

การศึกษาอิทธิพลของของเหลวในการดากขึ้นรูปลึกเหล็กคาร์บอนรีดเย็น
SPCC ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว

EFFECT OF LIQUID ON DEEP DRAWABILITY OF SPCC COLD
ROLLED CARBON STEEL BY HYDRODYNAMIC DEEP
DRAWING PROCESS

กฤษดา บรรเทาพิษ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาอิทธิพลของของเหลวในการตกชั้นรูปดึกเหล็กคาร์บอนรีดเย็น
SPCC ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว

กฤษดา บรรเทาพิษ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาอิทธิพลของของเหลวในการลากขึ้นรูปเหล็กคาร์บอนรีดเย็น SPCC ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว
ชื่อ - นามสกุล	นายกฤษดา บรรเทาพิษ
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, D. Ing.
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

กระบวนการลากขึ้นรูปเหล็กเป็นกระบวนการหนึ่งในกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะแผ่น ที่ถูกใช้ในการผลิตของอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับงานการศึกษาวิจัยครั้งนี้มุ่งศึกษาถึงกระบวนการการลากขึ้นรูปเหล็กด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ซึ่งเป็นการนำเอาแรงดันของเหลวเข้ามาช่วยในการลากขึ้นรูปเหล็ก

การศึกษาวิจัยฉบับนี้ศึกษาถึงกระบวนการลากขึ้นรูปเหล็กด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว โดยใช้วัสดุเหล็กคาร์บอนรีดเย็นในกลุ่มมาตรฐาน JIS ชั้นคุณภาพ SPCC ศึกษาของเหลวชนิดน้ำมันไฮดรอลิกตามมาตรฐาน มอก. 3 ระดับค่าความหนืด คือ 68 46 และ 32 mm²/s ตามค่าความหนืดเชิงจลศาสตร์ ที่อุณหภูมิ 40 °C ที่แรงดันของเหลว 3 ระดับ คือ 50, 100 และ 150 bar และแรงกดขึ้นงาน 3 ระดับ คือ 1.9, 3.9 และ 7.1 kN ศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูป และแรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงาน ชิ้นงานหลักการขึ้นรูป การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงาน และความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน

ผลการทดลองพบว่า แรงดันของเหลวและแรงกดขึ้นงานเป็นตัวแปรที่สำคัญและมีผลกระทบต่อกระบวนการลากขึ้นรูปมากที่สุด โดยแรงในการลากขึ้นรูปและแรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อแรงดันของเหลวและแรงกดขึ้นงานเพิ่มขึ้น ซึ่งการขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด VG 68 mm²/s แรงดัน 100 bar แรงกดขึ้นงาน 3.9 kN มีแรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานเท่ากับ 56.89 kN การขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด VG 46 mm²/s ที่แรงดัน 100 bar แรงกดขึ้นงาน 3.9 kN มีแรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานเท่ากับ 70.73 kN ในขณะที่การขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด VG 32 mm²/s ที่แรงดัน 100 bar โดยใช้แรงกดขึ้นงาน 3.9 kN ไม่สามารถทำการขึ้นรูปได้

คำสำคัญ : การลากขึ้นรูปเหล็ก การเคลื่อนที่ของของเหลว แรงกดขึ้นงาน ความหนืดเชิงจลศาสตร์

Thesis Title	Effect of Liquid on Deep Drawability of SPCC Cold Rolled Carbon Steel by Hydrodynamic Deep Drawing Process
Name - Surname	Mr. Kitsada Buntaopis
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Sirichai Torsakul, D. Ing.
Academic Year	2012

ABSTRACT

Deep drawing process is a manufacturing process in sheet metal forming used in industrial fabrication such as automotive and electronics industry. This study focuses on the hydrodynamic deep drawing which involves use of liquid pressure in deep drawing.

This paper studies the hydrodynamic deep drawing process associated with cold rolled carbon steel JIS standard SPCC quality grade. The study was conducted by using hydraulic oil TIS standard, with kinematics viscosity of 68, 46 and 32 mm²/s at 40°C at three levels of liquid pressure of 50, 100 and 150 bar and blank holder force three levels, which are 1.9, 3.9 and 7.1 kN. The parameter effect with the drawing force and punch force directly associated with the work piece, work after forming reflected thickness change and strain on work piece.

The results of the effected parameter can be summarized as liquid pressure and blank holder force which show relative effect in the deep drawing process. The drawing force and punch force on the work piece tend to increase when the fluid pressure and load on work price increase where the appropriate liquid VG 68 pressure lies in the range of 100 bar use. The blank holder force of 19.62 N/mm procreate and punch force directly to the work piece equals 56.89 kN. For the deep drawing condition utilizing liquid VG 46, the appropriate condition of pressure lies in the range of 100 bar using blank holder forces of 19.62 N/mm to procreate and punch force directly to the work piece which equals 70.73 kN. While deep drawing by liquid VG 32 pressure lies in range of 100 bar, the use of blank holder force 19.62 N/mm forming process be ineffective.

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

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง การศึกษาอิทธิพลของของเหลวในการลากขึ้นรูปลึกเหล็กคาร์บอนรีดเย็น SPCC ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากคณาจารย์ทั้งหลายที่คอยประสิทธิ์ประสาทวิชา และชี้แนะแนวทาง โดยอย่างยิ่ง ผศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์หลัก ตลอดจน ดร.สมศักดิ์ อิทธิโสภณกุล ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ กรรมการ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และ ดร.วิบูล อุทัยแสงสุข กรรมการจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

กระผมขอขอบพระคุณท่านอาจารย์บุญส่ง จงกลณี อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ช่วยให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการใช้เครื่องจักร ตลอดจนเครื่องมือต่างๆ และคุณธงชัย เฟื่องจันทร์ดี อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒเองครักษ์ สำหรับการช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือวัด จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จ และเสร็จสมบูรณ์ ที่ให้การสนับสนุนด้านงานวิจัย

ท้ายนี้กระผมใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้กระผมมาจนสำเร็จการศึกษา

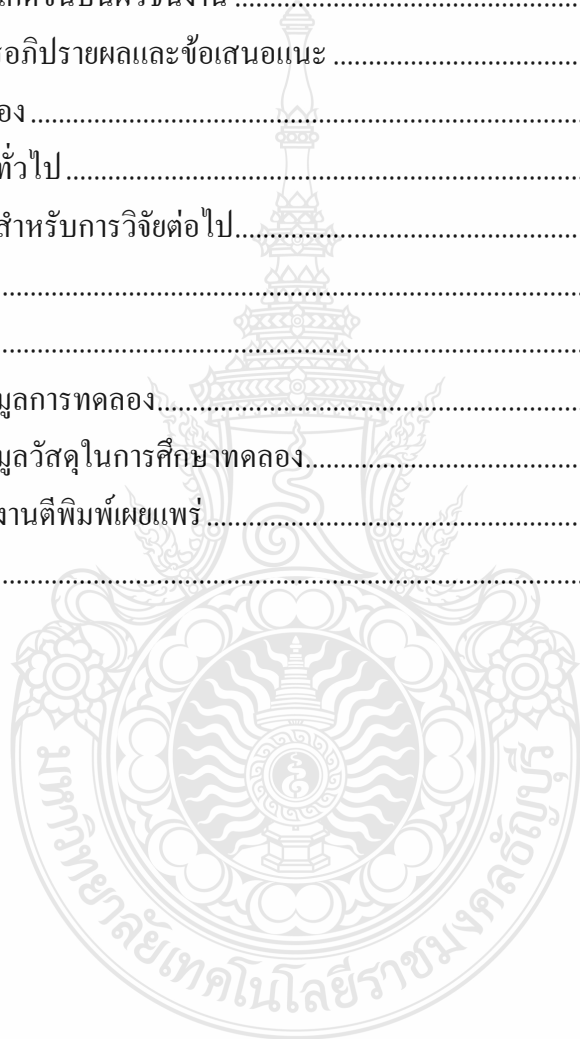
กฤษฎา บรรเทาพิษ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและจุดประสงค์.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
1.6 ข้อจำกัดของการศึกษา.....	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 แนวความคิด.....	7
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	41
2.4 สรุปบท.....	43
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	44
3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและการเตรียมการทดลอง.....	44
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	49
3.3 ขั้นตอนการเก็บบันทึกข้อมูลการทดลอง.....	63
3.4 การเปรียบเทียบสรุปผลการทดลอง.....	69
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	71
4.1 ผลการทดลองแรงในการลากจูงรูป.....	71

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.2 ผลการทดลองแรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงาน	76
4.3 ผลการทดลองชิ้นงานที่ได้หลังการลากลึงรูป	79
4.4 ผลการทดลองความหนาที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป	88
4.5 ความเครียดที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงาน	95
5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ	105
5.1 สรุปการทดลอง	105
5.2 ข้อเสนอแนะทั่วไป	107
5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป	108
รายการอ้างอิง.....	109
ภาคผนวก.....	113
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลอง.....	114
ภาคผนวก ข ข้อมูลวัสดุในการศึกษาทดลอง.....	128
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	135
ประวัติผู้เขียน.....	149



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ค่าตัวคูณประกอบของการแตก a_{cr} ของวัสดุต่างๆ.....	12
2.2	ค่าประกอบของวัสดุ (Material Factor).....	13
2.3	ค่าการปรับค่า $n = f(\beta_{actual})$	14
2.4	ระบบ หน่วย และอุณหภูมิที่วัดความหนืดของน้ำมัน	25
2.5	ชั้นคุณภาพตาม JIS G 3141 และการใช้งาน	38
3.1	สมบัติของเหล็ก SPCC	50
3.2	ชิ้นส่วนแม่พิมพ์.....	54
3.3	ตัวแปรในการทดลองสำหรับการขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว โดยใช้ของเหลว VG 68 .	62
3.4	ตัวแปรในการทดลองสำหรับการขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว โดยใช้ของเหลว VG 46 .	62
3.5	ตัวแปรในการทดลองสำหรับการขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว โดยใช้ของเหลว VG 32 .	62
3.6	ตัวแปรในการทดลองสำหรับการขึ้นรูปแบบธรรมดา.....	63
3.7	ค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดกริดในแนวส่วนโค้ง	68



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยรวม 4
2.1	การลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing)..... 7
2.2	การลากขึ้นรูปลึก 7
2.3	วงกลมหน้าสัมผัสของการลากขึ้นรูปด้วย..... 8
2.4	ส่วนย่อยในวงกลมหน้าสัมผัสจากภาพที่ 2.3 9
2.5	ลักษณะความเค้นและปริมาณความเครียดของจุดต่างๆ บนผิวสัมผัส..... 9
2.6	ส่วนของผิวสัมผัสในระหว่างกระบวนการลากขึ้นรูปในสภาวะที่ปราศจากแรงเสียดทานความเค้นภายในผนังมีขนาดที่เท่ากันทุกจุด คือ รัศมีความเค้นที่รัศมีวงใน σ_{ri} 10
2.7	เส้นกราฟของความเค้นในการลากขึ้นรูปเมื่อเปรียบเทียบกับเคลื่อนที่ของพื้นที่สำหรับวัสดุที่เกิดความเครียดเชิงตัว 11
2.8	รูปถ้วยทรงกระบอกแบบมีปีก 12
2.9	แรงกดพื้นที่ในการขึ้นรูปถ้วย 14
2.10	Hydrodynamic Deep Drawing 15
2.11	กระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว..... 16
2.12	ส่วนต่างของของระบบ Hydrodynamic Deep Drawing..... 17
2.13	หลักการทํางานของเครื่องอัดไฮดรอลิก โดยการใช้กฎของปาสคาล 22
2.14	หลักการของความหนืด 26
2.15	แรงดึง (Tensile)..... 29
2.16	แรงกด (Compression)..... 29
2.17	แรงเฉือน (Shear) 29
2.18	ความเค้นความเครียดของการดึงวัสดุ..... 30
2.19	ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain)..... 31
2.20	ความเครียดเฉือน (Shear Strain)..... 32
2.21	เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point) 32
2.22	ตารางวงกลมบนโลหะแผ่น 33
2.23	แผนภาพความเครียดตำแหน่งต่างๆ ของถ้วยทรงกระบอก..... 34
2.24	แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ความหนา 0.91 mm..... 36

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.25	กระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น..... 37
3.1	ชิ้นงานสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาด 90×90 mm..... 44
3.2	การจับยึด (Fixture) บนเครื่องกัด CNC..... 45
3.3	การกัดชิ้นงาน โดยเครื่องจักร CNC..... 45
3.4	ชิ้นงานทดสอบ (JIS:SPCC) ความหนา 0.5 mm 45
3.5	ของเหลวชนิดน้ำมันไฮดรอลิกตามมาตรฐานเกรด 32 46 และ 68 46
3.6	เครื่องปั๊มอัดระบบไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน..... 46
3.7	เครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC Automatic Machine) 47
3.8	เครื่องทดสอบแรงดึง..... 47
3.9	ชุดต้นกำลังและควบคุมระบบไฮดรอลิก..... 47
3.10	อุปกรณ์วัดแรงดันและอุปกรณ์บันทึกแรงที่ได้จากการขึ้นรูป..... 48
3.11	ไมโครคาลิปเปอร์สำหรับวัดความหนาชิ้นงาน 48
3.12	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 49
3.13	ชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดึงเหล็ก SPCC ตามมาตรฐาน JIS Z2201:1998 50
3.14	ชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกแบบมีปีก..... 51
3.15	สถานะของแม่พิมพ์ในการศึกษาทดลอง ซึ่งได้จากการออกแบบคำนวณตามทฤษฎีการ ลากชิ้นรูปเล็ก..... 52
3.16	ส่วนประกอบพร้อมรายละเอียดของแม่พิมพ์..... 54
3.17	ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ขึ้นรูป..... 55
3.18	แผงสวิทช์ควบคุมการทำงานของระบบไฮดรอลิก..... 56
3.19	วงจรการทำงาน และควบคุมระบบไฮดรอลิก..... 57
3.20	ช่องเติมน้ำมันทั้งสองช่องเพื่อเติมน้ำมันภายในถังและที่ปั๊มโดยตรง..... 57
3.21	กระบวนการกรัดเกลือกัดด้วยไฟฟ้า 59
3.22	แผ่นทดสอบที่สร้างกริดเรียบร้อยแล้ว 59
3.23	แม่พิมพ์ซึ่งติดตั้งบนเครื่องปั๊มอัดเรียบร้อยแล้ว..... 60
3.24	การปรับตั้งสวิทช์ควบคุมของเครื่องปั๊ม..... 60
3.25	แม่พิมพ์พร้อมใช้งานติดตั้งบนเครื่องเพรสไฮดรอลิก 61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.26 ตำแหน่งของการวัดความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป.....	64
3.27 การวัดขนาดกริดวงกลมด้วยโปรแกรม Decal Image Processing.....	65
3.28 การวัดอัตราความเครียดและอัตราความเครียดตรง	66
3.29 ลักษณะของกริดวงกลม	67
3.30 ตำแหน่งการวัดกริดวงกลม	67
3.31 กริดวงกลมที่ตำแหน่งกึ่งด้วยบริเวณกึ่งกลางและขอบด้วย	67
3.32 กริดวงกลมที่ตำแหน่งผนังด้วยด้านข้างบริเวณ กึ่งกลาง และมุมตาย.....	68
3.33 กริดวงกลมซึ่งทำการวัดในบริเวณที่เกิดการฉีกขาดบนผิวชิ้นงาน	69
4.1 ผลการทดลองการขึ้นรูปด้วยสปริงค่าคงที่ 9.42 N/mm	71
4.2 ผลการทดลองการขึ้นรูปด้วยสปริงค่าคงที่ 19.62 N/mm	72
4.3 ผลการทดลองการขึ้นรูปด้วยสปริงค่าคงที่ 35.69 N/mm	72
4.4 ผลการทดลองการขึ้นรูปด้วยสปริงค่าคงที่ 9.42 N/mm	73
4.5 ผลการทดลองการขึ้นรูปด้วยสปริงค่าคงที่ 19.62 N/mm	73
4.6 ผลการทดลองการขึ้นรูปด้วยสปริงค่าคงที่ 35.69 N/mm	73
4.7 ผลการทดลองการขึ้นรูปด้วยสปริงค่าคงที่ 19.62 N/mm	74
4.8 แรงในการลากชิ้นรูปการขึ้นรูปด้วยสปริงค่าคงที่ทั้ง 3 ค่า.....	75
4.9 แรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานจากการขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 68	76
4.10 แรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานจากการขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 46	77
4.11 แรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานจากการทดลองของเหลว VG 32	78
4.12 ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 68 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm	79
4.13 ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 68 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm	80
4.14 ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 68 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm	81
4.15 ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 46 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm	82
4.16 ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 46 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm	83
4.17 ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 46 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm	84
4.18 เปรียบเทียบชิ้นงานหลังการขึ้นรูป.....	85
4.19 ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 32 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm	86

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.20 เปรียบเทียบชิ้นงานหลังการขึ้นรูป.....	87
4.21 ตำแหน่งของการวัดความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปตามขั้นตอนการทดลอง	88
4.22 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป.....	89
4.23 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป.....	89
4.24 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป.....	90
4.25 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป.....	91
4.26 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป.....	92
4.27 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป.....	92
4.28 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานในตำแหน่งเหนือมุมพื้นซ์	93
4.29 เปรียบเทียบผลการทดลองความหนาที่ลดลงในตำแหน่งจุมกพื้นซ์ของการขึ้นรูป	93
4.30 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป.....	94
4.31 ตำแหน่งการวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริดวงกลม	95
4.32 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการลากขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 68 โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm	96
4.33 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการลากขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 68 โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm	96
4.34 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการลากขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 68 โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm	97
4.35 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการลากขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 46 โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 9.62 N/mm.....	98
4.36 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการลากขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 46 โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 9.62 N/mm.....	99
4.37 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการลากขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 46 โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm.....	99
4.38 ความเครียดที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานจากการขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 46 และ 68 ที่แรงดัน 50 bar โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm.....	100

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.39 ความเครียดที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานจากการขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 46 และ 68 ที่แรงดัน 100 bar โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm.....	100
4.40 ความเครียดที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานจากการขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 46 และ 68 ที่แรงดัน 150 bar โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm.....	101
4.41 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการลากขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 32 โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm.....	101
4.42 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติ โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 9.62, 19.62 และ 35.69 N/mm.....	102
4.43 ขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 46 และ 68 โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันในการทดสอบ ที่แรงดัน 50 100 และ 150 bar โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm.....	103
4.44 ขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 68 โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงกดชิ้นงานที่ 9.42, 19.62 และ 35.69 N/mm ที่แรงดันในการทดสอบ ที่แรงดัน 100 bar.....	103

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กรรมวิธีการผลิตทางด้านโลหะแผ่น หรือการแปรรูปโลหะแผ่นให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างตามที่กำหนด เป็นอีกหนึ่งงานทางด้านวิศวกรรมที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในปัจจุบัน ซึ่งโลหะแผ่นถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในผลิตภัณฑ์หลายๆอย่าง โดยการแปรรูปโลหะแผ่นให้เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ซึ่งมีขนาดรูปร่างหรือรูปลักษณะต่างๆ ให้เป็นไปตามความต้องการนั้น โดยทั่วไปเรียกว่า การขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet Metal Forming; SMF) ในปัจจุบันการขึ้นรูปโลหะแผ่น มีกรรมวิธีอยู่มากมายหลายอย่าง เช่น การปั๊มตัดเฉือน การปั๊มขึ้นรูป และการลากขึ้นรูปลึก เป็นต้น ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการต่างๆดังกล่าวนั้นก็มีความแตกต่างกันไป สำหรับการศึกษาวิจัยเพื่อการพัฒนาทางด้านกระบวนการการขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นก็มีความสำคัญ และการศึกษาวิจัยในกระบวนการการขึ้นรูปโลหะแผ่นอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญ และได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก คือ การลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการการขึ้นรูปด้วยของเหลว โดยเฉพาะกระบวนการการขึ้นรูปด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ซึ่งเป็นการนำแรงดันของเหลวเข้ามาช่วยในการบดการลากขึ้นรูปลึก โดยเป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นสำหรับกระบวนการทางด้านการขึ้นรูปโลหะ ที่มีโครงสร้างเป็นโลหะเบา และมีความยืดหยุ่นในกระบวนการการทำงานสูง [1]

ปัจจุบันการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยของเหลว เป็นกรรมวิธีการผลิตที่มีความสำคัญ และใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ เครื่องใช้ภายในครัวเรือน อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนของเครื่องบิน และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น โดยที่การขึ้นรูปด้วยกระบวนการทางด้านไฮดรอลิก สามารถใช้ได้กับการขึ้นรูปทั้งโลหะแผ่น และ การขึ้นรูปท่อ (Tube Hydroforming) [2-3] กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยของเหลว เป็นกระบวนการหนึ่งที่เป็นเทคโนโลยีขั้นสูง และกระบวนการที่มีความสำคัญมากอีกอย่างหนึ่ง คือ การลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการการเคลื่อนที่ของของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing; HDD) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ใช้ในกรรมวิธีการผลิตขั้นสูง และที่เข้ามามีบทบาทสำคัญทางด้านการขึ้นรูปโลหะแผ่น ในกระบวนการ HDD จะใช้น้ำมันหรือของเหลวเข้ามาช่วยการการขึ้นรูปโลหะแผ่น ของเหลวที่มีแรงดันจะเคลื่อนตัวไหลอยู่ระหว่างพื้นผิวด้านล่างของแม่พิมพ์ตัวล่าง (Die) กับแผ่นโลหะ กระบวนการดังกล่าวสามารถเพิ่มค่าของอัตราส่วนจำกัดการลากขึ้นรูป (Limiting Drawing Ratio; LDR) และเป็นการปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงาน [4]

กระบวนการ Sheet Hydroforming โดยการนำของเหลวเข้ามาช่วยในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น แทนการลากขึ้นรูปแบบธรรมดาซึ่งเป็นการลดความฝืด หรือความเสียดทานระหว่าง Blank holder กับแผ่นโลหะแบบพลศาสตร์ของไหล [5-6]

ในงานศึกษาวิจัยฉบับนี้ได้มุ่งศึกษาในเรื่องอิทธิพลของของเหลว ที่มีความหนืดต่างกัน ที่มีผลต่อกระทบกับกระบวนการการลากขึ้นรูปด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองในกระบวนการ Hydrodynamic Deep Drawing ที่นำมาพิจารณาประกอบไปด้วย 1. ความสามารถในการขึ้นรูป (Formability) 2. แรงในการลากขึ้นรูป (Drawing Force) และ 3. คุณภาพและความเสียหายของชิ้นงานในสถานะต่างๆของการลากขึ้นรูป โดยนอกจากชนิดของสารหล่อที่เป็นตัวแปรหลักในการศึกษาทดลองแล้ว ตัวแปรสำคัญในกระบวนการ Hydrodynamic Deep Drawing ที่นำมาศึกษาทดลองร่วมด้วยคือ แรงจับยึดแผ่นโลหะ (Blank Holder Force) และ ความดันของเหลวภายใน (Internal Fluid Pressure) ซึ่งตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน [7] โดยวัสดุที่นำมาทดสอบใช้เหล็กเกรดเย็น SPCC ตามมาตรฐาน JIS G3141 [8] เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมในการนำมาศึกษาทดลอง โดยงานศึกษาวิจัยของ สวัสดิ์ โสตามุข [9] ในเรื่องการทำนายความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นส่วนยานยนต์ด้วยแผนภาพจำกัดการขึ้นรูป เมื่อปี 2549 ซึ่งนำเอาวัสดุในกลุ่มของเหล็กกล้ารีดเย็น ซึ่งประกอบไปด้วยเหล็ก SPCC SPCE และ SPC270 นำมาทดลองเพื่อศึกษาถึงความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะดังกล่าว พบว่าเหล็ก SPCC มีความสามารถในการขึ้นรูปได้ดีที่สุด และเกิดปัญหาการแตกร้าวที่ตัวชิ้นงานมากที่สุด ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงเป็นที่น่าสนใจว่า การลากขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Hydrodynamic Deep Drawing จะสามารถเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปและแก้ไขปัญหาคุณภาพของชิ้นงานของเหล็กเกรดเย็น SPCC ได้หรือไม่

1.2 ความมุ่งหมายและจุดประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปลึกและคุณภาพชิ้นงาน ที่ผ่านกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ในสถานะของความดันและความหนืดที่แตกต่างกัน

1.2.2 เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของแรงกดแผ่นขึ้นงานโลหะ ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ที่มีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูป รอยย่นที่ปากถ้วย และรอยแตกร้าวหรือการฉีกขาดของผิวชิ้นงาน

1.2.3 เพื่อศึกษาถึงความสามารถในการขึ้นรูปของเหล็กแผ่น SPCC ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ในสถานะของความดันและความหนืดที่แตกต่างกัน

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1.3.1 แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความดันของของเหลว และใช้ของเหลวที่มีความหนืดสูงขึ้นในขณะทำการขึ้นรูป

1.3.2 ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว จะใช้แรงในการลากขึ้นรูปที่สูงกว่าการลากขึ้นรูปแบบปกติ

1.3.3 แรงในการลากขึ้นรูปที่เกิดขึ้น ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว จะสูงกว่าความดันของของเหลวที่เกิดขึ้นภายในห้องเก็บของเหลว (Liquid Chamber) ในขณะทำการขึ้นรูป

1.3.4 คุณภาพของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการ Hydrodynamic Deep Drawing ที่ใช้ของเหลวความหนืดต่างกัน ชิ้นงานที่ได้และปัญหาที่พบจะแตกต่างกัน โดย Hydraulic Oil เกรดที่มีสมบัติความหนืด (Viscosity) ที่ดีกว่าควรจะได้คุณภาพของชิ้นงานที่ดีกว่าและพบปัญหาน้อยกว่า

1.3.5 ความสามารถในการลากขึ้นรูปของโลหะแผ่นควรจะเพิ่มขึ้น เมื่อใช้สารหล่อลื่นหรือของเหลวที่มีความหนืดสูงกว่า และทำการขึ้นรูปภายใต้สภาวะของความดันที่มีความเหมาะสม

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 วัสดุในการศึกษาทดลองใช้เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC ความหนา 0.5 mm ขนาดชิ้นงานเริ่มต้นเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 mm ทำการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 45 mm แบบมีปีกขนาด 5 mm ในอัตราส่วนการลากขึ้นรูป 1.8 [10]

1.4.2 แม่พิมพ์ทำจากเหล็กเครื่องมือ SKD11 ชุบแข็งและชุบฮาร์ดโครม (Hard Chrome) ในชิ้นส่วนที่สัมผัสเกิดการเสียดสีกับอุปกรณ์ป้องกันการรั่วซึมของของเหลว ด้วยการออกแบบแม่พิมพ์ให้สอดคล้องกับกระบวนการดังกล่าว

1.4.3 ของเหลวที่ใช้ในการทดสอบใช้น้ำมันไฮดรอลิก-น้ำมันแร่ (Hydraulic Oil) ที่มีค่าดัชนีความหนืดเชิงจลศาสตร์ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 3 ค่า คือ VG 68, VG 46 และ VG 32 mm²/sec ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.977-2551 น้ำมันไฮดรอลิก-พื้นฐานน้ำมันแร่[11] การทดสอบตามมาตรฐาน ISO 3105 [12] (ASTM D 445-09)

1.4.4 ทำการทดสอบที่แรงดันของเหลว 50, 100 และ 150 bar ตามลำดับ เปรียบเทียบกับการขึ้นรูปแบบปกติ

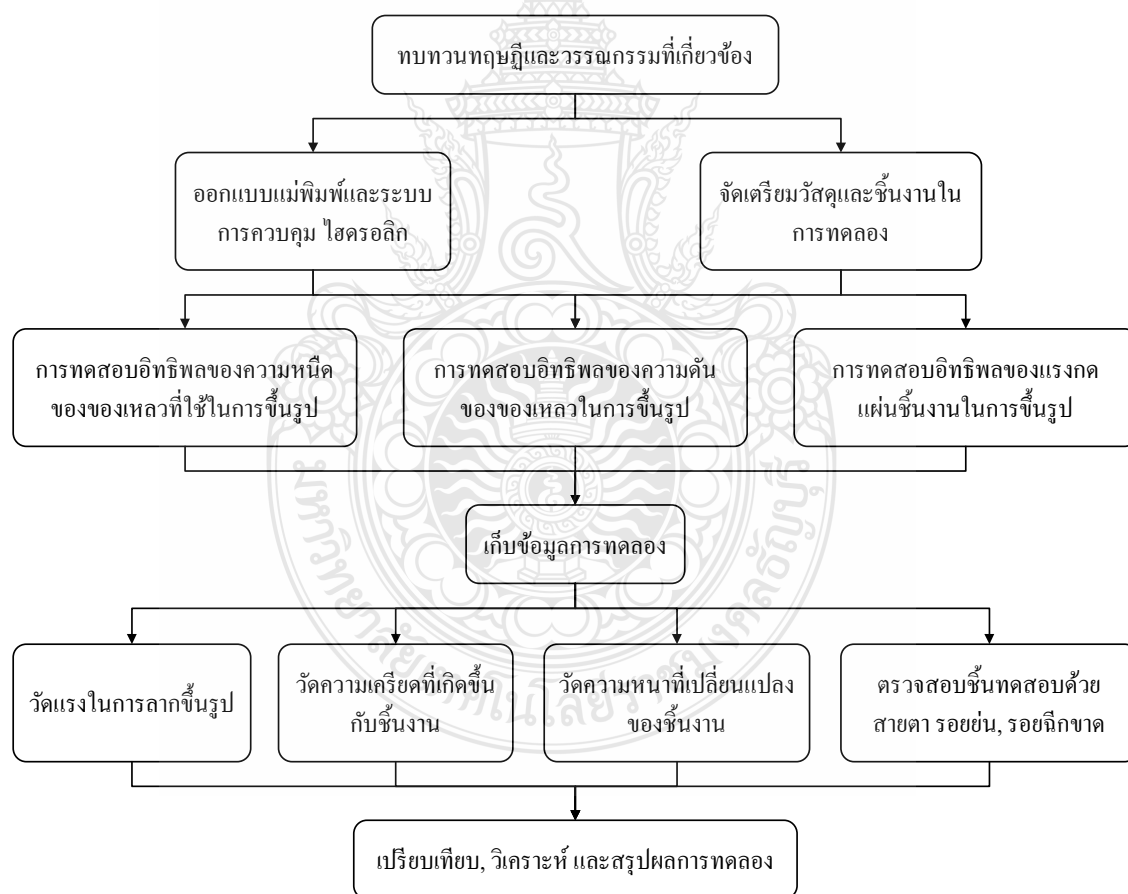
1.4.5 ทำการทดสอบโดยใช้แรงกดชิ้นงาน หรือแรงเหยียบแผ่นชิ้นงาน (Clamp Force) โดยออกแบบในใช้แรงจากการกดของสปริงแม่พิมพ์ ที่มีค่าคงที่สปริงเท่ากับ 9.42, 19.62, 35.69 N/mm ตามมาตรฐาน JIS B 5012 [13]

1.4.6 ศึกษาถึงสภาพโดยทั่วไปของชิ้นงาน โดยพิจารณาถึงปัญหาที่พบในกระบวนการลากชิ้นรูป อันประกอบไปด้วย 1. การฉีกขาด (Tearing) และ 2. รอยย่น (Wrinkling) [14-15]

1.4.7 ศึกษาถึงแรงในการลากชิ้นรูป (Drawing Force) ในกระบวนการลากชิ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว โดยใช้อุปกรณ์แปลงสัญญาณจากแรงคั้นน้ำมันที่กระบอกสูบของเครื่องปั๊ม

1.4.8 ศึกษาถึงความเครียดและความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นทดสอบ

1.5 ขั้นตอนการศึกษา



ภาพที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยรวม

1.6 ข้อจำกัดของการศึกษา

1.6.1 สำหรับตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ในครั้งนี้คือ รูปแบบของการขึ้นรูป ซึ่งในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เลือกใช้รูปแบบของการขึ้นรูปที่ง่าย และมีแหล่งของข้อมูลอ้างอิงที่เกี่ยวข้องกับวัสดุที่นำมาเป็นวัสดุทดสอบและตัวแปรต่างๆ ของเครื่องมือ (Tooling Parameter) ต่างๆ

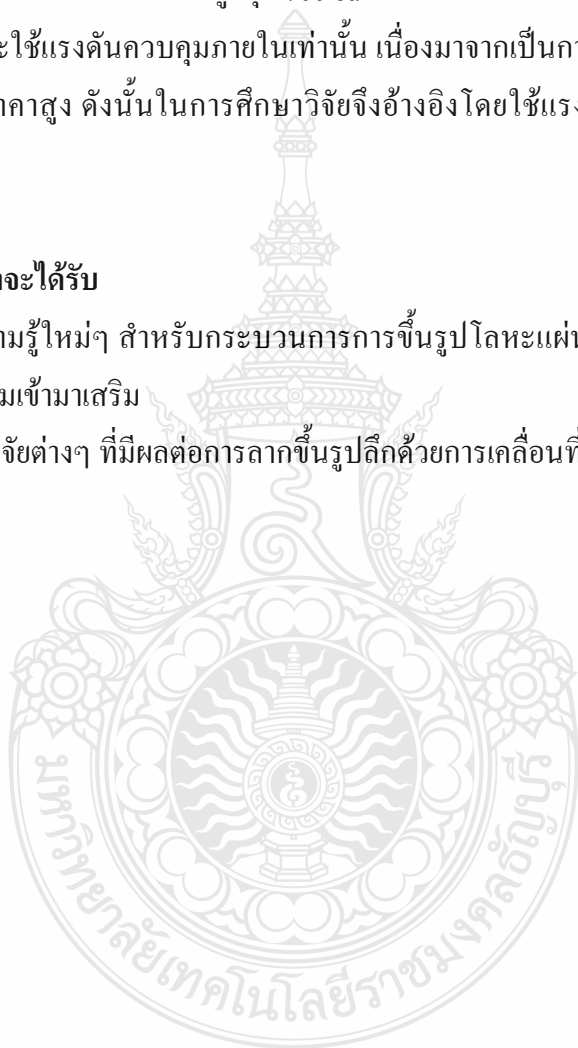
1.6.2 ความดันภายในของของเหลวที่ใช้ในการทดลองสูงสุดทำได้ที่ 300 bar เนื่องจากชุดต้นกำลังของระบบไฮดรอลิก ปกติแล้วทำได้สูงสุด 700 bar เพื่อความปลอดภัยในการทดสอบ

1.6.3 การศึกษาจะใช้แรงดันควบคุมภายในเท่านั้น เนื่องจากเป็นการศึกษาเริ่มต้นประกอบกับอุปกรณ์ที่ทันสมัยมีราคาสูง ดังนั้นในการศึกษาวิจัยจึงอ้างอิงโดยใช้แรงดันควบคุมในการทดลองเท่านั้น

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 เกิดองค์ความรู้ใหม่ๆ สำหรับกระบวนการการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยการนำเอาเทคโนโลยีอื่นๆ ทางด้านวิศวกรรมเข้ามาเสริม

1.7.2 ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว



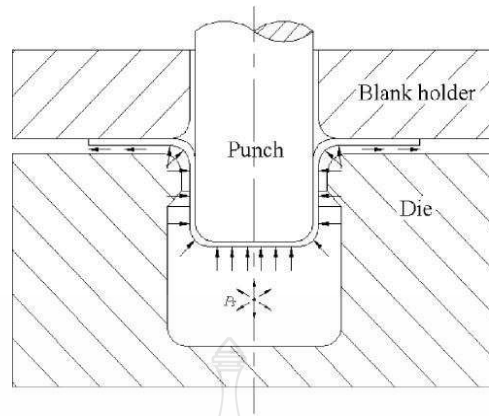
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวความคิด

จากการค้นคว้าและทบทวนวรรณกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิจัยในเรื่องการลากขึ้นรูปลึงโลหะแผ่นด้วยของเหลวและการเคลื่อนที่ของของเหลว เป็นการนำเอาของเหลวต่างๆ เข้ามาช่วยในการขึ้นรูปโลหะแผ่น เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะชนิดต่างๆ โดยเฉพาะโลหะที่มีความสามารถในการขึ้นรูปต่ำ และในปัจจุบันกระบวนการลากขึ้นรูปลึงเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นที่มีความสำคัญ โดยได้ถูกนำมาใช้อย่างมากมายในอุตสาหกรรมต่างๆ ในปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยมากมายที่จะศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถในการลากขึ้นรูปลึงโลหะแผ่นและความพยายามในการเพิ่มขีดความสามารถในการขึ้นรูป ของโลหะแผ่นด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปลึง ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นการนำเอาของเหลวเข้ามาช่วยในกระบวนการลากขึ้นรูปลึง โดยการใช้ของเหลวเข้าไปแทนที่อากาศภายในห้องแม่พิมพ์ ซึ่งของเหลวจะมีความสามารถในการกระจายตัวของแรงได้ดีกว่าอากาศ ในขณะที่เดียวกันยังทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นในขณะที่ของเหลวมีการเคลื่อนที่ (Hydrodynamic) กระบวนการดังกล่าวเป็นการลดแรงเสียดทานระหว่างผิวด้านล่างของแผ่นโลหะกับผิวด้านบนของแม่พิมพ์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการไหลตัวของโลหะในขณะที่ทำการขึ้นรูป ในการศึกษาทดลองใช้ของเหลวชนิดน้ำมันแร่หรือน้ำมันไฮดรอลิกที่มีความหนืดแตกต่างกัน โดยความหนืดเป็นสมบัติที่สำคัญของน้ำมันไฮดรอลิก ที่ใช้ในการแบ่งชั้นคุณภาพของน้ำมันไฮดรอลิก และใช้เหล็กคาร์บอนชั้นคุณภาพ SPCC เป็นวัสดุทดสอบ ซึ่งเป็นเหล็กในกลุ่มมาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น

สำหรับงานขึ้นรูปทั่วไป และเป็นเหล็กชั้นคุณภาพต่ำที่สุดในกลุ่มมาตรฐานเดียวกัน ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึง มีตัวแปรที่สำคัญอย่างยิ่งอีกหนึ่งตัวแปร คือ แรงกดแผ่นขึ้นงาน โดยแรงกดแผ่นขึ้นงานตามทฤษฎีแล้ว มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของแรงในการการลากขึ้นรูป และรอยร่นที่ปากถ้วยของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ในการพิจารณาถึงความสามารถในการลากขึ้นรูปลึงของเหล็กชั้นคุณภาพ SPCC เปรียบเทียบกันระหว่างการลากขึ้นรูปลึงโดยไม่ใช้ของเหลว กับการลากขึ้นรูปในสภาวะของการใช้ของเหลว จะพิจารณาถึงตัวแปรที่มีความสำคัญ คือ แรงในการการขึ้นรูปที่เกิดขึ้นในระหว่างการลากขึ้นรูป ซึ่งแรงในการลากขึ้นรูปมีผลสำคัญต่อ การเกิดรอยฉีกขาดที่ผิวของชิ้นงาน และความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของชิ้นงาน ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปมีลักษณะของปัญหาที่สำคัญ นอกจากรอยฉีกขาดที่ผิวชิ้นงานแล้ว ยังมีรอยร่นที่ปากถ้วยและความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน

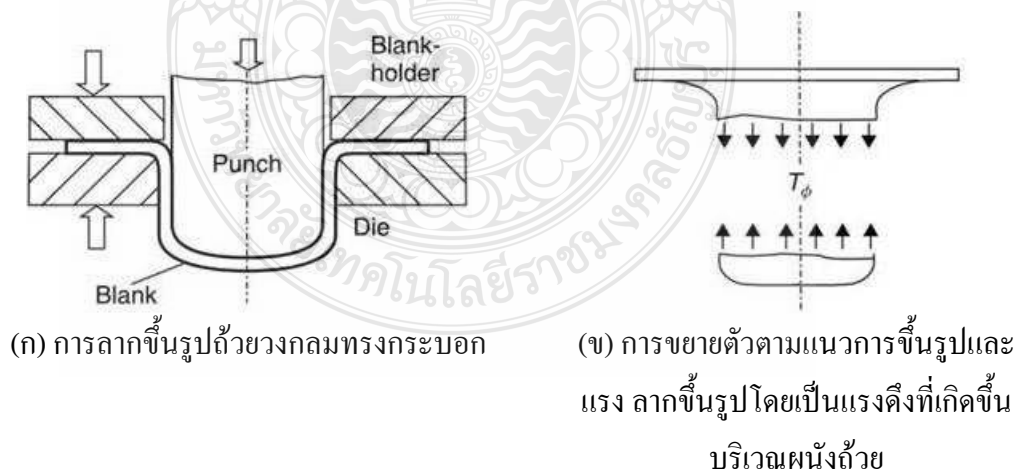


ภาพที่ 2.1 การลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) [16]

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing)

กระบวนการลากขึ้นรูปลึกเป็นการขึ้นรูปวัสดุแผ่นเรียบให้มีรูปร่างต่างๆ โดยการใช้แรงกดจากแม่พิมพ์พUNCH กดลงไปยังแผ่นชิ้นงานผ่านแม่พิมพ์ตาย (Die) โดยที่ความหนาของชิ้นงานยังเท่ากับวัสดุตั้งต้น กระบวนการลากขึ้นรูปลึกมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ดาย พUNCH และ ตัวกดแผ่นชิ้นงาน (Blank Holder Ring) สำหรับกดแผ่นชิ้นงานให้แนบกับแม่พิมพ์ตาย ในขณะที่ทำการขึ้นรูป (Blank Holder Force) [17-18]



ภาพที่ 2.2 การลากขึ้นรูปลึก [17]

1) หน้าสัมผัสในการลากขึ้นรูป

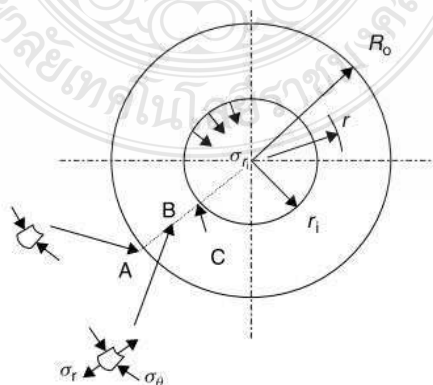
หน้าสัมผัสระหว่างวัสดุแผ่นกับพื้นผิวในขณะทำการลากขึ้นรูป พิจารณาได้ตามภาพที่ 2.2 เมื่อพิจารณาถึงส่วนย่อยตามภาพที่ 2.3 ความเค้นที่เกิดขึ้นกับส่วนย่อยที่รัศมี r ดังที่แสดงในภาพที่ 2.4 สมการอนุพันธ์สำหรับส่วนย่อยนั้นเมื่อไม่คำนึงถึงความเสียดทาน คือ [17]

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

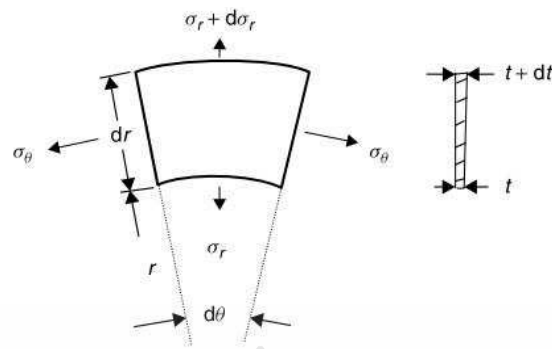
เมื่อยุบรวมสมการแล้วจะได้

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

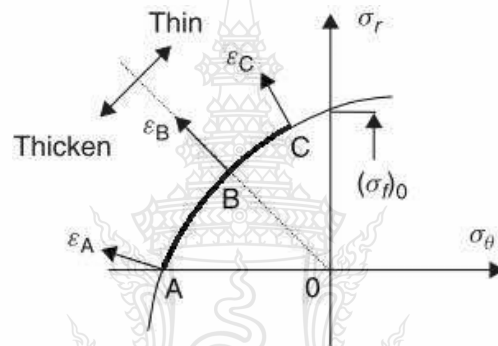
ที่บริเวณขอบของวงกลมจุด A เป็นพื้นผิวอิสระ $\sigma_r = 0$ ดังนั้น ความเค้นอัดในแนวแกนที่เกิดขึ้น $\sigma_\theta = \sigma_r$ เมื่อ σ_r คือ ความเค้นไหลที่เกิดขึ้นจริง ที่เส้นรัศมีกลาง ที่จุด B รัศมีความเค้นจะอยู่ตรงข้ามกันและมีขนาดเท่ากัน นั่นก็คือ ความเค้นตามแนวเส้นรอบวง (Hoop Stress) อยู่บริเวณขอบด้านใน จุด C รัศมีความเค้นมีค่าสูงสุด ลักษณะของการเกิดความเค้น และความสอดคล้องกันปริมาณความเครียด ปรากฏเป็นตำแหน่งของการเกิดความเค้นจุดครากฟอนมิสเซส (Von Mises) ในภาพที่ 2.5 บริเวณขอบด้านนอก A วัสดุแผ่นจะมีความหนาเพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ในขณะที่จุด B ความหนาจะไม่มีเปลี่ยนแปลงไป บริเวณด้านในขอบ C จะเกิดเป็นแผ่นบางทั้งหมดนี้เป็นภาพรวมของการลากขึ้นรูป พื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมดของวัสดุในช่วงต้นจะไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นการกำหนดขนาดของวัสดุแผ่นก่อนการขึ้นรูปเป็นเพียงการประมาณการเท่านั้น



ภาพที่ 2.3 วงกลมหน้าสัมผัสของการลากขึ้นรูปด้วย [17]



ภาพที่ 2.4 ส่วนย่อยในวงกลมหน้าสัมผัสจากภาพที่ 2.3 [17]



ภาพที่ 2.5 ลักษณะความเค้นและปริมาณความเครียดของจุดต่างๆ บนผิวสัมผัส [17]

ความเค้นซึ่งก่อตัวเพิ่มขึ้นขึ้นของผิวสัมผัสในกระบวนการการลากขึ้นรูป 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_o และ $\sigma_r = \sigma_{ri}$ ส่วนรัศมีวงใน r_i เป็นการกำหนดขึ้น

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

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

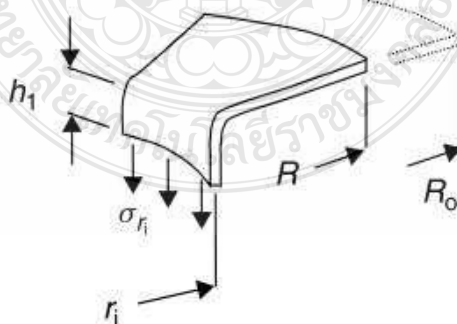
สำหรับวัสดุที่ไม่เกิดความเครียดแข็งตัว รัศมีความเค้นซึ่งให้ไว้โดยสมการที่ 2.4 เป็นตัวหารร่วมที่จุดเริ่มต้น และจะลดลงเมื่อเข้าใกล้รัศมีวงนอก ความเค้นที่ผนังของถ้วยวัสดุเกิดขึ้นได้อย่างถาวร เมื่อ $(\sigma_f)_0$ คือ ความเค้นตามสถานะที่คาดเดาได้นั้น เอา $\sigma_{ri} = (\sigma_f)_0$ เข้าไปแทนที่ในสมการที่ 2.4 ทำให้ทราบถึงความกว้างของแผ่นวัสดุที่จะสามารถนำมาลากขึ้นรูปได้ นั่นก็คือค่าของ “อัตราส่วนขีดจำกัดของการลากขึ้นรูป” (Limiting Drawing Ratio)

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

2) ผลกระทบของความเครียดแข็งตัว

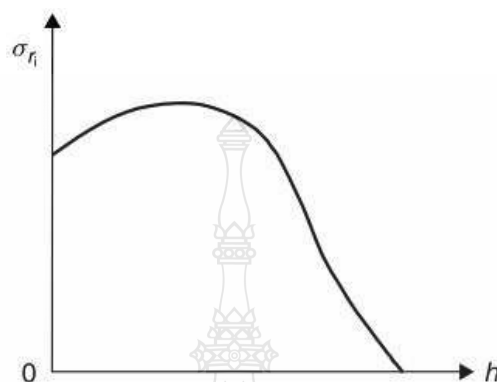
ค่าความเครียดแข็งตัว ความเค้นที่กระทำต่อพื้นผิวสัมผัส อาจเพิ่มสูงขึ้นในระหว่างการลากขึ้นรูป ในขณะที่ถึงแม้ว่ารัศมีวงนอกจะลดลง เมื่อพื้นผิวจะถูกลากขึ้นรูปเข้าไปยังด้านใน รัศมีวงนอก R จะลดลงอย่างรวดเร็วดังแสดงในภาพที่ 2.6 ค่าความเครียดแข็งตัวจากความเค้นไหลจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้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

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



ภาพที่ 2.6 ส่วนของผิวสัมผัสในระหว่างกระบวนการลากขึ้นรูปในสถานะที่ปราศจากแรงเสียดทาน ความเค้นภายในผนังมีขนาดที่เท่ากันทุกจุด คือ รัศมีความเค้นที่รัศมีวงใน σ_{ri} [17]

ดังนั้นการกำหนดค่าตัวแปรทั้งสองที่ตรงข้ามกัน คือ การเพิ่มขึ้นของความเค้นจนกระทั่งวัสดุเกิดการแข็งตัว และการลดลงของความเค้นที่รัศมี R อย่างช้าๆ โดยปกติแล้วความเค้นในขณะการลากขึ้นรูปจะเพิ่มสูงขึ้นในช่วงต้น ต้นกระทั้งมีค่าสูงสุดและจะลดลงดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 เส้นกราฟของความเค้นในการลากขึ้นรูปเมื่อเปรียบเทียบกับเคลื่อนที่ของพื้นที่สำหรับวัสดุที่เกิดความเครียดแข็งตัว [17]

