้การกระจายความเครียดมากกว่าชิ้นงานที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมาก [6]

ในปี 2000 Kang Dachang ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง A study on hydrodynamic deep drawing equipment โดยทำการศึกษาวิจัยถึงการทำงานของอุปกรณ์ในกระบวนการ Hydrodynamic deep drawing ซึ่งประกอบไปด้วย 1. ชุดแม่พิมพ์ (Die set), 2. ชุดควบคุมไฮดรอล

ลิก (Hydraulic control) และ 3. ชุดควบคุมการทำงานอัตโนมัติ (Automatic control) โดยการศึกษาวิจัยชิ้นนี้สรุปได้ว่า ชุดแม่พิมพ์ในกระบวนการ HDD เป็นอุปกรณ์มาตรฐานในการอัดขึ้นรูปครั้งเดียว มีความเหมาะสมสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบ HDD ลักษณะของการกดยึดแผ่นโลหะในรายงานฉบับนี้เป็นโครงสร้างและทฤษฎีใหม่ที่มีการออกแบบขึ้น เพื่อให้ประหยัดพลังงานและสามารถใช้งานได้กับเครื่องจักรกลต่างๆ ได้มากมาย แรงดันของของเหลวภายในระบบของการทำงานควบคุมโดยอุปกรณ์ลดแรงดัน (Pressure reducer) [7]

ในปี พ.ศ. 2549 สวัสดิ์ โสตามุข ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง การทำนายความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นส่วนยานยนต์ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป โดยนำวัสดุ 2 ชนิด คือ ใช้เหล็กแผ่น SPCC และ SPCEหนา 0.8 มม. สร้าง FLD ด้วยการขึ้นรูปกริดวงกลมบนแผ่นแบลงก์ทดสอบโดยวิธีกัดกรดด้วยไฟฟ้า เปลี่ยนขอบของแผ่นแบลงก์ด้วยรัศมีที่แตกต่างกัน ขึ้นรูปบนเครื่องเพรสไฮดรอลิกด้วยแม่พิมพ์รูปโดมครึ่งทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นซ์ 100 มม. กระทั่งเกิดรอยคอดและรอยแตก วัดการเปลี่ยนรูปของกริดวงกลมเป็นเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรอง นำ FLD มาประยุกต์ใช้ขึ้นรูปตัวถังรถยนต์ด้านใน ผลการวิจัยพบว่าเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปทั้งสองแตกต่างกัน เหล็ก SPCE มีความเครียดหลักและความเครียดรองในขณะที่เกิดการคอดสูงกว่าจึงสามารถขึ้นรูปได้มากกว่า แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปทั้งสองสอดคล้องกับความสามารถและความเสียหายในการขึ้นรูปขึ้นงานจริงและผลลัพธ์ของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [8]

ในปี พ.ศ. 2547 พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์ และ วารุณี เปรมานนท์ ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง การศึกษาอิทธิพลของความสูงด้ายแลนด์ในกรรมวิธีการลากขึ้นรูปลึง โดยใช้วัสดุทดสอบ 4 ชนิด คือ เหล็กกล้าไร้สนิม (SUS304) เหล็กกล้ารีดเย็น (SPCC) เหล็กกล้าเคลือบสังกะสี (SGCC) และอลูมิเนียม (A1100) ความหนา 1 mm นำมาทำการทดลองการลากขึ้นรูปลึงเป็นรูปถ้วยกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 44 mm อัตราส่วนการลากขึ้นรูปเท่ากับ 1.8 ส่วนความสูงของด้ายแลนด์ที่ทำการศึกษา มีขนาด คือ 40, 25, 20, 10 และ 0 mm ความสูงด้ายแลนด์จะไม่มีอิทธิพลต่อแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป ความหนาของชิ้นงาน และความเรียบผิวของชิ้นงานแต่จะมีอิทธิพลต่อการติดตัวกลับของชิ้นงาน โดยที่ด้ายแลนด์ 0 mm จะเกิดการติดตัวกลับมากที่สุด [9]

## บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

การศึกษาอิทธิพลของชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) ในครั้งนี้ได้เริ่มจากการศึกษาทฤษฎีของการวิจัย รายละเอียดต่างๆ เกี่ยวกับการออกแบบแม่พิมพ์ที่ใช้และกระบวนการแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำไปใช้ในการวางแผนการดำเนินงาน

### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ดำเนินการวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการศึกษาอิทธิพลของชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) ได้แก่

3.1.1 เครื่องเพรสขึ้นรูปขนาด 80 ตันของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องเพรสไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน

### 3.1.2 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile test) ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile test)

### 3.1.3 แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร 1 ชุด ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปถ้วยถ้วยเล็ก

3.1.4 ชุดต้นกำลังไฮดรอลิก ความดัน 0 – 70 MPa ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ชุดต้นกำลังไฮดรอลิก (Hydraulic Power Unit)

3.1.5 อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมันและอุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ (Mini data logger) ดังรูปที่ 3.5



(ก) อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน



(ข) อุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ

รูปที่ 3.5 เครื่องมือที่ใช้วัดและบันทึกผลแรงในการขึ้นรูป

3.1.6 น้ำมันไฮดรอลิก PTT ความหนืด 68 ขนาด 18 ลิตรจำนวน 2 ถัง ดังรูปที่ 3.6



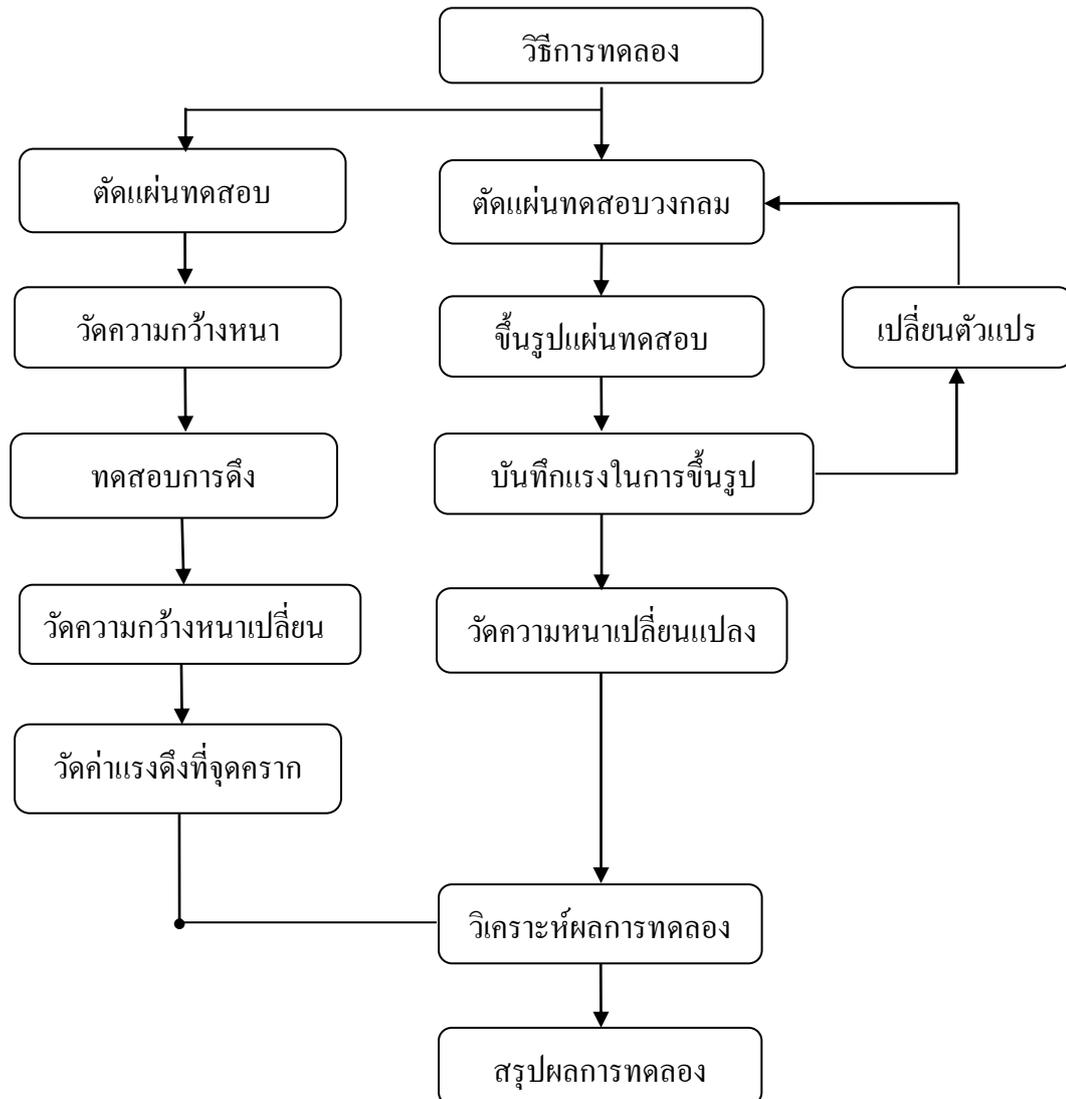
รูปที่ 3.6 น้ำมันไฮดรอลิก PTT ความหนืด 68

3.1.7 เครื่องมือวัดความหนาชิ้นงาน (Outside Micrometer) 1 เครื่อง ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องมือวัดความหนาชิ้นงาน (Outside Micrometer)

### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 3.8 แผนภาพการดำเนินการวิจัยการศึกษาชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิมในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing)

จากแผนภาพการดำเนินงานวิจัยสามารถแสดงรายละเอียดตามขั้นตอนดังนี้

#### 3.2.1 ทดสอบหาสมบัติอัตราส่วนความเครียดถาวร

1) นำค่าจากการทดสอบการดึง (Tensile test) ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 และ SUS 430 มาลงจุดสร้างแผนภาพความเค้นจริง (True stress)

2) วัดความกว้าง ( $W_0$ ) และความหนา ( $T_0$ ) ของแต่ละชิ้นทดสอบทุกแนวการรีดบันทึกข้อมูล ในช่วงความยืด (Gage length)



รูปที่ 3.9 ลักษณะชิ้นทดสอบหาสมบัติเชิงกล

3) นำชิ้นทดสอบที่วัดค่าความกว้างและหนาเสร็จแล้วมาทดสอบการดึงตามแนวแกน



รูปที่ 3.10 ลักษณะชิ้นทดสอบหลังดึงตามแนวแกน

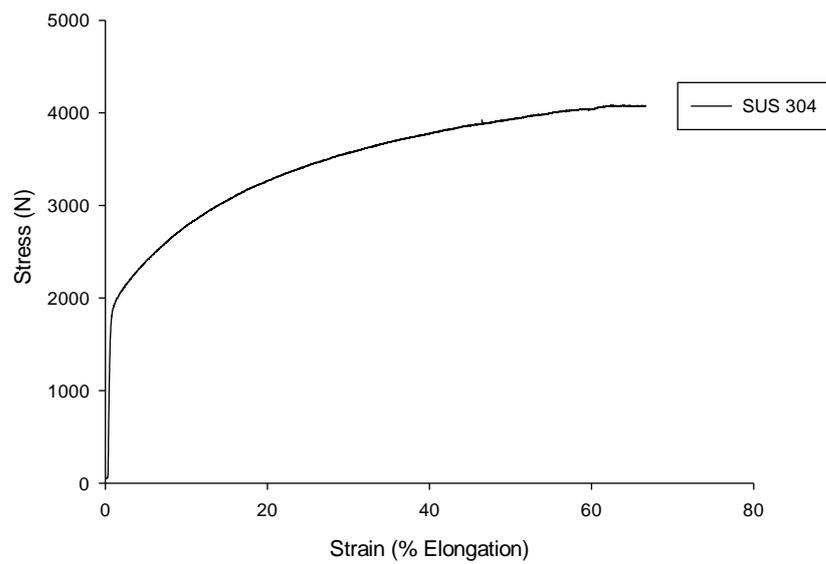
4) วัดความกว้าง ( $W_x$ ) และความหนา ( $T_x$ ) ของชิ้นทดสอบที่ดึงทดสอบแล้ว อุปกรณ์ (Extensometer) จะบันทึกการเปลี่ยนแปลงความยาวและพื้นที่หน้าตัด นำข้อมูลที่ได้จากการบันทึกมาคำนวณ

จากสมการที่ 2.13 อัตราส่วนความเครียดพลาสติกตามแนวทิศทางการรีดทั้ง 3 แนวแกน

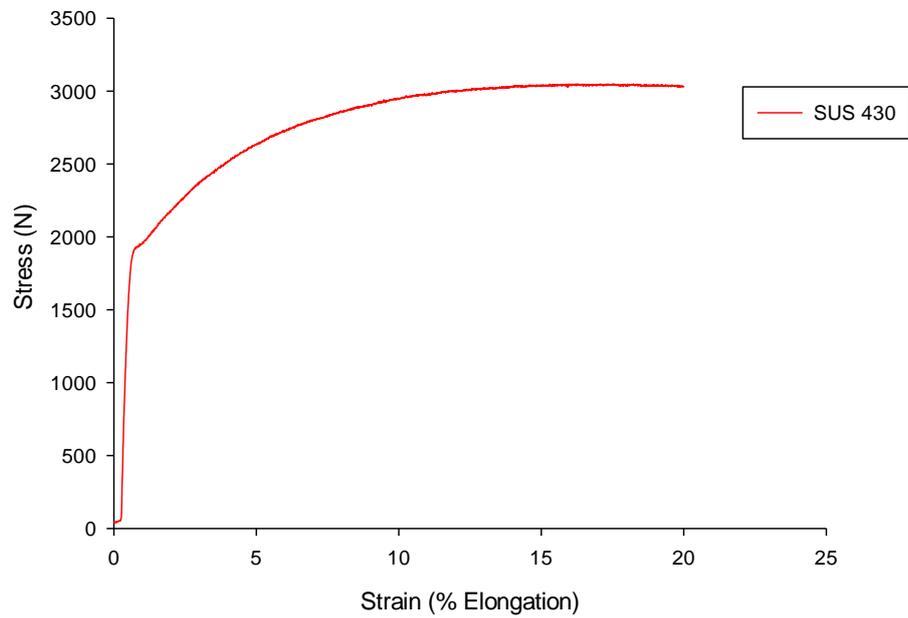
$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln(w/w_0)}{\ln(t/t_0)}$$

ตารางที่ 3.1 ตารางค่าสมบัติเชิงกลของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม

วัสดุหนา 0.48 mm.	แรงดึงที่จุดคราก (N)	อัตราส่วนความเครียดพลาสติก ( r )		
		$R_0$	$R_{45}$	$R_{90}$
SUS304	1740	1.258	1.451	1.151
SUS430	1922	0.765	0.798	0.589



รูปที่ 3.11 แผนภาพการยืดตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304



รูปที่ 3.12 แผนภาพการยืดตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 430

### 3.2.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

วัสดุที่นำมาใช้ในการทดลองคือเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS 304 และ เกรด SUS 430 ความหนาชิ้นงาน 0.48 มิลลิเมตร ชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.13



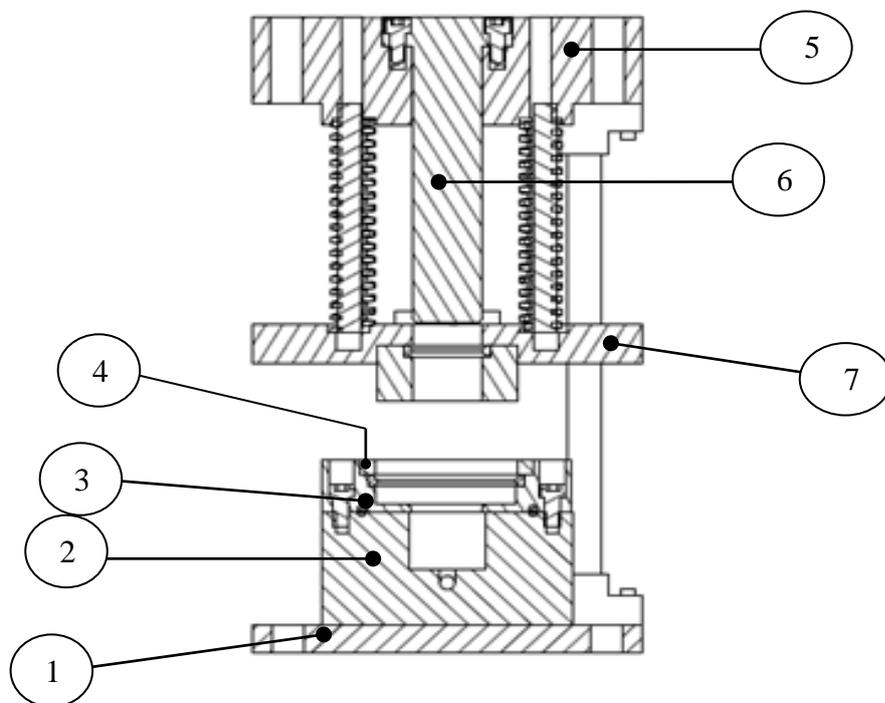
รูปที่ 3.13 แผ่นชิ้นงานทดลอง

### 3.2.3 การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ลากขึ้นรูป

แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปด้วยสร้างขึ้นโดยที่สอดคล้องกับการทำงานของระบบการลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) โดยที่แม่พิมพ์มีส่วนประกอบที่สำคัญของแม่พิมพ์มีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงชิ้นส่วนต่าง ๆ ของแม่พิมพ์

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	SS400 Steel
5	Punch Plate	250x250x75	SS400 Steel
6	Punch	Ø84x213	SKD11
7	Blank Holder Plate	250x250x27	SS400 Steel