แรงที่ทำให้เกิดรอยแตก [18] ในการเลือกอัตราส่วนการขึ้นรูปที่มีค่ามากที่สุด คือ $\beta = d_0/d_1$ ค่านี้จะเป็นค่าที่ใช้แรงสูงสุด ในการลากขึ้นรูปภายใต้เงื่อนไขที่ไม่เปลี่ยนแปลง ค่าแรงสูงสุดนี้จะถูกส่งผ่านไปที่ผนังของชิ้นงานที่ถูกขึ้นรูป ดังนั้นอัตราส่วนการขึ้นรูปจะต้องไม่มากกว่าค่าสูงสุด ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด β_{max} เป็นค่าเพื่อป้องกันการเกิดรอยแตกที่กั้นชิ้นงาน ชิ้นงานในสมการ 2.7 จะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ทำให้เกิดรอยแตก (Maximum Cracking Strength) σ_{cr} กับค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) S_u ของวัสดุที่แสดงไว้แล้ว

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

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

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

ตารางที่ 2.1 ค่าตัวคูณประกอบของการแตก a_{cr} ของวัสดุต่างๆ [18]

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

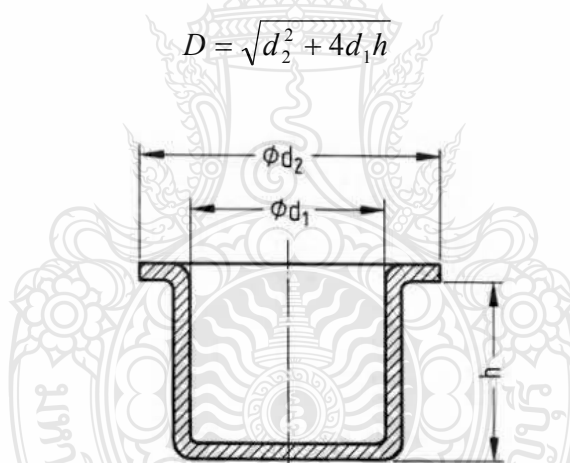
3) การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการลากขึ้นรูปลึก

สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ ในกระบวนการการลากขึ้นรูปลึกด้วยทรงกระบอกสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้ [19]

1. ขนาดแผ่นขึ้นงานเริ่มต้นสำหรับการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอก [18]

$$D = \sqrt{d_2^2 + 4d_1h}$$

2.9



ภาพที่ 2.8 รูปด้วยทรงกระบอกแบบมีปีก [20]

2. ขนาดของมุมคายแม่พิมพ์ [19-20]

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

3. ระยะช่องว่างแม่พิมพ์พื้นที่กับคาย [19]

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

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

ตารางที่ 2.2 ค่าประกอบของวัสดุ (Material Factor) [19-20]

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

4. แรงกดแผ่นขึ้นงาน

เป็นแรงที่ใช้กดแผ่นขึ้นงาน โดยการใช้แผ่นกดขึ้นงาน กดที่แผ่นขึ้นงานโดยตรง [18]

- แรงดันของแผ่นกดแผ่นขึ้นงาน (Blank Holder Pressure)

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

- พื้นที่ผิวสัมผัสของแผ่นกดขึ้นงาน (Blank holder area)

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

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

- แรงกดแผ่นขึ้นงาน (Blank holder force)

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

5. แรงในการลากขึ้นรูป

แรงที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการการลากขึ้นรูปลึก ซึ่งแม่พิมพ์ซึ่งเป็นตัวกดหรือพื้นที่กระทำต่อแผ่นขึ้นงาน ในภาพที่ 2 แรงกดพื้นที่ในการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอก ของกระบวนการ

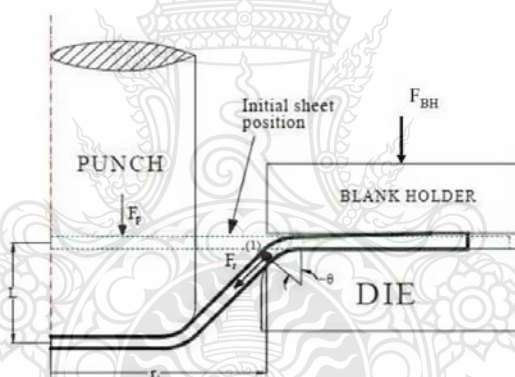
ลากขึ้นรูปลึก การคำนวณแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป ตามทฤษฎีการลากขึ้นรูปลึก คำนวณได้ตามสมการที่ 2.16 [20]

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

เมื่อ n คือ ค่าการปรับค่า (Correction Value) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของการขึ้นรูปจริงตามตารางที่ 2.3 ค่าการปรับค่า $n = f(\beta_{actual})$

ตารางที่ 2.3 ค่าการปรับค่า $n = f(\beta_{actual})$ [20]

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

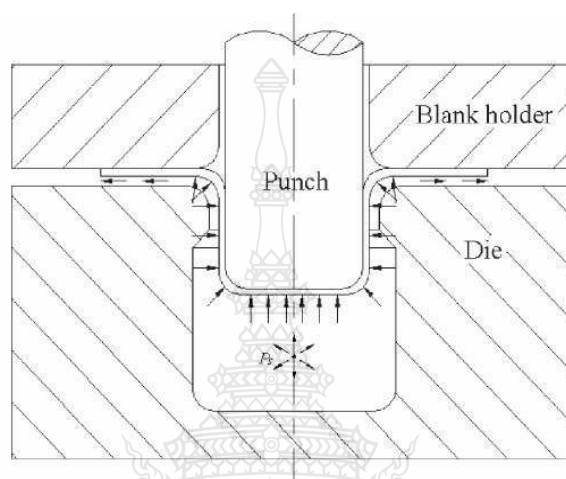


ภาพที่ 2.9 แรงกดพื้นที่ในการขึ้นรูปถ้วย [21]

2.2.2 การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยของเหลว (Sheet Hydroforming)

การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยของเหลว หรือ Sheet Hydroforming มีลักษณะการขึ้นรูปโลหะแผ่นคล้ายกับการขึ้นรูปโลหะแผ่นทั่วไป โดยมีชุดแม่พิมพ์ตาย และชุดแม่พิมพ์พื้นที่ทำการกดโลหะแผ่นให้เป็นชิ้นงาน ให้มีรูปร่างตามที่กำหนดเพียงแต่ภายในแม่พิมพ์นั้นจะบรรจุไปด้วยน้ำมันหรือของเหลวอื่นๆ ซึ่งเป็นน้ำมันหรือของเหลวความดันสูง (High Pressure) ที่จะสามารถกดแผ่นโลหะให้ติดกับพื้นที่ในขณะที่ทำการขึ้นรูป ซึ่งเป็นการลดความผิดที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการขึ้นรูปด้วยเช่นกัน ของเหลวที่อยู่ภายในชุดแม่พิมพ์จะไหลอยู่ระหว่างผิวด้านล่างของชุดแม่พิมพ์กับแผ่นโลหะ

ซึ่งจะทำหน้าที่ในการต้านทานแรงกดของพื้นที่ในขณะทำการขึ้นรูป และสารหล่อลื่นทำหน้าที่ในการลดแรงเสียดทานในขณะปฏิบัติงาน ค่าของขีดจำกัดของอัตราการลากขึ้นรูป (Limit Drawing Ratio; LDR) ของแผ่นโลหะนั้นจะเพิ่มขึ้น และเป็นการเพิ่มคุณภาพให้กับชิ้นงาน ตามภาพที่ 2.10 แสดงถึงกระบวนการ Sheet Hydroforming ในกรรมวิธีของ Hydrodynamic Deep Drawing (HDD)

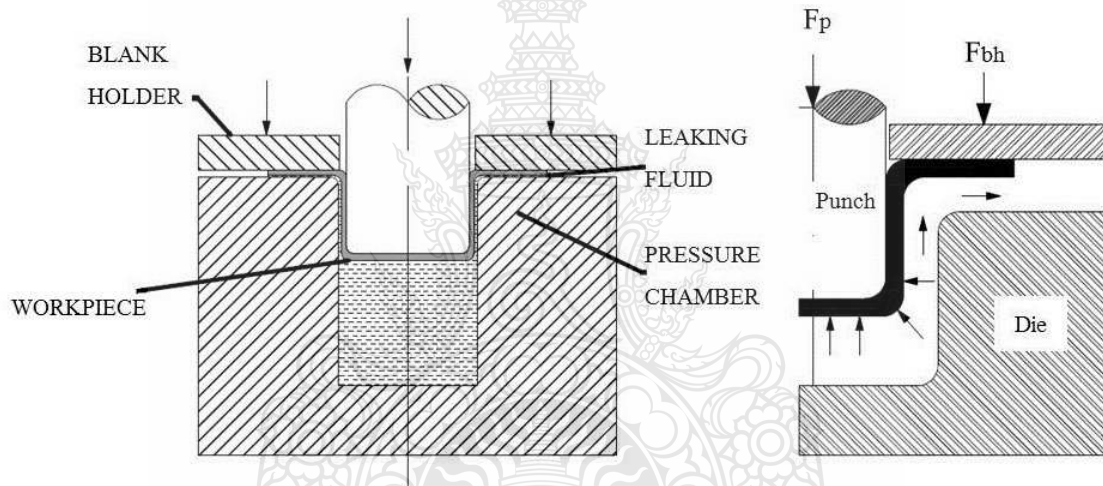


ภาพที่ 2.10 Hydrodynamic Deep Drawing [16]

ของเหลวสามารถนำมาใช้กับ Punch Die หรือนำเข้ามาช่วยในการพัฒนาความสามารถในการขึ้นรูปของแผ่นโลหะ ในการนำเอาของเหลวเข้ามาช่วยลดความเสียดทานในกระบวนการ Sheet Hydroforming สามารถแยกออกได้เป็นสองกลุ่ม คือ กระบวนการที่แม่พิมพ์เป็นตัวเคลื่อนที่ในการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Active Sheet Hydroforming) กับ กระบวนการที่แม่พิมพ์อยู่กับที่แต่ของเหลวทำหน้าที่ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นให้มีรูปร่างตามแม่พิมพ์ (Passive Sheet Hydroforming) วัสดุต่างๆ สามารถนำกระบวนการนี้เข้ามาใช้ได้อย่างมากมาย เช่น เหล็กคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel), เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High Strength Steel) อะลูมิเนียมอัลลอย (Aluminum Alloy) 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 [16]

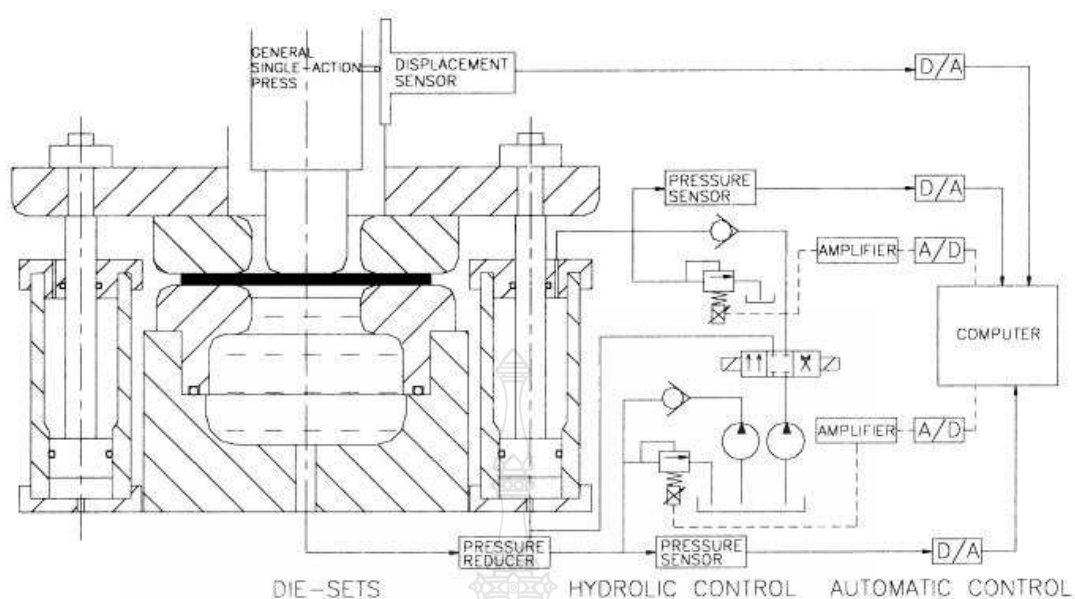
2.2.3 การลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลวหรือพลศาสตร์ของไหล

กระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลวนั้น ของเหลวจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยแรงดันและความเร็วตามที่กำหนด และไหลออกจากแม่พิมพ์ด้วยแรงดันและความเร็วสูง การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของแรงดันของเหลวในการไหลออกจากแม่พิมพ์นั้น เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ลงของพื้ในจังหวะของการลากขึ้นรูป สำหรับการควบคุมแรงดันของเหลวภายในระบบ สำหรับการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลวไม่ได้มีความสำคัญมากนัก รวมไปถึงการใช้แผ่นยางก็ไม่ได้มีความจำเป็น ซึ่งเป็นจุดที่แตกต่างไปจากกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยเครื่องจักรกลของเหลว (Hydromechanical Deep Drawing) และ การลากขึ้นรูปลึกของของเหลว (Hydroforming Deep Drawing) [22]



ภาพที่ 2.11 กระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว [22]

ระบบการทำงานและส่วนประกอบ ของกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว แสดงในภาพที่ 2.12 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) [4]



ภาพที่ 2.12 ส่วนต่างของของระบบ Hydrodynamic Deep Drawing [4]

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 [23]

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

เมื่อ f_D คือ แรงกดพื้นที่ที่กระทำโดยตรงต่อวัสดุแผ่น

f_P คือ แรงกดพื้นที่โดยรวม

d_p คือ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของพื้นที่

P_S คือ แรงดันของเหลว

2.2.5 กลศาสตร์ของไหลเบื้องต้น (Fluid Mechanics)

ของไหล คือ สสารที่เปลี่ยนรูปร่างไปเรื่อยๆ เมื่อถูกระทำด้วยแรงเฉือน (Shear Force) แรงเฉือนคือแรงที่กระทำในทิศทางที่สัมผัสกับผิวของของไหล และเมื่อแรงถูกหารด้วยพื้นที่ที่มันสัมผัส ก็จะเป็นหน่วยแรงเฉือน (Shear Stress) สมบัติของของไหลเป็นลักษณะเฉพาะของของไหลขึ้นกับพารามิเตอร์ต่างๆ สมบัติพื้นฐานของของไหล คือ ความควบแน่น น้ำหนักจำเพาะ ความหนืดพลวัต ความหนืดจลศาสตร์ โดยทั่วไปแล้วการศึกษาทางด้านกลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics) แบ่งออกเป็นสองแขนงคือ สถิตยศาสตร์ของไหล (Fluid Static) และพลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamic) [24]

1) กฎพื้นฐานทางฟิสิกส์ สมการควบคุมที่จะสร้างขึ้นเพื่อศึกษากลศาสตร์ของไหลเชิงทฤษฎีนี้ สร้างขึ้นบนพื้นฐานของกฎต่างๆ ทางฟิสิกส์ที่ได้รับการยอมรับกันโดยทั่วไปแล้ว กฎเหล่านี้ถือเป็นกฎธรรมชาติ (Natural Laws) ที่ต้องบัญญัติขึ้นมาเท่านั้น กล่าวคือไม่สามารถพิสูจน์ขึ้นมาได้ในเชิงคณิตศาสตร์ (แต่สามารถพิสูจน์ได้โดยการทดลองภายใต้เงื่อนไขที่เข้าใจกัน) กฎต่างๆ ที่สำคัญที่จะใช้เป็นฐานในการศึกษากลศาสตร์ของไหลมีดังนี้ คือ [24-25]

ก. กฎอนุรักษ์มวลของสาร (Conservation of Mass) “ในกรณีที่ไม่มีการทำปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยานิวเคลียร์หรือมีผลของทฤษฎีสัมพัทธ์ มวลของสารก่อนหนึ่งย่อมคงที่” หรือกล่าวในเทอมปริมาตรควบคุมของกลศาสตร์ของไหล กล่าวได้ว่า “อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในปริมาตรควบคุม ย่อมเท่ากับอัตราสุทธิของมวลที่ไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุม” อัตราสุทธิของการไหลเข้า หมายถึง อัตราการไหลเข้า ลบด้วย อัตราการไหลออก หากอัตราสุทธิของการไหลเข้ามีค่าเป็นลบ หมายความว่า ของไหลมีการไหลออกมากกว่าการไหลเข้านั่นเอง

ข. 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

ค. กฎอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงเส้น (Conservation of Momentum) “โมเมนตัมของมวลก่อนหนึ่งย่อมคงที่อยู่เช่นนั้น (โมเมนตัมของก้อนมวลคือมวลคูณด้วยความเร็ว; $M\vec{V}$) จนกว่าจะมีแรงจากภายนอกมากระทำ ซึ่งในกรณีนี้อัตราการเปลี่ยนของโมเมนตัมเท่ากับแรงที่มากระทำนั้น” ซึ่ง

หมายถึงกฎข้อที่สองของนิวตันนั่นเอง ($F = Ma$) หรือกล่าวในเทอมปริมาตรควบคุมของกลศาสตร์ของไหล กล่าวได้ว่า “อัตราการเปลี่ยนโมเมนตัมในปริมาตรควบคุม ย่อมเท่ากับแรงที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม บวกกับอัตราสุทธิของโมเมนตัมที่ไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุม ในครึ่งแรงของบัญญัตินี้ก็คือกฎข้อที่สองของนิวตันในระบบติดตามมวล เพราะโมเมนตัมของมวลในปริมาตรควบคุมย่อมเปลี่ยนด้วยแรงที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมในขณะเวลานั้น แต่ในระบบอาจมีการไหลเข้าออกของโมเมนตัม ผ่านพื้นที่ผิวด้วย เรียกว่าโมเมนตัมฟลักซ์ ซึ่งโมเมนตัมฟลักซ์นี้ไหลเข้าออกปริมาตรควบคุม พร้อมกับการไหลเข้าออกของมวลนั่นเอง ดังนั้นโมเมนตัมของมวลในปริมาตรควบคุม จึงอาจเปลี่ยนไปได้เพราะปริมาณสุทธิของโมเมนตัมฟลักซ์ ที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุมอีกโสดหนึ่งด้วย

ความจริงกฎข้อนี้จะเป็นความจริงในกรณีของคุณสมบัติอื่นๆ ด้วยเสมอ กล่าวคือ สามารถกล่าวเป็นกลางๆ สำหรับปริมาณคุณสมบัติ g . ได้ว่า อัตราการเปลี่ยนของ g . ในปริมาตรควบคุม จะเกิดขึ้นเนื่องจากมีเหตุบางอย่างกระทำต่อปริมาตรควบคุม (ตามกฎทางฟิสิกส์ในระบบติดตาม) ผนวกกับอัตราไหลเข้าสู่สุทธิของ g . 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

ง. กฎอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม (Conservation of Angular Momentum) “อัตราการเปลี่ยนของโมเมนตัมเชิงมุมของมวลก้อนหนึ่งย่อมเท่ากับแรงบิด (Torque) ที่มากระทำต่อก้อนมวลนั้น” หรือกล่าวในเทอมปริมาตรควบคุมของกลศาสตร์ของไหล กล่าวได้ว่า “อัตราการเปลี่ยนของโมเมนตัมเชิงมุมในปริมาตรควบคุม ย่อมเท่ากับแรงบิดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม บวกกับอัตราสุทธิของโมเมนตัมเชิงมุมที่ไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุม”

สมการควบคุมการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม

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

เมื่อ \vec{T} คือ แรงบิด

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

จ. กฎอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy) “อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานของก้อนมวล ย่อมเท่ากับอัตราการถ่ายโอนความร้อนและกำลังงานจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ก้อนมวล” หรือกล่าวในเทอมปริมาตรควบคุมของกลศาสตร์ของไหล กล่าวได้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในปริมาตรควบคุม ย่อมเท่ากับอัตราการถ่ายโอนความร้อนและงานจากสิ่งแวดล้อมเข้าปริมาตรควบคุม ของพลังงาน”

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

2) สถิตยศาสตร์ของไหล (Fluid Static)

กฎสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์กลศาสตร์เชิงสถิตยศาสตร์ ก็คือ กฎข้อที่หนึ่งของนิวตันที่บัญญัติโดยนัยว่า “วัตถุที่ปราศจากการกระทำของแรงลัพธ์สุทธิจากภายนอกย่อมคงสภาพนี้อยู่กับที่ดั้งเดิม หรือหากเดิมเคลื่อนที่อยู่ก็จะเคลื่อนที่ต่อไปด้วยความเร็วเดิมในทิศทางเดิม” [25]

ก. ค่าความดันที่จุดใดๆ (Pressure at A Point) ความดัน หรือแรงดัน คือ “แรงต่อหน่วยพื้นที่ในเนื้อของไหลที่กระทำในแนวตั้งฉากกับพื้นที่ที่พิจารณา” ซึ่งต่างจากแรงเฉือน (Shear Force) ที่นิยามว่าเป็น “แรงต่อหน่วยพื้นที่ที่กระทำในแนวขนานกับพื้นที่ที่พิจารณา” ตามกฎของนิวตัน

“แรง” ไม่อาจเกิดขึ้นได้ลอยๆ ด้วยตัวของมันเอง ดังนั้นที่ผิวของอุปกรณ์ที่สัมผัสของไหลอยู่ก็เช่นเดียวกัน เช่น ผิวเครื่องบิน รถยนต์ เรือ หรือแม้แต่ผิวหนังของเรา แรงดันก็คือแรงต่อหน่วยพื้นที่ และแรงจะเกิดขึ้นลอยๆ ไม่ได้ แต่การเกิดแรงต้องขึ้นอยู่กับกฎข้อที่สองของนิวตัน ซึ่งตามกฎดังกล่าวแรงต้องเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมเท่านั้นดังสมการ

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

หรือในทางกลับกัน โมเมนตัมเปลี่ยนแปลงได้เพราะมีแรงกระทำเท่านั้น

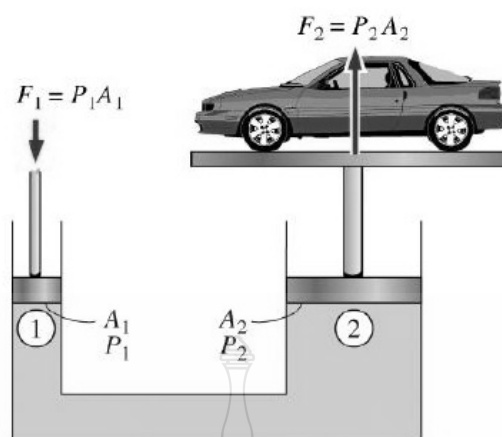
ข. แรงดันในของไหล แรงดันของของเหลวที่กระทำ ณ ส่วนใดๆ จะมีค่าเท่ากันทุกจุด โดยที่ยังไม่คิดน้ำหนักของของไหล ในความเป็นจริงจะเห็นว่า ความดันอากาศที่ระดับน้ำทะเลจะมีค่ามากกว่าบนภูเขา และความดันของน้ำใต้ท้องทะเลลึกจะสูงกว่าที่ระดับน้ำทะเล ความดันของน้ำทะเลเพิ่มขึ้นตามความลึก ยิ่งลึกมากความดันก็จะยิ่งมาก เป็นเพราะว่าของไหลมีน้ำหนักนั่นเอง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

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

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

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

ค. กฎของปาสคาล “เมื่อเพิ่มความดัน ณ ตำแหน่งใดๆ ในของเหลวที่อยู่นิ่งในภาชนะปิด ความดันที่เพิ่มขึ้นจะถูกส่งผ่านไปยังทุกๆ จุดในของเหลวนั้น” กฎของปาสคาลใช้ในการอธิบายหลักการทำงานของเครื่องอัดไฮดรอลิก



ภาพที่ 2.13 หลักการทำงานของเครื่องอัดไฮดรอลิก โดยการใช้กฎของปาสคาล

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

หรือ

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

ดังนั้น

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

3) พลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics)

การศึกษากฎพื้นฐานเกี่ยวกับการไหลของของไหลสามารถศึกษาการไหล โดยสมมุติฐานของไหลเป็นของไหลในอุดมคติ (Ideal Fluid) ของไหลในอุดมคติ หมายถึง ของไหลที่ถูกสันนิษฐานว่าเป็นของไหลที่ไม่มีความหนืด ดังนั้นการไหลของของไหล แบบนี้ จึงไม่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานระหว่างชั้นของของไหลหรือระหว่างของไหลกับผิวสัมผัส การไหลของของไหลในอุดมคติจะไม่มีเทอมของการไหลวน (Eddy Formation) หรือการสูญเสียพลังงานอันเกิดเนื่องจากแรงเสียดทาน สมมุติฐานนี้ สามารถทำให้พิจารณาการเคลื่อนตัวของของไหลเหมือนกับการเคลื่อนตัวของของแข็งบนแผ่นที่ไม่มีแรงต้านทาน ดังนั้นอาจจะพิจารณาแรงต่างๆ ที่ทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่โดยความเร่งเป็นไปตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน [25]

2.2.6 การควบคุมระบบไฮดรอลิก (Hydraulic System Control)

ระบบไฮดรอลิก หมายถึง การไหลของของเหลวทุกชนิดที่ใช้ในระบบเพื่อเป็นตัวกลางการถ่ายเทกำลังงานของไหลให้เป็นกำลังงานกล ในระบบไฮดรอลิกทั่วไปจะต้องมีอุปกรณ์พื้นฐานในการทำงานดังต่อไปนี้ [26]

- 1) อุปกรณ์ต้นกำลังไฮดรอลิก ทำหน้าที่เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนปั๊มน้ำมันไฮดรอลิกเพื่อส่งจ่ายให้แก่ระบบไฮดรอลิก ประกอบไปด้วยเครื่องยนต์หรือมอเตอร์ไฟฟ้า
- 2) อุปกรณ์เก็บและปรับปรุงคุณภาพน้ำมันไฮดรอลิก ทำหน้าที่เป็นที่พักของน้ำมัน ขจัดสิ่งสกปรก ขจัดฟองอากาศ และระบายความร้อนของน้ำมันไฮดรอลิก ประกอบไปด้วยถังพักน้ำมันไฮดรอลิก ไล์กรองน้ำมันไฮดรอลิก และอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ ที่ใช้กับถังพักน้ำมัน
- 3) อุปกรณ์สร้างการไหล ทำหน้าที่สร้างอัตราการไหล ประกอบด้วยปั๊มไฮดรอลิกชนิดต่างๆ
- 4) อุปกรณ์ควบคุมการทำงาน หมายถึงวาล์วควบคุมชนิดต่างๆ ในระบบไฮดรอลิก เช่น วาล์วควบคุมทิศทางการไหลใช้ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ขงก้านสูบ วาล์วควบคุมอัตราการไหลใช้จำกัดปริมาณน้ำมันที่ไหลเข้าสู่ลูกสูบเพื่อควบคุมความเร็วของก้านสูบ วาล์วควบคุมความดันใช้ควบคุมความดันในระบบ
- 5) อุปกรณ์การทำงาน ทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังงานของไหลให้เป็นกำลังงานกล เช่น กระบอกลูกสูบไฮดรอลิกหรือมอเตอร์ไฮดรอลิก
- 6) อุปกรณ์ในระบบท่อทาง ทำหน้าที่เป็นท่อทางการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกในระบบ ประกอบไปด้วย เป๊ป (Pipe) ท่อ (Tube) สายน้ำมันไฮดรอลิก (Hoses) ข้องอ (Bending) และข้อต่อชนิดต่างๆ (Fittings)

2.2.7 น้ำมันแร่หรือน้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic Oil)

น้ำมันไฮดรอลิก ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายเทแรงอัดไปยังส่วนต่างๆ ของระบบหล่อลื่นปั๊มและแบร์ริงตลอดจนทำหน้าที่เป็นซีล และช่วยระบายความร้อน น้ำมันไฮดรอลิกที่ดีจะต้องมีสารป้องกันการเกิดฟอง ป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชันป้องกันสนิมและการกัดกร่อน นอกจากนี้ยังต้องสามารถแยกตัวจากน้ำได้ดี ในระบบไฮดรอลิกขนาดใหญ่แบบเก่าอาจใช้น้ำเป็นตัวกลางในการทอดกำลัง แต่น้ำไม่สามารถทำหน้าที่หล่อลื่นได้ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดสนิม น้ำมันไฮดรอลิกในปัจจุบันประกอบด้วย น้ำมันแร่พวกที่มีค่าดัชนีความหนืดสูง (HVI) ผสมด้วยสารเพิ่มคุณภาพเพื่อป้องกันการสึกหรอ ป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชันป้องกันสนิม และการกัดกร่อนป้องกันการเกิดฟองและไม่รวมตัวกับน้ำถ้าหากอุปกรณ์ไฮดรอลิก ติดตั้งในบริเวณใกล้กับเปลวไฟ หรือหาก

เกิดไฟไหม้แล้วจะทำให้เกิดความเสียหายมาก เช่น ในเครื่องบิน หรือในอุตสาหกรรมบางประเภท น้ำมันไฮดรอลิกที่ใช้น้ำมันเป็นของเหลวชนิดไม่ติดไฟ ซึ่งอาจเป็นสารละลายน้ำพวกไกลคอล (Glycol) หรือเป็นพวกสารสังเคราะห์ เช่น คลอรีเนตเต็ดฟลูโอไฮโดรคาร์บอน หรือพวกฟอสเฟตเอสเทอร์ เป็นต้น [26]

1)หน้าที่หลักของน้ำมันไฮดรอลิกมี 4 ประการ คือ [26]

ก. การส่งผ่านกำลัง (Power Transmission) น้ำมันไฮดรอลิกมีหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายทอดกำลังงานจากจุดหนึ่งไปสู่อีกจุดหนึ่งในระบบ เพื่อเปลี่ยนแปลงกำลังงานของไหลให้เป็นการส่งผ่านกล ซึ่งถ้าจะให้เป็นการไปอย่างมีประสิทธิภาพแล้ว น้ำมันไฮดรอลิกที่ไหลในท่อทางหรือไหลผ่านวาล์วควบคุมต่างๆ จะต้องไหลไปได้อย่างราบรื่น แต่ถ้าเกิดความต้านทานการไหลมากๆ ก็จะทำให้กำลังงานสูญเสียไป และน้ำมันไฮดรอลิกจะต้องไม่ยุบตัวตามความดันในขณะที่ทำงาน เช่น เมื่อปั๊มทำงานดูดอัดเพื่อส่งน้ำมันไปยังท่อทาง วาล์วเลื่อนทำงาน และในขณะที่กระบอกสูบหรือมอเตอร์ไฮดรอลิกกำลังทำงานขับโหลด

ข. การหล่อลื่น (Lubrication) น้ำมันไฮดรอลิกจะทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นและลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ เช่น ชิ้นส่วนของปั๊ม มอเตอร์ไฮดรอลิก ลูกสูบ กระบอกสูบ แกนวาล์ว และส่วนประกอบต่างๆ ที่มีการเคลื่อนที่ โดยที่น้ำมันไฮดรอลิกจะมีสภาพเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ กั้นระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่เสียดสีกันทั้งในขณะที่ระบบทำงาน และหยุดนิ่ง ฟิล์มน้ำมันไฮดรอลิกจะช่วยให้การหล่อลื่นเพื่อลดการเสียดสีของผิวสัมผัส แผ่นฟิล์มของน้ำมันไฮดรอลิกจะต้องมีความหนืดพอเหมาะที่จะแทรกซึมเข้าไปในรูเล็กๆ และรอยต่อของชิ้นส่วนภายในอุปกรณ์ และสามารถรับน้ำหนักของวัตถุที่กดทับหรือรับแรงกดอยู่ได้ ซึ่งสมบัติดังกล่าวเรียกว่า ความแข็งแรงของฟิล์ม (Film strength) นอกจากนี้ น้ำมันไฮดรอลิกยังควรมีสมบัติในการลื่นไหลได้ดีด้วย กล่าวคือ ในขณะที่น้ำมันไฮดรอลิกเป็นฟิล์มยึดติดกับชิ้นส่วนใดก็สามารถจะลื่นไหลไปกับชิ้นส่วนนั้นๆ และช่วยให้เคลื่อนไปได้อย่างคล่องตัวด้วย สมบัติข้อนี้เรียกว่า ความลื่น (Lubricity)

ค. การซีล (Sealing) น้ำมันไฮดรอลิกจะทำหน้าที่เป็นซีลด้วยเพื่อให้มีการรั่วซึมเกิดขึ้นน้อยที่สุด ภายในชิ้นส่วนของอุปกรณ์ในระบบไฮดรอลิกเมื่อมีความดันเกิดขึ้น การซีลนี้จะขึ้นอยู่กับความหนืดของน้ำมันไฮดรอลิกแต่ละชนิด

ง. การระบายความร้อน (Cooling) การไหลเวียนของน้ำมันไฮดรอลิกในระบบขณะการทำงานจะช่วยถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ต่างๆ อันเนื่องมาจากการสูญเสียกำลังงานในระบบ ความร้อนนี้ก็จะถูกพาไปโดยน้ำมันและไหลลงสู่ถังพัก แล้วแผ่กระจายความร้อนผ่านผนังของถังพักได้

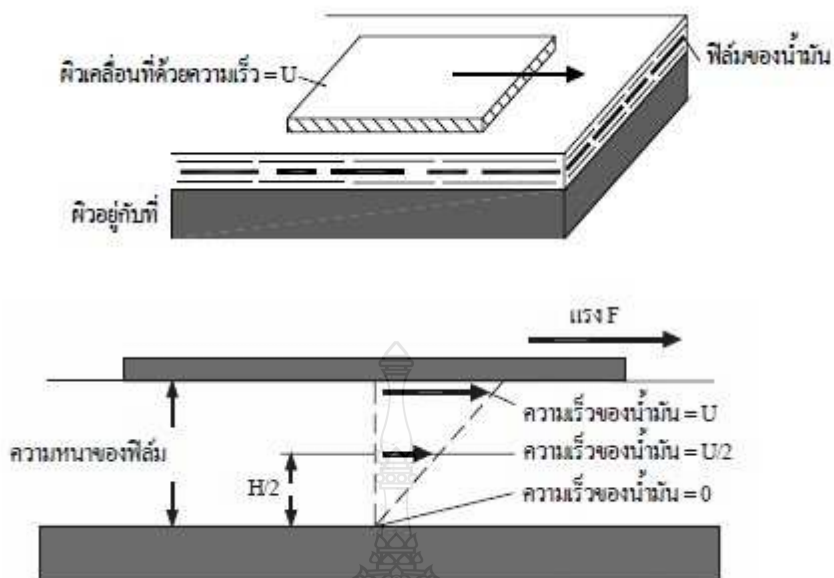
2) สมบัติความหนืด (Viscosity) ของน้ำมันไฮดรอลิกและของเหลว [27]

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

ตารางที่ 2.4 ระบบ หน่วย และอุณหภูมิที่วัดความหนืดของน้ำมัน [27]

ประเภทหรือระบบ	หน่วยความหนืด	อุณหภูมิที่ใช้วัด
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 ประกอบด้วยแผ่นวัดถูกดึงไปบนฟิล์มของน้ำมันด้วยความเร็วสม่ำเสมอ ฟิล์มของน้ำมันติดอยู่ที่ผิววัตถุที่เคลื่อนที่และที่อยู่กับที่ ซึ่งเมื่อพิจารณาให้น้ำมันประกอบขึ้นด้วยชั้นหลายๆ ชั้น ชั้นน้ำมันที่ติดอยู่กับผิวที่เคลื่อนที่ก็เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วเดียวกับผิวที่เคลื่อนที่ (U) ส่วนชั้นน้ำมันที่ติดอยู่กับผิวที่อยู่กับที่ก็จะมีความเร็วเป็นศูนย์ ชั้นน้ำมันที่อยู่ระหว่างชั้นบนสุด และล่างสุดก็จะถูกดึงไปด้วยน้ำมันที่อยู่ด้านบนถัดไปให้มีความเร็วส่วนหนึ่งของความเร็ว U ซึ่งความเร็วของแต่ละชั้นของน้ำมันดังกล่าวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะจากผิววัตถุที่อยู่กับที่ แรงที่ต้องใช้ในการดึงให้ผิววัตถุอันบนเคลื่อนที่ไปนี้คือ แรงที่ต้องเอาชนะความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นน้ำมันนั่นเอง และเนื่องจากแรงนี้เป็นผลมาจากความหนืด โดยแรงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนืด ดังนั้นความหนืดก็สามารถหาได้จากแรงที่ต้องใช้เพื่อเอาชนะความเสียดทานของน้ำมัน ความหนืดที่หาได้ในที่นี้เรียกว่า ความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute Viscosity) หรือความหนืดเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Viscosity)



ภาพที่ 2.14 หลักการของความหนืด [27]

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

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

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

โดยทั่วไปเครื่องมือที่ใช้วัดค่าความหนืด จะไม่สามารถวัดค่าความหนืดเชิงพลศาสตร์ได้โดยตรง ดังนั้น จึงได้กำหนดค่าความหนืดที่เรียกว่า ความหนืดเชิงจลศาสตร์ (Kinematic Viscosity) โดยให้ความหนืดเชิงจลศาสตร์ เท่ากับความหนืดเชิงพลศาสตร์ หารด้วยความหนาแน่นของน้ำมันหรือของไหลนั้นๆ ดังสมการ

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

เมื่อ ν คือ ความหนืดเชิงจลศาสตร์ (สโตก)

η คือ ความหนืดเชิงพลศาสตร์ (พอยส์)

ρ คือ 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 แต่จะแปรผันตามสภาวะการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะแปรผันกับอุณหภูมิและความดันในการใช้งาน ในด้านของอุณหภูมิความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำมัน ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นของเหลวจะขยายตัว โมเลกุลของน้ำมันจะเคลื่อนออกห่างกัน ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลลดลง และเป็นผลให้ความหนืดลดลงด้วย

3) สมบัติทางเคมีของน้ำมันไฮดรอลิก (Chemical Properties) [26]

สมบัติทางเคมีของน้ำมันไฮดรอลิก เป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยในการตัดสินใจคุณภาพและอายุการใช้งาน และสมบัติที่สำคัญที่สุดคือ ความต้านทานการเกิดสนิม (Oxidation Resistance) เพราะของเหลวทั่วไปมักจะเกิดสนิมง่ายทำให้อายุการใช้งานสั้นลง

การเกิดสนิมของน้ำมันไฮดรอลิกเป็นปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างน้ำมันกับอากาศ ซึ่งก่อให้เกิดสารใหม่ นอกเหนือไปจากส่วนประกอบอื่นๆ ปะปนอยู่ในน้ำมัน ทำให้น้ำมันมีสีเข้มขึ้นและเหนียวขึ้น นอกจากนี้สารประกอบบางอย่างที่ละลายออกมาจะมีสมบัติเป็นกรด ซึ่งจะกัดกร่อนชิ้นส่วนที่เป็นโลหะภายในระบบ

สำหรับสารประกอบประเภทยางที่ปะปนอยู่ในน้ำมันนั้น เมื่อได้รับความร้อนก็จับตัวกันเป็นก้อนยางเหนียว ซึ่งอนุภาคของสารนี้จะลอยปะปนหมุนเวียนอยู่ภายในระบบด้วย นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นๆ ที่เกิดจากสนิมจับตัวกลายเป็นสภาพน้ำมันขี้ไต้ เมื่อปะปนกับผงโลหะก็จะทำให้เกิดปัญหาในระบบเช่น ทำให้อุปกรณ์ต่างๆ ติดขัดจากการอุดตัน การที่น้ำมันในระบบเกิดสนิมมากขึ้น เนื่องมาจากสาเหตุหลายประการคือ

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

งานจะลดลงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 135 องศาฟาเรนไฮต์ ก็จะเกิดสนิมในน้ำมันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ข. ปริมาณอากาศ ในขณะที่ระบบไฮดรอลิกทำงานจะมีอากาศปะปนอยู่ทั่วไป ซึ่งจะทำให้เกิดสนิมเพราะเมื่อเครื่องจักรหยุดการทำงาน อากาศที่ละลายอยู่ในน้ำมันก็จะแยกตัวออกไปและทำปฏิกิริยากับผิวโลหะ ที่เป็นเช่นนี้เพราะในสภาพความดันบรรยากาศปกติ น้ำมันไฮดรอลิกจะดูดซึมอากาศได้ถึง 140 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรของอากาศทั้งหมด

ค. ปริมาณสิ่งสกปรกและฝุ่นผงที่ปะปนอยู่ในระบบ สิ่งสกปรกต่างๆ เช่น ฝุ่นละอองจารบี น้ำ และพวกเศษโลหะที่เกิดจากการสึกหรอเนื่องจากการทำงาน โดยเฉพาะพวกเศษทองแดงและทองเหลือง สิ่งต่างๆ เหล่านี้เป็นเสมือนตัวเร่งที่ทำให้เกิดสนิมและความสกปรกอย่างมาก

2.2.7 สมบัติเชิงกลของโลหะ [28]

1) ความเค้น (Stress)

ความเค้นหมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดหาค่านี้ เราจึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่า แรงกระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน การหาค่าความเค้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

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

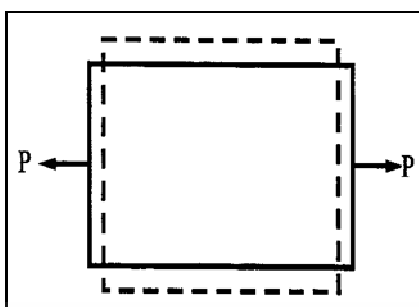
เมื่อ σ คือ ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็นปาสกาล (Pa, 1 Pa = 1N/m²) หรือ kgf/mm²

P คือ แรงภายนอกที่มากระทำ มีหน่วยเป็น N หรือ kgf

A คือ พื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำ; m² หรือ mm²

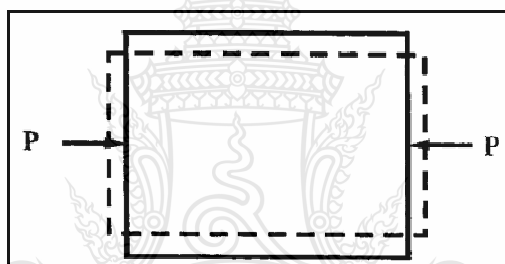
โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ โดยในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีทั้ง 3 แบบนี้พร้อมๆ กัน

1. ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน ดังภาพที่ 2.15



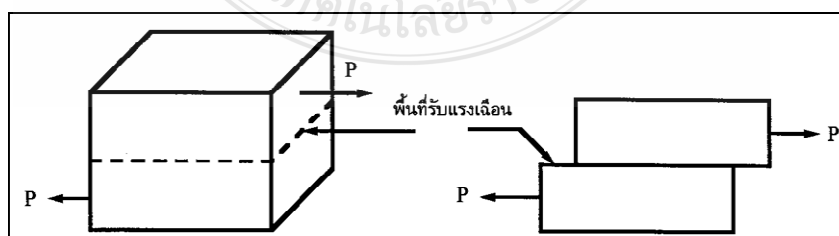
ภาพที่ 2.15 แรงดึง (Tensile) [29]

2. ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 แรงกด (Compression) [29]

3. ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันคั่งรูป มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force)หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง A ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน



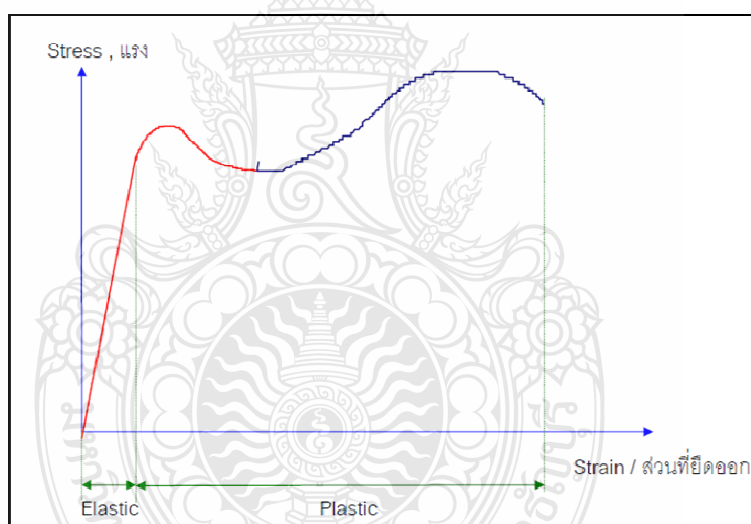
ภาพที่ 2.17 แรงเฉือน (Shear) [29]

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 2.18 ความเค้นความเครียดของการดึงวัสดุ [29]

วัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากระทำ หรือความเค้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินขีดจำกัดการคืนรูป (Elastic Limit) แล้ว วัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Behavior) แต่ถ้าความเค้นเกินกว่าขีดจำกัดการคืนรูปแล้ว วัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation) นอกจากความเครียดทั้ง 2 ชนิดนี้แล้ว ยังมีความเครียดอีกประเภทหนึ่งซึ่งพบในวัสดุประเภทโพลีเมอร์ เช่น พลาสติก เรียกว่า

ความเครียดกึ่งอลาสติกจะมีลักษณะที่เมื่อปราศจากแรงกระทำวัสดุจะมีการคืนรูป แต่จะไม่กลับไปจนมีลักษณะเหมือนเดิม การคำนวณหาค่าความเครียดมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

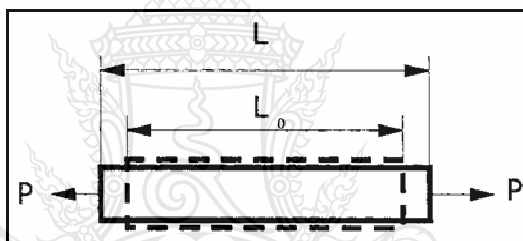
ก. แบบเส้นตรง ความเครียดที่วัดได้จะเรียกว่า ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกด ดังภาพที่ 2.19 ค่าของความเครียดจะเท่ากับ ความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม ดังสมการที่ 2.29

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

เมื่อ e คือ ความเครียดเชิงเส้น

ΔL คือ ความยาวที่เปลี่ยนไป ($L - L_0$)

L_0 คือ ความยาวเดิมของวัสดุที่สนใจ หรือ Gage Length



ภาพที่ 2.19 ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) [29]

ข. แบบเฉือน เรียกว่า ความเครียดเฉือน (Shear Strain) ใช้กับกรณีที่แรงที่กระทำมีลักษณะเป็นแรงเฉือน (τ) ดังภาพที่ 2.20 ค่าของความเครียดจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่างระนาบ ดังสมการ

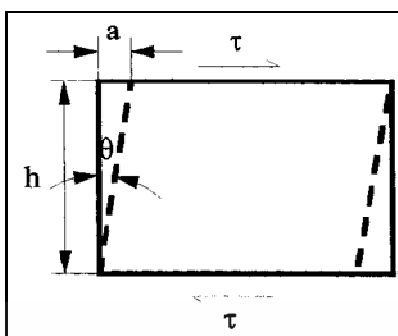
$$\gamma = \frac{a}{h} \quad (2.30)$$

เมื่อ γ คือ $\tan \theta \approx \theta$ (Radian ในกรณีที่มุมเล็ก)

a คือ ระยะที่เคลื่อนที่ไป (Displacement)

h คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

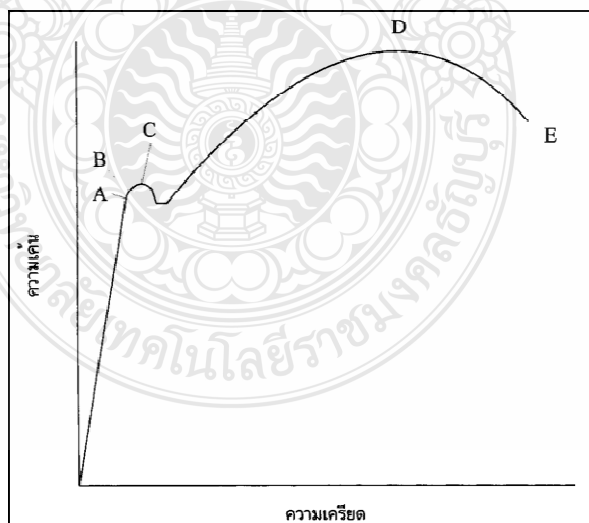
θ คือ มุมที่เปลี่ยนไป



ภาพที่ 2.20 ความเครียดเฉือน (Shear Strain) [29]

3) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship)

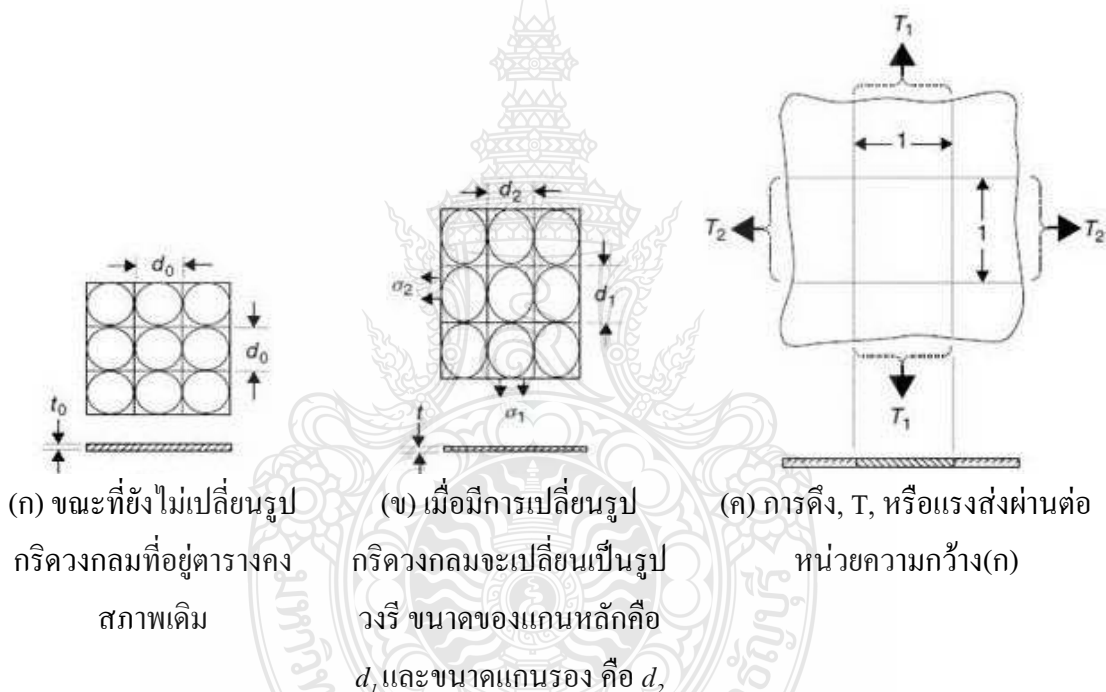
ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพล็อตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ดังภาพที่ 2.21 การทดสอบแรงดึง นอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ เหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย



ภาพที่ 2.21 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point) [29]

2.2.8 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโลหะแผ่น

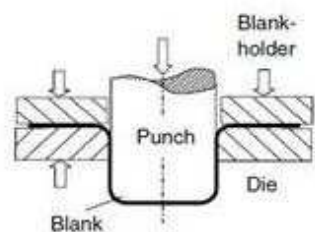
การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น (Deformation of Sheet in Plane Stress) ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูปบนระนาบความเค้น (Plane Stress) พิจารณา (Work Hardening) ของวัสดุ ซึ่งเข้ากำลังประยุกต์ใช้ทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูปในภาพที่ 2.22 ลักษณะที่ยังไม่มีการเปลี่ยนรูปที่ความหนา t_0 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d_0 หรือตารางขนาด d_0 แสดงในภาพที่ 2.22 (ก) ดังนั้นในระหว่างการเปลี่ยนรูปร่างกลมจะเปลี่ยนไปเป็นวงรี แกนของ Major คือ d_1 แกนของ Minor คือ d_2 ถ้าปรับตารางสี่เหลี่ยมให้เข้ากับทิศทางการหลักของกริดวงกลมจะกลายเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังภาพที่ 2.22 (ข) ส่วนความหนา คือ t ตามที่กรณีแสดงดังภาพที่ 2.22 (ค) ความเค้นที่ทำให้เปลี่ยนรูปคือ σ_1 และ σ_2 [9, 17]



ภาพที่ 2.22 ตารางวงกลมบนโลหะแผ่น [17]

2.2.9 แผนภาพความเครียด (Strain Diagram)

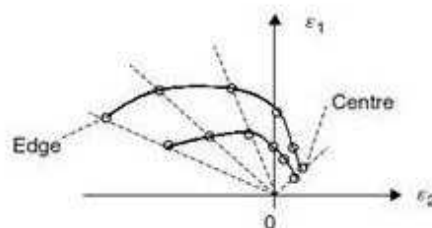
ความเครียดเฉพาะจุดที่เกิดขึ้นในภาพที่ 2.23 สามารถวัดได้จากกริดวงกลมแบบภาพที่ 2.22



(ก) การขึ้นรูปด้วยทรงกระบอก



(ข) ชิ้นส่วนย่อยของถ้วยทรงกระบอกแสดงค่าความเครียดที่วัดได้



ค) ผลค่าความเครียดที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอก

ภาพที่ 2.23 แผนภาพความเครียดตำแหน่งต่างๆ ของถ้วยทรงกระบอก [17]

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) โดยให้พิจารณาอัตราการเปลี่ยนรูปที่ปริมาตรคงที่

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

จากสมการที่ 2.26 ความหนาโดยทั่วไปคือ

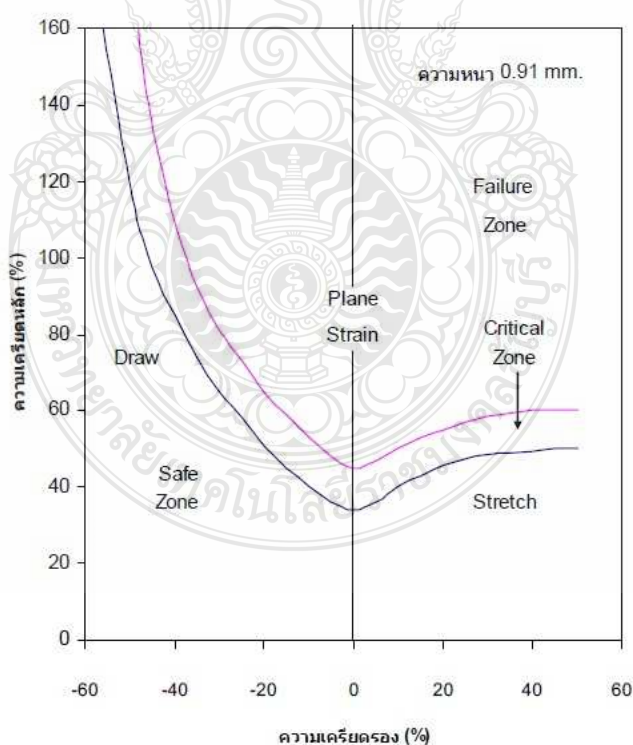
$$t = t_0 \exp(\varepsilon_3) = t_0 \exp[-(1 + \beta)\varepsilon_1] \quad (2.34)$$

หรืออีกแนวทางหนึ่งที่ปริมาตร $td_1d_2 = t_0d_0^2$ ที่ปริมาตรคงที่

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

2.2.10 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของโลหะแผ่น

แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Curve; FLC หรือ Forming Limit Diagrams; FLD) ใช้ในการวาดภาพจำลองขีดความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะต่างๆ ซึ่งจะสัมพันธ์กับภาพรวมของความเครียด ผลของม้วนหากไม่เกิดการแตกหักก็จะเกิดการหดตัวอย่างหนึ่งอย่างใดเสมอ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ในห้องปฏิบัติการทดสอบ [28]



ภาพที่ 2.24 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ความหนา 0.91 mm [28]

สำหรับเครียดในตำแหน่งของการคอดขยาย (Diffuse Necking) สามารถคำนวณได้จากสมการของ Hosford, William F.