รูปที่ 3.14 แสดงชิ้นส่วนแม่พิมพ์ขึ้นรูป

### 3.2.4 การประกอบแม่พิมพ์ขึ้นรูป

โดยการประกอบแม่พิมพ์มีขั้นตอนการประกอบชิ้นส่วนแม่พิมพ์ดังนี้

- 1) ทำความสะอาดชิ้นส่วนแม่พิมพ์ทั้งหมด
- 2) ประกอบชุดแม่พิมพ์ตัวล่างโดยการนำตาย (Die) มายึดติดกับแผ่นล่าง (Die holder) โดยการยึดสกรูให้แน่น
- 3) ประกอบส่วนของแผ่นรองยุคับ (U – cup) กับแผ่นตาย (Die)
- 4) ประกอบชุดแม่พิมพ์ตัวบน โดยการนำพunch (Punch) มายึดติดกับแม่พิมพ์ตัวบน (Upper Die) โดยยึดสกรู โดยที่ยังไม่ต้องยึดแน่นมากและประกอบยุคับ (U –cup) เข้ากับแผ่นเหยียบชิ้นงาน (Blank Holder Plate) ยึดสกรูให้แน่น
- 5) ประกอบสปริงกับแผ่นเหยียบชิ้นงาน (Blank Holder Plate) กับแม่พิมพ์ตัวบน (Upper Die) ยึดสกรูให้แน่น ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แสดงการประกอบแม่พิมพ์ชุดบน

- 6) นำชุดแม่พิมพ์ตัวบนไปสวมกับชุดแม่พิมพ์ตัวล่าง และยึดสกรูของชุดแม่พิมพ์ตัวบนให้แน่น
- 7) นำแม่พิมพ์ที่ประกอบเสร็จแล้ว ไปติดตั้งบนเครื่องเพรสไฮดรอลิก ยึดแม่พิมพ์ตัวบนและตัวล่างให้แน่น แล้วยกชุดบนขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แสดงแม่พิมพ์ติดตั้งบนเครื่องเพรส

8) ติดตั้งชุดต้นกำลังไฮดรอลิกเข้ากับแม่พิมพ์ โดยวางตำแหน่งให้เหมาะสม สะดวกในการปฏิบัติงาน



รูปที่ 3.17 ชุดต้นกำลังไฮดรอลิก (Hydraulic Power Unit)

9) ปรับตั้งสวิทช์กำหนดระยะ (Limit switch) ตามความลึกของชิ้นงานลากขึ้นรูป



รูปที่ 3.18 การปรับตั้งสวิทช์กำหนดระยะ (Limit switch) ของเครื่องปั๊ม

### 3.2.5 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงาน

การขึ้นรูปชิ้นงานรูปถ้วยทรงกระบอกด้วยแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) มีขั้นตอนดังนี้

- 1) นำเหล็กกล้าไร้สนิม มาทำการทดลองโดยใส่ลงไปแม่พิมพ์ตัวล่าง (Lower Die)
- 2) ทำการปรับแรงดันน้ำมันที่ไหลเข้าออกแม่พิมพ์ให้มีแรงดัน 3 ระดับ คือ 5 MPa

10 MPa และ 15 MPa

3) นำแม่พิมพ์ตัวบน (Upper Die) ลงมาจนถึงระยะที่กำหนด บันทึกแรงกดของเครื่อง



รูปที่ 3.19 แสดงแม่พิมพ์ขณะอยู่ในระยะที่กำหนด

4) เปิดชุดต้นกำลังไฮดรอลิก ขึ้นรูปตามระยะที่กำหนด หยุดการบันทึก

5) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1-4 โดยเปลี่ยนชนิดชิ้นงาน แรงดันน้ำมันที่เครื่องไฮดรอลิก และเปลี่ยนชนิดของสปริง โดยสปริงที่ใช้ในการทดลองมี 2 แบบ ดังรูปที่ 3.20



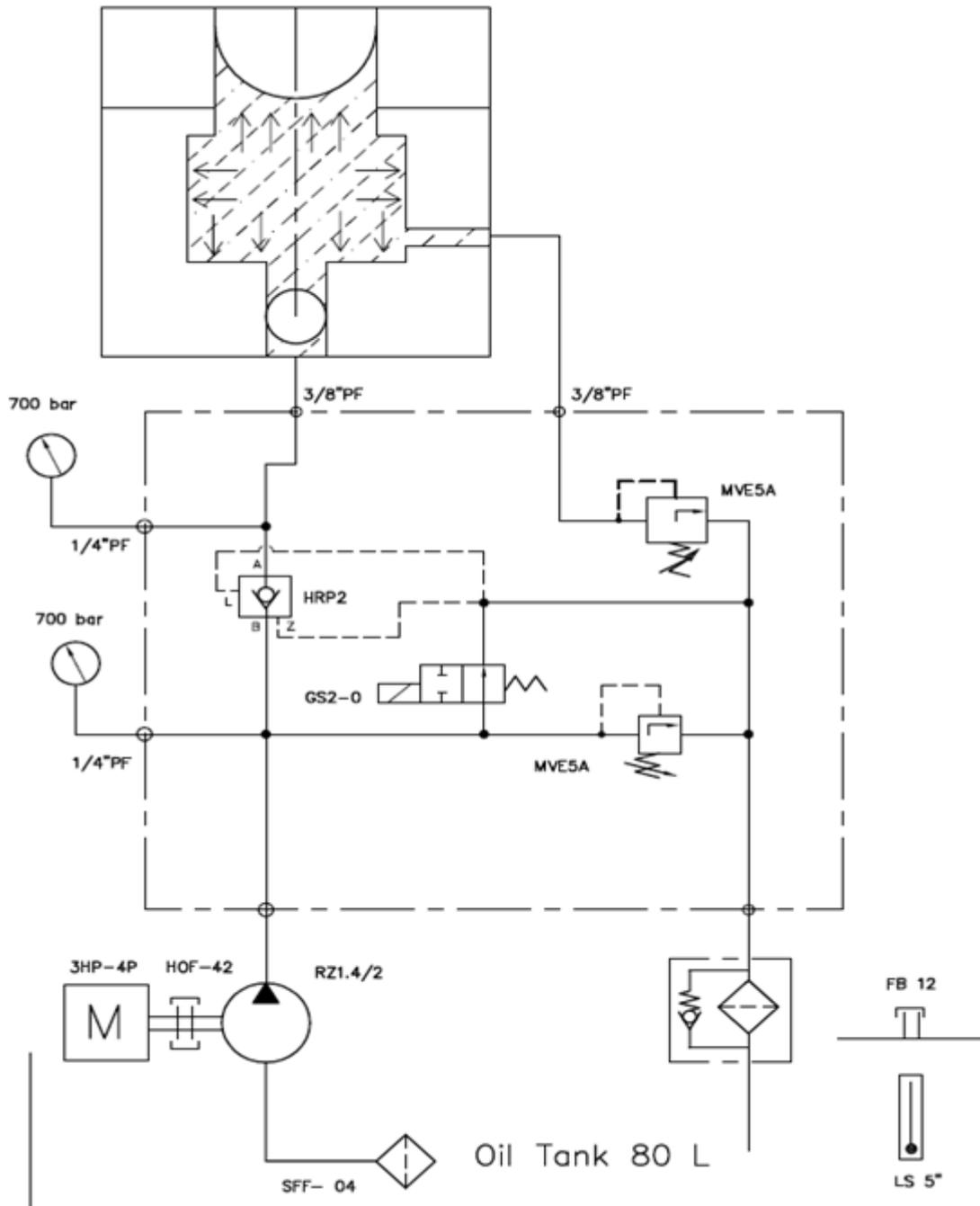
(ก) สปริงสีฟ้าค่านิจสปริง 2.00 kgf/mm.

(ข) สปริงสีแดงค่านิจสปริง 3.65 kgf/mm.

รูปที่ 3.20 สปริงที่ใช้ในการทดลอง

### 3.2.6 วงจรไฮดรอลิก

ในโครงการนี้ใช้แรงดันน้ำมันดันพร้อม ๆ กับใช้ฟังก์ดโดยมีวงจรของเครื่องต้นกำลังไฮดรอลิก ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แสดงวงจรเครื่องต้นกำลังไฮดรอลิก (Hydraulic) แรงดันสูงสุด 70 MPa

น้ำมันไฮดรอลิกที่ใช้ในการทดลองคือน้ำมันไฮดรอลิก PTT ที่ความหนืด (AW) 68 โดยจากการทดลองของนาย กฤษฎา บรรเทาพิช ซึ่งมีค่าความหนืดที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว

(Hydrodynamic Deep Drawing) ดีที่สุดเนื่องจากค่าความหนืดที่ 40°C มีค่า 69.60 cSt ซึ่งมากกว่าความหนืด (AW) 32 และ 46



รูปที่ 3.22 น้ำมันไฮดรอลิก PTT ความหนืด 68

### 3.2.7 การวัดผล

1) อุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ (Mini data logger) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูลพื้นฐานของระบบ (data logger) ประกอบไปด้วย scanner หรือ multiplexer digital-voltmeter และตัวบันทึกข้อมูล ซึ่งรับ Input ที่เป็นระบบ analog จาก sensor แล้วทำการเปลี่ยนข้อมูลเป็นระบบ digital และเก็บข้อมูลไว้ในหน่วยความจำเพื่อการนำไปใช้ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.23



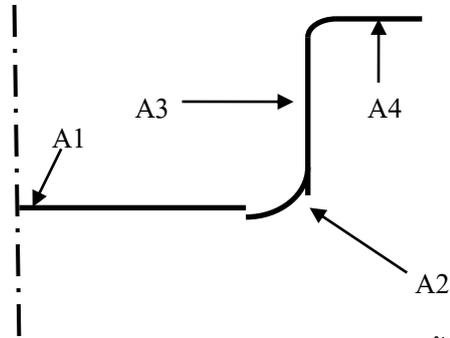
(ก) อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน



(ข) อุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ

รูปที่ 3.23 เครื่องมือที่ใช้วัดและบันทึกผลแรงในการขึ้นรูป

2) จะวัดขนาดของการเปลี่ยนแปลงขนาดความหนาของผนังชิ้นงานที่ทำการลากขึ้นรูป โดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่การตรวจวัดมีการเปรียบเทียบอยู่ 4 จุด ดังแสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 แสดงจุดตรวจความหนาที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงาน

3) เครื่องมือวัดความหนาชิ้นงาน ใช้วัดความโตภายนอกของชิ้นงาน (Outside Micrometer) ดังแสดงในรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.24 เครื่องมือวัดความหนาชิ้นงาน (Outside Micrometer)

หลังการตรวจวัดความหนาที่เปลี่ยนแปลงไป นำค่าที่ได้มาใส่ในตารางบันทึกผลเพื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์

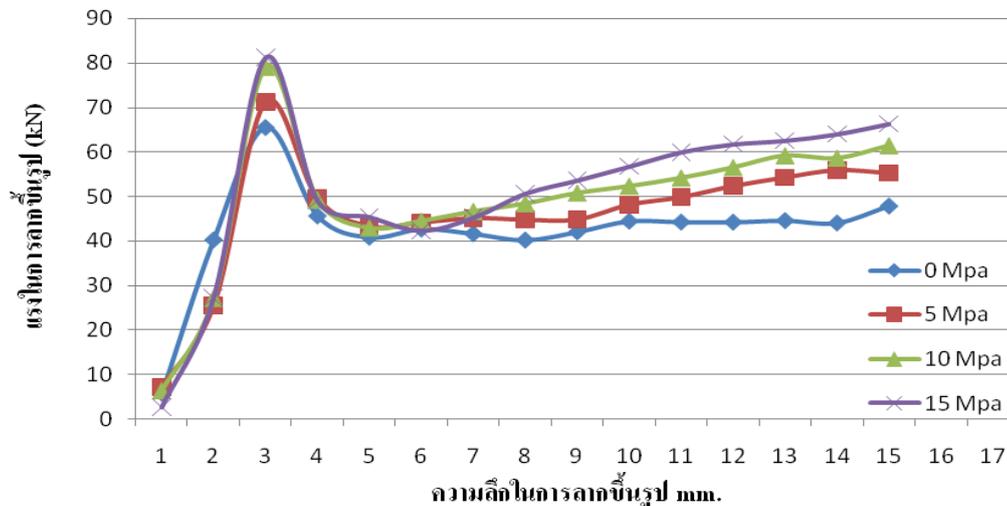
## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์

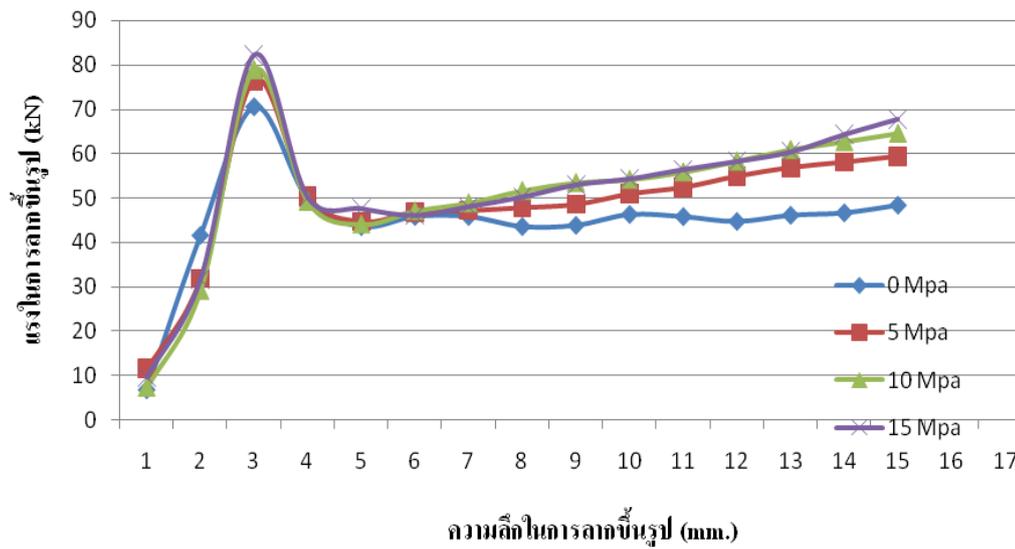
การศึกษาอิทธิพลของเหล็กกล้าไร้สนิมในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการ Hydrodynamic มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกที่มีผลต่อกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) และศึกษาแรงกดจากสปริง 2 ชนิด

#### 4.1 ผลการทดลองแรงในการลากขึ้นรูป (Drawing Force)

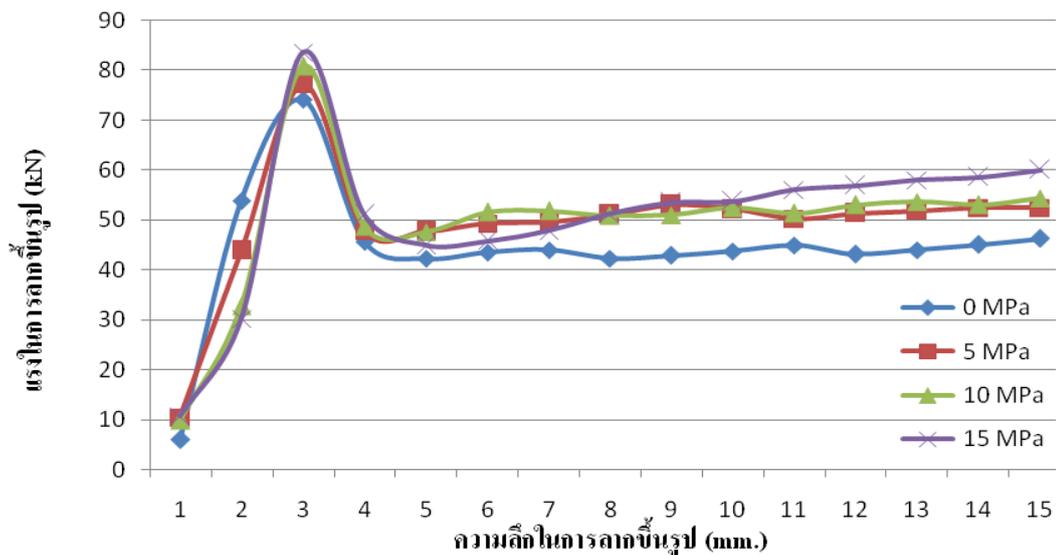
ผลการทดลองการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) ของเหล็กกล้าไร้สนิม 2 เกรด คือ SUS 304 และ SUS 430 โดยใช้แรงดัน 4 ค่า คือ 0, 5, 10, 15 MPa และ ค่านิจสปริง 2.00 kgf/mm. ใช้แรงกดเหยียบสูงสุด 6.28 kN (สปริงฟ้า) และ ค่านิจสปริง 3.65 kgf/mm. ใช้แรงกดเหยียบสูงสุด 11.46 kN (สปริงแดง) มีค่าแรงในการลากขึ้นรูปดังรูปที่ 4.1 - 4.4



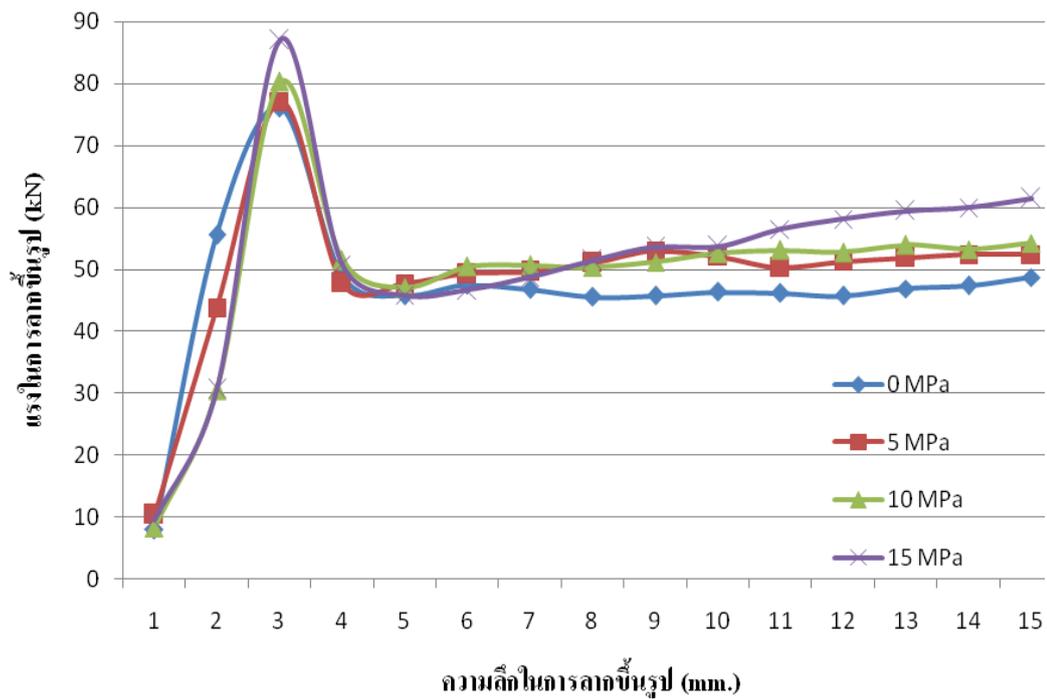
รูปที่ 4.1 แสดงแรงในการลากขึ้นรูปต่อความลึกในการลากขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ค่า นิจสปริง 2.00 kgf/mm.