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

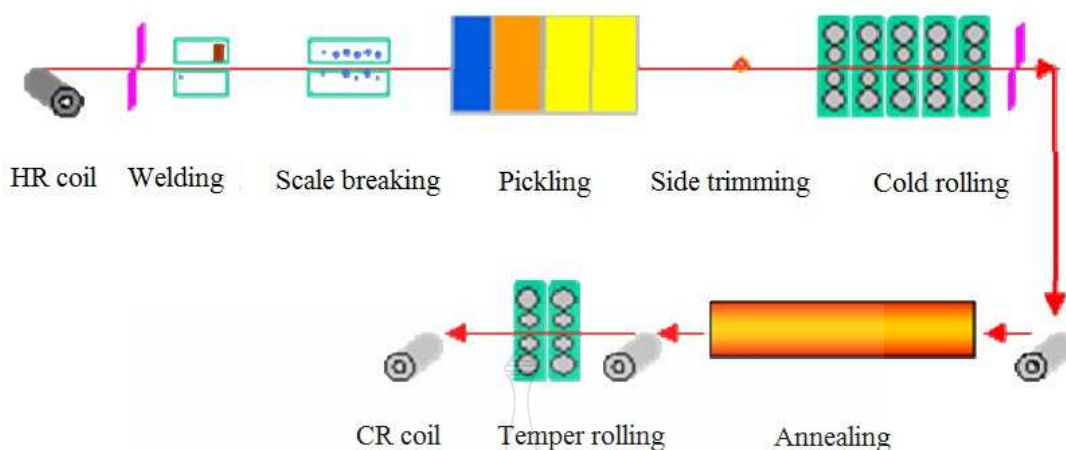
โดย $\rho = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$; ซึ่งความเครียดในตำแหน่งจึงตรง หรือความเครียดจากการดึง 2 ทิศทางเท่ากับ 1

2.2.11 เหล็กคาร์บอนรีดเย็น

1) กระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น (Manufacturing of Cold-Rolled Steel Flat Products)

การผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นจะใช้เหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน (HR Coil) เป็นวัตถุดิบในการผลิต (ภาพที่ 2.25) โดยเริ่มจากการตัดส่วนปลายของม้วนเหล็กแผ่นรีดร้อน และทำการเชื่อม (Welding) เพื่อให้สามารถผ่านกระบวนการกัดกรด (Pickling) ได้อย่างต่อเนื่อง จากนั้น เหล็กแผ่นรีดร้อน (Black Coil) จะถูกทำให้เคลื่อนตัวผ่านเครื่องกำจัดสนิมเหล็กทางกล (Scale Breaker) เพื่อให้สนิมที่ผิวแตกและง่ายต่อการกัดกรด เหล็กแผ่นที่ผ่าน Scale Breaker จะถูกทำให้เคลื่อนตัวลงสู่อ่างกรดเพื่อทำการกัดสนิม (Pickling) เหล็กแผ่นที่ผ่านการกัดกรดขจัดสนิมแล้วจะมีสีขาวเทา ซึ่งจะผ่านเครื่องตัดขอบ (Side Trimmer) เพื่อให้ขอบเรียบและลดการฉีกขาดจากขอบของเหล็กเมื่อทำการรีดลดขนาดปริมาณมาก เหล็กที่ผ่านการตัดขอบแล้วจะถูกนำไปรีดเย็นต่อเพื่อลดขนาดความหนา โดยการรีดเย็น (Cold Rolling) จะทำที่อุณหภูมิห้อง เหล็กแผ่นที่ผ่านการรีดเย็นมาจะมีผิวที่มันกว่าเหล็กแผ่นรีดร้อนซึ่งมีผิวที่ด้าน อย่างไรก็ตาม เหล็กแผ่นที่ผ่านรีดเย็นมายังมีความเครียดภายในเนื้อเหล็กเหลือค้าง ทำให้มีความแข็งแรงสูงความสามารถในการยืดตัว (Elongation) ต่ำ ตลอดจนมีความไม่สม่ำเสมอของคุณสมบัติเชิงกลในทิศทางต่างๆ สูงจึงไม่เหมาะแก่การใช้งานในลักษณะที่ต้องการนำไปขึ้นรูป จึงต้องผ่านการอบ (Annealing) เพื่อให้คลายความเครียดในเนื้อเหล็กลง เหล็กที่ผ่านการอบแล้วจะผ่านการรีดเย็นอีกเล็กน้อยโดยแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงความหนา (Temper Rolling) เพื่อปรับความเรียบ คุณภาพผิว และขจัดการยืดตัว ณ จุดคราก (Yield Point Elongation) ซึ่งช่วยให้เหล็กแผ่นที่ได้สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนต่างๆ ได้อย่างสม่ำเสมอยิ่งขึ้น

เหล็กแผ่นรีดเย็นสามารถนำไปใช้งานในลักษณะที่ต้องการคุณภาพผิวสูงกว่า และความหนาต่ำกว่าเหล็กแผ่นรีดร้อน เช่น นำไปทำเฟอร์นิเจอร์ เครื่องใช้ไฟฟ้า งานด้านยานยนต์ นำไปเคลือบดีบุกเพื่อทำเหล็กแผ่นสำหรับงานกระป๋องอาหาร เป็นต้น



ภาพที่ 2.25 กระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น

2) เหล็กแผ่นรีดเย็นสำหรับงานทั่วไปและงานขึ้นรูป

รูปแบบผลิตภัณฑ์สำหรับเหล็กแผ่นรีดเย็น หรือเหล็กแผ่นที่ได้จากการรีดเป็นแผ่นขณะเย็นให้ได้ความหนาตามต้องการ แล้วอาจผ่านการอบอ่อน หลังจากนั้น อาจผ่านกรรมวิธีการรีดปรับสภาพ (Skin Pass หรือ Temper Rolling) ด้วยก็ได้ โดยการรีดปรับสภาพ หมายถึง การรีดเย็นโดยมีวัตถุประสงค์อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างเพื่อควบคุมขนาด ความแข็ง ความราบ ผิวสำเร็จ และยับยั้งการเกิดร้าวร้าวหรือรอยยับ (Stretcher Strain or Coil Break) ในระยะเวลาหนึ่ง โดยตามมาตรฐาน JIS 3141 (เทียบชั้นคุณภาพได้ตามมาตรฐานสากล ISO 3574 หรือ ตามมาตรฐานประเทศไทย คือ มอก. 2012) ของเหล็กรีดเย็น คือ SPCC, SPCD และ SPCE

ตัวอย่างการใช้งานของเหล็กแผ่นรีดเย็นกลุ่มนี้ใช้สำหรับงานทั่วไป และงานขึ้นรูป (Drawing) โดยมีคุณภาพผิวที่ดีกว่าเหล็กแผ่นรีดร้อน เช่น ใช้ทำเฟอร์นิเจอร์ในสำนักงาน ถัง (Drum) ใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้าและชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น รายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับเหล็กแผ่นรีดเย็นสำหรับงานทั่วไปและงานขึ้นรูปเหล็กแผ่นรีดเย็นสำหรับงานทั่วไปและงานขึ้นรูป จัดเป็นกลุ่มของเหล็กแผ่นรีดเย็นที่มีการใช้งานมาก โดยจัดเป็นมาตรฐานบังคับของ สมอ. (โดยเหล็กแผ่นรีดเย็นชนิดเดียวกันหรือเทียบเท่าที่ผลิต หรือนำเข้ามาในราชอาณาจักรจะต้องมีคุณสมบัติผ่านตามมาตรฐานนี้) สำหรับชั้นคุณภาพของเหล็กแผ่นรีดเย็นสำหรับงานทั่วไปและงานขึ้นรูปตาม JIS G 3141 สามารถแบ่งได้ตามการใช้งานดังแสดงในตารางที่ 2.5 [8]

ตารางที่ 2.5 ชั้นคุณภาพตาม JIS G 3141 และการใช้งาน

JIS G 3141	ความหมาย	การใช้งาน
SPCC	Commercial Quality	ใช้งานกว้างขวางสำหรับงานพับขึ้นรูปทั่วไป และงานขึ้นรูปที่ไม่ซับซ้อน เช่น เครื่องทำความเย็น (Refrigerators) ตู้ขึ้นส่วนยานยนต์เฟอร์นิเจอร์ เครื่องใช้ในบ้าน ท่อ และถัง
SPCD	Drawing Quality	สำหรับงานขึ้นรูป เช่น Automotive Floor and Roof Panels เครื่องใช้ในบ้าน
SPCE, SPCEN	Deep Drawing Quality	สำหรับงานขึ้นรูปลึก การใช้งาน เช่น ตัวถังและชิ้นส่วนรถยนต์ ผนังด้านนอกของยานยนต์ (Automotive Outer Panels) เช่น Automotive Fender and Quarter Panels

หมายเหตุ ;

1. สำหรับเหล็กกล้าชั้นคุณภาพ SPCE ที่ลูกค้าต้องการให้รับประกันคุณสมบัติ Non-Aging จะใช้สัญลักษณ์ N เดิมต่อท้ายชั้นคุณภาพเป็น SPCE เป็น SPCEN ซึ่งโดยปกติ การรับประกันคุณสมบัติดังกล่าวจะถือระยะเวลาถึง 6 เดือนหลังจากจัดส่ง (Shipment) สมบัติ Non-Aging ถูกนิยามโดยเป็น 147คุณสมบัติที่จะไม่ก่อให้เกิดข้อบกพร่องลักษณะร้าวร้าวหรือรอยย่น (Stretcher Strains) เมื่อนำไปขึ้นรูป หรือแปรรูป
2. บางครั้งอาจพบชั้นคุณภาพ SPCCCT ซึ่งตัว T ที่ตามหลังชั้นคุณภาพ SPCC นี้จะหมายถึง การรับประกันค่าทดสอบความแข็งแรง (Tensile Test) หรือค่าทดสอบการขึ้นรูปโดยวิธี Erichsen Test
3. ผลกระทบของส่วนประกอบเหล็กกล้าบนความสามารถในการขึ้นรูป (Effect of Steel Composition on Formability)
แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปจะมีคาร์บอนน้อยกว่า 0.10 เปอร์เซ็นต์ และมีธาตุเจือที่ดึงใจและไม่ได้ดึงใจรวมน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ จำนวนแมงกานีสเป็นธาตุเจือหลักที่เพิ่มขึ้นปกติประมาณ 0.15-0.35 เปอร์เซ็นต์ ธาตุที่ถูกควบคุมเช่น ซิลิกอน ไนโอเบียมไทเทเนียมหรืออะลูมิเนียมอาจจะเพิ่มอย่างใดอย่างหนึ่ง เพื่อขจัดออกซิเจนหรือพัฒนาสมบัติที่ต้องการความแน่นอน ธาตุเหลือเช่น ซัลเฟอร์ โครเมียม นิกเกิล โมลิบดีนัม ทองแดง ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส มีความเป็นไปได้มากที่ต้องจำกัดไว้ ซึ่งจำนวนนี้เป็นค่าพื้นฐานโดยทั่วไปของคุณภาพแผ่นผลิตภัณฑ์ ซึ่งแผ่นเหล็กเจือนี้อาจจะมีธาตุเจือหนึ่งธาตุหรือมากกว่าก็ได้ [28]

1. คาร์บอน (Carbon) เป็นที่น่าสนใจโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มีอยู่ในเหล็กซึ่งมีเจตนาจะใช้ในการขึ้นรูปที่ยุ่งยากซับซ้อน การเพิ่มคาร์บอนในเหล็กจะเป็นการเพิ่มความแข็งแรงในเหล็กและลดความสามารถในการขึ้นรูป ผลกระทบของสาเหตุนี้โดยเกิดการก่อรูปของคาร์ไบด์ในโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และผลทำให้ขนาดเม็ดเกรนเล็กลง โดยทั่วไปจำนวนของคาร์บอนในเหล็กจะจำกัดไว้ที่ 0.10 เปอร์เซ็นต์หรือน้อยกว่าเพื่อให้แผ่นโลหะมีความสามารถในการขึ้นรูปได้สูงขึ้น

2. แมงกานีส (Manganese) เพิ่มลักษณะของเหล็กที่ร้อนและช่วยทำให้ง่ายในการพัฒนาขนาดเกรนตามที่พอใจ บางครั้งแมงกานีสก็มีความจำเป็นต่อผลกระทบของความเสียหายที่เกิดคราบซัลเฟอร์ทำให้ไม่มีผล โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับความสามารถในการขึ้นรูปร้อน เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีแมงกานีสในช่วง 0.15-0.35 เปอร์เซ็นต์ อาจจะขึ้นไปถึง 2.0 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉพาะในเหล็กเจือด้วยความต้านแรงสูง เมื่อซัลเฟอร์ต่ำมากแมงกานีสก็ต่ำด้วย ซึ่งเป็นกระบวนการช่วยให้เหล็กกล้าพัฒนาให้ค่า r สูงได้

3. ฟอสฟอรัสและซัลเฟอร์ (Phosphorus and Sulfer) ไม่เป็นที่ต้องการในแผ่นเหล็กสำหรับการดรอว์หรือการตัด เพราะว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มการแตกร้าวหรือแยกออก ระดับที่ยอมรับให้ฟอสฟอรัสและซัลเฟอร์เกิดขึ้นในระดับคุณภาพที่น่าพอใจ ตัวอย่างเช่น เหล็กที่เกรดคุณภาพเชิงพาณิชย์จะมีฟอสฟอรัสและซัลเฟอร์น้อยกว่า 0.035%P และ 0.040 %S ตามลำดับสำหรับการใช้ บางครั้งฟอสฟอรัสอาจจะเพิ่มเข้ามาในเหล็กเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ซัลเฟอร์โดยปกติจะปรากฏเป็นแมงกานีสซัลไฟด์ร่วมกันในโครงสร้างขนาดละเอียด การเกิดร่วมกันนี้สามารถกระตุ้นให้เกิดรอยแยกได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่ว่าเมื่อใดก็ตามที่ไม่ควบคุมปริมาณไว้ก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปได้

4. ซิลิกอน (Silicon) ที่อยู่ในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำจะเปลี่ยนแปลงตามกรรมวิธีการจัดออกซิเจนระหว่างการผลิตในเหล็กถลุงหรือรีดิวซ์ (รีดิวซ์ที่เรียกกันนั้นเพราะว่าในขณะที่เปลี่ยนจากสถานะหลอมเหลวเป็นของแข็งใช้แก๊สควบคุมบริเวณขอบหรือผิวด้านนอก) ซิลิกอนที่มีอยู่โดยทั่วไปน้อยกว่า 0.10 เปอร์เซ็นต์ ซิลิกอนค่อนข้างจะมากกว่าอะลูมิเนียมที่ใช้ในการจัดออกซิเจนกระทำที่รีดิวซ์ ซิลิกอนเพิ่มความแข็งแรงของเหล็กดังนั้นมันจะลดความสามารถในการขึ้นรูป

5. โครเมียม นิกเกิล โมลิบดีนัม วานาเดียมและธาตุเจืออื่นๆ ที่มีอยู่ในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเท่านั้นที่เป็นธาตุเหลือ ในการผลิตเหล็กควรจะควบคุมธาตุเหลือที่เหมาะสม ธาตุเหล่านี้โดยทั่วไปถือว่ามีจำนวนเล็กน้อย แต่ละธาตุเหล่านี้เป็นการเพิ่มความแข็งแรงและลดความสามารถในการขึ้นรูปแผ่นเหล็ก เหล็กความต้านแรงสูง เหล็กเจือต่ำอาจจะประกอบด้วยลักษณะเฉพาะจำนวนหนึ่งหรือมากกว่าของธาตุเหล่านี้

6. ทองแดง (Copper) โดยทั่วไปพิจารณาเป็นธาตุตกค้างที่ไม่เป็นพิษเป็นภัยในแผ่นเหล็ก ผลกระทบของทองแดงทำให้แข็งแรงขึ้น ในจำนวนเศษตกค้างเกือบทั้งหมดทองแดงพอมองข้ามไปได้เพราะมีค่าน้อยกว่า 0.10 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าทองแดงที่เพิ่มเข้ามาในเหล็กจำนวน 0.20 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนในชั้นบรรยากาศดีขึ้น

7. ไนโอเบียม (Niobium) ทำให้เหล็กเจือค่าความต้านแรงสูงมีความแข็งแรงมากขึ้น ตลอดจนการก่อรูปของไนโอเบียมคาร์ไบด์และไนไตรต์ ซึ่งสามารถใช้อย่างใดอย่างหนึ่งตามลำพังได้ หรือผสมกับไทเทเนียมเพื่อพัฒนาให้ค่า r สูงขึ้น ในเหล็กกล้า Interstitial Free ธาตุเจือนี้จะแยกออกจากธาตุที่แทรกในคาร์บอนและไนโตรเจน ด้วยเหตุนี้ทำให้เหล็กไม่มีการยึดที่จุดคราก

8. ไทเทเนียม (Titanium) เป็นการก่อรูปของคาร์ไบด์และไนไตรต์แข็ง ช่วยทำให้ค่า r สูงและขจัดการยึดที่จุดคราก เป็นการประกันอายุการใช้งานของแผ่นเหล็กรีดเย็นที่ถูกอบอ่อน ไทเทเนียมอาจจะมีปัญหาในเกรดบางชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปของจุดบกพร่องที่พื้นผิว

9. อะลูมิเนียม (Aluminum) เป็นการเพิ่มในเหล็กเพื่อการกำจัดออกซิเจนบริเวณริมขอบ ดังนั้นผลิตภัณฑ์เหล็กจะสะอาดมาก ที่รู้จักคือเหล็กกล้าเนื้อแน่นหรือเหล็กกล้าเนื้อแน่นชนิดพิเศษ อะลูมิเนียมผสมด้วยออกซิเจนและไนโตรเจนในขณะที่เหล็กหลอมละลาย เพื่อหยุดการรวมตัว ในขณะที่หลอมละลายหรือขณะเทโลหะลงแบบ อะลูมิเนียมช่วยพัฒนาการกำหนดเม็ดเกรนเพื่อทำให้ค่า r ได้ตามต้องการ ในแผ่นเหล็กรีดเย็นและแผ่นเหล็กที่อบอ่อนการประมาณของการยึดเม็ดเกรนตาม ASTM 7 เป็นการพบว่าเหล็กเหล็กกล้าเนื้อแน่นมีกระบวนการที่ดีที่สุด เพราะว่าอะลูมิเนียมผสมด้วยไนโตรเจนจะไม่มีการเปลี่ยนตามอายุความเครียด

10. ไนโตรเจน (Nitrogen) มีความสำคัญสามารถเพิ่มความแข็งแรงของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ทำให้เกิดการเปลี่ยนตามอายุความเครียดในเหล็ก ผลกระทบของไนโตรเจนที่สามารถควบคุมได้โดยการกำจัดออกซิเจนในขณะที่หลอมละลายด้วยอะลูมิเนียม

11. ซีเรียมและธาตุโลหะที่มีเลขอะตอมมิก 57-71 อื่นๆ (Cerium and Other Rare Earth Element) อาจเพิ่มเข้าไปในเหล็กเพื่อเปลี่ยนรูปร่างสิ่งแปลกปลอมที่รวมอยู่กับแมงกานีสซัลไฟด์ จากลักษณะเหมือนเข็มหรือปมให้เป็นลูกกลมๆ สิ่งแปลกปลอมที่รวมเป็นลูกกลมๆ มีความเป็นไปได้ที่จะลดการเกิดรอยร้าวถ้าการขึ้นรูปแผ่นเหล็กไม่มีการจำกัดที่ขอบ

12. ออกซิเจน (Oxygen) เกิดขึ้นในเหล็กขณะหลอมละลายรวมตัวเป็นของแข็งอยู่ในแท่งหล่อ (Ingot) ถ้ามีจำนวนมากเกินไปจะขัดขวางการก่อตัวของไนโตรเจนกับธาตุอื่นและปฏิเสธผลกระทบของธาตุเจือที่เพิ่มขึ้น ทำให้การเปลี่ยนตามอายุความเครียดลดลง ธาตุที่กักออกซิเจนไว้ เช่น ซีลีคอน อะลูมิเนียมและไทเทเนียม ขนาดของออกซิเจนจะถูกควบคุมเมื่อออกซิเจนรวมตัวกับ

สารที่ขจัดออกซิเจน ทำให้สารที่ไม่ใช่โลหะอื่นๆ ก่อตัวขึ้นมาได้ ถึงแม้ว่าสารที่ไม่ใช่โลหะจำนวนมากจะจางหายไปในกากถลุง (Slag) บางครั้งอาจจะกลายเป็นหลุมเล็กๆ ในเหล็กทำให้ผิวเป็นรอยได้

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.3.1 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 เพื่อให้ประหยัดพลังงานและสามารถใช้งานได้กับเครื่องจักรกลต่างๆ ได้มากมาย แรงดันของของเหลวภายในระบบของการทำงานควบคุมโดยอุปกรณ์ลดแรงดัน (Pressure Reducer)

3.3.2 ในปี 2004 Lihui Lang [2] ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง Study on Hydromechanical Deep Drawing with Uniform Pressure onto The Blank โดยทำทดลองขึ้นรูปอะลูมิเนียมผสมเกรด A116016-T4 โดยใช้กระบวนการ Hydromechanical Deep Drawing (HDD) ทำการขึ้นรูปด้วยที่มีอัตราส่วนการขึ้นรูปลึก (Drawing Ratio) 2.46 และ 3.11 กับ อะลูมิเนียมอ่อนเกรด A11050-H0 อัตราส่วนการขึ้นรูปลึก (Drawing Ratio) 3.11 ศึกษาวิจัยถึงแรงดันของของเหลวที่กระจายตัวกระทำต่อโลหะแผ่นที่ใช้ในการขึ้นรูป แล้วทำการจำลองการขึ้นรูปโดยการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปจริง โดยการกำหนดตัวแปรของวัสดุและตัวแปรของอุปกรณ์ สรุปได้ว่า อะลูมิเนียมอัลลอย ซึ่งมีความแข็ง ขึ้นรูปได้ดีที่สุดที่อัตราส่วนการขึ้นรูป 2.46 และจะเกิดรอยย่นที่อัตราส่วนการขึ้นรูป 2.54 ส่วนอะลูมิเนียมอ่อนสามารถขึ้นรูปได้ที่อัตราส่วนการขึ้นรูป 3.11 และได้ผิวงานที่เรียบ ในส่วนของ การจำลองการขึ้นรูปด้วย FEM ขอบเขตของสถานะต่างๆ จำเป็นต้องชัดเจน สมบัติ Anisotropy ของวัสดุเป็นตัวแปรสำคัญในการจำลองถึงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นโลหะ

3.3.3 ในปี 2004 Lihui Lang [5] ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง Investigation The Effect of Pre-Bulging During Hydromechanical Deep Drawing with Uniform Pressure onto The Blank โดยทำการศึกษาวิจัยถึงผลกระทบจากการพองตัวของโลหะแผ่นในกระบวนการ Hydromechanical Deep Drawing (HDD) โดยเป็นการศึกษาทดลองต่อเนื่อง ซึ่งงานวิจัยของ Lihui Lang ยังใช้อะลูมิเนียมเกรด A116016-T4 และ A11050-H0 ในการศึกษาวิจัย สรุปได้ว่า การพองตัวหรือรอยนูนมีตัวแปร 2 อย่าง คือ ความ

ดันของการพองตัว (Pre-Bulging Pressure) และ ความสูงของการพองตัว (Pre-Bulging Pressure) โดยการเพิ่มอัตราส่วนการลากขึ้นรูปจะทำให้เกิดความดันของการพองตัว (Pre-Bulging Pressure) และความสูงของการพองตัว (Pre-Bulging Pressure) อย่างรวดเร็ว เป็นผลมาจากความแปรปรวนของแรงดันของเหลวภายใน สรุปได้ว่า สารหล่อลื่นที่ติดระหว่างแผ่นโลหะกับ Blank Holder และแม่พิมพ์เป็นตัวช่วยอย่างมากในการปรับปรุงอัตราส่วนการลากขึ้นรูปของโลหะแผ่น สำหรับความเสียดทานระหว่างแผ่นโลหะกับ Punch เป็นอีกตัวแปรหนึ่งเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งเป็นลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน แต่จะไม่ส่งผลต่อการขึ้นรูปมากนัก ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานดังกล่าวมีค่าที่ไม่มากนัก

3.3.4 ในปี 2004-2005 Lihui Lang [30] 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 โดยเป็นการศึกษาวิจัยถึงการเตรียมการ การเข้าสังเกต การวิเคราะห์เชิงตัวเลขและตัวแปรในกระบวนการ Hydrodynamic Deep Drawing โดยใช้วัสดุอะลูมิเนียมผสม (Aluminum Alloy) เป็นวัสดุในการทดลอง สรุปได้ว่า อะลูมิเนียมอัลลอย A16016-T4 สามารถขึ้นรูปได้ดีที่อัตราส่วนการลากขึ้นรูป 2.46 และกระบวนการที่ดีที่สุดของการขึ้นรูปครั้งนี้คือ ระยะห่างระหว่าง Blank holder กับ แม่พิมพ์ คือ 0.98 ถึง 1.035 ของความหนาแผ่นโลหะ ความดันของเหลวภายในอยู่ที่ประมาณ 325 bar

3.3.5 ในปี 2005 Lihui Lang [1] 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 โดยทำการทดลองขึ้นรูปอะลูมิเนียมผสมเกรด คือ APP211 และ เหล็กอ่อนเกรด DC06 เป็นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมที่มีความโค้งของขอบมุมด้วยกระบวนการ Hydrodynamic Deep Drawing ทำการศึกษาวิเคราะห์ถึงความดันของของเหลวบริเวณรอบๆ แม่พิมพ์ที่มีผลกระทบต่อชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป สรุปได้ว่า เหล็กอ่อน (Soft Steel) มีอัตราการลากขึ้นรูปสูงสุดที่ 3.53 และ อะลูมิเนียมสูงสุดอยู่ที่ 3.44

3.3.6 ในปี พ.ศ. 2549 สวัสดิ์ โสคามุข [9] ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง การทำนายความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป โดยนำวัสดุ 2 ชนิด คือ ใช้เหล็กแผ่น SPCC และ SPCE หนา 0.8 mm สร้าง FLD ด้วยการขึ้นรูปกริดวงกลมบนแผ่นโลหะทดสอบโดยวิธีกัดกรดด้วยไฟฟ้า เปลี่ยนขอบของแผ่นชิ้นงานด้วยรัศมีที่แตกต่างกัน ขึ้นรูปบนเครื่องเพรสไฮดรอลิกด้วย

แม้พิมพ์รูปโดมครึ่งทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางพื้นที่ 100 mm กระทั่งเกิดรอยคอดและรอยแตก วิศวกรเปลี่ยนรูปของกริดวงกลมเป็นเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรอง นำ FLD มาประยุกต์ใช้ขึ้นรูปตัวถังรถยนต์ด้านใน ผลการวิจัยพบว่าเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปทั้งสองแตกต่างกัน เหล็ก SPCE มีความเครียดหลักและความเครียดรองในขณะที่เกิดการคอดสูงกว่าจึงสามารถขึ้นรูปได้มากกว่า แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปทั้งสองสอดคล้องกับความสามารถและความเสียหายในการขึ้นรูปชิ้นงานจริงและผลลัพธ์ของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.3.7 ในปี พ.ศ. 2547 พงศ์พันธ์ แก้วดาทิพย์ และ วารุณี เปรมานนท์ [14] ทำการศึกษาวิจัยเรื่องการศึกษานิทธิพลของความสูงคายแลนค์ในกรรมวิธีการลากขึ้นรูปลึก โดยใช้วัสดุทดสอบ 4 ชนิด คือ เหล็กกล้าไร้สนิม (SUS304) เหล็กกล้ารีดเย็น (SPCC) เหล็กกล้าเคลือบสังกะสี (SGCC) และ อะลูมิเนียม (A1100) ความหนา 1 mm นำมาทำการทดลองการลากขึ้นรูปลึกเป็นรูปถ้วยกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 44 mm อัตราส่วนการลากขึ้นรูปเท่ากับ 1.8 ส่วนความสูงของคายแลนค์ที่ทำการศึกษา มีขนาด คือ 40, 25, 20, 10 และ 0 mm ความสูงคายแลนค์จะไม่มีอิทธิพลต่อแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป ความหนาของชิ้นงาน และความเรียบผิวของชิ้นงานแต่จะมีอิทธิพลต่อการบิดตัวกลับของชิ้นงาน โดยที่คายแลนค์ 0 mm จะเกิดการบิดตัวกลับมากที่สุด

2.4 สรุปบท

จากการทบทวนวรรณกรรมในขั้นต้นที่กล่าวมานั้นพบว่า กระบวนการการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว เป็นกระบวนการที่พัฒนาขึ้นสำหรับการเพิ่มขีดความสามารถในการขึ้นรูป โดยเฉพาะโลหะแผ่น ซึ่งในปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวาง แต่ก็ยังมีจุดที่น่าสนใจในการดำเนินการศึกษาวิจัยอีกมากมาย ซึ่งปัญหาต่างๆ ที่มีความสำคัญที่พบจากวรรณกรรมขั้นต้นที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ได้แก่ ปัญหาการควบคุมสภาวะการทดลองให้มีความเหมาะสมต่อคุณลักษณะเฉพาะของโลหะแผ่นที่มีความแตกต่างกัน เช่น อะลูมิเนียม เหล็ก หรือ เหล็กกล้าไร้สนิม โดยเฉพาะสภาวะของการควบคุมแรงดันของเหลว การควบคุมสภาวะของแรงกดชิ้นงาน การเลือกใช้ของเหลวที่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นในการศึกษาทดลองเพื่อสรุปถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆ เหล่านี้ จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการการขึ้นรูปและชิ้นงานซึ่งเป็นหลักในกลุ่มของเหล็กคาร์บอน ที่มีความสามารถในการขึ้นรูปต่ำ โดยเฉพาะการลากขึ้นรูปลึก โลหะแผ่นอย่างเหล็ก SPCC อย่างไร โดยผลกระทบที่มีต่อกระบวนการการขึ้นรูป เช่น แรงลากขึ้นรูปที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการ และผลกระทบที่มีต่อชิ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปลึก เช่น ความเครียดหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ผิวชิ้นงาน ความหนาที่ลดลงของชิ้นงานและสภาพโดยทั่วไปของชิ้นงาน

บทที่ 3

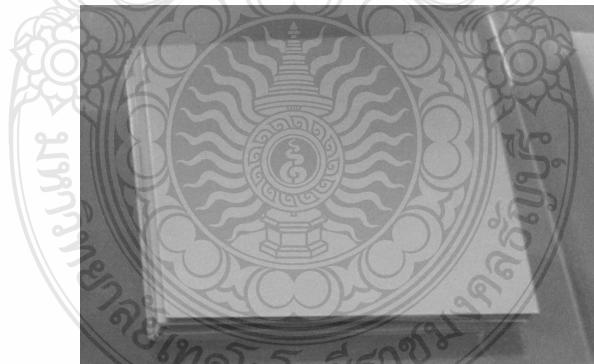
วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ เป็นการทดลองเพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการการเคลื่อนที่ของของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการการลากขึ้นรูปลึกเหล็กคาร์บอนรีดเย็นเกรด SPCC โดยจากการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องนั้น พบว่าปัจจัยหลัก คือ แรงในการลากขึ้นรูป แรงกดแผ่นชิ้นงาน ความดันที่เกิดขึ้นภายในห้องบรรจุของเหลว ความหนาของชิ้นทดสอบหลังการขึ้นรูป ความเครียดที่เกิดขึ้นที่ผิวแผ่นทดสอบ และปัญหาที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานหลังการขึ้นรูป คือ รอยย่นที่ปากถ้วยกับรอยฉีกขาด ทั้งหมดนี้มีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปของแผ่นเหล็ก

3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและการเตรียมการทดลอง

3.1.1 เหล็กแผ่นคาร์บอนรีดเย็นมาตรฐาน JIS เกรด SPCC ความหนา 0.5 mm

1) ตัดชิ้นงานตามแนวรีดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาด 90×90 mm ด้วยเครื่องตัด โลหะแผ่น (Power Shear) ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ชิ้นงานสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาด 90×90 mm

2) เตรียมอุปกรณ์จับยึด (Fixture) และติดตั้งบนเครื่องจักร CNC แล้วยึดแผ่นชิ้นงานซึ่งซ้อนกันหลายแผ่นให้แน่นดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 การจับยึด (Fixture) บนเครื่องกัด CNC

3) เครื่องกัด CNC เดินกัดชิ้นงานโดยคำสั่งจากโปรแกรมในระบบควบคุมอัตโนมัติจนกัดชิ้นงานสำเร็จดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 การกัดชิ้นงานโดยเครื่องจักร CNC

4) ทำการลบคมของแผ่นชิ้นงานให้เรียบร้อยดังแสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 ชิ้นงานทดสอบ (JIS:SPCC) ความหนา 0.5 mm

3.1.2 น้ำมันไฮดรอลิก PTT Hydraulic Oil 3 เกรด ตามมาตรฐาน มอก. 977-2551 ได้แก่

- 1) VG 32 ความหนืดเชิงจลศาสตร์ ที่อุณหภูมิ 40 °C โดยเฉลี่ยเท่ากับ 32 mm²/s
- 2) VG 46 ความหนืดเชิงจลศาสตร์ ที่อุณหภูมิ 40 °C โดยเฉลี่ยเท่ากับ 46 mm²/s
- 3) VG 68 ความหนืดเชิงจลศาสตร์ ที่อุณหภูมิ 40 °C โดยเฉลี่ยเท่ากับ 68 mm²/s



ภาพที่ 3.5 ของเหลวชนิดน้ำมันไฮดรอลิกตามมาตรฐานเกรด 32 46 และ 68

4) สปริงแม่พิมพ์มาตรฐาน JIS 3 ค่าคงที่สปริง เส้นผ่าศูนย์กลางวงนอก 27 mm เส้นผ่าศูนย์กลางวงใน 13.5 mm และความยาว 125 mm ที่ขนาด 3 ค่าคงที่ ได้แก่

1. สปริงสีเหลือง ค่าคงที่ของสปริง เท่ากับ 9.42 N/mm
2. สปริงสีฟ้า ค่าคงที่สปริง เท่ากับ 19.62 N/mm
3. สปริงสีแดง ค่าคงที่สปริง เท่ากับ 35.69 N/mm
- 5) เครื่องอัดขึ้นรูปโลหะระบบไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน



ภาพที่ 3.6 เครื่องปั๊มอัดระบบไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน

6) เครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC Automatic Machine)



ภาพที่ 3.7 เครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC Automatic Machine)

7) ชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลิก รูปถ้วยทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 45 mm

8) เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ดังแสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 เครื่องทดสอบแรงดึง

9) ชุดต้นกำลังและควบคุมระบบไฮดรอลิกขนาด 30 ลิตร แรงดันสูงสุด 700 บาร์



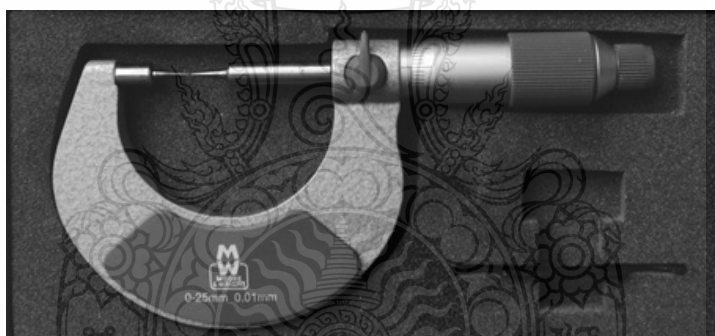
ภาพที่ 3.9 ชุดต้นกำลังและควบคุมระบบไฮดรอลิก

10) อุปกรณ์วัดแรงชนิดวัดแรงกดพร้อมชุดแปลงสัญญาณ



ภาพที่ 3.10 อุปกรณ์วัดแรงต้นและอุปกรณ์บันทึกแรงที่ได้จากการขึ้นรูป

11) ไมโครคาลิปเปอร์ชนิดปลายเข็ม สำหรับวัดความหนาขึ้นทดสอบหลังการขึ้นรูป

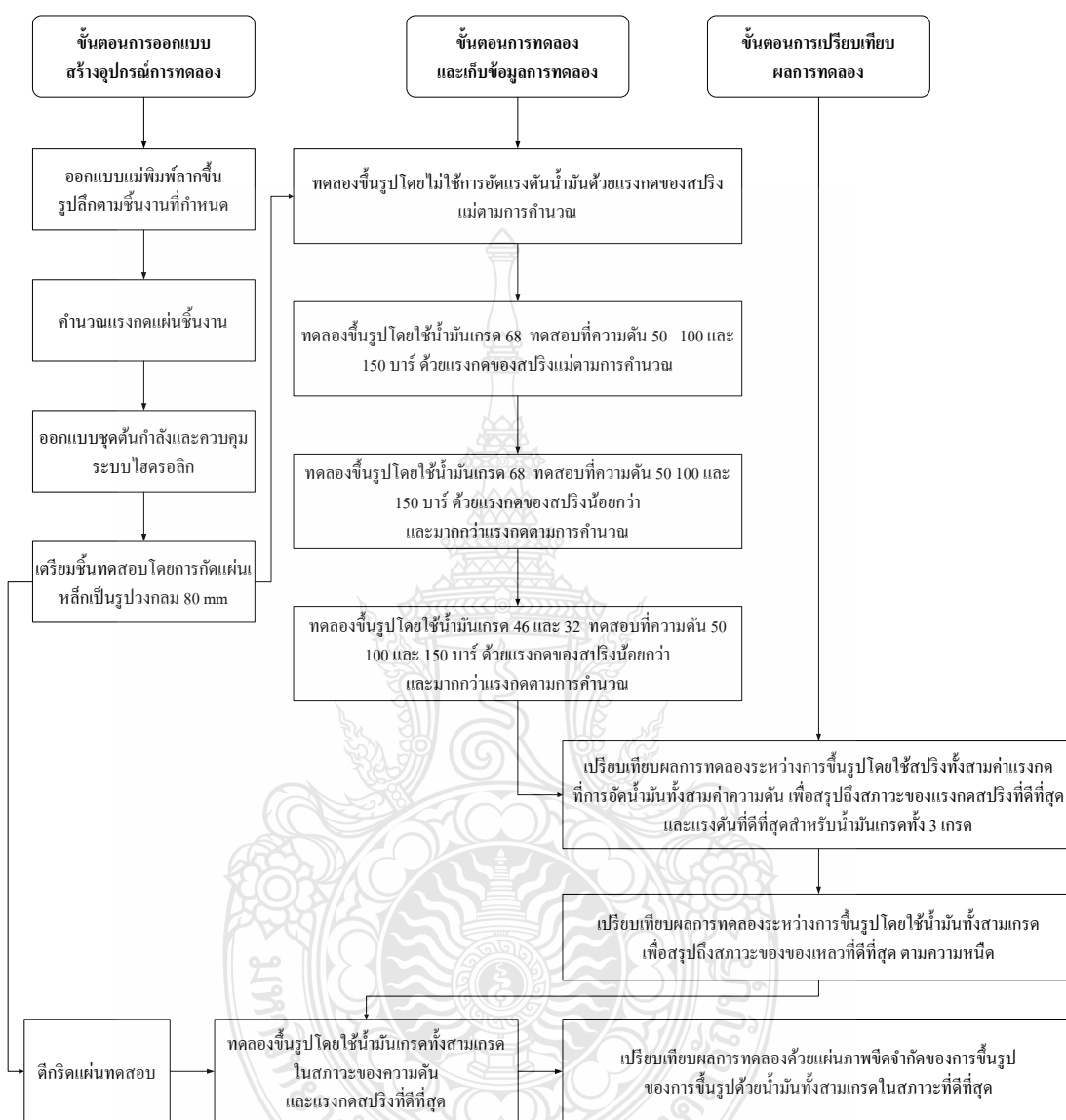


ภาพที่ 3.11 ไมโครคาลิปเปอร์สำหรับวัดความหนาขึ้นงาน

12) อุปกรณ์ที่ใช้สร้างกริด

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

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

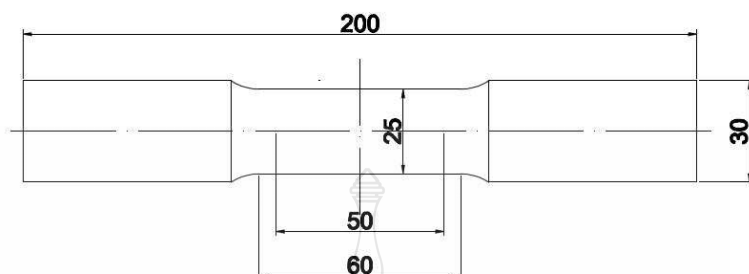


ภาพที่ 3.12 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 สมบัติของเหล็ก SPCC

ตารางที่ 3.1 สมบัติของเหล็ก SPCC ตามมาตรฐาน JIS โดยส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กคาร์บอนรีดเย็นเกรด SPCC ตามมาตรฐาน JIS G 3141: 2005 สำหรับสมบัติความเค้นแรงดึง แอนไอโซทรอปีและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว โดยการเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน JIS Z 2201: 1998

[31] ทำการทดสอบโดยแรงทดสอบแรงดึงมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ภาพที่ 3.13 ชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดึงเหล็ก SPCC ตามมาตรฐาน JIS Z2201



ภาพที่ 3.13 ชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดึงเหล็ก SPCC ตามมาตรฐาน JIS Z2201: 1998 [31]

ตารางที่ 3.1 สมบัติของเหล็ก SPCC

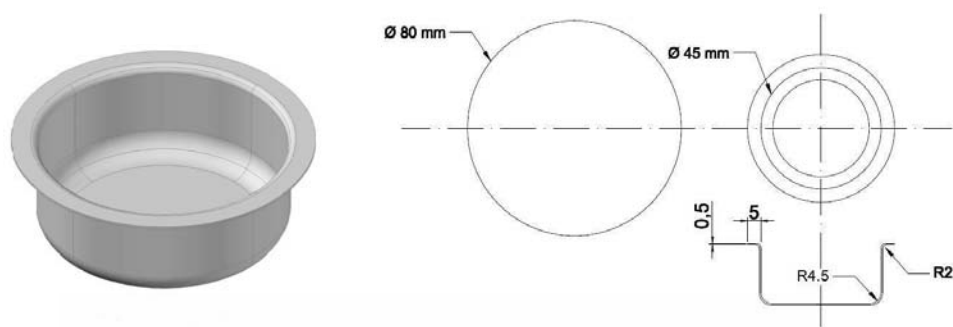
ส่วนประกอบทางเคมีตาม มาตรฐาน JIS G 3141:2005 (%)				การทดสอบสมบัติทางกลตามมาตรฐาน JIS Z 2201:1998				
				ความเค้นแรงดึง (N/mm ²)		แอนไอโซทรอปี		การยืดตัว (%)
C	Mn	P	S	R ₀	359.33	r ₀	1.017	36.1
0.15	0.6	0.1	0.05	R ₄₅	358.67	r ₄₅	0.981	35.0
Max	Max	Max	Max	R ₉₀	357.00	r ₉₀	1.084	35.8

$$\text{ความเค้นแรงดึงเฉลี่ย (R}_m\text{)} = 360 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ย} = 35.6\%$$

3.2.2 ทำการออกแบบแม่พิมพ์การลากลึงรูปลึก

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



ภาพที่ 3.14 ชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกแบบมีปีก

- 1) ขนาดแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นคำนวณตามทฤษฎีในบทที่ 2

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

$$= 75.7 \text{ mm}$$

กำหนดให้แผ่นทดสอบเท่ากับ 80 mm (เพื่อมุมโค้งคายและพื้นซ์)