รูปที่ 4.2 แสดงแรงในการลากขึ้นรูปต่อความลึกในการลากขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ค่า  
นิจสปริง 3.65 kgf/mm.



รูปที่ 4.3 แสดงแรงในการลากขึ้นรูปต่อความลึกในการลากขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430  
ค่านิจสปริง 2.00 kgf/mm.



รูปที่ 4.4 แสดงแรงในการลากขึ้นรูปต่อความลึกในการลากขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ค่านิสสปริง 3.65 kgf/mm.

จากรูปที่ 4.1 - 4.4 จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการลากขึ้นรูปไปถึง 3 มิลลิเมตรแล้ววัสดุจะต้องใช้แรงสูงเพื่อที่จะเปลี่ยนรูปร่างถาวรและจะเห็นได้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 430 จะใช้แรงสูงที่สุดมากกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 430 มีจุดครากที่สูงกว่า

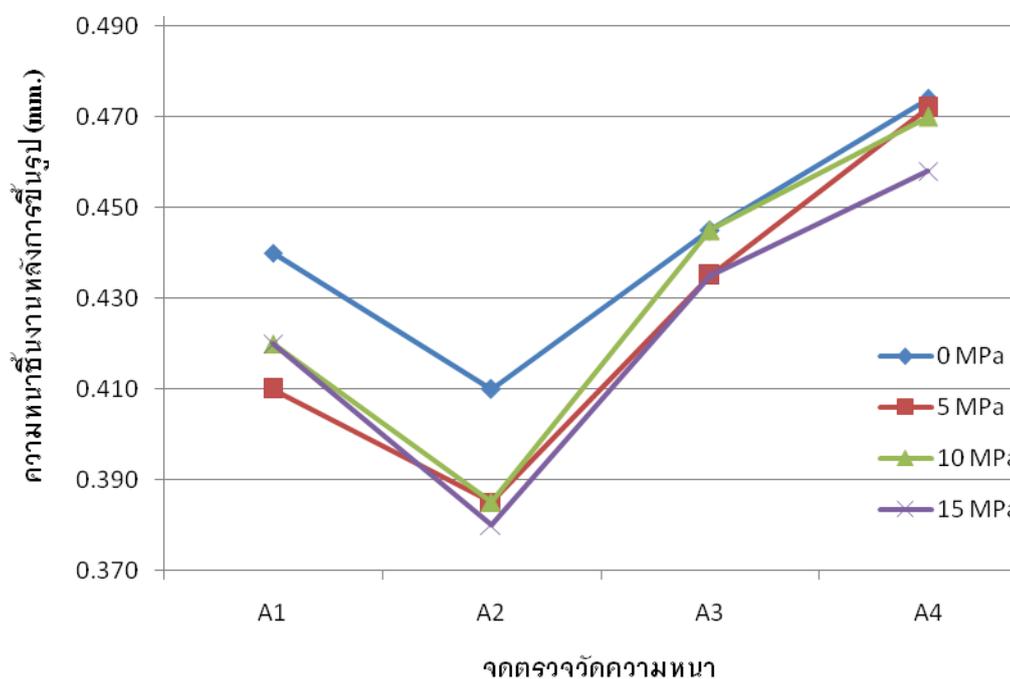
#### 4.2 ผลการทดลองความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปแบบ Hydrodynamic Deep Drawing

ผลการทดลองการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) มีผลค่าเฉลี่ยความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และ SUS 430 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลเฉลี่ยความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ค่านิจสปริง 2.00 kgf/mm. (สปริงฟ้า)

ผลเฉลี่ยความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป (mm.)				
แรงดัน	SUS 304 ค่านิจสปริง 2.00 kgf/mm. (สปริงฟ้า)			
	A1	A2	A3	A4
0 MPa	0.440	0.410	0.445	0.475
5 MPa	0.410	0.385	0.435	0.485
10 MPa	0.420	0.385	0.445	0.485
15 MPa	0.420	0.380	0.435	0.480

นำค่าเฉลี่ยความหนา มาสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบ ดังรูปที่ 4.5

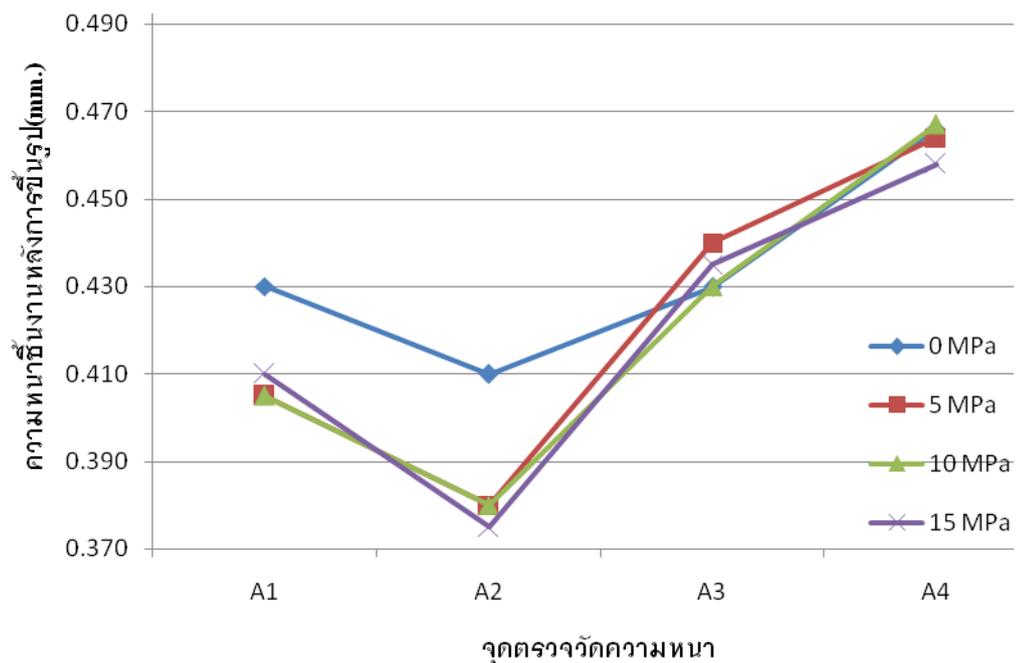


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลความหนาหลังการขึ้นรูปในแต่ละจุดการวัดของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 ค่านิจสปริง 2.00 kgf/mm. (สปริงฟ้า)

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลเฉลี่ยความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ค่านิจสปริง 3.65 kgf/mm. (สปริงแดง)

ค่าเฉลี่ยความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป (mm.)				
แรงดัน	SUS 304 ค่านิจสปริง 3.65 kgf/mm. (สปริงแดง)			
	A1	A2	A3	A4
0 MPa	0.430	0.410	0.430	0.47
5 MPa	0.405	0.380	0.440	0.46
10 MPa	0.405	0.380	0.430	0.47
15 MPa	0.410	0.375	0.435	0.46

นำค่าเฉลี่ยความหนา มาสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบ ดังรูปที่ 4.6

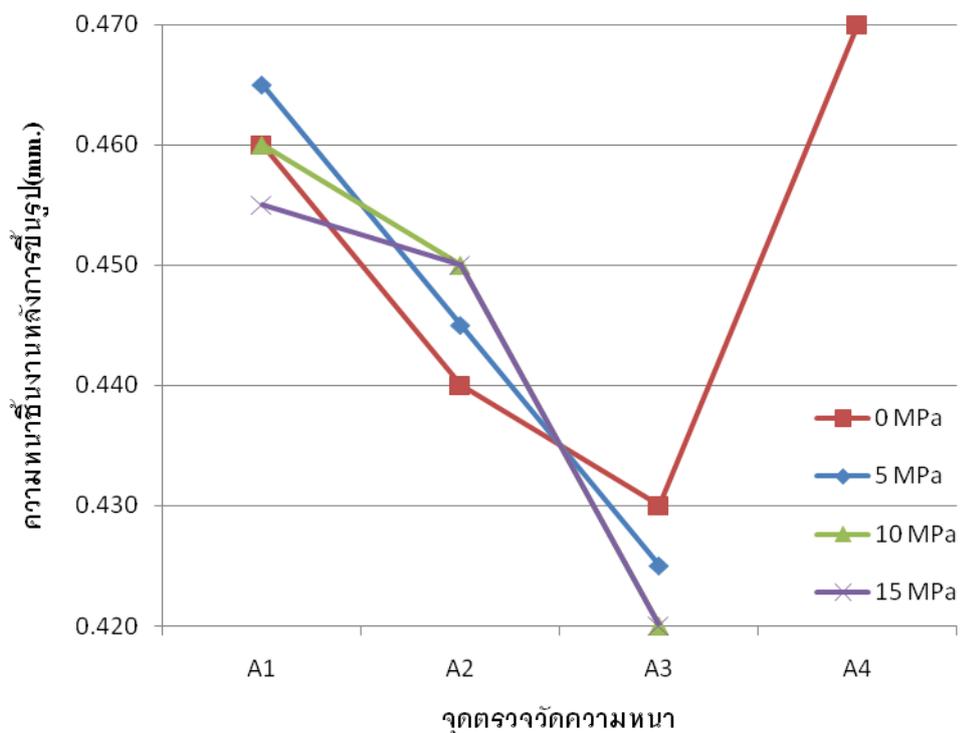


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลความหนาหลังการขึ้นรูปในแต่ละจุดการวัดของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 ค่านิจสปริง 3.65 kgf/mm. (สปริงแดง)

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงผลเฉลี่ยความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 คำนิจสปริง 2.00 kgf/mm. (สปริงฟ้า)

ผลเฉลี่ยความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป (mm.)				
แรงดัน	SUS 430 คำนิจสปริง 2.00 kgf/mm.(สปริงฟ้า)			
	A1	A2	A3	A4
0 MPa	0.460	0.440	0.430	0.470
5 MPa	0.465	0.445	0.425	ฉีกขาด
10 MPa	0.460	0.450	0.420	ฉีกขาด
15 MPa	0.455	0.450	0.420	ฉีกขาด

นำค่าเฉลี่ยความหนา มาสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบ ดังรูปที่ 4.7

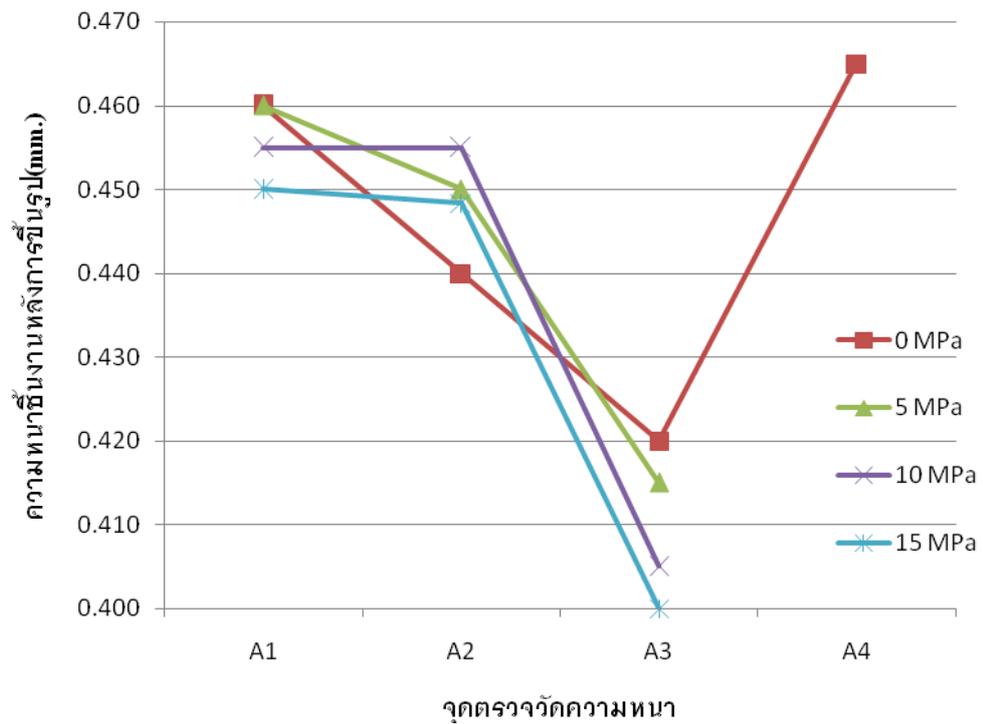


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลความหนาหลังการขึ้นรูปในแต่ละจุดการวัดของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 430 คำนิจสปริง 2.00 kgf/mm. (สปริงฟ้า)

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงผลเฉลี่ยความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 คำนิจสปริง 3.65 kgf/mm. (สปริงแดง)

ผลเฉลี่ยความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป (mm.)				
แรงดัน	SUS 430 คำนิจสปริง 3.65 kgf/mm.(สปริงแดง)			
	A1	A2	A3	A4
0 MPa	0.460	0.440	0.420	0.465
5 MPa	0.460	0.450	0.415	ฉีกขาด
10 MPa	0.455	0.455	0.405	ฉีกขาด
15 MPa	0.450	0.448	0.400	ฉีกขาด

นำค่าเฉลี่ยความหนา มาสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบ ดังรูปที่ 4.8



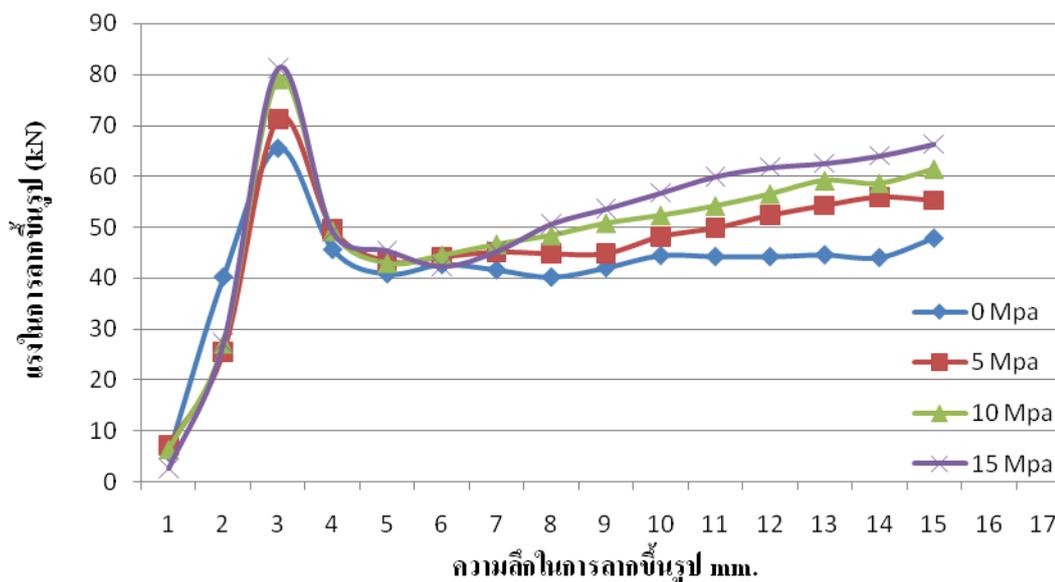
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลความหนาหลังการขึ้นรูปในแต่ละจุดการวัดของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 430 คำนิจสปริง 3.65 kgf/mm. (สปริงแดง)