- 2) มุมคาย คำนวณตามทฤษฎีในบทที่ 2

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

$$= 2.1 \text{ องศา}$$

กำหนดให้มุมปากคายเท่ากับ 2 องศา

- 3) ระยะช่องว่างแม่พิมพ์

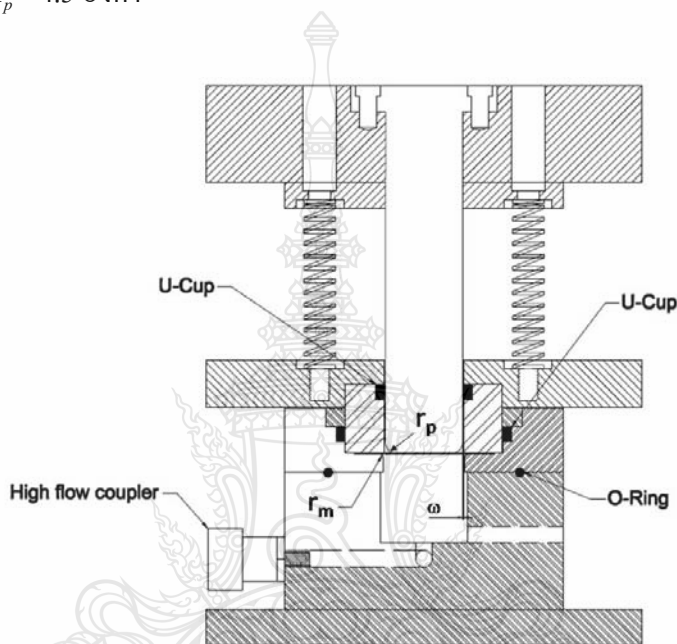
$$\omega = s \times \sqrt{\frac{D}{d}} = 0.66 \text{ mm}$$

กำหนดให้ระยะช่องว่างแม่พิมพ์เท่ากับ 0.65 mm

4) มุมพื่นซ์

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

กำหนดให้มุมพื่นซ์ $r_p = 4.5$ องศา



ภาพที่ 3.15 สภาวะของแม่พิมพ์ในการศึกษาทดลอง ซึ่งได้จากการออกแบบคำนวณตามทฤษฎีการลากขึ้นรูปลึก

3.2.3 จำนวนขนาดของแรงกดแผ่นทดสอบ

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 สำหรับการคำนวณใช้ค่าสูงสุด	=	360	N/mm ²
c สำหรับโลหะประเภทเหล็ก	=	0.002	
แรงดันกดแผ่นโลหะ	=	1.04	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) แรงกดยึดแผ่นโลหะ (Blank Holder Force, F_{BH})

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

$$F_{BH} = 3.2 \quad \text{kN}$$

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

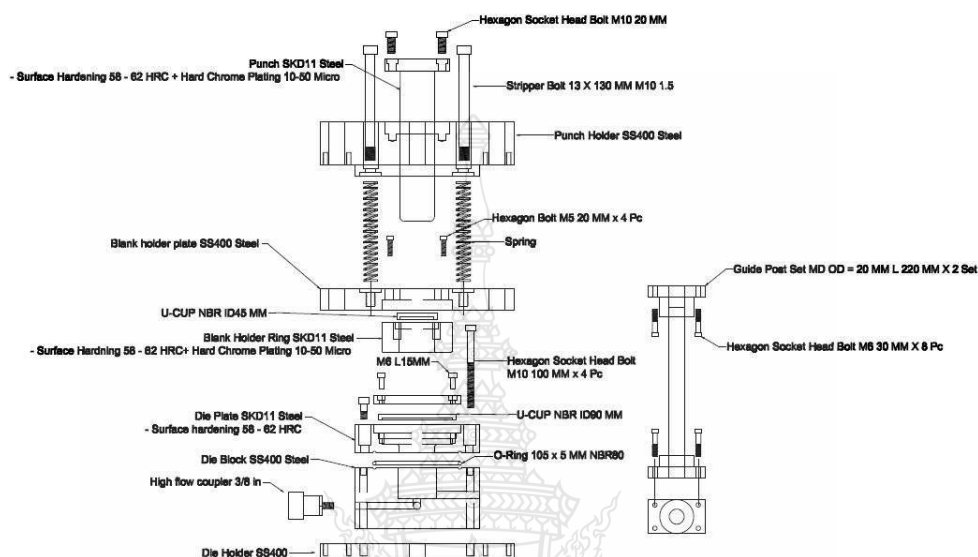
- สปริงค่าคงที่ 9.42 N/mm แรงกดรวม 1.9 kN
- สปริงค่าคงที่ 19.62 N/mm แรงกดรวม 3.9 kN
- สปริงค่าคงที่ 35.69 N/mm แรงกดรวม 7.1 kN

กำหนดให้ระยะกดแม่พิมพ์ก่อนการขึ้นรูปที่เท่ากับ 25 mm

3.2.4 การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการบรรจุของเหลว

สำหรับแม่พิมพ์ชุดล่าง จะมีห้องบรรจุของเหลว (Liquid Chamber) เจาะรูจากด้านบนของคาน สำหรับต่อท่อทางเดินของน้ำมันไฮดรอลิก จากชุดต้นกำลังไฮดรอลิก สำหรับชุดแม่พิมพ์ทำการป้องกันการรั่วไหลของของเหลว 3 จุด คือ 1. บริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างแผ่นหน้าคานซึ่งใช้เหล็กชุบ SKD11 ชุบแข็งกับตัวคานซึ่งใช้เหล็ก SS400 โดยใช้ซีลโอริง NBR 2. บริเวณจุดผิวสัมผัสระหว่างแผ่นกดชิ้นงานซึ่งใช้เหล็ก SKD11 ชุบแข็งและชุบ Hare Chrome กับผิวคาน โดยใช้ซีล U-CUP NBR ขนาด

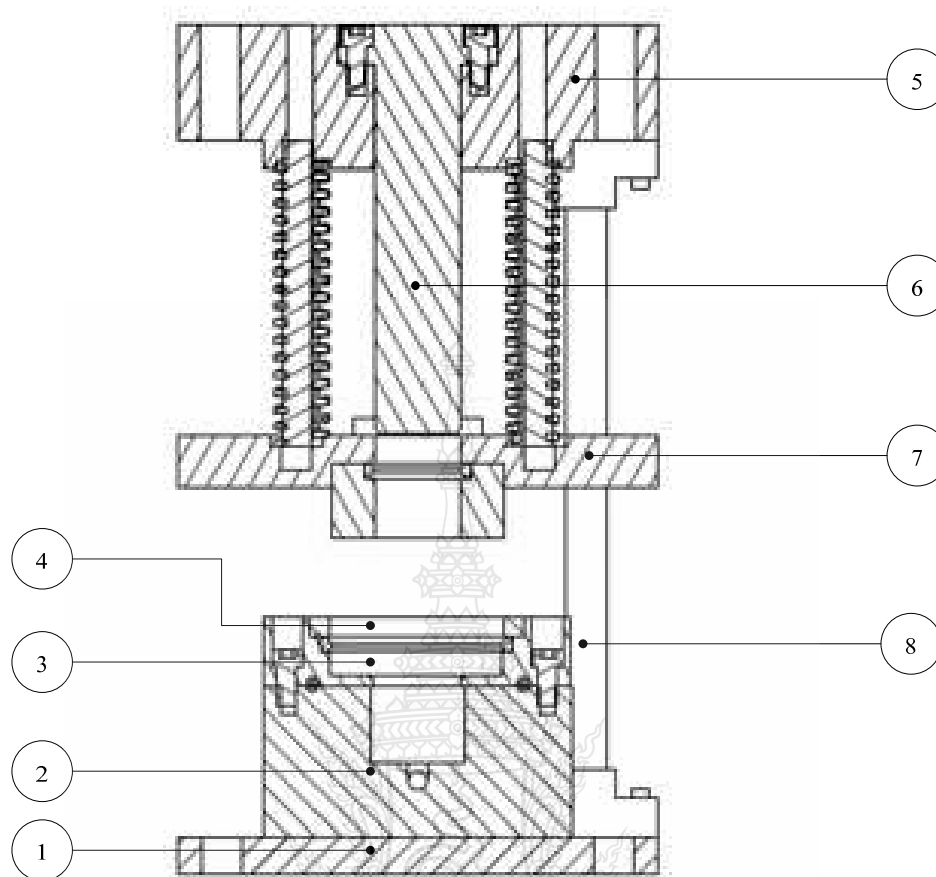
เส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน 90 mm สูง 8 mm และ 3. บริเวณจุดผิวสัมผัสระหว่างพื้นที่ซึ่งใช้เหล็ก SKD11 ชุบแข็งและชุบ Hare Chrome กับผิวด้านในของแผ่นกดชิ้นงาน โดยใช้ซีล U-CUP NBR ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน 45 mm สูง 10 mm ภาพที่ 3.16 ส่วนประกอบพร้อมรายละเอียดของแม่พิมพ์



ภาพที่ 3.16 ส่วนประกอบพร้อมรายละเอียดของแม่พิมพ์

ตารางที่ 3.2 ชิ้นส่วนแม่พิมพ์

ชิ้นที่	รายการ	ขนาด	วัสดุ
1	Die Holder	250 × 250 × 20	SS400 Steel
2	Die Block	160 × 160 × 78	SS400 Steel
3	Die Plate	160 × 160 × 36.5	SKD11
4	Die Plate Cover	112 × 112 × 10.5	SKD11
5	Punch Plate	250 × 250 × 75	SS400 Steel
6	Punch	Ø84 × 213	SKD11
7	Blank Holder Plate	250 × 250 × 27	SS400 Steel
8	Guide Post	Ø20.02 × 25	



ภาพที่ 3.17 ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ขึ้นรูป

3.2.5 การออกแบบชุดต้นกำเนิด และระบบควบคุมไฮดรอลิกสำหรับอันแรงดันเข้าแม่พิมพ์

ชุดต้นกำเนิดและระบบควบคุมไฮดรอลิก ได้รับการออกแบบและสร้างโดยบริษัทฟร้อนเทค เอ็นจิเนียริง จำกัด ขนาดของมอเตอร์ขับเคลื่อน 3 แรงม้า ระบบไฟฟ้า 3 เฟด ขับปั้มน้ำมันไฮดรอลิก แบบ ลูกสูบ กำล้งใช้งานสูงสุด 700 บาร์ อัตราการไหล 0.5 – 1 ลิตร/นาทึ ภาพที่ 3.7 วงจรการทำงานของระบบไฮดรอลิก โดยมีวงจรการทำงานและการควบคุมดังต่อไปนี้

1) ในขณะเครื่องทำงานที่สวิทช์ควบคุมปกติปิด ของเหลวจะไหลจากถังเก็บด้วยแรงดันของปั้ม ผ่านสวิทช์ควบคุมกลับถึงเก็บโดยไม่ผ่านลิ้นควบคุมความดัน ในภาพที่ 3.6 สวิทช์ควบคุมการทำงานของระบบไฮดรอลิก

2) เมื่อเปิดสวิทช์ควบคุมของเหลวจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ผ่านลิ้นควบคุมความดันทั้งสองตัว

3) ทำการปรับค่าความดันเข้าสู่ระบบแม่พิมพ์ หมุนสกรูปรับความดันที่ลิ้นควบคุมความดันทางเข้าแม่พิมพ์ (ตามภาพที่ 3.7 ลิ้นควบคุมความดันตัวล่าง)

4) ทำการปรับค่าความดันควบคุมภายในห้องแม่พิมพ์ โดยหมุนสกรูปรับความดันที่ลิ้นควบคุมความดันทางออกของแม่พิมพ์ (ตามภาพที่ 3.7 ลิ้นควบคุมความดันตัวบน)

5) เมื่อของเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยความดันที่สูงเกินค่าที่ปรับสกรูไว้ ของเหลวจะไหลกลับสู่ถังเก็บ โดยผ่านลิ้นควบคุมความดันทางเข้าแม่พิมพ์ ในขณะเดียวกันเมื่อความดันภายในห้องแม่พิมพ์สูงเกินค่าที่ปรับสกรูไว้ ของเหลวจะไหลกลับถังเก็บโดยผ่านลิ้นควบคุมความดันทางออกของแม่พิมพ์

6) บริเวณทางของเหลวไหลเข้าของแม่พิมพ์ ใช้อุปกรณ์ป้องกันการไหลย้อนกลับของของเหลว (Ball Valve)

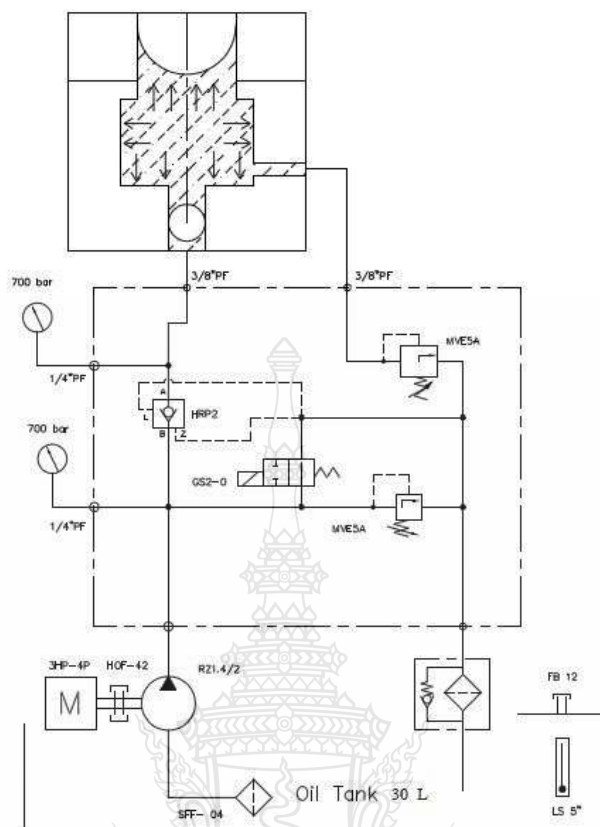
7) อุปกรณ์วัดแรงดันของเหลว 2 จุด

8) ทำการศึกษาทดลองที่ความดันควบคุม 50, 100 และ 150 bar

9) ในการเปลี่ยนถ่ายของเหลวเพิ่มทำการทดลองของเหลวที่มีค่าความหนืดต่างๆ โดยคลายสกรูด้านล่างของถังเพื่อปล่อยน้ำมันออก เปิดฝาด้านหน้าเพื่อทำความสะอาดภายในถัง หลังจากนั้นประกอบฝาดังและสกรูด้ายของเหลว จากนั้นเติมของเหลวที่ถัง โดยเติมผ่านช่องเติมด้านบนจนถึงจนกระทั่งภายในถังเต็ม หลังจากนั้นเติมของเหลวเข้าไปยังปั๊มโดยตรงผ่านทางช่องรูเล็ก เพื่อป้องกันอากาศที่ช่องทางเข้าของปั๊ม (Cavitation) ในภาพที่ 3.8 ช่องเติมน้ำมันทั้งสองช่องเพื่อเติมน้ำมันภายในถังและที่ปั๊มโดยตรง



ภาพที่ 3.18 แผงสวิทช์ควบคุมการทำงานของระบบไฮดรอลิก



ภาพที่ 3.19 วงจรการทำงาน และควบคุมระบบไฮดรอลิก

ช่องสำหรับเติมของเหลวเข้าสู่ถังบรรจุก



ช่องสำหรับเติมของเหลวเข้าสู่ถังโดยตรง

ภาพที่ 3.20 ช่องเติมน้ำมันทั้งสองช่องเพื่อเติมน้ำมันภายในถังและที่ปั๊มโดยตรง

3.2.6 การสร้างกริดบนแผ่นทดลอง

การสร้างกริดที่แผ่นชิ้นงานเพื่อใช้สำหรับการวัดค่าความเครียดหลัก และความเครียดดลอง โดยใช้กริดเกลือกัดด้วยไฟฟ้า กระบวนการตีกริดวงกลมที่ใช้กริดเกลือกัดด้วยไฟฟ้าเป็นการชุบเคลือบผิววัสดุทำให้เกิดลายตาราง เพื่อทำการวัดความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวหลังจากที่ชิ้นงานได้ผ่านการขึ้นรูป [32] โดยสร้างกริดวงกลมขนาด 2.5 mm ที่ใช้กริดเกลือกัดด้วยไฟฟ้ามีกระบวนการดังต่อไปนี้

1) จัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการสร้างกริด ดังต่อไปนี้

- แผ่นเหล็กขนาดพอเหมาะ กับ โต๊ะปฏิบัติงาน
- แผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencil) ขนาด 10 x 12 นิ้ว
- น้ำยาล้างทำความสะอาดแผ่นโลหะ
- น้ำยาอิเล็กโทรไลต์เพื่อใช้ในการกัดแผ่นโลหะซึ่งใช้สำหรับเหล็ก
- ตัวปรับไฟ (Rectifier) พร้อมด้วยสายต่อ 2 สายที่ประกอบด้วยลูกกลิ้งและสายดิน
- น้ำยากัดสนิม

1. ใช้แผ่นเหล็กวางบนโต๊ะปฏิบัติงาน สำหรับรองชิ้นงานในการทดลอง เพื่อต่อวงจรไฟฟ้า

2. ประกอบตัวปรับแรงดันและแปลงไฟ โดยใช้สายดินหนีบกับแผ่นเหล็กรองและ อีกสายหนึ่งติดลูกกลิ้ง

3. นำแผ่นเหล็กทดสอบ SPCC ที่ใช้เป็นชิ้นงานในการทดลอง วางบนแผ่นเหล็กรอง โดยที่แผ่นชิ้นงานจะต้องผ่านการแต่งครีบและขอบ พร้อมกับล้างคราบไขมันให้สะอาดแล้วเช็ดให้แห้ง และระวังอย่าให้มีเศษโลหะหรือวัสดุใดๆ เพราะจะทำให้ แผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils) เกิดทะลุได้ในขณะใช้ลูกกลิ้งกดขณะขึ้นรูปด้วยไฟฟ้า

4. นำแผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils) วางบนชิ้นงานโดยจัดให้เหมาะสมกับชิ้นงาน

5. นำแผ่นเบาะรองที่จุ่มด้วยน้ำยาอิเล็กโทรไลต์หมาดๆ เช็ดบนแผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils) ในบริเวณที่จะตีกริดให้ทั่วถึงโดยให้หมาดๆ แล้วจัดแผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils) ให้ตั้งอย่างให้ยื่น

6. นำแผ่นเบาะรองจุ่มด้วยน้ำยาอิเล็กโทรไลต์และบิดพอให้เปียกๆ วางบนแผ่นลอกลายกริดวงกลม (Stencils) อีกทีหนึ่ง ในกรณีที่แผ่นเบาะรองยังจุ่มด้วยน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ก็ยังไม่ต้องจุ่มน้ำยาจนกว่าจะแห้งพอประมาณ

7. เปิดสวิตซ์ที่เครื่องปรับไฟ ปรับตั้งขนาดไฟฟ้าให้เหมาะสม ใช้ลูกกลิ้งกดลงบนแผ่นเบาะรองด้วยน้ำหนักพอประมาณ และเคลื่อนที่ไปอย่างช้าๆเพียงครั้งเดียว ซึ่งสังเกตโดยให้เข็มวัดกระแสไฟฟ้ากระดิกมาที่กึ่งกลางหรือสูงๆของมาตรวัด จะทำให้กริดวงกลมบนแผ่นโลหะมีความชัดเจนและเส้นมีความคมสวยงาม หลังจากนั้นจึงปิดสวิตซ์ไฟแล้วนำแผ่นเบาะรองและ Stencils ออกเพื่อดูว่า กริดวงกลมมีความชัดเจนหรือไม่

8. หลังจากตีกริดวงกลมเสร็จแล้ว ให้นำแผ่นทดสอบมาล้างด้วยน้ำยาล้างทำความสะอาดและเช็ดให้แห้งแล้วพ่นน้ำยากัดสนิม เพื่อรอการศึกษาทดลองต่อไป



(ก) แผ่น Stencil
ขนาด 10 x 12 นิ้ว



(ข) เครื่องปรับแปลงไฟที่
ประกอบด้วยลูกกลิ้งและสายดิน



(ค) ตักขณะการขึ้นรูปกริดวง
กลมโดยใช้ลูกกลิ้งกด

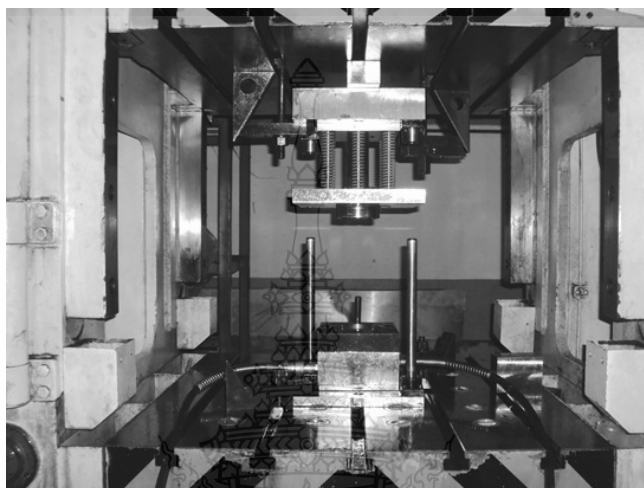
ภาพที่ 3.21 กระบวนการกรัดเกลือกัดด้วยไฟฟ้า



ภาพที่ 3.22 แผ่นทดสอบที่สร้างกริดเรียบร้อยแล้ว

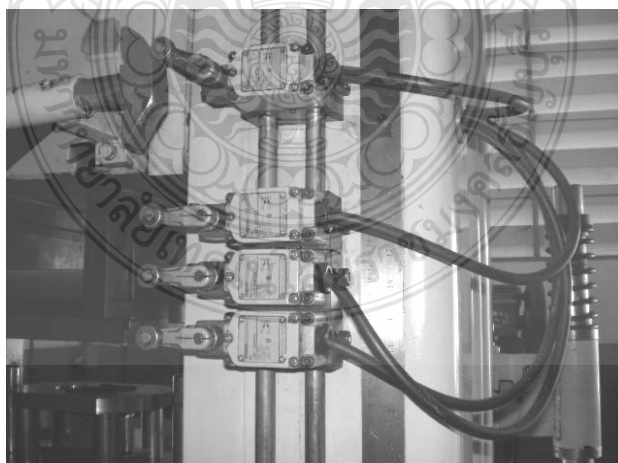
3.2.7 ติดตั้งแม่พิมพ์และต้นกำลังไฮดรอลิก

1) ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงสำหรับต่อพวงเข้ากับเครื่องปั๊มอัด หลังจากนั้นติดตั้งแม่พิมพ์ที่เครื่องปั๊มอัด 80 ตัน และติดตั้งชุดต้นกำลังไฮดรอลิกโดยใช้สายน้ำมันไฮดรอลิก ชนิดรับแรงดันสูงต่อเข้ากับตัวแม่พิมพ์ผ่าน High Flow Coupler ตามภาพที่ 3.23



ภาพที่ 3.23 แม่พิมพ์ซึ่งติดตั้งบนเครื่องปั๊มอัดเรียบร้อยแล้ว

2) ปรับตั้งสวิทช์ควบคุมตามความลึกของชิ้นงานลากขึ้นรูปดังแสดงในภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3.24 การปรับตั้งสวิทช์ควบคุมของเครื่องปั๊ม

3) แม่พิมพ์พร้อมใช้งานติดตั้งบนเครื่องเพรสไฮดรอลิก ดังแสดงในภาพที่ 3.23



ภาพที่ 3.25 แม่พิมพ์พร้อมใช้งานติดตั้งบนเครื่องเพรสไฮดรอลิก

3.2.8 การกำหนดตัวแปรในการทดลอง

ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ ใช้การลากขึ้นรูปลึกรูปถ้วยทรงกระบอก ซึ่งเป็นรูปทรงที่งานต่อการออกแบบแม่พิมพ์ การขึ้นรูป และการจัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์ในการศึกษาทดลอง สำหรับตัวแบบในการศึกษาทดลองได้แก่ การขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว (Fluids Pressure) เปรียบเทียบกับการขึ้นรูปแบบธรรมดาโดยไม่ใช้แรงดันของเหลว ใช้ของเหลวชนิดน้ำมันไฮดรอลิก 3 เกรด ซึ่งมีค่าความหนืดแตกต่างกัน และขนาดแรงกดแผ่นทดสอบ โดยใช้สปริงที่มีค่าคงที่สปริงแตกต่างกันเป็นตัวกด โดยใช้ความเร็วกดของพื้นที่ตลอดการทดลองที่ 2 mm ต่อวินาที

ลำดับขั้นของการทดลองตามตัวแปรที่กำหนด เป็นไปตามตารางที่ 3.3 - 3.6 โดยตัวแบบที่ใช้ในการทดลองกำหนดดังต่อไปนี้

1) ของเหลวน้ำมันไฮดรอลิก 3 ค่าความหนืด คือ VG 32 VG 46 และ VG 68 ตามมาตรฐาน มอก. 977 - 2551 ซึ่งทดสอบโดยมาตรฐานการทดสอบ ISO 3105 หรือเทียบได้กับมาตรฐาน ASTM 445-09 โดยทั้ง 3 ค่าความหนืด เป็นชั้นคุณภาพที่หาได้ง่ายตามท้องตลาดทั่วไป

2) แรงดันของเหลว 50 100 และ 150 บาร์ ได้มาจากกระบวนกาทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดช่วงของการทดลอง

3) ค่าแรงกดสปริง หรือค่าคงที่สปริง 9.42 19.62 และ 35.69 N/mm กำหนดจากการคำนวณแรงกดชิ้นงานตามทฤษฎีเท่ากับ 3.2 kN โดยกำหนดค่าเริ่มต้นการทดลองให้ใช้สปริงซึ่งมี

ค่าคงที่ ใกล้เคียงกับค่าจากการคำนวณ คือ สปริงที่มีค่าคงที่ 19.62 N/mm ตามมาตรฐาน JIS B 5012 ทั้งหมด 8 ตัว และระยะกดพื้นซ์ก่อนสัมผัสกับชิ้นงาน 25 mm รวมแรงกดเท่ากับ 3.9 kN แล้วจึงทำการเปลี่ยนค่าแรงกดของสปริง ซึ่งต้องใช้สปริงที่มีขนาดเดียวกัน ซึ่งตามมาตรฐานแล้ว สปริงที่มีค่าคงที่ที่น้อยกว่าคือ 9.42 N/mm และ สปริงที่มีค่าคงที่ที่สูงกว่าคือ 35.69 N/mm

4) การขึ้นรูปแบบปกติโดยการไม่ป้อนแรงดันของเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ และไม่ให้มีของเหลวค้างอยู่ในแม่พิมพ์ เพื่อเป็นการทดลองเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการขึ้นรูปโดยใช้ของเหลว กับการขึ้นรูปแบบปกติ

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการทดลองสำหรับการขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว โดยใช้ของเหลว VG 68

แรงกดชิ้นงานจากสปริง (kN)	แรงดันของเหลว (bar)		
1.9	50	100	150
3.9	50	100	150
7.1	50	100	150

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการทดลองสำหรับการขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว โดยใช้ของเหลว VG 46

แรงกดชิ้นงานจากสปริง (kN)	แรงดันของเหลว (bar)		
1.9	50	100	150
3.9	50	100	150
7.1	50	100	150

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการทดลองสำหรับการขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว โดยใช้ของเหลว VG 32

แรงกดชิ้นงานจากสปริง (kN)	แรงดันของเหลว (bar)		
1.9	50	100	150
3.9	50	100	150
7.1	50	100	150

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรในการทดลองสำหรับการขึ้นรูปแบบธรรมดา

แรงกดขึ้นงานจากสปริง (kN)	การขึ้นรูปแบบธรรมดา
1.9	ไม่ใช้แรงดันของเหลวเข้าสู่ระบบ
3.9	ไม่ใช้แรงดันของเหลวเข้าสู่ระบบ
7.1	ไม่ใช้แรงดันของเหลวเข้าสู่ระบบ

3.3 ขั้นตอนการเก็บบันทึกข้อมูลการทดลอง

3.3.1 การวัดแรงในการลากขึ้นรูป

ในการวัดแรงในการลากขึ้นรูป ที่สภาวะการทดลองต่างๆ เปรียบเทียบกัน เพื่อวิเคราะห์ถึงแรงที่กระทำกับแผ่นขึ้นงานในการทดลอง ที่มีต่อชิ้นงานที่ได้หลังจากการขึ้นรูป และประสิทธิภาพของการขึ้นรูปในสภาวะต่างๆ สำหรับการวัดค่าแรงกดในแนวแกนตั้ง ใช้เครื่องมือวัดชนิดวัดแรงกดอัดที่ต่อพ่วงเข้ากับเครื่องปั๊มอัด ในการวัดค่าจะได้แรงกดพื้นที่ทั้งหมดที่กดลงบนชิ้นงาน

แรงกดพื้นที่กระทำต่อแผ่นขึ้นงานคำนวณได้ตามทฤษฎีในบทที่ 2

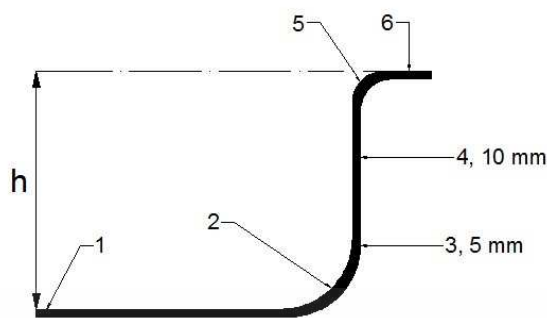
$$F_d = F_p - \left(\frac{\pi}{4} \times d_p^2 \times P \right)$$

3.3.2 ชิ้นงานที่ได้หลังการลากขึ้นรูป

ทำการทดลองโดยการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกแบบมีปีก เพื่อพิจารณาถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการลากขึ้นรูปได้แก่ รอยแตกที่ผนังของชิ้นงาน และ รอยย่นที่ปากถ้วย ด้วยใช้การตรวจสอบด้วยสายตา

3.3.3 ความหนาของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป

หลังจากการทดลองการขึ้นรูปที่สภาวะตามที่กำหนด แล้วจึงทำการวัดความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน ในจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงาน โดยใช้ไมโครคาลิเปอร์วัดความหนาของแผ่นขึ้นงานในการทดสอบ และ ชิ้นงานหลังการขึ้น ภาพที่ 3.26 ตำแหน่งของการวัดความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป



ภาพที่ 3.26 ตำแหน่งของการวัดความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

ในภาพที่ 3.26 ตำแหน่งสำหรับการวัดความหนาที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงาน หลังการลากขึ้นรูป โดย ตำแหน่งที่ 1 คือ บริเวณกึ่งกลางของกันด้วย ตำแหน่งที่ 2 คือ บริเวณมุมพUNCH ตำแหน่งที่ 3 คือ บริเวณพื้นที่โน้ต หรือ บริเวณความสูง 5 mm จากกันด้วย ตำแหน่งที่ 4 คือ บริเวณผนังด้วย ด้านข้างส่วนบน หรือ บริเวณความสูง 10 mm จากกันด้วย ตำแหน่งที่ 5 คือ บริเวณมุมตาย และ ตำแหน่งที่ 6 คือ บริเวณปีกด้วย ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป จากการลากขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกโดยทั่วไปของเหล็กคาร์บอน SPCC ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของพงศ์พันธ์ แก้วดาพิทย์ และวารุณี เปรमानนท์ ที่ทำการวัดความหนาของชิ้นงานในตำแหน่งกึ่งกลางกันด้วย มุมพUNCH เนื้อส่วนโค้งของมุมพUNCH (Punch Nose) แต่เนื่องจากงานวิจัยดังกล่าวเป็นการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกแบบไม่มีปีก หลังจากเนื้อส่วนโค้งแล้วจึงทำการวัดตามระยะความสูงของด้วย [10, 33]

3.3.4 วัดความเครียดที่เกิดขึ้นกับผนังชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

การวัดค่าเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของชิ้นงานตามแนวแกน X และแนวแกน Y จะกระทำโดยการวิเคราะห์กริดวงกลมจากการกัดด้วยกรดเกลือ ซึ่งมีขนาดของกริดวงกลมเท่ากับผ่านศูนย์กลาง 2.5 mm โดยหลังการขึ้นรูปกริดวงกลมบนแผ่นทดสอบจะเปลี่ยนรูปเป็นวงรี วัดขนาดของวงรีเพื่อกำหนดขนาดโตสุดคือความเครียดหลัก และขนาดต่ำสุดคือความเครียดรอง ความเครียดทั้งสองนี้จะถูกพล็อตบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป โดยขั้นตอนวัดขนาดกริดจากการเปลี่ยนรูปเป็นวงรี เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและความเครียดรอง ซึ่งมีวิธีการวัดดังนี้

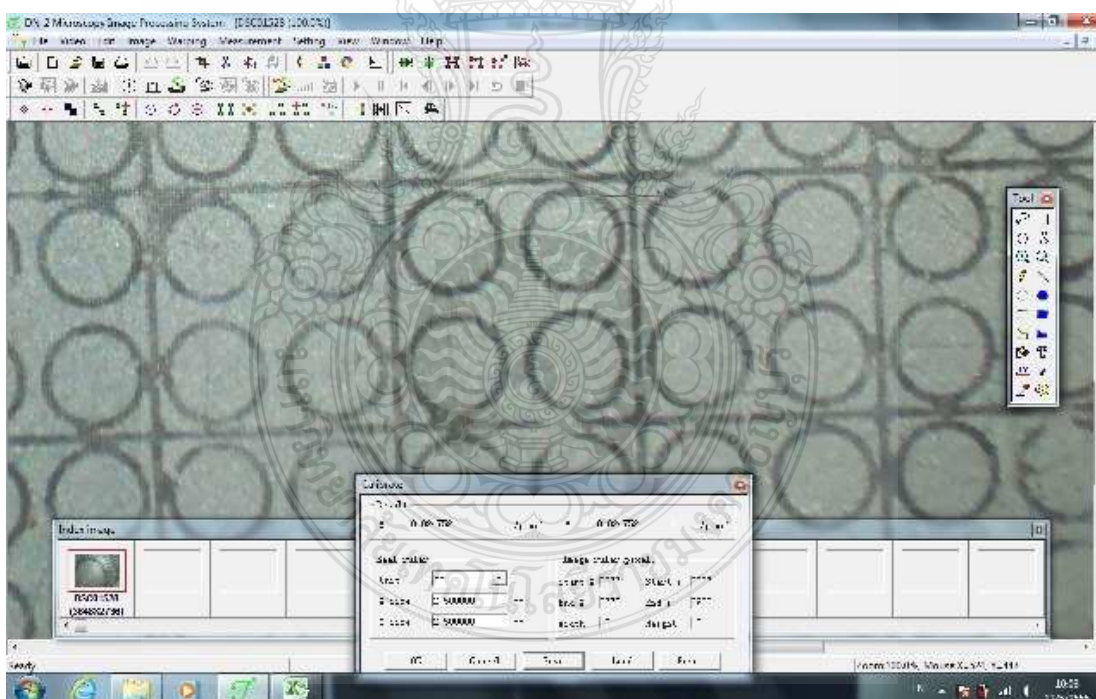
1) ใช้กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) ที่มีความละเอียดสูง ประกอบร่วมกับคอมพิวเตอร์ปรับโฟกัสตามลักษณะชิ้นทดสอบ ทำการถ่ายภาพขนาดกริดมาตรฐานก่อนทำการขึ้นรูป ที่ระยะ

โฟกัสเดียวกันซึ่งงานทดลอง เพื่อทำการกำหนดให้เป็นขนาด อ้างอิงในโปรแกรม สำหรับใช้ในการวัดขนาด วงกลมกริดที่เปลี่ยนไป

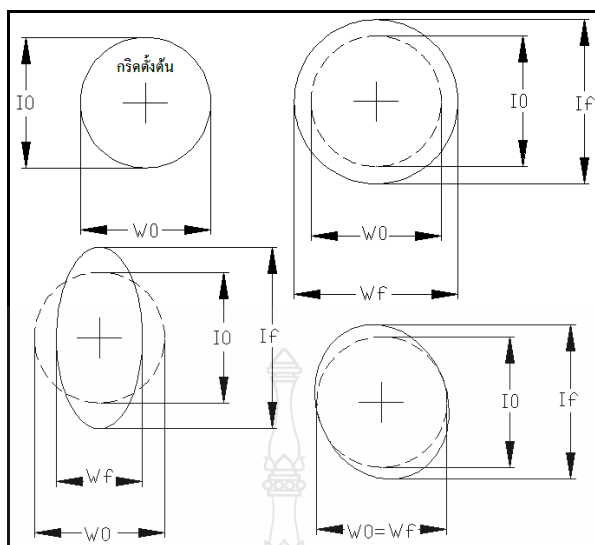
2) ใช้กล้องจุลทรรศน์ ที่มีความละเอียดสูง ประกอบร่วมกับคอมพิวเตอร์ ปรับโฟกัสตามลักษณะชิ้นทดสอบ โดยให้ขณะที่ถ่ายภาพ พื้นผิวของแผ่นทดสอบที่จะทำการถ่ายภาพจะต้องได้รับการปรับให้ขนานกับหน้ากล้องจุลทรรศน์ โดยให้ระยะโฟกัสที่ทำการถ่ายภาพกริด นั้นจะต้องเท่ากันในทุกชิ้นงานทดลอง

3) เลือกกริดวงกลมที่เกิดการเปลี่ยนขนาดของวงกลมกริด เป็นวงรีในแต่ละชิ้นการทดสอบแล้ว นำมาสร้างเส้นอ้างอิงในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอน

4) ทำการวัดขนาดกริดด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม Decal Image Processing ดังที่แสดงในภาพที่ 3.27 การใช้โปรแกรม Decal Image Processing วัดขนาดกริดในแนวตั้งและแนวนอน แล้วนำค่าที่ได้มาทำการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของความเครียดหลัก และเปอร์เซ็นต์ของความเครียดหลัก



ภาพที่ 3.27 การวัดขนาดกริดวงกลมด้วยโปรแกรม Decal Image Processing



ภาพที่ 3.28 การวัดอัตราความเครียดและอัตราความเครียดตรง [29]

5) อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป เกิดจากการคำนวณหาอัตราส่วนของรูปร่างวงกลมกริดที่เปลี่ยนตามแนวแกน ได้จากสูตรดังต่อไปนี้

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

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

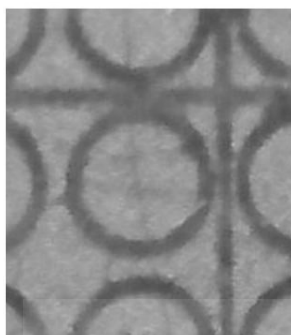
โดย I0 คือ ความยาวแกนหลักเดิม

If คือ ความยาวแกนหลักที่เปลี่ยนไป

W0 คือ ความยาวแกนหลักเดิม

Wf คือ ความยาวรองหลักที่เปลี่ยนไป

6) นำความเครียดหลัก (Major Strain) และความเครียดตรง (Minor Strain) มาพล็อตกราฟในโปรแกรม Excel



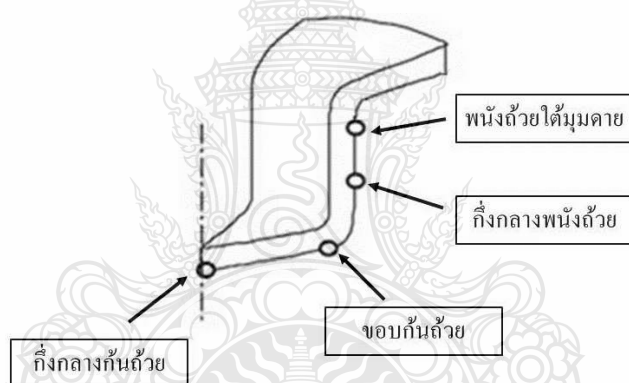
(ก) ลักษณะของกริดวงกลมก่อนการขึ้นรูป



(ข) ลักษณะของกริดวงกลมที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหลังจากการขึ้นรูป

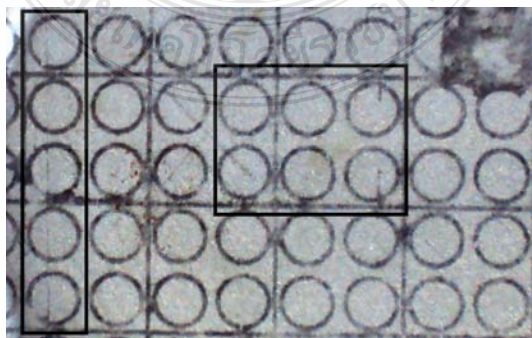
ภาพที่ 3.29 ลักษณะของกริดวงกลม

7) ตำแหน่งของการวัดกริด



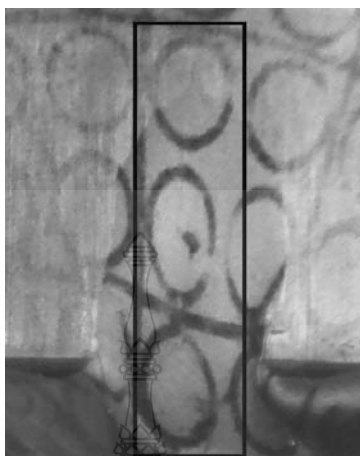
ภาพที่ 3.30 ตำแหน่งการวัดกริดวงกลม

ก. ตำแหน่งของกึ่งกลางและขอบก้นถ้วย



ภาพที่ 3.31 กริดวงกลมที่ตำแหน่งก้นถ้วยบริเวณกึ่งกลางและขอบถ้วย

ข. ตำแหน่งกึ่งกลางพนักด้านข้าง และได้มุมคาย



ภาพที่ 3.32 กริดวงกลมที่ตำแหน่งพนักถ้วยด้านข้างบริเวณ กึ่งกลาง และได้มุมคาย

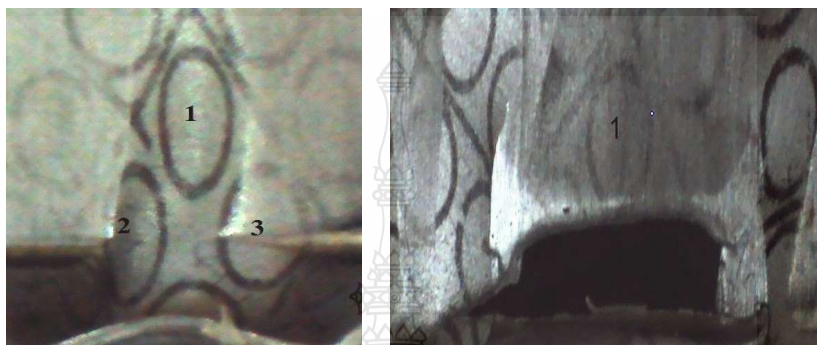
สำหรับบริเวณส่วน โค้งของพนักได้ข้างของความเคลือบรอง จากการทดลองคัดลอกลายกริดจากพนักด้านข้าง ลงสู่แผ่นฟิล์มแนวระนาบ เพื่อวัดขนาดของกริดเปรียบเทียบกับกริดขนาดกริดที่พนักถ้วยโดยตรง พบว่ามีขนาดที่คลาดเคลื่อนดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดกริดในแนวส่วนโค้ง

ครั้งที่	ขนาดของกริดในแนวส่วนโค้งที่พนักถ้วย		
	วัดที่พนักถ้วยโดยตรง	วัดจากแผ่นระนาบ	ค่าคลาดเคลื่อน
1	2.523	2.524	0.001
2	2.500	2.500	0.000
3	2.616	2.617	0.001
4	2.523	2.524	0.001
5	2.530	2.530	0.000
เฉลี่ย	2.5384	2.5390	0.0006
เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยเท่ากับ			0.02 %

จากค่าความคลาดเคลื่อนดังที่แสดงในตารางที่ 3.7 มีเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.02% ของขนาดกริดซึ่งวัดจากผนังถ้วยโดยตรง และในบางค่าของข้อมูล ไม่มีความแตกต่างของขนาดกริด ดังนั้นในการสรุปผลการทดลองจึงใช้ค่าซึ่งได้จากการวัดขนาดกริดที่ผนังถ้วยโดยตรง

ค. ลักษณะการฉีกขาดที่ผิวชิ้นงาน



ภาพที่ 3.33 กริดวงกลมซึ่งทำการวัดในบริเวณที่เกิดการฉีกขาดบนผิวชิ้นงาน

3.4 การเปรียบเทียบสรุปผลการทดลอง

3.4.1 การเปรียบเทียบแรงกดพื้นที่กระทำกับแผ่นชิ้นงานและชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

1) เปรียบเทียบแรงกดพื้นที่โดยรวม และแรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานในการลากขึ้นรูป ลึกแบบปกติ กับการใช้แรงดันของเหลวที่แรงดัน 50 100 และ 150 bar ของของเหลวค่าความหนืด 68 46 และ 32 ที่ค่าคงที่สปริง 9.42, 19.62 และ 35.69 N/mm ตามระยะความลึกของการลากขึ้นรูป

2) เปรียบเทียบชิ้นงานหลังการขึ้นรูปโดยโดยการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติ กับการใช้แรงดันของเหลวความหนืด 68, 46 และ 32 ที่สถานะของแรงกดสปริงที่ดีที่สุด ที่แรงดัน 50 100 และ 150 bar ตามระยะความลึกของการลากขึ้นรูปโดยพิจารณาจากปัญหา รอยแตกที่ผิวชิ้นงานกับ รอยย่นที่ปากถ้วยของชิ้นงาน

3.4.2 เปอร์เซนต์ความหนาที่เปลี่ยนแปลงไป และความเครียดที่เกิดขึ้นกับผิวของชิ้นงาน

เปรียบเทียบความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป โดยพิจารณาถึงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงาน และเปรียบเทียบความเครียดที่เกิดขึ้นกับผิวชิ้นงาน โดยการวัดขนาดของกริดแล้วพอร์กลงบน แผ่นภาพขีดจำกัดในการขึ้นรูป เปรียบเทียบผลดังต่อไปนี้

1) เปรียบเทียบความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูประหว่างการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติกับการขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวค่าความหนืด 68, 46 และ 32 ที่แรงดันดัน 50, 100 และ 150 bar ด้วยแรงกดสปริงค่าคงที่ 9.42, 16.62 และ 35.69 N/mm

2) เปรียบเทียบความเครียดที่ผิวชิ้นงานระหว่างการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติกับการขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวค่าความหนืด 68, 46 และ 32 ที่แรงดันดัน 50, 100 และ 150 bar ด้วยแรงกดสปริงค่าคงที่ 9.42, 16.62 และ 35.69 N/mm



บทที่ 4

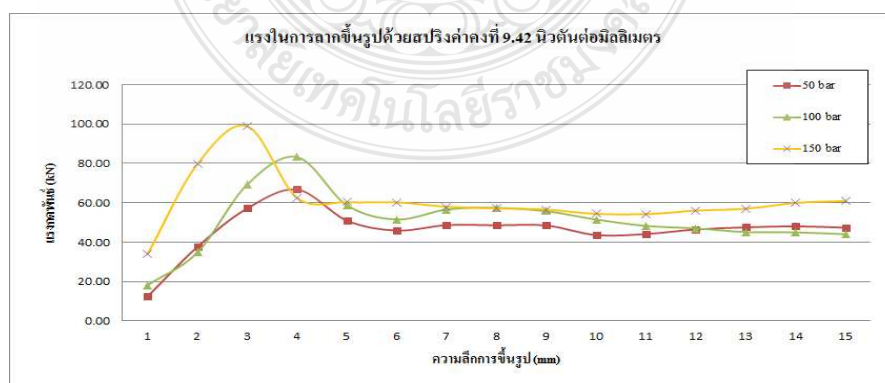
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

สำหรับการศึกษาวิจัยถึงอิทธิพลของของเหลว ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึงเหล็กคาร์บอนเกรด SPCC ด้วยกระบวนการการเคลื่อนที่ของของเหลว นอกจากชนิดของของเหลวซึ่งแบ่งตามความหนืดแล้ว ยังได้มีการนำเอาปัจจัยร่วมเพื่อประกอบการศึกษาในครั้งนี้ คือ แรงดันของเหลวภายในห้องแม่พิมพ์ โดยการควบคุมแรงดันในการทดลองที่ 50, 100 และ 150 bar และแรงกดแผ่นทดสอบ โดยใช้สปริงซึ่งมีค่าคงที่สปริง 9.42, 19.62 และ 35.69 N/mm ซึ่งตัวแปรทั้งสามส่งผลกระทบต่อกระบวนการลากขึ้นรูป คือ แรงในการลากขึ้นรูปและแรงกดพื้นที่กระทำต่อแผ่นทดสอบ ความหนาที่เปลี่ยนแปลงหลังการขึ้นรูป ชื้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูป และความเครียดที่ผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป หลังจากนั้นจึงนำผลการทดลองของการลากขึ้นรูปลึงด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลวมาเปรียบเทียบกับกระบวนการลากขึ้นรูปลึงแบบปกติ เพื่อพิจารณาถึงข้อดีและข้อเสียของการลากขึ้นรูปลึงโดยใช้ของเหลว ซึ่งผลการทดลองที่แสดงในบทนี้จะเป็นผลการทดลองที่ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูล และการคำนวณค่าจากข้อมูลดิบในภาคผนวก ก เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่ผลกระทบในการทำงานของกระบวนการลากขึ้นรูปลึง

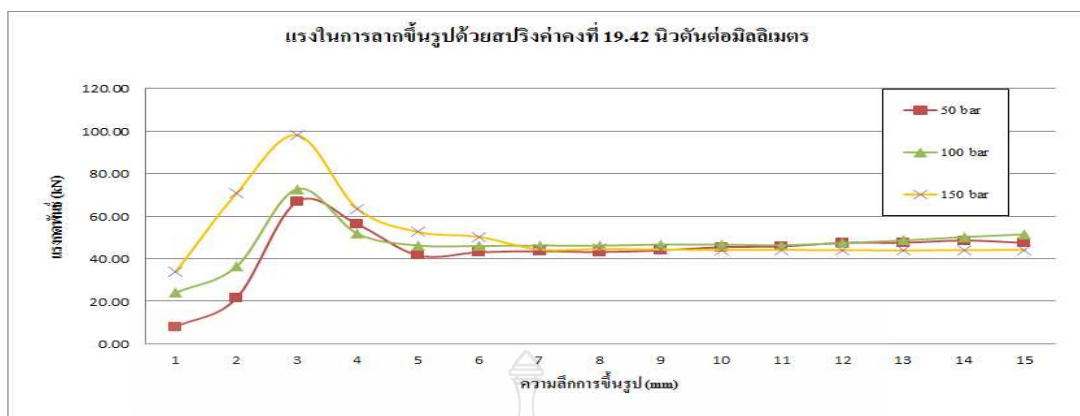
4.1 แรงในการลากขึ้นรูป

แรงในการลากขึ้นรูปเป็นตัวแบบที่มีความสำคัญในกระบวนการลากขึ้นรูปลึง เนื่องมาจากแรงในการลากขึ้นรูปส่งผลกระทบต่อตัวแปรอื่นๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

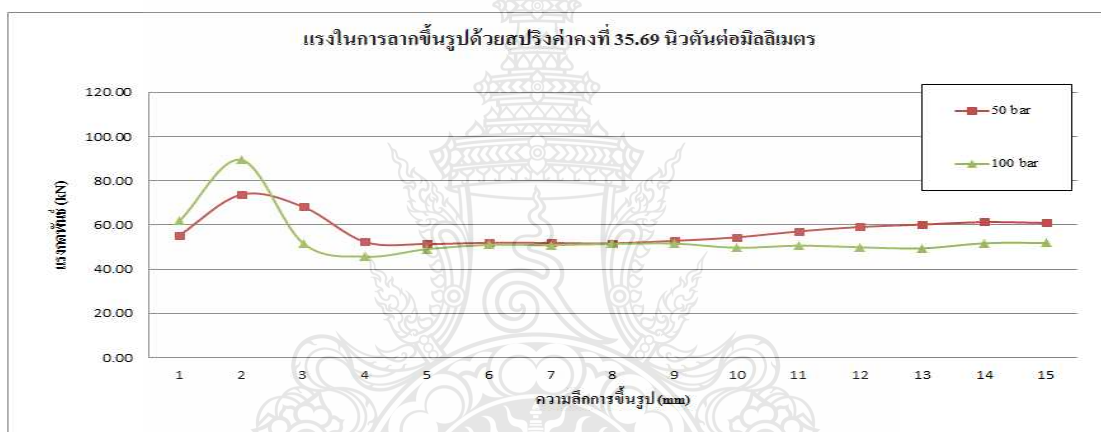
4.1.1 การลากขึ้นรูปลึงด้วยของเหลวค่าความหนืด 68 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที



ภาพที่ 4.1 ผลการทดลองการขึ้นรูปด้วยสปริงค่าคงที่ 9.42 N/mm



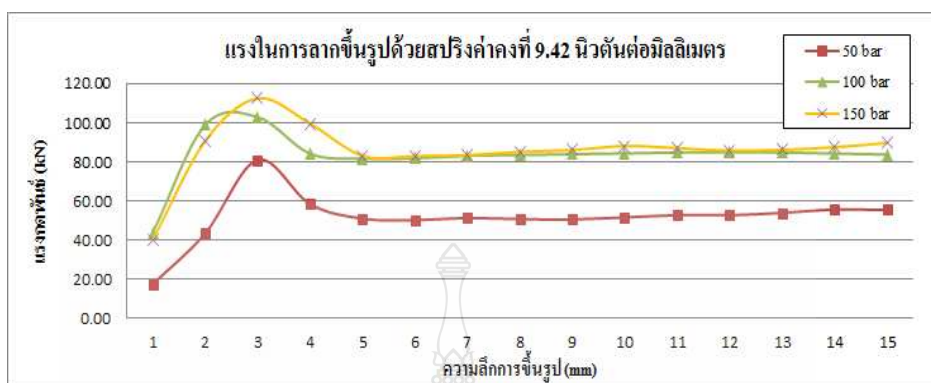
ภาพที่ 4.2 ผลการทดลองการขึ้นรูปด้วยสปริงค่าคงที่ 19.62 N/mm



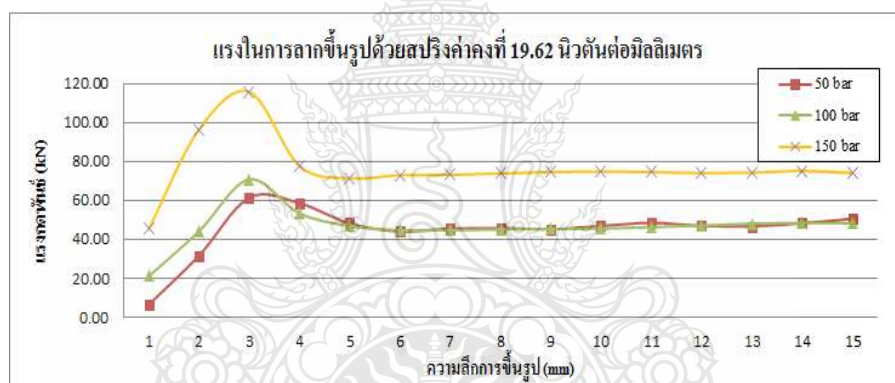
ภาพที่ 4.3 ผลการทดลองการขึ้นรูปด้วยสปริงค่าคงที่ 35.69 N/mm

แผนภาพที่ 4.1 - 4.3 แสดงผลการทดลองการลากขึ้นรูปลึกลงด้วยแรงกดขึ้นงาน ทั้ง 3 ค่าคงที่สปริง ที่การลากขึ้นรูปด้วยความลึกสูงสุด 15 mm หรือ 18.75% ของขนาดชิ้นงานเริ่มต้น ที่อัตราส่วนการขึ้นรูป 1.8 พบว่าเมื่อแรงดันของเหลวที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลทำให้แรงในการลากขึ้นรูปมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยการลากขึ้นรูปที่แรงดันของเหลว 150 bar ของการลากขึ้นรูปด้วยสปริงค่าคงที่ 9.42 N/mm แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดเท่ากับ 98.86 kN และ การลากขึ้นรูปด้วยสปริงค่าคงที่ 19.62 N/mm แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดเท่ากับ 99.29 kN ตามลำดับ สำหรับที่การลากขึ้นรูปด้วยสปริงค่าคงที่ 35.69 N/mm ไม่สามารถขึ้นรูปที่แรงดัน 150 bar ได้ ดังนั้นแรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดจึงเกิดขึ้นที่การขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว 100 bar มีค่าเท่ากับ 89.52 kN

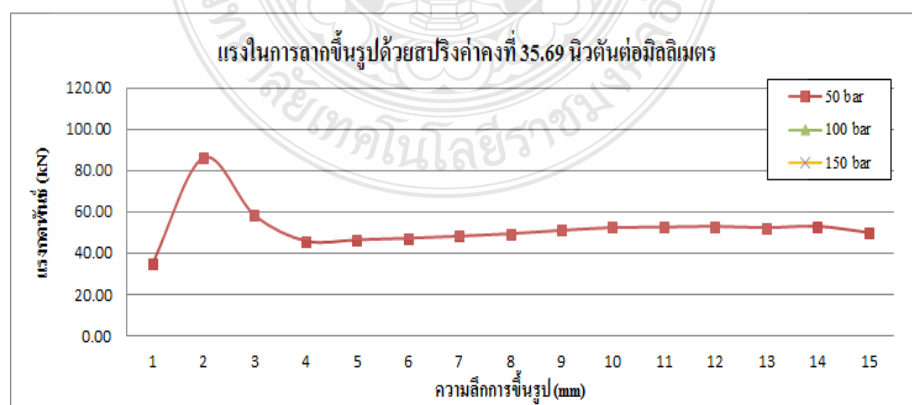
4.1.2 การลากขึ้นรูปลึกด้วยของเหลวค่าความหนืด 46 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที



ภาพที่ 4.4 ผลการทดลองการขึ้นรูปด้วยสปริงค่าคงที่ 9.42 N/mm



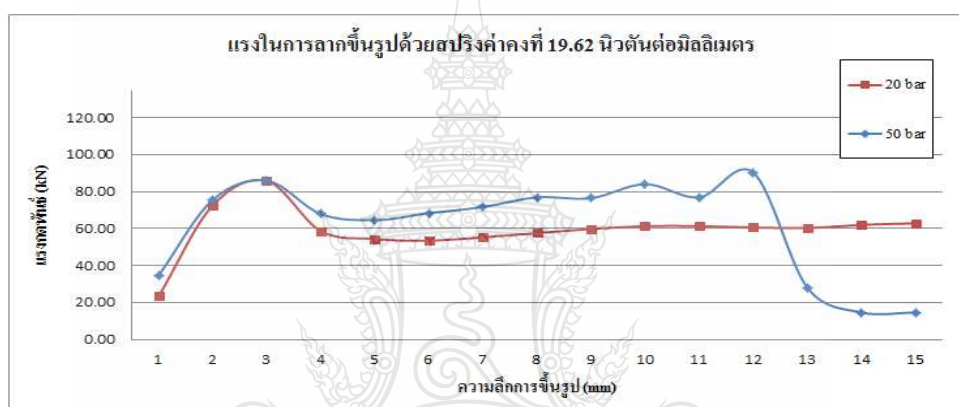
ภาพที่ 4.5 ผลการทดลองการขึ้นรูปด้วยสปริงค่าคงที่ 19.62 N/mm



ภาพที่ 4.6 ผลการทดลองการขึ้นรูปด้วยสปริงค่าคงที่ 35.69 N/mm

ภาพที่ 4.4 - 4.6 แสดงผลการทดลอง พบว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกับการทดลองที่ของเหลวความหนืด VG 68.98 การลากขึ้นรูปลึกโดยใช้แรงกดสปริงทั้ง 3 ค่าคงที่สปริง เมื่อแรงดันของเหลวเพิ่มสูงขึ้น แรงในการลากขึ้นรูปมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น โดยการขึ้นรูปด้วยสปริงค่าคงที่ 9.42 N/mm มีค่าแรงในการลากขึ้นรูปเท่ากับ 112.35 kN และการขึ้นรูปด้วยสปริงค่าคงที่ 19.62 N/mm มีค่าแรงในการลากขึ้นรูปเท่ากับ 115.70 kN ที่การขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว 150 bar ในขณะที่การลากขึ้นรูปด้วยสปริงค่าคงที่ 35.69 N/mm สามารถขึ้นรูปได้ที่แรงดันของเหลว 50 bar เพียงค่าเดียว โดยมีค่าแรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดเท่ากับ 86.17 kN

4.1.3 การลากขึ้นรูปลึกด้วยของเหลวค่าความหนืด 32 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที



ภาพที่ 4.7 ผลการทดลองการขึ้นรูปด้วยสปริงค่าคงที่ 19.62 N/mm

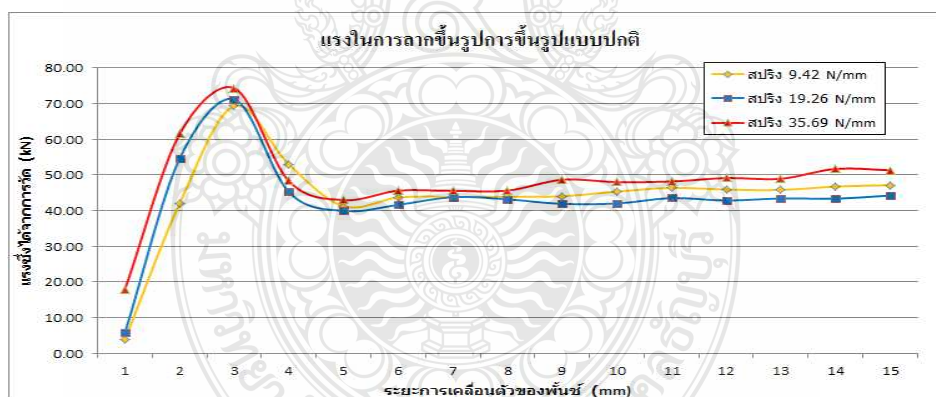
ภาพที่ 4.7 แผนภาพแสดงผลการทดลองของการลากขึ้นรูปลึก ด้วยของเหลวซึ่งมีค่าความหนืด VG 32 โดยการใช้สปริงซึ่งมีค่าคงที่ 19.62 N/mm โดยสามารถขึ้นรูปได้เพียงค่าแรงดันของเหลวที่ 20 bar ค่าแรงในการลากขึ้นรูปเท่ากับ 82.65 kN สำหรับแรงดันอื่นๆ และการลากขึ้นรูปโดยใช้สปริงค่าคงที่ 9.42 และ 35.69 N/mm ไม่สามารถขึ้นรูปได้

จากการทดลองการลากขึ้นรูปลึกโดยใช้ของเหลวที่มีค่าความหนืดทั้ง 3 ค่า ขึ้นรูปที่แรงดันของเหลว 50 100 และ 150 bar ด้วยแรงกดแผ่นทดสอบโดยใช้สปริงแม่พิมพ์ซึ่งมีค่าคงที่สปริงแตกต่างกัน 3 ค่า สามารถสรุปได้ว่า แรงดันของเหลวที่เพิ่มขึ้น และแรงกดแผ่นทดสอบที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้น จนในทีบางค่าแรงดันและแรงกดแผ่นทดสอบ ไม่สามารถทำการขึ้นรูปได้ และเมื่อพิจารณาเฉพาะในสภาวะที่สามารถขึ้นรูปได้ พบว่าการขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวค่าความหนืด VG 68 แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดเกิดขึ้นที่แรงดัน 150 bar ด้วยการขึ้นรูปโดย

ใช้สปริงค่าคงที่ 19.62 N/mm เท่ากับ 99.29 kN การขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวค่าความหนืด VG 46 แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดเกิดขึ้นที่แรงดัน 150 bar ด้วยการขึ้นรูปโดยใช้สปริงค่าคงที่ 19.62 N/mm เท่ากับ 115.70 kN การขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวค่าความหนืด VG 32 แรงในการลากขึ้นรูปสูงสุดเกิดขึ้นที่แรงดัน 50 bar ด้วยการขึ้นรูปโดยใช้สปริงค่าคงที่ 19.62 N/mm เท่ากับ 90.28 kN

จากผลการทดลองที่กล่าวมานั้น พบว่าแรงดันของเหลวมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของแรงในการลากขึ้นรูป ซึ่งได้จากการวัดค่าแรงดันนั้น เป็นผลเนื่องมาจากแรงกดจากเครื่องปั๊ม ที่พยายามเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่ของพื้นผิวจากแรงดันของเหลว เมื่อแรงดันของเหลวภายในห้องแม่พิมพ์เพิ่มสูงขึ้น จะทำให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ของพื้นผิวเพิ่มขึ้นด้วย ตามทฤษฎีกลศาสตร์ของไหลที่กล่าวมาตามบทที่ 2 [26-27] โดยสภาวะดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lihui Lang [22] ในปี ค.ศ. 2002 ซึ่งทำการศึกษาดูผลของแรงดันของเหลวภายในแม่พิมพ์ ที่มีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูปเล็ก ด้วยการนำพลศาสตร์ของไหลหรือการเคลื่อนที่ของของเหลว เข้ามาช่วยในกระบวนการลากขึ้นรูปเล็ก อลูมิเนียมผสมเกรด A16016-T4 และแรงต้านแรงกดพื้นผิวจากแรงดันของเหลวนั้น เป็นตัวแปรที่มีส่วนสำคัญต่อชิ้นงานที่ได้หลังจากการขึ้นรูป

4.1.4 การลากขึ้นรูปเล็กโดยไม่ใช้ของเหลว ซึ่งก็คือการลากขึ้นรูปเล็กแบบปกติ



ภาพที่ 4.8 แรงในการลากขึ้นรูปการขึ้นรูปด้วยสปริงค่าคงที่ทั้ง 3 ค่า

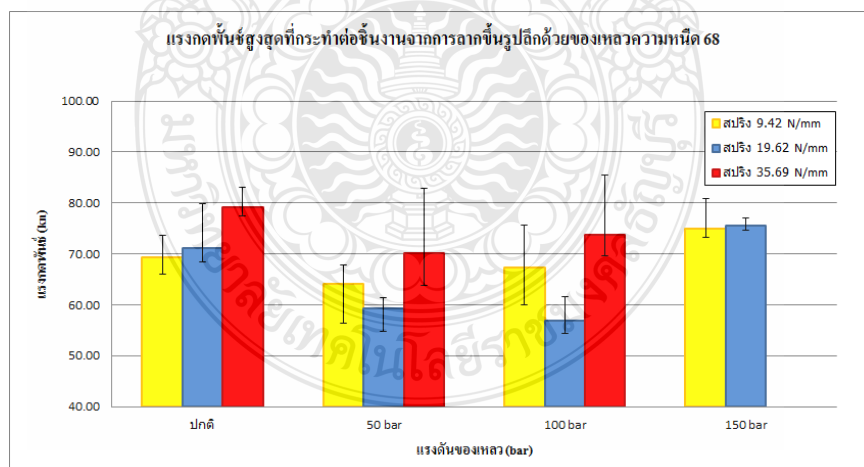
ภาพที่ 4.8 แผนภาพแสดงถึงแรงในการลากขึ้นรูปที่เกิดขึ้น ในการทดลองลากขึ้นรูปเล็กโดยไม่ใช้แรงดันของของเหลว จากผลการทดลองพบว่า แรงกดแผ่นทดสอบส่งผลต่อแรงในการลากขึ้นรูป ซึ่งที่การลากขึ้นรูปโดยใช้สปริงค่าคงที่ 19.62 N/mm ซึ่งเป็นค่าแรงกดที่สอดคล้องตามทฤษฎีการคำนวณในบทที่ 2 มากที่สุด ผลของแรงในการลากขึ้นรูป มีแนวโน้มที่เกิดแรงในการลากขึ้นรูปต่ำกว่า

เมื่อใช้สปริงค่าคงที่ 9.42 และ 35.69 N/mm ทั้งนี้เนื่องมาแรงกดชิ้นงานที่มีค่าต่ำกว่าทฤษฎีนั้นชิ้นงานจะเกิดปัญหารอยร่นที่ปากถ้วย ซึ่งส่งผลกระทบต่อความสามารถในการไหลตัวของวัสดุในขณะทำการขึ้นรูป และเมื่อใช้แรงกดชิ้นงานที่สูงกว่าทฤษฎี พบว่าชิ้นงานถูกบีบอัดจนส่งผลกระทบต่อความสามารถในการไหลตัวของวัสดุเช่นเดียวกัน แต่จะส่งผลกระทบต่อความเสียหายของชิ้นงานในลักษณะของการร้าวที่ผิวของชิ้นงาน [17-18]

4.2 แรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงาน

ในการพิจารณาถึงแรงในการลากชิ้นรูปนั้น ไม่สามารถพิจารณาเฉพาะแรงกดพื้นที่ทั้งหมดที่ได้จากผลการทดลองเพียงอย่างเดียว เนื่องจากเป็นกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงแรงด้านการเคลื่อนที่ของพื้นที่จากแรงดันของของเหลวด้วย โดยทฤษฎีในบทที่ 2 ทำการคำนวณแรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงาน โดยใช้สมการที่ 2.14 และในการพิจารณานั้นจำเป็นต้องใช้จุดที่เกิดแรงสูงสุด เนื่องจากในบางสภาวะของการทดลอง เกิดความเสียหายขึ้นกับชิ้นงานในการทดสอบที่แรงกระทำสูงสุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hyunok Kim [34] ในปี 2009 ซึ่งใช้แรงกดพื้นที่สูงในการพิจารณาถึงอิทธิพลของสารหล่อลื่นในการลากขึ้นรูปลึกโลหะ DP590 GA

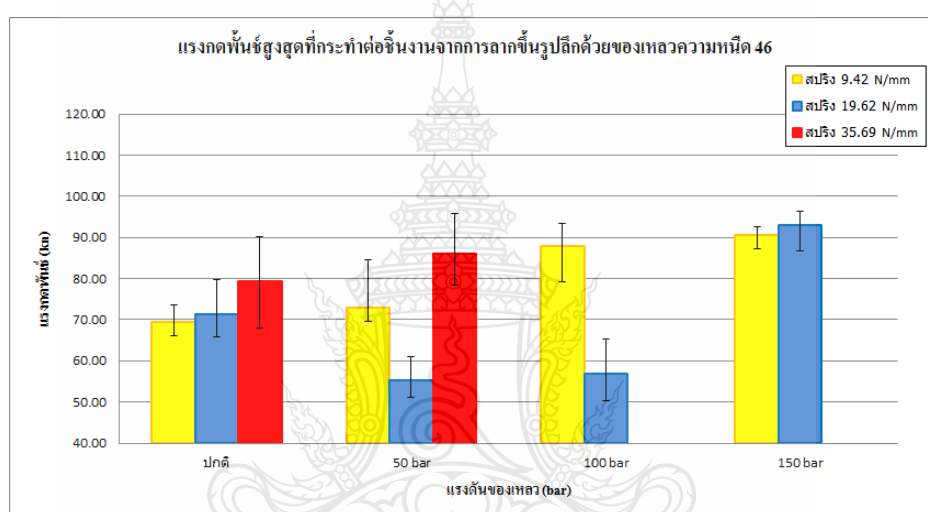
4.2.1 การทดลองลากขึ้นรูปโดยใช้ของเหลว VG 68



ภาพที่ 4.9 แรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 68

ภาพที่ 4.9 แสดงแรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงาน พบว่าการลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว ส่งผลทำให้แรงกดพื้นที่กระทำต่อแผ่นทดสอบลดลงในช่วงแรงดันหนึ่ง หลังจากนั้นแรงกดพื้นที่กระทำต่อแผ่นทดสอบจะเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง กดพื้นที่กระทำต่อแผ่นทดสอบสูงสุดเกิดขึ้นที่การขึ้นรูปแบบปกติด้วยแรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm เท่ากับ 79.24 kN แรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานต่ำสุด เกิดขึ้นที่การขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว 100 bar โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm เท่ากับ 56.89 kN

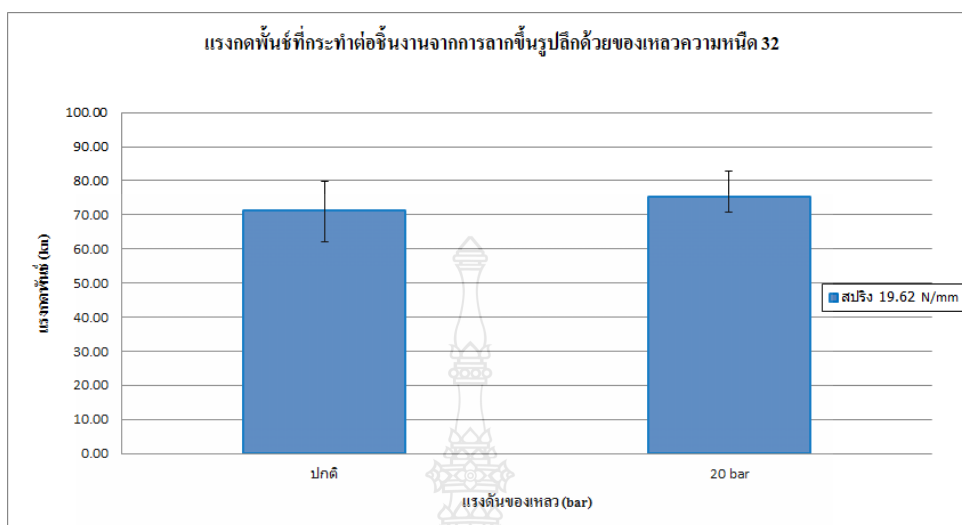
4.2.2 การทดลองลากขึ้นรูปโดยใช้ของเหลว VG 46



ภาพที่ 4.10 แรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานจากการขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 46

ภาพที่ 4.10 แสดงผลการทดลองแรงกดพื้นที่สูงสุดที่กระทำต่อแผ่นทดสอบ พบว่าการลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว ส่งผลทำให้แรงกดพื้นที่กระทำต่อแผ่นทดสอบลดลงในช่วงแรงดันหนึ่ง หลังจากนั้นแรงกดพื้นที่กระทำต่อแผ่นทดสอบจะเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง และสำหรับการทดลองโดยใช้ของเหลวค่าความหนืด VG 46 แรงกดพื้นที่กระทำต่อแผ่นทดสอบสูงสุดเกิดขึ้นที่การขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว 150 bar โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm เท่ากับ 93.00 kN และต่ำสุดเกิดขึ้นที่การขึ้นรูปด้วยแรงดัน 50 bar โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm เท่ากับ 55.27 kN

4.2.3 การทดลองลากขึ้นรูปโดยใช้ของเหลว VG 32



ภาพที่ 4.11 แรงกดพื้นที่ที่กระทำต่อชิ้นงานจากการทดลองของเหลว VG 32

ภาพที่ 4.11 เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง การขึ้นรูปแบบธรรมดากับการขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวแรงกดพื้นที่มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น และสำหรับของเหลวความหนืด VG 32 สามารถขึ้นรูปได้ที่แรงดัน 20 bar โดยใช้แรงกดแผ่นทดสอบเป็นสปริงค่าคงที่ 19.62 N/mm เพียงค่าเดียว แรงกดพื้นที่สูงสุดที่กระทำต่อแผ่นทดสอบเท่ากับ 80.05 kN

จากผลการทดลองที่กล่าวมาเมื่อพิจารณาถึงแรงกดพื้นที่ที่กระทำต่อชิ้นงาน จากการลากขึ้นรูปด้วยของเหลวทั้ง 3 ชนิด ตามความหนืดของของเหลว พิจารณาในแต่ละแรงดันของเหลวพบว่าเมื่อแรงกดสปริงเพิ่มขึ้น แรงกดพื้นที่ที่กระทำต่อชิ้นงาน มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นตามทฤษฎีของการลากขึ้นรูป เนื่องจากจากแรงกดแผ่นทดสอบมีผลทำให้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Soumya Subramonian [35] ในปี 2009 ซึ่งทำการศึกษาทดลองถึงความสัมพันธ์อิทธิพลของแรงกดชิ้นงาน กับแรงกดพื้นที่ในกระบวนการลากขึ้นรูปโดยใช้สารหล่อลื่นชนิดต่างๆ และ วิเชียร เกื้อนเครือวัลย์ [36] ซึ่งศึกษาทดลองถึงอิทธิพลของแรงกดชิ้นงาน และแรงเสียดทานที่มีผลต่อกระบวนการลากขึ้นรูป ด้วยการจำลองการลากขึ้นรูป แต่สำหรับในสถานะของการขึ้นรูปด้วยแรงกดชิ้นงานที่ 19.62 N/mm ด้วยของเหลวความหนืด 68 ที่แรงดันของเหลว 100 bar แรงกดพื้นที่ที่กระทำต่อชิ้นงานจะมีค่าต่ำกว่า และสถานะของการลากขึ้นรูปที่แรงดัน 50 bar และของเหลวความหนืด 46 ด้วยแรงดัน 100 bar แรงกดพื้นที่ที่กระทำต่อชิ้นงานไม่แตกต่างกันมากนัก

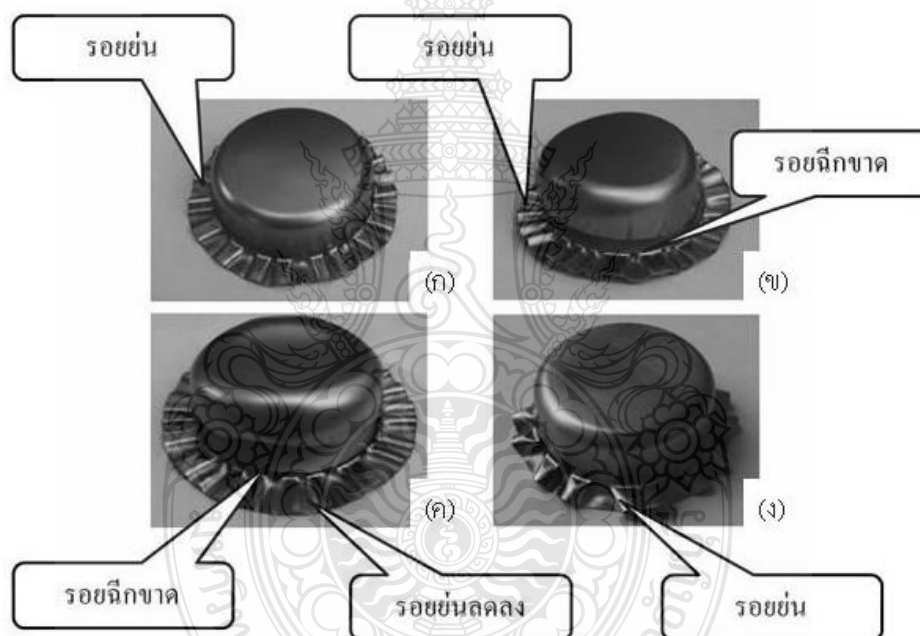
และสามารถขึ้นรูปได้ด้วยของเหลวทั้ง 3 ชนิด อันเนื่องมาจากค่าแรงกดดังกล่าวเป็นสภาวะซึ่งได้จากการคำนวณตามทฤษฎีการลากขึ้นรูป

4.3 ชิ้นงานที่ได้หลังการลากขึ้นรูป

ชิ้นงานที่ได้หลังจากการลากขึ้นรูปเป็นอีกหนึ่งอิทธิพล เนื่องจากตัวแปรต่างๆ ทั้งความหนืดของเหลว แรงดันของเหลวและแรงกดแผ่นทดสอบ ซึ่งการสรุปผลการทดลองดังต่อไปนี้ จะเป็นไปตามทฤษฎีการลากขึ้นรูปลึก โดยการตรวจสอบชิ้นงานด้วยสายตา (Visual Check)

4.3.1 ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 68

ก. การลากขึ้นรูปด้วยแรงกดแผ่นทดสอบสปริงค่าคงที่ 9.42 N/mm



(ก) การลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว 50 bar

(ข) การลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว 100 bar

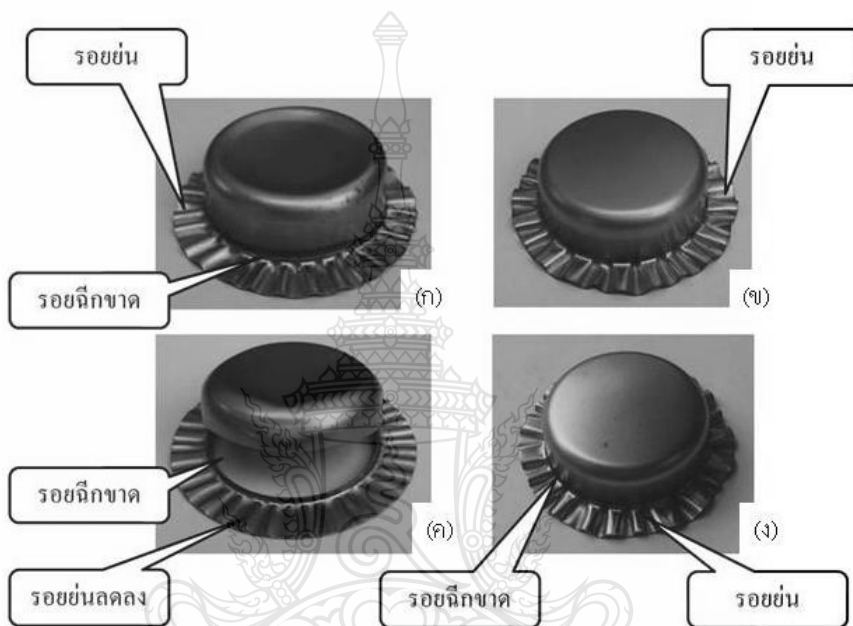
(ค) การลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว 150 bar

(ง) การลากขึ้นรูปแบบธรรมดา

ภาพที่ 4.12 ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 68 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm

ภาพที่ 4.12 แสดงผลการทดลองการลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว (ก) 50 bar (ข) 100 bar และ 150 bar พบว่ารอย่นที่ปากถ้วยลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการลากขึ้นรูปแบบธรรมดาในภาพที่ 4.12 (ง) แต่ชิ้นงานมีแนวโน้มของรอยฉีกขาดที่ผิวเพิ่มมากขึ้น เมื่อใช้แรงดันของเหลว 100 และ 150 bar

ข. การลากขึ้นรูปด้วยแรงกดแผ่นทดสอบสปริงค่าคงที่ 19.62 N/mm

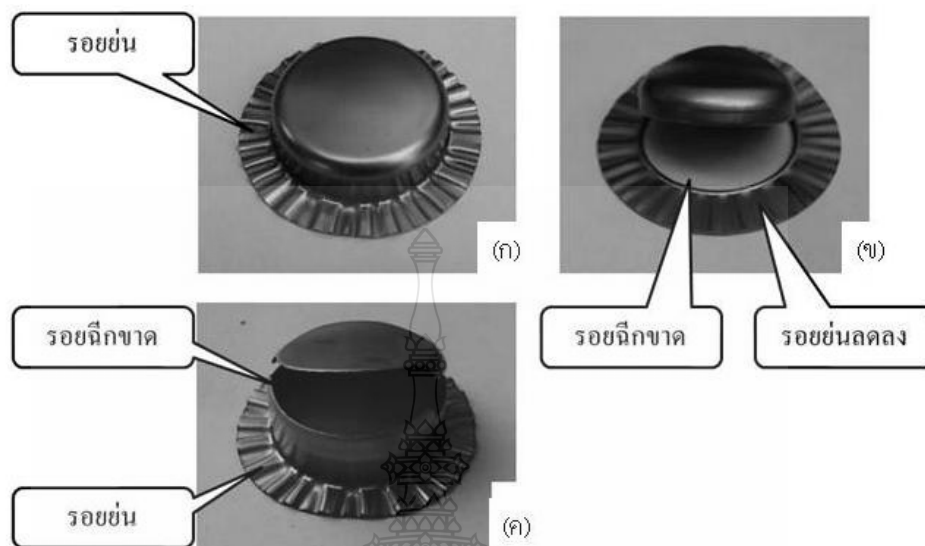


- (ก) การลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว 50 bar
 (ข) การลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว 100 bar
 (ค) การลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว 150 bar
 (ง) การลากขึ้นรูปแบบธรรมดา

ภาพที่ 4.13 ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 68 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm

ภาพที่ 14.13 แสดงการทดลองโดยการขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 68 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm (ก) 50 bar (ข) 100 bar และ (ค) 150 bar พบว่ารอย่นที่ปากถ้วยมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการลากขึ้นรูปแบบธรรมดาในภาพที่ 4.13 (ง) เมื่อแรงดันของเหลวของเหลวให้สูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันรอยฉีกขาดที่ผิวเกิดขึ้นที่การขึ้นรูปแบบปกติ กับการขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลวที่ 50 และ 150 bar และการขึ้นรูปที่แรงดันของเหลว 100 bar ไม่พบรอยฉีกขาดที่ผิวของชิ้นงาน

ค. การลากขึ้นรูปด้วยแรงกดแผ่นทดสอบสปริงค่าคงที่ 35.69 N/mm



(ก) การลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว 50 bar

(ข) การลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว 100 bar

(ค) การลากขึ้นรูปแบบธรรมดา

ภาพที่ 4.14 ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 68 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm

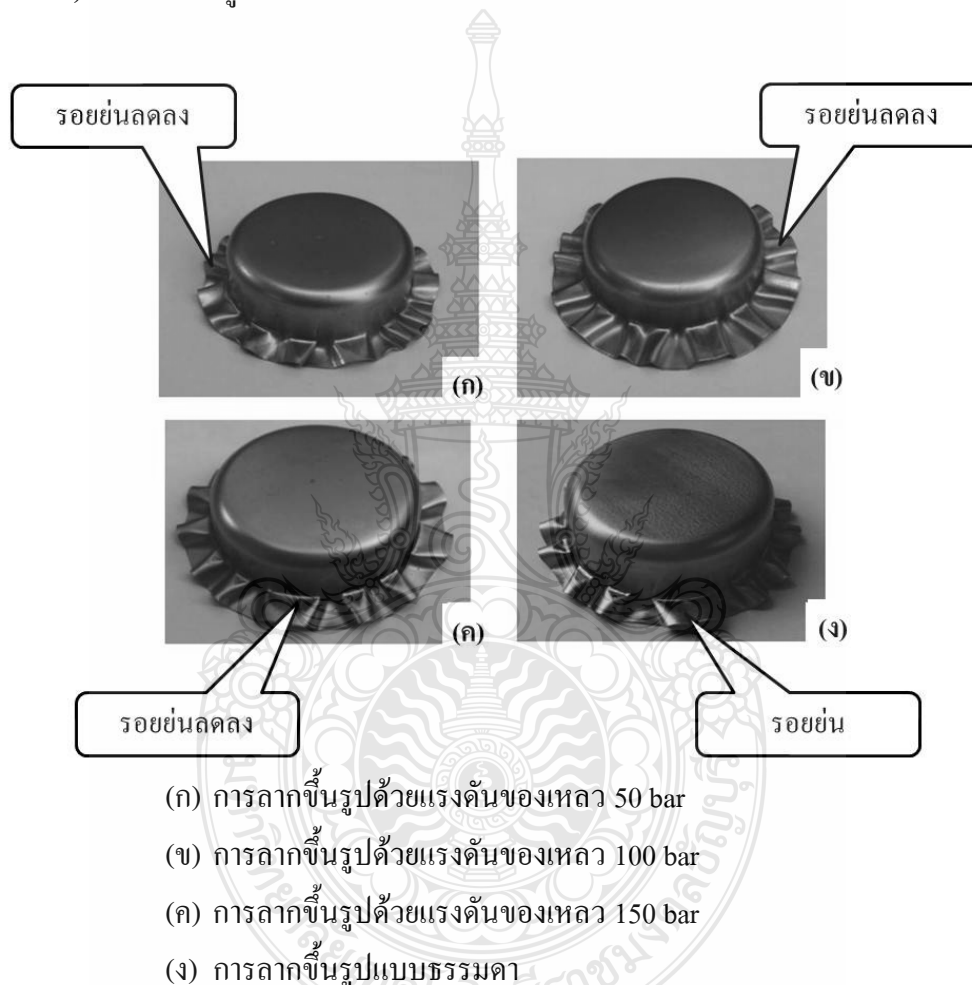
ภาพที่ 4.14 แสดงการทดลองลากขึ้นรูปโดยใช้ น้ำมันไฮดรอลิกเกรด 68 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm ที่การขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว 150 bar ไม่สามารถขึ้นรูปได้เนื่องจากแรงกดพันซ์สูงจนชิ้นงานเสียหาย ในส่วนของรอยย่นที่ปากถ้วยเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างการขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว พบว่ารอยย่นที่ปากถ้วยมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มแรงดันของเหลว และรอยฉีกขาดที่ผิวชิ้นงาน พบว่าการขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปด้วยแรงดัน 100 bar สำหรับการขึ้นรูปโดยใช้แรงดัน 50 bar ไม่พบรอยฉีกขาดที่ผิวชิ้นงาน

จากการทดลองการขึ้นรูปโดยใช้ของเหลว VG 68 พบว่า แรงดันของของเหลวที่ใช้ในการขึ้นรูปส่งผลต่อการลดลงของรอยย่นที่ปากถ้วย เนื่องจากแรงดันของเหลวเข้าไปช่วยในการลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นงานด้านล่างกับส่วนบนของคาน ในขณะที่เดียวกันยังทำหน้าที่ในการเพิ่มแรงกดด้านล่างของพื้นที่ผิวสัมผัสวงแหวนของปีกถ้วยให้แนบกับแผ่นกดชิ้นงานมากขึ้น ซึ่งสถานะดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nader Abedrabbo [37] ในปี 2005 โดยทำการศึกษาถึง

พฤติกรรมการเกิดรอยร่นที่ปากถ้วยของการขึ้นรูปของอลูมิเนียม 6111-T4 ด้วยการขึ้นรูปด้วยของเหลว พบว่าแรงดันของของเหลวเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดและการควบคุมรอยร่นที่ปากถ้วย เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการขึ้นรูปด้วยของเหลวกับสถานะปกติ นอกเหนือจากตัวแปรที่สำคัญคือแรงกดขึ้นงาน

4.3.2 ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 46

1) การลากขึ้นรูปด้วยแรงกดแผ่นทดสอบสปริงค่าคงที่ 9.42 N/mm

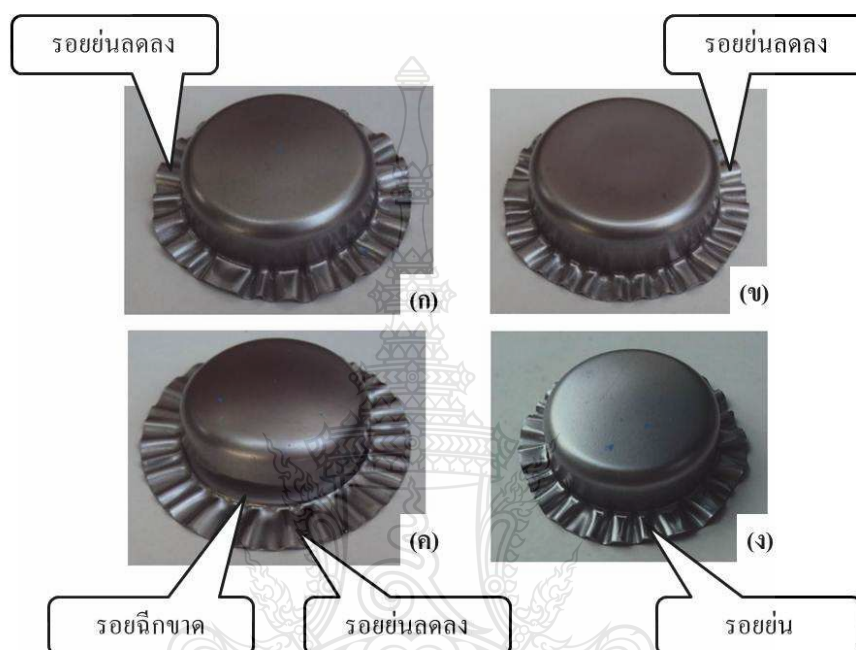


ภาพที่ 4.15 ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 46 ด้วยแรงกดขึ้นงาน 9.42 N/mm

ภาพที่ 4.15 แสดงการทดลองลากขึ้นรูปโดยใช้ของเหลว VG 46 ด้วยแรงกดขึ้นงาน 9.42 N/mm พบว่า รอยร่นที่ปากถ้วยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการลากขึ้นรูปแบบปกติ กับการลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว รอยร่นลดลง และเมื่อเพิ่มแรงดันในการลากขึ้นรูป รอยร่นที่ปากถ้วยลดลง

ในขณะที่รอยฉีกขาดที่ผิวของชิ้นงานทั้งการลากขึ้นรูปแบบปกติ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการทดลองโดยใช้ของเหลว VG 68 กับการลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลวที่ 50 100 และ 150 bar ไม่พบรอยฉีกขาดที่ผิวชิ้นงาน

2) การลากขึ้นรูปด้วยแรงกดแผ่นทดสอบสปริงค่าคงที่ 19.62 N/mm



(ก) การลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว 50 bar

(ข) การลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว

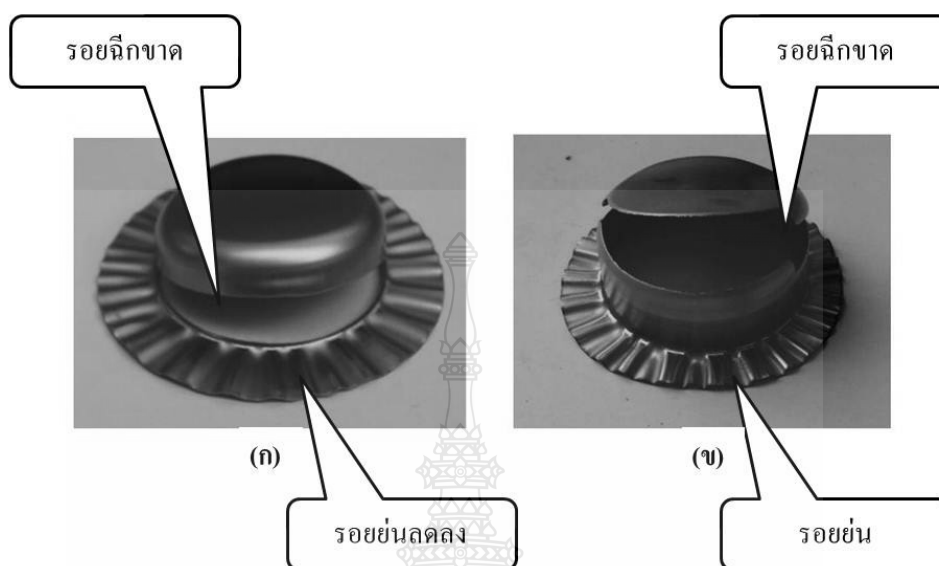
(ค) การลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว 150 bar

(ง) การลากขึ้นรูปแบบธรรมดา

ภาพที่ 4.16 ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 46 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm

ภาพที่ 4.16 แสดงการทดลองลากขึ้นรูปโดยใช้ของเหลว VG 46 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm พบว่ารอยย่นที่ปากถ้วยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการลากขึ้นรูปแบบปกติ กับการลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว พบว่ารอยย่นที่ปากถ้วยลดลงเมื่อใช้แรงดันของเหลว และเมื่อเพิ่มแรงดันในการทดลอง รอยย่นที่ปากถ้วยจะลดลงตามลำดับ ในขณะที่รอยฉีกขาดที่ผิวชิ้นงานเกิดขึ้นที่การขึ้นรูปแบบปกติ และการขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว 150 bar

3) การลากขึ้นรูปด้วยแรงกดแผ่นทดสอบสปริงค่าคงที่ 35.69 N/mm



(ก) การลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว 50 bar

(ข) การลากขึ้นรูปแบบธรรมดา

ภาพที่ 4.17 ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 46 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm

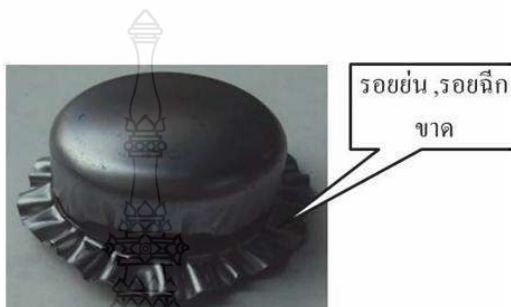
ภาพที่ 4.17 แสดงการทดลองลากขึ้นรูปโดยใช้ของเหลว VG 46 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm ที่การลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลวที่ 100 และ 150 bar ชิ้นงานเกิดการฉีกขาดไม่สามารถขึ้นรูปได้สำเร็จ ในส่วนของรอยย่นที่ปากถ้วยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการลากขึ้นรูปแบบปกติกับการลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลวที่แรงดัน 50 bar พบว่ารอยย่นที่ปากถ้วยลดลงเมื่อทดลองลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว ในขณะที่พบรอยฉีกขาดที่ผิวของชิ้นงานทั้งการลากขึ้นรูปแบบปกติกับการลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลวที่ 50 bar



(ก) การขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 46 ที่ 100 bar



(ข) การขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 68 ที่ 100 bar



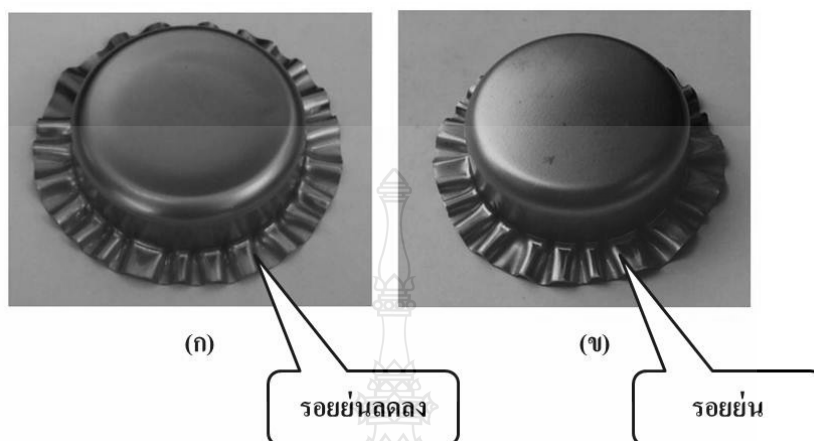
(ค) การขึ้นรูปแบบปกติ โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm

ภาพที่ 4.18 เปรียบเทียบชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

ภาพที่ 4.18 เมื่อพิจารณาถึงรอยฉีกขาดของชิ้นงานพบว่า แรงดันของเหลวมีผลกระทบโดยตรงต่อการเกิดรอยฉีกขาดที่ผิวของชิ้นงาน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า การขึ้นรูปด้วยของเหลวค่าความหนืด 46 และ 68 เกิดรอยฉีกขาดอย่างรุนแรงของชิ้นงาน เนื่องจากแรงดันของเหลวมีผลกระทบโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของแรงกดพื้นที่ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว [22] หรืออาจกล่าวโดยสรุปได้ว่าการฉีกขาดของชิ้นงานเป็นผลมาจากแรงกดพื้นที่เพิ่มสูงขึ้น จากแรงดันของเหลวที่เพิ่มสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานซึ่งทำการขึ้นรูปแบบปกติ พิจารณาการขึ้นรูปโดยใช้แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm ซึ่งเป็นสถานะตามทฤษฎีการคำนวณ พบว่ารอยฉีกขาดของชิ้นงานมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อทำการขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวค่าความหนืด 68 ที่แรงดัน 100 bar การขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวค่าความหนืด 46 ที่ 50 bar และ 100 bar และการขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวค่าความหนืด 32 ที่ 20 bar ซึ่งเป็นผลเนื่องจาก เป็นสถานะของแรงดันที่มีความเหมาะสมต่อการต้านทานแรงกดของพื้นที่ที่กระทำต่อชิ้นงาน โดยไม่ส่งผลให้แรงกดพื้นที่เพิ่มสูงขึ้นในอัตราที่รวดเร็วจากแรงดันของแรงดันของเหลว [22, 30]