### 4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

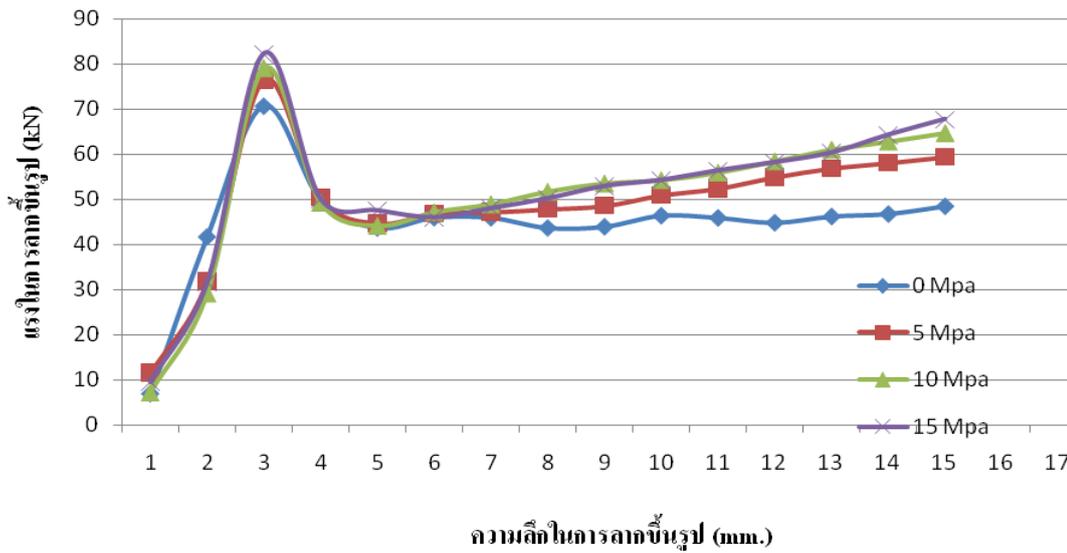
จากการทดลองการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยด้วยแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) ได้ผลการทดลองในแต่ละตัวแปร นำค่าที่ได้มาวิเคราะห์แรงในการลากขึ้นรูป และความหนาของชิ้นงาน ที่ระดับแรงดัน 3 ระดับ ของวัสดุทั้ง 2 ชนิด เพื่อนำข้อมูลที่มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการลากขึ้นรูปเพื่อหาข้อแตกต่างที่จะนำไปสู่การพัฒนาที่ดีขึ้น

#### 4.3.1 การวิเคราะห์แรงในการลากขึ้นรูป

จากการทดลองการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) จะเห็นได้ว่าแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 นั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามแรงดันน้ำมันที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.9 และ 4.10

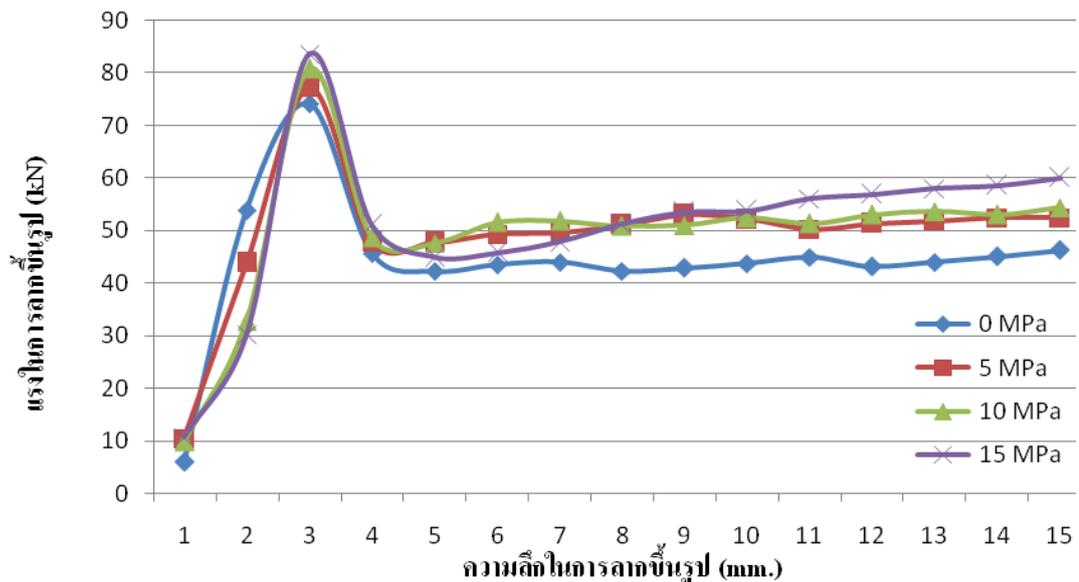


รูปที่ 4.9 แสดงแรงในการลากขึ้นรูปต่อความลึกในการลากขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ค่า  
นิจสปริง 2.00 kgf/mm.

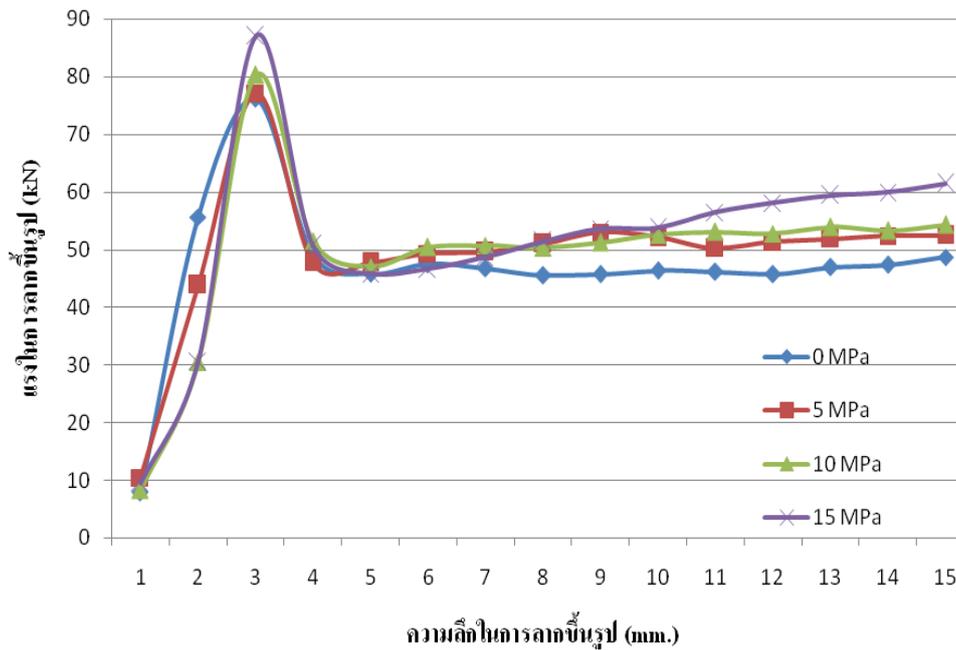


รูปที่ 4.10 แสดงแรงในการลากขึ้นรูปต่อความลึกในการลากขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ค่านิจสปริง 3.65 kgf/mm.

จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 จะเห็นได้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 มีแนวโน้มที่แรงในการลากขึ้นรูปจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันน้ำมันเนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 ไม่มีการฉีกขาดทำให้แรงในการลากขึ้นรูปสูงขึ้นเรื่อย ๆ



รูปที่ 4.11 แสดงแรงในการลากขึ้นรูปต่อความลึกในการลากขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 ค่านิจสปริง 2.00 kgf/mm.



รูปที่ 4.12 แสดงแรงในการลากขึ้นรูปต่อความลึกในการลากขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 คำนีจสปริง 3.65 kgf/mm.

จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 จะเห็นได้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 430 นั้นมีผลแรงในการลากขึ้นรูปแตกต่างจากเกรด SUS 304 โดยสิ้นเชิงเนื่องจากเกรด SUS 430 นั้นมีการฉีกขาดทุกชั้นที่ทำการทดลองแรงในการขึ้นรูปจึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

#### 4.3.2 การวิเคราะห์ชิ้นงานจากแรงกดเหยียบ

ผลจากการขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) ทำให้วิเคราะห์ผนังชิ้นงานโดยมีตัวแปรคือแรงกดเหยียบสูงสุด 6.28 kN (สปริงฟ้า) และแรงกดเหยียบสูงสุด 11.46 kN (สปริงแดง) โดยชิ้นงานหลังการขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 ออกมาในทิศทางเดียวกันคือในแรงกดเหยียบสูงสุด 11.46 kN (สปริงแดง) โดยความสูงของจิบจะต่ำกว่าและผนังชิ้นงานจะมีรอยยุบน้อยกว่าแรงกดเหยียบสูงสุด 6.28 kN N (สปริงฟ้า) ทุกชั้น ดังที่แสดงในรูปที่ 4.13

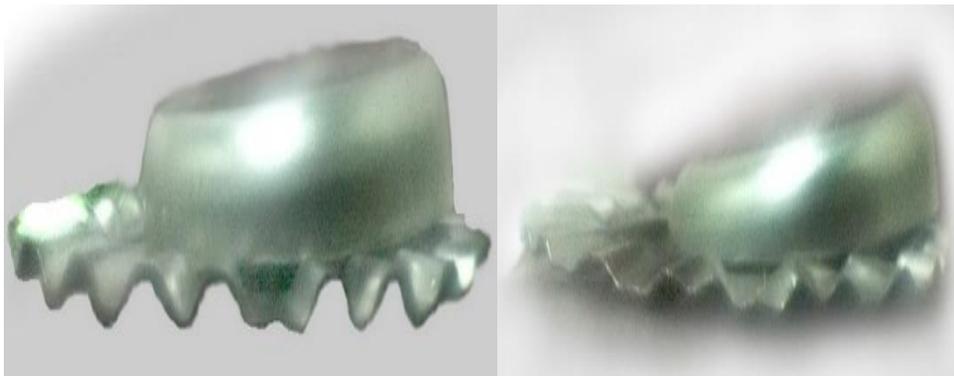


(ก) แรงกดเหยียบสูงสุด 6.28 kN

(ข) แรงกดเหยียบสูงสุด 11.46 kN

รูปที่ 4.13 แสดงตัวอย่างผนังชิ้นงานหลังการขึ้นรูปจากแรงกดเหยียบสูงสุดของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304

ผลการทดลองของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 430 นั้นก็เป็นไปในทิศทางเดียวกับเกรด SUS 304 คือแรงกดเหยียบสูงสุด 11.46 kN นั้นให้รอยย่นน้อยกว่าและจิบที่ตื้นกว่าเช่นเดียวกันจากการวิเคราะห์ในส่วนที่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 4.14



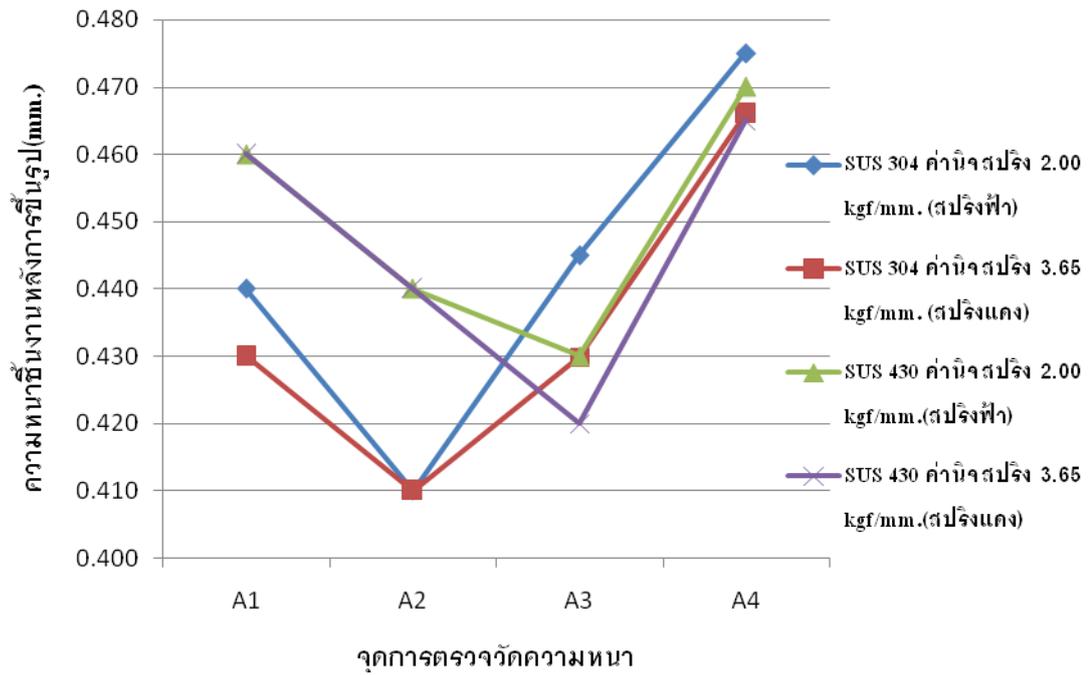
(ก) แรงกดเหยียบสูงสุด 6.28 kN

(ข) แรงกดเหยียบสูงสุด 11.46 kN

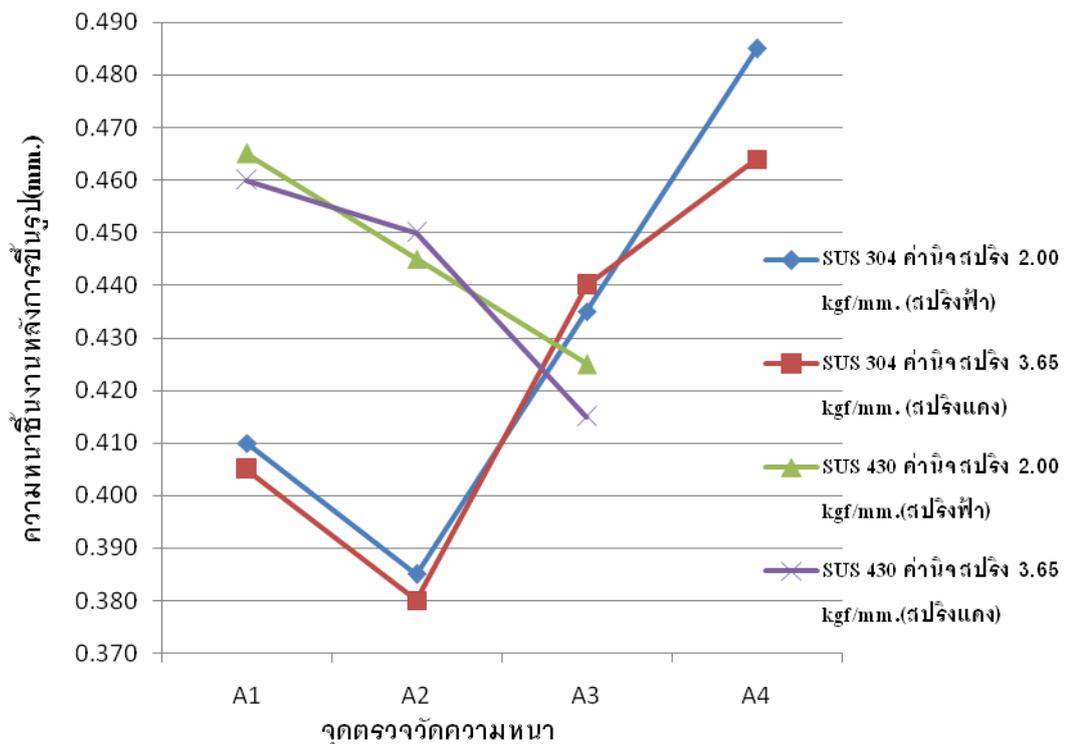
รูปที่ 4.13 แสดงตัวอย่างผนังขึ้นงานหลังการขึ้นรูปจากแรงกดเหยียบสูงสุดของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 430

#### 4.3.3 การวิเคราะห์ความหนาหลังการขึ้นรูป

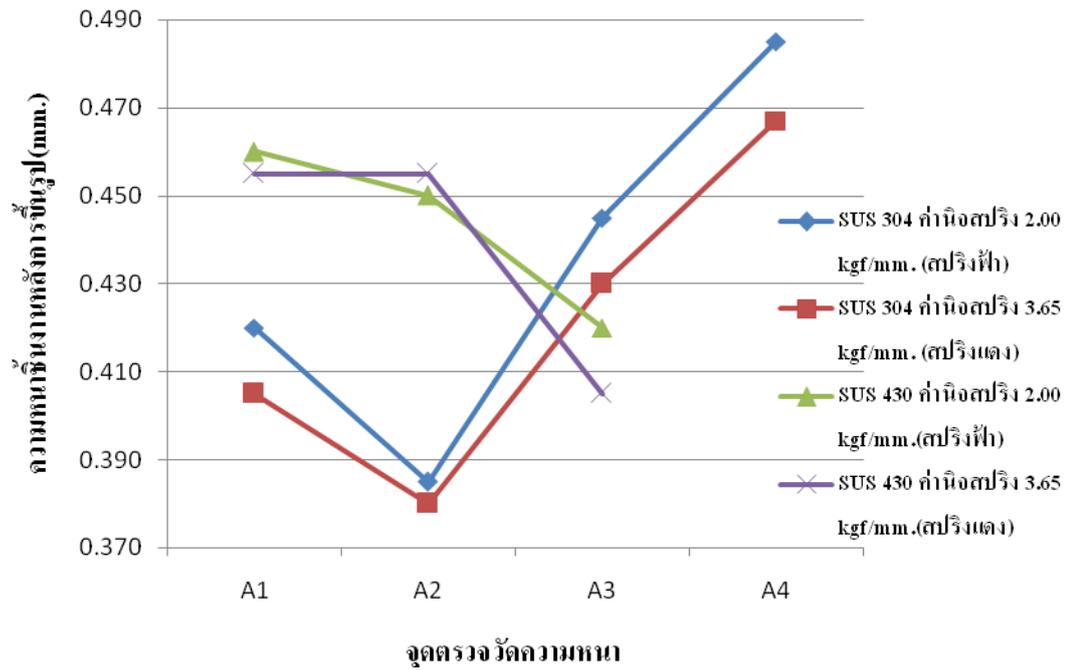
ขึ้นงานหลังการขึ้นรูปนั้นมีการตรวจวัดความหนาหลังการขึ้นรูปในแต่ละแรงดันน้ำมันแต่ละจุดมีการเปลี่ยนแปลงความหนาที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.15 - 4.18



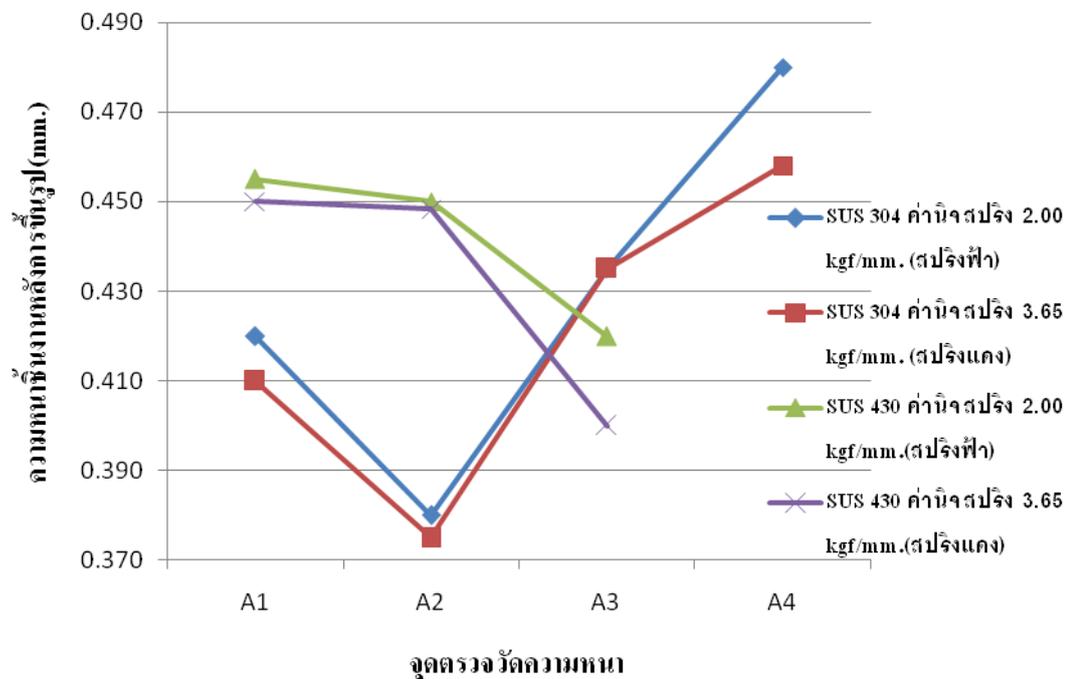
รูปที่ 4.15 แสดงความหนาหลังการขึ้นรูปที่แรงดัน 0 MPa



รูปที่ 4.16 แสดงความหนาหลังการขึ้นรูปที่แรงดัน 5 MPa



รูปที่ 4.17 แสดงความหนาหลังการขึ้นรูปที่แรงดัน 10 MPa



รูปที่ 4.18 แสดงความหนาหลังการขึ้นรูปที่แรงดัน 15 MPa

จากรูปที่ 4.15 – 4.18 จะเห็นได้ว่าแรงกดเหยียบสูงสุดนั้นส่งผลทำให้ขึ้นรูปได้มากกว่า หรือมีความหนาแน่นน้อยกว่าและที่แรงดันน้ำมันยิ่งสูงขึ้นจะทำให้ชิ้นงานกระจายความหนาได้มากกว่าที่แรงดันน้ำมันน้อยและในจุดที่ 2 ของเกรด SUS 304 นั้นมีความหนาแน่นที่ต่ำสุดแต่ในเกรด SUS 430 ในจุดที่ 3 นั้นมีความหนาแน่นที่ต่ำสุด เนื่องจากเกรด SUS 304 นั้นวัสดุยังยึดตัวได้ไม่เต็มที่แต่เกรด 430 นั้นยึดตัวเลยจุดยึดตัวสูงสุดของวัสดุแล้วจึงทำให้ความหนาแตกต่างกันตามคุณสมบัติวัสดุ โดยความหนาชิ้นงานหลังการขึ้นรูปของเกรด SUS 304 นั้นสอดคล้องกับงานวิจัยการศึกษาอิทธิพลของความสูงตายแลนต์ในกรรมวิธีการลากขึ้นรูปลึกของ รศ.ดร.พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์ และ รศ.ดร.วารุณี เปรมา นนท์ [9] ที่จุดวัดเดียวกัน

#### 4.3.3 การวิเคราะห์ความเสียหายของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

ในบทที่ 3 ตารางที่ 3.1 จะเห็นว่าค่าสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 มีค่า  $n$  หรือเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียดสูงกว่า SUS 430 และผลการทดลองคือ SUS 304 ลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) เป็นดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 แสดงตัวอย่างชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 หลังการขึ้นรูป

จากรูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานทดลองที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 จะไม่มีการฉีกขาดเลย ทั้งนี้เนื่องมาจากสมบัติเชิงกลของตัววัสดุด้วยเพราะเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 นั้นมีอัตราการยึดตัวสูง

เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 มีค่าอัตราการยึดตัวต่ำกว่ากว่า SUS 304 และผลการทดลองคือ SUS 430 ลากขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) เป็นดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 แสดงตัวอย่างชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 430 หลังการขึ้นรูป

จากรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานทดลองที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 430 จะมีการฉีกขาดในทุกการทดลอง แต่จะฉีกขาดในรูปแบบที่แตกต่างกันไป ทั้งนี้เนื่องมาจากสมบัติเชิงกลของตัววัสดุเพราะเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 430 นั้นมีค่าอัตราการยืดตัวต่ำ

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาอิทธิพลของชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการ Hydrodynamic นั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกที่มีผลต่อกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) และ ศึกษาแรงกดจากสปริง 2 ชนิด โดยขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อศึกษาความเสียหายของชิ้นงาน สภาพผนังเนื่องจากแรงกดสปริงและความหนาที่เปลี่ยนแปลง มีผลดังนี้

#### 5.1 สรุปผล

5.1.1 การศึกษาอิทธิพลของแรงดันน้ำมันต่อกระบวนการลากขึ้นรูปแบบ Hydrodynamic Deep Drawing สรุปได้ว่าแรงดันน้ำมันมีผลต่อกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) เนื่องจากแรงดันน้ำมันสูงขึ้นส่งผลให้เครื่องเพรสใช้แรงในการลากขึ้นรูปมากขึ้นและแรงดันน้ำมันที่สูงขึ้นนั้นส่งผลให้ความเค้นในแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมกระจายตัวได้สม่ำเสมอ โดยเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 ไม่มีการฉีกขาดในทุก ๆ แรงดันน้ำมัน แต่ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 430 ขาดในทุก ๆ แรงดันน้ำมัน ทั้งนี้เกี่ยวข้องกับสมบัติเชิงกลของวัสดุทั้ง 2 ชนิด ด้วย

5.1.2 การศึกษาความหนาหลังการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Hydrodynamic สรุปได้ว่าแรงดันน้ำมันมีผลทำให้ความหนาในจุดต่าง ๆ นั้นบางลงเนื่องจากแรงดันน้ำมันจะมีแรงกระทำเข้าไปในรูปแบบกระจายจึงทำให้ความหนาในส่วนต่าง ๆ น้อยลง

5.1.3 การศึกษาสภาพผนังของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปด้วยแรงกดเหยียบ 2 ค่า จากผลการทดลองสรุปได้ว่าแรงกดเหยียบสูงสุด 11.46 kN ทำให้สภาพการยึดตัวของผนังดีกว่าแรงกดเหยียบสูงสุด 6.28 kN จึงทำให้มีรอยยุบน้อยกว่าและแรงกดเหยียบสูงสุด 11.46 kN จะทำให้จิบของชิ้นงานเตี้ยกว่าแรงกดเหยียบสูงสุด 6.28 kN

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 แรงดันน้ำมันที่ใช้นี้ยังไม่ใช้ค่าที่ดีที่สุดควรหาค่าที่ดีที่สุดเพื่อนำมาประกอบการวิจัยชิ้นนี้
- 5.2.2 ใช้ความเร็วในการลากขึ้นรูปที่ต่ำกว่านี้
- 5.2.3 ใช้แรงกดสปริงที่มากกว่าค่าที่กำหนดโดยเปลี่ยนชนิดสปริง
- 5.2.4 เปลี่ยนกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมจากออสเทนไนต์และเฟอร์ไรต์เป็นกลุ่มอื่น

## บรรณานุกรม

- [1] สวัสดิ์ โสตามุก. 2550. การทำนายความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นส่วนยานยนต์ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [2] Ajay, D. and Yadav, A. 2008. **Process analysis and design in stamping and sheet hydroforming**. Ph. D. Thesis. Philosophy Engineer The Ohio State University,
- [3] Kang, D. 2000. "A study on hydrodynamic deep drawing equipment," **Journal Materials Processing Technology** (Electronic).vol 101, No. 21, Available: ELSEVIER / Science Direct (3 June 2010)
- [4] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2554. **เหล็กกล้าไร้สนิม**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : [th.wikipedia.org/wiki/เหล็กกล้าไร้สนิม](http://th.wikipedia.org/wiki/เหล็กกล้าไร้สนิม) (22 กุมภาพันธ์ 2555)
- [5] พนา แซ่มสวัสดิ์. 2542. การแก้ปัญหารอยย่นในงานขึ้นรูปถ้วยที่ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต(วิศวกรรมการผลิต). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [6] S.Tiratharanat, T. Tntarkumthopomchai and W.Limtrakarn. (2004). **Finite Element Simulationstudy of hemispherica Dome Forming Construction of LimitDiagram(FLD) for Sheet Metall Forming Processwps**. Thailand. Nationul Metal And Meterials Technology Center.
- [7] 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)
- [8] 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
- [9] วารุณี เปรมานนท์. 2547. การศึกษาอิทธิพลของความสูงตายแลนดในกรรมวิธีการลากขึ้นรูปลึก. ขอนแก่น. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18.

ภาคผนวก ก  
ข้อมูลการทดลอง

ตาราง ก.1 ตารางความหนาหลังการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 แรงกดเหยียบ 6.28 kN

แรงดัน	ชั้นที่	การฉีก ขาด	ความหนาที่ตรวจวัดได้ (mm.)			
MPa			A1	A2	A3	A4
0	1		0.435	0.400	0.445	0.48
	2		0.430	0.420	0.440	0.47
	3		0.440	0.410	0.450	0.47
	4		0.445	0.420	0.440	0.47
	5		0.450	0.400	0.450	0.48
เฉลี่ย			0.440	0.410	0.445	0.47
5	1		0.400	0.390	0.435	0.48
	2		0.410	0.380	0.430	0.48
	3		0.415	0.380	0.440	0.47
	4		0.410	0.395	0.435	0.46
	5		0.415	0.380	0.435	0.47
เฉลี่ย			0.410	0.385	0.435	0.47
10	1		0.420	0.385	0.440	0.48
	2		0.425	0.390	0.440	0.46
	3		0.430	0.395	0.450	0.46
	4		0.410	0.375	0.450	0.48
	5		0.415	0.380	0.445	0.47
เฉลี่ย			0.420	0.385	0.445	0.47
15	1		0.430	0.370	0.440	0.46
	2		0.410	0.380	0.430	0.45
	3		0.425	0.370	0.440	0.46
	4		0.415	0.385	0.430	0.46
	5		0.420	0.395	0.435	0.46
เฉลี่ย			0.420	0.380	0.435	0.46

ตาราง ก.2 ตารางความหนาหลังการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 แรงกดเหี่ยยบ 11.46 kN

แรงดัน	ชั้นที่	การฉีกขาด	ความหนาที่ตรวจวัดได้ (mm.)			
MPa			A1	A2	A3	A4
0	1		0.430	0.420	0.440	0.47
	2		0.420	0.410	0.430	0.47
	3		0.430	0.415	0.445	0.46
	4		0.435	0.400	0.435	0.46
	5		0.435	0.405	0.400	0.47
เฉลี่ย			0.430	0.410	0.430	0.47
5	1		0.400	0.380	0.435	0.46
	2		0.410	0.365	0.440	0.47
	3		0.400	0.390	0.450	0.45
	4		0.415	0.380	0.440	0.46
	5		0.400	0.385	0.435	0.48
เฉลี่ย			0.405	0.380	0.440	0.46
10	1		0.400	0.370	0.430	0.47
	2		0.410	0.380	0.420	0.47
	3		0.415	0.380	0.440	0.45
	4		0.395	0.390	0.430	0.47
	5		0.405	0.380	0.430	0.48
เฉลี่ย			0.405	0.380	0.430	0.47
15	1		0.410	0.370	0.430	0.47
	2		0.405	0.370	0.435	0.47
	3		0.420	0.375	0.440	0.44
	4		0.415	0.390	0.440	0.46
	5		0.400	0.370	0.430	0.47
เฉลี่ย			0.410	0.375	0.435	0.46

ตาราง ก.3 ตารางความหนาหลังการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 430 แรงกดเทียบ 6.28 kN

แรงดัน MPa	ชั้นที่	การฉีก ขาด	ความหนาที่ตรวจวัดได้ (mm.)			
			A1	A2	A3	A4
0	1	ขาด	0.465	0.440	0.430	0.475
	2	ขาด	0.455	0.430	0.425	0.475
	3	ขาด	0.450	0.440	0.435	0.460
	4	ขาด	0.465	0.450	0.425	0.470
	5	ขาด	0.465	0.440	0.435	0.470
เฉลี่ย			0.460	0.440	0.430	0.470
5	1	ขาด	0.465	0.450	0.420	ฉีกขาด
	2	ขาด	0.465	0.445	0.430	ฉีกขาด
	3	ขาด	0.470	0.460	0.420	ฉีกขาด
	4	ขาด	0.455	0.445	0.435	ฉีกขาด
	5	ขาด	0.470	0.450	0.420	ฉีกขาด
เฉลี่ย			0.465	0.450	0.425	
10	1	ขาด	0.460	0.460	0.420	ฉีกขาด
	2	ขาด	0.460	0.445	0.420	ฉีกขาด
	3	ขาด	0.465	0.460	0.425	ฉีกขาด
	4	ขาด	0.455	0.455	0.415	ฉีกขาด
	5	ขาด	0.460	0.455	0.420	ฉีกขาด
เฉลี่ย			0.460	0.455	0.420	
15	1	ขาด	0.450	0.46	0.430	ฉีกขาด
	2	ขาด	0.460	0.465	0.420	ฉีกขาด
	3	ขาด	0.460	0.460	0.415	ฉีกขาด
	4	ขาด	0.445	0.455	0.425	ฉีกขาด
	5	ขาด	0.460	0.460	0.410	ฉีกขาด
เฉลี่ย			0.455	0.460	0.420	

ตาราง ก.4 ตารางความหนาหลังการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 430 แรงกดเหยียบ 11.46 kN

แรงดัน MPa	ชั้นที่	การฉีก ขาด	ความหนาที่ตรวจวัดได้ (mm.)			
			A1	A2	A3	A4
0	1	ขาด	0.455	0.440	0.410	0.475
	2	ขาด	0.465	0.450	0.420	0.460
	3	ขาด	0.460	0.445	0.425	0.460
	4	ขาด	0.455	0.400	0.420	0.470
	5	ขาด	0.465	0.440	0.425	0.460
เฉลี่ย			0.460	0.435	0.420	0.465
5	1	ขาด	0.460	0.450	0.415	ฉีกขาด
	2	ขาด	0.460	0.440	0.425	ฉีกขาด
	3	ขาด	0.465	0.435	0.410	ฉีกขาด
	4	ขาด	0.455	0.440	0.420	ฉีกขาด
	5	ขาด	0.460	0.435	0.405	ฉีกขาด
เฉลี่ย			0.460	0.440	0.415	
10	1	ขาด	0.455	0.420	0.410	ฉีกขาด
	2	ขาด	0.450	0.420	0.410	ฉีกขาด
	3	ขาด	0.460	0.430	0.405	ฉีกขาด
	4	ขาด	0.450	0.420	0.390	ฉีกขาด
	5	ขาด	0.460	0.435	0.410	ฉีกขาด
เฉลี่ย			0.455	0.425	0.405	
15	1	ขาด	0.455	0.445	0.390	ฉีกขาด
	2	ขาด	0.460	0.450	0.400	ฉีกขาด
	3	ขาด	0.440	0.435	0.395	ฉีกขาด
	4	ขาด	0.450	0.430	0.400	ฉีกขาด
	5	ขาด	0.445	0.440	0.415	

ตาราง ก.5 ตารางแรงในการลากขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 แรงกดเหยียบ 6.28 kN