4.3.3 ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 32

การลากขึ้นรูปด้วยแรงกดแผ่นทดสอบสปริงค่าคงที่ 19.62 N/mm



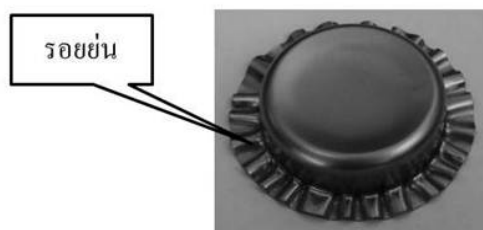
(ก) การลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว 20 bar

(ข) การลากขึ้นรูปแบบธรรมดา

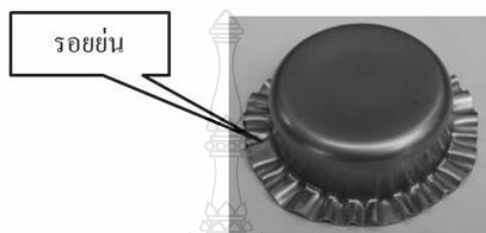
ภาพที่ 4.19 ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 32 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm

ภาพที่ 4.19 แสดงการทดลองลากขึ้นรูปโดยใช้น้ำมันไฮดรอลิกเกรด 32 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm พบว่ารอยย่นที่ปากถ้วยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการขึ้นรูปแบบปกติกับการลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลวที่ 20 bar รอยย่นที่ปากถ้วยไม่แตกต่างกันมากนัก ในขณะที่รอยฉีกขาดที่ผิวของชิ้นงานพบกับการลากขึ้นรูปแบบปกติ ในส่วนของการลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว 20 bar ไม่พบรอยฉีกขาดที่ผิวของชิ้นงาน สำหรับการทดลองลากขึ้นรูปอีกด้วยแรงดันของเหลว 50 bar ด้วยแรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm ไม่สามารถขึ้นรูปได้สำเร็จ

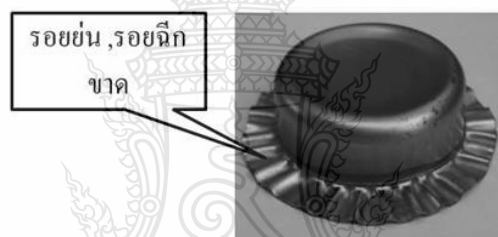
สำหรับการขึ้นรูปโดยใช้แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm และ 35.69 N/mm ที่แรงดัน 20 bar ไม่ได้ทำการทดลอง เนื่องจากผลการทดลองที่ผ่านมาชิ้นงานเกิดความเสียหายฉีกขาด จากแรงกดพื้นผิวมีแนวโน้มเพิ่มในอัตราที่สูง



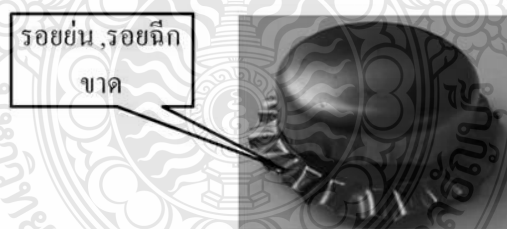
(ก) การขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 32 ที่ 20 bar



(ข) การขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 46 ที่ 50 bar



(ค) การขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 68 ที่ 50 bar



(ง) การขึ้นรูปแบบปกติ โดยใช้แรงกดขึ้นงาน 19.62 N/mm

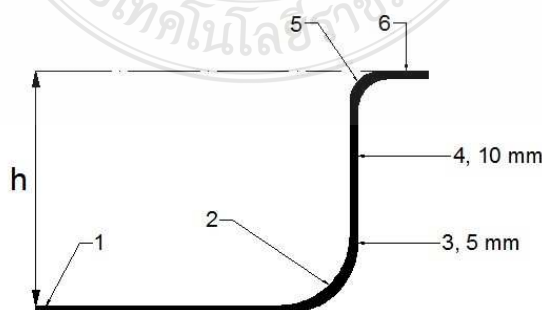
ภาพที่ 4.20 เปรียบเทียบชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

ภาพที่ 4.20 เปรียบเทียบอิทธิพลของการขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวที่มีค่าความหนืดต่างกัน ที่มีต่อชิ้นงานหลังการขึ้นรูป จากรูปเปรียบเทียบผลการทดลองที่ 4.45 และ 4.46 พิจารณาว่าการขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวค่าความหนืด 68 และ 46 ที่แรงดันเดียวกัน คือ 50 bar และ 100 bar โดยการใส่แรงกดขึ้นงาน 19.62 N/mm การเกิดรอยย่นที่ปากถ้วยไม่มีความแตกต่างกันมากนัก เนื่องจากในระหว่าง

การขึ้นรูป ของเหลวไหลเป็นชั้นฟิล์มระหว่างด้านล่างของปีกขึ้นงานกับผิวหน้าของคายตลอดเวลา ด้วยการควบคุมแรงดัน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการหล่อลื่นในลักษณะพลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics) [38] จึงไม่มีการสูญเสียชั้นฟิล์มในการหล่อลื่นจากการกดทับระหว่างขึ้นงานกับคาย ในขณะที่อิทธิพลของการขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวซึ่งมีค่าความหนืดต่างกัน ที่มีต่อการนิกขาดของขึ้นงาน พบว่าการขึ้นรูปด้วยของเหลวค่าความหนืด 68 ที่แรงดัน 100 bar ไม่พบรอยนิกขาดของขึ้นงาน และมีแรงกดพื้นที่กระทำต่อขึ้นงานน้อยที่สุดเท่ากับ 56.89 kN ในขณะที่ การขึ้นรูปด้วยของเหลวค่าความหนืด 46 ที่แรงดัน 50 และ 100 bar ไม่พบรอยนิกขาดของขึ้นงาน และมีแรงกดพื้นที่กระทำต่อขึ้นงานน้อยที่สุดเท่ากับ 55.27 kN และ 56.84 kN ตามลำดับ และการขึ้นรูปด้วยของเหลวค่าความหนืด 32 ที่แรงดัน 20 bar มีแรงกดพื้นที่กระทำต่อขึ้นงานเท่ากับ 75.28 kN และเป็นสถานะเดียวสำหรับของเหลวความหนืด 32 ที่สามารถขึ้นรูปได้ จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าเมื่อทำการขึ้นรูปด้วยของเหลวที่มีความหนืดต่ำลง จะทำให้แรงกดพื้นที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งแรงกดพื้นที่มีผลโดยตรงต่อการเกิดรอยนิกขาดของขึ้นงาน จนกระทั่งในการใช้ของเหลวความหนืด 32 ไม่สามารถขึ้นรูปที่สถานะแรงดันสูงได้ ของเหลวซึ่งมีความหนืดน้อยกว่าจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงที่กระทำต่อพื้นที่ในขณะที่ขึ้นรูปขึ้นงาน (Hydrostatic Counter Pressure) [39] ที่สูงกว่าของเหลวซึ่งมีความหนืดสูงกว่า เนื่องจากของเหลวซึ่งมีความหนืดต่ำ มีการต้านทานการไหลหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่ำ [40]

4.4 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงของขึ้นงานหลังการขึ้นรูป

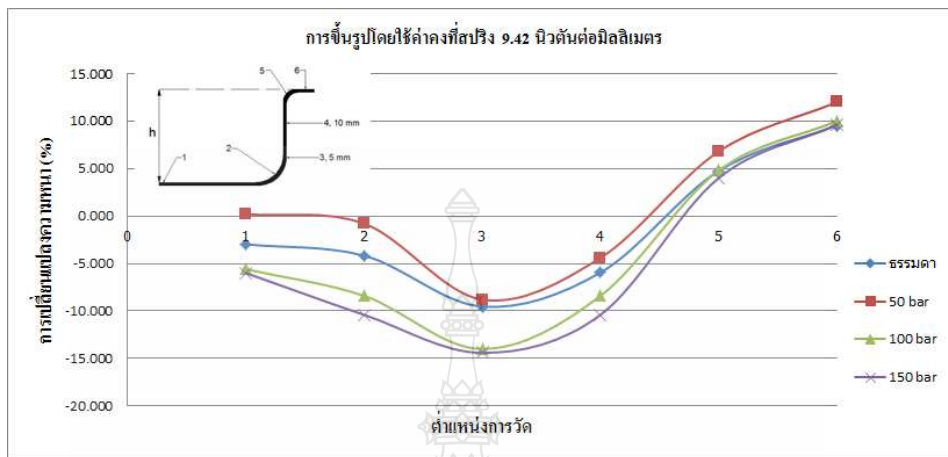
ความหนาของขึ้นงานหลังการขึ้นรูป เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการพิจารณาถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง เนื่องจากความหนาของขึ้นงานหลังการขึ้นรูปแสดงให้เห็นถึงการนิกขาดที่ผิวขึ้นงาน โดยในการสรุปผลการทดลอง เป็นการสรุปเป็นเปอร์เซ็นต์ของความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการขึ้นรูปเปรียบเทียบกับความหนาของขึ้นงานก่อนทำการขึ้นรูป



ภาพที่ 4.21 ตำแหน่งของการวัดความหนาของขึ้นงานหลังการขึ้นรูปตามขั้นตอนการทดลอง

4.4.1 การทดลองการลากขึ้นรูปลึกโดยใช้ของเหลว VG 68

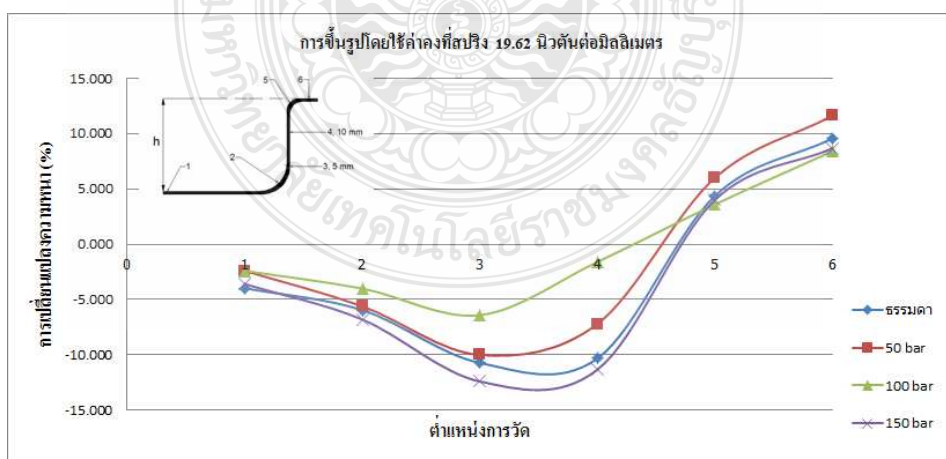
1) การลากขึ้นรูปลึกด้วยแรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm



ภาพที่ 4.22 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

ภาพที่ 4.22 จุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาสูงที่สุดคือ ตำแหน่งที่ 3 และเมื่อเพิ่มแรงดันของเหลว มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาในตำแหน่งที่ 3 ที่เพิ่มมากขึ้น โดยความหนาเปลี่ยนแปลงสูงสุดเท่ากับ -14.4% ที่การลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว 150 bar และความหนาเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดเท่ากับ -8.80% ที่การขึ้นรูปด้วยแรงดัน 50 bar

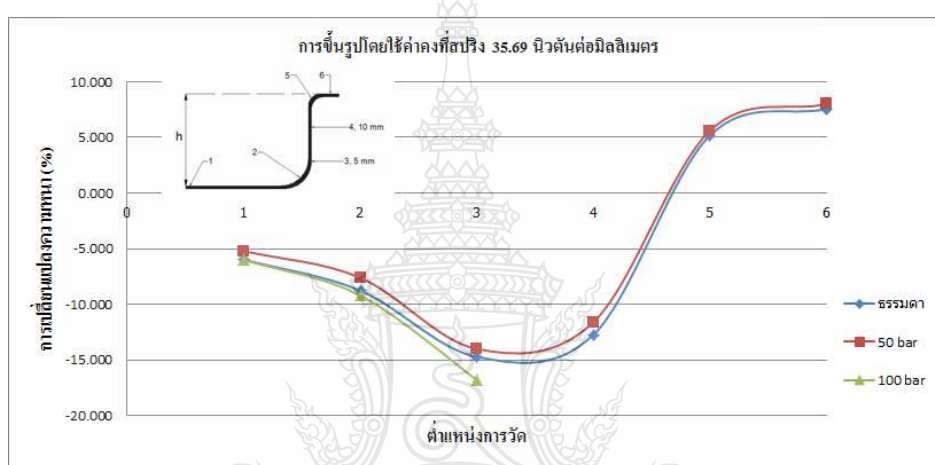
2) การลากขึ้นรูปลึกด้วยแรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm



ภาพที่ 4.23 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

ภาพที่ 4.23 ตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานสูงที่สุดคือ ตำแหน่งที่ 3 และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการลากขึ้นรูปแบบปกติกับการลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลวพบว่า การลากขึ้นรูปแบบปกติกับการลากขึ้นรูปที่แรงดันของเหลว 50 bar ผลการทดลองไม่แตกต่างกันมากนัก และสำหรับการทดลองที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาในตำแหน่งที่ 3 สูงที่สุดเท่ากับ -12.4% ที่การลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว 150 bar และต่ำสุดเท่ากับ -6.4% ที่การขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว 100 bar

3) การลากขึ้นรูปลึกด้วยแรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm



ภาพที่ 4.24 เปรอ์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

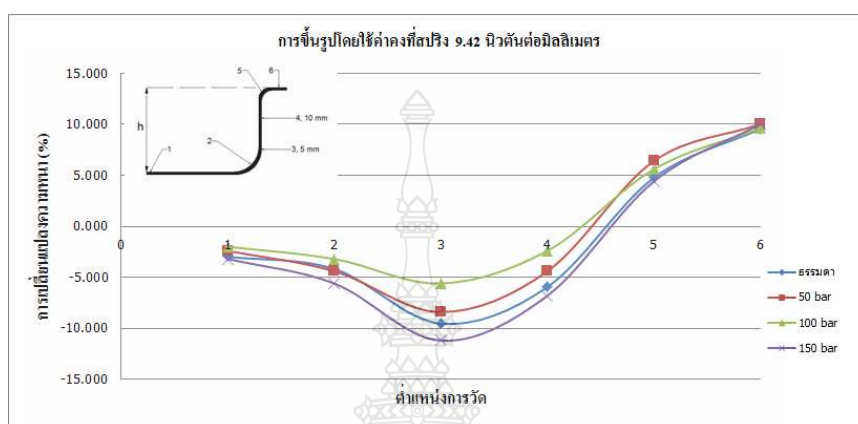
ภาพที่ 4.24 การลากขึ้นรูปลึกแบบปกติเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานสูงที่สุดในตำแหน่งที่ เมื่อใช้แรงดันของเหลวที่ 100 bar เท่ากับ -16.8% ในตำแหน่งที่ 4 ไม่สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงความหนาได้ เนื่องจากชิ้นงานเกิดรอยฉีกขาดด้านข้างอย่างรุนแรง และการเปลี่ยนแปลงความหนาท่ำสุดในตำแหน่งที่ 3 เท่ากับ -14.0% ที่การขึ้นรูปด้วยแรงดัน 50 bar

จากผลการทดลองที่ผ่านมา พบว่าแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงความหนา โดยเป็นความหนาที่ลดลงสูงสุด เกิดขึ้นในตำแหน่งผนังด้านข้างบริเวณมุมกึ่งจันถึงกึ่งกลางของถ้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ไพบูลย์ หาญมนต์ [33] ในปี 2551 พงศ์พันธ์ แก้วดาทิพย์ และ วารุณี เปรมาพันธ์ ในปี 2547 [14] และ Huiting Wang [41] ในปี 2011 ซึ่งทำการทดลองลากขึ้นรูปลึกอลูมิเนียมผสมเกรด 2A120 ด้วยกระบวนการขึ้นรูปด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว พบว่าการ

เปลี่ยนแปลงความหนาสูงสุดของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปเกิดขึ้นที่ตำแหน่งด้านบนเหนือมุมพื้นซ์เช่นเดียวกัน

4.4.2 การทดลองการลากขึ้นรูปลึกโดยใช้ของเหลวค่าความหนืด 46 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที

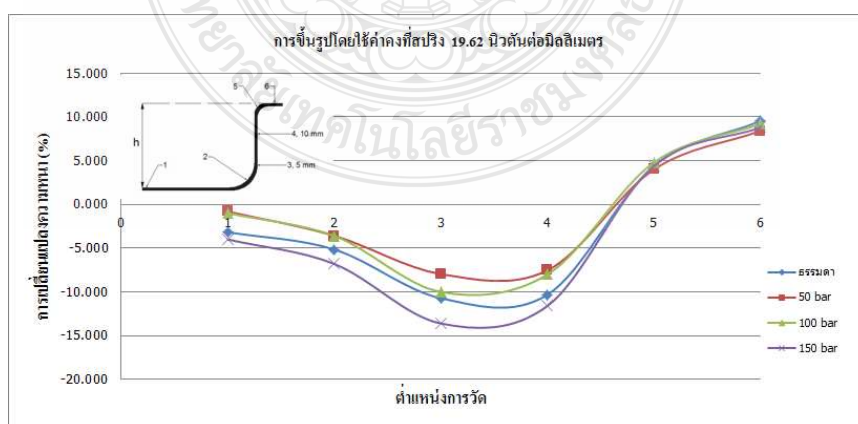
1) การลากขึ้นรูปลึกด้วยแรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm



ภาพที่ 4.25 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

ภาพที่ 4.25 การทดลองการลากขึ้นรูปลึกโดยใช้แรงกดชิ้นงาน 9.42 N/mm เปรียบเทียบระหว่างการขึ้นรูปแบบปกติ กับการขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว ตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนามากที่สุดคือ ตำแหน่งที่ 3 โดยในตำแหน่งที่ 3 มีการเปลี่ยนแปลงความหนาสูงสุดเท่ากับ -11.2% ที่การขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว 150 bar และการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยที่สุดเท่ากับ -5.6% ที่การขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว 100 bar

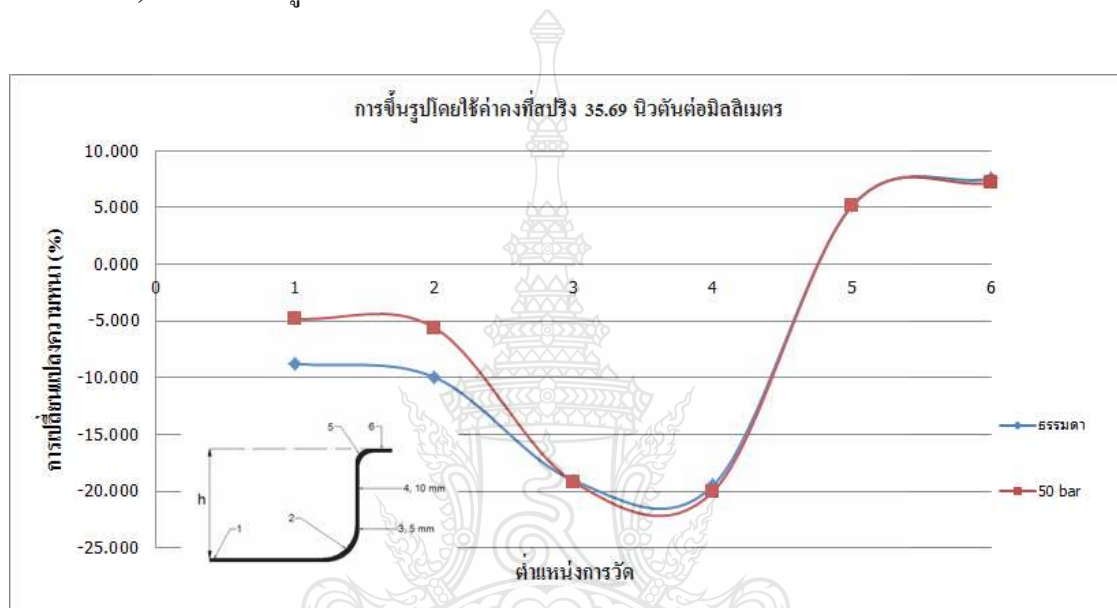
2) การลากขึ้นรูปลึกด้วยแรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm



ภาพที่ 4.26 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

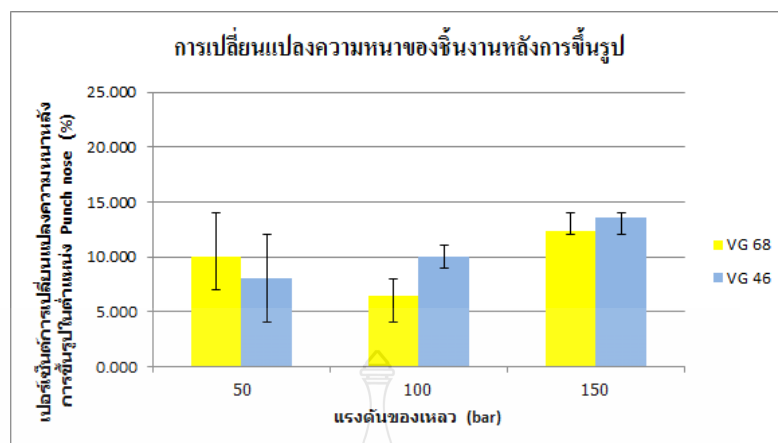
ภาพที่ 4.26 ตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานมากที่สุดคือ ตำแหน่งที่ 3 และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการขึ้นรูปแบบปกติ กับการขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว พบว่าแรงดันของเหลวมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนา โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาที่เกิดขึ้นสูงสุดที่ ตำแหน่งที่ 3 เท่ากับ -13.6% ที่การขึ้นรูปด้วยแรงดัน 150 bar และการเปลี่ยนแปลงความหนาต่ำสุดที่ ตำแหน่งที่ 3 เท่ากับ -7.953% ที่การขึ้นรูปด้วยแรงดัน 50 bar

3) การลากขึ้นรูปลึกด้วยแรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm



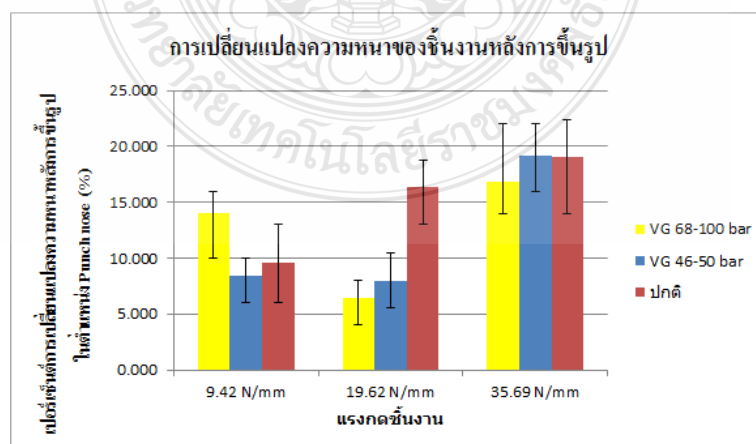
ภาพที่ 4.27 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

ภาพที่ 4.27 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้ เมื่อเปรียบเทียบการทดลองระหว่างการขึ้นรูปแบบปกติ กับการขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว พบว่าการขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลวที่ 50 bar มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความหนาน้อยกว่าเล็กน้อย และตำแหน่งที่มีการเปรียบเทียบความหนามากที่สุดคือตำแหน่งที่ 3 และ 4 โดยการขึ้นรูปแบบปกติมีการเปลี่ยนแปลงความหนาเท่ากับ 19.07% และ 19.47% ตามลำดับ ในขณะที่การขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว มีการเปลี่ยนแปลงความหนาเท่ากับ 19.2% และ 20.0% ตามลำดับ



ภาพที่ 4.28 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานในตำแหน่งเหนือมุมพื้นที่

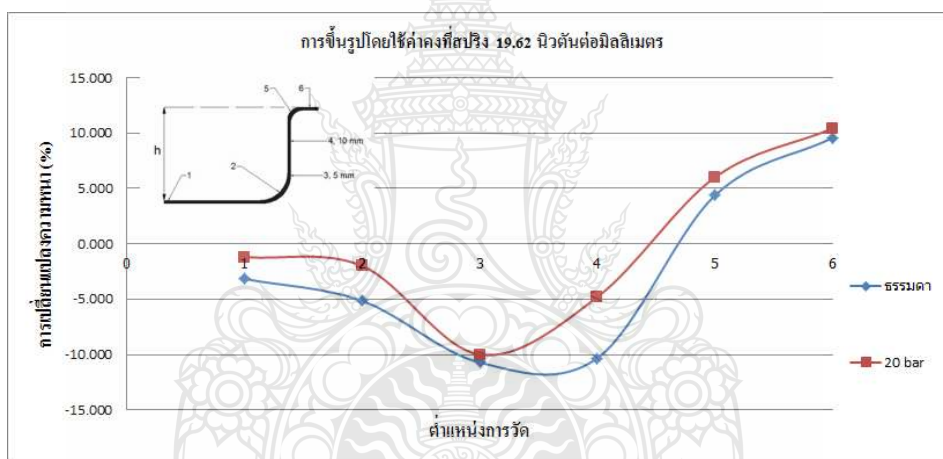
ภาพที่ 4.28 เปรียบเทียบผลการทดลองพบว่า ที่การขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวความหนืด 46 ที่แรงดัน 50 bar มีการลดลงของความหนาบริเวณมุมพื้นที่น้อยที่สุดเท่ากับ 8.00% และการขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวความหนืด 68 ที่แรงดัน 100 bar มีการลดลงของความหนาบริเวณมุมพื้นที่น้อยที่สุดเท่ากับ 6.4% ซึ่งเป็นสภาวะที่ดีที่สุดของการขึ้นรูป ของของเหลวทั้งสองค่าความหนืด โดยสอดคล้องกับผลการทดลองที่ผ่านมา ทั้งแรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานและชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาถึงแรงดันของของเหลวในแต่ละการทดลองพบว่า ในช่วงการทดลองโดยใช้แรงดันของเหลว 50 bar และ 100 bar เมื่อเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปแบบปกติแล้ว โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm การขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลวมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงความหนาที่ลดลง แต่เมื่อทำการเพิ่มแรงดันในการทดลองเป็น 150 bar เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความหนากับมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น เป็นผลอันเนื่องมาจากแรงกดพื้นที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง [41]



ภาพที่ 4.29 เปรียบเทียบผลการทดลองความหนาที่ลดลงในตำแหน่งมุมพื้นที่ของการขึ้นรูป

ภาพที่ 4.29 แสดงการทดลองเมื่อเปลี่ยนค่าแรงกดชิ้นงาน เพื่อพิจารณาถึง อิทธิพลของแรงกดชิ้นงานที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงาน ในตำแหน่งจุมกพื้นซ์ พบว่า ความหนาของชิ้นงานที่การขึ้นรูปโดยใช้ของเหลว เปรียบเทียบกับการขึ้นรูปแบบปกติ ด้วยแรงกดสปริง 9.42 N/mm ซึ่งน้อยกว่าแรงกดตามทฤษฎี ทั้งการขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 68 ที่แรงดัน 100 bar และ การขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 46 ที่แรงดัน 50 bar มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาสูงกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ ในขณะที่ การขึ้นรูปด้วยแรงดัน 150 bar ทั้งของเหลวความหนืด 68 และ 46 มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนา ใกล้เคียงกับการขึ้นรูปแบบปกติ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า แรงกดชิ้นงานที่ 19.62 N/mm ซึ่งเป็นแรงกดตามทฤษฎีมีความเหมาะสมในการขึ้นรูป ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ผ่านมา

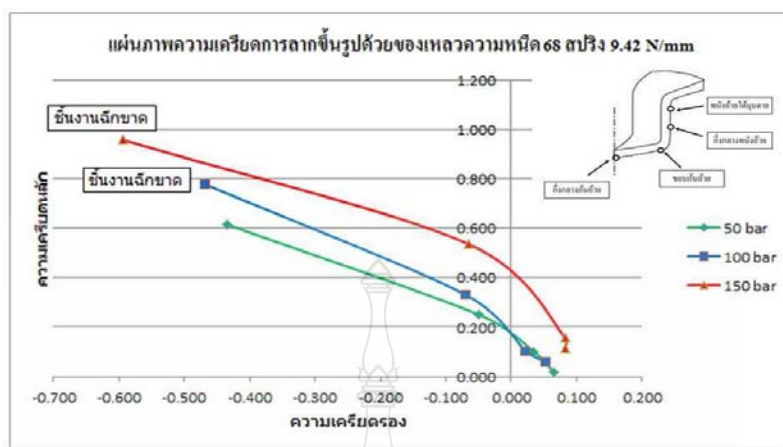
4.4.3 การทดลองการลากขึ้นรูปลึกโดยใช้ของเหลว VG 32 ด้วยแรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm



ภาพที่ 4.30 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

ภาพที่ 4.30 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้ เมื่อเปรียบเทียบการขึ้นรูปแบบปกติกับการขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว พบว่าแรงดันของเหลวมีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานลดลง โดยการขึ้นรูปแบบปกติตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนามากที่สุดคือตำแหน่งที่ 3 และ 4 เท่ากับ 10.71% และ 10.32% ตามลำดับ ในขณะที่การขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลวเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนามากที่สุดในตำแหน่งที่ 3 เท่ากับ 10.0% ซึ่งเป็นสภาวะเดียวสำหรับของเหลว VG 32 ที่สามารถทำการขึ้นรูปได้

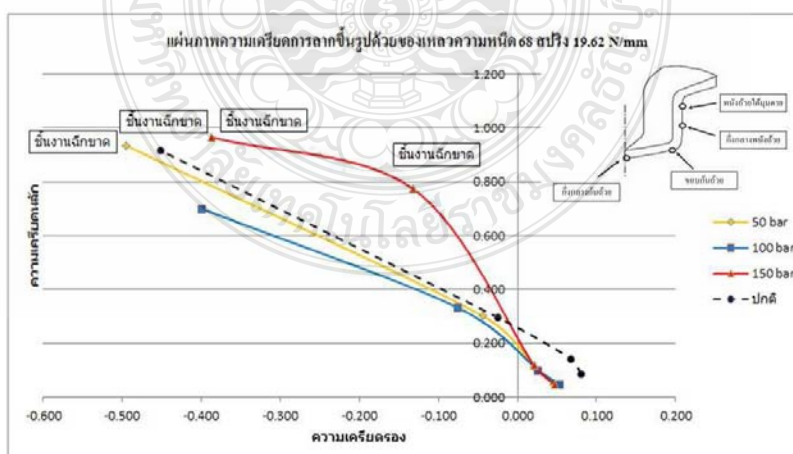
1) การลากขึ้นรูปลึกด้วยแรงกดสปริง 9.42 N/mm



ภาพที่ 4.32 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการลากขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 68 โดยใช้แรงกดขึ้นงาน 9.42 N/mm

ภาพที่ 4.32 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริดวงกลม ซึ่งสร้างความเสียหายให้แก่ชิ้นงานเกิดขึ้นบริเวณผนังด้านข้างบริเวณมุมคาย โดยความเครียดสูงสุดเกิดขึ้นที่การลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว 150 bar ความเครียดหลักสูงสุดเท่ากับ 0.959 ความเค้นดรอ้งสูงสุดเท่ากับ -0.594 และความเครียดที่ผนังด้านข้างบริเวณมุมคายต่ำสุดเกิดขึ้นที่การลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว 50 bar ความเครียดเท่ากับ 0.616 ความเค้นดรอ้งเท่ากับ -0.435

2) การลากขึ้นรูปลึกด้วยแรงกดสปริง 19.62 N/mm

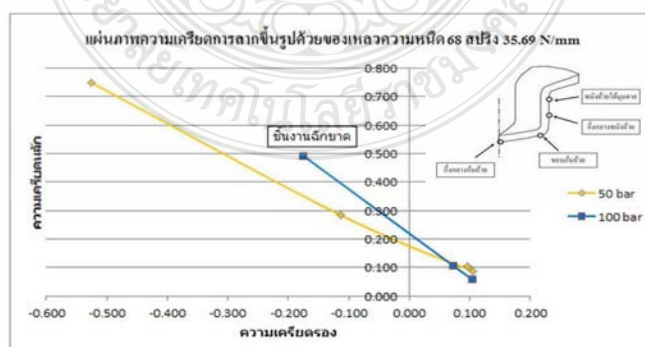


ภาพที่ 4.33 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการลากขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 68 โดยใช้แรงกดขึ้นงาน 19.62 N/mm

ภาพที่ 4.33 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริดวงกลม ซึ่งสร้างความเสียหายให้แก่ชิ้นงานเกิดขึ้นบริเวณผนังด้านข้างบริเวณมุมคาย ที่การลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว 150 bar และ 50 bar และจุดของผนังด้วยด้านข้างของการลากขึ้นรูปด้วยแรงดัน 150 bar พบรอยฉีกขาดเช่นกัน ความเครียดหลักสูงสุดเท่ากับ 0.965 และ 0.935 ตามลำดับ ความเครียดตรงสูงสุดเกิดขึ้นที่การลากขึ้นรูปลึกโดยใช้แรงดันของเหลว 50 bar เท่ากับ -0.496 และความเครียดที่ผนังด้านข้างบริเวณมุมคายต่ำสุดซึ่งชิ้นงานไม่เกิดรอยฉีกขาด เกิดขึ้นที่การลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว 100 bar ความเครียดหลักเท่ากับ 0.700 ความเครียดตรงเท่ากับ -0.400

ภาพที่ 4.33 แผ่นภาพความเครียดจากการขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 68 ที่แรงดัน 50, 100 และ 150 bar เปรียบเทียบกับการขึ้นรูปแบบปกติพบว่า ที่ตำแหน่งกันด้วย อัตราส่วนความเครียดจากการขึ้นรูปด้วยของเหลว ทั้งของเหลวความหนืด 68 ต่ำกว่าการขึ้นรูปแบบปกติทั้ง 3 ค่าแรงดัน และเมื่อพิจารณาถึงความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณผนังด้านข้าง พบว่าอัตราส่วนความเครียด โดยเฉพาะความเครียดหลัก การขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวจะต่ำกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ ซึ่งสภาพดังกล่าวเป็นการเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่นได้ โดยเป็นผลเนื่องมาจากแรงดันของเหลวที่ที่ด้านการเคลื่อนที่ของพื้นที่ ผิวสัมผัสของปลายพื้นที่ มีการกระจายตัวของแรงจากแรงดันของเหลวอย่างสม่ำเสมอมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับบทความวิชาการของ ชนสาร อินทรกำจรชัย [42] ในปี 2554 ในขณะเดียวกันแรงดันของของเหลว ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงาน ดังสรุปผลการทดลองที่ผ่านมา ยังส่งผลกระทบต่อความเครียดที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงาน โดยการขึ้นรูปด้วยของเหลว 68 ที่แรงดัน 100 bar มีความเหมาะสมต่อการขึ้นรูปและการขึ้นรูป โดยการขึ้นรูปด้วยของเหลว 46 ที่แรงดัน 50 และ 100 bar มีความเหมาะสมต่อการขึ้นรูป

3) การลากขึ้นรูปลึกด้วยแรงกดสปริง 35.69 N/mm

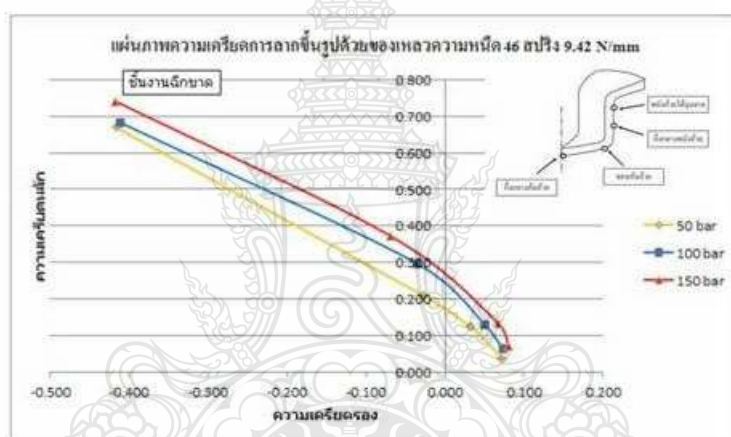


ภาพที่ 4.34 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการลากขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 68 โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm

จากภาพที่ 4.34 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริดวงกลม ซึ่งสร้างความเสียหายให้แก่ชิ้นงานเกิดขึ้นบริเวณผนังด้านข้างที่การลากขึ้นรูปด้วยแรงดัน 100 bar ซึ่งชิ้นงานเกิดรอยฉีกขาดอย่างรุนแรงที่บริเวณมุมคาย จนไม่สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงของกริดได้ โดยความเครียดสูงสุดเกิดขึ้นในการลากขึ้นรูปด้วยแรงดัน 100 bar ความเครียดหลักเท่ากับ 0.493 ความเครียดรองเท่ากับ -0.176 ในขณะที่ความเครียดของการลากขึ้นรูปด้วยแรงดัน 50 bar ที่จุดเดียวกัน ความเครียดหลักเท่ากับ 0.283 ความเครียดรองเท่ากับ -0.113

4.5.2 ความเครียดที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันของเหลวในการทดลองการลากขึ้นรูปลึก โดยใช้ของเหลว VG 46

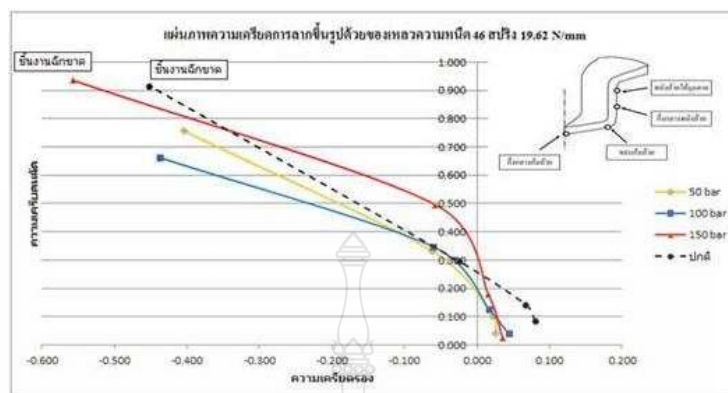
1) การลากขึ้นรูปลึกด้วยแรงกดสปริง 9.42 N/mm



ภาพที่ 4.35 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการลากขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 46 โดยใช้แรงกดขึ้นงาน 9.62 N/mm

จากภาพที่ 4.35 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริดวงกลม ซึ่งสร้างความเสียหายให้แก่ชิ้นงานเกิดขึ้นที่ผนังด้านข้างบริเวณมุมคาย โดยความเครียดหลักสูงสุดเกิดขึ้นที่การลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว 150 bar เท่ากับ 0.741 ความเครียดรองสูงสุดเท่ากับ -0.417 และความเครียดหลักต่ำสุดอยู่ที่การลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว 50 bar เท่ากับ 0.669 ในขณะที่ความเครียดรองต่ำสุดเกิดขึ้นที่การลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว 100 bar เท่ากับ -0.411

2) การลากขึ้นรูปลึกด้วยแรงกดสปริง 19.62 N/mm



ภาพที่ 4.36 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการลากขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 46 โดยใช้แรงกดขึ้นงาน 9.62 N/mm

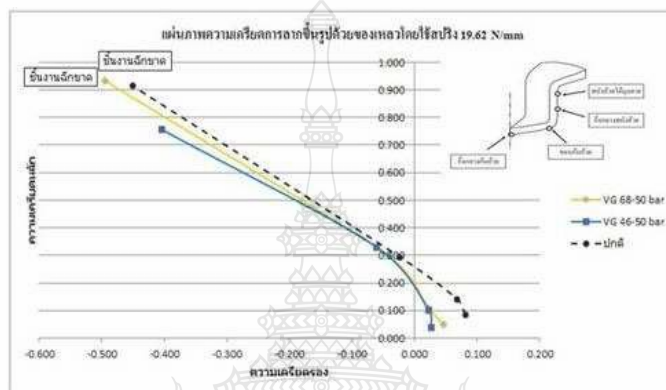
จากภาพที่ 4.36 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริดวงกลม ซึ่งสร้างความเสียหายให้แก่ชิ้นงานเกิดขึ้นบริเวณผนังด้านข้างบริเวณมุมคาย โดยความเครียดหลัก และความเค้นตรงสูงสุดเกิดขึ้นที่การลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว 150 bar เท่ากับ 0.935 และ -0.557 ตามลำดับ ในขณะที่ความเครียดหลักต่ำสุดเกิดขึ้นที่การลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว 100 bar เท่ากับ 0.663 ความเค้นตรงต่ำสุดเกิดขึ้นที่การลากขึ้นรูปด้วยแรงดัน 50 bar เท่ากับ -0.404

3) การลากขึ้นรูปลึกด้วยแรงกดสปริง 35.69 N/mm

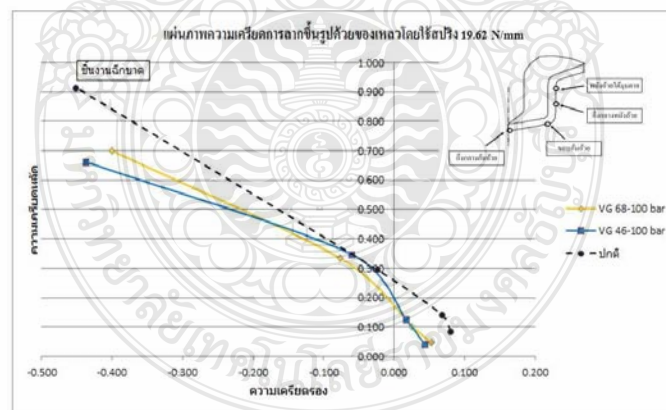


ภาพที่ 4.37 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการลากขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 46 โดยใช้แรงกดขึ้นงาน 35.69 N/mm

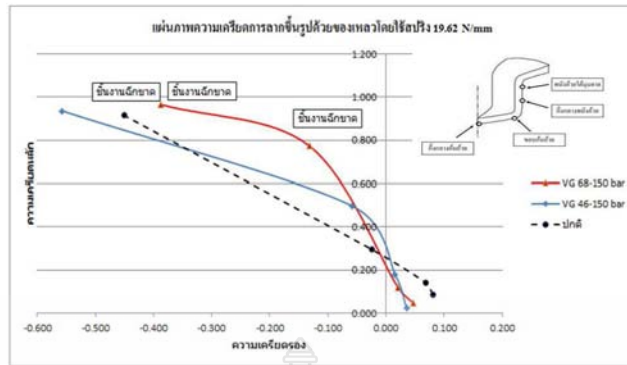
จากภาพที่ 4.37 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้ การลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลวความหนืด 46 โดยใช้แรงกดขึ้นงาน 35.69 N/mm สามารถขึ้นรูปได้ที่แรงดัน 50 bar เพียงค่าแรงดันเดียว การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริดวงกลม ซึ่งสร้างความเสียหายให้แก่ชิ้นงานเกิดขึ้นบริเวณผนังด้านข้างบริเวณมุมตาย โดยความเครียดหลักสูงสุดเท่ากับ 0.864 ความเคียวตรงสูงสุดเท่ากับ -0.309



ภาพที่ 4.38 ความเครียดที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานจากการขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 46 และ 68 ที่แรงดัน 50 bar โดยใช้แรงกดขึ้นงาน 19.62 N/mm



ภาพที่ 4.39 ความเครียดที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานจากการขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 46 และ 68 ที่แรงดัน 100 bar โดยใช้แรงกดขึ้นงาน 19.62 N/mm

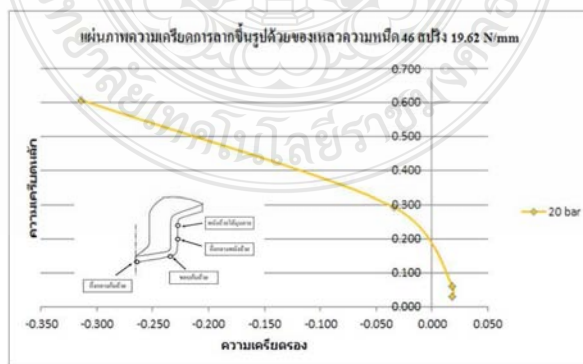


ภาพที่ 4.40 ความเครียดที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานจากการขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 46 และ 68 ที่แรงดัน 150 bar โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm

ภาพที่ 4.38 พบว่าการขึ้นรูปด้วยของเหลว ที่แรงดันต่ำ คือ 50 bar เมื่อเปรียบเทียบกับ การขึ้นรูปแบบปกติ อัตราส่วนความเครียดจากแผ่นภาพความเครียดตามทฤษฎี ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก โดยการขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวความหนืด 68 และ 46 มีแนวโน้มที่ต่ำกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ ซึ่งเมื่อพิจารณาภาพที่ 4.39 การขึ้นรูปที่แรงดัน 100 bar ของของเหลวทั้งสองค่าความหนืด มีแนวโน้มที่ต่ำกว่าการขึ้นรูปแบบปกติอย่างเห็นได้ชัด และจากภาพที่ 4.40 พบว่าการขึ้นรูปทั้งสามสภาวะ ชิ้นงานเกิดการฉีกขาดจากแรงกดพื้นที่เพิ่มสูงขึ้น เป็นผลทำให้อัตราส่วนความเครียดมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น และไม่มีความสม่ำเสมอตามแรงกดพื้นที่เกิดขึ้น

4.5.3 ความเครียดที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงาน จากการเปลี่ยนแปลงแรงดันของเหลวในการทดลองการลากขึ้นรูปลึก โดยใช้ของเหลว VG 32

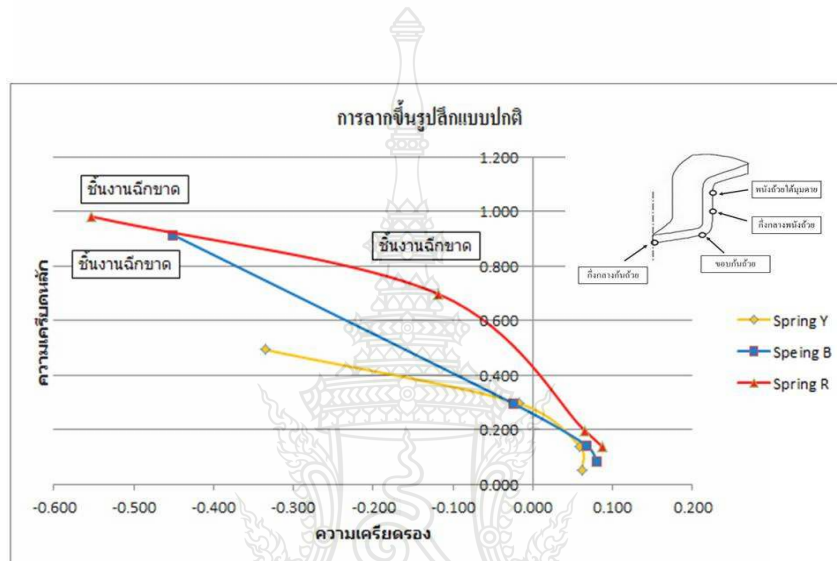
- 1) การลากขึ้นรูปลึกด้วยแรงกดสปริง 19.26 N/mm



ภาพที่ 4.41 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการลากขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 32 โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm

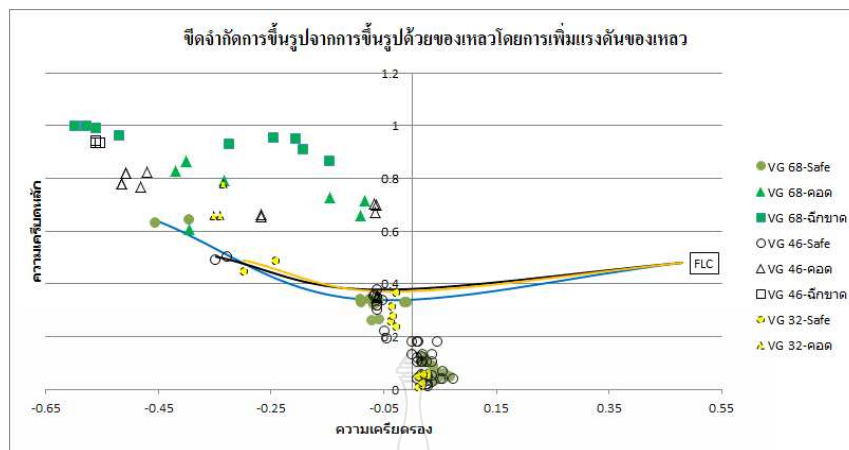
ภาพที่ 4.41 แสดงถึงการลากขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลวค่าความหนืด 32 สามารถขึ้นรูปได้โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 19.62 N/mm และใช้แรงดันแรงดัน 20 bar เท่านั้น และไม่พบรอยฉีกขาดที่ผิวชิ้นงาน การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริด โดยความเครียดหลักสูงสุดเท่ากับ 0.607 ความเครียดตรงสูงสุดเท่ากับ -0.314

4.5.4 ความเครียดที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานของการลากขึ้นรูปลึกลับแบบปกติ จากการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงกดชิ้นงาน



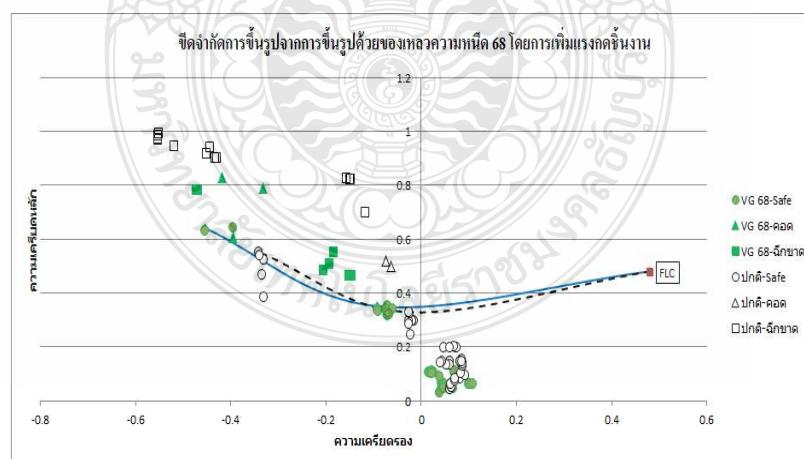
ภาพที่ 4.42 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการลากขึ้นรูปลึกลับแบบปกติ โดยใช้แรงกดชิ้นงาน 9.62, 19.62 และ 35.69 N/mm

ภาพที่ 4.42 แสดงถึงตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริดวงกลมสูงสุด คือ ตำแหน่งผนังด้านข้างบริเวณมุมคาย โดยความเครียดหลักและความเครียดตรงสูงสุดเกิดขึ้นที่การลากขึ้นรูปโดยใช้แรงกดชิ้นงาน 35.69 N/mm ความเครียดหลักสูงสุดเท่ากับ 0.982 ความเครียดตรงสูงสุดเท่ากับ -0.552 ในขณะที่ความเครียดหลักต่ำสุดเท่ากับ 0.493 ความเครียดตรงต่ำสุดเท่ากับ -0.335 ที่การขึ้นรูปโดยใช้แรงกดชิ้นงาน 9.62 N/mm



ภาพที่ 4.43 ขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 46 และ 68 โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันในการทดลอง ที่แรงดัน 50 100 และ 150 bar โดยใช้แรงกดขึ้นงาน 19.62 N/mm

ภาพที่ 4.43 พบว่า การขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวความหนืด 68 มีแนวโน้มที่สามารถขึ้นรูปได้ดีกว่าการขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 46 โดยพิจารณาจากเส้นกราฟขีดจำกัดความปลอดภัย การขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 68 ในตำแหน่งของขีดจำกัดความปลอดภัยสูงสุด มีค่าความเค้นดัดหลักและค่าความเค้นดัดตรงที่สูงกว่าการขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวความหนืด 46 ในขณะที่การขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 32 สามารถขึ้นรูปได้ที่แรงดัน 20 bar เท่านั้น ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว



ภาพที่ 4.44 ขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการขึ้นรูปด้วยของเหลวความหนืด 68 โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงกดขึ้นงานที่ 9.42, 19.62 และ 35.69 N/mm ที่แรงดันในการทดลอง ที่แรงดัน 100 bar

ภาพที่ 4.44 แผ่นภาพซีดจำกัดการขึ้นรูป จากการลากขึ้นรูปลึกด้วยของเหลวค่าความหนืด 68 ที่แรงดันของเหลว 100 bar โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงกดขึ้นงาน เปรียบเทียบกับแผ่นภาพซีดจำกัดการขึ้นรูป จากการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติ โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงกดขึ้นงาน เช่นเดียวกัน พบว่าการขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวในตำแหน่งของการขึ้นรูปอย่างปลอดภัยนั้น มีค่าความเครียดหลักและความเครียดรองที่เกิดขึ้น สูงกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lihui Lang [1-2, 5, 22] ในปี 2004 และ 2005 ซึ่งกล่าวว่า ในการขึ้นรูปด้วยของเหลว หรือการใช้ของเหลวช่วยในการลากขึ้นรูปลึก ในสภาวะของการควบคุมอย่างเหมาะสมทั้งความดันของเหลวและแรงกดขึ้นงานแล้ว สามารถเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่นได้



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลองสำหรับการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ คือ แรงดันของเหลว ความหนืดของเหลว และแรงกดชิ้นงาน ซึ่งมีผลต่อกระบวนการการขึ้นรูปด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว โดยทำการศึกษาถึงผลกระทบต่อ แรงในการลากขึ้นรูปและแรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงาน คุณภาพของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป และความเครียดที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงาน สามารถสรุปผลตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปการทดลอง

สรุปการทดลองจากผลการศึกษาวิจัยในเรื่อง การศึกษาอิทธิพลของของเหลวที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปลึกลูกเหล็กคาร์บอนรีดเย็น SPCC ด้วยกระบวนการการเคลื่อนที่ของของเหลว โดยทำการศึกษาถึงของเหลวชนิดน้ำมันไฮดรอลิกตามมาตรฐาน มอก. ชั้นคุณภาพตามความหนืด 68, 46 และ 32 วัสดุในการทดลองเป็นเหล็กคาร์บอนรีดเย็นตามมาตรฐาน JIS ชั้นคุณภาพ SPCC ความหนา 0.5 mm ทำการทดลองโดยการลากขึ้นรูปลึกรูปถ้วยทรงกระบอกแบบมีปีก ซึ่งตัวแปรในการทดลองคือ ความหนืดของของเหลวทั้งสามค่าความหนืด แรงดันของเหลวภายในห้องแม่พิมพ์ควบคุมที่ 50 100 และ 150 bar และแรงกดชิ้นงานสามระดับคือ 9.42, 19.62 และ 35.69 N/mm ศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อ แรงในการลากขึ้นรูปและแรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงาน ชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป และความเครียดที่ผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป สามารถสรุปอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ได้ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 การศึกษาถึงแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปลึกลูกเหล็กและคุณภาพชิ้นงาน ที่ผ่านกระบวนการลากขึ้นรูปลึกลูกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ในสภาวะของความดันและความหนืดที่แตกต่างกัน

1) แรงในการลากขึ้นรูปซึ่งได้จากการวัดค่า มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อทำการลากขึ้นรูปลึกลูกในสภาวะของแรงดันของเหลวที่เพิ่มสูงขึ้น

2) แรงในการลากขึ้นรูปซึ่งได้จากการวัดค่า และแรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงาน มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อทำการลากขึ้นรูปลึกลูกโดยใช้ของเหลวที่มีความหนืดเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ชิ้นงานหลังการขึ้นรูปพบปัญหาการร่นขีดที่ชิ้นงานลดลง

3) สำหรับการทดลองในครั้งนี้สภาวะของแรงดันที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ แรงกดชิ้นงานตามทฤษฎีการคำนวณ โดยพิจารณาจากแรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานที่ต่ำที่สุดและปัญหาการร่นขีด

ขาดของชิ้นงานที่น้อยที่สุด คือ การขึ้นรูปโดยใช้ของเหลว VG 68 ที่แรงดัน 100 bar แรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานเท่ากับ 56.89 kN และ ของเหลว VG 46 ที่แรงดัน 50 bar แรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานเท่ากับ 55.27 kN โดยใช้แรงเหี่ยบชิ้นงาน 6.28 kN เท่ากับ 41.86% ของระยะการขึ้นรูปลึก 15 mm เท่ากับ 18.75% ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแผ่นชิ้นงานเริ่มต้น

5.1.2 การศึกษาถึงอิทธิพลของแรงกดแผ่นชิ้นงานโลหะ ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ที่มีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูป รอยย่นที่ปากถ้วย และรอยแตกร้าวหรือการฉีกขาดของผิวชิ้นงาน

1) แรงกดชิ้นงาน หรือแรงเหี่ยบชิ้นงานส่งผลต่อแรงในการลากขึ้นรูปและรอยย่นที่ปากถ้วย ตามทฤษฎีของกระบวนการลากขึ้นรูปลึก โดยเมื่อแรงกดชิ้นงานต่ำส่งผลทำให้แรงในการลากขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากรอยย่นที่ปากถ้วยทำให้การไหลตัวของโลหะทำได้ยาก ในขณะเดียวกันเมื่อใช้แรงกดชิ้นงานที่สูงกว่าทฤษฎี ทำให้ชิ้นงานถูกบีบอัดแน่นเกินไป ซึ่งเป็นการขัดขวางการไหลตัวของแผ่นโลหะเช่นกัน

2) แรงกดชิ้นงานที่เหมาะสมที่สุด เมื่อพิจารณาถึงแรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงาน และชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูป คือ 3.9 kN หรือตามการคำนวณจากทฤษฎีการลากขึ้นรูปลึก

3) สรุปผลการทดลองเมื่อการลากขึ้นรูปลึกโดยใช้แรงกดชิ้นงาน และของเหลวที่ความหนืดแตกต่างกัน ในสถานะของแรงดันต่างๆ

ก. การขึ้นรูปดีที่สุดของน้ำมัน VG 68 ความหนืด $68 \text{ mm}^2/\text{sec}$ ที่แรงดัน 50 bar คือ ชิ้นรูปที่ความลึก 15 mm ที่แรงเหี่ยบ 3.01 kN เท่ากับ 20.10% ของเส้นผ่าศูนย์กลางชิ้นงานเริ่มต้น ใช้แรงในการลากขึ้นรูป 47.33 kN

ข. การขึ้นรูปดีที่สุดของน้ำมัน VG 68 ความหนืด $68 \text{ mm}^2/\text{sec}$ ที่แรงดัน 100 bar คือ ชิ้นรูปที่ความลึก 15 mm ที่แรงเหี่ยบ 6.28 kN เท่ากับ 41.86% ของเส้นผ่าศูนย์กลางชิ้นงานเริ่มต้น ใช้แรงในการลากขึ้นรูป 51.49 kN

ค. การขึ้นรูปดีที่สุดของน้ำมัน VG 46 ความหนืด $46 \text{ mm}^2/\text{sec}$ ที่แรงดัน 50 bar คือ ชิ้นรูปที่ความลึก 15 mm ที่แรงเหี่ยบ 6.28 kN เท่ากับ 41.86% ของเส้นผ่าศูนย์กลางชิ้นงานเริ่มต้น ใช้แรงในการลากขึ้นรูป 50.58 kN

ง. การขึ้นรูปดีที่สุดของน้ำมัน VG 46 ความหนืด $46 \text{ mm}^2/\text{sec}$ ที่แรงดัน 100 bar คือ ชิ้นรูปที่ความลึก 15 mm ที่แรงเหี่ยบ 6.28 kN เท่ากับ 41.86% ของเส้นผ่าศูนย์กลางชิ้นงานเริ่มต้น ใช้แรงในการลากขึ้นรูป 48.23 kN

จ. การขึ้นรูปดีที่สุดในน้ำมัน VG 46 ความหนืด $46 \text{ mm}^2/\text{sec}$ ที่แรงดัน 150 bar คือ ขึ้นรูปที่ความลึก 15 mm ที่แรงเหวี่ยง 3.01 kN เท่ากับ 20.10% ของเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานเริ่มต้น ใช้แรงในการลากขึ้นรูป 89.56 kN

ฉ. การขึ้นรูปดีที่สุดในน้ำมัน VG 32 ความหนืด $32 \text{ mm}^2/\text{sec}$ ที่แรงดัน 20 bar คือ ขึ้นรูปที่ความลึก 15 mm ที่แรงเหวี่ยง 6.28 kN เท่ากับ 41.86% ของเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานเริ่มต้น ใช้แรงในการลากขึ้นรูป 62.50 kN

5.1.3 การศึกษาถึงความสามารถในการขึ้นรูปของเหล็กแผ่น SPCC ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ในสภาวะของความดันและความหนืดที่แตกต่างกัน

1) การขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวที่มีค่าความหนืดสูงกว่า มีแนวโน้มทำให้เหล็กแผ่น SPCC สามารถขึ้นรูปได้ดีขึ้น โดยพิจารณาจากค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้นในช่วงของขีดจำกัดความปลอดภัยในการขึ้นรูป

2) ความสามารถในการขึ้นรูปของเหล็ก SPCC โดยการพิจารณาจาก แผ่นภาพขีดจำกัดของการขึ้นรูป โดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันของของเหลวเปรียบเทียบกับทั้ง 3 ค่าความหนืด ของเหลวค่าความหนืด VG 68 ซึ่งเป็นค่าความหนืดสูงสุด สามารถขึ้นรูปได้ดีที่สุดสำหรับการทดลองในครั้งนี้ โดยมีอัตราส่วนความเครียดในช่วงของขีดจำกัดความปลอดภัยเท่ากับ 1.75 ความเครียดหลักเท่ากับ 0.70 ความเครียดดลองเท่ากับ -0.40

5.2 ข้อเสนอแนะทั่วไป

5.2.1 การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการทดลองควรคำนึงถึงผลกระทบของแรงดันของเหลวที่เพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการลากขึ้นรูป ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของของเหลว จากแรงกดพื้นซ์ และต้องคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นหลัก เนื่องจากเป็นการปฏิบัติงานภายใต้สภาวะของแรงดันสูง และก่อนการเริ่มปฏิบัติงานทุกครั้งต้องตรวจสอบระดับของของเหลวภายในถัง ว่าอยู่ในระดับที่เหมาะสมหรือไม่ โดยดูจากเกจวัดระดับน้ำมันควรมีน้ำมันอย่างน้อย $1/3$ ของเกจวัด (ข้อมูลจากการสอบถามผู้ผลิต)

5.2.2 การเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหรือของเหลวเพื่อการทดลองในตัวแปรถัดไป ควรถ่ายของเหลวและทำความสะอาดภายในถังน้ำมัน เพื่อป้องกันการปะปนกันของน้ำมันซึ่งมีค่าความหนืดแตกต่างกัน และในการเติมน้ำมันจะต้องเติมช่องทางน้ำมันเข้าสู่ปั๊มโดยตรง ก่อนทุกครั้งเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับปั๊มน้ำมันไฮดรอลิก และก่อนเริ่มปฏิบัติงานใหม่หลังจากเปลี่ยนถ่ายน้ำมัน หรือเริ่ม

ปฏิบัติงานใหม่หลังจากหยุดเครื่องเป็นเวลานาน ต้องเปิดปั๊มทิ้งไว้ให้ทำงานก่อนเป็นเวลา 5-10 นาที ก่อนการเปิดลิ้นควบคุมแรงดัน (ข้อมูลจากการสอบถามผู้ผลิต)

5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป

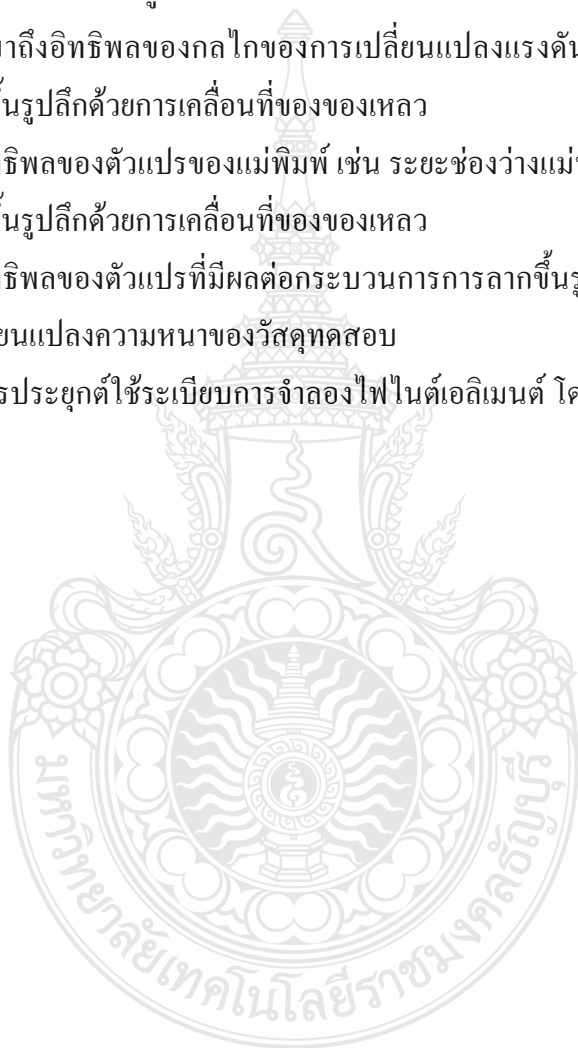
5.3.1 ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อกลไกการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ของของเหลว ในระหว่างกระบวนการการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว

5.3.2 ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของกลไกของการเปลี่ยนแปลงแรงดันของของเหลว ในระหว่างกระบวนการการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว

5.3.3 ศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรของแม่พิมพ์ เช่น ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ และมุมตาย ที่มีผลต่อกระบวนการการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว

5.3.4 ศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการการลากขึ้นรูปลึก ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว จากการเปลี่ยนแปลงความหนาของวัสดุทดสอบ

5.3.4 ศึกษาถึงการประยุกต์ใช้ระเบียบการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง



รายการอ้างอิง

- [1] Lang, L.H., "Investigation into the forming of a complex cup locally constrained by a round die based on an innovative hydromechanical deep drawing method," **Journal of Materials Processing Technology**, 2005. pp. 191.
- [2] Lang, L.H., "Study on hydromechanical deep drawing with uniform pressure onto the blank," **International Journal of Machine Tools & Manufacture Design, Research and Application**, 2004. pp. 495.
- [3] Schmoeckel, D., Hielscher, C. and Huber, R., "Metal Forming of Tubes and Sheets With Liquid and Other Flexible Media," **Annals of CIRP**, Vol. 48/2, 1999, pp. 1-20.
- [4] Kang, D. "A study on hydrodynamic deep drawing equipment," **Journal Materials Processing Technology**, 2000. pp 21.
- [5] Lang, L.H., "Investigation into the effect of pre-bulging during hydromechanical deep drawing with uniform pressure onto the blank," **International Journal of Machine Tools & Manufacture Design, Research and Application**, 2004, 44, pp. 649.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] JIS G3141 : 2005 Standard Cold-reduced carbon steel sheets and strips.
- [9] สวัสดิ์ โสตามุข, การทำนายความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นส่วนยานยนต์ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 20, จังหวัดนครราชสีมา, 18-20 ตุลาคม 2549.
- [10] 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.
- [11] มอก.977-2551 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม น้ำมันไฮดรอลิก-พื้นฐานน้ำมันแร่

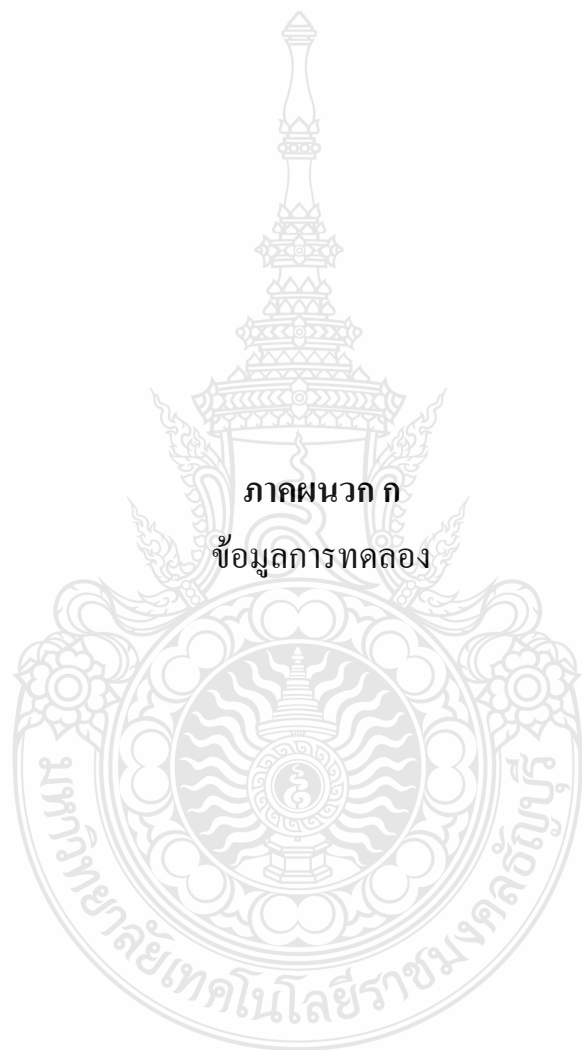
- [12] International standard ISO 3105 : 1994 Glass capillary kinematic viscometers – Specifications and operating instructions.
- [13] Standard JIS B 5012 : 2008 Coiled helical spring for press dies.
- [14] พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์ และ วารุณี เปรมานนท์, “การศึกษาอิทธิพลของความสูงคายแลนด์ในกรรมวิธีการลากขึ้นรูปปลีก,” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 18, จังหวัดขอนแก่น, 18-20 ตุลาคม 2547.
- [15] ทวีภัทร์ บุรณชิตติ และ ทศน์ชัย พงศผาย, “การออกแบบการขึ้นรูปขึ้นส่วนขวางยึดเครื่องยนต์โดยการวิเคราะห์การหนีขนาดและรอย่น,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 17, ฉบับที่ 2, ปี 2550, หน้าที่ 53.
- [16] Lang, L.H., “Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming,” **Journal of Materials Processing Technology**, 2004. pp. 165-166.
- [17] 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.
- [18] อภิชาติ แสนรัชฎากร, “การศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อขบวนการลากขึ้นรูปโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์”, ปรินญาณิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2549.
- [19] Kurt Lange, **Handbook of metal forming**, McGraw-Hill The United States of America, McGraw-Hill, 1985. pp. 20.1-20.69.
- [20] Tschaetsch, H., **Metal Forming Practise**, Verlag Berlin Heidelberg Germany, Springer, 2006. pp. 142-183.
- [21] 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.
- [22] Joakim L., **Numerical simulation of tube hydroforming**, Ph. D. Thesis, Civil and environmental engineering, Lulea university of technology, 2004. pp. 9-11.
- [23] 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. pp. 119-131.
- [24] Genick Bar–Meir, Basics of Fluid Mechanics, GNU Free Documentation License, USA, 2008.

- [25] รศ.ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์, **กลศาสตร์ของไหล**, สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล, กรุงเทพมหานคร, 2010.
- [26] ขวัญชัย สันทิพย์สมบูรณ์ และ ปานเพชร ชินินทร, **ไฮดรอลิกอุตสาหกรรม**. พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์ซีเอ็ด, กรุงเทพมหานคร, หน้าที่ 11-119.
- [27] เศรษฐ อุทธิยัง, **การศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการลากขึ้นรูปลึกโดยใช้สารหล่อลื่น**, ปรียญานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2546.
- [28] สวัสดิ์ โสตามุข, **การทำนายความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นส่วนยานยนต์ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป**, ปรียญานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2550.
- [29] ธงชัย เฟ็งจันทร์ดี, **อิทธิพลของการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดโดยการทำงานด้วยระบบ คอมพิวเตอร์ควบคุมเชิงตัวเลข**, ปรียญานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.
- [30] Lihui L., “31-Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure Part II. Numerical analysis of the drawing mechanism and the process parameters”, **Journal of Materials Processing Technology**, 2005. pp. 150-161.
- [31] Standard JIS Z 2201 : 1998 Test pieces for tensile test for metallic materials
- [32] สวัสดิ์ โสตามุข, **การทำนายความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นส่วนยานยนต์ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป**, ปรียญานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2550.
- [33] ไพบุญย์ หาญมนต์, “การศึกษารัศมีดาบที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกลมมีปีกของแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น,” **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**, ครั้งที่ 46, ปีพ.ศ.2551, หน้าที่ 11-18.
- [34] Soumya Subramonian, **Evaluation of lubricants for stamping deep draw quality sheet metal in industrial environment**, Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master, Mechanical Engineering, The Ohio State University, 2009. pp. 25.

- [35] 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.
- [36] วิเชียร เกื้อนเครือวัลย์ และ ศุภเอก ประมูลมาก, "การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานที่มีผลต่อ งานขึ้นรูปด้วย," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา, 22-23 เมษายน 2553. หน้าที่ 653-658.
- [37] Nader A., Michael A.Z, and Farhang P., "Wrinkling control in aluminum sheet hydroforming," **International Journal of Mechanical Sciences**, 2005. pp. 333-358.
- [38] William F.H., John A.B., **Theory and problems of fluid dynamics**. Second Edition. McGraw-Hill, 1998. pp.107-112.
- [39] S.Jamshidifard, H.Ziaeiipoor, H.Moosavi, H.Khademizadeh, "Investigation of hydrostatic counter pressure effect on thickness distribution in Hydromechanical deep drawing process with hemispherical punch," 2nd **International Conference on Manufacturing Engineering**, 2010, Constantza, Romania, September 3-5 2010. pp. 160-168.
- [40] Aiguo Xuan., Yuanxin Wu., Changjun Peng., Peisheng Ma., "Correlation of the viscosity of pure liquids at high pressures based on an equation of state," **Fluid Phase Equilibria**, 2006. pp.15-21.
- [41] Huiting W., Lin G., Minghe C., "Hydrodynamic deep drawing process assisted by radial pressure with inward flowing liquid," **International Journal of Mechanical Sciences**, 2011. pp. 793-799.
- [42] ธนสาร อินทรกำจรชัย และ สุวัฒน์ จีระเชียรนาถ, "การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำกับอุตสาหกรรมขึ้นส่วนยานยนต์," การประชุมวิชาการด้านการพัฒนาการดำเนินงานทางอุตสาหกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 2 (CIOD 2011), มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 11 – 12 พฤษภาคม 2554. หน้าที่ 1.

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก
ข้อมูลการทดลอง

ข้อมูลการทดลองตามลำดับขั้นตอนการทดลองของตารางที่ 3.2

ตารางที่ ก.1 แรงในการลากขึ้นรูปด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว VG 68 แรงดัน 50 bar

ระยะกดพื้นที่ลิ้น		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm ² /sec แรงดัน 50 bar								
		ค่าแรงกดที่สปริง=9.42 N/mm			ค่าแรงกดที่สปริง=19.62 N/mm			ค่าแรงกดที่สปริง=35.69 N/mm		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	1.96	13.06	12.38	4.08	27.21	8.05	7.42	49.49	55.36
2	2.50	2.03	13.56	37.62	4.24	28.25	21.47	7.71	51.39	73.79
3	3.75	2.11	14.07	57.16	4.39	29.30	66.82	7.99	53.30	68.26
4	5.00	2.19	14.57	66.70	4.55	30.35	56.10	8.28	55.20	52.37
5	6.25	2.26	15.07	50.93	4.71	31.39	41.55	8.57	57.10	51.47
6	7.50	2.34	15.57	45.88	4.87	32.44	43.08	8.85	59.01	52.00
7	8.75	2.41	16.08	48.66	5.02	33.48	43.54	9.14	60.91	51.93
8	10.00	2.49	16.58	48.56	5.18	34.53	43.17	9.42	62.81	51.73
9	11.25	2.56	17.08	48.46	5.34	35.58	43.93	9.71	64.72	52.87
10	12.50	2.64	17.58	43.58	5.49	36.62	45.45	9.99	66.62	54.45
11	13.75	2.71	18.09	44.13	5.65	37.67	45.83	10.28	68.52	57.17
12	15.00	2.79	18.59	46.43	5.81	38.72	47.44	10.56	70.43	59.18
13	16.25	2.86	19.09	47.50	5.96	39.76	47.54	10.85	72.33	60.23
14	17.50	2.94	19.59	48.05	6.12	40.81	48.58	11.14	74.24	61.36
15	18.75	3.01	20.10	47.33	6.28	41.86	47.44	11.42	76.14	60.96

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank; 3.01 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน;
 $\frac{3.01}{15} \times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป; 47.33 kN = แรงลากขึ้นรูป;
 19.62 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่ 2 (เพิ่มขึ้น) และ 35.69 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่
 3 (สูงสุด)

เพราะฉะนั้น การขึ้นรูปดีที่สุดของน้ำมัน VG 68 ความหนืด 68 mm²/sec ที่แรงดัน 50 bar
 คือ ขึ้นรูปที่ความลึก 15 mm ที่แรงเหยียบ 3.01 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูป 47.33 kN ดังแสดงในภาพ
 ที่ 4.12 (ก)

ตารางที่ ก.2 แรงในการลากขึ้นรูปด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว VG 68 แรงดัน 100 bar

ระยะกดพื้นซึ่กลี		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm ² /sec แรงดัน 100 bar								
(mm)		ค่าแรงคงที่สปริง=9.42 N/mm*			ค่าแรงคงที่สปริง=19.62 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=35.69 N/mm*		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	1.96	13.06	18.13	4.08	27.21	24.04	7.42	49.49	61.81
2	2.50	2.03	13.56	34.78	4.24	28.25	36.29	7.71	51.39	89.52
3	3.75	2.11	14.07	69.34	4.39	29.30	72.78	7.99	53.30	51.73*
4	5.00	2.19	14.57	83.21	4.55	30.35	51.74	8.28	55.20	45.69*
5	6.25	2.26	15.07	58.74*	4.71	31.39	46.23	8.57	57.10	49.11*
6	7.50	2.34	15.57	51.55*	4.87	32.44	46.02	8.85	59.01	51.08*
7	8.75	2.41	16.08	56.59*	5.02	33.48	46.21	9.14	60.91	50.94*
8	10.00	2.49	16.58	57.43*	5.18	34.53	46.14	9.42	62.81	51.50*
9	11.25	2.56	17.08	55.74*	5.34	35.58	46.67	9.71	64.72	51.65*
10	12.50	2.64	17.58	51.47*	5.49	36.62	46.68	9.99	66.62	49.74*
11	13.75	2.71	18.09	48.26*	5.65	37.67	46.33	10.28	68.52	50.69*
12	15.00	2.79	18.59	46.97*	5.81	38.72	47.34	10.56	70.43	49.96*
13	16.25	2.86	19.09	45.11*	5.96	39.76	48.59	10.85	72.33	49.48*
14	17.50	2.94	19.59	44.94*	6.12	40.81	50.22	11.14	74.24	51.79*
15	18.75	3.01	20.10	44.03*	6.28	41.86	51.49	11.42	76.14	51.92*

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank; 3.01 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน;
 $\frac{3.01}{15} \times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป; 44.03 kN = แรงลากขึ้นรูป
 (ขึ้นงานเกิดการฉีกขาด); 19.62 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของ
 เส้นผ่าศูนย์กลาง Blank; 6.28 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน; $\frac{6.28}{15} \times 100 = 41.86\%$ แรงเหยียบขึ้นงานของ
 ระยะความลึกการขึ้นรูป; 51.49 kN = แรงลากขึ้นรูป และ 35.69 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 3
 (สูงสุด)

เพราะฉะนั้น การขึ้นรูปที่ดีที่สุดของน้ำมัน VG 68 ความหนืด 68 mm²/sec ที่แรงดัน 100 bar
 คือ ขึ้นรูปที่ความลึก 15 mm ที่แรงเหยียบ 6.28 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูป 51.49 kN ดังแสดงในภาพ
 ที่ 4.13 (ข)

ตารางที่ ก.3 แรงในการลากขึ้นรูปด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว VG 68 แรงดัน 150 bar

ระยะกดพื้นชลิค (mm)		ของเหลว VG 68 ความหนืด 68 mm ² /sec แรงดัน 150 bar								
		ค่าแรงคงที่สปริง=9.42 N/mm*			ค่าแรงคงที่สปริง=19.62 N/mm*			ค่าแรงคงที่สปริง=35.69 N/mm*		
mm	%	แรงเหยียบ สปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	1.96	13.06	33.95	4.08	27.21	33.84	7.42	49.49	X
2	2.50	2.03	13.56	79.74	4.24	28.25	70.67	7.71	51.39	X
3	3.75	2.11	14.07	98.86	4.39	29.30	99.29	7.99	53.30	X
4	5.00	2.19	14.57	62.57*	4.55	30.35	63.44*	8.28	55.20	X
5	6.25	2.26	15.07	60.31*	4.71	31.39	52.57*	8.57	57.10	X
6	7.50	2.34	15.57	60.18*	4.87	32.44	50.29*	8.85	59.01	X
7	8.75	2.41	16.08	57.99*	5.02	33.48	44.27*	9.14	60.91	X
8	10.00	2.49	16.58	57.16*	5.18	34.53	44.66*	9.42	62.81	X
9	11.25	2.56	17.08	56.54*	5.34	35.58	44.29*	9.71	64.72	X
10	12.50	2.64	17.58	54.35*	5.49	36.62	44.10*	9.99	66.62	X
11	13.75	2.71	18.09	54.23*	5.65	37.67	44.13*	10.28	68.52	X
12	15.00	2.79	18.59	56.02*	5.81	38.72	43.99*	10.56	70.43	X
13	16.25	2.86	19.09	56.98*	5.96	39.76	43.95*	10.85	72.33	X
14	17.50	2.94	19.59	59.93*	6.12	40.81	44.00*	11.14	74.24	X
15	18.75	3.01	20.10	60.87*	6.28	41.86	44.16*	11.42	76.14	X

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank; 3.01 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน;
 $\frac{3.01}{15} \times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป; 60.87 kN = แรงลากขึ้นรูป
 (ขึ้นงานเกิดการฉีกขาด); 19.62 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 2 (แรงลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้นและ
 ขึ้นงานเกิดการฉีกขาด) และ 35.69 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 3 (ไม่สามารถทำการขึ้นรูปได้
 สำเร็จ) ดังแสดงในภาพที่ 4.12 (ค) และ 4.13 (ค)

ตารางที่ ก.4 แรงในการลากขึ้นรูปด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว VG 46 แรงดัน 50 bar

ระยะกดพื้นที่ลิค (mm)		ของเหลว VG 68 ความหนืด 46 mm ² /sec แรงดัน 50 bar								
		ค่าแรงคงที่สปริง=9.42 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=19.62 N/mm			ค่าแรงคงที่สปริง=35.69 N/mm*		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	1.96	13.06	17.40	4.08	27.21	6.53	7.42	49.49	34.74
2	2.50	2.03	13.56	43.35	4.24	28.25	31.70	7.71	51.39	86.17
3	3.75	2.11	14.07	80.88	4.39	29.30	61.40	7.99	53.30	58.43*
4	5.00	2.19	14.57	58.24	4.55	30.35	58.55	8.28	55.20	45.96*
5	6.25	2.26	15.07	50.84	4.71	31.39	48.12	8.57	57.10	46.54*
6	7.50	2.34	15.57	50.12	4.87	32.44	44.12	8.85	59.01	47.30*
7	8.75	2.41	16.08	51.14	5.02	33.48	45.55	9.14	60.91	48.29*
8	10.00	2.49	16.58	50.61	5.18	34.53	45.83	9.42	62.81	49.48*
9	11.25	2.56	17.08	50.44	5.34	35.58	45.16	9.71	64.72	51.07*
10	12.50	2.64	17.58	51.49	5.49	36.62	46.88	9.99	66.62	52.46*
11	13.75	2.71	18.09	52.57	5.65	37.67	48.50	10.28	68.52	52.65*
12	15.00	2.79	18.59	52.61	5.81	38.72	46.97	10.56	70.43	53.03*
13	16.25	2.86	19.09	53.81	5.96	39.76	46.68	10.85	72.33	52.35*
14	17.50	2.94	19.59	55.49	6.12	40.81	48.30	11.14	74.24	53.07*
15	18.75	3.01	20.10	55.27	6.28	41.86	50.58	11.42	76.14	50.05*

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank; 3.01 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน;
 $\frac{3.01}{15} \times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป; 55.27 kN = แรงลากขึ้นรูป;
 19.62 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 2 ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank;
 6.28 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน; $\frac{6.28}{15} \times 100 = 41.86\%$ แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป;
 50.58 kN = แรงลากขึ้นรูป (แรงลากขึ้นรูปลดลง) และ 35.69 N/mm = ค่าแรงคงที่ของสปริงชุดที่ 3
 (ขึ้นงานเกิดการฉีกขาด)

เพราะฉะนั้น การขึ้นรูปดีที่สุดของน้ำมัน VG 46 ความหนืด 46 mm²/sec ที่แรงดัน 50 bar
 คือ ขึ้นรูปที่ความลึก 15 mm ที่แรงเหยียบ 6.28 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูป 50.58 kN ดังแสดงในภาพ
 ที่ 4.16 (ก)

ตารางที่ ก.5 แรงในการลากขึ้นรูปด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว VG 46 แรงดัน 100 bar

ระยะกดพื้นขี้เหล็ก (mm)		ของเหลว VG 46 ความหนืด 46 mm ² /sec แรงดัน 100 bar								
		ค่าแรงกดที่สปริง=9.42 N/mm			ค่าแรงกดที่สปริง=19.62 N/mm			ค่าแรงกดที่สปริง=35.69 N/mm*		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	1.96	13.06	43.71	4.08	27.21	21.11	7.42	49.49	X
2	2.50	2.03	13.56	98.78	4.24	28.25	44.18	7.71	51.39	X
3	3.75	2.11	14.07	102.77	4.39	29.30	70.73	7.99	53.30	X
4	5.00	2.19	14.57	84.02	4.55	30.35	53.38	8.28	55.20	X
5	6.25	2.26	15.07	81.50	4.71	31.39	46.88	8.57	57.10	X
6	7.50	2.34	15.57	81.62	4.87	32.44	44.71	8.85	59.01	X
7	8.75	2.41	16.08	82.98	5.02	33.48	44.69	9.14	60.91	X
8	10.00	2.49	16.58	83.35	5.18	34.53	45.16	9.42	62.81	X
9	11.25	2.56	17.08	83.82	5.34	35.58	45.41	9.71	64.72	X
10	12.50	2.64	17.58	84.21	5.49	36.62	45.52	9.99	66.62	X
11	13.75	2.71	18.09	84.70	5.65	37.67	46.33	10.28	68.52	X
12	15.00	2.79	18.59	84.69	5.81	38.72	47.08	10.56	70.43	X
13	16.25	2.86	19.09	84.67	5.96	39.76	48.10	10.85	72.33	X
14	17.50	2.94	19.59	84.11	6.12	40.81	48.54	11.14	74.24	X
15	18.75	3.01	20.10	83.61	6.28	41.86	48.23	11.42	76.14	X

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank; 3.01 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน;
 $\frac{3.01}{15} \times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป; 83.61 kN = แรงลากขึ้นรูป;
 19.62 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่ 2 ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank;
 6.28 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน; $\frac{6.28}{15} \times 100 = 41.86\%$ แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป;
 48.23 kN = แรงลากขึ้นรูป (แรงลากขึ้นรูปลดลง) และ 35.69 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่ 3
 (ไม่สามารถขึ้นรูปได้สำเร็จ)

เพราะฉะนั้น การขึ้นรูปดีที่สุดของน้ำมัน VG 46 ความหนืด 46 mm²/sec ที่แรงดัน 100 bar
 คือ ขึ้นรูปที่ความลึก 15 mm ที่แรงเหยียบ 6.28 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูป 48.23 kN ดังแสดงในภาพ
 ที่ 4.16 (ข)

ตารางที่ ก.6 แรงในการลากขึ้นรูปด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว VG 46 แรงดัน 150 bar

ระยะกดพื้นซ์ลึก (mm)		ของเหลว VG 46 ความหนืด 46 mm ² /sec แรงดัน 150 bar								
		ค่าแรงกดที่สปริง=9.42 N/mm			ค่าแรงกดที่สปริง=19.62 N/mm*			ค่าแรงกดที่สปริง=35.69 N/mm*		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	1.96	13.06	40.03	4.08	27.21	45.42	7.42	49.49	X
2	2.50	2.03	13.56	90.55	4.24	28.25	96.42	7.71	51.39	X
3	3.75	2.11	14.07	112.35	4.39	29.30	115.70	7.99	53.30	X
4	5.00	2.19	14.57	99.40	4.55	30.35	77.65*	8.28	55.20	X
5	6.25	2.26	15.07	82.97	4.71	31.39	71.35*	8.57	57.10	X
6	7.50	2.34	15.57	82.81	4.87	32.44	72.98*	8.85	59.01	X
7	8.75	2.41	16.08	83.31	5.02	33.48	73.09*	9.14	60.91	X
8	10.00	2.49	16.58	84.96	5.18	34.53	73.84*	9.42	62.81	X
9	11.25	2.56	17.08	85.88	5.34	35.58	74.56*	9.71	64.72	X
10	12.50	2.64	17.58	88.00	5.49	36.62	74.86*	9.99	66.62	X
11	13.75	2.71	18.09	86.88	5.65	37.67	74.53*	10.28	68.52	X
12	15.00	2.79	18.59	85.58	5.81	38.72	74.05*	10.56	70.43	X
13	16.25	2.86	19.09	85.96	5.96	39.76	74.24*	10.85	72.33	X
14	17.50	2.94	19.59	87.35	6.12	40.81	75.11*	11.14	74.24	X
15	18.75	3.01	20.10	89.56	6.28	41.86	74.05*	11.42	76.14	X

ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank; 3.01 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน;
 $\frac{3.01}{15} \times 100 = 20.1\%$ แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป; 89.56 kN = แรงลากขึ้นรูป;
 19.62 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่ 2 (แรงลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้นและขึ้นงานเกิดการฉีกขาด) และ
 35.69 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่ 3 (ไม่สามารถขึ้นรูปได้สำเร็จ)

เพราะฉะนั้น การขึ้นรูปดีที่สุดในน้ำมัน VG 46 ความหนืด 46 mm²/sec ที่แรงดัน 150 bar
 คือ ขึ้นรูปที่ความลึก 15 mm ที่แรงเหยียบ 3.01 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูป 89.56 kN ดังแสดงในภาพ
 ที่ 4.15 (ค)

ตารางที่ ก.7 แรงในการลากขึ้นรูปด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว VG 32 แรงดัน 20 bar

ระยะกดพื้นซ์ลึก (mm)		ของเหลว VG 46 ความหนืด 46 mm ² /sec แรงดัน 150 bar								
		ค่าแรงกดที่สปริง=9.42 N/mm*			ค่าแรงกดที่สปริง=19.62 N/mm			ค่าแรงกดที่สปริง=35.69 N/mm*		
mm	%	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)	แรงเหยียบสปริง (kN)	%	แรงลากขึ้นรูป (kN)
1	1.25	1.96	13.06	X	4.08	27.21	74.40	7.42	49.49	X
2	2.50	2.03	13.56	X	4.24	28.25	82.65	7.71	51.39	X
3	3.75	2.11	14.07	X	4.39	29.30	65.77	7.99	53.30	X
4	5.00	2.19	14.57	X	4.55	30.35	57.98	8.28	55.20	X
5	6.25	2.26	15.07	X	4.71	31.39	54.80	8.57	57.10	X
6	7.50	2.34	15.57	X	4.87	32.44	55.41	8.85	59.01	X
7	8.75	2.41	16.08	X	5.02	33.48	56.78	9.14	60.91	X
8	10.00	2.49	16.58	X	5.18	34.53	58.93	9.42	62.81	X
9	11.25	2.56	17.08	X	5.34	35.58	60.13	9.71	64.72	X
10	12.50	2.64	17.58	X	5.49	36.62	60.07	9.99	66.62	X
11	13.75	2.71	18.09	X	5.65	37.67	61.21	10.28	68.52	X
12	15.00	2.79	18.59	X	5.81	38.72	60.05	10.56	70.43	X
13	16.25	2.86	19.09	X	5.96	39.76	60.79	10.85	72.33	X
14	17.50	2.94	19.59	X	6.12	40.81	61.54	11.14	74.24	X
15	18.75	3.01	20.10	X	6.28	41.86	62.50	11.42	76.14	X

9.42 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่ 1 (ไม่สามารถทำการขึ้นรูปได้สำเร็จ); ขึ้นรูปลึก 15 mm = 18.75% ของเส้นผ่าศูนย์กลาง Blank; 19.62 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่ 2; 6.28 kN = แรงเหยียบขึ้นงาน; $\frac{6.28}{15} \times 100 = 41.86\%$ แรงเหยียบขึ้นงานของระยะความลึกการขึ้นรูป; 62.50 kN = แรงลากขึ้นรูป) และ 35.69 N/mm = ค่าแรงกดที่ของสปริงชุดที่ 3 (ไม่สามารถขึ้นรูปได้สำเร็จ)

เพราะฉะนั้น การขึ้นรูปดีที่สุดของน้ำมัน VG 32 ความหนืด 32 mm²/sec ที่แรงดัน 20 bar คือ ขึ้นรูปที่ความลึก 15 mm ที่แรงเหยียบ 6.28 kN ใช้แรงในการลากขึ้นรูป 62.50 kN ดังแสดงในภาพที่ 4.19 (ก)

หมายเหตุ * หมายถึง ขึ้นงานเกินการฉีกขาด

** , X หมายถึง ไม่สามารถขึ้นรูปได้

ตารางที่ ก.8 แรงในการลากขึ้นรูปแบบปกติ

ระยะกดพื้นซ์ (mm) / เปอร์เซ็นต์ต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง แผ่นชิ้นงาน		แรงในการลากขึ้นรูป (kN) / เปอร์เซ็นต์แรงเทียบชิ้นงานต่อแรงกดพื้นซ์ (%)					
		สปริง 9.42 N/mm		สปริง 19.62 N/mm		สปริง 35.69 N/mm	
		kN	%	kN	%	kN	%
1	1.25	3.87	50.63	5.84	33.55	17.94	10.92
2	2.50	41.98	4.85	54.57	3.73	61.47	3.31
3	3.75	67.34	3.13	72.21	2.92	72.31	2.92
4	5.00	52.92	4.13	45.18	4.84	48.26	4.53
5	6.25	41.18	5.49	39.9	5.67	42.94	5.27
6	7.50	43.69	5.35	41.62	5.61	45.6	5.12
7	8.75	43.88	5.50	43.76	5.51	45.5	5.30
8	10.00	43.86	5.67	43.16	5.76	45.6	5.45
9	11.25	44.01	5.82	41.86	6.12	48.64	5.27
10	12.50	45.34	5.82	41.98	6.28	47.97	5.50
11	13.75	46.36	5.85	43.52	6.23	48.16	5.63
12	15.00	45.89	6.08	42.81	6.51	49.11	5.68
13	16.25	45.77	6.26	43.4	6.60	48.92	5.85
14	17.50	46.73	6.29	43.34	6.78	51.68	5.69
15	18.75	47.12	6.40	44.23	6.82	51.3	5.88

ตารางที่ ก.9 แรงกดพื้นซ์ที่กระทำต่อชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 68

แรงกดแผ่นทดสอบ ด้วยค่าคงที่สปริง (N/mm)	แรงกดพื้นซ์จากการลาก ขึ้นรูปแบบปกติ (kN)	แรงกดพื้นซ์ที่กระทำต่อชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 68 ที่ แรงดัน (bar)		
		50 bar	100 bar	150 bar
9.42	69.34	64.16	67.32	75.02
19.62	71.21	59.26	56.89	75.45
35.69	79.24	70.12	73.63	X

ตารางที่ ก.10 แรงกดพื้นซ์ที่กระทำต่อชิ้นงานจากการลากขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 46

แรงกดแผ่นทดสอบ ด้วยค่าคงที่สปริง (N/mm)	แรงกดพื้นซ์จากการลาก ขึ้นรูปแบบปกติ (kN)	แรงกดพื้นซ์สูงสุด (kN) ที่กระทำต่อแผ่นทดสอบจากการลากขึ้นรูปด้วย ของเหลว VG 46 ที่แรงดัน (bar)		
		50 bar	100 bar	150 bar
9.42	69.34	72.93	88.02	90.63
19.62	71.21	55.27	56.84	93.00
35.69	79.24	78.22	X	X

ตารางที่ ก.11 แรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานจากการขึ้นรูปด้วยของเหลว VG 32

แรงกดแผ่นทดสอบด้วย ค่าคงที่สปริง (N/mm)	แรงกดพื้นที่จากการลาก ขึ้นรูปแบบปกติ (kN)	แรงกดพื้นที่สูงสุด (kN) ที่กระทำต่อแผ่นทดสอบจากการลากขึ้นรูปด้วย ของเหลว VG 32 ที่แรงดัน (bar)			
		20 bar	50 bar	100 bar	150 bar
9.42	69.34	X	X	X	X
19.62	71.21	80.05	X	X	X
35.69	79.24	X	X	X	X

ตารางที่ ก.12 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปโดยใช้ของเหลว VG 68

ตำแหน่งการวัด	ค่าคงที่สปริง 9.42 N/mm			
	การขึ้นรูปแบบธรรมดา	50 bar	100 bar	150 bar
1	-2.98%	0.20%	-5.600%	-6.00%
2	-4.17%	-0.80%	-8.400%	-10.40%
3	-9.53%	-8.80%	-14.000%	-14.40%
4	-5.95%	-4.40%	-8.400%	-10.40%
5	4.75%	6.80%	4.800%	4.00%
6	9.54%	12.00%	10.000%	9.60%

ตารางที่ ก.13 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปโดยใช้ของเหลว VG 68

ตำแหน่งการวัด	ค่าคงที่สปริง 19.62 N/mm			
	การขึ้นรูปแบบธรรมดา	50 bar	100 bar	150 bar
1	-3.97%	-2.40%	-2.40%	-3.60%
2	-5.95%	-5.60%	-4.00%	-6.80%
3	-16.31%	-10.00%	-6.40%	-12.40%
4	-10.32%	-7.20%	-1.60%	-11.333%
5	4.37%	6.00%	3.60%	4.00%
6	9.55%	11.60%	8.40%	8.667%

ตารางที่ ก.14 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปโดยใช้ของเหลว VG 68

ตำแหน่งการวัด	ค่าคงที่สปริง 35.62 N/mm			
	การขึ้นรูปแบบธรรมดา	50 bar	100 bar	150 bar
1	-8.75%	-5.20%	-6.00%	X
2	-9.96%	-7.60%	-9.20%	X
3	-19.07%	-14.00%	-16.80%	X
4	-19.47%	-11.60%	X	X
5	5.17%	5.60%	X	X
6	7.56%	8.00%	X	X

ตารางที่ ก.15 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปโดยใช้ของเหลว VG 46

ตำแหน่งการวัด	ค่าคงที่สปริง 9.42 n/mm			
	การขึ้นรูปแบบธรรมดา	50 bar	100 bar	150 bar
1	-2.98	-2.400	-2.000	-3.200
2	-4.17	-4.400	-3.200	-5.600
3	-9.53	-8.400	-5.600	-11.200
4	-5.95	-4.400	-2.400	-6.800
5	4.75	6.400	5.600	4.400
6	9.54	10.000	9.600	10.000