ระยะ ละถึก	SUS 304 0 Mpa						SUS 304 5 Mpa					
	ซึนที่ 1	ซึนที่ 2	ซึนที่ 3	ซึนที่ 4	ซึนที่ 5	เฉล็ย	ซึนที่ 1	ซึนที่ 2	ซึนที่ 3	ซึนที่ 4	ซึนที่ 5	เฉล็ย
1	2.61	1.20	13.7 8	4.03	6.85	5.69	8.90	7.90	6.65	5.40	6.70	7.11
2	43.4 5	45.1 2	32.1 7	41.7 9	38.4 5	40.2 0	22.3 3	21.3 3	25.0 4	28.7 4	30.0 4	25.5 0
3	65.7 7	62.9 5	56.0 6	68.5 8	74.2 1	65.5 1	71.2 0	70.2 0	70.7 2	71.2 3	72.5 3	71.1 8
4	44.5 4	43.1 4	45.6 1	45.9 3	48.7 2	45.5 9	46.1 2	45.1 2	49.0 5	52.9 7	54.2 7	49.5 1
5	38.3 2	36.1 6	44.1 9	40.4 9	44.8 1	40.7 9	44.1 5	43.1 5	42.8 1	42.4 6	43.7 6	43.2 7
6	41.3 0	40.0 3	44.1 9	42.5 7	45.1 1	42.6 4	42.4 1	41.4 1	43.6 5	45.8 9	47.1 9	44.1 1
7	40.9 5	40.2 9	42.1 9	41.6 0	42.9 1	41.5 9	42.2 7	41.2 7	44.6 2	47.9 6	49.2 6	45.0 8
8	38.5 4	36.9 7	41.8 6	40.1 2	43.2 6	40.1 5	42.2 4	41.2 4	44.2 7	47.2 9	48.5 9	44.7 3
9	41.6 7	40.3 9	39.4 3	42.9 5	45.5 0	41.9 9	42.9 6	41.9 6	44.3 1	46.6 6	47.9 6	44.7 7
10	43.1 9	41.8 2	45.1 4	44.5 5	47.2 8	44.4 0	43.5 2	42.5 2	47.6 5	52.7 7	54.0 7	48.1 1
11	43.3 5	42.1 9	44.1 9	44.5 0	46.8 1	44.2 1	44.0 5	43.0 5	49.3 3	55.6 1	56.9 1	49.7 9
12	44.6 6	45.1 4	43.7 1	44.1 8	43.2 2	44.1 8	45.8 4	44.8 4	51.8 3	58.8 1	60.1 1	52.2 9
13	44.5 1	45.1 4	46.5 6	43.8 8	42.6 1	44.5 4	47.2 6	46.2 6	53.7 5	61.2 3	62.5 3	54.2 1
14	42.7 1	42.1 4	47.5 1	43.2 8	44.4 1	44.0 1	47.8 9	46.8 9	55.4 0	63.9 1	65.2 1	55.8 6
15	47.2 9	47.1 2	49.4 1	47.4 7	47.8 1	47.8 2	43.6 1	42.6 1	54.7 7	66.9 3	68.2 3	55.2 3

ระยะ ลึก	SUS 304 10 Mpa						304 15 Mpa					
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	เฉลี่ย	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	เฉลี่ย
1	4.75	10.1 1	6.18	8.72	2.24	6.40	3.12	1.37	3.45	2.93	2.41	2.66
2	25.1 8	30.8 1	27.2 7	28.6 5	23.7 2	27.1 3	27.3 6	25.6 1	28.6 5	27.8 9	27.1 3	27.3 3
3	73.6 5	82.0 6	81.0 4	78.3 1	80.0 2	79.0 2	81.2 1	79.4 6	82.6 1	81.8 2	81.0 4	81.2 3
4	51.7 9	45.7 3	48.5 1	48.8 3	51.2 8	49.2 3	50.3 1	48.5 6	48.8 3	48.7 6	48.7 0	49.0 3
5	49.7 1	40.1 4	41.2 2	41.2 7	42.3 0	42.9 3	47.4 2	45.6 7	44.2 7	44.6 2	44.9 7	45.3 9
6	48.9 4	42.2 9	43.2 0	43.9 1	44.1 1	44.4 9	42.1 4	40.3 9	43.9 1	43.0 3	42.1 5	42.3 2
7	48.9 4	42.2 9	45.2 1	48.6 3	48.1 3	46.6 4	43.6 1	41.8 6	48.6 3	46.9 4	45.2 5	45.2 6
8	47.1 2	44.6 7	47.3 9	52.6 6	50.1 1	48.3 9	50.0 7	48.3 2	52.6 6	51.5 8	50.4 9	50.6 2
9	49.7 7	47.0 4	50.0 0	54.0 3	52.9 5	50.7 6	53.5 1	51.7 6	55.0 3	54.2 1	53.4 0	53.5 8
10	50.0 4	47.5 2	51.5 3	56.8 3	55.5 3	52.2 9	57.7 2	55.9 7	56.8 3	56.6 2	56.4 0	56.7 1
11	50.9 9	49.9 0	53.7 3	58.6 1	57.5 6	54.1 6	62.1 0	60.3 5	58.6 1	59.0 5	59.4 8	59.9 2
12	52.7 4	52.6 5	56.3 4	60.7 1	60.0 3	56.4 9	63.6 4	61.8 9	60.7 1	61.0 1	61.3 0	61.7 1
13	57.0 2	56.3 7	58.7 9	62.3 4	61.2 0	59.1 4	64.6 2	62.8 7	61.3 4	61.7 2	62.1 1	62.5 3
14	56.5 4	51.8 7	57.2 4	64.7 1	62.6 0	58.5 9	66.1 6	64.4 1	62.7 1	63.1 4	63.5 6	64.0 0
15	60.8 2	59.2 0	61.2 6	62.4 1	63.3 1	61.4 0	68.1 3	66.3 8	65.4 1	65.6 5	65.9 0	66.2 9

ตาราง ก.6 ตารางแรงในการลากขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 แรงกดเทียบ 11.46 kN

ระยะ เหล็ก	304 0 MPa						304 5 MPa					
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	เฉลี่ย	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	เฉลี่ย
1	8.55	1.90	13.7 8	2.82	6.85	6.78	8.55	7.90	19.4 8	5.40	15.8 2	11.4 3
2	45.1 4	45.6 2	32.1 7	46.7 1	38.4 5	41.6 2	45.1 4	20.3 3	33.9 1	28.7 4	30.8 1	31.7 9
3	82.2 0	67.9 5	56.0 6	72.8 0	74.2 1	70.6 4	82.2 0	70.7 0	83.1 6	71.2 3	75.2 8	76.5 1
4	58.4 5	45.1 4	45.6 1	51.3 2	48.7 2	49.8 5	51.4 5	45.5 1	47.7 1	52.9 7	54.2 1	50.3 7
5	46.0 9	37.0 6	44.1 9	49.8 9	40.8 1	43.6 1	46.0 9	42.1 5	41.3 4	42.4 6	51.3 4	44.6 8
6	50.3 7	40.8 7	44.1 9	48.9 4	45.1 1	45.9 0	50.3 7	40.4 1	42.2 9	45.8 9	55.2 1	46.8 3
7	50.3 7	40.3 9	44.1 9	47.5 1	46.9 1	45.8 7	50.3 7	40.2 7	42.2 9	47.9 6	54.8 1	47.1 4
8	49.8 9	38.9 7	40.8 6	46.0 9	42.2 6	43.6 1	49.8 9	41.2 4	44.6 7	47.2 9	56.0 3	47.8 2
9	49.8 9	40.3 9	39.4 3	44.1 9	45.5 0	43.8 8	50.3 1	42.9 6	47.0 4	42.6 6	59.7 3	48.5 4
10	51.3 2	41.8 2	45.1 4	46.0 9	47.2 8	46.3 3	51.3 2	43.5 2	47.5 2	52.7 7	59.3 7	50.9 0
11	48.9 4	44.1 9	44.1 9	45.1 4	46.8 1	45.8 5	48.9 4	44.1 5	49.9 0	55.6 1	63.2 9	52.3 8
12	49.8 9	45.1 4	43.7 1	41.8 2	43.2 2	44.7 6	49.8 9	45.8 9	54.6 5	58.8 1	65.1 8	54.8 8
13	51.3 2	45.1 4	46.5 6	45.1 4	42.6 1	46.1 5	51.3 2	47.9 6	57.9 7	61.2 3	65.7 8	56.8 5
14	50.3 7	45.1 4	47.5 1	46.0 9	44.4 1	46.7 0	50.2 7	47.2 9	59.8 7	63.9 1	68.9 1	58.0 5
15	52.2 7	47.5 2	49.4 1	45.1 4	47.8 1	48.4 3	52.2 7	42.6 6	63.2 0	66.9 3	71.8 1	59.3 7

ระยะ ลึก	304 10 MPa						304 15 MPa					
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	เฉลี่ย	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	เฉลี่ย
1	4.75	10.6 1	9.71	8.72	2.54	7.27	3.62	15.7 3	3.45	13.6 6	11.4 0	9.57
2	25.1 8	31.8 1	35.6 1	28.6 5	24.7 2	29.1 9	28.3 6	38.2 1	28.6 5	36.5 9	26.6 1	31.6 8
3	73.6 5	83.1 6	79.5 3	78.3 1	80.3 2	78.9 9	82.4 1	85.7 2	82.6 1	79.5 1	80.9 1	82.2 3
4	51.7 9	47.7 1	45.6 3	48.8 3	52.2 8	49.2 5	50.6 1	52.6 3	48.8 3	45.1 4	53.2 1	50.0 8
5	49.7 1	41.3 4	44.4 3	41.2 7	43.9 0	44.1 3	48.4 6	49.3 6	44.2 7	43.7 2	51.9 8	47.5 6
6	48.9 4	42.2 9	52.3 0	43.9 1	48.2 1	47.1 3	42.3 4	51.2 3	43.9 1	45.1 4	47.5 1	46.0 3
7	48.9 4	42.2 9	53.4 0	48.6 3	51.2 3	48.9 0	45.7 1	53.5 4	48.6 3	45.1 4	47.0 4	48.0 1
8	49.1 2	44.6 7	56.7 3	52.6 6	55.2 1	51.6 8	50.3 7	54.1 3	52.6 6	46.3 6	47.5 1	50.2 1
9	49.7 7	47.0 4	58.7 0	55.0 3	56.9 1	53.4 9	55.9 1	56.4 7	55.0 3	48.7 7	48.4 6	52.9 3
10	50.0 4	47.5 2	59.5 3	56.8 3	57.1 3	54.2 1	58.8 2	57.3 5	56.8 3	49.7 2	48.6 2	54.2 7
11	50.9 9	49.9 0	61.3 7	58.6 1	58.5 3	55.8 8	63.3 0	58.9 1	58.6 1	52.1 0	48.9 7	56.3 8
12	52.7 4	54.6 5	63.5 2	60.7 1	60.2 3	58.3 7	66.6 4	59.3 5	60.7 1	53.8 0	50.4 9	58.2 0
13	57.0 2	57.9 7	66.0 4	62.3 4	61.4 0	60.9 5	69.6 2	61.3 2	62.3 4	54.1 7	54.2 4	60.3 4
14	56.5 4	59.8 7	68.9 3	64.7 1	63.6 0	62.7 3	70.3 6	63.6 2	64.7 1	60.3 5	62.2 4	64.2 6
15	60.8 2	61.2 0	71.3 7	65.4 1	64.3 5	64.6 3	72.1 3	68.1 2	65.4 1	65.5 8	67.4 7	67.7 4

ตาราง ก.7 ตารางแรงในการลากขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 430 แรงกดเทียบ 6.28 kN

ระยะ เหล็ก	430 0 MPa						430 5 Mpa					
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	เฉลี่ย	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	เฉลี่ย
1	8.15	5.19	6.85	2.22	7.50	5.98	15.2 1	8.55	10.6 3	15.2 6	2.42	10.4 1
2	71.1 8	58.6 6	38.4 5	46.1 3	54.8 2	53.8 5	49.2 0	43.1 2	47.1 4	44.6 2	35.1 5	43.8 5
3	75.2 8	73.8 4	74.2 1	72.4 0	74.7 5	74.1 0	72.7 0	72.2 0	80.2 0	79.1 3	81.4 5	77.1 4
4	39.3 4	45.1 8	48.7 2	51.0 1	44.0 3	45.6 6	48.4 7	47.2 1	49.3 7	42.3 6	51.4 5	47.7 7
5	38.1 1	43.7 0	40.8 1	49.2 9	39.4 6	42.2 7	44.1 9	46.2 9	47.3 4	45.6 2	55.1 2	47.7 1
6	38.7 4	43.3 9	45.1 1	48.0 4	41.9 3	43.4 4	47.0 4	48.4 1	48.9 4	47.8 1	54.2 6	49.2 9
7	39.3 1	43.2 6	46.9 1	47.2 1	43.1 1	43.9 6	46.5 7	50.7 5	51.6 7	46.0 9	52.8 3	49.5 8
8	40.0 7	42.5 8	42.2 6	45.0 9	41.1 7	42.2 3	48.4 7	49.2 9	52.2 4	51.8 9	53.2 5	51.0 3
9	39.1 1	42.2 5	45.5 0	45.3 9	42.3 1	42.9 1	52.2 7	50.7 1	53.6 2	52.3 1	55.9 4	52.9 7
10	39.2 4	42.6 7	47.2 8	46.0 9	43.2 6	43.7 1	51.3 2	51.5 5	51.2 8	53.5 1	52.9 3	52.1 2
11	43.3 3	44.2 4	46.8 1	45.1 4	45.0 7	44.9 2	55.6 0	49.9 3	47.7 2	48.1 6	49.8 3	50.2 5
12	44.0 7	42.9 5	43.2 2	41.8 2	43.6 5	43.1 4	56.8 7	49.8 9	49.8 9	49.8 9	49.8 9	51.2 9
13	44.6 7	44.6 1	42.6 1	44.5 4	43.6 4	44.0 1	58.7 0	51.2 7	48.9 4	51.3 2	48.9 4	51.8 3
14	45.1 4	45.3 7	44.4 1	45.5 9	44.7 8	45.0 6	59.9 9	52.9 4	47.8 1	49.9 0	51.3 2	52.3 9
15	46.0 1	45.5 8	47.8 1	45.1 4	46.9 1	46.2 9	54.7 6	51.4 5	52.2 7	51.3 4	52.2 7	52.4 2

ระยะ ลึก	430 10 Mpa						430 15 Mpa					
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	เฉลี่ย	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	เฉลี่ย
1	12.5 5	11.4 0	8.45	6.64	10.2 5	9.86	13.5 4	9.23	10.5 1	11.3 9	8.73	10.6 8
2	38.7 4	36.9 2	29.4 6	23.8 2	35.0 9	32.8 0	35.2 2	28.0 9	30.1 9	31.6 6	25.8 3	30.2 0
3	82.2 2	82.2 9	79.8 6	77.3 7	82.3 5	80.8 2	84.1 1	85.4 7	82.3 8	84.7 9	81.2 2	83.5 9
4	53.1 4	48.5 8	47.1 7	50.3 1	44.0 2	48.6 4	48.0 2	57.2 3	52.3 0	52.6 3	45.1 3	51.0 6
5	48.2 6	48.2 6	47.1 4	46.0 3	48.2 5	47.5 9	44.0 2	43.2 8	44.8 2	43.6 5	48.6 5	44.8 8
6	50.4 4	51.2 0	52.0 3	52.0 9	51.9 6	51.5 4	44.2 8	47.9 8	44.9 2	46.1 3	45.2 9	45.7 2
7	49.1 9	50.9 2	52.9 8	53.3	52.6 5	51.8 1	46.9 2	49.2 3	47.1 0	48.0 8	47.7 5	47.8 2
8	48.2 4	49.8 1	52.0 8	52.7 8	51.3 8	50.8 6	50.7 2	53.6 3	50.7 0	52.1 8	49.0 3	51.2 5
9	50.0 2	49.8 7	51.7 1	53.7	49.7 1	51.0 0	52.1 1	55.9 0	52.3 6	54.0 1	52.8 3	53.4 4
10	51.1 3	51.8 4	53.0 8	53.6 2	52.5 4	52.4 4	52.3 4	53.2 7	55.0 9	52.8 1	54.9 3	53.6 9
11	52.0 2	50.1 7	51.4 8	54.6 4	48.3 1	51.3 2	53.2 2	57.3 2	58.5 4	55.2 7	55.7 3	56.0 2
12	51.8 3	52.5 8	53.6 2	53.9 1	53.3 2	53.0 5	54.2 1	58.0 9	58.9 0	56.1 5	56.7 9	56.8 3
13	52.3 7	53.8 0	54.0 3	52.8 3	55.2 3	53.6 5	55.2 9	59.2 1	60.1 8	57.2 5	57.7 5	57.9 4
14	53.2 2	52.2 3	53.2 8	55.3 2	51.2 3	53.0 5	56.2 3	57.6 0	60.7 1	56.9 2	61.4 1	58.5 7
15	52.3 1	53.0 7	55.5 3	57.2 3	53.8 2	54.3 9	58.0 1	59.7 6	62.2 3	58.8 9	61.0 7	59.9 9

ตาราง ก.8 ตารางแรงในการลากขึ้นรูปของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 430 แรงกดเทียบ 11.46 k N