ตารางที่ ก.16 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปโดยใช้ของเหลว VG 46

ตำแหน่งการวัด	ค่าคงที่สปริง 19.62 n/mm			
	การขึ้นรูปแบบธรรมดา	50 bar	100 bar	150 bar
1	-3.97	-0.800	-1.000	-4.000
2	-5.95	-3.600	-3.600	-6.800
3	-16.31	-8.000	-10.000	-13.600
4	-10.32	-7.600	-8.000	-11.600
5	4.37	4.000	4.800	4.400
6	9.55	8.400	9.200	8.800

ตารางที่ ก.17 ความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปโดยใช้ของเหลว VG 46

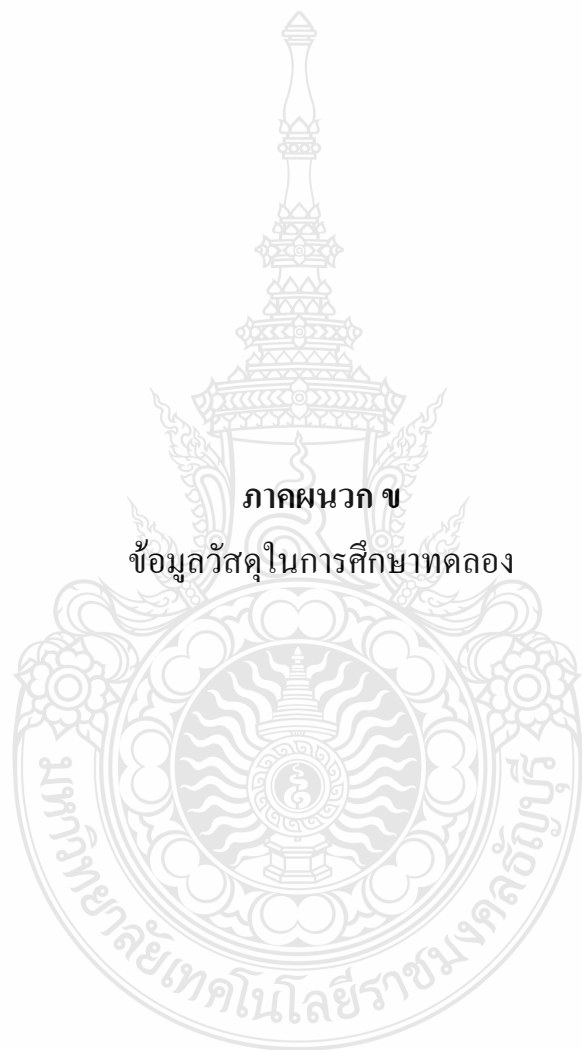
ตำแหน่งการวัด	ค่าคงที่สปริง 35.69 n/mm			
	การขึ้นรูปแบบธรรมดา	50 bar	100 bar	150 bar
1	-8.75	-4.800	X	X
2	-9.96	-5.600	X	X
3	-19.07	-19.200	X	X
4	-19.47	-20.000	X	X
5	5.17	5.200	X	X
6	7.56	7.200	X	X

ตารางที่ ก.25 การทดลองด้วยของเหลว VG 32 ที่แรงดัน 20 bar ด้วยแรงกดชิ้นงาน 19.62 นิวตันต่อมิลลิเมตร (*เกิดการฉีกขาด, Fail)

แรงดัน (bar)	ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (ชนิดของความเครียด)							
	ความเครียดตรง				ความเครียดหลัก			
	กึ่งกลางด้วย	ขอบด้วย	ผนังด้วย	มุมตาย	กึ่งกลางด้วย	ขอบด้วย	ผนังด้วย	มุมตาย
20	0.018	0.018	-0.034	-0.314	0.028	0.058	0.293	0.607
50	X	X	X	X	X	X	X	X
100	X	X	X	X	X	X	X	X

ตารางที่ ก.26 การทดลองด้วยการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติ (*เกิดการฉีกขาด, Fail)

แรงกด ชิ้นงาน (N/mm)	ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (ชนิดของความเครียด)							
	ความเครียดตรง				ความเครียดหลัก			
	กึ่งกลางด้วย	ขอบด้วย	ผนังด้วย	มุมตาย	กึ่งกลางด้วย	ขอบด้วย	ผนังด้วย	มุมตาย
9.42	0.062	0.059	-0.018	-0.335	0.052	0.139	0.297	0.493
19.62	0.080	0.067	-0.025	-0.452*	0.086	0.143	0.296	0.916*
35.69	0.087	0.065	-0.118*	-0.552*	0.137	0.197	0.697*	0.982*



ภาคผนวก ข

ข้อมูลวัสดุในการศึกษาทดลอง



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

รายงานผลการทดสอบ		หน้า 1/3
หมายเลขปฏิบัติการ	5503020940	
ชื่อที่อยู่ของผู้ขอรับบริการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ต.สองหอ 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 อุนะกุล) ผู้จัดการแผนกทดสอบ 14 / 04 / 55	
ผู้ทดสอบ นายริชา 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 อุตสาหกรรมรัตนโกสินทร์

หมายเลขปฏิบัติการ 5503020940

หน้า 2/3

ผลการทดสอบ

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



ผู้ทดสอบ *Mur Mur* 10/04/2555 ผู้ทบทวน *Wh* 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

หมายเลขปฏิบัติการ 5503020940

หน้า 3/3

ผลการทดสอบ

ส่วนประกอบทางเคมี

รายการทดสอบ		หน่วย	ผลการทดสอบ			
			#1	#2	#3	Uncertainty (95 %,k=2)
ส่วนประกอบ ทางเคมี	คาร์บอน	ร้อยละ	0.0449			
	ซิลิกอน	โดยน้ำหนัก	<0.0700			
	แมงกานีส		0.2534			
	ฟอสฟอรัส		0.0196			
	กำมะถัน		0.0078			
	ทองแดง		0.0041			
	นิกเกิล		0.0871			
	โครเมียม		0.0220			
	วานาเดียม		<0.0040			
	อลูมิเนียม		0.0217			
	โบลิบดีนัม		0.0027			
	ทังสเตน		0.0002			
	นิกเกิล + โครเมียม		-			

ผู้ทดสอบ *[Signature]* 10.104.2555 ผู้ทบทวน *[Signature]* 10.104.2555

รายงานนี้รับรองเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น ห้ามคัดลอกรายงานผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันยานยนต์
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.3 รายงานผลการทดสอบส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กแผ่น SPCC ซึ่งใช้ในการทดลอง



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

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

CERTIFICATE OF ANALYSIS

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

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

Item	Property	Date of Test	Unit	Test Method	Result
1.	Viscosity at 40 °C	27-Apr-2012	mm ² /s	ASTM D445-09	34.43

Remark :

Reported By : Mr. Chetwana Rungwanitcha

Approved By : 
(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.4 รายงานผลการทดสอบความหนืดของน้ำมันไฮดรอลิก VG 32



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

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

CERTIFICATE OF ANALYSIS

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

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

Item	Property	Date of Test	Unit	Test Method	Result
1.	Viscosity at 40 oC	27-Apr-2012	mm ² /s	ASTM D445-09	44.49

Remark :

Reported By : Mr. Chetwana Rungwanitcha

Approved By :

W.T.
(Mr. Wichian Tantithumpoosit)

Date of Issue : 27-Apr-2012



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

FR-RTI-SP-023-001

Revision 3 10/05/53

ภาพที่ ข.5 รายงานผลการทดสอบความหนืดของน้ำมันไฮดรอลิก VG 46



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

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

CERTIFICATE OF ANALYSIS

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

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

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

Remark :

Reported By : Mr. Chetwana Rungwanittha

Approved By :

(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.6 รายงานผลการทดสอบความหนืดของน้ำมันไฮดรอลิก VG 68



ภาคผนวก ค
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



การประชุมวิชาการ
ด้านการพัฒนาการดำเนินงาน
ทางอุตสาหกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 3 (CIOD 2012)
The Conference of Industrial Operations Development 2012



วันที่ 26 เมษายน 2555

ณ ห้องประชุม 12B02-05 ห้องประชุมใหญ่ 12B06 และ 12B07
บัณฑิตวิทยาลัย อาคารนวมินทรราชินี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

สาขาองค์ความรู้		กำหนดการเกี่ยวกับบทความ	
1. Carbon Management and Sustainable Production	17. Operations Research	วันสุดท้ายของการส่งบทความ	29 มกราคม 2555
2. CAD, CAM, CIM	18. Production and Operations Management	แจ้งผลตอบรับบทความ	5 กุมภาพันธ์ 2555
3. DSS and Expert Systems	19. Queue Theory	วันสุดท้ายการส่งบทความฉบับสมบูรณ์	5 มีนาคม 2555
4. Ergonomics	20. Routing	แจ้งผลการประเมินบทความฉบับสมบูรณ์	28 มีนาคม 2555
5. E-Business / Information Technology	21. Reliability	วันสุดท้ายการส่งบทความฉบับแก้ไข	10 เมษายน 2555
6. Engineering Economics	22. Scheduling	แจ้งผลการตอบรับบทความ	17 เมษายน 2555
7. Flexible Manufacturing	23. Search Algorithms	วันสุดท้ายของการลงทะเบียนเพื่อรับส่วนลด	17 เมษายน 2555
8. Group Technology	24. Simulation	การนำเสนอบทความ	26 เมษายน 2555
9. IE Applications in Medical Industry	25. Applied Statistics		
10. IE Applications in Semiconductor Industry	26. Supply Chain and Logistics Management		
11. IE Applications in Tourism Industry	27. System Dynamics		
12. Inventory Theory and Management	28. Total Quality Management		
13. Industrial Engineering Education	29. Mechatronics		
14. Knowledge and Information Management	30. Metallurgy, Welding, and Foundry		
15. Occupational Health and Safety	31. Nondestructive Testing		
16. Optimization / Artificial Intelligence	32. Other IE Related Topics		

ติดต่อสอบถามได้ที่ นางสาวการะเกด บัวแก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
โทร 0-2913-2500 ต่อ 8134-5 โทรสาร 0-2912-2012 มือถือ 086-302-6906
เว็บไซต์ <http://www.ie.kmutnb.ac.th/ciod2012.html>

นายอิทธิพล เนคมานูร์กีช
โทร 089-3011-415
E-mail : ciod2012@hotmail.com

7. คณะกรรมการดำเนินงาน

ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วิบูลย์ ชื่นแขก	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร. ประภัศร์ วังศากุญจน์	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผศ.ดร. อัครนันท์ คีตสม	คณบดีคณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ผศ.ดร. ไชยา คำคำ	หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร. จิรรัตน์ อีระวารพฤกษ์	หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ดร. กฤษดา อัครรุ่งแสงกุล	รักษาการหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ประธานจัดงาน

รศ.ดร. ยุทธชัย บรรเทิงจิตร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
----------------------------	--

คณะกรรมการดำเนินงาน

รศ. สมเกียรติ จงประสิทธิ์พร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร. อรรถกร เก่งพล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร. อีระเดช วุฒิพรพันธ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ. สมชาย พรชัยวิวัฒน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ชาติชาย อัครศักดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร. วิชัย รุ่งเรืองอนันต์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร. กุศล พิมาพันธุ์ศรี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร. นันทกฤษณ์ ยอดพิจิตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร. อนุสาร อินทรกำจรชัย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร. ชยธัช เมื่อกสามัญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ. ณฤทธิศักดิ์ ตันติพิทยวรรณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร. กฤษดา อัครรุ่งแสงกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เจ้าหน้าที่ประสานงาน

นางอรนุช อาลีมัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
นางสาวกระเมต บัวแก้ว	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
นางสาวรุ่งแก้ว ทรัพย์พจน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
นางสาวณิชากรีย์ วงศ์นิธิวารกิจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
นายณัฐวัตร ภาคอุหลาบ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

คณะกรรมการวิชาการ (ต่อ)

ดร. ไพฑูรย์ ช่วงทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร. ศุภฤกษ์ บุญเกียรติ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร. พิณนัฐ ศรีโยธา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. สุขสันต์ พรหมบุญพงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ. เจริญ สุนทรวานิชย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร. เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. เจริญชัย โขมพัตรภรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร. ช่อแก้ว จตุรานนท์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
อ. สุจินต์ ธงถาวรสุวรรณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ. พงมาน เตียวฉวีรัตน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร. อุษณีย์ คำพูล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
อ. เจษฎา จันทร์ทองใส	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร. ธราธร กุลภัทรนิรันดร์	คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ดร. สิริภัคตร์ สิริโท	คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ดร. วรพจน์ มีดม	คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ดร. สุชาดา เจียมสกุล	คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ดร. ชินสมล บุญนา	คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
อ. พัฒนพงษ์ แสงหัตถ์วัฒนา	คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ดร. วิจิตรสวัสดิ์ สุขสวัสดิ์ ณ อยุธยา	คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
อ. ธนิตา สุนารักษ์	คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

8. รูปแบบของบทความและบทความ**➤ การนำเสนอบทความ**

1. บทความภาษาไทย และภาษาอังกฤษ ใช้อักษร Angsana New ขนาด 15 pt. โดยโปรแกรม Microsoft Word ความยาวไม่เกิน 1 หน้ากระดาษ A4 (ทั้งบทความภาษาไทย และภาษาอังกฤษ)
2. บทความวิจัย และบทความวิชาการภาคเอกชน ความยาวไม่เกิน 6 หน้ากระดาษ A4
3. รูปแบบของบทความสามารถดูรายละเอียดได้ที่เว็บไซต์ <http://www.ie.kmutnb.ac.th/ciod2012.html>

9. กำหนดการเกี่ยวกับบทความ

- วันสุดท้ายของการส่งบทความ 29 มกราคม 2555
- แจ้งผลตอบรับบทความ 5 กุมภาพันธ์ 2555
- วันสุดท้ายการส่งบทความฉบับสมบูรณ์ 5 มีนาคม 2555
- แจ้งผลการประเมินบทความฉบับสมบูรณ์ 28 มีนาคม 2555
- วันสุดท้ายการส่งบทความฉบับแก้ไข 10 เมษายน 2555
- แจ้งผลการตอบรับบทความ 17 เมษายน 2555
- วันสุดท้ายของการลงทะเบียนเพื่อรับส่วนลด 17 เมษายน 2555
- การนำเสนอบทความ 26 เมษายน 2555

การประชุมวิชาการด้านการพัฒนาการดำเนินงานทางอุตสาหกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 3 (CIOD 2012)
26 เมษายน 2555 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

18.	ศึกษาผลกระทบทางกระบวนการความร้อนต่อ โครงสร้างจุลภาคและสมบัติงานเชื่อมเหล็กกล้า ไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรด UNS S31803 โดยผ่านกรรมวิธีการอบอ่อน ชาวลิต ราชแก้ว, สันติรัฐ นันสะอาง และ สิทธิชัย แก้วเกื้อกุล	141
19.	การศึกษาอิทธิพลของแรงดันของเหลวที่มีต่อแรงลากขึ้นรูปในการลากขึ้นรูปเหล็กคาร์บอน รีดเย็น SPCC ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว กฤษดา บรรเทาพิช และ สิทธิชัย ต่อสกุล	147
20.	การวางแผนการผลิตเพื่อประกอบตามคำสั่งใช้การ โปรแกรมแบบพอสลิบลิสติก ศุภธรร ศรีสอาด และ นุชบา พุกษาพันธ์รัตน์	155
21.	การหาค่าความหนาขั้วที่เหมาะสมในกระบวนการกัดโลหะด้วยไฟฟ้าด้วย โครงข่ายประสาทเทียม จิรวรรณ กล้อยกข์, วุฒิชัย วงษ์ทัศนีย์กร และ จุฑาพรรณ ทองชั้น	163
22.	การแก้ปัญหาค่าอัตราผลิตผลฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟภายใต้เงื่อนไขทางการเงินและคุณภาพ โดยวิธีการค้นหาแบบคัลกูและวิธึแบท จุฑารัตน์ บุญแปลง และ วุฒิชัย วงษ์ทัศนีย์กร	171
23.	การจัดการปัญหาการขนส่งรถยนต์สำเร็จรูปด้วยรถขนส่งหลายชนิด โดยระเบียบ วิธีพาร์ทิเคิลสวอร์มออปติไมเซชัน ชนวีร์ เกากัน และ สวัสดิ์ ภาะระราช	179
24.	การหาปัจจัยและค่าที่เหมาะสมในกระบวนการจัดร่องนำบอลของวงแหวนชั้นใน ด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง เขาวนา เจริญพร และ จิรรัตน์ ชีระวรพฤษ	186
25.	ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการตัดชิ้นงานหนึ่งมิติแบบทั่วไป จตุพร ใจดำรงค์ และ ปิยวิทย์ สุวรรณ	193
26.	การพัฒนาวิธีการเชื่อมโยงดัชนีวัดผลสมรรถนะระบบบริหารการผลิตด้วยเมตริกซ์ ความสัมพันธ์ เจนจิรา สุขมณี และ ณัฐวุฒิ จันทร์ทอง	200
27.	การจัดลำดับงานซ่อมบำรุงอากาศยานด้วยตารางเมตริกซ์ โครงสร้างการออกแบบ ภัทรวิทย์ ศรีเมือง และ กุศล พิมาพันธุ์ศรี	210

การศึกษาอิทธิพลของแรงดันของเหลวที่มีต่อแรงลากขึ้นรูปในการลากขึ้นรูปลึกเหล็กคาร์บอนรีด
เย็น SPCC ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว

Study effect of liquid pressure to drawing force in SPCC cold rolled carbon steel by
hydrodynamic deep drawing process

กฤษฎา บรรเทาพิษ^{1*} และ ศิริชัย ต่อสกุล²

^{1,2} สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เลขที่ 39 หมู่ที่ 1 ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

E-mail: k_bunthapis@hotmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของแรงดันของเหลว ในกระบวนการการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว (hydrodynamic deep drawing) โดยทำการศึกษาของเหลวชนิดน้ำมันไฮดรอลิกมาตรฐานเกรด 68 ที่มีค่าความหนืดเชิงจลศาสตร์ 61.2-74.8 mm²/s ที่อุณหภูมิ 40 °C ที่แรงดัน 3 ระดับ คือ 50, 100 และ 150 บาร์ ทำการศึกษาทดลองโดยการลากขึ้นรูปลึกชนิดรูปด้วยทรงกระบอกแบบมีปีก เหล็กคาร์บอนรีดเย็นเกรด SPCC ความหนา 0.5 มิลลิเมตร ผลการทดลองซึ่งเปรียบเทียบกับกรลากขึ้นรูปลึกแบบปกติ พบว่าแรงดันของเหลวส่งผลทำให้แรงกดเพิ่มขึ้นโดยรวมเพิ่มสูงขึ้น แต่แรงกดพื้นที่กระทำต่อแผ่นทดสอบลดลง โดยในสภาวะแรงดันของเหลวที่เหมาะสม คือที่แรงดัน 100 บาร์ ไม่พบรอยฉีกขาดที่ผิวของชิ้นงานในการทดสอบ และมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังชิ้นงานน้อยที่สุดเท่ากับ 6.40 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : การลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว, ความหนืดเชิงจลศาสตร์

Abstract

This research is study the effect of liquid pressure in deep drawing process by liquid flow (Hydrodynamic deep drawing). In the experimental studies used hydraulic oil standard grade 68 kinematics viscosity 61.2-74.8 mm²/s temperatures 40 °C liquid pressure 3 value mean 50, 100 and 150 bar. Study by used SPCC cold rolled carbon steel sheet thickness 0.5 mm deep drawing cylindrical cup forming. The result of study compared with normal deep drawing process, liquid pressure effect to total punch force increase but punch force direct to blank reduce. In the appropriately liquid pressure at 100 bar not found tearing of the work piece and percentage of the cup wall thickness minimal change 6.40%.

Keywords : Hydrodynamic deep drawing, Kinematics viscosity

1. บทนำ

งานขึ้นรูปโลหะแผ่น (sheet metal forming, SMF) ในปัจจุบัน มีกรรมวิธีอยู่อย่างมากมาย ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการต่างๆ ก็จะมีความแตกต่างกัน การลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการเคลื่อนที่ของของเหลว (hydrodynamic deep drawing, HDD) เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นสำหรับการขึ้นรูปโลหะที่มีโครงสร้างเป็นโลหะเบา และมีความยืดหยุ่น สำหรับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการต่างๆ [1] ในการลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการเคลื่อนที่ของของเหลว จะใช้ของเหลวที่มีแรงดันสูง เข้ามาช่วยในการขึ้นรูปโลหะแผ่นสำหรับการลากขึ้นรูปลึก โดยในขณะที่มีการเคลื่อนตัวของแม่พิมพ์ด้านบน กดลงบนชิ้นงานเพื่อขึ้นรูป ผลกระทบที่เกิดขึ้นคือ ของเหลวซึ่งมีการควบคุมแรงดัน จะทำให้เกิดแรงต้านแรงกดดันขึ้นระหว่างการขึ้นรูป โดยของเหลวที่มีแรงดันจะเคลื่อนตัว ไหลอยู่ระหว่างแม่พิมพ์ส่วนล่าง กับผิวของแผ่นโลหะ กระบวนการดังกล่าวนี้ สามารถเพิ่มอัตราส่วนขีดจำกัดการลากขึ้นรูป (limiting drawing ratio, LDR) และเป็นการปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูป ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ มุ่งศึกษาถึงอิทธิพลของแรงดันของเหลว (internal liquid pressure) ซึ่งเคลื่อนตัวอยู่ภายในของแม่พิมพ์ส่วนล่าง (liquid chamber) ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีสำคัญอย่างยิ่ง สำหรับกระบวนการลากขึ้นรูปลึก ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ที่มีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูป (drawing force) และความเสียหายของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป [2]

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การลากขึ้นรูปลึก (Deep drawing)

ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึก มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ดาย (die), ทั่ง (punch) และ ตัวกดแผ่นชิ้นงาน (blank holder ring)

2.1.1 แรงในการลากขึ้นรูป

แรงกระทำที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการ การลากขึ้นรูปลึก ซึ่งเกิดจากแม่พิมพ์ตัวกดหรือพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานในรูปที่ 1 แรงกดพื้นที่ในการขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกของ

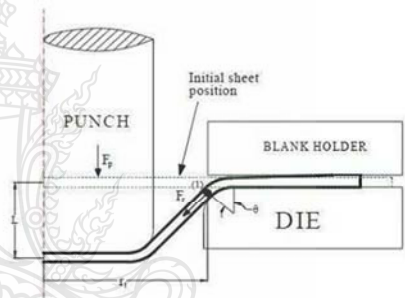
กระบวนการลากขึ้นรูปลึก และการคำนวณแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปลึก สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 1

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

โดย n คือ ค่าการปรับค่า (correction value) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของการขึ้นรูปจริง ตารางที่ 1 ค่าการปรับค่า $n = f(\beta_{actual})$ [3]

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

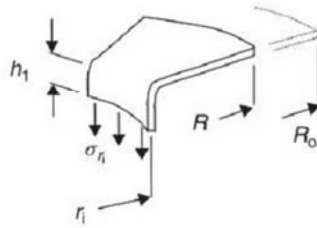


รูปที่ 1 แรงกดพื้นที่ในการขึ้นรูปด้วย

2.2.2 ความเครียดเชิงตัว

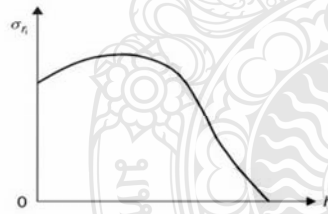
ความเค้นที่เกิดขึ้น บนส่วนของพื้นที่หน้าตัดของวัสดุแผ่น จะเพิ่มขึ้นในระหว่างการลากขึ้นรูป ในขณะที่รัศมีวงนอกของวัสดุแผ่นจะลดลง เนื่องจากโลหะแผ่นจะถูกกดลงไปยังด้านในของดาย รัศมีวงนอก R จะลดลงอย่างรวดเร็วดังในรูปที่ 2 ค่าความเครียดเชิงตัว ซึ่งเกิดจากความเค้นไหลจะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งวัสดุแผ่นไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก ถ้าสมมุติให้ค่าความเค้น ที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุแผ่น เป็นความเค้นเฉลี่ย (σ_m) และไม่คำนึงถึงความหนาที่ไม่สม่ำเสมอของวัสดุแผ่น จะสามารถเขียนได้เป็นสมการที่ 2 [4]

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



รูปที่ 2 ในระหว่างกระบวนการลากขึ้นรูปในสภาวะที่ปราศจากแรงเสียดทานความเค้นจะมีขนาดที่เท่ากันทุกจุด

ค่าตัวแปรสองตัวแปร คือ การเพิ่มขึ้นของความเค้นจนกระทั่งวัสดุเกิดความเครียดแข็งตัว และการลดลงของรัศมี R สามารถเขียนแผนภาพความสัมพันธ์ได้ตามรูปที่ 3 ซึ่งโดยปกติแล้วความเค้นในขณะการลากขึ้นรูปจะเพิ่มสูงขึ้นในช่วงต้น จนกระทั่งมีค่าสูงสุดและจะลดลง



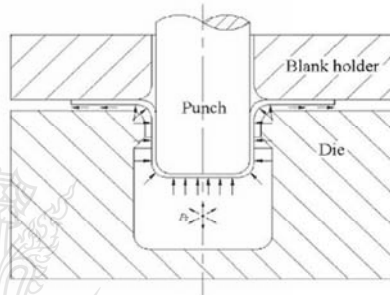
รูปที่ 3 เส้นกราฟของความเค้นในการลากขึ้นรูปเปรียบเทียบกับ การเคลื่อนที่ของพื้นที่

2.3 การลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว

การลากขึ้นรูปลึก ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลวในรูปที่

4 การทำงานและส่วนประกอบของระบบการลากขึ้นรูปลึก ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว โดยทั่วไปมีส่วนประกอบที่

สำคัญ 2 ส่วน คือ 1. ชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก (deep drawing die sets) และ 2. ระบบไฮดรอลิก (hydraulic system) ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนของชุดควบคุมไฮดรอลิก และชุดควบคุมอัตโนมัติ การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยการลากขึ้นรูปลึก โดยใช้การเคลื่อนที่ของของเหลว นั้น ของเหลวที่มีแรงดันตามการควบคุมจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ และไหลออกจากแม่พิมพ์ด้วยแรงดันและความเร็วสูง จากการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของแรงดันของของเหลว นั้น เกิดขึ้นจากการกดของพื้นที่ในจังหวะของการลากขึ้นรูปลึก [5]



รูปที่ 4 การลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว

2.4 แรงกดพื้นที่ที่กระทำต่อแผ่นขึ้นทดสอบ

ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึก ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลวในสภาวะของแรงสูง คำนวณได้ตามสมการที่ 3[6]

$$f_d = f_p - \frac{1}{4} \pi d^2 P_s \quad (3)$$

โดยที่ P_s คือ แรงดันของเหลวภายในห้องแม่พิมพ์ f_d คือแรงในการลากขึ้นรูปที่ทำต่อแผ่นเหล็ก และ f_p คือแรงกดของพื้นที่ในขณะขึ้นรูป

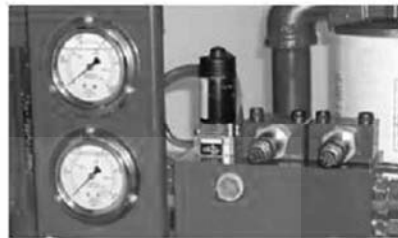
2.5 แอนไอโซทรอปของวัสดุโลหะแผ่น (Anisotropy)

$$R_m = \frac{R_0 + R_{45} + R_{90}}{4} \quad (4)$$

3 การเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง

3.1 เครื่องปั๊มและแม่พิมพ์การลากขึ้นรูปลึ้ก

เครื่องปั๊มไฮดรอลิกขนาด 80 ตันติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงชนิดวัดแรงกดพร้อมชุดแปลงสัญญาณ ชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึ้กทำจากเหล็ก SKD11 ชุบแข็ง 58-60 ซึ่งออกแบบให้ใช้สปริง เป็นอุปกรณ์กดแผ่นทดสอบ โดยในการทดลองติดตั้งสปริงแม่พิมพ์ ค่าคงที่สปริง 19.62 นิวตันต่อมิลลิเมตร ติดตั้งทั้งหมด 8 ตัว แรงกดขึ้นทดสอบรวม 156.96 นิวตันต่อมิลลิเมตร



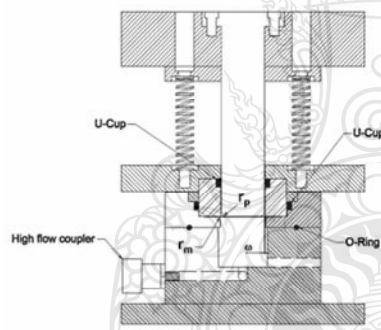
รูปที่ 6 ชุดปรับความดันและอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน

ตารางที่ 2 แม่พิมพ์ในการทดลองลากขึ้นรูปลึ้ก

รัศมีมุมดาช	รัศมีมุมพื้นซ์	เส้นผ่าศูนย์กลางพื้นซ์	ช่องว่างแม่พิมพ์
2 mm	4.5 mm	45 mm	0.65 mm

ตารางที่ 3 สมบัติของน้ำมันไฮดรอลิกเกรด 68

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



รูปที่ 5 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ในการลากขึ้นรูปลึ้ก

3.2 ระบบต้นกำลังไฮดรอลิก

ชุดต้นกำลังและชุดควบคุมระบบไฮดรอลิก แรงดันสูงสุด 700 บาร์ พร้อมชุดควบคุมแรงดันชนิดสกรูหมุน สำหรับปรับตั้งแรงดัน ใช้ปั๊มน้ำมันไฮดรอลิกมาตรฐานเกรด 68 ตามมาตรฐาน มอก.977-2551 [12] ค่าความหนืดเชิงจลศาสตร์ 61.2-74.8 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที เป็นของเหลวในการศึกษาทดลอง

3.3 ชิ้นงานในการทดสอบ

ใช้แผ่นเหล็กคาร์บอนรีดเย็นเกรด SPCC ตามมาตรฐาน JIS G 3141 : 2005 [13] ความหนา 0.5 มิลลิเมตร กัดเป็นแผ่นวงกลมด้วยเครื่องกัด CNC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร โดยก่อนการนำไปใช้ในการทดลอง ได้ทำการลบคมตัดของแผ่นทดสอบ ตารางที่ 4 สมบัติความเค้นสูงสุดของเหล็ก SPCC ความหนา 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งได้มาจากการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน JIS Z 2201 : 1998 [14] และ ตารางที่ 5 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็ก SPCC

ตารางที่ 4 สมบัติความเค้นสูงสุดของเหล็ก SPCC

สมบัติกันสูงสุด	R_p	R_{eL}	R_{90}
R_m (N/mm ²)	359.33	358.67	357.00

$R_m = 286.75 \text{ N/mm}^2$

ตารางที่ 5 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็ก SPCC

สัญญาลักษณ์	การใช้งาน	ส่วนประกอบทางเคมี (%)			
		C	Mn	P	S
SPCC	ทั่วไป	0.15	0.6	0.1	0.05
		Mix.	Mix.	Mix	Mix.

4 วิธีการทดลอง

4.1 การติดตั้งแม่พิมพ์และระบบไฮดรอลิก

ติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องบีบอัด 80 ตัน โดยใช้ชุดแคมป์สำหรับยึดแม่พิมพ์กับสลิดของฐานเครื่องบีบอัด พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์วัดแรง ชนิดวัดแรงกดพร้อมชุดแปลงสัญญาณ หลังจากนั้นติดตั้งชุดควบคุมไฮดรอลิกเข้ากับแม่พิมพ์ โดยใช้สายท่อทางเดินน้ำมันชนิดรับแรงดันสูง ที่ช่องทางเข้าและช่องทางออกของแม่พิมพ์ รูปที่ 7 การติดตั้งสายไฮดรอลิก ชนิดท่อแรงดันสูงเข้ากับหัวแม่พิมพ์ โดยใช้หัวต่อชนิดแรงดันสูง (high flow coupler)

4.2 สปริงสำหรับแรงกดแผ่นขึ้นทดสอบ

ในการขึ้นรูป แม่พิมพ์ชุดบนเลื่อนตัวลงประกบแม่พิมพ์ชุดล่าง จะมีระยะกดก่อนพ้นขั้นที่ขึ้นงานทดสอบ 25 มิลลิเมตร ใช้สปริงแม่พิมพ์ที่มีค่าคงที่สปริงตามมาตรฐาน JIS B 5012 : 2008 [15] ขนาดความยาว 125 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางวงใน 13.5 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางวงนอก 27 มิลลิเมตร และค่าคงที่สปริงเท่ากับ 19.62 นิวตันต่อมิลลิเมตร จำนวน 8 ตัว แรงกดรวมเท่ากับ 3.92 กิโลนิวตัน



รูปที่ 7 แม่พิมพ์ซึ่งติดตั้งบนเครื่องบีบอัดเรียบร้อยแล้ว

4.3 การควบคุมความดันภายในห้องแม่พิมพ์

การปรับค่าความดันภายในห้องแม่พิมพ์ เพื่อควบคุมความดันของเหลว ให้ได้ตามค่าการทดลองที่ 50, 100 และ 150 บาร์ โดยปรับที่ชุดต้นกำลังไฮดรอลิก พร้อมตัวปรับแรงดันชนิดสกรูหมุน ทำการปรับสกรูควบคุมความดันด้าน

ทางเข้า และทางออกของแม่พิมพ์ ซึ่งของเหลวจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ และเมื่อน้ำมันไหลออกจากแม่พิมพ์ ของเหลวจะไหลกลับถังเก็บ ตามความดันที่ควบคุม ในรูปที่ 7 แม่พิมพ์ที่ติดตั้งบนเครื่องบีบอัดระบบไฮดรอลิก และรูปที่ 6 ชุดปรับแรงดัน และอุปกรณ์ควบคุมแรงดันน้ำมัน

4.4 การทดลองลากขึ้นรูปลึก

ทำการทดลองลากขึ้นรูปลึก เหล็กคาร์บอนรีดเย็นเกรด SPCC รูปถ้วยทรงกระบอกแบบมีปีก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางทรงกระบอก 45 มิลลิเมตร ความสูงรวม 15 มิลลิเมตร ขนาดความกว้างของปีก 5 มิลลิเมตร โดยเริ่มการทดลองที่แรงดันของเหลว 50, 100 และ 150 บาร์ เปรียบเทียบกับการลากขึ้นรูปแบบปกติ โดยไม่ใช้แรงดันของเหลว ตารางที่ 6 ตัวแปรในการทดลอง

ตารางที่ 6 ตัวแปรในการทดลอง

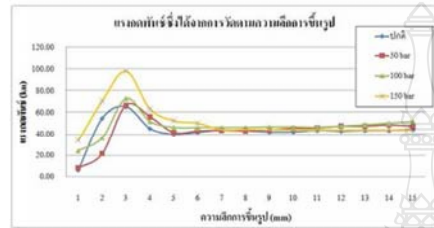
แรงกด (N/mm)	ตัวแปรการทดลอง			
	ลากขึ้นรูปลึก แบบปกติ	แรงดันน้ำมัน (bar)		
19.62			50	100

5 ผลการทดลอง

5.1 แรงในกดพื้นที่โดยรวมในการลากขึ้นรูป

ผลการทดลองในรูปที่ 5 พบว่าแรงดันของเหลวภายในมีผลทำให้แรงในการลากขึ้นรูปมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปในสภาวะปกติ และอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงกดของพื้นที่ ในการลากขึ้นรูป (σ_p) โดยการทดลองลากขึ้นรูปที่ความดัน 50, 100 และ 150 บาร์ พบว่าการลากขึ้นรูปที่แรงดันของเหลว 150 บาร์ ไม่สามารถขึ้นรูปได้สำเร็จ เนื่องจากแรงดันของเหลวที่สูงมาก จนทำให้เกิดจากนิกขาดของชิ้นงานอย่างรุนแรง ซึ่งสภาวะดังกล่าวสอดคล้องกับบทความวิจัยของ Lihui Lang ในปี ค.ศ. 2003[6] แรงกดพื้นที่เพิ่มขึ้นเป็นผลเนื่องมาจาก แรงดันจากแรงดันของเหลวภายในที่เพิ่มขึ้น ตามสมการที่ 3 และเมื่อเปรียบเทียบการขึ้นรูปที่แรงดันของเหลว 50 บาร์ และ 100 บาร์ กับการขึ้นรูปแบบปกติ พบว่าแรงกดพื้นที่โดยการใช้

แรงดันของเหลว มีความสม่ำเสมอมากกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ เนื่องจากการกระจายตัวของแรงดันของเหลวมีความสม่ำเสมอ ซึ่งสอดคล้องกับบทความวิชาการของ ธนสาร อินทรกำรชัช และ สุวัฒน์ จีระเชียรนาถ ในปี พ.ศ.2554[7]



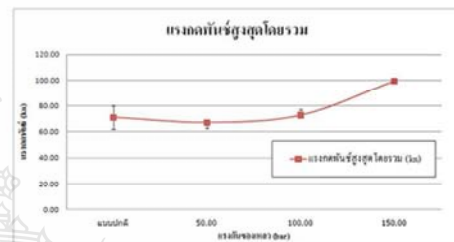
รูปที่ 8 แรงกดดันขึ้นรูปการลากขึ้นรูปสีกที่เกิดขึ้นในการทดลองตามระยะการเคลื่อนที่ของพินซ์

แรงกดดันที่เกิดขึ้นสูงสุด ในระหว่างการลากขึ้นรูปสีก [8] ในรูปที่ 8 พบว่าแรงกดดันมีอัตราที่เพิ่มขึ้นตามแรงดันของเหลว เป็นผลเนื่องมาจากแรงกดดันขยายอาณาเขตแรงดันจากแรงดันของเหลวที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lihui Lang ในปี ค.ศ. 2002 และแรงดันแรงกดดันจากแรงดันของเหลวนั้น เป็นตัวแปรที่มีส่วนสำคัญต่อชิ้นงานที่ได้หลังจากการขึ้นรูป [6] และการลากขึ้นรูปที่แรงดัน 150 บาร์เกิดแรงกดดันสูงสุดเท่ากับ 99.29 กิโลนิวตัน แรงกดดันสูงสุดเท่ากับ 67.21 กิโลนิวตัน ที่การขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว 50 บาร์ แรงกดดันสูงสุดจากการลากขึ้นรูปสีกแบบปกติ เท่ากับ 71.21 กิโลนิวตัน

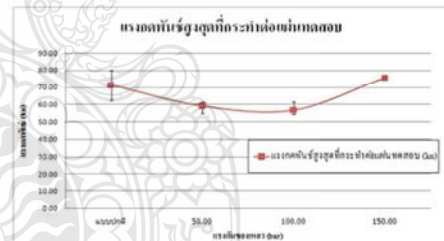
5.2 แรงกดดันที่กระทำต่อชิ้นงานในการทดสอบ

ผลการทดลองในรูปที่ 9 และ 10 พบว่า แรงกดดันสูงสุดที่กระทำต่อแผ่นทดสอบ โดยใช้สมาการที่ 3 มีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการลากขึ้นรูปแบบปกติกับการลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว แต่เมื่อเพิ่มแรงดันของเหลวเป็น 150 บาร์ แรงกดดันที่กระทำกับแผ่นทดสอบกลับมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของแรงกดดันที่โดยรวม เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการเพิ่มขึ้น ของแรงดันจากแรงดันของเหลวที่ช้ากว่า โดยที่การขึ้นรูปที่แรงดันของเหลว 100 บาร์ มีแรงกดดันที่

กระทำต่อแผ่นทดสอบค่าที่สุด มีค่าเท่ากับ 56.89 กิโลนิวตัน โดยการขึ้นรูปที่สภาวะแรงดันของเหลว 100 บาร์ สอดคล้องกับ ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูป มีลักษณะทั่วไปที่ดีที่สุด และไม่พบรอยแตกร้าวที่ผิวของชิ้นงาน โดยที่แรงกดดันสูงสุดที่กระทำต่อแผ่นทดสอบ มีค่าสูงสุดอยู่ที่สภาวะของการลากขึ้นรูปสีกโดยใช้แรงดันของเหลว 150 บาร์ แรงกดดันที่เท่ากับ 75.45 กิโลนิวตัน ในขณะที่แรงกดดันจากการลากขึ้นรูปแบบปกติเท่ากับ 71.21 กิโลนิวตัน



รูปที่ 9 แรงกดดันสูงสุดในการลากขึ้นรูปสีกโดยใช้ของเหลว เปรียบเทียบกับการขึ้นรูปแบบปกติ

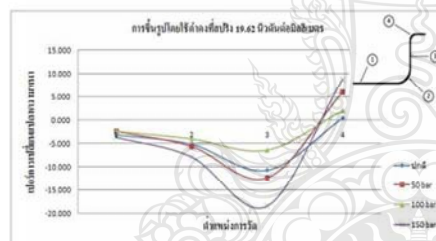


รูปที่ 10 แรงกดดันที่กระทำต่อชิ้นทดสอบในการลากขึ้นรูปสีกโดยใช้ของเหลว เปรียบเทียบกับการขึ้นรูปแบบปกติ

5.3 ความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง ความหนาของชิ้นงานหลังการลากขึ้นรูปสีก กับความหนาเดิมของชิ้นงานในการทดสอบ [9] โดยการใช้นิโครมิเตอร์ชนิดวัดเป็นจุด (point micrometer) วัดที่จุดซึ่งชิ้นงานในการทดสอบ

ถูกแรงกดที่ขึ้นกระทันหัน [10] จากรูปที่ 11 ผลการทดลองความหนาที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป พบว่าที่ตำแหน่งการวัดที่ 3 เกิดการเปลี่ยนแปลงของความหนามากที่สุด ในทุกสภาวะของการทดลอง เนื่องมาจากเป็นตำแหน่งของผนังด้านข้างของชิ้นงาน ซึ่งเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับบทความงานวิจัยของไพบุลย์ หาญมนต์ ในปี 2551 [11] และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการลากขึ้นรูป โดยการใช้ของเหลวกับการลากขึ้นรูปแบบธรรมดา พบว่าของเหลวสามารถลดเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนา ของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปได้ โดยที่บริเวณตำแหน่งการวัดที่ 3 โดยการขึ้นรูปที่แรงดัน 100 บาร์ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยที่สุดเท่ากับ 6.40 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การขึ้นรูปแบบปกติมีการเปลี่ยนแปลงความหนาเท่ากับ 10.714 เปอร์เซ็นต์ และการขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว 150 บาร์ มีการเปลี่ยนแปลงความหนาที่สุดเท่ากับ 18.40 เปอร์เซ็นต์

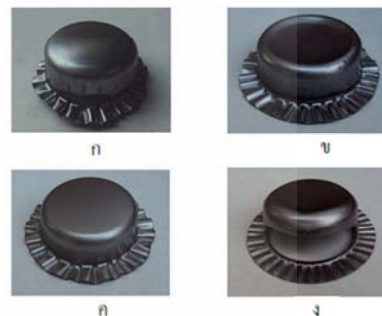


รูปที่ 11 ความหนาของชิ้นงานจากการขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวเปรียบเทียบกับผลการลากขึ้นรูปแบบปกติ

5.4 ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป

ชิ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูป ภายใต้สภาวะของแรงดันของเหลวซึ่งแตกต่างกัน เปรียบเทียบกับการขึ้นรูปแบบปกติ พบว่าการขึ้นรูปแบบปกติ ชิ้นงานเกินรอย่นที่ปากถ้วยมากที่สุด และชิ้นงานมีแนวโน้มของการเกิดรอยถลอกที่ผิวมากกว่าการลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว และเมื่อขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลวที่ 50, 100 และ 150 บาร์ ตามลำดับ พบว่ารอย่นที่ปากถ้วยลดลงตามลำดับ เนื่องจากแรงดัน

ของเหลวกระทำต่อแผ่นทดสอบเพิ่มขึ้น แต่ที่การขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว 150 บาร์ ชิ้นงานเกิดการถลอกที่ผนังถ้วยอย่างรุนแรง เนื่องมาจากมีแรงกดที่ขึ้นกระทันหันต่อแผ่นทดสอบมากที่สุด



รูปที่ 12 ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูป ก) การขึ้นรูปแบบปกติ, ข) การขึ้นรูปด้วยแรงดัน 50 บาร์, ค) การขึ้นรูปด้วยแรงดัน 100 บาร์ และ ง) การขึ้นรูปด้วยแรงดัน 150 บาร์

6 สรุปผลการทดลอง

การลากขึ้นรูปลึกโดยใช้ของเหลวเปรียบเทียบกับผลการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติ แรงดันของเหลวส่งผลทำให้แรงกดที่ขึ้นโดยรวมเพิ่มขึ้น โดยที่การขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว 150 บาร์ เกิดแรงกดที่ขึ้นสูงสุดเท่ากับ 99.29 กิโลนิวตัน

แรงดันของเหลว เป็นแรงต้านทานแรงกดของพื้นที่ขึ้นรูป ในขณะที่การขึ้นรูป เมื่อแรงดันของเหลว เพิ่มขึ้น จะทำให้แรงต้านทานแรงกดของพื้นที่ขึ้นรูปสูงขึ้นด้วย ซึ่งแรงต้านดังกล่าว มีผลทำให้แรงกดที่ขึ้นที่กระทำโดยตรงต่อแผ่นทดสอบลดลง โดยในสภาวะของการลากขึ้นรูปลึกด้วยแรงดันของเหลว 100 บาร์ เกิดแรงกดที่ขึ้นที่กระทำต่อชิ้นงานการทดลองต่ำที่สุด เท่ากับ 56.89 กิโลนิวตัน ซึ่งเป็นสภาวะการลากขึ้นรูปลึกที่ดีที่สุด ชิ้นงานไม่พบรอยแตกที่ผิว ในขณะที่รอย่นที่ปากถ้วยเกิดน้อยกว่า และการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติกับการลากขึ้นรูปลึกด้วยแรงดัน 50 บาร์ และการลากขึ้นรูปลึกที่แรงดัน 150 บาร์ ชิ้นงานเกิดรอยถลอก

การลากขึ้นรูปลึกด้วยแรงดันของเหลวต่ำเกินไป มีผลทำให้ชิ้นงานเกิดรอยแตกที่ผิวง เนื่องจากแรงดันจากแรงดันของเหลวไม่เพียงพอ ต่อการลดแรงกดพื้นที่กระทำต่อแผ่นทดสอบโดยการทดลองขึ้นรูปที่แรงดัน 50 บาร์ แรงกดพื้นที่ที่กระทำต่อชิ้นงานการทดสอบเท่ากับ 59.26 กิโลนิวตัน และการลากขึ้นรูปลึกด้วยแรงดันที่สูงมากเกินไป ส่งผลทำให้ชิ้นงานเกิดรอยแตกที่ผิวงเช่นกัน เนื่องจากแรงดันจากแรงดันของเหลวที่สูง ทำให้แรงในการลากขึ้นรูปโดยรวมเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงกว่าแรงดันมากโดยการทดลองขึ้นรูปที่แรงดัน 150 บาร์ แรงกดพื้นที่กระทำต่อชิ้นงานการทดสอบเท่ากับ 75.45 กิโลนิวตัน

7 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ศส.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ในการแนะนำแนวทางการดำเนินงานวิจัย และการสนับสนุนอุปกรณ์การทดสอบ สำหรับงานวิจัยครั้งนี้

8 เอกสารอ้างอิง

- Lang, L.H., "Investigation into the forming of a complex cup locally constrained by a round die based on an innovative hydromechanical deep drawing method," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.167, 2005, p 191
- Ajay, D. and Yadav, A., "Process analysis and design in stamping and sheet hydroforming", Ph.D. Thesis, Philosophy Engineer The Ohio State University, 2008, pp193-196
- Tschaetsch, H., *Metal Forming Practise*, Verlag Berlin Heidelberg Germany, Springer, 2006, pp. 142-183
- 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
- Lang, L.H., "Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.151, 2004, pp 165-166

6 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

7 ธนสาร อินทรกำธรชัย, "การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำกับอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์", การประชุมวิชาการด้านการพัฒนาการดำเนินงานทางอุตสาหกรรมแห่งชาติ, ครั้งที่ 2, ปี พ.ศ. 2554, หน้าที่ 1

8 Hyunok K., "Evaluation of stamping lubricants in forming advanced high strength steels (AHSS) using deep drawing and ironing tests", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.209, 2009, pp 4127-4132

9 Aleksandrovic S., "Significance and Limitations of Variable Blank Holding Force Application in Deep Drawing Process" *Tribology in industry*, Vol.27, No. 1-2, 2005, pp 49-54

10 Zhag X.B., "Cup-drawing formation of steel sheet with nickel coating by finite element method", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol.17, 2007, pp 37-40

11 ไพบูลย์ หาญมนต์, การศึกษารีดที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกลมมีปีก ของแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น, การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ครั้งที่ 46, ปีพ.ศ.2551, หน้าที่ 11-18

12 มอก.977-2551 มติฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม น้ำมันไฮดรอลิก-พื้นฐานน้ำมันแร่

13 JIS G 3141 : 2005 Standard Cold-reduced carbon steel sheets and strips

14 JIS Z 2201 : 1998 Test pieces for tensile test for metallic materials

15 JIS B 5012 : 2008 Coiled helical spring for press dies

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายกฤษดา บรรเทาพิษ
วัน เดือน ปีเกิด	19 พฤษภาคม 2519
ที่อยู่	53/86 หมู่ 1 ต.รังสิต อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ประสบการณ์การทำงาน	ตำแหน่งหัวหน้าแผนกควบคุมคุณภาพและผู้ช่วยตัวแทนฝ่ายบริหาร บริษัท SUMIKA POLYMER COMPOUNDS (THAILAND) CO., LTD.