ระยะ เหล็ก	430 0 MPa						430 5 Mpa					
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	เฉลี่ย	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	เฉลี่ย
1	8.55	12.8 3	6.85	2.82	8.55	7.92	15.2 1	8.55	10.6 3	15.2 6	2.42	10.4 1
2	71.2 8	76.5 0	38.4 5	46.7 1	45.1 4	55.6 2	49.2 0	43.1 2	47.1 4	44.6 2	35.1 5	43.8 5
3	75.3 8	76.0 7	74.2 1	72.8 0	82.2 0	76.1 3	72.7 0	72.2 0	80.2 0	79.1 3	81.4 5	77.1 4
4	39.4 4	54.3 5	48.7 2	51.3 2	51.4 5	49.0 6	48.4 7	47.2 1	49.3 7	42.3 6	51.4 5	47.7 7
5	38.9 6	53.1 6	40.8 1	49.8 9	46.0 9	45.7 8	44.1 9	46.2 9	47.3 4	45.6 2	55.1 2	47.7 1
6	39.4 4	53.5 1	45.1 1	48.9 4	50.3 7	47.4 7	47.0 4	48.4 1	48.9 4	47.8 1	54.2 6	49.2 9
7	39.9 1	49.1 8	46.9 1	47.5 1	50.3 7	46.7 8	46.5 7	50.7 5	51.6 7	46.0 9	52.8 3	49.5 8
8	40.8 7	48.6 0	42.2 6	46.0 9	49.8 9	45.5 4	48.4 7	49.2 9	52.2 4	51.8 9	53.2 5	51.0 3
9	39.9 1	48.7 9	45.5 0	44.1 9	50.3 1	45.7 4	52.2 7	50.7 1	53.6 2	52.3 1	55.9 4	52.9 7
10	39.4 4	47.5 4	47.2 8	46.0 9	51.3 2	46.3 3	51.3 2	51.5 5	51.2 8	53.5 1	52.9 3	52.1 2
11	43.2 4	46.5 6	46.8 1	45.1 4	48.9 4	46.1 4	55.6 0	49.9 3	47.7 2	48.1 6	49.8 3	50.2 5
12	44.6 7	48.9 4	43.2 2	41.8 2	49.8 9	45.7 1	56.8 7	49.8 9	49.8 9	49.8 9	49.8 9	51.2 9
13	44.6 7	50.8 4	42.6 1	45.1 4	51.3 2	46.9 2	58.7 0	51.2 7	48.9 4	51.3 2	48.9 4	51.8 3
14	45.1 4	50.8 4	44.4 1	46.0 9	50.2 7	47.3 5	59.9 9	52.9 4	47.8 1	49.9 0	51.3 2	52.3 9
15	46.0 9	52.2 1	47.8 1	45.1 4	52.2 7	48.7 0	54.7 6	51.4 5	52.2 7	51.3 4	52.2 7	52.4 2

ระยะ เหล็ก	430 10 Mpa						430 15 Mpa					
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	เฉลี่ย	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	เฉลี่ย
1	12.9 5	3.42	7.98	6.64	10.2 5	8.25	13.7 4	9.23	10.7 2	5.23	8.73	9.53
2	39.4 4	28.8 9	25.2 5	23.8 2	35.0 9	30.5 0	35.8 2	28.0 9	30.6 5	32.8 4	25.8 3	30.6 5
3	82.6 2	83.6 3	75.3 9	77.3 7	82.3 5	80.2 7	85.1 3	89.4 7	87.3 8	88.0 9	85.2 2	87.0 6
4	53.4	60.8	49.1 3	50.3 1	44.0 2	51.5 3	49.0 2	57.2 3	52.3 0	50.2 7	45.1 3	50.7 9
5	48.4 6	45.1 2	47.3 2	46.0 3	48.2 5	47.0 4	44.3 2	43.2 8	45.7 2	47.2 3	48.6 5	45.8 4
6	50.8 4	48.9 2	48.4 3	52.0 9	51.9 6	50.4 5	45.2 8	47.9 8	44.8 2	49.8 4	45.2 9	46.6 4
7	49.8 9	47.5	50.1 3	53.3	52.6 5	50.6 9	48.9 2	49.2 3	47.1 0	50.4 0	47.7 5	48.6 8
8	48.9 4	48.9 2	49.6 1	52.7 8	51.3 8	50.3 3	51.7 3	53.6 3	50.7 0	52.0 8	49.0 3	51.4 3
9	50.3 2	52.2 5	50.0 1	53.7	49.7 1	51.2 0	53.8 1	55.9 0	52.3 6	52.9 7	52.8 3	53.5 7
10	51.3	53.2	52.3 2	53.6 2	52.5 4	52.6 0	52.3 4	53.2 7	55.0 9	53.1 0	54.9 3	53.7 5
11	52.4 2	56.0 5	53.9 8	54.6 4	48.3 1	53.0 8	54.8 2	57.3 2	58.5 4	55.8 6	55.7 3	56.4 5
12	51.0 3	52.6 8	52.8 3	53.9 1	53.3 2	52.7 5	55.2 3	58.0 9	59.9 0	60.2 4	57.0 9	58.1 1
13	53.3 7	53.9 1	54.1 3	52.8 3	55.2 3	53.8 9	57.2 1	59.2 1	60.2 8	61.8 7	58.6 5	59.4 4
14	53.8 2	56.6 4	49.2 3	55.3 2	51.2 3	53.2 5	56.8 3	57.6 0	61.7 2	62.0 9	61.4 8	59.9 4
15	52.3 1	53.3 2	54.6 1	57.2 3	53.8 2	54.2 6	58.9 1	59.7 6	62.4 3	63.2 5	63.0 7	61 8

ภาคผนวก ข  
การคำนวณอัตราส่วนความเครียด

การหาสมบัติทางกลของเหล็ก SUS 304 หนา 0.48 mm.

จากสมการหาอัตราส่วนความเครียดพลาสติก

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln(w/w_0)}{\ln(t/t_0)}$$

จะได้ค่า  $r$  ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 ทั้ง 3 แนวแกนดังนี้

$$r_0 = \frac{\ln(9.44/12.5)}{\ln(0.40/0.5)} = 1.258$$

$$r_{45} = \frac{\ln(8.71/12.5)}{\ln(0.39/0.5)} = 1.454$$

$$r_{90} = \frac{\ln(9.39/12.5)}{\ln(0.39/0.5)} = 1.151$$

ทดสอบหาสมบัติทางกลของเหล็ก SUS 430 หนา 0.48 mm.

จะได้ค่า  $r$  ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 ทั้ง 3 แนวแกนดังนี้

$$r_0 = \frac{\ln(10.74/12.5)}{\ln(0.41/0.5)} = 0.765$$

$$r_{45} = \frac{\ln(10.67/12.5)}{\ln(0.41/0.5)} = 0.798$$

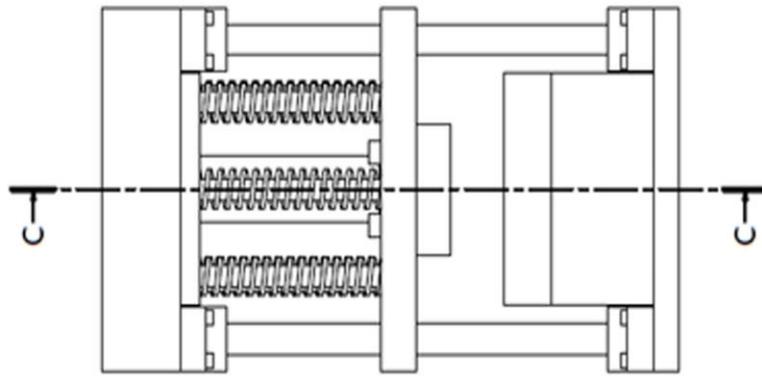
$$r_{90} = \frac{\ln(10.96/12.5)}{\ln(0.40/0.5)} = 0.589$$

ตาราง ข.1 ตารางค่าสมบัติเชิงกลของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม

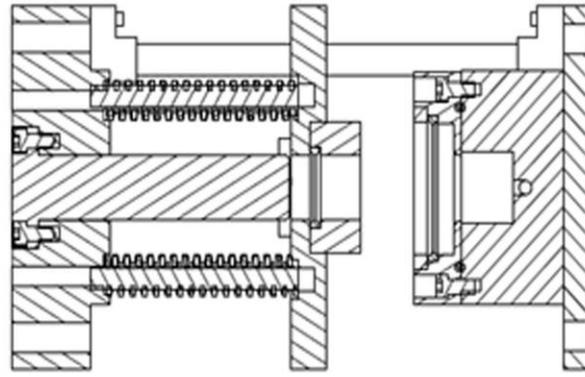
วัสดุหนา 0.48 mm.	แรงดึงที่จุดคราก (N)	อัตราส่วนความเครียดพลาสติก ( r )		
		$R_0$	$R_{45}$	$R_{90}$
SUS304	1740	1.258	1.451	1.151
SUS430	1922	0.765	0.798	0.589

ภาคผนวก ค  
แบบขึ้นส่วนแม่พิมพ์

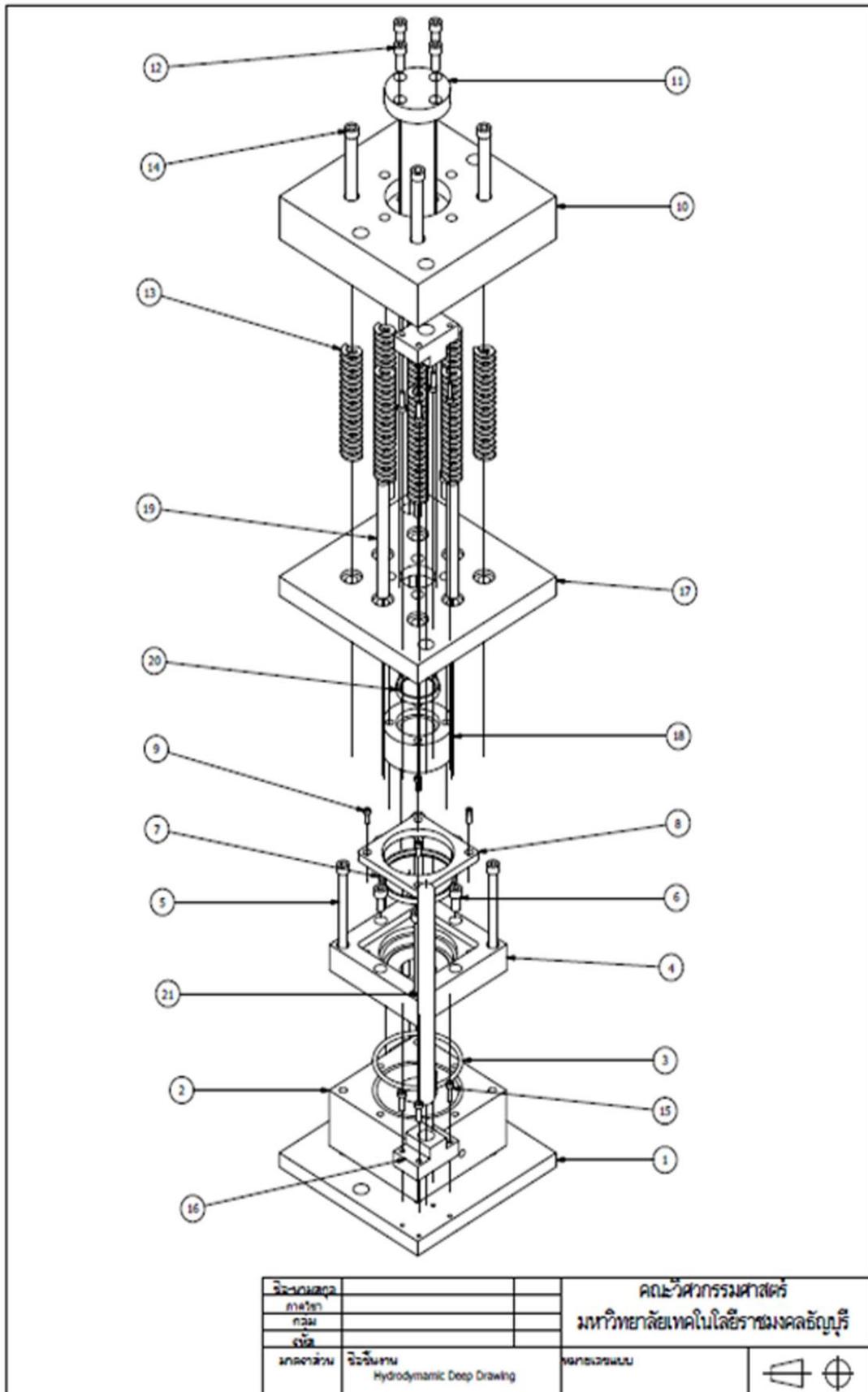
21	GUIDE POSTS	Ø21x300	-	-	2
20	u cup 2	Ø55	-	-	1
19	Stripper Bolt 3	M10x1.5x160	-	-	4
18	Blank holder ring Rev.02	Ø90x39	skd11	ine-05	1
17	Blank holder plate	250x250x27	ss400 steel	ine-06	1
16	Guide Bushings	74x44x35	-	-	4
15	Bolt 3	M6x1.25x30	-	-	16
14	Stripper Bolt 1	M10x1.5x180	-	-	4
13	Spring	-	-	-	8
12	Bolt 3	M10x1.25x35	-	-	8
11	Punch	Ø84x213	skd11	ine-07	1
10	Punch plate	250x250x75	ss400 steel	ine-08	1
9	Bolt 2	M10x1.25x25	-	-	4
8	Die Plate Cover	112x112x10.5	ss400 steel	ine-04	1
7	u cup 1	Ø99.8	-	-	1
6	Bolt 1	M6x1.25x30	-	-	4
5	Stripper Bolt 2	M10x1.5x120	-	-	4
4	Die Plate	160x160x36.5	skd11 ชุดแม่พิมพ์ S8-62	ine-03	1
3	oring	Ø110	-	-	1
2	die block	160x160x78	ss400 steel	ine-02	1
1	Die holder	250x250x20	ss400 steel	ine-01	1
ชั้นปี	รายการ	ขนาด	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ชื่อ-นามสกุล			คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี		
ภาควิชา					
กลุ่ม					
รหัส					
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน Hydrodynamic Deep Drawing		หมายเลขแบบ		

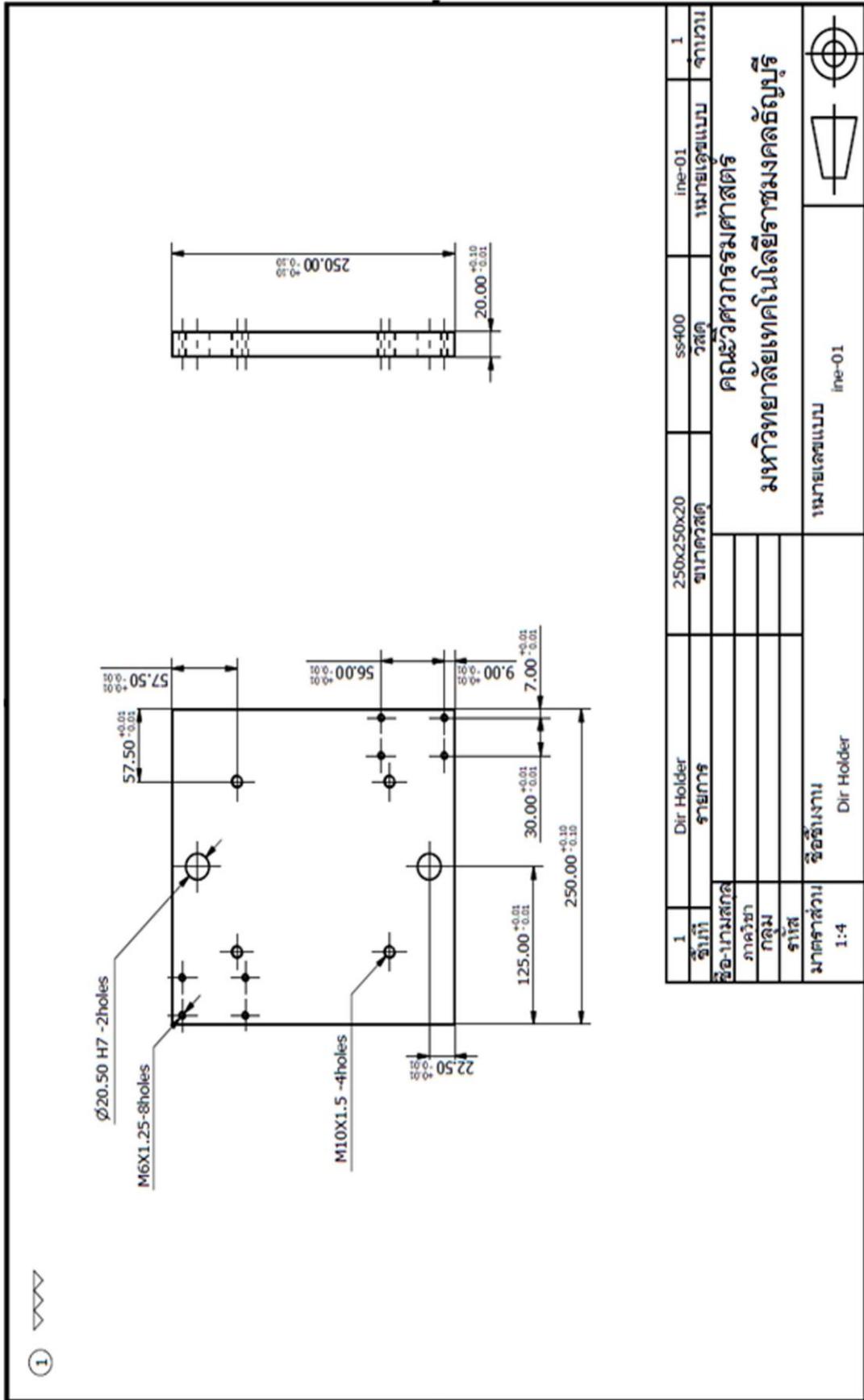


C-C ( 1 : 3 )



ชื่อ-นามสกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์	 
ชื่อ-นามสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	
ชื่อ-นามสกุล	ภาคเรียน	
ชื่อ-นามสกุล	ชื่อชิ้นงาน	
ชื่อ-นามสกุล	Hydrodynamic Deep Drawing	

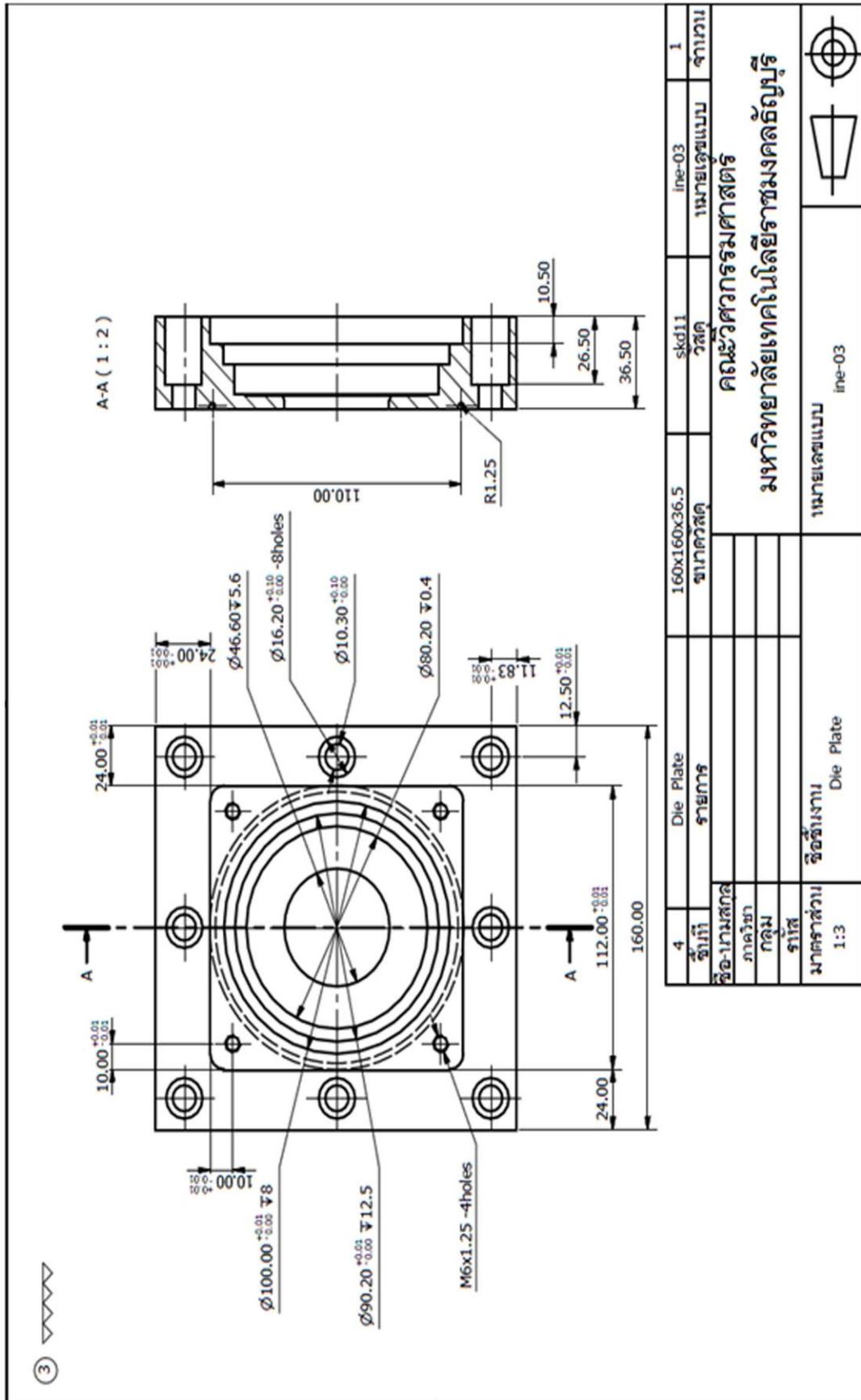


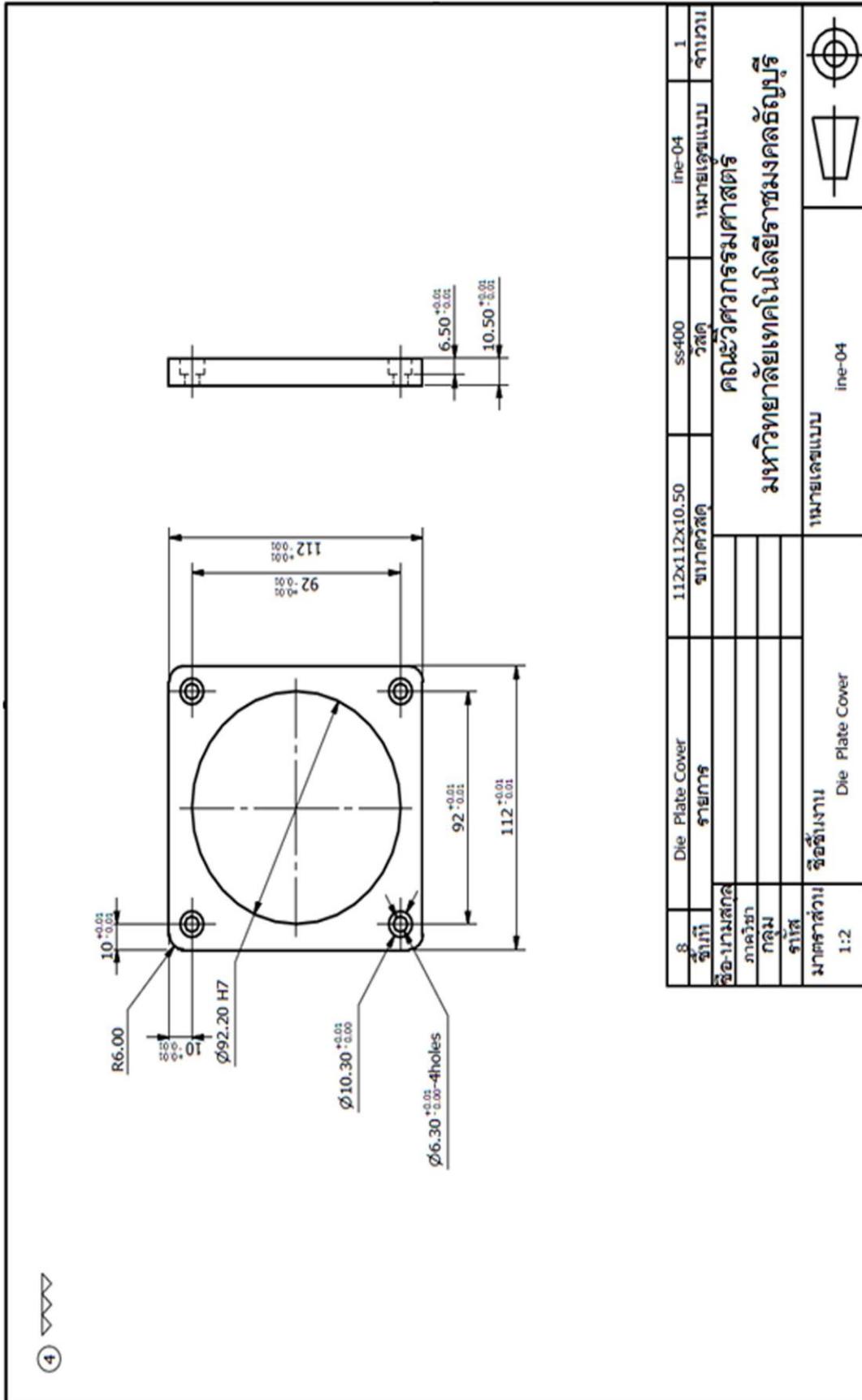


1	Dir Holder	250x250x20	ine-01	1
ชื่อแก้ไข	รายการ	ขนาดวัสดุ	ss-400	หมายเหตุแบบ
ชื่อ-นามสกุล			วัสดุ	จำนวน
ภาควิชา			คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	
กลุ่ม				
รายวิชา				
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน		หมายเหตุแบบ	
1:4	Dir Holder		ine-01	



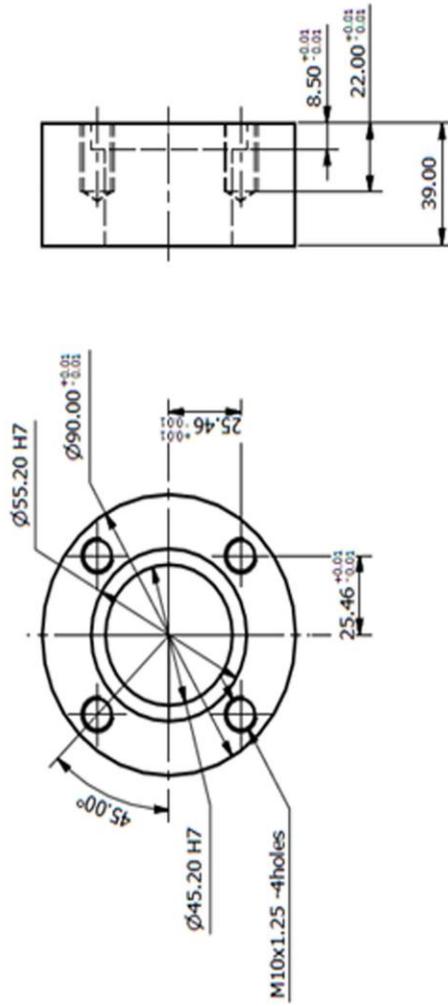






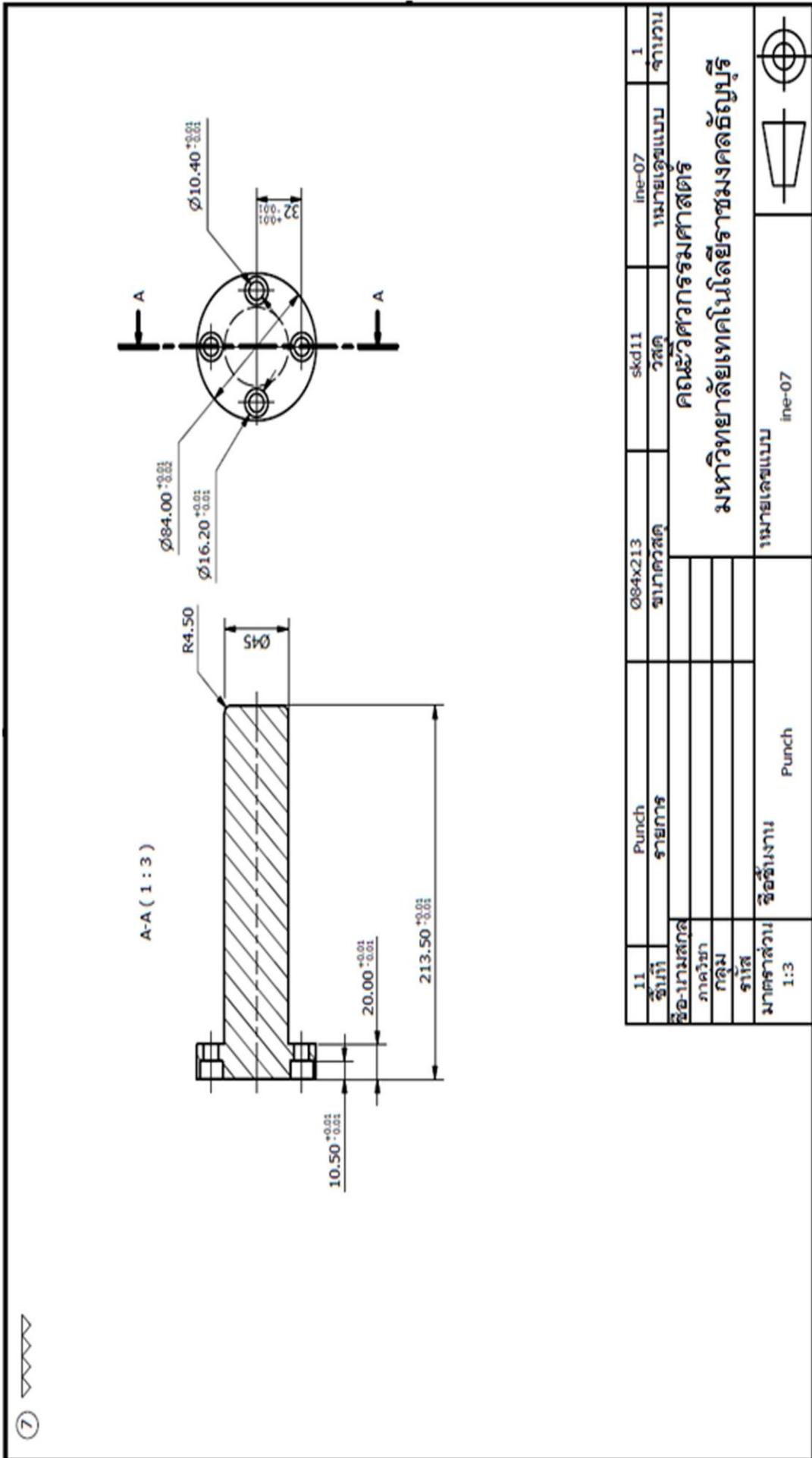
ชื่อ-นามสกุล	Die Plate Cover	112x112x10.50	ss-400	line-04	1
ชื่อ-นามสกุล	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ภาควิชา				<b>คณะวิศวกรรมศาสตร์</b> <b>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี</b>	
กลุ่ม					
รายปี					
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน		หมายเลขแบบ		
1:2	Die Plate Cover		line-04		

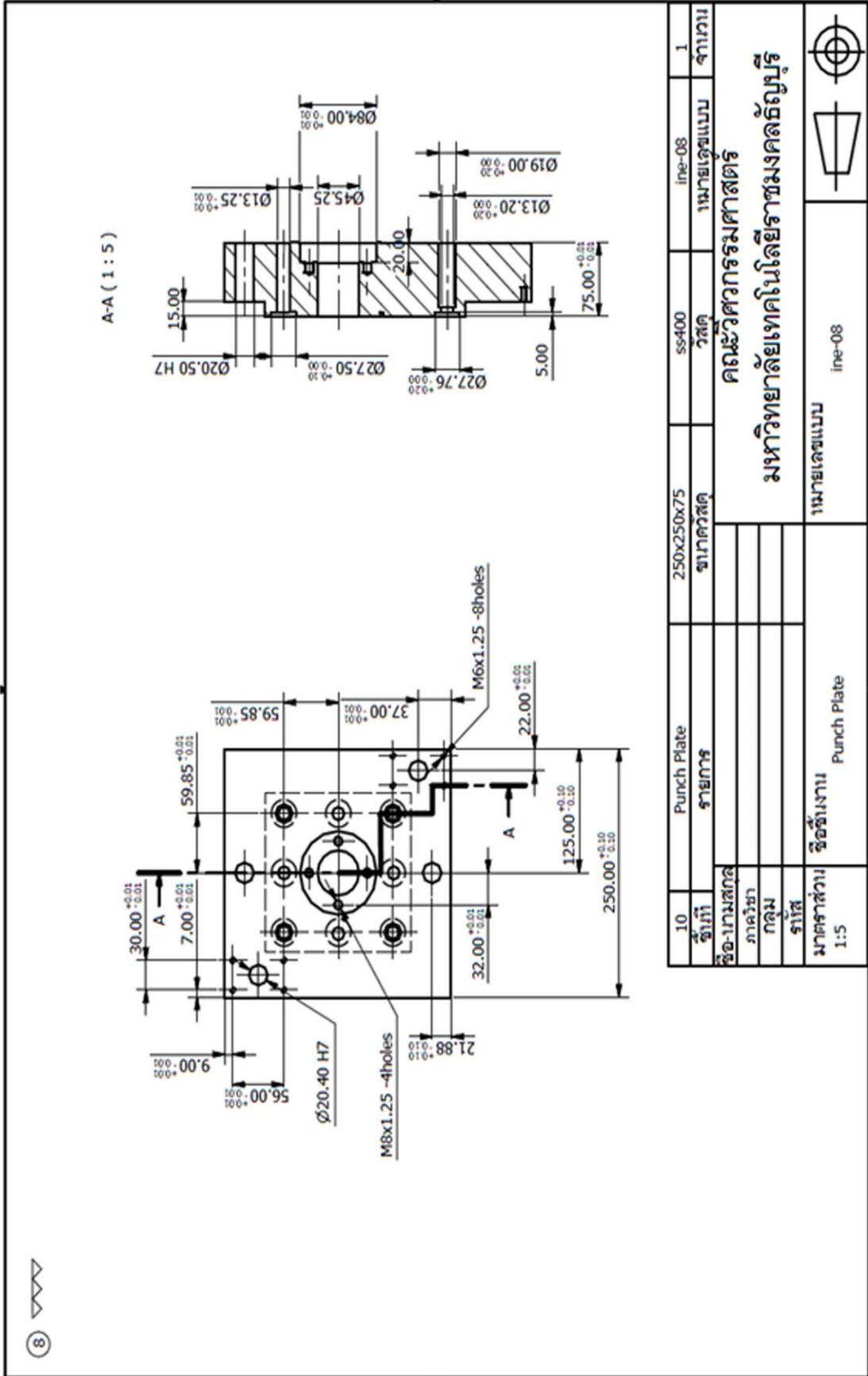




18	Blank holder ring Rev02	Ø90x39	skd11	ine-05	1
ชื่อ-นามสกุล	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ภาควิชา					
กลุ่ม					
รายสี					
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน	คณะวิศวกรรมศาสตร์			
1:2	Blank holder ring Rev02	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี			
		หมายเลขแบบ	ine-05		







10	Punch Plate	250x250x75	ss400	line-08	1
ชื่อ-นามสกุล	รายการ	ขนาด	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ภาควิชา					
กลุ่ม					
รายชื่อ					
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน	คณะวิศวกรรมศาสตร์			
1:5	Punch Plate	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี			
		1หมายเลขแบบ	line-08		



การเผยแพร่ผลงานวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม (IE Network 2014)

Industrial Engineering Department  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang



# IE NETWORK CONFERENCE

## 2014

การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2557

30-31 October 2014  
Novotel Suvarnabhumi Airport Hotel  
[www.ienet-th.org](http://www.ienet-th.org)

Diversifying Industrial Engineering  
for Future Generation

Proceedings



การไฟฟ้านครหลวง  
Metropolitan Electricity Authority

